

بررسی عددی نیروهای هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک در اثر حرکات انتقالی و دورانی بر رفتار دینامیکی توربین بادی شناور

محمد بارونی^۱، مرتضی بختیاری^{۲*}، نسیم آل علی^۳، مسعود صدری نسب^۴

m.barooni@kmsu.ac.ir

^۱ کارشناس ارشد مهندسی سازه‌های دریایی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر

mortezabakhtiari@yahoo.com

^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر

aleali@kmsu.ac.ir

^۳ استادیار، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر

masoud.sadri@ut.ac.ir

^۴ دانشیار، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۸

چکیده

با توجه به بحران‌های پیش رو در خصوص استحصال انرژی و آلودگی‌های محیط‌زیست توربین‌های بادی شناور می‌توانند عملی‌ترین و اقتصادی‌ترین روش برای استخراج منابع عظیم انرژی باد فراساحلی در آب‌های عمیق و عمق متوسط باشند. توربین‌های بادی شناور سازه‌های پیچیده‌ای هستند که تحت اثر هم‌زمان تحریکات باد و موج قرار دارند. دینامیک سازه‌ای کوپل و معادلات پاسخ حرکت این توربین‌ها غیرخطی شدگی‌های هندسی میان حرکت‌های نسبی و سرعت‌ها را نشان می‌دهد. توربین بادی شناور یک سیستم سازه‌ای مرکب آبرو-هایدرو-سرو-الاستیک هست؛ که برای چنین سازه‌هایی می‌بایست معادلات حرکت غیرخطی کوپل شده با در نظر گرفتن نیروهای تحریک و میرایی غیرخطی شامل تمام اثرات ناشی از باد و موج در حوزه زمان حل شوند. در پژوهش حاضر، آنالیز پاسخ‌های حرکت برای شرایط عملیاتی حرکات انتقالی و دورانی به منظور بررسی عملکرد و پایداری سازه‌ای توربین بادی شناور اسپار تحت نیروهای شناوری و هیدرودینامیک امواج مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا اقدام به توسعه مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار متلب گردید. پیش از انجام شبیه‌سازی دینامیکی توربین بادی شناور مورد بررسی در این پژوهش به صحت‌سنجی مدول‌های موجود در مدل پرداخته می‌شود. در نهایت نتایج به دست آمده در حوزه زمان ارائه شده‌اند نتایج به دست آمده نشان می‌دهند در حرکات انتقالی، بیشترین و کمترین میزان نیروی شناوری به ترتیب در جهت‌های عمودی و عرضی و بیشترین و کمترین میزان نیروی هیدرودینامیک به ترتیب در جهت‌های طولی و عرضی بوده است. همچنین در حرکات دورانی، بیشترین و کمترین میزان نیروی شناوری به ترتیب در جهت‌های طولی و عمودی و حداکثر و حداقل میزان نیروی هیدرودینامیک به ترتیب در جهت‌های عمودی و عرضی بوده است. بررسی کمی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، مقدار نیروی شناوری در راستای محور X حداقل ۱۶۰۰۰- کیلونیوتن و حداکثر ۵۰۰ کیلونیوتن در راستای محور Y حداقل ۵۰- کیلونیوتن و حداکثر ۵۵۰ کیلونیوتن و در راستای محور Z حداقل ۸۲۰۰۰ کیلونیوتن و حداکثر ۷۸۰۰ کیلونیوتن بوده است. همچنین مقدار نیروی

هیدرودینامیک در راستای محور X حداقل 350 - کیلونیوتن و حداکثر 350 کیلونیوتن در راستای محور Y حداقل صفر و حداکثر $2/6$ نیوتن و در راستای محور Z حداقل صفر و حداکثر 260 کیلونیوتن بوده است.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی شناور، نیروهای شناوری، نیروهای هیدرودینامیکی امواج، نرم‌افزار متلب

۱. مقدمه

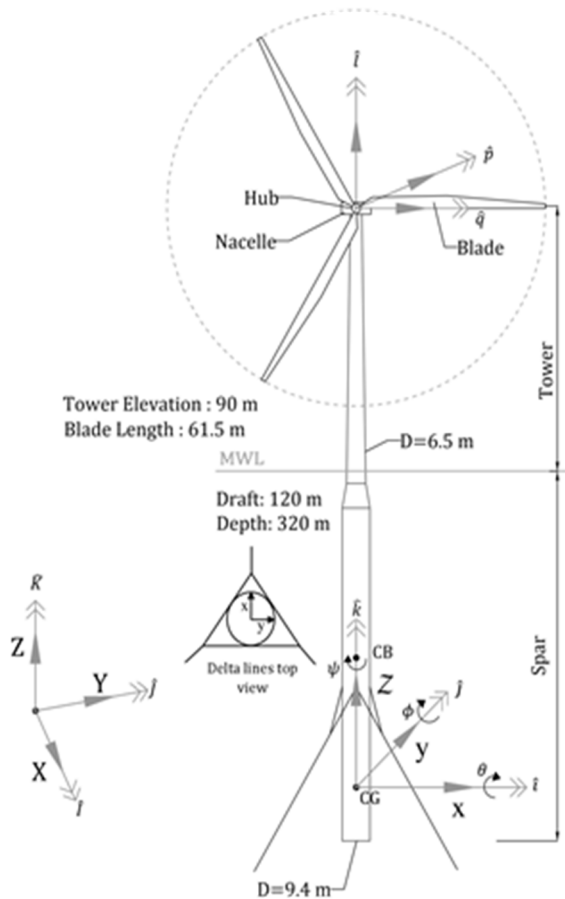
امروزه تقاضا برای انرژی تجدیدپذیر و قابل اطمینان به دلیل گرمایش جهانی، آلودگی محیط‌زیست و بحران انرژی محققان را به شدت به چالش کشیده است. سال‌هاست که برای تولید نیرو در خشکی و دریا از باد استفاده می‌شود. نخستین استفاده آن به حرکت درآوردن قایق‌ها در دریا بود. آسیاب کردن غلات و بالا کشیدن آب از چاه‌ها با استفاده از نیروی باد برای اولین بار با آسیاب‌های بادی در قرن دهم در ایران انجام شد [۱]. 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 سادهٔ مبدل انرژی است که انرژی جنبشی باد را به وسیلهٔ 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 افق دید ناشی از آن‌ها و ایجاد آلودگی صوتی مواجه‌اند؛ بنابراین مهندسان باد برای یافتن مکان‌های مناسب برای تولید انرژی الکتریکی پاک به سمت منابع باد فراساحلی در اقیانوس‌ها رفته‌اند [۲، ۳]. نظر به اینکه انرژی باد فراساحلی به سرعت در حال توسعه است، همچنین آلودگی بصری و صوتی و تداخل الکترومغناطیسی (بر تلویزیون، مایکروویو و رادار) توربین‌های بادی در خشکی، می‌تواند با انتقال توربین‌ها به فراساحل آن‌ها را کاهش دهد. توربین‌های فراساحلی مزایای بسیاری دارند و باد در فراساحل قوی‌تر و پایدارتر است که به تولید بیشتر انرژی الکتریکی کمک می‌کند. انرژی بادی فراساحلی هنوز فناوری تکامل یافته‌ای نیست و روش‌های جدیدتری نیز به وجود خواهند آمد. اخیراً مطالعه و بررسی در این خصوص مورد توجه محققان مختلف بوده است که از جمله آن‌ها

می‌توان به مواردی اشاره نمود. تانگ در سال ۱۹۹۸، در تحقیقی، به بحث طراحی مفهومی و بررسی اقتصادی استفاده از پی شناور برای نصب توربین بادی پرداخت. در این پژوهش جنبه‌های فنی و زیست‌محیطی توسعه استفاده از توربین‌های شناور فراساحلی مطرح شده و امکان نصب و بهره‌برداری از این توربین‌ها در عمق 100 تا 300 متر از لحاظ قانونی و عملیاتی مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. لی در سال 2004 ، در مطالعه خود به بررسی کلی دو نمونه پی شناور برای توربین‌های بادی پرداخت و ارزیابی اولیه کارایی این پی‌ها با تحریک باد و موج را ارائه داد. او برای تحلیل‌های هیدرودینامیکی از نرم‌افزار سویم^۱ و برای تحلیل خطوط مهار از نرم‌افزار لاین^۲ استفاده کرد [۵]. جانکنم در سال 2007 ، مطالعاتی بر آنالیز پاسخ دینامیکی توربین‌های بادی شناور با سکو از نوع بارج انجام داد و کد رایانه‌ای سریع فست را با اضافه کردن نیروهای هیدرودینامیک برای توربین‌های بادی شناور ارتقا داد [۲]. لارسن و هسن در سال 2007 ، روشی برای اجتناب از حرکت بسامد پایین میرا شده منفی یک توربین بادی شناور پیچ-کنترل شده از نوع اسپار ارائه دادند. کار آن‌ها در ارتباط با پروژه‌های ویند^۳ شرکت استات اویل^۴ بوده است [۶، ۷]. سافنایه در سال 2009 ، در تحقیق خود به بررسی مدل دینامیکی توربین بادی شناور فراساحلی پروژه‌های ویند پرداخته و مدل عددی ساده‌ای تی‌فلو^۵ 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 حوزهٔ زمان محاسبه نمود و نتایج به دست آمده را به صورت تاریخیچه‌های زمانی مودهای مختلف حرکت تحت چند سناریوی بارگذاری مختلف ارائه نموده است [۸]. اسکالیونوس و همکاران در سال 2010 ، طرح‌هایی برای دو توربین بادی شناور سخت مقاوم در برابر حرکت به منظور

استقرار در محدوده عمق ۳۰ تا صدها متری آب که قابلیت حمل توربین‌های ۳-۵ مگاوات را دارند ارائه نمودند. در این تحقیق سکو پایه کششی با کابل‌های عمودی به لنگر ثقلی مهار شده و بویه با مهار کشیده به وسیله خطوط مهار کشیده مورب به لنگر ثقلی متصل به بستر دریا مهار شده‌اند. سپس بارهای خطی و غیرخطی وارد بر بخش شناور توربین با روش‌های مورد استفاده برای طراحی سکوها 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 مهاربندی به دست آورده شده است. در نهایت نتایج شبیه‌سازی‌ها برای موج با ارتفاع مشخصه تا ۱۴ متر و عمق آب ۳۰ تا ۱۵۰ متر به صورت شتاب‌های نازل و کشش‌های دینامیک خطوط مهاربندی ارائه شد [۹]. کریمی‌راد و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی حرکات ناشی از باد و موج یک توربین بادی شناور اسپار ۵ مگاوات در شرایط محیطی عملیاتی و سخت پرداختند. در این پژوهش آن‌ها با شبیه‌سازی‌های آیرودینامیک هایدرو-سرو-الاستیک در حوزه زمان پاسخ‌های حرکت دینامیکی این سازه را تحلیل نمودند. تحلیل بخش آیرودینامیک شبیه‌سازی آن‌ها بر اساس تئوری مونتوم المان تیغه پیشرفته صورت گرفته و در بخش هیدرودینامیک از روش پنل با فرمول مورسون با در نظر گرفتن موقعیت لحظه‌ای سازه استفاده شده است. آن‌ها مشاهده نمودند که درگ هیدرودینامیک و هندسه خاص سازه باعث غیرخطی شدن می‌شود و غیرخطی شدگی هیدرودینامیک بیش‌تر از محدوده فرکانس موج سبب تحریک فرکانس‌های طبیعی در محدوده فرکانس پایین می‌شود. آن‌ها در این پژوهش دریافتند که مقادیر متوسط پاسخ‌های دینامیکی اصولاً از باد ناشی می‌شود و انحراف معیارهای پاسخ‌ها ناشی از موج می‌باشد [۱۰]. اسکوره و همکاران در سال ۲۰۱۵، یک آنالیز مقایسه‌ای میان اندازه‌گیری‌های صورت گرفته روی نمونه مقیاس اصلی توربین بادی شناورهای ویند و شبیه‌سازی‌های عددی آن انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش شرحی از مشخصات اصلی سازه‌های ویند، سیستم کنترلی آن و اندازه‌گیری‌های مهم انجام شده ارائه دادند. در این تحقیق

روشی برای برآورد تراز موج برخوردی به سازه‌های ویند پیشنهاد شده و شبیه‌سازی‌های دینامیک مقایسه‌ای با تاریخچه‌های زمانی تراز موج برآورد شده با پارامترهای آماری اندازه‌گیری شده میدان باد صورت گرفته است. در نهایت مقادیر اندازه‌گیری شده حرکت مودهای رول، پیچ و یاو، گشتاورهای خمشی برج، کشش خطوط مهاری، تولید نیرو، سرعت روتور و زاویه پیچ تیغه‌ها در دو حالت سرعت باد پایین‌تر و بالاتر از سرعت عملیاتی با شبیه‌سازی‌های عددی انجام گرفته توسط ابزار عددی سیمو/ریفلکس/اچ‌ای‌وی‌سی^۲ مورد مقایسه قرار گرفته و تطابق بسیار مناسبی را نشان داده است [۱۱]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶، یک آنالیز پاسخ دینامیکی تصادفی برای یک توربین بادی شناور محور عمودی ۵ مگاوات به صورت کوپل کاملاً غیرخطی در حوزه زمان ارائه دادند. مدل مورد مطالعه در این تحقیق که ترکیبی از یک روتور داریس و یک شناور نیمه مستغرق است؛ در شرایط مختلف باد و موج قرار داده شده و حرکت کلی، پاسخ سازه‌ای و کشش خطوط مهاری آن با شبیه‌سازی در حوزه زمان و بسامد به دست آمده است [۱۲].

در تحقیقات گذشته بررسی رفتار دینامیکی توربین بادی شناور به خوبی صورت نگرفته است؛ چرا که دامنه حرکتی این سازه‌ها بسیار بزرگ بوده و سبب می‌شوند که ترم‌های غیرخطی و ژيروسکوپیک تأثیر زیادی بر شکل رفتار دینامیکی و حرکتی سازه از خود به جا گذارند. در تحقیقاتی که در این مقاله مرور شد، ملاحظه شده است که این ترم‌های غیرخطی که در معادله حرکت اوپلر مشاهده می‌شوند یا در نظر گرفته نشده‌اند یا بحثی در مورد آن‌ها صورت نگرفته است. با توجه به این که رفتار دینامیکی توربین بادی شناور تحت اثر جابه‌جایی‌های بزرگ است در این مقاله سعی شده که کلیه ترم‌های غیرخطی معادله دینامیکی اوپلر بدون حذف کردن در معادله‌های حرکت باقی بمانند تا بتوان رفتار دقیق‌تری از حرکت توربین مشاهده کرد. همچنین با توجه به این که توربین‌های بادی شناور اغلب در شرکت‌های تجاری طراحی و تولید می‌شوند، به نتایج آزمایشگاهی تست‌های دینامیکی این سازه‌ها دسترسی خاصی وجود ندارد؛ بنابراین



شکل ۱. طرحواره سازه توربین بادی

در جدول (۱) مشخصات توربین بادی شناور مدل سازی شده نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات توربین بادی شناور

مشخصات اسپار (سکو)	
درفت کل	۱۲۰ (متر)
قطر بالای محل باریک شدن	۶/۵ (متر)
قطر پایین محل باریک شدن	۹/۴ (متر)
جرم، به همراه وزنه های تعادل	۷۵۹۳۰۰ (کیلوگرم)
مرکز جرم CG	-۹۲/۵۸ (متر)
اینرسی دوران رول حول CG	$۴/۴۸۹ \times ۱۰^۹$ (کیلوگرم. متر مربع)
اینرسی دوران پیچ حول CG	$۴/۴۸۹ \times ۱۰^۹$ (کیلوگرم. متر مربع)
اینرسی دوران یاو حول خط مرکز	$۱/۶۷۲ \times ۱۰^۹$ (کیلوگرم. متر مربع)
مشخصات جرم سیستم	
جرم کل	۸۰۶۶۰۴۸ (کیلوگرم)
مرکز جرم CG	-۷۸/۶۱ (متر)
اینرسی دوران پیچ حول مبدأ	$۶/۸۰ \times ۱۰^{۱۰}$ (کیلوگرم. متر مربع)
اینرسی دوران یاو حول خط مرکز	$۱/۹۲ \times ۱۰^۸$ (کیلوگرم. متر مربع)

در این تحقیق سعی شده که صحنه گذاری به طور موردی و در شرایط خاصی که در نتایج تحقیقات دیگران بوده صورت گیرد.

۲. روش تحقیق

یک توربین بادی شناور فراساحلی تحت بارهای ناشی از باد و موج که باعث ایجاد غیرخطی شدن در پاسخ دینامیکی می شوند، قرار دارد. در این بخش به بیان روش تحقیق مورد استفاده در این پژوهش به منظور محاسبه بارهای هیدرودینامیک، شناوری وارد بر سازه توربین بادی شناور و نیز روش عددی برای حل معادله های حرکت پرداخته شده است. در این پژوهش مدل مورد بررسی توربین ۵ مگاواتی طراحی شده با آزمایشگاه ملی انرژی های تجدیدپذیر آمریکا است که توسط یک سکو اسپار با عمق آبخور ۱۲۰ متر پایدار می شود [۳]. توربین بادی شناور به صورت یک جسم صلب در فضا دارای شش درجه آزادی می باشد. سه درجه آزادی محل قرارگیری مرکز جرم را مشخص می کنند و سه درجه آزادی دیگر نشان دهنده جهت گیری جسم هستند. موقعیت مرکز جرم به وسیله X ، Y و Z نشان داده می شود و جهت گیری جسم با زوایای اولر θ ، ϕ و ψ مشخص می شود. به منظور محاسبه بارهای هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک سه سیستم مختصات تعیین شده است. سیستم مختصات اول یک مختصات کلی است و به صورت ثابت در بستر دریا در نظر گرفته شده است. دو مختصات محلی نیز به ترتیب در مرکز جرم سیستم و محور هاب قرار دارند که در شکل (۱) نشان داده شده است.

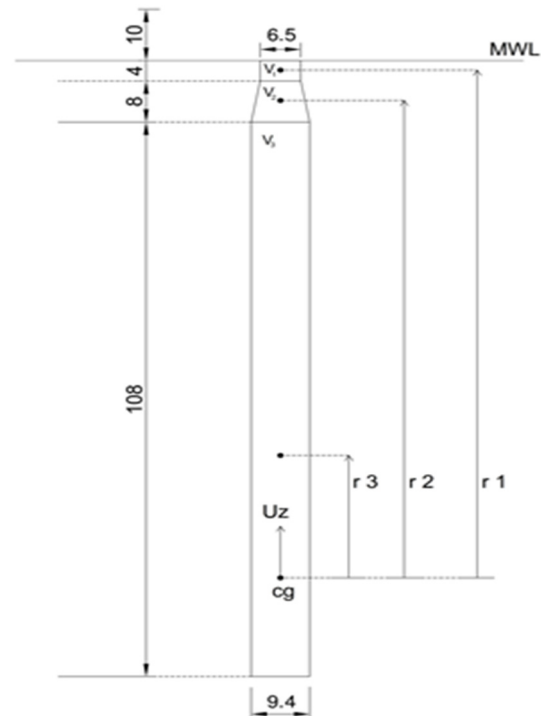
۱-۲. نیروهای هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک

بارهای هیدرواستاتیک با استفاده از قانون ارشمیدس به دست آمده‌اند. بر اساس قانون ارشمیدس وزن توربین بادی، سکو و کابل‌های مهاری در آب برابر با وزن حجم آب جابه‌جا شده می‌باشد. نیروی شناوری در محل مرکز شناوری سیستم با در نظر گرفتن موقعیت لحظه‌ای سازه و تراز موج در هر گام زمانی محاسبه شده است. فرم عمومی معادله نیروی شناوری را می‌توان به صورت معادله (۱) بیان نمود.

$$F_b = \rho_{sea} g (V_0 - A_{surf} u_z + A_{surf} \eta_{surf}) \quad (1)$$

F_b نیروی شناوری، ρ_{sea} چگالی آب دریا، g شتاب گرانشی، V_0 حجم آب جابه‌جا شده هنگامی که $u_z = 0$ و $\eta_{surf} = 0$ جابه‌جایی در راستای Z در سیستم مختصات کلی، A_{surf} مساحت مقطع اسپار در سطح آب و η_{surf} تراز موج سطحی است. محل مرکز شناوری برای به دست آوردن گشتاورهای شناوری ضروری است. معادله (۲) فاصله عمودی میان مرکز جرم و مرکز شناوری سیستم را مشخص می‌کند.

$$\overline{BG} = \frac{1}{V_s} \int V_s z dV = \frac{V_1 r_1 + V_2 r_2 + V_3 r_3}{V_1 + V_2 + V_3} \quad (2)$$



شکل ۲. نمای آزاد اسپار

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است V_1 ، V_2 و V_3 به ترتیب حجم آب جابه‌جا شده توسط بخش مستغرق فوقانی، میانی و تحتانی و $V_s = V_1 + V_2 + V_3$ است. کمیت‌های r_1 ، r_2 و r_3 نیز فاصله عمودی از مرکز جرم Cg تا مرکز جرم‌های V_1 ، V_2 و V_3 هستند. از آنجایی که مرکز شناوری اسپار همواره در بالای مرکز جرم Cg قرار می‌گیرد، فاصله میان مرکز جرم و سطح متوسط آزاد آب از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$h_B = h_G - \overline{BG} \quad (3)$$

در این رابطه، h_G فاصله عمودی مرکز جرم Cg تا سطح متوسط آزاد آب است.

۲-۲. بارهای هیدرودینامیک

در این پژوهش بارهای هیدرودینامیک با استفاده از ترکیب معادله موریسون و تئوری پانل نواری محاسبه شده‌اند. معادله موریسون به طور گسترده در تحلیل سازه‌های فراساحلی ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. در روش پانل نواری سازه به تعدادی المان تقسیم می‌شود و معادله موریسون به منظور محاسبه بارهای خطی موج و غیرخطی درگ و ویسکوز بر روی هر المان به کار برده می‌شود [۳]. در این پژوهش معادله موریسون به منظور در نظر گرفتن حرکت المان‌ها به صورت زیر تغییر داده شده است [۱۱].

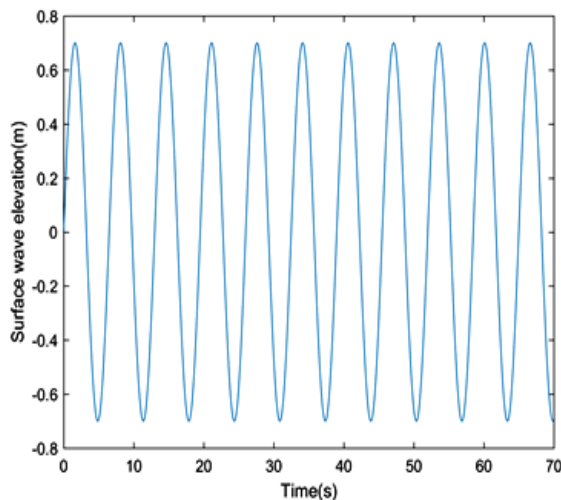
$$df^{hydro} = \frac{1}{2} \rho C_d D (u + c - \dot{q}_s) |u + c - \dot{q}_s| dz + \rho_{sea} A_s (c_m \ddot{\eta} - c_a \ddot{q}_s) dz \quad (4)$$

D : قطر مقطع اسپار، U و C : به ترتیب سرعت‌ها ذره موج و جریان، \dot{q}_s و \ddot{q}_s : سرعت و شتاب سیستم، A_s : مساحت مقطع عرضی اسپار، $\ddot{\eta}$: شتاب محلی ذره موج و d_z : طول واحد مقطع است. C_d ، C_m و C_a : به ترتیب ضرایب درگ و ویسکوز، اینرسی و جرم افزوده‌اند که به صورت تجربی محاسبه می‌شوند. این پارامترها تابع عدد رینولدز، عدد کلوگان کارپنتر، عدد جریان نسبی و نرخ زبری سطح هستند. سینماتیک ذرات موج برای هر گام زمانی بر اساس تئوری موج خطی ایری به دست آمده و در محاسبه نیروهای هیدرودینامیک وارد بر هر مقطع با در نظرگیری موقعیت لحظه‌ای آن مقطع به کار گرفته شده است [۳]. به دلیل عمق

نرم افزار متلب با استفاده از کد ODE45 که بر مبنای روش رانج کوتاه نوشته شده است حل شدند.

۲-۴. صحت سنجی مدول موج و هیدرودینامیک

شرایط موج در نظر گرفته شده در این پژوهش بر اساس جدول شرایط دریا در گزارش مشخصات سیستم شناور فاز IV برای OC3-Hywind برابر با وضعیت ۳ دریا یعنی ارتفاع موج ۱/۴ متر و دوره تناوب ۵/۶ ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل (۳) نیم رخ موج به دست آمده با مدول موج به کاررفته در این پژوهش نشان داده شده است که می توان مشاهده نمود به درستی موج تکفام سینوسی با دامنه ۰/۷ متر که بر اساس نظریه خطی موج برابر با یک دوم ارتفاع موج است، در مدت زمان ۷۰ ثانیه شبیه سازی شده است [۲].



شکل ۳. نیم رخ سطح موج با $T=6.5s$ و $H=1.4m$

شکل (۴) توزیع نیروی هیدرودینامیکی در جهت انتشار موج به دست آمده از رابطه موريسون در لحظه صفر و بدون جابه جایی بر روی اسپار را نشان می دهد. فرورفتگی ایجاد شده در تراز ۱۲ تا ۴ متر نشان دهنده تأثیر کاهش قطر مؤثر اسپار در این ناحیه است و به خوبی تأثیر هندسه خاص سازه مورد تحلیل را بر توزیع نیروی هیدرودینامیکی مشخص می کند این توزیع نیروی هیدرودینامیک در زمان صفر و بدون جابه جایی و با مشخصات موج بیان شده در بخش صحت سنجی مدول موج به دست آمده است.

آبخور زیاد اسپار یک روش جایگزین برای محاسبه نیروی هیدرودینامیک وارد بر کف سازه در این پژوهش ارائه شده است که از ترکیب ترم های اینرسی معادله موريسون و میرایی سیال حاصل شده است (رابطه ۵) [۳].

$$\begin{cases} F_z^{hydro} = -m_{az}\ddot{z}_s - C_{vd}|z_s|\dot{z}_s \\ F_z^{hydro} = -B_m\ddot{z}_s - C_{vd}|z_s|\dot{z}_s \end{cases} \quad (5)$$

B_m : جرم افزوده عمودی است که می توان آن را برابر با وزن یک نیمکره از آب در زیر اسپار در نظر گرفت (۱۹). \dot{z}_s و \ddot{z}_s : نیز به ترتیب مؤلفه های سرعت و شتاب سیستم هستند و C_{vd} : میرایی سیال است (رابطه ۶).

$$C_{vd} = \frac{1}{2} C \rho_{sea} A \quad (6)$$

C : ضریب درگ صفحه کف و A : مساحت کف اسپار است. خروجی بخش هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک شامل بارهای ناشی از شناوری، امواج، جریان و میرایی هیدرودینامیک است.

۲-۳. معادله های حرکت

سه معادله حرکت موده های جابه جایی به طور کلی به صورت رابطه (۷) می باشند.

$$M\ddot{\vec{r}} = \vec{F} \quad (7)$$

M : ماتریس جرم، \vec{r} : بردار شتاب جابه جایی، \vec{F} : بردار نیروی خارجی کل است. بردار شتاب جابه جایی نیز به صورت رابطه ۸ است.

$$\vec{\ddot{r}} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} \quad (8)$$

همچنین سه معادله حرکت موده های دورانی را می توان به صورت رابطه های ۹ تا ۱۱ نشان داد:

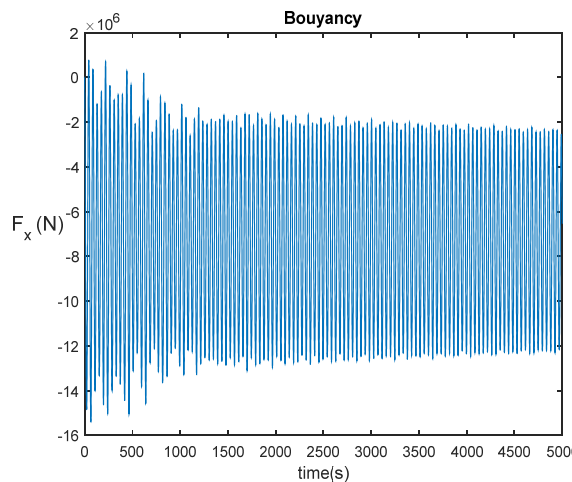
$$I_{xx}\alpha_x + (I_{zz} - I_{yy})\omega_y\omega_z = M_x \quad (9)$$

$$I_{yy}\alpha_y - (I_{zz} - I_{xx})\omega_x\omega_z = M_y \quad (10)$$

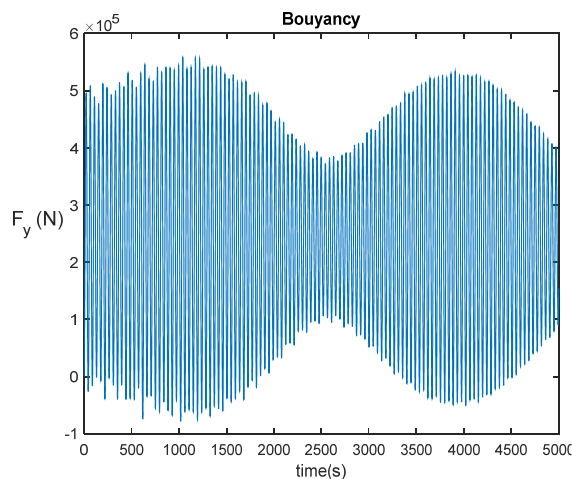
$$I_{zz}\alpha_z - (I_{xx} - I_{yy})\omega_x\omega_y = M_z \quad (11)$$

\vec{M} : برآیند گشتاورهای وارد بر اسپار، $\vec{\alpha}$: شتاب زاویه ای، $\vec{\omega}$: سرعت زاویه ای و I : ماتریس ممان اینرسی است. در نهایت نیز معادله های (۷) تا (۱۱) پس از تبدیل به فضای حالت در

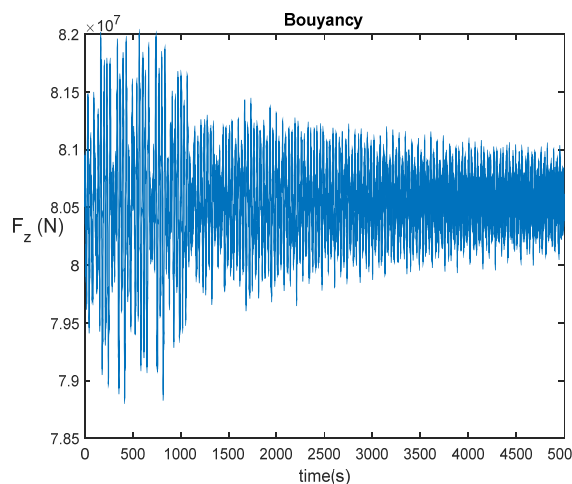
در اثر وجود نیروی آیرودینامیک بیشتر بوده، بنابراین میزان نیروی شناوری در این راستا از نیروی شناوری محور عرضی بیشتر بوده است.



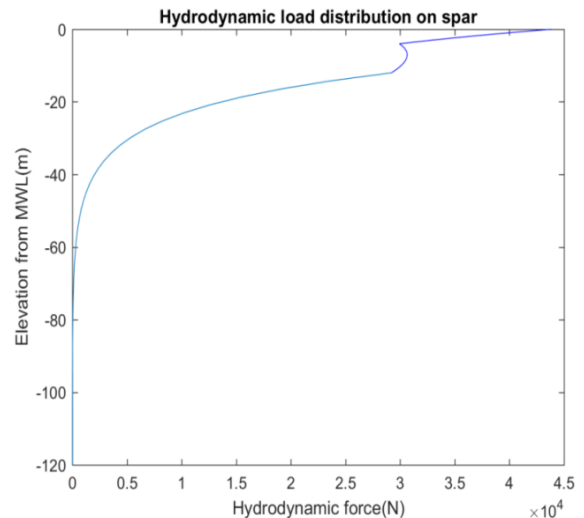
شکل ۶. نیروی شناوری در راستای محور طولی (X)



شکل ۷. نیروی شناوری در راستای محور عرضی (Y)

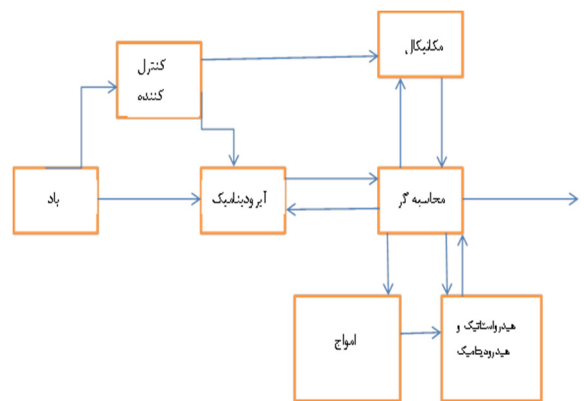


شکل ۸. نیروی شناوری در راستای محور عمودی (Z)



شکل ۴. توزیع نیروی هیدرودینامیکی در جهت انتشار موج بر جانب اسپار در راستای عمودی

در شکل (۵)، الگوریتم حل مسئله پژوهش حاضر نشان داده شده است.



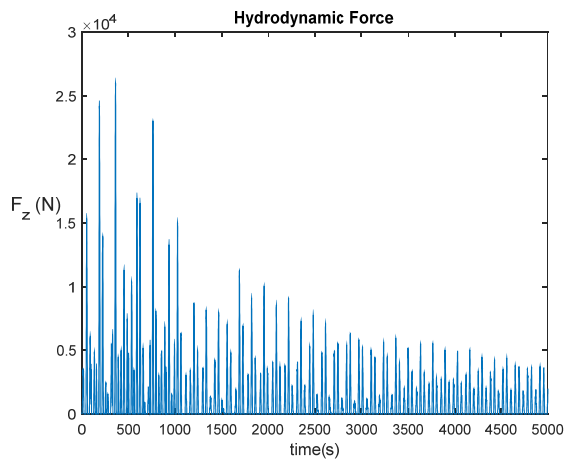
شکل ۵. فلوچارت اجرای مدل در تحقیق حاضر

۳. نتایج و بحث

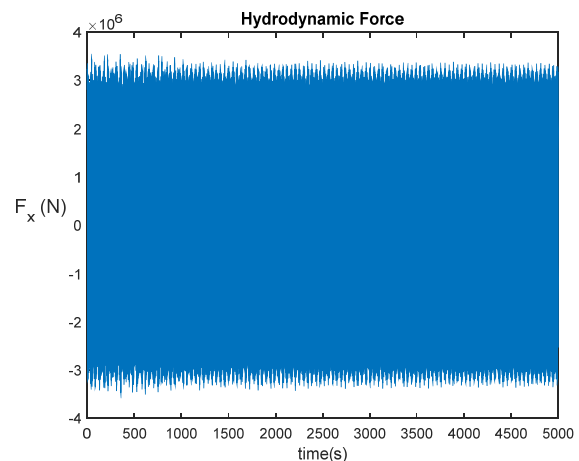
۳-۱. بررسی حرکات انتقالی

در این بخش نتایج به دست آمده برای نیروهای شناوری و هیدرودینامیک در اثر حرکات انتقالی به صورت تاریخچه زمانی ارائه شده است.

همان گونه که مشاهده می شود حداکثر میزان نیروی شناوری در راستای عمودی (Z) حدود $۸/۲ \times ۱۰^۷$ نیوتن بوده که در مقایسه با نیروی شناوری محور عرضی (۶×۱۰^۵ نیوتن) و نیروی شناوری محور طولی (۲×۱۰^۶ نیوتن) بزرگ تر است. همچنین نظر به این که دامنه نوسانات در راستای محور طولی



شکل ۱۱. نیروی هیدرودینامیک در راستای محور عمودی (Z)



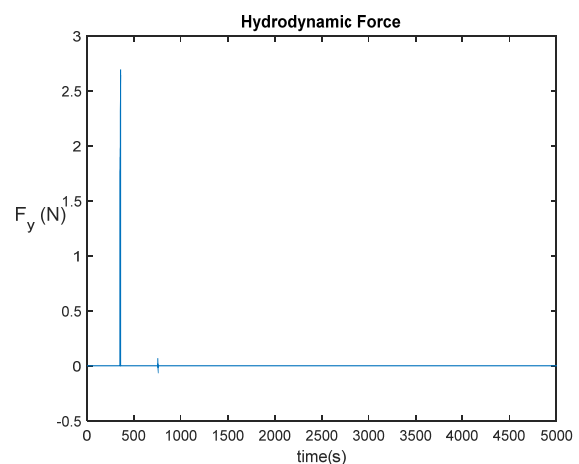
شکل ۹. نیروی هیدرودینامیک در راستای محور طولی (X)

۳-۲. بررسی حرکات دورانی

در این بخش نتایج به دست آمده برای نیروهای شناوری و هیدرودینامیک در اثر حرکات دورانی به صورت تاریخچه زمانی ارائه شده است.

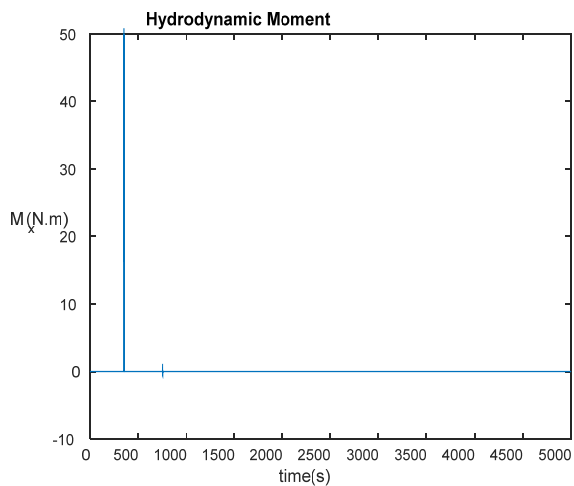
در شکل های (۱۲) تا (۱۵) نیروهای شناوری ناشی از حرکات دورانی و در شکل های (۱۶) تا (۱۹)، نیروهای هیدرودینامیک ناشی از حرکات دورانی ارائه شده است.

آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر آمریکا کدی را برای تحلیل و بررسی خستگی، آیرودینامیک، سازه و آشفستگی فست توربین های بادی تهیه کرده است [۱۳]. این کد از سال ۲۰۰۳ تاکنون مورد استفاده بسیاری از دانشمندان و مهندسان در این زمینه است [۱۳]. بخشی از این کد مربوط به توربین های بادی شناور بوده که برای مقایسه با نتایج مقاله حاضر به کار گرفته شده است. در این راستا شکل زیر برای حرکت سرج توربین بادی شناور OC3Hywind بین کد فست و کدی که در این مقاله استفاده شده است، مقایسه ای را نشان می دهد. همان طور که در این شکل نیز نشان داده شده است هر دو کد برای مدت ۲۰۰ ثانیه اجرا شده اند و از آنجایی که در کد فست فرضیه های متفاوتی از قبیل وجود میرایی در نیروهای مهارکننده در نظر گرفته شده است، تطابق قابل قبولی بین هر دو کد وجود دارد.

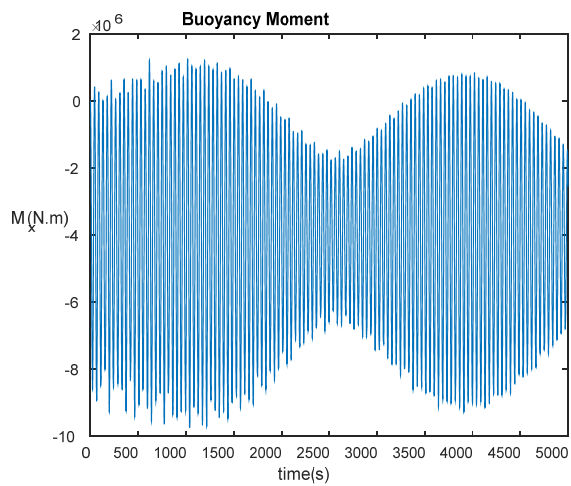


شکل ۱۰. نیروی هیدرودینامیک در راستای محور عرضی (Y)

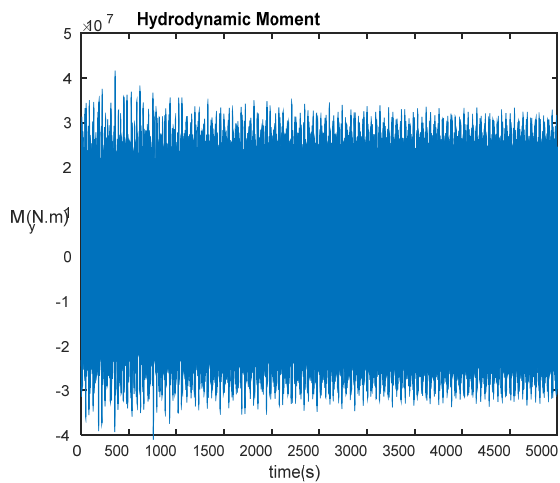
همان طور که مشاهده می شود دامنه نوسانات نیروهای هیدرودینامیک در راستای طولی از بقیه بیشتر است، نیروی هیدرودینامیکی تابع سرعت و جابه جایی است، بنابراین بیشتر بودن این نیرو در راستای طولی نشان می دهد که نوسانات سازه در راستای طولی بیشتر بوده و به همین دلیل مقدار این نیرو بیشتر از راستاهای دیگر است. از طرفی نیروی هیدرودینامیکی در راستای عرضی به قدری کم است که قابل صرف نظر بوده که ناشی از نوسانات کم سازه در این راستاست. در شکل های (۸) و (۱۱) که مربوط به نیروهای شناوری و هیدرودینامیکی هستند دیده می شود که در ابتدای حرکت قسمت گذرا وجود دارد که این به دلیل این است که در راستای Z شرایط اولیه دینامیکی پایدار وجود نداشته و سازه تا وقتی که بخواهد به حالت ماندگار برسد مجبور به طی قسمت گذرا است.



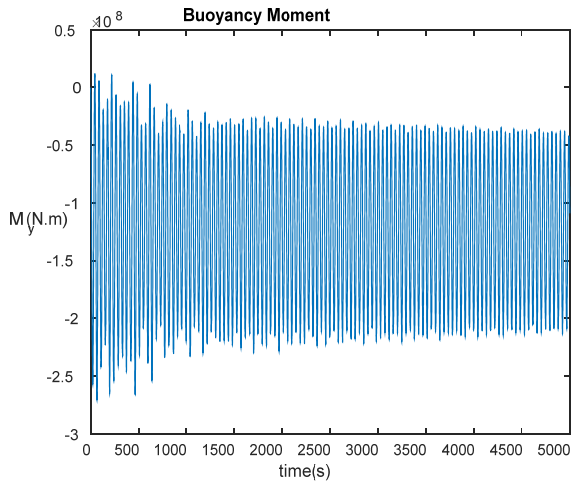
شکل ۱۵. نیروی هیدرودینامیک در راستای محور طولی (X)



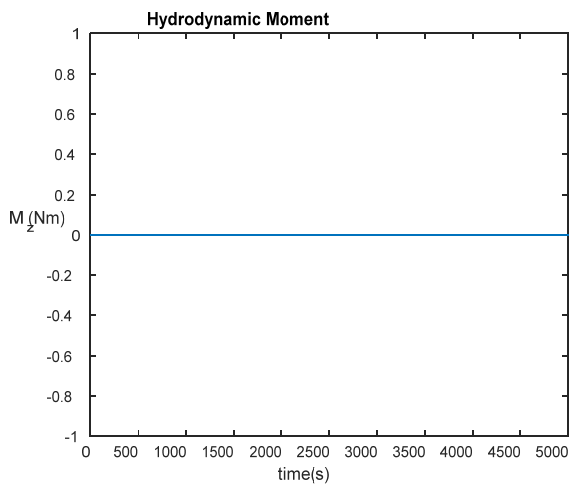
شکل ۱۲. نیروی شناوری در راستای محور طولی (X)



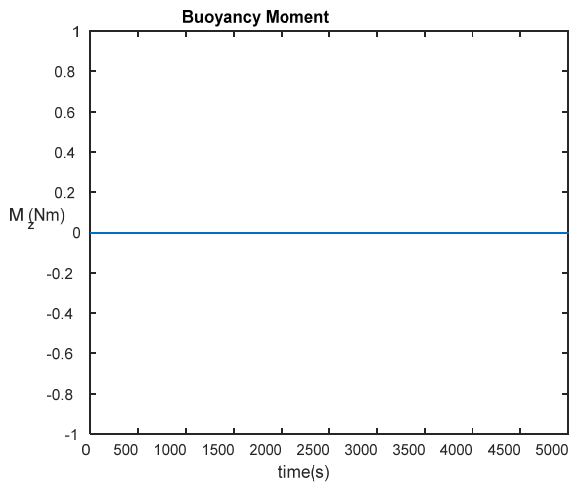
شکل ۱۶. نیروی هیدرودینامیک در راستای محور عرضی (Y)



شکل ۱۳. نیروی شناوری در راستای محور عرضی (Y)



شکل ۱۷. نیروی هیدرودینامیک در راستای محور عمودی (Z)



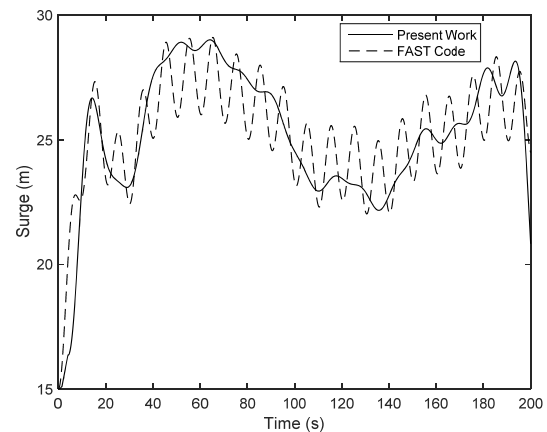
شکل ۱۴. نیروی شناوری در راستای محور عمودی (Z)

قدردانی

نویسندگان این مقاله از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر برای ایجاد شرایط انجام پژوهش حاضر، سپاسگزاری می نمایند.

منابع

- [1] Spera DA. Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering: ASME. New York, NY, USA. 2009.
- [2] Jonkman JM. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine [Ph. D thesis]. University of Colorado, Boulder. 2007.p.237.
- [3] Jonkman JM. Dynamics of offshore floating wind turbines—model development and verification. Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology. 2009 Jul;12(5):459-92.
- [4] Tong KC. Technical and economic aspects of a floating offshore wind farm. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1998 Apr 1;74:399-410.
- [5] Lee KH. Responses of floating wind turbines to wind and wave excitation [dissertation]. Massachusetts Institute of Technology; 2006.
- [6] Larsen TJ, Hanson TD. A method to avoid negative damped low frequent tower vibrations for a floating, pitch controlled wind turbine. Journal of Physics Conference Series.2007, 75(1):012073.doi: 10.1088/1742-6596/75/1/012073.
- [7] Hansen MO.L. Aerodynamics of wind turbines. 2nd ed. USA;scientific American; 2008. p. 130-80.
- [8] Savenije LB. Modeling the dynamics of a spar-type floating offshore wind turbine. [masters thesis]. Technical University Delft; 2009.
- [9] Sclavounos PD, Lee S, DiPietro J, Potenza G, Caramusco P, De Michele G. Floating offshore wind turbines, tension leg platform and taught leg buoy concepts supporting 3-5 MW wind turbines. European wind energy conference; 2010 Apr 20-23; Warsaw, Poland.
- [10] Karimirad M, Moan T. Wave-and wind-induced dynamic response of a spar-type offshore wind turbine. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering. 2011 Jan 24;138(1):9-20
- [11] Skaare B, Nielsen FG, Hanson TD, Yttervik R, Havmøller O, Rekdal A. Analysis of measurements and simulations from the Hywind



شکل ۱۸. مقایسه تحقیق حاضر با مطالعه گذشته

۴. نتیجه گیری

نتایج نهایی به دست آمده از مدل عددی ارائه شده در این تحقیق تاریخچه های زمانی جابه جایی ها و دوران های درجات آزادی توربین بادی شناور در نقطه مرکز جرم کل سازه CG و برآیند نیروهای مربوط به آن هاست.

- ✓ بررسی نتایج نیروی شناوری در اثر حرکات انتقالی نشان می دهد، بیشترین مقدار نیرو در راستای عمودی و کمترین مقدار نیرو در راستای عرضی به سازه وارد می شود.
- ✓ بررسی نتایج نیروی هیدرودینامیک در اثر حرکات انتقالی نشان می دهد بیشترین مقدار نیرو در راستای طولی و کمترین مقدار نیرو در راستای عرضی به سازه وارد می شود.
- ✓ بررسی نتایج نیروی شناوری در اثر حرکات دورانی نشان می دهد، بیشترین مقدار نیرو در راستای طولی و کمترین مقدار نیرو در راستای عمودی به سازه وارد می شود.
- ✓ بررسی نتایج نیروی هیدرودینامیک در اثر حرکات دورانی نشان می دهد، بیشترین مقدار نیرو در راستای عمودی و کمترین مقدار نیرو در راستای عرضی به سازه وارد می شود.

Demo floating wind turbine. Wind Energy. 2015 Jun;18(6):1105-22.

[12] Wang K, Moan T, Hansen MO. Stochastic dynamic response analysis of a floating vertical-axis wind turbine with a semi-submersible floater. Wind Energy. 2016 Oct;19(10):1853-70.

[13] Browning JR, Jonkman J, Robertson A, Goupee AJ. Calibration and validation of a spar-type floating offshore wind turbine model using the FAST dynamic simulation tool. Journal of Physics Conference Series. 2007;55(1):012015.doi:10.1088/1742-6596/75/1/012073.

پی نوشت

1. SWIM
2. LINE
3. Hywind
4. Statoil
5. A-T-Flow
6. SIMOI/RIFLEX/HAWC2
7. NREL