شبیه‌سازی آیروهیدروالاستیک توربین بادی با سکوی کرجی‌وار

مهدی بقائی[۱*]، حسین شاهوردی[۲]، سید محمود هاشمی‌نژاد[۳]

[۱]کارشناس ارشد هوافضا دانشکده مکانیک و هوافضا دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ mehdi.bgh@gmail.com
[۲]استادیار، دانشکده هوافضا دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران؛h_shahverdi@aut.ac.ir
[۳]استادیار، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج؛ sm.hasheminejad@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۰۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۱۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۳۱

کلمات کلیدی:
توربین بادی شناور
دینامیک چند جسمی
سکوی کرجی‌وار
آیروهیدروالاستیک

چکیده

در این مقاله از سیستمی چند جسمی در محیط نرم افزار ADAMS برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی توربین بادی با کرجی شناور تحت باد و موج تصادفی استفاده شده است. برای بارگذاری ناشی از باد، داده‌های باد متلاطم توسط نرم افزار TurbSim استخراج و از ماژول AeroDyn برای محاسبه نیروهای برا و پسای پره‌های توربین استفاده شده است. بارهای هیدرودینامیکی در حوزه زمان با استفاده از ماژول HydroDyn استخراج و محاسبه گردیده‌اند. مدل محاسباتی موجود در این ماژول شامل سختی هیدرواستاتیکی خطی، پسای لزجت غیرخطی ناشی از سینماتیک موج برخوردی، جرم افزوده و سهم استهلاک تشعشع موج خطی می‌باشد با برقراری اتصال این ماژول‌ها با محیط حل‌گر نرم‌افزار ADAMS شبیه‌سازی آیروهیدروالاستیک توربین بادی کرجی‌وار در حوزه زمان حاصل شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر با نتایج نرم افزار FAST مقایسه شده است. عمومیت تحلیل انجام یافته این اطمینان را می‌دهد که ابزار شبیه‌سازی برای تحلیل گونه‌های دیگر توربین بادی، سکوی نگهدارنده و آشکال سامانه مهار قابل بکارگیری است.

Aero-Hydro-Elastic Simulation of Barge Wind Turbine

Mehdi Baghaee[1*], Hossein Shahverdi[2], Seyyed Mahmoud HasheminNejad[3]

[1] Graduated MSc., Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Science and Research, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2] Assistance Professor, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran; h_shahverdi@aut.ac.ir
[3] Assistance, Professor, Material and Energy Research Center, Karaj, Iran; sm.hasheminejad@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 28 Dec. 2013
Accepted: 4 Aug. 2014
Available online: 22 Sep. 2014

Keywords:
Floating wind turbine,
Multi-body Dynamics,
Tension Leg Platform,
Aero-hydro-elastic.

ABSTRACT

In this paper a multi-body system of barge type wind turbine under stochastic wave and wind has been modeled within MSC ADAMS. For wind loading, the stochastic turbulent wind data have been extracted using TurbSim software.Also, the AeroDyn module has been used for calculating lift and drag forces on the blades of turbine.. The hydrodynamic loads have been calculated using HydroDyn module within time domain. It composed of hydrostatic restoring; nonlinear viscous drag from incident wave kinematics; the added mass and damping contributions from linear wave radiation, including free surface memory effects and the incident wave excitation. By linking these modules with ADAMS/Solver milieu, the time domain, aero-hydro-elastic simulation of Barge type wind turbines has been achieved. The derived results have been compared with FAST's outputs. The comparison shows the prosperity and accuracy of implemented analysis. The generality of analysis ensures that the simulation tool is applicable for any other types of the wind turbine, floating support platform, and mooring system configurations.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]

۱-مقدمه

توربین‌های بادی شناور یکی از ابزارهای جدید مهار انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان می‌باشند. 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 دریا نسبت به خشکی، نبود محدودیت مکانی برای نصب و راه‌اندازی به علت وسعت زیاد دریاها و برطرف شدن اغتشاشات سمعی و بصری با نصب آنها در فواصل مناسب و دور از مناطق مسکونی، استفاده از این نوع توربین‌ها برای تولید انرژی الکتریکی جنبه اقتصادی پیدا کرده است. برای مهار انرژی باد موجود در دریاها و آبهای فراساحل توسط توربین‌های بادی، باید آنها را در دریاها مستقر کرد. بر این اساس نصب توربین‌های بادی در دریاها را می‌توان از دو دیدگاه بررسی کرد. دیدگاه اول نصب سازه این توربین‌ها در آبهای کم عمق و دیدگاه دوم مربوط به آبهای عمیق است. در آبهای کم عمق (کمتر از ۶۰ متر)، پایه برج این توربین‌ها همانند توربین‌های زمین پایه به کف دریا متصل می‌شود. برای آبهای عمیق این روش جنبه اقتصادی و عملیاتی ندارد و بنابراین توربین‌های بادی بایستی بر روی سکوهای شناور مخصوصی نصب شوند تا روی سطح دریا شناور و پایدار باقی مانده و نیز ضمن داشتن سازگاری‌های لازم با محیط اطراف خود به بهترین وجه انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند.

توربین‌های بادی شناور بر اساس نوع سکویی که به آن متصل می‌باشند به سه گروه تقسیم می‌شوند: سکوی پایه کششی[۱] (TLP)، سکوی ستون شناور[۲] و سکوی کرجی‌وار[۳] . سکوی پایه کششی پایداری استاتیکی خود را با استفاده از خطوط مهاری[۴] کششی (کابل‌ها) و نیروی شناور حاصل از وجود مخزن در ته برج بدست می‌آورد، سکوی ستون شناور نیز که با استفاده از کابل‌های متصله به آن و کف دریا مهار می‌شود، پایداری استاتیکی خود را با ترازمندی پایین آوردن مرکز جرم مجموعه زیر مرکز شناوری آن به دست می‌آورد و سکوهای کرجی‌وار نیز مانند یک کرجی روی آب شناور می‌باشند و حرکات آنها توسط کابل‌های متصله به آن و کف دریا مهار و نیز از طریق مساحت صفحه آب[۵] (مساحت کرجی) به پایداری می‌رسند که در این مقاله نیز به آن پرداخته شده و در شکل ۱ نمایش داده شده است.

برخلاف توربین بادی زمین پایه، در محیط دریا بارهای اعمالی دیگری نیز وجود دارند و لذا رفتار دینامیکی متفاوتی از سازه توربین انتظار می‌رود. بارهای هیدرودینامیکی ناشی از تفرق موج[۶] و تشعشع سکو[۷]، از منابع جدید نیروها در این حالت می‌باشند، که چالش‌های سخت و جدیدی را برای تحلیل توربین‌های بادی به همراه دارند. در تحلیل این توربین‌ها لازم است اندرکنش دینامیکی بین حرکت‌های سکوی نگهدارنده، توربین بادی و سامانه مهار در نظر گرفته شود.



شکل ۱-شماتیک توربین بادی کرجی‌وار[۱]

در سال‌های اخیر ابزارهای متنوع آیروسروالاستیک برای مدل‌سازی توربین‌های بادی فراساحل به وجود آمده است. برای محاسبات بارهای هیدرودینامیکی، همه این کدها از معادله موریسون[۸] استفاده می‌کنند. این معادله ساده‌ترین تئوری در هیدرودینامیک است که نیروهای وارده بر یک سیلندر درون آب را بدست می‌دهد. سینماتیک موج برخوردی در این کدها از یک طیف موج مناسب با تئوری موج خطی آیری[۹] 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 جرم افزوده، اینرسی موج و پسای حاصل از لزجت سیال، را بدست می‌دهد. این بیان در مسئله تشعشع از آثار پتانسیل حاصل از سطح آزاد و اندرکنش‌های غیر معمول بین مودهای حرکتی که از جرم افزوده ناشی می‌شوند، چشم پوشی می‌کند [۲،۳] و از مزیت تقریب طول موج بلند جی آی تیلور[۱۰]، برای ساده سازی مسئله تفرق، بهره می‌گیرد[۴]. این تئوری ساده‌ترین تئوری برای بیان رفتار سیال دارای حرکت موجی است. این چشم‌پوشی‌ها و تقریب‌های ذاتی در بیان موریسون، قابلیت به کارگیری آن برای تحلیل بسیاری از گونه‌های سکوی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]

نگهدارنده پیشنهاد شده برای توربین‌های بادی شناور را محدود می‌کند.

در اکثر مطالعات انجام یافته در زمینه تحلیل دینامیکی توربین‌های بادی معلق از تحلیل خطی در حوزه فرکانس استفاده شده است، که اغلب در صنایع نفت و گاز به کار گرفته می‌شود. برای مثال بولدر و همکاران از روابط هیدرودینامیکی خطی در حوزه فرکانس برای یافتن عملگر دامنه پاسخ‌ها[11] (RAO) و دامنه انحرافات استاندارد مودهای حرکتی ۶ درجه آزادی جسم صلب سکوی نگهدارنده نوع سه پایه معلق، توربین بادی ۵ مگاواتی استفاده کرده‌اند[۵-۶]. لی از فرایند مشابهی برای تحلیل_توربین فراساحل ۱/۵ مگا واتی از نوع TLP، پایه کششی و نوع ستون شناور استفاده کرد. وایمن و همکاران نیز از فرایند مشابهی برای تحلیل توربین بادی فراساحل ۵ مگا واتی از نوع TLP چندگانه و نوع کرجی‌وار کششی کم عمق[12] (SDB) بهره برده‌اند[۷-۹]. ویجفوژن با بهره‌گیری از تحلیل‌های حوزه فرکانس، کرجی‌ای برای توربین بادی فراساحل ۵ مگا واتی طراحی کرده است که علاوه بر اینکه سکویی برای توربین بادی است، وسیله ای نیز برای جذب انرژی امواج آب می‌باشد که به ستون آبی مرتعش[13] (OWC) معروف است. در این مطالعات ماتریس جرم معادله حرکت با استفاده از خواص فیزیکی و هندسی توربین بادی بدست می‌آید. ماتریس‌های استهلاک هیدرودینامیکی و سختی نیز با استفاده از استهلاک آیرودینامیک روتور و بخش‌های ارتجاعی و ژیروسکوپیک سازه توربین بادی تعیین می‌شوند. برای استخراج ماتریس سختی سامانه مهار، سامانه حول یک وضعیت تغییر مکان جابجا شده سکوی نگهدارنده ناشی از تراست آیرودینامیکی روتور خطی‌سازی شده و تعیین شده است. در این تحقیقات خواص الاستیسیته بسیاری از بخش‌های توربین بادی نادیده گرفته شده است. بنابراین اکثر تحلیل‌های انجام یافته مربوط به حوزه فرکانس بوده و در مواردی که تحلیل در حوزه زمان انجام شده است، فرضیات سینماتیکی اعمال شده سازه توربین زیاد بوده است که در این مقاله به حداقل رسیده است.

در مطالعه حاضر با استفاده از نرم افزار تحلیل دینامیکی ADAMS، مدل غیرخطی دینامیک چند جسمی توربین بادی شناور کرجی‌وار 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 توربین بادی شناور حل می‌گردد. ارتعاشات پیچشی پره‌ها و برج برخلاف سایر تحقیقات در مطالعه حاضر در نظر گرفته می‌شود. 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 آیرودینامیکی به کار 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 اِعمال تحلیل همزمان همه بارهای وارده بر قسمت‌های مختلف توربین بادی، از قبیل سکوی نگهدارنده، پره‌ها، سامانه مهار و سازه برج اشاره کرد که از آن به عنوان تحلیل آیروهیدروسروالاستیک حوزه زمان یاد می‌شود، نام برد. منظور از آیروهیدروالاستیک آن است که مدل‌های آیرودینامیکی، مدل‌های الاستیک سازه‌ها و مدل‌های هیدرودینامیکی در یک محیط کاملا 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-هیدرودینامیک توربین بادی شناور

نیروهای هیدرودینامیکی از انتگرال‌گیری فشار دینامیکی آب روی سطح خیس شده‌ی سکوی نگهدارنده بدست می‌آیند. این نیروها شامل سهمی از جرم افزوده و پسای خطی (تشعشع)، شناوری (بازگردان)، پخش موج برخوردی (تفرق)، جریان دریا و آثار غیرخطی می‌باشند. ماژول HyroDyn نیروهای مذکور را محاسبه و به صورت گام به گام در اختیار نرم افزار ADAMS قرار می‌دهد[۱۰]. برای سینماتیک و سنتیک سکوی نگهدارنده، فرض شده است که سکوی نگهدارنده شناور به عنوان یک جسم صلب شش درجه آزادی متناسب با سه تغییرمکان کوچک چرخشی بیان شده باشد. فرض کوچک بودن زاویه چرخشی در این مورد فرض صحیحی می‌باشد. بعلاوه فرض می‌شود که برج به صورت 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. مسئله دوم، اشاره بر این دارد که جابجایی‌های انتقالی سکوی نگهدارنده نسبت به اندازه بدنه آن (مشخصه طول بدنه)، کوچک می‌باشد. بدین ترتیب مسئله هیدرودینامیک به سه مسئله ساده‌تر و مجزا تقسیم می‌شود: تشعشع، تفرق و هیدرواستاتیک[۱۱،۱۲]. سومین مسئله خطی‌سازی این است که می‌توان از مزایای روش قدرتمند اصل جمع آثار سود برد. همچنین باید توجه داشت که

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]

مسئله هیدرودینامیک دریایی کلاسیک، از تئوری جریان پتانسیل غیردائم برای بدست آوردن معادلات حاکم حرکت سیال بهره می‌برد. این تئوری فرض بر این دارد که سیال غیر قابل تراکم، غیر چرخشی و غیر لزج می‌باشد و تنها تحت نیروهای حجمی پایستار (گرانش) است.

مسئله تشعشع به دنبال پیدا کردن بارهای وارده بر سکوی نگهدارنده، که بدون حضور موج سطحی برخوردی، تحت ارتعاش اجباری در مودهای حرکتی مختلف خود است، می‌باشد. نیروهای تشعشع هنگامی به وجود می‌آیند که جسم شناور باعث تولید امواج بیرون رونده آب می‌شود. این نیرو شامل سهمی از جرم افزوده و استهلاک امواج تشعشع می‌باشد. مسئله تفرق به دنبال پیدا کردن بارهای وارده بر سکوی نگهدارنده با این فرض است که بدنه در موقعیت میانی ثابت شده است (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[۱۴] فرود کریلف[۱۵] 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 نگهدار 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].

$$F_i^{Platform} = -A_{ij}\ddot{q}_j + F_i^{Hydro} + F_i^{Lines} \qquad (۱)$$

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 درجه آزادی j ام 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].

$$F_i^{Hydro} = F_i^{Waves} + \rho g V_0 \delta_{i3} - C_{ij}^{Hydro} q_j - \int_0^t K_{ij}(t-\tau)\dot{q}_j(\tau)d\tau \qquad (۲)$$

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 ζ، مرتبط می‌باشد و ρ چگالی آب، g ثابت شتاب گرانشی، V_0 حجم جابجا شده سیال در سکوی ایستا، δ_{ij} تابع دلتا-کرونکر، C_{ij}^{Hydro} ماتریس سختی هیدرودینامیکی، q_j درجه آزادی j ام سامانه، K_{ij} ماتریس هسته اصلی تاخیر تشعشع t زمان شبیه‌سازی، $\dot{q}_j$ مشتق زمانی اول درجه آزادی j ام سامانه، τ متغیری دلخواه با واحدی برابر زمان شبیه‌سازی می‌باشند. تئوری موجی که در HydroDyn استفاده شده است مربوط به امواج پیش رونده می‌باشد. موج پیش رونده 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 پیش روی 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 ζ, F_i^{Wave} به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۳]:

$$\zeta(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} W(\omega)\sqrt{2\pi S_\zeta^{2-Sided}(\omega)}e^{j\omega t}d\omega \qquad (۳)$$

$$F_i^{Waves}(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} W(\omega)\sqrt{2\pi S_\zeta^{2-Sided}(\omega)}\,X_i(\omega,\beta)e^{j\omega t}d\omega \qquad (۴)$$

معادلات (۳) و (۴) تبدیلات فوریه معکوس، می‌باشند که در آنها j نشانگر عدد موهومی است. $S_\zeta^{2-Sided}$ نشانگر چگالی طیف توان[۱۶] (PSD) دوطرفه ارتفاع موج مورد نظر در زمان واحد، یا طیف موج دو طرفه که وابسته به فرکانس امواج برخوردی ω می‌باشد، است. $W(\omega)$ نشانگر تبدیل فوریه تحقق[۱۷] اختلال گوسی فرآیند دنباله زمانی با میانگین صفر و واریانس یک (توزیع استاندارد نرمال) می‌باشد. در ماژول HydroDyn، تحقق فرآیند WGN[۱۸] با استفاده از روش باکس مولر[۱۹] محاسبه می‌شود[۱۴]. تنها اختلاف میان معادلات (۳) و (۴) تابع تبدیل مختلط نیروی تحریک نرمالیزه شده موج، X_i، می‌باشد که مستقیماً از خطی‌سازی مسئله تفرق ناشی می‌شود. در حالت حدی، هنگامی که اختلاف بین فرکانس‌های یک موج مشخص به صفر نزدیک می‌شود، این سری با انتگرالی که روی همه فرکانس‌های موج برخوردی تعریف می‌شود (معادله ۴)، جایگزین می‌گردد. این خواص را می‌توان خیلی واضح‌تر هنگامی که معادله (۴) به شکلی دیگر اما معادل با آن بیان شود، توسط معادله (۵) دید[۱۵].

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

در این معادله τ متغیری دلخواه با واحدی یکسان با زمان شبیه سازی، t است و زمان و جهت نیروی تحریک موج برخوردی سکوی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]

نگهدارنده به ازای دامنه واحد موج، نرمالیزه شده وبه صورت (K_i) زیر داده می‌شود:

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

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 اینکه از کدام فرمولاسیون برای تحلیل استفاده می‌شود، 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)، بکار برده می‌شود. همچنین برای تبدیل فوریه معکوس از دستورات محاسباتی بهینه موسوم به تبدیل فوریه سریع استفاده می‌شود[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 خطی‌سازی نقض می‌گردند. 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 می‌شود به صورت زیر می‌باشد[۱۷]:

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

طیف یک طرفه جانسواپ[۲۰] استفاده شده در HyrdoDyn با رابطه زیر تعریف می‌شود:

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

که در آن H_s ارتفاع موج شاخص، T_p دوره طیفی قله و γ پارامتر شکل قله داده شده برای حالت دریای نامنظم است و σ فاکتور مقیاس می‌باشد.

دومین و سومین عبارت سمت راست معادله (۲)، یعنی $\rho gV_0\delta_{i3}-C_{ij}^{Hydrostatic}q_j$، نشانگر سهم بار هیدرواستاتیکی است. نیروهای هیدرواستاتیک حاصل شده از امواج برخوردی به ترتیب مستقل از مسائل تفرق و تشعشع هستند [۱۰]. اولین عبارت، $\rho gV_0\delta_{i3}$، نیروی شناوری ارشمیدس می‌باشد که هنگامی که سکوی نگهدارنده در موقعیت جابجا نشده‌اش قرار دارد، برابر وزن سیال جابجا شده و در جهت عمودی به سوی بالا می‌باشد. این عبارت صرفاً برای درجه آزادی جابجایی عمودی سکوی نگهدارنده غیر صفر می‌باشد، چون فرض می‌شود که مرکز شناوری سکو در طول خط مرکزی جابجا نشده‌ی برج است (یا محور Z سکوی نگهدارنده). عبارت دوم هیدرواستاتیک، یعنی $-C_{ij}^{Hydrostatic}q_j$، حاکی از تغییر در نیروی هیدرواستاتیکی و گشتاور حاصل از آثار مساحت سطح آب و مرکز شناوری (به محض اینکه سکوی نگهدارنده جابجا 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)، (۵و۳) و (۳و۵) هستند که در رابطه زیر نشان داده شده‌اند[۱۱].

$$C_{ij}^{Hydrostatic}=\begin{bmatrix}0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0\\0&0&\rho gA_0&0&-\rho g\iint_{A_0}xdA&0\\0&0&0&\rho g\iint_{A_0}y^2dA+\rho gV_0z_{COB}&0&0\\0&0&-\rho g\iint_{A_0}xdA&0&\rho g\iint_{A_0}x^2dA+\rho gV_0z_{COB}&0\\0&0&0&0&0&0\end{bmatrix} \qquad (۹)$$

که در آن A مساحت صفحه آبی سکوی نگهدارنده، x جابجایی طولی، A_0 مساحت صفحه آبی در موقعیت جابجا نشده، y جابجایی 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 (۵و۳) و (۳و۵) از $C_{ij}^{Hydrostatic}$ نیز صفر می‌شوند. معادله (۹) سختی هیدرواستاتیک را صرفاً برای حرکات غلتش عرضی (Roll)، غلتش طولی (Pitch) و غلتش قائم (Heave) تامین می‌کند و به طور صریح چنین بیان می‌دارد که سختی مودهای دیگر حرکتی، باید از طریق سامانه مهار تحقق یابد. نیروهای امواج تشعشع شامل سهم‌هایی از جرم افزوده هیدرودینامیکی و استهلاک می‌باشد. به علت اینکه مسئله تشعشع از مسئله تفرق جدا شده است، بارهای امواج تشعشع مستقل از امواج برخوردی می‌باشند.

در معادله (۱) اجزاء تکانشی جرم افزوده 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 درجه آزادی i که از انتگرال (روی سطح خیس شده سکوی نگهدارنده) بخش میدان فشار القاء شده موج نسبت به واحد شتاب jامین درجه آزادی سکوی نگهدارنده بدست می‌آید می‌باشند. همانند ماتریس جرمی بدنه، ماتریس تکانشی جرم افزوده هیدرودینامیکی، ماتریسی متقارن است. برخلاف ماتریس جرم و بسته به شکل سکوی نگهدارنده، ماتریس جرم افزوده هیدرودینامیکی حامل اجزاء غیر قطری می‌باشد که مودهای حرکتی‌ای که از طریق لختی بدنه نمی‌توانند کوپل شوند را کوپل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]

می‌کند[۱۰]. در بخش آخر معادله (۲)، $-\int_0^t K_{ij}(t-\tau)\dot{q}_j(\tau)d\tau$، انتگرال کانولوشن، نشانگر سهم بار استهلاکی ناشی از تشعشع موج بوده و نیز حاکی از یک سهم اضافه شده از جرم افزوده است که در A_{ij} به حساب آورده نمی‌شود. در این عبارت τ متغیر اختیاری با واحدی برابر با زمان شبیه سازی، t، و K_{ij}، (i,j)امین جزء ماتریس معروف به هسته (قسمت اصلی) تاخیر موج تشعشع[۲۱] می‌باشد. در مسئله تشعشع، سطح آزاد باعث به وجود آمدن آثار حافظه می‌شود، که بدین معنی است که بارهای تشعشع موج وابسته به پیشینه حرکتی سکوی نگهدارنده است. در ماژول HydroDyn انتگرال کانولوشن در حوزه زمان به کار گرفته می‌شود تا مستقیما آثار حافظه لحاظ گردد. تاثیر حافظه در حالت عام، بعد از گذشت مقدار زمان محدود از بین می‌رود[۱۰].

۳-مدل‌سازی سامانه مهار

سامانه مهار به عنوان ابزاری برای نگه‌داشتن موقعیت سکوی نگهدارنده و حفظ آن در برابر باد، امواج و جریان آب می‌باشد. در برخی از سکوهای 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 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 بشدت تابع حرکات توربین بادی شناور می‌باشد که از آن به عنوان تبعیت[۲۲] سامانه مهار یاد می‌شود[۱۱]. اگر تبعیت سامانه مهار به طور ذاتی خطی باشد و سختی مهار و استهلاک آن نادیده گرفته شود، برآیند نیروی وارده بر سکوی نگهدارنده از طرف همه خطوط مهاری، F_i^{Lines}، از معادله (۱) به صورت زیر در می‌آید:

$$F_i^{Lines} = F_i^{Lines,0} - C_{ij}^{Lines} q_j \qquad (۱۰)$$

که C_{ij}^{Lines}، (i,j)امین جزء ماتریس سختی خطی حاصل از همه خطوط مهاری است و $F_i^{Lines,0}$، iامین جزء نیروی سامانه مهار در موقعیت جابجا 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 صرف نظر می‌کند. به علت این که ماژول شبه استاتیک کاملا با ADAMS کوپل می‌شود، لذا سختی غیرخطی ناشی از هندسه کل سامانه مهار را نیز در نظر می‌گیرد. منظور از شبه استاتیک این است که موقعیت کابل‌های متصل به سکوی نگهدارنده به‌ازای جابجایی 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 بدست 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 توربین بادی می‌شود و برعکس، که در حقیقت تعاملی آیروالاستیکی به وجود می‌آورند. مدل‌های موجود در AeroDyn از روابطی بر پایه جریان محلی دو بعدی و مشخصه‌های ایرفویل در طول پره استفاده می‌کنند که با ضرایب پسا، برا و گشتاور پیچشی اندازه‌گیری شده در فرآیند آزمایش تونل باد، مشخص می‌گردند. باد ورودی می‌تواند شامل گستره وسیعی از شرایط محیطی از قبیل، تلاطم جوی متغیر با زمان سه بعدی همچون تندبادهای گسسته یا بادهایی با سرعت میانگین دائم باشد. اغلب این نوع بادها به وسیله ماژول دیگری از (NREL)[۲۳] به وجود می‌آید. TurbSim نام ماژولی است که این کار را انجام می‌دهد و توسط جانکمن و بوهل به وجود آمده است. داده‌های 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 BEM (BEM)[۲۴] و (GDW)[۲۵] 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[۲۶] وجود دارد. و اگر تئوری GDW را انتخاب کند همه این آثار به خودی 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].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]

تئوری BEM بسط تئوری دیسک متحرک بدست 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 دو بعدی 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 به علت کار انجام یافته توسط جریان عبوری از میان صفحه روتور و از روی پره می‌باشد، بنا شده است[۱۸]. شکل **۲** نمونه یک ایرفویل با سرعت‌ها و زوایای مربوطه 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:

$$\tan\varphi = \frac{U_\infty(1-a)}{\Omega r(1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \qquad (۱۱)$$

که در آن φ زاویه جریان محلی، U_∞ سرعت جریان باد آزاد، a ضریب القایی محوری، a' ضریب القایی دورانی یا مماسی، Ω سرعت دورانی روتور، r شعاع محلی روتور، λ_r نسبت سرعت نوک محلی می‌باشند. سرعت‌های محلی نیز در محاسبات زاویه جریان به صورت زیر وارد می‌شود:

$$\tan\varphi = \frac{U_\infty(1-a)+v_{e-op}}{\Omega r(1+a')+v_{e-ip}} \qquad (۱۲)$$

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 متون طراحی توربین بادی ملاحظه نمود[۲۰].

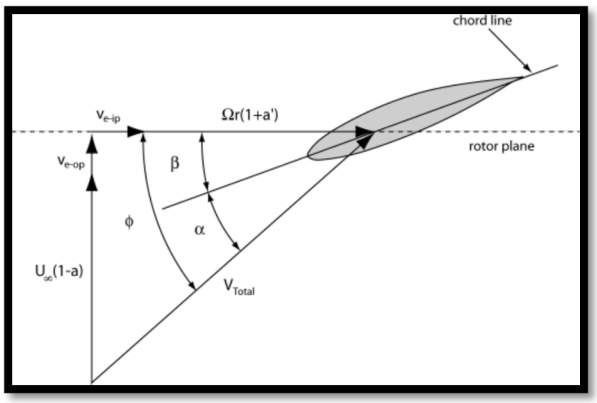
اگر a معرف ضریب القایی محوری باشد از تئوری BEM و شکل **۳**، تراست حاصله از هر منطقه حلقوی روتور برابر است با:

$$dT = 4\pi r\rho_a U_\infty^2(1-a)a\,dr \qquad (۱۳)$$

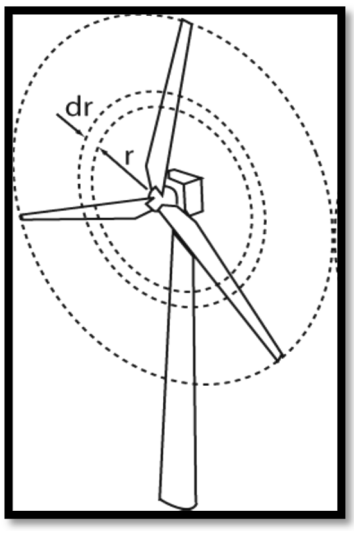
که T تراست آیرودینامیکی روتور و ρ_a چگالی هوا می‌باشد. گشتاور حاصله از هر بخش دایروی برابر است با:

$$dQ = 4\pi r^3\rho_a U_\infty^2\Omega(1-a)a'dr \qquad (۱۴)$$

هنگامی که جداول ضریب برا و پسای ایرفویل دو بعدی به صورت تابعی از زاویه حمله α در نظر گرفته شود، مجموعه‌ای از معادلات وجود خواهد داشت که می‌توانند به صورت 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 گرداب‌های موجود در این مناطق، تصحیح گلاورت برای سرعت‌های القایی بزرگ (a>۰/۴)، تصحیح دنباله مورب برای مدل‌سازی آثار جریان ورودی که عمود بر صفحه روتور نیست، می‌باشند[۱۸]. در این مقاله از تئوری BEM استفاده شده است.



شکل۲-زوایای جریان و سرعت‌های المان محلی [۱۸]



شکل ۳- صفحه حلقوی استفاده شده در BEM [۱۸]

مدل GDW موجود در AeroDyn بر اساس روش ارائه شده توسط پیترز می‌باشد[۱۸]. این مدل در اصل برای صنعت هلیکوپتر سازی توسعه داده شده و به عنوان روش پتانسیلی سرعت نیز شناخته می‌شود. مزیت این روش آن است که نسبت به تئوری BEM، توزیع فشار کلی‌تری برای صفحه روتور در نظر می‌گیرد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

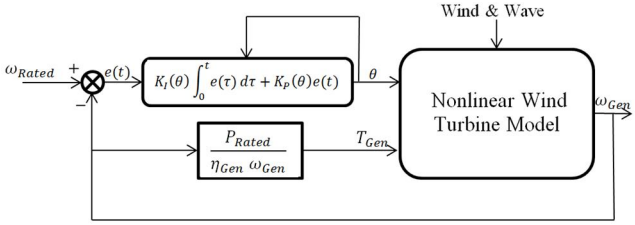
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]

این روش با بکارگیری حالت‌های غیر خطی جریان، تغییرات اغتشاش جریان ورودی در نظر می‌گیرد. روش GDW براساس پاسخ جریان پتانسیل معادله لاپلاس می‌باشد. کینر از این حل برای توسعه معادلات توزیع فشار در صفحه روتور استفاده کرد[۲۱]، که شامل یک سری بینهایت از توزیع لژاندر در جهت شعاعی و توابع مثلثاتی در جهت گردش عقربه‌های ساعت بود. او از معادلات اویلر (جریان غیر قابل تراکم و غیر لزج) 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، به علت تاخیر زمانی موجود در سرعت‌های القایی تولید شده توسط گردابه حاصله از پره‌هاست و در جهت پائین‌دست جریان جابجا 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 غیر تکراری حل گردند. به علت عدم نیاز به تکرار، برای تعیین ضرایب آیرودینامیکی هر المان پره، مدل می‌تواند مستقیما همراه با مدل واماندگی دینامیکی استفاده شود. اگرچه AeroDyn تاثیر واماندگی دینامیکی را بعد از حل معادلات GDW، تعیین می‌کند. برای اطلاع از جزئیات بیشتر به مرجع مربوطه مراجعه شود[۱۸].

۴-سامانه کنترل مرجع

سیستم کنترل مرجع توربین‌های بادی شناور از دو حلقه کنترلی مجزا تشکیل می‌شود که عبارتند از حلقه کنترلی گشتاور ژنراتور و کنترلر زاویه گام. برای حلقه کنترلی گشتاور ضریب کنترلر از حاصلضرب عکس سرعت ژنراتور و راندمان (η_{Gen}) آن در توان مجاز (P_{Rated}) ژنراتور بدست می‌آید. شکل ۴ نمای کلی از سیستم کنترلی ذکر شده را نشان می‌دهد.



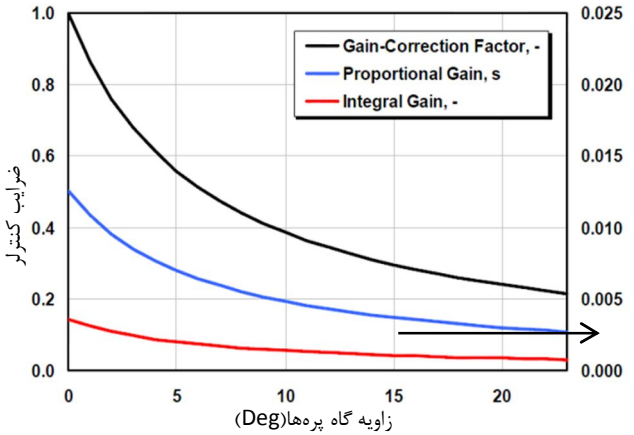
شکل ۴- شماتیک سیستم کنترل مرجع بالای سرعت مجاز [۲۲]

حلقه کنترل گام پره به وسیله کنترلر PI با ضرایب تعیین شده[۲۷] (GSPI) رابطه ۱۵ اعمال می‌شود.

$$\theta(t) = K_P(\theta)\,\mathrm{e(t)} + \mathrm{K}_I(\theta)\int_0^t e(\tau)\,\mathrm{d}\,\tau \qquad (۱۵)$$

که $\theta(t)$ زاویه گام پره، $K_P(\theta)$ ضریب تناسبی و K_I ضریب انتگرالی کنترلر هستند. $e(t)$ میزان خطای سرعت ژنراتور از سرعت مجاز[۲۸] می‌باشد. ضرایب کنترلر گام با استفاده از خطی سازی کل سیستم در سرعت‌های باد یکنواخت ۱۱/۴تا ۲۵ متر برثانیه در زوایای گام مختلف و سرعت دورانی ثابت روتور، بدست آمده‌اند. شکل ۵ مقادیر ضرایب کنترلر گام پره را که تابعی از مقدار زاویه گام می‌باشد نشان می‌دهد.

کنترلر مرجع استفاده شده در این مطالعه ساده‌ترین استراتژی کنترلی برای توربین بادی شناور نوع کرجی‌وار است. امروزه مطالعات زیادی روی کنترل توربین‌های بادی شناور در حال انجام است که پاسخ بهتری برای خروجی‌های مورد نظر فراهم می‌کنند. از آنجایی که هدف این مقاله تحلیل دینامیکی توبین بادی شناور بوده است، به بهینه بودن سیستم کنترلی پرداخته نمی‌شود. لذا میزان موفقیت کنترلر در رساندن سرعت دورانی ژنراتور به سرعت مجازی که توان ۵ مگاوات تولید کند نیازمند طراحی کنترلر بهینه‌ای است که خارج از حیطه این مطالعه است.



شکل ۵- نمودار ضرایب کنترلر تابعی از گام پره[۱۰]

۵-معرفی مشخصات توربین بادی مورد استفاده

در این مقاله از مشخصات توربین بادی کرجی‌وار مبنای NREL استفاده می‌شود. این توربین بادی روی سکویی به شکل کرجی سوار می‌شود که روی آب به عمق ۱۵۰ متر معلق است. در جدول شماره ۱ مشخصات توربین بادی، در جدول ۲ مشخصات سازه پره و در جدول ۳ مشخصات آیرودینامیکی پره آورده شده است[۱۰]. همانطور که از جدول ۳ نیز مشاهده می شود هر پره به ۱۷ المان تقسیم شده است که مشخصات آیرودینامیکی (ضرایب آیرودینامیکی برای زوایای مختلف حمله) هر المان در فایل مربوط به خود آورده می‌شود. مشخصات سکوی نگهدارنده نیز در جدول ۴ آورده شده است[۱۰].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]

جدول ۱-مشخصات توربین بادی

توان اسمی(MW)	۵
جهت روتور و تعداد پره‌ها	مقابل باد و ۳ پره
قطر هاب و روتور(m)	۳ و ۱۲۶
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 ($kg.m^2$)	۱۱۷۷۶۰۴۷
ممان اول اینرسی جرمی (kg.m)	۳۶۳۲۳۱

جدول ۳-مشخصات آیرودینامیکی پره‌ها

مقطع	ایرفویل
۱و۲	Cylinder 1
۳	Cylinder 2
۴	DU40_A17
۵و۶	DU35_A17
۷	DU30_A17
۸و۹	DU25_A17
۱۰و۱۱	DU21_A17
۱۲و۱۳و۱۴و۱۵و۱۶و۱۷	NACA64_A17

جدول ۴-مشخصات سکو

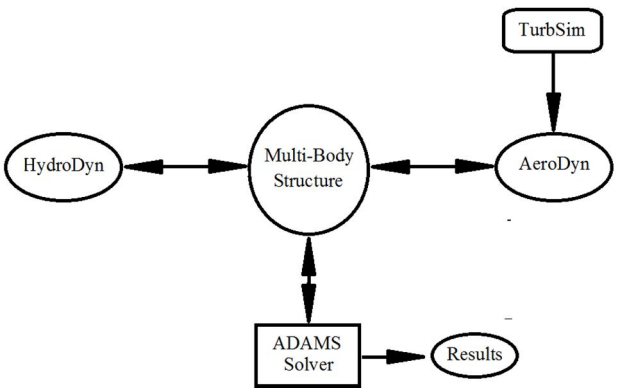
اندازه سکو(m)	۱۰×۴۰×۴۰
ارتفاع آبخور(m)	۴
جرم شامل شناوری(kg)	۵۴۵۲۰۰۰
مرکز جرم(m)	-۰/۲۸۱۷۶۸
اینرسی غلتش طولی حول CM (kgm^2)	۷/۲۶۹×۱۰^۸
اینرسی غلتش قائم حول CM (kgm^2)	۱/۴۵۳۹×۱۰^۹
عمق لنگر(m)	۱۵۰
قطر کابل(m)	۰/۰۸۰۹
چگالی کابل(kg/m)	۱۳۰/۴
سختی کششی کابل(N)	۵/۸۹×۱۰^۸

۶-نحوه‌ی شبیه‌سازی توربین بادی

اکنون با استفاده از مشخصات توربین بادی کرجی‌وار که در بخش قبل بیان گردید و نیز با استفاده از فایل مجموع داده ایجاد شده توسط نرم‌افزار FAST، مدل توربین مورد نظر در نرم‌افزار ADAMS ایجاد می‌شود. فایل مذبور حاوی هندسه دینامیک چند جسمی مسئله و مشخصات آورده شده در قسمت قبل می‌باشد. منظور از هندسه دینامیک چند جسمی توربین بادی این است که سیستم توربین بادی شناور به صورت یک سری از اجسام صلب ۶ درجه آزادی متصل به هم با جرم متمرکز 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 به وسیله ماتریس‌های سختی و دمپینگ خطی چند بعدی مدل می‌شوند (قیود ۶ درجه آزادی). موتورخانه و هاب نیز از این قاعده مستثنی نیستند. تمام سازه سکوی نگهدارنده به صورت یک جرم صلب متصل به پایه برج توربین در نظر گرفته شده است. مقادیر سازه‌ای سازه توربین بادی نیز مربوط به توربین بادی مبنای NREL می‌باشد. که با توجه به حجیم بودن ارائه این مشخصات در داخل مقاله پیشنهاد می شود به مرجع [۱۰] مراجعه گردد.

فایل سازه‌ای مسئله فایل اصلی بوده و ورودی حلگر ADAMS می‌باشد. اولین قدم در اجرای تحلیل، ساخت فایل کتابخانه‌ای ارتباط دینامیکی dll[۲۹] از AeroDyn و HyroDyn می‌باشد. که این کار به وسیله کامپایلر IVF[۳۰] انجام گرفت. در حقیقت نرم‌افزار ADAMS هنگام حل از این فایل استفاده می‌کند.

دومین گام ساخت فایل مربوط به داده‌های میدان باد متلاطم با سرعت میانگین ۱۵ متر بر ثانیه به مدت ۳۰۰ ثانیه می‌باشد که توسط نرم افزار TurbSim استخراج می‌گردد. گام سوم، حل مسئله به وسیله حلگر ADAMS می‌باشد که با معرفی فایل اصلی سازه‌ای به آن و انتخاب پارامترهای حل‌گر انجام می‌پذیرد. شکل ۶ مراحل حل مسئله را در نرم افزار ADAMS نشان می‌دهد. در ادامه توضیحاتی درباره پارامترهای حل‌گر ADAMS ارائه می‌شود.



شکل ۶- شماتیک مراحل حل مسئله در نرم افزار ADAMS

روشهای بسیار زیادی برای حل معادلات دیفرانسیل سیستم دارای قیود وجود دارد. از این معادلات دیفراسیل و معادلات مربوط به قیود در ADAMS تحت عنوان مجموعه (DAE)[۳۱] 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 شبیه سازی سیستم‌های دینامیکی اندیس ۳ دارد. در حلگر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]

ADAMS دو روش که قابلیت اعتماد بیشتری به حل می‌دهد وجود دارد. معروف ترین آنها حل‌گر 3DAE است که مربوط به حل معادلات دیفرانسیل موقعیت قیود سینماتیکی می‌باشد. توضیحات مذکور نحوه کار حلگر GSTIFF-I3 می‌باشد.

دومین روش الگوریتم تصحیح شده‌ای است که اندیس اصلی ۳ را به مسئله‌ای با اندیس ۲ برای DAE کاهش می‌دهد که از لحاظ عددی متفاوت ولی از لحاظ تحلیلی معادل با آن است. بنابراین بجای در نظر گرفتن موقعیت، معادلات قیود سینماتیکی سرعت همراه با معادلات دیفرانسیلی سینماتیکی حل می‌شوند. در حلگر ADAMS این حلگر SI2 نامیده شده است و به نوعی آهسته‌تر از روش اندیس ۳ می‌باشد ولی دقت و ثبات زیادی دارد. در این کار از حلگر GSTIFF به خاطر سرعت بالای آن استفاده می‌شود. این حلگر ابتدا با استفاده از فرمول انتگرال‌گیری ضمنی DAEها را به مجموعه‌ای از معادلات جبری تبدیل می‌کند. این فرمول، همان فرمول اولر برگشتی (رو به عقب) با گام منفرد است. در ادامه از الگوریتم تکراری نیوتن رافسون برای بدست آوردن حاصل دستگاه غیر خطی (مکانها) استفاده می‌شود. اگر فرایند تکرار ناکام بماند، گام انتگرال‌گیری کم می‌شود و مسئله برای گام جدید حل می‌گردد.

جدول ۵-خلاصه‌ای از شرایط DLC 1.2 [۲۲]

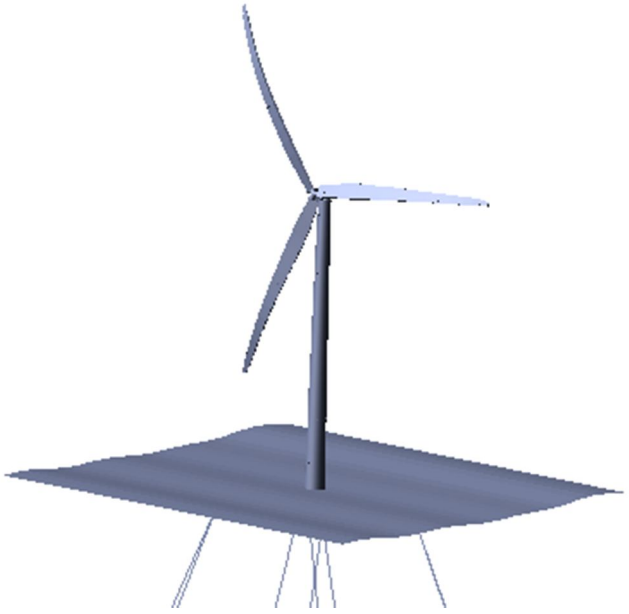
شرایط باد	مدل تلاطم معمولی Vin < Vhub < Vout
امواج	حالت دریای معمولی
جهات امواج و باد	هم جهت
جریان دریا	ندارد

استاندارد IEC برای شرایط محیطی مسئله، DLC 1.2 چنین مشخص می‌کند که از توزیع احتمال توام[۳۲] باید برای سرعت باد، ارتفاع موثر موج و دوره تناوب موج استفاده شود. اما به علت در دسترس نبودن داده‌های کامل سایت، شرط DLC 1.1 در استفاده از ارتفاع موثر موج مورد انتظار در محدوده سرعت باد داده شده بکار گرفته شده است. به علت 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 شده است. 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)[۳۳] برای تئوری موج خطی قابل بکارگیری در آبهای عمیق معادله زیر ارضاء می‌شود[۲۲].

$$\frac{H_s}{gT_p^2} \le 0.002 \qquad (۱۶)$$

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



شکل ۷-شبیه سازی در ADAMS در لحظه مشخص

بعد از ایجاد مدل توربین بادی کرجی‌وار در ADAMS، با یکپارچه نمودن ماژول‌های بارگذاری به صورت فایل DLL اقدام به اجرای شبیه‌سازی در محیط ADAMS/Solver می‌شود. مدت زمان شبیه‌سازی ۳۰۰ ثانیه می‌باشد. بعد از اتمام شبیه‌سازی‌ها مجموعه جواب‌ها در فایل خروجی قابل دسترسی می‌باشد. شکل ۷ روند شبیه سازی را در زمان مشخص نشان می‌دهد.

۷-نتایج شبیه‌سازی

همانگونه که در بخش قبل نیز بیان شد، نتایج عددی حاصل از شبیه سازی از طریق فایل خروجی ADAMS در دسترس می‌باشد. به علت زیاد بودن تعداد پارامترها در اینجا فقط به برخی از مهمترین آنها اشاره می‌شود. اَشکال ۸ تا ۱۰ نمونه‌هایی از نتایج ASAMS را نشان می‌دهد که با نتایج حاصل از نرم افزار FAST مقایسه شده‌اند.

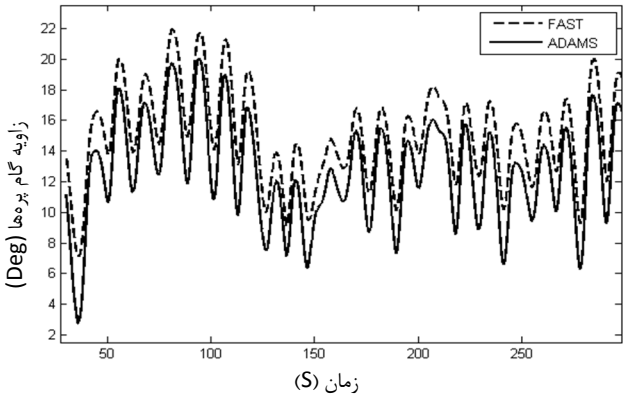
از شکل ۸ مشاهده می‌شود که روند تغییرات زاویه گام پره‌ها با استفاده از کنترلر مرجع در بازه ۷ تا ۲۰ درجه در حال تغییر می‌باشد. نتایج حاصله از ADAMS و FAST اختلافاتی باهم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

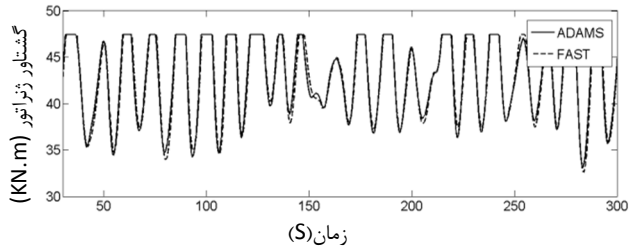
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]

دارند. علت این اختلاف را این‌گونه می‌توان توجیه نمود که پیچش و جابجایی جرم در مدل پره که در نرم افزار FAST نادیده گرفته می‌شوند در ADAMS در محاسبات لحاظ می‌شوند. نتیجه واضح این اختلافات آن است که زوایای گام پره برای ADAMS کوچکتر از FAST می‌باشد، چون سامانه کنترلی در FAST باید کمبود پیچش پره را جبران کند. با این توصیف تراست اعمالی روی پره‌ها نیز تغییر کرده و نوسانات سازه‌ای توربین را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد.

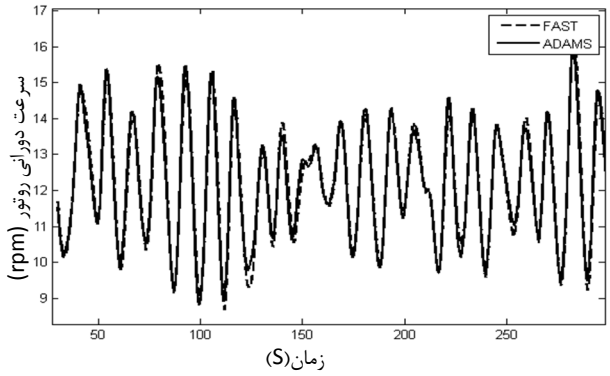
طبق اطلاعات ذکر شده در بخش ۴ برای کنترلر مرجع، شکل ۹ نحوه تغییرات گشتاور ژنراتور با زمان را در دو نرم افزار نشان می‌دهد. اختلاف موجود بین این دو نرم افزار نیز از میزان چرخش زاویه گام ذکر شده در پاراگراف قبل است. با تغییر زاویه گام پره سرعت دورانی نیز به تبع آن تغییر پیدا می‌کند که گشتاور ژنراتور را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. تغییرات سرعت دورانی روتور در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۸-تغییرات زاویه گام پره‌ها در مقابل زمان

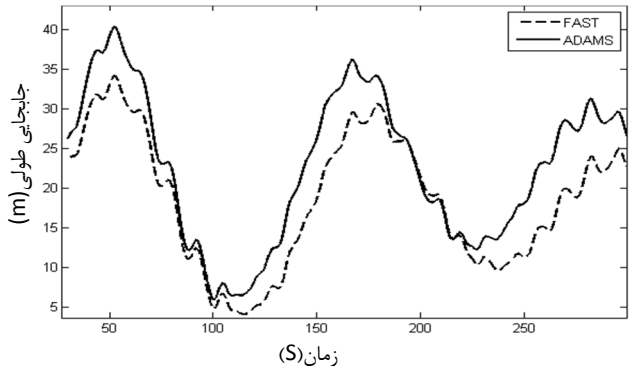


شکل ۹- تغییرات گشتاور ژنراتور

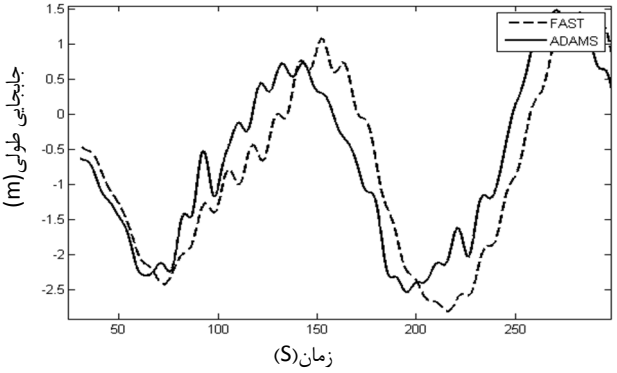


شکل ۱۰-تغییرات سرعت دورانی روتور در مقابل زمان

به علت کوپلینگ نیروهای آیرودینامیکی و هیدرودینا-میکی جابجایی قائم، طولی، عرضی و غلتش‌های سکو اجتناب ناپذیر است. شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ این پاسخ‌ها را نشان می‌دهند. با توجه به اینکه نیروهای آیرودینامیکی وارده بر پره‌ها و همچنین نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر سکوی نگهدارنده تابع حرکت و رفتار پره‌ها و سکو می‌باشد لذا تغییر پاسخ دینامیکی سازه توربین باعث تغییر نیروی آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی وارده بر سازه می‌شود و برعکس که تعاملی آیروهیدرو الاستیکی بین سازه، نیروهای آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی برقرار می‌شود. لذا در حقیقت اختلاف بین نتایج را باید در کوپلینگ آیروهیدرو الاستیکی مسئله جستجو کرد.



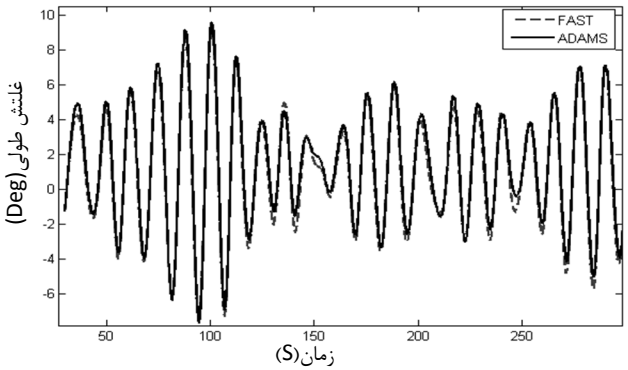
شکل ۱۱-جابجایی طولی سکو در مقابل زمان



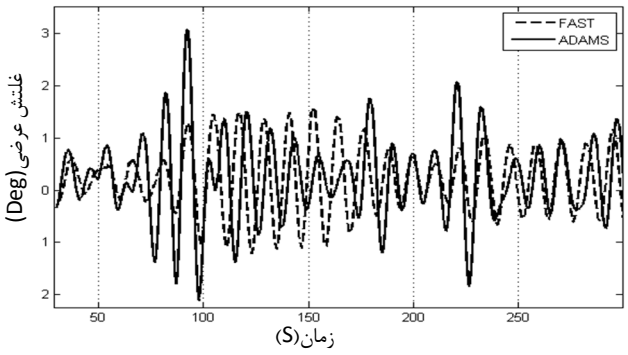
شکل ۱۲-جابجایی عرضی سکو در مقابل زمان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

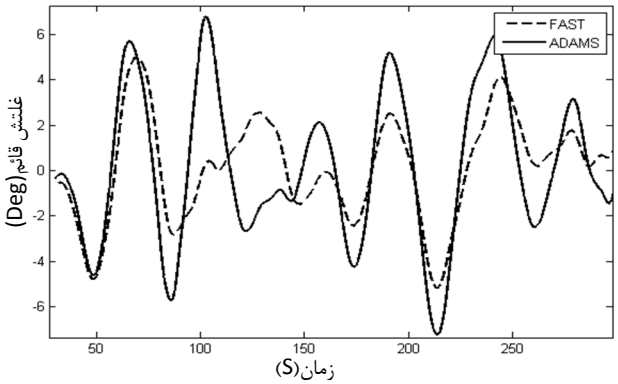
[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]



شکل ۱۳-غلتش طولی سکو در مقابل زمان

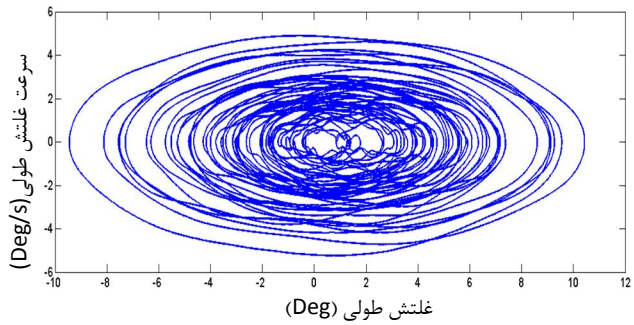


شکل ۱۴-غلتش عرضی سکو در مقابل زمان



شکل ۱۵-غلتش قائم سکو در مقابل زمان

با توجه به مجهز بودن توربین به کنترلر گام پره و گشتاور ژنراتور سیستم همواره پایدار خواهد بود و با افزایش زمان تاثیری در پایداری دینامیکی اتفاق نمی‌افتد. شکل ۱۶ نمودار صفحه فاز غلتش عرضی را برای مدت زمان ۶۰۰ ثانیه نشان می‌دهد.



شکل ۱۶-نمودار جابجایی غلتش طولی در مقابل سرعت دورانی آن

نرم‌افزار FAST یک شبیه‌ساز غیرخطی مختص توربین بادی در حوزه زمان است که ترکیبی از فرمولاسیون دینامیک چند جسمی و مودال می‌باشد. این نرم افزار توسط آزمایشگاه بین‌المللی انرژیهای تجدید پذیر NREL توسعه داده شده است. اگرچه FAST تعداد درجات آزادی سازه‌ای محدودی دارد، با این حال می‌تواند اغلب توربین‌های بادی با اَشکال مرسوم را شبیه سازی کند. در FAST انعطاف پذیری پره‌ها و برج با استفاده از بیان خطی مودال و احتساب تغییر مکان‌های کوچک هر عضو مشخص می‌شود. مشخصه‌های انعطاف پذیری این اعضا به وسیله سختی توزیع شده و مشخصات جرمی در طول اعضاء با تعیین شکل مودهای آنها توسط چند جمله‌ای‌های هم ارز مشخص می‌شوند. FAST قابلیت احتساب دو درجه آزادی مود خمشی در جهت عمود بر صفحه روتور و یک درجه آزادی مود خمشی در صفحه روتور را برای پره‌ها و دو درجه آزادی جلو و عقبی و بغلی مودهای خمشی برج را به کاربر می‌دهد. همزمان یک درجه آزادی برای سرعت متغیر ژنراتور و یک درجه آزادی برای انعطاف پذیری پیچشی زنجیره حرکتی با استفاده از مدل فنر دمپر خطی در سرعت کم شافت منظور می‌گردد. موتورخانه و هاب در FAST به صورت اجسام صلب با جرم مجموع و عبارت اینرسی مناسب، مدل می‌شوند. کاربر می‌تواند درجات آزادی مشخص شده را به کار گرفته یا قفل کند.

اختلاف اصلی موجود بین نتایج حاصل از ADAMS و FAST از نحوه تشکیل معادلات چند جسمی در آنها ناشی می‌شود. بطوریکه در ADAMS از روش لاگرانژ و در FAST از روش کین استفاده می‌شود. در این راستا قیود ارتعاشات پیچشی و جابجایی پره‌ها و برج نیز بر روند تشکیل معادلات حرکت تاثیر می‌گذارد. البته الگوریتم‌های حلگر نیز در این اختلافات دخیل هستند ولی سهم به مراتب کمتری به خود اختصاص می‌دهند. همانطور که عنوان شد پیچش و جابجایی 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 جابجایی‌های 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 (کوپلینگ) بین جریان هوای ورودی و سازه توربین به وجود می‌آید. درباره بارهای اعمالی از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]

طرف آب به سکوی نگهدانده 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 جابجایی آن می‌شود، این جابجایی 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.

۸-نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل‌سازی دینامیکی و شبیه‌سازی آیروهیدرو-الاستیک توربین بادی از نوع کرجی‌وار با استفاده از نرم افزار تحلیل دینامیکی ADAMS انجام شد. نیروهای هیدرو-دینامیکی اعمالی روی سکوی نگهدارنده و نیروهای آیرودینامیکی اعمالی روی اجزاء پره‌های توربین با استفاده از زیربرنامه‌های HydroDyn و AeroDyn که با ADAMS کوپل می‌شود محاسبه گردیدند. داده‌های باد با سرعت میانگین ۱۸ متر برثانیه با استفاده از نرم افزار TurbSim استخراج و در مدل‌سازی بکار گرفته شدند. در ادامه برای اجرای شبیه‌سازی، کنترلر مرجع توبین بادی پایه خاکی روی آن اعمال و شبیه‌سازی انجام گرفت. با توجه به عدم وجود داده‌های تجربی نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی توربین بادی کرجی‌وار شناور در نرم افزار تحلیل دینامیکی ADAMS با نتایج بدست آمده از نرم افزار FAST مقایسه شد که نشان از سازگاری نتایج دارد. تفاوت‌های موجود بین جواب‌های حاصله از ADAMS و FAST را می‌توان ناشی از نحوه تشکیل معادلات حرکتی سازه‌ای چند جسمی در نرم افزار ADAMS و همچنین کمتر بودن فرضیات ساده کننده نسبت به نرم‌افزار FAST دانست. فرضیاتی همچون ارتعاشات پیچشی پره‌ها و برج که در نرم افزار FAST نادیده انگاشته شده‌اند و در نرم افزار ADAMS در نظر گرفته شده و در محاسبات منظور می‌گردند، بنابراین در نتایج تحلیل نیز تاثیر گذار بوده‌اند. بدین ترتیب جواب‌های استخراج شده از ADAMS قابلیت اعتماد بیشتری داشته و به حالت واقعی نزدیکتر خواهند بود. با توجه به اینکه برای طراحی واقعی توربین بادی در قدم اول نیاز به طراحی و تحلیل مفهومی و شبیه‌سازی پیش نمونه می‌باشد، لذا هرچه پاسخ‌های حاصله به واقعیت نزدیک باشد ارزشمندتر خواهد بود.

۹-تشکر و قدردانی

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

کلید واژگان

1- Tension Leg Platform
2- Spar Type
3- Barge Type
4- Mooring Lines
5- Water Plane
6- Wave Diffraction
7- Platform Radiation
8- Morison
9- Airy
10- G. I. Tailor
11- Response of Amplitude Operator
12- Shallow-Drafted Barge
13- Oscillating Water Column
14- Undisturbed
15- Froude-Kriloff
16- Power Spectral Density
17- Realization
18- White Gaussian Noise
19- Box-Muller
20- JONSWAP
21- Wave radiation retardation kernel
22- Compliance
23- National Renewable Energy Lab
24- Blade Element Momentum
25- Generalized Dynamic Wake
26- Skewed wake
27- Gain Scheduled Proportional-Integral
28- Rated
29- Dynamic-Link Library
30- Intel Visual Fortran
31- Differential Algebraic Equation
32- Joint Probability Distribution
33- International Electrotechnical Commission

۱۰-مراجع

1- Musial, W. and Butterfield, S., (2004), *Future for Offshore Wind Energy in the United States*, EnergyOcean Proceedings, Palm Beach Florida, USA, NREL/CP-500-36313, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

2- Cummins, W. E., (1962), *The Impulse Response Function and Ship Motions*, Schiffstechnik, Vol. 9, , pp. 101–109.

3- Ogilvie, T. F. (1964), *Recent Progress toward the Understanding and Prediction of Ship Motions*, Fifth Symposium on Naval Hydrodynamics, pp. 3–128.

4- Sclavounos, P. D., (2005) *13.022 Surface Waves and Their Interaction with Floating Bodies, Lecture Notes*, Massachusetts Institute of Technology (MIT) OpenCourseWare [online publication].

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]

5- Bulder, B. H., et al, (2002), *Study to Feasibility of and Bound-ary Conditions for Floating Offshore Wind Turbines*, Novem 2002-CMC-R43, ECN, MARIN, Lagerway the Windmaster, TNO, TUD, MSC.
6- Lee, K. H., (2005), *Responses of Floating Wind Turbines to Wind and Wave Excitation*, M.S. Dissertation, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
7- Wayman, E. N., Sclavounos, P. D., Butterfield, S., Jonkman, J., and Musial, W., (2006), *Coupled Dynamic Modeling of Floating Wind Turbine Systems*, 2006 Offshore Technology Conference, 1–4 May 2006, Houston, TX [CD-ROM], Richardson, TX: Offshore Technology Conference, OTC 18287, NREL/CP-500-39481, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
8- Wayman, E., (2006), *Coupled Dynamics and Economic Analysis of Floating Wind Turbine Systems*, M.S. 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.S. Dissertation, Department of Naval Architecture and Mechanical Engineering, Universities of Glasgow and Strathclyde, Glasgow, Scotland.
10- Jonkman JM., (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 Off-shore 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., and Widden, M. B.,(2005), *A Time-Domain Model of a Floating Body Using Transforms*, 6th European Wave and Tidal Conference, 30 August – 2 September 2005, Glasgow, Scotland.
16- Swarztrauber, P. N., (2007), FFTPACK, *NCAR's Mathema-tical and Statistical Libraries* [online database], Boulder, CO: The National Center for Atmospheric Research (NCAR).
17- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and 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. and 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 Aero-dynamics*. 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, 8(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, doi:10.1016/j.mechatronics.2010

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1393.10.19.3.6]