J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 45, 2025. (67-78)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Improvement of Hydrodynamic Response of a Semi-submersible Wind Turbine with Damping Sheets

Seyede Sajede Mousavi Sardari [1] , Arefeh Emami[2*]

[1] *Student of Marine and Coastal Engineering, University of Hormozgan, (sajede.mousavi@gmail.com)*
[2] *Assistant Professor at offshore Structures, University of Hormozgan, (emami@hormozgan.ac.ir)*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 01 Mar 2025
Last modification: 22 Apr 2025
Accepted: 23 Apr 2025
Available online: 23 Apr 2025

Article type:
Research paper

Keywords:
Semi-submersible Wind Turbine
Damping sheets
Hydrodynamic Response
Resonance Phenomena
Boundary Element Method

ABSTRACT

This study investigated the effect of damping plates on the hydrodynamic responses of a semi-submersible wind turbine. First, the original turbine model without damping plates was simulated under wave loading using the Boundary Element Method (BEM), and the results were validated against experimental data. Following this, eight different configurations of damping plates—varying in size, quantity, and installation position—were evaluated. The results revealed that the introduction of damping plates increased the natural period of heave motion while reducing its response amplitude in the vicinity of this period. While these plates also extended the natural period of pitch motion, they did not effectively reduce its response amplitude. Analysis of surge motion further confirmed that the damping plates were beneficial in alleviating this movement. The evaluation of structural behavior under 10-year and 100-year wave conditions demonstrated that damping plates significantly reduced heave and surge motions, although they did not yield positive effects on pitch motion. Nevertheless, in all scenarios, the natural period of the structure separated from the wave period, preventing resonance. Ultimately, damping plates with a diameter of 25 meters connected to the columns positioned 5 meters from the pontoons, as well as damping plates with a diameter of 30 meters attached to the pontoons, were identified as optimal solutions for enhancing the hydrodynamic performance of this turbine.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.61186/marineeng.21.45.67

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-16]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.67]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۵، ۱۴۰۴، (۷۸-۶۷)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

بهبود پاسخ هیدرودینامیکی توربین بادی نیمه مغروق اصلاح شده با ورق‌های میراگر

سیده ساجده موسوی سردری[۱] ، عارفه امامی[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد سواحل، بنادر و سازه های دریایی، دانشگاه هرمزگان، sajede.mousavi@gmail.com

[۲] استادیار سازه های دریایی، دانشگاه هرمزگان، emami@hormozgan.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

توربین بادی نیمه مغروق

ورق‌های میراگر

پاسخ هیدرودینامیکی

پدیده تشدید

روش المان مرزی

چکیده

در این مطالعه، تأثیر ورق‌های میراگر بر پاسخ‌های هیدرودینامیکی توربین بادی نیمه‌مغروق مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا، مدل اولیه توربین بدون ورق‌های میراگر تحت بار موج با استفاده از روش عددی المان مرزی (BEM) شبیه‌سازی و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی تأیید شد. سپس هشت پیکربندی مختلف از ورق‌های میراگر، شامل تغییرات در ابعاد، تعداد و موقعیت نصب، ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که استفاده از ورق‌های میراگر موجب افزایش پریود طبیعی حرکت هیو و کاهش دامنه پاسخ آن در اطراف این پریود می‌شود. هرچند این ورق‌ها پریود طبیعی حرکت پیچ را افزایش دادند، اما تأثیر مثبتی بر کاهش دامنه پاسخ پیچ نداشتند. بررسی حرکت سرج نیز تأیید کرد که ورق‌های میراگر تأثیر مثبتی در کاهش این حرکت دارند. تحلیل رفتار سازه تحت شرایط موج ده‌ساله و صدساله نشان داد که ورق‌های میراگر به‌طور مؤثری حرکات هیو و سرج را کاهش می‌دهند، درحالی‌که تأثیر مطلوبی بر حرکت پیچ ندارند. بااین‌حال، در تمامی حالات، پریود طبیعی سازه از پریود موج فاصله می‌گیرد که از بروز تشدید جلوگیری می‌کند. در نهایت، ورق‌های میراگر با قطر ۲۵ متر متصل به ستون‌ها در فاصله ۵ متری از پانتون‌ها، و همچنین ورق‌های میراگر با قطر ۳۰ متر متصل به پانتون‌ها به‌عنوان گزینه‌های بهینه برای بهبود عملکرد هیدرودینامیکی توربین پیشنهاد گردید.

DOI: http://dx.doi.org/10.61186/marineeng.21.45.67

ISSN: 2645-8136

حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-16]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.67]

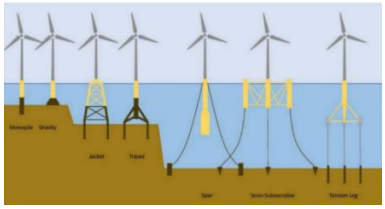
۱ – مقدمه

انرژی باد از دیرباز به‌عنوان یک منبع مناسب برای تأمین نیازهای انرژی شناخته شده است. در مناطق ساحلی و خشکی، این انرژی بخشی از نیازهای کشورهای مختلف را تأمین می‌کند. اما با اشغال‌شدن این مناطق، استفاده از انرژی باد فراساحل به‌عنوان یک رویکرد مؤثر در حال گسترش است. منابع باد در مزارع بادی فراساحل بیشتر و باکیفیت‌تر از خشکی هستند، و توسعه فناوری‌ها باعث شده تا کشورهای اروپایی این انرژی را به‌عنوان یکی از برنامه‌های توسعه ملی خود در نظر گیرند.

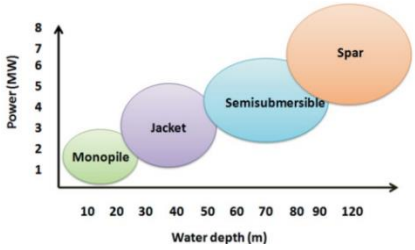
نیروگاه‌های بادی دریایی مزایای زیادی دارند از جمله مزایا عبارت‌اند از عدم آسیب‌زدن به چشم‌انداز طبیعی به دلیل فاصله از ساحل، عدم ایجاد مشکل برای ساکنان مناطق ساحلی از نظر فضا و طبیعت و امکان تولید برق بیشتر به دلیل اینکه باد در مناطق دریایی با سرعت بیشتری وزیده و موانع طبیعی مانند کوه‌ها وجود ندارد. این ویژگی‌ها سبب شده مهندسان به سمت استفاده از سازه‌های شناور برای برداشت انرژی باد از اعماق دریا گرایش پیدا کنند.

صنعت فراساحلی در بخش‌های نفت و گاز به بلوغ رسیده است، اما تقاضا برای مزارع بادی فراساحلی در زمینه‌هایی همچون فونداسیون، جابجایی و حمل‌ونقل در حال افزایش است. در بخش نفت و گاز، هزینه‌های سرمایه‌ای بالا توجیه‌پذیر است، اما در انرژی بادی، کاهش هزینه‌ها اهمیت بیشتری دارد. با افزایش ظرفیت توربین‌های بادی و انتقال آن‌ها به آب‌های عمیق‌تر، چالش‌های فنی و اقتصادی این صنعت نیز بیشتر شده است. ازاین‌رو، انتخاب سیستم سازه‌ای مناسب برای توربین‌های بادی اهمیت فراوانی دارد.

فونداسیون‌های توربین بادی به دو دسته ثابت و شناور تقسیم‌بندی می‌شود (شکل ۱). همان‌گونه که شکل ۱ مشاهده می‌شود بسته به نواحی فراساحلی با اعماق مختلف، فونداسیون‌های مختلف پیشنهاد شده است. همچنین از شکل ۲ مشاهده می‌شود که هر چه به سمت آب‌های عمیق‌تر می‌رود میزان تولید انرژی الکتریکی برگرفته‌شده از توربین بادی افزایش یافته است. به‌عنوان نمونه برای فونداسیون‌های نیمه مغروق که تا اعماق ۶۰ تا ۹۰ متر می‌توانند نصب شوند، توان تولیدی به میزان ۴ تا ۵ مگاوات خواهد بود.



شکل ۱ انواع فنداسیون توربین بادی فراساحل[۱]



شکل ۲. میزان حدودی توان تولید شده توسط توربین های بادی فراساحلی در اعماق مختلف[۲]

طراحی بهینه و مقرون‌به‌صرفه توربین‌های شناور، محققان را به تحلیل دقیق‌تر دینامیک و پاسخ‌های این سازه‌ها سوق داده است. در آب‌های عمیق‌تر، هندسه‌های شناور مانند نیمه‌مغروق‌ها و اسپارها برای توربین‌ها استفاده می‌شوند. در این میان فونداسیون توربین بادی نیمه‌مغروق که موضوع این مطالعه است نوعی فونداسیون شناور است که برای نصب توربین‌های بادی در آب‌های عمیق‌تر از ۵۰ متر طراحی شده و از ستون‌های عمودی زیر سطح آب تشکیل می‌شود. این فونداسیون‌ها در برابر امواج و جریان‌ها مقاوم بوده و در مناطقی با دسترسی محدود به فونداسیون‌های ثابت، گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه به شمار می‌آیند. طراحی آن‌ها شامل شناور اصلی و ستون‌های عمودی است که پایداری توربین را در شرایط سخت دریایی حفظ می‌کنند. فونداسیون‌ها ممکن است در اشکال مختلف مثلثی، مربعی یا مستطیلی برای بهبود پایداری طراحی شوند. این فونداسیون‌ها ترکیبی از شناوری و مقاومت در برابر نیروهای محیطی را ارائه می‌دهند و بر اساس ویژگی‌های هر پروژه خاص بهینه‌سازی می‌شوند.

یکی از مهم‌ترین مسائل مربوط به بررسی و شناخت رفتار فونداسیون نیمه مغروق، جهت و ماهیت حرکاتی است که می‌تواند داشته باشد. سازه نیمه مغروق به دلیل نیمه مغروق بودن آن دارای شش درجه آزادی حرکت انتقالی و غلتشی است این حرکات شامل حرکت سرج (حرکت در امتداد محور طولی) [۱]، سوای (حرکت در امتداد محور عرضی) [۲]، هیو (حرکت در امتداد محور قائم سکو) [۳]، رول (غلتش حول محور طولی) [۴]، پیچ (غلتش حول محور عرضی) [۵] و یاو (غلتش حول محور قائم) [۶] هستند[۳]. عمدتاً پاسخ‌های یک فونداسیون نیمه مغروق در درجات آزادی هیو، رول و پیچ وابستگی مستقیم به هندسه و ابعاد آن دارند؛ اما حرکات سرج، سوای و یاو عموماً توسط سیستم‌های مهاری کنترل می‌شوند[۴]. دراین‌بین؛ سه حرکت هیو، پیچ و رول (به‌خصوص حرکت هیو) از حرکات مهم و محدودکننده برای سازه نیمه مغروق هستند؛ زیرا این حرکات در

[1] Surging
[2] Swaying
[3] Heave
[4] Rolling
[5] Pitching
[6] Yawing

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-16]
[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.67]

شرایط طوفانی در عملیات بهره‌برداری این سازه می‌توانند اختلال ایجاد کرده و حتی منجر به خرابی سیستم‌های مهاری و اختلال در بهره‌وری انرژی باد گردند؛ بنابراین تلاش در جهت کاهش حرکات فونداسیون نیمه مغروق بادی، امری مهم و حائز اهمیت است.

برای این منظور مطالعاتی در سال های اخیر انجام و در حال کامل شدن است از جمله در مطالعه پاون و همکاران [۵]، نیروهای هیدرودینامیکی روی صفحات هیو برای توربین بادی نیمه شناور بررسی شده و نتایج آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی شامل ضرایب جرم اضافه و میرایی، فشارهای دینامیکی و مقایسه با مطالعات قبلی ارائه شد. مورنو و همکاران [۶] ضرایب هیدرودینامیکی صفحات هیو شش‌ضلعی را برای سکوهای نیمه شناور فراساحلی محاسبه و با داده‌های قبلی مقایسه کردند. الکان [۷] به بررسی سیستم سکوی شناور فراساحلی برای توربین بادی ۵ مگاواتی و تحلیل هیدرودینامیکی سیستم مهاری سکو پرداخت. جیانگ و همکاران [۸] عملکرد هیدرودینامیکی پلتفرم نیمه شناور با صفحه هیو شش‌ضلعی را مدل‌سازی عددی و با طراحی پیشین مقایسه کردند. کریشناونی و همکاران [۹] اثر نیروهای غلطشی بر توربین‌های بادی با اسپار و نیمه شناور را مقایسه و نشان دادند که سکوی اسپار مقرون‌به‌صرفه‌تر است. بزونارتی و همکاران [۱۰] اثر مقیاس صفحات هیو بر دامنه حرکت و پریود طبیعی را بررسی کردند. در مطالعه ژانگ و همکاران [۱۱] تحلیل هیدرودینامیکی سه سکوی نیمه شناور توربین بادی ۵ مگاواتی انجام شد و اثرات بارهای موج مرتبه دوم بر حرکات سکو و تنش سیستم مهاری بررسی گردید. راجسواری و همکاران [۱۲] پاسخ هیدرودینامیکی توربین‌های نیمه شناور سه و چهارستونی را مقایسه کردند. شکوهیان و همکاران[۱۳] تأثیر پارامترهای سیستم مهاری بر پاسخ هیدرودینامیکی سکوی نیمه شناور را مورد بررسی قرار دادند. ژوو و همکاران [۱۴] تأثیر ابعاد و پارامترهای سیستم مهاری را بر هزینه ساخت و خواص هیدرودینامیکی توربین نیمه شناور چهارستونی ارزیابی کردند. الکافس و همکاران [۱۵] سه پیکربندی سکوی نیمه شناور را برای بهبود مقاومت در برابر موج با استفاده از نرم‌افزار ANSYS AQWA تحلیل کردند. لی و همکاران [۱۶] اثر صفحات هیو دایروی متصل به پانتون‌ها روی پاسخ‌های دینامیکی توربین بادی نیمه شناور را با استفاده از OpenFast و شبیه‌سازی‌های حوزه زمان تحت پنج شرایط ترکیبی موج و باد بررسی کردند. نتایج نشان داد که صفحات هیو تک و دوبل تأثیرات متفاوتی بر حرکت‌های هیو و پیچ دارند، با کاهش ۴۰ درصدی در حرکات هیو برای سکوهای دارای صفحات هیو دوبل. صفحات هیو دوبل تنها در شرایط موج نامنظم تأثیر کمی بر گشتاور خمشی پایه برج داشتند. همچنین، میانگین حرکات پیچ برای صفحات هیو دوبل نسبت به صفحات هیو تک کاهش یافت. ونگ و همکاران[۱۷] صفحات هیو داخلی و خارجی را برای افزایش پایداری سکوی نیمه شناور ۱۰ مگاواتی بررسی کرده و تأثیر آنها را بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی سکو تحلیل کردند. نتایج نشان داد که تخلخل ۱۰ درصد با ۱۶ سوراخ بهترین طرح است که دامنه هیو را ۵.۷ درصد کاهش می‌دهد و کاهش زاویه صفحه بیرونی می‌تواند جرم اضافه‌شده را افزایش دهد. صفحات هیو داخلی و خارجی تأثیر مثبتی در کاهش دامنه هیو و پیچ در شرایط دریای شدید داشتند. جوهانسن [۱۸] استفاده از دیسک‌های نازک را برای کاهش حرکت پیچ سکوهای نیمه شناور با استفاده ازCFD ، روش‌های جریان پتانسیل و آزمایش‌ها بررسی کرد. نتایج نشان داد که استفاده از دیسک‌های نازک به‌طور مؤثر حرکت پیچ را کاهش می‌دهد و مقایسه آن با صفحات هیو نشان داد که دیسک‌ها باعث افزایش ۲۵٪ در جرم اضافه و ۷۸٪ در میرایی خطی می‌شوند.

هرچند مطالعاتی در خصوص استفاده از صفحات میراگر انجام شده است، اما تاکنون مطالعه جامعی که اثر این صفحات را در بخش‌های مختلف فونداسیون مورد بررسی قرار دهد، صورت نگرفته است. ازاین‌رو، مطالعه حاضر باهدف تکمیل تحقیقات آتی، به بررسی دقیق‌تر این مسئله به‌صورت عددی پرداخته و تلاش دارد تا ابعاد جدیدی از تأثیر صفحات میراگر را در طراحی و عملکرد فونداسیون‌ها آشکار سازد. برای این منظور، پس از مقدمهٔ حاضر، در بخش دوم به معرفی فونداسیون نیمه مغروق بکار گرفته شده و فرضیات حاکم بر مسئله پرداخته می‌شود. بخش سوم معادلات حاکم بر مسئله را بیان می‌کند. صحت‌سنجی نتایج عددی حاصل‌شده با داده‌های آزمایشگاهی موجود در بخش چهارم ارائه خواهد شد. در بخش پنجم، اضافه‌کردن ورق‌های میراگر در بخش‌های مختلف بدنه سکو بررسی می‌شود. تجزیه‌وتحلیل نتایج در بخش ششم انجام خواهد شد و در نهایت، جمع‌بندی و پیشنهادها برای تحقیقات آتی در بخش هفتم مطرح می‌گردد.

۲ – توربین بادی نیمه مغروق در این مطالعه

به‌منظور بهبود پاسخ هیدرودینامیکی تحت بار امواج با استفاده از ورق‌های میراگر، مدل اولیه کار Rajeswari and Nallayarasu [۱۲] که در سال ۲۰۲۰ در آزمایشگاه ساخته شد و حرکات هیو، پیچ و سرج آن استخراج گردید، استفاده شد. این مدل شامل چهار ستون مربعی در چهار طرف بدنه، یک ستون مرکزی و چهار پانتون شش‌ضلعی متصل به زیر ستون‌هاست. برای انسجام سازه‌ای، مهاربندهایی به ستون‌ها متصل شده‌اند (شکل ۳).

در مطالعه حاضر، مشخصات سازه‌ای و پارامترهای محیطی حاکم بر مسئله مطابق با جدول ۲ در نظر گرفته شده است. فرضیات حاکم بر مسئله عبارتند از:

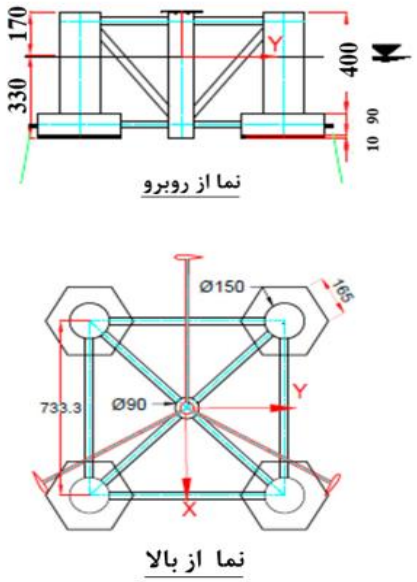
- اثر باد در نظر گرفته نشده و تمرکز بر تحلیل بدنه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-16]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.67]

فونداسیون زیر آب و تحت اثر موج است.

- آب به‌عنوان یک محیط همگن و تراکم‌ناپذیر مدل‌سازی شده است.
- فرض بر این است که بدنه با افزودن ورق‌های میراگر در حالت پایدار خود باقی می‌ماند.



شکل ۳. هندسه بدنه توربین بادی چهار ستونه همراه با پانتونها، سمت چپ نما از بالا را نشان می‌دهد و سمت راست نما از روبرو[۱۲]

جدول ۱. مشخصات فونداسیون توربین بادی مورد مطالعه[۱۲]

مشخصات	اندازه	واحد
آبخور مدل	۲۴/۷۵	m
قطر ستون	۱۱/۲۵	m
ارتفاع ستون	۳۰	m
طول ضلع پانتون شش‌ضلعی	۱۲/۳۷	m
ارتفاع پانتون شش‌ضلعی	۷/۵	m
قطر مهاربند	۲/۲۵	m
جابه‌جایی	$۲/۱\times۱۰^{۷}$	kg
مرکز ثقل	۱۶/۲	m
ارتفاع متاسنتریک	۶/۳۷۵	m
ممان اینرسی xx	$۲/۱۲\times۱۰^{۱۰}$	$kg.m^2$
ممان اینرسی yy	$۲/۱۲\times۱۰^{۱۰}$	$kg.m^2$
ممان اینرسی zz	$۲/۴۶\times۱۰^{۱۰}$	$kg.m^2$
تعداد سیستم مهاری	۴	-

جدول ۲. مشخصات محیطی دریا و ویژگیهای حرکتی فونداسیون مورد مطالعه[۱۲]

مشخصات	مدل اصلی	واحد
عمق آب	۱۸۷/۵	m
طیف موج	جانسواپ	
ارتفاع موج شاخص	۵	m
پریود پیک موج	۱۳/۱۷	Sec
پریود طبیعی هیو سازه	۱۹/۵	Sec
پریود طبیعی پیچ سازه	۳۳/۳	Sec
جرم اضافه هیو	$۱/۶۶۵\times۱۰^{۷}$	kg
جرم اضافه پیچ	$۲/۳\times۱۰^{۸}$	$kg.m^2/^o$
سختی هیدرودینامیکی هیو	۴۳۳۸۲۳۴/۵	$N.m$
سختی هیدرودینامیکی پیچ	۲۷۲۹۹۰۶۰	$N.m/^o$

۳- معادلات حاکم بر مسئله

در این مطالعه، مدل‌سازی با استفاده از روش المان مرزی در نرم‌افزار سسم انجام شده است که شامل حل معادلات پتانسیل و تئوری تفرق برای بخش‌های حجیم و معادلات موریسون برای بخش‌های لاغر است [۱۹]. مطالعه در حوزه فرکانس صورت گرفت. برای تحلیل طیفی سازه فوق، از عملگر دامنه پاسخ (RAO[7]) استفاده شده که نسبت دامنه پاسخ سازه به دامنه موج برخوردی را نشان می‌دهد و نقشی کلیدی در محاسبه طیف پاسخ دارد [۲۰, ۲۱]. این عملگر از حل معادله حرکت (معادله ۱) استخراج می شود.

$$-\omega^2[\mathbf{M}+\mathbf{A}(\omega)]\tilde{X}+[i\omega\mathbf{A}(\boldsymbol{\omega})+\mathbf{B}(\omega)]i\omega\tilde{X}+[\mathbf{C}+\mathbf{K}]\tilde{X}=\tilde{\mathbf{F}} \quad (۱)$$

که دراین‌رابطه **A** ماتریس جرم اضافی، **M** ماتریس جرم، **B** ماتریس میرایی، **C** و **K** ماتریس‌های سختی هستند[۲۲].

طیف موج، توزیع چگالی انرژی امواج در محدوده فرکانسی مشخص را نشان داده و در تحلیل‌های دینامیکی سازه‌های دریایی استفاده می‌شود. مدل رایج آن، طیف جانسواپ است که برای امواج ناشی از باد مناسب بوده و بر اساس پارامترهایی مانند ارتفاع موج، فرکانس پیک و پارامتر شکل تعریف می‌شود که در این مطالعه از آن استفاده شده است (معادله ۲).

$$S_\xi(\omega)=\hat{a}H_s^2\frac{\omega^{-5}}{\omega_p^{-4}}exp\left[-1.25\left(\omega/\omega_p\right)^{-4}\right]\gamma^{exp\left[-\frac{(\omega-\omega_p)^2}{2\tau^2\omega_p^2}\right]} \quad (۲)$$

که در این رابطه H_s ارتفاع موج مشخصه، ω_p فرکانس پیک موج، τ پارامتر شکل است که مقدار این پارامتر اگر $\omega\le\omega_p\Rightarrow\tau=\tau_a=0.07$ در غیر این صورت $\tau=\tau_b=0.09,$ است و مقدار $\hat{a}$ برابر با رابطه 3 است.

$$\hat{a}=\frac{0.0624}{0.230+0.0336\gamma-0.185(1.9+\gamma)^{-1}} \quad (۳)$$

γ پارامتر پیک طیف است که در مطالعه حاضر عدد ۳/۳ استفاده شده است.

طیف پاسخ سازه شناور از حاصل‌ضرب طیف موج مورد نظر در مربع عملگر دامنه پاسخ به دست می‌آید. این رابطه در معادله (۴)

[7] Response Amplitude Operator

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-16]
[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.67]

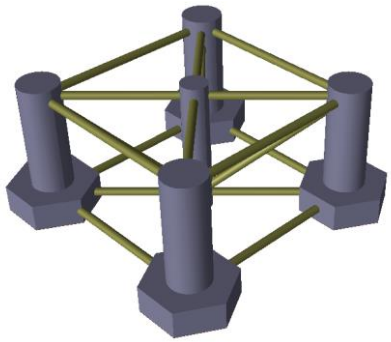
بیان شده است.

$$S_s(\omega) = RAO^2 \times S_\xi(\omega). \quad (۴)$$

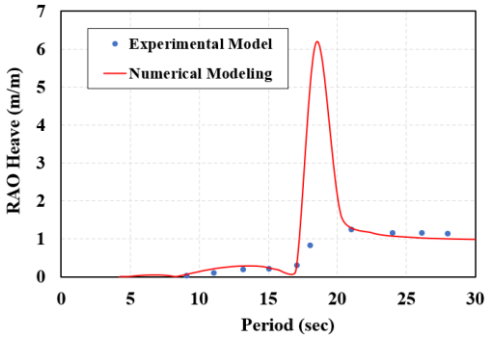
با داشتن طیف امواج و عملگر دامنه پاسخ سکو، طیف پاسخ سازه نیمه‌مغروق محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از انتگرال‌گیری از سطح زیر نمودار طیف پاسخ سکو، مقدار میانگین پاسخ نهایی سازه محاسبه خواهد شد [۴].

۴- مدلسازی و صحت سنجی

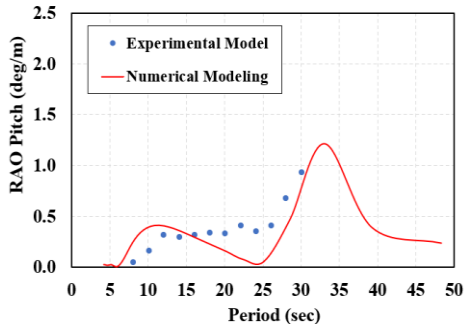
پیش از اعمال هرگونه راهکار برای بهبود عملکرد سازه، لازم است از صحت و دقت نرم‌افزار در محاسبه پاسخ‌های هیدرودینامیکی و همچنین از کارایی نرم‌افزار در برقراری تعادل اطمینان حاصل شود. به همین منظور، مدل‌سازی بدنه مطابق با ابعاد بیان شده در بخش قبل در نرم‌افزار سسم انجام شد (شکل ۴). مدلسازی فوق در ماژول هایدرودی فراخوانی شده و با اعمال پارامترهای مورد نظر (جدول ۱ و ۲) در بازه فرکانسی ۰/۱ تا ۱/۳ رادیان بر ثانیه تحلیل شد. سپس نتایج عملگر پاسخ هیو، پیچ و سرج استخراج‌شده و با داده‌های آزمایشگاهی ارائه‌شده در مرجع [۱۲] مقایسه گردید (اشکال ۵ تا ۷). همان‌طور که مشاهده می‌شود حرکت هیو با ضریب همبستگی ۹۵ درصد؛ حرکت سرج با ضریب همبستگی ۹۸ درصد و حرکت پیچ با ضریب همبستگی ۸۵ درصد تطابق قابل قبولی را ارائه داده اند. با اطمینان از صحت کار، در ادامه استفاده از ورق های میراگر به منظور بهبود پاسخ حرکات استفاده میگردد.



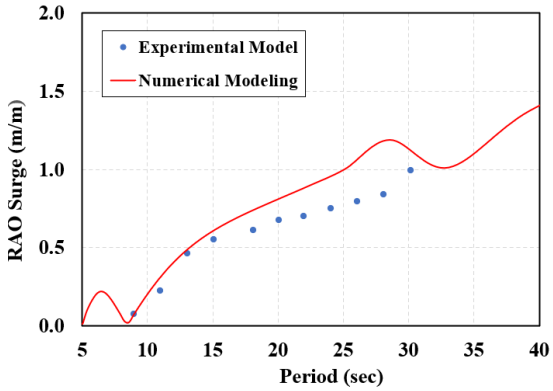
شکل ۴. فونداسیون مدل شده در نرم افزار سسم



شکل ۵. مقایسه عملگر دامنه پاسخ هیو مدل‌سازی شده در نرم‌افزار سسم با مدل آزمایشگاهی در دسترس



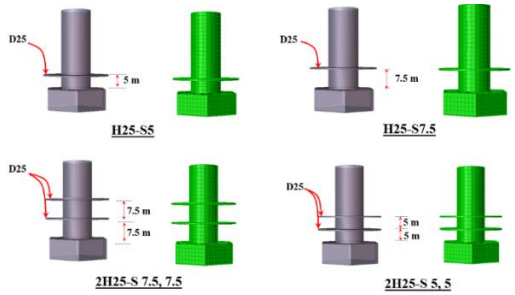
شکل ۶. مقایسه عملگر دامنه پاسخ پیچ مدل‌سازی شده در نرم‌افزار سسم با مدل آزمایشگاهی در دسترس



شکل ۷. مقایسه عملگر دامنه پاسخ سرج مدل‌سازی شده در نرم‌افزار سسم با مدل آزمایشگاهی در دسترس

۵- مدلسازی فونداسیون اصلاح شده با ورق میراگر

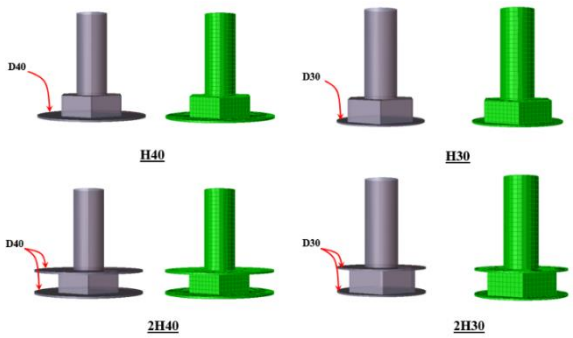
به‌منظور بررسی تأثیر ورق‌های میراگر در بهبود پاسخ حرکات سازه، ۸ حالت مختلف از ورق با ابعاد و فواصل مختلف مورد بررسی قرار گرفت. این ورق‌ها در دو بخش مختلف شامل پانتون‌ها و روی ستون‌ها تعبیه شده‌اند. هدف از این تحلیل، ارزیابی میزان اثربخشی ورق‌ها در کاهش حرکات دینامیکی و بهبود عملکرد سازه در شرایط مختلف است. جدول ۳ و اشکال ۸ و ۹ مشخصات هر یک از حالت‌های در نظر گرفته‌شده، شامل ابعاد، فاصله و وزن ورق‌ها را به تفصیل نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، وزن ورق‌ها در مقایسه با وزن کل سکو بسیار ناچیز است. این ویژگی باعث می‌شود که اضافه‌وزن ناشی از نصب ورق‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر توزیع وزن کلی سازه نداشته باشد و از این رو، کارایی دینامیکی سکو به‌صورت بهینه حفظ شود.



شکل ۸. ورق های متصل شده به ستون ها با فاصله های متفاوت و تعداد تک و دوبل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-16]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.67]



شکل ۹. ورق های متصل شده به پانتون به‌صورت تک و دوبل

جدول ۳. نامگذاری ورق های متصل شده به توربین همراه با وزن آنها

نام‌گذاری	توضیحات	یک وزن ورق (کیلوگرم)	وزن کل ورق‌ها (کیلوگرم)	وزن کل بدنه (کیلوگرم)
Original	۴ پایه بدون صفحات میراگر	-	-	۲/۱×۱۰^۷
H25-S7.5	یک ورق با قطر ۲۵ متصل به ستون در فاصله ۷/۵	۳/۰۷×۱۰^۵	۱/۲۳×۱۰^۶	۲/۲۲۳×۱۰^۷
H25-S5	یک ورق با قطر ۲۵ متصل به ستون در فاصله ۵	۳/۰۷×۱۰^۵	۱/۲۳×۱۰^۶	۲/۲۲۳×۱۰^۷
2H25-S5,5	دو ورق با قطر ۲۵ متصل به ستون در فاصله ۵	۳/۰۷×۱۰^۵	۲/۴۶×۱۰^۶	۲/۳۴۶×۱۰^۷
2H25-S7.5,7.5	دو ورق با قطر ۲۵ متصل به ستون در فاصله ۷/۵	۳/۰۷×۱۰^۵	۲/۴۶×۱۰^۶	۲/۳۴۶×۱۰^۷
H30	یک ورق با قطر ۳۰ متصل به کف پانتون	۱/۸۵×۱۰^۵	۷/۳۹×۱۰^۵	۲/۱۷۴×۱۰^۷
2H30	دو ورق با قطر ۳۰ متصل به پانتون	۱/۸۵×۱۰^۵	۱/۴۸×۱۰^۶	۲/۲۴۸×۱۰^۷
H40	یک ورق با قطر ۴۰ متصل به کف پانتون	۶/۱۶×۱۰^۵	۲/۴۶×۱۰^۶	۲/۳۴۶×۱۰^۷
2H40	دو ورق با قطر ۴۰ متصل به پانتون	۶/۱۶×۱۰^۵	۴/۹۲×۱۰^۶	۲/۵۹۲×۱۰^۷

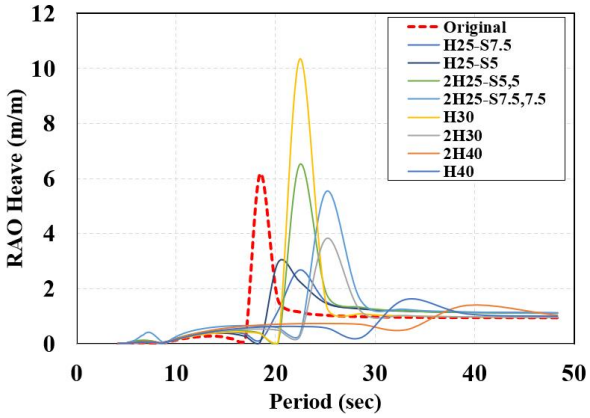
۶. تجزیه و تحلیل نتایج

نتایج عملگر دامنه پاسخ حرکات هیو، سرج و پیچ برای بدنه سازه همراه با ورق‌های میراگر محاسبه می‌شود. پس از آن پاسخ‌های هیدرودینامیکی سازه در حضور ورق‌های میراگر به‌تفصیل مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

۶-۱. عملگر دامنه پاسخ بدنه توربین بادی اصلاح شده

شکل ۱۰ عملگر دامنه پاسخ حرکات هیو بدنه توربین بادی همراه با ورق‌های میراگر را در هشت حالت مختلف، مطابق با مشخصات ارائه‌شده در جدول ۳، نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش اندازه ورق‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر تغییر پریود طبیعی سازه دارد. به‌طور مشخص، با افزایش قطر ورق‌ها، پریود طبیعی سازه افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در حالت بدون ورق، پریود طبیعی سازه برابر با ۱۸ ثانیه است. اما با افزودن حداقل یک ورق به قطر ۳۰ متر، این مقدار به ۲۵ ثانیه افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده رشد ۲۸ درصدی در پریود طبیعی سازه است. این افزایش پریود ناشی از تأثیر ورق‌های میراگر بر رفتار اینرسی با افزایش جرم اضافی سازه می‌باشد [۲۱].

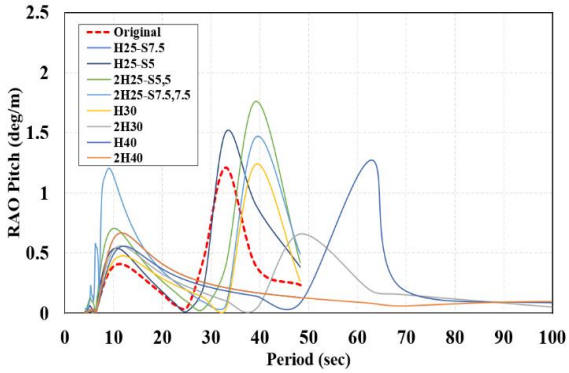
علاوه بر تغییر در پریود طبیعی، استفاده از ورق‌های میراگر به کاهش میزان پیک دامنه عملگر پاسخ در نزدیکی پریود طبیعی منجر می‌شود به‌ویژه در حالتی که دو ورق دوبل با قطر ۴۰ متر به دور پانتون‌ها متصل شده‌اند، تغییرات چشمگیری مشاهده می‌شود. در این حالت، علاوه بر افزایش قابل توجه در پریود طبیعی، مقدار پیک در پریود طبیعی نیز به طور محسوسی کاهش یافته است. این امر نشان‌دهنده میرایی تشعشعی بالای حرکات هیو و کاهش انرژی انتقالی از موج به سازه است [۲۱]. به عبارت دیگر، ورق‌های میراگر در این حالت عملکرد بهینه‌ای در کاهش پاسخ هیو نشان می‌دهند.



شکل ۱۰. عملگر دامنه پاسخ بدنه توربین بادی همراه با ورق های میراگر

شکل ۱۱ عملگر دامنه پاسخ پیچ بدنه توربین بادی همراه با ورق های میراگر در نظر گرفته شده نشان می‌دهد. در حالت کلی مشاهده می‌شود که در این حالت نیز ورق های میراگر باعث افزایش پریود طبیعی سازه و دور شدن بیشتر سازه از پریود موج شده است. به عنوان مثال، در حالت بدون وجود ورق، دوره طبیعی سازه ۳۳ ثانیه است، اما با افزودن ورق با قطر حداقل ۳۰ متر، دوره طبیعی سازه به ۴۰ ثانیه افزایش یافته است که نشان‌دهنده یک رشد ۲۸ درصدی است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-16]
[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.67]

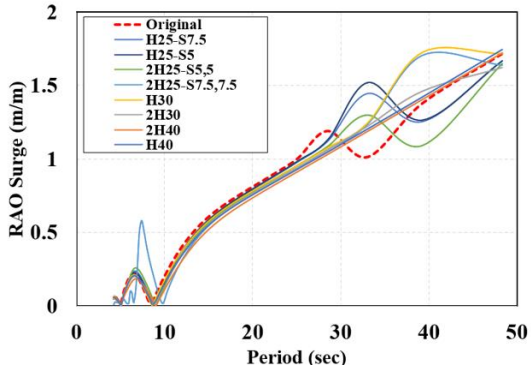


شکل ۱۱. عملگر دامنه پاسخ پیچ بدنه توربین بادی همراه با ورق های میراگر

همچنین مشاهدات نشان می‌دهد که زمانی که از یک ورق تک در ستون استفاده می‌شود، تفاوت قابل‌توجهی در دوره طبیعی سازه در فاصله‌های ۵ متر و ۷.۵ متر مشاهده نمی‌شود. با این حال، زمانی که ورق‌ها به حالت دوبل تبدیل می‌شوند، دوره طبیعی سازه به طور قابل توجهی از دوره تناوب موج دور می‌شود. از سوی دیگر، افزایش تعداد ورق‌ها روی ستون‌ها، مقدار پیک عملگر دامنه پاسخ را افزایش داده است. این افزایش ناشی از نیروهای اضافی است که به سازه وارد می‌شود و بر دامنه نوسانات آن تأثیر می‌گذارد.

علاوه بر این، زمانی که ورق‌ها به ستون اضافه می‌شود در پریودهای خیلی پایین‌تر از ۱۰ ثانیه به عبارتی در فرکانس های بالا، پیک سوم قابل شهود است که این پیک نشان دهنده افزایش سختی بیشتر سازه است و ممکن است در سیستم‌های مهاری اختلال ایجاد کند. هرچه فاصله ورق از تراز آب دریا کمتر باشد این خطر بیشتر است. این پیک در واقع پیک ناشی از حرکت سرج در فرکانس های بالاست. برای حذف پیک می توان از سیستم مهاری با سختی کم استفاده کرد تا فرکانس در محدوده فرکانسهای پایین رخ دهد و در نتیجه از فرکانس موج دور شود.

شکل ۱۲ عملگر دامنه پاسخ حرکت سرج را نشان می‌دهد. از شکل مشاهده می‌شود که دوره تناوب طبیعی حرکت سرج در دوره‌های کوتاه یا فرکانس‌های بالا اتفاق می‌افتد. علت این امر آن است که در این مدل، جهت شبیه‌سازی، فرض شده است که سیستم مهاری با سختی بالایی به سیستم متصل است ازاین‌رو، امکان جابه‌جایی‌های زیاد وجود ندارد.



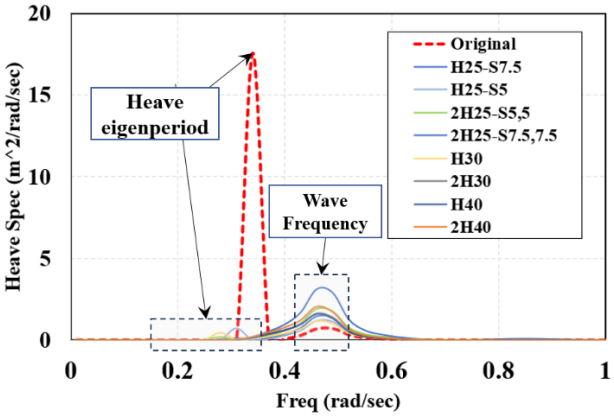
شکل ۱۲. عملگر دامنه پاسخ سرج بدنه توربین بادی همراه با ورق های میراگر

۶-۲. طیف پاسخ فونداسیون اصلاح شده با ورق میراگر

به‌منظور بررسی میزان پاسخ توربین بادی اصلاح‌شده با ورق‌های میراگر و با توجه به RAO های استخراج‌شده، طیف پاسخ سازه مطابق با اشکال ۱۳ تا ۱۵ استخراج شد. برای این منظور، از شرایط محیطی بیان‌شده در جدول ۲ و طیف جانسواپ استفاده گردید. در نهایت، با انتگرال‌گیری از سطح زیر نمودار میزان میانگین پاسخ محاسبه و درصد بهبود پاسخ فونداسیون توربین بادی مورد مطالعه تحت بار موج تعیین شد. در ادامه در مورد هر یک توضیحاتی داده می‌شود.

شکل ۱۳ طیف پاسخ حرکت هیو را برای تمامی حالات در نظر گرفته‌شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیک فرکانس طبیعی هیو در زمان اتصال ورق به کمترین مقدار خود رسیده و در بسیاری از موارد از محدوده موج دور (کمتر از ۰/۲ رادیان بر ثانیه) شده و کاملاً حذف گردیده است. این مسئله نشان می‌دهد که استفاده از ورق‌های میراگر امکان پدیده تشدید را کاهش می‌دهد. در مواردی که پیک ظاهر شده است، از جمله ورق‌های H30 وH25-S5 ، نیز به‌طور قابل‌توجهی مقدار پاسخ کاهش یافته است. این نکته نشان‌دهنده این است که ورق‌های میراگر، میرایی هیدرودینامیکی سازه را بهبود می‌بخشند.

در محدوده‌ای که پیک موج شکل‌گرفته است (محدوده ۰/۳ تا ۰/۸)، مشاهده می‌شود که ورق‌های میراگر باعث شده‌اند که سازه موج بیشتری را در راستای هیو دریافت کند. این پدیده به دلیل اتصال ورق های میراگر به سازه و در معرض موج قرار گرفتن، کاملاً بدیهی است.

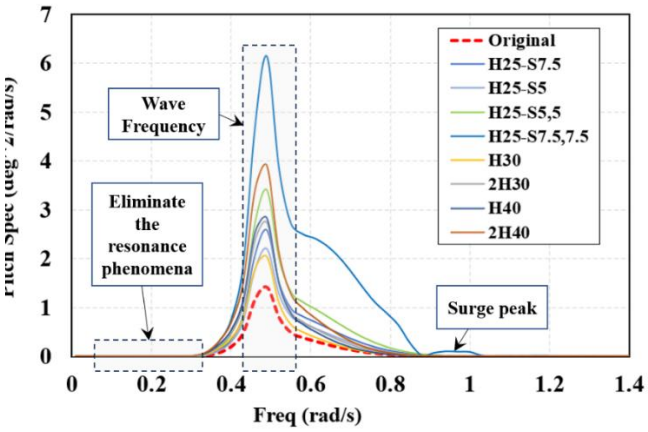


شکل ۱۳. طیف پاسخ هیو بدنه توربین بادی همراه با ورق های میراگر مختلف

شکل ۱۴ طیف پاسخ حرکت پیچ را نشان میدهد. مشاهده می‌شود که در تمامی حالت پیک پریود طبیعی حرکت پیچ حذف شده است که به این معنی است پریود سازه به اندازه کافی از پریود موج دور شده و امکان رخداد پدیده تشدید از بین رفته است. در محدوده موج به واسطه وجود ورق‌ها، سازه نیروی موج بیشتری گرفته است. همچنین زمانی که دو ورق به ستون ها با قطر ۲۵ و فاصله ۷/۵ متر از یکدیگر متصل می‌شود کوپل حرکت پیچ با سرج

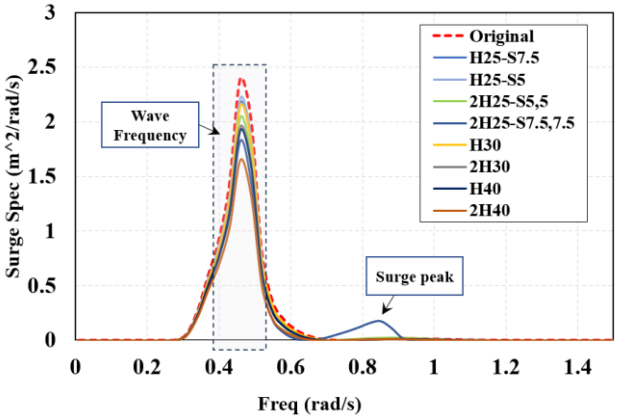
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-16]
[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.67]

رخ داده است.



شکل ۱۴. طیف پاسخ پیچ بدنه توربین بادی همراه با ورق های میراگر مختلف

شکل ۱۵ طیف پاسخ حرکت سرج را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود به غیر از ورق 2H25-S7.5, 7.5 در بقیه حالات پیک حرکت سرج به طور کامل حذف شده است. از سوی دیگر افزایش ورق‌ها باعث کاهش حرکت سرج در محدوده موج بین ۰/۳ تا ۰/۸ رادیان بر ثانیه است که این امر به دلیل این است که در جهت سرج ورق‌ها ضخامت ناچیز داشته و تاثیری در سطح تماس سازه با آب ایجاد نکرده اند. کاهش حرکت سرج به دو دلیل رخ داده است: اولا، حتی ورق‌های نازک نیز با افزایش سطح تماس سازه با آب در جهت عمود بر حرکت سرج، سبب افزایش میرایی تشعشعی می‌شوند. این افزایش میرایی منجر به کاهش انتقال انرژی از موج به سازه در جهت سرج می‌گردد. ثانیاً، این ورق‌ها الگوی جریان اطراف بدنه را تغییر داده و موجب افزایش نیروهای مقاوم در برابر حرکت می شوند. لذا علی‌رغم ضخامت کم، ورق‌ها پاسخ سرج کاهش داشته است.



شکل ۱۵. طیف پاسخ حرکت سرج بدنه توربین بادی همراه با ورق های میراگر مختلف

۶-۳. درصد بهبود پاسخ حرکات فونداسیون اصلاح شده با ورق

به‌منظور مشخص‌شدن میزان پاسخ سازه تحت طیف موج با ارتفاع موج شاخص و پریود پیک نشان‌داده‌شده در جدول ۲، مقدار میانگین پاسخ حرکات سازه با انتگرال گیری از سطح زیر نمودار درصد بهبود آن ها محاسبه شد (جدول ۴). همانطور که مشاهده می‌شود حرکت هیو و سرج در تمامی حالات بهبود یافته اند به نحوی که بیشترین درصد بهبود برای حرکت هیو ۵۶/۸۶ درصد و برای حرکت سرج ۱۷/۴۳ درصد است. اما در مورد حرکت پیچ مشاهده می‌شود که میانگین پاسخ حرکت پیچ در مقایسه با حالت اولیه بدون وجود ورق افزایش یافته شد. این مسئله نشان میدهد که اگر چه وجود ورق باعث افزایش پریود طبیعی پیچ سازه شده و با دور شدن از پریود موج پدیده تشدید را تا حدود زیادی از بین می برد اما ورق‌های میراگر سطح تماس سازه را با آب افزایش می‌دهند در نتیجه این مسئله باعث تولید نیروهای هیدرودینامیکی اضافی می شود. اگر این نیروها به‌طور نامتعادل در اطراف مرکز جرم عمل کنند، می‌توانند لنگر پیچشی بیشتری ایجاد کنند و در نتیجه حرکت پیچ را افزایش دهند.

۶-۴ بررسی پاسخ های هیدرودینامیکی سازه تحت بارهای مختلف موج

به‌منظور رفتار فونداسیون سازه تحت بارهای موج در شرایط مختلف، این بار شرایط موج ۱۰ساله و ۱۰۰ساله مطابق با جدول ۵ در نظر گرفته شد. طیف پاسخ توربین بادی اصلاح شده تحت طیف موج جانسواپ محاسبه شد.

همان‌گونه که در اشکال ۱۶ و ۱۷ مشاهده می‌S شود، پاسخ حرکت هیو در تمامی حالات نسبت به حالت بدون وجود ورق های میراگر کاهش یافته است. از شکل ۱۷مشخص است که تا ۷۰ درصد حتی در شرایط موج ۱۰۰ ساله حرکت هیو بهبود یافته است.

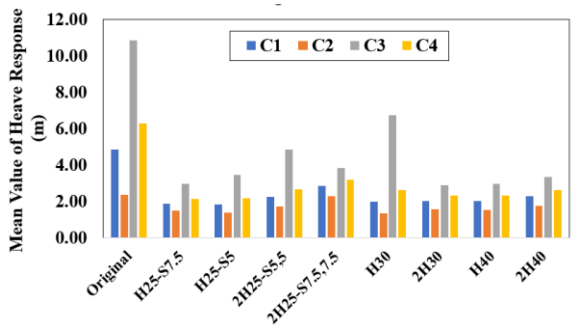
جدول ۴. درصد بهبود پاسخ حرکات فونداسیون اصلاح شده با ورق های میراگر

نام‌گذاری فونداسیون‌ها	پاسخ هیو (متر)	درصد بهبود پاسخ هیو	پاسخ پیچ (درجه)	درصد بهبود پاسخ پیچ	پاسخ سرج (متر)	درصد بهبود پاسخ سرج
Original	۱/۷۷		۰/۸۶		۱/۰۶	
H25-S7.5	۰/۸	۵۴/۵۸	۱/۲۱	-۲۸/۷۴	۱/۰۱	۴/۹۶
H25-S5	۰/۷۶	۵۶/۸۶	۱/۱۰	-۲۲/۱۲	۱/۰۲	۳/۹۹
2H25-S5,5	۰/۹۴	۴۶/۸۰	۱/۴۱	-۳۸/۷۹	۰/۹۸	۷/۹۳
2H25-S7.5,7.5	۱/۲۳	۳۰/۶۴	۲/۰۸	-۵۸/۵۸	۰/۹۵	۱۰/۱۰
H30	۰/۷۷	۵۶/۵۸	۱/۰۲	-۱۶/۰۷	۱/۰۰	۵/۳۶
2H30	۰/۸۶	۵۱/۴۸	۱/۲۰	-۲۸/۳۴	۰/۹۵	۱۰/۰۲
H40	۰/۸۵	۵۱/۷۷	۱/۲۰	-۲۸/۲۷	۰/۹۵	۱۰/۵۳
2H40	۰/۹۷	۴۵/۱۱	۱/۴۳	-۳۹/۶۴	۰/۸۸	۱۷/۴۳

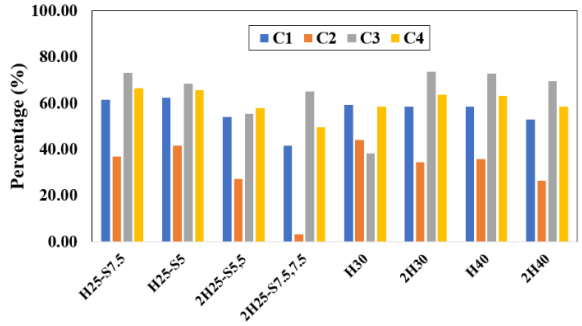
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-16]
[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.67]

جدول ۵. چهار حالت گوناگون امواج در مناطق مختلف[۲۰]

نام‌گذاری	شرایط موج	ارتفاع موج شاخص (متر)	پریود موج (ثانیه)
C1	موج دهساله در جنوب دریای چین	۱۱/۱	۱۳/۶
C2	موج دهساله در شمال غربی استرالیا	۱۰/۰	۱۲/۵
C3	موج صدساله در جنوب دریای چین	۱۳/۳	۱۵/۵
C4	موج صدساله در خلیج مکزیک	۱۲/۲	۱۴/۰

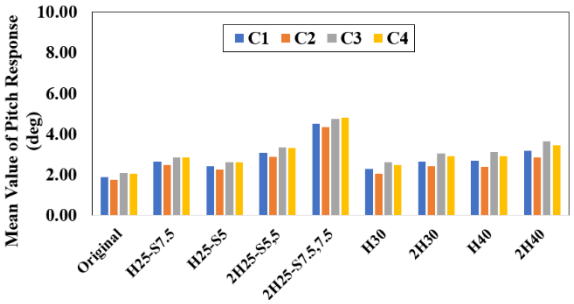


شکل ۱۶. میانگین پاسخ هیو توربین بادی اصلاح شده با ورق های میراگر

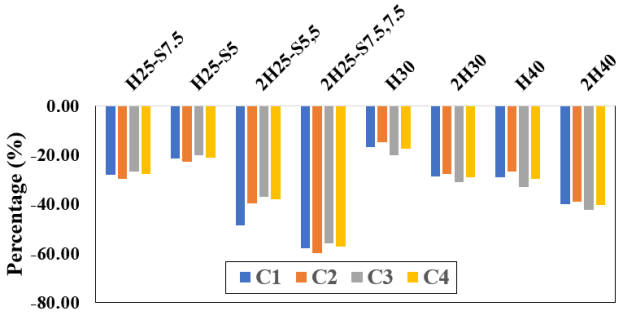


شکل ۱۷. درصد کاهش پاسخ هیو توربین بادی اصلاح شده با ورق های میراگر نسبت به حالت توربین بدون وجود میراگر

شکل ۱۸ میزان پاسخ پیچ توربین بادی را در حالت اصلاح‌شده با ورق‌های میراگر و بدون ورق میراگر تحت شرایط مختلف امواج نمایش می‌دهد. همچنین، شکل ۱۹ درصد بهبود پاسخ پیچ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ورق‌های میراگر برخلاف حرکت هیو تأثیر مثبتی در بهبود حرکت پیچ نداشته‌اند، بلکه در مقایسه با حالت اولیه مقادیر بیشتری را نشان داده‌اند و رفتاری مشابه با حالت عملیاتی داشته است.

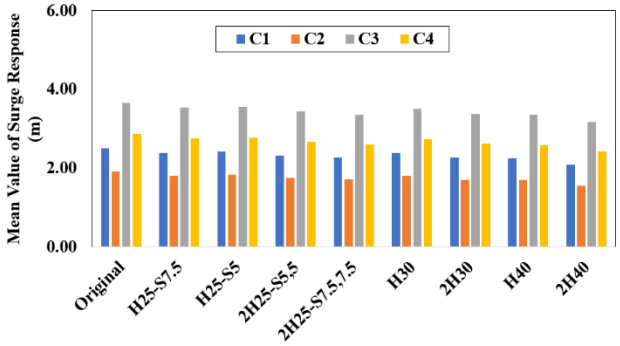


شکل ۱۸. میانگین پاسخ پیچ توربین بادی اصلاح شده با ورق های میراگر

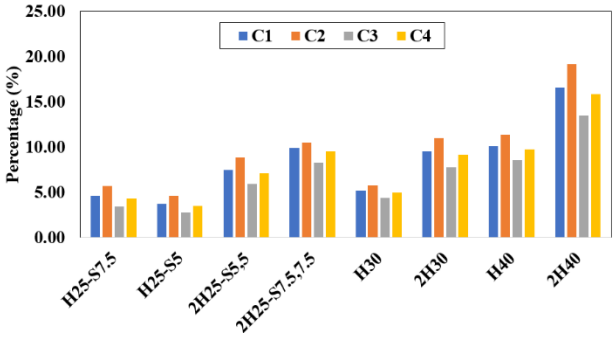


شکل ۱۹. درصد کاهش پاسخ پیچ توربین بادی اصلاح شده با ورق های میراگر نسبت به حالت توربین بدون وجود میراگر

اشکال ۲۰ و ۲۱ به ترتیب میانگین پاسخ حرکت سرج و درصد بهبود حرکت تحت شرایط گوناگون موج را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود، ورق های میراگر در بهبود حرکت سرج موثر بوده اند.



شکل ۲۰. میانگین پاسخ سرج توربین بادی اصلاح شده با ورق های میراگر



شکل ۲۱. درصد کاهش پاسخ سرج توربین بادی اصلاح شده با ورق های میراگر نسبت به حالت توربین بدون وجود میراگر

۶-۵ انتخاب مناسب ترین حالت ورق

انتخاب مناسب‌ترین حالت ورق به هدف عملکرد بستگی دارد. اگر حرکت هیو نگران‌کننده باشد، مشاهده شده است که ورق‌های میراگر می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در این حرکت ایجاد کند. از سوی دیگر، اگر نگرانی اصلی مربوط به حرکت پیچ باشد، ورق‌ها نمی‌توانند پاسخ پیچ را به‌طور مستقیم بهبود دهند، اما قادر به افزایش پریود طبیعی پیچ سازه هستند؛ بنابراین، درصورتی‌که پریود طبیعی پیچ مسئله مهمی باشد، استفاده از ورق‌ها گزینه‌ای مناسب خواهد بود. در مورد حرکت سرج، اگرچه ورق‌ها توانسته‌اند تا حدی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-16]
[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.67]

این حرکت را بهبود بخشند، اما ارزیابی دقیق تنها زمانی ممکن است که سیستم‌های مهاری به‌صورت دقیق مدل‌سازی شوند.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت از بین ۸ حالت در نظر گرفته شده در این مطالعه ورق‌های H25-S5 و H30 به دلیل وزن کمتر، هزینه پایین‌تر و بهبود قابل‌توجه حرکت هیو، گزینه‌های بهینه محسوب می‌شوند.

۷. جمع بندی و پیشنهادات

در این مطالعه، عملکرد ورق‌های میراگر در کاهش پاسخ‌های هیدرودینامیکی توربین بادی نیمه‌مغروق، به‌ویژه در کاهش حرکات هیو، سرج و پیچ تحت شرایط امواج، مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی به‌صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار سسم انجام شد. ابتدا مدل بدون وجود ورق میراگر شبیه‌سازی و با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه گردید. پس از اطمینان از صحت مدل‌سازی، شبیه‌سازی‌ها باوجود ورق‌های میراگر در نظر گرفته شد. مدل‌سازی در هشت حالت مختلف با اتصال ورق به پانتون‌ها و ستون‌ها صورت گرفت. فرض شد ورق‌ها ضخامت کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر دارند و به‌صورت متقارن به فونداسیون متصل می‌شوند؛ بنابراین، مرکز جرم ثابت نگه داشته شد. با توجه به فاصله ورق‌ها از تراز آب، اندرکنش باد و موج نادیده گرفته شد و فرض گردید فونداسیون تنها تحت‌تأثیر امواج قرار دارد. نتایج حاصل از این مطالعه به‌صورت زیر جمع‌بندی می‌شود:

(۱) نتایج نشان داد استفاده از ورق‌های میراگر تأثیر چشمگیری بر تغییرات پریود طبیعی سازه داشته و قادر است دامنه پاسخ را در نزدیکی پریود طبیعی به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. این کاهش ناشی از میرایی بالای ورق‌ها و توانایی جذب و انتقال انرژی موج به سازه است.

(۲) افزایش قطر ورق‌های میراگر باعث افزایش پریود طبیعی سازه شد. به‌عنوان‌مثال در حالت اتصال دو ورق با قطرهای بزرگ‌تر به پانتون‌ها (2H40)، افزایش پریود طبیعی و کاهش چشمگیر پیک دامنه در نزدیکی پریود طبیعی مشاهده گردید.

(۳) موقعیت و فاصله ورق‌ها نقش مهمی در تأثیر آن‌ها بر پاسخ‌های سازه داشت. ورق‌هایی که به ستون‌ها متصل شده و در فاصله‌های مشخصی از یکدیگر قرار داشتند، سختی سازه را افزایش داده؛ اما در فرکانس‌های بالاتر موجب ایجاد پیک‌های اضافی شدند.

(۴) استفاده از ورق‌های میراگر باعث دورشدن فرکانس سازه از فرکانس موج شده و احتمال ایجاد پدیده تشدید را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد.

(۵) ورق‌های میراگر می‌توانند با افزایش میرایی تشعشعی و جرم اضافی، تأثیر مثبتی در کاهش حرکت سرج و هیو داشته باشند. اما این تأثیر در حرکت پیچ ممکن است متفاوت باشد، زیرا پیچ تحت‌تأثیر لنگرهای هیدرودینامیکی پیچیده‌تری قرار دارد.

(۶) محاسبه میانگین پاسخ حرکات نشان داد استفاده از ورق‌ها می‌تواند بیش از ۵۶ درصد پاسخ هیو را بهبود بخشد. با این حال، به دلیل افزایش سطح تماس سازه با آب، پاسخ پیچ افزایش یافت.

(۷) بررسی مقدار میانگین طیف پاسخ توربین بادی اصلاح شده تحت شرایط امواج ده‌ساله و صدساله نشان داد که ورق‌های میراگر حتی در شرایط بحرانی می‌توانند به طور قابل‌توجهی حرکت هیو را کاهش دهند؛ اما باعث افزایش حرکت پیچ می‌شوند.

(۸) اگرچه ورق‌های میراگر باعث بهبود میانگین پاسخ حرکت سرج شدند، اما برای قضاوت دقیق‌تر این مورد، لازم است سیستم‌های مهاری به‌طور کامل مدل شوند.

در نهایت، جمع‌بندی نشان می‌دهد که استفاده از ورق‌های میراگر، به‌ویژه در سازه‌های شناور بزرگ مانند توربین‌های بادی دریایی، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود پایداری و کاهش پاسخ‌های دینامیکی حرکتی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این تحقیق می‌تواند به طراحی بهینه‌تر سازه‌های شناور با عملکرد بهتر در محیط‌های دریایی کمک کرده و راه‌حل‌های اقتصادی و کارآمدی برای سازه‌های نیمه‌مغروق فراهم آورد.

همچنین، انجام آزمایش‌های فیزیکی در مقیاس کوچک یا در مقیاس واقعی، به‌منظور مقایسه با نتایج عددی، می‌تواند به افزایش اعتبار و کاربردپذیری نتایج مدل‌سازی‌ها کمک شایانی نماید. از سوی دیگر، نقش سیستم‌های مهاری در پاسخ‌های دینامیکی سازه بسیار حائز اهمیت است و بررسی اثر متقابل میان ورق‌های میراگر و سیستم‌های مهاری پیشرفته می‌تواند منجر به بهبود عملکرد کلی سازه شود. استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه جهت تعیین مناسب‌ترین ترکیب ابعاد، ضخامت و محل نصب ورق‌ها، به‌منظور دستیابی به بیشینه پایداری و کمینه‌سازی پاسخ‌های دینامیکی نیز از دیگر مسیرهای پیشنهادی برای تحقیقات آینده است. علاوه بر این، در مطالعه حاضر اثر نیروی باد در تحلیل لحاظ نشده است. با توجه به اینکه بارهای باد نقش مؤثری در عملکرد توربین‌های بادی ایفا می‌کنند، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی، اندرکنش باد و موج و تأثیر آن بر عملکرد ورق‌های میراگر نیز مورد بررسی دقیق قرار گیرد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-16]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.67]

۸. مراجع

[1] E. Dornhelm, H. Seyr, and M. Muskulus, "Vindby—a serious offshore wind farm design game," *Energies*, vol. 12, no. 8, p. 1499, 2019.

[2] M. Karimirad, *Offshore energy structures: for wind power, wave energy and hybrid marine platforms*. Springer, 2014.

[3] P. Mohammadi, A. Emami, A. R. M. Gharabaghi, S. Tahmooresi, M. R. Chenaghlou, and H. B. Ghavifekr, "Evaluation of RAOs of a semi-submersible platform using field measurements: A full-scale model in Caspian sea environmental conditions," *Marine Structures*, vol. 91, p. 103467, 2023.

[4] A. Emami and A. R. M. Gharabaghi, "Improvement of the heave motion of a semi-submersible platform with damping sheets subjected to sea waves," *Journal Of Marine Engineering*, vol. 19, no. 38, pp. 62-76, 2023.

[5] C. Lopez-Pavon and A. Souto-Iglesias, "Hydrodynamic coefficients and pressure loads on heave plates for semi-submersible floating offshore wind turbines: A comparative analysis using large scale models," *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 864-881, 2015.

[6] J. Moreno ,K. P. Thiagarajan, and M. Cameron, "Hydrodynamic coefficients of hexagonal heave plates for floating offshore wind turbine platforms," in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2016, vol. 49972: American Society of Mechanical Engineers, p. V006T09A032 .

[7] S. Alkan, "Comparative hydrodynamic analysis of catenary and tension leg moored floating offshore wind turbine," in *1st International Conference on Energy Systems Engineering, November*, 2017, pp. 291-298 .

[8] Y. Jiang ,G. Hu, G. Jin, Z. Sun, J. Li, and Z. Zong, "Hydrodynamic performance of a novel floating foundation for offshore wind turbine," in *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*, 2018: ISOPE, pp. ISOPE-I-18-559 .

[9] K. Balakrishnan, S. R. Arwade, D. J. DeGroot, C. Fontana, M. Landon, and C. P. Aubeny, "Comparison of multiline anchors for offshore wind turbines with spar and with semisubmersible," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1452, no. 1: IOP Publishing, p. 012032 .

[10] A. Bezunartea-Barrio *et al.*, "Scale effects on heave plates for semi-submersible floating offshore wind turbines: case study with a solid plain plate," *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 142, no. 3, p. 031105, 2020.

[11] L. Zhang, W. Shi, M. Karimirad, C. Michailides, and Z. Jiang, "Second-order hydrodynamic effects on the response of three semisubmersible floating offshore wind turbines," *Ocean Engineering*, vol. 207, p. 107371, 2020.

[12] K. Rajeswari and S. Nallayarasu, "Hydrodynamic response of three-and four-column semi-submersibles supporting a wind turbine in regular and random waves," *Ships and Offshore Structures*, vol. 16, no. 10, pp. 1050-1060, 2021.

[13] M. Shokouhian, M. Head, J. Seo, W. Schaffer, and G. Adams, "Hydrodynamic response of a semi-submersible platform to support a wind turbine," *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 170-185, 2021.

[14] S. Zhou, K. Müller, C. Li, Y. Xiao, and P. W. Cheng, "Global sensitivity study on the semisubmersible substructure of a floating wind turbine: Manufacturing cost, structural properties and hydrodynamics," *Ocean Engineering*, vol. 221, p. 108585, 2021.

[15] A. G. Elkafas, Y. M. Ahmed, and M. M. Elgohary, "Hydrodynamic analysis of floating offshore wind turbine With different numbers of offset columns," *Marine Technology Society Journal*, vol. 56, no. 2, pp. 8-19, 2022.

[16] H. Li, J. Zheng, J. Zhang, W. Peng, and J. Peng, "Numerical investigation on dynamic responses of a semi-submersible wind turbine with different types of heave plates," *Ocean Engineering*, vol. 310, p. 118650, 2024.

[17] H. Wang, Y. Yang, Y. Guo, and J. Lian, "Influence of Heave Plate on the Dynamic Response of a 10 MW Semisubmersible Floating Platform," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 12, p. 2156, 2024.

[18] I. Pregnan Johannesen, "Enhancing pitch stability in floating wind platforms: the hydrodynamic effects of thin plates," 2024.

[19] A. Emami and M. Karimirad, "Further development of offshore floating solar and its design requirements," *Marine Structures*, vol. 100, p. 103730, 2025.

[20] A. Emami, N. Pourjafari, and A. Parghi, "Effect of porous SBR composites on mitigating the heave motion response of a semi-submersible platform," *Ocean Engineering*, vol. 2 ,۹۵p. 116856, 2024.

[21] A. Emami and A. R. M. Gharabaghi, "Application of poroelastic layers in a semi-submersible platform: Devising an efficient heave motion response reduction method," *Ocean engineering*, vol. 201, p. 107148, 2020.

[22] I. Rivera Arreba, "Computation of nonlinear wave loads on floating structures," NTNU, 2017 .

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-16]

[DOI: 10.61186/marineeng.21.45.67]