بررسی تغییرات پاسخ دینامیکی در توربین بادی شناور از نوع TLP تحت قطع‌شدگی کابل‌های مهاری

محمد علی نصرت‌زاده[۱] ، میرمحمد اتفاق[۲*]، پویا حاجی‌نژاد دهخوارقانی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز- دانشکده فنی مهندسی مکانیک؛ Ali.nosratzadeh94@ms.tabrizu.ac.ir
[۲] دانشیار، دانشگاه تبریز- دانشکده فنی مهندسی مکانیک؛ Ettefagh@tabrizu.ac.ir (* نویسنده مسئول)
[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز- دانشکده فنی مهندسی مکانیک؛ Hajinezhad.pooya@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۲۸

کلمات کلیدی:
توربین بادی شناور
کابل‌های مهاری
قطع‌شدگی کابل های مهاری
مدل‌سازی دینامیکی
دینامیک چندجزئی

چکیده

از آنجایی که هزینه نگهداری و تعمیر توربین‌های بادی شناور نسبت به توربین‌های معمولی بالا می‌باشد، یکی از راههای کاهش این هزینه‌ها بررسی عیوب در این سازه‌ها قبل از هر نوع کار عملی می‌باشد. اهمیت پایداری و سلامت سازه‌ای توربین‌های بادی با افزایش عمق آب مهم‌تر می‌گردد و یکی از مهمترین عوامل برای پایداری توربین بادی شناور، سیستم کابل‌های مهاری می‌باشد. در این پژوهش تاثیر قطع‌شدگی خطوط مهاری بر پاسخ دینامیکی توربین با پایه TLP مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور توربین بادی شناور با معادلات غیرخطی به صورت دقیق مدل‌سازی می‌گردد به طوری که این مدل‌سازی برای زوایای انحراف بزرگ سازه که ممکن است به دلیل قطع‌شدگی خطوط مهاری ایجاد شود، جواب‌گو باشد. پس از مدل‌سازی کامل توربین و اعمال نیروها، با قطع‌کردن کابل‌های مهاری مختلف، تغییرات پاسخ دینامیکی سازه مورد بررسی قرارمی‌گیرد. با تحلیل نتایج مشخص می‌گردد که بر خلاف سایر پلتفرم‌ها، قطع شدن خطوط مهاری در توربین با پایه TLP، منجر به جابجایی و نوسانات شدید سازه نمی‌گردد.

Investigation of Dynamic Response Changes in TLP Type Floating Wind Turbine with Broken Mooring Lines

Mohammad Ali Nosratzadeh[1], Mir Mohammad Ettefagh[2*], Pooya Hajinezhad Dehkharghani[3]

[1] MS Student, Mechanical Engineering Department, University of Tabriz; Ali.nosratzadeh94@ms.tabrizu.ac.ir
*[2] Associate Prof., Mechanical Engineering Department, University of Tabriz; Ettefagh@tabrizu.ac.ir (*Corresponding author)*
[3] MS Student, Mechanical Engineering Department, University of Tabriz; Hajinezhad.pooya@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 23 Jan. 2018
Accepted: 13 jan. 2019

Keywords:
Floating wind turbine
Mooring Cables
Broken mooring cables
Dynamic Modeling
Multi-body Dynamics

ABSTRACT

As the cost of maintaining and repairing floating wind turbines is high compared with conventional turbines, one way to reduce these costs is to investigate the defects in these structures before any practical work. The importance of the stability and structural safety of wind turbines becomes more important with water depth growth and one of the most important factors for the stability of floating wind turbines is the system of mooring cables. In this paper, the effects of broken mooring cables on the dynamic response of a TLP type wind turbine is investigated. For this purpose, the floating wind turbine is modeled accurately with non-linear equations so that this modeling is responsive to large rotation angles that may be caused due to the cutting-off of the mooring cables. After concluding turbine modeling and applying forces, by cutting various mooring cables, the dynamic response changes of the structure are investigated. Studying the results shows that unlike other platforms, breaking of the mooring lines in a TLP-type turbine does not cause extreme oscillations and drifts in the structure.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.5.4]

۱ - مقدمه

مانند سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی باد نیز به صورت گسترده در سراسر جهان در دسترس است و می‌تواند نقش مهمی در کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی را ایفا کند. اولین توربین‌های بادی برای تولید الکتریسیته در ابتدای قرن ۲۰ توسعه داده شدند. این تکنولوژی تا اوایل دهه ۱۹۷۰ به تدریج توسعه پیدا کرد. در اواخر دهه ۱۹۹۰، انرژی باد دوباره به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی پایدار مورد توجه قرارگرفت[۱] و [۲]. توربین بادی که به شکل عمده به دو نوع محورعمودی و محورافقی تقسیم می‌شود، می‌تواند انرژی باد را به انرژی مکانیکی تبدیل‌کند. متداول‌ترین نوع توربین بادی که در طول تاریخ استفاده شده است، توربین بادی محورافقی می‌باشد که در دشت‌ها و چمن‌زارها قرار می‌گرفت. در سال ۱۹۹۱ اولین مزرعه بادی فراساحلی در دانمارک ایجاد گردید[۳]. با توجه به موارد ذکر شده، توربین‌های بادی به دو نوع فراساحلی و ساحلی (زمینی) تقسیم می‌شود. اگرچه تکنولوژی سکوهای فراساحلی چندین دهه وجود داشته، ولی توان بادی فراساحلی از سال ۲۰۰۰ به صورت جدی مورد توجه قرار گرفته‌است. بسیاری از مشکلاتی که برای توربین‌های بادی زمینی وجود دارد، در توربین های بادی فراساحلی مرتفع گردیده‌است. سرعت باد در اقیانوس‌ها معمولا بالاتر می‌باشد و این سرعت اغلب پایدار می‌باشد که این منجر به عملکرد بهتر توربین فراساحلی در مقایسه با توربین زمینی می‌گردد[۳] و [۴]. به علاوه، شهرهای بزرگ نیازمند انرژی فراوان، اغلب در خطوط ساحلی واقع شده‌اند. این بدین معنا است که انرژی الکتریکی تولید شده توسط توربین‌های بادی شناور، به خطوط انتقال طولانی احتیاجی ندارد[۳].

از آنجایی که هزینه‌های نگهداری و تعمیر توربین‌های بادی شناور معمولا ۲ تا ۵ برابر توربین‌های بادی معمولی می‌باشد، یکی از راههای کاهش این هزینه‌ها، ارائه روش عیب‌یابی مناسب یا پایش وضعیت سلامت سازه قبل از خرابی ناگهانی می‌باشد[۵]. با توجه به اهمیت پایداری و سلامت سازه‌ای توربین‌های بادی، محققین این حوزه روش‌های متفاوتی را برای پایش سلامت و عیب‌یابی و شبیه‌سازی عیوب توربین‌های بادی شناور ارائه کرده‌اند. با توسعه فناوری‌های فراساحلی به سمت آب‌های عمیق، خطرات مربوطه نیز افزایش می‌یابد. سیستم کابل‌های مهاری سازه‌های شناور فراساحلی با افزایش عمق آب مهم‌تر می‌گردد. از این رو محققین بررسی‌هایی را بر روی عیوب کابل‌های مهاری سازه‌های شناور انجام داده‌اند. هان و همکاران رفتار سیستم کابل‌های مهاری تحت شرایط شکستگی کابل را با روش‌های عددی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با شکستگی یکی از کابل‌ها، تنش کابل‌های مهاری مجاور به شدت افزایش می‌یابد و نهایتا باعث شکستگی سایر کابل‌ها می‌گردد[۶]. جمالکیا و همکاران روشی را بر مبنای منطق فازی و با استفاده از پاسخ دینامیکی توربین بادی شناور برای تشخیص عیوب کابل‌های مهاری سازه پیشنهاد کردند [۷]. بئی و همکاران تاثیر قطع‌شدگی کابل‌های مهاری بر روی عملکرد و پایداری توربین بادی فراساحلی از نوع نیمه شناور را بررسی کردند و میزان جابجایی توربین در موقع قطع‌شدگی کابل‌ها را مورد بحث قرار دادند[۸]. با بررسی موارد فوق، اهمیت بررسی عیوب مربوط به توربین‌های بادی شناور قبل از هر نوع کار عملی آشکار می‌گردد.

برای بررسی عیوب توربین‌های بادی شناور، ابتدا باید بتوان مدل دقیقی را از توربین ارائه داد. یک توربین بادی را می‌توان به عنوان یک سیستم چندجزئی متشکل از تاور[۱]، روتور[۲]، ناسل[۳] و سایر اجزای متحرک در نظر گرفت که به طور مکانیکی به یکدیگر متصل شده‌اند. یکی از روش‌های تحلیلی برای شبیه‌سازی حرکات دینامیکی توربین، استفاده از روش‌های Newton_Euler یا Euler_Lagrange می‌باشد. معادلات NE[۴] معمولا با جداکردن اجزا سیستم در دیاگرام آزاد سیستم به‌دست می‌آید ولی روش EL[۵]، روش انرژی را برای استخراج معادلات حرکتی برای درجات آزادی تعمیم یافته به‌کار می‌گیرد[۹]. جانکمن و همکاران در سازمان انرژی‌های نو آمریکا، برنامه FAST را برای شبیه سازی توربین‌های بادی شناور ایجاد کردند که با استفاده از روش کین، معادلات حرکت را برای دوران‌های کمتر از ۲۰ درجه توربین‌های بادی شناور به دست آوردند[۱۰]. ونگ و همکارش با استفاده از قانون دوم نیوتن و بقای مومنتوم زاویه‌ای و در نظر گرفتن سیستم چند جزئی، معادلات حرکتی غیر خطی کوپل برای توربین بادی شناور را به دست آوردند. روش مورد استفاده آنها، به دلیل کامل بودن اثرات غیرخطی، توانایی شبیه سازی توربین با دوران‌های بزرگ را دارا می‌باشد[۹].

در کارهای پیشین، برخی از پژوهشگران به بررسی تاثیر عیوب کابل‌ها بر روی عملکرد توربین بادی شناور پرداخته‌اند. به طور مثال تاثیر قطع‌شدگی کابل‌های مهاری بر روی عملکرد توربین بادی شناور در پلتفرم OC4 DeepCwind مورد بررسی قرار گرفته است[۸]. تابش‌پور و همکاران به بررسی رفتار سازه‌های TLP در هنگام وجود عیب در کابل‌ها پرداختند و یکی از نتایج حاصله از کار آنها متفاوت بودن ماتریس سفتی در حالت معیوب بودن کابل‌ها با حالت بدون عیب کابل‌ها می باشد. همچنین در کار آنها نشان داده شد اگرچه کابل معیوب اثر شدیدی بر دامنه نوسانات نمی گذارد اما بر تنش سایر کابل‌های نزدیک به تسلیم تاثیر زیادی دارد [۱۱] و [۱۲]. بسیاری از پژوهشگران برای بررسی و مدل‌سازی توربین بادی شناور از نرم افزار FAST استفاده می‌کنند ولی این نرم‌افزار با توجه به محدودیت‌هایی که دارد مناسب برای نوسانات بزرگ نمی‌باشد. در کار حاضر، ابتدا توربین بادی شناور فراساحلی با استفاده از قوانین نیوتن و در نظر گرفتن معادلات به صورت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.5.4]

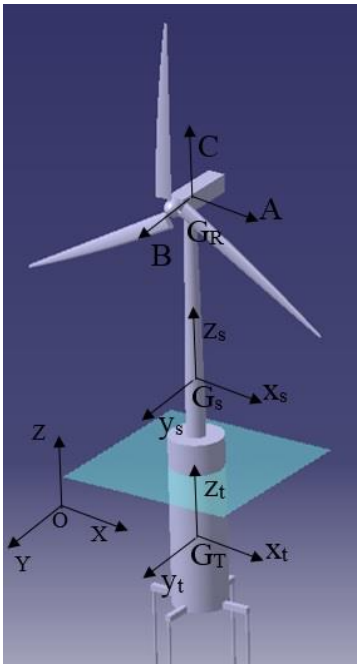
غیرخطی، به طور دقیق مدل‌سازی می‌گردد. به دلیل در نظر گرفتن عبارات غیرخطی در معادلات دینامیکی، مدل سازی کنونی قادر به شبیه‌سازی حرکات توربین بادی شناور با زوایای انحراف بزرگ می‌باشد که ممکن است هنگام قطع شدگی کابل‌های مهاری حادث شود. پس از مدل‌سازی کامل توربین و اعمال نیروهای خارجی، معادلات حاصله به شکل قابل‌حل در MATLAB تبدیل می‌شود. پس از اطمینان از صحت شبیه‌سازی با ادبیات فن، با قطع‌کردن عمدی کابل‌های مهاری مختلف، تغییرات پاسخ دینامیکی سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. پلتفرم مورد بررسی در این پژوهش، TLP[۶] خواهد بود. روند کار نیز بدین صورت خواهدبود که ابتدا در بخش ۲ نحوه مدل‌سازی سیستم و نحوه اعمال نیروها شرح داده می‌شود، سپس در بخش ۳ مشخصات توربین بادی شناور ذکر می‌گردد، پس از آن، در بخش ۴ با استفاده از ادبیات فن، مدل مورد صحه‌سنجی قرار می‌گیرد و در بخش ۵ تاثیر قطع شدگی کابل‌ها در رفتار دینامیکی توربین مورد بحث قرار می‌گیرد و نهایتا در بخش ۶ نتایج حاصل از این پژوهش ذکر می‌گردد.

۲ – مدل‌سازی دینامیکی

در کار حاضر ترکیبی از روش‌های اولر- لاگرانژ و نیوتن- اولر برای به‌دست آوردن معادلات حرکتی سیستم استفاده می‌شود به طوری که از ۶ معادله حرکتی استفاده می‌گردد و ۲ درجه آزادی به عنوان ورودی برای سیستم در نظر گرفته‌می‌شود. در روش مورد استفاده از عکس‌العمل‌های بین اجزا مکانیکی توربین بادی برای استخراج معادلات چرخشی استفاده می‌گردد. برای به دست آوردن معادلات انتقالی توربین بادی، سیستم به صورت یک جسم صلب در نظر گرفته می‌شود. مومنتم زاویه‌ای کل سیستم از مجموع مومنتم زاویه‌ای اجزای صلب در یک دستگاه به دست می‌آید. به دلیل استفاده از دستگاه‌های مختلف برای محاسبه مومنتم زاویه‌ای هر قسمت، از ماتریس‌های انتقال برای تبدیل کلیه مومنتوم‌ها به یک دستگاه واحد استفاده می‌گردد. این معادلات حرکت دورانی به همراه معادلات حرکت انتقالی، که با استفاده از قانون دوم نیوتن به دست می‌آیند، معادلات شش‌تایی حرکت کلی سیستم را تشکیل می‌دهند.

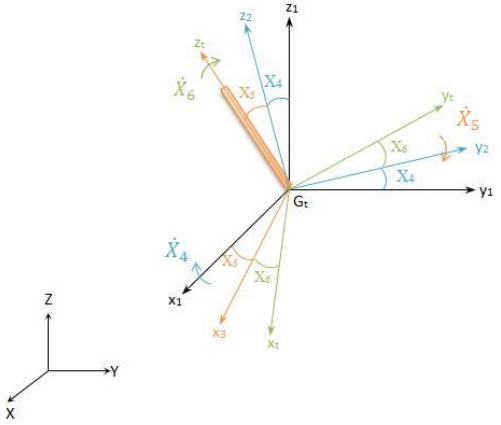
۲-۱- دستگاه‌های مختصات و زوایای اولر

توربین‌های بادی شناور معمولاً به صورت دو قسمت صلب در نظر گرفته می‌شوند: مجموع بدنه-پایه (TPA)[۷] و مجموع روتور- ناسل (RNA)[۸]، که آزادانه نسبت به بدنه حرکت دارند. برای استخراج معادلات حرکت، باید از دستگاه‌های مختصات مختلفی استفاده کرد که در شکل ۱ نشان داده شده‌است. دستگاه (X,Y,Z) دستگاه اینرسی اولیه یا به عبارتی دستگاه متصل به زمین می‌باشد. (X,Y,Z) در حالت تعادل اولیه سیستم که جابجایی صفر است، در مرکز جرم کلی سیستم قرار دارد. (x_t,y_t,z_t) و (A,B,C) دستگاه‌های واسطه متصل به جسم هستند که به ترتیب در مرکز جرم TPA و RNA قرار دارند. فرض می‌شود مرکز جرم RNA در امتداد محور TPA قرار دارد. همچنین (x_s,y_s,z_s) به موازات محورهای (x_t,y_t,z_t) و در مرکز جرم کلی سیستم در نظر گرفته می‌شود که در حالت تعادل بر روی (X,Y,Z) منطبق می‌شود. برای ساده سازی محاسبات فرض می‌شود که دستگاه‌های (A,B,C) و (x_t,y_t,z_t) به ترتیب در راستای محورهای اصلی اینرسی RNA و TPA قرار دارند[۵].



شکل ۱ - دستگاه‌های مختصات توربین بادی شناور

برای توصیف زوایای انحراف بزرگ، از زوایای اولر استفاده می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده‌است. ترتیب دوران زوایا بسیار مهم است. در حالت کلی ۱۲ حالت وجود دارد که در این پژوهش حالت ۳-۲-۱ به کار برده شده‌است. یعنی ابتدا حول x، بعد حول y و سپس حول z دوران انجام می‌گیرد، که زوایای آن‌ها به ترتیب عبارتند از X_6, X_5, X_4 [۵].



شکل ۲ - زوایای اولر[۵].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.5.4]

سرعت زاویه‌ای مجموعه توربین و پلتفرم در دستگاه متصل به جسم (x_t,y_t,z_t)، با استفاده از زوایای اولر و با توجه به شکل ۲ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\vec{\omega}_T = \left(\dot{X}_4\vec{i}\right)_{(x_1,y_1,z_1)} + \left(\dot{X}_5\vec{j}\right)_{(x_2,y_2,z_2)} + \left(\dot{X}_6\vec{k}\right)_{(x_3,y_3,z_3)} \quad (۱)$$

بردار سرعت زاویه‌ای مجموعه توربین و پلتفرم در دستگاه متصل به جسم (x_t,y_t,z_t)، از ۳ مولفه مطابق رابطه (۱) تشکیل شده است که این ۳ مولفه هر یک در دستگاه‌های جداگانه قرار دارند و باید به دستگاه (x_t,y_t,z_t) منتقل شوند. با انتقال هر یک از مولفه‌های بردار سرعت زاویه‌ای مجموعه توربین و پلتفرم به دستگاه متصل به جسم (x_t,y_t,z_t)، رابطه (۱) به صورت رابطه (۲) در می‌آید.

$$\vec{\omega}_T = \begin{Bmatrix} \dot{X}_4\cos X_5\cos X_6 + \dot{X}_5\sin X_6 \\ -\dot{X}_4\cos X_5\sin X_6 + \dot{X}_5\cos X_6 \\ \dot{X}_6 + \dot{X}_4\sin X_5 \end{Bmatrix} \quad (۲)$$

۲-۲- استخراج معادلات حرکت سیستم

در مدل مورد نظر۶ درجه آزادی نامعلوم TPA (۳ حرکت انتقالی و ۳ حرکت دورانی) و دو درجه آزادی معلوم RNA (دوران ناسل و روتور) در نظر گرفته می‌شود. مومنتم زاویه‌ای کل سیستم، حاصل جمع مومنتم زاویه‌ای هر کدام از قسمت‌های صلب توربین می‌باشد که هر کدام در دستگاه مختصات مربوطه محاسبه شده سپس به دستگاه مختصات متصل شده به مرکز جرم کلی سیستم انتقال داده می‌شود. حرکت انتقالی سیستم با توجه به قانون دوم نیوتن برابر است با حرکت مرکز جرم کلی سیستم به طوری که برآیند تمام نیروهای وارد به سیستم در دستگاه اینرسی اولیه با جرم کلی سیستم (جرم RNA و TPA) در شتاب مرکز جرم سیستم برابر است[۵] و [۹]. در حالت کلی معادلات حرکت به شکل رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$\begin{cases} \sum\vec{F} = m_s\vec{a}_{G_s} = m_s\times\left(\ddot{X}_1,\ddot{X}_2,\ddot{X}_3\right) \\ \sum\vec{M} = \dfrac{D}{Dt}\vec{H}_{G_s} = \dfrac{d}{dt}\vec{H}^s_{G_s} + \vec{\omega}_s\times\vec{H}^s_{G_s} \end{cases} \quad (۳)$$

که در آن $\vec{a}_{G_s}$ شتاب مرکز جرم کل سیستم می‌باشد و m_s جرم کل سیستم (RNA و TPA) و $\sum\vec{F}$ مجموع تمام نیروهای خارجی در دستگاه (X,Y,Z) و $\sum\vec{M}$ نیز گشتاور تمام نیروهای خارجی می‌باشد که در رابطه (۴) آورده شده است و در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند.

$$\begin{cases} \sum\vec{F} = \vec{F}^I_{mooring} + \vec{F}^I_{buoyancy} + \vec{F}^I_{wind} + \vec{F}^I_{wave} + \vec{G}^I \\ \sum\vec{M} = \vec{M}^s_{mooring} + \vec{M}^s_{buoyancy} + \vec{M}^s_{wind} + \vec{M}^s_{wave} \end{cases} \quad (۴)$$

$\vec{H}^s_{G_s}$ مومنتم زاویه‌ای کل سیستم حول مرکز جرم کلی، در دستگاه (x_s,y_s,z_s) و $\vec{\omega}_s$ سرعت زاویه‌ای دستگاه (x_s,y_s,z_s) می‌باشد و چون دستگاه‌های (x_s,y_s,z_s) و (x_t,y_t,z_t) هم‌راستا و هم‌جهت هستند، در نتیجه سرعت زاویه‌ای آن‌ها نیز با هم برابر است ($\vec{\omega}_s = \vec{\omega}_T$). مومنتم زاویه‌ای کلی سیستم برابر مومنتم تک تک اجزا (TPA و RNA)، حول مرکز جرم کلی سیستم (G_s) می‌باشد($\vec{H}^s_{G_s} = \vec{H}^T_{G_s} + \vec{H}^R_{G_s}$). $\vec{H}^T_{G_s}$ و $\vec{H}^R_{G_s}$ با استفاده از رابطه (۵) به دست می‌آیند.

$$\begin{cases} \vec{H}^T_{G_s} = \vec{H}^T_{G_T} + \vec{\rho}_{G_T/G_s}\times m_T\vec{v}_{G_T} \\ \vec{H}^R_{G_s} = \vec{H}^R_{G_R} + \vec{\rho}_{G_R/G_s}\times m_R\vec{v}_{G_R} \end{cases} \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، $\vec{H}^T_{G_T}$ مومنتم زاویه‌ای TPA حول مرکز جرم خودش، $\vec{H}^R_{G_R}$ مومنتم زاویه‌ای RNA حول مرکز جرم خودش، $\vec{\rho}_{G_T/G_s}$ فاصله مرکز جرم TPA تا مرکز جرم کل سیستم، $\vec{\rho}_{G_R/G_s}$ فاصله مرکز جرم RNA تا مرکز جرم کل سیستم، $\vec{v}_{G_T}$ و $\vec{v}_{G_R}$ سرعت خطی مرکز جرم‌ها و m_T و m_R هم جرم عضوهای صلب می‌باشد. مومنتم زاویه‌ای TPA ($\vec{H}^T_{G_T}$) در دستگاه (x_t,y_t,z_t) حول مرکز جرم TPA (G_T) محاسبه میشود و چون (x_t,y_t,z_t) در راستای محورهای اصلی TPA می‌باشد، $\vec{H}^T_{G_T}$ از حاصل‌ضرب تانسور اینرسی و سرعت زاویه‌ای به دست می‌آید و سپس به دستگاه واسطه (x_s,y_s,z_s) انتقال داده می‌شود (مطابق رابطه (۶)).

$$\vec{H}^T_{G_T} = T_{T\to s}\left(I_T\vec{\omega}_T\right) \quad (۶)$$

و از آنجایی که دستگاه‌های (x_s,y_s,z_s) و (x_t,y_t,z_t) هم‌راستا و هم‌جهت هستند، $T_{T\to S}$ برابر ماتریس واحد می‌باشد. مومنتم زاویه‌ای RNA ($\vec{H}^R_{G_R}$) حاصل جمع مومنتم زاویه‌ای روتور و ناسل می‌باشد و از حاصل‌ضرب تانسور اینرسی و سرعت زاویه‌ای به دست می‌آید و سپس به دستگاه واسطه (x_s,y_s,z_s) انتقال داده می‌شود(مطابق رابطه (۷)).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.5.4]

$$\begin{aligned}&\vec{H}^{R}_{G_R}=\vec{H}^{n}_{G_R}+\vec{H}^{r}_{G_R}\\&\vec{H}^{n}_{G_R}=T_{n\to s}\left(I_n\vec{\omega}_n\right)\quad,\quad\vec{H}^{r}_{G_R}=T_{n\to s}\left(I_r\vec{\omega}_r\right)\end{aligned}\qquad(۷)$$

که در آن I_n ممان اینرسی ناسل حول محورهای دستگاه (A,B,C)می‌باشد و $T_{n\to s}$ ماتریس انتقال از (A,B,C) به (x_s,y_s,z_s)می‌باشد که دستگاه (A,B,C) به اندازه β حول محور z دستگاه (x_s,y_s,z_s) دوران می‌کند و به صورت رابطه (۸) محاسبه می‌گردد.

$$T_{n\to s}=T_{R\to s}=\begin{pmatrix}\cos\beta & -\sin\beta & 0\\ \sin\beta & \cos\beta & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\qquad(۸)$$

سرعت زاویه‌ای ناسل در دستگاه مختصات (A,B,C)، $\vec{\omega}_n$ ، ابتدا در دستگاه (x_t,y_t,z_t) محاسبه می‌گردد سپس به (A,B,C) منتقل می‌شود. که در آن $T_{T\to n}$ ماتریس انتقال از (x_t,y_t,z_t) به (A,B,C) می‌باشد که برابر است با معکوس ماتریس $T_{n\to s}$. بردار $\vec{\omega}_{yaw}$ سرعت زاویه‌ای ناسل حول z_t می‌باشد یعنی $\vec{\omega}_{yaw}=\left(0,0,\omega_{yaw}\right)$.

$$\vec{\omega}_n=T_{T\to n}\left(\vec{\omega}_T+\vec{\omega}_{yaw}\right)\qquad(۹)$$

همچنین $\vec{\omega}_r$ از رابطه (۱۰) بدست می‌آید.

$$\vec{\omega}_r=\left(\vec{\omega}_n+\dot{\vec{\psi}}\right)\qquad(۱۰)$$

که در آن $\dot{\vec{\psi}}$ سرعت زاویه‌ای روتور حول جهت مثبت محور B می‌باشد، یعنی $\dot{\vec{\psi}}=\left(0,\dot{\psi},0\right)$.

در این پژوهش، $\sum\vec{F}$ موجود در معادله (۳) ، مجموع تمام نیروهای وارده بر سازه می‌باشد که در دستگاه اینرسی (X,Y,Z) محاسبه می‌شود و $\sum\vec{M}$ ، گشتاورِ مربوط به تمام نیروهای مذکور حول مرکز جرم کلی سیستم می‌باشد که در دستگاه واسطه (x_s,y_s,z_s) محاسبه می‌گردد. بنابراین ماتریس انتقال، بین این دو دستگاه لازم می‌باشد، که تابعی از زوایای اولر (X_4, X_5, X_6) است، زیرا دستگاه (x_s,y_s,z_s) به موازات (x_t,y_t,z_t) انتخاب شده است. این ماتریس به شکل رابطه (۱۱) بدست می‌آید.

$$T_{s\to I}=T^{T}_{I\to s}=\begin{pmatrix}t_{11} & t_{12} & t_{13}\\ t_{21} & t_{22} & t_{23}\\ t_{31} & t_{32} & t_{33}\end{pmatrix}$$

$$\begin{cases}t_{11}=\cos X_5\cos X_6\\ t_{12}=-\cos X_5\sin X_6\\ t_{13}=\sin X_5\\ t_{21}=\cos X_4\sin X_6+\sin X_4\sin X_5\cos X_6\\ t_{22}=\cos X_4\cos X_6-\sin X_4\sin X_5\sin X_6\\ t_{23}=-\cos X_5\sin X_4\\ t_{31}=\sin X_4\sin X_6-\cos X_4\sin X_5\cos X_6\\ t_{32}=\sin X_4\cos X_6+\cos X_4\sin X_5\cos X_6\\ t_{33}=\cos X_4\cos X_5\end{cases}\qquad(۱۱)$$

۲-۳- نیروی شناوری

نیروی شناوری لحظه‌ای یک استوانه شناور در دستگاه مختصات اینرسی از رابطه (۱۲) به دست می‌آید[۹].

$$\vec{F}^{I}_{B}=(0,0,\rho g\pi r^2h_1)\qquad(۱۲)$$

که درآن ρ چگالی آب دریا، g شتاب جاذبه، r شعاع استوانه و h_1 طول قسمتی از استوانه است که در داخل آب قرار می‌گیرد و به صورت رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود[۹].

$$h_1=\frac{\rho_{G_M/O}-X_3}{\cos X_4\cos X_5}-\rho_{G_M/O}+h_0\qquad(۱۳)$$

$\rho_{G_M/O}$ فاصله مرکز جرم کلی سیستم تا سطح آب در حالت تعادل اولیه می‌باشد و h_0 نیز مقدار اولیه h_1 می‌باشد. مرکز شناوری استوانه‌ای که سطح آب را با زاویه‌ای نسبت به آن قطع کرده، در دستگاه (x_s,y_s,z_s)برابر است با $\vec{\rho}_{B/G_s}$ که به صورت رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد[۹].

$$\vec{\rho}_{B/G_s}=\left(X^B_S,Y^B_S,Z^B_S\right)=$$
$$\left(-\frac{t_{31}r^2}{4t_{33}h_1},-\frac{t_{32}r^2}{4t_{33}h_1},-h_G+\frac{h_1}{2}+\frac{r^2\left(t^2_{31}+t^2_{32}\right)}{8t^2_{33}h_1}\right)\qquad(۱۴)$$

که h_G فاصله قسمت تحتانی استوانه تا مرکز جرم سیستم در امتداد محور استوانه می‌باشد. برای بدست آوردن گشتاور شناوری در دستگاه (x_s,y_s,z_s)از رابطه (۱۵) استفاده می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.5.4]

$$\vec{M}_B^S = \vec{\rho}_{B/G_s} \times \vec{F}_B^S \quad , \quad \vec{F}_B^S = T_{I\to s}\vec{F}_B^I \tag{۱۵}$$

۲-۴- نیروی خطوط مهاری

در مدل‌سازی توربین بادی شناور، کابل‌های مهاری به صورت یک فنر خطی در نظر گرفته می‌شوند که نیروی اعمالی هر خط مهاری به سازه با جابجایی سازه رابطه مستقیم دارد و طبق رابطه (۱۶) به دست می‌آید[۹].

$$\begin{cases} \vec{F}_{line}^I = \left[T_0 + K\left(\rho_{E/A} - L\right)\right]\dfrac{\vec{\rho}_{E/A}}{\rho_{E/A}} \\ \vec{M}_{line}^S = \vec{\rho}_{A/G_S} \times \vec{F}_{line}^S \quad , \quad \vec{F}_{line}^S = T_{I\to s}\vec{F}_{line}^I \end{cases} \tag{۱۶}$$

در رابطه (۱۶)، T_0 کشش اولیه کابل، L طول اولیه کابل، K ضریب فنریت کابل و $\rho_{E/A}$ طول کابل در هر لحظه می‌باشد به طوری که A محل اتصال هرکدام از کابل‌ها به سازه می‌باشد و E نقطه اتصال کابل‌ها به کف دریا می‌باشد.

۲-۵- نیروی باد

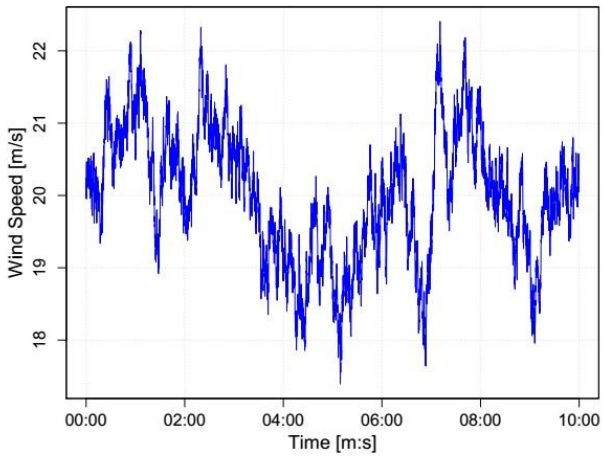
نیروی باد در دستگاه اینرسی اولیه و گشتاور آن حول (G_s) در دستگاه (x_s, y_s, z_s)، در معادلات حرکت سیستم لازم می‌باشد. برای سادگی نیروی باد را برای تمام سطح پره‌ها که عمود بر جریان می‌باشد محاسبه می‌کنیم. لازم به ذکر است که از نیروی باد وارد بر بدنه توربین بادی صرف نظر می‌شود[۹].

$$F_b = \frac{1}{2} C_T \rho_a A_b V_{rb}^2 \tag{۱۷}$$

که در آن ρ_a چگالی هوا، A_b سطح روبروی پره‌ها یا سطح عمود بر جهت جریان، C_T ضریب تراست و V_{rb} اندازه سرعت باد نسبت به سرعت RNA در جهت محور B می‌باشد. باد در جو زمین همواره توربولانت است و این بدین معنی است که باد جریانی نامنظم، با دوره تناوب‌های متغیر از چند ثانیه تا چند دقیقه می‌باشد. پس برای توصیف این جریان، روش‌های آماری مورد نیاز است[۱۳]. برای توصیف سرعت باد از اسپکتروم کیمال[۹]، که تقریبی ساده از مدل باد واقعی است استفاده می‌گردد. اسپکتروم کیمال به شکل رابطه (۱۸) می‌باشد[۱۴].

$$S_{uu}(f) = u_*^2 \frac{52.5z/U}{\left(1+33n\right)^{5/3}} \tag{۱۸}$$
$$n = f\,z/U$$

که z نشانگر ارتفاع مورد نظر، U نشانگر سرعت میانگین و u_* بیانگر سرعت اصطکاکی[۱۰] میباشد. با تبدیل اسپکتروم کیمال به سری زمانی، سرعت باد به صورت پدیده‌ای تصادفی به‌دست می‌آید. شکل ۳ نمونه‌ای از باد سرعت باد تولید شده با میانگین ۲۰ m/s را نشان می‌دهد.



شکل ۳ – نمونه‌ای از سرعت باد تولید شده با اسپکتروم کیمال[۱۴].

لازم به ذکر است که در این پژوهش از سرعت میانگین ۸ m/s استفاده شده است و C_T =۰/۹ فرض شده است[۹]. فرم برداری نیروی باد و گشتاور حاصل از آن به شکل رابطه (۱۹) خواهد بود.

$$\vec{F}_{wind}^I = T_{R\to I}\vec{F}_{wind}^R \quad , \quad \vec{F}_{wind}^R = \left(0, -F_b, 0\right)$$
$$\vec{M}_{wind}^S = \vec{r}_{G_R/G_s} \times \vec{F}_{wind}^R \tag{۱۹}$$

که در رابطه فوق $\vec{r}_{G_R/G_s}$، بردار واصل مرکز جرم سیستم به مرکز جرم RNA است.

۲-۶- نیروی موج

شرایط دریا بایستی با چند مشخصه که عبارتند از ارتفاع موج، پریود موج، جهت موج و سطح آب توصیف شود، زیرا آن‌ها پارامترهایی هستند که مهم‌ترین تاثیرات را بر روی سازه می‌گذارند. از سایر مشخصه‌های تاثیرگذار می‌توان به زمان پایداری شرایط دریا و شکل اسپکتروم موج اشاره کرد[۱۵]. نیروی موج در دستگاه اینرسی اولیه محاسبه می‌شود و برای محاسبه گشتاور نیروی موج، به دستگاه مختصات متصل به جسم منتقل می‌شود. برای محاسبه نیروی موج از معادله موریسن -رابطه (۲۰) - که به ازای واحد طول سازه می‌باشد، استفاده می‌گردد[۹].

$$\vec{f}_n^I = C_m \rho \frac{\pi}{4} D^2 \dot{\vec{V}}_n - C_a \rho \frac{\pi}{4} D^2 \dot{\vec{V}}_t + \frac{1}{2}\rho C_d D \vec{V}_{rt}\left|\vec{V}_{rt}\right| \tag{۲۰}$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.5.4]

در این رابطه، ρ چگالی آب دریا، D قطر استوانه قائم داخل آب، C_m ضریب اینرسی، C_a ضریب جرم افزوده[۱۱] و C_d ضریب دراگ[۱۲] می‌باشد. همچنین $\dot{\vec{V}}_n$ مولفه نرمال شتاب موج، $\dot{\vec{V}}_t$ مولفه نرمال شتاب سازه، $\vec{V}_{rt}$ مولفه نرمال سرعت ذرات آب دریا نسبت به استوانه می‌باشد. برای توصیف حرکت ذرات آب ناشی از امواج اقیانوس با شدت و پیچیدگی مختلف، تعدادی نظریه موج منظم توسط انجمن مهندسی دریا، توسعه یافته‌است. که شامل نظریه‌های موج خطی یا موج ایری[۱۳]، نظریه استوکس[۱۴] مرتبه دو یا مرتبه بالاتر، تابع جریان[۱۵] و نظریه اسنویدل[۱۶] می‌باشد[۱۶]. حالت نسبتاً نامنظم دریا به همراه شرایط طوفانی، اغلب با ترکیب امواج ایری مدل‌سازی می‌شود. در پژوهش حاضر برای مدل کردن سرعت و شتاب ذرات از طیف JONSWAP استفاده می‌شود که توسط استاندارد IEC61400-3 طراحی شده است[۱۷]. شکل ساده شده طیف JONSWAP به فرم رابطه (۲۱) می‌باشد.

$$S(f)=\alpha {H_s}^2 f_p^4 f^{-5}\gamma^{\beta}\exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right) \qquad (۲۱)$$

در رابطه (۲۱) H_s ارتفاع موج، f_p فرکانس غالب موج و γ ضریب شکل موج مرتبط با وضعیت دریا می‌باشد. در پژوهش حاضر، برای مدل کردن موج دریا از ارتفاع موج ۵ m و فرکانس غالب ۰/۱ Hz استفاده می‌گردد همچنین C_m=۲، C_a=۱ و C_d=۰/۶ در نظر گرفته می‌شود. در نهایت سرعت و شتاب موج با تئوری موج نامنظم به شکل رابطه (۲۲) محاسبه می‌گردد که سرعت ذرات آب در راستای موج $u(x,t)$ و در راستای عمود بر موج $v(x,t)$ می‌باشد.

$$\begin{cases} u(z,t)=\sum_{i=1}^{N}\left\{\omega_i\dfrac{\cosh(\kappa_i(z+h))}{\sinh(\kappa_i h)}a_i\sin\left(\omega_i t+\phi_i\right)\right\} \\ v(z,t)=\sum_{i=1}^{N}\left\{\omega_i\dfrac{\sinh(\kappa_i(z+h))}{\sinh(\kappa_i h)}a_i\cos\left(\omega_i t+\phi_i\right)\right\} \\ \dot{u}(z,t)=\sum_{i=1}^{N}\left\{\omega_i^2\dfrac{\cosh(\kappa_i(z+h))}{\sinh(\kappa_i h)}a_i\cos\left(\omega_i t+\phi_i\right)\right\} \\ \dot{v}(z,t)=\sum_{i=1}^{N}\left\{-\omega_i^2\dfrac{\sinh(\kappa_i(z+h))}{\sinh(\kappa_i h)}a_i\sin\left(\omega_i t+\phi_i\right)\right\} \end{cases} \qquad (۲۲)$$

در رابطه فوق، $a_i=\sqrt{2S(f_i)\Delta f}$ دامنه موج نامنظم، Δf بازه فرکانسی، N تعداد نمونه فرکانسی، $\omega_i=2\pi f_i$ فرکانس زاویه‌ای موج، Φ_i زاویه اتفاقی بین صفر و π۲، z فاصله از سطح متوسط آب و h عمق آب می‌باشد[۱۵].

در نهایت نیروی موج بر روی سازه، $\vec{F}^{I}_{wave}$، با جمع نیروها بر هر المان سازه بدست می‌آید و گشتاور موج با انتقال نیروی بدست آمده از معادله (۲۰) به دستگاه (x_s,y_s,z_s) و انتگرال‌گیری در طول سازه مطابق رابطه (۲۳) قابل حصول است.

$$\begin{aligned} \vec{F}^{I}_{wave} &= \int_z \vec{f}_n^{\,I}\,dz \\ \vec{M}^{s}_{wave} &= \int_z\left(\vec{\rho}_{i/G_s}\times(T_{I\to s}\vec{f}_n^{\,I})\right)dz \\ \vec{\rho}_{i/G_s} &= (0,0,z) \end{aligned} \qquad (۲۳)$$

۳ – مشخصات توربین بادی شناور

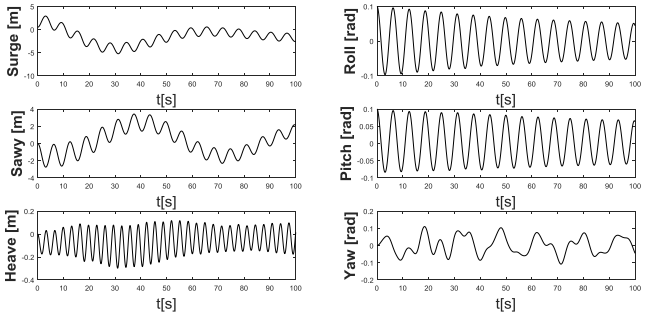
در این پژوهش مشخصات توربین از استاندارد توربین NREL 5MW گرفته می‌شود[۱۸]. همچنین از بین پایه‌های شناوری که برای توربین بادی شناور طراحی شده‌اند، پایه TLP که قابلیت نگهداری توربین NREL 5MW را دارد، انتخاب می‌گردد[۱۹]. بخش زیرین بدنه‌ی توربین که روی بالاترین نقطه پایه است، به اندازه ۱۰ متر بالاتر از سطح آب ساکن (SWL)[۱۷] و بخش فوقانی آن به اندازه ۸۷/۶ متر بالاتر از سطح آب قرار گرفته است[۲۰]. مجموعه RNA نیز بر پایه مدل OC3-Hywind می‌باشد که در آن ممان اینرسی RNA حول محورهای مختصات اصلی آن (A,B,C) برابر است با: $I_A=2.35\times10^7\ kg.m^2$، $I_B=4.37\times10^7\ kg.m^2$، $I_C=2.54\times10^7\ kg.m^2$. سرعت زاویه‌ای روتور ۱۲/۱ rpm بوده و ثابت فرض می‌شود. از دوران ناسل صرف‌نظر شده و زاویه β صفر در نظر گرفته می‌شود. جرم ناسل ۱۱۰۰۰۰ کیلوگرم، جرم روتور ۲۴۰۰۰۰ کیلوگرم و جرم هاب ۵۶۷۸۰ کیلوگرم می‌باشد[۹]. پایه شناور TLP از یک استوانه پهن با ۴ اسپوک[۱۸] (پره) برای نگه داشتن خطوط مهاری تشکیل یافته است. قطر استوانه پایه ۱۸ متر بوده و به اندازه‌ی ۴۷/۸۹ متر داخل آب قرار دارد. ضخامت آن ۰/۰۱۵ متر می‌باشد. تا ارتفاع ۱۲/۶ متری از کف پایه، بالاست به آن اضافه شده است [۱۹]. عامل پایداری در پایه TLP کشش در خطوط مهاری می‌باشد. بنابراین خطوط مهاری در این پایه از اهمیت بسزایی برخوردار است. به گونه‌ای که ۸ کابل در این پایه وجود دارد، که به صورت دوتایی در هر کدام از اسپوک‌ها وصل شده‌اند. این کابل‌ها با زاویه‌ی ۹۰ درجه ، مستقیم به کف دریا متصل گردیده‌اند. عمق آب در چنین سازه‌هایی ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده است. ضریب فنریت هر کدام از کابل‌ها $9/89\times10^6$ N/m می‌باشد و طول اولیه هر کابل ۱۵۲/۱۱ متر در نظر گرفته می‌شود[۱۹].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.5.4]

۴ – صحه‌سنجی مدل‌سازی

ابتدا ارتعاشات آزاد توربین بادی شناور با در نظر گرفتن مقاوت باد بر روی پره‌ها و مقاومت آب دریا بر پایه سازه و بدون اعمال نیروهای موج و باد مورد بررسی قرار گرفته و فرکانس‌های طبیعی استخراج می‌گردد. با مقایسه این فرکانس‌ها با فرکانس‌های موجود در ادبیات فن، صحت مدل تایید می‌گردد[۱۹]. شکل ۴ ارتعاشات آزاد توربین بادی شناور با پایه TLPرا نشان می‌دهد.



شکل ۴- ارتعاشات آزاد توربین بادی شناور با پایه TLP

با استفاده از طیف فرکانسی ارتعاشات آزاد سیستم، فرکانسهای طبیعی سیستم در مودهای مختلف مشخص می‌گردد. در جدول ۱ مقایسه‌ای میان فرکانسهای طبیعی حاصل از شبیه‌سازی با فرکانس های مرجع [۱۹] صورت گرفته است.

جدول ۱- فرکانس‌های طبیعی توربین بادی شناور با پایه TLP

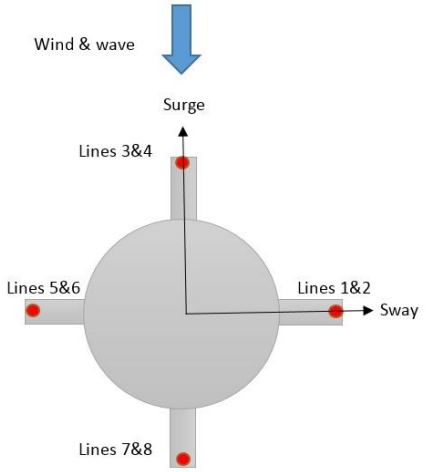
مود	فرکانسهای طبیعی حاصل از شبیه‌سازی [Hz]	فرکانس های طبیعی مرجع [۱۹] [Hz]
Surge	۰/۰۱۴	۰/۰۱۶
Sway	۰/۰۱۵	۰/۰۱۶
Heave	۰/۳۰۸	۰/۴۳۷
Roll	۰/۱۶۱	۰/۲۲۲
Pitch	۰/۱۶۱	۰/۲۲۱
yaw	۰/۰۶۳	۰/۰۹۷

با مقایسه فرکانس‌های طبیعی حاصل از شبیه سازی با مرجع [۱۹] مشاهده می‌گردد که شبیه‌سازی دقت قابل قبولی دارد و تفاوت‌های موجود در فرکانس‌های طبیعی می‌تواند ناشی از متفاوت بودن شیوه مدل سازی و نیروهای اعمالی باشد. به عبارت دقیق‌تر، به علت استفاده از معادله موریسون در کار حاضر، نیروی میرا کننده موج در درجات آزادی رول(Roll)، پیچ(Pitch)، یاو(Yaw) و بخصوص هیو(Heave) مدل نشده است، از این رو اختلاف در فرکانس های طبیعی با مرجع مذکور امری غیر قابل اجتناب است.

پس از اطمینان از صحت مدل‌سازی، ارتعاش اجباری سیستم با وجود باد و موج دریا و قطع‌شدگی کابل‌ها بررسی می‌گردد. لازم به ذکر است که جهت نیروی موج و باد ثابت بوده و در خلاف جهت مثبت Surge در حالت ساکن توربین فرض می‌شود.

۵ – بررسی تاثیر قطع‌شدگی کابلهای مهاری

با اطمینان یافتن از صحت مدل‌سازی، با ایجاد قطع‌شدگی در کابل‌های مهاری سازه، تاثیرات قطع‌شدگی در پاسخ دینامیکی سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۵ موقعیت هر یک از خطوط مهاری با شماره‌گذاری مشخص شده است.



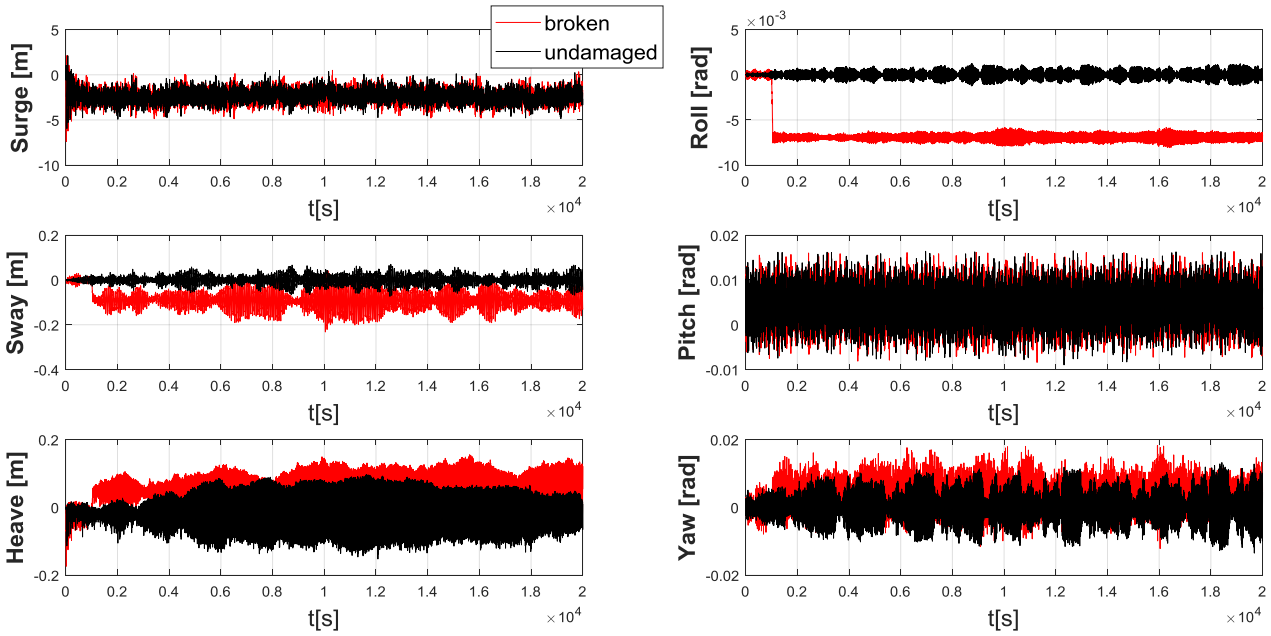
شکل ۵ - شماره گذاری و نحوه اتصال کابل‌ها به پایه TLP در حالت ساکن

شبیه‌سازی قطع‌شدگی کابل‌ها بدین صورت خواهد بود که کابل‌ها ابتداء به صورت سالم خواهند بود و در یک زمان مشخص یکی از کابل‌ها قطع می‌گردد. قطع‌شدگی تصنعی هر کابل، با صفر قرار دادن نیروی متناظر با آن کابل حاصل می‌گردد. در این بخش، یکی از حالت‌ها با شکل شرح داده می‌شود و نتایج سایر حالات در جداولی آورده می‌شود. با ایجاد قطع‌شدگی در کابل شماره ۱ در ثانیه ۱۰۰۰ شبیه‌سازی، تغییرات در پاسخ دینامیکی مطابق شکل ۶ قابل مشاهده است.

در شکل ۶ لحظه قطع‌شدگی کابل شماره ۱، در ثانیه ۱۰۰۰ قابل مشاهده است. به دلیل قرار گرفتن کابل شماره ۱ در راستای Sway، قطع شدن این کابل تاثیر زیادی در این مود دارد. چون کابل در جهت مثبت قطع شده است، مشاهده می‌گردد که سازه در راستای Sway به سمت عکس قطع‌شدگی متمایل می‌گردد و پاسخ Roll سازه نیز در قسمت منفی قرار می‌گیرد که این نشانگر درست بودن مدل‌سازی می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که با قطع شدن کابل، سازه اندکی بالاتر می‌رود. نتایج آماری قطع شدگی کابل شماره ۱ به شرح جدول ۲ می‌باشد. لازم به ذکر است که کلیه نتایج آماری بعد از پایدار شدن پاسخ‌ها و از ثانیه ۵۰۰۰ ام تا ۲۰۰۰۰ ام به بعد محاسبه شده‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.5.4]

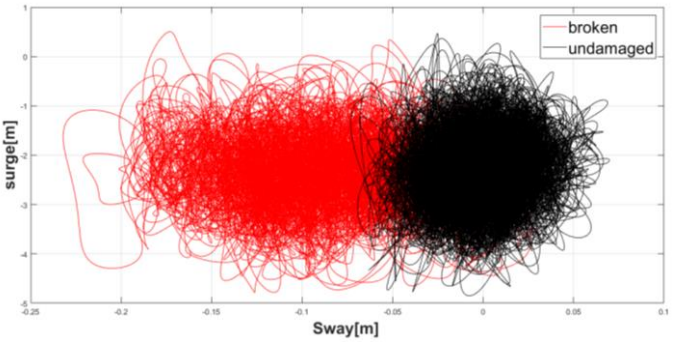


شکل ۶ - پاسخ سازه TLP در حالت سالم و قطع شدگی کابل شماره ۱

جدول ۲- نتایج آماری قطع شدگی کابل شماره ۱ در سازه TLP

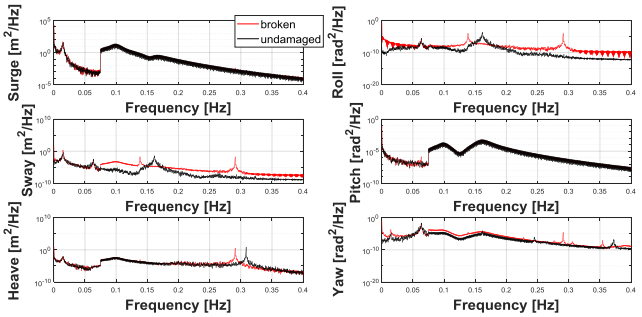
		بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار
Surge [m]	سالم	۰/۴۶۴۴	-۴/۸۵۰۰	-۲/۳۱۴۴	۰/۶۸۴۵
	شکسته	۰/۴۹۸۵	-۴/۸۶۰۷	-۲/۳۴۹۸	۰/۶۹۰۵
Sway [m]	سالم	۰/۰۶۹۸	-۰/۰۷۳۱	-۶/۶۱e $^{-۴}$	۰/۰۲۱۰
	شکسته	۰/۰۴۰۶	-۰/۲۳۲۱	-۰/۰۹۱۷	۰/۰۴۱۷
Heave [m]	سالم	۰/۰۹۶۹	-۰/۱۵۲۴	-۰/۰۱۷۷	۰/۰۵۲۷
	شکسته	۰/۱۵۳۳	-۰/۰۷۳۶	۰/۰۴۹۱	۰/۰۴۲۳
Roll [rad]	سالم	۰/۰۰۱۲	-۱/۰۰e $^{-۶}$	-۱/۰۰e $^{-۶}$	۴/۷۷e $^{-۴}$
	شکسته	-۰/۰۰۵۸	-۰/۰۰۶۹	-۰/۰۰۶۹	۳/۲۰e $^{-۴}$
Pitch [rad]	سالم	۰/۰۱۶۵	-۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۳۷
	شکسته	۰/۰۱۶۴	-۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۳۷
Yaw [rad]	سالم	۰/۰۱۳۲	-۰/۰۱۳۵	-۵/۰۰e $^{-۶}$	۰/۰۰۴۶
	شکسته	۰/۰۱۸۳	-۰/۰۱۲۲	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۴۲

نتایج توضیح داده شده برای شکل ۶ در جدول ۲ نیز قابل مشاهده است. به طور مثال سازه در Sway و در حالت سالم از حدود ۰ متر به ۰/۰۹- متر انتقال یافته است. این جابجایی به طور ملموس‌تر در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۷- جابجایی سازه TLP در اثر قطع شدن کابل شماره ۱

با بررسی نتایج فوق، می‌توان گفت که قطع شدن کابل شماره ۱ تاثیر شدیدی بر پایداری سازه نخواهد داشت و تنها موجب جابجایی اندک سازه و افزایش اندک دامنه نوسانات خواهد شد. همچنین این قطع‌شدگی می‌تواند بر روی فرکانس‌های غالب سازه اثر بگذارد (شکل ۸) که باید در طراحی سازه ای توربین مورد بررسی قرار بگیرد.



شکل ۸ - اسپکتروم پاسخ توربین در دو حالت سالم و قطع‌شدگی کابل شماره ۱

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.5.4]

با بررسی فرکانسی سازه، مشاهده می‌شود که با قطع‌شدگی کابل شماره ۱، در برخی از مودها فرکانس‌های غالب افزایش یافته است. به دلیل حجیم بودن، سایر نتایج به صورت جدولی و فقط در مودهای Surge و Sway آورده شده‌اند که در ادامه قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۳- مشخصات پاسخ Surge سازه در اثر قطع شدگی کابل ها

		بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار
Surge [m]	سالم	۰/۴۶۴۰	-۴/۸۵۰۰	-۲/۳۱۴۰	۰/۶۸۴۰
	کابل ۱	۰/۴۹۸۰	-۴/۸۶۱۰	-۲/۳۵۰۰	۰/۶۹۱۰
	کابل ۱ و ۲	۰/۱۹۰۰	-۵/۰۲۶۰	-۲/۳۹۲۰	۰/۶۹۴۰
	کابل ۳	۰/۵۸۸۰	-۴/۹۲۴۰	-۲/۴۵۵۰	۰/۷۰۶۰
	کابل ۳ و ۴	۰/۰۶۸۰	-۶/۰۱۶۰	-۲/۷۸۱۰	۰/۸۹۲۰
	کابل ۵	۰/۱۰۵۰	-۴/۹۰۴۰	-۲/۳۷۴۰	۰/۶۹۵۰
	کابل ۵ و ۶	۰/۱۹۵۰	-۵/۰۳۴۰	-۲/۳۹۱۰	۰/۶۹۴۰
	کابل ۷	۰/۲۵۹۰	-۴/۸۶۷۰	-۲/۲۶۸۰	۰/۷۱۰۰
	کابل ۷ و ۸	۰/۹۴۲۰	-۵/۰۲۴۰	-۱/۸۸۷۰	۰/۸۷۵۰

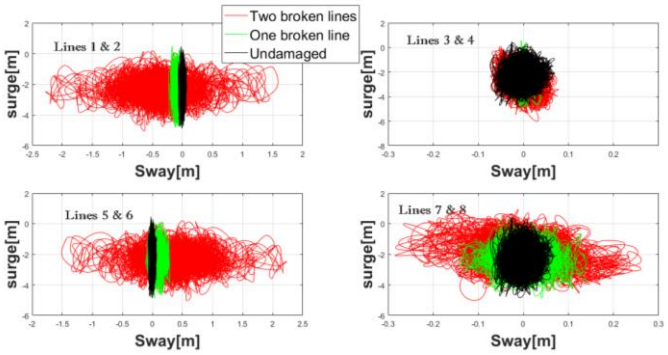
با توجه به جدول ۳، مشاهده می‌شود که قطع شدگی کابل‌ها تاثیر شدیدی بر پاسخ دینامیکی سازه در راستای Surge نخواهد داشت و حتی بیشترین جابجایی و دامنه که مربوط به قطع‌شدگی جفت کابل شماره ۳ و ۴ می‌باشد، تفاوت چندان زیادی با حالت سالم کابل‌ها ندارد. یکی از دلایلی که می‌توان برای این پاسخ برشمرد غالب بودن نیروی موج و باد در راستای Surge می‌باشد.

در جدول ۴ تقارن سازه نسبت به راستای Surge مشخص می‌گردد به طوری که میانگین پاسخ Sway در قطع‌شدگی کابل‌های ۱ و ۲ قرینه میانگین پاسخ Sway در قطع‌شدگی کابل‌های ۵ و ۶ می‌باشد. همچنین انحراف معیار در قطع‌شدگی‌های فوق تقریبا یکسان می‌باشد و این را می‌توان به عنوان یکی دیگر از دلایل صحت مدل‌سازی برشمرد.

جدول ۴- مشخصات پاسخ Sway سازه در اثر قطع شدگی کابل ها

		بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار
Sway [m]	سالم	۰/۰۷۰۰	-۰/۰۷۳۰	$-1/00e^{-2}$	۰/۰۲۱۰
	کابل ۱	۰/۰۴۱۰	-۰/۲۳۲۰	-۰/۰۹۲۰	۰/۰۴۲۰
	کابل ۱ و ۲	۱/۷۰۸۰	-۲/۳۶۲۰	-۰/۳۷۶۰	۰/۴۹۲۰
	کابل ۳	۰/۰۵۶۰	-۰/۰۵۶۰	۰	۰/۰۱۳۰
	کابل ۳ و ۴	۰/۰۹۲۰	-۰/۱۰۱۰	-۰/۰۰۳۰	۰/۰۲۹۰
	کابل ۵	۰/۲۸۷۰	-۰/۱۱۵۰	۰/۰۹۰۰	۰/۰۵۵۰
	کابل ۵ و ۶	۲/۳۴۸۰	-۱/۷۰۲۰	۰/۳۷۵۰	۰/۴۸۸۰
	کابل ۷	۰/۱۴۱۰	-۰/۱۴۷۰	$-1/00e^{-2}$	۰/۰۴۰۰
	کابل ۷ و ۸	۰/۲۶۱۰	-۰/۲۸۵۰	-۰/۰۰۳۰	۰/۰۷۶۰

یکی از عمده‌ترین دلایل بررسی قطع‌شدگی کابل توربین بادی شناور، بررسی میزان جابجایی در اثر این قطع‌شدگی می‌باشد. شکل ۹ میزان جابجایی‌ها و جدول ۵ اطلاعات آماری را در صورت قطع شدن کلیه خطوط نشان می‌دهد.



شکل ۹ - میزان جابجایی های سازه در اثر قطع شدن خطوط مهاری

جدول ۵ - اطلات آماری از میزان جابجایی سازه TLP در اثر قطع شدن کابل‌های مهاری

	میانگین Surge [m]	میانگین Sway [m]	جابجایی [m]	بیشینه دامنه حرکتی [m]	میانگین دامنه حرکتی [m]	انحراف معیار دامنه حرکتی [m]
سالم	-۲/۳۱۴۴۱	-۰/۰۰۰۶۶	-	۲/۷۷۸۹۰	۰/۵۴۸۵۵	۰/۴۰۹۸۸
کابل ۱	-۲/۴۳۹۷۸	-۰/۰۹۱۷۱	۰/۰۹۷۶۷	۲/۸۴۹۴۱	۰/۵۵۴۷۲	۰/۴۱۳۳۱
کابل ۱ و ۲	-۲/۳۹۱۷۴	-۰/۳۷۵۷۸	۰/۳۸۳۰۱	۲/۶۴۶۹۹	۰/۷۳۸۶۳	۰/۴۲۱۹۱
کابل ۳	-۲/۴۵۵۴۹	-۰/۰۰۰۴۶	۰/۱۴۱۰۷	۳/۰۴۳۹۰	۰/۵۶۴۴۵	۰/۴۲۴۷۲
کابل ۳ و ۴	-۲/۷۸۱۱۱	-۰/۰۰۳۱۲	۰/۴۶۶۷۰	۳/۲۳۴۷۱	۰/۷۲۴۳۵	۰/۵۲۱۴۵
کابل ۵	-۲/۳۷۴۴۱	۰/۰۹۰۲۸	۰/۱۰۸۹۴	۲/۵۲۹۹۶	۰/۵۶۳۶۷	۰/۴۱۰۸۰
کابل ۵ و ۶	-۲/۳۹۱۲۵	۰/۳۷۵۳۷	۰/۳۸۳۸۰	۲/۶۴۹۹۶	۰/۷۳۷۹۲	۰/۴۱۷۹۰
کابل ۷	-۲/۲۶۸۲۷	-۰/۰۰۱۴۲	۰/۰۴۶۱۴	۲/۵۹۸۷۷	۰/۵۷۵۲۰	۰/۴۱۸۸۷
کابل ۷ و ۸	-۱/۸۸۷۰۰	-۰/۰۰۲۵۶	۰/۴۲۷۴۲	۳/۱۳۸۷۱	۰/۷۱۶۹۰	۰/۵۰۷۸۱

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-20]

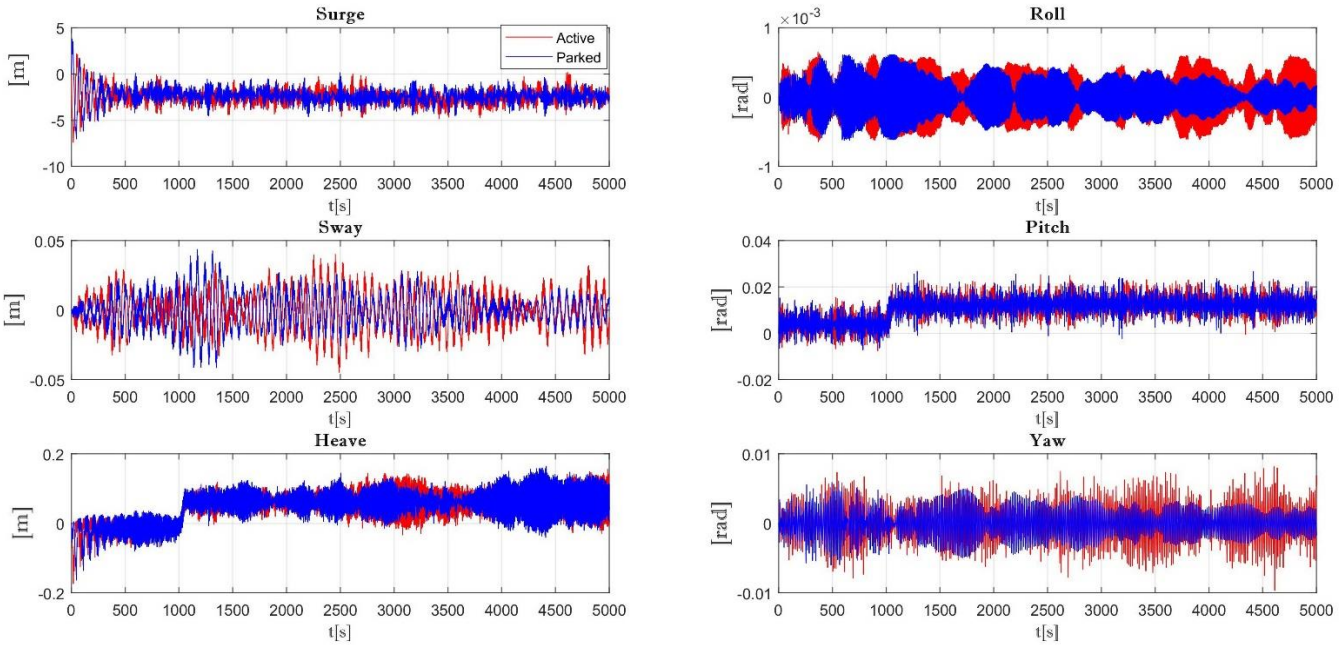
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.5.4]

با مشاهده شکل ۹و جدول ۵، میزان جابجایی سازه در هنگام قطع شدگی کابل‌ها مشخص می‌گردد. بحرانی‌ترین جابجایی مربوط به قطع‌شدگی کابل‌های شماره ۳ و ۴ می‌باشد که این میزان ۰/۴۶ متر می‌باشد. همان طوری که در جدول ۵ مشاهده می‌گردد، قطع‌شدگی کابل‌ها در توربین بادی شناور با پایه TLP، منجر به جابجایی شدید توربین بادی نمی‌گردد و از این جهت برای توربین‌های بادی مجاور خطری محسوب نمی‌گردد ولی ممکن است افزایش دامنه نوسانات منجر به عملکرد نامناسب توربین در تولید الکتریسیته گردد. همچنین افزایش دامنه نوسانات می‌تواند باعث کاهش عمر سایر کابل‌ها نیز گردد و پس از مدتی موجب شکستی آنها و عدم پایداری توربین گردد.

یکی از کارهای ساده برای کاهش دامنه حرکتی توربین‌های شناور در هنگام قطع‌شدگی کابل‌های مهاری، خاموش‌کردن توربین یا در حالت پارک قرار دادن توربین می‌باشد، زیرا طبق رابطه (۷)، خاموش شدن توربین باعث کاهش مومنتوم زاویه‌ای RNA می‌شود. کاهش مومنتوم زاویه‌ای RNA اگر چه باعث کاهش نوسانات می گردد ولی در سازه TLP به علت کوچک بودن دامنه نوسانات، این تغییرات چشمگیر نخواهند بود، اما در سازه هایی نظیر Spar که دامنه نوسانات بسیار بالاتری را نسبت به سازه TLP دارند، خاموش کردن توربین یا در حالت پارک قرار دادن آن تغییر قابل توجهی را در دامنه حرکتی پاسخ سازه ایجاد می‌کند. شکل ۱۰ نشان‌گر پاسخ دینامیکی توربین با پایه TLP به هنگام قطع شدن کابل مهاری در دو حالت فعال و خاموش شدن توربین پس از قطع‌شدگی کابل مهاری می‌باشد. لازم به ذکر است که در شکل شماره ۱۰، پاسخ توربین در دو حالت فعال و خاموش در هنگام قطع‌شدگی کابل مهاری شماره ۳ نشان داده شده است. با مشاهده شکل ۱۰، مشخص می‌گردد که اثر خاموش شدن توربین بر روی سازه TLP به دلیل پایین بودن دامنه نوسانات چندان زیاد نمی‌باشد.

۶ – نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، توربین بادی شناور با معادلات غیرخطی به صورت دقیق مدل‌سازی گردید به طوری که این مدل‌سازی برای زوایای انحراف بزرگ سازه جواب‌گو باشد. در کارهای قبلی نوسانات کوچک در نظر گرفته شده بود، در حالی که در کار حاضر با توجه به اینکه به علت وجود پارگی در کابلها احتمال ایجاد نوسانات بزرگ وجود دارد، یک روش مدل سازی بر پایه دینامیک سیستم های چند جزئی (Multibody Dynamics) که بتواند با معادلات دقیق‌تر، نوسانات بزرگ را پیش‌بینی نماید، پیشنهاد گردید. به طوری که با فرض نوسانات بزرگ برای سازه، عدم قطعیت مرتبط با غیرخطینگی تا حدودی مرتفع گردید. همچنین در کار حاضر با توجه به اینکه ثابت در نظر گرفتن نیروهای اعمالی، باعث عدم قطعیت بسیار در شکل موج و باد اعمالی به سازه می‌شد، با تصادفی در نظر گرفتن این نیروها تا حدودی سعی شد که از این عدم قطعیت نیز کاسته شود. بعلاوه برای مدل کردن اثر موج از معادله موریسون استفاده گردید (همانند بیشتر منابع موجود). با استخراج معادلات حرکتی سیستم و تبدیل معادلات به فرم مناسب برای حل در نرم‌افزار MATLAB می‌توان پدیده‌های مختلف را بر روی سیستم آزمایش کرد. در این پژوهش، تغییرات پاسخ دینامیکی توربین بادی شناور در پلتفرم TLP در اثر قطع‌شدگی کابلها مورد بررسی قرار گرفت که نتایج کلی آن به شرح زیر است:



شکل ۱۰ – پاسخ توربین در دو حالت فعال و خاموش شده در هنگام قطع‌شدگی کابل مهاری شماره ۳

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.5.4]

- در پلتفرم TLP قطع شدن هیچ یک از خطوط مهاری تاثیرات شدیدی بر روی سازه نخواهد داشت به طوری‌که با قطع شدن هر یک از خطوط مهاری، توربین افزایش دامنه حرکتی و ارتعاشی کمی خواهد داشت. علت کم بودن اثر قطع‌شدگی خطوط مهاری در TLP زیاد بودن تعداد کابل‌های مهاری است به طوری‌که با قطع شدن یکی از خطوط، سایر خطوط مهاری بار خط قطع شده را تحمل می‌کنند.
- بر خلاف سایر پلتفرم‌ها مانند OC4 Semisubmersible که در آن قطع شدگی خطوط مهاری باعث جابجایی‌های بزرگ می‌شود[۸]، قطع شدن خطوط مهاری در توربین با پایه TLP، خطری برای توربین‌های بادی مجاور ندارد زیرا میزان جابجایی توربین بسیار کم می‌باشد.

از کاربردهای این پژوهش می‌توان به بررسی پایداری توربین بعد از قطع‌شدگی کابل‌ها و بررسی میزان جابجایی توربین در یک مزرعه توربین بادی، موقع قطع‌شدگی کابل‌های مهاری اشاره کرد. به دلیل نزدیک بودن توربین‌ها در این مزارع، این نوع بررسی‌ها جهت پیش‌بینی میزان جابجایی توربین‌ها امری ضروری می‌باشد. از جمله پیشنهاداتی که برای ادامه کار مطرح میگردد بهبود مدل کابل ها می‌باشد. همچنین معادله موریسون فاقد میرایی در درجه آزادی Yaw سازه می‌باشد و این مورد نیز به عنوان یکی از نواقص مدل‌سازی مطرح می‌گردد.

کلید واژگان

1- Tower
2- Rotor
3- Nacelle
4- Newton-Euler
5- Euler-Lagrange
6- Tension-leg Platform
7- Tower - Platform Assembly
8- Rotor - Nacelle Assembly
9- Kaimal spectrum
10- Friction velocity
11- Added mass
12- Drag
13- Airy wave theory
14- Stokes
15- Stream-Function
16- Cnoidal
17- Still Water Level
18- Spoke

۷ – مراجع

1- O. Ellabban, H. Abu-Rub, and F. Blaabjerg, (2014). *Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 39, pp. 748–764.
2- K. Kaygusuz, (2009). *Wind power for a clean and sustainable energy future*, Energy Sources, Part B Econ. Plan. Policy, vol. 4, no. 1, pp. 122–133.
3- S. Anderson, (2013). *Comparing Offshore and Onshore Wind II . Economics of Wind Energy*, The Economics of Oil and Energy, pp. 1–6.
4- E. M. Harringer, (2011). *Dynamic analysis of a 5 megawatt offshore floating wind turbine*, Doctoral dissertation, UC San Diego.
5- A. Jamalkia, M. M. Ettefagh, A. Mojtahedi, (2015). *Damage Identification of the Floating Wind Turbine Mooring Line by Fuzzy Classification*, Journal of Marine Engineering., vol. 11.(In Persian)
6- J. S. Han, Y.-J. Son, H. S. Choi, and J. B. Rho, (2011). *The Transient Behavior of Mooring Systems In Line-Broken Condition*, International Society of Offshore and Polar Engineers.
7- A. Jamalkia, M. M. Ettefagh, and A. Mojtahedi, (2016). *Damage detection of TLP and Spar floating wind turbine using dynamic response of the structure*, Ocean Engineering, vol. 125, pp. 191–202.
8- Y. H. Bae, M. H. Kim, and H. C. Kim, (2017). *Performance changes of a floating offshore wind turbine with broken mooring line*, Renewable Energy, vol. 101, pp. 364–375.
9- L. Wang and B. Sweetman, (2012). *Simulation of large-amplitude motion of floating wind turbines using conservation of momentum*, Ocean Engineering, vol. 42, pp. 155–164.
10- J. M. Jonkman and M. L. Buhl Jr, (2005). *FAST User's Guide-Updated August 2005*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO.
11- E. Malayjerdi, A. Ahmadi, and M. R. Tabeshpour, (2016). *Dynamic Analysis of TLP in Intact and Damaged Tendon Conditions*, in The 18th Marine Industries Conference (MIC2016), pp. 18–21.
12- M. Reza, A. Ahmadi, and E. Malayjerdi,(2018). *Investigation of TLP behavior under tendon damage*, Ocean Engineering, vol. 156, no. March, pp. 580–595.
13- Dyrbye and Hansen, (1997). *Wind Loads on Structures*, John Wiley & Sons.
14- E. Branlard, (2010). *Generation of time series from a spectrum*
15- Z. Liu and P. Frigaard, (1999). *Generation and analysis of random waves*, Aalborg Universitet.
16- N. Haritos, (2007). *Introduction to the Analysis and Design of Offshore Structures – An Overview*, Mechanics Based Design of Structures and Machines, vol. 35, no. 4, pp. 333–333.
17- J. M. Jonkman and M. L. Buhl Jr, (2007). *Loads analysis of a floating offshore wind turbine using fully coupled simulation*, Wind Power Conference and Exhibition, Los Angeles, CA.
18- J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, (2009). *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO,

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.5.4]

Technical Report No. NREL/TP-500-38060.
19- D. Matha, (2010). *Model Development and Loads Analysis of a Wind Turbine on a Floating Offshore Tension Leg Platform*, European Offshore Wind Conference.

20- J. Jonkman, (2010). *Definition of the Floating System for Phase IV of OC3*, CO: National Renewable Energy Laboratory.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.5.4]