

بررسی تأثیر نیروهای آبرودینامیک بر عملکرد توربین بادی شناور

محمد بارونی^۱، مرتضی بختیاری^{۱*}، نسیم آل علی^۱، صدری نسب^۲

۱. دانشکده مهندسی دریا دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

۲. دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۰۶

شناسه دیجیتال (DOI): [10.22113/jmst.2017.71169.1944](https://doi.org/10.22113/jmst.2017.71169.1944)

چکیده

امروزه تقاضا برای انرژی تجدیدپذیر و قابل اطمینان به دلیل گرمایش جهانی، آلودگی محیط زیست و بحران انرژی موضوع بسیار با اهمیت در مهندسی دریا می‌باشد. با توسعه و پیشرفت علم، توربین‌های بادی برای استحصال انرژی از باد مورد استفاده قرار گرفتند. تا کنون تحقیقات گسترده‌ای در خصوص استحصال انرژی از توربین‌های بادی صورت گرفته است ولی پژوهش در مورد توربین‌های بادی شناور در حوزه مهندسی دریا به دلیل پیچیدگی رفتار آبرودینامیکی آن کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، هدف بررسی تأثیر نیروهای آبرودینامیکی بر رفتار دینامیکی توربین بادی شناور می‌باشد بدین منظور و جهت دستیابی به اهداف تحقیق اقدام به تعریف سناریو و اجرای مدل عددی مربوطه در نرم افزار متلب گردید. در این تحقیق، یک مدل با سه درجه آزادی از جسم با در نظر گرفتن حرکت اوپلر در نظر گرفته شد و نیروهای آبرودینامیک از تئوری مومنتوم المان تیغه (BEM)، محاسبه گردید از آنجائیکه نیروهای آبرودینامیکی تابع سرعت و مکان سازه می‌باشند لذا محاسبه این نیروها و حل معادلات حرکت به صورت همزمان انجام پذیرفت. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که نیروهای غالب محیطی وارد بر این سازه عمدتاً آبرودینامیکی بوده و همچنین نشان داده شده است که فرکانس غالب تحریک نیروی آبرودینامیکی با فرکانس‌های طبیعی سازه فاصله داشته که این خود پایداری سازه را ایجاد می‌کند.

واژه های کلیدی: توربین بادی شناور، رفتار دینامیکی، استحصال انرژی، نیروهای آبرودینامیکی

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: mortezabakhtiari@yahoo.com

۱. مقدمه

امروزه در بسیاری از کشورهای پیشرفته از انرژی‌هایی نظیر باد و خورشید و همچنین انرژی تجدیدپذیر دریایی به منظور کاهش انتشار گازهای مضر استفاده می‌شود. استفاده از این انرژی‌ها به سرعت در حال افزایش است و کشورها به مطالعه طرح‌های جدید در این زمینه می‌پردازند (Mahpeykar et al (2016)).

انرژی‌های باد، امواج، جزر و مد، خورشید، بیولوژیک و هیدرولوژیک منابع بالقوه برای تولید نیروی مورد نیاز هستند. به نظر می‌رسد در این میان منابع باد عملی‌ترین و قابل اطمینان‌ترین منبع می‌باشند که سالانه دارای نرخ افزایش ۳۰-۲۵ درصدی است (et al., (2010), Henderson et al (2002) , Sclavounous با توجه به دائمی بودن نیروهای ناشی از موج، جریان و باد نقش و میزان تأثیر آن بر ارزیابی طول عمر سکوها در یابی برای ادامه بهره‌برداری اهمیت بالایی دارد (Movahedinia et al (2015)).

استفاده از باد برای تولید نیرو در خشکی از سال‌های گذشته متداول بوده است. اولین استفاده‌ی آن به حرکت درآوردن قایق‌ها در دریا بود. آسیاب کردن غلات و بالا کشیدن آب از چاه‌ها با استفاده از نیروی باد برای اولین بار توسط آسیاب‌های بادی در قرن دهم در ایران انجام شد (Spera,1998). با توسعه و پیشرفت علم توربین‌های بادی برای استحصال انرژی از باد مورد استفاده قرار گرفتند. برای دهه‌ها توربین‌های بادی در خشکی برای استحصال انرژی پاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. توربین بادی یک ساختار ساده‌ی مبدل انرژی است که انرژی جنبشی باد را به وسیله‌ی مکانیزم الکتریکی-مکانیکی خود به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. در حال حاضر حتی بهترین سایت‌های قرارگیری توربین‌های بادی در خشکی با شکایت همسایگان به دلیل شلوغی بیش از حد آفاق دید ناشی از آنها و ایجاد آلودگی صوتی مواجه‌اند. بنابراین مهندسين باد برای

یافتن مکان‌های مناسب برای تولید انرژی الکتریکی پاک به سمت منابع باد فرا ساحلی در اقیانوس‌ها رفته‌اند (Jonkman,2007,2009).

نظر به اینکه انرژی باد فراساحلی به سرعت در حال توسعه است و همچنین آلودگی بصری و صوتی و تداخل الکترومغناطیسی (بر تلویزیون، مایکروویو و رادار) توربین‌های بادی در خشکی، می‌توان با انتقال توربین‌ها به فراساحل آنها را کاهش داد. توربین‌های فراساحلی مزایای بسیاری دارند و همچنین باد در فراساحل قوی‌تر و پایدارتر است که به تولید بیشتر انرژی الکتریکی کمک می‌کند. انرژی بادی فراساحلی هنوز تکنولوژی تکامل یافته‌ای نیست و روش‌های جدیدتری نیز به وجود خواهند آمد. اخیراً مطالعه و بررسی در این خصوص موضوع توجه محققین مختلف بوده است که از جمله آنها می‌توان به مواردی اشاره نمود. (Jonkman,2007)، مطالعاتی بر روی آنالیز پاسخ دینامیکی توربین‌های بادی شناور با پلتفرم از نوع بارج انجام داد و کد کامپیوتری FAST را با اضافه کردن نیروهای هیدرودینامیک برای توربین‌های بادی شناور ارتقاء داد (Jonkman,2007). (Larson and Hanson,2007) روشی برای اجتناب از حرکت فرکانس پایین میرا شده‌ی منفی یک توربین بادی شناور پیچ - کنترل شده از نوع اسپار ارائه دادند. کار آنها در ارتباط با پروژه ی Hywind شرکت Statoil بوده است. (Savenije,2009)، در تحقیق خود به بررسی مدل دینامیکی توربین بادی شناور فراساحلی پروژه Hywind پرداخته و مدل عددی ساده ی A.T.Flow را برای تحلیل دینامیکی این سازه ایجاد نموده است. وی در این پژوهش پاسخ‌های دینامیکی توربین بادی شناور از نوع اسپار را تحت اثر نیروهای باد یکنواخت و موج منظم در حوزه‌ی زمان محاسبه نمود و نتایج به دست آمده را به صورت تاریخچه‌های زمانی مودهای مختلف حرکت تحت چند سناریوی بارگذاری مختلف ارائه

نموده است. تحریک فرکانس‌های طبیعی در محدوده‌ی فرکانس پایین می‌شود. آنها در این پژوهش یافتند که مقادیر متوسط پاسخ‌های دینامیکی اصولاً ناشی از باد هستند و انحراف معیار‌های پاسخ‌ها ناشی از موج می‌باشند. نظر به این که پرداختن به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر بخصوص در فراساحل جدیداً در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، موضوع این تحقیق، خصوصاً در ایران ذاتاً نو می‌باشد. دستیابی به دانش تحلیل دینامیکی توربین‌های بادی شناور در کشور در حد کافی مورد نظر قرار نگرفته است و پرداختن به آن می‌تواند باعث یافتن روش‌های جدیدی در محاسبات مربوطه شده و باعث بومی‌سازی ابزارها و کدهای محاسباتی گردد لذا بر این اساس موضوع این تحقیق بر تحلیل پاسخ دینامیکی توربین‌های بادی شناور قرار گرفته است. در این پژوهش یک کد کامپیوتری جهت آنالیز و طراحی توربین بادی شناور ارائه شده است. ابزار تحلیلی پیشنهادی در این تحقیق تحت نرم افزار متلب اجرا می‌شود و معادلات حرکت با استفاده از روش عددی رانج - کوتا در گام‌های زمانی مختلف حل شده‌اند.

۲. روش تحقیق

در این بخش به بیان روش تحقیق مورد استفاده اشاره شده است. در این پژوهش اقدام به محاسبه نیروهای آیرودینامیکی به همراه حل معادلات حرکت به صورت همزمان انجام گرفته است. در این تحقیق مدل مورد بررسی، یک توربین ۵ مگاواتی طراحی شده توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر آمریکا، که توسط یک پلتفرم اسپار با عمق آبخور ۱۲۰ متر پایدار می‌شود (جانکمن، ۲۰۱۰) می‌باشد. در جدول (۱) مشخصات اصلی این توربین نشان داده شده است.

Sclavounous et al., (2010)، طرح‌هایی برای دو توربین بادی شناور سخت مقاوم در برابر حرکت به منظور استقرار در محدوده‌ی عمق آب ۳۰ متر تا صدها متر که قابلیت حمل توربین‌های 3-5 MW را دارند ارائه نمودند. در این تحقیق پلتفرم پایه کششی به وسیله‌ی کابل‌های عمودی به لنگر ثقلی مهار شده و بویه با مهار کشیده به وسیله‌ی خطوط مهار کشیده مورب به لنگر ثقلی متصل به بستر دریا مهار شده‌اند. سپس بارهای خطی و غیر خطی وارد بر بخش شناور توربین به وسیله‌ی روش‌های مورد استفاده برای طراحی پلتفرم‌های صنایع نفت و گاز فراساحلی محاسبه شده و بارهای ناشی از باد نیز از مدل‌های توربین بادی غیر کوپل با دینامیک آیرودینامیک برج توربین و دینامیک بخش شناور و سیستم مهار بندی بدست آورده شده است. در نهایت نتایج شبیه‌سازی‌ها برای موج با ارتفاع مشخصه‌ی ۱۴ متر و عمق آب ۳۰ تا ۱۵۰ متر به صورت شتاب‌های نازل و کشش‌های دینامیک خطوط مهاربندی ارائه گردید. (Karimirad et al 2012)، به بررسی حرکات ناشی از باد و موج یک توربین بادی شناور اسپار 5MW در شرایط محیطی عملیاتی و سخت پرداختند. در این پژوهش آنها به وسیله‌ی شبیه‌سازی-های آیرودینامیک-سرو-الاستیک در حوزه‌ی زمان پاسخ‌های حرکت دینامیکی این سازه را تحلیل نمودند. تحلیل بخش آیرودینامیک شبیه‌سازی آنها بر اساس تئوری مومنتوم المان تیغه‌ی پیشرفته صورت گرفته و در بخش هیدرودینامیک از روش پنل به همراه فرمول موریسون با در نظر گرفتن موقعیت لحظه‌ای سازه استفاده شده است. آنها مشاهده نمودند که درگ هیدرودینامیک و هندسه‌ی خاص سازه باعث غیر خطی شدگی می‌شود و همچنین اینکه غیر خطی شدگی هیدرودینامیک بیشتر از محدوده‌ی فرکانس موج سبب

جدول ۱. مشخصات اسپار(پلتفرم)

درفت کل	قطر بالای	قطر پایین	جرم، به همراه	مرکز جرم	اینرسی دوران	اینرسی دوران	اینرسی دوران
۱۲۰ متر	محل باریک	محل باریک	وزنه های	CG	رول حول	پیچ حول	یاو حول خط
	شدگی	شدگی	تعادل		CG	CG	مرکز
	۶/۵ متر	۹/۴ متر	۷۵۹۳ میلی-گرم	۹۲/۵۸ متر	$10^9 * 4/489$	$10^9 * 4/489$	$10^9 * 1/672$

به منظور محاسبه ی بارهای آیرودینامیک سه سیستم مختصات تعریف شده است. سیستم مختصات اول یک مختصات کلی می باشد به صورت ثابت در بستر دریا در نظر گرفته شده است. دو مختصات محلی نیز به ترتیب در مرکز جرم سیستم و مرکز محور هاب قرار دارند.

نیروهای آیرودینامیک

بارهای آیرودینامیک وارد بر المان تیغه از تئوری مومنتوم المان تیغه (BEM) که از تلفیق دو تئوری مومنتوم و المان تیغه بدست آمده است محاسبه شده اند(هانسن، ۲۰۱۵). در تئوری المان تیغه نیروهای وارد

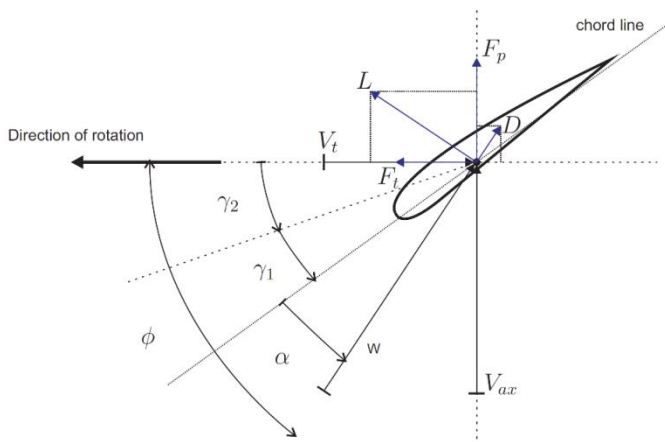
بر المان تیغه به صورت ترم های لیفت L و درگ D بیان می شود. تئوری المان تیغه بر پایه ی دو فرض کلیدی بنا شده است:

✓

پیچ اندرکنش آیرودینامیکی میان المان های مختلف تیغه وجود ندارد.

✓

یروهای وارد بر المان های تیغه به طور جداگانه به وسیله ی ضرایب لیفت C_l و درگ C_d ابروفویل هر المان تیغه محاسبه می شوند.



شکل ۱. مولفه های سرعت و نیرو در صفحه ی روتور

تئوری مومنتوم (تئوری دیسک گردان رانکی - فرود) بر پایه ی قوانین بقاء می باشد. کاربرد اصلی تئوری

مومنتوم بدست آوردن یک برآورد اولیه از جریان حلقوی ایجاد شده و سپس اتلاف توان ایجاد شده ی کل

است. در این روش روتور با یک دیسک گردان با ضخامت صفر جایگزین می‌شود که ایجاد یک ناپیوستگی در فشار تونل جریان گذرنده از روتور می‌کند (مانول ۲، ۲۰۱۰). در تئوری المان تیغه نیروهای محوری F_p و مماسی F_t به صورت ترم های نیروی درگ و لیفت از روابط (۱) و (۲) به دست می‌آیند.

². J. F. Manwell

که در آن \dot{x}_p سرعت المان تیغه در راستای \hat{p} و \dot{x}_t سرعت المان تیغه در راستای \hat{t} می‌باشد.

معادلات حرکت در این پژوهش سیستم توربین بادی شناور به صورت یک جسم صلب در نظر گرفته شده است. این سازه داری ۶ درجه‌ی آزادی شامل ۳ درجه‌ی آزادی انتقالی x ، y و z و ۳ درجه‌ی دورانی θ ، φ و ψ و نیز تیغه‌ها نسبت به سیستم دارای یک درجه‌ی آزادی دورانی می‌باشند. تیغه با سرعت دورانی ثابت Ω حول محور روتور دوران می‌کنند. برای نشان دادن معادلات حرکت دو سیستم مختصات xyz و $b_1b_2b_3$ در نظر گرفته شده‌اند که به ترتیب در محل مرکز جرم سازه و چسبیده به تیغه‌ها می‌باشند. ماتریس تبدیل این دو مختصات به یکدیگر به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{j} \\ \hat{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Omega t) & -\sin(\Omega t) \\ 0 & \sin(\Omega t) & \cos(\Omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{b}_1 \\ \hat{b}_2 \\ \hat{b}_3 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

و ماتریس تبدیل مختصات عمومی به مختصات محلی xyz نیز مطابق زیر است.

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\psi & \cos\theta \sin\psi + \cos\psi \sin\varphi \sin\theta & \sin\varphi \sin\theta \\ -\cos\varphi \sin\psi & \cos\theta \cos\psi - \sin\psi \sin\varphi \sin\theta & \cos\varphi \sin\theta \\ \sin\varphi & -\cos\varphi \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (۹)$$

با معرفی این سیستم‌های مختصات و استفاده از معادلات اولر معادلات دینامیک حرکت بدست آمده‌اند (بارو، ۱۹۹۹). پیش از آن می‌بایست سرعت دورانی اسپار $\vec{\omega}$ و تیغه‌ها $\vec{\omega}_b$ باید در مختصات $b_1b_2b_3$ محاسبه شوند.

$$\vec{\omega} = \omega_x \hat{b}_1 + (\omega_y \cos \Omega t + \omega_z \sin \Omega t) \hat{b}_2 + (-\omega_y \sin \Omega t + \omega_z \cos \Omega t) \hat{b}_3 \quad (۱۰)$$

$$\vec{\omega}_b = (\omega_x + \Omega) \hat{b}_1 + (\omega_z \cos \Omega t + \omega_y \sin \Omega t) \hat{b}_2 + (-\omega_y \sin \Omega t + \omega_z \cos \Omega t) \hat{b}_3 \quad (۱۱)$$

$$\Delta F_p = N_b (\Delta L \cos\phi + \Delta D \sin\phi) = \quad (۱)$$

$$1/2\rho_{air}W^2N_b c(C_l \cos\phi + C_d \sin\phi)\Delta r$$

$$\Delta F_t = N_b (\Delta L \sin\phi - \Delta D \cos\phi) = \quad (۲)$$

$$1/2\rho_{air}W^2N_b c(C_l \sin\phi - C_d \cos\phi)\Delta r$$

که در آنها ρ_{air} دانسیته ی هوا، C طول کورد^۳ ایروفویل، W سرعت باد نسبی، C_l ضریب لیفت، C_d ضریب درگ، α زاویه حمله، Δr_b طول المان تیغه، ϕ زاویه ی جریان ورودی و N_b تعداد تیغه‌های توربین می‌باشد. همانطور که در شکل (۱) می‌توان مشاهده نمود W جمع برداری سرعت‌های مماسی و عمودی باد بر المان تیغه است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$W = \sqrt{V_{ax}^2 + V_t^2} \quad (۳)$$

به دلیل حضور توربین سرعت‌های باد مماسی و عمودی با سرعت‌های جریان آزاد باد و سرعت دورانی برابر نمی‌باشند و دو پارامتر ضرایب القای مماسی و عمودی به منظور نشان دادن کاهش سرعت باد ناشی از اصطکاک به کار برده می‌شوند.

$$V_{ax} = V_p(1 - a) \quad (۴)$$

$$V_t = \Omega r(1 - a') \quad (۵)$$

در روابط پیشین V_{ax} سرعت باد در محل صفحه ی روتور، V_p سرعت باد غیر آشفته عمود بر روتور، V_t سرعت باد تانژانتی، a ضریب القای محوری، a' ضریب القای مماسی و Ω سرعت زاویه ای روتور می‌باشد. با دانستن سرعت باد روی هر المان تیغه و در نظر گرفتن سرعت المان تیغه ناشی از حرکت اسپار بارهای وارد بر هر المان تیغه از روابط زیر بدست می‌آید.

$$\Delta L = \frac{1}{2}\rho_{air}cC_l((V_{ax} - \dot{x}_p)^2 + (V_t - \dot{x}_t)^2)\Delta r_b \quad (۶)$$

$$\Delta D = \frac{1}{2}\rho_{air}cC_d((V_{ax} - \dot{x}_p)^2 + (V_t - \dot{x}_t)^2)\Delta r_b \quad (۷)$$

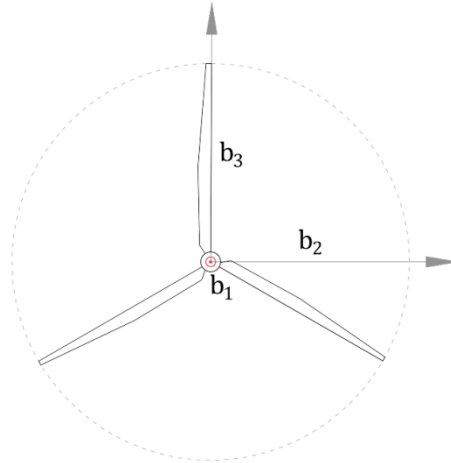
³. Chord

که در آن ω_x ، ω_y و ω_z مولفه های $\vec{\omega}$ در مختصات xyz می باشند.

$$\omega_x = \dot{\theta} \cos\varphi \cos\psi + \dot{\varphi} \sin\psi \quad (12)$$

$$\omega_y = -\dot{\theta} \cos\varphi \sin\psi + \dot{\varphi} \cos\psi \quad (13)$$

$$\omega_z = \dot{\psi} + \dot{\theta} \sin\varphi \quad (14)$$



شکل ۲. محل قرارگیری سیستم مختصات $b_1b_2b_3$

۳ شتاب دورانی تیغه ها نیز به صورت زیر بیان می شود.

$$\vec{\alpha}_b = \dot{\vec{\omega}}_b + \vec{\omega} \times (\Omega \hat{b}_1) \quad (15)$$

که در آن

$$\vec{\omega}_b = \omega_x \hat{b}_1 + (\omega_y \cos \Omega t + \omega_z \sin \Omega t - \omega_y \Omega \sin \Omega t + \omega_z \Omega \cos \Omega t) \hat{b}_2 + (-\omega_y \sin \Omega t + \omega_z \cos \Omega t - \omega_y \Omega \cos \Omega t - \omega_z \Omega \sin \Omega t) \hat{b}_3 \quad (16)$$

و

$$\vec{\omega} \times (\Omega \hat{b}_1) = -[\Omega(\omega_y \cos \Omega t + \omega_z \sin \Omega t)] \hat{b}_3 + [\Omega(-\omega_y \sin \Omega t + \omega_z \cos \Omega t)] \hat{b}_2 \quad (17)$$

با جایگذاری معادلات (۲۶) و (۲۷) در معادله (۲۵) خواهیم داشت

$$\vec{\alpha}_b = \omega_x \hat{b}_1 + [\omega_y \cos \Omega t + \omega_z \sin \Omega t - \omega_y \Omega \sin \Omega t + \omega_z \Omega \cos \Omega t + \Omega(-\omega_y \sin \Omega t + \omega_z \cos \Omega t)] \hat{b}_2 + [-\omega_y \sin \Omega t + \omega_z \cos \Omega t - \omega_y \Omega \cos \Omega t - \omega_z \Omega \sin \Omega t - \Omega(\omega_y \cos \Omega t + \omega_z \sin \Omega t)] \hat{b}_3 \quad (18)$$

و شتاب دورانی سیستم نیز از رابطه زیر محاسبه می شود

$$\vec{\alpha} = \dot{\vec{\omega}} \quad (19)$$

بنابراین مولفه های $\vec{\alpha}$ در مختصات xyz مطابق زیر بدست می آیند

$$\alpha_x = \dot{\theta} \cos\varphi \cos\psi + \dot{\varphi} \sin\psi - \dot{\theta}\dot{\varphi} \sin\varphi \cos\psi - \dot{\theta}\dot{\psi} \cos\varphi \sin\psi + \dot{\varphi}\dot{\psi} \cos\psi \quad (20)$$

$$\alpha_y = -\dot{\theta} \cos\varphi \sin\psi + \dot{\varphi} \cos\psi + \dot{\theta}\dot{\varphi} \sin\varphi \sin\psi - \dot{\theta}\dot{\psi} \cos\varphi \cos\psi - \dot{\varphi}\dot{\psi} \sin\psi \quad (21)$$

$$\alpha_z = \dot{\psi} + \dot{\theta}\sin\varphi + \dot{\theta}\dot{\varphi} \cos\varphi \quad (22)$$

معادلات حرکت تیغه‌ها را می‌توان به صورت زیر نشان داد.

$$M_1 = M_e - I_1 \alpha_{b1} \quad (23)$$

$$M_2 = I_2 \alpha_{b2} - (I_2 - I_1) \omega_{b1} \omega_{b3} \quad (24)$$

$$M_3 = I_3 \alpha_{b3} - (I_3 - I_1) \omega_{b1} \omega_{b2} \quad (25)$$

که در آن

$$M_e = F_t^{aero} \bar{r} \quad (26)$$

در رابطه ی فوق F_t^{aero} نیروی آیرودینامیک مماسی کل بر روی تیغه ها و \bar{r} موقعیت شعاعی نیروی آیرودینامیک مماسی است. نظر به اینکه $I_b = I_2 = I_3$

$$M_1 = F_t^{aero} \bar{r} - I_1 \dot{\omega}_x \quad (27)$$

$$M_2 = I_b [\dot{\omega}_y \cos \Omega t + \dot{\omega}_z \sin \Omega t - \omega_y \Omega \sin \Omega t + \omega_z \Omega \cos \Omega t + \Omega (-\omega_y \sin \Omega t + \omega_z \cos \Omega t)] - (I_b - I_1) (\omega_x + \Omega) (-\omega_y \sin \Omega t + \omega_z \cos \Omega t) \quad (28)$$

$$M_3 = I_b [-\dot{\omega}_y \sin \Omega t + \dot{\omega}_z \cos \Omega t - \omega_y \Omega \cos \Omega t - \omega_z \Omega \sin \Omega t - \Omega (\omega_y \cos \Omega t + \omega_z \sin \Omega t)] - (I_b - I_1) (\omega_x + \Omega) (\omega_y \cos \Omega t + \omega_z \sin \Omega t) \quad (29)$$

با تعریف دو رابطه ی پیش رو

$$P_2 = I_b [-2\omega_y \Omega \sin \Omega t + 2\omega_z \Omega \cos \Omega t] - (I_b - I_1) (\omega_x + \Omega) (-\omega_y \sin \Omega t + \omega_z \cos \Omega t) \quad (30)$$

$$P_3 = I_b [-2\omega_y \Omega \cos \Omega t - 2\omega_z \Omega \sin \Omega t] - (I_b - I_1) (\omega_x + \Omega) (\omega_y \cos \Omega t + \omega_z \sin \Omega t) \quad (31)$$

می توان معادلات ۲۸ و ۲۹ را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$M_2 = I_b [\dot{\omega}_y \cos \Omega t + \dot{\omega}_z \sin \Omega t] + P_2 \quad (32)$$

$$M_3 = I_b [-\dot{\omega}_y \sin \Omega t + \dot{\omega}_z \cos \Omega t] + P_3 \quad (33)$$

پیش رو معادلات حرکت دینامیک کل سیستم می باشد. در این روابط M_1 ، M_2 و M_3 گشتاورهای وارده به سازه از جانب تیغه ها می باشند. M_1 برآیند گشتاور در جهت b_1 است که در روتور تولید نیرو می کند. معادلات

$$M\vec{f} = \vec{W} + \vec{F}^{aero} + \vec{F}^{hydro} + \vec{F}^{mooring} \quad (34)$$

$$I_{xx} \alpha_x + (I_{zz} - I_{yy}) \omega_y \omega_z = M_x + M_1 \quad (35)$$

$$I_{yy} \alpha_y - (I_{zz} - I_{xx}) \omega_x \omega_z = M_y + M_2 \cos \Omega t - M_3 \sin \Omega t \quad (36)$$

$$I_{zz} \alpha_z - (I_{xx} - I_{yy}) \omega_x \omega_y = M_z + M_2 \sin \Omega t + M_3 \cos \Omega t \quad (37)$$

که در آن M ماتریس جرم، \vec{f} بردار شتاب جابه جایی، I ماتریس گشتاور اینرسی در مختصات xyz ، $\vec{\alpha} = \vec{\dot{\omega}}$ بردار شتاب دورانی سیستم، \vec{W} بردار نیروی وزن، \vec{F}^{aero} بردار نیروی آیرودینامیک، \vec{F}^{hydro} بردار نیروی هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک و $\vec{F}^{mooring}$ بردار نیروی مهار بندی و M_x ، M_y و M_z مولفه های برآیند گشتاورها در مختصات xyz هستند. که در آن \vec{M}^{aero}

$$M_x \hat{i} + M_y \hat{j} + M_z \hat{k} = \vec{M}^{aero} + \vec{M}^{hydro} + \vec{M}^{mooring} \quad (38)$$

$$I_{xx} \alpha_x + (I_{zz} - I_{yy}) \omega_y \omega_z = M_x + 3F_t^{aero} \bar{r} - I_1 \dot{\omega}_x \quad (37)$$

$$I_{yy} \alpha_y - I_b \dot{\omega}_y = (I_{zz} - I_{xx}) \omega_x \omega_z + M_y + P_2 \cos \Omega t - P_3 \sin \Omega t \quad (38)$$

$$I_{zz} \alpha_z - I_b \dot{\omega}_z = (I_{xx} - I_{yy}) \omega_x \omega_z + M_z + P_2 \sin \Omega t + P_3 \cos \Omega t \quad (39)$$

بردار گشتاور آیرودینامیک، \vec{M}^{hydro} بردار گشتاور هیدروستاتیک و هیدرواستاتیک و $\vec{M}^{mooring}$ بردار گشتاور مهاربندی می باشد در محل مرکز جرم سازه می باشند. باید توجه داشت که معادلات حرکت شامل اثرات جابجایی و سکوپیگ نیز هستند. با جایگذاری معادلات (۲۷)، (۳۲) و (۳۳) در معادلات (۳۵) تا (۳۷) خواهیم داشت.

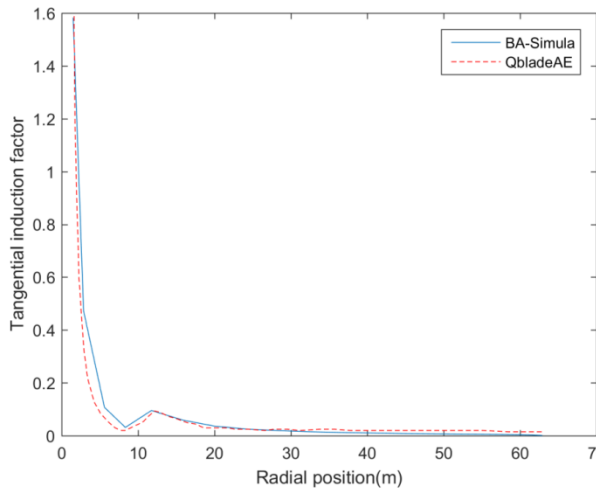
۳. نتایج

صحت سنجی مدول آیرودینامیک

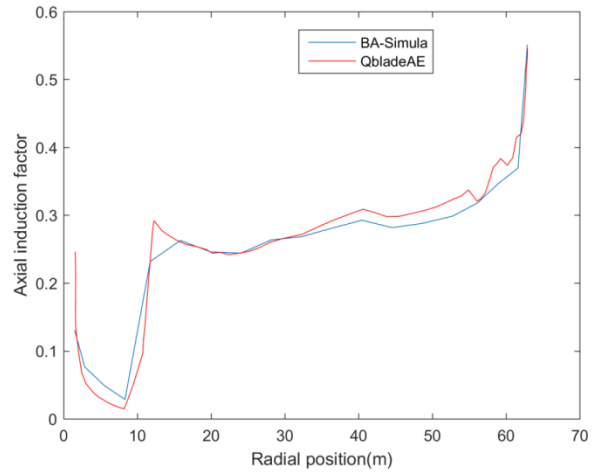
پیش از انجام شبیه سازی دینامیکی توربین بادی شناور مورد بررسی در این پژوهش به صحت سنجی مدول های موجود در مدل پرداخته می شود. به منظور ایجاد تمایز نتایج بدست آمده در این پژوهش در شکل های پیش رو این مدل را با نام BA-Simula مشخص شده است. نخست نتایج به دست آمده از مدول آیرودینامیک این پژوهش با نتایج شبیه سازی عددی مدل آیروالاستیک تیغه های توربین بادی شناور NREL دانشگاه فناوری برلین که با همکاری گروه انرژی بادی در موسسه دینامیک سیالات و آکوستیک فنی ۴ و به صورت مدل QbladeAE در سال ۲۰۱۱ ارائه شده مورد مقایسه قرار داده گرفته است. باید توجه داشت که تمامی مقایسه های صورت گرفته در شرایط میدان باد یکنواخت با سرعت عملیاتی ۱۱,۴ متر بر ثانیه و زمان صفر و بدون جابه جایی اولیه انجام گرفته است.

در شکل های (۳) تا (۶) پارامترهای اساسی در تحلیل آیرودینامیک تیغه ها شامل ضرایب القای محوری و مماسی و همچنین نیروهای محوری و مماسی وارد بر واحد طول تیغه ها مورد بررسی قرار گرفته است و همانطور که مشاهده می شود نتایج به دست آمده از مدل ارائه شده در این تحقیق BA-Simula و نتایج QbladeAE تطابق مناسبی را نشان می دهند.

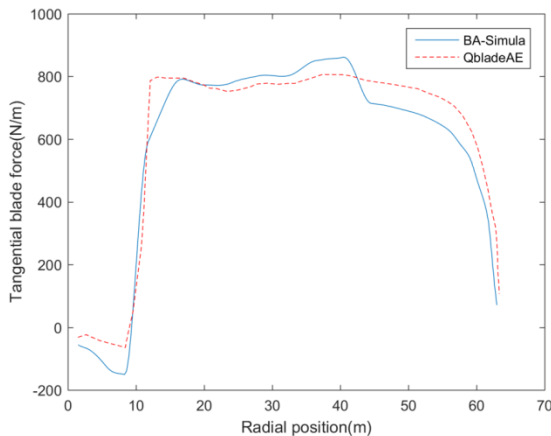
4. ISTA



شکل ۵: نتایج صحت سنجی ضریب القای مماسی

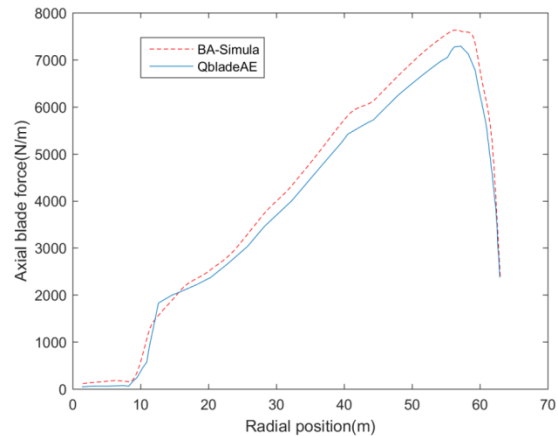


شکل ۳: نتایج صحت سنجی ضریب القای محوری



شکل ۶: نتایج صحت سنجی نیروی مماسی

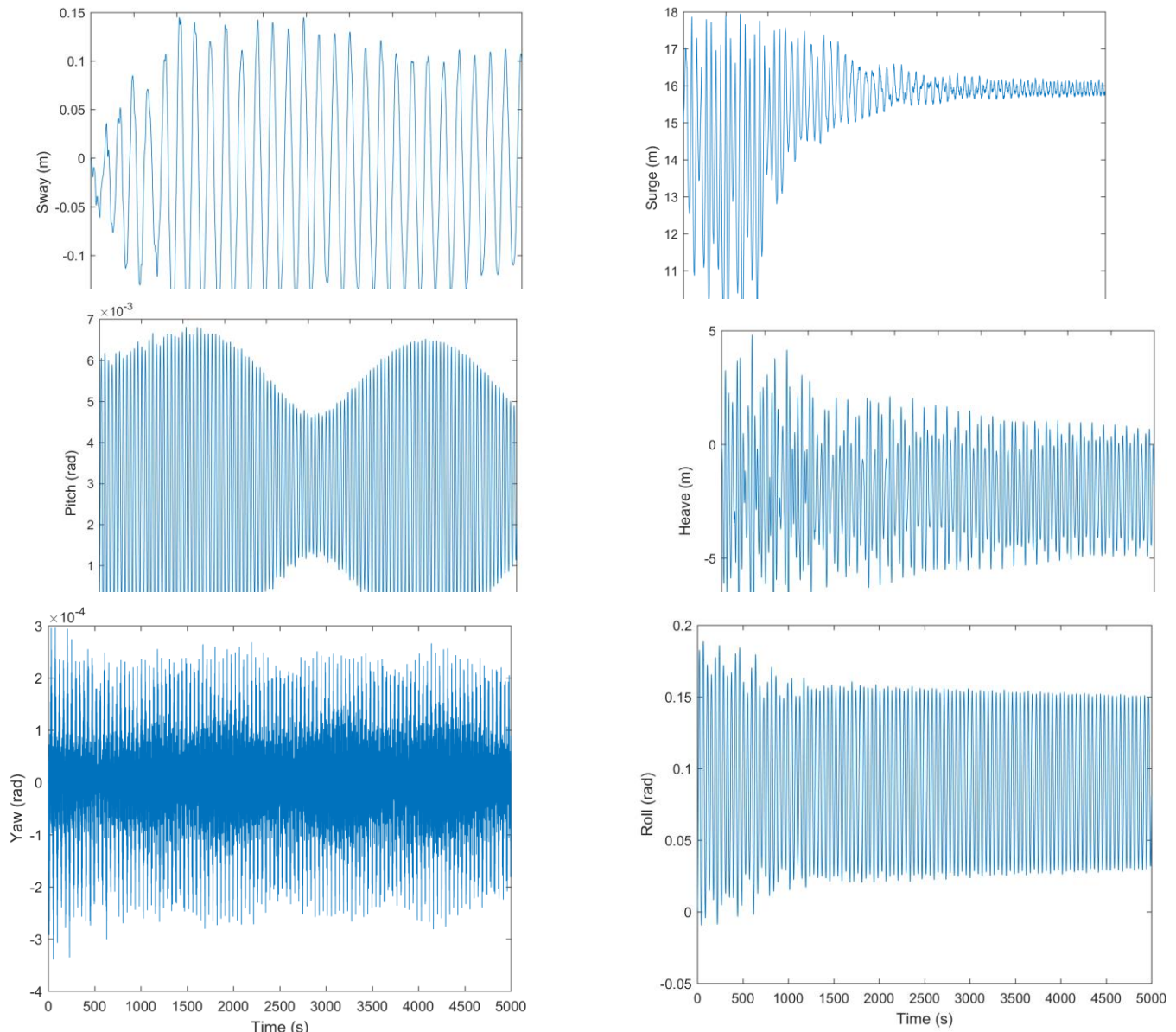
میدان باد یکنواخت با سرعت 11.4m/s که هر دو در جهت مثبت محور x مختصات محلی اول انتشار می-یابند را نشان می‌دهند.



شکل ۴: نتایج صحت سنجی نیروی محوری

نتایج شبیه سازی عددی

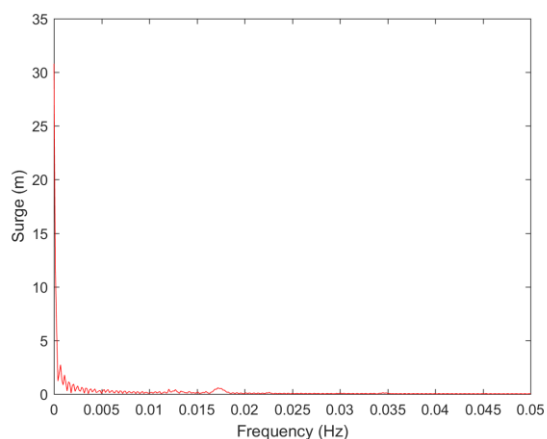
نتایج نهایی بدست آمده از مدل عددی ارائه شده در این تحقیق تاریخچه‌های زمانی جابه‌جایی‌ها و دوران‌های درجات آزادی توربین بادی شناور در نقطه مرکز جرم کل سازه CG و برآیند نیروهای مربوط به آنها می‌باشد. شکل‌های ۷ تا ۱۲ به ترتیب جابه‌جایی و برآیند نیروها و لنگرهای خارجی در درجات آزادی سرچ، سواى و هیو و دوران های پیچ، رول و یاورا در شرایط انتشار موج تکفام سینوسی با ارتفاع $H=1.4\text{m}$ و پریود $T=6.5\text{s}$ و



استفاده از صفحات هیو به منظور ایجاد میرایی بیشتر در این راستا می‌باشد. هرچند نوسان هیو در توربین‌های بادی شناور همانند ریزرها امری پارامتری اساسی محسوب نمی‌شود زیرا که برخلاف ریزرها روی پلتفرم توربین‌های بادی تأسیسات قرار نمی‌گیرند. شکل ۷ نشان می‌دهد که پاسخ دینامیکی سیستم در مود سرج بعد از عبور از حالت گذرا حول نقطه ی تعادل $x=15.8$ که از آنالیز اسمی بدست آمده است، نوسان می‌کند.

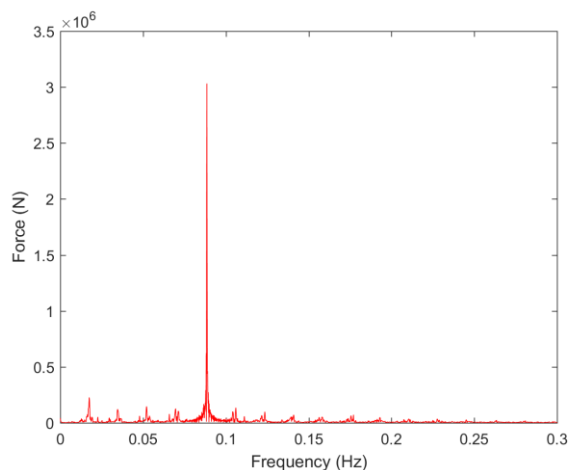
گذرا به حالت پایدار می‌رسد. جهت نیروهای وارد بر سازه در این تحقیق در راستای محور x می‌باشد بنابراین هیچ تحریک خارجی در جهت y حضور ندارد و دامنه‌های کوچک نوسان در مودهای پیچ و سوای به دلیل آنالیز کاملاً کوپل استفاده شده در این تحقیق می‌باشد. از شکل ۹ می‌توان مشاهده نمود که دامنه‌ی پاسخ نوسان هیو در حالت پایدار برابر با ۲٫۵ متر است که از مقادیر رایج در مطالعات مهندسی فراساحل برای

طیف فرکانس تحریک و نوسان سرج برای نمونه آورده شده‌اند که به خوبی عدم تطابق فرکانس تحریک و پاسخ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ ب: طیف فرکانس حرکت مود سرج عبارت فرکانس طبیعی میرا شده به این دلیل اتلاق می‌شود که به دلیل آنالیز کاملاً کوپله امکان حذف برخی از میرایی‌های ذاتی سیستم وجود ندارد. جدول ۲ مقادیر فرکانس‌ها و پریودهای طبیعی میرا شده‌ی سیستم را نشان می‌دهد.

نتایج حوزه‌ی فرکانس از تبدیل فوریه سریع (FFT) تاریخچه‌های زمانی بدست آمده از تحلیل حوزه زمان منتج شده است. فرکانس‌های تحریک در تمام مودهای حرکت با فرکانس‌های پاسخ متناظر خود برابر نیستند که این امر نشان دهنده‌ی کاملاً غیرخطی بودن رفتار دینامیکی سیستم است. در شکل‌های ۱۳ الف و ۱۳ ب



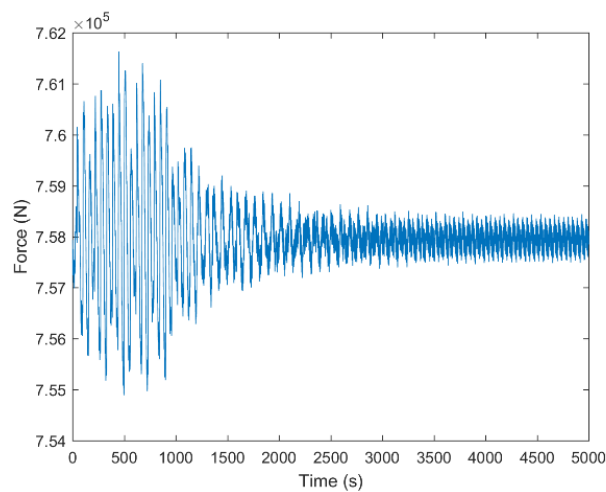
شکل ۱۳ الف: طیف فرکانس نیروی تحریک در مود سرج همانطور که در شکل ۱۳ ب می‌توان مشاهده نمود حرکت سرج در فرکانس صفر دارای دامنه‌ی بیشینه است که این امر نشان دهنده‌ی نوسان بدون ارتعاش است. با حذف نیروهای تحریک خارجی و اعمال جابه‌جایی‌های اولیه‌ی ۵، ۲ و ۰٫۵ متر به ترتیب در مودهای انتقالی سرج، سوای و هیو و جابه‌جایی اولیه‌ی ۰٫۱ رادیان برای تمام مودهای حرکت دورانی فرکانسهای طبیعی میرا شده‌ی سیستم بدست آمده‌اند.

جدول ۲: فرکانس‌ها و پریودهای طبیعی میرا شده

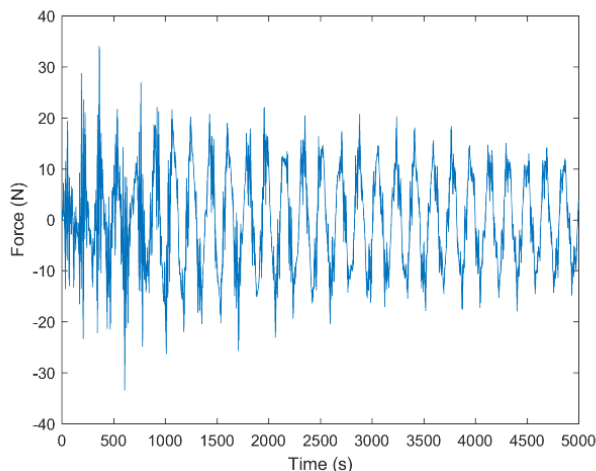
حالت	فرکانس (هرتز)	دوره تناوب (ثانیه)
جابجایی طولی	۰/۰۰۶۹	۱۴۴/۱۸۷۱
جابجایی عرضی	۰/۰۰۶۹	۱۴۴/۱۸۷۱
جابجایی قائم	۰/۰۳۱۴	۳۱/۸۳۵۲
غلتش عرضی	۰/۰۲۲۴	۴۴/۵۷۰۲
غلتش طولی	۰/۰۲۲۴	۴۴/۵۷۰۲
چرخش	۰/۱۱۴۰	۸/۷۷۳۷

اول انتشار می‌یابند پاسخ‌های نیروهای آیرودینامیک برای تمام مودهای حرکت انتقالی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و هر جفت از شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ این پاسخ‌ها را در مودهای حرکتی مربوطه نشان می‌دهند.

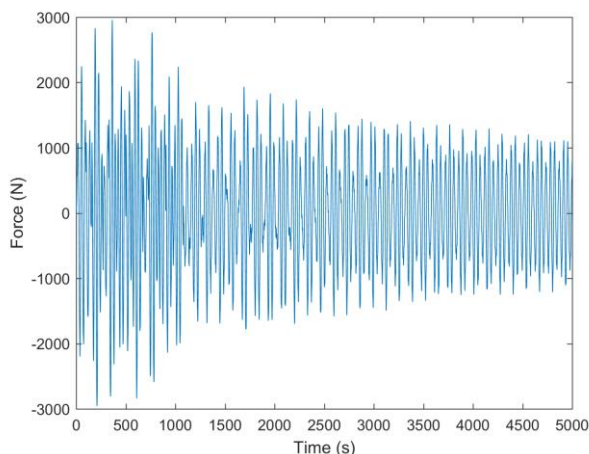
در شرایط عملیاتی با موج تکفام سینوسی با ارتفاع $H=1.4m$ و پریود $T=6.5s$ و میدان باد یکنواخت با سرعت $11.4m/s$ که هردو در جهت مثبت محور x مختصات محلی



شکل ۱۴: تاریخچه‌ی زمانی پاسخ نیروی آیرودینامیک در مود سرج



شکل ۱۵: تاریخچه‌ی زمانی پاسخ نیروی آیرودینامیک در مود سوای



شکل ۱۶: تاریخچه‌ی زمانی پاسخ نیروی آیرودینامیک در مود هیو

پاسخهای نیروهای آیرودینامیکی شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان می‌دهد که این نیرو در مقایسه با سایر نیروهای محیطی نیرویی غالب بوده و در شکل پاسخ دینامیک تأثیر گذار می‌باشد. در شکل ۱۳ مقدار فرکانس تحریک غالب نیروی آیرودینامیکی در راستای سرج در حدود $0,08$ هرتز نشان داده شده است و مطابق جدول ۲ فرکانس طبیعی سیستم در راستای سرج در حدود $0,007$ هرتز می‌باشد، با مقایسه این دو فرکانس می‌توان این نتیجه را گرفت که فرکانس تحریک اختلاف زیادی با فرکانس طبیعی دارد که این امر نشان می‌دهد که احتمال وقوع پدیده تشدید در سازه بسیار پایین می‌باشد و سازه از پایداری قابل قبولی برخوردار است.

با توجه به اینکه پاسخ‌های حرکت دینامیکی نشان داده شده در شکل‌های ۷ تا ۱۲ مشابه با پاسخ تحریک آیرودینامیک نشان داده شده در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ است می‌توان دریافت که نیروی آیرودینامیک در تعیین شکل رفتار دینامیکی سیستم نیروی غالب است.

۴. نتیجه گیری

نتایج حل معادلات (۳۴) تا (۳۷) نشان می‌دهد که روش عددی پیشنهادی انطباق خوبی در صحت سنجی‌های ارائه شده در شکل‌های ۳ تا ۶ داشته است. همچنین با مقایسه الگوی رفتاری پاسخهای حرکتی انتقالی و دورانی ارائه شده در شکل‌های ۷ تا ۱۲ با

and Pourzeinali,S.2015. ASSESSMENT OF FIXED JACKET PLATFORM USING INCREMENTAL WAVE ANALYSIS. Journal of Marine Science and Technology. 14(4).98-107. (In Persian).

Manwell, J. F., McGowan, J. G., and Rogers, A. L. 2010. Wind energy explained: theory, design and application. John Wiley & Sons.

Savenije, L. B. 2009. Modeling the dynamics of a spar-type floating offshore wind turbine (Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology).

Sclavounos, P., Tracy, C., & Lee, S. 2008. Floating offshore wind turbines: Responses in a seastate pareto optimal designs and economic assessment. In ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers. 31-41.

Sclavounos, P. D., Lee, S., DiPietro, J., Potenza, G., Caramuscio, P., & De Michele, G. 2010. Floating offshore wind turbines: tension leg platform and taught leg buoy concepts supporting 3-5 MW wind turbines. In European Wind Energy Conference EWEC .

Spera, D. 1998. Wind turbine technology—fundamental concepts of wind turbine technology.

قدردانی

در پایان نویسندگان از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر به جهت امکان استفاده از شرایط آزمایشگاهی کمال قدردانی را دارد.

منابع

Baruh, H. 1999. Analytical dynamics. Boston: WCB/McGraw-Hill press. 559-563.

Henderson, A. R., Leutz, R and Fujii, T. 2002. Potential for floating offshore wind energy in Japanese waters.

Jonkman, J. M. 2007. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine. ProQuest.

Jonkman, J. M. 2009. Dynamics of offshore floating wind turbines—model development and verification. Wind energy, 12(5), 459-492.

Karimirad, M., & Moan, T. 2011. Wave-and wind-induced dynamic response of a spar-type offshore wind turbine. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 138(1), 9-20.

Larsen, T. J., & Hanson, T. D. 2007. A method to avoid negative damped low frequent tower vibrations for a floating, pitch controlled wind turbine. In Journal of Physics: Conference Series 75(1). IOP Publishing.

Mahpeykar, M. Sadrinasab, M. Bakhtiari, M and Shahnikaramzadeh, N. The Investigation of Energy Production from Tidal Potential in Experimental Scale (Doragh estuary case study). 2016. Journal of Marine Science and Technology. 15(3).116-125.(In Persian).

Movahedinia, R. Mir Abdolhamid, M

Evaluation the effect of Aerodynamic on floating wind turbine operation

Mohamad Barooni¹, Morteza Bakhtiari^{1*}, Nasim Aleali¹, Masoud Sadrinasab²

1. Marine Engineering Faculty, Khorramshahr University of Marine Science and Technology
2. Environmental Faculty, Tehran University

(DOI): [10.22113/jmst.2017.71169.1944](https://doi.org/10.22113/jmst.2017.71169.1944)

Abstract

Nowadays demand for renewable and reliable energy sources due to the global warming, environment pollution and global energy crisis is of utmost importance in offshore engineering. As a result of recent developments in wind industries extracting energy from offshore wind resources has a growth. A number of researches are carried out in the field of land based wind turbines but investigations about floating wind turbines as a consequent of their dynamic behavior complexity are still limited and further more detailed surveys are required. This paper presents an open source and public simulation code for the analysis and design of floating offshore wind turbines. The dynamic behavior due to environmental and inertial loads is obtained using a fully coupled comprehensive numerical tool implemented in MATLAB. blade element momentum theory used to determination of aerodynamic loads on wind turbine as well as Panel method and Morison's equation to calculate the hydrodynamic loads considering the instantaneous position of wind turbine system. The results show the domination of aerodynamic loads on wind turbine dynamic behavior as well as stability of structure due to the great difference between values of dominate aerodynamic excitation frequency and system natural frequencies.

Keywords: floating wind turbine, Dynamic behavior, Energy recovery, Aerodynamic forces

List of tables & figures

- Figure 1. The component of Velocities and forces on the rotor
- Figure 2. The location of the coordinate system b_1, b_2, b_3
- Figure 3. The Results Validation of Axial induction coefficient
- Figure 4. The Results Validation of Tangential induction coefficient
- Figure 5. The Results Validation of Axial force coefficient
- Figure 6. The Results Validation of Tangential force coefficient
- Figure 7. The Departure time history in surge mode
- Figure 8. The Departure time history in sway mode
- Figure 9. The Departure time history in heave mode
- Figure 10. The Departure time history in pitch mode
- Figure 11. The Departure time history in roll mode
- Figure 12. The Departure time history in yaw mode
- Figure 13a. The frequency spectrum excitation in surge mode
- Figure 13b. The frequency spectrum in surge mode
- Figure 14. Response time history aerodynamic force in surge mode

*Corresponding author, E-mail: mortezabakhtiari@yahoo.com

Figure 15. Response time history aerodynamic force in sway mode

Figure 16. Response time history aerodynamic force in heave mode

Table 1. The characteristics of spar

Table 2. Damped natural frequencies and periods