J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 48, 2026. (1-20)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

A Comparative Study of the Hydrodynamic Performance of Floating Breakwaters with F-Shaped and Rectangular Cross-Sections

Maryam Taghizadeh [1], Meisam Qorbani Fouladi [2*] Arefeh Emami[3], Pouya Khoshnazari[4]

[1] *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and technology of Mazandaran, Iran.* *Taghizadeh@Mazust.ac.ir*

[2] *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and technology of Mazandaran, Iran .* *M.Qorbani@Mazust.ac.ir*

[3] *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Hormozgan, Iran,* *emami@hormozgan.ac.ir*

[4] *Undergraduate student, Department of Civil Engineering, University of Science and technology of Mazandaran.* *poya.khoshnazari@mazust.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 24 Sep 2025
Last modification: 6 Jan 2026
Accepted: 6 Jan 2026
Available online: 7 Jan 2026

Article type:
Research paper

Keywords:
Floating Breakwater
Dynamic Analysis
Frequency Response of Structure
Wave Energy Control

ABSTRACT

With the expanding utilization of marine resources and the growing volume of maritime transportation, floating breakwaters have gained significant attention as efficient alternatives to conventional fixed structures, due to advantages such as mobility, reduced construction and installation costs, and minimized environmental impacts. Hydrodynamic modeling of these structures is typically conducted in both two-dimensional and three-dimensional frameworks. While two-dimensional models offer faster computations but are limited in applicability, three-dimensional models-despite their higher computational demand-enable a more comprehensive and accurate assessment of complex wave–structure interactions. In this study, a three-dimensional hydrodynamic model was developed to compare the performance of floating breakwaters with F-shaped and rectangular cross-sections under a range of geometric and hydrodynamic conditions. Simulations were performed in both frequency and time domains, focusing on key parameters including draft depth, structure length, and wave frequency. Fundamental hydrodynamic coefficients, namely added mass and radiation damping, were computed, and their influence on the response amplitude operator (RAO) was examined. The findings reveal that the F-shaped configuration, within specific frequency ranges—particularly for heave and pitch motions—demonstrates superior capability in reducing motion amplitudes and dissipating wave energy, whereas the rectangular configuration delivers more stable and uniform performance over a broader spectrum of wave conditions. Parametric analyses further highlight that cross-sectional geometry not only governs hydrodynamic efficiency but also shapes environmental impacts related to flow patterns and sediment transport. These results provide actionable insights for the design and optimization of high-performance, environmentally sustainable floating breakwaters.

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 2026-01-29]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۸، ۱۴۰۴، (۲۰-۱)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

مطالعه مقایسه‌ای عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های شناور با مقاطع اف شکل و مستطیلی

مریم تقی‌زاده[۱]، میثم قربانی فولادی[۲*]، عارفه امامی[۳]، پویا خوش‌نظری[۴]

[۱] استادیار،گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران ، آدرس پست الکترونیکی: Taghizadeh@Mazust.ac.ir

[۲] استادیار،گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران ، آدرس پست الکترونیکی: M.Qorbani@Mazust.ac.ir

[۳] استادیار،گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان ، ایران ، آدرس پست الکترونیکی: emami@hormozgan.ac.ir

[۴] دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران : poya.khoshnazari@mazust.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

موج شکن شناور

تحلیل دینامیکی

پاسخ فرکانسی سازه

کنترل انرژی امواج

چکیده

با گسترش بهره‌برداری از منابع دریایی و افزایش فعالیت‌های حمل‌ونقل دریایی، موج‌شکن‌های شناور به عنوان جایگزینی کارآمد برای نمونه‌های ثابت، به دلیل ویژگی‌هایی همچون قابلیت جابه‌جایی، هزینه ساخت و نصب کمتر و اثرات زیست‌محیطی محدودتر، مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. مدل‌سازی هیدرودینامیکی این سازه‌ها به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی انجام می‌شود؛ مدل‌های دوبعدی سریع‌تر اما محدود و مدل‌های سه‌بعدی با وجود پیچیدگی بیشتر، امکان ارزیابی دقیق‌تر اندرکنش موج - سازه را فراهم می‌کنند. در این پژوهش یک مدل سه‌بعدی هیدرودینامیکی برای مقایسه عملکرد موج‌شکن‌های شناور با مقاطع اف‌شکل و مستطیلی تحت شرایط مختلف هندسی و هیدرودینامیکی توسعه داده شد. شبیه‌سازی‌ها در حوزه‌های فرکانس و زمان، با تمرکز بر پارامترهایی مانند عمق فرورفتگی، طول سازه و فرکانس موج انجام گرفت. ضرایب کلیدی هیدرودینامیکی شامل جرم افزوده و میرایی تشعشعی محاسبه و اثر آن‌ها بر شاخص پاسخ دامنه تحلیل شد. نتایج نشان داد که مقطع اف‌شکل در برخی بازه‌های فرکانسی، به‌ویژه در حرکات قائم و چرخشی، عملکرد بهتری در کاهش دامنه حرکات و تضعیف انرژی امواج دارد، در حالی که مقطع مستطیلی رفتاری پایدارتر و یکنواخت‌تر در گستره وسیع‌تری از شرایط موجی ارائه می‌دهد. بررسی پارامتریک ابعاد نیز نشان داد که هندسه مقطع علاوه بر کارایی هیدرودینامیکی، بر پیامدهای زیست‌محیطی مرتبط با الگوهای جریان و رسوب‌گذاری مؤثر است. این نتایج می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی موج‌شکن‌های شناور با بازدهی بالا و سازگاری زیست‌محیطی کاربرد داشته باشد.

DOI:

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

ISSN: 2645-8136

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]

۱- مقدمه

با گسترش روزافزون بهره‌برداری از منابع انرژی دریا نظیر نفت، گاز و انرژی‌های تجدیدپذیر و همچنین افزایش نقش بنادر و مسیرهای آبی در تسهیل تجارت بین‌المللی، تمرکز ویژه‌ای بر توسعه زیرساخت‌های دریایی در نواحی ساحلی و فراساحلی به وجود آمده است. این توسعه مستلزم طراحی و اجرای سازه‌هایی است که بتوانند در برابر شرایط متغیر محیطی مقاومت کرده و درعین‌حال از لحاظ اقتصادی، اجرایی و زیست‌محیطی مقرون‌به‌صرفه باشند. در این میان، موج‌شکن‌های شناور به عنوان یکی از گزینه‌های جایگزین موج‌شکن‌های سنتی، به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی همچون سرعت اجرای بالا، سهولت در انتقال و نصب، انعطاف‌پذیری در مواجهه با تغییرات تراز آب و بستر و کاهش نیاز به عملیات خاکی و زیرساخت‌های سنگین، مورد استقبال قرارگرفته‌اند. افزون بر این، امکان استفاده از آن‌ها در مناطقی با بستر نرم یا عمیق که اجرای موج‌شکن‌های سنگی یا بتنی سنتی دشوار یا پرهزینه است، از دیگر مزایای کلیدی این نوع سازه‌ها به شمار می‌رود. بااین‌حال، بررسی‌ها نشان داده‌اند که عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های شناور در بازه‌ای مشخص از پریودهای امواج، بهینه است؛ به‌طوری‌که در مواجهه با امواج دارای پریودهای بسیار بلند یا کوتاه، کارایی آن‌ها ممکن است کاهش یابد. ازاین‌رو، تحلیل دقیق رفتار این سازه‌ها در مواجهه با طیف گسترده‌ای از شرایط دریا، ضرورتی انکارناپذیر در فرآیند طراحی و بهینه‌سازی آن‌ها محسوب می‌شود.

علاوه بر مزایای فنی و اجرایی، موج‌شکن‌های شناور در مقایسه با سازه‌های ثابت، از منظر زیست‌محیطی نیز مزایای قابل‌توجهی دارند. این سازه‌ها معمولاً نیاز کمتری به مداخله مستقیم در بستر دریا دارند، که می‌تولند منجر به کاهش تخریب زیستگاه‌های کف‌زی و جلوگیری از برهم‌زدن تعادل رسوبی در نواحی ساحلی شود. همچنین، امکان جابه‌جایی و نصب موقت آن‌ها، موجب کاهش اثرات بلندمدت بر اکوسیستم‌های دریایی می‌گردد. در مقایسه با موج‌شکن‌های سنتی سنگی یا بتنی، که نیازمند خاک‌برداری گسترده و احداث زیرساخت‌های سنگین هستند، موج‌شکن‌های شناور با ایجاد حداقل اختلال در محیط طبیعی، به‌عنوان گزینه‌ای پایدارتر و سازگارتر با محیط زیست شناخته می‌شوند.

در طراحی موج‌شکن‌های شناور، انتخاب شکل مقطع عرضی نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد هیدرودینامیکی، پایداری سازه و کاربردهای اجرایی ایفا می‌کند. از رایج‌ترین و پرکاربردترین اشکال می‌توان به مقطع مستطیلی اشاره کرد که به‌دلیل سادگی ساخت، امکان استقرار تجهیزات و قابلیت استفاده از سطح فوقانی به‌عنوان عرشه‌ی دسترسی یا اسکله، در پروژه‌های متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. در سال‌های اخیر در مطالعات مختلفی به بررسی عملکرد این مقاطع پرداخته شده است. Koraim (۲۰۱۵) با تحلیل عددی موج‌شکن‌های مستطیلی، عملکرد نسبتا مطلوب آنها را در کاهش تلاطم در پس‌موج نشان داد، هرچند با افزایش پریود موج، حرکات نوسانی و غلتشی قابل توجهی مشاهده شد[۱]. Yamamoto و همکاران (۱۹۸۱) نیز در مدل‌سازی فیزیکی خود، پایداری و میزان عبور موج از موج‌شکن مستطیلی را تحت زوایای مختلف برخورد امواج بررسی کردند [۲]. با این وجود، حساسیت بالا به حرکات عرضی و نوسان عمودی در مقاطع ساده، محققان را به بررسی اشکال جایگزین سوق داده است. از جمله این گزینه‌ها، می‌توان به مقاطع حفره‌دار یا پی شکل اشاره کرد که با ایجاد نواحی گیرلندازی موج، به افت انرژی امواج ورودی کمک می‌کنند. قربانی فولادی و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که این نوع مقاطع در مواجهه با امواج با پریود متوسط تا بلند، در مقایسه با مقاطع ساده مستطیلی، عملکرد بهتری در تضعیف موج دارند [۳]. از سوی دیگر، مقاطع نیم‌دایره‌ای یا دایره‌ای با هدف کاهش مقاومت هیدرودینامیکی و بهبود پاسخ در امواج چندجهته مورد توجه قرار گرفته‌اند. مطالعه عددی قربانی فولادی و همکاران (۲۰۲۱) به مقایسه عملکرد موج‌شکن‌های شناور با مقاطع دایره‌ای و مستطیلی پرداختند [۴]. نتایج نشان داد که اگرچه در برخی شرایط موج عبوری از سازه افزایش می‌یابد، اما نیروی‌های وارده بر بدنه و دامنه حرکات نوسانی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در سال‌های اخیر، طراحی مقاطع مرکب یا هیبریدی به‌عنوان رویکردی نوین در بهبود عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. این مقاطع معمولاً از ترکیب اشکال هندسی مختلف مانند بدنه‌های استوانه‌ای همراه با صفحات جانبی عمودی یا پره‌ای و همچنین سازه‌های چندپیکره متصل[1] تشکیل می‌شوند که هربخش نقش مشخصی در تضعیف و شکست موج ایفا می‌کند. مطالعات قربانی فولادی و همکاران (۲۰۲۱ و ۲۰۲۳) نشان داده‌اند که این نوع طراحی‌ها می‌توانند به صورت هم‌زمان مزایای نظیر پایداری، کاهش عبور موج و انعطاف در نصب و بهره‌برداری را فراهم کنند[۳-۴]. با این وجود، پیچیدگی‌های تحلیلی و نیاز به تنظیم دقیق پارامترهای هندسی، همچنان چالشی جدی در مسیر توسعه صنعتی این سازه‌ها مطرح است.

در سال‌های اخیر،گروهی از پژوهش‌های جدید بر پیکربندی‌های نوآورانه موج‌شکن‌های شناور تمرکز کرده‌اند؛ از جمله طرح‌هایی با قفسه توری و توپ‌های معلق که انرژی موج را به‌صورت مکانیکی جذب می‌کنند [۵]. نتایج آزمایش‌های فیزیکی نشان می‌دهد این سامانه‌ها با کاهش ضریب انتقال، افزایش تلاطم و تقویت میرایی حرکات سازه عملکرد قابل‌توجهی دارند، هرچند ممکن است جابه‌جایی افقی کمی افزایش یابد. همچنین ارزیابی نسخه‌های بازطراحی‌شده موج‌شکن‌ها در فلوم موج نشان داده است که

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]

بهبودهای هندسی می‌تولند به کاهش موج عبوری، کنترل انرژی بازتابی و پایداری بیشتر سازه منجر شود [۶].

در کنار این طرح‌ها، مطالعات دیگر از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی و مدل‌سازی المان مرزی برای بررسی بدنه‌های جعبه‌ای دارای موانع متخلخل یا صفحات افقی نفوذپذیر بهره گرفته‌اند [۷]. این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که پارامترهایی مانند ارتفاع مانع، فاصله نصب، میزان تخلخل و طول صفحات نسبت به طول موج نقش تعیین‌کننده‌ای در افت انرژی، کاهش انتقال موج و بهبود پایداری هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های شناور دارند [۸].

بخش قابل‌توجهی از مطالعات مقدماتی و تحلیلی در حوزه موج‌شکن‌های شناور بر پایه مدل‌سازی‌های دوبعدی انجام شده است. در این دسته از تحلیل‌ها، سازه معمولا در یک صفحه قائم (عمدتا صفحه x-z) و با فرض تقارن هندسی در راستای عرضی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. استفاده از مدل‌های دو بعدی به‌دلیل سادگی هندسی، سهولت در پیاده‌سازی و کاهش چشمگیر حجم محاسبات، به ویژه در مطالعات پارامتریک و ارزیابی‌های اولیه عملکرد سازه، همواره از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده است. Koraim (۲۰۱۵) به تحلیل عملکرد موج‌شکن‌های مستطیلی و جعبه‌ای شناور با استفاده از مدل‌سازی دوبعدی مبتنی بر نظریه خطی موج و روش جداسازی متغیرها پرداخته و شاخص‌هایی نظیر ضریب عبور موج و حرکت قائم سازه را مورد بررسی قرار داده است [۱]. همچنین، Yamamoto و همکاران (۱۹۸۱) در ترکیبی از آزمایش‌های فیزیکی و مدلسازی عددی دو بعدی، تأثیر پارامترهایی همچون عرض موج‌شکن، ارتفاع آزاد و شرایط لنگرگاه را بر رفتار موج‌شکن‌های ساده تحلیل کرده‌اند [۲]. Li و همکاران (۲۰۰۵) نیز با بهره‌گیری از روش المان مرزی دوبعدی (2D BEM) ، به مدلسازی بحث اندرکنش موج و موج‌شکن پرداخته و نشان داده‌اند که نحوه توزیع فشار موج و عمق مؤثر در این تحلیل‌ها قابل پیش‌بینی است [۹]. با این حال، علی‌رغم مزایای مدل‌های دوبعدی در سادگی و کارآمدی محاسبات، محدودیت اساسی آن‌ها در ناتوانی از لحاظ کردن اثرات سه‌بعدی مشهود است. عواملی نظیر برخورد امواج با زاویه مایل، پدیده‌های لبه‌ای، اندرکنش‌های عرضی بین ماژول‌ها و حرکات پیچشی سازه، در این نوع تحلیل‌ها به طور دقیق قابل بررسی نیستند و از این رو، دقت نتایج آن‌ها به شرایط ساده و ایده‌آل محدود می‌شود.

در بیشتر پژوهش‌های پیشین، تحلیل رفتار هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های شناور عمدتاً بر پایه مدل‌های دوبعدی عددی یا تحلیلی انجام شده است. هرچند این مدل‌ها از نظر محاسباتی ساده و سریع‌اند، اما با فرض یکنواختی میدان موج در راستای طولی، از بازنمایی کامل اندرکنش‌های سه‌بعدی میان موج و سازه بازمی‌مانند. در شرایط واقعی، امواج با انتشار جانبی و تفرق از لبه‌های انتهایی سازه، الگوهای پیچیده‌ای از فشار و میرایی تشعشعی ایجاد می‌کنند که مستقیماً بر پاسخ‌های حرکتی سازه و میزان تاثیر آن اثرگذار است. در نتیجه، صرف‌نظر کردن از این اثرات می‌تولند منجر به برآوردهای غیرواقعی از عملکرد سازه شود، به‌ویژه در هندسه‌های پیچیده‌ای مانند مقطع اف شکل که دارای سطوح جانبی متعدد است. از این‌رو، به‌کارگیری مدل‌سازی سه‌بعدی برای شبیه‌سازی دقیق انتشار و تداخل امواج پیرامون سازه ضروری به نظر می‌رسد. مدل سه‌بعدی با امکان بررسی اندرکنش کامل موج و سازه در شش درجه آزادی، دقت و قابلیت تعمیم نتایج را افزایش داده و می‌تولند مبنایی مطمئن‌تر برای طراحی‌های واقعی در محیط‌های دریایی فراهم آورد [۱۳-۱۰].

برای نمونه، Cheema و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از نرم‌افزار ANSYS AQWA، به تحلیل رفتار هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های شناور با هندسه‌های مختلف در مواجهه با امواج چندجهته پرداختند [۱۴]. همچنین، Wang و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای جامع پیرامون سیستم‌های مرکب موج‌شکن‌های چندپانتونی، با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی، تاثیر تداخل امواج و پاسخ دینامیکی سازه را مورد بررسی قرار داده و دریافتند که این رویکرد زمینه طراحی بهینه و کاهش هزینه‌های اجرایی را فراهم می‌آورد [۱۵]. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که علی‌رغم پیچیدگی‌های محاسباتی و نیاز به منابع سخت‌افزاری قدرتمند، مدل‌سازی سه‌بعدی مبتنی بر معادلات خطی حرکت سیال، به عنوان یک رویکردی دقیق و کارآمد در تحلیل سازه‌های دریایی شناخته شده و در طراحی‌های نوین جایگاه ویژه‌ای یافته است.

در مدل‌سازی سه‌بعدی موج‌شکن‌های شناور، با وجود پیچیدگی‌های ذاتی جریان سیال و تعاملات سازه‌ای، غالباً از رویکردهای خطی هیدرودینامیکی بهره‌برداری می‌شود. این روش با ساده‌سازی معادلات حرکت سیال و کاهش چشمگیر هزینه‌های محاسباتی، امکان تحلیل رفتار دینامیکی سازه در شرایط مختلف موج را فراهم می‌سازد. اساس این مدل‌ها بر فرضیات جریان غیرچرخشی[۲]، غیرلزج[۳] و حرکات موج با دامنه‌های موج کوچک استوار است، به‌طوری که در آن نیروهای اینرسی به مراتب بر نیروهای غیرخطی همچون اصطکاک ویسکوز و فشارهای توربولانسی هستند [۲و ۱۶-۱۸]. بر همین اساس، معادلات خطی حرکت سیال قادرند پاسخ‌های اصلی و نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر سازه را با دقت قابل‌قبول پیش‌بینی نمایند، در حالی‌که استفاده از مدل‌های غیرخطی، علاوه بر پیچیدگی‌های محاسباتی گسترده، نیازمند داده‌های تجربی دقیق و تنظیمات فنی پیچیده خواهد بود. از این رو، مدل‌سازی خطی در تحلیل‌های سه‌بعدی تعادلی مناسب میان دقت تحلیل و قابلیت اجرایی شبیه‌سازی‌ها برقرار می‌کند و به طور

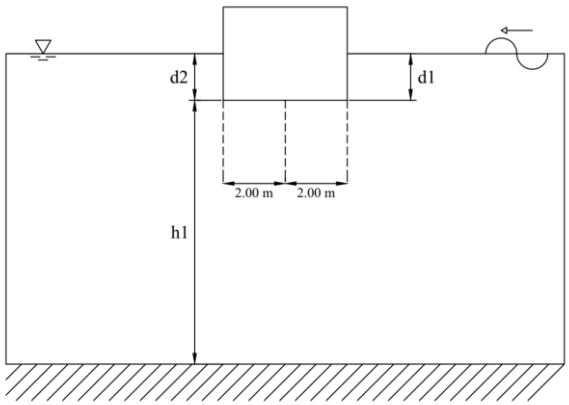
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]

گسترده در نرم‌افزارهای تخصصی نظیر ANSYS AQWA و WAMIT به کار گرفته می‌شود [۱۹].

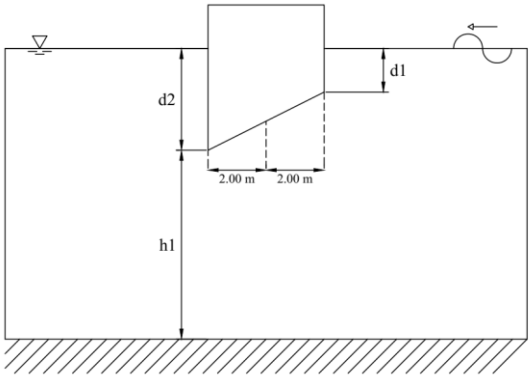
در مطالعه حاضر، یک مدل سه‌بعدی هیدرودینامیکی به‌منظور تحلیل رفتار موج‌شکن‌های شناور توسعه داده شده است که به‌طور خاص بر مقایسه عملکرد موج‌شکن‌های با مقطع اف شکل و مقطع مستطیلی با عمق‌های مختلف فرورفتگی تمرکز دارد. در این راستا، طول‌ها و ابعاد هندسی مقاطع به‌صورت پارامتریک تعریف شده‌اند تا اثر تغییرات ابعادی بر پاسخ دینامیکی سازه با دقت ارزیابی شود. هدف از این تحلیل پارامتریک، شناسایی هندسه‌های بهینه و ارزیابی تطبیقی عملکرد نسبی دو نوع مقطع در برابر بارهای هیدرودینامیکی است؛ این مطالعه نخستین مقایسه سه‌بعدی بین مقاطع اف شکل و مستطیلی تحت شرایط هیدرودینامیکی یکسان است که می‌تواند داده‌های جدید برای طراحان سازه‌های شناور و موج‌شکن‌های نسل جدید فراهم سازد.

۲-معادلات حاکم و شرایط مرزی

به‌منظور بررسی تأثیر شکل مقطع بر عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های شناور، دو پیکربندی هندسی شامل یک موج‌شکن با مقطع اف‌شکل و یک نمونه مرجع با مقطع مستطیلی طراحی و به صورت عددی مدل‌سازی شده‌اند (شکل ۱ و ۲). در پیکربندی اف‌شکل، بخش جلویی موج‌شکن که مستقیماً در معرض برخورد موج قرار دارد، دارای عمق فرو رفتگی برابر با d_1 و بخش عقبی آن (سمت پشت به موج) دارای عمق فرو رفتگی برابر با d_2 در نظر گرفته شده است. هدف از این طراحی، افزایش پایداری حرکتی سازه و تقویت اثرات میرایی در برابر امواج ورودی بوده است. در مقابل، موج‌شکن مستطیلی با عمق فرو رفتگی یکنواخت و برابر با d_1 در سرتاسر مقطع خود مدلسازی شده است. در هر دو هندسه، پهنای سازه برابر با B، طول سازه برابر L و عمق آب برابر با H در نظر گرفته شده است. این مقایسه پارامتریک امکان تحلیل نقش توزیع عمق در مقطع عرضی را در رفتار دینامیکی سازه فراهم می‌سازد.



شکل ۱- پیکربندی موج‌شکن با مقطع مستطیلی



شکل ۲- پیکربندی موج‌شکن با مقطع اف شکل

در این مطالعه، اندرکنش بین موج‌های منظم سطحی و موج‌شکن‌های شناور با استفاده از نرم‌افزار ANSYS AQWA مدل‌سازی شده است. این نرم‌افزار بر پایه‌ی نظریه پتانسیل جریان غیرچرخشی، غیرلزج و تراکم‌ناپذیر[۴] عمل می‌کند. در این چارچوب، فرض می‌شود که میدان جریان سیال با یک تابع پتانسیل سرعت $\Phi(x,y,z)$ قابل توصیف است، که از معادله لاپلاس پیروی می‌کند [۲۰] :

(۱) در تمام فضای سیال $$\nabla^2\Phi = 0$$

برای حل معادله لاپلاس در ناحیه محصور بین سطح آزاد، بدنه موج‌شکن و بستر دریا، شرایط مرزی مناسب بر هریک از مرزهای فیزیکی اعمال شده‌اند. این شرایط به شرح زیر هستند:

۱-شرط مرزی کف دریا:

با فرض عدم وجود جریان عمودی در بستر و بردار سرعت در راستای عمود بر سطح کف صفر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، شرط زیر اعمال می‌گردد:

(۲) در $z=-h$ $$\frac{\partial\Phi}{\partial z}=0$$

۲-شرط مرزی سطح آزاد (خطی‌شده برای امواج کوچک):

(۳) در $z=0$ $$\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}+g\frac{\partial\Phi}{\partial z}=0$$

۳- شرط مرزی روی بدنه شناور (مرز سخت – شرط نفوذناپذیری):

(۴) روی سطح موج‌شکن $$\frac{\partial\Phi}{\partial n}=v_{\vec{n}}$$

که در آن $v_{\vec{n}}$ مولفه نرمال سرعت سازه نسبت به سیال است. این شرط در محاسبه نیروهای وارد بر بدنه و تعیین پاسخ دینامیکی شش درجه آزادی (حرکت در سه راستا و چرخش حول سه محور) موج‌شکن نقش اساسی دارد. در ANSYS AQWA، حل عددی با

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]

استفاده از روش پنل‌بندی مرزها[5] انجام می‌گیرد که در آن سطح بدنه و سطح آزاد با پنل‌های مثلثی یا چهارضلعی گسسته می‌شود. این نرم‌افزار توانایی تحلیل پاسخ‌های فرکانسی و زمان-وابسته[6] سازه را داراست و در این مطالعه تحلیل در حوزه فرکانس برای بررسی ضرایب هیدرودینامیکی و پاسخ حرکتی انجام شده است.

۳ - مدل‌سازی عددی در ANSYS AQWA

به‌منظور ارزیابی پاسخ هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های شناور با مقاطع مختلف، شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS AQWA انجام شده است. این نرم‌افزار از جمله ابزارهای تخصصی در تحلیل دینامیک سازه‌های دریایی شناور محسوب می‌شود و قابلیت مدل‌سازی لندرکنش بین موج و سازه را در هر دو حوزه فرکانس و زمان داراست. در این پژوهش، تحلیل‌ها در حوزه فرکانس[7] با فرض امواج منظم و شرایط دریای آرام صورت پذیرفته است. در تمامی مدل‌ها، سازه به‌صورت جسم صلب[8] فرض شده و اندرکنش بین موج و سازه به صورت خطی در نظر گرفته شده است. هندسه سازه‌ها شامل دو نوع مقطع اصلی است: مقطع افشکل[9] و مستطیلی[10]. در کلیه مدل‌ها، طول و پهنای سازه‌ها ثابت فرض شده‌اند، به‌نحوی‌که تنها متغیر مستقل در فاز اول مدل‌سازی، عمق فرورفتگی سازه در آب بوده که در چهار مقدار ۳، ۴.۵، ۶ و ۷.۵ متر مورد بررسی قرار گرفته است. در فاز دوم، به منظور بررسی تاثیر طول سازه، تنها مقطع مستطیلی با طول‌های مختلف مدل‌سازی شده است. در حالی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته شده‌اند.

مدل‌سازی عددی سه‌بعدی در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ANSYS AQWA انجام شد. این نرم‌افزار مبتنی بر روش المان مرزی سه‌بعدی توسعه یافته و قابلیت تحلیل اندرکنش کامل موج و سازه شناور را داراست. در فرآیند مدل‌سازی هیدرودینامیکی، ابعاد دامنه محاسباتی دریا بر اساس پارامتر ضریب اندازه شبکه دریا[11] تعیین گردید. در این مطالعه، مقدار این پارامتر برابر ۲ در نظر گرفته شد که مطابق تنظیمات پیش‌فرض نرم‌افزار، ناحیه دریا را تقریباً دو برابر ابعاد سازه در هر جهت پوشش می‌دهد و نسبت ابعاد افقی دامنه در راستاهای X , Y حدود $X=1.6\,Y$ است. انتخاب این ابعاد با هدف اطمینان از عدم تأثیر مرزهای محاسباتی بر میدان موج متفرق شده و پاسخ‌های سازه صورت گرفته و بررسی حساسیت اولیه نشان داد که افزایش بیشتر اندازه دامنه تأثیر محسوسی بر نتایج هیدرودینامیکی ندارد.

تعداد مش‌های روی سازه بر اساس حداکثر سایز مش بین ۰.۱ تا ۰.۲ متر تعیین شده که موجب شده تعداد مش‌ها روی سازه بین ۳۵۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ مش قرار گیرد. تعداد گره‌های روی سطح آب به شکل ثابت برابر ۱۰۱ × ۱۶۱ گره بوده و مقادیر پتانسیل سیال بر اساس روش مدل جریان[12] محاسبه می‌شوند. مقادیر پتانسیل بین گره‌های سطح آزاد آب نیز با استفاده از درونیابی خطی تعیین گردیده است. مرزهای جانبی سازه و کف دامنه دارای شرط عدم نفوذ[13] و مرز دوردست دامنه دارای شرط تابش[14] هستند.

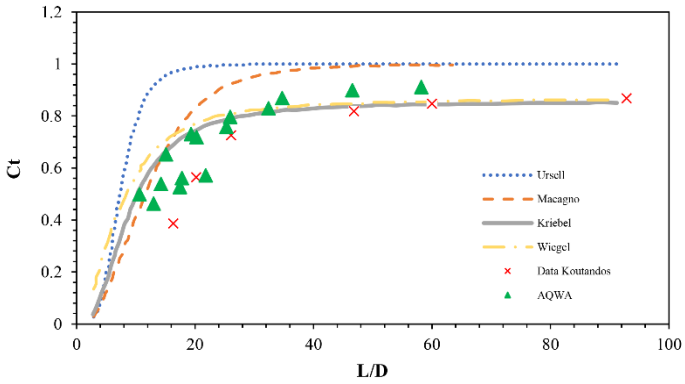
تحلیل‌ها در حوزه فرکانس برای بازه‌ای از فرکانس‌های موج بین ۰.۴۱۹ تا ۶.۲۸۳ رادیان بر ثانیه انجام شد و پاسخ حرکتی سازه در شش درجه آزادی شامل heave، surge، sway، roll، pitch و yaw محاسبه گردید. چگالی آب دریا برابر $1025kg/m^3$، شتاب گرانش $9.81m/s^2$ و ارتفاع موج ورودی ۰.۱ متر در نظر گرفته شد. در این مدل‌سازی، جرم سازه به شکل متمرکز در مرکز جرم در نظر گرفته شده و بر اساس ممان اینرسی‌های جرمی، توزیع جرم سازه اعمال گردیده است.

مشخصات موج ورودی شامل امواج منظم با دامنه ثابت، دوره تناوب متغیر و زاویه برخورد عمود بر سازه در نظر گرفته شده‌اند. پریود امواج برخوردی شامل ۳۲ موج از پریود یک تا ۱۵ ثانیه با گام‌های هر نیم ثانیه در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی در عمق سیال ۱۰ متری انجام شده است. مرزهای مدل به‌صورت باز در نظر گرفته شده تا اثرات انعکاس مصنوعی به حداقل برسد. خروجی‌های کلیدی شامل نیروها و لنگرهای مدل تفرق امواج، ضرایب جرم افزوده و میرائی تشعشعی و دامنه پاسخ‌ها سازه[15] می‌باشد.

۳-۱- کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل برای موج‌شکن ثابت

برای ارزیابی دقت مدل، از داده‌های آزمایش‌های دوبعدی Koutandos و همکاران (۲۰۰۵) جهت مقایسه عملکرد AQWA در پیش‌بینی موج‌های عبوری استفاده شد [۲۱]. شبیه‌سازی ناظر به مطالعه اندرکنش موج منظم با فرکانس‌های مختلف با یک موج‌شکن شناور است که در جای خود ثابت شده است. آزمایش در حالتی انجام شده است که سازه دارای طولی است که تقریبا تمام عرض فلوم آزمایشگاه را می‌پوشاند و عملا امکان چرخش امواج از دو انتهای موج‌شکن را از بین می‌برد. این امر موجب شده است تا فرض دوبعدی بودن مدل‌سازی فرضی نافذ باشد. به عنوان پارامتر مورد ارزیابی، ضریب انتقال موج از سازه انتخاب شده است. نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد مدل عددی تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد، اگرچه به‌دلیل عدم لحاظ تلاطم، مقادیر پیش‌بینی‌شده اندکی بزرگ‌تر هستند. این روند در جدول ۱ نیز مشاهده می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]



شکل ۳ – داده‌های آزمایشگاهی Koutandos و همکاران (۲۰۰۵) برای موج‌شکن ثابت در مقایسه با مدل عددی AQWA، امواج منظم (H=2m , B=2m) [۲۱-۲۴]

جدول ۱- نتایج خروجی AQWA با داده‌های به‌دست‌آمده توسط Koutandos و همکاران (۲۰۰۵) برای یک موج‌شکن شناور ثابت در شرایط امواج منظم با مشخصات d = 0.5 m، L = 350 m و (H) = 2 m [21]

T(s)	Ct_{AQWA} [-]	Ct_{exp} [-]	Ct_{exp} - Ct_{AQWA}
5.50	0.87	0.81	-0.05
3.33	0.73	0.73	-0.01
2.77	0.6	0.56	-0.04
2.5	0.53	0.48	-0.05
2.20	0.4	0.38	-0.02
		RMSE	0.04

۴ – نتایج و بحث

در این مطالعه، هدف اصلی ارزیابی عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن شناور با مقطع اف‌شکل است که به عنوان یک هندسه نوظهور در طراحی سازه‌های حفاظتی دریایی مطرح شده است. به منظور درک بهتر مزایا و محدودیت‌های مقطع اف، برای هر هندسه موج‌شکن اف شکل، یک موج شکن شناور با مقطع مستطیلی هم‌ارز با شرایط هندسی مشابه (اعم از طول و عمق فرورفت) به عنوان مدل مرجع در نظر گرفته شده است. ارزیابی‌ها، در دو محور انجام شده است: نخست، بررسی تأثیر عمق‌های مختلف فرورفت سازه بر پاسخ هیدرودینامیکی و دوم، تحلیل نقش تغییرات طول سازه. در گام نخست، اثر تغییر عمق فرورفت سازه در نحوه رفتار هیدرودینامیکی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

الف- بررسی اثر عمق فرورفت سازه بر عملکرد مقایسه‌ای موج‌شکن شناور مستطیل شکل و اف شکل:

در این بخش، به بررسی و مقایسه عملکرد موج‌شکن‌های شناور با دو مقطع هندسی متفاوت، پرداخته شده است. هدف اصلی تحلیل، ارزیابی تأثیر عمق فرورفت سازه بر کارایی این دو نوع موج‌شکن است. در تمامی مدل‌های مورد مطالعه، طول سازه به صورت ثابت در نظر گرفته شده و تغییر نمی‌کند. همچنین، پهنای سازه نیز در تمام مدل‌ها ثابت باقی مانده است تا بتوان تأثیر عمق فرورفتگی را به طور مستقل مورد ارزیابی قرار داد. در هر کدام از این دو نوع مقطع، چهار حالت مختلف عمق فرورفتگی (d_1) به ترتیب ۳، ۴.۵، ۶ و ۷.۵ متر در نظر گرفته شده است. در موج‌شکن‌های اف شکل، برای تمامی مدل‌ها، عمق d_2 بر اساس رابطه $d_2 = d_1 - 1.5^m$ تعریف شده است. نتایج در سه زیر بخش در این بحث ارائه شده است. در گام نخست، به منظور حل مسئله تفرق امواج، نیروهای وارده از میدان موج به سازه ثابت شناور استخراج و گزارش شده است. در زیر بخش دوم، در حل مسئله تشعشع، که ناظر بر تحریک اجباری حرکت سازه بر سیال ساکن فاقد موج درجات آزادی مختلف است، ضرایب جرم افزوده و میرائی تشعشعی در هر مود حرکتی محاسبه و ارائه شده است. در گام پایانی، دامنه پاسخ‌های سازه در مودهای مختلف حرکتی استخراج و ارائه شده‌اند. این پاسخ‌ها از طریق برهم‌نهی آثار هیدرودینامیکی حاصل از دو زیربخش پیشین محاسبه گردیده‌اند.

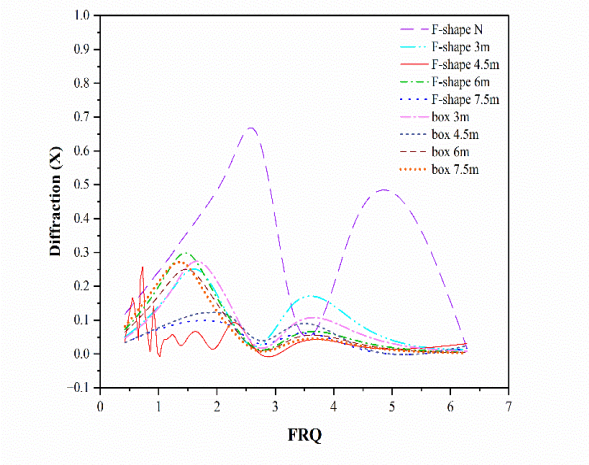
الف-۱- حل مسئله تفرق امواج:

همانگونه که پیشتر اشاره شد، برای حل مسئله اندرکنش کامل یک سازه شناور با یک میدان موج، می‌توان مطابق با اصل جمع آثار قوا، مسئله را به دو زیرمسئله تفکیک کرد. ابتدا فرض شد که سازه در محل خود بدون حرکت و ثابت است و تحت اثر تحریک میدان موج به آن، نیروها و لنگرهائی وارد می‌شود. این گام در ادبیات علمی با عنوان حل مسئله تفرق موج شناخته می‌شود. در گام دوم، فرض بر آن است سیال ساکن بوده و سازه در مودهای مختلف تحریک می‌شود. این نوع تحلیل منجر به شناسایی ضرایب میرائی تشعشعی و جرم افزوده سازه در فرکانس‌های مختلف می‌گردد. با تلفیق آثار حاصل از این دو مود، امکان حل معادلات حرکت سازه به صورت اندرکنشی با محیط سیال فراهم می‌شود. نیروها و لنگرهای به دست آمده، مطابق روابط زیر نرمال‌سازی شده و در شکل‌های ۴ تا ۶ ارائه گردیده‌اند.

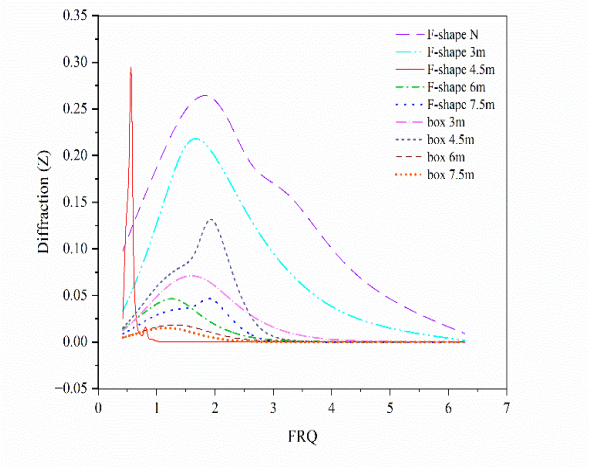
$$\text{نیروی بی‌بعد شده تفرق} = \frac{\text{اعداد نرم افزار}}{(\text{حجم جسم})\times(\gamma_{\text{سیال}})\times(\text{ارتفاع موج})\times(g)} \quad (۵)$$

$$\text{لنگر بی‌بعد شده} = \frac{\text{اعداد نرم افزار}}{(\text{حجم جسم})\times(\gamma_{\text{سیال}})\times(\text{ارتفاع موج})\times(\text{نصف پهنای جسم})\times(g)} \quad (۶)$$

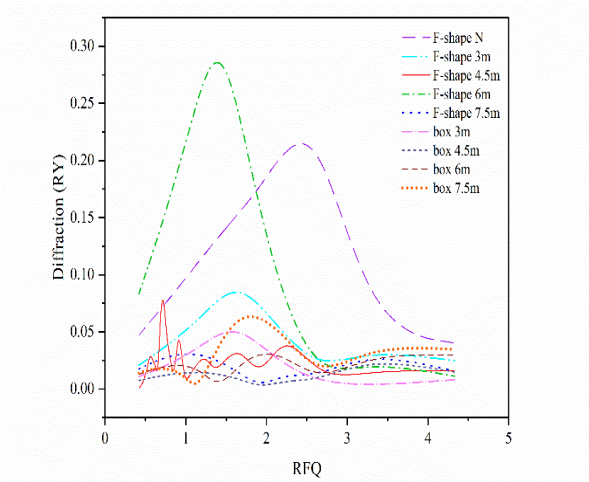
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]



شکل ۴- تغییرات نیروی افقی دو نوع موج‌شکن شناور با مقاطع مستطیلی و اف شکل در اعماق فرورفت مختلف



شکل ۵- تغییرات نیروی قائم دو نوع موج‌شکن شناور با مقاطع مستطیلی و اف شکل در اعماق مختلف فرو رفت



شکل ۶- تغییرات گشتاور تفرق موج دو نوع موج‌شکن شناور با مقاطع مستطیلی و اف شکل در اعماق مختلف فرو رفت

شکل‌های ۴ تا ۶ به ترتیب تغییرات نیروی افقی، نیروی قائم و گشتاور تفرق موج را بر دو نوع موج‌شکن شناور با مقاطع مستطیلی و اف شکل تحت اعماق مختلف فرو رفت نمایش می‌دهند. بررسی نمودار نیروی افقی (شکل ۴) نشان می‌دهد که در هر دو نوع مقطع، الگوی نیرو با فرکانس موج رابطه‌ی مشخصی دارد و بیشینه نیرو عمدتاً در بازه‌ی فرکانسی پایین (۱ تا ۲ رادیان بر ثانیه) رخ می‌دهد. در مقاطع مستطیلی، افزایش عمق فرورفت موجب افزایش منظم نیروی افقی شده است که نشان‌دهنده‌ی تشدید اندرکنش بدنه با امواج ورودی می‌باشد. در مقابل، مقاطع اف شکل رفتاری پیچیده‌تر با نوسانات موضعی دارند که به تغییر در توزیع جرم و انحراف جریان اطراف سازه نسبت داده می‌شود. به‌طور کلی، مقاطع مستطیلی رفتاری خطی‌تر و پیش‌بینی‌پذیرتر دارند، در حالی که مقاطع اف شکل پتانسیل مناسبی برای تنظیم پاسخ در فرکانس‌های هدف‌گذاری‌شده دارند.

در شکل ۵، نیروهای وارده از میدان موج در راستای قائم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مؤلفه عمودی نیرو نیز تحت تأثیر مستقیم شکل مقطع و عمق فرو رفت قرار دارد. در مقاطع مستطیلی، افزایش عمق منجر به افزایش دامنه پاسخ قائم در بازه میانی فرکانسی شده است. یک پیک برجسته در فرکانس ۲ رادیان بر ثانیه برای عمق ۴.۵ متر مشاهده می‌شود که احتمالاً به پدیده تشدید موضعی مرتبط است. از سوی دیگر، مقاطع اف شکل با افزایش عمق لزوماً افزایش پاسخ قائم را تجربه نمی‌کنند و در برخی بازه‌ها کاهش نیرو مشاهده می‌شود.

در نهایت نمودار شکل ۶، لنگر پیچشی وارده بر سازه‌ها را نشان می‌دهد که شاخص مهمی در تحلیل پایداری دوران آزاد موج‌شکن‌هاست. بیشینه گشتاور در مقطع اف شکل با عمق ۶ متر و در فرکانس حدود ۱.۷ رادیان بر ثانیه ثبت شده است. این مقدار به‌طور محسوسی از سایر حالت‌ها بیشتر بوده و می‌تواند ناشی از هم‌راستایی ابعاد سازه با امواج میان‌برد و اثرات تشدید هندسی باشد. سایر مقاطع اف شکل پاسخ‌هایی با نوسانات کمتر نشان می‌دهند. در مقاطع مستطیلی، رفتار گشتاوری یکنواخت‌تر و با دامنه‌ی پایین‌تری ثبت شده است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که مقطع اف شکل در اعماق خاصی مستعد دریافت گشتاورهای پیچشی شدید است و از این‌رو تحلیل پایداری دینامیکی آن‌ها باید با دقت بیشتری نسبت به مقاطع متقارن مستطیلی صورت گیرد.

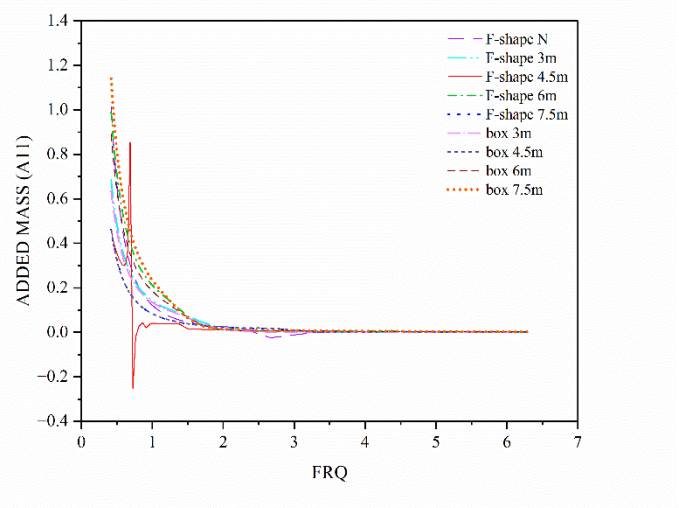
به طور کلی می‌توان چنین بیان کرد که با افزایش دامنه نیروهای وارده از سیال به جسم ساکن شناور، سازه به شکل موثرتری با میدان موج اندرکنش داده است. به عبارت دیگر، نیروها و لنگرهای بزرگتر وارده از میدان موج به معنای آن است که سازه با ابعادی که دارد توانسته است بخشی از انرژی امواج عبوری را به خود اختصاص دهد. این مسئله می‌تواند در مورد بازه فرکانسی اثرگذاری سازه یک شاخص قابل قبول باشد. همچنین، در زمانی که از سازه شناور به عنوان سازه‌های استخراج‌کننده انرژی امواج استفاده می‌شود، این بازه‌ها مبین بهترین دامنه فرکانسی امواج در بکارگیری سازه شناور است.

الف-۲- حل مسئله تشعشع

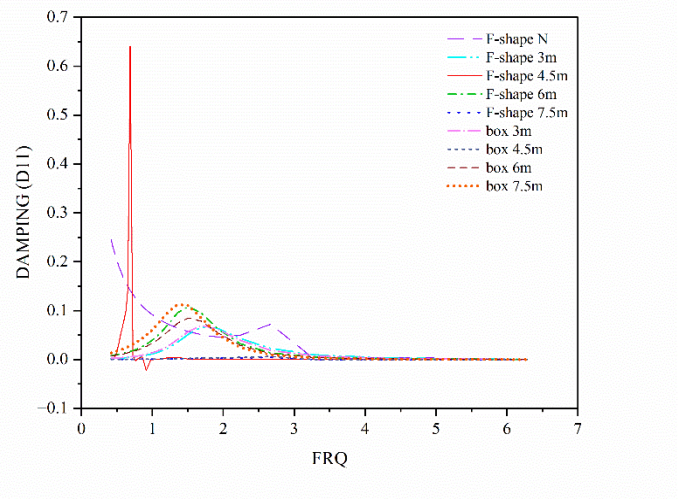
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]

چنانچه در بخش قبل بیان شده است، با حل مسئله تشعشع، ضرایب هیدرودینامیکی جرم افزوده و میرایی تشعشعی قابل استخراج هستند. مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه زیر بی‌بعدسازی شده و در نمودارهای (۷) تا (۱۲) گزارش گردیده‌اند.

$$\text{جرم افزوده یا میرائی بی‌بعد شده} = \frac{\text{ضریب محاسبه شده}}{(\text{ارتفاع موج})(g)(\text{حجم مستغرق جسم})(\gamma_{\text{سیال}})(\omega^2)} \quad (۷)$$



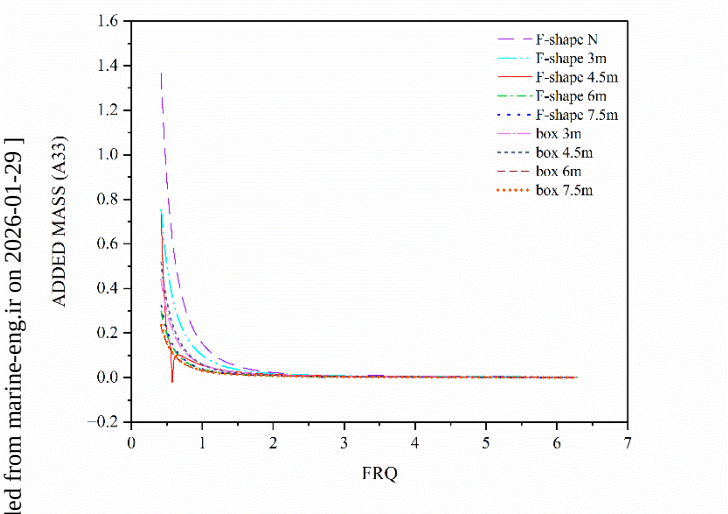
شکل ۷- تغییرات ضریب جرم افزوده (A11) در راستای افقی دو مقطع موج‌شکن شناور مستطیلی و اف شکل در اعماق مختلف فرورفت



شکل ۸- ضریب میرایی هیدرودینامیکی (D11) در راستای افقی دو مقطع موج‌شکن شناور مستطیلی و اف شکل در اعماق مختلف فرورفت

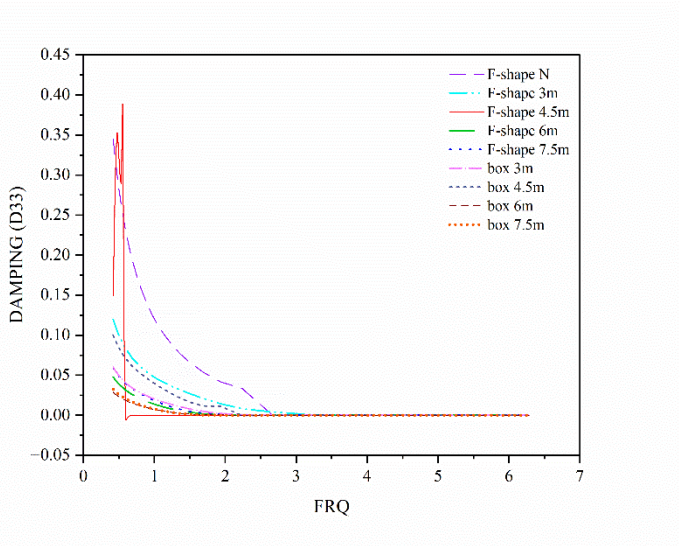
نمودار ۷ مربوط به ضریب جرم افزوده (A11) در راستای افقی برای دو نوع مقطع موج‌شکن شناور، یعنی مقطع مستطیلی و اف شکل، در اعماق مختلف فرورفت است. در تمامی حالات، ضریب A11 با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد که این روند با نتایج پیش‌بینی شده توسط تحلیل‌های نظری هیدرودینامیکی سازه‌های شناور همخوانی دارد. در فرکانس‌های پایین (کمتر از ۱)، مقادیر جرم افزوده در مقاطع اف شکل بیشتر از مقاطع مستطیلی است. این افزایش به دلیل سطح تماس جانبی بیشتر و هندسه پیچیده‌تر مقطع اف شکل است که موجب حبس جریان و افزایش اینرسی سیال پیرامون سازه می‌شود. با افزایش عمق فرورفتگی، تفاوت میان دو نوع مقطع کاهش می‌یابد و در عمق‌های ۶ و ۷.۵ متری منحنی‌ها هم‌گرا می‌شوند؛ به‌طوری که رفتار کلی جرم افزوده بیشتر تابع حجم غوطه‌ور و توزیع فشار کلی سیال می‌گردد تا هندسه جزئی سازه. به بیان دیگر، در اعماق بیشتر، اثر شکل هندسی بر پاسخ هیدرودینامیکی کاهش می‌یابد و پاسخ‌ها به رفتار جسم صلب غوطه‌ور در سیال نزدیک می‌شوند.

در نمودار ۸، ضریب میرایی هیدرودینامیکی (D11) در راستای افقی مورد بررسی قرار گرفته است. برخلاف A11، مقادیر D11 رفتار غیرخطی‌تر و پیک‌دار دارند که نشان‌دهنده وجود پدیده‌های تابشی در تعامل موج با سازه است. در مقاطع مستطیلی، به‌ویژه در اعماق فرورفتگی ۶ و ۷.۵ متر، پیک میرایی مشخصی در حدود فرکانس نرمال‌شده ۱.۲ تا ۱.۵ مشاهده می‌شود که بیانگر بیشینه انتقال انرژی از موج به سازه در آن محدوده است. این عملکرد نشان می‌دهد که مقطع مستطیلی توانایی بالاتری در جذب انرژی موج در بازه فرکانسی متوسط دارد. در مقابل، مقاطع اف شکل رفتار یکنواخت‌تر و در برخی موارد ناپایدار دارند؛ به‌ویژه در حالت فرورفت ۴.۵ متر، یک پیک بسیار تند و غیرمعمول در نزدیکی فرکانس ۰.۹ مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از اثرات پیچیده جریان مانند جدایش موضعی یا تشکیل گردابه‌های محبوس باشد. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که مقاطع اف شکل در فرکانس‌های پایین جرم افزوده بیشتری ایجاد می‌کنند اما در جذب انرژی موج (میرایی) عملکرد ضعیف‌تر و در مواردی ناپایدار دارند، در حالی که مقاطع مستطیلی پایداری بیشتر از خود نشان داده و راندمان میرایی بالاتری، به‌ویژه در اعماق بیشتر و محدوده فرکانسی مرتبط با تشدید، ارائه می‌دهند.



شکل ۹- تغییرات ضریب جرم افزوده در راستای قائم بر حسب فرکانس در اعماق مختلف فرورفت موج شکن

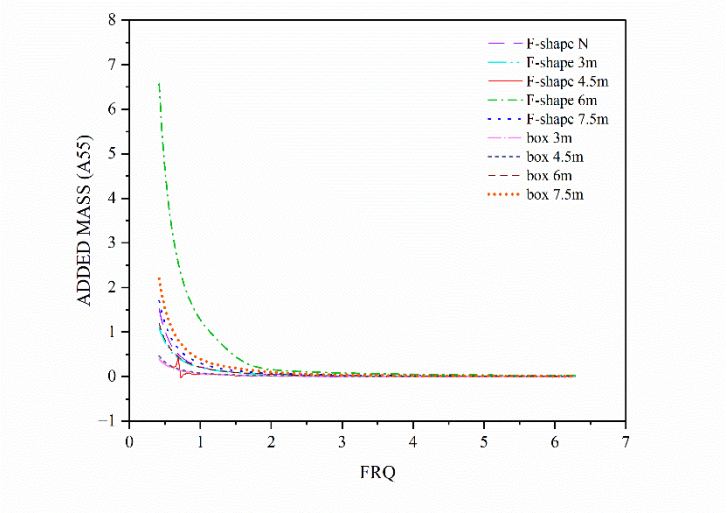
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]



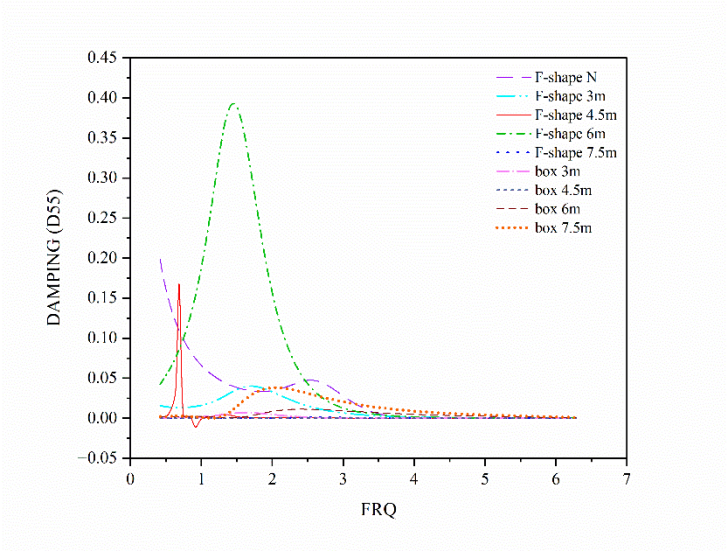
شکل ۱۰- تغییرات ضریب میرایی تشعشعی حرکت قائم (D33) برای سازه‌های شناور در اعماق مختلف فرورفت

نمودار ۹ تغییرات ضریب جرم افزوده در راستای قائم (در راستای حرکت بالا و پایین سازه) بر حسب فرکانس، در اعماق مختلف فرورفت سازه نشان می‌دهد. در تمامی حالت‌ها، A33 در فرکانس‌های پایین مقادیر قابل توجهی دارد و با افزایش فرکانس به‌سرعت کاهش یافته و پس از فرکانس حدود ۲ رادیان بر ثانیه، تقریباً به صفر میل می‌کند. این رفتار، بیانگر افزایش سهم جرم مؤثر سیال در فرکانس‌های پایین است که ناشی از برهم‌کنش قوی‌تر میان سازه و میدان سیال در این بازه‌ها می‌باشد. مقاطع اف شکل، بیشینه پاسخ در ناحیه فرکانس‌های پایین مشاهده می‌شود؛ این افزایش شدید می‌تواند ناشی از شکل خاص این نوع مقطع و نحوه پخش جریان و محبوس شدن توده آب در زیر آن باشد که جرم افزوده عمودی را به‌طور چشم‌گیری بالا می‌برد. در مقابل، مقاطع مستطیلی رفتار یکنواخت‌تر و مقادیر جرم افزوده پایین‌تری نشان می‌دهند، به ویژه در اعماق کم که تفاوت عملکرد بین مقاطع بیشتر نمایان است. با افزایش عمق فرورفتگی در هر دو نوع مقطع، مقادیر A33 کاهش یافته و منحنی‌ها به‌هم نزدیک می‌شوند، به طوری که در عمق ۷.۵ متر، اختلاف بین هندسه‌ها تقریباً از بین رفته و پاسخ‌ها هم‌پوشانی قابل توجهی پیدا کرده‌اند. این روند حاکی از آن است که در شرایط غوطه‌وری عمیق‌تر، تاثیر شکل هندسی مقطع کاهش یافته و پاسخ دینامیکی سازه بیشتر تحت تاثیر ابعاد کلی و سطح تماس آن با محیط سیال قرار می‌گیرد.

نتایج بررسی ضریب میرایی تشعشعی حرکت قائم (D33) برای سازه‌های شناور در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در محدوده فرکانسی ۱ تا ۷ رادیان/ثانیه، هر دو مقطع اف شکل و مستطیلی رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند، با این تفاوت که مقادیر D33 برای مقطع اف شکل به طور کلی پایین‌تر است. در فرکانس‌های پایین (۱-۳ رادیان/ثانیه)، میرایی تشعشعی برای هر دو مقطع در حداقل مقدار خود قرار دارد (نزدیک به صفر)، در حالی که در فرکانس‌های میانی (۵-۳ رادیان/ثانیه) به تدریج افزایش می‌یابد. افزایش عمق فرورفتگی تأثیر قابل توجهی بر کاهش مقادیر D33 دارد، به‌طوری که برای مقطع مستطیلی، افزایش عمق از ۳ به ۷.۵ متر منجر به کاهش حدود ۴۰-۵۰ درصدی در مقادیر D33 می‌شود.



شکل ۱۱- تغییرات جرم افزوده نسبت به فرکانس نوسانات دورانی سازه‌های شناور در اعماق مختلف فرورفت



شکل ۱۲- تغییرات ضریب میرایی تشعشعی حرکت دورانی (D55) برای سازه‌های شناور در اعماق مختلف فرورفت

در نمودار ۱۱ که تغییرات جرم افزوده نسبت به فرکانس نوسانات دورانی را نشان می‌دهد، روندی کاهشی در تمامی مقاطع بررسی شده مشاهده می‌گردد؛ به‌طوری که با افزایش فرکانس، مقدار جرم افزوده به‌سرعت کاهش یافته و در فرکانس‌های بالا به مقادیر ناچیز میل می‌کند. این رفتار عمدتا ناشی از کاهش تدریجی اثرگذاری برهمکنش سیال–سازه در فرکانس‌های بالا است، جایی که سیال فرصت کافی برای دنبال کردن حرکت سریع سازه را ندارد. در میان مقاطع بررسی‌شده، مقطع اف شکل با عمق فرورفتگی ۶۰٪ عمق

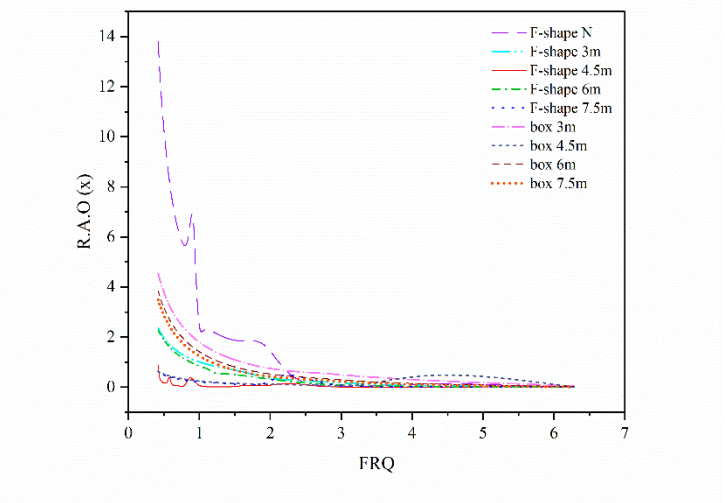
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]

آب در فرکانس‌های پایین، بالاترین میزان جرم افزوده را ایجاد می‌کند. این موضوع نشان‌دهنده بیشترین میزان تاثیرپذیری این پیکربندی از نوسانات با فرکانس کم و در نتیجه ظرفیت بالاتر آن در تبادل انرژی با سیال در این بازه است. به ویژه در محدوده فرکانسی کمتر از ۱ رادیان بر ثانیه، این مقطع جرم افزوده‌ای چندین برابر بیشتر از سایر مقاطع تولید می‌کند. همچنین، با افزایش عمق فرورفت، گرچه روند کلی نمودارها مشابه باقی می‌ماند، اما میزان جرم افزوده در مقاطع اف شکل همواره بالاتر از مقاطع مستطیلی است که بیانگر حساسیت هندسه اف شکل به افزایش سطح تماس با سیال و افزایش نیروی اینرسی القایی است.

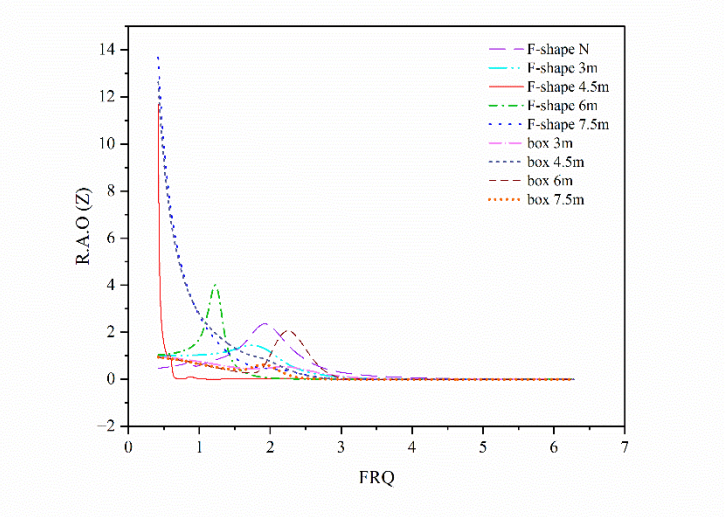
در نمودار ۱۲ که مربوط به ضریب میرائی تشعشعی حرکت دورانی تحمیلی است، رفتار غیرخطی و پیچیده‌تری در مقاطع مختلف دیده می‌شود. بیشترین مقدار میرایی مربوط به مقطع اف شکل با عمق ۶ متر است که در حدود فرکانس ۱.۵ رادیان بر ثانیه، پیک بسیار بالایی از خود نشان می‌دهد. این پدیده احتمال وقوع تشدید در آن فرکانس را مطرح می‌کند، که در صورت عدم کنترل می‌تواند منجر به ناپایداری سازه در شرایط دریایی گردد. در مقابل، مقاطع مستطیلی در تمامی اعماق بررسی‌شده، دارای منحنی‌های میرایی یکنواخت‌تر و بدون پیک‌های شدید هستند. این ویژگی نشان‌دهنده‌ی پاسخ خطی‌تر و قابل پیش‌بینی‌تر آن‌ها در برابر تحریک امواج است. همچنین، بررسی کلی روندها نشان می‌دهد که با افزایش عمق فرورفت، پاسخ‌های میرائی برای هر دو نوع مقطع تمایل به کاهش پیک و یکنواختی بیشتر دارند، که می‌تواند ناشی از افزایش ظرفیت جذب انرژی و کاهش شدت کوپل سازه—سیال در اعماق بیشتر باشد.

الف-۳- دامنه پاسخ سازه:

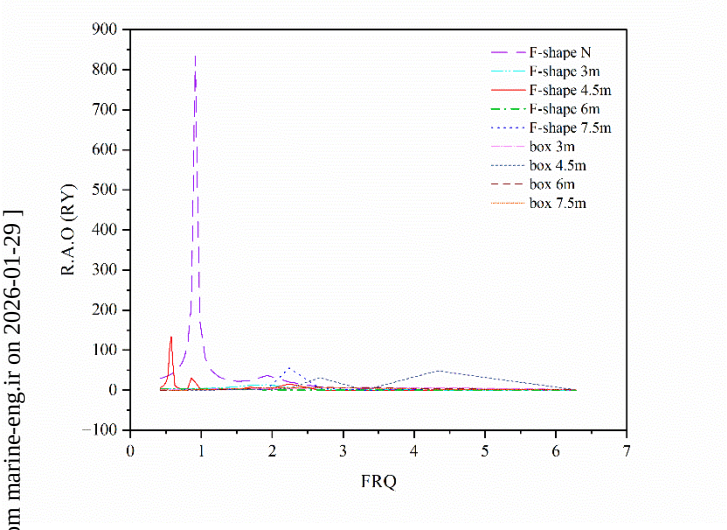
با جمع آثار گام‌های الف-۱ (که در آن نیروهای وارده از میدان موج محاسبه شده) و الف-۲ (که در آن ضرایب هیدرودینامیکی سازه شناور استحصال شده است) می‌توان معادلات تعادل سازه را تعریف کرد. با حل این معادلات، دامنه حرکت سازه در مودهای مختلف استخراج شده است. برای ارائه دامنه‌های حرکت سازه، این مقادیر بر دامنه موج ورودی (دامنه تحریک) تقسیم شده‌اند تا ضرایب RAO محاسبه و مطابق شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ گزارش شوند.



شکل ۱۳- پاسخ دینامیکی سازه‌های شناور با مقاطع اف شکل و مستطیلی تحت تاثیر امواج منظم را در جهت افقی



شکل ۱۴- پاسخ دینامیکی سازه‌های شناور با مقاطع اف شکل و مستطیلی تحت تاثیر امواج منظم را در جهت قائم



شکل ۱۵- پاسخ دینامیکی حرکت دورانی سازه‌های شناور با مقاطع اف شکل و مستطیلی تحت تاثیر امواج منظم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]

شکل ۱۳ پاسخ دینامیکی سازه‌های شناور با مقاطع اف شکل و مستطیلی تحت تاثیر امواج منظم را در جهت افقی، عمود بر محور سازه شناور نشان می‌دهد. نتایج حاکی از عملکرد برتر مقطع اف شکل در کاهش حرکت‌های افقی است؛ به‌طوری که مقادیر RAO آن در تمامی بازه فرکانسی ۱ تا ۷ رادیان بر ثانیه و در تمام عمق‌های فرورفتگی بررسی‌شده (۳ تا ۷.۵ متر) نسبت به مقطع مستطیلی پایین‌تر می‌باشد. این بهبود عملکرد به دلیل طراحی هیدرودینامیکی بهینه‌تر مقطع اف شکل است که موجب افزایش میرایی و کاهش پاسخ سازه می‌شود. از سوی دیگر، مقطع مستطیلی در محدوده فرکانس‌های میانی (۲ تا ۵ رادیان بر ثانیه) و به ویژه در عمق‌های کم (۳ و ۴.۵ متر)، افزایش قابل توجهی در مقدار RAO تا حدود ۱۴ در فرکانس تقریبی ۳ رادیان بر ثانیه نشان می‌دهد که نشانگر وقوع پدیده رزونانس است. افزایش عمق فرورفتگی تاثیر قابل توجهی در کاهش RAO هر دو مقطع دارد، که این اثر در مقطع مستطیلی شدت بیشتری دارد؛ به عنوان مثال، در عمق ۷.۵ متر مقدار RAO در فرکانس بحرانی تقریباً به نصف مقدار متناظر در عمق ۳ متر کاهش می‌یابد. با این وجود، حتی در عمق‌های زیاد، مقطع اف شکل ثبات بیشتری را از خود نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که در کاربردهای عملی، انتخاب مقطع اف شکل با عمق فرورفتگی بیش از ۶ متر می‌تواند تعادل مطلوبی بین عملکرد هیدرودینامیکی و الزامات عملیاتی فراهم آورد.

شکل ۱۴ نتایج بررسی پاسخ دینامیکی حرکت قائم دو سازه شناور در بازه فرکانسی ۱ تا ۷ رادیان بر ثانیه تفاوت‌های قابل توجهی در رفتار هیدرودینامیکی این دو مقطع نشان می‌دهد. در تمامی عمق‌های فرورفتگی مورد بررسی (۳، ۴.۵، ۶ و ۷.۵ متر)، مقادیر RAO برای مقطع اف شکل به‌طور محسوسی پایین‌تر از مقطع مستطیلی است که بیانگر کارایی بالاتر این طراحی در کاهش انتقال انرژی امواج به سازه می‌باشد. به ویژه در محدوده فرکانس‌های میانی (۲.۵ تا ۴ رادیان بر ثانیه)، که معمولاً بحرانی‌ترین بازه برای وقوع رزونانس محسوب می‌شود، مقطع مستطیلی با عمق فرورفتگی ۳ متر به مقدار حداکثری RAO حدود ۱۴ می‌رسد، در حالی که همین مقدار برای مقطع اف شکل در همان عمق حدود ۸ محدود شده است. افزایش عمق فرورفتگی تاثیر قابل توجهی در کاهش RAO هر دو مقطع دارد، به طوری که برای مقطع مستطیلی، افزایش عمق از ۳ به ۷.۵ متر باعث کاهش تقریبی ۶۰ درصدی در مقدار پیک RAO می‌شود، در حالی که این کاهش برای مقطع اف شکل حدود ۴۰ درصد گزارش شده است. دلیل این پدیده این است که در حرکات قائم، نیروی امواج وارد بر کف سازه بیشترین تاثیر را بر دامنه حرکت سازه می‌گذارد. از سوی دیگر معادلات توزیع انرژی امواج در عمق مبین این حقیقت است که بیشترین انرژی امواج در اعماق کم و نزدیک به سطح آزاد سیال وجود دارد. نکته حائز اهمیت، انتقال فرکانس رزونانس به سمت مقادیر پایین‌تر با افزایش عمق فرورفتگی است که این پدیده با تئوری‌های هیدرودینامیکی مرتبط با افزایش جرم افزوده و میرایی سازه هماهنگ است. از منظر طراحی، مقطع اف شکل با عمق فرورفتگی ۶۰٪ عمق آب به عنوان نقطه بهینه شناخته می‌شود، چرا که علاوه بر حفظ مزایای هیدرودینامیکی، از نظر اقتصادی و عملیاتی نیز قابل توجیه است.

نتایج تحلیل پاسخ دینامیکی حرکت دورانی سازه‌های شناور در شکل ۱۵ نشان می‌دهد که مقطع اف شکل در کلیه عمق‌های فرورفتگی بررسی شده (۳ تا ۷.۵ متر)، در مقایسه با مقطع مستطیلی، عملکرد مطلوب‌تری در کاهش پاسخ دینامیکی ارائه می‌دهد، به‌طوری که مقادیر RAO در این مقطع به طور میانگین بین ۳۰ تا ۴۰ درصد کمتر از مقطع مستطیلی مشاهده می‌شود. افزایش عمق فرورفتگی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش پاسخ دینامیکی هر دو نوع مقطع دارد، به نحوی که در مقطع مستطیلی، افزایش عمق از ۳ به ۷.۵ متر منجر به کاهش حدودی ۵۰ تا ۶۰ درصدی در مقادیر پیک RAO می‌شود. این یافته‌ها بیانگر آن است که انتخاب مقطع اف شکل با عمق فرورفتگی ۶ متر یا بیشتر، می‌تواند تعادلی مناسب میان بهینه‌سازی عملکرد هیدرودینامیکی و ملاحظات عملیاتی ایجاد کرده و به عنوان گزینه‌ای موثر جهت کنترل و کاهش حرکت‌های دورانی ناخواسته در طراحی سازه‌های شناور مطرح شود.

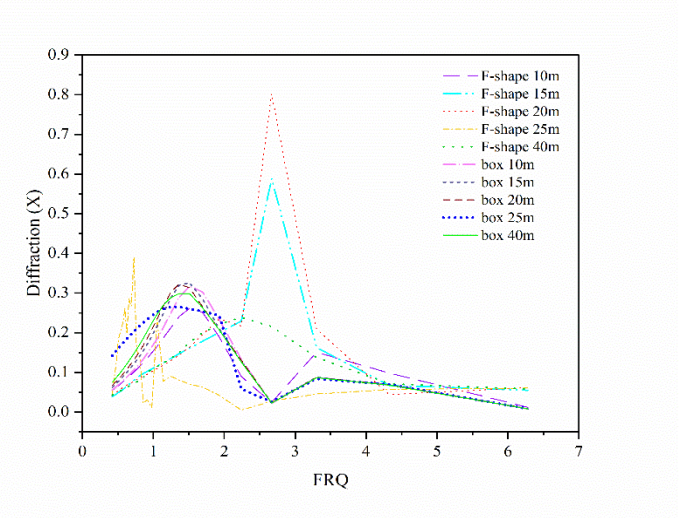
ب-بررسی اثر طول سازه بر عملکرد مقایسه‌ای موج‌شکن مستطیلی و اف شکل:

در این بخش، به منظور تکمیل مطالعات ارائه شده در بخش الف، تاثیر طول سازه موج شکن بر رفتارهای هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، طول‌های مختلف شامل ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۴۵ متر برای هر دو نوع سازه در نظر گرفته شده و فرآیند مدل‌سازی انجام شده است. ترتیب ارائه نتایج در این بخش نیز مطابق با بخش پیشین بوده و تحلیل‌ها بر اساس مقایسه ضرایب هیدرودینامیکی و پاسخ دینامیکی سازه‌ها در طول‌های مختلف انجام گرفته است.

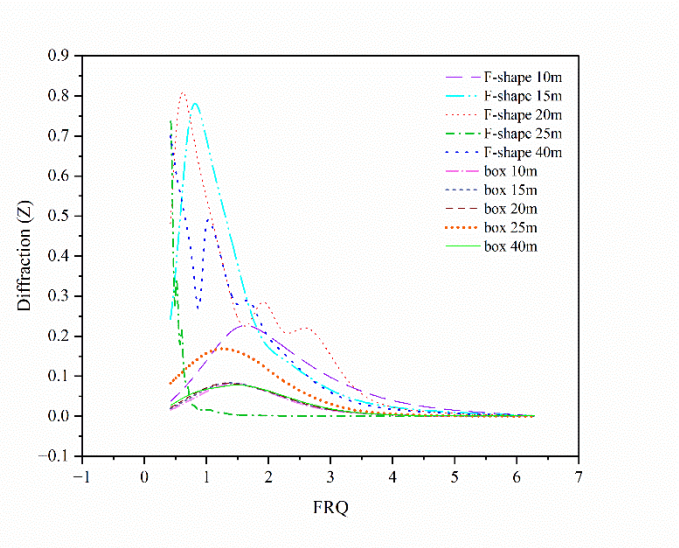
ب-۱- بررسی پدیده تفرق:

نیروها و لنگرهای وارد بر سازه ساکن شناور ناشی از برخورد موج ورودی، استخراج شده و نتایج حاصل مطابق نمودارهای (۱۶) تا (۱۸) ارائه شده است:

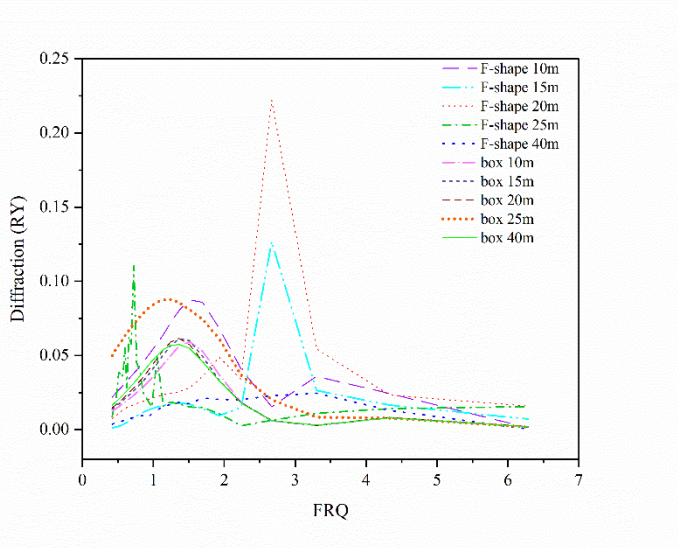
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]



شکل ۱۶- تغییرات نیروی افقی در دو نوع موج‌شکن شناور با مقاطع مستطیلی و اف شکل در طول‌های مختلف



شکل ۱۷- تغییرات نیروی قائم در دو نوع موج‌شکن شناور با مقاطع مستطیلی و اف شکل در طول‌های مختلف



شکل ۱۸- تغییرات گشتاور تفرق موج دو نوع موج‌شکن شناور با مقاطع مستطیلی و اف شکل در طول‌های مختلف

در نمودار ۱۶ که به مؤلفه افقی حرکت سازه شناور (حرکت طولی) مربوط می‌شود، مشاهده می‌گردد که با افزایش طول موج‌شکن، مقدار نیروی تفرق به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای مقطع مستطیلی، بیشینه نیروی تفرق در طول ۴۰ متر و در فرکانس حدود ۱.۵ هرتز رخ داده است که بالاترین مقدار ثبت شده در این نمودار به شمار می‌رود. در مقایسه، مقطع اف شکل در همین طول (۴۰ متر) نیرویی حدود ٪ ۴۵ کمتر از مقدار مقطع مستطیلی در همان بازه فرکانسی تولید کرده است. همچنین در تمامی طول‌ها، روند تغییرات نیروی تفرق برای مقطع اف شکل یکنواخت‌تر بوده و فاقد پیک‌های شدید و ناگهانی است. این رفتار بیانگر آن است که مقطع اف شکل در برابر نیروهای طولی ناشی از امواج، عملکردی نرم‌تر، پایدارتر و با قابلیت کاهش تمرکز نیرو در فرکانس‌های بحرانی دارد.

در نمودار ۱۷، که به مؤلفه قائم حرکت سازه شناور مربوط می‌شود، تفاوت‌های آشکاری در رفتار دینامیکی دو نوع مقطع مشاهده می‌گردد. در مقطع اف شکل و به ویژه در طول ۴۰ متر، بیشینه نیرو تفرق در فرکانس حدود ۰.۵ هرتز ظاهر رخ می‌دهد، مقداری که بیش از ۶ برابر بزرگ‌تر از مقدار متناظر در مقطع مستطیلی با در همان طول است. همچنین، در مقاطع اف شکل، پدیده رزونانس با امواج با فرکانس پایین‌تر موجب نوسانات شدیدتر در مؤلفه قائم شده است. در مقابل، هر چند در مقاطع مستطیلی با افزایش طول، نیروی تفرق افزایش می‌یابد، اما این روند با تغییرات نرم‌تر و بدون جهش‌های ناگهانی همراه است. این نتایج نشان می‌دهد که در حرکت قائم، مقطع مستطیلی عملکرد پایدارتری در برابر نفوذ انرژی موج از پایین دارد، در حالی که مقطع اف شکل به شدت تحت تأثیر تداخلات هیدرودینامیکی ناشی از هندسه خاص بدنه قرار می‌گیرد.

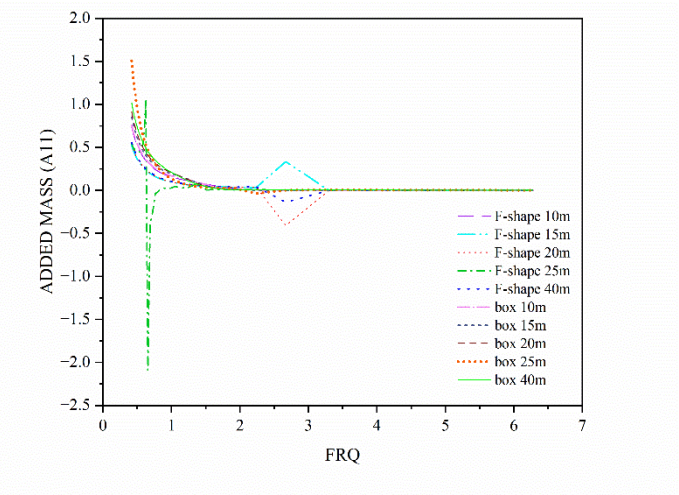
بر اساس نمودار ۱۸ که گشتاور ناشی از موج حول محور عرضی سازه را نشان می‌دهد، تغییرات نیروهای تفرق در طول‌های مختلف، هم از نظر فرکانس و هم از نظر شدت، بسیار قابل توجه است. در مقطع اف شکل با طول ۲۰ متر، یک پیک مشخص در فرکانس حدود ۲.۷ هرتز مشاهده می‌شود که مقدار آن بیش از دو برابر پیک متناظر در مقطع مستطیلی با همان طول است. در سایر طول‌ها نیز، مقطع اف شکل در بازه فرکانسی میانی (۲ تا ۳.۵ هرتز)، رفتاری ناپایدارتر و همراه با نوسانات بیشتر از خود نشان می‌دهد، در حالی که مقطع مستطیلی عمدتا منحنی‌ای هموارتر و یکنواخت‌تر ارائه می‌دهد. با این حال، در طول ۲۵ متر، مقطع مستطیلی نیز نشانه‌هایی از پدیده رزونانس را نشان می‌دهد، که بیانگر امکان بروز شرایط بحرانی در طراحی آن است. به طور کلی، مقطع اف شکل در مؤلفه گشتاور، حساسیت دینامیکی بالاتری نسبت به فرکانس‌های

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]

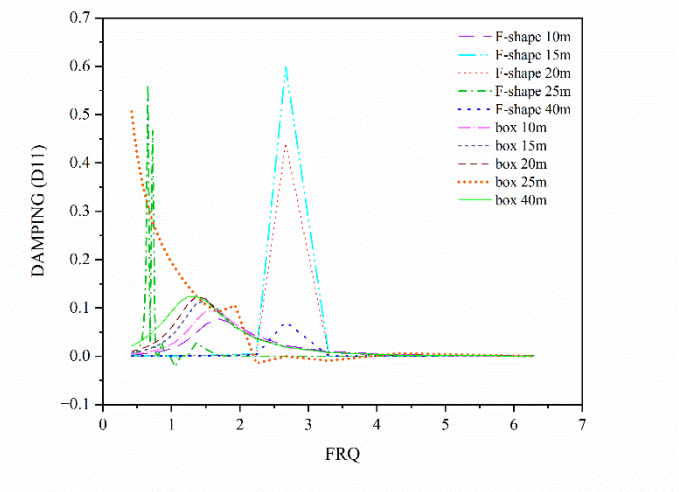
خاص دارد، در حالی که مقطع مستطیلی عملکردی کنترل‌شده‌تر و پایدارتر ارائه می‌دهد.

ب-۲-مسئله تشعشع:

در تحلیل مسئله تشعشع، سه مود حرکتی تحمیلی شامل حرکت افقی، قائم و چرخشی (دورانی) به سازه اعمال شده است. این تحلیل برای سازه‌هایی با طول‌های مختلف به منظور بررسی تاثیر ابعاد بر پاسخ دینامیکی انجام گرفته است و در نمودارهای ۱۹ تا ۲۴ ارائه شده است.



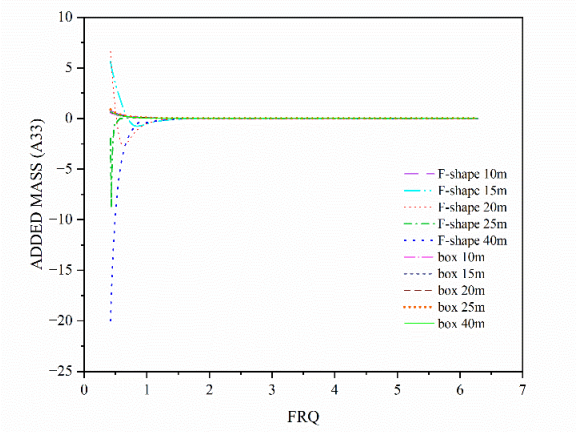
شکل ۱۹- تغییرات ضریب جرم افزوده (A11) در راستای افقی دو مقطع موج‌شکن شناور مستطیلی و اف شکل در طول‌های مختلف



شکل ۲۰- تغییرات ضریب میرایی هیدرودینامیکی (D11) در راستای افقی دو مقطع موج‌شکن شناور مستطیلی و اف شکل در طول‌های مختلف

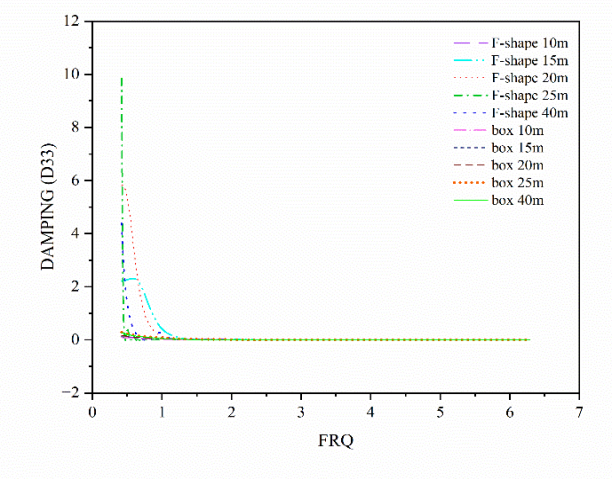
نمودار ۱۹، که به بررسی رفتار جرم افزوده در راستای افقی موج‌شکن شناور می‌پردازد، تأثیر قابل توجه هندسه و طول سازه بر مقدار جرم هیدرودینامیکی تحمیلی از سوی سیال آشکار است. در مقاطع مستطیلی، به‌ویژه با طول ۴۰ متر، مشاهده می‌شود که ضریب جرم افزوده A11 در فرکانس‌های پایین (کمتر از ۱ رادیان بر ثانیه) به حدود ۱۶۰۰۰ می‌رسد، که این مقدار ناشی از افزایش حجم جابه‌جا شده و تأثیر بیشتر فشار هیدرودینامیکی آب اطراف سازه می‌باشد. در مقابل، مقاطع اف شکل رفتار پیچیده‌تری از خود نشان می‌دهند. به‌طور خاص، در طول ۲۵ متر، نوسانات شدید و حتی مقادیر منفی در A11 مشاهده می‌شود که می‌تواند به دلیل عبور از محدوده رزونانس یا تغییر ناگهانی در الگوی جریان اطراف مقطع باشد. با افزایش فرکانس (بیش از ۳ رادیان بر ثانیه)، برای هر دو نوع مقطع و در تمام اعماق، مقدار A11 به‌طور پیوسته کاهش یافته و به صفر نزدیک می‌شود، روندی که بیانگر کاهش اثر اینرسی سیال بر سازه در شرایط تحریک با فرکانس بالا است.

در نمودار ۲۰، که به ارزیابی ضریب میرایی در راستای افقی سازه شناور اختصاص دارد، تفاوت‌های آشکاری در عملکرد دینامیکی دو نوع مقطع قابل مشاهده است. مقاطع اف شکل، به‌ویژه در طول‌های میانی مانند ۱۵ و ۲۰ متر، در بازه فرکانسی ۲ تا ۳ رادیان بر ثانیه، به پیک‌هایی با دامنه بسیار بالا را نشان می‌دهند که بیانگر اتلاف انرژی شدید ناشی از برهم‌کنش پیچیده میان هندسه غیراستاندارد این مقاطع و جریان سیال اطراف آنهاست. در این شرایط، احتمال وقوع پدیده‌هایی نظیر تشکیل گردابه‌های قوی یا افزایش ناپیوستگی جریان در نواحی لبه‌های منحنی بیشتر می‌شود. در مقابل، مقاطع مستطیلی با هندسه ساده‌تر، پاسخی یکنواخت‌تر و تقریبا خطی ارائه می‌دهند. هرچند در طول‌های بالاتر مانند ۴۰ متر نیز افزایش ضریب دمپینگ در مقاطع مستطیلی مشاهده می‌شود، شدت این افزایش به مراتب کمتر از مقاطع اف شکل است. همچنین، در فرکانس‌های بالا، مشابه نمودار ۱۹، ضریب دمپینگ برای هر دو نوع مقطع به تدریج کاهش یافته و به سمت صفر میل می‌کند، روندی که بیانگر کاهش نرخ اتلاف انرژی به‌واسطه کاهش اثر برهم‌کنش بدنه-سیال در تحریکات با فرکانس بالا است. این نتایج نشان می‌دهد که مقاطع اف شکل در برابر تحریکات دینامیکی حساسیت بیشتری دارند و رفتار آن‌ها نسبت به فرکانس، وابستگی شدید و غیرخطی دارد.



شکل ۲۱- تغییرات ضریب جرم افزوده در راستای قائم دو مقطع موج‌شکن شناور مستطیلی و اف شکل در طول‌های مختلف

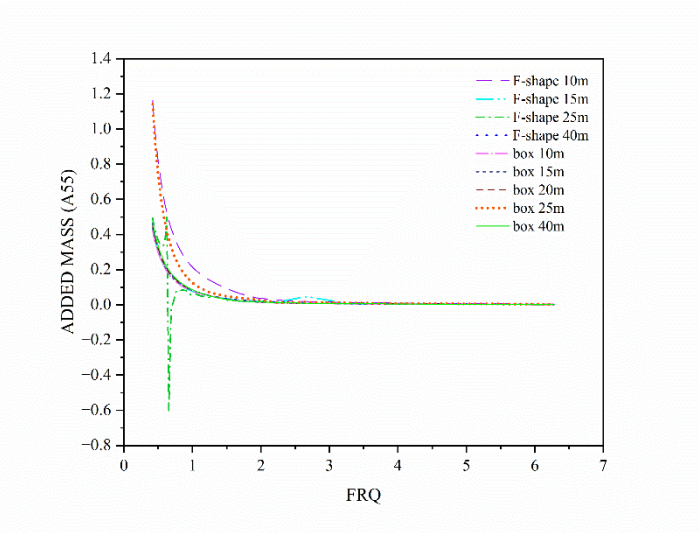
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]



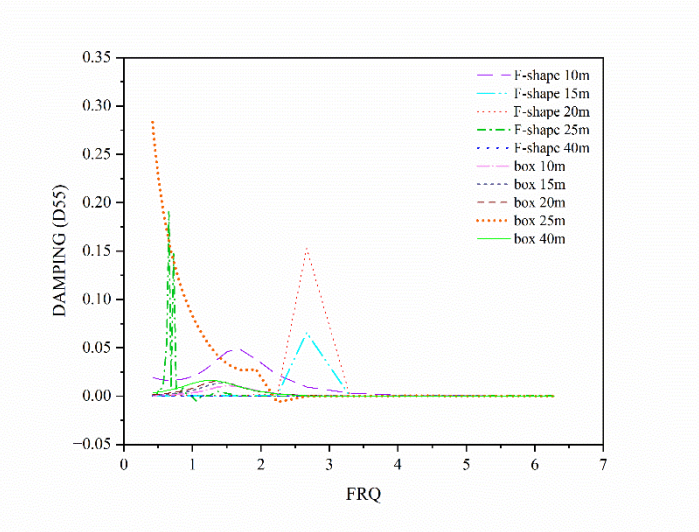
شکل ۲۲- تغییرات ضریب میرایی تشعشعی حرکت قائم (D33) دو مقطع موج‌شکن شناور مستطیلی و اف شکل در طول‌های مختلف

در نمودار ۲۱ مشاهده می‌شود که مقاطع اف‌شکل در فرکانس‌های پایین، به‌ویژه کمتر از ۱ رادیان بر ثانیه، دارای مقادیر بسیار بالایی از جرم افزوده (A33) هستند. این مقدار با افزایش طول سازه دچار نوسانات شدیدتری می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که در نمونه ۴۰ متری، جرم افزوده حتی به مقادیر منفی قابل‌توجهی شده می‌رسد. این رفتار نشان‌دهنده حساسیت بالای مقاطع اف شکل به حرکات ناشی از امواج کم‌فرکانس است. در مقابل، موج‌شکن‌های با مقطع مستطیلی رفتاری ملایم‌تر و پایدارتر از خود نشان می‌دهند، به طوری که با افزایش طول سازه، مقدار A33 کاهش یافته و به سمت مقادیر تثبیت‌شده‌ای میل می‌کند.

نمودار ۲۲ نیز بیانگر رفتار میرایی حرکت قائم موج‌شکن‌ها در برابر امواج با فرکانس‌های مختلف است. در این نمودار، مقاطع اف‌شکل، به ویژه در طول‌های میانی (۱۵ تا ۲۵ متر)، بیشینه مقادیر میرایی را در فرکانس‌های کمتر از ۱ رادیان بر ثانیه تجربه می‌کنند، اما این مقادیر به سرعت با افزایش فرکانس می‌یابند. این روند بیانگر مقاومت اولیه بالای این نوع سازه در برابر حرکات موج است، ولی در عین حال، ناپایداری آن‌ها در طول‌های بیشتر و در امواج کم فرکانس، می‌تواند عملکرد پایدار سازه را با چالش مواجه سازد. در مقابل، موج‌شکن‌هاب با مقطع مستطیلی -به ویژه در طول‌های بلند (۴۰ متر)- میرایی یکنواخت‌تری ایجاد کرده‌اند که با پیک کمتر همراه است و نشان‌دهنده رفتار خطی‌تر و قابل‌کنترل‌تر آن‌ها در برابر تحریکات دینامیکی امواج می‌باشد.



شکل ۲۳- تغییرات جرم افزوده نسبت به فرکانس نوسانات دورانی سازه‌های شناور در طول‌های مختلف



شکل ۲۴- تغییرات ضریب میرایی تشعشعی حرکت دورانی (D55) برای سازه‌های شناور در طول‌های مختلف

در بررسی مؤلفه‌ی A55 (نمودار ۲۳)، که معرف سختی دورانی حول محور عرضی سازه است، تفاوت‌های قابل‌توجهی میان دو نوع مقطع اف شکل و مستطیلی در اعماق مختلف مشاهده می‌شود. در مقاطع اف شکل ، به‌ویژه در طول‌های میانی مانند ۲۰ و ۲۵ متر، نمودارها افت‌های ناگهانی و نوسانات شدید را در محدوده‌ی فرکانسی پایین (کمتر از ۱.۵ هرتز) نشان می‌دهند. این رفتار می‌تواند ناشی از بروز پدیده‌هایی مانند تمرکز تنش و توزیع غیریکنواخت سختی در این هندسه باشد که منجر به افزایش پاسخ دورانی سازه تحت اثر بارهای دینامیکی می‌شود. در برخی موارد، مانند مقطع اف شکل با طول ۲۵ متر، مقدار A55 حتی به مقادیر منفی قابل‌توجهی رسیده که بیانگر ناپایداری یا رفتار نامطلوب موضعی سازه است. از سوی دیگر، مقاطع مستطیلی در تمامی طول‌ها (از ۱۰ تا ۴۰ متر) رفتاری یکنواخت، پیوسته و بدون افت‌های ناگهانی از خود نشان می‌دهند.

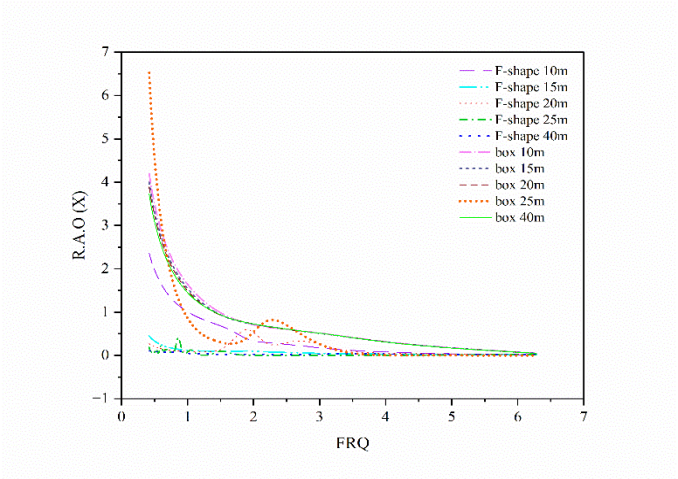
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]

منحنی‌های مربوط به این نوع مقاطع به‌تدریج و با افزایش فرکانس، کاهش می‌یابند و فاقد نوسانات شدید یا علائم ناپایداری هستند. این ویژگی‌ها بیانگر پایداری مناسب سازه در برابر چرخش عرضی و توزیع متعادل سختی در هندسه‌ی مستطیلی است که آن را برای کاربردهای حساس به حرکات دورانی، گزینه‌ای مناسب‌تر می‌سازد.

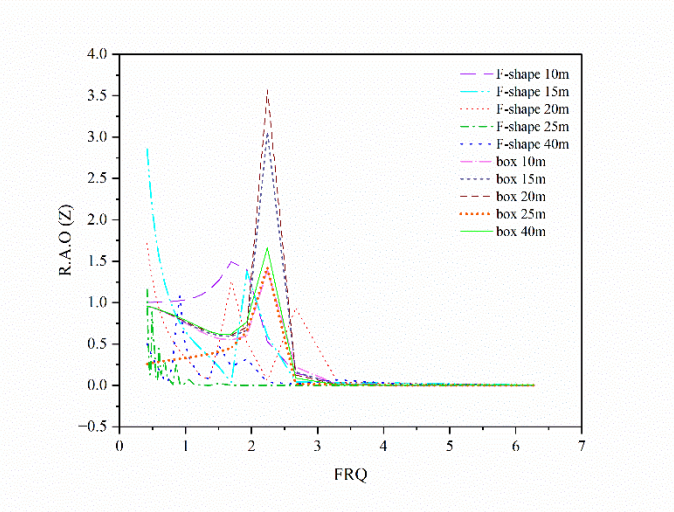
در تحلیل مؤلفه‌ی D55 (نمودار ۲۴)، که معرف میرایی دورانی حول محور عرضی سازه است، مجدداً مقاطع اف شکل رفتار ناپایدارتری نسبت به مقاطع مستطیلی از خود نشان می‌دهند. در این هندسه، به‌ویژه در طول‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر، نمودارها دارای چندین پیک شدید در بازه‌ی فرکانسی پایین (۰.۵ تا ۳ هرتز) هستند که نشان‌دهنده‌ی بروز تشدید مودهای طبیعی و پدیده‌ی رزونانس است. این رفتار می‌تواند ناشی از پیچیدگی‌های هندسی و نقاط تمرکز جرم در این نوع مقطع باشد که سبب افزایش میزان جذب و اتلاف انرژی ارتعاشی در برخی فرکانس‌های خاص می‌شود. در مقابل، نمودار D55 مربوط به مقاطع مستطیلی فاقد پیک‌های ناگهانی و نوسان‌های شدید بوده و روندی یکنواخت و کاهشی را نشان می‌دهند. این رفتار به‌ویژه در طول‌های بالاتر (مانند ۲۵ و ۴۰ متر) بارزتر است، به طوری که منحنی‌ها از یکنواختی بالایی برخورداند و عمدتا در محدوده‌ای قابل قبول از میرایی باقی می‌مانند. این ویژگی‌ها بیانگر تاثیر کمتر هندسه مستطیلی از لبه‌های انتهایی و در نتیجه جلوگیری از تقویت نوسانات در شرایط دینامیکی است.

ب-۳-دامنه‌های پاسخ دینامیکی:

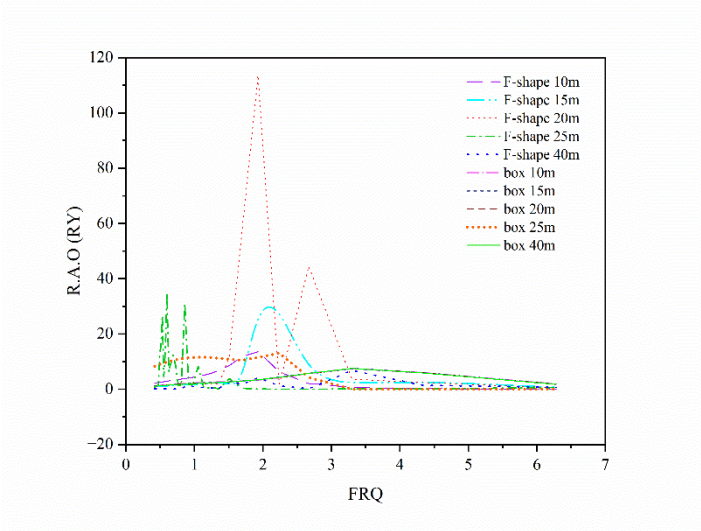
دامنه‌های پاسخ سازه‌ها با طول‌های مختلف در شکل‌های ۲۵ تا ۲۷ ارائه شده‌اند. این نمودارها رفتار دینامیکی موج‌شکن‌ها را در فرکانس‌های مختلف نشان داده و امکان مقایسه‌ی دقیق تاثیرطول و نوع مقطع بر دامنه‌ی حرکات سازه را فراهم می‌سازد.



شکل ۲۵- پاسخ دینامیکی سازه‌های شناور با مقاطع اف شکل و مستطیلی تحت تاثیر امواج منظم را در جهت افقی



شکل ۲۶- پاسخ دینامیکی سازه‌های شناور با مقاطع اف شکل و مستطیلی تحت تاثیر امواج منظم را در جهت قائم



شکل ۲۷- پاسخ دینامیکی حرکت دورانی سازه‌های شناور با مقاطع اف شکل و مستطیلی تحت تاثیر امواج منظم

نمودار ۲۵، که بیانگر پاسخ سازه به تحریک امواج در راستای افقی است، روندی نزولی و کاهنده را با افزایش فرکانس در تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد. در مقطع مستطیلی، بیشینه مقدار RAO در بازه فرکانسی پایین (حدود ۰.۲ تا ۰.۵ هرتز) مشاهده شده و بالاترین پاسخ مربوط به مدل مستطیلی با طول ۲۵ متر است که RAO آن به حدود ۶.۵ می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد که مقطع مستطیلی در فرکانس‌های پایین، دچار حرکات انتقالی شدیدتری می‌شود که حتی در شرایط دریایی آرام نیز می‌تواند پایداری سازه را به مخاطره اندازد. در مقابل، مقاطع اف شکل به دلیل طراحی منحنی و خصوصیات هیدرودینامیکی خاص خود، پاسخ منظم‌تری ارائه داده‌اند. نمودارهای مربوط به این مقاطع دارای شیب نزولی یکنواخت‌تری هستند که حاکی از میرایی موثرتر و رفتار دینامیکی کنترل شده‌تر آنها در راستای افقی است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]

در راستای قائم، نمودارهای RAO رفتار کاملاً متفاوتی نسبت به جهت افقی از خود نشان می‌دهند. در این راستا، حضور پیک‌های مشخص در بازه‌ی فرکانسی ۲ تا ۳ هرتز نشان دهنده وقوع پدیده رزونانس است. بیشترین مقدار پاسخ در این راستا مربوط به مقطع مستطیلی با طول ۲۰ متر بوده که در فرکانس نزدیک به ۲.۳ هرتز به مقدار حداکثری RAO حدود ۳.۵ می‌رسد. این مقدار در مقایسه با سایر نمونه‌ها بسیار قابل‌توجه بوده و می‌تواند منجر به تشدید حرکات قائم و در نتیجه کاهش پایداری موج‌شکن در این شرایط بحرانی شود. در مقاطع اف شکل، اگرچه برخی مدل‌ها (مانند نمونه‌های ۱۰ تا ۱۵ متری) نیز دارای پیک هستند، اما دامنه این پیک‌ها به مراتب کمتر از مدل‌های مستطیلی معادل بوده و معمولاً مقدار آن‌ها کمتر از ۱.۵ باقی می‌ماند. همچنین، در فرکانس‌های بالا (بالاتر از ۴ هرتز)، تمامی منحنی‌ها به‌تدریج به صفر صفر میل می‌کنند که حاکی از تضعیف اثر تحریکات موج در این محدوده فرکانسی است. این نتایج نشان می‌دهد که طراحی مقطع اف شکل با کاهش احتمال وقوع رزونانس و کنترل دامنه حرکات قائم، عملکرد مناسب‌تری در مواجهه با شرایط دریایی پرتلاطم از خود نشان می‌دهد.

رفتار موج‌شکن‌ها در راستای چرخشی، بیش از سایر محورها به نوع مقطع و طول سازه وابسته است. نمودارهای RAO در این محور دارای نوسانات شدید و پیک‌های تند و بارزی هستند که نشان‌دهنده احتمال وقوع رزونانس خطرناک در این مود حرکتی می‌باشد. در این میان، مقطع اف شکل با طول ۲۰ متر در فرکانس حدود ۲ هرتز، بیشینه‌ی پاسخ را با مقدار بسیار بالای حدود ۱۱۵ نشان می‌دهد، که به وضوح ناپایداری شدیدی را در رفتار چرخشی نشان می‌دهد. این رفتار می‌تواند ناشی از ترکیب نامناسب پارامترهایی مانند جرم، محل مرکز ثقل و ویژگی‌های هیدرودینامیکی در این عمق خاص باشد. در مقاطع مستطیلی، اگرچه دامنه‌ی نوسانات کمتر از مقاطع اف شکل در همین فرکانس است، اما در برخی موارد مانند مدل مستطیلی ۲۵ متر، مقادیر قابل توجهی از RAO در حدود ۲۰ تا ۳۰ نیز مشاهده می‌شود که همچنان بیانگر حساسیت دینامیکی بالاست. با افزایش طول سازه تا ۴۰ متر، هر دو نوع مقطع رفتار یکنواخت‌تری از خود نشان می‌دهند و شدت نوسانات کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در فرکانس‌های بالاتر از ۳ هرتز، مقادیر RAO در هر دو مقطع به کمتر از ۵ محدود می‌شود. این روند نشان می‌دهد که افزایش طول سازه (بیشتر از ۴۰ متر) می‌تواند نقش موثری در کاهش حرکات چرخشی و بهبود پایداری دینامیکی کلی موج‌شکن‌ها ایفا کند.

۵-تحلیل زیست‌محیطی عملکرد موج‌شکن‌ها

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های هیدرودینامیکی نشان داد که موج‌شکن‌های شناور با مقطع اف شکل در بسیاری از مودهای حرکتی، به‌ویژه در پاسخ قائم و چرخشی، عملکرد بهتری در جذب انرژی امواج ورودی دارند. این ویژگی می‌تواند در زمینه محیط زیست دریایی، یک مزیت مهم تلقی شود؛ چرا که جذب مؤثرتر انرژی موج به کاهش آشفتگی و تلاطم در نواحی پشت موج‌شکن منجر می‌شود و از بروز فرسایش ساحلی و برهم‌خوردگی زیستگاه‌های کف‌زی جلوگیری می‌کند.

همچنین مشاهده شد که در بازه‌های مختلف فرکانسی، موج‌شکن با مقطع اف شکل رفتار پایدارتر و یکنواخت‌تری در پارامترهایی مانند RAO، جرم افزوده و میرایی تشعشعی از خود نشان داده است. این موضوع به معنای کاهش نوسانات ناگهانی جریان و نیرو در اطراف سازه و در نتیجه پایدار ماندن زیستگاه‌های حساس اطراف سازه است. از منظر دینامیکی نیز، در اعماق مختلف غوطه‌وری، موج‌شکن اف شکل نوسانات کمتری نسبت به موج‌شکن مستطیلی در برابر تحریکات با فرکانس بالا نشان داد. این رفتار منجر به کاهش تولید گردابه‌های موضعی، کاهش کدورت آب و اختلال کمتر در جریان‌های طبیعی در منطقه اطراف می‌شود. با وجود پیچیدگی احتمالی در ساخت مقطع اف شکل، اگر این هندسه با استفاده از مصالح سبک، بازیافتی یا کم‌کربن طراحی شود، در چرخه عمر خود می‌تواند اثر زیست‌محیطی کمتری نسبت به سازه‌های مستطیلی و حجیم‌تر داشته باشد. بنابراین، بر اساس شواهد به‌دست‌آمده از تحلیل‌های عددی، می‌توان نتیجه گرفت که مقطع اف شکل نه تنها از نظر عملکرد هیدرودینامیکی، بلکه از دیدگاه پایداری محیط‌زیستی نیز گزینه مطلوب‌تری برای طراحی موج‌شکن‌های شناور به‌شمار می‌آید.

۶-نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های شناور با دو نوع مقطع مستطیلی و اف شکل با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی و تحلیل دینامیکی بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که مقاطع اف شکل به دلیل توزیع مناسب‌تر جرم افزوده و میرایی تشعشعی، در کاهش پاسخ‌های دینامیکی سازه نسبت به مقاطع مستطیلی عملکرد بهتری دارند. همچنین با افزایش عمق فرورفت و طول سازه، الگوی اندرکنش سازه و میدان موج تغییرات قابل توجهی را تجربه کرد که تأثیر مستقیمی بر کارایی جذب انرژی و کاهش انتقال نیروهای موج به سازه داشت.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]

از سوی دیگر، مقاطع مستطیلی با وجود ساده‌تر بودن در اجرا و ساخت، در مواجهه با امواج با فرکانس‌های پایین‌تر، رفتار نسبتاً ناپایدارتری از خود نشان دادند و مستعد بروز پدیده‌های رزونانس در بازه‌های فرکانسی بحرانی بودند. این در حالی است که مقاطع اف شکل به واسطه هندسه خاص خود، نه تنها پاسخ یکنواخت‌تری در بازه فرکانسی وسیع‌تر از خود نشان دادند، بلکه در کاهش اثرات لرزش و نوسانات ناخواسته نیز موفق‌تر عمل کردند. بنابراین، انتخاب نوع مقطع در طراحی موج‌شکن‌های شناور باید با در نظر گرفتن شرایط محیطی، اهداف عملکردی و محدودیت‌های اجرایی صورت پذیرد، اما نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقاطع اف شکل می‌توانند گزینه‌ای بهینه برای بهبود پایداری و کارایی سازه در مواجهه با شرایط دینامیکی پیچیده باشند.

مدل‌سازی عددی ارائه‌شده در این پژوهش مبتنی بر مدل سه‌بعدی خطی و شرایط ایده‌آل صورت گرفته است. در این مدل، سازه موج‌شکن شناور به‌صورت جسم صلب[۱۶] در نظر گرفته شده و اثرات تغییرشکل‌های الاستیک بدنه لحاظ نشده است. همچنین سیستم مهاربندی[۱۷] در تحلیل منظور نشده و فرض شده است که سازه به‌طور آزاد روی سطح آب شناور است. علاوه بر این، مدل حاضر بر پایه جریان غیرلزج و تراکم‌ناپذیر توسعه یافته و اثرات ویسکوزیته و آشفتگی جریان به‌طور مستقیم مدل‌سازی نشده‌اند؛ حال آن‌که در شرایط واقعی این پدیده‌ها می‌توانند بر میرایی کلی سیستم و انرژی منتقل‌شده به سازه اثرگذار باشند. همچنین، تحلیل‌ها در حوزه فرکانس انجام شده و فرض خطی بودن دامنه حرکات را در بر دارد؛ بنابراین برای امواج با دامنه بزرگ یا شرایط غیرخطی، استفاده از مدل‌های حوزه زمان یا CFD ضروری است.

با وجود این محدودیت‌ها، مدل توسعه‌یافته توانسته روند کلی رفتار هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های شناور را با دقت قابل‌قبول بازنمایی کند. با این حال، برای افزایش دقت و کاربردپذیری نتایج، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده موارد زیر مورد توجه قرار گیرند:

۱. در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری سازه و استفاده از مدل‌های کوپله‌شده سازه-سیال برای بررسی دقیق‌تر اندرکنش دینامیکی.
۲. مدل‌سازی سیستم مهاربندی با لحاظ پارامترهای سختی و میرایی خطوط مهار و بررسی تأثیر آن بر پایداری حرکتی موج‌شکن.
۳. بهینه‌سازی هندسه مقطع اف شکل از طریق تغییر ابعاد بخش‌های افقی و زاویه گوشه‌ها به منظور کاهش ضریب انتقال موج (Ct) در محدوده‌های فرکانسی بحرانی.
۴. گسترش مدل سه‌بعدی به حوزه زمان و بررسی اثرات غیرخطی در امواج شدید و پدیده‌هایی نظیر wave slamming و green water loading.
۵. انجام اعتبارسنجی آزمایشگاهی مقیاس فیزیکی برای تأیید یافته‌های عددی و تعیین ضرایب تصحیح مقیاسی.

با رعایت و اجرای پیشنهادات فوق، پژوهش‌های آینده می‌توانند محدودیت‌های مدل حاضر را رفع کرده و زمینه‌ی توسعه طراحی بهینه موج‌شکن‌های شناور با هندسه‌های پیچیده و کارایی بالاتر را فراهم آورند.

۷- کلید واژگان

1- multi-pontoon systems
2- inviscid
3- irrotational
4- incompressible flow
5- Boundary Element Method – BEM
6- Time Domain
7-Frequency Domain
8-Rigid Body
9- F-type floating breakwater
10-Sea Grid Size Factor
11-Flow Model
12-No- Flux
13-Radiation boundary condition
14- Response Amplitude Operator (RAO)
15-Mooring System
16-Flange Width
17-Physical Validation Model

۸- منابع

1- A.S. Koraim., (2015), Mathematical study for analyzing caisson breakwater supported by two rows of piles, Journal of Ocean Engineering. 104 89–106. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.088.
2- T. Yamamoto., (1981), Moored floating breakwater response to regular and irregular waves, Journal of Applied Ocean Research. 3 27–36. https://doi.org/10.1016/0141-1187(81)90082-1
3- M.Qorbani Fouladi, F. Bahmanpouri, S. Rezazadeh, F. Kollolemad, M. Mashayekhi, G. Viccione., (2023), Investigating the sidewall's effects on π-shaped floating breakwaters interacting with water waves by the scaled boundary FEM, Journal of Ocean Engineering. 284.115200.https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115200.
4- M. Qorbani Fouladi, H. Heidary-Torkamani, L. Tao, B. Ghiasi., (2021), Solving Wave Interaction with a Floating Breakwater in Finite Water Depth Using Scaled Boundary FEM, Numerical Methods in Civil Engineering.64249.https://doi.org/10.52547/nmce.6.1.42.
5- C.Y. Ji, X. Chen, J. Cui, Z.M. Yuan, A. Incecik,.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]

(2015), Experimental study of a new type of floating breakwater, Journal of Ocean Engineering,105295303.https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.046

6- Z. Liu, Y. Wang, (2020), Numerical studies of submerged moored box-type floating breakwaters with different shapes of cross-sections using SPH, Journal of Coastal Engineering,158103687. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103687.

7- K.Z. Hu, T.J. Xu, S. Wang, (2025), Hydrodynamic investigation of a new type of floating breakwaters integrated with porous baffles, Journal of Applied Ocean Research, 154 104380. https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104380

8- Z. Deng, L. Wang, X. Zhao, Z. Huang, (2019), Hydrodynamic performance of a T-shaped floating breakwater, Journal of Applied Ocean Research, 82 325-336. https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.11.002.

9- B. Li, L. Cheng, A.J. Deeks, B. Teng, (2005), A modified scaled boundary finite-element method for problems with parallel side-faces. Part II. Application and evaluation, Journal of Applied Ocean Research. 27 224–234. https://doi.org/10.1016/j.apor.2005.11.007.

10- B.Z. Zhou, G.X. Wu, Q.C. (2016), Meng, Interactions of fully nonlinear solitary wave with a freely floating vertical cylinder, Journal of Engineering Analysis with Boundary Elements.69119–131. https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2016.05.004.

11- A. Kang, P. Lin, Y.J. Lee, B. Zhu,. (2015), Numerical simulation of wave interaction with vertical circular cylinders of different submergences using immersed boundary method, Journal of Computers and Fluids. 106 41–53. https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.09.043.

12- S. Ganesan T., D. Sen, (2016), Time domain simulation of side-by-side floating bodies using a 3D numerical wave tank approach, Journal of Applied Ocean Research. 58 189–217. https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.03.014.

13- D. Li, V. Panchang, Z. Tang, Z. Demirbilek, J. Ramsden,. (2005), Evaluation of an approximate method for incorporating floating docks in harbor wave prediction models, Candidate Journal of Civil Engineering. 32 1082–1092. https://doi.org/10.1139/l05-059.

14- A. Cheema, M. Zhu, S. Chai, C.K.H. Chin, Y. Jin., (2014), Motion response of a floating offshore wind turbine foundation, Proc. 19th Australas. Fluid Mechanical Conference..

15- C.M. Wang, Z.Y. Tay, Very large floating structures: Applications, research and development, Journal of Procedia Engineering. 14 (2011) 62–72. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.007.

16- A.G. Abul-Azm, M.R. Gesraha, Approximation to the hydrodynamics of floating pontoons under oblique waves, Journal of Ocean Engineering. 27 (2000) 365–384. https://doi.org/10.1016/S0029-8018(98)00057-2.

17- M.R. Gesraha, Analysis of Π shaped floating breakwater in oblique waves: I. Impervious rigid wave boards, Appl. Journal of Ocean Research. 28 (2006) 327–338. https://doi.org/10.1016/j.apor.2007.01.002.

18- M.Qorbani. Fouladi, P. Badiei, S. Vahdani, A study on full interaction of water waves with moored rectangular floating breakwater by applying 2DV scaled boundary finite element method, Journal of Ocean Engineering. 220 (2021) 108450. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108450.

19- M.Qorbani. Fouladi, P. Badiei, S. Vahdani, Extracting the Solution of Three-Dimensional Wave Diffraction Problem from Two-Dimensional Analysis by Introducing an Artificial Neural Network for Floating Objects, Latin American Journal of Solids and Structures. 17 (2020) e324. https://doi.org/10.1590/1679-78256096.

20- S.Nemati, M. Bakhtiari, M. Azami. Investigation of Wave-Structure Interaction in Floating Breakingwaters. Journal of Hydrosciences and Environment, 5(9), 2021,8-20. https://doi.org/1022111/JHE.2022.42343.1079

21- E. Koutandos, P. Prinos, and X. Gironella, Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics. Journal of hydraulic Research, 43(2): 174-188, 2005. https://doi.org/10.1080/00221686.2005.9641234.

22- D.L. Kriebel and C.A. Bollmann. Wave transmission past vertical wave barriers. In COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 2 (1996) 2470-2483. https://doi.org/10.1061/9780784402429.1.

23- F. Ursell. The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water. In Proceeding of the Cambridge Philosophical Society, 43 (1974) 374-382. https://doi.org/10.1017/S0305004100023604.

24- R.L,Wigel, 1960, Transmission of waves Past a Rigid Vertical Thin Barrier, Journal of the

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]

waterways and Harbors Division, ASCE, 86 (1960), 1-12. https://doi.org/10.1061/JWHEAU.00001.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-01-29]