J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 48, 2026. (135-146)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Experimental Investigation of Mooring Line Forces in a Porous Pontoon-Type Floating Breakwater with an wave Energy-Dissipating Sub-Structure

Shayan Asadi[1], Naser Shabakhty[2]

[1] *M.Sc. Student in Civil Engineering (Coastal, Port, and Marine Structures), Iran University of Science and Technology; shayan_asadi@civileng.iust.ac.ir*

[2] *Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran; shabakhty@iust.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 19 Oct 2025
Last modification: 23 May 2026
Accepted: 21 May 2026
Available online: 23 May 2026

Article type:
Research peper

Keywords:
Floating Breakwater
Pontoon-Type Floating Breakwater
Mooring Forces
Physical Modeling

ABSTRACT

Floating breakwaters have recently attracted increasing attention as one of the effective solutions for wave energy control and attenuation, particularly due to their ability to be deployed in deep waters, rapid installation, ease of relocation, and prevention of sediment accumulation. However, the mooring system remains one of the most vulnerable components of these structures, as most structural damages typically occur in the connection zones. Therefore, an efficient design is achieved only when, in addition to ensuring proper hydrodynamic performance, the forces acting on the mooring lines are effectively controlled. In this study, aiming to reduce mooring forces and enhance structural stability, the effects of two key parameters, pontoon porosity and the presence of an energy-dissipating sub-structure, were experimentally investigated. The experiments were carried out in the wave flume of Iran University of Science and Technology (IUST) using a 1:30 scale physical model of a porous twin-pontoon floating breakwater, tested under 40 regular wave conditions with varying wave heights and periods. The variations of forces in the front and rear mooring lines were measured, and the results were compared for different porosity levels and the presence or absence of the sub-structure.The findings revealed that increasing pontoon porosity significantly reduces mooring forces, while the effect of the sub-structure depends on the wave period and may exhibit dual behavior either reducing or increasing the mooring loads. Moreover, the front and rear mooring lines exhibited distinct responses to changes in wave height and period. These results can serve as a practical guideline for the optimal design of porous floating breakwaters equipped with energy-dissipating sub-structures.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.48.135

Copyright: © 2026 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 2026-11-18]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.135]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۸، ۱۴۰۴، (۱۴۶-۱۳۵)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

بررسی آزمایشگاهی نیروی خطوط مهار موج‌شکن شناور پانتونی متخلخل با زیرسازه مستهلک‌کننده انرژی موج

شایان اسدی[۱]، ناصر شابختی[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد عمران (سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی)، دانشگاه علم و صنعت، shayan_asadi@civileng.iust.ac.ir

[۲] دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم وصنعت، shabakhty@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۳۱

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

موج‌شکن شناور

موج‌شکن شناور پانتونی

نیرو مهار

مدلسازی فیزیکی

چکیده

موج‌شکن‌های شناور به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در کنترل و جذب انرژی امواج در سال‌های اخیر، به‌ویژه به‌دلیل قابلیت احداث در آب‌های عمیق، نصب سریع، جابه‌جایی آسان و جلوگیری از تجمع رسوبات، به‌شکل فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این حال سامانه مهاربندی همچنان از آسیب‌پذیرترین بخش‌های این سازه‌هاست و بیشترین تخریب‌ها معمولاً در ناحیه اتصالات رخ می‌دهد. ازاین‌رو، طراحی کارآمد هنگامی حاصل می‌شود که علاوه بر عملکرد هیدرولیکی مناسب، نیروهای وارد بر خطوط مهار نیز به‌خوبی کنترل شوند. در این پژوهش با هدف کاهش نیروهای مهاربندی و ارتقای پایداری سازه، تأثیر دو عامل تخلخل پانتون‌ها و وجود زیرسازه مستهلک‌کننده انرژی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. آزمایش‌ها در کانال موج آزمایشگاه دانشگاه علم وصنعت ایران با مدل فیزیکی موج‌شکن دوپانتونی متخلخل در مقیاس ۱:۳۰ انجام گرفت و رفتار سازه در برابر ۴۰ حالت موج منظم با پریود و ارتفاع متفاوت تحلیل شد. تغییرات نیرو در خطوط مهاربندی جلو و پشت سازه اندازه‌گیری و نتایج برای حالت‌های مختلف تخلخل و وجود زیرسازه مقایسه گردید. یافته‌ها بیانگر آن است که افزایش تخلخل موجب کاهش قابل‌توجه نیروهای مهاربندی می‌شود، در حالی‌که اثر زیرسازه وابسته به پریود موج بوده و می‌تواند رفتار دوگانه‌ای در کاهش یا افزایش نیروها داشته باشد. همچنین خطوط مهاربندی جلو و پشت رفتار متمایزی در برابر تغییر ارتفاع و پریود امواج نشان دادند. این نتایج می‌تواند راهنمایی مؤثر برای طراحی بهینه موج‌شکن‌های شناور متخلخل با زیرسازه مستهلک‌کننده انرژی باشد.

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.48.135

ISSN: 2645-8136

حق نشر: © ۲۰۲۶ 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 2026-11-18]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.135]

۱- مقدمه

موج‌شکن‌های شناور به‌عنوان یکی از راهکارهای نوین در مهندسی سواحل و سازه‌های دریایی، برای جذب و تضعیف انرژی موج و کاهش اثرات مخرب آن بر زیرساخت‌های ساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرند[۱]. این نوع سازه به سبب قابلیت استقرار در آب‌های عمیق، سرعت ساخت، سهولت نصب و کاهش مسائل رسوب‌گذاری، در دهه اخیر به‌طور فزاینده‌ای در کانون توجه قرار گرفته‌اند[۲]. با وجود این مزایا، سامانه مهار همچنان یکی از مهمترین عوامل در تعیین عملکرد و دوام این سازه‌هاست؛ جایی که تمرکز نیروها و خستگی اتصالات می‌تواند هزینه‌های نگهداشت را افزایش داده و ریسک‌های بهره‌برداری را تشدید کند[۳].

مطالعات اولیه متعددی به طبقه‌بندی موج‌شکن‌های شناور اختصاص داشته است. برای نمونه McCartney [۴] و Hales [۵] انواع مختلف این سازه‌ها را بررسی کردند و در یک مرور جامع‌تر که توسط Dai و همکاران [1] انجام گردید موج‌شکن‌های شناور را به دسته‌هایی شامل جعبه‌ای، پانتونی، چهارچوبی، حصیری، شناور مهارشده، صفحه افقی و سایر تجهیزات کاهنده موج تقسیم‌بندی کردند. همچنین Sawaragi [۶] در سال ۱۹۹۵ این سازه‌ها را بر اساس مکانیزم عملکرد به سه گروه بازتابی، شکست و استهلاکی تفکیک نمود.

با توجه به عبور بخش قابل توجهی از انرژی موج از زیر سازه‌های جعبه‌ای و پانتونی، پژوهشگران به طراحی ساختارهای متنوع برای افزایش جذب انرژی در این ناحیه روی آوردند. برای مثال Mani [۷] در سال ۱۹۹۱سازه‌ای Y-Frame را معرفی نمود و Koutandos و همکاران [۸] ، Nasri وهمکاران [۹] و Kolahdozan و همکاران [۱۰] با افزودن صفحات متخلخل به بخش زیرین سازه تأثیر تخلخل، ارتفاع و تعداد صفحات را بررسی کردند و حالت بهینه‌ای را پیشنهاد دادند. He و همکاران [۱۱] نیز نشان دادند که این اصلاحات علاوه بر افزایش جذب انرژی، موجب کاهش و کنترل بهتر حرکات چرخشی می‌شوند. همچنین Ji وهمکاران درسال ۲۰۱۵ [۱۲] با قرارگیری قفس‌های مشبک دارای توپ های معلق، نوع هوشمندانه‌ای از موجشکن شناور دارای زیر سازه را معرفی نمودند.

یکی از راهکارهایی که در مطالعات پیشین به منظور افزایش عملکرد سازه موج شکن های شناور صورت پذیرفته است متخلخل نمودن این نوع سازه ها می باشد که مطالعات Wang و Sun [۱۳] در سال ۲۰۱۰ با معرفی موج شکن شناوری متشکل از بلوک‌های لوزی شکل، Christensen و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸ با ایجاد پوششی متخلخل در بدنه موج شکن شناور جعبه ای، Li و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۴ با پیکربندی نوآورانه دارای تخلخل به بهبود شرایط عمومی موج شکن های شناور پرداخته اند. در حالی‌که پژوهشگران متعددی طراحی‌های نوآورانه‌ای برای موج‌شکن‌های متخلخل شناور ارائه کرده‌اند، بیشتر آن‌ها تنها از یک نوع سامانه مهاربندی (مانند مهاربندی کابلی کشیده یا زنجیری خمیده) استفاده کرده‌اند. به عنوان نمونه مطالعات انجام شده توسط Rahman و همکاران [۱۶] و Ferreras و همکاران [۱۷] با مهار بندی نوع کشیده، ji و همکاران در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۴ [۱۸, ۱۹] با مهار نوع زنجیر خمیده ودر انتها Delvari و همکاران [۲۰] از مهار نوع شمعی استفاده نمودند. درادامه برای بیشتر تاثیر نوع مهاربندی در عملکرد سازه‌های مختلف از نوع جعبه ای و پانتونی ، می توان به مطالعات guo و همکاران و Liang و همکاران [۲۱, ۲۲] اشاره نمود که مزایا و معایب انواع سیستم مهار بندی را بررسی و راهکارهایی برای بهینه سازی این سیستم ارائه نمودند.

باید توجه داشت که عملکرد موج‌شکن متخلخل به‌شدت به اصطکاک بین جریان درون محیط متخلخل و اسکلت جامد آن وابسته است، که خود تابع سرعت نسبی بین آب و سازه است [۲۳]. ازاین‌رو طراحی سامانه مهاربندی نقشی تعیین‌کننده در کنترل پاسخ دینامیکی موج‌شکن متخلخل دارد و مستقیماً بر میزان اتلاف موج تأثیر می‌گذارد[۲۴]. این موضوع در وجود زیر سازه‌های ارائه شده در طراحی‌های مختلف نیز کاملا صدق می‌کند لذا رفتار سامانه مهار بندی تحت وجود این پارامترهای طراحی می‌بایست با تمرکز ببیشتری مورد مطالعه قرار گیرد.

با وجود توسعه گسترده راهکارهای مبتنی بر تخلخل و زیر سازه برای بهبود عملکرد هیدرودینامیکی موج‌شکن‌های شناور، تمرکز اغلب مطالعات پیشین بر ضرایب عبور و بازتاب موج و یا پاسخ‌های حرکتی سازه بوده است. در مقابل، اثر مستقیم این راهکارهای طراحی بر نیروهای وارد بر سامانه مهاربندی، که یکی از عوامل کلیدی در پایداری سازه، دوام اتصالات و هزینه‌های بهره‌برداری محسوب می‌شود، به‌صورت کمی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ازاین‌رو هنوز مشخص نیست که آیا بهبود عملکرد هیدرودینامیکی لزوماً به کاهش نیروهای مهاربندی منجر می‌شود یا می‌تواند در برخی شرایط اثر معکوس داشته باشد.

در این پژوهش، با الهام از یافته‌های پیشین درباره بهبود میرایی و اتلاف انرژی و کاهش میزان عبور و بازتاب موج، یک پیکربندی نوین برای موج‌شکن شناور ارائه می‌شود که متشکل از دو پانتون متخلخل است به‌طوری‌که تخلخل پانتون‌ها به‌عنوان نسبت مساحت حفره‌های ایجادشده روی سطح روبه موج به مساحت کل آن سطح تعریف شده و این پانتون‌ها با یک زیرسازه نوین ترکیب شده‌اند. برای کمی‌سازی نقش تخلخل پانتون‌ها و تاثیر وجود زیرسازه بر نیرو وارد بر خطوط مهاربندی، مجموعه‌ای از آزمایش‌های کانال موج در بازه‌ای از پریودها و ارتفاع‌های موج انجام گردید. پس از استخراج بیشینه نیروی خطوط

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.135]

مهاربندی جلو و پشت، نتایج بین پیکربندی‌های پانتونی گوناگون و همتای دارای زیرسازه و با تخلخل یکسان مقایسه شدند.

۲ – آزمایشگاه و تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلوم دوبعدی آزمایشگاه آب و محیط زیست دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران انجام گردید. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است این فلوم دارای طول ۲۴ متر، عرض ۰/۹۳ متر و ارتفاع ۱/۲ متر است [۲۵]. موج‌ساز از نوع لولایی بوده و در انتهای فلوم جاذب موج برای به حداقل رساندن بازتاب امواج برخوردی تعبیه شده است.

برای اندازه‌گیری نیروی خطوط مهار در جلوی موج و پشت سازه، دو لودسل روی بستر نصب شد که یکی برای سنجش نیروی خط مهار سمت دریا و دیگری برای سمت ساحل به‌کار رفت. هر لودسل به قلاب نگه‌دارنده جهت اتصال زنجیر مهار مجهز گردید و پیش از انجام آزمایش‌ها به‌صورت استاتیکی با اعمال بارهای معلوم کالیبره شد. لودسل‌های مورد استفاده دارای کلاس دقت C3 بوده و سیگنال خروجی آن‌ها پس از کالیبراسیون به برد آردوینو منتقل شد. ثبت نیرو به‌صورت سری زمانی با نرخ نمونه‌برداری ۵۰ هرتز و در مدت ۵۰ ثانیه برای هر آزمون انجام گرفته شده و پس از حذف نوسانات گذرا و در بازه پایدار، بیشینه نیروی وارد بر هر خط مهار به‌عنوان شاخص ارزیابی بدست آمده است.

علاوه بر این، فلوم موج مورد استفاده در این پژوهش پیش‌تر در مطالعه مروئی و همکاران (۲۰۲۶) [۲۵] مورد استفاده قرار گرفته و در ادامه، آرایش آزمایشگاهی این مطالعه در ادامه پژوهش اسدی و همکاران (۲۰۲۶) [۲۶] تنظیم شده است. لذا عملکرد فلوم از نظر تولید موج و دقت اندازه‌گیری‌ها به‌طور مستقل کالیبره و صحت‌سنجی شده است.

شکل ۱- تصویر کانال موج ساز

۳ – مقیاس‌بندی و مدل‌سازی

مقیاس‌گذاری بر مبنای تشابه فرود و با نسبت مقیاس ۱:۳۰ با توجه به مشخصات و محدودیت‌های آزمایشگاهی درنظرگرفته شده است. مدل پروتوتایپ مطابق مدل ارائه شده در مطالعه Ji و همکاران [۱۲] و ابعاد آن در جدول ۱ ارایه شده‌است. برای سنجش عملکرد سازه در پریودهای بلندتر، بازه گسترده‌تری از پریود موج به‌کار گرفته شد لذا حداکثر پریود تا ۱/۸ثانیه افزایش یافت.

۳-۱- معرفی مدل‌ها

دو پیکربندی کلی برای مقاطع آزمایش‌شده در این پژوهش معرفی گردید. نوع نخست با نام DP شامل دو پانتون جعبه‌ای است که فاصله بین آن‌ها برابر با نصف عرض هر پانتون در نظر گرفته شده است. تخلخل پانتون‌ها در چهار سطح و برای هر دو پانتون جلو و عقب این تخلخل یکسان درنظرگرفته شده است. ایجاد تخلخل از طریق مجموعه‌ای از کانال‌های PVC با قطر ۳۲ میلی‌متر روی سطح روبه‌موج پانتون ها ایجادگردیدو قطر حفره‌ها ثابت و تعداد لوله‌ها برابر ۱۴، ۲۸ و ۴۲ عدد به ترتیب برای پانتون با تخلخل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در دو ردیف بالا و پایین برای هر پانتون به صورت یکپارچه و منظم درنظرگرفته شد تا سطح تخلخل مورد نظر حاصل شود. لذا وزن این نوع پیکربندی برابر ۸۲۰۰ گرم حاصل گردید. نامگذاری سازه ها بدین ترتیب می باشدکه پس از نام سازه میزان تخلخل با یک خط تیره مشخص می‌گردد. به طور مثال DP_20 نشان دهنده سازه پانتون دوتایی با تخلخل ۲۰ درصد می‌باشد.

نوع دوم، با نام DPS بوده که معادل پیکربندی DP با تخلخل ۳۰ درصد است که در زیر هر پانتون، زیرسازه‌ای متشکل از دو ردیف لوله PVC با قطر ۶۳ میلی‌متر و آرایش شطرنجی تعبیه شده است. این لوله‌ها در صفحه‌ای نگه دارنده و با فاصله برابر در زیر پانتون‌ها قرار گرفته‌اند که مجموعاً ۱۱ عدد لوله در زیر هر پانتون را تشکیل می‌دهد که در زمان استقرار در محل آزمایش لوله‌ها از طریق حفرات مناسب که در صفحه زیرین درنظرگرفته شده است پر از آب می‌شود. لذا وزن این سازه حدود ۱۵۲۰۰ گرم بدست می آید. مطابق شواهد گزارش‌شده در مطالعات پیشین، وجود چنین زیرسازه‌ای می‌تواند کاهش ارتفاع موج و اتلاف انرژی را در موج‌شکن‌های شناور تقویت کند؛ ازاین‌رو، در این مطالعه اثر افزودن زیرسازه بر میزان نیروی وارد بر سامانه مهار به‌صورت اختصاصی ارزیابی شده است. با قاعده نامگذاری طراحی شده نام این سازه DPS_30 می‌باشد. شکل شماتیک انواع سازه مورد آزمایش در این مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که محل شناوری تمام مدل‌ها بعلت تقارن در مرکز پانتون‌ها قرار گرفته است.

خطوط مهار با الهام از ابعاد نمونه‌واقعی گزارش‌شده در مطالعه Ji و همکاران درسال ۲۰۱۵ [۱۲]، به‌صورت خمیده، موازی و بدون تماس با بستر طراحی و به‌کارگرفته شد. برای هر خط از زنجیر فولادی ضدزنگ با طول آزاد ۱/۰۵ متر و جرم طولی ۰/۲۸ کیلوگرم بر متر استفاده گردید. به‌منظور تثبیت اتصالات، قلاب‌های نگهدارنده در بستر بتنی فلوم و روی سازه نصب گردید تا زنجیرهای مهار در موقعیت صحیح نگه داشته شوند. این آرایش مهار برای تمامی پیکربندی‌های سازه‌ای به‌صورت مشابه درنظرگرفته شد. در شکل ۳ مشخصات و آرایش خطوط مهاربندی شامل شیب و زاویه خطوط

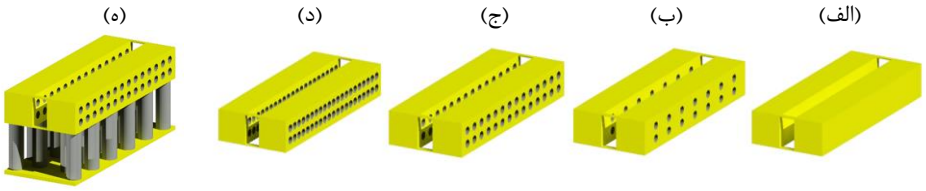
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.135]

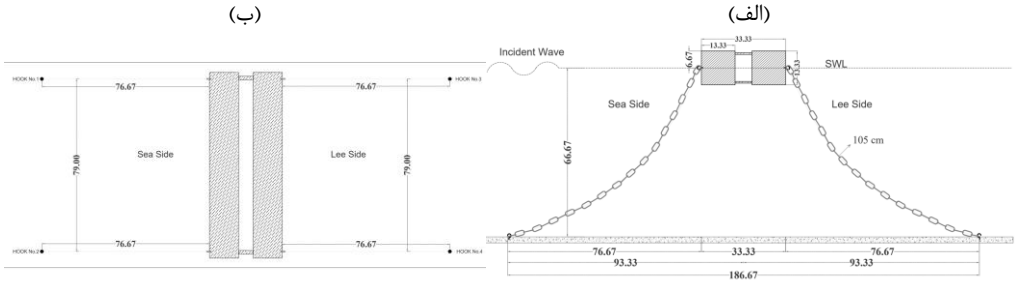
مهار نشـان داده شـده که در تمامی آزمایش‌ها این نوع آرایش ثابت و بدون تغییر در نظر گرفته شده است.

جدول ۱ – مشخصات ابعادی مدل‌سازی

شرح	ابعاد مدل واقعی	ابعاد در مقیاس ۱:۳۰
عمق آب (m)	۲۰	۰/۶۶۷
عرض مدل (m)	۱۰	۰/۳۳۳
عرض پانتون (m)	۴	۰/۱۳۳
فاصله بین پانتون‌ها (m)	۲	۰/۰۶۷
طول مقطع (m)	۱۲/۲۰۰	۰/۵۰۷
ارتفاع پانتون (m)	۴	۰/۱۳۳
ارتفاع زیرسازه (m)	۸	۰/۲۶۷
بازه ارتفاع موج (m)	۱/۶۵ – ۳/۴۵	۰/۰۵۵ – ۰/۱۱۵
بازه پریود موج (sec)	۴/۴۰ – ۹/۹۰	۰/۸ – ۱/۸
طول آزاد مهار (m)	۳۱/۵	۱/۰۵
فاصله مهار جلو و پشت (m)	۵۶	۱/۸۶۷



شکل ۲- شماتیک انواع سازه‌های مورد آزمایش الف) DP_0 ب) DP_10 ج) DP_20 د) DP_30 ه) DPS_30



شکل ۳- آرایش سیستم مهاربندی الف) نمای جانبی ب)نمای بالا

۲-۳-مدل‌سازی امواج

در تحقیق حاضر، با توجه به ابعاد نمونه واقعی گزارش‌شده در جدول ۱ و محدودیت‌های آزمایشگاهی، امواج منظم در چهار سطح ارتفاع موج با مقادیر ۰/۰۵۵، ۰/۰۷۵، ۰/۰۹۵ و ۰/۱۱۵ متر در نظر گرفته شد. همچنین پریود موج در بازه‌ای گسترده‌تر نسبت به نمونه واقعی و در ده سطح مختلف از ۰/۸ تا ۱/۸ ثانیه انتخاب گردید. جدول ۲ مقادیر ارتفاع و پریود امواج به‌کاررفته در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. ترکیب این چهار ارتفاع موج با ده پریود مختلف، در مجموع ۴۰ حالت موج منظم را تشکیل می‌دهد که تمامی پیکربندی‌های معرفی‌شده دربخش قبلی تحت این شرایط امواج مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۲ – مشخصات امواج مدل‌سازی

H (m)	*T (sec)*	تعداد تست
۰/۰۵۵	۰/۸، ۰/۹، ۱/۰، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳، ۱/۴، ۱/۵، ۱/۶، ۱/۸	۱۰
۰/۰۷۵	۰/۸، ۰/۹، ۱/۰، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳، ۱/۴، ۱/۵، ۱/۶، ۱/۸	۱۰
۰/۰۹۵	۰/۸، ۰/۹، ۱/۰، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳، ۱/۴، ۱/۵، ۱/۶، ۱/۸	۱۰
۰/۱۱۵	۰/۸، ۰/۹، ۱/۰، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳، ۱/۴، ۱/۵، ۱/۶، ۱/۸	۱۰
مجموع آزمایشات هر سازه		۴۰

۴-نتایج

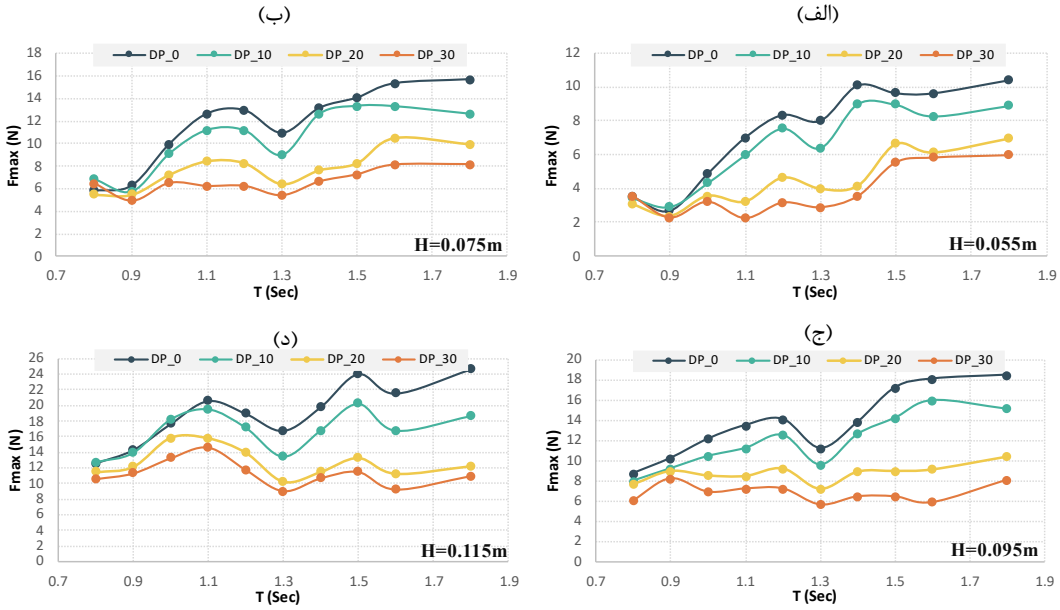
۴-۱- بررسی تاثیر تخلخل بر نیروی مهار

شکل ۴ تغییرات نیروی مهار جلویی موج‌شکن‌های شناور نوع DP با سطوح مختلف تخلخل (۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که به‌طور کلی نیروی مهار جلویی (در سمت دریا) برای تمامی مدل‌ها با افزایش پریود موج روندی افزایشی دارد. افزایش تخلخل از ۰ به ۱۰ درصد باعث کاهش نسبی نیروی مهار در حدود ۲۵ درصد گردید. با افزایش تخلخل از ۱۰ به ۲۰ درصد کاهش نیرو به حدود ۶۰ درصد و در نهایت افزایش تخلخل از ۲۰ به ۳۰ درصد موجب کاهش در حدود ۳۵ درصد به‌صورت نسبی گردید. این نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تغییر رفتار سازه در بازه‌ی بین تخلخل‌های ۱۰ و ۲۰ درصد رخ داده است که می‌تواند ناشی از تغییرات دینامیکی جریان و اندرکنش موج و سازه باشد. روند کلی نتایج بیانگر آن است که با افزایش تخلخل، سطح مؤثر برخورد موج با سازه کاهش یافته و بخش بیشتری از حجم آب از میان سازه عبور می‌کند. در نتیجه نیروی منتقل شده از موج به سازه و به تبع آن نیروی وارد بر خطوط مهار نیز کاهش می‌یابد.

شکل ۵ تغییرات نیروی وارد بر خط مهار پشتی سازه را برای ارتفاع موج‌های مختلف بر حسب پریود موج، برای انواع سازه DP با تخلخل متفاوت را نشان می‌دهد. الگوی کلی نتایج مشابه رفتار مشاهده‌شده در خط مهار جلویی است با این تفاوت که مقادیر نیروی مهار پشتی

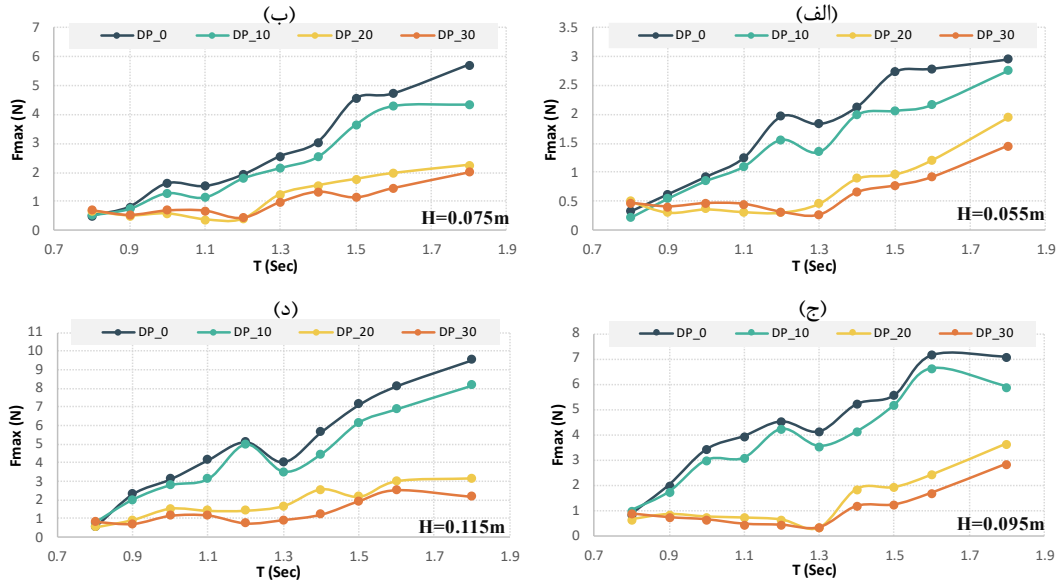
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.135]

به‌صورت نسبی حدود ۳ تا ۱۸ برابر کمتر از نیروی مهار جلویی است.این اختلاف ناشی از آن است که بیشترین انتقال انرژی موج در محل برخورد اولیه موج با پانتون‌های جلویی رخ می‌دهد و در نتیجه، بخش عمده بار دینامیکی در همان ناحیه به خطوط مهار جلو منتقل می‌شود. با عبور موج در امتداد سازه، بخشی از انرژی آن به‌واسطه بازتاب، عبور و اتلاف در بدنه متخلخل مستهلک شده و دامنه نیروهای منتقل‌شده به مهارهای پشتی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین با برخورد موج به سازه، سازه تمایل به حرکت در راستای طولی فلوم دارد که سبب افزایش آزادی ارتعاش خط مهار پشتی و در نتیجه کاهش نیروی منتقل‌شده به آن می‌گردد.



شکل ۴- بیشینه نیرو وارد به مهار جلو سازه‌های با سطوح مختلف تخلخل بر حسب پریود در ارتفاع امواج مختلف

(الف):*H=0.055m* (ب): *H=0.075m* (ج): *H=0.095m* (د): *H=0.115m*



شکل ۵- بیشینه نیرو وارد به مهار پشت سازه‌های با سطوح مختلف تخلخل بر حسب پریود در ارتفاع امواج مختلف

(الف):H=0.055m (ب): H=0.075m (ج): H=0.095m (د): H=0.115m

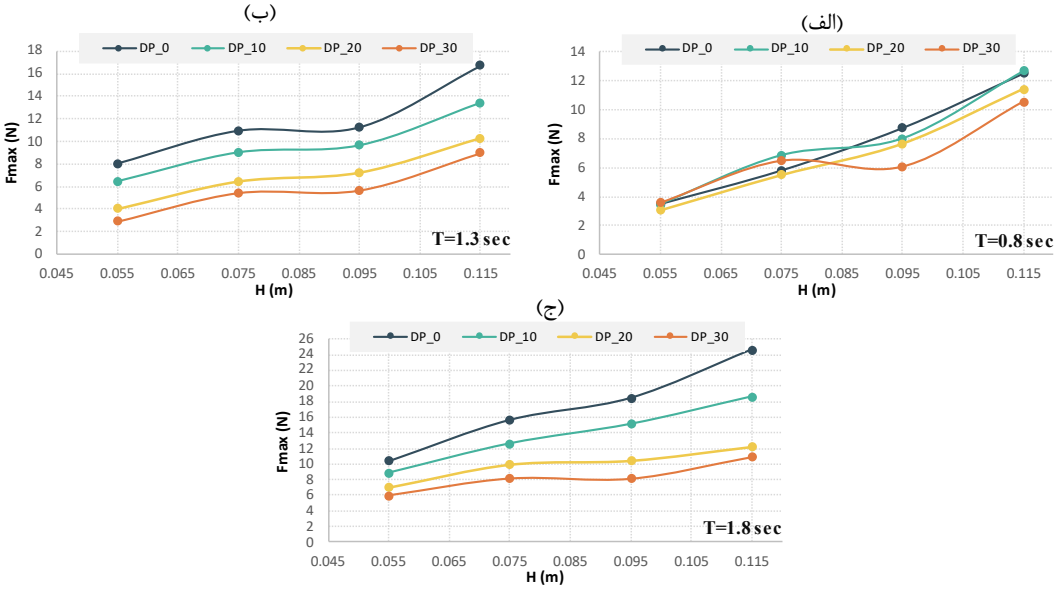
شکل ۶ نیز نتایج مربوط به بررسی نیروی وارد بر خط مهار جلویی سازه برای سه پریود ۰/۸، ۱/۳ و ۱/۸ ثانیه بر حسب ارتفاع امواج آزمایش‌شده را نشان می دهد. نتایج بیانگر آن است که افزایش ارتفاع موج می‌تواند منجر به افزایش بیشینه نیروی مهاربندی تا حدود سه برابر شود. این اثر در پریودهای بلندتر بارزتر بوده، در حالی‌که با کاهش پریود موج، حساسیت نیرو نسبت به تغییر ارتفاع موج کاهش یافته و در پریود ۰.۸ ثانیه اختلاف نیروها تقریباً ناچیز می‌شود.

رفتار نشان داده شده ناشی از تفاوت در رفتار دینامیکی سازه در پریودهای مختلف موج می‌باشد. مطالعات پیشین، از جمله Christensen و همکاران [۱۴] موید این موضوع بوده و مشاهده کردند که در پریودهای کوتاه، تغییر در پاسخ حرکت چرخشی سازه که یکی از عوامل مؤثر بر نیروی مهار محسوب می‌شود، در اثر افزایش تخلخل محدودتر از پریودهای بلند است. بنابراین حساسیت نیروی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.135]

مهار نسبت به تغییر تخلخل در پریودهای کوتاه کمتر از پریودهای بلند خواهد بود.



شکل ۶- بیشینه نیرو وارد به مهار جلو سازه‌های با سطوح مختلف تخلخل بر حسب ارتفاع موج در سه نوع پریود
(الف): T=0.8 sec (ب): T=1.3 sec (ج): T=1.8 sec

در ادامه نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که متخلخل‌کردن سازه عاملی مؤثر و کارآمد در کاهش نیروی وارد بر خطوط مهار موج‌شکن شناور است، که در نتیجه موجب افزایش عمر سازه و خطوط مهار می‌شود. با این حال باید توجه داشت که افزایش بیش از حد تخلخل ممکن است عملکرد هیدرولیکی سازه را از نظر میزان عبور و استهلاک انرژی تحت تاثیر قراردهد. از این‌رو یافتن میزان تخلخل بهینه در طراحی سازه امری ضروری بنظر می رسد.

۲-۴- بررسی تاثیر زیر سازه بر نیروی مهار

مقایسه بیشینه نیروی وارد بر خط مهار جلویی سازه‌ها در برابر تغییرات پریود موج و تحت ارتفاع‌های مختلف، برای دو پیکربندی DP_30 و DPS_30 در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که حضور زیرسازه تا پریود حدود ۱/۳ ثانیه موجب کاهش قابل توجه نیروی مهاربندی شده، به‌گونه‌ای که بیشینه نیرو در برخی شرایط تا حدود ۵۰ درصد نسبت به حالت فاقد زیرسازه کاهش یافته است. این رفتار را می‌توان ناشی از کاهش دامنه پاسخ‌های چرخشی و بهبود میرایی سامانه در بازه پریودهای کوتاه‌تر دانست.در مقابل در پریودهای بزرگ‌تر از ۱/۳ ثانیه، حضور زیرسازه با افزایش نیرو همراه بوده و در برخی حالات افزایش تا حدود ۲۵ درصد نیز مشاهده شده است.

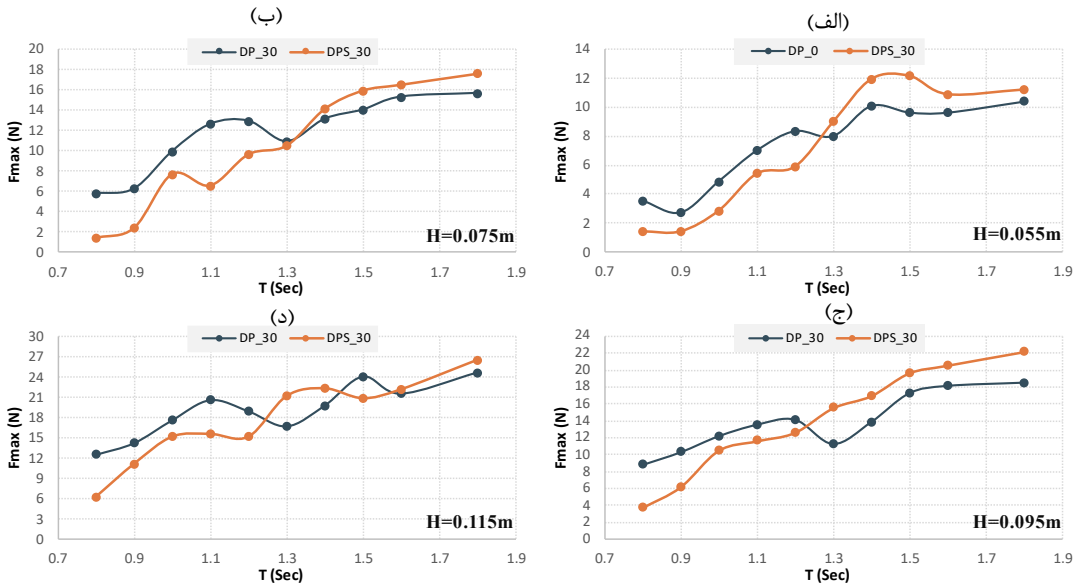
همچنین شیب بیشتر منحنی‌های نیرو، پریود در سازه DPS نسبت به DP نشان‌دهنده حساسیت بالاتر این پیکربندی به تغییرات پریود موج است. به عبارت دیگر پاسخ نیروی مهاربندی در حضور زیرسازه وابستگی شدیدتری به مشخصات موج داشته و دامنه تغییرات آن در بازه پریودهای آزمایش‌شده بزرگ‌تر است. تأثیر وجود زیرسازه بر نیروی وارد بر خطوط مهار پشت سازه در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل مربوطه مشاهده می‌شود، حضور زیرسازه به‌طور کلی موجب کاهش نیروی وارد بر خط مهار پشتی در مقایسه با حالت فاقد زیرسازه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر کاهشی زیرسازه بر نیروی مهار پشتی در پریودهای بلندتر تقویت می‌شود، به‌گونه‌ای که برای پریودهای بیش از ۱ ثانیه اختلاف نیرو بین دو پیکربندی تا حدود دو برابر افزایش می‌یابد در حالی‌که در پریودهای کوتاه‌تر، پاسخ دو سازه به یکدیگر نزدیک بوده و اختلاف قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. از نظر فیزیکی این کاهش ناشی از کاهش دامنه حرکت چرخشی و افزایش حرکت طولی سازه در حضور زیرسازه است که به نوبه خود آزادی عمل بیشتری برای خطوط مهار پشت سازه ایجاد می نماید. همچنین مشاهده می‌شود که این اختلاف با افزایش پریود افزایش یافته است.

شکل ۹ تأثیر حضور زیرسازه بر تغییرات نیروی مهار جلویی در اثر افزایش ارتفاع موج را برای سه پریود ۰/۸، ۱/۳ و ۱/۸ ثانیه نشان می‌دهد. در پریود ۰/۸ ثانیه، مقادیر بیشینه نیروی مهار در سازه DP-30 بیشتر از سازه DPS-30 بوده و اختلاف بین دو پیکربندی به‌طور متوسط در بازه‌ای حدود ۲ تا ۴ برابر مشاهده شده است. در مقابل، در پریودهای ۱/۳ و ۱/۸ ثانیه که سازه DPS مقادیر بزرگ‌تری از بیشینه نیروی مهار را نسبت به DP نشان می‌دهد، این اختلاف به‌صورت نسبی تا حدود ۳ برابر افزایش یافته است.

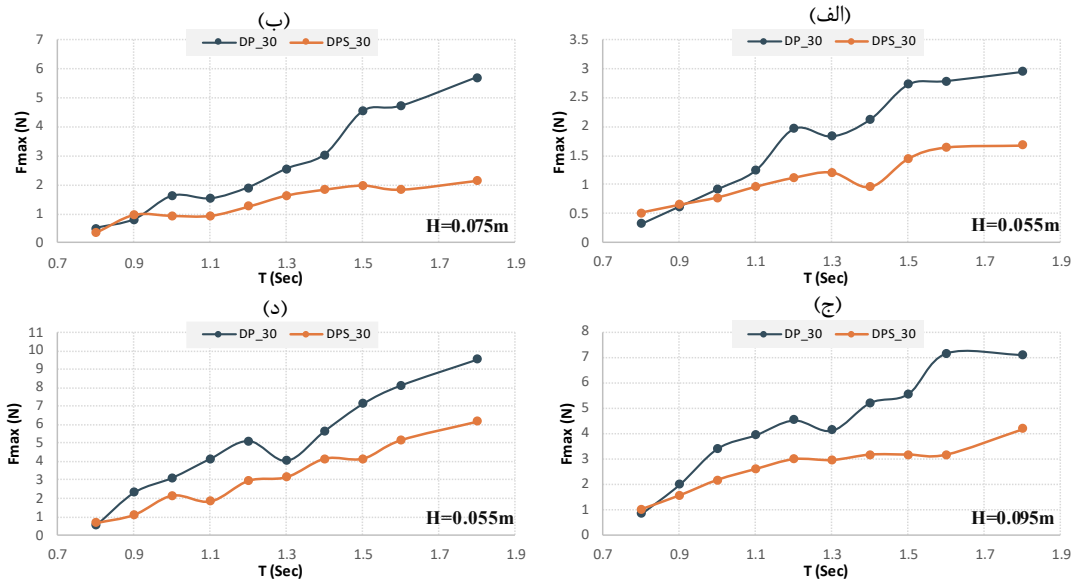
نتایج این مطالعه نشان می دهد که برای خطوط مهار جلوی سازه در پریودهای کوتاه موجب کاهش نیرو در سامانه مهارگردیده اما در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.135]

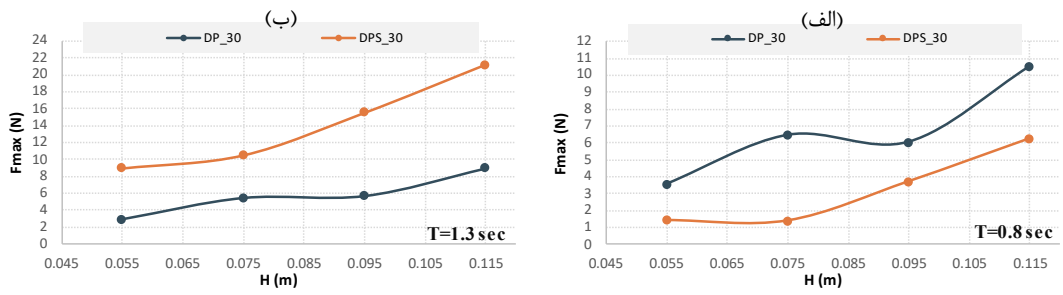
پریودهای بلند موجب افزایش نیرو شده است. بنابراین استفاده از زیرسازه باید به‌صورت کنترل‌شده و با توجه به شرایط هیدرودینامیکی امواج در محل اجرای سازه صورت گیرد و برای کنترل نیروهای مهار در پریودهای بلند، نیازمند بهینه‌سازی طراحی و ارائه راهکارهای مؤثر می‌باشد.



شکل ۷- مقایسه بیشینه نیرو وارد به مهار جلو سازه بین سازه DP_30 و DPS_30 بر حسب پریود در ارتفاع امواج مختلف
(الف): *H=0.055m* (ب): *H=0.075m* (ج): *H=0.095m* (د): *H=0.115m*

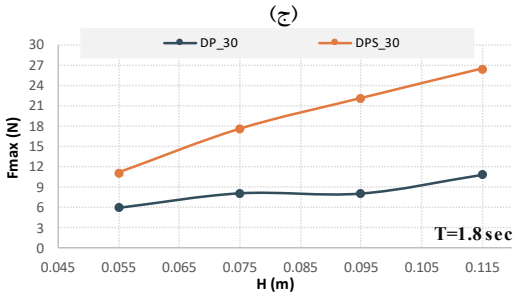


شکل ۸- مقایسه بیشینه نیرو وارد به مهار پشت سازه بین سازه DP_30 و DPS_30 بر حسب پریود در ارتفاع امواج مختلف
(الف): *H=0.055m* (ب): *H=0.075m* (ج): *H=0.095m* (د): *H=0.115m*



[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.135]



شکل ۹- مقایسه بیشینه نیرو وارد به مهار جلو سازه بین سازه DP_30 و DPS_30 بر حسب ارتفاع موج در سه نوع پریود موج مختلف (الف): T=0.8 sec (ب): T=1.3 sec (ج): T=1.8 sec

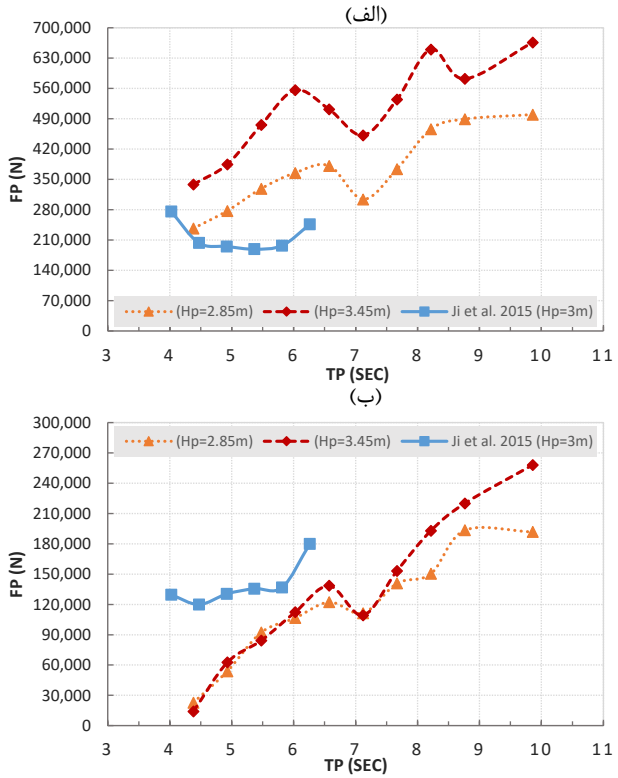
۳-۴- مقایسه نتایج پژوهش حاضر با Ji و همکاران (۲۰۱۵)

به‌منظور مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر با مطالعه Ji و همکاران (۲۰۱۵) [۱۲]، مقادیر نیروی بیشینه وارد بر مهار جلویی و مهار پشتی سازه بر حسب پریود موج، در شرایط ارتفاع موج نزدیک به یکدیگر، مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به اختلاف مقیاس مدل‌سازی در دو پژوهش به‌منظور حذف اثر مقیاس‌بندی، تمامی پارامترها بر اساس تشابه فرود به حالت پروتوتایپ تبدیل شده و سپس مقایسه انجام گردید. نتایج این مقایسه در شکل ۱۰ ارائه شده است.

از میان مدل‌های معرفی‌شده در مطالعه مرجع مدل متشکل از دو پانتون استوانه‌ای انتخاب شد و از پژوهش حاضر نیز مدل دو پانتون جعبه‌ای بدون تخلخل مورد استفاده قرار گرفت، زیرا بیشترین شباهت را از نظر پیکربندی کلی داشته و امکان بررسی اثر تفاوت شکل پانتون‌ها (جعبه‌ای در برابر استوانه‌ای) را فراهم می‌کند. همچنین، ارتفاع موج‌های آزمایش‌شده در دو پژوهش در بازه‌های نزدیک قرار دارند؛ به‌این‌ترتیب، از مطالعه مرجع آزمایش‌های متناظر با ارتفاع موج ۳ متر در مقیاس پروتوتایپ انتخاب شد و از پژوهش حاضر نیز نتایج مربوط به ارتفاع موج‌های ۲/۸۵ و ۳/۴۵ متر (پروتوتایپ) مورد استفاده قرار گرفت. میانگین‌گیری از این دو سری آزمایش در پژوهش حاضر به‌عنوان نماینده‌ای مناسب برای شرایط نزدیک به ارتفاع موج ۳ متر در نظر گرفته شد تا نزدیک‌ترین حالت مقایسه بین دو مطالعه فراهم گردد.

بر اساس نتایج شکل ۱۰-الف، به‌طور کلی نیروی مهار جلویی در پیکربندی جعبه‌ای بزرگ‌تر از پیکربندی استوانه‌ای به‌دست آمده است. این رفتار را می‌توان به سطح مؤثر بیشتر پانتون‌های جعبه‌ای در برخورد با موج نسبت داد که موجب افزایش نیروی وارد بر سازه و در نتیجه افزایش تنش مهار جلویی می‌شود. این نتیجه همسو با مشاهدات مربوط به اثر تخلخل است به‌نحوی‌که در صورت استفاده از پیکربندی متخلخل می‌توان انتظار داشت این اثر نامطلوب (افزایش نیرو) تا حدی کاهش یابد. به‌عنوان نمونه اختلافی در حدود ۱/۶ برابر بین سازه استوانه‌ای مطالعه Ji و همکاران (۲۰۱۵) [۱۲] و سازه جعبه‌ای پژوهش حاضر در پریود ۶ ثانیه (پروتوتایپ) مشاهده می‌گردد.

همچنین مطابق شکل ۱۰-ب، به دلیل افزایش نیروی مهار جلویی در پیکربندی جعبه‌ای، میزان جابه‌جایی طولی سازه افزایش یافته و در پی آن، آزادی نسبی خطوط مهار پشتی بیشتر می‌شود، در نتیجه نیروی بیشینه مهار پشتی در پیکربندی جعبه‌ای کاهش می‌یابد. با این وجود، باید توجه داشت که تغییرات رفتار هیدرودینامیکی سازه و تفاوت در میزان استهلاک انرژی موج در دو پیکربندی (استوانه‌ای و جعبه‌ای) نیز می‌تواند در تشدید یا تضعیف این اختلاف‌ها نقش داشته باشد. ازاین‌رو بررسی دقیق‌تر ضرایب هیدرولیکی و شاخص‌های عملکرد موج‌شکنی برای تفسیر کامل‌تر نتایج پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۰- مقایسه بیشینه نیروی مهار جلو و پشت سازه بین پژوهش حاضر و Ji et al. (2015) بر حسب پریود موج (مقیاس پروتوتایپ): (الف) مهار جلو، (ب) مهار پشت.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.135]

۵- بحث و نتیجه گیری

۵-۱-بحث

نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش درک روشنی از تأثیر تخلخل پانتون‌ها و وجود زیرسازه مستهلک‌کننده انرژی بر نیروهای مهاربندی موج‌شکن شناور دوپانتونی تحت شرایط مختلف موج منظم فراهم می‌کند. در این مطالعه، آرایش هندسی سامانه مهاربندی شامل زاویه و شیب خطوط مهار در تمامی آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده و اثر تغییر این پارامترها به‌طور مستقل بررسی نشده است. با این حال، بدیهی است که تغییر زاویه و شیب خطوط مهار می‌تواند با تغییر توزیع مؤلفه‌های افقی و عمودی نیرو، بر میزان نیروی منتقل‌شده به اتصالات و شرایط بحرانی سامانه مهاربندی اثرگذار باشد.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان تخلخل پانتون‌ها، نیروی وارد بر خط مهار جلویی به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. این رفتار بیانگر آن است که وجود حفره‌ها موجب عبور بخشی از جریان از بدنه پانتون شده و بخشی از انرژی موج پیش از انتقال به سامانه مهاربندی مستهلک می‌گردد. با افزایش تخلخل، سهم عبور و اتلاف انرژی افزایش یافته و در نتیجه، نیروی کمتری به خطوط مهار منتقل می‌شود. روند کاهش نیرو ماهیتی غیرخطی دارد، به‌گونه‌ای که بیشترین کاهش نیرو در بازه تغییر تخلخل از ۱۰ به ۲۰ درصد مشاهده شده است؛ موضوعی که می‌تواند نشان‌دهنده گذار از رژیم بازتاب غالب به رژیم اتلاف انرژی غالب باشد. در شرایطی که بازتاب موج غالب است، سهم بیشتری از انرژی موج به سازه و خطوط مهار منتقل می‌شود.

در تمامی حالات آزمایش‌شده، نیروی وارد بر خطوط مهار پشت سازه کمتر از خط مهار جلویی بوده است. این موضوع را می‌توان به استهلاک بخشی از انرژی موج پیش از رسیدن به پانتون دوم و همچنین آزادی حرکتی بیشتر سازه در راستای طولی نسبت داد که منجر به کاهش کشش در خطوط مهار پشتی می‌شود. با این وجود، روند تغییرات نیرو در مهار پشت سازه در اثر افزایش تخلخل، الگوی مشابهی با مهار جلویی نشان می‌دهد، هرچند با دامنه کمتر.

افزودن زیرسازه مستهلک‌کننده انرژی رفتار دوگانه‌ای در پاسخ نیروهای مهاربندی ایجاد کرده است. در امواج با پریودهای کوتاه‌تر (کمتر از حدود ۱.۳ ثانیه)، وجود زیرسازه با کاهش نوسانات سازه به‌ویژه کاهش پاسخ‌های چرخشی همراه بوده و در نتیجه منجر به کاهش نیروی وارد بر خطوط مهار جلویی شده است. در مقابل در پریودهای بلندتر زیرسازه با افزایش جرم افزوده و تشدید حرکات طولی سبب افزایش نیروهای مهاربندی گردیده است. این رفتار نشان می‌دهد که اثر زیرسازه به‌شدت وابسته به پریود موج بوده و عملکرد آن می‌تواند در بازه‌های پریودی مختلف متفاوت باشد.

در خطوط مهار پشت سازه این رفتار دوسویه مشاهده نشده است و در تمامی پریودهای آزمایش‌شده، نیروهای مهاربندی در سازه DP نسبت به سازه DPS کمتر بوده است. این موضوع می‌تواند ناشی از استهلاک بیشتر انرژی موج پیش از رسیدن به پانتون دوم و همچنین افزایش دامنه حرکات طولی سازه DPS در اثر جرم افزوده بیشتر باشد.

بررسی اثر پریود و ارتفاع موج نشان می‌دهد که به‌طور کلی با افزایش پریود موج بیشینه نیروی وارد بر خطوط مهار افزایش می‌یابد. این افزایش در سازه‌های با تخلخل کمتر دارای شیب تندتری است در حالی‌که سازه DPS حساسیت بیشتری نسبت به تغییر پریود از خود نشان می‌دهد و دامنه تغییرات نیروی مهار در آن بزرگ‌تر است. همچنین افزایش ارتفاع موج، با افزایش دامنه حرکات سازه منجر به افزایش کشش در خطوط مهار و در نتیجه افزایش نیروی مهاربندی در تمامی پیکربندی‌ها شده است.

به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که افزایش تخلخل پانتون‌ها و استفاده از زیرسازه مستهلک‌کننده انرژی می‌توانند توانایی اتلاف انرژی موج‌شکن شناور را بهبود بخشند، اما دستیابی به عملکرد بهینه مستلزم درنظرگرفتن هم‌زمان مشخصات موج غالب محل و ویژگی‌های سامانه مهاربندی است.

۵-۲- نتیجه گیری

۱. افزایش تخلخل پانتون‌ها تأثیر قابل توجهی بر کاهش نیروهای مهاربندی داشته است. افزایش تخلخل از ۰ به ۳۰ درصد منجر به کاهش بیشینه نیروی مهار جلویی تا حدود ۲۵ تا ۶۰ درصد شده و بیشترین تغییر رفتار در بازه تخلخل ۱۰ تا ۲۰ درصد مشاهده گردیده است که نشان‌دهنده گذار از رژیم بازتاب غالب به رژیم اتلاف انرژی غالب است.

۲. نیروی وارد بر خط مهار پشتی به‌طور نسبی بین ۳ تا ۱۸ برابر کمتر از نیروی مهار جلویی اندازه‌گیری شد. این اختلاف ناشی از تمرکز انتقال مومنتوم موج در محل برخورد اولیه با پانتون‌های جلویی و استهلاک تدریجی انرژی موج در امتداد سازه متخلخل است.

۳. حضور زیرسازه مستهلک‌کننده انرژی رفتار دوگانه‌ای از خود نشان داد. در پریودهای کوتاه‌تر از حدود ۱.۳ ثانیه، استفاده از زیرسازه موجب کاهش نیروی مهار جلو تا حدود ۵۰ درصد شد، در حالی‌که در پریودهای بلندتر افزایش نیرو تا حدود ۲۵ درصد نیز مشاهده گردید که می‌تواند ناشی از تشدید حرکات طولی سازه باشد.

۴. در بررسی اثر ارتفاع موج، افزایش ارتفاع موج موجب افزایش بیشینه نیروی مهار تا حدود سه برابر شد، اما این حساسیت در پریودهای کوتاه‌تر کاهش یافته و در پریود ۰/۸ ثانیه اختلاف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.135]

نیروها تقریباً ناچیز بوده است که بیانگر وابستگی رفتار سامانه مهاربندی به رژیم دینامیکی حاکم است.

۵. مقایسه پیکربندی‌های DP_30 و DPS_30 نشان داد که در برخی شرایط اختلاف نیرو بین دو مدل به ۲ تا ۴ برابر نیز می‌رسد. همچنین شیب بیشتر منحنی‌های نیرو، پریود در سازه DPS نشان‌دهنده حساسیت بالاتر این پیکربندی نسبت به تغییرات پریود موج است.

۶. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه افزایش تخلخل به‌طور کلی موجب کاهش نیروهای مهاربندی می‌شود، اما استفاده از زیرسازه باید با درنظرگرفتن شرایط طیفی موج غالب محل اجرا انجام گیرد؛ زیرا در پریودهای بلند می‌تواند منجر به افزایش بار مهاربندی گردد. ازاین‌رو طراحی بهینه مستلزم بررسی همزمان تخلخل، هندسه زیرسازه و ویژگی‌های سامانه مهاربندی است.

علاوه بر نقش مؤثر تخلخل پانتون‌ها در کاهش نیروهای مهاربندی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی زیرسازه مستهلک‌کننده انرژی می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر رفتار دینامیکی سازه و میزان نیروی منتقل‌شده به سامانه مهار اثرگذار باشد. ازاین‌رو، بررسی زیرسازه‌های جایگزین با هندسه‌ها و آرایش‌های متفاوت، به‌منظور دستیابی به کاهش نیروهای مهاربندی در بازه وسیع‌تری از پریودهای موج، توصیه می‌شود. همچنین ارزیابی آرایش‌های مختلف سامانه مهاربندی با هدف بهینه‌سازی توزیع نیرو و کاهش تمرکز تنش در خطوط مهار و نواحی اتصال می‌تواند نقش مهمی در افزایش دوام سازه و به‌ویژه طول عمر اتصالات ایفا کند.

۳-۵- پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی

در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود اثر امواج نامنظم (طیفی) بر رفتار سامانه مهاربندی موج‌شکن شناور، به‌عنوان گامی مکمل برای تعمیم نتایج حاضر، مورد بررسی قرار گیرد. همچنین ارزیابی پیکربندی‌های چندماژوله، آرایش‌های مختلف و ترکیبی مهاربندی، اندازه‌گیری همزمان پاسخ‌های حرکتی و سنجش ضرایب هیدرولیکی می‌تواند درک جامع‌تری از عملکرد سازه فراهم آورد. علاوه بر این، بررسی پارامتریک اثر تغییر زاویه و شیب خطوط مهار در ترکیب با شرایط مختلف موج، به‌منظور تحلیل توزیع مولفه‌های نیرو و شناسایی حالت‌های بحرانی سامانه مهاربندی، توصیه می‌شود. توسعه مدل‌های عددی نیز می‌تواند به تحلیل دقیق‌تر برهم‌کنش غیرخطی بین تخلخل، پاسخ دینامیکی سازه و رفتار مهار کمک کند.

۶ - مراجع

1- Dai, J., C.M. Wang, T. Utsunomiya, and W. Duan, (2018), *Review of recent research and developments on floating breakwaters.* Ocean Engineering. 158: p. 132–151. 10.1016/j.oceaneng.2018.03.083

2- Cui, X., R. Song, B. Liu, W. Yang, H. Wang, J. Deng, and F. Li, (2025), *Hydrodynamic performance study of Savonius hydrodynamic turbine - Double pontoon composite floating breakwater.* Ocean Engineering. 318. 10.1016/j.oceaneng.2024.120143

3- Diamantoulaki, I. and D.C. Angelides, (2013), *Risk-based maintenance scheduling using monitoring data for moored floating breakwaters.* Structural safety. 41: p. 107–118. 10.1016/j.strusafe.2012.10.007

4- McCartney, B.L., (1985), *Floating breakwater design.* Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 111(2): p. 304–318. 10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:2(304)

5- Hales, L.Z., (1981), *Floating breakwaters: State-of-the-art literature review.*

6- Sawaragi ,T., (1995), *Coastal engineering-waves, beaches, wave-structure interactions*. Vol. 78: Elsevier.

7- Mani, J., (1991), *Design of Y-frame floating breakwater.* Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 117(2): p. 105–119. 10.1061/(ASCE)0733-950X(1991)117:2(105)

8- Koutandos, E., P. Prinos, and X. Gironella, (2010), *Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics.* Journal of Hydraulic Research. 43(2): p. 174–188. 10.1080/00221686.2005.9641234

9- Nasri, B., M.N. Moghim, and M.A. Badri, (2021), *Experimental study on trapezoidal pontoon-type floating breakwaters with attached porous plates.* Journal of Ocean Engineering and Marine Energy. 7: p. 41–57. 10.1007/s40722-021-00185

10- Kolahdoozan, M., M. Bali, M. Rezaee, and M.H. Moeini, (2017), *Wave-transmission prediction of π-type floating breakwaters in intermediate waters.* Journal of Coastal Research. 33(6): p. 1460–1466. 10.2112/JCOASTRES-D-16-00071.1

11- He, F., J. Li, J. Pan, and Z. Yuan, (2023), *An experimental study of a rectangular floating breakwater with vertical plates as wave-dissipating components.* Applied Ocean Research. 133. 10.1016/j.apor.2023.103497

12- Ji, C.-Y., X. Chen, J. Cui, Z.-M. Yuan, and A. Incecik, (2015), *Experimental study of a new type of floating breakwater.* Ocean Engineering. 105: p. 295–303. 10.1016/j.oceaneng.2015.06.046

13- Wang, H.Y. and Z.C. Sun, (2010), *Experimental study of a porous floating breakwater* .Ocean Engineering. 37(5-6): p. 520–527. 10.1016/j.oceaneng.2009.12.005

14- Christensen, E.D., H.B. Bingham, A.P. Skou Friis, A.K. Larsen, and K.L. Jensen, (2018), *An experimental and numerical study of floating breakwaters.* Coastal Engineering. 137: p. 43–58. 10.1016/j.coastaleng.2018.03.002

15- Li, S., F. Wei, H .Xu, Y. Li, and L. Zhang, (2024), *Experiment study on wave attenuation performance of a new type of porous floating*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.135]

breakwater. Ocean Engineering. 309. 10.1016/j.oceaneng.2024.118334
16- Rahman, M.A., N. Mizutani, and K. Kawasaki, (2006), *Numerical modeling of dynamic responses and mooring forces of submerged floating breakwater*. Coastal Engineering. 53(10): p. 799–815. 10.1016/j.coastaleng.2006.04.001
17- Ferreras, J., E. Peña, A. López, and F. López, (2014), *Structural performance of a floating breakwater for different mooring line typologies.* Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering. 140(3): p. 04014007. 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000240
18- Ji, C., X. Bian, F. Huo, J. Guo, Z. lian, and Z. Yuan, (2022), *Experimental study on hydrodynamic characteristics of a new type floating breakwater with opening pass and wing structure*. Ocean Engineering. 259. 10.1016/j.oceaneng.2022.111923
19- Ji, C., X. Bian, S. Xu, and F. Lv, *3D* (2024), *experimental investigation of floating breakwater with symmetrical openings and wing structures.* Ocean Engineering. 313: p. 119624. 10.1016/j.oceaneng.2024.119624
20- Delavari, E. and A.R. Mostafa Gharabaghi, (2017), *Simulating regular wave effects on a pile-moored floating breakwater using a modified WCSPH method.* Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 143(5): p. 04017021. 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000411
21- Guo, W., J. Zou, M. He, H. Mao, and Y. Liu, (2022), *Comparison of hydrodynamic performance of floating breakwater with taut, slack, and hybrid mooring systems: An SPH-based preliminary investigation.* Ocean Engineering. 258: p. 111818. 10.1016/j.oceaneng.2022.111818
22- Liang, J.-m., Y. Liu, Y.-k. Chen, and A.-j. Li, (2022), *Experimental study on hydrodynamic characteristics of the box-type floating breakwater with different mooring configurations.* Ocean Engineering. 254. 10.1016/j.oceaneng.2022.111296
23- Dong, Y., W. Tan, H. Chen, and J. Yuan, (2024), *Numerical modeling of wave interaction with a porous floating structure consisting of uniform spheres.* Physics of Fluids.36. https://doi.org/10.1063/5.0222161
24- Luo, K., Y. Dong, and J. Yuan, (2025), *Impact of mooring configurations on wave attenuation of porous floating breakwater: A comparative experimental study*. Coastal Engineering. p. 104823. 10.1016/j.coastaleng.2025.104823
25- Marouei, K., S.M. Siadatmousavi, I .Aryanfar, and S. Asadi, (2026), *On the comparative hydraulic performance of submerged rubble-mound and geotextile breakwaters; An experimental study.* Ocean Engineering. 343. 10.1016/j.oceaneng.2025.123404
26- S. Asadi, N. Shabakhty, K. Marouei, , I .Aryanfar, (2026), *Performance of a new floating breakwater based on hydraulic parameters and motion responses: An experimental study.* Ocean Engineering. Volume 357, Part 1. 10.1016/j.oceaneng.2026.125357

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.135]