تحلیل عددی خطوط مهار توربین بادی شناور و محاسبه توزیع آماری نیروی مهار

مرضیه صیادی[۱] ، محمد رضا زارعی[۲]*

[۱] دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، mehrasa146@gmail.com
[۲] استادیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار ، mrzarei@cmu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴

کلمات کلیدی:
توربین بادی شناور
تحلیل هیدرودینامیکی
خطوط مهار
کشش مهار
توزیع آماری

چکیده

طراحی خطوط مهار سازه‌های شناور یکی از بخش‌های مهم در روند طراحی سازه‌های فراساحلی است. برای طراحی و ارزیابی عملکرد خطوط مهار، معیارهایی نظیر استحکام نهایی و خستگی تعریف شده که برای بررسی آنها باید ابتدا نیروی کششی خط مهار تحت تاثیر نیروهای محیطی محاسبه شود. نیروهای کششی خطوط مهار یک سازه شناور در شرایط واقعی متغیرهایی تصادفی هستند، لذا برای بررسی استحکام خطوط مهار ابتدا باید توزیع آماری نیروی کششی آنها محاسبه شود. در این تحقیق بررسی آماری کشش مهار یک سکوی نیمه شناور به همراه توربین بادی، که توسط سه خط مهار کاتنری-زنجیری در دریا ثابت شده، انجام شده است. تحلیل هیدرودینامیکی سازه توسط نرم افزار ANSYS-AQWA انجام شده و مشخصات محیطی سازه برای دریای مدیترانه در نظر گرفته شده که از استاندارد DNVGL استخراج شده است. در طول عمر سازه بدلیل خوردگی قطر زنجیر مهار کاهش می‌یابد از این رو در این تحقیق سعی شده است تا با درنظرگرفتن خوردگی با نرخ ثابت سالانه، وضعیت خطوط مهار از منظرنیروهای کششی مورد بررسی قرار گیرد. در طول عمر سازه در اثر خوردگی و درنتیجه کاهش سختی محوری کشش خطوط مهار سازه کاهش خواهد یافت. این مقدار کاهش برای خط مهار بحرانی سازه در بازه های زمانی ۱۰ ساله از طول عمر ۳۰ ساله آن بترتیب ۵/۴، ۱۳/۱ و ۲۱/۳ درصد می باشد.

Numerical analysis of moorings of floating wind turbine and statistical distribution

Marzie Sayyadi[1], Mohammad Reza Zareei[2*]

[1] M.Sc., Marine engineering faculty, Chabahar Maritime University, mehrasa146@gmail.com
[2] Asst. Prof., Marine engineering faculty, Chabahar Maritime University, mrzarei@cmu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 27 Jun. 2021
Accepted: 26 Oct. 2021

Keywords:
Floating offshore wind turbine
Hydrodynamic analysis
Mooring lines
Mooring tension
Statistical distribution

ABSTRACT

The mooring design of floating structures is one of the important parts in the design process of offshore structures. To design and evaluate the performance of mooring lines, criteria such as ultimate strength and fatigue have been defined. In real conditions, mooring forces are random variables, so to check the strength, the statistical distribution of mooring forces under the influence of environmental condition must be calculated at first. In this article, a statistical study of the mooring force of a semi-submersible offshore wind turbine, which is stabled by three catenary-chain mooring lines, has been considered. Hydrodynamic analysis of the structure was performed by ANSYS-AQWA software and the environmental characteristics of the area were extracted from the DNVGL standard for the Mediterranean Sea. During the life of the structure, due to corrosion, the diameter of the mooring chain decreases. Therefore, in this research, the condition of the mooring lines from the perspective of tensile forces has been investigated by considering the corrosion at a constant annual rate. During the life of the structure, due to corrosion and as a result the reduction of the axial stiffness, the tension of the mooring lines will be reduced. This amount of reduction for the critical mooring line in 10-year intervals of its 30-year lifetime is 5.4, 13.1 and 21.3 percent, respectively.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]

۱ - مقدمه

مبحث انرژی در همه زمان‌ها حائز اهمیت فراوانی بوده است. پس از جنگ جهانی دوم وجود منابع به‌ظاهر بی‌پایان نفت، گاز و زغال‌سنگ در کنار انرژی نوظهور هسته‌ای تبدیل به یک عامل جدی جهت توزیع قدرت شد. از حدود دهه ۷۰ میلادی، از یک‌سو رؤیای بی‌پایان بودن این منابع رنگ‌باخته بود و از سویی دیگر اثرات سو ناشی از سوختن این منابع بر همگان آشکار شد. از آن زمان روند توجه به انرژی دچار تغییرات بسیار چشمگیری شد. در سال‌های اخیر با در نظر گرفتن ملاحظاتی نظیر آلایندگی، دسترسی آسان و قیمت، برخی از منابع به صورت ویژه مورد توجه قرارگرفتند. منابع انرژی تجدید پذیر طیف گسترده‌ای از منابع را در برمی‌گیرد. این منابع را می‌توان به ۵ گروه شامل: انرژی آبی، بادی، خورشیدی، زمین‌گرمایی و سایر تقسیم‌بندی کرد. یکی از منابع عظیم انرژی تجدید پذیر در دریاها موجود بوده و شامل انرژی ناشی از امواج، باد و جریان‌های دریایی است. توربین‌های بادی شناور نوع جدیدی از سازه‌های دریایی هستند که به منظور استفاده از انرژی باد در دریاها مورد استفاده قرارمی‌گیرند.

کشورهای دنیا و بخصوص کشورهای اروپایی در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به تولید این نوع از انرژی داشته و سرمایه‌گذاری وسیعی نیز در این زمینه انجام داده‌اند. بر اساس گزارش انجمن جهانی انرژی باد در سال ۲۰۲۰ [۱]، تعداد توربین‌های فراساحلی جدید نصب شده در فاصله سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ از ۳۳۸۲ به ۶۱۴۵ افزایش یافته است. در فاصله این سال‌ها، میزان انرژی جدید که سالانه استحصال شده از ۳۳۸۲ MW به ۶۱۴۵ MW افزایش داده شده است. یک دلیل عمده این روند تصاعدی، سرعت بالاتر باد در مناطق دور از ساحل و در آب‌های عمیق است. نصب توربین‌های بادی در فاصله دور از ساحل و در آب‌های عمیق سبب می‌شود تا الزاما تمهیدات ویژه‌ای برای طراحی سازه توربین بادی فراساحل مد نظر قرار گیرد.

برای نصب توربین‌های بادی در دریا، سازه‌های مختلفی طراحی و اجرا شده است. این سازه‌ها را با دیدگاه‌های متفاوتی می‌توان تقسیم بندی نمود. از دیدگاه عمق آب این سازه‌ها را میتوان به سه دسته سازه های آب کم عمق، عمق متوسط و آب عمیق طبقه بندی کرد. در حال حاضر بیشتر تمرکز تحقیقات انجام شده در این زمینه بر روی سکوهای شناور که معمولا در آب‌های عمیق نصب می‌شوند، قرار دارد.

یکی از بخشهای مهم در طراحی و ارزیابی عملکرد سازه‌های شناور در دریا، خطوط مهار آنها است. این سازه‌ها در طول عمر خود تحت تاثیر بارهای مختلفی شامل نیروهای باد، موج و جریان‌های دریایی قرار می‌گیرند. در این شرایط خطوط مهار سازه وظیفه پایدار نگه داشتن سازه و همچنین تثبیت موقعیت آن را بر عهده دارند. خرابی سیستم مهار یک توربین بادی می‌تواند عواقب مختلفی نظیر جابجایی بیش از حد سازه، آسیب به توربین‌های بادی مجاور در یک مزرعه بادی، مخاطرات جانی و مالی نظیر ایجاد خطر برای کشتی‌های عبوری در یک مسیر دریانوردی و آسیب‌های زیست محیطی را در بر داشته‌باشد.

برای طراحی و ارزیابی عملکرد خطوط مهار در طول عمر سازه خطوط مهار، حالت‌های خرابی استحکام نهایی و خستگی در استانداردهای موجود تدوین شده‌است. برای بررسی هر کدام از این حالت‌های خرابی نیاز است تا ابتدا نیروهای کششی وارد بر خطوط مهار سازه شناور محاسبه شود. از سویی، بدلیل متغییر بودن نیروهای محیطی وارد بر سازه شناور، نیروهای کششی خط مهار بصورت تصادفی هستند، لذا باید برای طراحی خطوط مهار یک سازه شناور، نیروهای کششی آنها را بصورت آماری بررسی و توزیع آن‌ها را محاسبه نمود.

در سال ۱۹۹۱ برای اولین بار کشور دانمارک موفق شد در مقیاس تجاری یک مزرعه بادی دریایی را احداث کند. در ابتدای استفاده از توربین‌های بادی در دریا، از پایه‌های ثابت جهت نگهداری توربین استفاده می‌شد؛ اما هزینه‌بر بودن این روش به‌ویژه برای نواحی با عمق متوسط و عمیق که از نظر نوع و شدت باد مکان‌های مناسب‌تری به‌حساب می‌آمدند، تبدیل به یک چالش جهانی شد. اولین مزرعه بادی شناور که متشکل از ۵ توربین بادی با پایه های شناور بودند، در سال ۲۰۱۵ در اسکاتلند توسط استاتویل راه‌اندازی شدند. وجود امواج پرقدرت دریا و جریان‌های دریایی تبدیل به مشکلاتی اساسی برای توربین‌های بادی شناور شدند. طراحی سیستم مهار برای چنین سازه‌های عظیمی با لحاظ اثر توأم چندین نوع نیرو کاری دشوار را پیش روی طراحان قرار داده است. گسترش روزافزون سازه‌های شناور و بروز خرابی‌های متعدد در خطوط مهار، محققان و طراحان این حوزه را به انجام تحقیقات بیشتر بر روی خطوط مهار و بررسی عوامل موثر بر خرابی آن‌ها سوق داده است. ما و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۲] تحقیقی را بر روی خرابی‌های سیستم مهار توربین‌های بادی شناور در فاصله سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ انجام دادند. آن‌ها چند حالت خرابی در سیستم مهار توربین‌های بادی را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که اکثر خرابی‌های خطوط مهار در سال‌های ابتدایی استفاده از سازه رخ داده است. این امر اهمیت ارزیابی دقیق نیروهای وارد بر خطوط مهار را در زمان طراحی سازه شناور نشان می‌دهد. هوردویک [۳] در سال ۲۰۱۱ حالت‌های حدی خطوط مهار توربین بادی شناور را بررسی نمود. او در تحقیق خود از روابط بررسی طراحی ارائه‌شده توسط موسسه رده‌بندی DNV استفاده نموده است. هدف از تحقیق

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]

هوردویک بررسی اثر توام خرابی‌ها به منظور بهینه‌سازی خطوط مهار بود. بر اساس استاندارد DNV شکل کلی رابطه بررسی طراحی به‌صورت زیر است:

$$S_{min} - \gamma T > 0 \qquad (۱)$$

در این رابطه S_{min} مقدار حداقل استحکام شکست خط مهار، γ ضریب عدم قطعیت محاسبه کشش خط مهار و T نیز متوسط توزیع مقادیر حداکثر کشش مهار است. از این روش در طراحی و بررسی وضعیت خطوط مهار سازه‌های شناور فراساحل نظیر توربین‌های بادی دریایی در تحقیقات مختلفی استفاده‌شده که از جمله این موارد میتوان مقاله سو و همکارانش در سال ۲۰۱۷ [۴] را نام برد. سو و همکارانش در این تحقیق محاسبه مقادیر حدی نیروی مهار در شرایط دریای متلاطم و تحت اثر نیروی‌های شدید حاصل از طوفان را بررسی نمودند. بناسای و همکارانش در سال ۲۰۱۴ [۵] بر اساس همین روش، طراحی سیستم مهار یک توربین بادی شناور را بر اساس حالت‌های حدی استحکام نهایی و تصادفی انجام دادند. آن‌ها سه محدوده جغرافیایی در دریای مدیترانه را در نظر گرفته و تأثیر قطر و وزن زنجیر خطوط مهار را در حالت‌های استحکام نهایی و خستگی بررسی نمودند. همان‌طور که گفته شد، در این دسته از تحقیقات هدف اصلی ارائه روش‌هایی برای محاسبه مقدار حدی نیروی کششی خط مهار و طراحی بر اساس روابط استاندارد است. در سال‌های اخیر بررسی احتمالاتی خرابی سیستم مهار برای تعیین وضعیت آن‌ها گسترش بیشتری داشته است. پام در سال ۲۰۱۹ [۶] در پایان‌نامه دکتری خود احتمال خرابی سیستم مهار برای حالت‌های استحکام نهایی و خستگی را بررسی نمود. هدف او بررسی وضعیت خطوط مهار باگذشت زمان بود. او نشان داد که محاسبه توزیع آماری نیروی کشش خطوط مهار تاثیر قابل توجهی در ارزیابی استحکام آنها دارد. نتایج این تحقیق در مقاله پام و همکارانش در سال ۲۰۱۹ [۷] نیز ارائه شده است. آنها همچنین تاثیر خوردگی را بر روی توزیع آماری نیروی کششی خطوط مهار و استحکام آنها بررسی نمودند.

بدلیل نو بودن این دسته از سازه‌ها، تحقیقات انجام شده بر روی سازه توربین‌های بادی اندک می‌باشد. محیط کاملا متغیر دریا سبب اعمال نیروهای هیدرودینامیکی شدیدی بر توربین‌های بادی شده و همچنین حرکات مختلفی را در آنها ایجاد می‌کند. مطالعات مختلفی بر روی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر خطوط مهار انجام شده، اما مطالعات انجام شده با لحاظ بررسی احتمال خرابی بسیار اندک است. بر این اساس در این تحقیق قصد داریم تا با لحاظ شرایط دریا، ارزیابی دقیقتری بر روی نیروهای کششی خطوط مهار یک توربین بادی شناور داشته باشیم تا از این طریق شرایط لازم برای بررسی استحکام و احتمال خرابی خطوط مهار در تحقیقات آینده فراهم گردد. بر این اساس در این تحقیق نیروهای کششی خطوط مهار سکوی نیمه مغروق یک توربین بادی شناور از نوع کاتنری بصورت عددی محاسبه شده و توزیع آماری آن ارائه خواهد شد. برای انجام تحلیل های عددی از نرم افزار انسیس-آکوا [i] استفاده شده است. در بخش دوم مقاله بطور مختصر در خصوص این نرم افزار توضیح داده خواهد شد. در بخش سوم مدل هندسی توربین بادی مد نظر و سکوی نیمه مغروق آن و همچنین شرایط محیطی مرتبط با آن توصیف خواهد شد. در بخش چهارم با مقایسه نتایج تحلیلهای عددی با آزمایش مدل صحت سنجی تحلیلهای عددی انجام شده است. در بخش پنجم و ششم نیز بترتیب نتایج تحلیل های عددی در خصوص حرکات سکو و نیروهای کشش خطوط مهار آن تحت شرایط محیطی تعریف شده، ارائه خواهد شد.

۲ - نرم افزار مورد استفاده

نرم‌افزار انسیس یکی از ابزارهای قدرتمند در حوزه مهندسی است. این نرم‌افزار در ماژول انسیس-آکوا این امکان را فراهم آورده تا اثرات موج، جریان و باد بر روی سازه‌های دریایی قابل‌تحلیل باشد. یکی از قابلیت‌های مهم نرم‌افزار انسیس-آکوا تولنایی در تجزیه و تحلیل اکثر قریب به‌اتفاق نیازهای مربوط به تحلیل هیدرودینامیکی انواع سازه‌های دریایی و فراساحلی نظیر اسپار، سکوی نیمه شناور، سکوی پایه کششی، کشتی، دستگاه‌های انرژی تجدید پذیر و موج‌شکن است. در ورژن های جدید انسیس بخش آکوا به نام انسیس-دیفرکشن [ii] در انسیس-ورکبنچ [iii] تعریف شده است. ماژول انسیس-دیفرکشن مبتنی بر تئوری تفرق موج بوده و ابزاری را برای توسعه پارامترهای اولیه هیدرودینامیکی موردنیاز برای تجزیه‌وتحلیل حرکات پیچیده هیدرودینامیکی فراهم می‌کند. روند تحلیل در این قسمت به‌گونه‌ای است که اندرکنش هیدرودینامیکی مابین اجسام و اثرات تابش و تفرق موج منتشر شده به‌صورت خطی در سه بعد موردبررسی قرارمی‌گیرند. از طرف دیگر محاسبه نیروهای موج مرتبه دوم از طریق ماتریس‌های تابع انتقال درجه دوم این ویژگی را برای این نرم‌افزار به وجود آورده تا بتواند در طیف وسیعی از عمق آب تحلیل‌های لازم را انجام دهد. پاسخ هیدرودینامیکی در آکوا قابلیت تحلیل دینامیکی را برای انجام ارزیابی عملکرد سازه‌های شناور فراهم می‌کند. به‌علاوه وجود طیف گسترده‌ای از اتصالات فیزیکی، مانند خطوط مهار، فندر و مفصل به‌عنوان پیش‌فرض در این نرم‌افزار شرایط مدل‌سازی در حالت شناوری را تسهیل می‌نماید. قابلیتهای این ماژول در تحلیل سازه های شناور فراساحلی پیشتر در پژوهشهایی نظیر [۸-۱۱] نشان داده شده است.

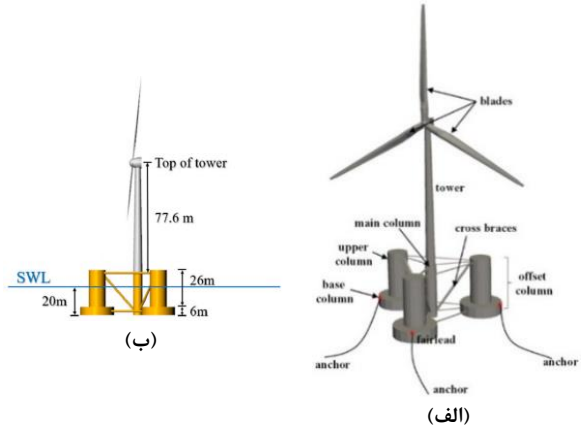
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]

۳ – مدل هندسه توربین بادی و سکوی نیمه مغروق، شرایط محیطی و فرضیات

سکوهای نیمه مغروق شامل یه سازه شناور هستند که بوسیله خطوط مهار از نوع کاتنری در بستر دریا لنگر اندازی میشوند. در این نوع سازه، پایداری در شرایط آب آرام و حتی در امواج کوتاه بوسیله بویانسی ایجاد شده توسط بخش مغروق آن تامین می‌شود. در سکوهای نیمه مغروق، خطوط مهار به کمک وزن خود و همچنین با اتصال به لنگر، پایداری سازه را در دریای مواج و تحت اثر بارهای محیطی تامین می‌کنند. همچنین خطوط مهار سازه از جابجایی غیر قابل قبول سازه در دریا نیز پیشگیری می‌کنند.

در این تحقیق برای ارزیابی نیروی کشش خط مهار، یک توربین بادی با نام OC4 DeepCwind در نظر گرفته شده است. سکوی این سازه از نوع نیمه مغروق است که توربین بادی استاندارد NREL 5MW بر روی آن نصب شده و توسط سه زنجیر کاتنری مهارشده است. این توربین با نامگذاری اجزاء در شکل ۱ به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. مدل OC4 در واقع یک طرح تحقیقاتی از پروژه DeepCwind مربوط به آزمایشگاه ملی انرژیهای نو ایالت متحده است.

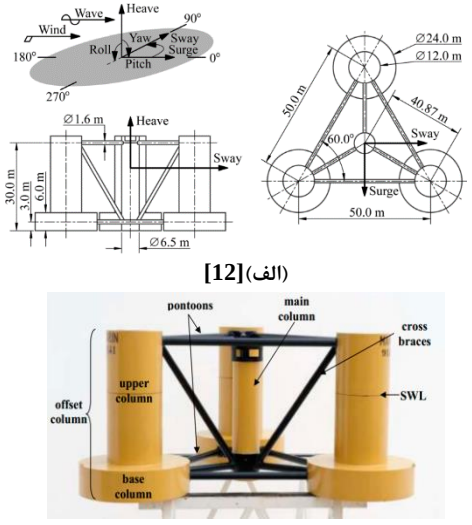


شکل ۱ – مدل توربین بادی شناور OC4 DeepCwind [۱۳]

۳ – ۱ – توربین بادی، برج و سکوی نیمه مغروق

توربین بادی استفاده شده در پروژه OC4 توربین بادی استاندارد ۵ مگاواتی است که جهت استقرار درخشکی طراحی شده است. پایه های برج منطبق بر ستون‌های اصلی سکو و در ارتفاع ۱۰ متر از سطح آب آرام قرار داده شده است. قسمت فوقانی برج در محل مرکز سکو و در ارتفاع ۸۷/۶ متری از سطح دریا نصب شده است. در مجموع ارتفاع از نوک هاب تا پایه برج همانند نوع خشکی آن یعنی ۹۰ متر است. برج با قطر ۶/۵ متر درقسمت پایه مطابق با ستون اصلی سکوی نیمه مغروق و با قطر ۳/۸۷ متر در قسمت فوقانی بنا شده است[۱۲]. جزئیات مشخصات توربین بادی و برج از [۱۲] قابل دسترسی است.

سکوی شناور استفاده شده در مدل مورد بررسی از نوع نیمه مغروق است. در شکل ۲ ابعاد اجزاء اصلی سکو و سیستم مختصات در نظر گرفته شده برای آن آورده شده است. این سکو از یک ستون مرکزی با قطر ۶/۵ متر برای نصب سکو و سه ستون کناری تشکیل شده است. ستونهای کناری دارای ارتفاع ۲۶ متر و قطر ۱۲ متر بوده که هر کدام دارای یک پایه ۶ متری با قطر ۲۴ متر می‌باشند. برای اتصال ستون مرکزی به ستونهای کناری از یکسری مهاربندهای افقی و مورب با قطر ۱/۶ متر استفاده شده است. این مهاربندها متشکل از دو مجموعه سه پانتنی برای اتصال ستون های خارجی به یکدیگر، دو مجموعه سه پانتنی برای اتصال ستون های خارجی به ستون مرکزی و سه مهاربند مورب می‌باشد که موجب اتصال قسمت فوقانی ستون خارجی به ستون مرکزی می‌گردد. در جدول ۱ مشخصات سکوی نیمه مغروق آورده شده است.



شکل۲- مشخصات سکوی نیمه مغروق مدل OC4

۳ – ۲ – سیستم مهار

در یک تقسیم بندی سیستم مهار سازه‌های شناور را می‌توان به دو دسته تک نقطه ای و چند نقطه ای تقسیم بندی کرد. Fairleadها نقاط ثابت روی سکوی شناور برای اتصال خطوط مهار هستند. در سیستم تک نقطه ای خطوط مهار تنها به یک نقطه ثابت که زیر ستون مرکزی در عمق ۲۰ متری قراردارد، متصل می‌شوند؛ اما در سیستم چند نقطه ای از چند نقطه ثابت روی ستون های کناری برای اتصال خطوط مهار کمک گرفته می‌شود. به منظور مهار توربین بادی OC4 سه مهار کاتنری در نظر گرفته شده که در بالای ستون های پایه در عمق ۱۴ متری زیر خط آب آرام و در شعاع ۴۰/۹ متری از خط مرکزی سکو قرار دارند . لنگرها در عمق ۲۰۰ متری زیر خط آب آرام و در شعاع ۸۳۷/۶ متری از خط

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]

مرکزی قرار گرفته اند. یکی از خطوط مهار در صفحه XZ در امتداد محور منفیX گسترده می‌گردد. دو خط مهار باقیمانده به‌طور یکنواخت در اطراف سکو توزیع شده اند، به‌گونه‌ای که هر خط مهار و لنگر آن ۱۲۰ درجه از یکدیگر فاصله داشته باشند. طول هریک از خطوط مهار درحالت غیرکشش ۸۳۵/۵ متر و قطر خطوط مهار ۰/۰۷۶۶ متر در نظر گرفته شده است. همچنین جرم واحد طول برای هر سه مهار ۱۰۸/۶۳کیلوگرم بر متر و سختی کششی معادل ۷۵۳/۶×۱۰۶ نیوتن است. موقعیت سه نقطه ثابت روی سازه شناور و لنگر نسبت به سکو در جدول ۲ آورده شده است. در شکل ۳ نیز مدل ساخته شده سکوی شناور به همراه خطوط مهار آن در نرم‌افزار انسیس نمایش داده شده است.

جدول۱- مشخصات سکوی نیمه مغروق [۱۲]

پارامتر	نماد	مقدار
آبخور کل	T	۲۰ متر
ارتفاع بالای خط آب	D	۱۰ متر
جرم کل شامل بالاست	M	۱۳۴۴۴۰۰۰ کیلوگرم
جابجایی	Δ	۱۳۹۸۶/۸ متر مکعب
مرکز جرم (پایین خط آب)	VCG	۱۴/۴ متر
ممان اینرسی حرکت رول حول مرکز جرم	I_{xx}	۸/۰۱۱×۱۰۹ کیلوگرم-متر مربع
ممان اینرسی حرکت پیچ حول مرکز جرم	I_{yy}	۸/۰۱۱×۱۰۹ کیلوگرم-متر مربع
ممان اینرسی حرکت یاو حول مرکز جرم	I_{zz}	۱/۳۹۱×۱۰۱۰ کیلوگرم-متر مربع

۳ - ۳ - شرایط محیطی و مش بندی مدل

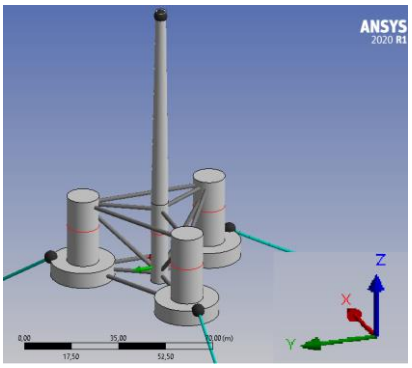
نیروهای محیطی وارد بر توربین بادی شناور شامل نیروهای امواج، جریان‌های دریایی و باد می‌باشد که بترتیب در این بخش توصیف می‌گردند. در جدول ۳ خلاصه شرایط محیطی سازه آورده شده است.

در اینجا فرض شده است که توربین بادی شناور در دریای مدیترانه و محدوده آب‌های جنوب ایتالیا تا لیبی قرار دارد. برای دستیابی به اطلاعات امواج در محدوده‌های جغرافیایی متفاوت می‌توان از مراجعی نظیر استانداردهای موسسات رده بندی استفاده کرد. بر اساس استاندارد DNVGL [۱۵]، برای بررسی استحکام خطوط مهار باید اطلاعات محیطی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله مورداستفاده قرار گیرد. بر اساس این استاندارد، امواج موجود در محدوده جغرافیایی مد نظر را می‌توان بوسیله طیف جانسوآپ بررسی نمود. طبق این استاندارد، ارتفاع مشخصه موج در این محدوده جغرافیایی ۸/۵ متر، دوره تناوب پیک موج برابر با ۱۴ ثانیه و پارامتر مشخصه پیک موج برابر با ۱/۲۵۵۷ است.

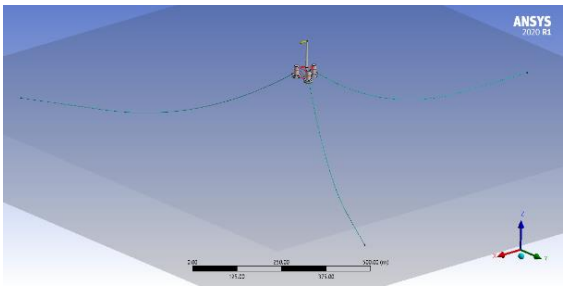
جریان‌های دریایی بر روی بخش‌هایی از سازه که در زیر سطح آب دارند تاثیر می‌گذارند. طبق استاندارد DNVGL [۱۵]، برای تحلیل خطوط مهار باید سرعت جریان‌های دریایی با دوره بازگشت ۱۰ ساله مورداستفاده قرار گیرد. بر اساس این استاندارد سرعت جریان دریایی در محدوده جغرافیایی مد نظر برابر با ۱ متر بر ثانیه می‌باشد.

جدول۲- موقعیت نقاط اتصال مهار به سکو [۱۲]

Faierlead خط مهار شماره ۱	(۱۴-، ۰ ، ۴۰/۹) متر
Faierlead خط مهار شماره ۲	(۱۴-، ۳۵/۴- ، ۲۰/۴-) متر
Faierlead خط مهار شماره ۳	(۱۴-، ۳۵/۴ ، ۲۰/۴-) متر
لنگر به خط مهار شماره ۱	(۲۰۰-، ۰ ، ۸۳۷/۶) متر
لنگر به خط مهار شماره ۲	(۲۰۰-، ۷۲۵/۴- ، ۴۱۸/۸-) متر
لنگر به خط مهار شماره ۳	(۲۰۰-، ۷۲۵/۴- ، ۴۱۸/۸-) متر



(الف)



(ب)

شکل۳- مدل سکوی نیمه شناور به همراه خطوط مهار در نرم‌افزار انسیس، الف-مدل سه بعدی توربین بادی، ب-مدل سه بعدی و محدوده گستردگی خطوط مهار

سرعت باد مهمترین عامل در بررسی توربین‌های بادی است. برای اینکار باید سرعت باد به دو صورت شامل سرعت باد یکنواخت و سرعت تندباد بررسی شود. در این تحقیق تنها سرعت باد یکنواخت در نظر گرفته شده است. طبق استاندارد DNVGL [۱۵]، برای طراحی توربین بادی باید از سرعت باد با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله استفاده کرد. بر اساس همین استاندارد سرعت متوسط یک ساعته باد در ارتفاع ۱۰ متر با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در منطقه جغرافیایی مورد نظر برابر با ۲۵/۳ متر بر ثانیه است. برای محاسبه سرعت باد در محل هاب توربین بادی از روابط ارائه‌شده توسط DNV [۱۶] به‌صورت زیر استفاده شده است.

$$U_{T,z} = U_{T_0,h}\left(1+5.73\times10^{-2}\sqrt{1+0.15\times U_{T_0,h}}\times ln\frac{z}{h}\right) \quad (۲)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]

در این رابطه T_0 دوره اندازه گیری سرعت باد که در اینجا ۱ ساعت است، $U_{T_0,h}$ سرعت باد در ارتفاع شاخص با دوره اندازه گیری T_0 ، h ارتفاع شاخص که دراینجا ۱۰ متر است، و z ارتفاع نقطه مد نظر است. بر این اساس سرعت باد با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در محل توربین بادی برابر با ۳۲/۲۷ متر بر ثانیه خواهدبود.

توربین بادی ۵ مگاواتی NREL بگونه ای طراحی‌شده است که در بادی با سرعت ۱۱/۴ متر بر ثانیه بیشترین میزان قدرت تولیدی را دارد. برای جلوگیری از آسیب به توربین در سرعت‌های باد بیشتر از۲۵ متر بر ثانیه پره های توربین را متوقف می‌کنند. این شرایط با نام پارک کردن توربین شناخته می‌شود. در این تحقیق برای ساده کردن مساله، توربین بادی مدلسازی نشده و تنها نیروی تراست تولید شده توسط آن به محل هاب توربین بادی اعمال می‌گردد. در شکل ۴ تراست تولید شده توسط توربین بادی بر اساس سرعت باد آورده شده است. در شکل ۵ نیز مدل سازه و محل اعمال نیروی تراست باد نشان داده شده است.

جدول۳- شرایط محیطی سازه توربین بادی شناور

موج	دوره بازگشت	۱۰۰ سال
	نوع طیف	جانسوآپ
	ارتفاع مشخصه	۸/۵ متر
	دوره تناوب پیک	۱۴ ثانیه
	پارامتر مشخصه	۱/۲۵۵۸
باد	دوره بازگشت	۱۰۰ سال
	سرعت	۳۲/۲۷ متر بر ثانیه
جریان دریایی	دوره بازگشت	۱۰ سال
	سرعت	۱ متر بر ثانیه

عوامل محیطی ذکر شده ممکن است در جهت‌های مختلفی بر روی سازه توربین بادی شناور مؤثر باشند. در اینجا، مطابق با شکل ۶، فرض شده است که همه نیروهای محیطی در یک جهت بر سازه وارد می‌شوند.

بر اساس نیروهای هیدرودینامیکی وارد سازه، اجزاء موجود در توربین بادی شناور را می‌توان به دو دسته به‌صورت زیر تقسیم بندی کرد:

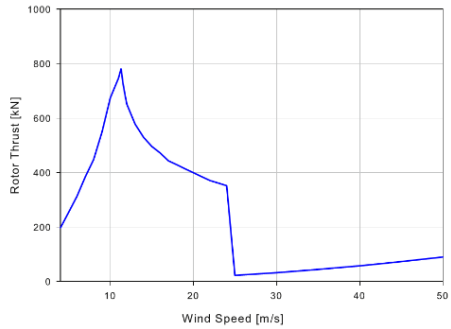
۱- مهاربندها و خطوط مهار: در محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی، اجزاء باریک اجزائی هستند که مساحت مقطع عرضی کمی داشته بطوریکه تغییرات سرعت وشتاب در راستای عمود بر عضو قابل صرفنظر کردن است[۱۷]. نیروهای موج وارد بر این اجزاء از طریق معادله موریسون قابل محاسبه است.

(۳)

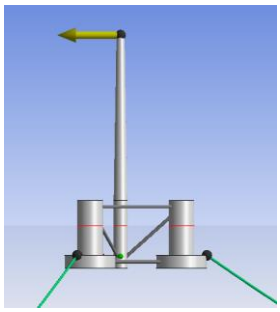
$$dF = \frac{\rho\pi D^2}{4} dz\, C_M\, a_n + \frac{\rho\pi D^2}{4} dz\, (C_M - 1) a_c + \frac{\rho C_D D}{2} dz |u| u$$

در این رابطه D قطر یا بعد مشخص کننده مقطع عرضی عضو، a_n مولفه شتاب سیال در موج عمود یا در راستای عضو، a_c مولفه شتاب عضو عمود یا در راستای عضو، dz مولفه نشان دهنده طول عضو، u مولفه سرعت نسبی عمود یا در راستای طول عضو و C_M و C_D نیز بترتیب ضرایب جرم افزوده و درگ عضو هستند.

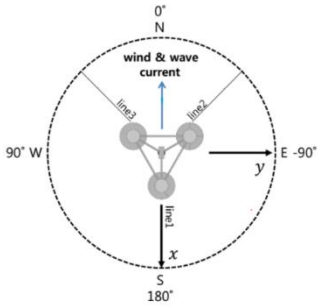
معادله نیروی موریسون زمانی که $\lambda>5D$ باشد قابل استفاده است[۱۷].



شکل ۴ - تراست تولید شده توسط توربین بادی بر اساس سرعت باد [۱۷]



شکل ۵ - مدل توربین بادی و محل اعمال نیروی تراست



شکل ۶ - جهت اعمال نیروهای محیطی

در این رابطه λ نشان دهنده طول موج است. در توربین بادی شناور مهاربندها و خطوط مهار این شرایط را دارند. برای استفاده از معادله موریسون باید ضرایب درگ و اینرسی برای اعضای باریک تعریف شود. بر این اساس در نرم‌افزار انسیس-آکوا مهاربندها به‌صورت اجزاء میله‌ای تعریف شده اند. ضریب درگ وارد بر این اجزاء برابر با ۰/۶۸ و ضریب جرم افزوده برابر با ۱/۰ در نظر گرفته شده است[۸]. خطوط مهار به‌صورت مجموعه‌ای از المانهای موریسون مدلسازی می‌شوند. برای خطوط مهار نیز براساس استاندارد DNVGL [۱۵] ضریب جرم افزوده برابر با ۱/۰ و ضرایب درگ برای انواع خط مهار به‌صورت جدول ۴ تعریف شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]

جدول۴- ضرایب درگ برای خطوط مهار

اجزاء مهار	طولی	عرضی
استادلینک	۱/۴	۲/۶
استادلس	۱/۱۵	۲/۴
Standard rope	-	۱/۸

۲- ستونهای سکوی نیمه شناور: در بررسی نیروهای موج بر روی سازه‌های فراساحل، اجزاء حجیم سازه‌هایی هستند که بعد مشخصه آن‌ها با نماد D بزرگتر از $\lambda/6$ باشد[۱۶]. در این حالت نیروهای موج وارد بر سازه از تئوری تفرق تبعیت می‌کند. نرم‌افزار انسیس-دیفرکشن به روش المان مرزی و برمبنای تئوری تفرق نیروهای وارد بر سازه‌های حجیم را محاسبه می‌کند. برای اینکار باید سطح مشترک سازه و سیال مش بندی شده و با لحاظ شرایط مرزی مساله تابع پتانسیل تعریف شود. در نهایت با حل تابع پتانسیل تاثیرات نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر مساله محاسبه می‌گردد.

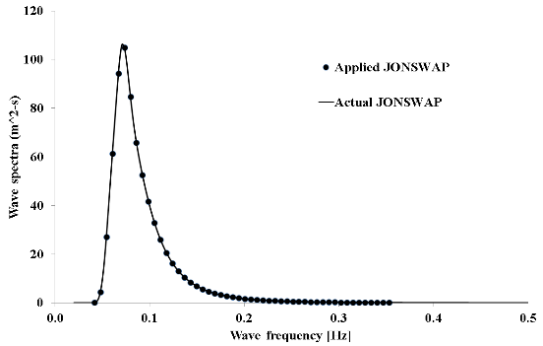
در نرم‌افزار انسیس-دیفرکشن برای تولید شبکه تنها لازم است تا اندازه المان وارد شود. حداکثر اندازه المان وارد شده باید بگونه ای کنترل شود تا فرکانس حداکثر متناظر با مش بندی از فرکانس حداکثر موج بیشتر نشود. همچنین در این نرم‌افزار قابلیت تنظیم خودکار فرکانسهای طیف موج بر اساس مشخصات ورودی موج نامنظم تعریف شده است. در شکل ۷ طیف موج خودکار پیشنهاد شده و همچنین طیف موج واقعی جانسوآپ بر اساس مشخصات موج نامنظم مدنظر تولید شده، نشان داده شده است. بر اساس این پیشنهاد حداکثر فرکانس موج که باید برای تحلیل سازه در نظر گرفته شود برابر با ۰/۳۵۲۹ Hz است. این فرکانس ، مشخص کننده حداکثر اندازه المان خواهد بود. بر اساس این فرکانس باید حداکثر اندازه المان برای سازه مدنظر ۲/۲۵ متر باشد. همانطور که می‌دانیم با ریزتر شدن شبکه دقت حل مساله و همچنین زمان لازم برای تحلیل افزایش خواهد یافت. بر این اساس اندازه المان برابر با ۲ متر برای تحلیل در نظر گرفته شده است. شبکه بندی ایجاد شده با این اندازه المان در شکل ۸ نشان داده شده است. صحت سنجی تحلیلهای عددی بر اساس این اندازه المان با لحاظ مقیاس مدل در بخش چهارم آورده شده است.

۳ - ۴ - خوردگی و تاثیر آن بر پارامترهای خط مهار

خوردگی عامل اجتناب ناپذیری است که باعث آسیب به سازه‌های فولادی، به ویژه در محیط‌های دریایی می‌شود. در تحقیق حاضر خط مهار سازه به‌صورت زنجیر و از جنس فولاد در نظر گرفته شده‌است.گذشت زمان و خوردگی تدریجی سبب کاهش ضخامت خطوط مهارمی‌گردد. مدلهای مختلفی برای بیان کاهش ضخامت اجزاء سازه‌ای در اثر خوردگی ارائه‌شده است. مدل خوردگی یکنواخت با نرخ خوردگی ثابت یکی از مدلهای ساده ارائه‌شده است. در این مدل قطر اسمی زنجیر در زمان t با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است[۱۱].

$$d(t) = d_0 - t.R_{corr} \qquad (۴)$$

در این رابطه d_0 قطر اسمی اولیه، $d(t)$ قطر اسمی در سال t ام و R_{corr} نرخ خوردگی سالانه است. در اینجا قطر اولیه زنجیر برابر با ۰/۰۷۶۶ متر معادل با قطر زنجیر طراحی‌شده برای سازه شناور OC4 در نظر گرفته شده است. نرخ خوردگی سالانه نیز بر اساس مقدار مجاز خوردگی ارائه‌شده توسط استاندارد DNVGL [۱۵] برابر با ۰/۴ میلیمتر درنظر گرفته خواهد شد. دو نوع حلقه زنجیر شامل استادلس[iv] و استادلینک[v] برای مهار سازه‌های دریایی وجود دارد.



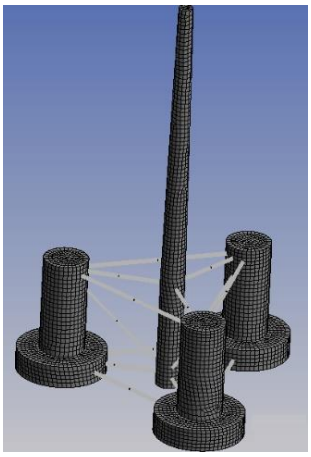
شکل۷- مقایسه طیف موج جانسوآپ اعمال شده در نرم‌افزار با طیف واقعی

زنجیر در نظر گرفته شده در این تحقیق از گرید R3 متناسب با گرید طراحی شده برای توربین بادی OC4 و از نوع استادلینک است. بر اساس استاندارد DNVGL [۱۵] مقادیر مدول الاستیسیته مؤثر در طراحی زنجیری با این گرید برابر با $۵/۶\times۱۰^{۱۰}$ N/m است. مقدار سختی محوری زنجیر مهار AS از حاصلضرب مدول الاستیسیته مؤثر در مساحت مقطع عرضی حلقه زنجیر بدست می‌آید. با در نظر گرفتن اثر خوردگی، سختی محوری برای دو نوع حلقه زنجیر به‌صورت زیر خواهد بود.

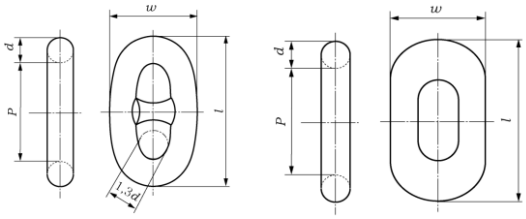
$$AS = 5.6\times10^{10}\times\frac{\pi d(t)^2}{4} \quad [N] \qquad (۵)$$

در این رابطه $d(t)$ قطر زنجیر خط مهار در سال t است. با گذشت زمان و کاهش مقدار قطر خط مهار مقدار سختی محوری نیز کاهش خواهد یافت. در این تحقیق برای ارزیابی نیروی کشش خط مهار، مقادیر سختی محوری با فاصله‌های زمانی ۵ ساله ازسال ۰ تا ۳۰ سال در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]



شکل۸-شبکه بندی توربین بادی شناور



(ب) (الف)

شکل ۹- انواع حلقه زنجیر برای سیستم مهار سازه‌های دریایی، الف-استادلس، ب- استادلینک [۱۸]

۴ – صحت سنجی نتایج تحلیل‌های عددی

سازه توربین بادی مدل OC4 توسط آزمایشگاه‌های مختلفی در دنیا بررسی شده و نتایج آن گزارش شده است. یکی از جامع‌ترین نتایج آزمایش این سازه توسط کولینگ و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۱۳ ارائه‌شده است. آن‌ها مدلی از سازه واقعی بر اساس تشابه فرود و با نسبت هندسی ۱ به ۵۰ ساخته بودند. مشخصات سازه واقعی که مدل از روی آن ساخته شده بود، در بخش قبل آورده شده است. برای تعمیم نتایج آزمایش به سازه واقعی از نسبت‌های ارائه‌شده در جدول ۵ استفاده شده است. چند حالت در مرجع [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است.

در ادامه به منظور صحت سنجی نتایج تحلیلهای عددی، نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از نرم افزار انسیس آکوا برای حالت موج منظم آورده شده است.

جدول۵- نسبتهای پارامترها بر اساس تشابه فرود

مقیاس	فاکتور مقیاس	نماد	متغییر
1:50	λ	D	ابعاد
1:7.707	$\lambda^{0.5}$	T	زمان و دوره تناوب
$1:1.25\times10^5$	λ^3	M	وزن سازه
$1:1.25\times10^5$	λ^3	V	حجم مغروق سازه
$1:1.25\times10^5$	λ^3	F	نیرو
$1:6.25\times10^6$	λ^4	M	ممان

در مرجع [۱۲]، سازه توربین بادی شناور در چند حالت موج منظم با دامنه و دوره تناوب مختلف آزمایش شده است. چهار مورد از این امواج منظم انتخاب‌شده و در بازه زمانی ۲۴۰۰ ثانیه توسط آکوا تحلیل شده است. مشخصات امواج منظم انتخاب شده از مرجع [۱۲] جهت صحت سنجی در جدول ۶ آورده شده است. نتایج تحلیل در مرجع [۱۲]، به‌صورت مقادیر RAO^{vi} که بصورت رابطه زیر می باشد، گزارش شده است.

$$RAO = \frac{\text{output amplitude}}{\text{wave amplitude}} \qquad (۶)$$

بنابرتعریف ارائه شده فوق، مقادیر RAO نسبت دامنه پاسخ سازه به دامنه موج ورودی است. برای دستیابی به هر کدام از پارامترهای خروجی آزمایش، ابتدا با تحلیل‌های عددی داده‌های سازه شامل حرکات سازه و کشش مهار در بازه زمانی ۲۴۰۰ ثانیه تحت اثر موج منظم به‌صورت تابعی از زمان محاسبه شده است. پس از میرا شدن حرکات اولیه سازه هر کدام از داده‌های سازه دارای رفتاری منظم خواهند بود و از این طریق می‌توان دامنه پاسخ سازه را بدست آورد. بطور کلی حرکات اصلی اجسام شناوری نظیر توربین بادی شامل سه حرکت سرج ^{vii}، هیو ^{viii} و پیچ ^{ix} است. در خصوص سازه شناور مورد نظر، بدلیل شرایط خطوط مهار و جهت اعمال نیروهای خارجی دو حرکت اصلی سازه حرکات سرج و هیو می باشند. بر اساس شکل ۶، حرکت سرج حرکت طولی در راستای اعمال نیروی های خارجی وارد بر سازه است. جابجایی سازه و همچنین اعمال کشیدگی مرتبط با آن در خط مهار شماره ۱ نتیجه بوجود آمدن این حرکت در سازه توربین بادی شناور خواهد بود. حرکت عمودی هیو نیز به نوبه خود سبب ایجاد کشیدگی در همه خطوط مهار خواهد شد. حرکت پیچ توربین بادی شناور نسبت به دو حرکت اخیر تاثیر بسیار کمتری بر میزان کشیدگی خطوط مهار خواهد داشت، بنابراین در گزارش حرکات توربین بادی شناور دو حرکت سرج و هیو بررسی شده اند و حرکت پیچ گزارش نشده است.

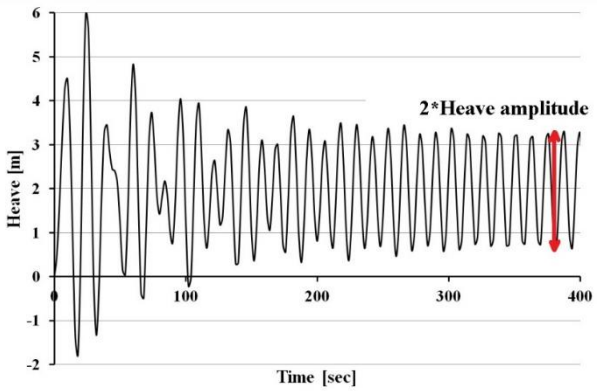
خروجی حرکت هیو سازه در حالت سوم یعنی حالت موج منظم با دامنه ۵/۱۵ متر، در شکل ۱۰ آورده شده است. بر اساس این شکل دامنه پاسخ ۱/۴۴ متر شده و درنتیجه مقدار RAO حرکت هیو در این حالت برابر با $\frac{1.44}{5.15}$ یعنی مقدار ۰/۲۸ با واحد m/m بدست آمده است. مقایسه بین مقادیر RAO مربوط به حرکات سرج، هیو و همچنین کشش مهار شماره ۱ در شکل ۱۱ آورده شده است. در این شکل مقادیر ۱ تا ۴ در واقع دامنه های مختلف موج مطابق با جدول ۶ است. بر اساس شکل ۱۳ می‌توان گفت که در عمده موارد تطابق خوبی بین نتایج تحلیل عددی توسط انسیس- آکوا و آزمایش مدل وجود دارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]

جدول۶-مشخصات امواج منظم انتخاب‌شده برای صحت سنجی

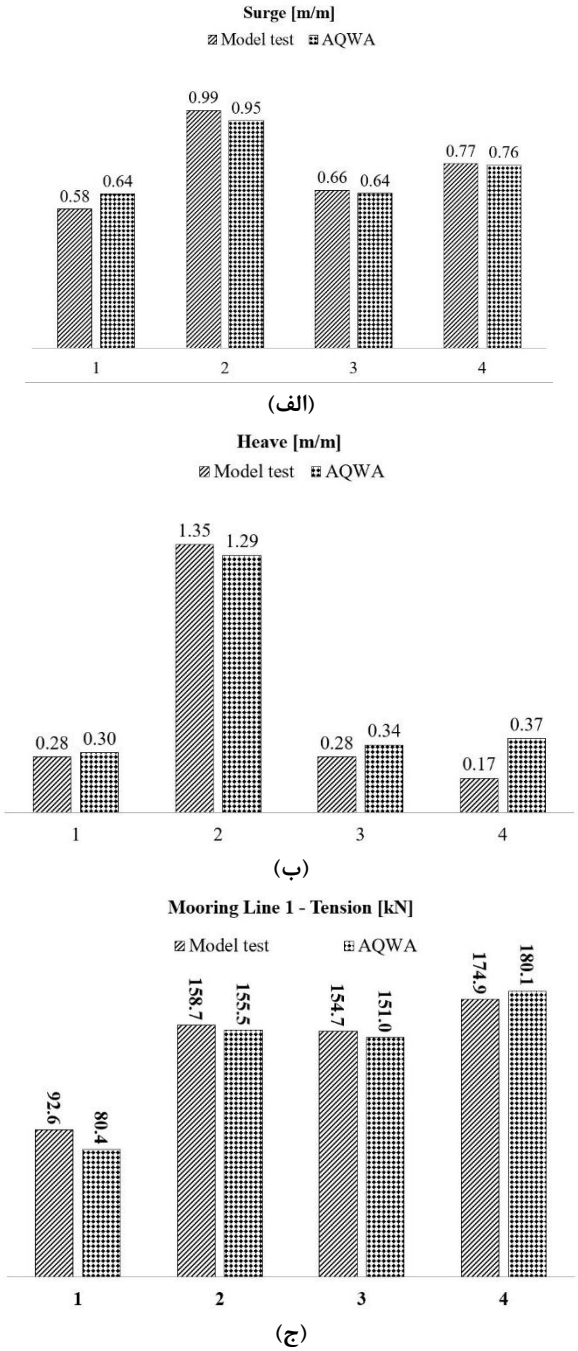
آیتم	دامنه موج [m]	دوره تناوب [sec]
۱	۳/۷۹	۱۲/۱
۲	۳/۷۹	۲۰
۳	۵/۱۵	۱۲/۱
۴	۵/۳۷	۱۴/۳



شکل ۱۰- روش محاسبه دامنه پاسخ حرکت heave جهت تعیین مقدار RAO

۵ – ارزیابی حرکات توربین بادی شناور

برای ارزیابی خروجی‌ها، سازه توربین بادی با شرایط تعریف شده در بخش های قبل در نرم افزار انسیس-آکوا مدل سازی و تحلیل شده‌است. ابتدا تحلیل های حوزه فرکانس با ۴۸ فرکانس در بازه ۰/۰۱ تا ۰/۳ هرتز انجام شده و نمودارهای RAO حرکات سازه استخراج شده است. این نمودارها در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. با استفاده از این نمودارها تاثیر پذیری حرکات سازه در فرکانس‌های مختلف موج تحریک بدست می‌آید. فرکانس‌های طبیعی حرکات توربین بادی OC4 بر اساس مرجع [۱۲] برای دو حرکت سرج و هیو به صورت جدول ۷ است. با مقایسه داده‌های این جدول و نمودارهای شکل ۱۲ می¬توان دید که دامنه حرکت سازه در فرکانس نزدیک به فرکانس طبیعی مقدار بیشینه را دارد. در حرکت سرج با افزایش مقدار فرکانس از فرکانس طبیعی سازه دورتر شده و دامنه حرکات سازه کمتر می‌شود. در حرکت هیو، در فرکانس‌های پایین مقدار RAO برابر با یک است. این بدین معنی است که در این فرکانسها جابجایی سازه در راستای عمود بر صفحه آبخور کاملا متناسب با رویه موج است. فرکانس‌های بالای موج نیز تاثیر کمی بر دامنه حرکت هیو سازه دارند.

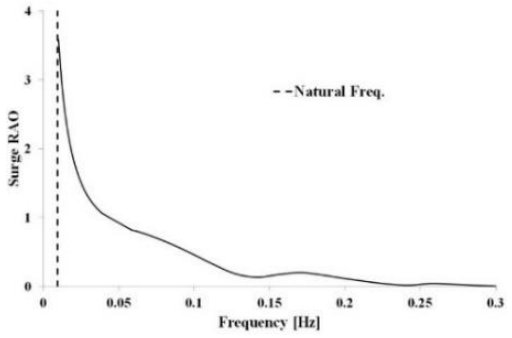


شکل ۱۱- مقایسه نتایج RAO حرکات و کشش مهار، الف-حرکت سرج، ب-حرکت هیو، ج-کشش مهار شماره یک

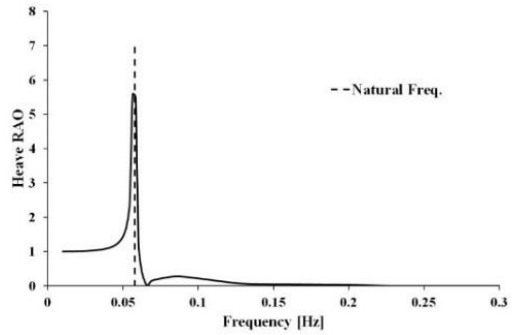
پس از تحلیل فرکانسی، پاسخ‌های حرکتی سازه در حوزه زمان با استفاده از ماژول انسیس-پاسخ هیدرودینامیکی[x] بدست آمده است. برای این کار مطابق با شکل ۷ محدوده فرکانسی لازم بر اساس پیشنهاد نرم افزار انتخاب شده و شبیه سازی حرکات سازه در دوره زمانی سه ساعته با تقسیم بندی یک ثانیه ای انجام شده است. برای صرف نظر کردن از تاثیر پاسخ‌های ابتدایی، ۱۰۰ ثانیه اول خروجی‌ها در نظر گرفته نشده‌است. به منظور لحاظ کردن اثرات خوردگی در این بخش تغییرات جرم واحد طول، مساحت مقطع عرضی معادل و سختی محوری خطوط مهار زنجیری به صورت جدول ۸ بدست آمده است. با استفاده از این اطلاعات تحلیل حرکات

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]

توربین بادی شناور در ۷ مقطع زمانی با بازه زمانی ۵ ساله از سال صفر تا ۳۰ انجام شد. یک نمونه از خروجی‌های زمانی حرکات سازه در شکل ۱۳ آورده شده است. با استفاده از داده‌های زمانی حرکات سازه می‌توان مقادیر متوسط، حداکثر و حداقل هر کدام از حرکات سازه را به دست آورد. این مقادیر در شکل ۱۴ برای حرکات سرج و هیو نشان داده شده اند.



(الف)



(ب)

شکل۱۲-نمودارهای RAO حرکات، الف- سرج، ب- هیو

جدول۷- مقادیر فرکانس طبیعی شناور OC4 [۱۲]

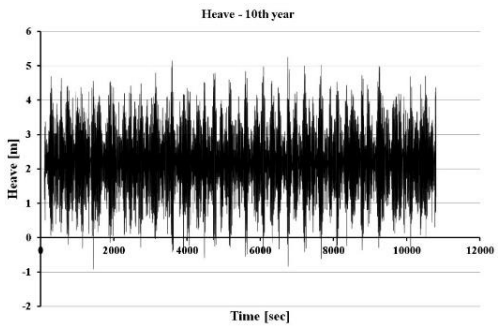
فرکانس طبیعی [Hz] .	دوره تناوب طبیعی [s]	درجه آزادی
۰/۰۰۹۳۴۶	۱۰۷	سرج
۰/۰۵۷۸	۱۷/۳	هیو

با گذشت زمان و کاهش قطر اسمی زنجیر خطوط مهار، سختی محوری آنها کاهش می‌یابد. این کاهش سبب می‌شود تا آزادی عمل بیشتری در سازه توربین بادی به وجود آمده و دامنه حرکات شناور افزایش یابد. این افزایش دامنه حرکت به خوبی در شکل ۱۴ برای حرکات مختلف سازه قابل رویت است. مقدار متوسط حرکت سرج در سال صفر و ۵ بترتب ۴/۱ و ۸/۳ متر است. مقدار حداکثر این حرکت نیز در همین سال‌ها برابر با ۱۰/۸۵ و ۱۴/۹۲ متر بدست آمده است. پس از سال پنجم این مقادیر با یک روند تقریبا ثابت افزایش می‌یابند، بطوری که مقدار متوسط و حداکثر حرکت سرج در سال ۳۰ام بترتیب به ۱۰/۱۳ و ۱۷/۰۳ متر می رسد. با کاهش قطر خطوط مهار در طول عمر سازه، مقدار متوسط حرکت سرج سازه در پایان سال های دهم، بیستم و سی ام به ترتیب ۱/۹۸، ۲/۱۶ و ۲/۳۸ برابر خواهد شد که نشان دهنده افزایش ۹۸ تا ۱۳۸ درصدی در طول سالهای فوق است. بطور متنظر در طول سالهای ذکر شده مقدار حداکثر حرکت سرج سازه به اندازه ۴۱، ۴۹ و ۵۸ درصد افزایش خواهد یافت.

برای حرکت هیو نیز تقریبا روند مشابهی روی می‌دهد. مقادیر متوسط و حداکثر این حرکت در سال صفر برابر با ۲/۰۷ و ۵/۰۸ متر بوده و در سال ۳۰ام به ۲/۲۸ و ۵/۳۲ متر می‌رسد. مقدار متوسط حرکت هیو در طول عمر سازه با کاهش قطر خطوط مهار، در پایان سال های دهم، بیستم و سی ام به ترتیب ۶، ۸ و ۱۰ درصد افزایش خواهد یافت. بطور متنظر در طول سالهای ذکر شده مقدار حداکثر حرکت هیو سازه به طور حدودی به مقدار ۲، ۳ و ۵ درصد افزایش خواهد یافت. بررسی حرکات سازه توربین بادی بخصوص در مزرعه‌های بادی شناور که سازه‌ها به نوعی به یکدیگر مرتبط هستند بسیار حائز اهمیت است. این افزایش حرکات در شرایط خاص نظیر تندباد سبب ایجاد خرابی بیشتر در محل اتصال خطوط مهار به سازه خواهد شد. در عین حال بدلیل آزادی عمل بیشتر سازه باید جابجایی سازه به عنوان یک معیار مجزا در حالت حدی تصادفی سازه بررسی شود.

۶ – ارزیابی کشش مهار

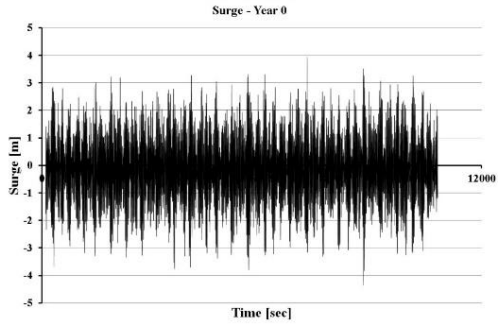
همانطور که پیشتر اشاره شد، یکی از معضلات اصلی در طراحی سازه های شناور فراساحل، طراحی خطوط مهار آنها است. برای طراحی خطوط مهار حالت‌های حدی مختلفی تعریف شده که مطابق انتظار در همه آنها باید در مراحل ابتدایی محاسبه مقدار کشش خطوط مهار انجام شود. در این بخش بر اساس اهداف اولیه تعریف شده توزیع مقدار نیروی کشش مهار بررسی می‌شود. برای محاسبه کشش خطوط مهار در حوزه زمان باید از ماژول انسیس-پاسخ هیدرودینامیکی استفاده کرد. نظیر بخش قبل، برای دستیابی به نتیجه از تحلیل سه ساعته با تقسیم بندی یک ثانیه ای با لحاظ حذف ۱۰۰ ثانیه اول استفاده شده است. برای محاسبه مقادیر کشش مهار با استفاده از داده های جدول ۸ تحلیل هیدرودینامیکی توربین بادی شناور در ۷ مقطع زمانی با بازه زمانی ۵ ساله انجام شده است.



(الف)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

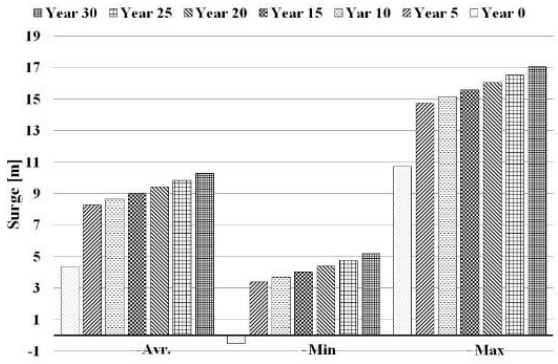
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]



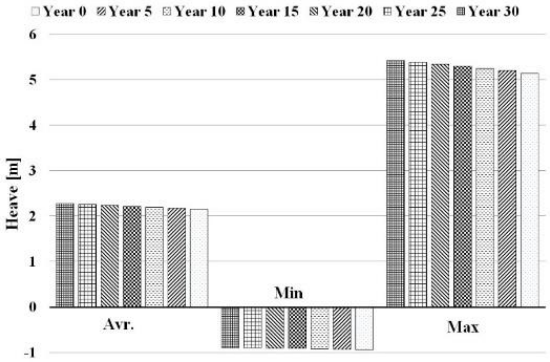
(ب)

شکل۱۳- حرکات توربین بادی شناور تحت اثر نیروهای محیطی، الف- حرکت هیو در سال دهم، ب-حرکت سرج در سال صفر

به عنوان نمونه، مقادیر سه ساعته کشش مهار شماره ۱ در سال بیستم بصورت شکل ۱۵ است. با استفاده از نمودارهای مشابه در هفت مقطع زمانی مدنظر، مقادیر حداکثر، حداقل، متوسط و انحراف استاندارد کشش مهار شماره یک بدست آمده است. این مقادیر در شکل ۱۶ نمایش داده شده اند. همانطور که در بخش قبل اشاره شد، با گذشت زمان و کاهش قطر اسمی زنجیر خطوط مهار، سختی محوری کاهش یافته و درنتیجه آزادی عمل توربین بادی شناور افزایش می یابد. این افزایش آزادی عمل بدلیل کاهش مقدار کشش خطوط مهار روی می‌دهد. در شکل ۱۶ کاهش مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط کشش مهار شماره یک در طول عمر سازه قابل مشاهده است. مقدار متوسط کشش مهار در شرایط ابتدایی برابر با ۲۱۵۱ kN است و پس از شروع خوردگی بترتیب در سالهای دهم، بیستم و سی ام ۵/۴، ۱۳/۱ و ۲۱/۳ درصد کاهش می‌یابد. بطور متناظر مقدار حداکثر کشش مهار شماره یک در سال صفر برابر با ۳۲۶۰ kN بوده که در طول عمر سازه با کاهش قطر خطوط مهار، در پایان سال های دهم، بیستم و سی ام به ترتیب۷/۴، ۱۴/۶ و ۲۰/۵ درصد کاهش خواهد یافت.



(الف)



(ب)

شکل۱۴- مقایسه مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط حرکات سازه در مقاطع زمانی ۵ ساله از عمر سازه

جدول ۸- پارامترهای خطوط مهار در مقاطع زمانی مختلف با لحاظ خوردگی

زمان (سال)	جرم واحد طول[kg/m]	مقطع عرضی معادل [m^2]	سختی محوری [N]	قطر معادل [m]
۰	۱۰۸/۶۳	۰/۰۰۴۶۰۸	۵۱۶۱۲۲۳۱۳	۰/۱۴۴۷۷
۵	۱۰۳/۰۳	۰/۰۰۴۳۷۱	۴۸۹۵۲۲۶۰۴	۰/۱۴۰۹۹
۱۰	۹۷/۵۸	۰/۰۰۴۱۴۰	۴۶۳۶۲۶۵۹۱	۰/۱۳۷۲۱
۱۵	۹۲/۲۸	۰/۰۰۳۹۱۵	۴۳۸۴۳۴۲۷۴	۰/۱۳۳۴۳
۲۰	۸۷/۱۳	۰/۰۰۳۶۹۶	۴۱۳۹۴۵۶۵۴	۰/۱۲۹۶۵
۲۵	۸۲/۱۲	۰/۰۰۳۴۸۴	۳۹۰۱۶۰۷۲۹	۰/۱۲۵۸۷
۳۰	۷۷/۲۶	۰/۰۰۳۲۷۷	۳۶۷۰۷۹۵۰۰	۰/۱۲۲۰۹

با استفاده از داده های زمانی نیروی کشش مهار، نظیر شکل ۱۵، می‌توان توزیع آماری نیروی کشش مهار را بدست آورد. برای اینکار روشهای مختلفی ارائه شده که از جمله آنها میتوان روش حداکثرهای بلوکی ^{xi} و روش مقدار حداکثر بیش از حد آستانه $^{xi\ i}$ را نام برد [۱۹-۲۰]. در اینجا از روش POT استفاده می‌شود. روند این روش در شکل ۱۷ نشان داده شده است. ابتدا یک مقدار پایه با نام حد آستانه، به عنوان مثال مقدار متوسط، برای کشش مهار در نظر گرفته شده، سپس مقادیر حداکثر کشش مهار که بیشتر از این مقدار پایه باشند تعیین می‌شوند. این مقادیر حداکثر در طول زمان تحلیل تعیین و در یک بردار با عنوان بردار حداکثرها قرار داده می‌شوند. در شکل ۱۷ بصورت شماتیک مقادیر حداکثر برای بخشی از زمان تحلیل مربوط به یکی از خطوط مهار با نماد دایره مشخص شده است. از این بردار برای تعیین توزیع احتمالی کشش مهار استفاده خواهد شد. در اینجا مقدار ۷۵ درصد متوسط کشش مهار به عنوان حد آستانه در نظر گرفته شده است. در مرحله آخر، برای تعیین توزیع احتمال کشش مهار باید مقادیر بردار حداکثرها با توزیع های احتمالی مختلف برازش داده شده و بهترین توزیع احتمالی انتخاب گردد. این کار در شکل ۱۸ برای مقادیر کشش مهار

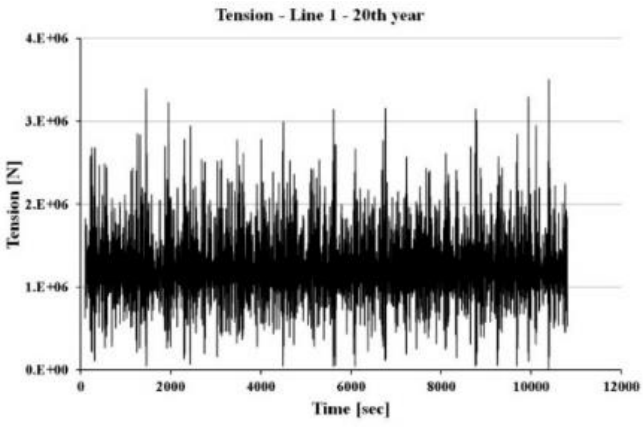
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]

در سال صفر و با سه توزیع احتمالی ویبال، نرمال و GEV[xiii] نشان داده شده است. از روی این شکل میتوان دید که توزیع احتمال GEV بهترین توزیع احتمال برای برازش مقادیر کشش مهار در سالهای مختلف است. تابع توزیع احتمال GEV بصورت زیر است.

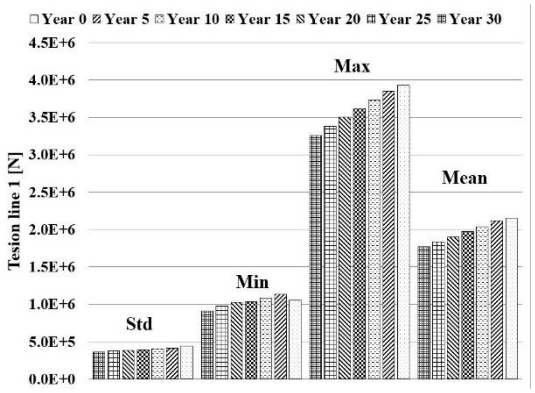
$$f(x)=\left(\frac{1}{\sigma}\right)exp\left(-\left(1+k\,\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right)\left(1+k\,\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{k}} \qquad (۷)$$

در این رابطه، μ پارامتر مکان، σ پارامتر مقیاس و k پارامتر شکل است. برای نشان دادن کیفیت برازش در شکل ۱۹ توزیع احتمال کشش مهار در دو مقطع زمانی و برازش با توزیع GEV نشان داده شده است. از روی این شکل هم بخوبی می‌توان تطابق تابع توزیع احتمال GEV را با بردار حداکثرها مشاهده کرد. پارامترهای توزیع GEV در هفت مقطع زمانی مختلف از طول عمر خط مهار شماره ۱ با لحاظ خوردگی در جدول ۹ آورده شده است. بر اساس آنچه در رابطه (۱) آورده شده، برای طراحی خطوط مهار محاسبه مقدار کشش یکی از دو پارامتر اصلی است، در نتیجه با روند طی شده در این تحقیق میتوان بطور دقیقتری میزان کشش خطوط مهار را در طول عمر آن محاسبه نمود.

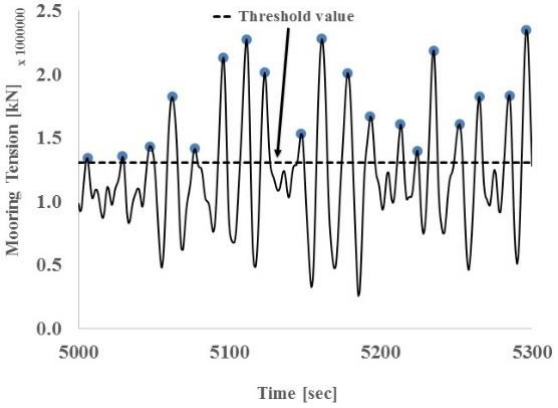
از طرفی، با گذشت زمان در طول عمر خطوط مهار و افزایش میزان خوردگی، استحکام کششی خطوط مهار نیز کاهش می‌یابد، بنابراین نتایج بدست آمده در این تحقیق پایه‌ای برای ارزیابی بهتر خطوط مهار با لحاظ خوردگی خواهد بود. تحقیق حاضر بخش اولیه از یک تحقیق جامع در خصوص طراحی خطوط مهار سازه های شناور است. با استفاده از نتایج بدست آمده در این تحقیق، نظیر جدول ۹، میتوان ارزیابی کمی دقیقتری از کشش خطوط مهار یک سازه شناور و تاثیر خوردگی بر روی آن داشت. همچنین از این نتایج می‌توان در تحقیقات آینده برای محاسبه احتمال خرابی خطوط مهار در طول عمر آن استفاده نمود. ارزیابی احتمال خرابی نیز یکی از معیارهای مهم در تعیین ریسک خرابی سازه و تعیین زمانبندی بازرسی آن خواهد بود.



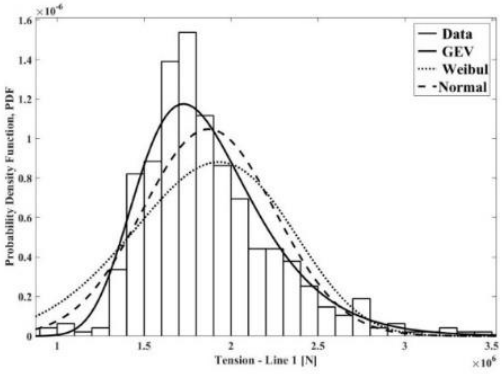
شکل ۱۵- نیروی کشش خط مهار شماره ۱ با ویژگیهای خط مهار در سال بیستم از عمر سازه



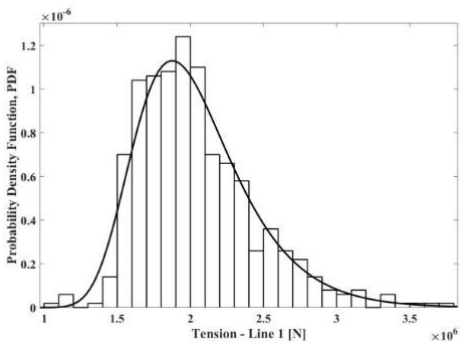
شکل۱۶- مقایسه مقادیر حداکثر، حداقل، متوسط و انحراف استاندارد نیروی کشش خط مهار شماره ۱ در طول عمر سازه



شکل۱۷-روش انتخاب مقادیر کشش مهار برای محاسبه توزیع احتمال



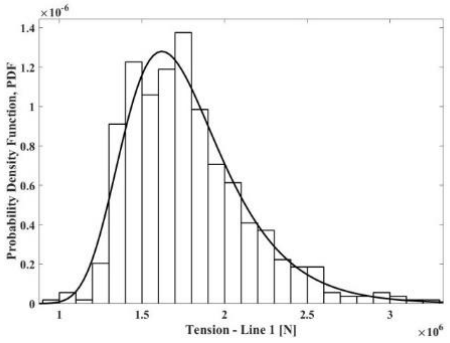
شکل ۱۸- برازش کشش مهار در سال صفر با توزیعهای احتمال مختلف



(الف)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]



(ب)

شکل ۱۹- توزیع احتمال نیروی کشش خط مهار شماره یک و منحنی تابع توزیع احتمال GEV برازش شده، الف- سال دهم، ج) سال سال سی ام

جدول ۹- پارامترهای برازش توزیع GEV در زمانهای مختلف برای نیروی کششی خط مهار شماره ۱

زمان (سال)	پارامترهای توزیع احتمال GEV		
	μ	σ	k
۰	-۰/۰۵۵۹۸	۳۱۳۵۱۲/۶	۱۷۰۸۳۹۱
۵	-۰/۰۱۱۱۸	۳۲۳۷۰۵/۹	۱۹۳۳۶۶۹
۱۰	-۰/۰۳۳۸۵	۳۲۵۸۱۴/۴	۱۸۶۴۰۶۸
۱۵	-۰/۰۳۱۷۴	۳۱۶۱۴۱/۳	۱۷۹۷۷۰۱
۲۰	-۰/۰۲۳۹۵	۳۰۵۵۱۴/۶	۱۷۳۲۹۹۲
۲۵	-۰/۰۳۳۴۳	۳۰۱۳۸۹/۳	۱۶۷۰۶۴۶
۳۰	-۰/۰۲۲۳۸	۲۸۷۴۸۷/۲	۱۶۱۳۴۶۰

۶ – نتیجه گیری

توربین‌های بادی شناور دسته جدید از سازه فراساحل هستند که جهت تامین انرژی لازم بکار می‌روند. در سالهای اخیر و با گسترش روز افزون نیاز به انرژی استفاده از این روش تولید انرژی گسترش قابل توجهی داشته است. خطوط مهار این نوع سازه بخش مهمی از طراحی سازه آن بوده که وظیفه تامین ایمنی سازه و جلوگیری از جابجایی آن در شرایط متغییر دریا بر عهده دارد. قدم اول در طراحی خط مهار، محاسبه میزان نیروی کششی خط مهار است. در این تحقیق یک سکوی نیمه مغروق با نام OC4 با خطوط مهار از نوع کاتنری زنجیری و توربین بادی ۵ مگاواتی نصب شده بر روی آن جهت بررسی نیروی کشش مهار انتخاب شده اند. تحلیل هیدرودینامیکی سازه شناور تحت تاثیر نیروهای امواج، باد و جریان دریایی توسط نرم افزار انسیس-آکوا انجام شده است. خوردگی یک عامل موثر در کاهش قطر زنجیر خطوط مهار است. در این تحقیق تاثیر کاهش ضخامت زنجیر مهار بر روی توزیع آماری کشش مهار بررسی شده است. بر اساس این بررسی می‌توان نتایج زیر را بیان کرد:

- با گذشت زمان در طول عمر خطوط مهار، در اثر خوردگی مساحت مقطع عرضی زنجیر خطوط مهار و در نتیجه سختی محوری آنها کاهش می یابد، بطوریکه در پایان سالهای دهم، بیستم و سی ام عمر سازه مقدار سختی محوری خطوط مهار بترتیب ۱۰/۱ ، ۱۹/۸ و ۲۸/۹ درصد کاهش می یابد. با افزایش میزان خوردگی و کاهش قطر خطوط مهار، مقدار متوسط کشش مهار کاهش می‌یابد. این عامل سبب می‌شود تا میزان تاثیر کشش مهار بر نقطه اتصال مهار به سازه کاهش یابد. مقدار اولیه متوسط کشش مهار شماره یک برابر با kN ۲۱۵۱ است که درانتهای سالهای دهم، بیستم و سی ام بترتیب ۵/۴، ۱۳/۱ و ۲۱/۳ درصد کاهش می‌یابد. این مقدار کاهش برای حداکثر کشش مهار شماره یک که در ابتدا برابر با kN ۳۲۶۰ بود در پایان سال های دهم، بیستم و سی ام به ترتیب ۷/۴، ۱۴/۶ و ۲۰/۵ خواهد شد.
- در طول زمان، با کاهش مقادیر کشش مهار، آزادی عمل سازه شناور افزایش یافته که این عامل می‌تواند سبب آسیب رسیدن به سازه و یا اجزاء مجاور گردد. این افزایش آزادی عمل سبب می‌شود تا در صورت وقوع شرایط ناگهانی نظیر تند باد، نیروهای ضربه ای بیشتری بر نقاط اتصال مهار به سازه بوجود آید. مقدار متوسط حرکت سرج سازه در سال صفر برابر با ۴/۱ متر می باشد که با کاهش قطر خطوط مهار در طول عمر سازه، در پایان سال های دهم، بیستم و سی ام به ترتیب ۱/۹۸، ۲/۱۶ و ۲/۳۸ برابر خواهد شد. مقدار اولیه متوسط حرکت هیو سازه نیز ۲/۰۷ متر می باشد که در پایان سال های دهم، بیستم و سی ام به ترتیب ۶، ۸ و ۱۰ درصد افزایش خواهد یافت.
- با توجه به آزادی عمل بیشتر سازه شناور در اثر خوردگی باید حالت حدی تصادفی سازه که در بر گیرنده معیارهایی از جابجایی سازه است بطور مجزا بررسی شود.
- برای طراحی و ارزیابی عملکرد خطوط مهار سازه‌های شناور باید حالتهای خرابی استحکام نهایی و خستگی مورد بررسی قرار گیرند. در هر دو حالت محاسبه کشش مهار اولین مرحله از روند کار است. با استفاده از نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌توان در تحقیقات آینده ارزیابی دقیقتری از عملکرد سازه در طول عمر آن و همچنین احتمال خرابی آن ارائه داد.

۷ - مراجع

[1] Global Wind Energy Council (GWEC), (2019), GWEC Repoer, https://gwec.net/global-wind-report-2019.

[2] Ma, K., Shu, H., Smedley, P., (2013), A Historical Review on Integrity Issues of Permanent Mooring Systems. In: Offshore Technology Conference, OTC 24025. .

[3] Hordvik, T., (2011), Design analysis and optimisation of mooring system for floating wind turbines. M.Sc. thesis, NTNU.

[4] Hsu, W., Thiagarajan, K.P., Manuel, L., (2017), Extreme mooring tensions due to snap loads on a floating offshore wind turbine system. Journal of Marine Structres, Vol. 55, p. 182–199.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]

[5] Benassai, G., Campanile, A., Piscopo. V., (2014), Ultimate and accidental limit state design for mooring systems of floating offshore wind turbines. Journal of Ocean Engineering, Vol. 92, p. 64–74.

[6] Pham, H.D., (2019), Modeling and Service Life Monitoring of Mooring Lines of Floating Wind Turbines, Phd thesis, École centrale de Nantes.

[7] Pham, H.D., Schoefs, F., Cartraud, P., (2019), Methodology for modeling and service life monitoring of mooring lines of floating wind turbines, Journal of Ocean Engineering, Vol. 193, 106603.

[8] Zhang, L., Shi, W., Karimirad, M., (2020), Second-order hydrodynamic effects on the response of three semisubmersible floating offshore wind turbines, Journal of Ocean Engineering, Vol. 207, 107371.

[9] Ghafari, H. R., Dardel, M., (2018), Parametric study of catenary mooring system on the dynamic response of the semi-submersible platform, (2018), Journal of Ocean Engineering, Vol. 153, p. 319-332.

[10] Ghafari, H. R., Ketabdari, J., Ghassemi, H., (2019), Numerical study on the hydrodynamic interaction between two floating platforms in Caspian Sea environmental conditions, Jornal of Ocean Engineering, Vol. 188, 106237.

[11] Ferri, G., Marino, E., Borri, C., (2020), Optimal Dimensions of a Semisubmersible Floating Platform for a 10 MW Wind Turbine. Energies, Journal of Energies, Vol. 13(12), 3092.

[12] Coulling, A.J., Goupee, A.J., Robertson, A.N., (2013), Validation of a FAST semi-submersible floating wind turbine numerical model with DeepCwind test data, Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 5, 23116.

[13] Lin, Y-H., Yang, C-H., (2020), Hydrodynamic Simulation of the Semi-Submersible Wind Float by Investigating Mooring Systems in Irregular Waves, Jornal of Applied science, Vol. 10, 4267.

[14] Zhou, Y., Xiao, Q., Liu, Y., (2019), Numerical modelling of dynamic responses of a floating offshore wind turbine subject to focused waves, Journal of Energies, Vol. 12, 3482.

[15] DNVGL, (2018), Position mooring, DNVGL-OS-E301.

[16] DNV, (2013), Design of Offshore Wind Turbine Structures, Offshore Standard, DNV-OS-J101.

[17] DNV, (2010), Envirinmental conditions and environmental loads, Recommended practice, DNV-RP-C205.

[18] KR, (2017), Rules for the Classification of Steel Ships, Part 4 Hull Equipment. Korean register.

[19] Zhao, Y., Dong, S., (2021), Long-term extreme response analysis for semi-submersible platform mooring systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. Vol.235(2), 463-479.

[20] Kim, D.H., Lee, S.G., (2015), Reliability analysis of offshore wind turbine support structures under extreme ocean environmental loads,Journal of Renewable Energy, Vol. 79, 161-166,

[i] ANSYS-AQWA
[ii] ANSYS-Diffraction
[iii] ANSYS-Workbench
[iv] Studless
[v] Stud link
[vi] Response Amplitude Operator: RAO
[vii] Surge
[viii] Heave
[ix] Pitch
[x] ANSYS-Hydrodynamic Response
[xi] Block maxima method
[xii] Peak Over Threshold: POT
[xiii] Generalized extreme value distribution: GEV

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1400.17.34.8.0]