

## مدل سازی آبرو هیدروالاستیک توربین بادی با سکوی پایه کششی

مهدی بقائی<sup>۱\*</sup>، حسین شاهوردی<sup>۲</sup> و سید محمود هاشمی نژاد<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> توربین بادی شناور، دینامیک چند جسمی، سکوی پایه کششی، آبرو هیدروالاستیک.</p>	<p>در این مقاله از سیستمی چند جسمی در محیط نرم افزار ADAMS برای مدل سازی رفتار غیرخطی توربین بادی با سکوی پایه کششی تحت باد و موج تصادفی استفاده شده است. برای بارگذاری ناشی از باد، داده های باد متلاطم توسط نرم افزار TurbSim استخراج و از ماژول AeroDyn برای محاسبه نیروهای برا و پسای پره های توربین استفاده شده است. مدل های آبرودینامیکی موجود در این ماژول، در بردارنده تئوری اندازه حرکت المان پره و دنباله دینامیکی تعمیم یافته هستند. بارهای هیدرو دینامیکی در حوزه زمان با استفاده از ماژول HydroDyn استخراج و محاسبه گردیده اند. مدل محاسباتی موجود در این ماژول شامل سختی هیدرواستاتیکی خطی، پسای لزجت غیرخطی ناشی از سینماتیک موج برخوردی، جریان دریا و حرکت سکو، جرم افزوده و سهم استهلاک تشعشع موج خطی شامل آثار حافظه سطح آزاد و تحریک موج برخوردی ناشی از تفرق خطی در دریا های منظم یا نامنظم، می باشد. با برقراری اتصال این ماژول ها با محیط محاسبه گر نرم افزار ADAMS، شبیه سازی آبرو هیدروالاستیک توربین بادی پایه کششی در حوزه زمان حاصل شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی حاضر با نتایج نرم افزار FAST مقایسه شده است. نتایج تحلیل انجام یافته این اطمینان را می دهد که ابزار شبیه سازی برای تحلیل گونه های دیگر توربین بادی، سکوی نگهدارنده و اشکال سامانه مهار، قابل بکارگیری است.</p>

### ۱- مقدمه

دریا نسبت به خشکی، نبود محدودیت مکانی برای نصب و راه اندازی به علت وسعت زیاد دریاها و برطرف شدن اغتشاشات سمعی و بصری با نصب آن ها در فواصل مناسب و دور از مناطق مسکونی، استفاده از این نوع توربین ها برای تولید انرژی الکتریکی جنبه اقتصادی پیدا کرده است. برای مهار انرژی باد موجود در دریاها و آب های فراساحل توسط توربین های بادی، باید آن ها را در دریاها مستقر کرد. بر این اساس نصب توربین های بادی در دریاها را می توان از دو دیدگاه بررسی کرد. دیدگاه اول نصب سازه

توربین های بادی شناور یکی از ابزارهای جدید مهار انرژی های تجدید پذیر در جهان می باشند. با توجه به مسائل جوی و جغرافیایی در دریا از قبیل بالا بودن شدت و پیوستگی سرعت باد با کمترین میزان تلاطم و برش در

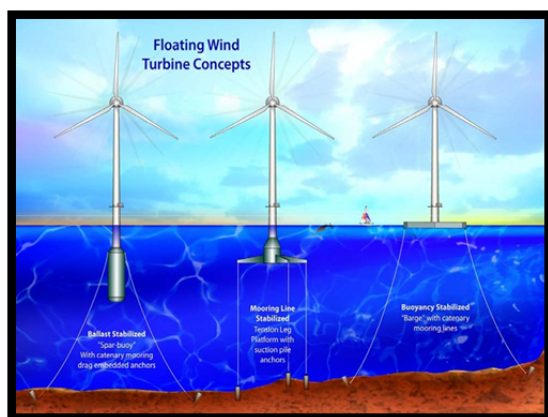
\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mehdi.bgh@gmail.com

۱. کارشناس ارشد هوافضا، دانشکده مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی

واحد علوم و تحقیقات تهران

۲. استادیار دانشکده هوافضا دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳. استادیار پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج



شکل ۱- شماتیک سه نوع توربین بادی شناور متداول [۱]

توربین بادی زمین پایه، در محیط دور از ساحل پتانسیل بارهای اعمالی دیگری نیز وجود دارد که در شکل ۲ نشان داده شده است و لذا رفتار دینامیکی متفاوتی از سازه توربین انتظار می رود. بارهای هیدرو دینامیکی ناشی از تفرق موج<sup>۶</sup> و تشعشع سکوی<sup>۷</sup>، از منابع جدید نیروها در این حالت می باشند، که چالش های سخت و جدیدی را برای تحلیل توربین های بادی به همراه دارند. در تحلیل این توربین ها لازم است اندرکنش دینامیکی بین حرکت های سکوی نگهدارنده، توربین بادی و سامانه مهار در نظر گرفته شود.

برق تولیدی به وسیله توربین از طریق کابل های مناسبی که در برابر شرایط محیطی دریا مقاوم می باشند و طول به اندازه کافی دارند از مسیر کف دریا به نیروگاه متصل می شود. طول اضافی کابل از سکوی تا کف دریا مانع از اعمال بارهای ناشی از جابه جایی سکوی به کابل می گردد. در مواقعی که محل استقرار مزرعه توربین ها از خشکی دور می باشد نیروگاه مربوطه را نیز در زیر آب تعبیه می کنند تا از هدررفت انرژی الکتریکی طی مسیر انتقال جلوگیری گردد.

این توربین ها در آب های کم عمق و دیدگاه دوم مربوط به آب های عمیق است. در آب های کم عمق (کمتر از ۶۰ متر)، پایه برج این توربین ها همانند توربین های زمین پایه به کف دریا متصل می شود. برای آب های عمیق این روش جنبه اقتصادی و عملیاتی ندارد و بنابراین توربین های بادی بایستی بر روی سکوهایی شناور مخصوصی نصب شوند تا روی سطح دریا شناور و پایدار باقی مانده و نیز ضمن داشتن سازگاری های لازم با محیط اطراف خود به بهترین وجه انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند.

توربین های بادی شناور بر اساس نوع سکویی که به آن متصل می باشند به سه گروه تقسیم می شوند: سکوی پایه کششی<sup>۱</sup> (TLP)، سکوی ستون شناور<sup>۲</sup> و سکوی کرجی وار<sup>۳</sup>. سکوی پایه کششی پایداری استاتیکی خود را با استفاده از خطوط مهاری<sup>۴</sup> کششی (کابل ها) و نیروی شناور حاصل از سکوی در ته برج به دست می آورد که در این مقاله نیز به آن پرداخته شده است، سکوی ستون شناور نیز که با استفاده از کابل های متصله به آن و کف دریا مهار می شود، پایداری استاتیکی خود را با ترازمندی پایین آوردن مرکز جرم مجموعه زیر مرکز شناوری آن به دست می آورد و سکوهایی کرجی وار نیز مانند یک کرجی روی آب شناور می باشند و حرکات آنها توسط کابل های متصله به آن و کف دریا مهار و نیز از طریق مساحت صفحه آب<sup>۵</sup> (مساحت کرجی) به پایداری می رسند. می توان با ترکیب سه مورد بالا، گونه های دیگری از سکوی نگهدارنده به وجود آورد. هر سه نوع سکوی توصیف شده در شکل ۱ نمایش داده شده اند.

<sup>1</sup> Tension Leg Platform

<sup>2</sup> Spar Type

<sup>3</sup> Barge Type

<sup>4</sup> Mooring Lines

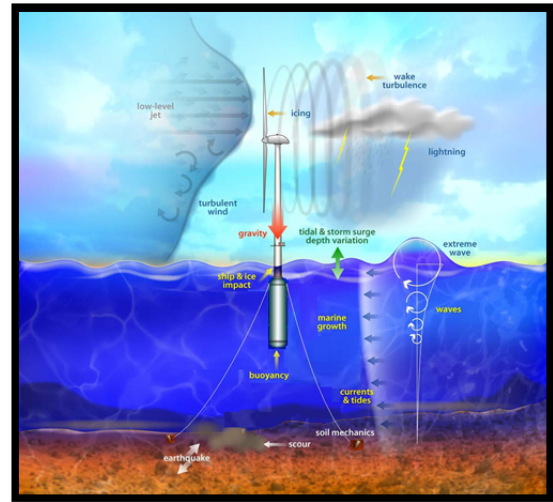
<sup>5</sup> Water plane

<sup>6</sup> Wave Diffraction

<sup>7</sup> Platform Radiation

در اکثر مطالعات انجام یافته، از تحلیل خطی در حوزه فرکانس استفاده شده‌است، که اغلب در صنایع نفت و گاز به کار گرفته می‌شود. برای مثال بولدر<sup>۵</sup> و همکاران از روابط هیدرودینامیکی خطی در حوزه فرکانس برای یافتن عملکرد دامنه پاسخ‌ها<sup>۶</sup> (RAO) و دامنه انحرافات استاندارد موده‌های حرکتی ۶ درجه‌آزادی جسم صلب سکوی نگهدارنده نوع سه پایه معلق، توربین‌بادی ۵ مگاواتی استفاده کرده‌اند [۵-۶]. وایمن<sup>۷</sup> و همکاران نیز از فرایند مشابهی برای تحلیل توربین‌بادی فراساحل ۵ مگاواتی از نوع TLP چندگانه و نوع کرجی‌وار کششی کم‌عمق<sup>۸</sup> (SDB) بهره برده‌اند [۷-۹]. در این مطالعات ماتریس جرم معادله حرکت با استفاده از خواص فیزیکی و هندسی توربین‌بادی به دست می‌آید. ماتریس‌های استهلاک هیدرودینامیکی و سختی نیز با استفاده از استهلاک آیرودینامیک روتور و بخش‌های ارتجاعی و ژيروسکوپیک سازه توربین‌بادی تعیین شده‌اند. برای استخراج ماتریس سختی سامانه مهار، سامانه حول یک وضعیت تغییرمکان جابه‌جا شده سکوی نگهدارنده ناشی از تراست آیرودینامیکی روتور خطی‌سازی شده و تعیین شده‌است. در این تحقیقات خواص الاستیسیته بسیاری از بخش‌های توربین‌بادی نادیده گرفته شده‌است.

در مطالعه حاضر با استفاده از نرم افزار تحلیل دینامیکی ADAMS، مدل غیرخطی دینامیک چندجسمی توربین‌بادی شناور پایه کششی با کمترین فرضیات سینماتیکی نسبت به مطالعات پیشین ایجاد و برای یافتن پاسخ‌های حاصل از اندرکنش دینامیکی بین بارهای آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی وارده بر سازه توربین‌بادی شناور حل می‌گردد. در این راستا از ماژول‌های مجزای AeroDyn برای محاسبات آیرودینامیکی و HydroDyn برای محاسبات هیدرودینامیکی استفاده می‌شود. در گام اول ابتدا محاسبات و تئوری‌های هیدرودینامیکی و



شکل ۲- توربین‌بادی در حضور شرایط محیطی [۱۰]

در سال‌های اخیر ابزارهای متنوع آیروسروالاستیک برای مدل‌سازی توربین‌های فراساحل به وجود آمده‌است. برای محاسبات بارهای هیدرودینامیکی، همه این کدها از معادله موریسون<sup>۱</sup> استفاده می‌کنند. سینماتیک موج برخوردی<sup>۲</sup> در این کدها از یک طیف موج مناسب با تئوری موج خطی آیری<sup>۳</sup> برای دریاهای نامنظم یا یکی از اشکال غیرخطی تابع جریان تئوری موج برای دریاهای منظم و وسیع، استفاده می‌کنند. روش موریسون، برای استوانه‌های باریک مدور عمودی که در کف دریا قرار داده شده، معتبر بوده و سینماتیک نسبی بین سیال و حرکات زیر سازه‌ها، شامل جرم‌افزوده، اینرسی موج و پسای حاصل از لزجت سیال، را به دست می‌دهد. این بیان در مسئله تشعشع از آثار پتانسیل حاصل از سطح آزاد و اندرکنش‌های غیرمعمول بین موده‌های حرکتی که از جرم‌افزوده ناشی می‌شوند، چشم‌پوشی می‌کند [۲،۳] و از مزیت تقریب طول موج بلند جی‌آی‌تیلور<sup>۴</sup>، برای ساده‌سازی مسئله تفرق، بهره می‌گیرد [۴]. این چشم‌پوشی‌ها و تقریب‌های ذاتی در بیان موریسون، قابلیت به‌کارگیری آن را برای تحلیل بسیاری از گونه‌های سکوی نگهدارنده پیشنهاد شده برای توربین‌های بادی شناور محدود می‌کند.

<sup>5</sup> Bulder

<sup>6</sup> Response of Amplitude Operator

<sup>7</sup> Wayman

<sup>8</sup> Shallow-Drafted Barge

<sup>1</sup> Morison

<sup>2</sup> Incident

<sup>3</sup> Airy

<sup>4</sup> G. I. Taylor

چرخشی در این مورد فرض صحیحی می‌باشد. بعلاوه فرض می‌شود که برج به‌صورت تیر یک سر گیردار به سکوی نگهدارنده متصل است.

فرض اساسی در توسعه ماژول هیدرودینامیکی HydroDyn، خطی‌سازی مسئله هیدرودینامیک دریایی کلاسیک می‌باشد. اولین مسئله خطی‌سازی هیدرودینامیک یعنی خطی‌سازی سینماتیک غیرخطی و شرایط مرزی دینامیکی سطح آزاد، اشاره بر این دارد که دامنه‌های امواج برخوردی خیلی کوچکتر از طول موج‌های آنان است و این، امکان استفاده از ساده‌ترین تئوری سینماتیک موج برخوردی را که به تئوری موج آیری معروف است فراهم می‌کند [۱۳]. مسئله دوم، اشاره بر این دارد که جابه‌جایی‌های انتقالی سکوی نگهدارنده<sup>۴</sup> نسبت به اندازه بدنه آن (مشخصه طول بدنه)، کوچک می‌باشد. بدین ترتیب مسئله هیدرودینامیک به سه مسئله ساده‌تر و مجزای تشعشع، تفرق و هیدرواستاتیک تقسیم می‌شود. سومین مسئله خطی‌سازی این است که می‌توان از مزایای روش قدرتمند اصل جمع آثار سود برد. همچنین باید توجه داشت که مسئله هیدرودینامیک دریایی کلاسیک، از تئوری جریان پتانسیل غیردائم برای به‌دست آوردن معادلات حاکم حرکت سیال بهره می‌برد. این تئوری فرض بر این دارد که سیال غیرقابل تراکم، غیرچرخشی و غیرلزج می‌باشد و تنها تحت نیروهای حجمی پایستار (گرانش) است.

در هیدرودینامیک خطی، مسئله هیدرودینامیکی به سه قسمت ساده‌تر تقسیم می‌گردد: تشعشع، تفرق و هیدرواستاتیک [۱۲، ۱۱]. مسئله تشعشع به دنبال پیداکردن بارهای وارده بر سکوی نگهدارنده، که بدون حضور موج سطحی برخوردی، تحت ارتعاش اجباری در مودهای حرکتی مختلف خود است، می‌باشد. نیروهای تشعشع هنگامی به‌وجود می‌آیند که جسم شناور باعث تولید امواج بیرون‌رونده آب می‌شود. این نیرو شامل سهمی از جرم‌افزوده و استهلاک امواج تشعشع می‌باشد.

آبرودینامیکی به‌کار برده شده در مدل‌سازی ارائه می‌شوند. در ادامه با استفاده از راهکار کنترل کلاسیک، مدل‌سازی توربین شناور فراساحل با ملازمات کافی در حوزه زمان توسعه داده می‌شود تا محدودیت‌های مطالعات حوزه فرکانس و زمانی قبل را برطرف کند. از این ملازمات می‌توان به اعمال تحلیل همزمان همه بارهای وارده بر قسمت‌های مختلف توربین‌بادی، از قبیل سکوی نگهدارنده، پره‌ها، سامانه مهار و سازه برج اشاره کرد که از آن به‌عنوان تحلیل آبرویدروسروالاستیک حوزه زمان یاد می‌شود، نام برد. منظور از آبرویدروسروالاستیک آن است که مدل‌های آبرودینامیکی، مدل‌های الاستیک سازه‌ها و مدل‌های هیدرودینامیکی در یک محیط کاملاً کوپله باهم تلفیق و تحلیل می‌گردند. از این ماهیت می‌توان برای ارتقاء طراحی بهینه پروژه‌های ممکن در این زمینه سود جست. نتایج تحلیل بارها و مقایسه آن‌ها با خروجی نرم افزار FAST نشان از موفقیت آمیز بودن تحلیل دارد.

## ۲- محاسبات هیدرودینامیک توربین‌بادی شناور

نیروهای هیدرودینامیکی از انتگرال‌گیری فشار دینامیکی آب روی سطح خیس شده‌ی سکوی نگهدارنده به‌دست می‌آیند. این نیروها شامل سهمی از جرم‌افزوده و پسای خطی (تشعشع<sup>۱</sup>)، شناوری (بازگردان<sup>۲</sup>)، پخش موج برخوردی (تفرق<sup>۳</sup>)، جریان دریا و آثار غیرخطی می‌باشند. ماژول HydroDyn نیروهای مذکور را محاسبه و به‌صورت گام‌به‌گام در اختیار نرم‌افزار ADAMS قرار می‌دهد [۱۰]. برای سینماتیک و سنتیک سکوی نگهدارنده، فرض شده‌است که سکوی نگهدارنده شناور به‌عنوان یک جسم صلب شش درجه‌آزادی متناسب با سه تغییرمکان کوچک چرخشی بیان شده باشد. فرض کوچک‌بودن زاویه

<sup>1</sup> Radiation

<sup>2</sup> Restoring

<sup>3</sup> Diffraction

<sup>4</sup> Support platform

درجه‌آزادی زام سامانه،  $K_{ij}$  ماتریس هسته اصلی تاخیر تشعشع  $t$  زمان شبیه‌سازی،  $\dot{q}_j$  مشتق زمانی اول درجه‌آزادی زام سامانه،  $\tau$  متغیری دلخواه با واحدی برابر زمان شبیه‌سازی می‌باشند. تئوری موجی که در HydroDyn استفاده شده‌است مربوط به امواج پیش‌رونده می‌باشد. موج پیش‌رونده در امتداد محور X تحت یک سرعت معلوم (که سرعت انتشار شکل موج یا سرعت فاز نامیده می‌شود) منتقل می‌شود. مشخصات این موج برای ناظری که با سرعتی برابر با سرعت فاز در جهت انتشار موج حرکت می‌کند بدون تغییر باقی می‌ماند. سطح آب در یک موج ایستاده، مابین نقاط ثابت در راستای قائم نوسان نموده و پیش‌روی نمی‌کند. تئوری موج منظم خطی آیری، یکی از ساده‌ترین و مفیدترین تئوری‌های موج منظم است. در این تئوری فرض می‌شود که موج شکلی سینوسی داشته و ارتفاع آن در مقایسه با طول موج و عمق آب کوچک می‌باشد. این تئوری مبنای بیان آماری امواج و حرکت ناشی از آن‌ها در شرایط طوفانی است. بدین منظور مقادیر  $F_i^{Wave}$ ، به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۳]:

$$\zeta(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) \sqrt{2\pi S_{\zeta}^{2-Sided}(\omega)} e^{j\omega t} d\omega \quad (3)$$

$$F_i^{Waves}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) \sqrt{2\pi S_{\zeta}^{2-Sided}(\omega)} X_i(\omega, \beta) e^{j\omega t} d\omega \quad (4)$$

معادلات (۳) و (۴) تبدیلات فوریه معکوس، می‌باشند که در آن‌ها  $j$  نشانگر عدد موهومی است.  $S_{\zeta}^{2-Sided}$  نشانگر چگالی طیف توان<sup>۳</sup> PSD دوطرفه ارتفاع موج مورد نظر در زمان واحد، یا طیف موج دو طرفه که وابسته به فرکانس امواج برخوردی  $\omega$  می‌باشد، است.  $W(\omega)$  نشانگر تبدیل فوریه تحقق<sup>۴</sup> اختلال گوسی سفید<sup>۵</sup> (WGN) فرآیند دنباله زمانی با میانگین صفر و واریانس یک (توزیع

مسئله تفرق به دنبال پیدا کردن بارهای وارده بر سکوی نگهدارنده با این فرض است که بدنه در موقعیت میانی ثابت شده‌است (بدون حرکت) و امواج سطحی آب از سمت دیگر حرکت کرده و پس از برخورد به سکوی شناور پخش می‌شوند. نیروهای تفرق از میدان فشار غیرآشفته<sup>۱</sup> (فرود کرلیف<sup>۲</sup>) و پخش موج به وجود می‌آیند. هیدرواستاتیک مسئله‌ای مقدماتی است ولی با این حال در رفتار کل سکوی نگهدارنده مهم می‌باشد. برای سامانه شناور بایستی همه ۶ مود حرکتی جسم صلب سکوی نگهدارنده در تحلیل در نظر گرفته شود. مبداء این چارچوب با شرط پایداری استاتیکی و نبود هیچ نوع نیروی دینامیکی روی سطح آب می‌باشد. برآیند نیروهای خارجی اعمال شده روی سکوی نگهدارنده،  $F_i^{Platform}$ ، را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۰].

$$F_i^{Platform} = -A_{ij} \ddot{q}_j + F_i^{Hydro} + F_i^{Lines} \quad (1)$$

که در آن  $F_i^{Hydro}$  نیروی وارده بر سکوی نگهدارنده ناشی از سهم نیروهای هیدرودینامیکی غیر از جرم افزوده،  $A_{ij}$  ماتریس ضربه جرم افزوده هیدرودینامیکی،  $\ddot{q}_j$  مشتق دوم زمانی درجه‌آزادی زام سامانه و  $F_i^{Lines}$  نیروی وارده خطوط مهاری به سکوی نگهدارنده می‌باشد. در مسئله هیدرودینامیک خطی واقعی، عبارت  $F_i^{Hydro}$  موجود در معادله (۱) به صورت زیر می‌باشد [۲،۳].

$$F_i^{Hydro} = F_i^{Waves} + \rho g V_0 \delta_{i3} - C_{ij}^{Hydro} q_j - \int_0^t K_{ij}(t-\tau) \dot{q}_j(\tau) d\tau \quad (2)$$

اولین عبارت سمت راست معادله (۲)،  $F_i^{Wave}$ ، نشانگر نیروهای اعمال شده به سکوی شناور نگهدارنده ناشی از امواج برخوردی بوده و بشدت با ارتفاع موج  $\zeta$ ، مرتبط می‌باشد و  $\rho$  چگالی آب،  $g$  ثابت شتاب گرانشی،  $V_0$  حجم جابه‌جا شده سیال در سکوی ایستا،  $\delta_{ij}$  تابع دلتا-کرونکر،  $C_{ij}^{Hydro}$  ماتریس سختی هیدرودینامیکی،  $q_j$

<sup>3</sup> Power Spectral Density

<sup>4</sup> Realization

<sup>5</sup> White Gaussian Noise

<sup>1</sup> Undisturbed

<sup>2</sup> Froude-Kriloff

استفاده می شود [۱۶]. نیروی تحریک موج برخوردی داده شده با معادله (۴) یا (۶) مستقل از حرکت سکوی نگهدارنده است. این حاکی از این است که چگونه مسئله تفرق از مسئله تشعشع، جدا شده است و نشانگر این است که اگر مقدار حرکت سکوی نگهدارنده بزرگ باشد فرضیات خطی سازی نقض می گردند. رابطه بین طیف موج دوسویه استفاده شده در تبدیل فوریه معکوس،  $S_{\zeta}^{2-sided}$  و طیف موج یک سویه  $S_{\zeta}^{1-sided}$ ، که به صورت متعارف در مهندسی دریا، استفاده می شود به صورت زیر می باشد [۱۷]:

$$S_{\zeta}^{2-sided}(\omega) = \begin{cases} \frac{1}{2} S_{\zeta}^{1-sided}(\omega) & \text{for } \omega \geq 0 \\ \frac{1}{2} S_{\zeta}^{1-sided}(-\omega) & \text{for } \omega < 0 \end{cases} \quad (۷)$$

طیف یک طرفه جانسواپ استفاده شده در HyrdoDyn به واسطه استاندارد طراحی IEC61400-3<sup>۳</sup> با رابطه زیر تعریف می شود [۲۳]:

$$S_{\zeta}^{1-Sided}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{5}{16} H_s^2 T_p \left( \frac{\omega T_p}{2\pi} \right)^{-5} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega T_p}{2\pi} \right)^{-4} \right] \quad (۸)$$

که در آن  $H_s$  ارتفاع موج شاخص،  $T_p$  دوره طیفی قله و  $\gamma$  پارامتر شکل قله داده شده برای حالت دریای نامنظم است و  $\sigma$  فاکتور مقیاس می باشد.

دومین و سومین عبارت سمت راست معادله (۲)، یعنی  $\rho g V_0 \delta_{i3} - C_{ij}^{Hydrostatic} q_j$  نشانگر سهم بار هیدرواستاتیکی است. نیروهای هیدرواستاتیک حاصل شده از امواج برخوردی به ترتیب مستقل از مسائل تفرق و تشعشع هستند [۱۰]. اولین عبارت،  $\rho g V_0 \delta_{i3}$ ، نیروی شناوری ارشمیدس می باشد که هنگامی که سکوی نگهدارنده در موقعیت جابه جانشده اش قرار دارد، برابر وزن سیال جابه جاشده و در جهت عمودی به سوی بالا می باشد. این عبارت صرفاً برای درجه آزادی جابه جایی عمودی سکوی نگهدارنده غیر صفر می باشد، چون فرض

استاندارد نرمال) می باشد. در ماژول HydroDyn، تحقق فرآیند WGN با استفاده از روش باکس مولر<sup>۱</sup> محاسبه می شود [۱۴]. تنها اختلاف میان معادلات (۳) و (۴) تابع تبدیل مختلط نیروی تحریک نرمالیزه شده موج،  $X_i$ ، می باشد که مستقیماً از خطی سازی مسئله تفرق ناشی می شود. در حالت حدی، هنگامی که اختلاف بین فرکانس های یک موج مشخص به صفر نزدیک می شود، این سری با انتگرالی که روی همه فرکانس های موج برخوردی تعریف می شود (معادله ۴)، جایگزین می گردد. این خواص را می توان خیلی واضح تر هنگامی که معادله (۴) به شکلی دیگر اما معادل با آن بیان شود، توسط معادله (۵) دید [۱۵].

$$F_i^{Waves}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} K_i(t-\tau) \zeta(\tau) d\tau \quad (۵)$$

در این معادله  $\tau$  متغیری دلخواه با واحدی یکسان با زمان شبیه سازی،  $t$  است و زمان و جهت نیروی تحریک موج برخوردی سکوی نگهدارنده به ازای دامنه واحد موج، نرمالیزه شده و به صورت  $(K_i)$  زیر داده می شود:

$$K_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_i(\omega, \beta) e^{j\omega t} d\omega \quad (۶)$$

از معادله (۳)، انتگرال کل نیروهای تحریک موج برخوردی که وابسته به فرکانس هستند، با استفاده از انتگرال کانولشن کل نیروهای تحریک موج برخوردی وابسته به زمان در معادله (۵) جاگذاری شده است. صرف نظر از این که از کدام فرمولاسیون برای تحلیل استفاده می شود، سکوی نگهدارنده شناور باید طوری طراحی گردد که نزدیک سطح آزاد آب کمترین سطح سازه را دارا باشد تا نیروهای تحریک موج وارده بر سکو از کمترین مقدار برخوردار باشد. در HydroDyn از معادله (۴) به دلیل نیاز به زمان کم محاسبات به جای معادله (۶)، به کار برده می شود. همچنین برای تبدیل فوریه معکوس از دستورات محاسباتی بهینه موسوم به تبدیل فوریه سریع<sup>۲</sup> (FFT)

<sup>1</sup> Box-Muller

<sup>2</sup> Fast Fourier Transform

<sup>3</sup> International Electrotechnical Commission

می‌شود که مرکز شناوری سکو در طول خط مرکزی جابه‌جا نشده‌ی برج است (یا محور  $Z$  سکوی نگهدارنده). عبارت دوم هیدرواستاتیک، یعنی  $q_j - C_{ij}^{Hydrostatic}$ ، حاکی از تغییر در نیروی هیدرواستاتیکی و گشتاور حاصل از آثار مساحت سطح آب و مرکز شناوری (به محض اینکه سکوی نگهدارنده جابه‌جا می‌شود) می‌باشند. هنگامی که در قسمت مغروق سکوی نگهدارنده، صفحه  $XZ$  متصل به بدنه، صفحه تقارن است، تنها اجزای غیر صفر  $C_{ij}^{Hydrostatic}$ ، درایه‌های (۳و۳)، (۴و۴)، (۵و۵)، (۳و۵) و (۵و۳) هستند که در رابطه زیر نشان داده شده‌اند [۱۱].

می‌شود که مرکز شناوری سکو در طول خط مرکزی جابه‌جا نشده‌ی برج است (یا محور  $Z$  سکوی نگهدارنده). عبارت دوم هیدرواستاتیک، یعنی  $q_j - C_{ij}^{Hydrostatic}$ ، حاکی از تغییر در نیروی هیدرواستاتیکی و گشتاور حاصل از آثار مساحت سطح آب و مرکز شناوری (به محض اینکه سکوی نگهدارنده جابه‌جا می‌شود) می‌باشند. هنگامی که در قسمت مغروق سکوی نگهدارنده، صفحه  $XZ$  متصل به بدنه، صفحه تقارن است، تنها اجزای غیر صفر  $C_{ij}^{Hydrostatic}$ ، درایه‌های (۳و۳)، (۴و۴)، (۵و۵)، (۳و۵) و (۵و۳) هستند که در رابطه زیر نشان داده شده‌اند [۱۱].

$$C_{ij}^{Hydrostatic} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho g A_0 & 0 & -\rho g \int_0^l x dA & 0 \\ 0 & 0 & \rho g \int_0^l y^2 dA + \rho g V_{\sigma_{COB}} & 0 & 0 \\ 0 & -\rho g \int_0^l x dA & 0 & \rho g \int_0^l x^2 dA + \rho g V_{\sigma_{COB}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

استهلاکی ناشی از تشعشع موج بوده و نیز حاکی از یک سهم اضافه شده از جرم‌افزوده است که در  $A_{ij}$  به حساب آورده نمی‌شود. در این عبارت  $\tau$  متغیر اختیاری با واحدی برابر با زمان شبیه‌سازی،  $t$ ، و  $K_{ij}$ ،  $(i, j)$  امین جزء ماتریس معروف به هسته (قسمت اصلی) تاخیر موج<sup>۱</sup> تشعشع می‌باشد. در مسئله تشعشع، سطح آزاد باعث به‌وجود آمدن آثار حافظه<sup>۲</sup> می‌شود، که بدین معنی است که بارهای تشعشع موج وابسته به پیشینه حرکتی سکوی نگهدارنده است. در ماژول HydroDyn انتگرال کانولوشن در حوزه زمان به‌کار گرفته می‌شود تا مستقیماً آثار حافظه لحاظ گردد. تاثیر حافظه در حالت عام، بعد از گذشت مقدار زمان محدود از بین می‌رود. به این علت ماژول HydroDyn بعد از این‌که کاربر مقدار زمان را مشخص می‌کند، توانایی کوتاه کردن<sup>۳</sup> انتگرال عددی را دارد. که منجر به محاسبات سریعتر تاثیر حافظه می‌شود [۱۰].

که در آن  $A$  مساحت صفحه آبی سکوی نگهدارنده،  $x$  جابه‌جایی طولی،  $A_0$  مساحت صفحه آبی در موقعیت جابه‌جانشده،  $y$  جابه‌جایی عرضی،  $Z_{COB}$  موقعیت عمودی مرکز شناوری سکوی نگهدارنده می‌باشند. لذا اگر در بخش مغروق سکوی نگهدارنده، صفحه  $XZ$  متصل به بدنه نیز صفحه‌ای متقارن باشد، بخش‌های (۳و۵) و (۵و۳) از  $C_{ij}^{Hydrostatic}$  نیز صفر می‌شوند. معادله (۹) سختی هیدرواستاتیک را صرفاً برای حرکات Roll, Pitch, Heave تامین می‌کند و به‌طور صریح چنین بیان می‌دارد که سختی موده‌های دیگر حرکتی، باید از طریق سامانه مهار تحقق یابد. نیروهای امواج تشعشع شامل سهم‌هایی از جرم‌افزوده هیدرودینامیکی و استهلاک می‌باشد. به‌علت این‌که مسئله تشعشع از مسئله تفرق جدا شده‌است، بارهای امواج تشعشع مستقل از امواج برخوردی می‌باشند. در معادله (۱) اجزاء تکانشی جرم‌افزوده هیدرودینامیکی،  $A_{ij}$ ، نشانگر مکانیسم نیروی متناسب با شتاب سکوی نگهدارنده در مسئله تشعشع حوزه زمان می‌باشند. اجزاء  $(i, j)$  حاکی از نیروی هیدرودینامیکی در جهت درجه‌آزادی  $i$  که از انتگرال (روی سطح خیس شده

### ۳- مدل سازی سامانه مهار

<sup>1</sup> Wave-radiation-retardation kernel

<sup>2</sup> Memory effects

<sup>3</sup> Truncate

می‌شود، لذا سختی غیرخطی ناشی از هندسه کل سامانه مهار را نیز در نظر می‌گیرد. منظور از شبه‌استاتیک این است که موقعیت کابل‌های متصل به سکوی نگهدارنده به‌ازای جابه‌جایی سکو در هر بازه زمانی، معلوم می‌باشد. این ماژول، کشش‌های درونی و سینماتیک هر خط مهاری را با فرض اینکه معادله هر کابل در آن زمان استاتیک است، را حل می‌کند. سپس با استفاده از کشش‌های کابل‌ها و نیروهای اضافی دیگری که از هیدرودینامیک مسئله به سکوی نگهدارنده وارد می‌شوند و نیز نیروهای ناشی از آیرودینامیک توربین، ADAMS معادلات حرکت دینامیکی بقیه سامانه (سکو، برج، موتورخانه، پره‌ها) را برای به‌دست آوردن شتاب آن‌ها حل می‌کند. در ادامه ADAMS با انتگرال‌گیری، موقعیت‌های طناب و سکو را در گام زمانی بعدی تعیین می‌کند و این فرایند ادامه می‌یابد.

#### ۴- محاسبات آیرودینامیک توربین افقی محور

نیروهای آیرودینامیکی باعث تغییر شکل توربین‌بادی می‌شود و برعکس، که در حقیقت تعاملی آیرودینامیکی به‌وجود می‌آورند. مدل‌های موجود در AeroDyn از روابطی بر پایه جریان محلی دوبعدی و مشخصه‌های ایرفویل در طول پره استفاده می‌کنند که با ضرایب پسا، برا و گشتاور پیچشی اندازه‌گیری‌شده در فرآیند آزمایش تونل باد، مشخص می‌گردند. باد ورودی می‌تواند شامل گستره وسیعی از شرایط محیطی از قبیل، تلاطم جوی متغیر با زمان سه‌بعدی همچون تندبادهای گسسته یا بادهایی با سرعت میانگین دائم باشد. اغلب این نوع بادهای به‌وسیله ماژول دیگری از NREL<sup>۳</sup> به‌وجود می‌آید. TurbSim نام ماژولی است که این کار را انجام می‌دهد و توسط جانکمن و بوهل<sup>۴</sup> به‌وجود آمده‌است. داده‌های

سامانه مهار به‌عنوان ابزاری برای نگاه‌داشتن موقعیت سکوی نگهدارنده و حفظ آن در برابر باد، امواج و جریان آب می‌باشد. در برخی از سکوه‌های نگهدارنده همچون TLPها، از سامانه مهار برای برقراری پایداری سازه نیز استفاده می‌شود. سامانه مهار از تعدادی کابل که به سکوی نگهدارنده متصل شده‌اند تشکیل می‌شود، که طرف دیگر کابل‌ها با استفاده از لنگر<sup>۱</sup> به بستر دریا وصل می‌شوند. کابل‌ها می‌توانند از زنجیر، فولاد و یا الیاف مرکب که اغلب ترکیبی از این مواد است، ساخته شوند [۱۰]. با حرکت کابل‌های مهار با سکوی نگهدارنده در پاسخ به نیروهای محیطی غیردائم، نیروهای مهاری در طناب‌ها با تغییر کشش کابل تغییر می‌کند. این بدین معنی است که سامانه مهار به‌شدت تابع حرکات توربین‌بادی شناور می‌باشد که از آن به‌عنوان تبعیت<sup>۲</sup> سامانه مهار یاد می‌شود [۱۱].

اگر تبعیت سامانه مهار به طور ذاتی خطی باشد و سختی مهار و استهلاک آن نادیده گرفته‌شود، برآیند نیروی وارده بر سکوی نگهدارنده از طرف همه خطوط مهاری،  $F_i^{Lines}$ ، از معادله (۱) به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$F_i^{Lines} = F_i^{Lines,0} - C_{ij}^{Lines} q_j \quad (10)$$

که  $C_{ij}^{Lines}$ ،  $(i, j)$  امین جزء ماتریس سختی خطی حاصل از همه خطوط مهاری است و  $F_i^{Lines,0}$ ،  $i$  امین جزء نیروی سامانه مهار در موقعیت جابه‌جا نشده‌اش می‌باشد. برای خطوط مهاری زنجیره‌ای،  $F_i^{Lines,0}$  نشانگر نیروی پیش‌کششی موجود در طناب‌ها، ناشی از وزن مقدار کابل موجود در آب است که روی بستر دریا قرار ندارند.

این ماژول وزن ظاهری سیال، فنریت کششی و اصطکاک بستر دریا را برای هر خط مهار در نظر می‌گیرد اما از سختی خمش هر یک از خطوط صرف‌نظر می‌کند. به‌علت این که ماژول شبه‌استاتیک کاملاً با ADAMS کوپل

<sup>3</sup>National Renewable Energy Lab

<sup>4</sup> Buhl

<sup>1</sup> Anchor

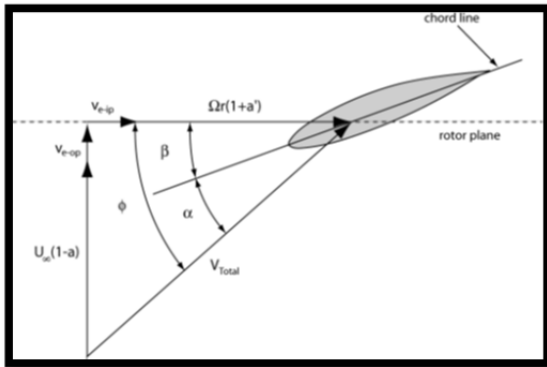
<sup>2</sup> Compliance



می‌باشد که نیروهای روی المان پره و نیز سرعت‌های القایی ناشی از تاثیر دنباله جریان را نشان می‌دهد. با فرض اینکه حرکت پره خیلی کوچک است، معادله حاصله وابسته به سرعت‌های القایی در هر دو جهت محوری و مماسی و نیز نسبت سرعت نوک پره می‌باشد:

$$\tan \phi = \frac{U_{\infty}(1-a)}{\Omega r(1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \quad (11)$$

که در آن  $\phi$  زاویه جریان محلی،  $U_{\infty}$  سرعت جریان باد آزاد،  $a$  ضریب القایی محوری،  $a'$  ضریب القایی دورانی یا مماسی،  $\Omega$  سرعت دورانی روتور،  $r$  شعاع محلی روتور،  $\lambda_r$  نسبت سرعت نوک محلی می‌باشند.



شکل ۳- زاویای جریان و سرعت‌های المان محلی [۱۸]

سرعت‌های محلی نیز در محاسبات زاویه جریان به صورت زیر وارد می‌شود:

$$\tan \phi = \frac{U_{\infty}(1-a) + v_{e-op}}{\Omega r(1+a') + v_{e-ip}} \quad (12)$$

که در آن  $v_{e-ip}$  سرعت صفحه‌ای المان ناشی از حرکت پره،  $v_{e-op}$  سرعت خارج از صفحه المان ناشی از حرکت پره می‌باشند. اگرچه زاویه جریان با موقعیت المان تغییر می‌کند ولی این معادله برای همه المان‌های واقع در طول پره، صادق است. با مقایسه معادله‌های (۱۱) و (۱۲) سرعت القایی المان تابعی از نیروهای روی پره‌ها هستند و از تئوری BEM برای محاسبه آن‌ها استفاده می‌شود. نحوه استخراج این معادلات را می‌توان در منابع طراحی توربین‌بادی ملاحظه نمود [۲۰]. از تئوری

مربوط به این بادها و کلیه محاسبات موجود در AeroDyn همه محدود به حوزه زمان می‌باشند. AeroDyn در هر گام زمانی برای محاسبه تغییرات نیروهای آیرودینامیکی، توسط نرم افزار شبیه‌ساز فراخوانی می‌شود [۱۸].

چندین مدل آیرودینامیکی مختلف در AeroDyn استفاده می‌شود. مهمترین این مدل‌های آیرودینامیکی، مدل‌های دنباله‌دار می‌باشند. AeroDyn دارای دو نوع مدل دنباله جریان می‌باشد که شامل: تئوری<sup>۱</sup> (BEM) و<sup>۲</sup> (GDW) می‌باشد، اگر کاربر از تئوری BEM استفاده کند. گزینه‌هایی برای در نظر گرفتن آثار آیرودینامیکی افت‌های نوک پره، افت‌های مربوط به هاب روتور و دنباله‌های مورب<sup>۳</sup> وجود دارد. و اگر تئوری GDW را انتخاب کند همه این آثار به‌خودی خود اعمال می‌شوند. هر دو روش فوق برای محاسبه سرعت‌های القایی محوری، از دنباله موجود در صفحه روتور استفاده می‌کنند. کاربر امکان محاسبه سرعت القایی دورانی (یا مماسی) را نیز دارد، که گشتاور روتور را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۸].

تئوری BEM بسط تئوری دیسک متحرک به دست آمده می‌باشد. این تئوری فرض می‌کند که پره‌ها به اجزای کوچکی تقسیم‌بندی شده‌اند به گونه‌ای که هر جزء مستقل از اجزای دیگر و همانند یک ایرفول دوبعدی عمل می‌کند، که در این حالت نیروهای آیرودینامیکی بر اساس شرایط جریان محلی محاسبه می‌شوند. این نیروهای جزئی در طول پره توزیع شده و با جمع آن‌ها، نیروها و گشتاورهای وارد بر توربین محاسبه می‌شوند. نیمه دیگر تئوری BEM، تئوری اندازه حرکت می‌باشد، که این تئوری با فرض این‌که افت فشار یا اندازه حرکت در صفحه روتور به‌علت کار انجام یافته توسط جریان عبوری از میان صفحه روتور و از روی پره می‌باشد، بنا شده‌است [۱۸]. شکل ۳ نمونه یک ایرفویل با سرعت‌ها و زاویای مربوطه

<sup>1</sup> Blade Element Momentum

<sup>2</sup> Generalized Dynamic Wake

<sup>3</sup> Skewed wake

روش پتانسیلی سرعت نیز شناخته می‌شود. مزیت این روش آن است که نسبت به تئوری BEM، توزیع فشار کلی تری برای صفحه روتور در نظر می‌گیرد. این روش با به‌کارگیری حالت‌های غیر خطی جریان، تغییرات اغتشاش جریان ورودی در نظر می‌گیرد. روش GDW براساس پاسخ جریان پتانسیل معادله لاپلاس می‌باشد. کینر<sup>۲</sup> از این حل برای توسعه معادلات توزیع فشار در صفحه روتور استفاده کرد [۲۱]، که شامل یک سری بینهایت از توزیع لژاندر<sup>۳</sup> در جهت شعاعی و توابع مثلثاتی در جهت گردش عقربه‌های ساعت بود. او از معادلات اوپلر (جریان غیرقابل تراکم و غیرلزج) شروع کرد و فرض نمود که سرعت‌های القایی نسبت به سرعت متوسط باد کمتر است و همچنین روتور در نظر گرفته شده را به تعداد نامتناهی از پره‌های باریک تقسیم کرد تا نسبت صلبیت پائینی حاصل شود.

مزیت اصلی روش GDW نسبت به تئوری BEM ناشی از تاثیر ذاتی دنباله دینامیکی، افت‌های نوک و آیرودینامیک دنباله مورب روی مدل‌سازی می‌باشد. تاثیر دنباله دینامیکی، به‌علت تاخیر زمانی موجود در سرعت‌های القایی تولید شده توسط گردابه حاصله از پره‌هاست و در جهت پائین‌دست جریان جابه‌جا می‌شود. مزیت دیگر این روش آن است که سرعت‌های القایی در صفحه روتور، از مجموعه معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول تعیین می‌شوند، که می‌توانند با استفاده از روش‌های غیرتکراری حل گردند. به‌علت عدم نیاز به تکرار، برای تعیین ضرایب آیرودینامیکی هر المان پره، مدل می‌تواند مستقیماً همراه با مدل واماندگی دینامیکی استفاده شود. اگرچه با مدل AeroDyn تاثیر واماندگی دینامیکی را بعد از حل معادلات GDW، تعیین می‌کند. برای اطلاع از جزئیات بیشتر به مرجع مربوطه مراجعه شود [۱۸].

## ۵- سامانه کنترل مرجع

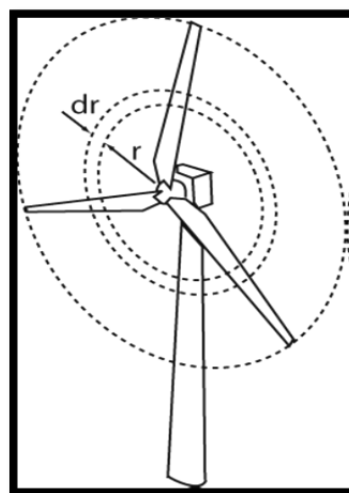
BEM و شکل ۴، تراست حاصله از هر منطقه حلقوی روتور برابر است با:

$$dT = 4\pi r \rho_a U_\infty^2 (1-a) a dr \quad (13)$$

که  $T$  تراست آیرودینامیکی روتور و  $\rho_a$  چگالی هوا می‌باشد. گشتاور حاصله از هر بخش دایروی برابر است با:

$$dQ = 4\pi r^3 \rho_a U_\infty^2 \Omega (1-a) a' dr \quad (14)$$

هنگامی که جداول ضریب برا و پسای ایرفویل دوبعدی به‌صورت تابعی از زاویه حمله  $\alpha$  در نظر گرفته شود، مجموعه‌ای از معادلات وجود خواهد داشت که می‌توانند به‌صورت تکراری برای سرعت‌های القایی و نیروهای هر المان پره حل گردند. به هر حال قبل از حل معادلات سامانه، باید چندین تصحیح برای تئوری BEM در نظر گرفته شود. این تصحیحات شامل مدل‌های افت هاب و نوک پره برای گردآب‌های موجود در این مناطق، تصحیح گلاورت برای سرعت‌های القایی بزرگ ( $a > 0.4$ )، تصحیح دنباله مورب برای مدل‌سازی آثار جریان ورودی که عمود بر صفحه روتور نیست، می‌باشند [۱۸].



شکل ۴- صفحه حلقوی استفاده شده در BEM [۱۸]

مدل GDW موجود در AeroDyn براساس روش ارائه‌شده توسط پیترز<sup>۱</sup> می‌باشد [۱۸]. این مدل در اصل برای صنعت هلیکوپترسازی توسعه داده شده و به‌عنوان

<sup>2</sup> Kinner

<sup>3</sup> Legendre

<sup>1</sup> Peters

در جدول ۳ مشخصات آیرودینامیکی آن، مشخصات سکوی نگهدارنده نیز در جدول ۴ آورده شده است [۷].

جدول ۱- مشخصات توربین بادی

توان اسمی (MW)	۵
جهت روتور و تعداد پره‌ها	مقابل باد و ۳ پره
قطر هاب و روتور (m)	۱۲۶ و ۳
ارتفاع هاب (m)	۹۰
سرعت قطع پائین و بالا (m/s)	۳ و ۱۱/۴
جرم روتور (kg)	۱۱۰۰۰۰
جرم موتورخانه (kg)	۲۴۰۰۰۰
جرم برج (kg)	۳۴۷۴۶۰

جدول ۲- مشخصات سازه پره‌ها

طول (m)	۶۱/۵
جرم کل (kg)	۱۷۷۴۰
ممان دوم اینرسی جرمی ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	۱۱۷۷۶۰۴۷
ممان اول اینرسی جرمی (kg.m)	۳۶۳۲۳۱

جدول ۳- مشخصات آیرودینامیکی پره‌ها [۲۴]

مقطع	ایرفویل
۲۱	Cylinder 1
۳	Cylinder 2
۴	DU40_A17
۶ و ۵	DU35_A17
۷	DU30_A17
۹ و ۸	DU25_A17
۱۱ و ۱۰	DU21_A17
۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷	NACA64_A17

جدول ۴- مشخصات سکو

شعاع سکو (m)	۱۱
ارتفاع سیلندر (m)	۲۱/۵
ارتفاع آبخور (m)	۲۰/۰۱
مرکز جرم (m)	-۹/۴
جرم بخش بتونی سکو (kg)	$۴/۳۷۵ \times ۱۰^۶$
جرم بخش فولادی سکو (kg)	$۱/۷۶ \times ۱۰^۵$
عمق لنگر (m)	۱۵۰
قطر کابل (m)	۰/۰۸۰۹
چگالی کابل (kg/m)	۱۳۰/۴
سختی کششی کابل (N)	$۵/۸۹ \times ۱۰^۸$

در توربین‌های بادی جدید از ژنراتورهای سرعت متغیر برای کسب انرژی بادهای با سرعت بیش از مجاز استفاده می‌شود. برای همین سرعت ژنراتور با تنظیم همزمان گشتاور ژنراتور و گام پره تغییر و تنظیم می‌شود. لذا کنترلر برای سرعت‌های باد بالاتر از مجاز طراحی شده است. کنترلر از نوع تناسبی-انتگرال‌گیر تطبیقی است. بدین ترتیب که ضرایب مربوط به آن با استفاده از خطی‌سازی کل سیستم در سرعت‌های باد یکنواخت ۱۱/۴ تا ۲۵ متر بر ثانیه و زوایای گام مختلف و سرعت دورانی ثابت روتور، به دست آمده اند.

برای کنترل توربین بادی از اشکال کنترلی سرعت متغیر<sup>۱</sup> و پیچش پره در جهتی که لبه حمله به سمت باد حرکت کند، استفاده می‌شود. در چنین توربین‌هایی، روش مرسوم برای کنترل عملی توان تولیدی، متکی به طراحی دو سامانه کنترلی کنترلر گشتاور ژنراتور و کنترل همزمان زاویه پیچش سه پره می‌باشد. این دو سامانه کنترلی به گونه‌ای طراحی می‌شوند، که برای اکثر مواقع به ترتیب در سرعت‌های باد کمتر و بیشتر از مقدار مجاز به صورت مستقل از هم کار کنند. هدف کنترلر گشتاور ژنراتور بیشینه کردن توان اکتسابی زیر نقطه عملکردی مجاز است. هدف کنترلر پیچش پره، تنظیم سرعت ژنراتور بالای نقطه عملکردی مجاز است [۱۰]. جیسون جانکمن روش فوق را با استفاده از کنترلر PID تطبیقی روی توربین بادی شناور پیاده‌سازی کرده است که در این جا نیز از آن استفاده می‌شود.

## ۶- معرفی مشخصات توربین بادی مورد استفاده

در این مقاله از مشخصات توربین بادی پایه کششی مبنای NREL-MIT استفاده می‌شود. در جدول شماره ۱ مشخصات توربین بادی، در جدول ۲ مشخصات سازه پره،

<sup>1</sup> Variable Speed

## ۷- نحوه‌ی شبیه‌سازی توربین‌بادی

استفاده از ارتفاع موثر موج مورد انتظار در محدوده سرعت باد داده شده به کار گرفته شده‌است. به‌علت این‌که تمرکز اصلی استراتژی کنترلی به بالای منطقه سرعت مجاز باد تکیه دارد، محدوده سرعت باد بین ۱۵ تا ۲۴ متر بر ثانیه خواهد بود. شرایط موج بر اساس سایت مرجع هواشناسی استفاده شده توسط جیسون جانکمن [۱۰] که در شمال شرقی اسکاتلند است بنا شده‌است. در داده‌های این سایت ارتفاع موثر موج و محدوده دوره تناوب موج برای سرعت باد مربوطه وجود دارد. در این تحقیق دوره‌های تناوب موج در هر سری از سرعت باد به طور خطی از کمترین تا بیشترین محدوده دوره تناوب برای سایتی که تئوری فرضیات خطی موج استفاده شده توسط ماژول HydroDyn را نقض نمی‌کند، تغییر می‌کند. لازم به یادآوری است که استفاده از تئوری موج خطی در آب‌های عمیق منطقی می‌باشد.

طبق استاندارد IEC-61400-3 برای تئوری موج خطی قابل به‌کارگیری در آب‌های عمیق لازم است معادله زیر ارضاء شود [۲۲ و ۲۳].

$$\frac{H_s}{gT_p^2} \leq 0.002 \quad (15)$$

که در آن  $H_s$  ارتفاع موج،  $T_p$  دوره تناوب موج و  $g$  شتاب گرانشی می‌باشد.

جدول ۵- خلاصه‌ای از شرایط DLC 1.2 [۲۳]

شرایط باد	مدل تلاطم معمولی $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$
امواج	حالت دریای معمولی
جهت امواج و باد	هم جهت
جریان دریا	ندارد

بعد از ایجاد مدل توربین‌بادی پایه کشتی در ADAMS، با یکپارچه نمودن ماژول‌های بارگذاری به‌صورت فایل DLL اقدام به اجرای شبیه‌سازی در محیط ADAMS/Solver می‌شود. مدت زمان شبیه‌سازی ۳۰۰ ثانیه می‌باشد. بعد از اتمام شبیه‌سازی‌ها مجموعه جواب‌ها

اکنون با استفاده از مشخصات توربین‌بادی نوع پایه کشتی که در بخش قبل بیان گردید و نیز با استفاده از فایل مجموع داده ایجادشده توسط نرم‌افزار FAST، مدل توربین موردنظر در نرم‌افزار ADAMS ایجاد می‌شود. فایل مذکور حاوی هندسه دینامیک چند جسمی مسئله و مشخصات آورده شده در قسمت ۶ می‌باشد. منظور از هندسه دینامیک چند جسمی توربین‌بادی این است که سیستم توربین‌بادی شناور به‌صورت یک سری از اجسام صلب ۶ درجه‌آزادی متصل به هم با جرم‌متمرکز و اینرسی مرتبط توسط مفصل‌ها (قیود) بیان می‌شود. بر این اساس اجزاء الاستیک، همچون پره‌ها و برج توربین با استفاده از یک سری اجسام صلب متصل به هم به‌وسیله ماتریس‌های سختی و دمپینگ خطی چندبعدی مدل می‌شوند (قیود ۶ درجه‌آزادی). موتورخانه و هاب نیز از این قاعده مستثنی نیستند. تمام سازه سکوی نگهدارنده به‌صورت یک جرم صلب متصل به پایه برج توربین درنظر گرفته شده‌است. الگوریتم گام زمانی متغیر برای تلفیق استفاده می‌کند.

مسئله شبیه‌سازی مطابق استاندارد IEC-61400-3 برای مورد بار طراحی<sup>۱</sup> DLC 1.2 تحت شرایط نرمال کاری انجام می‌شود [۲۳]. این شرایط در جدول ۵ ارائه شده‌است. DLC 1.2 احتیاج به این دارد که باد و موج هم‌سو و چندجهته باشند، اما به‌علت این‌که سکو متقارن محوری است صرفاً یک جهت موج و باد درنظر گرفته شده‌است. موقعیت‌های متغیر توسط DLC 1.4 پوشش داده می‌شوند. با این حال DLC 1.4 برای تحلیل بار نهایی استفاده می‌شود و خارج از حیطه این کار است.

استاندارد IEC برای DLC 1.2 چنین مشخص می‌کند که از توزیع احتمال توام<sup>۲</sup> باید برای سرعت باد، ارتفاع موثر موج و دوره تناوب موج استفاده شود. اما به‌علت در دسترس نبودن داده‌های کامل سایت، شرط DLC 1.1 در

<sup>1</sup> Design Load Case

<sup>2</sup> Joint Probability Distribution

می‌دهد که از لحاظ عددی متفاوت ولی از لحاظ تحلیلی معادل با آن است. بنابراین به‌جای در نظر گرفتن موقعیت، معادلات قیود سینماتیکی سرعت همراه با معادلات دیفرانسیلی سینماتیکی حل می‌شوند. در حل گر ADAMS این حل گر SI2 نامیده شده‌است و به نوعی آهسته‌تر از روش اندیس ۳ می‌باشد ولی دقت و ثبات زیادی دارد.

در این کار از حل گر GSTIFF به خاطر سرعت بالای آن استفاده می‌شود. این حل گر ابتدا با استفاده از فرمول انتگرال‌گیری ضمنی DAE ها را به مجموعه‌ای از معادلات جبری تبدیل می‌کند. این فرمول، همان فرمول اولر برگشتی<sup>۲</sup> (رو به عقب) با گام منفرد است. در ادامه از الگوریتم تکراری نیوتن رافسون برای به‌دست آوردن حاصل دستگاه غیر خطی (مکان‌ها) استفاده می‌کند. اگر فرایند تکرار ناکام بماند، گام انتگرال‌گیری کم می‌شود و مسئله برای گام جدید حل می‌گردد.

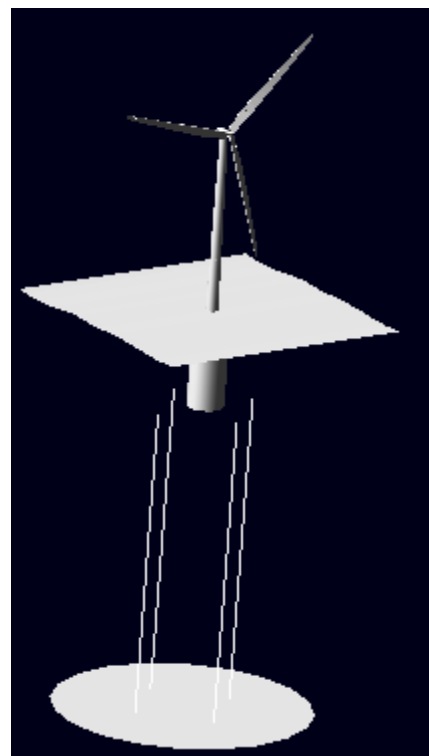
## ۸- نتایج شبیه‌سازی

همان‌گونه که در بخش قبل نیز بیان شد، نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی از طریق فایل خروجی ADAMS در دسترس می‌باشد. به‌علت زیاد بودن تعداد پارامترها در اینجا فقط به برخی از مهمترین آن‌ها اشاره می‌شود. اشکال ۶ تا ۱۷ نمونه‌هایی از نتایج ADAMS را نشان می‌دهد که با نتایج حاصل از نرم افزار FAST مقایسه شده‌اند.

از شکل ۶ مشاهده می‌شود که روند تغییرات زاویه گام پرها با استفاده از کنترلر خطی تطبیقی از مقدار صفر شروع و در بازه ۷ تا ۲۰ درجه در حال تغییر می‌باشد. نتایج حاصله از ADAMS و FAST اختلافاتی باهم دارند. علت این اختلاف را این‌گونه می‌توان توجیه نمود که پیچش و جابه‌جایی جرم در مدل پره که در نرم‌افزار

در فایل خروجی قابل دسترسی می‌باشد. شکل ۵ روند شبیه‌سازی را در زمان مشخص نشان می‌دهد.

روش‌های بسیار زیادی برای حل معادلات دیفرانسیل سیستم و قیود آن وجود دارد. از این معادلات دیفرانسیل و معادلات مربوط به قیود در ADAMS تحت عنوان مجموعه<sup>۱</sup> DAE یاد می‌شود. هر DAE اندیس مربوط به خود را دارد که معرف تعداد دفعات دیفرانسیل‌گیری از DAE هاست تا درجات آزادی سیستم را دربرگیرد. در حالت خاص DAE مربوط به مسئله تحلیل دینامیکی در شبیه‌سازی سیستم‌های دینامیکی اندیس ۳ دارد. که بالا در نظر گرفته می‌شود. در حل گر ADAMS دو روش که قابلیت اعتماد بیشتری به حل می‌دهد وجود دارد. معروفترین آن‌ها حل گر 3DAE است که مربوط به حل معادلات دیفرانسیل موقعیت قیود سینماتیکی می‌باشد. این نحوه کار حل گر GSTIFF-13 می‌باشد.

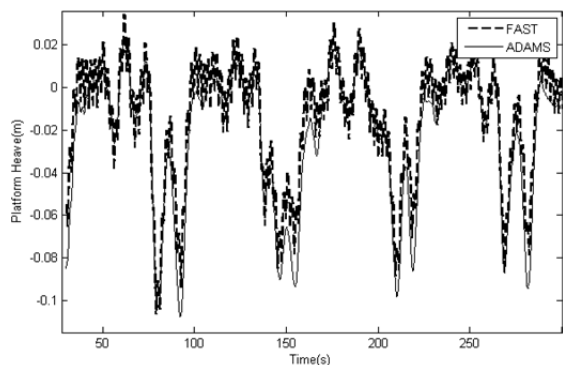


شکل ۵- شبیه‌سازی در ADAMS در لحظه مشخص

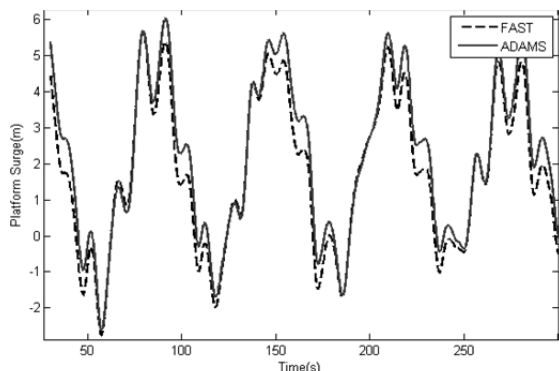
دومین آن‌ها الگوریتم تصحیح شده‌ای است که اندیس اصلی ۳ را به مسئله‌ای با اندیس ۲ برای DAE کاهش

<sup>2</sup> Backward Euler formula

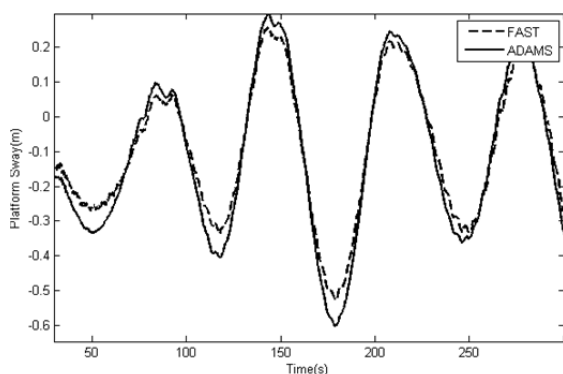
<sup>1</sup> Differential Algebraic Equation



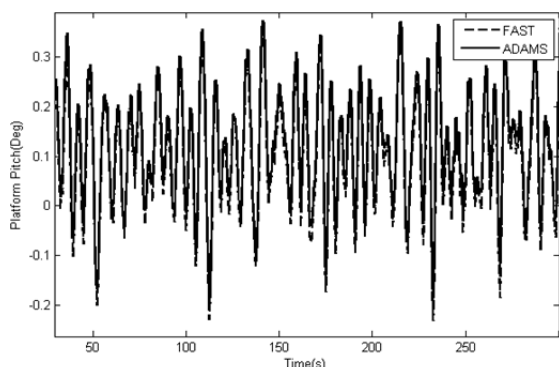
شکل ۸- جابه جایی قائم سکوی در مقابل زمان



شکل ۹- جابه جایی طولی سکوی در مقابل زمان

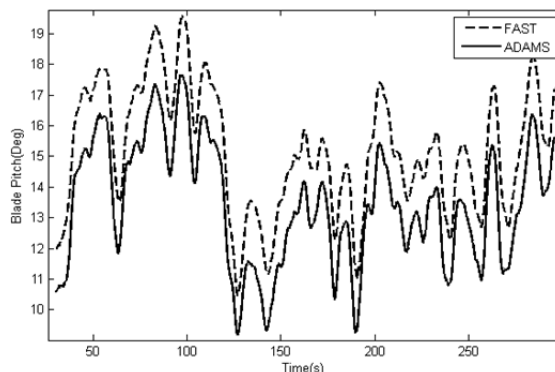


شکل ۱۰- جابه جایی عرضی سکوی در مقابل زمان



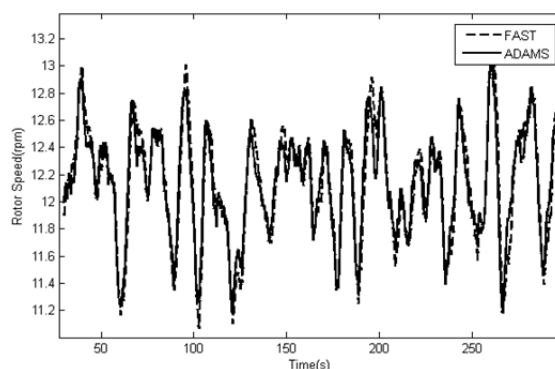
شکل ۱۱- غلتش طولی سکوی در مقابل زمان

FAST نادیده گرفته می شوند در ADAMS در محاسبات لحاظ می شوند. نتیجه واضح این اختلافات آن است که زوایای گام پره برای ADAMS کوچکتر از FAST می باشد، چون سامانه کنترلی در FAST باید کمبود پیچش پره را جبران کند. با این توصیف تراست اعمالی روی پره ها نیز تغییر کرده و نوسانات سازه ای توربین را نیز تحت تاثیر قرار می دهد.



شکل ۶- تغییرات زاویه گام پره ها در مقابل زمان

از شکل ۷ می توان دریافت که کنترلر خطی در صدد ثابت نگه داشتن گشتاور ژنراتور می باشد. برای این کار اجباراً سرعت دورانی روتور و به تبع آن سرعت دورانی ژنراتور باید تغییر کند. با این توصیف توان خروجی ژنراتور نیز رفتاری مشابه سرعت دورانی ژنراتور خواهد داشت.



شکل ۷- تغییرات سرعت دورانی روتور در مقابل زمان

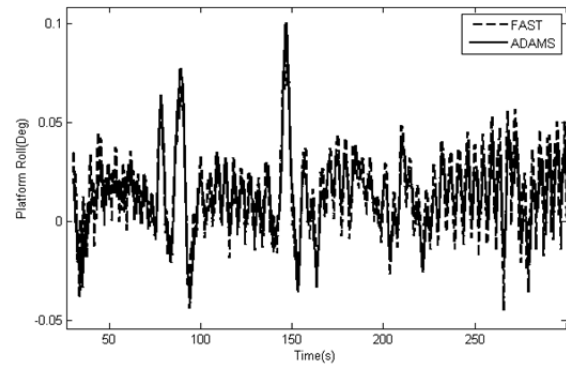
به علت کوپلینگ نیروهای آبرودینامیکی و هیدرودینامیکی جابه جایی قائم، طولی، عرضی و غلتش های سکوی اجتناب ناپذیر است. شکل های ۸ تا ۱۳ این پاسخ ها را نشان می دهند. اختلاف موجود بین پاسخ FAST و ADAMS در این اشکال ناشی از تحلیل پاسخ سازه ای می باشد.

(کوپلینگ) بین جریان هوای ورودی و سازه توربین به وجود می‌آید. درباره بارهای اعمالی از طرف آب به سکوی نگهدارنده نیز رفتاری مشابه تکرار می‌شود با این تفاوت که در اینجا کل سکو به صورت یک جسم صلب در نظر گرفته می‌شود. وقتی موج آب به سکو برخورد می‌کند باعث جابه‌جایی آن می‌شود، این جابه‌جایی به نوبه خود در رفتار امواج نیز تاثیر می‌گذارد که از آن به عنوان تشعشع موج یاد می‌شود.

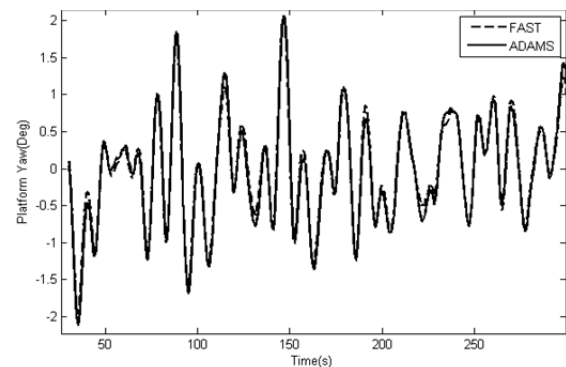
لذا می‌توان چنین جمع‌بندی کرد که سازه توربین بادی شناور همزمان پذیرای دو نیروی آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی می‌باشد که باهم کوپل می‌باشند. بدین واسطه تعاملی آیروالاستیکی بین سازه و آن‌ها برقرار است که از آن تحت عنوان تعامل آیروهیدروالاستیکی توربین بادی یاد می‌شود. لذا اختلافات موجود بین نتایج حاصله از دینامیک سازه توربین ناشی می‌شود که تحت قیود مختلفی قرار دارند.

#### ۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل‌سازی دینامیکی و شبیه‌سازی آیروهیدروالاستیک توربین بادی از نوع پایه کششی با استفاده از نرم‌افزار تحلیل دینامیکی ADAMS انجام شد. نیروهای هیدرودینامیکی اعمالی روی سکوی نگهدارنده و نیروهای آیرودینامیکی اعمالی روی اجزاء پره‌های توربین با استفاده از زیربرنامه‌های AeroDyn و HydroDyn که با ADAMS کوپل می‌شود، محاسبه گردیدند. داده‌های باد با سرعت میانگین ۱۸ متر بر ثانیه با استفاده از نرم‌افزار TurbSim استخراج و در مدل‌سازی به کار گرفته شدند. در ادامه برای اجرای شبیه‌سازی، کنترلر خطی تطبیقی مرسوم توربین بادی پایه خاکی روی آن اعمال و شبیه‌سازی انجام گرفت. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی توربین بادی پایه کششی شناور در نرم‌افزار تحلیل دینامیکی ADAMS با نتایج به دست آمده از



شکل ۱۲- غلتش عرضی سکو در مقابل زمان



شکل ۱۳- غلتش قائم سکو در مقابل زمان

اختلاف اصلی موجود بین نتایج حاصل از ADAMS و FAST از قیود دینامیک سازه موجود در سازه توربین نشأت می‌گیرد. البته الگوریتم‌های حل‌گر نیز در این اختلافات دخیل هستند ولی سهم به مراتب کمتری به خود اختصاص می‌دهند. به عنوان مثال پیچش و جابه‌جایی جرم در مدل پره که در نرم افزار FAST نادیده گرفته می‌شوند در ADAMS در نظر گرفته شده و محاسبه می‌شوند. با این توصیف و با علم به این‌که نیروهای برا و پسای آیرودینامیکی ارتباط مستقیمی با زاویه برخورد جریان ورودی هوا با مقطع ایرفویل پره دارند و با کمترین مقدار تغییر زاویه گام پره دچار نوسان می‌شوند، تراست اعمالی روی پره‌ها نیز که از برآیند نیروهای برا و پسا در مقاطع مختلف پره‌ها ناشی می‌شود دچار تغییر شده و درحقیقت مقدار بار اعمالی روی سازه برج توربین را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با ادامه این روند جابه‌جایی‌های سازه‌ای نیز در پارامترهای جریان هوای برخوردی به پره‌ها همچون سرعت نسبی جریان، زاویه حمله، جدایش جریان و غیره تغییر ایجاد می‌کنند که تعاملی آیروالاستیکی

طراحی واقعی توربین‌بادی در قدم اول نیاز به طراحی و تحلیل مفهومی و شبیه‌سازی پیش‌نمونه می‌باشد، لذا هرچه پاسخ‌های حاصله به واقعیت نزدیک باشد ارزشمندتر خواهد بود.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از آقا و خانم جانکمن به خاطر مشاوره علمی در روند اجرای این مطالعه اعلام می‌دارند.

نرم‌افزار FAST نشان از دقت بالای نتایج دارد. تفاوت‌های موجود بین جواب‌های حاصله از ADAMS و FAST را می‌توان ناشی از قابلیت بسیار بالای ساختاری نرم‌افزار ADAMS در تحلیل و شبیه‌سازی سامانه‌های مکانیکی دانست. می‌توان گفت که اکثر فرضیاتی که در نرم‌افزار FAST برای ساده‌سازی تحلیل به کار گرفته شده‌اند در ADAMS در نظر گرفته نمی‌شوند. بنابراین در نتایج تحلیل نیز تاثیر گذارند. بدین ترتیب جواب‌های استخراج شده از ADAMS قابلیت اعتماد بیشتری داشته و به حالت واقعی نزدیک‌تر خواهند بود. باتوجه به این‌که برای

### مراجع

- [1] Musial, W., Butterfield, S., (2004). "Future for offshore wind energy in the united states". Proceedings of the EnergyOcean Conference, Palm Beach Florida, USA.
- [2] Cummins, W.E. (1962). "The impulse response function and ship motions". The Symposium on Ship Theory at the Institute for Schiffbau University, Hamburg, Germany.
- [3] Ogilvie, T.F. (1964). "Recent progress toward the understanding and prediction of ship motions". Proceedings of the Fifth Symposium on Naval Hydrodynamics, Bergen, Norway, pp. 3–128.
- [4] Sclavounos, P.D., "13.022 Surface Waves and Their Interaction with Floating Bodies, Lecture Notes". Massachusetts Institute of Technology (MIT), OpenCourseWare.
- [5] Bulder, B.H., van Hees, M.T., Henderson, A., Huijsmans, R.H.M., Pierik, J.T.G., Snijders, E.J.B., ..., Wolf, M.J. (2002). "Study to feasibility of and boundary conditions for floating offshore wind turbines". Public Report.
- [6] Lee, K.H. (2005). "Responses of floating wind turbines to wind and wave excitation". M.Sc Dissertation, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- [7] Wayman, E.N., Sclavounos, P.D., Butterfield, S., Jonkman, J., Musial, W. (2006). "Coupled dynamic modeling of floating wind turbine systems". Proceedings of the 2006 Offshore Technology Conference, Houston, TX.
- [8] Wayman, E., (2006). "Coupled dynamics and economic analysis of floating wind turbine systems". M.Sc Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- [9] Vijfhuizen, W.J.M.J. (2006). "Design of a wind and wave power barge". M.Sc Dissertation, Department of Naval Architecture and Mechanical Engineering, Universities of Glasgow and Strathclyde, Glasgow, Scotland.
- [10] Jonkman, J.M. (2007). "Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine". PhD Thesis, University of Colorado.
- [11] Faltinsen, O.M. (1990). "Sea loads on ships and offshore structures". Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [12] Newman, J.N. (1997). "Marine Hydrodynamics". The MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- [13] Emmerhoff, O.J. (1994). "The slow-drift motions of offshore structures". Ph.D. Dissertation, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.



- [14] Rubinstein, R.Y. (1981). "Simulation and the monte carlo method". John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 86–91.
- [15] McCabe, A.P., Bradshaw, A., Widden, M.B. (2005). "A time-domain model of a floating body using transforms". Proceedings of the 6th European Wave and Tidal Conference, Glasgow, Scotland.
- [16] Swarztrauber, P.N. (2007). "FFTPACK". NCAR's Mathematical and Statistical Libraries, documentation files accessible at <http://www.cisl.ucar.edu/softlib/FFTPACK.html>.
- [17] Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P. (1992). "Numerical recipes in fortran: The art of scientific computing". 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 490–498.
- [18] Moriarty, P.J., Hansen, A.C. (2005). "AeroDyn Theory Manual". NREL/EL-500-36881, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- [19] Leishman, J.G. (2000). "Principles of helicopter aerodynamics". Cambridge University Press, pp.78-127.
- [20] Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L. (2002). "Wind energy explained: Theory, Design and Application". New York: John Wiley & Sons.
- [21] Kinner, W. (1937). "Die kreisförmige tragfläche auf potentialtheoretischer grundlage". Ing. Arch, Vol. 8, No. 1, pp. 47-80.
- [22] Namik, H., Stol, K., (2011). "Performance analysis of individual blade pitch control of offshore wind turbines on two floating platforms". Mechatronics, Vol. 21, No. 4, pp. 691-703.
- [23] IEC 61400–3, (2006). "Wind Turbines – Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines", International Electrotechnical Commission (IEC), in Press.
- [24] Jonkman, J.M. (2010). "Definition of the Floating System for Phase IV of OC3". Technical Report NREL/TP-500-47535, National Renewable Energy Laboratory.
- [25] Jonkman, B.J., Buhl, M.L.J. (2007). "TurbSim User's Guide". National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden. CO, Tech. Rep. NREL/TP-500-41136,[Online]. Available: <http://wind.nrel.gov/designcodes/preprocessors/turbsim>.
- [26] Jonkman, B.J., Buhl, M.L.J. (2004). "FAST User's Guide". NREL/EL-500-29798, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.