مطالعه عددی اثرات صفحه هیو بر پاسخ های هیدرودینامیکی توربینهای بادی فراساحلی شناور

محمد جواد اصلاحی [۱], سعید کاظمی [۲*], مجتبی عظام [۳], مجید قدسی حسن آباد [۴]

[۱]دانشجوی دکتری تخصصی ، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، mj.eslahi@srbiau.ac.ir
[۲]استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران،saeid kazemi@srbiau.ac.ir
[۳] استادیار، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران،ezam@srbiau.ac.ir
[۴] استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران، m.ghodsi@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۶
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

توربین بادی نیمه شناور
تحلیل هیدرو دینامیکی غیر خطی
بهینه سازی پلت فرم شناور
بهینه سازی صفحه هیو

چکیده

در مطالعات ابتدایی بر روی توربین‌های بادی شناور، چالش‌های زیادی وجود دارد. بررسی دقیق این سازه‌ها، نیازمند تحقیقات جامع در آیرودینامیک توربین‌های بادی، هیدرودینامیک سکوهای شناور و دینامیک خطوط مهار می‌باشد. صفحه هیو بهینه‌شده برای پشتیبانی از توربین بادی شناور با ظرفیت ۵ مگاوات در آب‌های عمیق نزدیک بندر جاسک مدلسازی شده است. برای آنالیز پاسخ‌های دینامیکی ترکیبی سیستم توربین بادی شناور به بارهای موج، جریان، جزر و مد و باد از شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ‌های دینامیکی ترکیب شده با الزامات عملیاتی در شرایط عادی و سخت سازگار هستند و صفحه هیو بهینه شده با ابعاد کوچکتر عملکرد مناسبی در تعامل غیرخطی سازه و موج دارد.

Numerical Study on Heave Plate Effects on Hydrodynamic Responses of Floating Offshore Wind Turbines

Mohammad Javad Eslahi[1], Saeid Kazemi[2]*, Mojtaba Ezam[3], Majid Ghodsi Hasanabad[4]

[1] Ph.D. student, Department of Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; mj.eslahi@srbiau.ac.ir
[2]Assistant Professor, Department of Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; Saeid kazemi@srbiau.ac.ir
[3]Assistant Professor, Department of Natural and Environmental Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; ezam@srbiau.ac.ir
[4] Assistant Professor, Faculty of Technical and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran; m.ghodsi@srbiau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received:15 Oct 2023
Accepted: 15 Feb 2024
Available online: 17 Feb 2024

Keywords:
Renewable energies
Semi-submersible wind turbine
Nonlinear hydrodynamic analysis
Optimization of the floating platform
Heave plate optimization

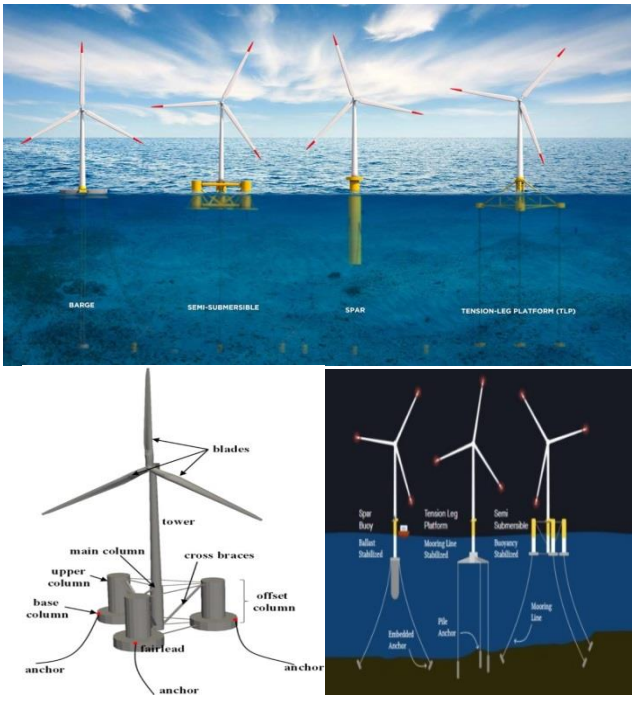
ABSTRACT

A study was conducted on the initial stages of floating wind turbines, which face significant challenges. The research focused on the comprehensive investigation of the aerodynamics of wind turbines, hydrodynamics of floating platforms, and dynamics of mooring lines. The study also examined the interaction between these components and their effects on each other. The research introduced a new design for the heave plate, optimizing its dimensions for supporting a five MW wind turbine in deep offshore waters near Jask Port in the Oman Sea. Through numerical simulations, the study evaluated the dynamic responses of the coupled floating wind turbine system to wave loads, currents, tides, and winds. The findings demonstrated that the optimized heave plate effectively met operational requirements under normal and severe conditions. Additionally, the study highlighted the superior performance of the optimized heave plate in the structural-wave interaction, providing satisfactory results.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

۱-مقدمه

استفاده بی رویه از سوخت های فسیلی بحران انرژی و معضل آلودگی محیط زیست را در جهان تشدید کرده است. این روند استفاده از یک سو و آلودگی های ناشی از سوخت های فسیلی از سوی دیگر، بشریت را با مشکل مواجه کرده است. بنابراین، یافتن یک منبع انرژی پاک و تجدیدپذیر برای جایگزینی انرژی فسیلی برای بشر بسیار ضروری است. انرژی باد به عنوان یکی از موثرترین و غیر آلاینده ترین منابع انرژی های تجدیدپذیر، پتانسیل بالایی برای جایگزینی دارد و توجه جهانیان را به خود جلب کرده است. از این رو، توربین‌های بادی می‌توانند گزینه ای مناسب باشند. توربین بادی ساحلی به دلیل آلودگی بصری و صوتی در مقایسه با توربین بادی دور از ساحل می تواند بهره برداران را دچار مشکل کند. از سوی دیگر عمق آب با فاصله گرفتن از ساحل بیشتر می شود، این در حالی است که هزینه توربین‌های بادی تثبیت شده در کف دریا به طور چشمگیری با افزایش عمق آب افزایش می‌یابد. بنابراین توربین های بادی شناور گزینه ای مناسب، برای مزارع بادی فراساحلی با عمق آب بیش از ۵۰ مترمی باشند. این سازه‌ها شامل سکوهای اسپار[۱] ، پایه کششی[۲] و نیمه شناور[۳] می‌باشند که برای تبدیل انرژی باد به الکتریسیته استفاده می‌شوند[3].



شکل ۱- انواع توربین بادی شناور دور از ساحل[1,2]

توربین بادی شناور نیمه غوطه‌ور شامل چندین بخش است از جمله، پره‌ها: این بخش‌ها قسمت‌های چرخان توربین هستند که انرژی باد را جذب می‌کنند. ناسل: درون آن گیربکس، ژنراتور و سایر اجزای ضروری توربین قرار دارد. هاب: هاب، پره‌ها را به شافت اصلی متصل کرده و چرخش آنها را تسهیل می‌کند. برج: برج، پشتیبانی و ارتفاع مورد نیاز توربین را فراهم می‌کند و امکان استفاده از سرعت باد بالا، در ارتفاع را فراهم می‌سازد. سیستم مهار: این سیستم شامل خطوط مهار یا کابل‌هایی است که توربین را به کف دریا متصل می‌کند و باعث پایداری آن می شود. صفحات هیو: این صفحات، در پایه ستون‌های سکو قرار دارند و به کاهش حرکت عمودی و جانبی (در جهت حرکت پره توربین) توربین بادی شناور می شود. حلقه اتصال مهار: این یک وسیله است که برای هدایت و کنترل خطوط مهار استفاده می‌شود. سکوی شناور: سکوی نیمه غوطه‌ور، برای توربین در محیط‌های دور از ساحل، بویانسی و پایداری را فراهم می‌کند. این اجزا با همکاری یکدیگر از قدرت باد بهره می‌برند و آن را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. توربین بادی شناور نیمه غوطه‌ور به عنوان یک راه حل موثر برای تولید انرژی بادی در دور از ساحل معرفی می‌شود. در این راستا اباذری و بهزاد یک مطالعه مروری بر روی کاربرد سکوهای شناور در آبهای عمیق انجام دادند. در چنین مکانهایی نیروهای اعمالی محیطی باد و موج دریا به سکوها باعث ناپایداری و ارتعاشات آنها در جهت های مختلف می شود . یکی از بهینه ترین راهها برای کاهش ارتعاشات، نصب یک ورق با نسبت ضخامت به قطر کم در پاشنه ستونهای سکو است. بواسطه وجود صفحه هیو[۴]، جرم افزوده [۵]و میرایی[۶]در معادلات دینامیکی حرکت سازه القا می شود. لذا تعیین ضرایب هیدرودینامیک ورقها در محاسبه دقیق پاسخ سازه اهمیت دارد[۵].

در مطالعه ای دیگر، باچینسکی و نال تحلیل دامنه فرکانس سازه در خصوص ارزیابی طیف وسیعی از طرح‌های مختلف توربین بادی شناور را بررسی کرده‌اند. طیف گسترده ای از طرح های توربین بادی شناور تک ستونی در چهار شرایط مختلف موج-باد با استفاده از ابزارهای سیمو[۷]، رفلکس[۸] و آیرودین[۹] در یک تحلیل، همراه با ارزیابی حرکت سکو و بارهای ساختاری (مثلا حرکت پره توربین) بر روی اجزای توربین و سیستم مهار، تجزیه و تحلیل می شوند. نتایج نشان می‌دهد که یک رابطه خطی بین عملکرد طوفان و هزینه‌ها وجود دارد و حرکات عمود بر باد و امواج ورودی ممکن است برای طرح‌های توربین بادی شناور با جابجایی کوچک مهم باشند[6].

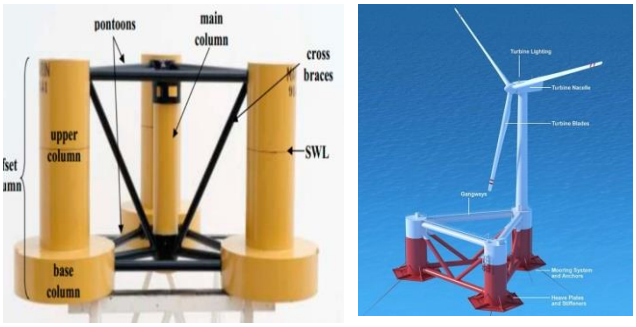
در پژوهشی دیگر جیلوتو و بی زونت، یک مطالعه عددی مربوط به طراحی سکوی شناور استوانه ای شکل انجام شد. هندسه در نظر گرفته شده برای توربین از یک سیلندر شناور و یک صفحه دمپر تشکیل شده است. در این تحقیق مشخص شد، با استفاده از صفحه متعادل کننده (بالاست سنگین) که در پایین سیلندر قرار می گیرد، می توان بالاست[۱۰] دائمی را در سیستم انجام داد. سپس نتایج حساسیت سیستم به پارامترهای مختلف از نظر پایداری هیدرواستاتیکی[۱۱] و دامنه حرکت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

نشان داد که (بالاست سنگین) پایداری هیدرواستاتیکی را افزایش داده و رزونانس[۱۲] و دامنه حرکت را به طور موثر کاهش می دهد [7].

این پدیده باعث می‌شود که بخش‌هایی از نیروی تحریک، فرکانس بزرگی به اندازه مقدار فرکانس طبیعی[۱۳] سکو داشته باشد و تشدید اتفاق بیفتد. اضافه کردن یک ورق در پایین ستون سکوها می تواند سیستم دینامیکی را از شرایط تشدید دور کند.



شکل ۲- ورقهای هیو در پاشنه ستونهای سکوی نیمه شناور[۴،۵]

این کار از طریق ایجاد میرایی در حالت تشدید و از سوی دیگر با کاهش فرکانس طبیعی سازه موجب افزایش پایداری سازه می شود. وقوع پدیده تشدید اغلب باعث آسیب به بخشهای مختلفی مانند رایزرها و سیستم مهار می شود[8] .

برای رفع این مشکل سه راه توسط فالتینسن و هاسلوم[9]پیشنهاد شد.

- دور کردن پریود طبیعی سازه از پریود امواج
- کاهش بیشتر نیروی تحریک هیو خطی
- افزایش میرایی

در راستای راه حل اول، افزایش جرم هزینه بر است و کاهش سختی با کاهش سطح آبخور راه حل دیگری است که البته به دلایل سازه ای مناسب نیست. برای راه حل دوم، افزایش آبخور برای سازه های لاغر،تحریک ناشی از موج را کاهش می دهد ولی از جنبه های سازه ای و حمل و نقل ممکن است مشکلاتی ایجاد کند. در راستای راه حل سوم، اضافه کردن یک ورق با ضخامت کم در پاشنه ستونهای سازه سکو پیشنهاد شد که به علت لبه های تیز و ایجاد گردابه، میرایی سیستم و از طرف دیگر جرم موثر، افزایش می یابد که نهایتاً پریود طبیعی سیستم را افزایش می دهد. این مکانیزم پیشنهادی دامنه پاسخ ارتعاشی سازه را با افزایش میرایی هیدرودینامیک، در محدوده قابل قبولی نگه می دارد. از آنجایی که سازه های فراساحلی به آهستگی میرا می شوند تحریک سازه حتی با مقدار نیروی تحریک کوچک می تواند منجر به پاسخ بزرگ شود لذا میرایی هیدرودینامیکی یک پارامتر برای محدود کردن دامنه پاسخ است. در این تحقیق نخست به بررسی تحقیقات اولیه درباره توربین‌های بادی شناور و چالش‌های آنها اشاره شده است. مطالعه دقیق این سازه ها نیازمند تحقیقات جامع و کامل در مورد آیرودینامیک توربین های بادی، هیدرودینامیک سکوی شناور و دینامیک خطوط مهار است. دراین تحقیق صفحه هیو برای پشتیبانی از کلاس توربین بادی ۵ مگاواتی و تحت شرایط محیطی دور از ساحل بندر جاسک مدلسازی شده است. شبیه سازی پاسخ های دینامیکی سیستم توربین بادی شناور با بارهای موج، جریان، جزر و مد و باد با استفاده از شبیه ساز عددی برای تحلیل رفتارهای دینامیکی سیستم توربین بادی شناور در شرایط عملیاتی انجام شد ودر بخش بعد به بررسی تأثیرات این نیروها بر پاسخ‌های شش درجه آزادی حرکتی سکو پرداخته شد و در آخر به ارائه نتایج پاسخ‌های دینامیک حرکتی توربین بادی شناور در شرایط عملیاتی تحت تأثیر صفحه هیو بهینه شده پرداخته شده است.

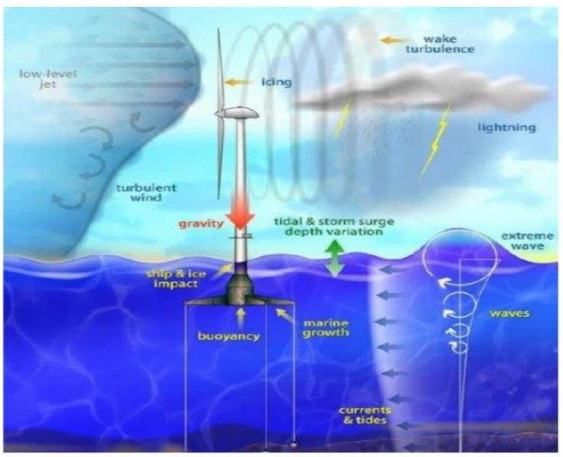
۲-معادلات حاکم

در این بخش، نیروهای آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی[۱۴] برای تجزیه و تحلیل ویژگی ها و روابط آنها به نیروهای مختلف تقسیم می شوند. هر نیرو می‌تواند منبع نیروهای غیرخطی باشد، بنابراین تحلیل آن هم به صورت مستقل و هم با در نظر گرفتن تاثیرات آن بر کل سیستم، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. هنگام تجزیه و تحلیل سیستم های غیر خطی، مدل های حوزه زمان[۱۵] مورد نیاز است. معادله (۱) تمام نیروهای وارد بر یک سیستم را بدون مشخص کردن نحوه اتصال آنها نشان می دهد.

۲-۱-معادله حرکت توربین بادی شناور

به طور کلی معادله حرکت یک جسم شناورصلب، یک معادله شش درجه آزادی در جهات سرج[۱۶]، اسوی[۱۷]، هیو ، یاو[۱۸]، رول[۱۹] و پیچ[۲۰] است که در حوزه زمان به صورت زیر بیان میشود.

$$M\ddot{X}(t)=F[t]=[F_{wind}+F_{Aerodynamic}+F_g+F_{Morrison}+F_{diffraction}+F_{Radiation}+F_{viscosity}+F_{mooring}+F_{drag}+F_{buoyancy}+F_{drift}+F_{tide}+F_{Stiffness}+F_{Damping}] \quad (۱)$$



شکل ۳- نیروهای محیطی

[M] ماتریس شش درجه آزادی جرمی، شناور است که شامل جرم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

و ممان اینرسی جرمی حول محورهای مختصات است. نیروی کل وارد به شناور یک ماتریس ۶ سطر و ۱ ستونی است که شامل بخشهای نیرویی موریسون[۲۱]، تفرق[۲۲]، تشعشعی[۲۳] و سختی[۲۴] است. $F_{Stiffness}$نیروی ناشی از سختی و فنریت است که ماتریس سختی $[c]$ را بوجود می آورد و بواسطه سختی نیروی مهار و سختی نیروی شناوری ناشی از سطح آبخور ایجاد می شود. $F_{Radiation}$ نیرویی است که بر اثر باز تاب برخورد موج به سازه غوطه ور در آب و یا ببه دلیل حرکت درجا، جسم غوطه ور در سیال بوجود می آید و شامل بخش هم فاز با سرعت ($Bd\ \{\dot{x}\}$) و هم فاز با شتاب($Ma\{\ddot{x}\}$) است. این نیروها با علامت منفی در سمت راست معادله ظاهر می شوند. بعد از مرتب سازی، این ترمها با علامت مثبت در سمت چپ معادله قرار می گیرند و به همین دلیل در بسیاری از مراجع به آنها نیروهای ذاتی سیستم هم گفته می شود. این نیروها در کل مانعی برای جابجایی و حرکت سازه هستند. $F_{diffraction}$، نیروهای تفرق ناشی از موج متفرق شده موج برخوردی به جسم است و زمانی تاثیر آن روی جسم قابل ملاحظه است که ابعاد جسم در مقابل طول موج قابل ملاحظه باشد. $F_{Morrison}$ نیروی اعمالی ناشی از فشار موج برخوردی به جسم است. با توجه به مطالب بیان شده معادله حرکت به شکل زیر باز نویسی شد.

$$[M+Ma]\{\ddot{x}\}+[B]\{\dot{x}\}+[C]\{x\}=F[t] \qquad (۲)$$

در حقیقت نصب صفحه هیو در زیر ستون سکوها اثرش را در ماتریس جرم افزوده $[Ma]$ و میرایی $[Bd]$ می گذارد. نکته بسیار مهم این است که از آن جایی که صفحه هیو به صورت افقی نصب می شود، بیشترین تاثیر میرایی و جرم افزوده القا شده ناشی از این صفحه به معادله کلی حرکت سکو در جهت قائم یا هیو است. اما علاوه بر این، صفحه افقی باعث ایجاد میرایی، ممان اینرسی[25] و جرم افزوده در جهت زاویه ای مانند پیچ هم می شود. برای تحلیل دقیق ضرایب هیدرودینامیکی باید ارتعاشات کوپل هیو و پیچ برای یک صفحه در نظر گرفته شود[10].

۲-۲- نیروهای آیرودینامیکی بر روی توربین

بارهای آیرودینامیکی بر روی قطعاتی مانند (برج، ستون و سکوی شناور) با در نظر گرفتن درگ با معادله موریسون محاسبه می‌شوند[۱۱]. نیروی آیرودینامیک وارد بر تیغه ها با استفاده از الگوریتم روش عنصر تیغه[۲۶] که به اختصار BEM نامیده می شود محاسبه شد [۱۵].

$$F_{aero}=\frac{1}{2}\rho V_P^2 C_D A \qquad (۳)$$

۲-۲-۱-تئوری تکانه عنصر تیغه (BEM)

BEM برای محاسبه نیروی آیرودینامیکی وارد بر تیغه استفاده می شود. در آن، هر تیغه به تعدادی المان تقسیم می شود و نیروی اعمال شده توسط باد بر هرالمان محاسبه می شود. نظریه BEM از مفهوم سرعت القایی برای محاسبه بارهای آیرودینامیکی روی عناصر تیغه استفاده می کند. تخمین سرعت القایی در تعیین بارهای آیرودینامیکی روی عنصر تیغه کلیدی است. BEM پایدار را می توان برای محاسبه بارها در شرایط ثابت استفاده کرد و به عنوان شرط اولیه برای BEM ناپایدار در نظر گرفت. BEM ثابت بارهای آیرودینامیکی روی روتور را با فرض شرایط شبه استاتیکی محاسبه می کند، بنابراین استفاده از آن در شرایطی است که، سرعت باد ورودی روی یک عنصر تیغه ثابت است. تغییرات در شبیه سازی و محاسبه بارهای آیرودینامیکی روی روتور در یک گام زمانی بر اساس ویژگی های سیستم در آن مرحله زمانی و بارها در مرحله زمانی قبلی می باشد. BEM ناپایدار از بارهای محاسبه شده توسط BEM ثابت برای اولین مرحله شبیه سازی استفاده می کند. الگوریتم پایه BEM یک فرض اولیه در مورد مقدار سرعت القایی ایجاد می کند. با استفاده از تئوری عناصر تیغه، از این سرعت القایی برای محاسبه نیروهای بالابر و کشش روی یک عنصر تیغه استفاده می شود. سپس بارهای آیرودینامیکی برای محاسبه یک سرعت القایی جدید در نظر گرفته می شود. بعد از آن سرعت القایی جدید با فرض اولیه مقایسه می شود. اگر این دو در یک حالت مشخص مطابقت نداشته باشند، سرعت القایی جدید به عنوان ورودی برای تئوری عنصر تیغه استفاده می شود و این فرآیند تا زمانی که همگرایی حاصل شود تکرار می شود. دو فرض مهم تئوری BEM این است که المان تیغه مستقل از یکدیگر رفتار می کنند و بی نهایت تیغه در شبیه سازی موجود است. این با افزودن تصحیح پراندلت تصحیح می شود [۱۵]. این صفحه ، عمود بر محوری است که توسط دو گره تشکیل دهنده المان تیغه تشکیل شده است و در نصف فاصله بین این دو قرار دارد. این بدان معناست که آیرودینامیک پره به دلیل خاصیت ارتجاعی پره از جابجایی مربوط به المان پره پیروی می کند.

۲-۲-۲- BEM ناپایدار

الگوریتم روش عنصر تیغه ناپایدار تغییرات دینامیکی سرعت نسبی در عنصر تیغه را محاسبه می کند و می تواند توسط یک روتور چرخان با زوایای مخروطی یا در یک باد غیریکنواخت (مثلاً با برش) هنگام حرکت کنترل کننده به سمت بالا تولید شود. تیغه ها، شتاب دهنده، سرعت روتور، ارتعاش تیغه یا حرکت آشفته برج و تغییرات دینامیکی سرعت القایی با استفاده از مطالب گفته شده در [۱۶] محاسبه می شود. این مدل از فیلتر، بر روی سرعت القایی استفاده شده است که سرعت القایی را در یک گام زمانی محاسبه می کند. t=tn بر اساس شرایط باد، موقعیت سیستم بر حسب tn و سرعت القایی در مرحله زمانی قبلی t=tn−۱ است. این گزینه با توجه به در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

نظر گرفتن تمامی حالت های رفتاری سازه در مواجهه با باد مورد استفاده قرار گرفت. مراحل الگوریتم روش عنصر تیغه ناپایدار در زیر توضیح داده شده است.

۱-۲-۲-۲-محاسبه سرعت نسبی و زاویه ضربه

سرعت نسبی به عنوان مجموع سرعت باد، سرعت چرخش و سرعت القایی مرحله زمانی قبلی t=tn−۱ در نظر گرفته می‌شود که $W_{in-۱}$ ذکر شد. سپس زاویه برخورد در بخش ۲ الگوریتم روش عنصر تیغه پایدار[16] محاسبه شد.

۲-۲-۲-۲-محاسبه ضرایب استال دینامیکی

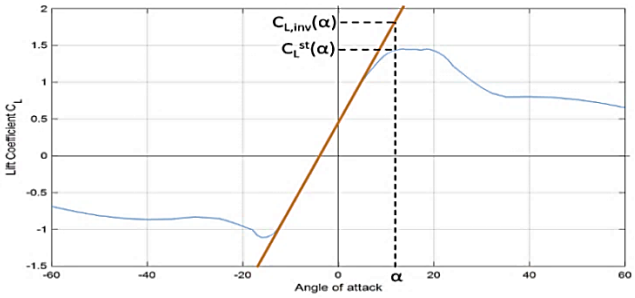
ابتدا عدد رینولدز محاسبه شده و ضرایب آیرودینامیکی از فایل ایرفویل[۲۷] مانند مرحله ۳ الگوریتم روش عنصر تیغه[21] پایدارجستجو می شود. سپس، ضریب لیفت C_L برای در نظر گرفتن اثرات استال پویا تنظیم می شود. در این تحقیق استال دینامیکی به دو دسته تقسیم شده است.

$$C_L(\alpha) = f C_{L,\text{inv}}(\alpha) + (۱ - f) C_{L,fs}(\alpha) \qquad (۴)$$

که در آن $C_{L,\text{inv}}$ ضریب بالابر برای جریان غیر لزج بدون جداسازی و $C_{L,fs}$ ضریب بالابر برای جریان کاملاً جدا شده است. برای حل این معادله ابتدا آن را در حالت ساکن از معادله زیر محاسبه می کنیم.

$$C_L^{st}(\alpha) = f^{st} C_{L,inv}^{st}(\alpha) + (۱ - f^{st}) C_{L,fs}^{st}(\alpha) \qquad (۵)$$

که در آن بالانویس 'st' به حل ثابت اشاره دارد. $C_L^{st}(\alpha)$ مطابق با مقدار جستجو شده در زاویه قطبی است. $C_{L,inv}^{st}(\alpha)$ همانطور که در زیر نشان داده شده است، با برونیابی ناحیه خطی منحنی بالابر به دست می آید. ابتدا عدد رینولدز محاسبه می شود و ضرایب آیرودینامیکی از فایل ایرفویل مانند مرحله ۳ الگوریتم BEM پایدار جستجو می شود. سپس، ضریب لیفت CL برای در نظر گرفتن اثرات استال پویا تنظیم می شود. در این تحقیق، استال پویا از طریق یک تابع جداسازی به نام f مدل‌سازی می‌شود.



شکل ۴- محاسبه ضرایب استال دینامیکی [۱۵]

لازم به ذکر است که حد بالای نظری برای f^{st} برابر با یک است. اگر مقدار بالاتری به دست آید، $f^{st}=1$ گرفته می شود. هنگامی که f^{st} محاسبه شد، f با این فرض محاسبه می شود که به مقدار استاتیک زیر برمی گردد.

$$\frac{df}{dt} = \frac{f^{st} - f}{\tau} \qquad (6)$$

$$f(t) = f^{st}(t) + f(t - \Delta t) - f^{st}(t) \exp\frac{-t\Delta}{\tau} \qquad (7)$$

جایی که Δt گام زمانی شبیه سازی است و $f(t - \Delta t)$ مربوط به تابع گسسته سازی در مرحله زمانی قبلی است. τ ثابت زمانی است که به صورت زیر تعریف شده است.

$$\tau = \frac{4c}{|W|} \qquad (8)$$

که در آن c طول وتر و W سرعت نسبی است. هنگامی که f تعیین شد، مرحله بعدی برای حل معادله محاسبه نیاز به $C_{L,fs}(\alpha)$ و $f^{st} C_{L,inv}(\alpha)$ است. با تنظیم مجدد معادله، می توانیم $C_{L,fs}$ را به صورت زیر بیان کنیم.

$$C_{L,fs}(\alpha) = \frac{C_L^{st}(\alpha) - f^{st} C_{L,inv}(\alpha)}{۱ - f^{st}} \qquad (9)$$

f^{st} =1 ، سپس $C_{L,fs}$به صورت C_L محاسبه می شود، C_L, $f_s(\alpha)=C^{st}_L(\alpha)/2$ زمانی که $C_{L,inv}(\alpha)$ و $C_{L,fs}(\alpha)$ در رابطه قبلی محاسبه و برای تعیین ضریب وارد فرمول می شوند.

۳-۲-۲-۲-محاسبه سرعت القایی شبه استاتیک

هنگامی که ضرایب آیرودینامیکی محاسبه و تنظیم شدند، نیروهای لیفت[۲۸] و درگ مانند مرحله ۴ الگوریتم روش عنصر تیغه[21] حالت پایدار محاسبه می شوند و یک سرعت القایی شبه استاتیکی wq_{SN}, از این نیروها مانند مرحله ۵ محاسبه می شود. شامل تصحیح ناسل[۲۹] و هاب[۳۰] بر اساس ضریب پراندلت و تصحیح گلاورت[21] خواهد بود.

۴-۲-۲-۲-محاسبه سرعت القایی دینامیکی

بر اساس سرعت القایی شبه استاتیکی، یک سرعت القایی دینامیکی به دنبال معادلات ارائه شده در [۱۵] محاسبه می شود. برای این منظور دو ثابت زمانی تعریف شده است.

$$\tau_۱ = \frac{۱.۱}{۱ - ۱.۳a} \cdot \frac{R}{|V|} \qquad (10)$$

$$\tau_۲ = \left(۰.۳۹ - ۰.۲۶\left(\frac{r}{R}\right)^۲\right) \cdot \tau_۱ \qquad (11)$$

سپس سرعت القایی دینامیکی در زمان t = tn داده می شود.

$$W_{i,n} + \tau_۲ \frac{dW_{i,n}}{dt} = W_{int,n} \qquad (12)$$

که در آن $W_{\text{int},n}$یک مقدار میانی از W_{int} است و به سرعت القایی شبه استاتیکی محاسبه شده از طریق معادله زیر بستگی دارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

$$W_{\text{int},n} + \tau_1 \frac{dW_{\text{int},n}}{dt} = W_{qs,n} + k \cdot \tau_1 \frac{dW_{qs,n}}{dt} C_L \quad (13)$$
$$= f_s C_{L,inv}(\alpha) + (1 - f_s) C_{L,fs}(\alpha)$$

با $k = 0.6$ (طبق کتاب مارتین هانسن [15] ، مدل بر اساس روش گردابی کالیبره شده است و $k = 0.6$ مقداری است که بهترین تطابق را بین روش BEM و روش گردابی ارائه می دهد.)در عمل، این معادلات با فرض ثابت بودن سمت راست آنها و گرفتن مقادیر در گام زمانی $t=tn-1$ حل می شوند.

۵-۲-۲-۲-ضریب انحراف YAW

انحراف YAW بر روی سرعت القایی دینامیکی همانطور که در مرحله ۷ الگوریتم روش عنصر تیغه [21] حالت پایدار توضیح داده شده است، اعمال می شود.

۶-۲-۲-۲-محاسبه بارهای آیرودینامیکی

هنگامی که سرعت القایی مشخص شد، بارهای آیرودینامیکی مانند مرحله ۴ الگوریتم روش عنصر تیغه[21] حالت پایدار با فرض ضرایب آیرودینامیکی محاسبه شده در مرحله ۲ محاسبه می شوند.

۳-۲-۲-بارهای آیرودینامیکی روی عناصر غیر تیغه ای (مانند ناسل و توپی)

برای بارهای آیرودینامیکی روی تیغه ها، الگوریتم روش عنصر تیغه شرح داده شد. بارهای آیرودینامیکی روی اعضای بخش پشتیبانی (سکو، برج و غیره) که دارای ضریب درگ غیر صفر است از معادله موریسون [۱۱] محاسبه می شود.

$$F_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \rho V_P^2 C_D A \quad (14)$$

که در آن ρ چگالی هوا است، V_P المان باد ورودی عمود بر محور سیلندر است، C_D ضریب پسا، A سطح مقطع است، یعنی مساحت عنصری است که رو به باد قرار گرفته است، در صفحه ای عمود بر باد ورودی.

۳-۲-بارهای هیدرودینامیکی

یک سازه شناور ممکن است به باد، امواج و جریان ها با حرکت در سه مقیاس زمانی مختلف پاسخ دهد .

حرکات فرکانس موج (WF) .

حرکات فرکانس پایین (LF) .

حرکات با فرکانس بالا (HF) .

بیشترین بار موج بر روی سازه های دریایی در همان فرکانس امواج رخ می دهد و باعث حرکت سازه شناور در فرکانس موج (WF) می شود. برای جلوگیری از اثرات تشدید بزرگ، سازه های دریایی و سیستم های مهار آنها اغلب به گونه ای طراحی می شوند که فرکانس های تشدید به خوبی خارج از محدوده فرکانس موج قرار گیرد. بارهای ناشی از موج می توانند باعث پاسخ الاستیک با فرکانس بالا HF شود و به دلیل اثرات بار غیر خطی، برخی از پاسخ ها همیشه در فرکانس های طبیعی ظاهر شوند. گاهی نیروهای موج و باد باعث حرکات افقی تشدید کننده با فرکانس پایین LF می شوند که به آن حرکات رانش آهسته نیز می گویند. حرکات WF و HF عمدتا توسط اثرات سیال غیر لزج کنترل می شوند، اما به دلیل ویسکوزیته [۳۱] و اثرات غیرخطی، در حرکات LF اینگونه نیست. اثرات هیدرودینامیک مختلف برای هر نوع سازه شناور مهم است و باید در تحلیل و طراحی در نظر گرفته شود. در کل تحت اثر این حرکات، در یک سازه شناور شش درجه آزادی حرکتی به وجود می آید. حرکات، سرج، اسوی، هیو که به صورت رفت و برگشتی(یا خطی) می باشد و حالت‌های دورانی، رول، پیچ، یاو. از لحاظ احتمال وقوع یک حرکت، دوره های طبیعی برای یک سازه دریایی با سیستم مهار در سرج، سوی و یاو معمولا بیشتر از ۱۰۰ ثانیه و در هیو، رول و پیچ ، در شناورهای نیمه غوطه ور معمولاً بالای ۲۰ ثانیه است[۱۸] .

بارهای هیدرودینامیکی با استفاده از معادله کلاسیک موریسون محاسبه شد. که در آن ρ چگالی آب است، C_D ضریب پسا، C_M ضریب اینرسی، R^2 بعد بخش عنصر (قطر برای یک بخش استوانه‌ای، عرض یا طول برای یک بخش مستطیلی)، u سرعت ذرات آب است. a شتاب ذرات آب، x جابجایی عضو و z مختصات عمودی گره است.

$$F_{\text{hydro}}(z) = \rho C_D R |u - \dot{x}|(u - \dot{x}) + \pi \rho R^2 a + (C_M - 1)\pi \rho R^2 (a - \ddot{x}) \quad (15)$$

۱-۳-۲-نیروی هیدرودینامیکی روی اعضای ضخیم

معادله موریسون برای محاسبه بارهای هیدرودینامیکی روی سازه های توربین بادی این واقعیت را در نظر نمی گیرد که ساختار سکو امواج ورودی را منحرف می کند. این فرض در صورتی معتبر است که طول موج بسیار بیشتر از قطر المانی باشد که اغلب بر روی آن محاسبه می شود. جایی که طول موج λ کمتر از پنج برابر قطر باشد، باید اثرات تفرق را در نظر گرفت. باتوجه به مطالب گفته شده در [۱۲]، در این موارد از نظریه مک‌کامی فوکس استفاده می‌شود. رابطه مک‌کامی فوکس زمانی به معادله موریسون اضافه می شود که طول موج بیشتر از قطر عضو باشد. چنین نظریه ای را می توان با اصلاح ضریب اینرسی معادله موریسون پیاده سازی کرد.

$$C_M = \frac{4}{\pi (kr)^2 \sqrt{A_1(kr)}} \quad (16)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

که k عدد موج و r شعاع المان است. A_1 برابر است با جایی که J'_1 مشتق تابع بسل نوع اول مرتبه ۱ و Y'_1 مشتق تابع بسل نوع دوم مرتبه ۱ است.

۲-۴-میرایی

در طول شبیه سازی زمان، پاسخ های فرکانس بالا ممکن است رخ دهد که هیچ معنای فیزیکی ندارند. اینها را می توان با اعمال میرایی عددی برای معادلات حذف کرد. در روش هیلبرت- هیوز- تیلور (HHT) می توانیم میرایی عددی را اضافه کنیم. در واقع روش HHT اصلاحی بر روش نیومارک-بتا است. روش HHT از مطالب گفته شده در [۲۰] مشتق شده است. به طور پیش فرض، مقدار ۰،۰۲۵- پیشنهاد می شود. این مقدار به طور موثر اکثر فرکانس های بالا را حذف می کند در حالی که به طور قابل توجهی بر فرکانس های پایین تأثیر نمی گذارد این فرکانس ها معمولاً با استفاده از میرایی رایلی کم می شوند. لازم به ذکر است که مقدار ۰ هیچ میرایی عددی ایجاد نمی کند و با استفاده از روش نیومارک-بتا کاهش می یابد.

۲-۵-سیستم خطوط مهار

خطوط مهار قطعاتی مانند کابل ها، سیم ها و خطوط لنگر که تحت وزن خود آویزان می شوند و شکل یک طناب را می گیرند. با محاسبه شکل با فرض خطی با طول l، ارتفاع (بین نقاط انتهایی) h و فاصله عمودی d. از رابطه زیر برای محاسبه پارامتر ساگ[۳۲] استفاده شد.

$$\frac{۲}{x}\sinh\left(\frac{sd}{۲}\right)-\sqrt{L^۲-h^۲}=۰ \qquad (17)$$

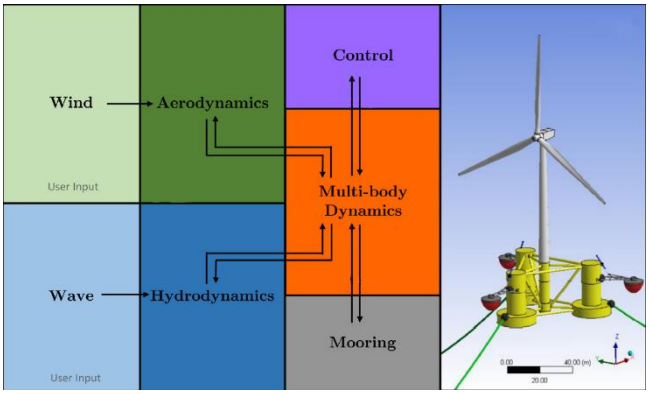
که در آن از روش حل عددی نیوتن می توان استفاده کرد.

$$x_{left}=\frac{۱}{۲}\left(\frac{\ln\frac{l+d}{l-d}}{s}-d\right) \qquad (18)$$

مقدار بدست آمده از فرمول بالا فاصله مناسب جهت مهار سازه شناور است.

۳- شبیه سازی

در این بخش داده های مربوط به نیرو های محیطی ارائه شد است. بعد از آن سحت سنجی مربوط به نرم افزار انجام شد. سپس مدلسازی مربوط به دو توربین پنج مگاواتی با در نظر گرفتن ابعاد ارائه شده در جدول ۲ انجام و جهت بهینه سازی در حرکات هیو و پیچ هشت صفحه هیو با در نظر گرفتن دو فاکتور اصلی یعنی قطر و ضخامت صفحه، طراحی و ارائه شده است. در این تحقیق از یک تحلیل عددی قدرتمند برای شبیه سازی یک توربین بادی شناور استفاده شده است. ASHES یک نرم افزار شبیه سازی توربین بادی است که در دانشگاه NTNU نروژ برای کارهای علمی و تحقیقاتی توسعه یافته است. ASHES قادر به شبیه سازی دامنه زمانی برای پاسخ های دینامیکی یک توربین بادی شناور (FOWT) در یک محیط باد و موج تصادفی است و با جفت کردن مدل های آیرودینامیکی، هیدرودینامیکی، کنترلی و ساختاری نتایج دقیق و قابل قبولی ارائه می دهد.



شکل ۵- الگوریتم شبیه سازی نرم افزار

۳-۱-شبیه سازی حوزه زمانی

شبیه سازی در حوزه زمان با حل معادله دینامیکی حرکت برای هر مرحله انجام می شود. در مرحله زمانی n معادله حرکت به صورت زیر تعریف می شود.

$$Md_n+Cd_n+f_n^{int}-f_n^{ext}=۰ \qquad (19)$$

M ماتریس جرم، C ماتریس میرایی، d بردار حاوی جابجایی در هر گره سیستم، f^{int} بردار حاوی نیروهای داخلی (یعنی نیروهای پمانند حرکت پره توربین) در هر گره از سیستم است و f^{ext} عبارت است از بردار حاوی نیروهای خارجی (یعنی نیروهای تحریک مانند نیروی موج) سیستم.

۳-۲- جمع آوری داده ها

داده های مربوط به باد، امواج، جزر و مد، عمق و جریان از وب سایت GEBCO، سازمان مطالعات جغرافیایی ایران، نرم افزار NCC tide جمع آوری و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. محل مورد مطالعه ۱۷ کیلومتر ی سواحل جاسک می باشد. داده های باد، موج، جزر و مد، عمق و جریان مورد استفاده در این تحقیق در جدول [1] ارائه شده است [22],[23].

جدول ۱- بار محیطی

نوع نیرو	میزان
باد	۱۰،۵ [متر بر ثانیه]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

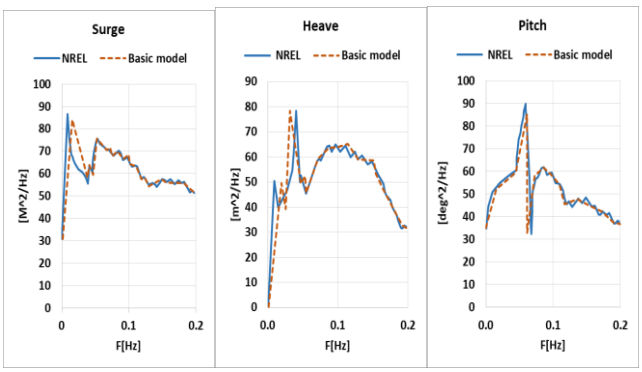
موج	۴ [متر]
جزر و مد	۳,۵ [متر]
جریان	۰,۷ [متر بر ثانیه]
عمق سنجی	۲۰۰ - [متر]

۳-۳- کالیبراسیون و اعتبار سنجی

داده های مربوط به شرایط محیطی در مدل تنظیم شد، سپس یک توربین بادی OC4 شناور ۵ مگاواتی با توجه به ابعاد ارائه شده در تحقیق[۱۹] و استاندارد NREL برای کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل (شش درجه آزادی حرکت) ایجاد شد و به عنوان مرجع استاندارد برای ارزیابی و اعتبار سنجی خروجی های نرم افزار مورد استفاده قرار گرفت. مدت زمان آنالیزها ۳۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. سپس نتایج آن با نتایج [۱۹] مقایسه شد. نتایج کالیبراسیون مقادیر مناسبی را برای اعتبارسنجی نرم افزار نشان می دهد. لازم به ذکر است که مقادیر جزئی تفاوت به دلیل نبود داده های مربوط به سیستم مهار است.

جدول ۲- پلت فرم ۵ مگاواتی NREL

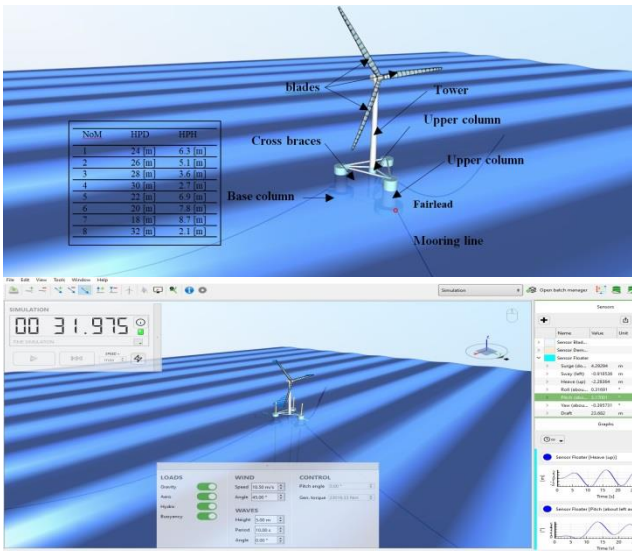
پلت فرم ۵ مگاواتی NREL DeepCwind	میزان [متر]
عمق پایه پلت فرم زیر SWL	۲۰
ارتفاع ستون اصلی بالاتر از SWL	۱۰
ارتفاع ستون افست بالاتر از SWL	۱۲
طول ستون بالایی	۲۶
طول صفحه هیو	۶
عمق به ستون پایه بالا در زیر SWL	۱۴
قطر ستون های اصلی	۶,۵
قطر ستون های افست	۱۲
قطر صفحه هیو	۲۴
قطر پانتون و مهاربندهای متقاطع	۱,۶
مکان CM پلت فرم زیر SWL	۱۳,۵
عمق آب	۲۰۰



شکل ۶- اعتبارسنجی مربوط به مدل اولیه

۳-۴-مدلسازی صفحه هیو

پس از کالیبراسیون مدل، یک مدل ۵ مگاواتی با توجه به مشخصات ابعادی استاندارد آزمایشگاه ملی انرژی های تجدیدپذیر (NREL) شماره ۶۰۶۰۱ -[۱۷]، به عنوان مدل شماره ۱ و حد رواداری حرکتی و استاندارد ابعادی برای مقایسه داده ها ایجاد شد. سپس ۸ مدل با توجه به مشخصات جدول شماره ۳ و شکل شماره ۷، طراحی شد. در ادامه یک مدل بدون صفحه هیو نیز به نام مدل شماره صفر جهت برآورد تاثیرات هیو پلیت بر حرکات سکو ایجاد شد. برای نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از موج از طیف موج jonswap[۳۳] در این تحقیق استفاده شد. برای محاسبه نیروهای باد بر اجزاء توربین و شبیه سازی دقیق حرکت پره توربین و نیروهای حاصل از این حرک از تونل باد ، با مش بندی با دقت بالا (۰,۰۲ متر) استفاده شد. مدل شماره ۱ جهت حد رواداری انتخاب و با مدلهای ۲ تا ۸ مقایسه شد. در نهایت تمامی داده ها در قالب نمودارهای RAO[34] ایجاد شد وحد اکثر مقدار هر نمودار و سطح زیرآن به عنوان معیار مقایسه داده ها در نظر گرفته شد.



شکل ۷- شبیه‌سازی مدل و صفحه‌های هیو

در جدول زیر مشخصات مربوط به مدلها و اختلاف ابعادی آورده شد. این بهینه سازی بر اساس کاهش ابعاد و وزن سازه و از سوی دیگر ابعادی که منجر به عملکرد مناسب حرکتی سکو باشد انجام شده که باعث بالا رفتن راندمان و اقتصادی شدن طراحی می شود.

جدول ۳- داده های صفحه هیو جدید

شماره مدل	قطر صفحه هیو [متر]	ارتفاع صفحه هیو [متر]	وزن هیو پلیت [کیلوگرم]	حجم هیو پلیت [متر مکعب]
1	24	6.3	10886.4	9.072
2	26	5.1	10554.0	7.956

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

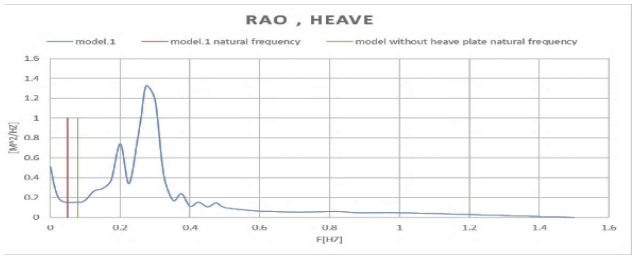
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

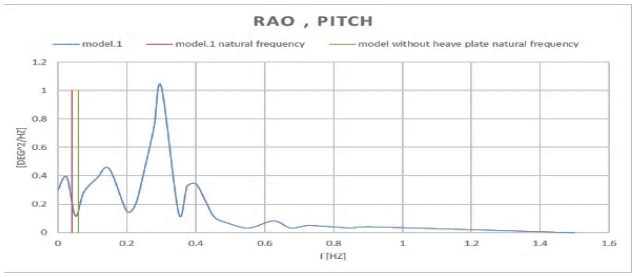
شماره مدل	قطر صفحه هیو [متر]	ارتفاع صفحه هیو [متر]	وزن هیو پلیت [کیلوگرم]	حجم هیو پلیت [متر مکعب]
3	28	3.6	9201.6	5.376
4	30	2.7	8109.6	4.356
5	22	6.9	8832.0	10.692
6	20	7.8	8736.0	12.096
7	18	8.7	7905.6	13.176
8	32	2.1	8064.0	2.112

لازم به ذکر است نتایج مربوط به وزن و حجم هیو پلیت با توجه به ضخامت ۰/۰۶ متر، برای ورق محاسبه شده است.

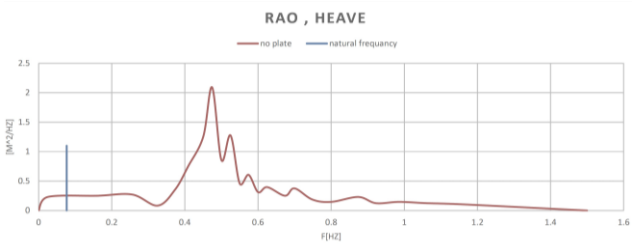
۴- نتایج

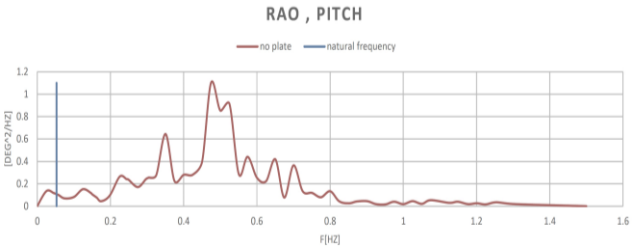
در توربین های بادی شناور و بسیاری از سکوهای دریایی شناور بیشترین تاثیر بر حرکت سکو در جهت قائم بر اثر میرایی و جرم افزوده القا شده ناشی از صفحه هیو می باشد. اما علاوه بر این، صفحه هیو باعث ایجاد میرایی ، ممان اینرسی و جرم افزوده در جهت زاویه ای مانند پیچ نیز می شود. برای تحلیل دقیق ضرایب هیدرودینامیکی باید ارتعاشات کوپل هیو و پیچ برای یک صفحه در نظر گرفته شود. اما به هر حال در تمامی مقالات چاپ شده تا کنون با ساده سازی ضرایب هیدرودینامیک انتقالی درجهت هیو و زاویه ای به صورت جداگانه بدون در نظر گرفتن اثرات کوپل حرکتی با تست مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو در این تحقیق با در نظر گرفتن موارد یاد شده به ارزیابی این مسئله می پردازیم. نخست به بررسی توربین مدل شماره صفر(مدل بدون صفحه هیو) و مدل پایه(شماره ۱) با در نظر گرفتن ابعاد و شرایط محیطی، مشابه پرداخته شد. هدف، بررسی تا ثیرات وجود صفحه هیو در حرکات سکو می باشد و اینکه این صفحات تا چه میزان می توانند بر حرکات هیو و پیچ سکوی توربین بادی نیمه غوطه ور تاثیر گذار باشد. شکل ۸ و ۹ ، مربوط به نتایج حرکات هیو و پیچ می باشد که خط عمود در آن مربوط به فرکانس طبیعی سازه در آن حرکت است. فرکانس طبیعی در هر دو مدل در جایگاه مناسبی قرار دارد.(لازم به ذکر است در مدل ۱ به دلیل وجود صفحه هیو در جایگاه مناسبی قرار دارد و در هر دو حرکت ۰،۰۲ هرتز کمتر است). در ادامه شدت نمودارهای RAO نشان می دهد که مدل شماره ۱ دارای عملکرد مناسب تر در قله های RAO می باشد. این مقادیر در مدل شماره ۱ در حرکات هیو و پیچ به ترتیب ۱،۳۸ و ۱،۱ را نشان می دهد اما در مدل شماره صفر این مقادیر برابر ۲،۱۵ و ۱،۱۸ می باشد.





شکل ۸- فرکانس طبیعی و طیف پاسخ مدل شماره یک





شکل ۹- فرکانس طبیعی و طیف پاسخ مدل صفر

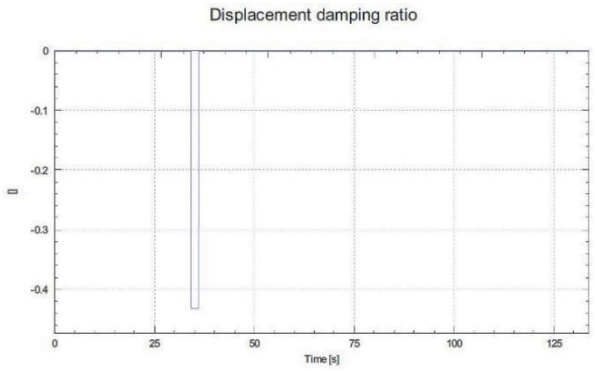
۴-۱-بررسی تاثیر صفحه هیو برمیرایی و جرم افزوده

هنگام تحلیل پاسخ سکوی شناور بایستی به این نکته توجه کرد که ضرایب هیدرودینامیک تابعی از دامنه ارتعاشات هستند. به عبارتی دیگر وابسته به مقدار پاسخ هستند. لذا با توجه به متغیر بودن دامنه ارتعاش یک سکو در طی زمان، حل تحلیلی معادله حرکت با در نظر گرفتن یک عدد ثابت برای میرایی و جرم افزوده نمی تواند منجر به پاسخ دقیق شود و نیاز به حل تکرار شونده دارد تا میرایی و جرم افزوده ورودی در معادله منجر به یک پاسخ متناظر با مقادیر واقعی میرایی و جرم افزوده داشته باشد. از این رو در این تحقیق از تحلیل حوزه زمان برای کسب نتایج با دقت بالا استفاده شد. مقادیر مربوط به میرایی مدلهای شماره ۱ و صفر در شکل شماره ۱۰ و۱۱ نمایش داده شد. همانطور که انتظار می رفت در مدل شماره صفر مقادیر ناچیزی را نشان می دهد(برابر ۰،۱)، و منجر به حرکات شدید نسبت به مدل شماره یک می شود. صفحه های هیو در جهت عمود بر سطح باعث جدایش جریان و ایجاد گردابه می شود. این گردابه ها هنگامی

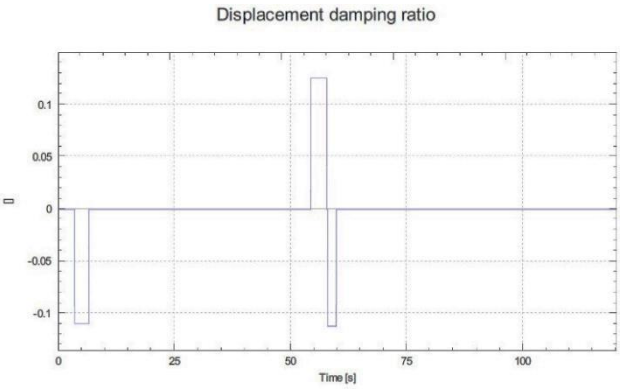
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

که از سطح ورق جدا می شوند در حقیقت مقداری انرژی ورودی را به صورت انرژی جنبشی دورانی انتقال یافته به سیال در فاصله دور انتقال می دهند که بدین ترتیب ارتعاشات سیستم میرا می شود. میرایی القا شده منجر به کاهش دامنه پاسخ حرکت ارتعاشی سازه و پایداری آن خواهد شد.

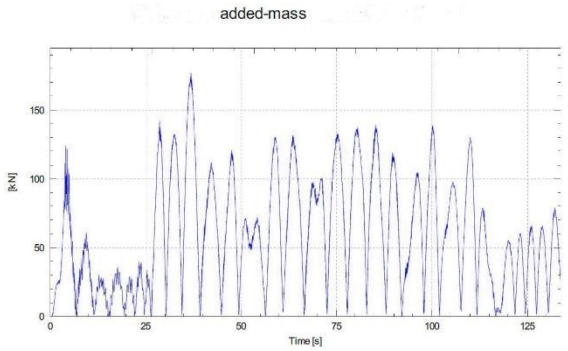


شکل ۱۰- میرایی مدل مدل شماره یک

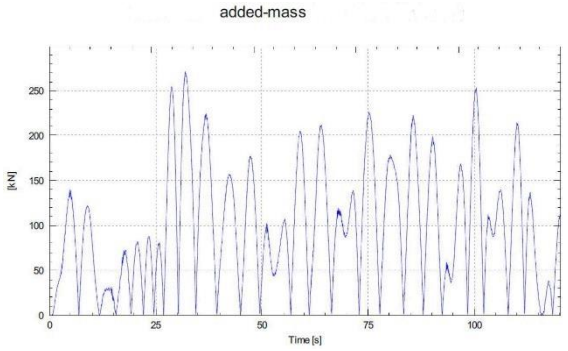


شکل ۱۱- میرایی مدل شماره صفر

در شکل ۱۳ و ۱۲ مقادیر مربوط به جرم افزوده نمایش داده شده است. درمدل شماره صفر(حالت بدون هیو پلیت) جرم افزوده ۱۷۰ کیلونیوتن را نشان می دهد و در مدل شماره یک این مقادیر ۲۷۰ کیلونیوتن را نشان می دهد. هنگام ارتعاشات صفحه در سیال مقداری آب همراه صفحه جابجا می شود. جابجا شدن جرمی از سیال همراه با سازه مرتعش، جرم معادل کل سازه را افزایش می دهد و باعث کاهش فرکانس طبیعی کل سازه می شود. کاهش فرکانس طبیعی سازه بواسطه جرم افزوده ناشی از صفحه هیو می تواند در حالتهایی باعث کاهش پاسخ ارتعاشاتی سازه شود به این دلیل که، فرکانس طبیعی نهایی فاصله بیشتری از فرکانس نیروهای تحریک پیدا خواهد کرد. بنابراین صفحه هیو با اعمال دو عامل میرایی و تغییر فرکانس طبیعی روی پاسخ سازه تاثیر گذار است.



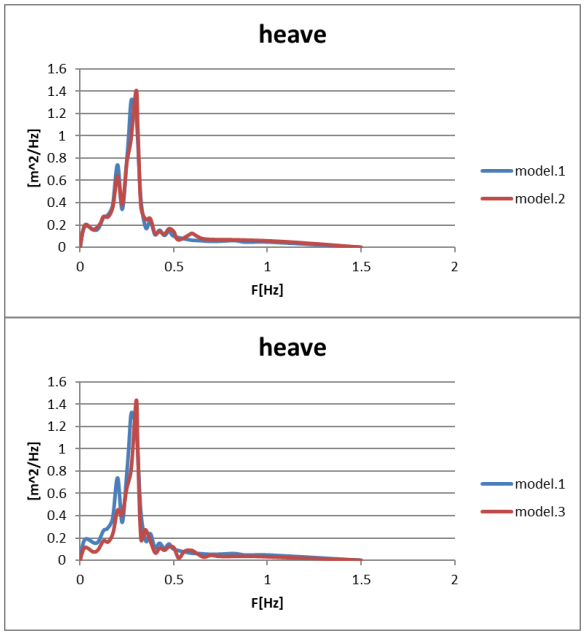
شکل ۱۲- جرم افزوده مدل شماره صفر



شکل ۱۳- جرم افزوده مدل شماره یک

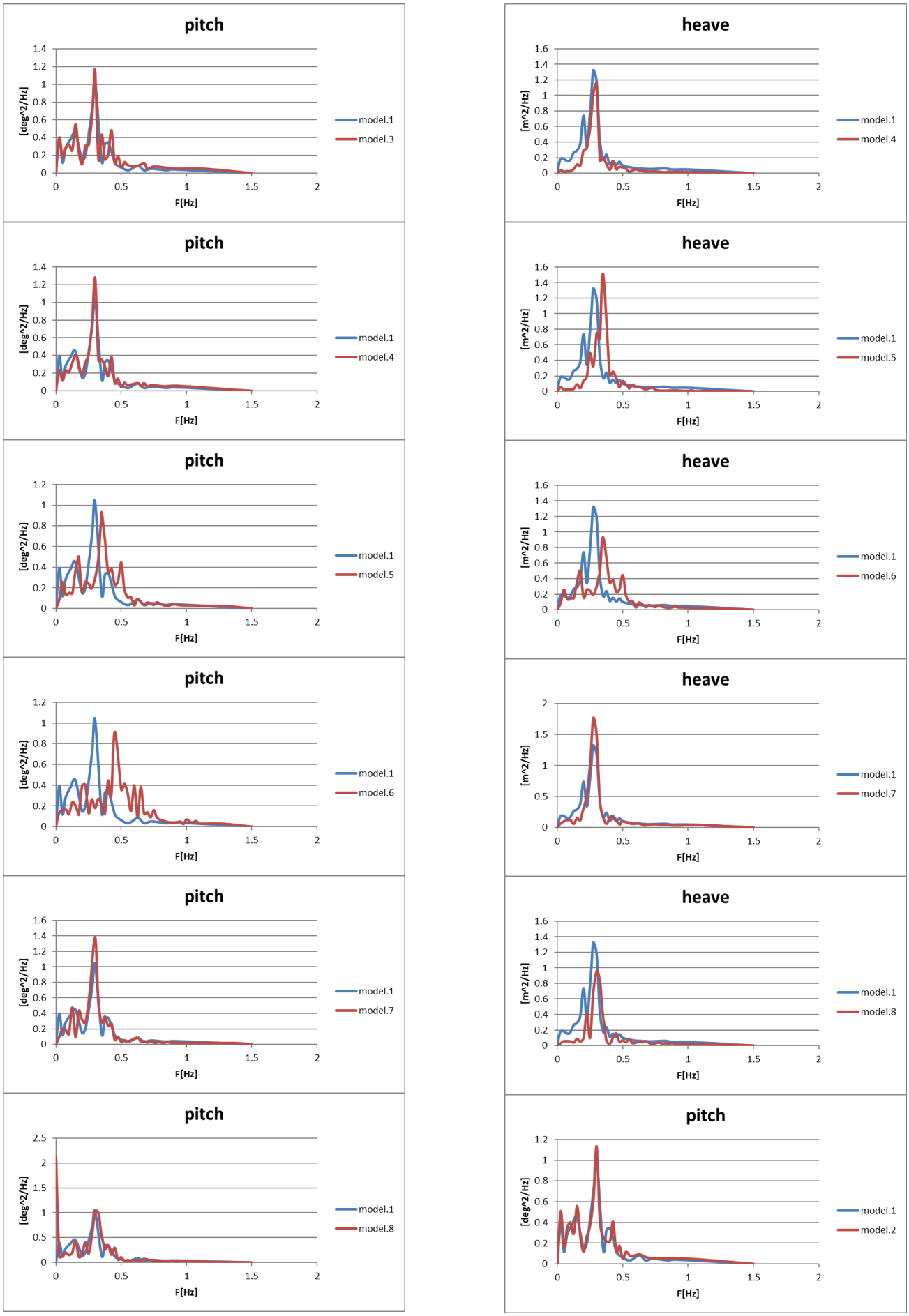
۲-۴-مقایسه نتایج طراحی

در شکل ۱۴ نتایج حرکات هیو و پیچ توربین های طراحی شده نشان داده شد. این نتایج به صورت طیف پاسخ ارائه شده است. مدل شماره یک، به عنوان مدل مبنا با دیگر مدل ها مورد قیاس قرار گرفت. نتایج نشان می دهد مدل شماره ۶ و مدل شماره ۸ نسبت به مدلهای دیگر عملکردی مناسب تر داشته اند و در ادامه به بررسی این دو مدل پرداخته می شود.



[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

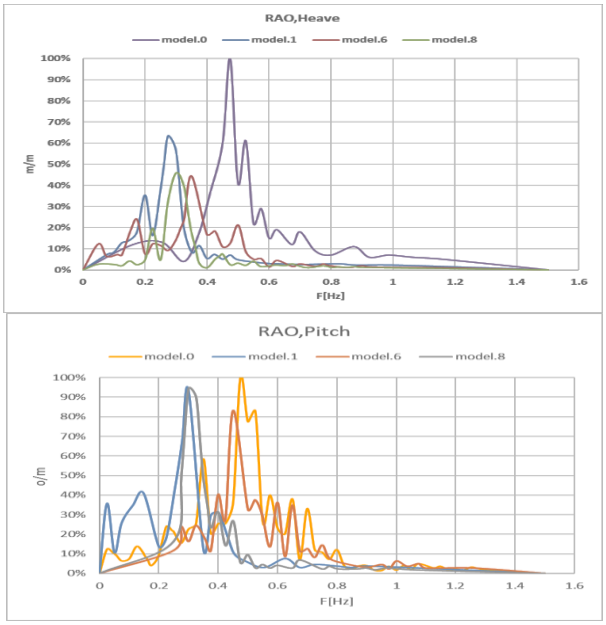


شکل ۱۴- طیف پاسخ هیو و پیچ سکو با طراحی جدید هیو پلیت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

شکل۱۵ نتایج مدلهای ۸،۶،۱ و مدل شماره ۰ را به صورت درصدی از بیشترین مقدار که مربوط به مدل شماره ۰ می باشد، را نشان می دهد. در قسمت حرکت پیچ ، مدل شماره ۶ نسبت به مدل شماره ۰ حدود ۱۷٪ عملکرد بهتر را نشان می دهد. در حرکت هیو مدل شماره ۶ نسبت به مدل شماره صفر ۵۵،۵٪ عملکرد مناسب تر را نشان می دهد. با توجه به نتایج به دست آمده تاثیرات صفحه هیو بر عملکرد سکو در حرکت هیو و پیچ کاملا مشهود است .



شکل ۱۵- طیف پاسخ هیو و پیچ مدل ۸،۶،۱،۰به صورت درصدی

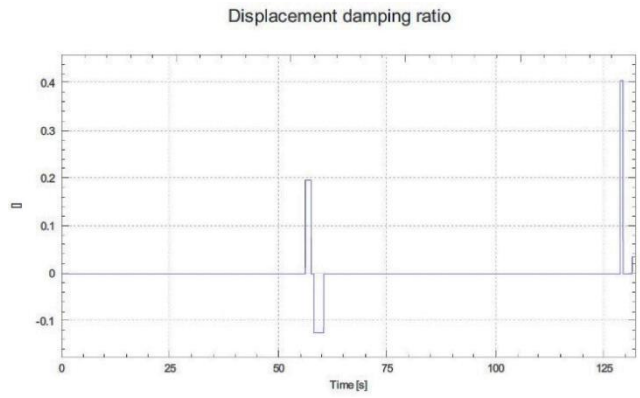
مدل شماره ۶ در قیاس با مدل پایه نیز (استاندارد NREL) دارای عملکردی مناسب است. این مقدار در حرکت هیو برابر ۱۸،۹ درصد و در حرکت پیچ برابر ۱۰،۴ درصد می باشد. مدل شماره ۶ نسبت به مدل شماره ۸ ، در حرکت هیو ۱،۳ درصد و در حرکت پیچ ۱۱،۲ درصد بهبود عملکرد را نشان می دهد. با این تفاوت که مدل شماره شش دارای ضخامت هیو پلیت بالا نسبت به قطر و در مدل شماره هشت، نسبت ضخامت به قطر کم می باشد. نتایج جدول ۴ برای حرکت هیو مدل ۸ برابر ۵۴،۲ درصد و برای مدل شماره ۱ برابر ۳۶،۵۸ درصد را نشان می دهد. نتایج در حرکت هیو، حاکی از آن است که مدل شماره ۸ در حرکت هیو عملکرد مناسبی نسبت به مدل شماره ۱ دارد. در حرکت پیچ اما مدل ۱ با اختلافی بسیار کم نسبت به مدل ۸ عملکرد مناسبی را نشان می دهد.

جدول ۴- ارزیابی و مقایسه پاسخ حاصل از مدل های بهینه و مدل پایه

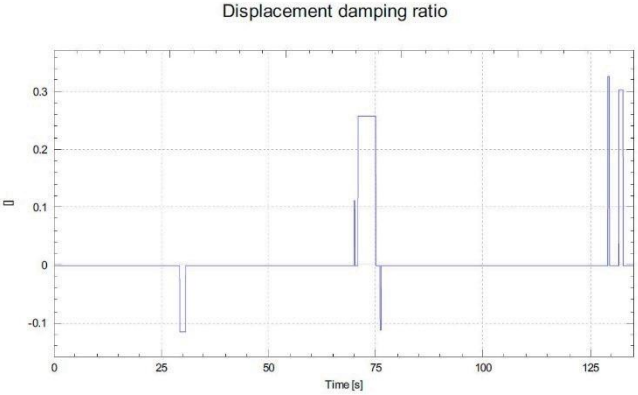
درصد بهبود عملکردی مدلها نسبت به حالت بدون هیو پلیت	مقادیر مربوط به دامنه طیف پاسخ	Heave motion
0%	۲/۰۹۱	مدل.۰(بدون هیو پلیت)
36.58%	1.327	مدل.۱(مدل پایه NREL)
55.47%	0.931	مدل.۶(مدل بهینه شده)
54.2%	0.958	مدل.۸(مدل بهینه شده)
درصد بهبود عملکردی مدلها نسبت به حالت بدون هیو پلیت	مقادیر مربوط به دامنه طیف پاسخ	Pitch motion
0%	1.100	مدل.۰(بدون هیو پلیت)
6.6%	1.027	مدل.۱(مدل پایه NREL)
17%	0.916	مدل.۶(مدل بهینه شده)
5.8%	1.037	مدل.۸(مدل بهینه شده)

۳-۴- نتایج مربوط به مدل های بهینه شده

مقادیر میرایی مربوط به مدل شماره شش و هشت در زیر آورده شده است. نتایج نشان می دهد مدل شماره شش مانند پاسخ های RAO مقادیر جزئی در حدود ۰،۱ واحد، بهبود عملکرد نسبت به مدل شماره هشت دارد.



شکل ۱۶- میرایی مدل شماره شش

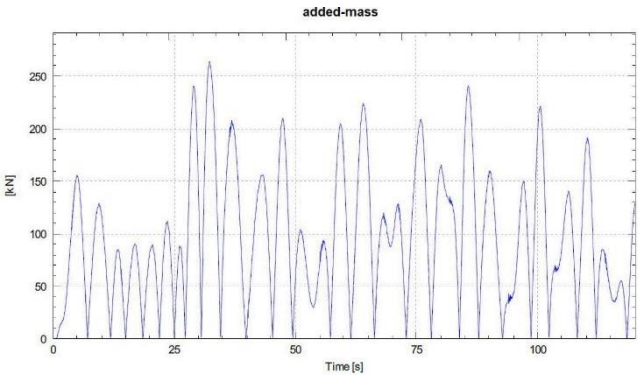


شکل ۱۷- میرایی مدل شماره هشت

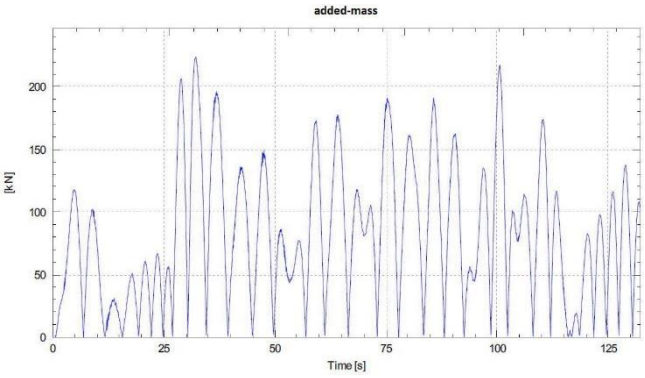
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

نتایج مربوط به جرم افزوده اما اینگونه نیست به نتایج در شکل ۱۸و۱۹ دقت کنید.

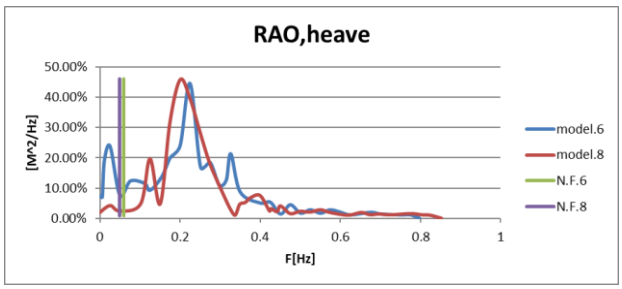


شکل ۱۸- جرم افزوده مربوط به مدل شماره هشت

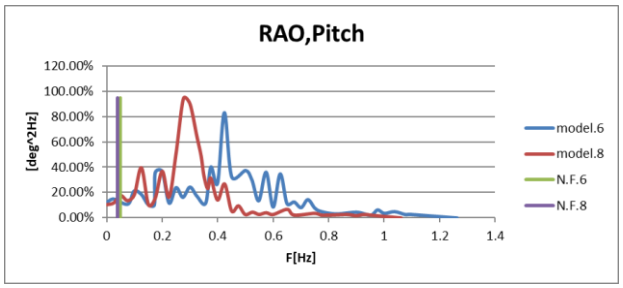


شکل ۱۹- جرم افزوده مربوط به مدل شماره شش

در مدل شماره شش جرم افزوده برابر ۲۴۵ کیلونیوتن و در مدل شماره هشت به دلیل بزرگ بودن قطر صفحه این مقادیر به ۲۶۰ کیلونیوتن می رسد. این با توجه به قله های دامنه پاسخ سازه و مقادیر میرایی نشان می دهد عامل دیگری باعث میرایی بیشتر در مدل شماره شش شده است. از این رو به تحلیل فاصله فرکانس طبیعی سازه و طیف پاسخ و اندازه مساحت زیر نمودار طیف پاسخ در حرکات هیو و پیچ می پردازیم. به دو گراف زیر توجه کنید.



شکل ۲۰- نمودار RAO مربوط به حرکت هیو مدلهای شماره۶و۸



شکل ۲۱- نمودار RAO مربوط به حرکت پیچ مدلهای شماره۶و۸

مقادیر فرکانس طبیعی برای مدلهای ۶و ۸ در حرکت هیو به ترتیب برابر با۰,۰۶ و ۰,۰۴۹ هرتز می باشد و در حرکت پیچ برای این دو مدل برابر ۰,۰۴۶ و ۰,۰۳۹ هرتز می باشد. با توجه به مقادیر ذکر شده فرکانسهای طبیعی بسیار نزدیک به هم هستند که در تصویر نیز مشخص است. در حالت هیو و پیچ مدل شماره هشت به نسبت مدل شماره شش به قله طیف دامنه پاسخ نزدیک تر می باشد و از طرفی اندازه سطح زیر منحنی قله پاسخ در هر دو حرکت هیو و پیچ در مدل هشت مقدار بزرگتری را نسبت به مدل شماره ۶ دارا می باشد و می تواند عملکرد ضعیف تر مدل شماره ۸ نسبت به مدل شماره ۶ را توجیه کند.

جدول ۵- مقادیر مربوط به مساحت زیر منحنی مدلهای بهینه شده

شماره مدل	معادله خط	مساحت زیر منحنی
6 heave	y = -3146.7x^3 + 3066.3x^2 - 981.12x + 103.57	۰,۰۶۸
8 heave	$y = -236188x^6 + 446319x^5 - 337597x^4 + 130565x^3 - 27205x^2 + 2899.6x - 123.74$	۰,۰۸۷
6 pitch	y = 24579x^4 - 44191x^3 + 29575x^2 - 8729.1x + 958.97	۰,۰۳
8 pitch	y = 213253x^5 - 296122x^4 + 160892x^3 - 42737x^2 + 5553.6x - 282.52	۰,۰۸۵

5- نتیجه گیری

در این تحقیق یک مدل ابعادی جدید از هیو پلیت ارائه شد که با توجه به حجم و وزن کم ، از لحاظ اقتصادی و عملکردی، بهینه تر از طراحی ارائه شده توسط استاندارد NREL [35] می باشد. در ادامه مشخص شد که بزرگی هیو پلیت(تا یک نسبت قطر به ضخامت مشخص می تواند تاثیر گزار باشد.) و به طبع آن جرم اضافه به تنهایی نمی تواند معیار کلی بر اثرات حرکتی سازه باشد و معیارهایی مانند کاهش وزن سازه و کم شدن نیروی گرانش و بالا بردن نیروی بویانسی (در یک حجم ثابت و با تغییر در شکل هندسی هیو پلیت و پایه) می تواند با بالا بردن نیروی مقاوم در سیستم باعث بهبود عملکرد سازه شود. همچنین تاثیرات طراحی صفحه هیو با اشکال هندسی متفاوت می تواند(مجوف) با افزایش میرایی باعث کاهش فرکانس طبیعی سازه شده و فرکانس طبیعی نهایی فاصله بیشتری از فرکانس نیروهای تحریک پیدا کند و روی پاسخ سازه تاثیر مثبت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

داشته باشد. برای تعیین میرایی ورقها روش جریان پتانسیل بواسطه فرض صفر بودن ویسکوزیته به هیچ وجه نمی تواند دقت خوبی داشته باشد و روشهای عددی غیر خطی سری زمانی می تواند با دقت مناسبی ضرایب هیدرودینامیک ورقها را تعیین کنند. به طور کلی حرکت هیو یا حرکت پیچ به صورت جداگانه برای یک صفحه هیو متصل به یک سکو اتفاق نمی افتد. به عبارتی دیگر ارتعاشات هیو همزمان با ارتعاشات دورانی پیچ و رول رخ می دهد لذا تاثیر توام ارتعاشات کوپل زاویه ای و انتقالی روی ضرایب هیدرودینامیک یکی از نکات بسیار مهمی است که بررسی شد. با این وجود همچنان خلا تحقیقاتی در بعضی بخشها وجود دارد که در ادامه موارد زیر برای تحقیقات آتی پیشنهاد می گردد.

۱- شبیه سازی عددی کوپل اجزامحدود و یا دینامیک سیالات محاسباتی از تشکیل، حرکت و تاثیرات نیروی گردابه ها در اطراف صفحات و بررسی فاصله صفحه های هیو از سطح آب بر تشکیل این گردابه ها پیشنهاد می گردد.

۲- بررسی تاثیرات طراحی یک صفحه هیو به صورت یک پارچه و به شکل مجوف ، در کف تانک های بالاست و مقایسه آن با صفحات دایره ای مرسوم برای کارهای تحقیقاتی آینده پیشنهاد می شود.

۶- کلید واژگان

1- Spar Platform
2- Tension Leg Platform
3- Semi-Submersible Platform
4- Heave Plate
5- Add-Mass
6- Damping
7- Simo
8- Reflex
9- Aerodynamics
10- Ballast
11- Hydrostatics
12- Resonance
13- Natural Frequency
14- Hydrodynamics
15- Time Domain
16- Surge
17- Sway
18- Yaw
19- Roll
20- Pitch
21- Morrison
22- Diffraction
23- Radiation
24- Stiffness
25- Inertia Momentum
26- Blade Element Method
27- Airfoil
28- Lift
29- Nacelle
30- Hub
31- Viscosity
32- Sag
33- JONSWAP Spectrum
34- Response Amplitude Operation
35- National Renewable Energy Laboratory

۷-مراجع

1- Froese, M. (2019). *New hybrid floating offshore wind platform*. Excipio Energy. Retrieved from https://www.excipioenergy.com/news/new-hybrid-floating-offshore-wind-platform

2- Fan, Y. (2019). *Numerical study of a proposed semi-submersible floating platform with different numbers of offset columns based on the DeepCwind prototype for improving the wave-resistance ability*. School of Civil Engineering and Mechanics, Wuhan, China. https://doi.org/10.3390/app9061255

3- Tracy, C. (2007). *Parametric design of floating wind turbines*. Massachusetts Institute of Technology. http://hdl.handle.net/1721.1/40877

4- Lopez-Pavon, C. & Souto-Iglesias, A. (2015). *Hydrodynamic coefficients and pressure loads on heave plates for semi-submersible floating offshore wind turbines*. A comparative analysis using large scale models. Renewable Energy. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.003

5- Abazari, A. & Behzad, M. (2020*). A review of the researches on the added mass and damping coefficients for the heave plates of the offshore platforms at translational and rotational oscillations*. Faculty member of Chabahar Maritime University. (In Persian) http://dx.doi.org/10.29252/marineeng.16.31.65

6- Bachynski. (2012). *Design considerations for tension leg platform wind turbines*. Marine Structures. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2012.09.001

7- Gilloteaux, J. (2014). *Parametric analysis of a cylinder-like shape floating platform dedicated to multi-megawatt wind turbine*. International Ocean and Polar Engineering, Busan, Korea. https://www.researchgate.net/publication/263099654_Parametric_Analysis_of_a_Cylinder-Like_Shape_Floating_Platform_Dedicated_to_Multi-Mega_Watt

8- Clauss, G.F. (1996). *Hydrodynamic shape optimization of large offshore structures*. Ocean

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]

Research. https://doi.org/10.1016/S0141-1187(96)00028-4

9- Haslum, H. & Faltinsen, O. (1999). *Alternative shape of spar platform for use in hostile areas*. In Offshore Technology Conference. https://doi.org/10.4043/10953-MS

10- Kumar, C.S. (1994). *Offshore Structure Modeling*. World Scientific.

11- Morison, J.R. (1950). *The Force Exerted by Surface Waves on Piles*. Journal of Petroleum Technology. https://doi.org/10.2118/950149-G

12- MacCamy, R.C. & Fuchs, R.A. (1954*). Wave Forces on Piles.* A Diffraction Theory. Washington DC. Corps of Engineers.

13- Jonkman, J.M. & Musial, W. (2010*). Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA Wind Task 23*. Offshore Wind Technology and Deployment. National Renewable Energy Lab.

14- International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). IEC-61400-3-1. *Design Requirements for Fixed Offshore Wind Turbines*.

15- Hansen, M.O.L. (2008). *Aerodynamics of Wind Turbines*. Earthscan.

16- Hansen. (2004). *A Beddoes-Leishman Type Dynamic Stall Model in State-Space and Indicial Formulations*. National Laboratory, Roskilde, Denmark.

17- Robertson, A. Jonkman, J.M., & Musial, M. (2001). *Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4*. National Renewable Energy Laboratory.

18- Journée, J.M.J. & Massie, W.W. (n.d.). *Offshore Hydromechanics*. Delft University of Technology.

19- Ferri, G. (2020*). Optimal Dimensions of a Semisubmersible Floating Platform for a 10 MW Wind Turbine*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Florence, Italy. https://doi.org/10.3390/en13123092

20- Crisfield, M. & Galvanetto, U. (1997). *Dynamics of 3-D Co-Rotational Beams*. Computational Mechanics. http://dx.doi.org/10.1007/s004660050271

21- Larsen, Sørensen. (2007). *Dynamic wake meandering modeling*. Wind Energy Department, Risø. http://130.226.56.153/rispubl/reports/ris-r-1607.pdf; Commercial reproduction prohibited; OSTI as DE20941220

22- National Cartographic Center of the Islamic Republic of Iran. (2023). *World Hydrography Day Commemoration* [Webpage]. Retrieved from https://en.ncc.gov.ir/NCC-NEWS/World-Hydrography-Day-Commemoration-

23- General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO). (n.d.). *GEBCO Bathymetric Compilation* [Website]. Retrieved from https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.119]