ارائه‌ی طرح جدیدی از یک موج‌شکن دیواری مشبّک نیم‌عمق

محمد جواد چوپانی زاده[۱]، مرتضی بختیاری[۲*]، محمد رستمی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر؛ javadchoopani@hotmail.com
[۲] استادیار، عضو هیئت علمی گروه مهندسی رودخانه و سواحل، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر؛ mortezabakhtiari@yahoo.com
[۳] استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران؛ rostami@Scwmri.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۳

کلمات کلیدی:
موج‌شکن دیواری
دیوار مشبّک
انتقال موج
مدل فیزیکی
امواج منظم

چکیده

پژوهش حاضر به معرفی یک موج‌شکن دیواری مشبّک جدید می‌پردازد. دیوار این موج‌شکن از روی هم قرار گرفتن اجزای مکعبی کوچک از جنس پی وی سی(PVC)، ساخته می‌شود. هر کدام از این اجزای مکعبی شکل(بلوک) دارای دو سوراخ می‌باشند که با قرار گرفتن آن‌ها بر روی هم و عبور کابل فلزی از میان آن‌ها، بلوک‌ها به یکدیگر بافته می‌شوند. در پژوهش حاضر سه مدل از سازه (با درصد تخلخل متفاوت)، با بررسی سه ارتفاع موج و حداقل ۱۰دوره‌ی تناوب، در یک عمق آب و عمق آبخور ثابت از سازه، مورد سنجش قرار می‌گیرند. نتایج نشان داد که کاهش ارتفاع موج به میزان ۵۰درصد، در تخلخل دیوار برابر ۱۵درصد اتفاق می‌افتد. نحوه‌ی رفتار هر مدل از سازه در مقابل امواج نیز با بررسی دقیق توان موج برخوردی به آن‌ها توجیه گشت.

Presentation of New Design of Perforated Half-Depth Wall Breakwater

Mohammad Javad Choopanizade[1], Morteza Bakhtiari[2*], Mohammad Rostami[3]

[1] MSc, Khorramshahr University of Marine Science and Technology; javadchoopani@hotmail.com
[2] Assistant Professor, Faculty Member of Department of River and Coastal Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology;: mortezabakhtiari@yahoo.com
[3] Associate Professor, Head of Technical Research Department, Tehran Institute of Soil Conservation and Watershed Management; rostami.mohammad@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 11 Jun. 2019
Accepted: 14 Dec. 2019

Keywords:
Wall breakwater
Perforated wall
Wave transmission
Physical model
Regular waves

ABSTRACT

The present study aims to introduce a new lattice wall breaker. The wall of this breaker is made up of small PVC cubic elements (PVC). Each of these cuboid shapes (blocks) has two holes, which, when placed on each other and through the metal cable through them, blocks are woven together. In the present study, three models of structures (with different porosity percent) are evaluated by examining three wave heights and at least 10 periods of rotation in a depth of water and a constant nourishment depth of the structure. The results showed that the decrease of wave height by 50%, in the porosity of the wall is 15%. The behavior of each model of the structure against the waves was also justified by accurate examination of the shock wave power.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]

۱- مقدمه

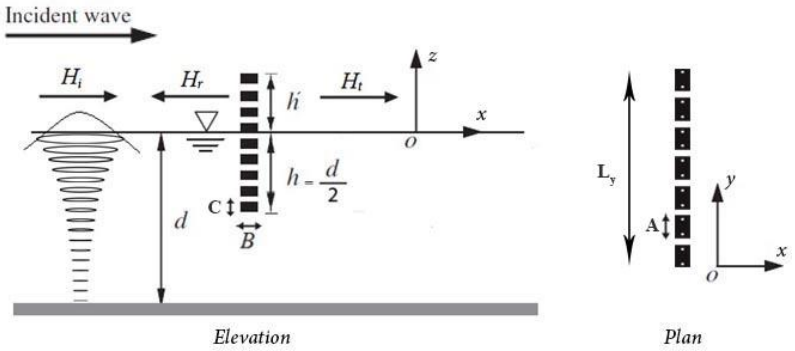
موج‌شکن‌های دیوار مشبّک از نوع موج‌شکن‌های دیواری[۱] می‌باشند که به علّت مشکلاتی که موج‌شکن‌های دیواری در مواجهه با امواج داشتند به وجود آمدند. در موج‌شکن‌های دیوار قائم، موج تابشی تقریباً بدون استهلاک قابل توجّه انرژی، به طور کامل منعکس می‌شود. بنابراین احتمال لغزش[۲] یا واژگونی[۳] مقطع دیوار و نیز تخریب پی توده سنگی یا فرسایش بستر دریا در محل این نوع سازه وجود دارد. بنابراین به مرور دیوار سازه‌ی موج‌شکن حجیم‌تر، سنگین‌تر و شیب‌دار شد تا برای مقابله با نیروی حاصل از امواج بتواند پایداری خود را حفظ کند. اساساً این موج‌شکن‌ها طی سالیان گذشته به ندرت در اثر ضعف ساختمانی تخریب شده‌اند، اما آسیب‌پذیری آن‌ها عموماً در اثر آب شستگی و فرسایش پنجه، فرا رفتن بار مجاز وارده از بار طراحی یا شکست برشی خاک در پی سازه بوده است. بنابراین به دلیل مشکلاتی که برای پی این سازه‌های دیواری پدید می‌آمد، موج‌شکن‌های مرکّب که ترکیبی از موج‌شکن‌های قائم و توده سنگی می‌باشند، بوجود آمد. در این موج‌شکن‌ها، انرژی امواج تابشی با شکستن بر روی شیب سازه مستهلک می‌گردد. بنابراین انعکاس موج قابل توجهی در اثر برخورد موج به سازه ایجاد نمی‌شود و نیز سازه‌ی توده سنگی مقاومت بیشتری در برابر آب شستگی و نیروهای بالارونده‌ی[۴] فشار آب در زیر پی، دارند. در ادامه‌ی تکامل موج‌شکن‌های دیواری، دیوارهایی با ساختار متخلخل و سوراخ‌دار پدید آمدند. این نوع سازه‌ها با کاهش سطح برخورد در برابر امواج علاوه بر این‌که از انعکاس موج و نیروی وارد به دیوار می‌کاهند، باعث کاهش ارتفاع دیوار طراحی نیز می‌شود. علاوه بر این بخاطر وجود روزنه‌ها و انتقال بخشی از انرژی موج به پشت سازه توازنی میان نیروهای پشت و جلوی سازه بوجود می‌آید و پایداری سازه بالا می‌رود. عبور موج از درون روزنه‌ها نیز باعث استهلاک انرژی[۵] آن می‌شود و پارامترهای مختلفی از موج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. میزان کارآیی دیوارهای مشبّک[۶] برای جذب انرژی امواج به پارامترهای سازه‌ای(شامل شکل و ابعاد حفره‌ها، تعداد حفره‌ها، عرض دیوار، ارتفاع دیوار و...) و نیز پارامترهای مربوط به موج(شامل ارتفاع، پریود و اختلاف تراز سطح آب در طرفین سازه) بستگی دارد[۱]. Jarlan نخستین پژوهشگری بود که کاربرد موج‌شکن‌های دیوار مشبّک را پیشنهاد کرد و رابطه‌ای برای محاسبه‌ی ضریب انعکاس موج به صورت تابعی از مشخصات هندسی دیوار و نیز مشخصات موج تابشی ارائه نمود [۲]. Mani در سال۱۹۹۵ طرح جدیدی از موج‌شکن را ارائه داد. در این طرح او با استفاده از لوله های نصب شده بر روی شمع‌های مهاری[۷] توانست ارتفاع موج عبوری را با بهینه کردن عرض شیار نسبت به قطر لوله(b/d) و نیز عمق آبخور سازه نسبت به عمق آب در محل نصب سازه(y/h)، حتی تا ۵۰ درصد کاهش دهد. وی با آزمایش بر روی رنج ارتفاع امواج بین ۶ تا ۲۴ سانتی متر و رنج پریود های بین ۰/۸ تا ۲ ثانیه، نتیجه گرفت که سازه با تخلخل ۱۸درصد و در نسبت‌های b/d برابر۰/۲۲ وy/h برابر۰/۴۶، دارای ضریب عبور۰/۵ می‌شود[۳]. Suh و Park بر روی یک موج‌شکن کیسونی با پیشانی مشبّک، نتایج حاصل از یک مدل عددی را با مدل آزمایشگاهی مقایسه کردند. آن‌ها سه صفحه‌ی مشبّک با تخلخل یکسان اما با شکل شکاف‌های قائم ، افقی و سوراخ دار را امتحان کردند. نتایج حاکی از آن بود که تفاوت ضریب بازتاب از آن‌ها بسیار کم بود. هم‌چنین آن‌ها دریافتند که اگر نسبت عرض محفظه‌ی موج به طول موج تابشی۰/۲۵ شود آن‌گاه کم‌ترین بازتاب از موج‌شکن رخ می‌دهد[۴]. Marks یک سری آزمایش‌های مدل فیزیکی بر روی موج‌شکن‌های دیواری متخلخل ثابت و شناور انجام داد. این تحقیقات در شرایط آب کم‌ژرفا نشان داد که در صورت استفاده از یک دیواره متخلخل درجلوی دیواره غیر متخلخل، نیروی وارده به دیوار انتهایی۵۰ درصد کاهش می‌یابد[۵]. Sawaragi و همکاران ۱۹۷۶، با استفاده از دو ردیف دیوار متخلخل به جای یک دیواره‌ی متخلخل در جهت پیشروی موج[۸]، ضریب انعکاس موج را کاهش دادند. آن‌ها با فرض انعکاس‌های متوالی بین نخستین دیوار متخلخل و دیواره‌ی غیر متخلخل انتهائی و با در نظر گرفتن ضرایب انعکاس و عبور موج و اختلاف فازهای یکسان حاصل از عبور موج از دیوارهای متخلخل، سعی کردند رابطه‌ای برای تعیین ضریب انعکاس موج از سازه پیدا کنند. آن‌ها سپس با ترکیب(جمع آثار قوا) موج تابشی و امواج منعکس شده‌ی متوالی، روابطی برای محاسبه‌ی ضریب انعکاس موج و نوسان سطحی آب درون موج‌شکن(به صورت بی بعد) بدست آوردند. جهت استفاده از این روش باید قبلاً ضرایب انعکاس و عبور موج و اختلاف فازهای بین امواج عبور کرده و تابشی را بطور تجربی تعیین نمود[۶]. Koraim و Salem در سال۲۰۱۲ موج‌شکنی که شامل یک ردیف از لوله‌های نیمه تعلیق شده در عمق آب بود را با استفاده از مدل فیزیکی در سه حالت زاویه‌ی قائم، 45^{o} و75^{o} مورد مطالعه قرار داد. وی با مطالعه بر روی رنج امواج منظمی با پریود۰/۶۵ تا۱/۳۳ ثانیه و ارتفاع۵ تا۲۲ سانتی‌متر، توانست در حالتی که سازه در عمق نسبی(D/h) برابر۰/۵ و در تخلخل برابر صفر درصد و در زاویه‌ی45^{o} قرار دارد به ضریب عبور کم‌تر از۲۰ درصد و ضریب بازتاب بیش‌تر از۴۰ درصد و ضریب اتلاف انرژی حدود۸۰ درصد برسد[۷]. Huang در سال۲۰۰۷ مطالعه بر روی یک و دو ردیف دیوار سیلندر مستطیلی شکاف‌دار که در تمام عمق آب گسترده شده بودند را انجام داد. این پژوهش برای یک ردیف از این دیوار با چهار ضخامت مختلف و چهار درصد تخلخل مختلف، در پریود ثابت۱/۱ ثانیه و تحت اصابت پنج ارتفاع موج مختلف از۲ تا۶ سانتی متر صورت گرفت. وی در H/h برابر۰/۲ که نسبت ارتفاع موج برخوردی[۹] به عمق آب را نشان می‌دهد و در درصد تخلخل برابر ۱۶درصد، به ضریب عبور حدود۶۰ درصد و ضریب انعکاس حدود۴۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]

درصد رسید[۸]. Isaacson و همکارانش در سال های ۱۹۹۸و۱۹۹۹ آزمایش‌هایی بر روی یک و دو صفحه‌ی شیاردار نازک که از سطح آب تا فاصله‌ای بالای بستر دریا امتداد داشت، انجام دادند. هدف آن‌ها مقایسه‌ی بین نتایج حاصل از روش عددی توسعه یافته مبتنی بر تابع مقادیر ویژه با نتایج آزمایشگاهی بود. اتلاف انرژی در این موج‌شکن با اصطکاک و جرم افزوده‌ی[۱۰] به کار گرفته شده در محاسبات مرتبط بوده و با مطابقت با نتایج آزمایشگاهی استخراج می‌شود. نتیجه، تطابق قابل قبولی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی بود. مقایسه نتایج این تحقیق با کار سال ۱۹۹۸ حاکی از آن بود که افزودن یک صفحه‌ی شیاردار دیگر، باعث کاهش چشمگیر ضرایب عبور و بیشینه نیروی عمودی می‌گردد. این در حالی است که ضریب بازتاب تفاوت چندانی نمی‌نماید[۹و۱۰]. Liu و همکاران در سال ۲۰۰۷ بر روی موج‌شکن دیوار متخلخل با دیوار صلب پشتی که توسط یک صفحه‌ی افقی متخلخل به هم متصل می‌شدند، تحقیق کردند. آن‌ها اذهان کردند که این صفحه‌ی متخلخل افقی در افزایش پایداری و افزایش استهلاک موج مؤثر است[۱۱]. Kou و همکاران در سال ۲۰۱۹ تحقیق بر روی یک مدل جدید از موج‌شکن شناور متخلل را آغاز کردند. این موج‌شکن به شکل حلقه‌ای با دو لایه دیواره‌ی متخلخل ساخته شد و اثرات استهلاک موج و بالاروی موج بر روی آن سنجیده شد[۱۲]. همچنین تحقیقات مشابهی در زمینه‌ی موج‌شکن‌های نیمه مستغرق[۱۱] شده توسط[۱۳] و [۱۴]و [۱۵] صورت گرفته است. در ادامه پارامترها و نتایج تحقیاتی بعضی از این محققین در شکل۲۱ با یکدیگر و نیز با پروژه‌ی حاضر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

این نوع خاص از موج‌شکن را می‌توان جزء موانع قائم موج[۱۲] طبقه-بندی کرد. این موج‌شکن‌ها معمولاً به صورت مشبّک یا غیرمشبّک، تمام عمق یا نیم عمق، به منظور حفاظت از بندرگاه در برابر امواج ناشی از باد ساخته می‌شوند. این نوع خاص از موجشکنها که تا نیمه در عمق آب امتداد می‌یابند و معمولاً مبتنی بر شمع‌های مهاری هستند، به تعداد کمی در دنیا ساخته شده‌اند. از مدل‌های مشابه این طرح می‌توان به دیوارهای صاف جامد نیمه غوطه‌ور شده[۱۳] و دیوارهای شکاف‌دار[۱۴] و موج‌شکن‌های لوله‌ای[۱۵] می‌توان اشاره کرد[۷]. در این مطالعه کاربرد یک موج‌شکن دیواریِ مشبّک، نیم-عمق و مبتنی بر شمع، در گذردهی امواج مورد بررسی قرار گرفته است. دیوار این موج‌شکن از بافته شدن بلوک‌های پلاستیکی از جنس پی وی سی (PVC) توسط کابل‌های فلزی بر روی هم ساخته شده است. در مطالعه‌ی آزمایشگاهی که بر روی مدل این سازه صورت گرفت، ضریب عبور موج از سه درصد تخلخل از سازه، تحت اصابت امواج منظم، در محدوده‌ی پریود ۰/۹ تا ۲/۲ ثانیه و در محدوده‌ی ارتفاع ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر بررسی گردید.



شکل۱- نمای قائم و جانبی موج‌شکن دیوار بلوکی نیم عمق

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]

در شکل۱ و نیز جدول۱ مشخصات پارامترهای آزمایشگاهی استقرار سازه‌ی موج‌شکن از قبیل واحد اندازه‌گیری و محدوده‌ی تغییرات هر یک ذکر شده است. در شکل۲ نیز تصویری از مدل سازه‌ی موج‌شکن مشبّک بلوکی در سه درصد تخلخل(P) ۰/۳۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۵ نشان داده شده است. در این آزمایشات برای کاهش تخلخل سازه، با پوشاندن ۶۰ عدد از روزنه‌ها، تخلخل سازه از ۰/۳۵ به ۰/۲۵ و نیز با پوشاندن ۶۰ عدد روزنه‌ی دیگر، تخلخل سازه از ۰/۲۵ به ۰/۱۵ کاهش پیدا کرده است.

جدول۱- مشخصات پارامترهای آزمایشگاهی استقرار سازه‌ی موج‌شکن

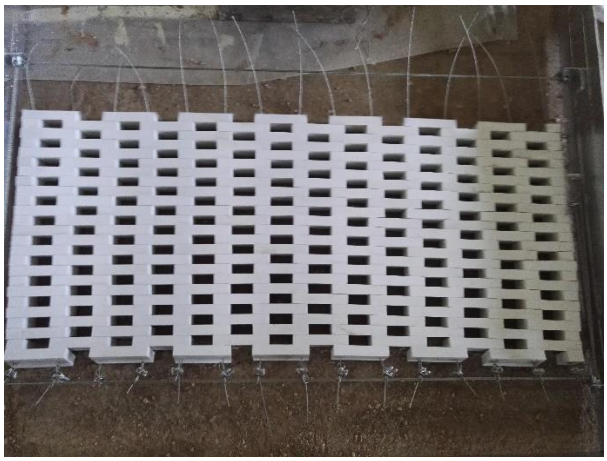
پارامتر	واحد	محدوده تغییرات
عمق آب(d)	[m]	۰/۵
پریود موج(T)	[s]	۰/۹-۲/۲
طول موج(L)	[m]	۱/۲۳-۴/۶۲
ارتفاع موج تابشی(H_i)	[m]	۰/۰۵و۰/۱و۰/۱۵
طول موج نسبی(d/L)	-	۰/۱۰۸-۰/۴۰۵
تیزی موج(H_i/gT^2)	-	۰/۰۰۱-۰/۰۰۸
تیزی موج(H_i/L)	-	۰/۰۱۱-۰/۰۶۲
عرض سازه[16] یا عرض بلوک(B)	[m]	۰/۰۴
ضخامت بلوک(C)	[m]	۰/۰۱۶
طول بلوک(A)	[m]	۰/۰۹
ارتفاع بادخورسازه[17](h')	[m]	۰/۱۶
عمق نسبی سازه(h/d)	-	۰/۵
ارتفاع نسبی موج(H_i/h)	-	۰/۲و۰/۴و۰/۶
ارتفاع نسبی موج(H_i/d)	-	۰/۱و۰/۲و۰/۳
درصد تخلخل سازه(P)	-	۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۳۵

توزیع تخلخل در مدل اول یکنواخت است اما در مدل دوم و سوم پوشاندن سوراخ‌ها به صورت تقریباً غیریکنواخت صورت گرفت. این موضوع به علّت برگشت نامتقارن موج از سازه و ایجاد اختلاف فاز در موج برگشتی از سازه است که موجب ایجاد اغتشاش بیش‌تر در جلوی سازه می‌شود و در نتیجه به افزایش بیش‌تر استهلاک موج تابشی کمک می‌کند. این پدیده که بازتاب نامتقارن نام دارد برای اولین بار در این پژوهش مطالعه شده است. ذرات آبی که در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند با حرکات غیرهمگون خود یکدیگر را وادار به کنش می‌کنند و این عامل موجب استهلاک در حرکت آن‌ها و ایجاد اغتشاش می‌شود.

۲-۱- شرایط آزمایشگاهی

فلوم مورد استفاده در این آزمایشات دارای عرض و طول و عمق برابر با ۵/۵، ۳۳و۱متر است و شامل سه قسمت می‌شود که به وسیله‌ی دیواره از یکدیگر جدا شده‌اند. عرض قسمت میانی فلوم که سازه در آن نصب گردید یک متر و عرض دو طرف کناری آن ۱/۵ متر است. سیستم موج‌ساز[18] در ابتدای فلوم قرار دارد که شامل یک پدال است که توسط بازوهای هیدرولیکی با فشار روغن کار می‌کند. در انتهای فلوم نیز برای کاهش تأثیر و استهلاک موج بازگشتی سیستم استهلاک ساحل شنی[19] قرار گرفته است. در این سیستم استهلاک چون عمق آب به تدریج کاهش می‌یابد، موج افزایش ارتفاع می دهد و به تدریج تیزتر می‌گردد تا اینکه در انتهای ساحل می‌شکند. با شکست موج انرژی آن مستهلک می‌شود. هر چه شیب ساحل ملایم‌تر باشد انعکاس موج از ساحل و تأثیر آن در برهمنهی با موج تابشی نیز کم‌تر خواهد بود[۱۵]. شیب ساحل در قسمت انتهایی فلوم برابر با ۹درصد یا یک یازدهم است. جانمایی سازه[20] تقریباً در مرکز فلوم و در جایی میان پدل موج‌ساز و ساحل شنی صورت گرفت. این کار به منظور مصون ماندن سازه از اغتشاشات جلوی دستگاه موج‌ساز و نیز انعکاس موج از ساحل انجام گرفت. در ابتدای فلوم نیز برای کاهش تأثیر بازتاب مجدد موج از سیستم موج‌ساز از سطح شیبداری استفاده شده است که در جلوی پدل موج با مکانیزم اصطکاک باعث استهلاک موج بازتابیده شده می‌گردد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]



(الف)



(ب)



(ج)

شکل۲- نمایش سه مدل از سازه با تخلخل‌های مختلف. (الف):تخلخل۳۵درصد (ب):تخلخل۲۵درصد (ج):تخلخل۱۵درصد

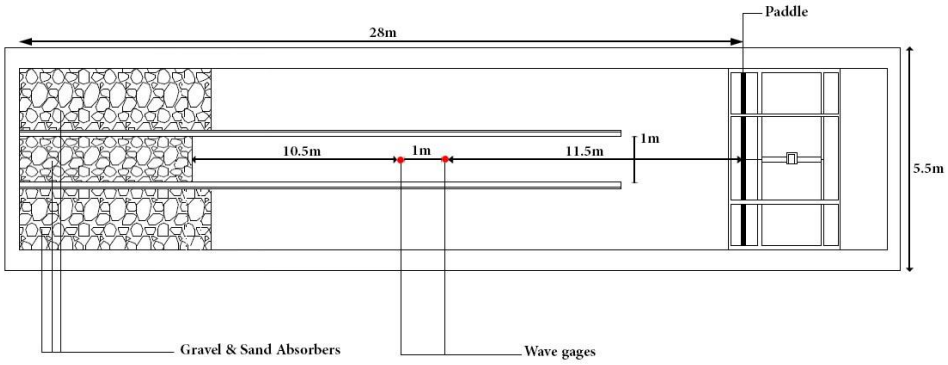
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]

[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]

۲-۲- کالیبراسیون

مجموعه عملیّاتی که موجب می‌شود در محل استقرار سازه موجی با مشخصات پیش‌بینی شده وجود داشته باشد را کالیبراسیون گویند. بدین منظور از دو موج‌سنج[۲۱] که با دقت تغییر ولتاژ ۱ ولت به ازای یک سانتی‌متر تغییر تراز آب کالیبره شده‌اند، به فاصله‌ی یک متر در محل استقرار سازه استفاده شده است تا از صحّت برداشت اطلاعاتِ موج‌سنج‌ها، اطمینان حاصل گردد. در شکل۳ جانمایی موج‌سنج‌ها در میانه‌ی فلوم و در مکانی که قرار است بعد از آن محل استقرار سازه باشد، نشان داده شده است.



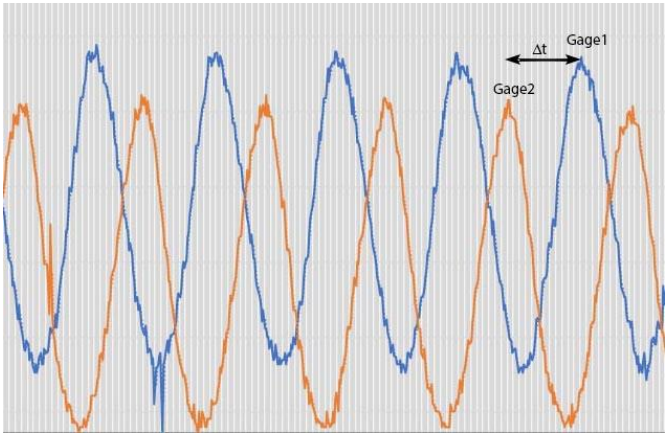
شکل۳- جانمایی موج‌سنج‌ها در فلوم جهت کالیبراسیون

با مقایسه‌ی زمان ثبت دو قلّه‌ی کنار هم در نمودار سری زمانی ثبت شده توسط دو موج‌سنج می‌توان اختلاف زمانیِ ثبت اطلاعات را بین دو موج‌سنج بدست آورد(شکل۴). این اختلاف زمان در واقع مدّت زمانی است که قلّه فاصله‌ی میان دو موج‌سنج را می‌پیماید. از آن‌جا که فاصله‌ی بین دو موج‌سنج برابر یک متر است، بنابراین با معکوس کردن این اختلافِ زمان (Δt) می‌توان سرعت پیشروی موج (C) و همچنین طول موج (L) را طبق روابط (۱) و (۲) به روش آزمایشگاهی بدست آورد:

$$C = \frac{1(m)}{\Delta t\ (sec)} \qquad (۱)$$

$$L = C.T \qquad (۲)$$

در کالیبراسیون[۲۲] موج تابشی، معیارِ موج شاخص[۲۳] در محل استقرار سازه، میانگین مشخصات موج ثبت شده در دو موج‌سنج در نظر گرفته شده است.



شکل۴- مقایسه‌ی نمودارهای سری زمانی ثبت شده از دو موج‌سنج

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]

۲-۳- تعیین مقیاس

در تعیین مقیاس مدل، نکته‌ای که ضروری به نظر می‌رسد این است که بدانیم در آزمایشگاه حداکثر توان دستگاه تولید کننده‌ی موج بدون اینکه به آن فشار زیادی وارد شود یا دقّت خود را از دست بدهد، چقدر است. برای این منظور باید بدانیم که حداکثر ارتفاع و دوره‌ی تناوبی که دستگاه مولّد موج می‌تواند در عمق آب مورد بررسی بسازد چه مقدار است. این در حالی است که همین اطلاعاتِ حداکثر در خصوص امواج واقعی دریا نیز در دسترس است تا با مقایسه‌ی آن‌ها با اطلاعاتِ حداکثر در آزمایشگاه تعیین مقیاسِ بیشینه صورت پذیرد. بنابراین عدد مقیاسی که برای ساخت مدل انتخاب می‌شود باید از عدد مقیاسِ بیشینه[۲۴] کوچکتر یا نهایتاً مساوی باشد. بر اساس محدودیّت‌های آزمایشگاهی، باید حداکثر عمقی از آب را که در آزمایشگاه می‌توان مطالعه کرد بدست آورد. در این آزمایشگاه عمق آب در محل استقرار سازه، ۵۰ سانتی‌متر تنظیم می‌گردد که بر اساس ارتفاع سازه‌ی ساحلیِ مستهلک کننده‌ی موج در انتهای فلوم و نیز دقّت دستگاه موج‌ساز در ایجاد موج در عمق‌های مختلف آب، تنظیم شده است. این اطلاعات در مورد دستگاه موج‌ساز بر اساس سال‌ها تجربه‌ی کار با آن، توسط مسئول مربوطه بدست آمده است. با توجّه به این تجربیات در عمق آب ۵۰ سانتی‌متر، دستگاه می‌تواند تا حداکثر موج ۱۵ سانتی‌متری را با دقّت خوبی ایجاد کند. اگر ارتفاع موج از این مقدار بیش‌تر گردد آن‌گاه هم به دستگاه موج‌ساز در پریودهای کم‌تر فشار زیادی وارد می‌شود و هم دقّت دستگاه در تولید موج با چنین ارتفاعی به شدّت کاهش می‌یابد. بنابراین در آزمایشگاه باید در عمق آب ۵۰ سانتی‌متر و با حداکثر ارتفاع موج ۱۵ سانتی‌متر کار کرد. تعیین مقیاس بیشینه با فرض غالب بودن عدد فرود و با در نظر گرفتن عمق آب در فلوم موج برابر ۰/۵ متر و نیز با در نظر گرفتن حداکثر پریود و ارتفاع قابل تولید دستگاه مولّد موج، ۳ ثانیه و ۱۵ سانتی متر، و حداکثر پریود و ارتفاع موج در دریا (واقعیّت) ۱۰ ثانیه و۳ متر، به صورت رابطه (۳) تعیین می‌گردد:

$$\min\begin{cases}\frac{T_m}{T_p}=\left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{1/2}=\frac{3}{10}\rightarrow\frac{L_m}{L_p}=\frac{9}{100}\approx\frac{1}{11}\\ \frac{H_m}{H_p}=\frac{L_m}{L_p}=\frac{0.15}{3}=\frac{1}{20}\end{cases} \qquad (۳)$$

از میان این دو مقیاس آنی که عدد کوچک‌تری است باید مبنا قرار گیرد و به عنوان مقیاس بیشینه انتخاب شود بنابراین مقیاس $\frac{1}{20}$ به عنوان حداکثر مقیاس هندسی تعیین می‌گردد. با قبول این عدد به عنوان عدد مقیاس، حتی کوچک‌ترین اجزاء مثل قطر یک سیم بکسل نیز با این عدد نسبت به واقعیت تغییر می‌کند. حجم یک قطعه$۲۰^۳$ برابر می‌گردد و با فرض ثابت بودن چگالی آن قطعه، وزن آن نیز$۲۰^۳$ برابر می‌شود. حال باید دید که آیا این موارد از نظر نیرویی یا وزنی محدودیّتی برای سازه ایجاد می‌کنند یا خیر. به عنوان مثال اگر فرض شود که در ساخت مدل سازه در آزمایشگاه یک کابل فلزی به قطر۳ میلی‌متر مورد استفاده قرار گیرد، این کابل در واقعیّت قطری برابر ۶۰ میلی‌متر خواهد داشت. اگر فرض شود حداکثر نیروی کششی قابل تحمل کابل۳ و۶۰ میلی‌متری برابر۰/۵ و۱۹۸ تن-نیرو باشد، آن‌گاه باید دید که آیا این محدودیّت نیرویی، به محدودیّت مقیاسی می-انجامد یا خیر. بنابراین باید یک بار دیگر مطابق رابطه‌ی (۴)، مقیاس را از طریق این نیروها برای سازه بدست آورد و با مقیاس پذیرفته شده از قبل مقایسه کرد و اگر عدد کوچک‌تری را نشان دهد باید آن به عنوان حداکثر مقیاس بیشینه مورد پذیرش واقع گردد، در غیر این صورت محدویّت نیرویی کابل‌ها، محدودیّت مقیاسی ایجاد نکرده است.

$$\min\begin{cases}\frac{F_m}{F_p}=\left(\frac{L_m}{L_p}\right)^3=\frac{0.5}{198}\rightarrow\frac{L_m}{L_p}=\frac{1}{7.34}\approx\frac{1}{7}\\ \frac{D_m}{D_p}=\frac{L_m}{L_p}=\frac{3}{60}=\frac{1}{20}\end{cases} \qquad (۴)$$

بنابراین محدودیّت نیرویی در کابل‌های فلزی محدودیّت مقیاسی ایجاد نکرد. به همین ترتیب مطابق محدودیّت‌هایی که وجود دارد باید بررسی کرد که آیا آن محدودیّت‌ها باعث ایجاد محدودیّت در مقیاس می‌گردند یا خیر. در این پژوهش مقیاس پذیرفته شده در ساخت مدل آزمایشگاهی برابر $\frac{1}{20}$ انتخاب گردید.

۲-۴- جزئیات مدل

مدل سازه تشکیل شده است تعدادی از بلوک‌های مکعبی شکل از جنس پی وی سی(PVC) که در ردیف‌هایی بر روی یکدیگر توسط کابل چیده شده‌اند. طول، عرض و ضخامت این بلوک‌ها به ترتیب برابر۹، ۴ و ۱/۶ سانتی‌متر است. وزن مخصوص ورق پی وی سی به کار رفته در ساخت بلوک‌ها برابر ۰/۴۸۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. در جدول۲ مشخصات سازه‌ای مدل به صورت کامل آورده شده است. در این پژوهش ارتفاع بادخور مدل سازه به نحوی انتخاب شده است که در برخورد مرتفع‌ترین موج به آن نیز از روگذری[۲۵] محفوظ است. هر چند در این سازه، روگذریِ موج مشکلی برای سازه ایجاد نمی‌کند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]

جدول۲- مشخصات سازه‌ای مدل موج‌شکن دیوار بلوکی

طول بلوک[m]	A	۰/۰۹
عرض بلوک[m]	B	۰/۰۴
ضخامت بلوک[m]	C	۰/۰۱۶
طول مدل سازه[m]	Ly	۰/۹۳
ارتفاع سازه[m]	ΣH	۰/۴۱
ارتفاع آبخور سازه[۲۶][m]	h	۰/۲۵
ارتفاع بادخور سازه[m]	h'	۰/۱۶
ضخامت کابل فلزی[m]	t_c	۰/۰۰۳
وزن دیوار بلوکی[kg]	W	۶/۳

در این پژوهش مطابق شکل۵ برای اتصال مدل سازه‌ی موج‌شکن در بدنه‌ی فلوم از یک قاب فلزی در ابعاد طول، عرض، ارتفاع و ضخامت برابر۱۰۱، ۱۱، ۱۰۱/۵ و ۰/۵ سانتی‌متر استفاده شده است.



شکل۵- استقرار مدل سازه‌ی موج‌شکن دیوار بلوکی در بدنه‌ی فلوم

اتصال کابل‌های فلزی به یکدیگر توسط کورپی[۲۷]های کوچک انجام می‌شود. ابتدا کابل فلزیِ سراسری، به دور اتصالات تعبیه شده بر روی قاب فلزی(کابل اصلی)، نصب می‌گردد و سپس کابل‌های قائم بلوک‌ها را به یکدیگر و نیز به کابل اصلی اتصال می‌دهد(شکل۶). محل دقیق اتصالات نبشی در بدنه‌ی قاب فلزی، دقیقاً باید در جایی باشد که پس از نصب مدل سازه در بدنه‌ی فلوم، میزان آبخوری(عمق فرورفت) سازه تا نصف عمق آب، ثابت گردد.

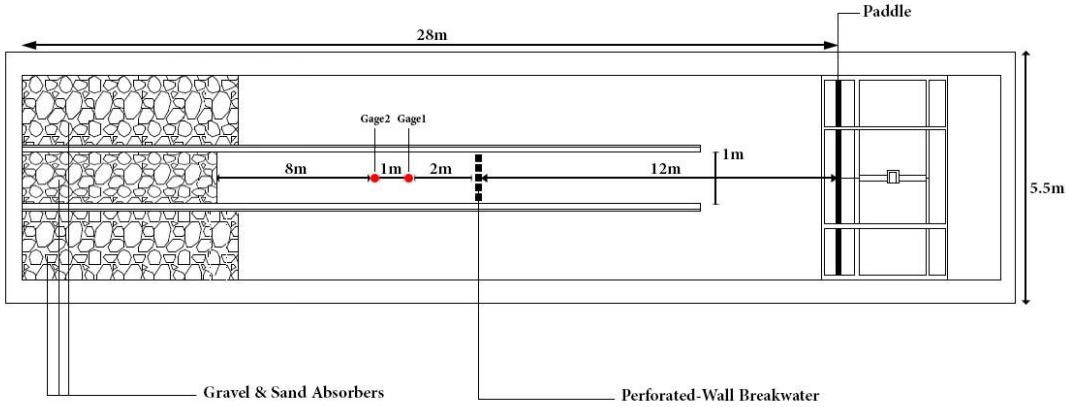
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]



شکل۶- جزییات اتصال کابل‌ها به یکدیگر و به اتصالات

۲-۵- جانمایی سازه و موج‌سنج‌ها

موج‌سنج‌ها باید در حد فاصله‌ای پشت موج‌شکن قرار گیرند که از اغتشاشات[۲۸] پشت سازه در امان باشند چرا که ممکن است در عملکرد موج‌سنج‌ها خلل ایجاد کند. برای اطمینان بیش‌تر این فاصله به صورت محافظه‌کارانه برابر ۲ متر انتخاب شد. نزدیک بودن برداشت‌های دو موج‌سنج نیز حاکی از آن است که هر دو کاملاً از اغتشاشات پشت سازه محفوظ هستند در غیر این صورت با یکدیگر اختلاف زیادی در برداشت اطلاعات می‌داشتند.



شکل۷- جانمایی سازه و موج‌سنج‌ها در فلوم

۲-۶- روش تحقیق

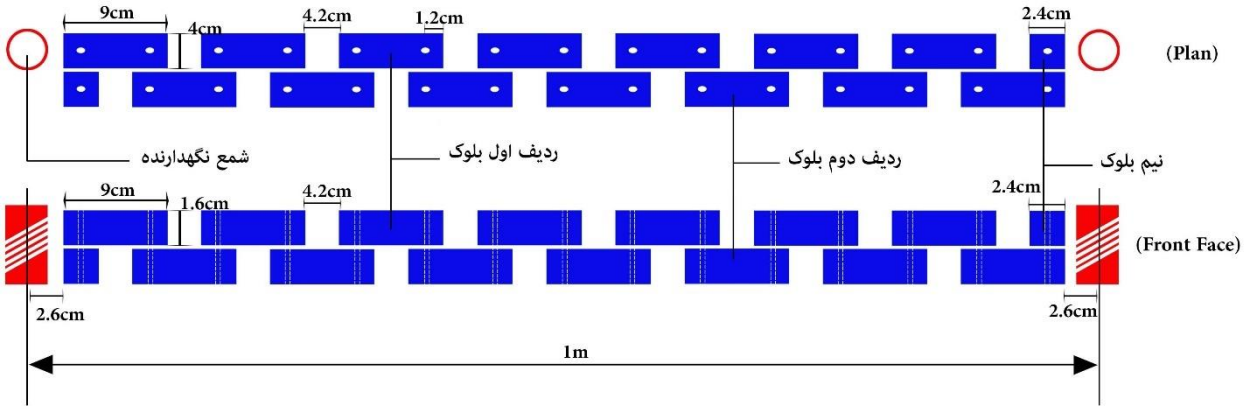
به دلیل استفاده از فرضیاتی هم‌چون برخورد موج ناشکنا[۲۹] به سازه و قرار گرفتن سری امواج برخوردی در محدوده‌ی میاناب با طول موج نسبی بین($0.05\leq \frac{d}{L} \leq 0.5$) ، امواج با تئوری مرتبه‌ی اول و دوم استوکس را بررسی کرده و از بررسی امواج تئوری مرتبه‌ی سوم استوکس به بالا صرف نظر می‌کنیم. چرا که این امواج به علّت تیزی بالاتری که دارند ممکن است با موج برگشتی از سازه برهمنهی کنند و شکنا شوند. موج قبل از رسیدن به سازه نباید بشکند چرا که اگر موج قبل از رسیدن به سازه بشکند، مقداری اتلاف انرژی در آن رخ می‌دهد و دیگر نمی‌توان تمام این اتلاف انرژی را به سازه نسبت داد و از آن‌جا که سنجشِ عملکرد سازه در کاهش ارتفاع و اتلاف انرژیِ موج مدّ نظر است، پس بهتر است از وقوع این اتفاق جلوگیری شود. پس از عبور موج از سازه ارتفاع آن توسط دو موج‌سنج برداشت شده و میانگین آن به عنوان ارتفاع موج عبوری از سازه ثبت می‌گردد. ضریب عبور موج (K_t) با نسبت ارتفاع موج عبور کرده از سازه (H_t) به ارتفاع موج برخوردی به سازه (H_i)، مطابق رابطه (۵) تعریف می‌گردد:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \qquad (۵)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]

جدول۳- امواج منظم آزمایش شده در سه مدل از سازه با تخلخل مختلف

شماره نمونه	ارتفاع موج[m]	پریود موج[s]	تخلخل سازه(%)
A1-A14	0.05	0.9-2.2with step at 0.1	35
A15-A26	0.1	1.1-2.2with step at 0.1	35
A27-A36	0.15	1.3-2.2with step at 0.1	35
B1-B14	0.05	0.9-2.2with step at 0.1	25
B15-B26	0.1	1.1-2.2with step at 0.1	25
B27-B36	0.15	1.3-2.2with step at 0.1	25
C1-C14	0.05	0.9-2.2with step at 0.1	15
C15-C26	0.1	1.1-2.2with step at 0.1	15
C27-C36	0.15	1.3-2.2with step at 0.1	15



شکل۸- جزییات اجرایی مدل اول با تخلخل۳۵ درصد

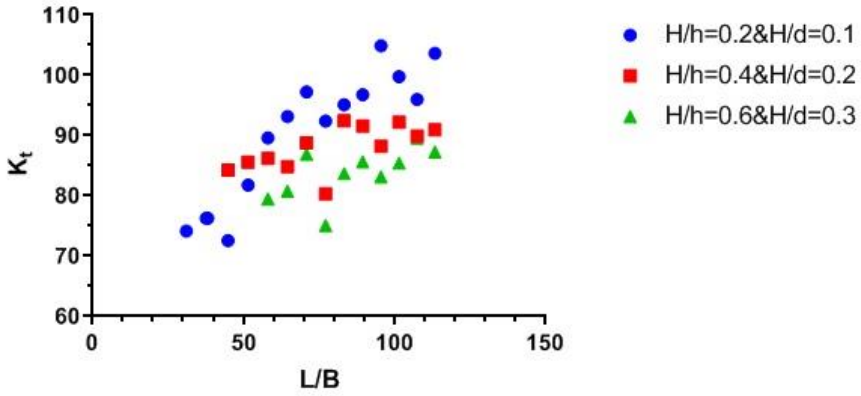
پس از این‌که مدل اول سازه با درصد تخلخل۳۵ درصد ساخته شد و آزمایشات سری امواج بر روی آن صورت گرفت و ضرایب عبور موج از آن مشخّص گردید، آن‌گاه نوبت به کاهش تخلخل سازه برای آزمایش بر روی مدل دوم و سوم می‌گردد. با پوشاندن۶۰ روزنه۱۰ درصد از تخلخل سازه کاسته می‌شود و درصد تخلخل برای مدل دوم به۲۵ درصد می‌رسد و با پوشاندن۶۰ روزنه‌ی دیگر درصد تخلخل برای مدل سوم به۱۵ درصد کاهش می‌یابد. سپس برای هر یک دوباره آزمایشات سری امواج مطابق جدول۳ انجام می‌شود و ضرایب عبور برای آن‌ها تعیین می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

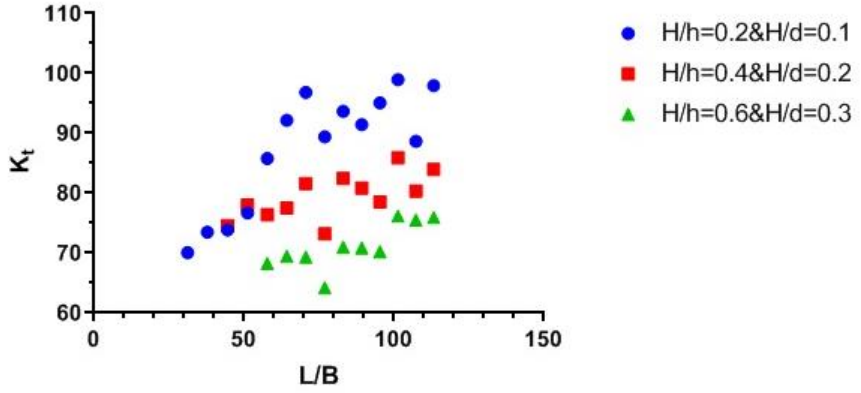
در ادامه پس از این‌که امواج عبوری از سه مدل از سازه تعیین گردید به وسیله‌ی رابطه‌ی(۵) ضریب عبور موج از سازه برای آن‌ها مشخص می‌گردد. سپس از آن‌جایی که عرض سازه(B)، عمق آب(d) و عمق آبخور سازه(h) ثابت هستند، با پارامترهای متغیری هم‌چون ارتفاع موج(H_i) و طول موج(L) بی بُعد می‌گردند تا پس از تطبیق شرایط طبیعی با شرایط آزمایشگاه این پارامترهای ثابت به راحتی برای شرایط واقعی در طبیعت قابل محاسبه باشند. چرا که در طبیعت هر موج نامنظم دارای یک ارتفاع شاخص[۳۰](H_s) و یک پریود شاخص[۳۱] (T_s) (یا در واقع یک طول موج شاخص[۳۲]L_s) می‌باشد. بنابراین با داشتن شاخصه‌های این موج نامنظم و ارتباط دادن آن‌ها(از طریق بی بُعد کردن پارامترها) به پارامترهای ثابتی همچون عمق آبخور سازه، عرض سازه و عمق آب، می‌توان این پارمترهای ثابت را به نحوی برای شرایط طبیعی بدست آورد که با شرایط آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد.

با دقّت در شکل‌های۹ تا۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش طول موج نسبی[۳۳] (L/B) ضریب عبور موج از سازه رو به افزایش است. همچنین با افزایش ارتفاع موج نسبی(H/h) و(H/d) ضریب عبور موج از سازه کاهش می‌یابد. و نیز در نسبت‌های ارتفاعی(H/h) کم‌تر با کاهش درصد تخلخل از مدل اول به سوم مشاهده می‌گردد که نمودار تیزتر شده است و این به معنی افزایش وابستگی به پارامتر بی بُعد(L/B) است. این در حالی است که افزایش نسبت ارتفاعی(H/h) و کاهش هم‌زمان درصد تخلخل سازه، روند افزایشیِ وابستگی به پارامتر بی‌بُعد(L/B) کاهش یافته است و در نسبت ارتفاعی H/h=0.6به تدریج با کاهش درصد تخلخل و در مدل سوم سازه، روند معکوس یا کاهشی به خود گرفته است. همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش درصد تخلخل سازه هر چه نسبت ارتفاعی(H/h) بیش‌تر باشد، ضریب عبور موج از سازه کاهش بیش‌تری پیدا می‌کند.

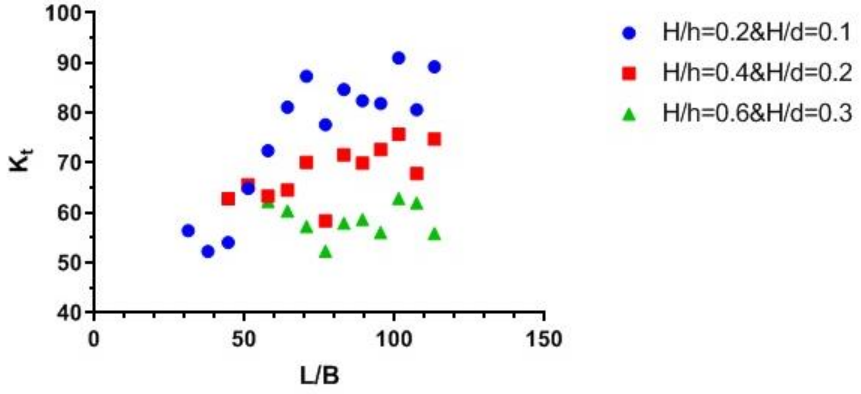
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]



شکل۹- ارائه‌ی نتایج ضریب عبور K_t در نسبت بی بُعد L/B برای مدل A

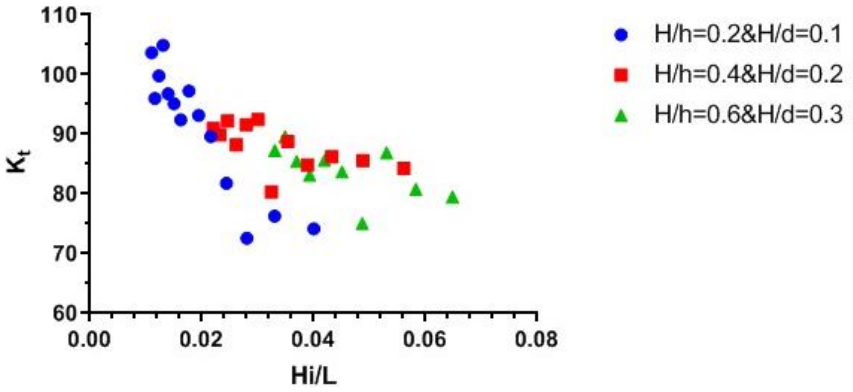


شکل۱۰- ارائه‌ی نتایج ضریب عبور K_t در نسبت بی بُعد L/B برای مدل B

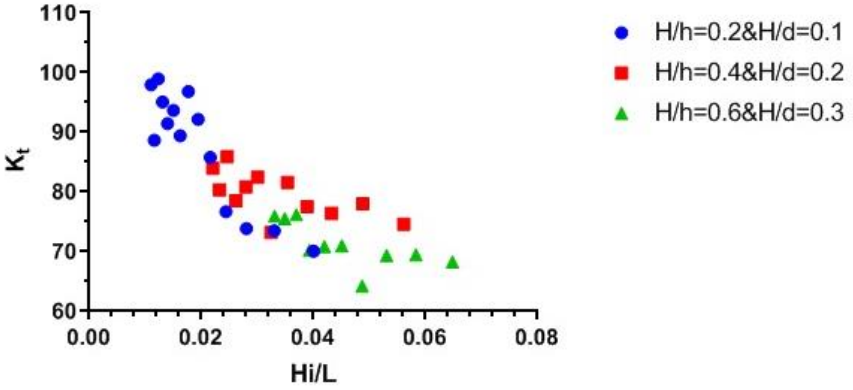


شکل۱۱- ارائه‌ی نتایج ضریب عبور K_t در نسبت بی بُعد L/B برای مدل C

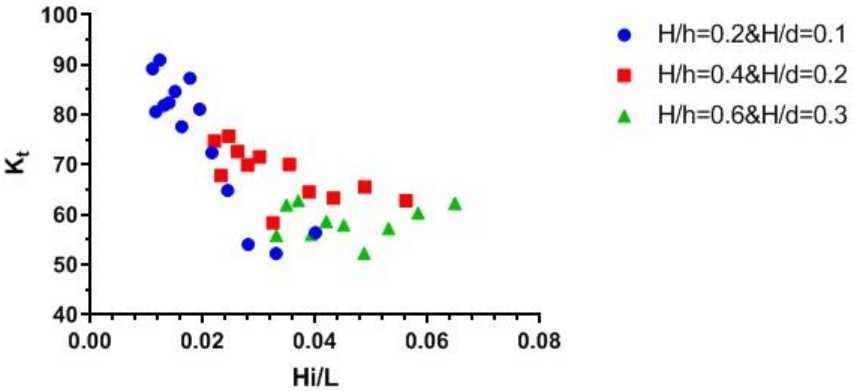
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]



شکل۱۲- ارائه‌ی نتایج ضریب عبور K_t در نسبت بی بُعد H/L برای مدل A

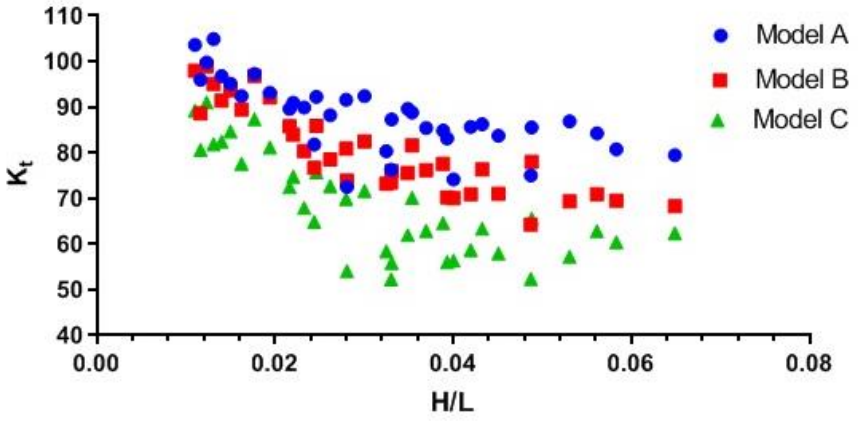


شکل۱۳- ارائه‌ی نتایج ضریب عبور K_t در نسبت بی بُعد H/L برای مدل B



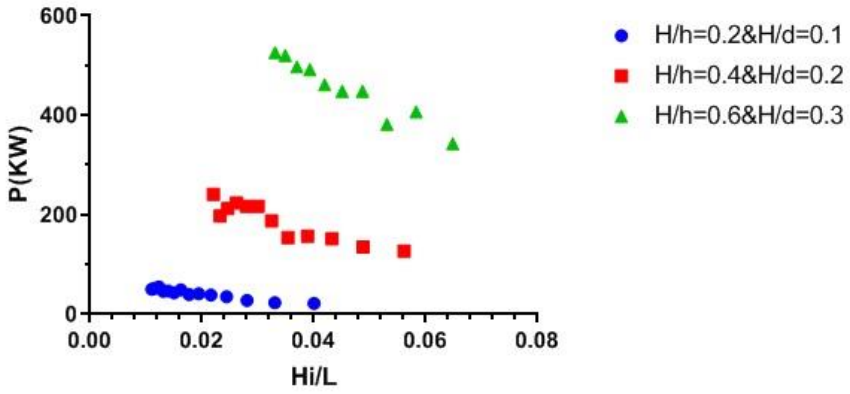
شکل۱۴- ارائه‌ی نتایج ضریب عبور K_t در نسبت بی بُعد H/L برای مدل C

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]



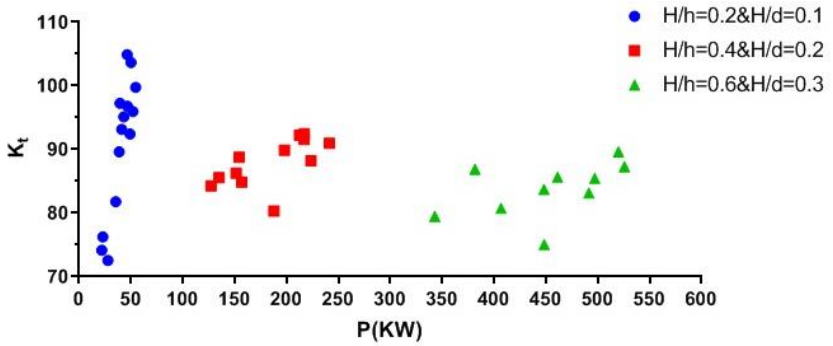
شکل۱۵- مقایسه‌ی نتایج ضریب عبور K_t در نسبت بی بُعد H/L برای هر سه مدل A،B و C

حال با دقّت در شکل‌های۹ تا۱۱ می‌توان دریافت که در یک طول موج نسبی(L/B) ثابت، با افزایش ارتفاع نسبی موج(H/h)، که منجر به افزایش تیزی موج(H/L) می‌گردد، ضریب عبور موج از سازه برای هر سه مدل کاهش یافته است. این موضوع به وضوح در شکل‌های۱۲ تا۱۵ قابل رویت است. حال اگر دوباره به شکل‌های۹ تا۱۱ رجوع شود و این بار پارامتر ارتفاع نسبی موج(H/h) ثابت گرفته شود و پارامتر طول موج نسبی(L/B) کاهش یابد، پارامتر تیزی موج(H/L) دوباره افزایش می‌یابد و این در حالی است که ضریب عبور موج از سازه در ارتفاع‌های نسبی کم‌تر کاهش شدیدتری دارد و در ارتفاع‌های نسبی بزرگ‌تر کاهش ملایم‌تری دارد و حتی ممکن است روند افزایشی به خود بگیرد. چنان‌که در مدل سوم و در ارتفاع نسبی موجH/h=0.6 رخ داده است. بنابراین در کاهش ضریب عبور موج از سازه، تأثیر افزایش ارتفاع موج در افزایش تیزی موج بسیار بیش‌تر از تأثیر کاهش طول موج در افزایش تیزی موج است. این موضوع باعث می‌شود که نتوان در یک تیزی موج(H/L) ثابت رابطه‌ای برای تغییرات ضریب عبور موج با افزایش ارتفاع نسبی موج بیان کرد. برای درک بهتر این موضوع به شکل‌های۱۲ تا۱۵ توجّه شود. در این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش ارتفاع موج نسبی(H/h) از ۰/۲ به۰/۴ در یک تیزی موج[۳۴] ثابت، ضریب عبور موج[۳۵] افزایش یافته است اما با افزایش ارتفاع موج نسبی(H/h) از ۰/۴ به ۰/۶ در یک تیزی موج ثابت، ضریب عبور موج کاهش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش تیزی موج روند تغییرات ضریب عبور موج، با افزایش ارتفاع نسبی موج، ابتدا افزایشی و سپس کاهشی است. این روند افزایش و کاهش نیز با کاهش درصد تخلخل سازه شدیدتر شده است. برای توجیه علّت این موضوع باید توان موج برخوردی به سازه و تأثیر آن در ضریب عبور موج از سازه در هر سه حالت تخلخل و نیز تغییرات توان موج با تیزی موج به دقّت بررسی گردد.

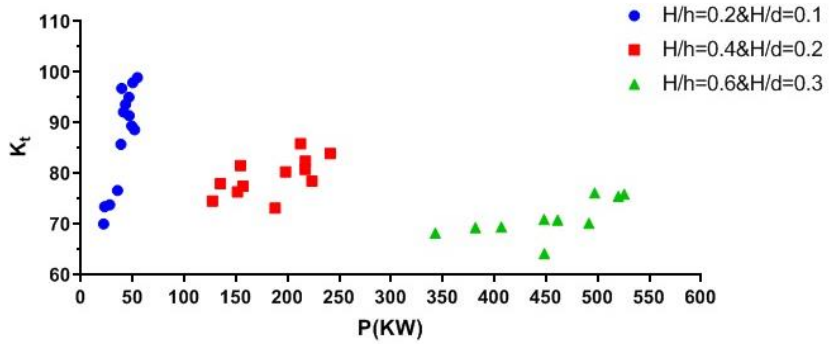


شکل۱۶- تغییرات توان موج برخوردی به سازه با تیزی موج

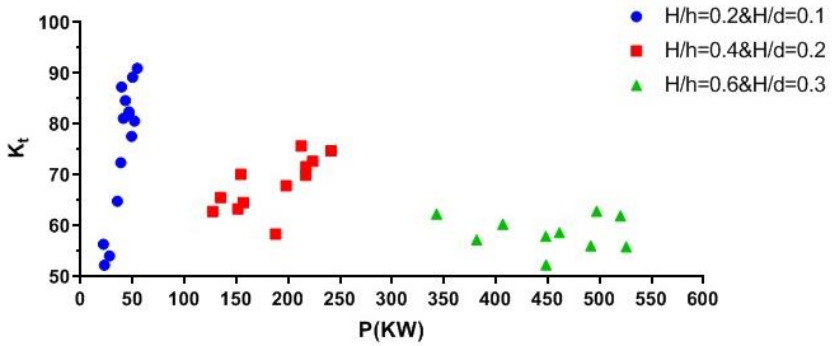
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]



شکل۱۷- ارائه‌ی نتایج ضریب عبور موج K_t با توان موج P در مدل A



شکل۱۸- ارائه‌ی نتایج ضریب عبور موج K_t با توان موج P در مدل B

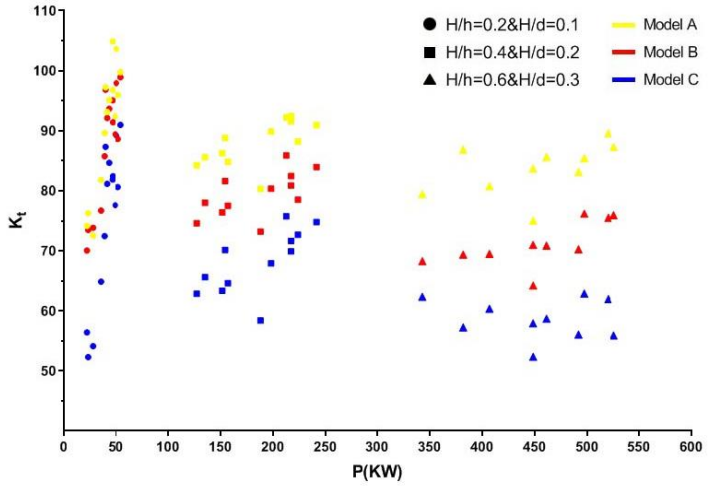


شکل۱۹- ارائه‌ی نتایج ضریب عبور موج K_t با توان موج P در مدل C

از شکل۱۶ چنین برمی‌آید که تمام ارتفاع‌های نسبی موج تابشی (H/h) در کم‌ترین تیزی خود پر توان‌تر و در بیش‌ترین تیزی خود کم توان‌تر هستند. همچنین تأثیر ارتفاع موج بر روی توان موج خیلی بیش‌تر از تأثیر طول موج بر روی آن است. از طرفی هر چه ارتفاع موج تابشی بیش‌تر باشد تأثیر طول موج بر روی توان آن موج بیش‌تر است و بالعکس. حال اگر در شکل۱۶ تیزی موج را ثابت در نظر بگیریم خواهید دید که توان کمینه‌ی H/h=0.2، توان متوسط H/h=0.4 و توان بیشینه‌ی H/h=0.6 با یکدیگر تلاقی می‌کنند. با دنبال کردن این توان‌ها برای سه مدل در شکل۱۷ تا۱۹، شکل۱۲ تا۱۵ به راحتی توجیه می‌گردد. آن‌چه با دقّت در نمودار هر مدل بدست می‌آید این است که با افزایش نسبت ارتفاعی (H/h) و افزایش توامان توان موج، وابستگی ضریب عبور موج به توان موج کاهش پیدا می‌کند و حتی ممکن است روند معکوس به خود بگیرد. اما با مقایسه‌ی نمودار هر سه مدل، کاهش درصد تخلخل سازه اگر چه برای هر نسبت ارتفاعی (H/h) به کاهش ضریب عبور موج منجر می‌گردد، اما در نسبت‌های ارتفاعی کم‌تر با کاهش درصد تخلخل سازه، وابستگی ضریب عبور موج به توان موج بیش‌تر می‌شود و با افزایش نسبت ارتفاعی (H/h)، کاهش درصد تخلخل سازه، وابستگی ضریب عبور موج به توان موج به صورت ملایم‌تری زیاد می‌شود تا این‌که روند افزایش وابستگی متوقف می‌شود و روند کاهشِ وابستگی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]

نمود می‌یابد. برای هر درصد تخلخل سازه، به ازای هر نسبت ارتفاعی (H/h) که روند وابستگی ضریب عبور موج به توان موج متوقف شود آن‌گاه سازه در آن نسبت ارتفاعی به حداکثر میزان ظرفیت عبور حجم آب[۳۶] از خود رسیده است و دیگر بیش از این مقدار نمی‌تواند آب را از خود عبور دهد. این نسبت ارتفاعی بیشینه که در آن وابستگی ضریب عبوری موج از سازه به افزایش یا کاهش توان موج متوقف می‌شود، همانطور که از شکل۲۰ مشخّص است در درصد تخلخل‌های کم‌تر به ازای نسبت‌های ارتفاعی کوچک‌تر و در درصد تخلخل‌های بیش‌تر به ازای نسبت‌های ارتفاعی بزرگ‌تر اتفاق می‌افتد.



شکل۲۰- مقایسه‌ی نتایج توانی سه مدل A،B و C

همچنین مشخّص می‌شود که از این نسبت ارتفاعی بیشینه به بعد هر چه توان موج برخوردی[۳۷] به سازه (با افزایش نسبت ارتفاعی موج برخوردی به آن) زیاد شود، نتیجه‌ی عکس می‌دهد و افزایش توان منجر به کاهش ضریب عبور موج از سازه می‌شود.

$$P = \frac{n}{T}\left(\frac{1}{8}\rho g H^2 L \times 1\right) = \frac{n\rho g H}{8T}(H \times L \times 1) = \frac{n\rho g H}{8T}(\forall) \qquad (۶)$$

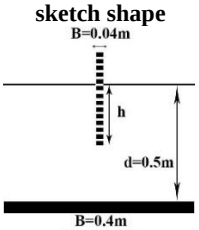
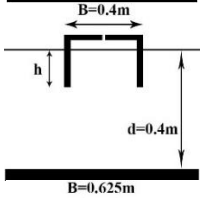
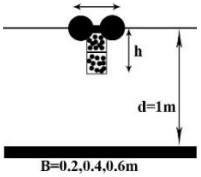
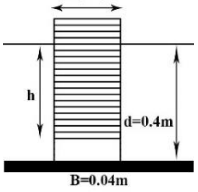
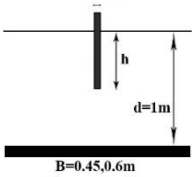
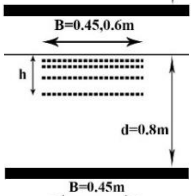
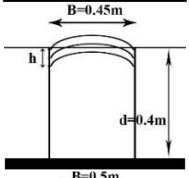
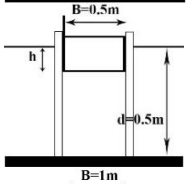
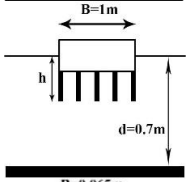
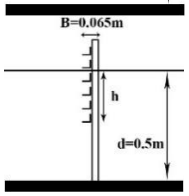
رابطه‌ی فوق توان موج را نشان می‌دهد. در این رابطه پارامتر ∀ نشان دهنده‌ی حجم آب برخوردی به سازه در هر پریود از زمان است و پارامتر n بیانگر کسری از انرژی مکانیکی در امواج منتقل شده به جلو، در هر پریود است و مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

$$n = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kd}{sinh2kd}\right) \qquad (۷)$$

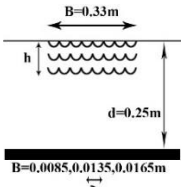
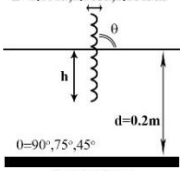
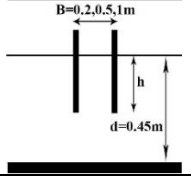
مطابق شکل۱۶ در یک (H/h) ثابت، افزایش طول موج منجر به کاهش تیزی موج و افزایش توان موج می‌گردد و از طرفی مطابق رابطه‌ی(۶) افزایش طول موج منجر به افزایش حجم برخوردی آب در یک پریود موج به سازه می‌شود. سازه با درصد تخلخل مشخّص این افزایش توان یا به عبارتی این افزایش حجم برخوردی آب را در یک پریود موج، با افزایش ضریب عبور موج از خود پاسخ می‌دهد تا جایی که دیگر قادر به عبور حجم آب بیش‌تری در یک پریود موج از خود نیست. از آن‌جا به بعد با افزایش توان موج یا به عبارتی افزایش حجم برخوردی آب در یک پریود موج به سازه روند معکوس می‌شود که این به علّت اختلال در نظم تخلیّه‌ی حجم آب از سازه در واحد زمان است. با بیان این نکته شاید بتوان علّت کاهش داده در طول موج نسبی (L/B≈۷۸) در شکل‌های۹ تا۱۱ بیان کرد. در این طول موج نسبی به هر دلیلی پدیده‌ی انسداد روی داده است که علّت آن ممکن است ایجاد اغتشاش ناشی از تغییر فازهای متوالیِ موج برگشتی از سازه باشد. به این معنی که ممکن است در این پریود خاص، تأثیر متوالی تغییر فاز موج برگشتی به نحوی باشد که بیش-ترین بی نظمی در برخورد موج به سازه ایجاد شود. این عامل به کاهش بیش‌تر انرژی و توان موج برخوردی می‌انجامد و در نتیجه کاهش عبور موج امری بدیهی خواهد بود. البته این موضوع را نمی-توان با قطعیّت بیان کرد و تنها یک برداشت شخصی از اندرکنش موج و سازه است و نیازمند بررسی بیش‌تر است. در جدول۴ و شکل۲۱ نیز نتایج آزمایشگاهی محققینی که تحقیقات مشابهی به انجام رسانده‌اند با یکدیگر مقایسه شده است. که در آن (P) درصد تخلخل سازه و(h/d) نسبت عمق فرورفت سازه در آب به عمق آب در محل استقرار است. در جدول۴، شکل و نحوه‌ی قرارگیری سازه های نیم‌عمق مختلف، محدوده‌ی موج برخوردی به سازه، پارامترهای مورد مطالعه در یک تحقیق و درصد تخلخل‌های یک سازه در مطالعه‌ی آزمایشگاهی، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با نگاهی به این جدول شباهت‌ها و تفاوت‌های سازه‌ی حاضر از نظر پارامترهای مورد مطالعه و محدوده‌ی هر یک از آن‌ها و حتی شکر ظاهری، با دیگر سازه‌ها کاملاً مشهود خواهد بود.

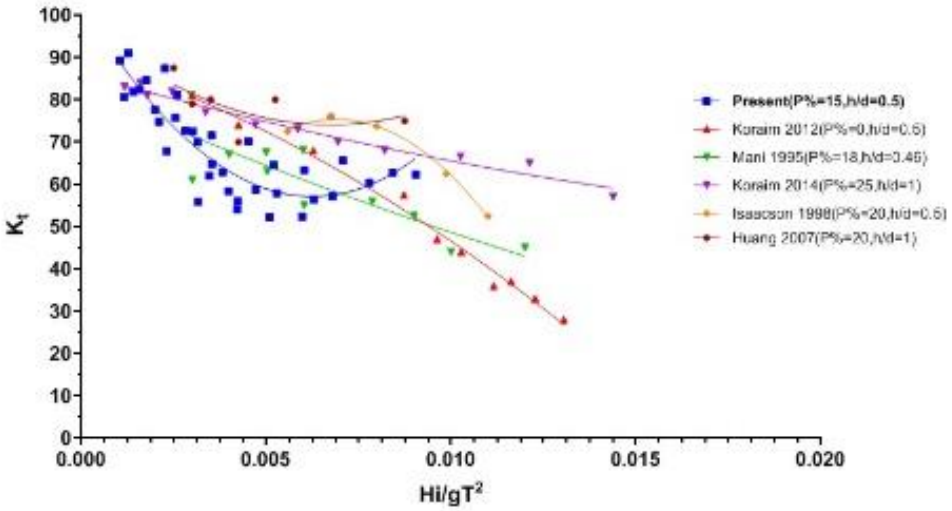
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]

جدول۴- مقایسه‌ی شکل و پارامترهای موج‌شکن‌هایی با عملکرد و کارآیی مشابه با پروژه حاضر

Project	sketch shape	h/d	other experimental parameters
Perforated Half-Depth Block-Made Wall (Present study)		0.5	H_i/L=0.011-0.062; B/L=0.0086-0.0325; d/L=0.108-0.405; H/h=0.2,0.4,0.6; Porosity%=15,25,35; No Pile
Pile-Supported OWC[38]-type Breakwater, He and Huang (2014),[17]		0.25,0.375,0.5	H_i/L=0.012-0.028; B/L=0.141-0.327; d/L=0.141-0.327; H/h=0.175,0.23,0.35; Porosity%=0,0.625,1.25,1.875,20; No Pile
CFB[39]-type Floating Breakwater, Ji et al. (2016),[18]		0.25	H_i/L=0.016-0.051; B/L=0.128-0.625; d/L=0.205-1; H/h=0.32,0.6,1; No Pile
Multiple-layer Breakwater, Wang et al. (2006),[19]		0.75	H_i/L=0.04-0.09; B/L=0.073-0.45; d/L=0.136-0.31; H/h=0.13,0.27,0.4,0.53; Plates Gap=0.04,0.1,0.2; Supported by Four Piles
Suspended Pipe Breakwater, Mani and Jayakumar (1995),[4]		0.26-0.56	H_i/L=0.05-0.106; B/L=0.008-0.04; d/L=0.2-1; H/h=0.11-0.92; Porosity%=18,30,40,50; Two Piles with 16cm in Diameter
Multi-layer Submerged Horizontal Porous Plate Breakwater, Fang et al. (2018),[20]		0.4	H_i/L=0.05-0.11; B/L=0.162-1; d/L=0.29-1.43; H/h=0.0625,0.125,0.1875; Porosity%=5,8,12.5,18; Supported by Four Slender Columns
arc Plate Breakwater, Wang et al. (2016),[21]		0,0.125,0.25	H_i/L=0.016-0.096; B/L=0.16-0.54; d/L=0.16-0.5; H/h=0.4,0.8,1.6; Plates gap=0.05,0.1,0.15; supported by Four Screw Rods
Caisson Breakwater Supported by Two Rows of Piles, Koraim (2015),[22]		0.1,0.3,0.5	H_i/L=0.01-0.07; B/L=0.15-0.4; d/L=0.15-0.4; H/h=0.133-0.35; Pile Porosity%=50,75,100; Supported by Two Rows of Piles
Floating Pontoon Type Breakwater with Skirt Walls, Neelamani and Ljubic (2018),[23]		0.143,0.286,0.43,0.57	H_i/L=0.007-0.097; B/L=0.133-0.646; d/L=0.093-0.452; H/h=0.125-1.5; Porosity%=0,5,10,20; No pile
Pile-Supported L-Shaped Bars Used as a Screen Breakwater, Koraim (2014),[24]		0.5,1	H_i/L=0.01-0.088; B/L=0.018-0.052; d/L=0.15-0.425; H/h=0.076-0.472; Porosity%=50,75,87.5; One Rows of piles with 5cm in Diameter

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]

Suspended horizontal rows of half pipes, Koraim (2013),[25]		0.462	H_i/L=0.02-0.095; B/L=0.115-0.507; d/L=0.09-0.39; H/h=0.563-0.866; Plates gap=0.05; No Pile
Single Suspended Row of Half Pipes, Koraim and Salem (2012),[7]		0-0.85	H_i/L=0.03-0.082; B/L=0.005-0.026; d/L=0.13-0.3; H/h≥0.306; No Pile
Suspended Double Slotted Barriers, Isaacson et al. (1999),[10]		0.5,1	H_i/L=0.07; B/L=0.082-1.945; d/L=0.184-0.875; H/h=0.08-0.76; Porosity%=0,5,10; No Pile



شکل۲۱- مقایسه نتایج تحقیقات مشابه با پژوهش حاضر

با دقّت در شکل۲۱ مشاهده می‌گردد که روند تغییرات به ازای تیزی موجِ کمتر به صورت نزولی است و به ازای تیزی موجِ بیش‌تر به صورت صعودی تغییر می‌کند. این موضوع در سایر تحقیقات مشابه دیده نمی‌شود. علّت در متخلخل بودن سازه‌ی مورد مطالعه است، چرا که در مدل سوم از سازه که درصد تخلخل کم‌ترین است، توان سازه در عبور موج از خود پایین آمده است. در این حالت به علّت پدیده‌ی انسداد، افزایش توان موج به افزایش عبور موج از سازه نمی-انجامد بلکه برعکس هر چه توان موج برخوردی به سازه زیادتر می-شود، سازه فرصت تخلیه‌ی حجم آب کم‌تری پیدا می‌کند و این در حالی است که حجم آب تخلیه نشده از سازه با حجم آب برخوردی به سازه در پریود بعدی اضافه می‌شود و منجر به اغتشاش و انسداد بیش‌تری می‌گردد. در این حالت بدیهی است که با افزایش تیزی موج طبق رابطه‌ی(۶) توان موج کاهش پیدا می‌کند و این باعث افزایش عبور موج از سازه می‌گردد. بنابراین نقطه ی قعر این نمودار بیانگر جایی است که می‌توان پیش‌بینی کرد که سازه به ازای یک موج با ارتفاع و طول موج خاص(تیزی خاص)، آیا دچار انسداد می‌شود یا خیر؟

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بر اساس مطالعات آزمایشگاهی بر روی طرح جدیدی از موج‌شکن دیواری مشبّک و نیمه مستغرق[۴۰]، ضریب عبور موج از سازه با سه درصد تخلخل مختلف مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفت. عمق آب، ارتفاع آبخور سازه و عرض سازه در این آزمایشات ثابت بودند و مطالعه بر روی رنج امواج منظمی مطابق جدول۳ انجام شد. در مجموع ۱۰۸ آزمایش بر روی این سه مدل از سازه انجام گرفت و نتایج زیر حاصل گشت:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]

الف) با افزایش دوره‌ی تناوب یا به عبارت دیگر با افزایش طول موجِ امواج برخوردی به سازه، ضریب عبور موج از سازه افزایش می‌یابد مگر زمانی که سازه در نهایت حدّ ظرفیت عبور حجم آب در واحد زمان از خود باشد. در این صورت با افزایش دوره‌ی تناوب یا طول موج، در یک ارتفاع موج ثابت، که به کاهش تیزی موج و در نهایت افزایش توان موج ختم می‌شود، کاهش گذردهی سازه و در نهایت کاهش ضریب عبور موج دیده می‌شود.

ب) افزایش تیزی موج اگر ناشی از کاهش طول موج در یک ارتفاع موج ثابت باشد، باعث کاهش ضریب عبور موج از سازه می‌شود مگر زمانی که سازه به حدّ نهایی ظرفیت عبور حجم آب در واحد زمان از خود رسیده باشد. در این صورت افزایش تیزی موج به کاهش توان موج منجر می‌گردد و موجب افزایش ضریب عبور موج از سازه می‌شود.

ج) افزایش تیزی موج اگر ناشی از افزایش ارتفاع موج در یک طول موج ثابت باشد، به ازای محدوده‌ای از دوره‌ی تناوب باعث کاهش ضریب عبور موج از سازه می‌شود. در این پژوهش به ازای دوره‌ی تناوب ۱/۳ ثانیه به بعد کاهش ضریب عبور با افزایش ارتفاع موج در یک طول موج ثابت اتفاق افتاد و به ازای دوره‌ی تناوب‌های قبل از آن، نتیجه برعکس شد.

د) کاهش ضریب عبور سازه با کاهش درصد تخلخل آن، در نسبت‌های ارتفاعی(H/h) کوچک‌تر کم‌تر و در نسبت‌های ارتفاعی بزرگ‌تر بیش‌تر است. علّت آن است که با افزایش نسبت ارتفاعی موج برخوردی، ظرفیت سازه برای عبور توان‌های بیش‌تر موج، کم‌تر می‌شود و از طرفی با کاهش درصد تخلخل سازه نیز دوباره همین اتفاق می‌افتد. بنابراین نسبت‌های ارتفاعی بزرگ‌تر بیش‌ترین کاهش و نسبت‌های ارتفاعی کوچک‌تر کم‌ترین کاهش را در ضریب عبور موج خواهند داشت.

ه) در این طرح با استفاده از بلوک‌های پلاستیکی بافته شده توسط کابل‌های فلزی و نصب شده بر روی شمع‌های مهاری و استفاده از نسبت‌های بی بعدی مثل(h/d) و(L/B) و(H/h) و(H/d)، ارتفاع موج عبوری از سازه حتی تا ۵۰ درصد کاهش یافت. در این پژوهش با پوشاندن تعداد ۱۲۰ عدد از روزنه‌ها درصد تخلخل سازه به ۱۵درصد رسید و از طریق کاهش درصد تخلخل سازه از ۳۵درصد به ۱۵درصد ارتفاع موج عبوری از سازه کاهش یافت. با آزمایش بر روی رنج ارتفاع امواج بین ۵ تا ۱۵ سانتی متر(۱تا۳متر در واقعیّت) و رنج پریود های بین ۰/۹ تا ۲/۲ ثانیه(۴تا۱۰ ثانیه در واقعیّت)، نتیجه گرفته شد که سازه در نسبت‌های(H/h) برابر۰/۶ و (H/d) برابر ۰/۳ و(h/d) برابر۰/۵ و(L/B) برابر۷۷/۳، دارای ضریب عبور ۰/۵ می‌شود.

۵- سپاسگزاری

نگارندگان لازم می‌دارند از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر و نیز پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری تهران جهت همکاری و ارائه‌ی خدمات آزمایشگاهی تقدیر و تشکر نمایند.

کلید واژگان

1- Wall breakwaters
2- Sliding
3- Overturning
4- Uplift
5- Energy dissipation
6- Perforated walls
7- Supportive piles
8- Progressive wave direction
9- Incident wave height
10- Added mass
11- Semi submerged breakwater
12- Vertical wave barrier
13- Semi-immersed smooth solid walls
14- Slots barriers
15- Pipe breakwaters
16- Model breadth
17- Structure windage height
18- Wave generator system
19- Depreciation system of sandy beach
20- Structure seat
21- Wave gage
22- Calibration
23- Significant wave
24- Maximum scale number
25- Overpassing
26- Structure draft height
27- Cable clip connection
28- Disturbance
29- Non-breaking wave
30- Significant height
31- Significant period
32- Significant wave length
33- Relative wave length
34- Wave steepness
35- Wave transmission coefficient
36- Maximum water volume transfer capacity
37- Incident wave power
38- Oscillating water column
39- Cylindrical floating breakwater
40- Semi-submerge

۶- مراجع

1- Chegini, V., (Ed.)., (1998), *Manual on the Design of Breakwaters*, Water and Watershed Research Jihad Company, Tehran. (In Persian)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]

Faculty of Engineering, Suez Canal University, Port Said, Egypt.
15- Rao, S., et al., (2003), *Energy dissipation at single row of suspended perforated pipe breakwaters*, Journal of the Institution of Engineers. India. Civil Engineering Division, Vol.84, p.77-81.
16- Sorensen, R.M., (Ed.)., (2005), *Basic coastal engineering* (Bargi, k., Trans.). Tehran, Iran: UT. (In Persian)
17- He, F., and Huang, Z., (2014), *Hydrodynamic performance of pile-supported OWC-type structures as breakwaters: An experimental study*, Ocean Engineering, Vol.88, p.618-626.
18- Ji, C.Y., et al., (2016), *3D experimental study on a cylindrical floating breakwater system*, Ocean Engineering, Vol.125, p.38-50.
19- Wang, Y., et al., (2006), *Experimental study on the performance of the multiple-layer breakwater*, Ocean Engineering**,** Vol.33, p.1829-1839.
20- Fang, Z., et al., (2018), *Experimental study of the wave-dissipating performance of a four-layer horizontal porous-plate breakwater*, Ocean Engineering, Vol.151, p.222-233.
21- Wang, G., et al., (2016), *Experimental study on hydrodynamic performance of arc plate breakwater*, Ocean Engineering, Vol.111, p.593-601.
22- Koraim, A., (2015), *Mathematical study for analyzing caisson breakwater supported by two rows of piles*, Ocean Engineering, Vol.104, p.89-106.
23- Neelamani, S., and Ljubic, J., (2018), *Experimental Study on the Hydrodynamic Performance of Floating Pontoon Type Breakwater with Skirt Walls*, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.140, p.021303.
24- Koraim, A., et al., (2014), *Hydrodynamic characteristics of porous seawall protected by submerged breakwater*, Applied ocean research, Vol.46, p.1-14.
25- Koraim, A., (2013), *Hydrodynamic efficiency of suspended horizontal rows of half pipes used as a new type breakwater*, Ocean Engineering, Vol.64, p.1-22.
2- Jarlan, G., (1961), *A perforated vertical wall breakwater*, The Dock and Harbour Authority, Vol.486, p.394-398.
3- Mani, J., and Jayakumar, S., (1995), *Wave transmission by suspended pipe breakwater*, Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, Vol.121, p.335-338.
4- Suh, K.D., et al., (2006), *Wave reflection from partially perforated-wall caisson breakwater*, Ocean Engineering, Vol.33, p.264-280.
5- Marks, W., (1967), *A perforated mobile breakwater for fixed and floating application*, Coastal Engineering 1966**,** p.1079-1129.
6- Sawaragi, T., et al., (1976), *Transmission et reflexion de la houle par une digue formée de planches verticales*, La Houille Blanche, p.625-637.
7- Koraim, A., and Salem, T., (2012), *The hydrodynamic characteristics of a single suspended row of half pipes under regular waves*, Ocean Engineering, Vol.50, p.1-9.
8- Huang, Z., (2007), *Wave interaction with one or two rows of closely spaced rectangular cylinders*, Ocean Engineering, Vol.34, p.1584-1591.
9- Isaacson, M., et al., (1998), *Wave interactions with vertical slotted barrier*, Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, Vol.124, p.118-126.
10- Isaacson, M., et al., (1999), *Wave interactions with double slotted barriers*, Applied ocean research, Vol.21, p.81-91.
11- Liu, Y., (2007), *Wave interaction with a perforated wall breakwater with a submerged horizontal porous plate*, Ocean Engineering, Vol.34, p.2364-2373.
12- Kou, Y., (2019), *Performance characteristics of a conceptual ring-shaped spar-type VLFS with double-layered perforated-wall breakwater*, Applied Ocean Research, Vol.86, p.28-39.
13- Mani, J., (1998), *Wave forces on partially submerged pipe breakwater*, Ocean Wave Kinematics, Dynamics and Loads on Structures, ASCE.
14- Galal, S., (2002), *The use of permeable breakwater for sea defense and shore protection*, Master thesis,

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.8.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.93]