J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 48, 2026. (78-94)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Dynamic Response Analysis and Power Production Evaluation of a Combined Floating Breakwater–Wave Energy Converter System

Mohammad Akrami[1], Abuzar Abazari[2*]

[1] *Undergraduate student, Marine Engineering Department, Chabahar Maritime University, Chabahar* akrami.mohammad79@gmail.com
[2] *Associate Professor, Marine Engineering Department, Chabahar Maritime University, Chabahar* abuzarabazari@cmu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 24 May 2025
Last modification: 22 Feb 2026
Accepted: 28 Mar 2026
Available online: 28 Mar 2026

Article type:
Research Article

Keywords:
Floating breakwater
ANSYS AQWA
Wave transmission coefficient
Geometric parameters
Mooring system
Energy Conversion

ABSTRACT

In coastal and offshore engineering, floating breakwaters are widely recognized as effective solutions for attenuating wave energy and protecting coastal infrastructure. However, the development of modern technologies has enabled these structures to simultaneously function as renewable energy systems. The goal of this study is to investigate the performance of a hybrid system consisting of a rectangular floating breakwater integrated with wave energy converters (WECs) of different sizes and configurations, aiming to enhance both coastal protection and energy generation. To achieve this, numerical simulations were conducted using ANSYS AQWA software, based on potential flow theory and wave diffraction analysis. Three different buoy diameters for the WECs and two distinct layouts (longitudinal and transverse) were examined. Additionally, the best damping coefficient for each converter was determined to maximize power extraction. The novelty of this work lies in combining the dynamic response analysis of a floating breakwater with a quantitative evaluation of power output while simultaneously assessing the effects of WEC size and arrangement. The findings reveal that the installation of WECs not only reduces pitch and heaving motions but also slightly increases surge motion by up to 25% in some configurations. The best performance was seen for a 1.5-meter buoy diameter in the longitudinal arrangement, capable of producing approximately 56 kW of power at a wave period of 5 seconds. Overall, the results confirm that the proposed hybrid floating breakwater–WEC system can serve as a dual-purpose solution, simultaneously providing coastal protection and renewable energy generation.

ISSN: 2645-8136

DOI:

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 2026-05-27]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۸، ۱۴۰۴، (۹۴-۷۸)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

تحلیل پاسخ دینامیکی و ارزیابی توان تولیدی سیستم ترکیبی موج‌شکن شناور و مبدل انرژی موج

محمد اکرمی[۱]، ابوذر اباذری[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار akrami.mohammad79@gmail.com

[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار abuzarabazari@cmu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۰۸

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۰۸

نوع مقاله:

پژوهشی

کلمات کلیدی:

موج‌شکن شناور

انسیس آکوا

ضریب انتقال موج

پارامترهای هندسی

سیستم مهاربند

تبدیل انرژی

چکیده

در مهندسی سواحل و فراساحل، سازه‌های موج‌شکن شناور به‌عنوان راهکاری کارآمد برای کاهش انرژی امواج و حفاظت از زیرساخت‌های ساحلی شناخته می‌شوند. بااین‌حال، توسعه فناوری‌های نوین امکان بهره‌برداری هم‌زمان از این سازه‌ها در تولید انرژی پاک را فراهم کرده است. هدف پژوهش حاضر بررسی عملکرد یک سیستم ترکیبی شامل موج‌شکن شناور مستطیلی همراه با مبدل‌های انرژی موج در ابعاد و چیدمان‌های مختلف است تا ضمن ارتقای کارایی حفاظتی، قابلیت تولید انرژی نیز ارزیابی شود. برای دستیابی به این هدف، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار انسیس آکوا مبتنی بر تئوری پتانسیل و تحلیل تفرق امواج انجام گرفت. در این مطالعه سه اندازه متفاوت از بویه‌های مبدل انرژی و دو نوع آرایش طولی و عرضی آن‌ها روی موج‌شکن بررسی شدند. همچنین، برای مبدل‌ها ضریب میرایی بهینه محاسبه شد تا بیشترین بازده توان خروجی حاصل شود. نوآوری این تحقیق در ترکیب تحلیل دینامیکی موج‌شکن شناور با ارزیابی کمی تولید انرژی و بررسی اثر هم‌زمان ابعاد و نحوه استقرار مبدل‌ها است. یافته‌ها نشان داد که استفاده از مبدل‌های انرژی علاوه بر کاهش نسبی حرکات پیچ و هیو، در برخی چیدمان‌ها موجب افزایش حرکت سرج تا حدود ۲۵ درصد می‌شود. بهترین عملکرد مربوط به بویه با قطر ۱/۵ متر در چیدمان طولی بوده است که توان تولیدی آن در پریود ۵ ثانیه حدود ۵۶ کیلووات برآورد شد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که سیستم ترکیبی موج‌شکن - مبدل انرژی قابلیت ایفای نقش دوگانه در حفاظت سواحل و تولید انرژی تجدیدپذیر را دارد.

DOI:

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 2026-05-27]

۱ - مقدمه

موج‌شکن‌های شناور، سازه‌هایی دریایی هستند که برای کاهش اثر امواج در مناطق ساحلی، بندرگاه‌ها و تأسیسات دریایی مورداستفاده قرار می‌گیرند. این سازه‌ها به دلیل شناور بودن، قابلیت جابه‌جایی و نصب آسان دارند و یک راه‌حل اقتصادی و کارآمد در مهندسی سواحل شناخته می‌شوند. موج‌شکن‌ها در انواع مختلفی مانند لاستیکی، فلزی و بتنی وجود دارند که بسته به شرایط محیطی و نیازهای خاص پروژه انتخاب می‌شوند. این سازه‌ها به کاهش انرژی امواج کمک کرده و از آسیب‌رساندن به سواحل و تأسیسات بندری جلوگیری می‌کنند. همچنین، در تأسیسات نفتی، گازی، دریایی، مناطق تفریحی و ورزشی دریایی نیز به کار می‌روند. باوجود مزایای بسیار، موج‌شکن‌های شناور دارای محدودیت‌هایی مانند کاهش کارایی در برابر امواج بزرگ و پایداری کمتر در شرایط آب‌وهوایی سخت هستند. در مجموع، این سازه‌ها به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر و اقتصادی برای محافظت از تأسیسات ساحلی و بهبود ایمنی و کارایی آنها مورداستفاده قرار می‌گیرند. موج‌شکن‌های شناور علاوه بر کاهش انرژی امواج، قابلیت استفاده به‌عنوان ابزاری برای جذب انرژی از موج دریا را نیز دارند. این سازه‌ها می‌توانند با نصب سامانه‌های تبدیل انرژی، به تولید برق از انرژی امواج کمک کنند. سامانه‌های مختلفی مانند مبدل نوع ستون نوسانگر آب[1] و سامانه‌های پاندولی قابل‌نصب بر روی موج‌شکن‌های شناور هستند که هر کدام بسته به شرایط پروژه و نوع موج‌شکن انتخاب می‌شوند.

استفاده از این فناوری نه‌تنها به کاهش هزینه‌های انرژی تولیدی کمک می‌کند، بلکه گامی مؤثر در جهت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است. موج‌شکن‌های شناور می‌توانند نقش دوگانه‌ای در حفاظت از سواحل و تولید انرژی پایدار ایفا کنند. مطالعات زیادی روی موج‌شکن‌های شناور تا کنون انجام‌گرفته است.

نینگ و همکاران در یک مطالعه تجربی، موج‌شکن شناور مجهز به مبدل نوسانگر ستونی را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که مهار به وسیله شمع نقش مهمی در بهبود عملکرد انرژی‌گیری سازه ایفا می‌کند[۱]. رضایی‌مزیک و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی عددی، الگوی تغییر ارتفاع موج در اطراف موج‌شکن پانتونی را تحلیل کرده و نشان دادند که ابعاد هندسی سازه مستقیماً بر کارایی آن تأثیر دارد[۲]. گوتو و همکاران در مروری جامع بر روش‌های ذره‌ای، به معرفی ظرفیت این روش‌ها در تحلیل مسائل پیچیده سواحل و موج‌شکن‌ها پرداختند و بیان کردند که این روش‌ها در بررسی برهم‌کنش موج و سازه دقت بالایی دارند [۳]. مارکزی و همکاران یک مدل عددی برای سامانه دو بدنه‌ی مبدل انرژی ارائه کردند و نشان دادند که این روش قابلیت شبیه‌سازی عملکرد مبدل در آب‌های کم‌عمق را دارد [۴]. اعظمی و همکاران عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن مستطیلی پانتونی را در شرایط دریای خزر بررسی کردند و بهبود پاسخ سازه در برابر امواج بلند را گزارش کردند[۵]. اباذری و همکاران به بررسی تعیین فرکانس رزونانس توان در مبدل انرژی موج از نوع ستون نوسانی آب با استفاده از مدل تحلیلی مدار معادل RLC می‌پردازد[۶]. قاسمی و همکاران نیز با تغییر هندسه مقطع موج‌شکن‌های شناور دوبل، نشان دادند که می‌توان ضریب انتقال موج را به طور محسوسی کاهش داد [۷]. گالوتیا و همکاران در یک مرور جدید، به پیشرفت‌های سامانه‌های تبدیل انرژی موج پرداختند و تأکید کردند که طراحی بهینه نیازمند ترکیب نظریه موج، هندسه سازه و الگوریتم‌های کنترل است[۸]. غفاری و همکاران سامانه ترکیبی ویوستار را با تحلیل هیدرودینامیکی مبتنی بر تئوری جریان پتانسیل بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند که افزایش قطر از ۵ تا ۱۰ متر، توان جذب‌شده را تا حدود چهار برابر افزایش می‌دهد و بیشینه توان کل سامانه در حدود ۹۹۴ کیلووات حاصل می‌شود[۹]. یوسفی و همکاران با بررسی عددی تأثیر کانال جانبی در موج‌شکن شناور، نشان دادند که این تغییر هندسی باعث بهبود کارایی هیدرودینامیکی می‌شود[۱۰]. درستکارو همکاران با انجام یک مطالعه هیدرودینامیکی عددی، عملکرد پلتفرم نیمه‌شناور امیرکبیر ترکیب‌شده با چهار مبدل نقطه‌جاذب انرژی موج را ارزیابی کرده و نشان دادند که این سامانه ترکیبی ضمن کاهش پاسخ‌های دینامیکی پلتفرم، توان قابل‌توجهی نیز تولید می‌کند[۱۱]. یوسفی و همکاران اثر تغییر پارامترهای هندسی و ردیف‌بندی موج‌شکن‌ها را بر عملکرد هیدرودینامیکی تحلیل کرده و بهترین آرایش را معرفی نمودند [۱۲]. اعظمی و همکاران در مطالعه‌ای روی موج‌شکن‌های پانتونی با مقاطع مختلف، گزارش کردند که هندسه ذوزنقه‌ای در شرایط دریای خزر می‌تواند انتقال موج کمتری ایجاد کند [۱۳]. درستکار و همکاران سامانه ترکیبی کشتی «دوو» و مبدل انرژی موج را با تحلیل عددی در نرم‌افزار انسیس آکو بررسی کرده و حداکثر توان ۴۰۰ کیلووات را برای چهار مبدل نقطه‌جاذب گزارش کرده‌اند[۱۴]. کمال و همکاران با مدلسازی هیدرودینامیکی در نرم‌افزار انسیس آکوا نشان دادند که ترکیب سکوی نیمه‌شناور توربین بادی با مبدل‌های نوسانی نوع فلپ، ضمن کاهش پاسخ‌های سرج، هیو، رول و پیچ تا حدود ۳۰٪، توان قابل‌توجهی تا حدود ۱۰۰۰ کیلووات نیز تولید می‌کند[۱۵]. اباذری با مدلسازی عددی در محیط انسیس آکوا پاسخ دینامیکی

[1] Oscillating Water Column - OWC

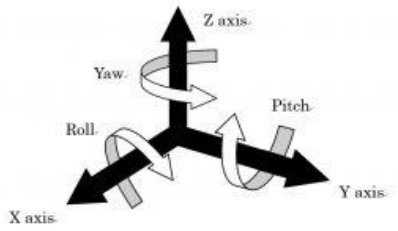
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

یک سکوی نیمه‌شناور مجهز به توربین بادی و مبدل انرژی موج نوع فلپ را بررسی کردند و نشان دادند که این سامانه ترکیبی ضمن کاهش نوسانات پلتفرم، بازده استخراج انرژی را نیز بهبود می‌دهد[۱۶]. قره‌چائی و همکاران سامانه ترکیبی قفس ماهی و مبدل انرژی موج را با مدل‌سازی دینامیکی و بهینه‌سازی پارامترهای سازه و سامانه برداشت توان بررسی کرده‌اند و کارایی آن را در کاهش پاسخ موج و افزایش توان تولیدی نشان داده‌اند[۱۷]. در نهایت، ژو و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی روی سامانه ترکیبی موج‌شکن–مبدل انرژی نشان دادند که این ترکیب می‌تواند ضمن کاهش حرکات سازه، بازده تولید انرژی را نیز بهبود بخشد [۱۸].

همان‌طور که از تحقیقات منتشر شده مشخص است تحقیقات روی تأثیر مبدل انرژی روی پاسخ دینامیکی موج‌شکن در سیستم ترکیبی مبدل انرژی انجام شده است در این مقاله سعی شده این مبدل انرژی بر روی موج‌شکن شناور پیاده‌سازی شود. در مقالات پیشین مشخص شده که ارتفاع موج روی ضریب انتقال موج تأثیر ندارد[۱۰]. هدف اصلی این تحقیق، پر کردن این خلأ با تحلیل عددی پاسخ دینامیکی یک موج‌شکن شناور مستطیلی همراه با مبدل‌های انرژی در ابعاد و چیدمان‌های مختلف و تعیین تأثیر آن بر ضریب انتقال موج و حرکات شش‌درجه‌آزادی سازه است.

۲ - معادلات اساسی حاکم

در طراحی موج‌شکن‌های شناور، مفهوم "شش درجه آزادی" بسیار مهم است در شکل ۱ درجات آزادی شامل سه حرکت انتقالی و سه حرکت دورانی آمده است.



شکل ۱ - معرفی شش درجه آزادی

شش درجه آزادی در طراحی موج‌شکن‌های شناور اهمیت زیادی دارد؛ زیرا این حرکات شامل سه حرکت انتقالی (طولی، عرضی، عمودی) و سه حرکت دورانی (چرخش حول محور طولی، عرضی، عمودی) هستند. شناخت و کنترل این حرکات موجب افزایش پایداری و کارایی موج‌شکن‌ها در برابر شرایط متغیر دریایی می‌شود. با عمل به این مهم می‌توان هزینه‌های نگهداری را کاهش داد.

برای این که عملکرد یا راندمان موج‌شکن بررسی گردد از معادله (۱) ارتفاع موج قبل از موج‌شکن و بعد از آن استفاده می‌شود. معمولاً این راندمان را ضریب انتقال موج (C_t) می‌نامند.

$$C_t = \frac{H_t}{H_i} \qquad (۱)$$

H_t ارتفاع موج بعد از موج‌شکن، H_i ارتفاع موج تابشی به موج‌شکن (۱ متر) در محاسبه ضریب انتقال موج، تأثیر موج منعکس شده از موج‌شکن در ارتفاع قبل از موج‌شکن در نظر گرفته نمی‌شود. مقدار ضریب انتقال موج هرچه قدر کوچک‌تر باشد عملکرد موج‌شکن بهتر است. برای بیان میدان سیال اطراف سازه از معادله (۲) استفاده شده است[۱۰].

$$\Phi(\vec{X},t) = A\,\phi(\vec{X})e^{-i\,\omega t} \qquad (۲)$$

A دامنه موج تابشی، ω فرکانس موج تابشی، t زمان و $\vec{X}\,(x,y,z)$ بیانگر موقعیت نسبت به محورهای مرجع ثابت باشد. در اینجا، پتانسیل کل (Φ) را به‌عنوان جمع سه مؤلفه φ_I موج تابشی، φ_D موج تفرق یافته (φ_R) و موج تشعشعی می‌توان فرض نمود که هر سه تابع در معادله لاپلاس صدق می‌کنند.

$$\Phi(\vec{X})e^{-i\,\omega t} = \left[\phi_I + \phi_D + \sum_{j=1}^{6}\phi_{R_j}X_j\right]e^{-i\,\omega t} \qquad (۳)$$

که φ_I پتانسیل موج تابشی مرتبه اول با دامنه موج واحد، φ_D پتانسیل موج تفوق یافته، φ_{Rj} پتانسیل موج تشعشعی ناشی از حرکت مود j ام با دامنه حرکت واحد است. $\Phi(\vec{X},t)$ تابع پتانسیل سرعت و $\phi(\vec{X})$ ترم مستقل از زمان است که بر اساس تئوری هیدرودینامیک خطی برای سیال تراکم‌ناپذیر و غیر لزج و جریان سیال غیر چرخشی با معادلات(۴ تا ۸) توصیف می‌شود[۱۰].

$$\nabla^2\phi(x,y,z) = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \qquad (۴)$$

در معادله (۵) شرایط مرزی سطح آزاد خطی (S_f) در $z=0$ اعمال شده است که g شتاب جاذبه زمین است.

$$-\omega^2\phi + g\frac{\partial\phi}{\partial z} = 0 \qquad (۵)$$

در معادله (۶) شرط مرزی روی سطح جسم (S_b) که n بردار نرمال خارجی است.

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n} = \begin{cases} -i\omega n_j & ; \quad \text{برای پتانسیل تابشی} \\ -\dfrac{\partial\varphi}{\partial x} & ; \quad \text{برای پتانسیل پراش} \end{cases} \qquad (۶)$$

در معادله (۷) شرایط مرزی بستر دریا (S_z) در $z = -h$ است.

$$\frac{\partial\phi}{\partial z} = 0 \qquad (۷)$$

در معادله (۸) که k عدد موج شرط مرزی تابش در بی‌نهایت (S_∞) جایی که $r = \sqrt{X^2 + Y^2} \to \infty$ است.

$$\lim_{r\to\infty} r^{1/2}\left(\frac{\partial\phi}{\partial r} - ik\phi\right) = 0 \qquad (۸)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

برای محاسبه توان تولیدی امواج توسط مبدل انرژی (بویه‌ها) از معادله ۹ استفاده شده است[۹].

$$P = 0.5\ B\ \omega^2\ \Theta^2 \qquad (۹)$$

که در این معادله B ضریب میرایی به واحد ((N.m/ (rad/s)، ω فرکانس موج برخوردی با واحد (rad/s)، Θ دامنه تغییرات زاویه مبدل انرژی نسبت به محور چرخش با واحد (rad) و P توان تولید شده برحسب (W) است.

۳ - مدل‌سازی و شبیه‌سازی

در مدل‌سازی از نرم‌افزار انسیس آکوا استفاده شده است که دارای دو ماژول Hydrodynamic Diffraction و Hydrodynamic Response است که ماژول اول در حوزه فرکانس و ماژول دوم در حوزه زمان امکان تحلیل را انجام می‌دهد. از نرم‌افزار آکوا برای بررسی اثرات موج، باد و جریان بر سازه‌های دریایی ثابت و شناور نظیر یدک‌کش‌ها، سکوهای دریایی، سازه‌های نیمه شناور، سکوهای پایه کششی، کشتی‌ها، سیستم‌های تولید انرژی تجدیدپذیر و موج‌شکن‌ها استفاده می‌شود.

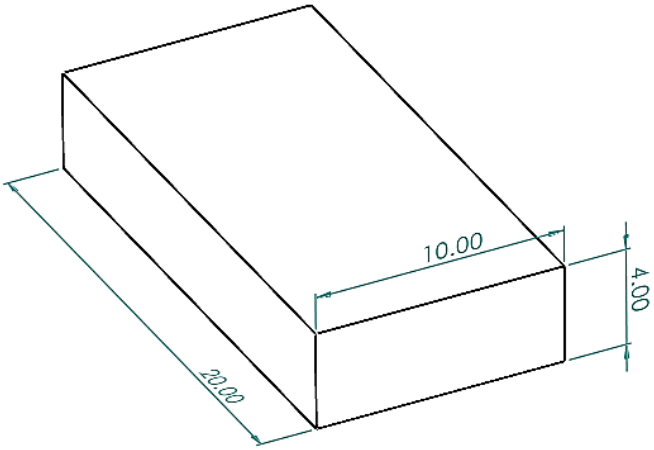
۴ - مشخصات موج‌شکن و سیستم مهاربندی

سیستم مهاربندی در موج‌شکن‌های شناور یک بخش حیاتی از طراحی این سازه‌ها است که نقش کلیدی در پایداری و عملکرد آنها در شرایط دریایی دارد. این سیستم به مجموعه‌ای از کابل‌ها، زنجیرها، و لنگرها اطلاق می‌شود که موج‌شکن را در موقعیت مورد نظر نگه می‌دارند و از جابجایی غیرمجاز آن تحت تأثیر امواج، باد و جریان‌های دریایی جلوگیری می‌کنند. مشخصات مهارهای در نظر گرفته شده برای موج شکن شناور و مشخصات موج‌شکن با جرم ۴۱۰ تن(شکل ۲)نشان داده شده است.

جدول ۱ : مشخصات سیستم مهاربندی در مدل‌سازی عددی[۱۹]

واحد طول / جرم	۱۵۰ کیلوگرم بر متر
سطح مقطع معادل	۰/۰۱ مترمربع
ماکزیمم کشش	۷/۵ مگا نیوتن
سختی	۶۰۰ مگاپاسکال
قطر معادل	۰/۲ متر
طول کابل	۴۲ متر
تعداد کابل برای هر موج‌شکن شناور	۴
نوع کابل	زنجیری با رفتار غیرخطی [۲]

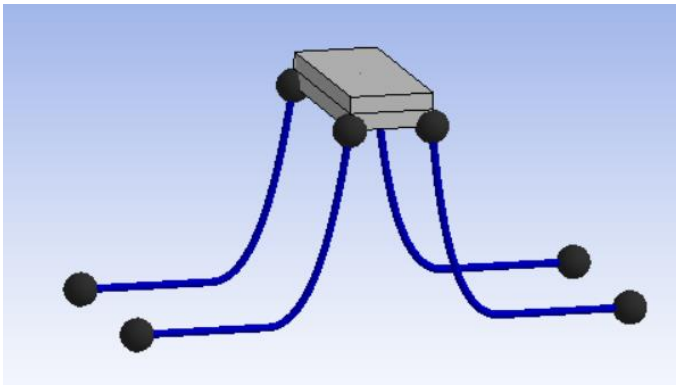
[2] Nonlinear catenary mooring line



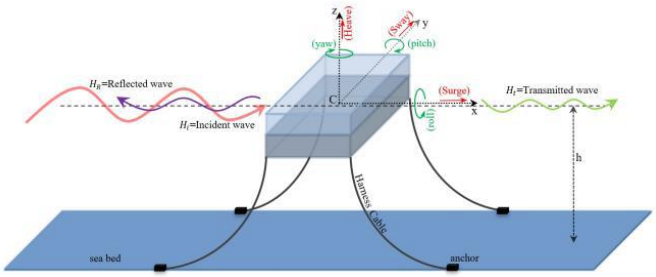
شکل ۲- شکل و مشخصات موج شکن برحسب متر

۵- صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی

به‌منظور صحت شبیه‌سازی عددی ابتدا یک موج‌شکن تنها و بدون مبدل انرژی طبق مقاله [۱۰] شبیه‌سازی می‌شود(شکل ۳). در شکل ۴ محورهای حرکت شناور معرفی شده‌اند که شامل ۶ درجه آزادی است.



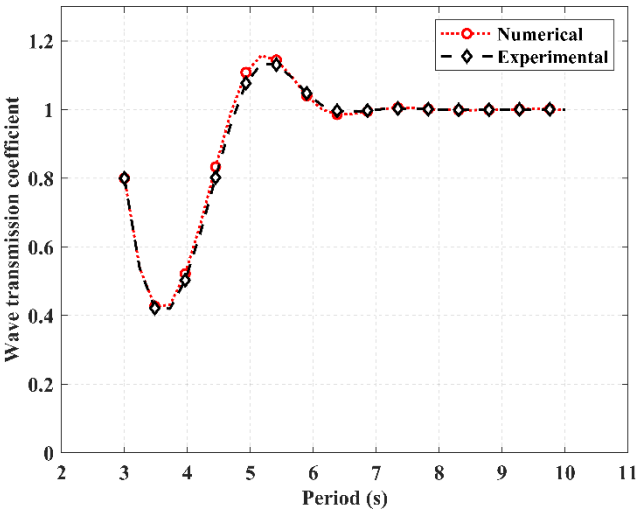
شکل ۳- هندسه مدل شده در انسیس آکوا



شکل ۴- نمایش موج‌های برخوردی، انعکاسی و مستهلک شده[۱۰]

مقایسه نتایج ضریب انتقال موج ذکر شده با ضریب انتقال شبیه‌سازی در پژوهش حاضر در شکل ۵ آمده است. نتایج تجربی و عددی در پریود ۵ بیشترین اختلاف را دارند که حدود ۲ درصد است؛ لذا صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر موردتأیید قرار می‌گیرد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

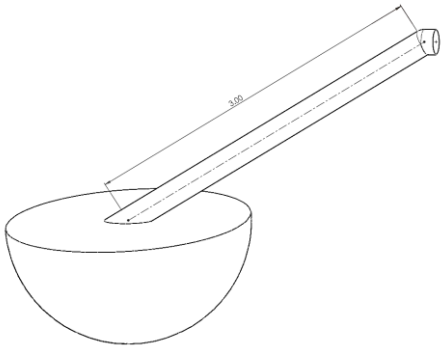


شکل ۵- مقایسه ضریب انتقال موج تجربی و عددی[۱۰]

۶ - مشخصات مدل‌های مختلف موج‌شکن شناور

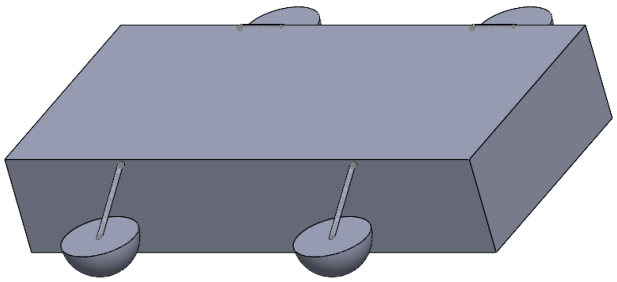
به‌منظور بررسی تأثیر حالت‌های قرارگیری مختلف بویه بر ضریب انتقال موج و بررسی مقدار تولید انرژی، سه نمونه مبدل انرژی با استفاده از نرم‌افزار سالیدورک طراحی شده و روی موج‌شکن قرار می‌گیرد. سپس در نرم‌افزار انسیس آکوا فراخوانی شده است. انواع هندسه‌های در نظر گرفته شده برای مبدل انرژی با قطرهای مختلف بویه شناور در شکل ۶ آمده است. مبدل انرژی در نظر گرفته شده از نوع ویواستار[۳] است.

همچنین چیدمان قرارگیری مبدل‌ها روی موج‌شکن شناور به دو صورت چیدمان در راستای عرضی و طولی است که در شکل ۷ و شکل ۸ آمده است.



شکل ۶- مبدل با شعاع ۱ متری (شعاع میله۰/۱) - مبدل با شعاع ها ۱، ۱/۵ ، ۲ متر

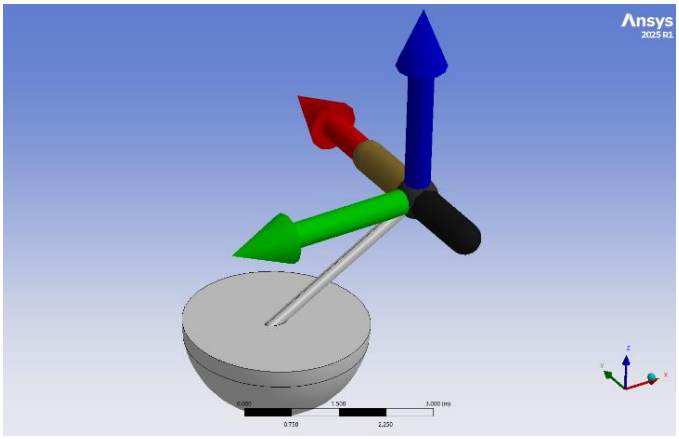
شکل ۷- نحوه قرارگیری مبدل‌ها در چیدمان ۱ (عرضی)



شکل ۸- نحوه قرارگیری مبدل‌ها در چیدمان ۲ (طولی)

۷ - بهینه‌سازی میرایی برای دریافت بیشترین توان

در ابتدا باید برای هر کدام از مبدل‌ها بهترین ضریب میرایی که باید بین سازه موج‌شکن و ویواستار باشد محاسبه شود. برای این کار با استفاده از چندین تحلیل مختلف در بازه‌های متفاوت مقادیر میرایی، بهترین ضریب در بازه پریود تحریک امواج ۳ تا ۱۷ ثانیه و با فریبرد[۴] یکسان ۳۰ سانتی‌متر محاسبه شده است که در شکل ۹ آمده است.



شکل ۹- مدل‌سازی مبدل انرژی برای محاسبه میرایی

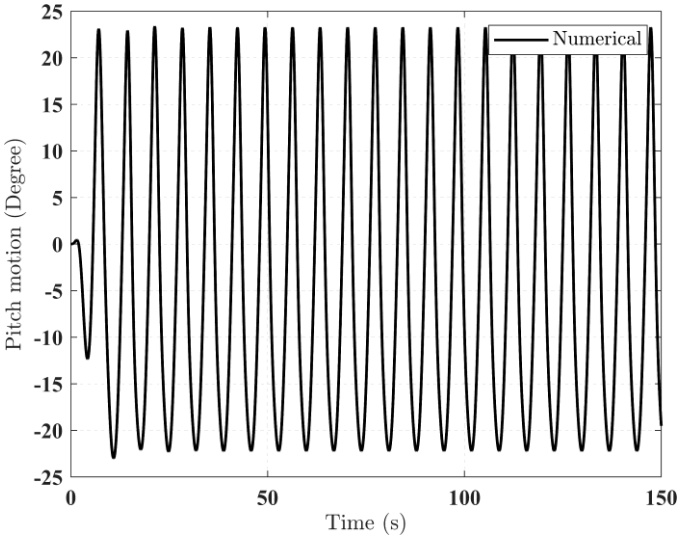
لازم به ذکر است که برای جلوگیری از پیچیدگی‌های مسئله، بهینه‌سازی برای یک مبدل انرژی تنها بدون اثرات تقابلی با موج‌شکن انجام می‌شود[۹]. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود برای محاسبه بهترین ضریب میرایی، مبدل انرژی توسط

[3] Wave Star

[4] Freeboard

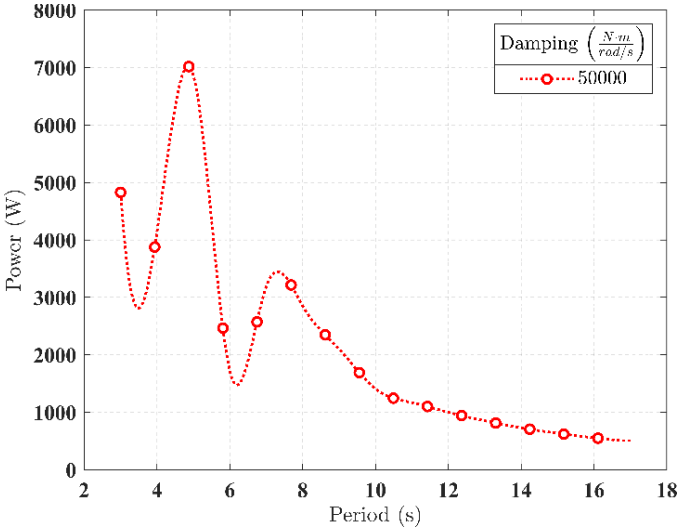
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

یک میله در یک نقطه ثلبت لولا می‌شـــود و یک میرایی زاویه‌ای مشخص، در پریودهای مختلف مقدار حرکت پیچ محاسبه و مقدار دامنه حرکت پایای Θ به دست آورده می‌شود (شکل ۱۰).



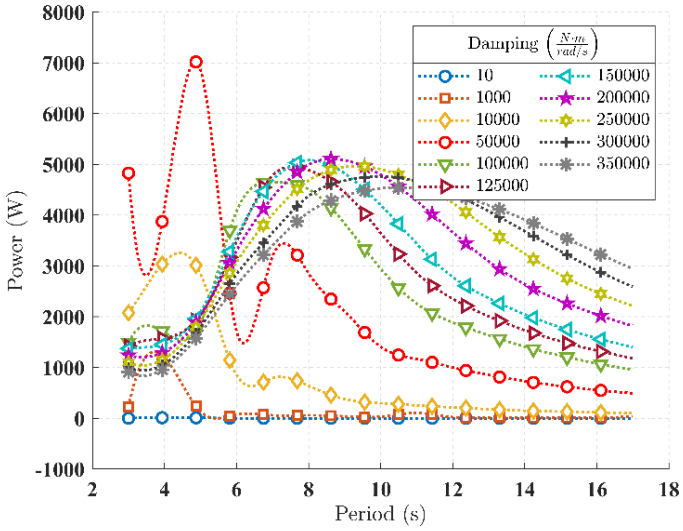
شکل ۱۰- حرکت پیچ مبدل در پریود ۵ ثانیه برای مبدل ۱/۵ متری

در این حالت دامنه حرکت Θ نصـــف جلبه‌جایی کل خواهد بود. با اســـتفاده از معادله ۹ مقدار توان تولیدی محاســـبه شـــده و به‌ازای هر پریود و میرایی مقدار توان خروجی محاســـبه می‌شـــود و در ادامه محنی توان تولیدی بر حسب پریود به‌صورت شکل ۱۱ به دست می‌آید.

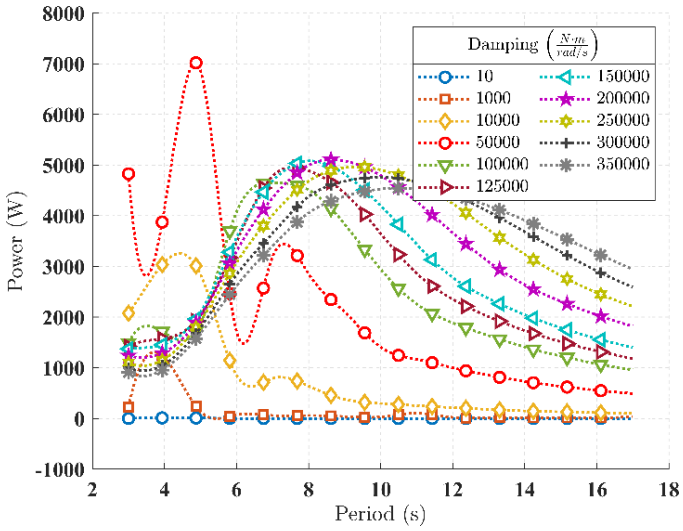


شکل ۱۱- مبدل تکی توان برحسب پریود در میرایی $\frac{N\cdot m}{rad/s}$ ۵۰۰۰۰

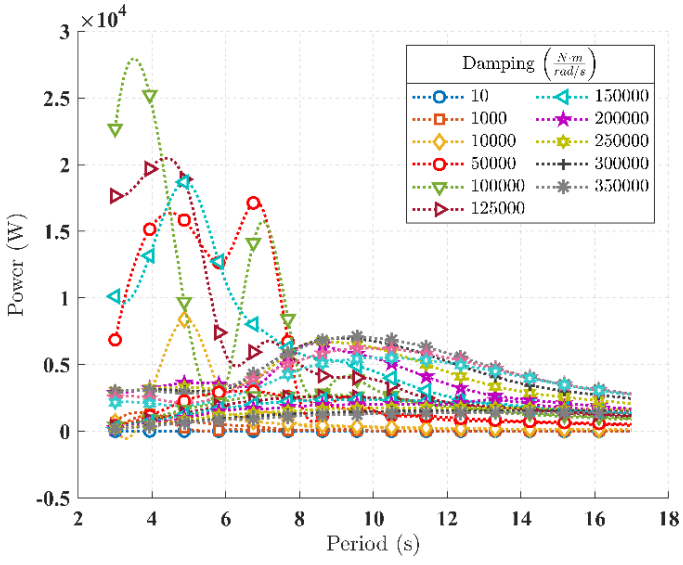
با بررسی همه حالت‌ها در سه نمونه مبدل انرژی نمودار توان آن‌ها به‌صورت (شکل ۱۲، شکل ۱۳ و شکل ۱۴) خواهد بود.



شکل ۱۲- مبدل تکی ۱ متری توان برحسب پریود در میرایی‌های مختلف



شکل ۱۳- مبدل تکی ۱/۵متری توان برحسب پریود در میرایی‌های مختلف



شکل ۱۴- مبدل تکی ۲ متری در میرایی‌های مختلف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

که برای تعیین بهینه‌ترین میرایی در طیف وسیعی از پریودها، با محاسبه معیار اصلی بیشتر بودن مساحت سطح زیر منحنی توان بر حسب پریود انتخاب می‌شود که نهایتاً میرایی بهینه برای ابعاد مختلف بویه‌ها به‌صورت جدول ۲ است.

جدول ۲ – میرایی‌های بهینه محاسبه شده برای هر مبدل

شعاع بویه‌ها	میرایی بهینه $\frac{N \cdot m}{rad/s}$
۱ متر	۱۲۵۰۰۰
۱/۵ متر	۳۰۰۰۰۰
۲ متر	۳۵۰۰۰۰

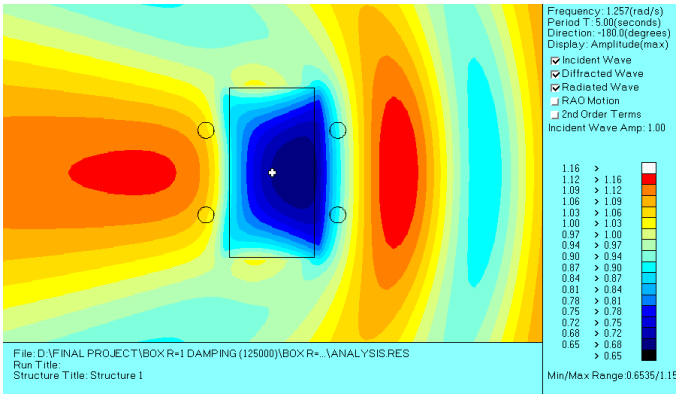
حال این مبدل انرژی‌ها روی موجشکن به صورت دو چیدمان بیان شده در شکل ۷ و شکل ۸ قرار می‌گیرند و شبیه‌سازی انجام می‌شود.

۸ – بحث و بررسی نتایج

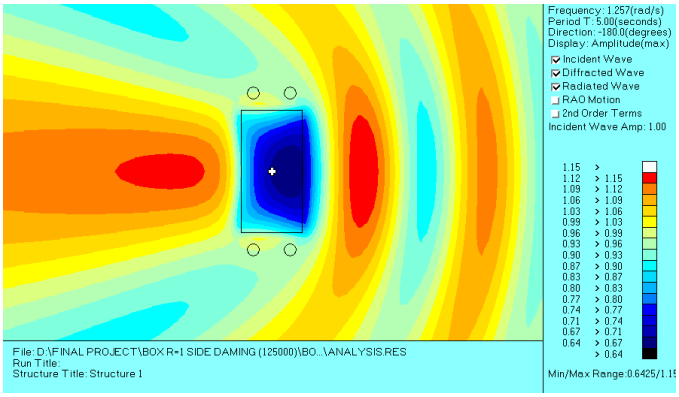
در ابتدا به بررسی تأثیر مبدل انرژی‌ها با ابعاد مختلف بر ضریب انتقال موج می‌پردازیم. برای مقایسه بهتر، همه چیدمان‌ها را در پریود ۵ ثانیه مقایسه می‌کنیم؛ زیرا شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که این پریود نماینده‌ی بدترین‌حالت دینامیکی سازه است و بیشترین تغییرات حرکتی و نامطلوب‌ترین مقدار ضریب انتقال موج در آن رخ می‌دهد. در همین حالت، بیشینه توان قابل‌استخراج از مبدل‌ها نیز حاصل شده است، که امکان ارزیابی هم‌زمان کارایی حفاظتی و انرژی‌گیری را فراهم کرد. همچنین، صحت‌سنجی مدل نشان داد که بیشترین اختلاف عددی–تجربی در همین پریود تنها حدود ۲٪ است؛ بنابراین انتخاب پریود ۵ ثانیه از منظر علمی و کاربردی موجه است.

۸ – ۱ – بررسی ارتفاع موج

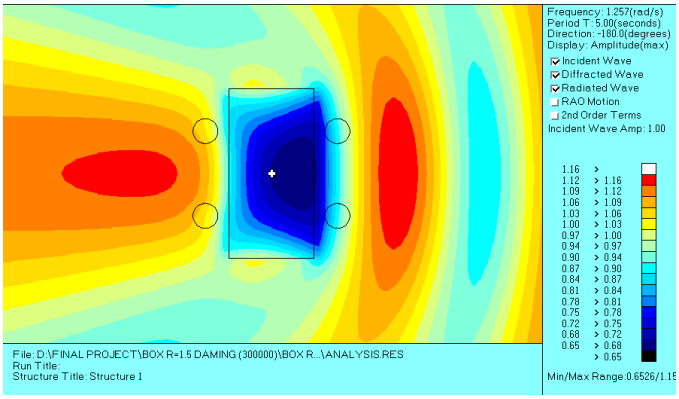
در شکل ۱۵ تا ۲۰ کانتورهای رنگی نمایانگر توزیع دامنه ارتفاع موج در اطراف موج‌شکن شناور را نشان می‌دهد. این کانتورها حاصل تحلیل عددی اندرکنش موج و سازه‌اند و نشان می‌دهند که چگونه موج ورودی در برخورد با سازه دچار پراکندگی[5] و تابش[6] می‌شود. در نواحی آبی‌رنگ، دامنه موج کاهش‌یافته و نشان‌دهندهٔ ناحیه سایه موجی یا کاهش انرژی موج در برخورد با سازه است، درحالی‌که نواحی قرمز و نارنجی، بیشینهٔ دامنه موج را در جلو یا اطراف سازه نشان می‌دهند. این توزیع فضایی بیانگر نحوهٔ انتقال و بازتاب انرژی موج است و برای تحلیل رفتار هیدرودینامیکی سازه، بررسی فشارهای وارد بر آن، و طراحی سیستم‌های میرایی یا تثبیت‌کننده حیاتی است. این کانتورها نقشه‌ای از شدت میدان موج در اطراف سازه ارائه می‌دهند و امکان درک کیفی و کمی از الگوی پراکندگی و تابش امواج را فراهم می‌کنند.



شکل ۱۵ – کانتورهای ارتفاع موج در اطراف موج شکن با مبدل ۱متر و چیدمان ۱



شکل ۱۶ – کانتورهای ارتفاع موج در اطراف موجشکن با مبدل ۱ متر و چیدمان ۲

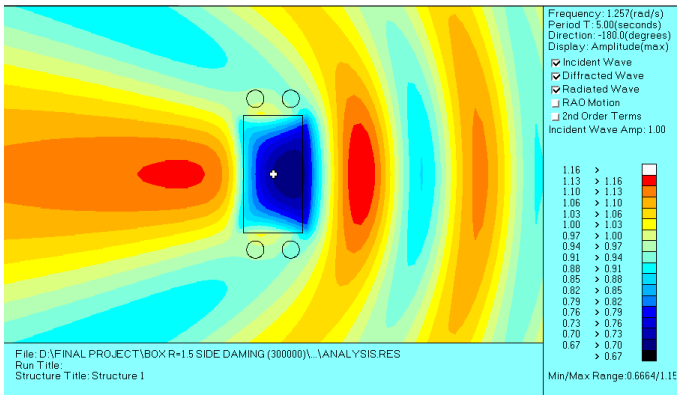


شکل ۱۷ – کانتورهای ارتفاع موج در اطراف موجشکن با مبدل۱/۵ متر و چیدمان ۱

[5] Diffraction

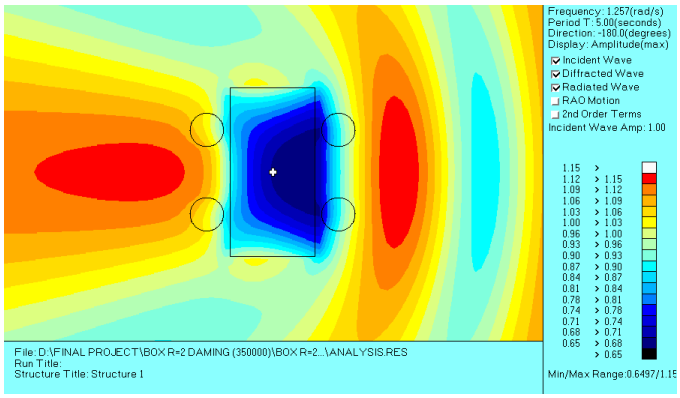
[6] Radiation

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

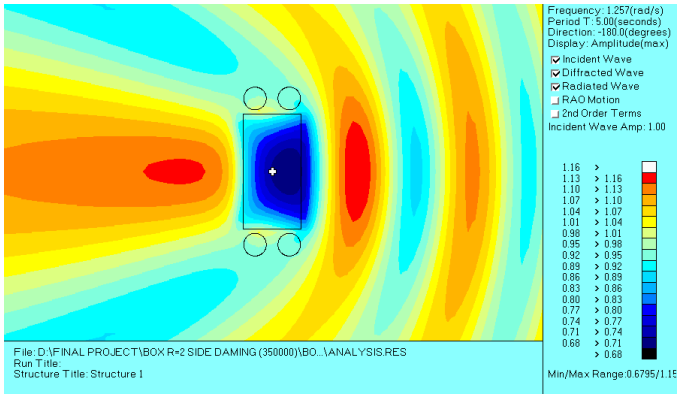


شکل ۱۸- کانتورهای ارتفاع موج در اطراف موج‌شکن با مبدل ۱/۵ متر و چیدمان ۲

زمانی که بویه بزرگتر می‌شود در شکل ۱۷، شکل ۱۸،شکل ۱۹و شکل ۲۰ تاثیر محسوس‌تر می شود. اما به طور کلی مشخص است در سه حالت بررسی شده مبدل انرژی تأثیر چندانی روی ضریب انتقال موج ندارند. بررسی حرکات موج‌شکن نیز حائز اهمیت است.



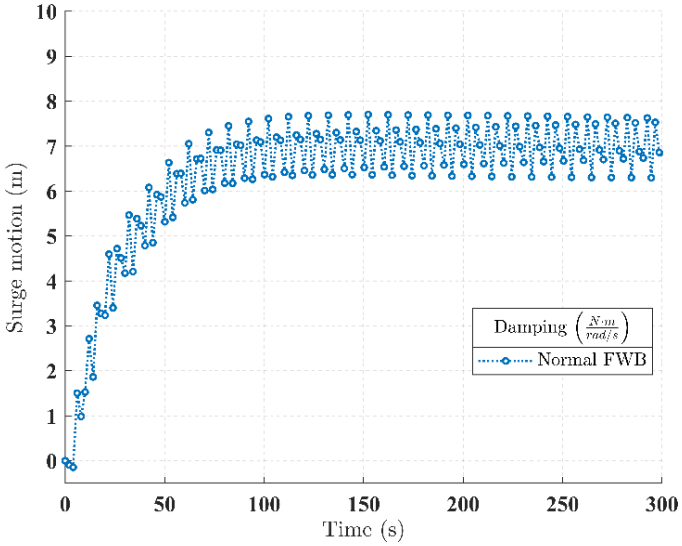
شکل ۱۹- کانتورهای ارتفاع موج در اطراف موج‌شکن با مبدل ۲ متر و چیدمان ۱



شکل ۲۰- کانتورهای ارتفاع موج در اطراف موج‌شکن با مبدل ۲ متر و چیدمان ۲

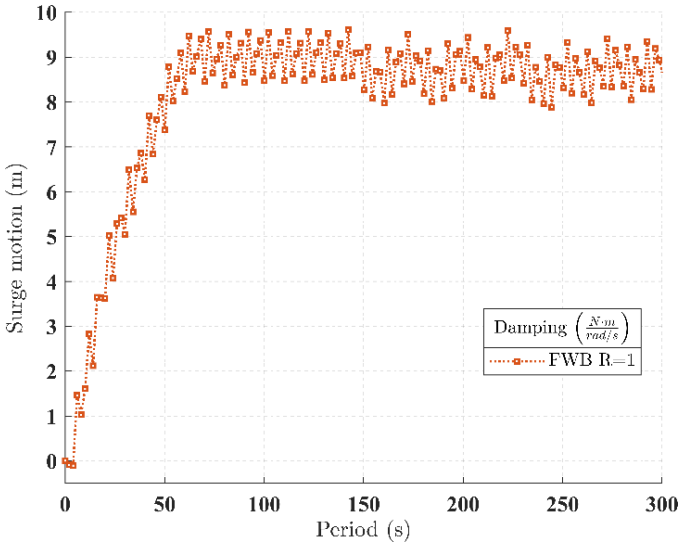
۸ - ۲ - بررسی حرکت سرج

پاسخ انتقالی موج‌شکن در راستای موجِ برخوردی، یعنی حرکت سرج (جابه‌جایی در امتداد محور x) بررسی می‌شود. نمودارها دامنه سرج را بر حسب زمان در یک‌چرخه تحریک نشان می‌دهند و مبنای مقایسه، حالتِ بدون مبدل انرژی است. سپس اثر سه قطر بویه (۱، ۱/۵ و ۲ متر) در دو چیدمان ۱ و ۲ گزارش شده است.



شکل ۲۱- حرکت سرج موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه بدون مبدل

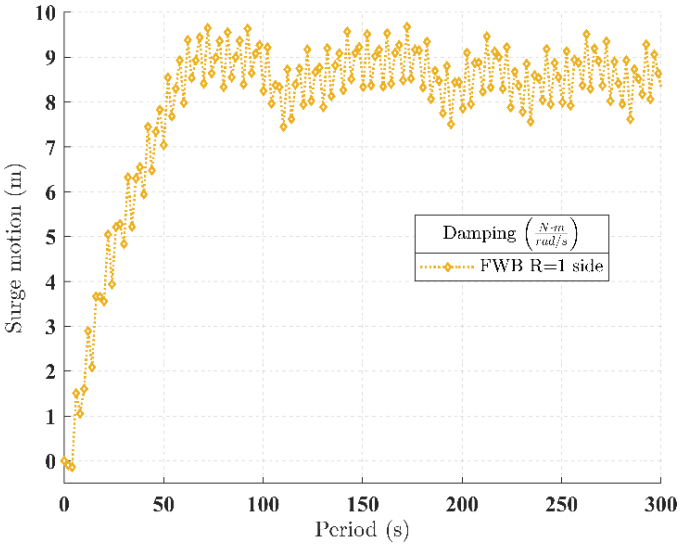
شکل ۲۱ پاسخ سرج موج‌شکن بدون مبدل انرژی را نشان می‌دهد و به‌عنوان خط مبنا برای تمامی مقایسه‌ها به کار می‌رود. دامنه مشاهده‌شده، شاخصِ ترکیب جرم مؤثر سازه و سختی سامانه مهاربندی در این پریود است و برای سنجش درصد افزایش یا کاهش در حالت‌های بعدی استفاده می‌شود.



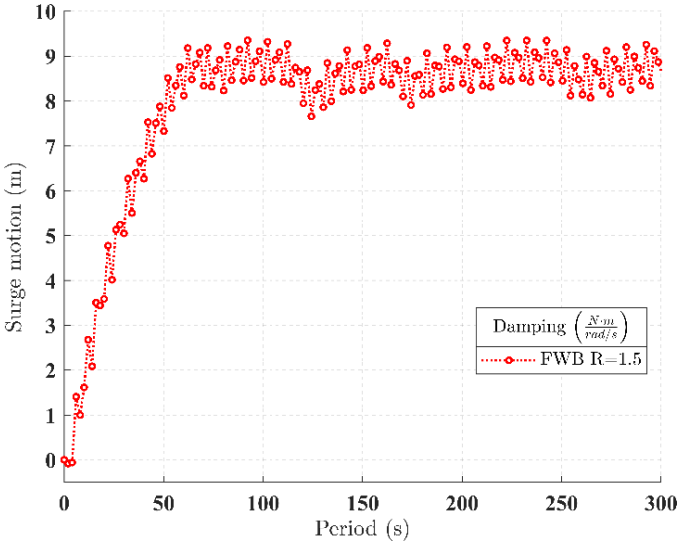
شکل ۲۲- حرکت سرج موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۱ متر و چیدمان ۱

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

با افزودن چهار بویه ۱ متری، تغییر محسوسی در دامنه سرج نسبت به حالت مبنا دیده می‌شود؛ مقایسه مستقیم (شکل ۲۲) و (شکل ۲۳) نشان می‌دهد که دامنه نوسانات بویه در چیدمان ۲ حدود ۵۰ ٪ بیشتر است. اثر چیدمان در این اندازه تغییرات زیادی دارد و پاسخِ انتقالی عملاً تغییر معناداری پیدا می کند که نشان دهنده ۳۳٪ افزایش حرکت سرج است. این نتیجه بیانگر آن است که برهم‌کنش تابشی - پراکندگی بویه‌های کوچک در این پریود، اثر غالبی بر نیروهای موجِ وارده به موج‌شکن دارد.

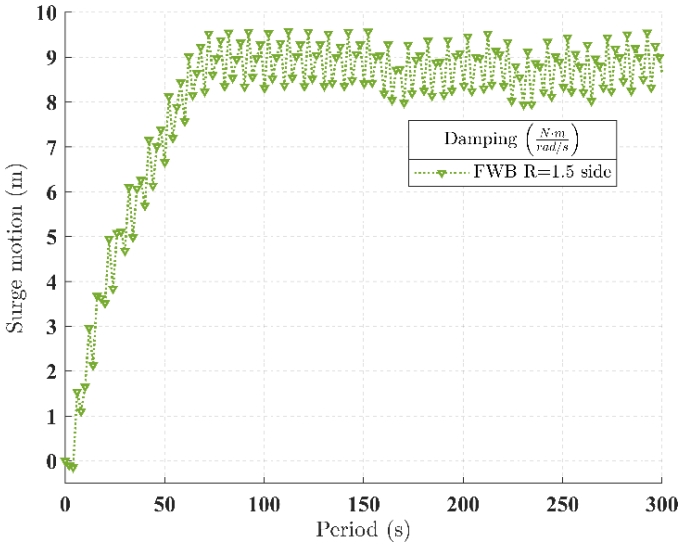


شکل ۲۳- حرکت سرج موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۱ متر و چیدمان ۲

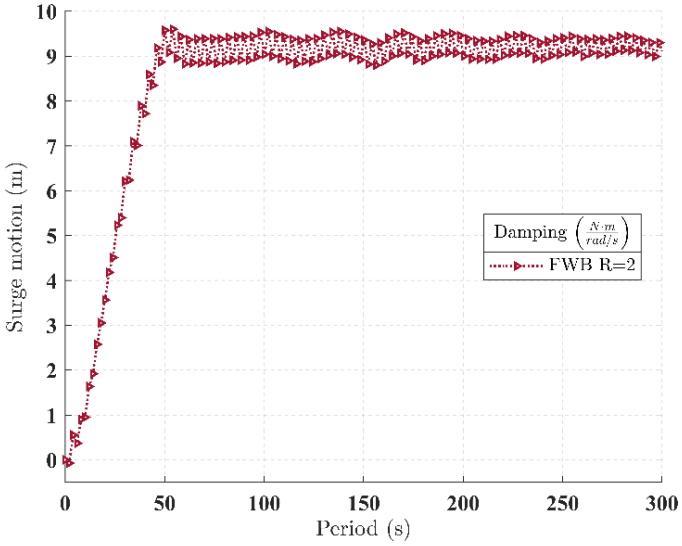


شکل ۲۴- حرکت سرج موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۱/۵ متر و چیدمان ۱

برای بویه ۱/۵ متری (شکل ۲۴ و شکل ۲۵)، تفاوت چیدمان معنادار می‌شود. مطابق نمودارها، چیدمان ۱ دامنه سرج کمتر از چیدمان ۲ دارد و این اختلاف حدود ۵٪ است. تفسیر فیزیکی آن است که در چیدمان ۱، توزیع نیروهای هیدرودینامیکیِ ناشی از موجِ تابشی و موجِ تشعشعیِ بویه‌ها، به‌صورت مؤثرتری با مقاومت مؤثر مهاربند هم‌راستا می‌شود و بخشی از انرژی ورودی به‌صورت میرایی تابشی مستهلک می‌گردد. در این حالت حرکت سرج افزایش داشته و مقدار آن حدود ۳۰٪ است.



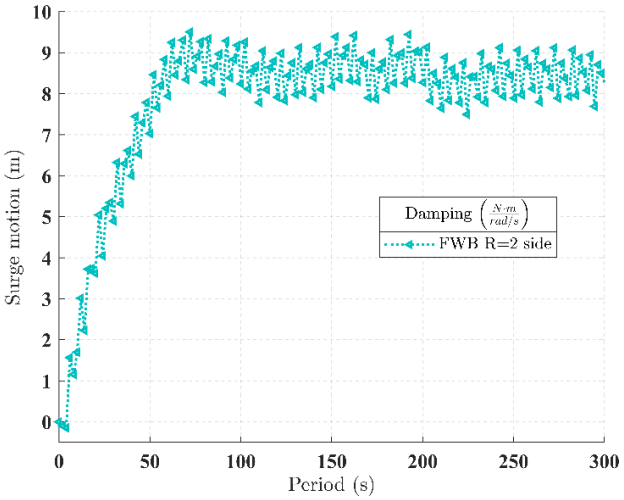
شکل ۲۵- حرکت سرج موجشکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۱/۵ متر و چیدمان ۲



شکل ۲۶: حرکت سرج موجشکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۲ متر و چیدمان ۱

در بویه ۲ متری (شکل ۲۶ و شکل ۲۷)، چیدمان ۲ نسبت به چیدمان ۱ حدود ۴۰٪ دامنه حرکت بیشتر نشان می‌دهد. اما نکته آن است که در چیدمان ۱ کمترین نوسانات را داریم. حرکت سرج هم در این حالت حدود ۳۰٪ است.

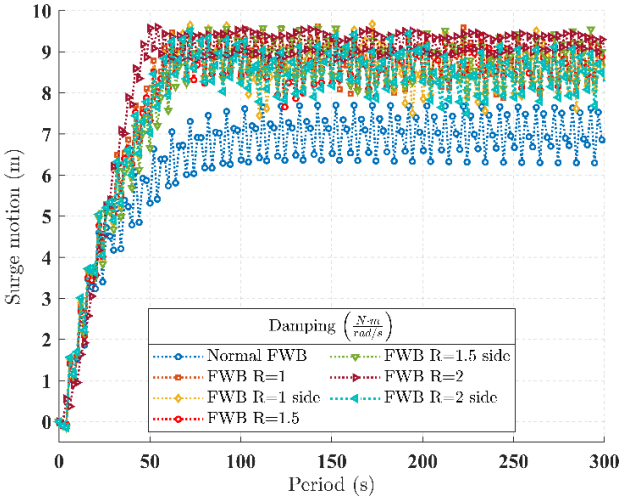
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]



شکل ۲۷- حرکت سرج موجشکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۲ متر و چیدمان ۲

مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهد که در بویه ۱ متری، اثر چیدمان ناچیز بوده و در بویه ۱/۵ متری، چیدمان ۱ بهتر بوده و به کاهش حدود ۵٪ نسبت به چیدمان ۲ ایجاد می کند. بویه ۲ متری در چیدمان ۲ بهتر عملکرده است و حدود ۳٪ نسبت به چیدمان ۱حرکت سرج کاهش داشته است.

هم‌زمان با افزایش قطر بویه، نوسانات کوچک سرج کاهش اما جابه‌جایی انتقالی کل تمایل به افزایش دارد؛ نشانه‌ای از تغییر تراز نیروی مؤثر تابشی و بازتوزیع انرژی ورودی در سامانه سازه - مبدل - مهاربند دارد.

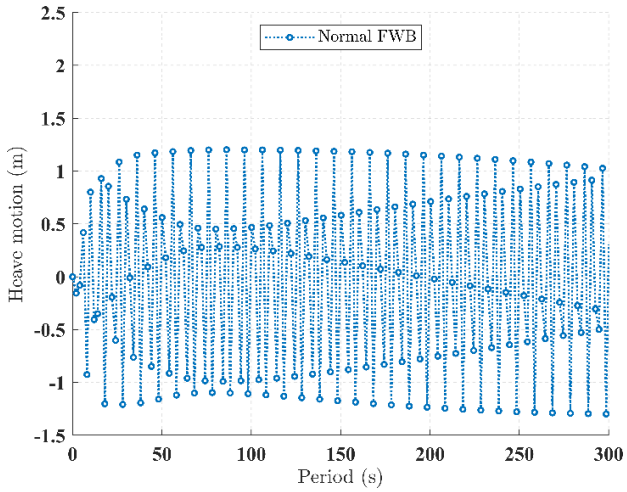


شکل ۲۸- مقایسه حرکت سرج در پریود ۵ ثانیه

شکل ۲۸ مقایسه همه حالت‌ها باحالت بدون مبدل را نشان می‌دهد. نتیجه اصلی این است که نصب مبدل‌ها صرف‌نظر از قطر و آرایش به طور میانگین باعث افزایش حدود ۲۵٪ در حرکت سرج می‌شود. این افزایش، بهای دینامیکی الحاق مبدل‌ها به موجشکن است و باید در طراحی مهاربند و انتخاب چیدمان مدنظر قرار گیرد. بااین‌حال، انتخاب هوشمندانه قطر بویه و چیدمان می‌تولند این افزایش را مدیریت کند؛ به‌ویژه برای مبدل ۱/۵ متر در چیدمان ۱ و مبدل ۲ متر در چیدمان ۲، پاسخ‌ها به مقادیر نسبتاً کنترل‌شده نزدیک می‌شوند.

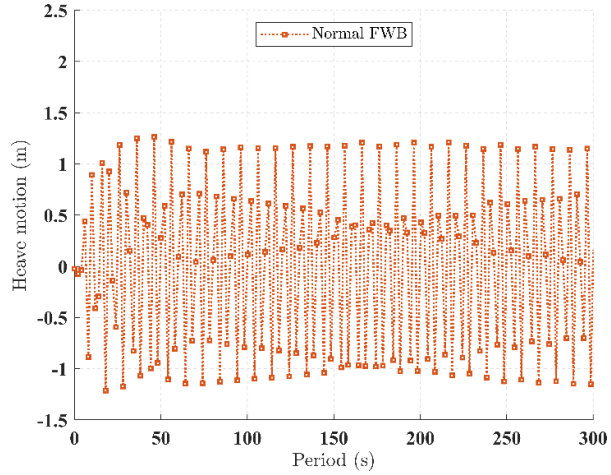
۸ - ۳- بررسی حرکت هیو

حرکت هیو موجشکن شناور جابه‌جایی عمودی سازه در پریود موج ۵ ثانیه بررسی می‌شود. خط مبنا، پاسخ سازه در حالت بدون مبدل انرژی است؛ سپس اثر سه قطر بویه مبدل (۱، ۱/۵ و ۲ متر) در دو چیدمان ۱ و ۲ مقایسه می‌شود تا میزان کاهش یا افزایش هیو روشن گردد.



شکل ۲۹- حرکت هیو موجشکن در پریود ۵ ثانیه بدون مبدل

شکل ۲۹ دامنه و الگوی زمانیِ هیوِ موجشکن بدون مبدل را نشان می‌دهد و مبنای ارزیابی درصد تغییر در حالت‌های بعدی است. این نمودار، پاسخ عمودی سازه را تحت تحریک موج منظم با پریود ۵ ثانیه ثبت می‌کند و معیار مقایسه برای تمامی ترکیبات قطر و چیدمان است.

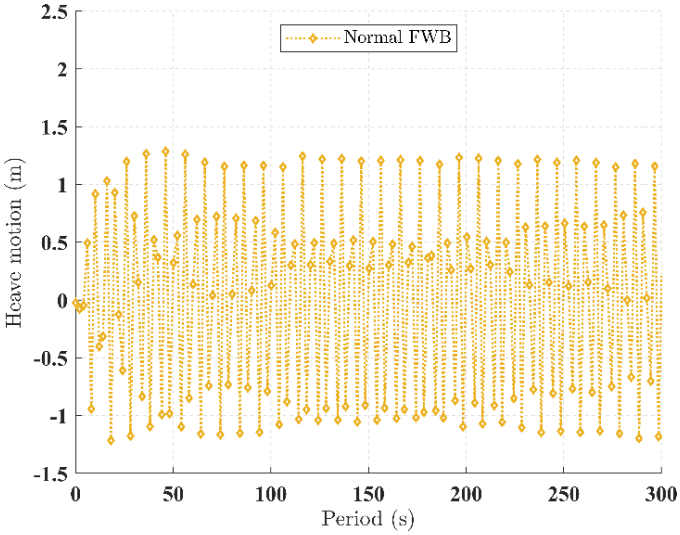


شکل ۳۰- حرکت هیو موجشکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۱ متر و چیدمان ۱

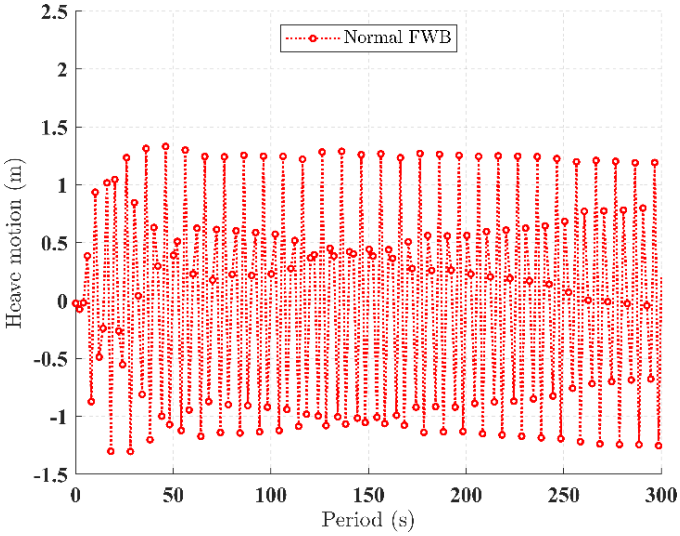
افزودن چهار بویه ۱ متری(شکل ۳۰ و شکل ۳۱) در چیدمان ۱ و در چیدمان ۲ تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در دامنه هیو نسبت به حالت مبنا ایجاد نکرده است. به عبارت دقیق‌تر، پاسخ عمودی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

سـازه نسـبت به جابه‌جایی موج در این اندازه از بویه تقریباً خنثی می‌ماند و تفاوت معناداری بین دو چیدمان مشاهده نمی‌شود. این نتیجه نشـان می‌دهد که در این مقیاس، بازتوزیع میدان موج پیرامون سازه برای تغییر محسوسِ هیو کافی نیست.

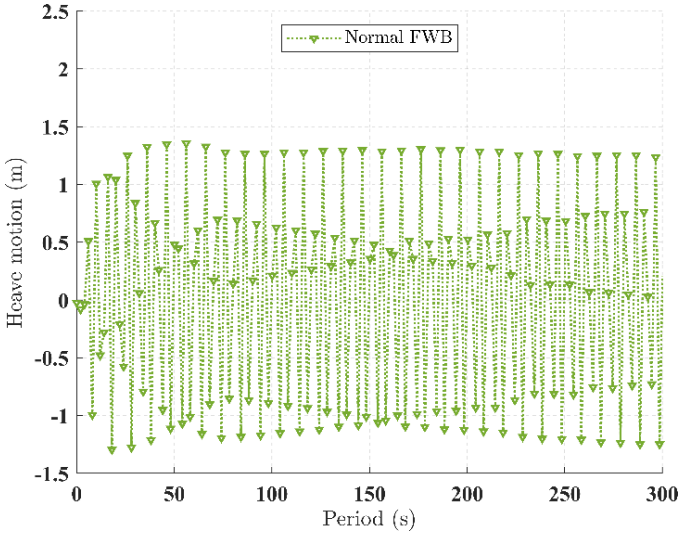


شکل ۳۱- حرکت هیو موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۱ متر و چیدمان ۲

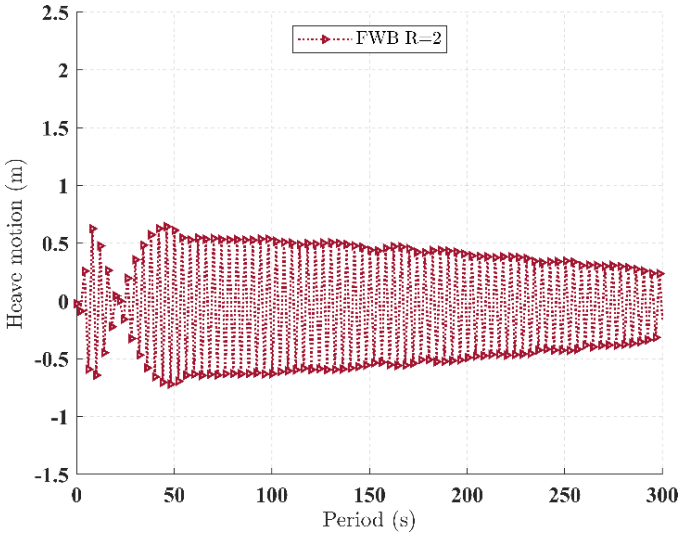


شکل ۳۲- حرکت هیو موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۱/۵ متر و چیدمان ۱

برای بویه ۱/۵ متری(شکل ۳۲ و شکل ۳۳) نیز، هم در چیدمان ۱ و هم چیدمان ۲، تغییر چشمگیری در هیو مشاهده نمی‌شود و دامنه‌ها به خط مبنا نزدیک باقی می‌مانند؛ بنابراین، صرف افزایش اندازه از ۱ به ۱/۵متر به کاهش برجسته هیو منجر نمی‌شود.



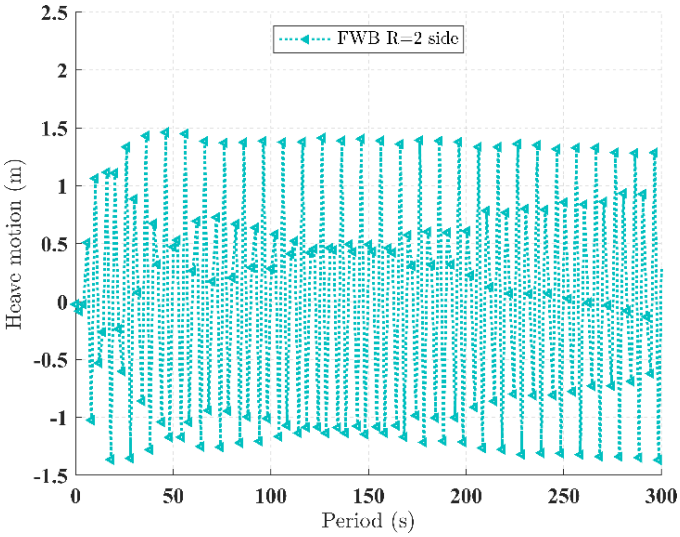
شکل ۳۳- حرکت هیو موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۱/۵ متر و چیدمان ۲



شکل ۳۴- حرکت هیو موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۲ متر و چیدمان ۱

در بویه ۲ متری(شـکل ۳۴ و شـکل ۳۵)، اختلاف چیدمان‌ها معنادار می‌شـود. چیدمان ۱ نسـبت به چیدمان ۲ کاهش شـدیدی در دامنـه هیو نشـــان می‌دهد؛ بزرگی این کاهش در حدود ۵۰٪ اسـت. این نتیجه حاکی از آن اسـت که در چیدمان ۱، بزرگ شـدن و افزایش وزن بویه‌ها با موج و الگوی پراکندگی پیرامون سـطح آب سـازه به‌گونه‌ای سـازمان می‌یابد که نوسـان عمودی مؤثرِ سـازه به طور محسـوس تضـعیف می‌شـود، درحالی‌که در چیدمان ۲ چنین هم‌خطی کارآمدی شکل نمی‌گیرد.

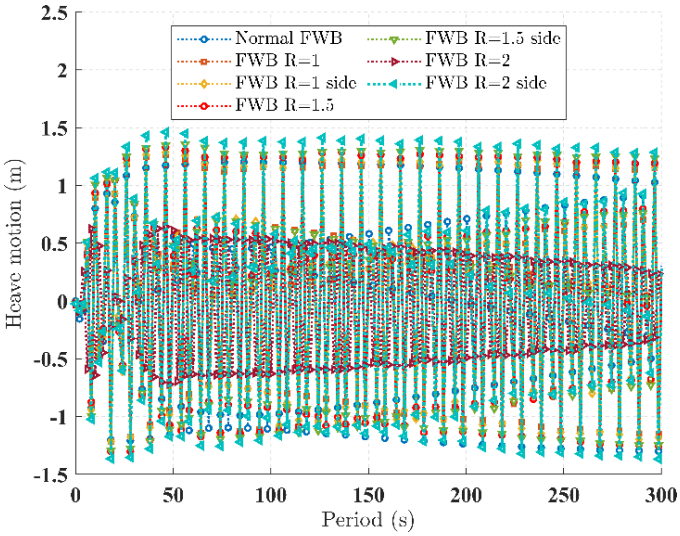
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]



شکل ۳۵- حرکت هیو موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۲ متر و چیدمان ۲

مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهد که بویه ۱ متری، اثر بویه بر هیو ناچیز و غیرحساس به چیدمان است. بویه ۱/۵ متری، پاسخ هیو نزدیک به مبنا باقی می‌ماند و تغییر معناداری دیده نمی‌شود. بویه ۲ متریچیدمان ۱ موجب کاهش حدود٪۵۰ نسبت به چیدمان ۲ می‌شود و تنها حالت دارای کاهش محسوس است.

این روند دلالت می‌کند که صرف بزرگ‌تر کردن بویه کافی نیست؛ نحوه استقرار آن‌ها بر مسیر انتقال انرژی موج و شکل‌گیری سایه موجی[۷] مؤثر است و می‌تواند هیو را به طور هدفمند کنترل کند.

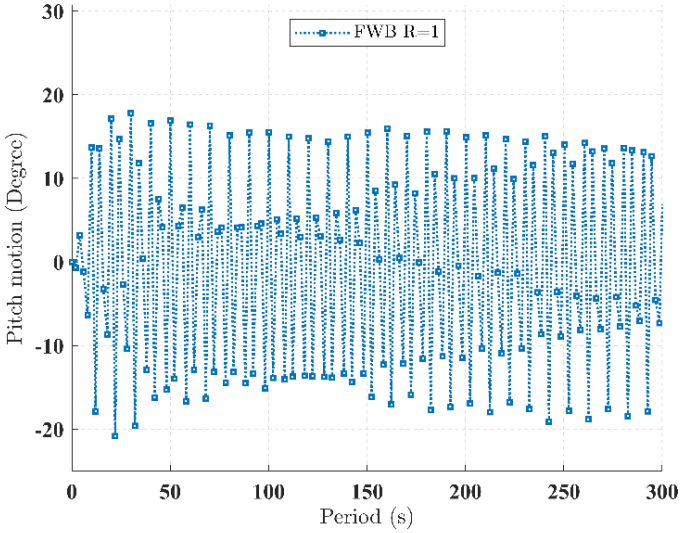


شکل ۳۶- مقایسه حرکت هیو در پریود ۵ ثانیه

شکل ۳۶ جمع‌بندی همه حالت‌ها را در قیاس با شکل ۲۹ (بدون مبدل) ارائه می‌کند. نتیجه کلیدی این است که تنها ترکیبِ بویه ۲ متری در چیدمان ۱ هیو را به طور معنادار کاهش می‌دهد؛ سایر ترکیبات اعم از قطر ۱ و ۱/۵ متر در هر دو چیدمان، و بویه ۲ متری در چیدمان ۲ تأثیر چشمگیری بر هیو ندارند؛ بنابراین، برای کنترل هیو در پریود ۵ ثانیه، گزینش چیدمان مناسب حداقل به‌اندازه ابعاد بویه اهمیت دارد.

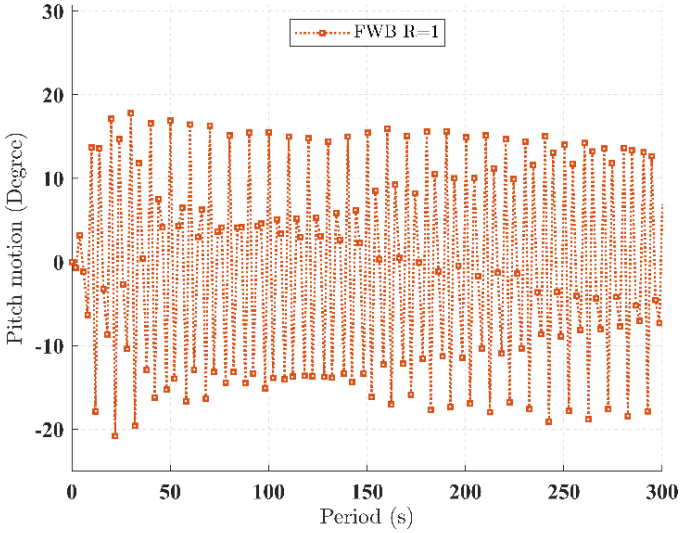
۸ - ۴ - بررسی حرکت پیچ

در این بخش، حرکت پیچ موج‌شکن شناور (چرخش حول محور عرضی) در پریود موج ۵ ثانیه بررسی می‌شود؛ حالت بدون مبدل به‌عنوان خط مبنا در نظر گرفته شده و سپس اثر سه قطر بویه مبدل (۱، ۱/۵ و ۲ متر) در دو چیدمان ۱ و ۲ ارزیابی می‌شود.



شکل ۳۷- حرکت پیچ موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه بدون مبدل

شکل ۳۷ پاسخ پیچ موج‌شکن بدون مبدل انرژی را نمایش می‌دهد و معیار سنجش درصد کاهش یا افزایش در حالت‌های بعدی است. این خط مبنا برای تمام مقایسه ها استفاده می‌شود.

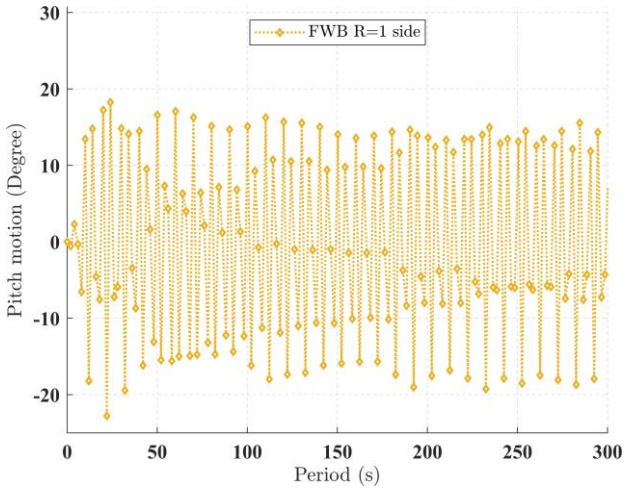


شکل ۳۸- حرکت پیچ موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۱ متر و چیدمان ۱

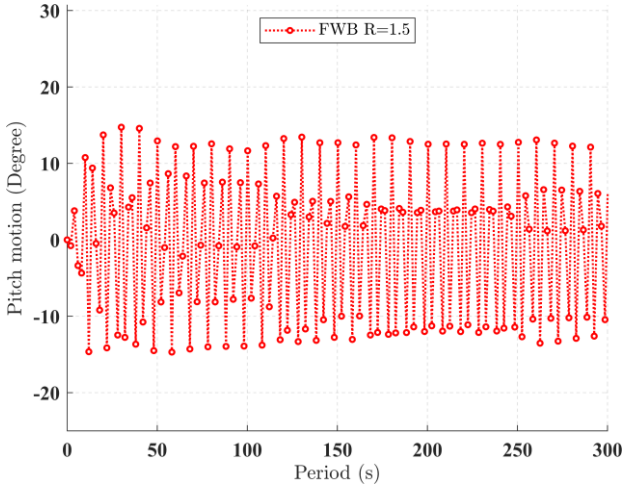
[7] Wave Shadow

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

افزودن چهار بویه ۱ متری(شکل ۳۸ و شکل ۳۹) در چیدمان ۱ و در چیدمان ۲ تغییر معناداری در دامنه پیچ نسبت به حالت مبنا ایجاد نکرده است؛ بنابراین در این مقیاس، تغییر الگوی میدان موج پیرامون سازه برای شکل‌دهی گشتاور مهارکننده پیچ کافی نیست و پاسخ عملاً نسبت به چیدمان بی‌تفاوت می‌ماند.

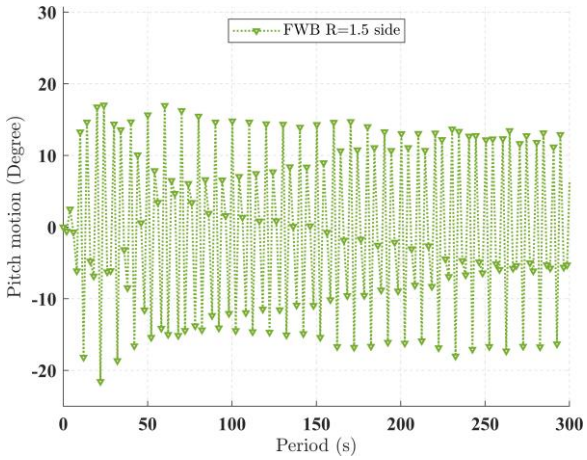


شکل ۳۹- حرکت پیچ موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۱ متر و چیدمان ۲

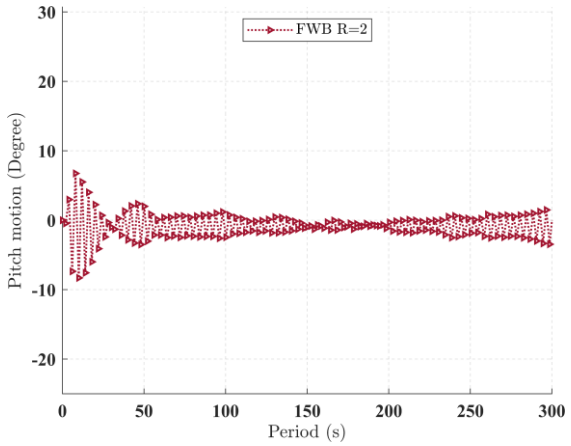


شکل ۴۰- حرکت پیچ موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۱/۵ متر و چیدمان ۱

برای بویه ۱/۵ متری(شکل ۴۰ و شکل ۴۱)، چیدمان ۱ نسبت به چیدمان ۲ حدود ۱۵٪ کاهش در دامنه پیچ نشان می‌دهد. این تفاوت را می‌توان به توزیع مناسب‌تر فشار هیدرودینامیکی و هم‌خطی فاز گشتاورهای مخالفِ پیچ در چیدمان ۱ نسبت داد که در نهایت به تضعیف محسوس نوسان دورانی می‌انجامد.

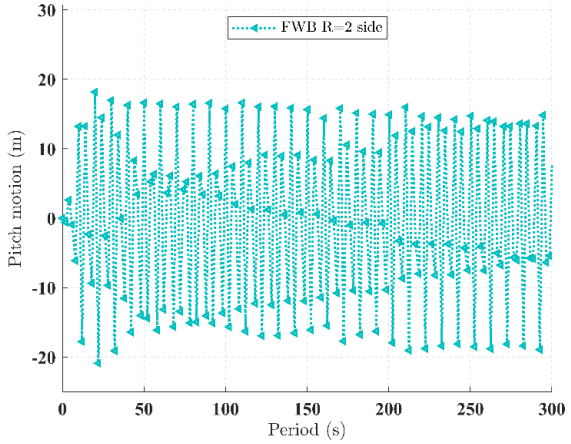


شکل ۴۱- حرکت پیچ موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۱/۵ متر و چیدمان ۲



شکل ۴۲- حرکت پیچ موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۲ متر و چیدمان ۱

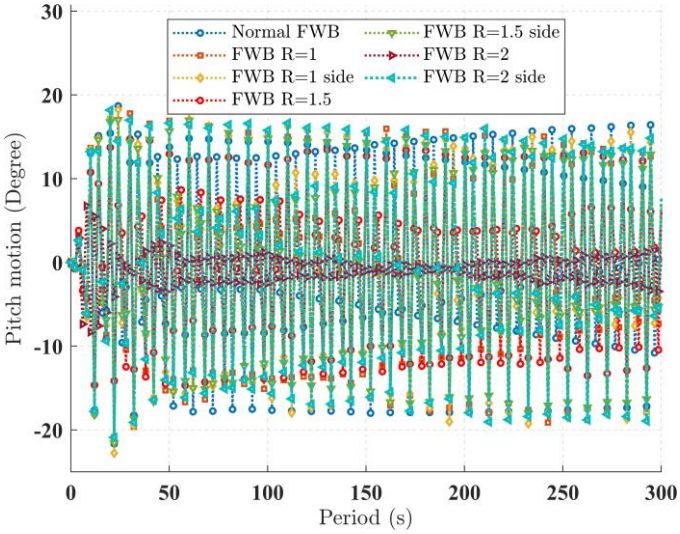
در بویه ۲ متری(شکل ۴۲ و شکل ۴۳)، اختلاف چیدمان‌ها چشمگیر می‌شود. چیدمان ۱ نسبت به چیدمان ۲ حدود ٪۷۰ کاهش در دامنه پیچ دارد. این نشان می‌دهد که در این ابعاد، چگونگی آرایش بویه‌ها و مکان‌یابی نسبت به جبهه موج‌نقش تعیین‌کننده‌ای درشکل‌گیری گشتاورهای بازدارنده داشته و می‌تواند پاسخ دورانی را به طور عمده مهار کند.



شکل ۴۳- حرکت پیچ موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه با مبدل ۲ متر و چیدمان ۲

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهد که بویه ۱ متری، اثر بویه و چیدمان بر پیچ ناچیز است. در بویه ۱/۵ متری، چیدمان ۱ نسبت به ۲، حدود٪۱۵ کاهش ایجاد می‌کند و در بویه ۲ متری چیدمان ۱ نسبت به ۲، حدود ٪۷۰ کاهش ایجاد می‌کند. این روند تأکید می‌کند که برای مهار پیچ، آرایش مکانی بویه‌ها هم‌تراز با افزایش ابعاد تعیین‌کننده است و صرف بزرگ‌تر شدن بویه بدون چیدمان مؤثر، الزاماً به کاهش معنی‌دار پیچ منتهی نمی‌شود.



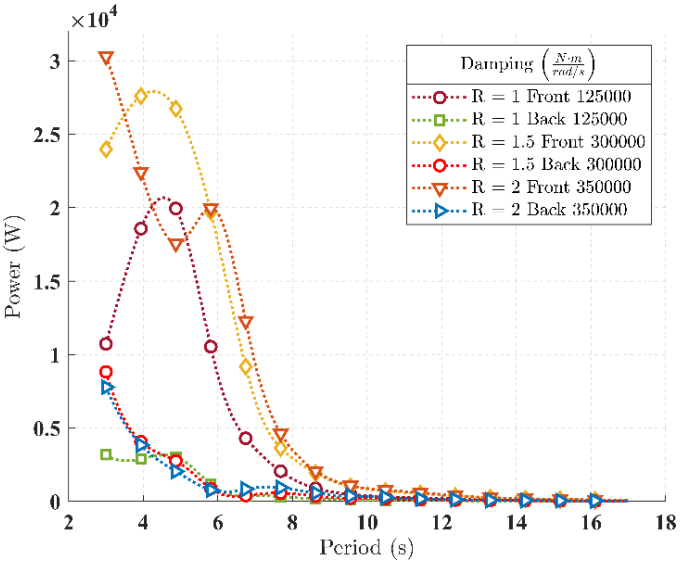
شکل ۴۴- مقایسه حرکت پیچ موج‌شکن در پریود ۵ ثانیه

شکل ۴۴ مقایسه نهایی همه حالات نسبت به شکل ۳۷ (بدون مبدل) را ارائه می‌کند. بر پایه این جمع‌بندی، بویه ۱/۵ متری در چیدمان ۱ و بویه ۲ متری در چیدمان ۱ به ترتیب حدود ٪۱۵ و حدود٪۷۰ کاهش در حرکت پیچ نسبت به حالت بدون مبدل ایجاد می‌کنند؛ سایر ترکیبات کاهش معناداری ندارند.

نتایج حاصل نشان می‌دهد که در چیدمان ۱، باوجود افزایش حدود ۲۵ درصدی مؤلفهٔ سرج نسبت به حالت بدون مبدل، نصب مبدل‌های انرژی می‌تواند از طریق کاهش پایدار مؤلفهٔ پیچ و کاهش قابل‌توجه مؤلفهٔ هیو در ترکیب بهینه (بویه ۲ متری و چیدمان ۱) بااین‌حال، باید توجه داشت که موارد استثنایی مانند کاهش حدود ۱۳ درصدی سرج در بویهٔ ۱/۵ متری و چیدمان ۱ نیز مشاهده شده است.

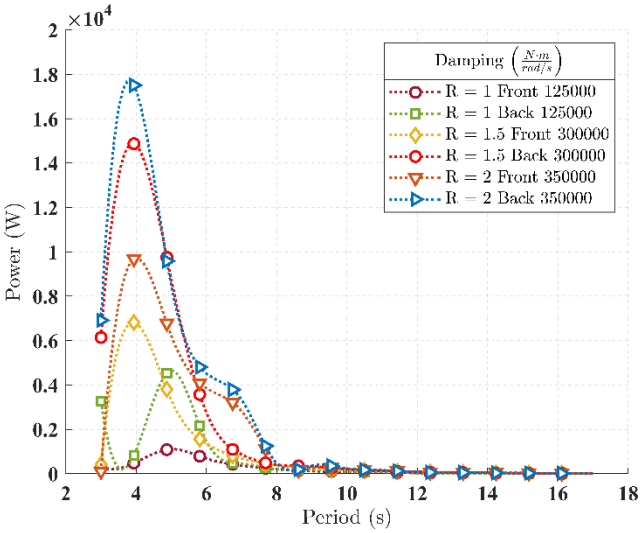
۸ - ۵ - بررسی توان تولیدی مبدل‌ها

به‌منظور اجتناب از تکرار و ارائه جمع‌بندی قابل‌اتکا برای گزینش مبدل‌ها، نتایج توان - پریود همه ترکیبات در هر چیدمان به‌صورت نمودار تجمیعی نمایش‌داده‌شده است. معیار مقایسه، مساحت زیر منحنی توان بر حسب پریود است؛ بدین معنا که گزینه‌ای کارآمدتر است که در بازه بررسی‌شده، توان تجمعی بیشتری تولید کند (و نه صرفاً قله موضعی بزرگ‌تری داشته باشد). این همان معیاری است که در مرحله تعیین میرایی‌های بهینه برای ابعاد مختلف بویه نیز به‌کاررفته و در جدول متناظر گزارش شده است.



شکل ۴۵- توان بر حسب پریود برای مبدل‌ها- چیدمان ۱

شکل ۴۵ مقایسه تجمیعی مبدل‌ها را در چیدمان ۱ نشان می‌دهد. با محاسبه مساحت زیر منحنیِ هر گزینه، نتیجه می‌شود که مبدل ۱/۵ متری با میرایی ۳۰۰۰۰۰ بیشترین بازدهی تجمعی را در این چیدمان ارائه می‌کند و از سایر گزینه‌ها پیشی می‌گیرد؛ بنابراین، برای آرایش طولی (چیدمان ۱)، این ترکیب از منظر انرژی گزینه برتر است. برای سنجش نقش آرایش، همین مقایسه تجمیعی برای چیدمان ۲ نیز تکرار شده است تا نشان داده شود انتخاب بهینه ممکن است با تغییر نحوه استقرار مبدل‌ها تغییر کند. مبنای قضاوت همچنان مساحت زیر منحنی توان - پریود است.



شکل ۴۶- توان بر حسب پریود برای مبدل‌ها- چیدمان ۲

شکل ۴۶ نتایج مبدل‌ها را در چیدمان ۲ ارائه می‌کند. مطابق محاسبه مساحت زیر منحنی، مبدل ۲ متری با میرایی ۳۵۰۰۰۰ بیشترین بازدهی تجمعی را نشان می‌دهد؛ ازاین‌رو در چیدمان ۲، این ترکیب انتخاب ارجح به شمار می‌رود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

۹ - نتیجه‌گیری

سیستم ترکیبی موج‌شکن شناور - مبدل انرژی در این پژوهش به‌عنوان زیرساختی نو برای دو هدف هم‌زمانِ کاهش تلاطم ساحلی و تولید انرژی بررسی شد. نتایج نشان داد عملکرد سامانه به طور معناداری به چیدمان مبدل‌ها و ابعاد بویه وابسته است و با انتخاب ترکیب مناسب می‌توان میان پایداری حرکتی و بازده انرژی موازنه‌ای کارآمد برقرار کرد.

از منظر انرژی، مقایسه تجمیعیِ توان در بازه پریود نشان داد که در چیدمان ۱، بویه ۱/۵ متری و در چیدمان ۲، بویه ۲ متری بالاترین بازدهی را ارائه می‌کنند. در پریود ۵ ثانیه (به‌عنوان حالت مرجع) توان خروجی هر موج‌شکن مجهز به چهار مبدل می‌تواند به حدود ۵۶ کیلووات برسد.

از منظر پاسخ‌های حرکتی، نصب مبدل‌ها به‌طورکلی موجب حدود ۲۵٪ افزایش سرج نسبت به حالت بدون مبدل می‌شود؛ بااین‌حال، بویه ۱/۵ متری در چیدمان ۱ یک استثنای سودمند ایجاد می‌کند و سرج را حدود ۱۳٪ کاهش می‌دهد. در حرکت هیو، تنها بویه ۲ متری در چیدمان ۱ کاهش حدود ۵۰٪ (نسبت به چیدمان ۲ و نیز نسبت به خط مبنا) نشان می‌دهد و سایر ترکیبات اثر معناداری ندارند. در حرکت پیچ، بویه ۱/۵ متری در چیدمان ۱ حدود ۱۶٪ و بویه ۲ متری در چیدمان ۱ حدود ۷۲٪ کاهش نسبت به حالت بدون مبدل ثبت کرده‌اند؛ بدین معنا چیدمان ۱ برای کنترل نوسان دورانی آشکارا برتر است. از سوی دیگر، در سنجش ضریب انتقال موج نیز کمترین مقدار عملاً به بویه ۱/۵ متری و چیدمان ۱ تعلق دارد؛ بنابراین این ترکیب ضمن حفظ کارکرد حفاظتی موج‌شکن، از حیث انرژی و حرکات نیز متوازن عمل می‌کند.

برآیند این شواهد نشان می‌دهد که اگر کنترل حرکات پیچ یا هیو اولویت نخست باشد، چیدمان ۱(به‌ویژه با بویه ۲ متری) گزینه مناسب‌تری است؛ و اگر بازده انرژی ملاک اصلی باشد، بویه ۱/۵ متر در چیدمان ۱ و بویه ۲ متر در چیدمان ۲ به ترتیب اولویت دارند. باتوجه‌به گرایش کلی سرج به افزایش، توصیه می‌شود بهینه‌سازی چیدمان و مهاربندی به‌گونه‌ای انجام گیرد که منافع حاصل از کاهش پیچ و هیو و تولید انرژی بدون تحمیل ریسک‌های جدید سازه‌ای حفظ شود.

در مجموع، استفاده از مبدل‌های انرژی روی موج‌شکن با تمرکز بر چیدمان ۱ و انتخاب سنجیده ابعاد بویه از منظر فنی و بهره‌برداری موجه است و می‌تواند مبنایی عملی برای توسعه موج‌شکن‌های دوکاره در پروژه‌های ساحلی و بندری فراهم آورد.

۱۰ - مراجع

1- Ning, D., et al., (2016), *Hydrodynamic performance of a pile-restrained WEC-type floating breakwater: An experimental study*, Journal, Vol.95, p.531–541. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.057

2- Rezaei Mazik, A., et al., (2017), *Pattern of Wave Height Variations Around a Floating Pontoon Breakwater*, Journal, Vol.16, p.29–45. https://doi.org/10.22113/jmst.2017.50586

3- Gotoh, H. and A. Khayyer. (2018), *On the state-of-the-art of particle methods for coastal and ocean engineering*, Journal, Vol.60, p.79–103. https://doi.org/10.1080/21664250.2018.1436243

4- Marchesi, E., M. Negri, and S. Malavasi. (2020), *Development and analysis of a numerical model for a two-oscillating-body wave energy converter in shallow water*, Journal, Vol.214, p.107765. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107765

5- Nemati, S., M. Bakhtiari, and M. Azami Ali Abady. (2021), *Investigation of Wave-Structure Interaction in Floating Breakwaters*, Journal, Vol.5, p.8–21. https://doi.org/10.22111/JHE.2022.42343.1079

6- Abazari, A., M.R. Zareei, and S. Poursheikhali. (2021), *Determination of the power resonant frequency of an OWC converter based on the RLC circuit analytical approach*, Journal, Vol.16, p.93–105. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23456000.2021.16.0.12.7

7- Rajabi, M. and H. Ghassemi. (2021), *Hydrodynamic Performance Improvement of Double-Row Floating Breakwaters by Changing the Cross-Sectional Geometry*, Journal, Vol.2021, p.1–21. https://doi.org/10.1155/2021/2944466

8- Gallutia, D., et al., (2022), *Recent advances in wave energy conversion systems: From wave theory to devices and control strategies*, Journal, Vol.252, p.111105. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111105

9- Ghafari, H.R., H. Ghassemi, and A. Neisi. (2022), *Power matrix and dynamic response of the hybrid Wavestar-DeepCwind platform under different diameters and regular wave conditions*, Journal, Vol.247, p.110734. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110734

10- Yousefi, S., A. Mahmoudi, and S. Hajizadeh. (2023), *Investigating the effect of using a Lateral duct in the body of a floating breakwater by numerical method*, Journal, Vol.18, p.89–104. http://doi.org/10.52547/marineeng.18.37.89

11- Dorostkar, R., A. Abazari, and A. Ebrahimi. (2022), *Energy harvesting through an integrated design of a semi-submersible offshore platform with point absorber wave energy converters*, Journal, Vol.7, p.27–36. https://doi.org/10.22034/ijcoe.2022.166735

12- Yousefi, S., A. Mahmoudi, and S. Hajizadeh. (2023), *Numerical Investigation into Effect Section Geometry parameters of Floating Breakwaters in single and double rows on its Hydrodynamics*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

performance, Journal, Vol.19, p.35–49. http://doi.org/10.61186/marineeng.19.39.35
13- Azami, M., M. Bakhtiari, and H. Bahrami. (2023), *Numerical investigation of the effect of geometric and hydrodynamic parameters of waves on the performance of rectangular floating pontoon breakwater structure*, Journal, Vol.3, p.42–60. https://doi.org/10.22126/atwe.2023.9049.1049
14- Jokar, H., A. Abazari, and R. Dorostkar. (2024), *Performance evaluation of a hybrid system of dhow ship and wave energy converter for power generation*, Journal, Vol., p. https://doi.org/10.22044/rera.2024.13737.1264
15- Kamal, F., A. Abazari, and R. Dorostkar. (2024), *The effect of flap dimension and wave angle on the dynamic response and extracted power of the hybrid system of offshore wind turbine and surge oscillating converter*, Journal, Vol.20, p.1–12. http://doi.org/10.61186/marineeng.20.42.1
16- Abazari, A., (2023), *Dynamic response of a combined spar-type FOWT and OWC-WEC by a simplified approach*, Journal, Vol.4, p.66–77. https://doi.org/10.22044/rera.2022.11768.1109
17- Gharechae, A., A. Abazari, and K. Soleimani. (2024), *Performance assessment of a combined circular aquaculture cage floater and point absorber wave energy converters*, Journal, Vol.300, p.117239. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117239
18- Zhou, B., et al., (2024), *Experimental study of a WEC array-floating breakwater hybrid system in multiple-degree-of-freedom motion*, Journal, Vol.371, p.123694.
https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123694
19- Alireza Aghalari, A.P., Morteza Shahrouyi. (2019), *Specialized Book Series on Ansys Workbench: Analysis of Marine Floating Structures Using Aqwa and Ansys Workbench Software*, Journal, Vol., p.242.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]