بررسی تغییرات پاسخ دینامیکی در توربین بادی شناور از نوع TLP تحت قطع *شدگی* کابلهای مهاری

محمد على نصرتزاده (، ميرمحمد اتفاق ً * ، پويا حاجي نژاد دهخوارقاني "

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز – دانشکده فنی مهندسی مکانیک؛ Ali.nosratzadeh94@ms.tabrizu.ac.ir (* نویسنده مسئول) ۲ دانشیار، دانشگاه تبریز – دانشکده فنی مهندسی مکانیک؛ <u>Ettefagh@tabrizu.ac.ir</u> (* نویسنده مسئول) ۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز – دانشکده فنی مهندسی مکانیک؛ Hajinezhad.pooya@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیدہ
<i>تاریخچه مقاله:</i> تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۲۸	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
<i>کلمات کلیدی:</i> توربین بادی شناور کابلهای مهاری قطعشدگی کابل های مهاری مدلسازی دینامیکی دینامیک چندجزئی	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، جواب گو 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 Nosratzadeh¹, Mir Mohammad Ettefagh^{2*}, Pooya Hajinezhad Dehkharghani³

¹ MS Student, Mechanical Engineering Department, University of Tabriz; Ali.nosratzadeh94@ms.tabrizu.ac.ir

² Associate Prof., Mechanical Engineering Department, University of Tabriz; <u>Ettefagh@tabrizu.ac.ir</u> (^{*}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.

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 توربین های 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 قرار گرفت[۱] و [۲]. توربین بادی که به شکل عمده به دو نوع محورعمودی و محورافقی تقسیم می شود، می تواند انرژی باد را به انرژی مکانیکی تبدیل کند. متداول ترین نوع توربین بادی که در طول تاریخ استفاده شده است، توربین بادی محورافقی می باشد که در دشت ها و چمن زارها قرار می گرفت. 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 توربین های بادی زمینی وجود دارد، در توربین های بادی فراساحلی مرتفع گردیده است. سرعت باد در اقیانوس ها معمولا بالاتر میباشد و این سرعت اغلب پایدار میباشد که این منجر به عملکرد بهتر توربین فراساحلی در مقایسه با توربین زمینی می گردد[۳] و [۴]. به علاوه، شهرهای بزرگ نیازمند انرژی فراوان، اغلب در خطوط ساحلی واقع شدهاند. این بدین معنا است که انرژی الکتریکی تولید شدہ توسط توربین، ای 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 می یابد. سیستم کابلهای مهاری سازههای شناور فراساحلی با افزایش عمق آب مهمتر می گردد. 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 می یابد و نهایتا باعث شکستگی سایر کابلها می گردد [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 می گردد. 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'، روتور'، ناسل 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 مىباشد. معادلات ^۴NE معمولا با جداكردن اجزا سیستم در دیاگرام آزاد سیستم بهدست میآید ولی روش EL⁶، روش انرژی را برای استخراج معادلات حرکتی برای درجات آزادی تعمیم یافته به کار می گیرد [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 بادی شناور از نرم افزار TAST استفاده می کنند ولی این نرمافزار با توجه به محدودیتهایی که دارد مناسب برای نوسانات بزرگ نمیباشد. در کار حاضر، ابتدا توربین بادی شناور فراساحلی با

غیرخطی، به طور دقیق مدلسازی می گردد. 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 قابل حل در MATLAB تبدیل می شود. پس از اطمینان از صحت شبیهسازی با ادبیات فن، با قطع کردن عمدی کابلهای مهاری مختلف، تغییرات پاسخ دینامیکی سازه مورد بررسی قرار می گیرد. پلتفرم مورد بررسی در این پژوهش، TLP⁸ خواهد بود. روند کار نیز بدین صورت خواهدبود که ابتدا در بخش ۲ نحوه مدلسازی سیستم و نحوه اعمال نیروها شرح داده می شود، سپس در بخش ۳ مشخصات توربین بادی شناور ذکر می گردد، 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 می گیرد و نهایتا در بخش ۶ نتایج حاصل از این پژوهش ذکر می گردد.

۲ – مدلسازی دینامیکی

در کار حاضر ترکیبی از روشهای اولر - لاگرانژ و نیوتن - اول ر 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 دستگاه واحد استفاده می گردد. 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 می شوند: مجموع بدنه-پایه (TPA)^۷ و مجموع روتور- ناسل (RNA)^۸، که آزادانه نسبت به بدنه حرکت دارنـد. بـرای اسـتخراج معادلات حرکت، باید از دستگاههای مختصات مختلفی استفاده کرد که در شکل ۱ نشان داده شدهاست. دسـتگاه (X,Y,Z) دسـتگاه اینرسی اولیه یا بـه عبارتی دستگاه متصل بـه زمین می،اشد. (X,Y,Z) در حالت تعادل اولیه سیستم که جابجایی صفر است،

(A,B,C) و (x_t,y_t,z_t) در مرکز جرم کلی سیستم قرار دارد. (x_t,y_t,z_t) و (x_t,y_t,z_t) دستگاههای واسطه متصل به جسم هستند که به ترتیب در مرکز در مرکز RNA و TPA و RNA قرار دارند. فرض می شود مرکز جرم RNA در محداد 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 می شود که در حالت تعادل بر روی (X,Y,Z) منطبق می شود. برای ساده سازی محاسبات فرض می شود که دستگاههای اصلی (A,B,C) و RNA در استای محورهای (A,B,C) و A



شکل ۱ - دستگاههای مختصات توربین بادی شناور

برای توصیف زوایای انحراف بزرگ، از زوایای اولر استفاده می شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. ترتیب دوران زوایا بسیار مهم است. در حالت کلی ۱۲ حالت وجود دارد که در این پژوهش حالت I - 7 - 7 به کار برده شده است. یعنی ابتدا حول X، بعد حول Y و سپس حول Z دوران انجام می گیرد، که زوایای آن ها به ترتیب عبار تند از X_6, X_5, X_4 [۵].



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:

$$\vec{\omega}_{T} = \left(\dot{X}_{4}\vec{i}\right)_{(x_{1},y_{1},z_{1})} + \left(\dot{X}_{5}\vec{j}\right)_{(x_{2},y_{2},z_{2})} + \left(\dot{X}_{6}\vec{k}\right)_{(x_{3},y_{3},z_{3})}$$
(1)

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.

$$\vec{\omega}_{T} = \begin{cases} \dot{X}_{4} \cos X_{5} \cos X_{6} + \dot{X}_{5} \sin X_{6} \\ -\dot{X}_{4} \cos X_{5} \sin X_{6} + \dot{X}_{5} \cos X_{6} \\ \dot{X}_{6} + \dot{X}_{4} \sin X_{5} \end{cases}$$
(7)

۲-۲- استخراج معادلات حرکت سیستم

در مدل مورد نظر ۶ 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 می گردد.

$$\begin{cases} \sum \vec{F} = m_s \vec{a}_{G_s} = m_s \times (\ddot{X}_1, \ddot{X}_2, \ddot{X}_3) \\ \sum \vec{M} = \frac{D}{Dt} \vec{H}_{G_s} = \frac{d}{dt} \vec{H}_{G_s}^s + \vec{\omega}_s \times \vec{H}_{G_s}^s \end{cases}$$
(7)

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

$$\begin{cases} \sum \vec{F} = \vec{F}_{mooring}^{I} + \vec{F}_{buoyancy}^{I} + \vec{F}_{wind}^{I} + \vec{F}_{wave}^{I} + \vec{G}^{I} \\ \sum \vec{M} = \vec{M}_{mooring}^{s} + \vec{M}_{buoyancy}^{s} + \vec{M}_{wind}^{s} + \vec{M}_{wave}^{s} \end{cases}$$
(f)

(X_s,y_s,Z_s) مومنتم زاویهای کل سیستم حول مرکز جرم کلی، در $\vec{H}_{G_s}^s$ دستگاه (X_s,y_s,Z_s) و $\vec{\omega}_s$ سرعت زاویهای دستگاه (X_s,y_s,Z_s) همراستا دستگاه (X_s,y_s,Z_s) و میباشد و چون دستگاههای (X_s,y_s,Z_s) و (X_s,y_s,Z_s) همراستا و هم جهت هستند، در نتیجه سرعت زاویهای آنها نیز با هم برابر است ($\vec{\omega}_s = \vec{\omega}_T$). مومنتم زاویهای کلی سیستم برابر مومنتم تک است (\vec{G}_s). مومنتم زاویهای کلی سیستم برابر مومنتم تک است (\vec{G}_s). مومنتم زاویهای کلی سیستم برابر مومنتم تک است (\vec{G}_s). مومنتم زاویهای کلی سیستم برابر مومنتم تک است (\vec{G}_s). مول مرکز جرم کلی سیستم (\vec{G}_s) با استفاده از میباشد (\vec{G}_s) به دست میآیند.

$$\begin{cases} \vec{H}_{G_s}^T = \vec{H}_{G_T}^T + \vec{\rho}_{G_T/G_s} \times m_T \vec{v}_{G_T} \\ \vec{H}_{G_s}^R = \vec{H}_{G_R}^R + \vec{\rho}_{G_R/G_s} \times m_R \vec{v}_{G_R} \end{cases}$$
(δ)

در رابطه (۵)، $\vec{H}_{G_T}^T$ مومنتم زاویهای TPA حول مرکز جرم خودش، $\vec{H}_{G_T}^T$ مومنتم زاویهای RNA حول مرکز جرم خودش، خودش، $\vec{H}_{G_R}^R$ مومنتم زاویهای RNA حول مرکز جرم کل سیستم، \vec{V}_{G_T} فاصله مرکز جرم RNA تا مرکز جرم کل سیستم، \vec{V}_{G_T} \vec{V}_{G_T} فاصله مرکز جرم RNA تا مرکز جرم کل سیستم، \vec{V}_{G_r} \vec{V}_{G_T} فاصله مرکز جرم ها و m_T و m_R هم جرم \vec{V}_{G_T} سرعت خطی مرکز جرمها و m_T و m_R هم جرم عضوهای صلب میباشد. مومنتم زاویهای TPA (\vec{H}_{G_T}) در عضوهای صلب میباشد. مومنتم زاویهای محورهای اصلی TPA دستگاه (\vec{H}_{G_T}) TPA (\vec{L}_T) محاسبه میشود و چون (\vec{L}_t, y_t, z_t) در راستای محورهای اصلی TPA میباشد، \vec{T}_{G_T} از حاصل ضرب تانسور اینرسی و سرعت زاویهای به میباشد، (\vec{L}_{S}, y_s, z_s) انتقال داده میشود (مطابق رابطه (۶)).

$$\vec{H}_{G_T}^T = T_{T \to s} \left(I_T \vec{\omega}_T \right) \tag{9}$$

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 ($\overline{H}_{G_R}^R$) حاصل جمع مومنتم زاویهای روتور و ناسل میباشد و از حاصل ضرب تانسور اینرسی و سرعت زاویهای به دست می آید و سپس به دستگاه واسطه (x_s, y_s, z_s) انتقال داده می شود(مطابق رابطه (۲)).

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

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

$$\vec{F}_B^I = (0, 0, \rho g \pi r^2 h_1)$$
 (17)

که درآن ho چگالی آب دریا، g شتاب جاذبه، r شعاع استوانه و $h_{
m l}$ طول قسمتی از استوانه است که در داخل آب قرار میگیرد و به صورت رابطه (۱۳) محاسبه میشود[۹].

$$h_1 = \frac{\rho_{G_M/O} - X_3}{\cos X_4 \cos X_5} - \rho_{G_M/O} + h_0 \tag{17}$$

میبستم تا سطح آب در حالت $ho_{G_M/O}$ 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 $(\mathbf{X}_{\mathrm{s}}, \mathbf{Y}_{\mathrm{s}}, \mathbf{Z}_{\mathrm{s}})$ که به صورت رابطه (۱۴) محاسبه میگردد[۹].

$$\vec{\rho}_{B/G_s} = \left(x_s^B, y_s^B, z_s^B\right) = \left(-\frac{t_{31}r^2}{4t_{33}h_1}, -\frac{t_{32}r^2}{4t_{33}h_1}, -h_G + \frac{h_1}{2} + \frac{r^2\left(t_{31}^2 + t_{32}^2\right)}{8t_{33}^2h_1}\right) \quad (14)$$

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.

$$\vec{H}_{G_{R}}^{R} = \vec{H}_{G_{R}}^{n} + \vec{H}_{G_{R}}^{r}$$

$$\vec{H}_{G_{R}}^{n} = T_{n \to s} \left(I_{n} \vec{\omega}_{n} \right) , \quad \vec{H}_{G_{R}}^{r} = T_{n \to s} \left(I_{r} \vec{\omega}_{r} \right)$$
(V)

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 (A,B,C) میباشد که دستگاه (A,B,C) به اندازه β حول (x_s, y_s, z_s) میباشد که دستگاه (x_s, y_s, z_s) دوران می کند و به صورت رابطه می گردد. (۸) محاسبه می گردد.

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

سرعت زاویه ای ناسل در دستگاه مختصات (A,B,C)، $\vec{\omega}_n$ ، (A,B,C) در دستگاه (X_t,Y_t,Z_t) محاسبه می گردد سپس به (X_t,Y_t,Z_t) در دستگاه $T_{T \to n}$ محاسبه می گردد سپس به (X_t,Y_t,Z_t) منتقل می شود. که در آن $T_{T \to n}$ ماتریس انتقال از (A,B,C) می باشد که برابر است با معکوس ماتریس (A,B,C) به (A,B,C) می باشد که برابر است با معکوس ماتریس $\vec{\omega}_{yaw}$ بردار $\vec{\omega}_{yaw} = (0,0,\omega_{yaw})$

$$\vec{\omega}_n = T_{T \to n} \left(\vec{\omega}_T + \vec{\omega}_{yaw} \right) \tag{9}$$

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

$$\vec{\omega}_r = \left(\vec{\omega}_n + \dot{\vec{\psi}}\right) \tag{1.1}$$

B میباشد، یعنی $\vec{\psi}$ سرعت زاویه ای روتور حول جهت مثبت محور میباشد، یعنی $(0, \dot{\psi}, 0)$ در این پژوهش، \vec{T} موجود در معادله (۳) ، مجموع تمام نیروهای وارده بر سازه میباشد که در دستگاه اینرسی (X,Y,Z) محاسبه میشود و \vec{M} ، گشتاور مربوط به تمام نیروهای مذکور حول مرکز جرم کلی سیستم میباشد که در دستگاه واسطه 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_s, x_s, x_s, z_s) 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.

Downloaded from marine-eng.ir on 2024-05-03

۵۵

$$\vec{M}_B^s = \vec{\rho}_{B/G_s} \times \vec{F}_B^s \quad , \quad \vec{F}_B^s = T_{I \to s} \vec{F}_B^I \tag{10}$$

۴-۲- 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].

$$\begin{cases} \vec{F}_{line}^{I} = \left[T_{0} + K\left(\rho_{E/A} - L\right)\right] \frac{\vec{\rho}_{E/A}}{\rho_{E/A}} \\ \vec{M}_{line}^{s} = \vec{\rho}_{A/G_{S}} \times \vec{F}_{line}^{s} , \quad \vec{F}_{line}^{s} = T_{I \to s} \vec{F}_{line}^{I} \end{cases}$$
(19)

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

۵-۲- 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 می باشد. برای سادگی نیروی باد را برای تمام سطح پرهها که عمود بر جریان می باشد محاسبه می کنیم. لازم به ذکر است که از نیروی باد وارد بر بدنه توربین بادی صرف نظر می شود [۹].

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

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 می گردد. اسپکتروم کیمال به شکل رابطه (۱۸) میباشد[۱۴].

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

$$n = f z/U$$
(1A)

 u_* که z نشانگر ارتفاع مورد نظر، U نشانگر سرعت میانگین و u_* بیانگر سرعت اصطکاکی' میباشد. با تبدیل اسپکتروم کیمال به سری زمانی، سرعت باد به صورت پدیده ای تصادفی به دست می آید. شکل ۳ نمونه ای از باد سرعت باد تولید شده با میانگین $r ext{ m/s}$ نشان می دهد.



شکل ۳ – نمونه ای 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 ۲۹/۹ - C۲ فرض شده است[۹]. فرم برداری نیروی باد و گشتاور حاصل از آن به شکل رابطه (۱۹) خواهد بود.

$$\vec{F}_{wind}^{I} = T_{R \to I} \vec{F}_{wind}^{R} , \quad \vec{F}_{wind}^{R} = (0, -F_{b}, 0)$$

$$\vec{M}_{wind}^{s} = \vec{r}_{G_{R}}/G_{s} \times \vec{F}_{wind}^{R}$$
(19)

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

۶-۲- 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 می گذارند. از سایر مشخصههای تاثیر گذار می توان به زمان پایداری شرایط دریا و شکل اسپکتروم موج اشاره کرد[۱۵]. نیروی موج در دستگاه اینرسی اولیه محاسبه می شود و برای محاسبه گشتاور نیروی موج، به دستگاه مختصات متصل به جسم منتقل می شود. برای محاسبه نیروی موج از معادله موریسن –رابطه (۲۰) – که به ازای واحد طول سازه می باشد، استفاده می گردد[۹].

$$\vec{f}_n^I = C_m \,\rho \frac{\pi}{4} D^2 \,\vec{V}_n - C_a \,\rho \frac{\pi}{4} D^2 \,\vec{V}_t + \frac{1}{2} \rho C_d \,D \,\vec{V}_{rt} \left| \vec{V}_{rt} \right| \tag{7.2}$$

در این رابطه، ρ چگالی آب دریا، D قطر استوانه قائم داخل آب، C_m ضریب اینرسی، C_a ضریب جرم افزوده'' و D ضریب دراگ'' میباشد. همچنین \overline{N} مولفه نرمال شتاب موج، \overline{V} مولفه نرمال شتاب سازه، \overline{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''، نظریه استوکس^{''} مرتبه دو یا مرتبه موج خطی یا موج ایری''، نظریه استوکس^{''} مرتبه دو یا مرتبه نسبتاً نامنظم دریا به همراه شرایط طوفانی، اغلب با ترکیب امواج ایری مدل سازی میشود. در پژوهش حاضر برای مدل کردن سرعت استاندارد IEC61400-3 طراحی شده است[۱۲]. شکل ساده شده طیف JONSWAP به فرم رابطه (۲۱) میباشد.

$$S(f) = \alpha H_s^2 f_p^4 f^{-5} \gamma^\beta \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right)$$
(71)

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 p و فرکانس غالب ۲/۱ Hz استفاده می گردد همچنین ۲= c_a ، ۱ = c_a و $\gamma/=$ C_d در نظر گرفته میشود. در نهایت سرعت و شتاب موج با تئوری موج نامنظم به شکل رابطه (۲۲) محاسبه می گردد که سرعت ذرات آب در راستای موج u(x,t) و در راستای عمود بر موج v(x,t) میباشد.

$$\begin{cases} u(z,t) = \sum_{i=1}^{N} \left\{ \omega_{i} \frac{\cosh(\kappa_{i}(z+h))}{\sinh(\kappa_{i}h)} a_{i} \sin\left(\omega_{i}t+\phi_{i}\right) \right\} \\ v(z,t) = \sum_{i=1}^{N} \left\{ \omega_{i} \frac{\sinh(\kappa_{i}(z+h))}{\sinh(\kappa_{i}h)} a_{i} \cos\left(\omega_{i}t+\phi_{i}\right) \right\} \\ \left\{ \dot{u}(z,t) = \sum_{i=1}^{N} \left\{ \omega_{i}^{2} \frac{\cosh(\kappa_{i}(z+h))}{\sinh(\kappa_{i}h)} a_{i} \cos\left(\omega_{i}t+\phi_{i}\right) \right\} \\ \dot{v}(z,t) = \sum_{i=1}^{N} \left\{ -\omega_{i}^{2} \frac{\sinh(\kappa_{i}(z+h))}{\sinh(\kappa_{i}h)} a_{i} \sin\left(\omega_{i}t+\phi_{i}\right) \right\} \end{cases}$$
(YY)

در رابطه فوق، Δf موج نامنظم، $a_i = \sqrt{2S(f_i)\Delta f}$ دامنه موج نامنظم، $\omega_i = 2\pi f_i$ دامنه فرکانسی، N معداد نمونه فرکانسی، Δf فرکانسی ازویه ای موج، Φ_i زاویه اتفاقی بین صفر و π ماصله از سطح متوسط آب و h عمق آب میباشد[۱۵].

در نهایت نیروی موج بر روی سازه، \overrightarrow{F}^{I} ، 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 انتگرال گیری در طول سازه مطابق رابطه (۲۳) قابل حصول است.

$$\vec{F}_{wave}^{I} = \int_{z} \vec{f}_{n}^{I} dz$$

$$\vec{M}_{wave}^{s} = \int_{z} \left(\vec{\rho}_{i/G_{s}} \times (T_{I \to s} \vec{f}_{n}^{I}) \right) dz$$

$$\vec{\rho}_{i/G_{s}} = \left(0, 0, z \right)$$
(177)

۳ – مشخصات توربین بادی شناور

در این پژوهش مشخصات توربین از استاندارد توربین NREL 5MW گرفته می شود [۱۸]. همچنین از بین پایه های شناوری که برای توربین بادی شناور طراحی شدهاند، پایه TLP که قابلیت نگهداری توربین NREL 5MW را دارد، انتخاب می گردد[۱۹]. بخش زیرین بدنه ی 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 می باشد که در آن ممان اینرسی RNA حول محورهای مختصات اصلی آن $I_{A} = 2.35 \times 10^{7} \text{ kg.m}^{2}$ (A,B,C) $I_{C} = 2.54 \times 10^{7} kg.m^{2}$, $I_{B} = 4.37 \times 10^{7} kg.m^{2}$ زاویهای روتور ۱۲/۱ rpm بوده و ثابت فرض می شود. از دوران ناسل صرفنظر شده و زاویه eta صفر در نظر گرفته میشود. جـرم 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 خط وط مهاری تشکیل یافته است. قطر استوانه پایه ۱۸ متر بوده و به اندازهی ۴۷/۸۹ متـر داخل آب قرار دارد. ضخامت آن ۱۵ ۰/۰ متر می باشد. تا ارتفاع ۱۲/۶ متری از کف پایه، بالاست به آن اضافه شده است [۱۹]. عامل پایداری در پایه TLP کشش در خطوط مهاری میاشد. 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 N/m میباشد و طول اولیه هر کابل ۱۵۲/۱۱ متر در نظر گرفته می شود [۱۹].

۴ – صحەسنجى مدلسازى

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 می گردد. با مقایسه این فرکانسها با فرکانسهای موجود در ادبیات فن، صحت مدل تایید می گردد[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 می گردد. 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

فرکانس های طبیعی مرجع	فرکانسهای طبیعی حاصل از	مود
[١٩]	شبيەسازى	
[Hz]	[Hz]	
۰/۰ ۱۶	•/• 14	Surge
۰/۰ ۱۶	۰/۰۱۵	Sway
•/۴۳۷	۰ / ۳ • ۸	Heave
•/777	•/١۶١	Roll
•/771	•/181	Pitch
٠/•٩٧	•/•۶٣	yaw

با مقایسه فرکانسهای طبیعی حاصل از شبیه سازی با مرجع [۱۹] مشاهده می گردد که شبیه سازی دقت قابل قبولی دارد و تفاوتهای موجود در فرکانسهای طبیعی می تواند ناشی از متفاوت بودن شیوه مدل سازی و نیروهای اعمالی باشد. به عبارت دقیق تر، 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 می گردد. 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 می گیرد. در شکل ۵ موقعیت هر یک از خطوط مهاری با شماره گذاری 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 می گردد. قطعشدگی تصنعی هر کابل، با صفر قرار دادن نیروی متناظر با آن کابل حاصل می گردد. در این بخش، یکی از حالتها با شکل شرح داده می شود و نتایج سایر حالات در جداولی آورده می شود. با ایجاد قطعشدگی در کابل شماره ۱ در ثانیه ۱۰۰۰ شبیه سازی، تغییرات در پاسخ دینامیکی مطابق شکل ۶ قابل مشاهده است.

در شکل ۶ لحظه قطع شدگی 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 می گردد که سازه در راستای Sway به سمت عکس قطع شدگی متمایل می گردد و پاسخ Roll سازه نیز در قسمت منفی قرار می گیرد که این نشانگر درست بودن مدل سازی می باشد. همچنین مشاهده می گردد که با قطع شدن کابل، سازه اندکی بالاتر می رود. نتایج آماری قطع شدگی کابل شماره ۱ به شرح جدول ۲ می باشد. 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.



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					
انحراف	میانگین	كمينه	بيشينه		
معيار					
•/8840	-7/7144	-۴/۸۵۰۰	•/4944	سالم	Surge
•/89•0	-2/2698	-4/80.1	•/4988	شكسته	[m]
•/•۲١•	-\$/\$1e -*	-•/•٧٣١	•/•۶٩٨	سالم	Sway
+/+414	-•/•٩ ١ ٧	-•/٣٣٢١	•/•۴•۶	شكسته	[m]
•/•۵۳٧	-•/• \YY	-•/1624	•/•٩۶٩	سالم	_ Heave [m]
•/•۴۳٣	•/•۴۹١	-•/•٧٣۶	•/1۵۳۳	شكسته	
۴/۷ ۷e -۴	-1/••e -۶	-1/••e ⁻۶	•/••1٢	سالم	Roll [rad]
۳/۲ ۰ е ^{-۴}	-•/••۶٩	-•/••۶٩	-•/•• ۵ ۸	شكسته	
•/••٣٧	•/••۴١	-•/•• ٩ •	•/•180	سالم	_ Pitch [rad] _ Yaw [rad]
•/••٣٧	•/••۴۲	-•/•• \ ۴	•/•184	شكسته	
•/••۴۶	-۵/••e ^{-۶}	-•/•180	•/•182	سالم	
•/••۴۲	•/••*	-•/•١٢٢	•/•18٣	شكسته	

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 ملموس تر در شکل ۲ قابل مشاهده می باشد.

شکل ۲- 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.

شماره ۱

با بررسی فرکانسی سازه، مشاهده می شود که با قطع شدگی کابل شماره ۱، در برخی از مودها فرکانس های 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 می باشد.

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

		بيشينه	كمينه	میانگین	انحراف
					معيار
5 Surge [m]	سالم	•/494•	-4/20++	-2/2160	•/884•
	کابل ۱	•/۴٩٨•	-4/8810	-۲/۳۵۰۰	•/891•
	کابل ۱ و ۲	•/1٩••	-۵/•۲۶•	-2/292.	•/۶٩۴•
	کابل ۳	•/۵٨٨•	- 4/974+	-2/400+	•/٧•۶•
	کابل ۳ و ۴	•/•۶٨•	-8/•18•	-۲/۷۸۱۰	•/៱٩٢•
	کابل ۵	•/1•&•	-\$/9+\$+	-2/2060	•/890•
	کابل ۵ و ۶	•/190•	-۵/•۳۴•	-7/391•	•/894•
	کابل ۷	•/٢۵٩٠	-4/881.	-2/2880	•/٧١••
	کابل ۷ و ۸	•/947•	-0/•74•	-1/884.	•/ ٨٧۵٠

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

در جدول ۴ تقارن سازه نسبت به راستای Surge مشخص می گردد 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

انحراف	میانگین	كمينه	بيشينه		
معيار					
•/•٣١•	-1/**e ^{-*}	-•/• \ *	•/•¥••	سالم	- - - - [m] -
•/•۴۲•	-•/•97•	-•/٣٣٢•	•/•۴1•	کابل ۱	
•/۴۹۲•	-•/٣٧۶•	-4/481.	1/2•8•	کابل ۱ و ۲	
•/•18•	•	-•/•۵۶•	•/•۵۶•	کابل ۳	
•/•۲٩•	-•/•• * •	-•/1•1•	•/•٩٢•	کابل ۳ و ۴	
•/•۵۵•	•/•٩••	-•/11&•	•/٢٨٧•	کابل ۵	
•/۴٨٨•	•/٣٧۵•	-1/7•7•	2/2680	کابل ۵ و ۶	
•/•۴••	-1/••e ⁻	-•/144•	•/141•	کابل ۷	
•/•٧۶•	-•/••٣•	-•/٢٨۵٠	•/791•	کابل ۷ و ۸	

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.

	• • •					
	میانگین Surge [m]	میانگین Sway [m]	جابجایی [m]	بیشینه دامنه حرکتی [m]	میانگین دامنه حرکتی [m]	انحراف معیار دامنه حرکتی [m]
سالم	-7/81461	-•/••• %	-	۲/۷۷۸۹۰	•/۵۴۸۵۵	•/۴•۹۸۸
کابل ۱	-7/42978	-•/•٩١٧١	۰/ ۰ ۹۷۶۷	٢/٨۴٩۴١	·/۵۵۴۷۲	•/۴١٣٣١
کابل ۱ و ۲	-7/21176	-•/YYAYA	• /٣٨٣ • ١	٢/۶۴۶٩٩	• / ٧٣ እ ۶٣	•/47191
کابل ۳	-7/40049	-•/•••۴۶	•/141•4	٣/• ٤٣٩ •	•/۵۶۴۴۵	•/۴۲۴۷۲
کابل ۳ و ۴	-7/78111	-•/••٣١٢	•/*۶۶٧•	٣/٢٣٤٧١	•/72420	•/57145
کابل ۵	-7/37441	•/• 9• 78	•/1•194	۲/۵۲۹۹۶	•/۵۶۳۶۷	۰/۴۱۰ ۸ ۰
کابل ۵ و ۶	-7/39175	•/٣٧۵٣٧	• /٣٨٣٨ •	٢/۶۴٩٩۶	•/٧٣٧٩٢	•/۴١٧٩•
کابل ۷	-7/78877	-•/••147	•/•4814	۲/۵۹۸۷۷	•/۵۷۵۲·	•/۴١٨٨٧
کابل ۷ و ۸	- 1 / A A Y • •	-•/••Y08	•/47747	٣/١٣٨٧١	•/४१६٩•	•/ Δ • YA 1

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

با مشاهده شکل ۹و جدول ۵، میزان جابجایی سازه در هنگام قطع شدگی کابلها مشخص می گردد. بحرانی ترین جابجایی مربوط به قطع شدگی کابلهای شماره ۳ و ۴ می باشد که این میزان ۰/۴۶ متر می باشد. همان طوری که در جدول ۵ مشاهده می گردد، قطع شدگی کابلها در توربین بادی شناور با پایه TLP، منجر به جابجایی شدید توربین بادی نمی گردد و از این جهت برای توربینهای بادی مجاور خطری محسوب نمی گردد ولی ممکن است افزایش دامنه نوسانات منجر به عملکرد نامناسب توربین در تولید الکتریسیته گردد. همچنین افزایش دامنه نوسانات می تواند 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، خاموش کردن 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 شکل ۲۱۰ نشان گر 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 شدن توربین

مشاهده شکل ۱۰، مشخص می گردد که اثر خاموش شدن توربین بر روی سازه TLP به دلیل پایین بودن دامنه نوسانات چندان زیاد نمی باشد.

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 جواب گو 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 می شد، 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:

0 E

-5 -10

0.05

-0.05

0.2

-0.2

0

0 []

0

500

500

500

1000

1500 2000

1000 1500 2000

1500 2000 2500

1000

2500

ts

Sway

2500

ts

3000 3500 4000

3000 3500

3000 3500 4000 4500

Active Parked

4500 5000

4000 4500 5000

5000

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,

• در پلتفرم TLP قطع شدن هیچ یک از خطوط مهاری تاثیرات شدیدی بر روی سازه نخواهد داشت به طوری که با قطع شدن هر یک از خطوط مهاری، توربین افزایش دامنه حرکتی و ارتعاشی کمی خواهد داشت. علت کم بودن اثر قطع شدگی خطوط مهاری در TLP زیاد بودن تعداد کابل های مهاری است به طوری که با قطع شدن یکی از خطوط، سایر خطوط مهاری بار خط قطع شده را تحمل می کنند.

 بر خلاف سایر پلتفرمها مانند OC4
 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 Vaw سازه میباشد و این مورد نیز به عنوان یکی از نواقص مدلسازی مطرح میگردد.

کليد 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

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.

Downloaded from marine-eng.ir on 2024-05-03

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

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.