



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Review Article

A review of hydraulic responses in composite caisson breakwaters

Omid Karbasi^{1*}, Hasan Akbari²

1-* master graduated in Coastal engineering of ports and marine structures, Faculty of Civil Engineering and Environment, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering and Environment, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 27 March 2024; Revised: 11 April 2024 Accepted: 01 May 2024; Published: 22 July 2024

Abstract

Sea transportation is one of the main methods of moving goods between different countries in the world. In this regard, ports play an extremely important role and breakwaters are very important as the main structure of coastal protection. There are different types of breakwaters, including traditional rock mass breakwaters, platform breakwaters, vertical breakwaters, combined breakwaters, and special breakwaters. Due to cost reduction in construction, caisson breakwaters are used in deep waters. In the design and construction of these breakwaters, the reflection coefficient, wave overtopping and stability of the breakwater are important issues that make designers face many challenges. In order to improve the performance of caissons, various solutions have been proposed by researchers, among them Jarlan caissons in which perforated plates were placed in front of the caisson. In the following, after presenting the solution of creating holes on the front face of the caisson, many researchers have evaluated various variables to obtain the optimal plan in this regard. The collection of these researches confirm the optimal performance of caisson breakwaters with holes and some of them suggest new geometries on how to create holes. This optimized performance includes both better hydraulic response and, in some cases, reduced forces, which will improve stability. At the same time, other researches have been conducted on breakwaters without holes, and researchers have tried to improve their performance by changing the geometry of these caissons.

Keywords: caisson breakwater, hydraulic response, composite breakwater, perforated caisson breakwater

Cite this article as Karbasi,O and Akbari,H . (2024). A review of hydraulic responses in composite caisson breakwaters. (e195342). Civil and Project journal, 6(5), e195342 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2024.454514.1278>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2024 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: karbasiomid@modares.ac.ir



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

مروری بر پاسخ‌های هیدرولیکی در موج‌شکن‌های کیسونی مرکب

امید کرباسی^{۱*}، حسن اکبری^۲

^{۱*} - کارشناس ارشد مهندسی سواحل بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
^۲ - دانشیار گروه مهندسی سواحل بنادر و سازه‌های دریایی دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۰۸ فروردین ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۲۳ فروردین ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۲ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ مرداد ۱۴۰۳

چکیده

حمل و نقل دریایی یکی از اصلی‌ترین روش‌های جابه‌جایی کالاها میان کشورهای مختلف در سطح جهان است. در همین راستا بنادر نقش فوق‌العاده مهمی یافته و موج‌شکن‌ها به عنوان اصلی‌ترین سازه‌ی حفاظت از ساحل اهمیت فراوانی دارند. موج‌شکن‌ها انواع مختلفی دارند که از جمله‌ی آن می‌توان موج‌شکن‌های توده سنگی سنتی، موج‌شکن‌های سکویی، موج‌شکن‌های قائم، موج‌شکن‌های ترکیبی و موج‌شکن‌های خاص اشاره کرد. به علت کاهش هزینه در ساخت، موج‌شکن‌های کیسونی در آب‌های عمیق مورد استفاده قرار می‌گیرند. در طراحی و ساخت این موج‌شکن‌ها ضریب انعکاس، روگذری موج و پایداری موج‌شکن موارد مهمی هستند که طراحان را با چالش‌های فراوانی روبه‌رو می‌کنند. به منظور بهبود عملکرد کیسون‌ها راهکارهای مختلفی توسط پژوهشگران ارائه شده است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به کیسون‌های جارلان که در آن صفحه‌های متخلخل در برابر کیسون قرار داشتند، اشاره کرد. در ادامه پس از ارائه‌ی راهکار ایجاد حفره بر وجه جلویی کیسون بسیاری از پژوهش‌گران متغیرهای مختلف جهت به دست آوردن طرح بهینه در این راستا را مورد سنجش قرار داده‌اند. مجموعه‌ی این پژوهش‌ها عملکرد بهینه‌ی موج‌شکن‌های کیسونی حفره‌دار را تایید می‌کنند و برخی از آن‌های هندسه‌های جدیدی در مورد چگونگی ایجاد حفرات را پیشنهاد می‌کنند. این عملکرد بهینه هم شامل پاسخ هیدرولیکی مناسب‌تر و هم در برخی موارد کاهش نیروهای وارد می‌شود که این موضوع پایداری را بهبود خواهد بخشید. هم‌زمان پژوهش‌های دیگری نیز بر روی موج‌شکن‌های بدون حفره صورت گرفته است و پژوهش‌گران با تغییر هندسه‌ی این کیسون‌ها، در صدد بهبود عملکردشان برآمده‌اند.

کلمات کلیدی: موج‌شکن مرکب، موج‌شکن کیسونی مرکب حفره‌دار، موج‌شکن کیسونی، پاسخ هیدرولیکی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: karbasiomid@modares.ac.ir

۱- مقدمه

موج‌شکن به عنوان سازه‌ای برای محافظت از سواحل و ایجاد حوضچه‌ی آرامش بنادر در دریا کاربرد دارد. با توجه به عمق مورد استفاده، مصالح و امکانات موجود، شرایط طبیعی محل احداث و همچنین زمان بهره‌برداری از انواع مختلفی چون موج‌شکن توده سنگی، موج‌شکن قائم، موج‌شکن مرکب، موج‌شکن شناور و موج‌شکن ویژه استفاده می‌شود. موج‌شکن‌های کیسونی صندوقه‌های ساخته شده از بتن هستند که در آب‌های عمیق مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به سختی اجرا و جلوگیری از هدررفت مصالح، در اکثر موارد دو لایه هسته و فیلتر در بستر کیسون‌های قرار می‌گیرد که به این صورت موج‌شکن‌های مرکب کیسونی ایجاد می‌شود. در مواردی که محلی جهت تولید بتن مورد نیاز در ابعاد وسیع وجود نداشته باشد، استفاده از این موج‌شکن‌ها توصیه نمی‌شود. همچنین با توجه به حساسیت این نوع از موج‌شکن در برابر لغزش و پایداری، می‌بایست بررسی این دو مور به صورت ویژه‌ای در دستور کار طراحان قرار گیرد. در طراحی موج‌شکن‌ها، متغیرهای مختلفی تاثیرگذار هستند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به پاسخ هیدرولیکی اشاره کرد. دلیل اهمیت پاسخ‌های هیدرولیکی موج‌شکن از آن جهت است که طراحی بر مبنای آن صورت می‌پذیرد. به عنوان نمونه روگذری موج‌شکن برای عملکردهای مختلف، مقدار متفاوتی دارد که تامین آن الزامی آیین‌نامه‌ای است. این مقدار با توجه به حساسیت‌های مورد نیاز تعیین شده است. از طرف دیگر موج‌شکن‌های کیسونی به دلیل بازتاب موج، باعث شکل‌گیری امواجی که وجه جلویی موج‌شکن می‌شوند که می‌تواند منشا آسیب باشد. از دیگر پاسخ‌های هیدرولیکی می‌توان به عبور موج و بالاروی و پایین روی موج اشاره کرد. به دلیل اهمیت پاسخ‌های هیدرولیکی در طراحی موج‌شکن‌ها، طرح‌های مختلف به منظور رسیدن به طرح بهینه همواره مورد بررسی و آزمایش پژوهشگران قرار گرفته است. ایده‌ی استفاده از یک کیسون حفره‌دار ابتدا توسط (Jarlan, 1961) پیشنهاد شد. در این مدل با استفاده از ایده‌ی ایجاد حفره در دیوار جلوی کیسون قائم، ویژگی‌هایی مانند ضریب انعکاس امواج و روگذری بهبود بخشیده شد. با مشاهده‌ی بهبود عمومی عملکرد با ایجاد دیوارهای حفره‌دار در محوطه‌ی جلویی کیسون پژوهشگران با بررسی‌های مختلف تلاش کردند تا به دید جامع‌تری از این نوع موج‌شکن‌ها دست یابند. همچنین در این راستا همواره رسیدن به طرح‌های بهینه‌تر با آزمایش مدل‌های مختلف به عنوان هدف در نظر گرفته می‌شود. پس از اثبات کارایی موج‌شکن‌های حفره‌دار بررسی‌های جزئی‌تری مانند بررسی چینش و شکل حفره‌ها، ابعاد آن‌ها، تعداد دیوارهای حفره‌دار مورد استفاده و موارد مشابه صورت پذیرفت. همچنین طرح‌های خلاقانه‌ی دیگری نیز مورد آزمایش قرار گرفت تا در صورت قابل قبول بودن نتایج، اجرایی شوند. در سال‌های گذشته با توجه به گسترش امکانات آزمایشگاهی، پژوهشگران آزمایش نمونه‌های مختلف موج‌شکن‌های کیسونی را در دستور کار قرار دادند. انتشار نتایج این آزمایش‌ها باعث فهم عمیق‌تر از عملکرد این نوع موج‌شکن‌ها شده است. به علاوه این نتایج به منظور صحت‌سنجی در اختیار پژوهشگرانی که با مدلسازی عددی پژوهش خود را انجام می‌دهند، قرار گرفته است.

۲- مطالعات انجام شده

در این بخش به پژوهش‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر پرداخته می‌شود. در هر یک از این پژوهش‌ها، فعالیت مشخصی بر روی یکی از پاسخ‌های هیدرولیکی موج‌شکن‌های کیسونی با حفره و بدون حفره صورت پذیرفته است. در ابتدا به بررسی مطالعات صورت گرفته بر موج‌شکن‌های کیسونی بدون حفره پرداخته شده و در ادامه کیسون‌های حفره‌دار مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۱-۲ مطالعات صورت گرفته بر روی موج شکن های کیسونی بدون حفره

یکی از تغییراتی که می تواند پاسخ هیدرولیکی موج شکن کیسونی بدون حفره را تغییر دهد، اضافه کردن تاج (فراسازه)^۱ در قسمت بالایی بدنه ی موج شکن است. در پژوهش صورت گرفته توسط (Misra et al., 2008) با تغییر هندسه فراسازه بر روی موج شکن کیسونی متغیرهای مختلف این دو نوع با همدیگر مقایسه شده اند. از جمله ی این متغیرها می توان به نیرو و روگذری اشاره کرد. در مدل سازی انجام شده مقایسه میان موج شکن کیسونی عادی و موج شکن کیسونی با فراسازه که هر دوی آن ها در یک ارتفاع قرار دارند، انجام شده است. با اندازه گیری روگذری مربوط به هر کدام از حالت ها، مقایسه روگذری تجمعی و همین طور نیروی وارده بر پشت موج شکن صورت گرفت. در نتیجه ی این مقایسه مشخص شد که روگذری تجمعی و نیروی وارده برای موج شکن کیسونی ساده که در یک تراز ارتفاع با موج شکن همراه با فراسازه قرار داشته باشد، نتایج مطلوب تری را ارائه می کند.

یکی از پژوهش های آزمایشی مرجع در زمینه ی پاسخ هیدرولیکی موج شکن های کیسونی بدون حفره، مطالعه ی آزمایشگاهی (Lara et al., 2008) است. این پژوهش آزمایشگاهی با فراهم آوردن فلو م موجی به طول ۵.۶۰، عرض ۲ و ارتفاع ۲ متر سه متغیر فشار، تراز سطح آب و روگذری را اندازه گیری و گزارش کرده است. موج ورودی به دو صورت منظم و نامنظم در نظر گرفته شده است. این مطالعه علاوه بر فراهم آوردن نتایجی جامع به منظور صحت سنجی مدل های مختلف عددی و آزمایشگاهی پیشنهاد می کند تا استفاده ی وسیع تری از مدل سازی عددی صورت بگیرد تا بتوان مدل های پیچیده تر را پیاده سازی کرد.

به منظور بررسی تاثیر روگذری بر روی ویژگی های هیدرودینامیکی امواج ایستا که در مقابل موج شکن های قائم شکل می گیرد، پژوهشی توسط (Yeganeh-Bakhtiary et al., 2010) انجام شده است. پیش تر تاثیر روگذری موج و تغییرات شیب روی موج شکن عمودی بر روی حداکثر سرعت افقی بررسی شده بود. این موضوع تاثیر خود را به این صورت نمایان می کرد که در صورت امکان روگذری بیشتر حداکثر سرعت افقی کاهش می یافت که در آبشستگی پای موج شکن عمودی و پایداری آن تاثیرگذار است. در این پژوهش با مدلسازی عددی این موضوع روند تغییرات پارامترهای مختلفی مانند سرعت افقی ذرات در مقابل موج شکن عمودی بررسی شد. نتیجه ی به دست آمده از این قرار است که ارتفاع موج و سرعت افقی و عمودی به ترتیب در گرہ ها و ضد گرہ ها در امواج کاملاً ایستاده بیشتر است. سرعت مداری افقی و عمودی به ترتیب در ضد گرہ ها و گرہ ها مانند امواج کاملاً ایستاده به صفر نزدیک نیست. پارامترهای آشفتگی در ناحیه روگذری موج، زمانی که شکستن موج روی تاج موج شکن اتفاق می افتد، به شدت افزایش می یابد. همچنین در امواج کاملاً ایستاده، دیواره ی موج شکن عمودی به سمت دریا قسمتی است که بیشتر تحت تاثیر تولید آشفتگی قرار می گیرد، در حالی که برای موج نیمه ایستاده تاج موج شکن عمودی تاثیر بسیار مهمی بر تولید آشفتگی خواهد داشت. در ادامه (Tofany et al., 2016) به حساسیت سنجی روگذری نسبت به تغییر Re^2 و ارتفاع موج پرداختند. همچنین تاثیر این تغییرات بر روی آبشستگی و تاثیر روگذری بر پروفیل موج بررسی شده است. نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر است.

(۱) افزایش روگذری انرژی موج را کاهش می دهد. سپس مشخصات موج ایستاده را تغییر داده آن را نامتقارن تر می کند. این موضوع باعث کاهش سرعت ذرات شده که عمق آبشستگی را کاهش می دهد.

(۲) تغییرات Re بر بروی مشخصات موج ایستاده و سپس الگو و اندازه سرعت ها تاثیر می گذارد. این موضوع در نهایت در عمق آبشستگی در پای موج شکن تاثیرگذار است.

(۳) افزایش روگذری باعث آشفتگی جریان بر روی تاج موج شکن می شود اما این تلاطم بسیار ناچیز است و به مناطق دیگر گسترش نیافته و بر عمق آبشستگی نیز تاثیری ندارد.

¹ Superstructure

^۲ فاصله میان تراز سطح آب تا تراز تاج سازه

۴) ارتفاع موج و R_c بیشتر، ارتفاع موج ایستاده را افزایش می‌دهد که این موضوع باعث افزایش سرعت ذرات شده و در نهایت عمق آبشستگی را افزایش می‌دهد.

به منظور کاهش روگذری از دیوار عمودی دریایی، ساختارهای قرار داده شده در برابر دیوار عمودی با درصد تخلخل‌های متفاوت توسط (P. D. Hieu and P. N. Vinh, 2012) مورد آزمایش قرار داده شده است تا درصد بهینه کارایی برای کاهش روگذری به دست آید. مطابق نتایج ارائه شده در این پژوهش، بهینه‌ترین میزان روگذری برای تراس در محدوده ۰/۴ تا ۰/۶ و برای reef در محدوده ۰/۲ تا ۰/۷ است.

کیسون LOWREB یک ساختار ابتکاری چند محفظه‌ای و با انعکاس کم است. این کیسون دارای سرریزهای داخلی در هر محفظه‌ای اتلاف‌کننده برای افزایش اتلاف انرژی امواج است. این مکانیزم برای استفاده به عنوان موج‌شکن خارجی یا به عنوان دیوار اسکله با انعکاس کم طراحی شده است. (Lopez et al., 2018) در این مقاله از مدل‌سازی عددی به وسیله نرم‌افزار OpenFOAM برای پیاده‌سازی یک مدل عددی RANS-VOF از مدل کیسون LOWREB استفاده کردند. در این مطالعه بر روی رفتار هیدرودینامیکی کیسون LOWREB با هدف درک مکانیسم‌های اتلاف انرژی موج و ارزیابی بازده هیدرولیکی آن با توجه به بازتاب موج در محدوده وسیعی از شرایط هیدرودینامیکی، بررسی صورت گرفت. نتایج این مطالعه اهمیت سرریزهای داخلی در اتلاف انرژی موج را تایید کرد. بازدهی هیدرولیکی کیسون LOWREB به شدت تحت تاثیر اثر ترکیبی دوره‌ی تناوب موج و سطح آب است. با این حال، تاثیر ارتفاع موج ناچیز نیست. به طور کلی، اتلاف انرژی با افزایش ارتفاع موج افزایش می‌یابد. کیسون LOWREB بهترین عملکرد خود را برای شرایط سطح آب بالا و متوسط ارائه می‌دهد. برای تمام مقادیر ضریب بازتاب زیر ۷۰ درصد و بیشتر آن‌ها در محدوده ۳۰ تا ۶۰ درصد هستند.

در ادامه (Di Lauro et al., 2020) در مورد تفاوت بین عملکرد موج‌شکن کیسونی سنتی و موج‌شکنی که با تغییر در هندسه عملکردش بهبود پیدا کرده است، نتایجی را ارائه داده‌اند. بهبود عملکرد در این موج‌شکن در ضریب انعکاس، روگذری، نیروهای وارد و پایداری خود را نشان داده است. علی‌رغم انطباق حدود ۹۰ درصدی با فرمول‌های ارائه شده در EuroTop به منظور بهبود روابط متغیرهای جدیدی هم پیشنهاد شده است. در مورد دستگاه‌های مبدل انرژی در موج‌شکن‌ها راه‌حل‌های مختلفی برای توسعه آن‌ها پیشنهاد شده است. این دستگاه که به اختصار OBREC^۱ نامیده می‌شود یک سطح شیب‌دار به همراه یک مخزن بتنی است. این فناوری قادر است بخشی از انرژی وارد شده توسط موج را ذخیره کند. در نهایت این نوع موج‌شکن علاوه بر تامین پایداری بهتر، ضریب انعکاس کمتر و در مواردی روگذری کمتر نسبت به موج‌شکن‌های کیسونی سنتی طرح قابل قبولی برای اجرا می‌باشد. به طوری که این موج‌شکن می‌تواند تا حدود ۴۰ درصد ضریب انعکاس را کاهش دهند و نیروهایی که باعث ایجاد ناپایداری می‌شود را بین ۶۰ تا ۸۰ درصد کاهش دهد.

به منظور در نظر گرفتن زاویه امواج برخوردی و همچنین بررسی تفاوت پاسخ‌های در بدنه و پیشانی موج‌شکن در حضور و یا عدم حضور تاج سازه (van Gent, 2020) در پژوهش خود، آزمایش‌هایی با امواج بین ۰ تا ۷۵ درجه با گام‌های ۱۵ درجه‌ای در حالت حضور یا بدون حضور سازه‌ی تاج انجام داده است. اندازه‌گیری میزان روگذری در این پژوهش با قرار دادن چهار ایستگاه در نقاط مختلف انجام شده تا علاوه بر حصول اطمینان از نتایج به دست آمده تفاوت احتمالی میزان روگذری در بدنه و پیشانی موج‌شکن نیز بررسی شود. در این پژوهش مقایسه میان دبی روگذری از بدنه و پیشانی موج‌شکن صورت پذیرفته و پیشنهاد تاثیر موقعیت محاسبه دبی بر روی میزان آن با اضافه کردن یک ضریب در رابطه مربوطه داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در تحقیق حاضر، به ازای اکثر مقادیر ثبت شده دبی عبوری از پیشانی بیشتر از دبی عبوری از بدنه موج‌شکن بوده است. تاثیر این متغیر نیز با یک ضریب تاثیر در رابطه پیشنهادی آورده شده است.

¹ Overtopping BReakwater for Energy Conversion

۲-۲ مطالعات صورت گرفته بر روی موج شکن های کیسونی حفره دار

پس از پیشنهاد جارلان، کارهای تحقیقاتی متعددی بر روی موج شکن های حفره دار انجام شد تا بتوان پاسخ های هیدرولیکی موج شکن های حفره دار و همچنین نحوه عملکرد آن ها در برابر امواج دریا را ارزیابی و پیش بینی کرد. از این میان می توان به پژوهش های (Takahashi et al., 2003) در زمینه ی ارزیابی عملکرد موج شکن های کیسونی حفره دار و پژوهش (Takahashi et al., 1994) در زمینه ی پاسخ دینامیکی و لغزش موج شکن عمودی در برابر نیروهای امواج شکسته اشاره کرد. این پژوهش ها باعث شد تا با مشاهده ی عملکرد موج شکن های کیسونی حفره دار، پژوهش گران بعدی تلاش کنند تا نقاط ضعف موج شکن های کیسونی حفره دار را برطرف کرده و نقاط قوت آن را تقویت نمایند تا به مدل های بهینه دست یابند. به منظور توسعه ی مطالعات پیشین (Suh et al., 2005) مطالعه بر روی موج شکن مرکب کیسونی حفره دار را که پیش تر با امواج منظم مورد مطالعه قرار گرفته بود، با امواج نامنظم ادامه دادند. باید اشاره کرد که در این مطالعه تخلخل در نیمه بالایی وجه جلویی موج شکن اعمال شده است تا موج شکن مورد استفاده پایداری بیشتری داشته باشید. در ادامه با تغییر عرض محفظه موج شکن تغییرات ضریب انعکاس نسبت به آن بررسی شده است. با توجه به نتایج ارائه شده با افزایش نسبت عرض محفظه به طول موج، ضریب انعکاس روند کاهشی و سپس افزایشی دارد. با تغییر شیب بستر تغییرات خیلی زیادی در ضریب انعکاس به وجود نمی آید. این مدل در محدوده ی خاصی نتایج مورد قبولی می دهد و با افزایش نسبت ارتفاع به طول موج میزان محاسبه شده به طرز قابل توجهی بیشتر از میزان واقعی مورد نظر است. در ادامه بررسی عملکرد هیدرولیکی موج شکن های کیسونی حفره دار (Ghasemizade and Ketabdari, 2015) اثر شکل حفرات را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش پس از تعریف شرایط مرزی و صحت سنجی مدل سازی، چهار شکل مختلف برای ارزیابی اثر شکل حفرات با درصد تخلخل های مختلف ساخته شد. شکل های استفاده شده عبارت اند از حفره های دایره ای، مربعی، مستطیلی عمودی و مستطیلی افقی. درصدهای تخلخل ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ هستند. در ادامه برای هر یک از شکل های حفره های موجود با تغییر درصد تخلخل و همچنین تغییر نسبت عرض محفظه موج شکن به طول موج روند تغییرات ضریب انعکاس به دست آمد. مطابق نتایج گزارش شده در این پژوهش، روند تغییرات برای یک درصد تخلخل خاص، مثلاً ۴۰ درصد، و همچنین برای یک شکل حفره، مثلاً مربعی شکل، به صورت نوسانی افزایش، کاهش و افزایش می یابد. همچنین در شکل حفرات مختلف در نسبت عرض محفظه به طول موج های مختلف غالباً درصد تخلخل ۱۵ درصد کمترین ضریب بازتاب را دارد اما در مورد بیشترین ضریب انعکاس اظهار نظر قاطعی نمی توان کرد. در ادامه نتایج ضریب انعکاس نسبت به عرض محفظه به طول موج های مختلف برای یک درصد تخلخل خاص با اشکال مختلف گزارش شده است. در نسبت عرض محفظه به طول موج های مختلف و همچنین در درصدهای تخلخل مختلف اشکال مختلفی بیشترین و کمترین ضریب انعکاس را دارند. به همین دلیل نمی توان اظهار نظر کلی درباره ی روند موجود تغییرات در این نمودارها داشت. در انتها با قرار دادن دو دیوار متخلخل با فواصل مختلف از همدیگر روند تغییرات ضریب استهلاک انرژی و انعکاس نسبت به عرض محفظه به طول موج های مختلف گزارش شده است. ضریب استهلاک انرژی در بعضی از نسبت عرض به طول موج ها برای فاصله ی ۱/۵ برابر ضخامت دیوارها و در برخی دیگر از نسبت ها برای فاصله ی برابر با ضخامت دیوارها کمترین میزان را دارد. این بررسی نشان می دهد که نمی توان روند یکسانی را برای همه درصد تخلخل ها و همه نسبت ها داشت و برای تحلیل هر کدام می بایست نمودار مربوطه رسم و نتایج تحلیل شود. در پژوهشی دیگر (Amirabadi et al., 2015) با تغییر هندسه سازه سعی در به دست آوردن هندسه بهینه کرده و همچنین در طی این روند تغییرات متغیرهای مختلف را نیز اندازه گیری کرده اند. مدل سازی این مقطع با استفاده از نرم افزار Flow-3D انجام شده است. میدان سرعت ذرات در حالت های مختلف هندسه ی موج شکن مدل می شود تا تغییرات سرعت ذرات در حالت های مختلف با همدیگر مقایسه شود. مطابق گزارشات سرعت حداکثر با ایجاد محفظه در مرکز موج شکن و بزرگ تر کردن آن روند کاهشی دارد. همچنین توزیع سطح ذرات آب به صورت یک نواخت تری در می آید. در ادامه حساسیت روگذری موج به مشخصات موج در حالت مقطع حفره دار سنجیده شده است. مطابق نتایج گزارش شده با افزایش ارتفاع و دوره ی تناوب موج، میزان دبی روگذری نیز افزایش می یابد. همچنین از مقایسه نتایج می توان دریافت که مقدار دبی روگذری به عرض حفره وابسته است و با افزایش این عرض به صورت کلی می توان گفت دبی روگذری روند کاهشی دارد.

مدل فیزیکی یک نوع جدید از موج‌شکن کیسونی که به اصطلاح LOWREB نامیده می‌شود در این مطالعه با مقیاس فرود ۱:۵۰ توسط (Ciocan et al., 2017) ساخته شد. مطالعه برای دو سطح آب و موج نامنظم در سه ارتفاع موج ۳، ۴ و ۵ متر و سه دوره تناوب ۱۰، ۱۴ و ۱۸ ثانیه صورت پذیرفت. سه مدل با تخلخل‌های مختلف و ترتیبات حفره‌های عمودی تحت شرایط هیدرودینامیکی یکسان مورد آزمایش قرار گرفتند تا بررسی شود که چگونه این موارد بر عملکرد LOWREB تأثیر می‌گذارند. در واقع یعنی این موضوع چگونه بر انعکاس موج از سازه در مقایسه با کیسون ساده تأثیر می‌گذارد. این مطالعه تجربی نشان می‌دهد که کیسون LOWREB به دلیل ظرفیت اتلاف انرژی موج آن، که مشخص شد سرریزهای داخلی نقش مهمی در آن بازی می‌کنند، مدل خوبی برای موج‌شکن است. در نهایت در این مطالعه نحوه‌ی چینش تیغه‌ها به صورت زیگزاگی و موازی بررسی شد که برای هر کدام از موارد سطح آب بالا و سطح آب پایین پیشنهاداتی مطرح شده است.

با انجام مطالعه‌ای آزمایشگاهی (Liu et al., 2018) آزمایش‌هایی را برای به دست آوردن روگذری موج از موج‌شکن کیسونی حفره‌دار انجام داده‌اند. با تغییر متغیرهای مختلف مانند نوع شکل حفره‌ها، R_c ، میزان تخلخل، عرض نسبی محفظه موج و عمق آب تأثیر آن‌ها در ویژگی‌های مختلف کیسون حفره‌دار دیده شده است. شکل حفره‌های در این مطالعه به صورت مستطیل‌های عمودی و افقی در وجه جلویی کیسون است. با انجام آزمایش‌های مختلف فرمول‌های ارائه شده برای محاسبه روگذری اعتبارسنجی شدند. روابط موجود برای نسبت ارتفاع آزاد به ارتفاع موج کوچکتر از $1/6$ کارایی مناسب دارد اما می‌بایست این روابط برای نسبت‌های بالاتر از $1/6$ برای این مدل‌ها اصلاح شود. در ادامه مقایسه حفره‌های عمودی و افقی مستطیل انجام شده است. مطابق نتایج گزارش شده عمودی یا افقی بودن مستطیل‌ها تأثیر زیادی بر میزان روگذری ندارد. متغیر دیگری که مورد سنجش قرار گرفته است عبارت است از درصد. مطابق نتایج ارائه شده با ایجاد تخلخل می‌توان نسبت دبی در موج‌شکن حفره‌دار به موج‌شکن عادی را کاهش داد که این به معنی کاهش میزان روگذری است. البته این نسبت برای عرض، دوره تناوب و نسبت ارتفاع آزاد به ارتفاع موج‌های مختلف، متفاوت است.

به منظور بهینه‌سازی موج‌شکن‌های کیسونی حفره‌دار (Liu et al., 2020) پس از صحت‌سنجی مدل‌سازی انجام شده با مطالعات آزمایشگاهی پیشین، هندسه‌ی کیسون را با توجه به ویژگی‌های مختلف تغییر داده‌اند. سپس خروجی‌های مختلفی با توجه به تغییر متغیرهای مختلف ارائه شده است. به عنوان مثال برای درصد تخلخل‌های مختلف ضرایب انعکاس، انرژی روگذری موج و اتلاف انرژی نمودارهای بر حسب تغییر دادن درصد تخلخل و R_c نسبت به پرپود موج به دست آمده است. سپس با تغییر درصد تخلخل و همچنین نسبت عرض محفظه به طول موج، تأثیر آن‌ها بر روی روگذری موج نشان داده شد. مطابق نتایج ارائه شده با افزایش نسبت عرض محفظه به طول موج داخل آن، نسبت روگذری به روگذری عرض مبنا هم کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که میزان کاهش روگذری بیشتر می‌شود. در ادامه‌ی نتایج تأثیر درصد تخلخل و نسبت عرض به طول موج‌های مختلف داخل محفظه در نسبت دبی روگذری به دبی مبنا گزارش شده است. مطابق نتایج پژوهش با افزایش نسبت عرض به طول موج‌های مختلف داخل محفظه، نسبت دبی روگذری به دبی مبنا کاهش می‌یابد. در ادامه تأثیر درصد تخلخل و نسبت عرض به طول موج‌های مختلف داخل محفظه در نسبت دبی روگذری به دبی مبنا گزارش شده است. مطابق نتایج پژوهش با افزایش نسبت عرض به طول موج‌های مختلف داخل محفظه، نسبت روگذری به دبی مبنا کاهش می‌یابد. امواج مورد استفاده در این مدل‌سازی امواج منظم بودند که می‌توان با تغییر آن‌ها به امواج نامنظم تحقیقات را توسعه داد.

در ادامه روند مطالعات بر روی موج‌شکن‌های کیسونی مرکب حفره‌دار (Zhoa et al., 2020) ضرایب بازتاب و نیروهای وارد بر موج‌شکن حفره‌دار مرکب را مورد بررسی قرار داده‌اند. شکل موج‌شکن مدل شده به صورتی است که در وجه جلویی کیسون آن محفظه‌ای خالی با عرض مشخص و وجه حفره‌دار قرار داد. با تغییر عرض محفظه نتایج ضریب انعکاس به نسبت عرض محفظه به طول موج در محفظه گزارش شده است. مطابق نتایج گزارش شده، به ازای طول موج‌های مختلف درون محفظه ضریب

انعکاس به صورت کاهش، افزایش و کاهش تغییر می‌کند. همچنین برای هر طول موج ترتیب متفاوتی از ارتفاع‌ها وجود دارد و نمی‌توان به صورت کلی در مورد بزرگ یا کوچک بودن ضریب انعکاس ارتفاع‌های مختلف اظهار نظر کرد. در ادامه نیروهای وارده به موج‌شکن نیز بررسی شدند. مطابق نتایج گزارش شده به ازای طول موج‌های مختلف درون محفظه نسبت نیروی کل وارد بر موج‌شکن کیسونی مرکب حفره‌دار به نیروی وارد بر موج‌شکن کیسونی مرکب سنتی به صورت کاهش، افزایش و کاهش تغییر می‌کند. همچنین برای هر طول موج ترتیب متفاوتی از ارتفاع‌ها وجود دارد.

کالیبراسیون مدل‌سازی‌های عددی که موج‌شکن‌های مرکب کیسونی حفره‌دار را شبیه‌سازی می‌کنند همواره چالش‌هایی را به همراه داشته است. یکی از مواردی هم پژوهش‌گران مختلف وقت زیادی را صرف آن می‌کنند تا مدلشان کالیبره شود، انتخاب ضرایب α و β در محیط‌های متخلخل است. با توجه به هزینه‌بر بودن محاسبات و محدودیت‌های موجود برای تغییر ضرایب، (Dang et al., 2023) با استفاده از الگوریتم GBTD توانستند رویکردی تازه برای کالیبراسیون مدل‌های عددی مربوط به موج‌شکن‌های کیسونی حفره‌دار ارائه دهند.

پژوهش بر روی هندسه‌های مختلف توسط پژوهش‌گران مختلف در سال‌های اخیر همچنان در حال پیگیری است. به عنوان نمونه (Ghassemi et al., 2023) در قسمت میانی کیسون مرکب فضایی را به وجود آوردند تا عملکردهای مختلف طراحی موج‌شکن کیسونی را بهبود بخشند. از جمله‌ی این عملکردها می‌توان به روگذری امواج، ضریب بازتاب، سرعت سیال بر روی بدنه‌ی موج‌شکن، مقدار فشار روی بدنه و فشار بالابرنده اشاره کرد. تغییرات ایجاد شده در هندسه عملکرد موج‌شکن‌ها را نسبت به موج‌شکن سنتی بهبود بخشیده است. به عنوان مثال در فشار بالابرنده کیسون‌های جدید با کاهش فشار ۴۰ و ۶۰ درصدی مواجه شدند. این روند کاهش در روگذری و ضریب بازتاب نیز به صورت قابل توجهی مشاهده شد. با توجه به نتایج ارائه شده در این پژوهش می‌توان گفت که هندسه‌های جدید نسبت به هندسه‌ی کیسون سنتی عملکرد مطلوب‌تر ارائه می‌دهند. در پژوهشی دیگر موج‌شکن کیسون حفره‌دار با دیوار ساحلی شکافدار (PCB-S) در شرایط موج منظم توسط (Sun et al., 2024) مورد بررسی قرار گرفت. این مدل‌سازی عددی به کمک حل معادلات دو بعدی ناپیر-استوکس با میانگین رینولدز با در نظر گرفتن آشفتگی به روش $k-\omega$ و استفاده از مدل VOF برای گرفتن سطح آزاد، صحت‌سنجی شده است. در این پژوهش تأثیر عوامل مختلف مانند تخلخل دیواره جلو، عرض محفظه موج نسبی، عمق غوطه ور شدن شکاف دیوار به سمت ساحل، و تخلخل دیوار ساحلی را بر روی ضریب بازتاب، دبی روگذری موج، و سرعت جریان خروجی بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که PCB-S تبادل آب بین داخل و پشت کیسون را بهبود بخشیده و به طور موثر ضریب انعکاس و دبی روگذری را کاهش می‌دهد. در نتیجه‌ی این پژوهش نسبت‌های بهینه برای طرح هندسی جدید معرفی شده است.

در مطالعه‌ای که توسط (Liu et al., 2023) صورت گرفته، به صورت تجربی و عددی برهم‌کنش‌های بین امواج منفرد و موج‌شکن‌های کیسونی حفره‌دار بررسی شده است. در این پژوهش با استفاده از روش حجم سیال و مدل $k-\epsilon$ ، همراه با معادله گاز ایده‌آل در دمای ثابت، تبدیل موج و تکامل گرداب در مجاورت موج‌شکن‌های کیسون حفره‌دار شبیه‌سازی شده است. تطابق قابل قبولی بین نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی مشاهده شد. مقایسه کیسون‌های بدون حفره و کیسون‌های حفره‌دار نشان می‌دهد که کیسون‌های حفره‌دار به طور موثر ارتفاع موج‌های بازتابی و ارسالی را کاهش دادند. بر اساس نتایج عددی، توزیع سرعت سیال و انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) در نزدیکی کیسون‌های حفره‌دار مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این تغییرات انعکاس موج، انتقال، ضرایب اتلاف، و حجم‌های روگذری موج در برابر ارتفاع‌های آزاد نسبی تاج، عرض محفظه موج نسبی، تخلخل‌های کیسون، و ارتفاع موج نسبی در زیر امواج منفرد مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با بررسی نتایج در این پژوهش هندسه‌ی مدل‌های بهینه معرفی شد. در پژوهشی دیگر که توسط (Lee et al., 2023) انجام شده است، تأثیر تعداد دیوارهای وجه جلویی کیسون حفره‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. در نتیجه آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش هنگامی که دو دیوار در وجه جلویی کیسون حفره‌دار قرار می‌گیرد، بهترین نتایج در مقایسه با یک دیوار و حالت بدون حفره حاصل می‌شود. به صورت خاص در حضور دو دیوار باعث پایداری بیشتر چینش آرمور در موج‌شکن‌های مرکب شده است. موج‌شکن ربع دایره‌ای

¹ Uplift

(QBW) را یک چهارم دیوار جلویی دایره‌ای رو به امواج فرودی، یک دیوار عقب عمودی و یک دال پایه افقی که بر روی پایه تپه قلوه سنگ قرار گرفته است، تشکیل می‌دهد. در این مطالعه که توسط (Mane et al., 2023) صورت گرفته، یک بررسی تجربی جامع به منظور بررسی ویژگی‌های غلبه بر موج یک موج شکن ربع دایره‌ای حفره‌دار و بدون حفره که در معرض امواج منظم قرار دارند، انجام شده است. در نتیجه‌ی این پژوهش، ایجاد حفره بر روی موج‌شکن دایره‌ای شکل باعث کاهش روگذری و انرژی وارده بر کیسون می‌شود.

۳- نتیجه‌گیری

موج‌شکن‌ها به منظور ایجاد حوضچه‌ی آرامش در بنادر مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اهمیت اقتصادی و حیاتی بنادر در جامعه‌ی امروزی، موج‌شکن نیز اهمیت خاصی پیدا می‌کند. هزینه‌بر بودن تامین مواد مورد نیاز و ساخت موج‌شکن‌ها نیز اهمیت مضاعفی را برای این موارد ایجاد می‌کند. با توجه به شرایط هر پروژه، موج‌شکن‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابر مجموعه‌ی این دلایل مطالعه بر روی انواع موج‌شکن موضوعی مهم به حساب می‌آید. در مقاله‌ی حاضر مروری بر دستاوردهای جدید پژوهشگران در خصوص موج‌شکن‌های مرکب کیسونی بدون حفره و حفره‌دار صورت گرفت. به عنوان نتیجه‌ای کلی می‌توان بیان کرد که ایجاد حفرات در وجه جلویی کیسون‌ها می‌تواند عملکرد هیدرولیکی موج‌شکن‌ها را نسبت به عملکرد موج‌شکن‌های کیسونی ساده بهبود بخشد. به این منظور پژوهش بر روی یافتن درصد بهینه‌ی تخلخل ناشی از حفرات و همچنین شکل این حفره‌ها در دستور کار پژوهشگران قرار گرفته است که برای آن‌ها پیشنهاداتی نیز ارائه شده است. همچنین تغییر در هندسه‌ی موج‌شکن‌های کیسونی ساده می‌تواند پاسخ هیدرولیکی این موج‌شکن‌ها را نیز بهبود بخشد. موارد زیر را می‌توان به منظور پیشنهاد برای مطالعات بیشتر ارائه کرد.

- پژوهش بر روی طرح‌های پیشنهادی برای امواج نامنظم که شرایط واقعی‌تری را فراهم می‌آورد صورت پذیرد. این موضوع می‌تواند دید مناسب‌تری در انتخاب طرح بهینه در اختیار طراحان قرار دهد.
- با توجه به آن که موج‌شکن‌ها در شرایط واقعی تحت امواج با زوایا قرار می‌گیرند، می‌بایست پژوهش‌های آتی را برای زوایای مختلف موج تکرار کرد تا از روند عملکرد موج‌شکن با این تغییر، ارزیابی مناسبی به دست آورد.
- استفاده از مبدل‌های انرژی در موج‌شکن با توجه به قرارگیری آن‌ها در محیطی که ورود امواج همیشگی است، می‌تواند منبعی برای انرژی‌های پاک باشد. پژوهش در این خصوص می‌تواند دید مناسبی جهت استفاده و یا عدم استفاده از آن‌ها را در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهد.

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

Amirabadi R ,Ghasemi A, (2018) “Numerical modeling investigation of irregular wave interaction with perforated caisson breakwater,” Journal Of Marine Engineering, vol. 14, no. 27, pp. 69–79, Persian.

Ciocan, C. S., Taveira-Pinto, F., das Neves, L., & Rosa-Santos, P. (2017). Experimental study of the hydraulic efficiency of a novel perforated-wall caisson concept, the LOWREB. Coastal Engineering, 126, 69-80. doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.06.001

Dang, B. L., Nguyen-Xuan, H., & Wahab, M. A. (2023). An effective approach for VARANS-VOF modelling interactions of wave and perforated breakwater using gradient boosting decision tree algorithm. Ocean Engineering, 268, 113398. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.113398

Di Lauro, E., Maza, M., Lara, J. L., Losada, I. J., Contestabile, P., & Vicinanza, D. (2020). Advantages of an innovative vertical breakwater with an overtopping wave energy converter. Coastal Engineering, 159, 103713. doi: 10.1016/j.coastaleng.2020.103713.

Ghasemi, A., Amirabadi, R., Kamalian, U. R., & Mazyak, A. R. (2023). Numerical modeling investigation of perforated geometry of caisson breakwater under irregular waves by considering porous media. Ocean Engineering, 269, 113558. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.113558

Ghasemizade M, Ketabdari J , (2014), "Investigation of the effect of the shape of the perforated breakwater holes on the energy dissipation of impinging waves using a numerical method",Darya Fanon scientific research journal, Persian.

Hieu, P. D., & Vinh, P. N. (2012). Numerical study of wave overtopping of a seawall supported by porous structures. Applied Mathematical Modelling, 36(6), 2803-2813. doi: 10.1016/j.apm.2011.09.065.

Jarlan, G. E. (1961). A perforated vertical wall breakwater. The Dock and Harbour Authority, (486), 394-398.

Lara, J. L., Losada, I. J., & Guanche, R. (2008). Wave interaction with low-mound breakwaters using a RANS model. Ocean engineering, 35(13), 1388-1400., doi: 10.1016/j.oceaneng.2008.05.006.

Lee, B. W., Baek, D., Ha, T., Lee, K. J., & Yoon, J. S. (2023). Experimental study on hydrodynamic performance of partially perforated-wall caisson breakwaters designed for the southeast coast of Korea. Journal of Coastal Research, 39(1), 167-174. doi: DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-22TM-00004.1

- Liu, X., Liu, Y., Lin, P., & Li, A. J. (2021). Numerical simulation of wave overtopping above perforated caisson breakwaters. *Coastal Engineering*, 163, 103795., doi: 10.1016/j.coastaleng.2020.103795.
- Liu, X., Liu, Y., Li, H., Wang, X., & Zhao, Y. (2018). Experimental study of mean overtopping discharge at perforated caissons for non-impulsive waves. *Science China Technological Sciences*, 61, 711-723. doi: 10.1007/s11431-017-9206-5.
- Liu, X., Liu, Y., Lin, P., & Wang, D. (2023). Experimental and numerical studies of solitary wave interaction with perforated caisson breakwaters. *Physics of Fluids*, 35(5). doi: 10.1063/5.0149420
- López, I., Rosa-Santos, P., Moreira, C., & Taveira-Pinto, F. (2018). RANS-VOF modelling of the hydraulic performance of the LOWREB caisson. *Coastal Engineering*, 140, 161-174. doi: 10.1016/j.coastaleng.2018.07.006
- Mane, V., Rao, S., & Hegde, A. V. (2023). WAVE OVERTOPPING CHARACTERISTICS OF NONPERFORATED AND SEASIDE PERFORATED EMERGED QUARTER-CIRCLE BREAKWATER. *Journal of Naval Architecture & Marine Engineering*, 20(1). doi: 10.3329/jname.v20i1.55046
- Misra, S., Narayanaswamy, M., Bayram, A., & Shi, F. (2011). Optimization of Caisson Breakwater Superstructure Geometry using a 2DV Rans-VOF Numerical Model. *Coastal Engineering Proceedings*, (32), 49-49. doi: 10.9753/icce.v32.structures.49
- Sun, H., Bai, J., Ding, W., Zhao, X., & Fan, Y. (2024). Numerical simulation on hydrodynamic performance of perforated caisson breakwater with slotted shoreward wall. *Ocean Engineering*, 299, 117294. doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.117294
- Suh, K. D., Park, J. K., & Park, W. S. (2006). Wave reflection from partially perforated-wall caisson breakwater. *Ocean Engineering*, 33(2), 264-280, doi: 10.1016/j.oceaneng.2004.11.015.
- Takahashi, S., Tanimoto, K., & Shimosako, K. (1994, January). Dynamic response and sliding of breakwater caissons against impulsive breaking wave forces. In *Proceedings of the International Workshop on Wave Barriers in Deepwaters* (pp. 362-401). Japan: Port and Harbour Research Institute.
- Takahashi, S., Kotake, Y., Fujiwara, R., & Isobe, M. (2003). Performance evaluation of perforated-wall caissons by VOF numerical simulations. In *Coastal Engineering 2002: Solving Coastal Conundrums* (pp. 1364-1376).
- Tofany, N., Ahmad, M. F., Mamat, M., & Mohd-Lokman, H. (2016). The effects of wave activity on overtopping and scouring on a vertical breakwater. *Ocean Engineering*, 116, 295-311, doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.03.007.

van Gent, M. R. (2021). Influence of oblique wave attack on wave overtopping at caisson breakwaters with sea and swell conditions. *Coastal Engineering*, 164, 103834., doi: 10.1016/j.coastaleng.2020.103834.

Yeganeh-Bakhtiary, A., Hajivalie, F., & Hashemi-Javan, A. (2010). Steady streaming and flow turbulence in front of vertical breakwater with wave overtopping. *Applied Ocean Research*, 32(1), 91-102., doi: 10.1016/j.apor.2010.03.002.

Zhao, P., Sun, D., & Wu, H. (2021). Influence of Wave-Absorbing Chamber Width on the Wave Attenuation Performance of Perforated Caisson Sitting on Rubble-Mound Foundation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1-14. doi: 10.1155/2021/8845331.