

Improving the Hydraulic Performance of a Composite Perforated Caisson Breakwater by Changing the Front Face Geometry

Omid Karbasi¹, Hassan Akbari^{2*} 

1. PhD student in Coastal, Ports and Marine Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Department of Coastal, Ports, and Marine Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

Breakwaters, as port protection structures, are of considerable importance in creating a calm basin and preventing damage to equipment and structures in the port. Depending on the water depth and project conditions, the use of various breakwaters is recommended, including the use of composite caisson breakwaters in deep waters. In these structures, a rubble mound under the caisson provides a reliable setting for the caisson, while the vertical caisson faces the waves directly. The hydraulic performance of composite caisson breakwaters can be improved by creating some holes in their front face to absorb and dissipate wave energy in an efficient way. In the present study, in addition to creating holes in the front face of the caisson, the geometry of this face has also been changed to find an optimum hydraulic performance of these structures. For this purpose, FLOW3D, a well-known numerical model, is employed and the model is at first validated by comparing the results with the measured results in the experimental study performed by Lara et al. (2008). The time series of the simulated surface elevation as well as the calculated pressure spectra show good compatibility with the measured data that confirms the ability of the utilized numerical model in well prediction of the hydraulic performance of composite caisson breakwaters. In total, five breakwater models with different geometries based on both the hole and the front face shapes were considered in this study by considering the limitations of construction activities. These cases were then subjected to seven different wave conditions. In addition, irregular waves with different wave heights and periods were simulated in the models, and the effects of water depth on the calculated overtopping rates were also investigated. To capture wave irregularities and random occurrence of high waves, the cumulative wave overtopping discharge in addition to the mean overtopping value was reported and investigated during the simulations. According to the results obtained from numerical modeling, making the two proposed changes altogether i.e. using holes besides the face modification simultaneously improves the performance of the caisson more than when one of these is applied. Based on the calculated overtopping rate, reflection coefficient and applied wave pressures on the caisson, it can be concluded that the proposed modifications can significantly improves the hydraulic performance of these structures. Among the studied geometries, the best performance was finally obtained for the new proposed caisson with trapezoidal teeth and holes on its front face. Once the holes dissipate wave energy through penetrating to the porous breakwater, the toothed shape improves the wave reflection through phase lags. Based on the results, the optimal model can reduce the cumulative overtopping by 50% to 70%, the maximum overtopping by 20% to 70%, the reflection coefficient by 17%, and the average maximum pressure in the three pressure gauges investigated by 15.5, 6.9, and 0.8% compared to the simple vertical caisson without any hole. Since the investigated models are compatible with the construction limitations, (providing the required weights for satisfying the sliding and overturning stability of caisson breakwaters), the outcomes of this study can efficiently help coastal engineers to design structures satisfying the required hydraulic performance with an optimum cost.

Review History

Received: Aug 19, 2025

Revised: Nov 23, 2025

Accepted: Dec 10, 2025

Keywords

Composite Caisson
Breakwater
Hydraulic Response
Overtopping
Irregular Wave
Reflection Coefficient
FLOW-3D

* Corresponding Author Email: akbari.h@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0002-9881-8710



Copyright © 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بهبود عملکرد هیدرولیکی موج شکن کیسونی مرکب حفره دار با تغییر هندسه وجه پیشانی

امید کرباسی^۱، حسن اکبری^{۲*} 

۱. دانشجوی دکتری مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. دانشیار گروه مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

موج‌شکن‌ها به عنوان سازه‌های محافظت از بنادر، اهمیت قابل توجهی در ایجاد حوضچه آرامش دارند و مانع از آسیب رسیدن به تجهیزات و سازه‌های موجود در بندر می‌شوند. با توجه به عمق آب و شرایط پروژه، استفاده از موج‌شکن‌های مختلفی توصیه می‌شود که از جمله آن‌ها به استفاده از موج‌شکن کیسونی مرکب در آب‌های عمیق می‌توان اشاره کرد. عملکرد هیدرولیکی موج‌شکن‌های کیسونی را می‌توان با ایجاد حفره در وجه جلویی آن‌ها بهبود داد. در پژوهش حاضر علاوه بر ایجاد حفره در وجه جلویی، هندسه این وجه با ایجاد دندانه‌های دوزنقه‌ای شکل عمودی تغییر داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از مدلسازی‌های عددی، ایجاد این دو تغییر به صورت هم‌زمان عملکرد کیسون را بیشتر از زمانی که یکی از این موارد اعمال شود، بهبود می‌بخشد. در مدلسازی از موج نامنظم استفاده شده است. در مجموع، پنج مدل موج‌شکن با استفاده از ایجاد حفره و تغییر هندسه وجه جلویی با در نظر گرفتن ملاحظات اجرایی، تعریف و تحت هفت شرایط موجی مورد بررسی قرار گرفتند که در نهایت موج‌شکن کیسونی حفره دار با دندانه‌های دوزنقه‌شکل در وجه جلویی آن، به عنوان مدل بهینه معرفی شد. این مدل روگذری تجمعی را نسبت به مدل ساده از ۵۰ تا ۷۰ درصد، بیشینه روگذری را از ۲۰ تا ۷۰ درصد، ضریب انعکاس را ۱۷ درصد و میانگین بیشینه فشار در ۳ فشارسنج بررسی شده را ۱۵،۵، ۶،۹ و ۰،۸ درصد کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی

موج‌شکن کیسونی مرکب

پاسخ هیدرولیکی

روگذری

موج نامنظم

ضریب انعکاس

FLOW-3D

۱- مقدمه

بر پژوهش‌های صورت گرفته روی کیسون‌های بدون حفره انجام شود. میسرا و همکاران با اضافه کردن تاج (فراسازه) روی قسمت جلویی کیسون عملکرد هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند [2]. مدل‌های ساخته شده با لحاظ کردن ارتفاع یکسان برای موج‌شکن با فراسازه و بدون فراسازه ایجاد شده‌اند. نتایج به دست آمده از روگذری و نیروی وارده نشان داد که روگذری تجمعی و نیروی وارد شده برای کیسونی ساده‌ای که در یک تراز ارتفاعی با کیسون با فراسازه قرار دارد، مقادیر کمتری را ارائه کرده است. توفانی و همکاران با بررسی تغییرات R_c تغییرات روگذری و جریان از

بررسی پاسخ هیدرولیکی موج‌شکن‌های کیسونی به عنوان متغیری تاثیرگذار در طراحی این نوع موج‌شکن‌ها، موضوعی مهم برای پژوهش‌گران به شمار می‌رود. برای اولین بار جارلان ایده استفاده از کیسون‌های حفره‌دار را مطرح کرد [1]. در مدل پیشنهادی جارلان، با ایجاد حفره در دیوار جلویی یک کیسون قائم، متغیرهایی چون ضریب انعکاس امواج و روگذری نسبت به کیسون ساده با کاهش همراه شد. این نتیجه باعث شد تا در سالیان بعد از آن، پژوهش‌های مختلفی درباره کیسون‌های حفره‌دار علاوه

* رایانامه نویسنده مسئول: akbari.h@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0002-9881-8710

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



موج شکن کیسونی ساده را گزارش کرده‌اند [3]. هیو و وینه با قرار دادن ساختارهای متخلخل در برابر دیوار عمودی درصدهای بهینه برای عملکرد مطلوب این ساختارها را ارائه کردند [4]. لویز و همکاران با بررسی عملکرد موج شکن‌های LOWREB به این نتیجه رسیدند که مقادیر ضریب انعکاس امواج از ۷۰ تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابند [5]. دی‌لائورو و همکاران ساختار بهبودیافته‌ای ارائه کردند که در آن علاوه بر امکان استفاده از مبدل‌های انرژی، روگذری و ضریب انعکاس کاهش یافته است [6]. همچنین موج شکن کیسونی پیشنهادی از کیسون‌های ساده پایدارتر است. فن‌خنت (۲۰۲۱) در پژوهش خود زاویه امواج برخوردی در بدنه و پیشانی موج شکن کیسونی را مورد بررسی قرار داده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دبی عبوری از پیشانی موج شکن بیش از دبی عبوری از بدنه‌ی موج شکن می‌باشد [7].

سوه و پارک با استفاده از امواج نامنظم به بررسی عملکرد موج شکن کیسونی حفره‌دار پرداختند [8]. ایشان با تغییر عرض محفظه جلویی این نوع کیسون روند تغییرات ضریب انعکاس را گزارش کرده‌اند که این تغییرات به صورت کاهشی و افزایشی است. قاسمی‌زاده و کتابداری در پژوهش خود به بررسی اثر شکل حفرات در پاسخ هیدرولیکی موج شکن‌های کیسونی حفره‌دار پرداخته‌اند [9]. در این پژوهش چهار نوع حفره دایره‌ای، مربعی، مستطیلی عمودی و افقی مورد بررسی گرفته است. همچنین مدل‌های این پژوهش با چهار درصد تخلخل ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ساخته شده‌اند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده‌ی این موضوع هستند که در هر درصد تخلخل، نوع خاصی از حفرات عملکرد مطلوب را ارائه می‌کنند. امیرآبادی و قاسمی در پژوهش خود با ایجاد تغییرات در هندسه موج شکن‌های کیسونی متغیرهایی مختلف مانند میدان سرعت ذرات و روگذری موج را مورد بررسی قرار دادند [10]. مطابق نتایج گزارش شده با افزایش ارتفاع و دوره تناوب موج، دبی روگذری نیز افزایش می‌یابد. همچنین از مقایسه نتایج می‌توان دریافت که مقدار دبی روگذری به عرض حفره وابسته است و با افزایش این عرض به صورت کلی می‌توان گفت دبی روگذری روند کاهشی دارد. کیوکان و همکاران با مطالعه در خصوص موج شکن‌های کیسونی LOWREB نشان دادند که سرریزهای داخلی این موج شکن و همچنین نوع چینش تیغه‌ها در عملکرد آن‌ها نقش مهمی دارند [11]. لیو و همکاران با انجام

مطالعه‌ای آزمایشگاهی برای موج شکن‌های کیسونی حفره‌دار تاثیر متغیرهای مختلفی مانند شکل حفره‌ها، میزان تخلخل، R_c ، عرض نسبی محفظه موج و عمق آب را مورد بررسی قرار دادند [12]. لیو و همکاران برای درصد تخلخل‌های مختلف ضرایب انعکاس، روگذری موج، انرژی روگذری موج و اتلاف انرژی را مورد بررسی قرار دادند [13]. ژوآ، سون و ووه با تغییر عرض محفظه‌ی جلویی موج شکن‌های کیسونی حفره‌دار ضرایب انعکاس و نیروی وارده به کیسون‌ها را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند [14].

قاسمی و همکاران با ایجاد فضای خالی در مرکز موج شکن کیسونی متغیرهای مختلف را اندازه‌گیری کرده و آن‌ها را با موج شکن‌های کیسونی ساده مقایسه کردند [15]. این تغییر باعث بهبود عملکرد موج شکن‌ها در مواردی مانند روگذری امواج، ضریب بازتاب، سرعت سیال روی بدنه موج شکن، مقدار فشار روی بدنه و فشار بالابرنده شده است. به عنوان نمونه برای دو مدل ساخته شده فشار بالابرنده کیسون‌ها ۴۰ و ۶۰ درصد کاهش یافته است. لیو و همکاران در پژوهش خود برهم‌کنش میان امواج منفرد و موج شکن‌های کیسونی حفره‌دار را مورد بررسی قرار داده و مدل بهینه‌ای ارائه کرده‌اند [16]. لی و همکاران در پژوهش خود تاثیر تعداد دیوارهای وجه جلویی کیسون‌های حفره‌دار را مورد بررسی قرار دادند [17]. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که هنگامی که دو دیوار در برابر کیسون قرار گیرد، بهترین عملکرد حاصل می‌شود. همچنین حضور دو دیوار باعث پایداری بیشتر در چینش آرمورهای موج شکن مرکب می‌شود. مانه، رائو و هگده در پژوهش خود با ایجاد حفره بر یک موج شکن ربع دایره‌ای دریافتند که وجود حفره در این موج شکن‌ها باعث کاهش روگذری و نیروی وارد شده بر آن می‌شود [18].

پژوهش‌های پیشین در زمینه موج شکن‌های کیسونی نشان می‌دهد که اصلاح ساختار این سازه‌ها با هدف بهبود عملکرد هیدرولیکی، محور اصلی مطالعات بوده است. از ایده‌ی اولیه جارلان در ایجاد حفره در دیواره جلویی تا مدل‌های پیشرفته با تاج، دیوارهای مضاعف و ساختارهای متخلخل، همگی منجر به کاهش ضریب انعکاس، روگذری و نیروهای وارد شده‌اند. تاثیر متغیرهایی مانند شکل و عرض حفره، درصد تخلخل، ارتفاع موج، و زاویه برخورد امواج بررسی شده و نشان داده شده است که طراحی‌های بهینه می‌توانند پایداری و کارایی موج شکن‌های

نیز برقرار است.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \quad (2)$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x$$

در معادله ۲ متغیر G_x شتاب کالبدی، P فشار و f_x شتاب ناشی از لزجت هستند. با توجه به مدل سازی محیط متخلخل در محدوده سنگی موج شکن مرکب، مقاومت ناشی از حضور این محیط در معادله اندازه حرکت به صورت تابعی از سرعت سیال و مشخصات محیط متخلخل وارد می شود. همچنین در این نرم افزار از روش های تکراری برای حل معادلات ضمنی سرعت-فشار استفاده می شود.

در پژوهش حاضر از موج نامنظم به عنوان موج ورودی استفاده شده است. یک موج نامنظم به عنوان برهم نهی از تعدادی موج خطی با دامنه ها، تناوب ها و فازهای اولیه مختلف است. در نرم افزار FLOW-3D طیف انرژی موج برای معرفی موج استفاده می شود. در این پژوهش از طیف جانسون آپ برای فایل ورودی طیف انرژی و از مدل دو معادله ای نرمال شده (RNG) با توجه به عملکرد مناسب آن استفاده شده است.

۳- درستی آزمایشی

به منظور اطمینان از درستی نتایج مدل سازی عددی به درستی آزمایشی آن با یک پژوهش آزمایشگاهی پرداخته می شود. به این منظور، مطالعه آزمایشگاهی شبیه سازی برهم کنش امواج و موج شکن های توده سنگی کم ارتفاع با استفاده از مدل RANS که توسط لارا، لوسادا و گوانچه (۲۰۰۸) انجام شده است، انتخاب شد [19]. از نتایج روگذری، تراز سطح آب و مقدار فشار در فشارسنج های مختلف برای درستی آزمایشی مدل عددی استفاده شده است. همچنین در این بخش حساسیت سنجی مربوط به شبکه بندی نیز انجام می شود تا در مدل سازی از تنظیمات بهینه استفاده شود.

۳-۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی

فلوم مورد استفاده در مطالعه آزمایشگاهی به طول ۶۰/۵ متر، عرض ۲ متر و ارتفاع ۲ متر است. ابعاد مدل استفاده شده در شکل (۱) آورده شده است. مصالح استفاده شده در بستر سنگریزه بوده که درصد تخلخل و قطر متوسط آن ها در جدول (۱) نشان داده شده است.

کیسونی را به طرز قابل توجهی افزایش دهند. تحقیق حاضر به صورت خاص به تغییر در هندسه ی وجه جلویی کیسون به همراه ایجاد حفره بر روی این وجه می پردازد و تاثیر این مورد را در عملکرد موج شکن ها مورد مطالعه قرار می دهد.

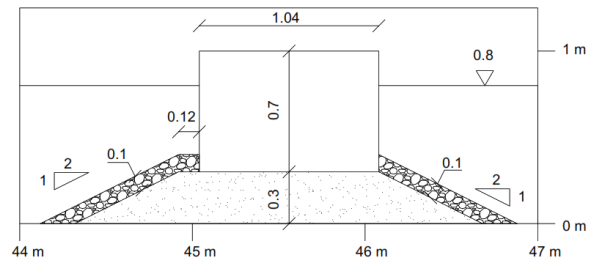
۲- مشخصات مدل سازی عددی

مدلسازی عددی با رفع محدودیت های مطالعات آزمایشگاهی، امکان ایجاد نمونه های متعدد را برای پژوهش گران فراهم آورده است. در حل ریاضی میدان جریان، دو روش حل تحلیلی و عددی می تواند مورد استفاده قرار گیرد. گام هایی که برای حل عددی میدان جریان باید طی شود عبارت است از انفصال میدان، گسسته سازی معادلات حاکم و تبدیل به معادلات جبری و در نهایت حل معادلات جبری در نقاط خاص. حل عددی میدان جریان امکان شبیه سازی مدل های مختلف را فراهم می کند. این روش نسبت به مطالعات آزمایشگاهی هزینه مالی و صرف زمان کمتری را نیاز دارد. همچنین می توان با این روش مدل هایی را مورد آزمایش قرار داد که در ساخت آن ها در آزمایشگاه چالش های فراوانی دارد. در این پژوهش از نرم افزار Flow-3D به عنوان نرم افزاری قدرتمند در زمینه مدل سازی جریان سیالات استفاده شده است. در پژوهش حاضر از دستگاه مختصات دکارتی استفاده شده است. معادلات حاکم بر جریان سیال از قوانین بقای جرم (پیوستگی) و حرکت (تکانه) به دست آمده و به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی هستند. معادلات اصلی برای مدل سازی جریان سه بعدی، چهار معادله دیفرانسیل شامل روابط پیوستگی و اندازه حرکت در جهات x ، y و z هستند. معادلات حاکم بر سیال لزج در حالت آشفته توسط معادلات ناویر-استوکس متوسط شده زمانی رینولدز بیان می شوند. معادله عمومی بقای جرم در نرم افزار به صورت زیر است.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

در معادله ۱ متغیر V_F کسر حجمی فضای باز به جریان و ρ چگالی سیال است. u ، v و w سرعت در راستای x ، y و z است. معادلات اندازه حرکت در سه جهت مختصات مورد استفاده قرار می گیرند که در ادامه معادله مورد استفاده در جهت x ، به عنوان نمونه ارائه می شود. این معادله با ساختاری مشابه در سایر جهت ها

مشخصات آزمایشگاهی استفاده شده است. تعریف شرایط مرزی، اولین گام مهم در تنظیمات مدل عددی است. در تعریف شرایط مرزی، مرحله‌ی اول تعریف مدل در نرم‌افزار است. به منظور اعمال شرایط مرزی باید با شناخت ویژگی‌های هر مرز در مطالعه آزمایشگاهی و نرم‌افزار، مرز مناسب انتخاب شود. به این منظور مرز ابتدایی در راستای X که در مطالعه آزمایشگاهی موج از آن تولید می‌شود، شرط مرزی موج و مرز انتهایی به علت ثابت بودن فشار از نوع شرط مرزی فشار خاص تعریف شده است. به منظور تعریف شرط مرزی موج یک فایل ورودی اکسل با پسوند CSV، تهیه شد. به منظور ساخت فایل اکسل از طیف موج جانسوآپ با استفاده از مشخصه‌های موج مورد نظر استفاده شده است. در راستای Y یکی از مرزها با توجه به این که در مطالعه آزمایشگاهی دیوار قرار دارد، از شرط مرزی دیوار استفاده شده است. در راستای دیگر به منظور استفاده بهینه از حافظه‌ی رایانه و همچنین مقارن بودن هندسه از مرز مقارن استفاده شده است و عرض فلوم از ۲ به ۱ متر کاهش داده شده است. در راستای Z نیز مرز بستر از شرط مرزی دیوار و در مرز بالایی فلوم، با توجه به این مورد که ابعاد شبکه به صورتی انتخاب شده است که پاسخ‌گوی تغییرات تراز سطح آب باشد و آب موجود در هیچ شرایطی به انتهای شبکه مشخص شده نزدیک نشود، از شرط مرزی مقارن استفاده شده است. تمامی شروط مرزی مش داخلی نیز باید شرط مرزی مقارن باشد. ابعاد حوزه مورد بررسی یک فلوم به طول ۶۰ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۲ متر است. مدت زمان انجام آزمایش مشابه با آزمایش لارا و همکاران، ۲۰۰ ثانیه است. ضریب تخلخل لایه‌های هسته و فیلتر مطابق با موارد گزارش شده در مطالعه‌ی لارا و همکاران که در جدول شماره (۱) گزارش شده است مقدار ۰٫۵ برای لایه فیلتر و مقدار ۰٫۴۸ برای لایه هسته قرار داده شده است. همچنین مطابق با پیشنهاد ارائه شده در بخش تنظیمات مدل عددی و کالیبراسیون مطالعه ایشان از مقادیر $\alpha = 200$ و $\beta = 0.8$ برای لایه هسته و مقادیر $\alpha = 200$ و $\beta = 1.1$ برای لایه فیلتر استفاده شده است. به منظور جلوگیری از بازتاب‌های مصنوعی و ورود مجدد امواج بازتاب شده به ناحیه به بخش فعال دامنه موج، یک لایه اسفنجی به عنوان جاذب موج در ناحیه‌ای که موج از آن به سمت موج‌شکن تابیده می‌شود، تعریف شده است.



شکل ۱. مشخصات مدل - لارا، لوسادا و گوانچه (۲۰۰۸)

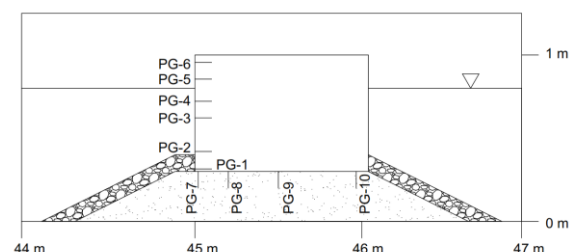
Fig. 1. Model specifications -- Lara, Losada and Guanche (2008)

جدول ۱. مشخصات سنگدانه‌های مورد استفاده

Table 1. Properties of the used materials

value	Parameter
3.5	D_{n50} of filter layer (cm)
0.5	Porosity of filter layer
0.035	D_{n50} of core layer (cm)
0.48	Porosity of core layer

به منظور ثبت مقادیر فشار و تراز سطح آب در این مدل آزمایشگاهی به ترتیب ۱۰ فشارسنج و ۱۳ ترازسنج سطح آب قرار داده شده است. قرارگیری فشارسنج‌ها به گونه‌ای است که بخش زیرین کیسون، بخشی که در مجاورت دائمی با آب قرار دارد و بخشی که در صورت تغییر سطح آب تغییر فشار خواهد داشت، مورد سنجش قرار گیرند. در خصوص قرارگیری ترازسنج‌ها نیز سعی بر آن بوده است که در اطراف کیسون که تغییرات بیشتر است، تعداد بیشتری ترازسنج برای ثبت دقیق‌تر اطلاعات قرار داده شده و در قسمت‌های دورتر از کیسون با پراکندگی بیشتری ترازسنج‌ها نصب شده‌اند. چگونگی قرارگیری فشارسنج‌ها در شکل (۲) نشان داده می‌شود.



شکل ۲. محل قرارگیری فشارسنج‌ها - لارا، لوسادا و گوانچه (۲۰۰۸)

Fig. 2. Location of pressure gauges -- Lara, Losada and Guanche (2008)

۲-۳- تنظیمات مدل عددی

به منظور مدل‌سازی عددی از ابعاد تعریف شده در

جدول ۲. ابعاد شبکه بندی های مورد استفاده

Table 2. Dimensions of the utilized mesh

Mesh No.	Dimensions of the main mesh (cm)	Dimensions of the secondary mesh (cm)	No. of the Cells
1	8	4	300'000
2	6	3	650'000
3	5	2.5	1'176000

جدول ۳. مقادیر تجمعی روگذری برای سه شبکه بندی مختلف

Table 3. Cumulative overtopping for three different meshes

model	Cumulative overtopping (m3/s/m)
Experimental	0.260
Mesh 1	0.371
Mesh 2	0.242
Mesh 3	0.285

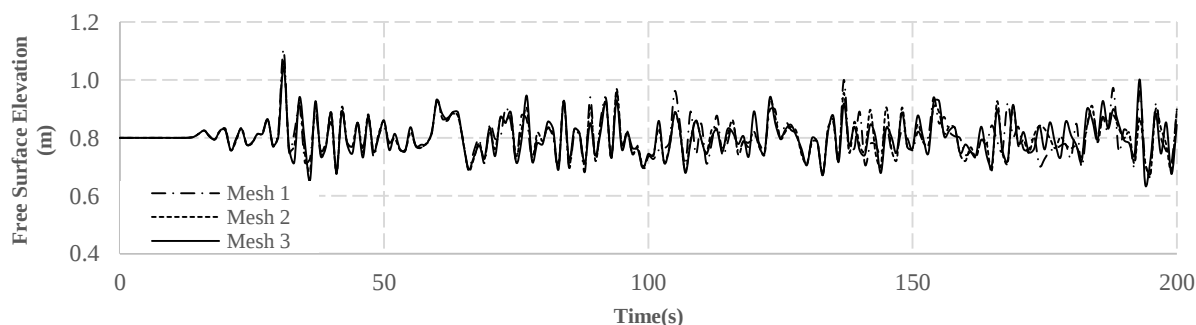
روگذری یکی از مهم ترین پاسخ های هیدرولیکی موج شکن است که برای مقایسه عملکرد آن ها می تواند مورد استفاده قرار بگیرد. با این حساب اگر نتایج روگذری یک مدل عددی مطابقت قابل قبولی با نتایج مدل آزمایشگاهی داشته باشد، آن مدل عددی می تواند مورد اطمینان واقع شود. به منظور مقایسه نتایج مدل سازی با نتایج مطالعه ای لارا و همکاران از موج نمونه با ارتفاع مشخصه ۰٫۱۸ متر، دوره تناوب ۵ ثانیه و تراز اولیه سطح آب ۰٫۸ متر استفاده است. در بررسی نتایج، اختلاف شبکه بندی شماره ۱ با مطالعه آزمایشگاهی قابل توجه بود اما نتایج مربوط به شبکه بندی ۲ خطای مقدار تجمعی روگذری حدود ۶٫۹ درصدی و شبکه بندی ۳ با خطای ۹٫۶ درصدی را به نمایش گذاشتند. همین طور با مشاهده روند تغییرات از شبکه بندی ۳ به ۲ و ۱ می توان مشاهده کرد که خطای روگذری تجمعی در حال کاهش است که این موضوع نشانه ای از روند همگرایی مدل است. با توجه به این که تعداد سلول های شبکه ۳ حدود دو برابر شبکه ۲ است، به منظور استفاده بهینه از حافظه و صرفه جویی در مدت زمان تحلیل، شبکه ۲ به عنوان شبکه بهینه انتخاب شد. همچنین می توان به این نکته اشاره نمود که کفایت شبکه انتخاب شده برای مدل سازی کیسون حفره دار مورد مطالعه، پیش تر در مطالعه قاسمی و همکاران (۲۰۲۳) نیز تایید شده بود [15]. نتایج روگذری تجمعی برای سه شبکه بندی معرفی شده و نتایج مطالعه آزمایشگاهی در ادامه در جدول شماره (۳) نشان داده می شود.

با توجه به نامنظم بودن موج، تاریخچه های زمانی مختلفی با یک شرایط ثابت ارتفاع مشخصه و دوره تناوب بیشینه، قابل بازتولید است. در مقایسه نتایج، از شرایط تجمعی روگذری و همچنین مشخصات طیفی برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شده است. اگرچه تاریخچه زمانی روگذری های اتفاق افتاده با توجه به تصادفی بودن موج، می تواند متفاوت باشد، برای تحلیل دقیق تر نتایج، تعداد امواج موثر، تعداد امواجی که منجر به روگذری شده اند، از مدل صحت سنجی استخراج شد. بر اساس این نتایج، در زمان ۲۰۰ ثانیه، تعداد ۱۶ موج منجر به روگذری شده اند. با این حال با توجه به نامنظم و تصادفی بودن امواج، میانگین زمانی روگذری تجمعی به دست آمده در انتهای طوفان می تواند معیار مناسبی را برای کاربردهای مهندسی ارائه دهد. تراز سطح آب یکی دیگر از مواردی است که می تواند دقت مدل سازی را مشخص

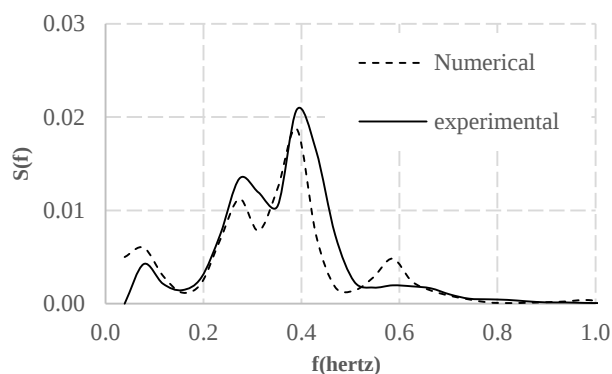
از مهم ترین موارد مطرح در بحث حساسیت سنجی محاسبات به روش اویلری، تعیین ابعاد شبکه بندی مدل است. هر چه شبکه بندی مورد استفاده ابعاد درشت تری داشته باشد، گرادیان تغییرات افزایش یافته و دقت نتایج کاهش می یابد. با ریزتر کردن ابعاد سلول های شبکه، دقت نتایج افزایش یافته اما مدت زمان تحلیل و حافظه مورد نیاز هم افزایش می یابند. به منظور یافتن شبکه بندی بهینه نیاز است تا متغیرهای مختلفی را در شبکه بندی های مختلف با هم مقایسه کرد و با توجه به دقت جواب، زمان محاسبات و حجم حافظه استفاده شده در این خصوص تصمیم گرفت. به این منظور دو متغیر روگذری و تراز سطح آب برای مقایسه شبکه بندی ها در نظر گرفته شد. به منظور بررسی حساسیت نسبت به شبکه بندی علاوه بر تعیین متغیر مورد بررسی نیاز است تا شبکه بندی های مختلفی نیز تعریف شود تا مقایسه میان آن ها صورت گیرد. در این پژوهش به منظور افزایش دقت محاسبات در محدوده موج شکن از شبکه بندی متداخل استفاده شده است. با توجه به اهمیت هندسه کیسون و ناحیه اطراف آن در استخراج نتایج، شبکه فرعی به گونه ای تعریف شده است که هندسه کیسون را به صورت کامل پوشش دهد. برای تعیین ابعاد سلول های شبکه بندی، محدودیت نسبت ۱ به ۲ میان شبکه اصلی و شبکه فرعی وجود دارد. به عنوان نمونه اگر شبکه محلی یا فرعی اندازه ۴ سانتی متری داشته باشد، ابعاد شبکه ی سراسری یا اصلی نمی تواند از ۸ سانتی متر بیش تر باشد. با این توضیح سه شبکه بندی با ابعاد ذکر شده در جدول (۲) انتخاب شده است.

روگذری تجمعی در قالب نمودار نشان داده خواهد شد. با توجه به تطابق قابل قبول دو نمودار و نتیجه نهایی آن‌ها، می‌توان مدل‌سازی عددی را در این مورد قابل قبول خواند. در شکل شماره (۵) طیف تراز سطح آب در یکی از ترازسنج‌های موجود، واقع در فاصله‌ی ۴۱ متری از ابتدای فلوم و در فاصله ۴ متری از وجه جلویی کیسون، با نتایج مطالعه آزمایشگاهی در قالب نمودار مقایسه می‌شود. همان‌طور که در شکل (۵) قابل مشاهده است نتایج سطح تراز آب به صورت قابل قبولی منطبق بر نتایج آزمایشگاهی است. در نهایت نیز مقادیر طیف فشار در دو فشارسنج در قالب نمودار با همدیگر مقایسه خواهد شد. مختصات (x, z) فشارسنج شماره ۱ و فشارسنج شماره ۴ به ترتیب $(۰, ۳۱۵)$ و $(۰, ۷۲۲)$ است.

همان‌طور که در شکل‌های (۶ و ۷) قابل مشاهده است نتایج فشارسنج‌های مدل‌سازی عددی به صورت قابل قبولی منطبق بر نتایج آزمایشگاهی است. در ادامه مقایسه میان متغیرهای مورد بحث در قالب جدول شماره (۴) ارائه شده است.



شکل ۳. مقایسه تراز سطح آب در ایستگاه WG6
Fig. 3. Comparison of water level at station WG6



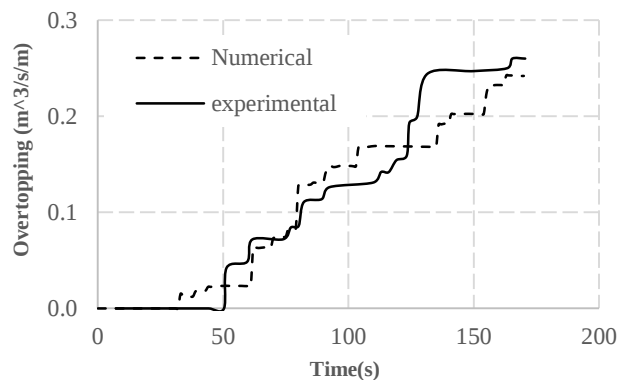
شکل ۵. مقایسه نمودار طیفی سطح تراز آب در ترازسنج ۶ (WG6)
Fig. 5. Comparison of spectral diagrams of water level in WG6

نماید. به این منظور در یک ترازسنج در ناحیه نزدیک به کیسون، واقع در فاصله‌ی ۴۱ متری از ابتدای فلوم و در فاصله‌ی ۴ متری از وجه جلویی کیسون، ترازهای سطح آب به دست آمده با یکدیگر مقایسه شدند. همان‌طور که در نمودار موجود در شکل (۳) مشخص است نتایج تراز سطح آب هر سه شبکه‌بندی نزدیک به همدیگر هستند. در این بین تراز سطح آب شبکه‌های ۲ و ۳ تطابق بیشتری با نتایج مدل آزمایشگاهی دارند.

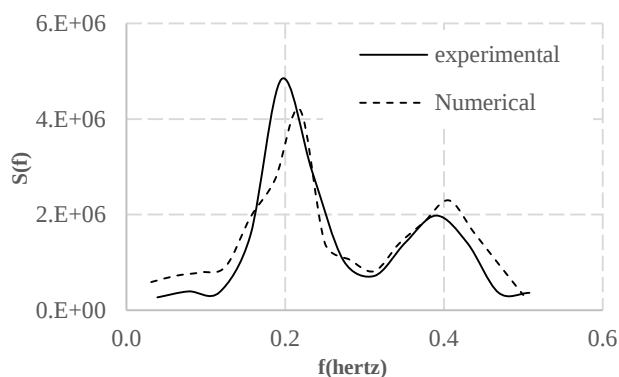
در نهایت با توجه به مقایسه نتایج تراز سطح آب و روگذری تجمعی و همچنین با توجه به زمان تحلیل و حجم مورد نیاز حافظه، شبکه‌بندی شماره‌ی ۲ به عنوان شبکه‌بندی مناسب و بهینه برای ادامه‌ی مدل‌سازی در بخش بعدی انتخاب شد.

۳-۳- درستی آزمایشی نتایج مدل عددی

با توجه به تکمیل مراحل مدل‌سازی و انتخاب شبکه‌بندی مناسب در ادامه می‌توان نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و مطالعه آزمایشگاهی را با همدیگر مطابقت داد تا از درستی نتایج مدل‌سازی اطمینان حاصل کرد. شکل شماره (۴) نتایج مربوط به

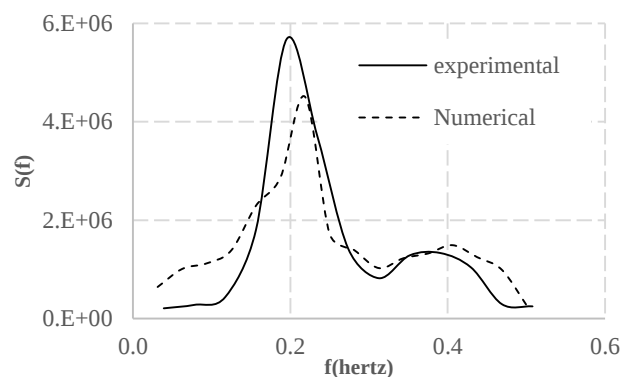


شکل ۴. روگذری تجمعی مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی
Fig. 4. Cumulative overtopping for numerical model and laboratory study



شکل ۷. مقایسه نتایج فشارسنج ۴ (PG4)

Fig. 7. Comparison of results of PG4



شکل ۶. مقایسه نتایج فشارسنج ۱ (PG1)

Fig. 6. Comparison of results of PG1

۴- تحلیل و بررسی

وجه رو به موج در موج شکن های کیسونی اهمیت قابل توجهی در پاسخ هیدرولیکی آنها دارد. به منظور بهبود عملکرد هیدرولیکی این نوع موج شکن ها می توان هندسه وجه جلویی آنها را تغییر داد. از جمله این تغییرها می توان به ایجاد حفره اشاره کرد. در این پژوهش به منظور ایجاد هندسه بهینه، از تغییر شکل این وجه، ایجاد حفره بر روی آن و یا ترکیب این دو مورد استفاده شده است. در ادامه شکل و نام گذاری هر یک از این مدل ها آورده خواهد شد.

قسمت الف شکل ۸ موج شکن کیسونی ساده است که در بخش پیشین، صحت سنجی مدل سازی عددی به وسیله مطالعات صورت گرفته با استفاده از این مدل صورت پذیرفت. در قسمت ب حفره های ۱۰*۱۰ سانتی متری مربع شکل به فاصله عمودی و افقی ۱۰ سانتی متر بر روی این مدل ایجاد شده است. قسمت پ، ت و ث مربوط به کیسونی با دندان های دوزنقه ای شکل عمودی است که بر روی تمام صفحه ها، صفحه های جلویی و صفحه های عقبی آن حفره های مربع شکل ۱۰*۱۰ سانتی متری ایجاد شده است. در ادامه در شکل (۹) ابعاد حفره ها در شکل (پ) به عنوان نمونه نمایش داده می شود.

شرایط موجی نیز به شرح جدول ۵ برای نرم افزار تعریف شده اند.

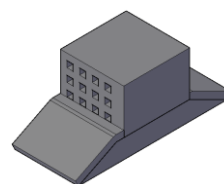
به منظور بررسی عملکرد موج شکن ها در مقابل موج های مختلف با ثابت بودن دوره تناوب موج و تراز اولیه سطح آب، سه ارتفاع موج مختلف تعریف شده است. همین روند در خصوص دوره تناوب نیز تکرار شده

جدول ۴. مقایسه متغیرهای مدل آزمایشگاهی و عددی برای شاخص های

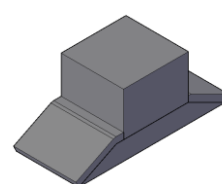
روگذری موج، تراز سطح آب و فشار

Table 4. Comparison of experimental and numerical model variables for wave overtopping indices, water level, and pressure

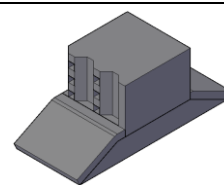
Feature	Experimental	Numerical	Error %
Overtopping	0.260	0.242	6.94
Hm0 (WG6)	0.00435	0.00426	-2.01
Tp (Wg6)	2.84	2.63	-7.62
Pm0 (PG-1)	716090	752461	5.07
Tp (PG-1)	5.12	4.57	-10.71
Pm0 (PG-4)	674983	723926	7.25
Tp (PG-4)	5.12	4.61	-9.9



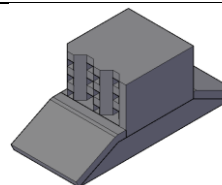
FHAF (ب)



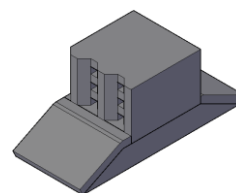
FNHF (الف)



VHFF (ت)



VHAF (پ)



VHBF (ث)

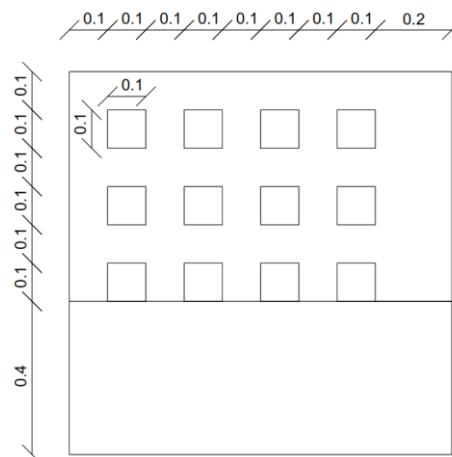
شکل ۸. هندسه ی مدل های مورد استفاده

Fig. 8. Geometry of the models used

ترتیب می‌توان تاثیر تغییر هر سه متغیر تراز اولیه سطح آب، ارتفاع مشخصه موج و دوره تناوب موج را بر پاسخ هیدرولیکی موج‌شکن سنجید. به منظور مقایسه میان مدل‌های ارائه شده، ابتدا نمودارهای روگذری تجمعی برای شرایط موجی شماره ۱ ارائه می‌شود.

نتایج روگذری تجمعی برای موج با ارتفاع مشخصه ۰/۱۸ متر و دوره تناوب ۵ ثانیه و عمق ۰/۸ متر در شکل (۱۰) ارائه شده است. علاوه بر روگذری تجمعی مدل‌های حفره‌دار به منظور مقایسه چگونگی تغییر عملکرد، نتایج مدل ساده نیز آورده شده است. همان‌طور که از این نمودار قابل برداشت است، هندسه دندان‌دار دوزنقه‌ای عمودی با حفره در تمامی سطوح کمترین میزان روگذری تجمعی را دارد. این مدل، روگذری تجمعی را بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌دهد که این موضوع نشان‌دهنده عملکرد مناسب آن در کاهش این متغیر است. با کم شدن تعداد حفره‌ها که باعث کم شدن فضای خالی در کل وجه جلویی می‌شود، میزان کاهش روگذری کمتر می‌شود. با این حال ولی این دو حالت نیز با کاهش روگذری نسبت به کیسون ساده همراه هستند. نتایج این دو حالت نزدیک به یکدیگر هستند که این موضوع نشان‌دهنده عدم تاثیر جانمایی حفره‌ها در وجه جلویی و یا عقبی کیسون است. این دو کیسون حدود ۳۰ درصد کاهش روگذری را ارائه کرده‌اند. به منظور بررسی دقیق‌تر در شکل (۱۱) نمودارهای روگذری تجمعی و بیشینه روگذری در حالت‌های مختلف موج ورودی ارائه خواهد شد. در این نمودارها، مدل مبنا بر اساس موج با دوره تناوب ۵ ثانیه، ارتفاع مشخصه ۰/۱۸ متر و عمق ۰/۸ متر است. در باقی موارد، متغیر تغییر داده شده، در راهنمای شکل مشخص شده است. به عنوان نمونه $T_p = 3$ در شکل نمایانگر موج با دوره تناوب ۳ ثانیه، ارتفاع مشخصه ۰/۱۸ متر و عمق ۰/۸ متر است.

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، وجود حفره در وجه جلویی کیسون و تغییر هندسه وجه جلویی کیسون‌ها توانسته با کاهش روگذری تجمعی و بیشینه روگذری همراه شود. کاهش بیشینه روگذری برای هندسه‌های دندان‌دار دوزنقه‌ای با حفره در سطوح جلویی و عقبی حدود از حدود ۱۰ درصد تا حدود ۴۰ درصد، برای هندسه‌ی دندان‌دار دوزنقه‌ای با حفره در تمامی سطوح حدود از حدود ۲۰ درصد تا ۷۰ درصد و برای هندسه‌ی کیسون مکعبی ساده با حفره حدود ۲۰ درصد تا ۸۰ درصد است. در زمینه کاهش روگذری تجمعی نیز هندسه دندان‌دار دوزنقه‌ای با

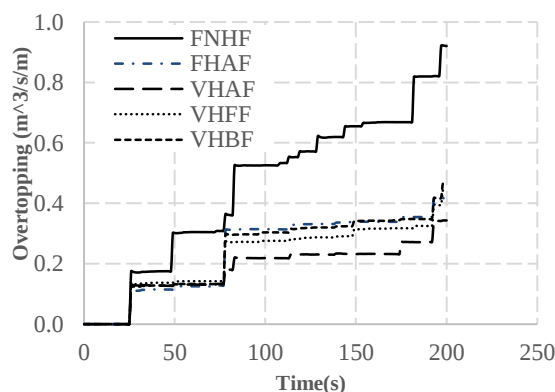


شکل ۹. ابعاد حفره‌ها در نمای روبه‌روی یکی از هندسه‌های مورد استفاده
Fig. 9. Dimensions of the holes in the front view of one of the geometries

جدول ۵. مشخصات موج‌های مورد استفاده

Table 5. The utilized wave characteristics

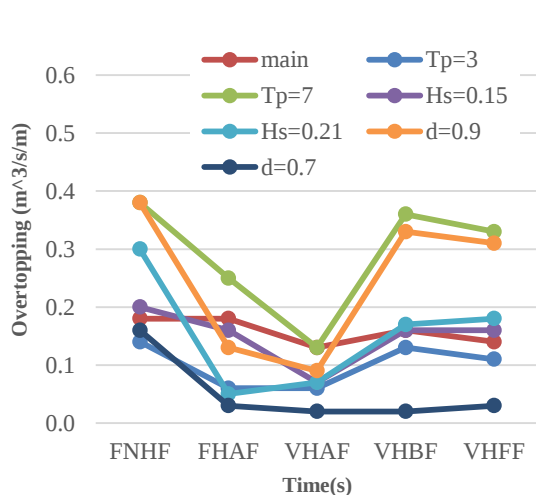
Depth (m)	T_p (s)	H_s (m)	No.
0.8	5.0	0.18	1
0.8	3.0	0.18	2
0.8	7.0	0.18	3
0.8	5.0	0.15	4
0.8	5.0	0.21	5
0.9	5.0	0.18	6
0.7	5.0	0.18	7



شکل ۱۰. روگذری موج‌شکن‌ها برای موج با ارتفاع مشخصه ۰/۱۸ متر و دوره تناوب ۵ ثانیه و عمق ۰/۸ متر

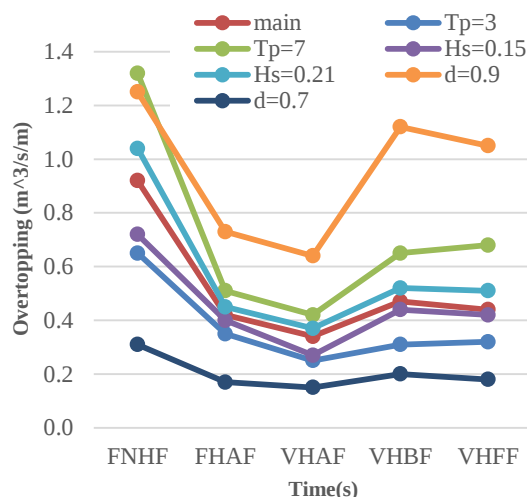
Fig. 10. Breakwater overpass for a wave with a characteristic height of 0.18 m, a period of 5 seconds, and a depth of 0.8 m.

و با ثابت نگه داشتن ارتفاع موج و تراز اولیه سطح آب، سه دوره تناوب متفاوت برای مدل‌سازی تعریف شده است. تراز اولیه سطح آب در تمامی این مدل‌ها ۰/۸ متر است. به منظور بررسی تاثیر تغییر تراز اولیه سطح آب علاوه بر تراز اولیه ۰/۸ متری، دو عمق ۰/۷ و ۰/۹ با فرض ثابت بودن دوره تناوب و ارتفاع مشخصه موج تعریف شده‌اند. به این



(ب) بیشینه‌ی روگذری برای هندسه‌های مورد بررسی در شرایط موجی مختلف

b) Maximum overtopping for geometries in different wave conditions

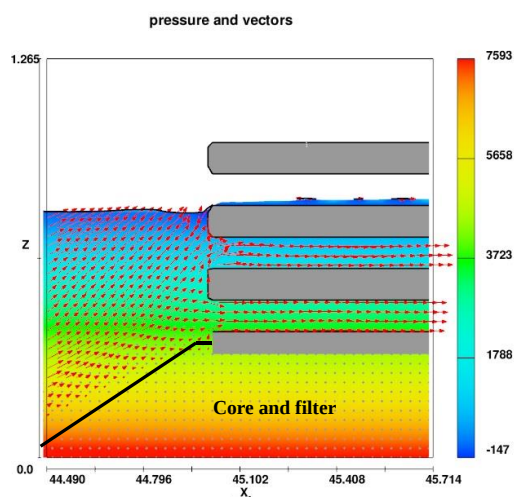


(الف) روگذری تجمعی برای هندسه‌های مورد بررسی در شرایط موجی مختلف

a) Cumulative overtopping for geometries in different wave conditions

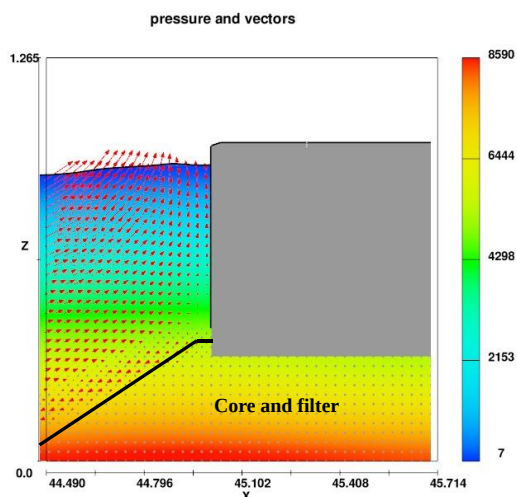
شکل ۱۱. روگذری تجمعی و بیشینه‌ی روگذری برای هندسه‌های حفره دار در شرایط موجی مختلف (شرایط مبنا: $H_s=0.18$ m, $T_p=5.0$ s, $d=0.8$ m)

Fig. 11. Cumulative overtopping and maximum overtopping for perforated geometries in different wave conditions (Base case: $H_s=0.18$ m, $T_p=5.0$ s, $d=0.8$ m)



(ب) میدان سرعت در اطراف کیسون دندانه دار دوزنقه‌ای با حفره در تمامی سطوح

b) Velocity field around a trapezoidal toothed caisson with holes on all faces



(الف) میدان سرعت در اطراف کیسون ساده بدون حفره

a) Velocity field around a simple caisson without holes

شکل ۱۲. میدان سرعت در اطراف کیسون ساده بدون حفره و کیسون دندانه دار دوزنقه‌ای با حفره در تمامی سطوح

Fig. 12. Velocity field around a simple caisson without holes and a trapezoidal toothed caisson with holes on all faces

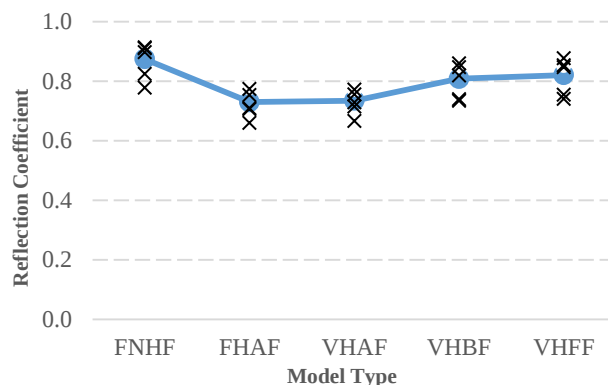
از لحظات آزمایش برای دو کیسون ساده بدون حفره و کیسون دندانه دار دوزنقه‌ای با حفره در تمامی سطوح نمایش داده می‌شود. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است وجود حفره باعث می‌شود تا جریان به داخل حفره‌ها منحرف شده و به جای آن که جهت سرعت جریان رو به بالا بوده و باعث ایجاد روگذری شود، سرعت جریان به صورت افقی بوده و از داخل حفره‌ها گذر کند.

حفره در تمامی سطوح عملکرد بهتری را در تمامی شرایط موجی نسبت به دیگر هندسه‌ها ثبت کرده است. مطابق نتایج ارائه شده کاهش روگذری تجمعی برای هندسه دندانه دار دوزنقه‌ای با حفره در تمامی سطوح از حدود ۵۰ درصد تا ۷۰ درصد و برای سه هندسه دیگر همگی حدود ۴۰ درصد تا ۵۰ درصد است. در ادامه در شکل (۱۲) به منظور فهم دقیق‌تر از تاثیر ایجاد حفره میدان سرعت در یکی

بیشترین تعداد حفره می‌شود. در دو حالتی که حفره‌ها فقط در دندان‌های جلویی و یا عقبی قرار گرفته‌اند، کاهش ضریب انعکاس حدود ۸ درصد است. قرارگیری حفره‌ها در دندان‌های عقبی، برخلاف وضعیتی که در روگذری تجمعی حاکم بود، باعث اندکی کاهش بیشتر نسبت به حالتی که حفره‌ها در دندان‌های جلویی باشند، می‌شوند. مقادیر مربوط به کاهش ضریب بازتاب در شرایط موجی مورد بررسی در قالب جدول شماره ۶ ارائه شده است.

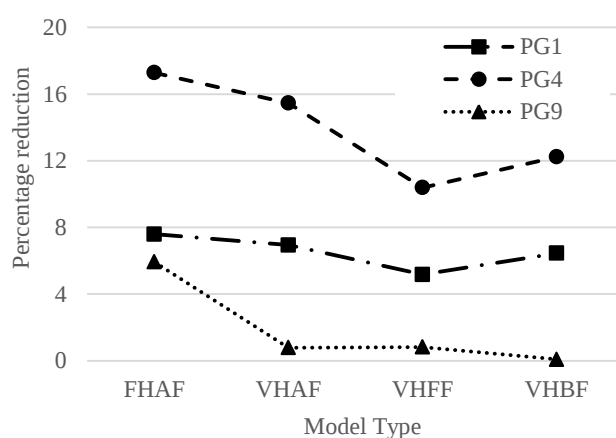
در ادامه بررسی عملکردها موج‌شکن‌ها به بررسی درصد کاهش فشار در موج‌شکن‌ها پرداخته می‌شود.

مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۷) مشخص است که همه‌ی مدل‌های حفره‌دار نسبت به مدل ساده کاهش فشار بیشینه را در فشارسنج‌های موجود تجربه کرده‌اند. این کاهش همان‌طور که در نتایج شکل (۱۴) مشخص است برای دو مدل کیسون مکعبی حفره‌دار و کیسون دندان‌دار دوزنقه‌ای با حفره در تمامی سطوح بیشتر از دو مدل دندان‌دار دوزنقه‌ای با حفره در سطوح عقبی یا جلویی است. میان دو کیسون دندان‌دار عمودی با حفره در سطوح عقبی یا جلویی، کیسون با حفره در سطوح عقبی فشار بیشینه کمتری داشته است که این موضوع نشان‌دهنده عملکرد بهتر حفره‌ها با قرارگیری در سطوح عقبی در این کیسون است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان داد که استفاده از موج‌شکن‌های حفره‌دار منجر به کاهش فشار وارده ناشی از امواج بر بدنه موج‌شکن شده است. به عنوان مثال در نمونه کیسون مکعبی شکل با حفره کاهش فشار حدود ۱۷٫۳ درصدی نسبت به مدل ساده مشاهده شده است. ورود بخشی از جریان موج به حفرات داخلی کاهش دامنه فشارهای وارد شده را به همراه دارد. از سوی دیگر،



شکل ۱۳. ضریب انعکاس هندسه‌های حفره‌دار

Fig. 13. Reflection coefficient of perforated geometries



شکل ۱۴. درصد کاهش فشار بیشینه فشارسنج‌های مختلف برای هندسه‌های

حفره‌دار نسبت به هندسه ساده

Fig. 14. Percentage of maximum pressure drop of different PG for perforated geometries compared to simple geometries

در ادامه به منظور سنجش عملکرد کیسون ضریب انعکاس کیسون‌ها محاسبه می‌شود. سپس با مقایسه‌ی این ضرایب می‌توان عملکرد این کیسون‌ها را در برابر امواج ارزیابی کرد.

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است وجود حفره باعث

کاهش ضریب انعکاس به میزان حدود ۱۷ درصد در مدل‌های با

جدول ۶. مقادیر ضریب بازتاب برای مدل‌های حفره‌دار در شرایط موجی مختلف

Table 6. Reflection coefficient values for perforated models in different wave conditions

	FNHF	FHAF	VHAF	VHBF	VHFF
Tp=5, Hs=0.18, d=0.8	0.923	0.778	0.772	0.852	0.853
Tp=3, Hs=0.18, d=0.8	0.988	0.962	0.949	0.951	0.95
Tp=5, Hs=0.15, d=0.8	0.913	0.753	0.755	0.859	0.877
Tp=7, Hs=0.18, d=0.8	0.778	0.709	0.714	0.739	0.754
Tp=5, Hs=0.21, d=0.8	0.91	0.706	0.728	0.846	0.853
Tp=5, Hs=0.18, d=0.9	0.897	0.773	0.771	0.819	0.846
Tp=5, Hs=0.18, d=0.7	0.824	0.659	0.666	0.734	0.74

جدول ۷. میانگین فشار بیشینه در فشارسنج‌ها برای مدل‌های حفره‌دار

Table 7. Average maximum pressure in pressure gauges for perforated models

Model	PG1	Reduction%	PG4	Reduction%	PG9	Reduction%
FNHF	7610	-	3932	-	6349	-
FHAF	7031	7.6	3253	17.3	5973	5.9
VHAF	7082	6.9	3324	15.5	6020	5.2
VHFF	7216	5.2	3524	10.4	6069	4.4
VHBF	7119	6.4	3452	12.2	6074	4.3

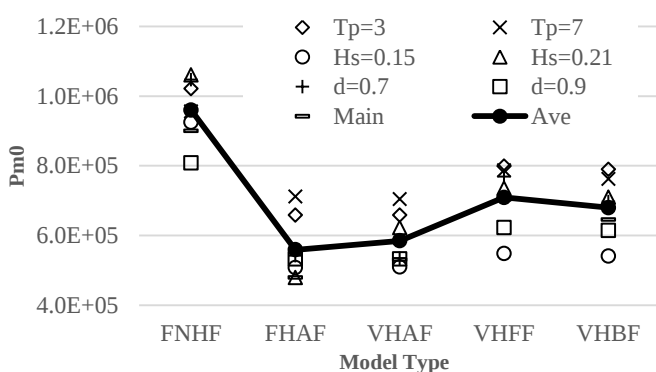
موجب مستهلک شدن انرژی جنبشی موج شده که این موضوع مقایسه ضرایب بازتاب نشان می‌دهد که با کاهش حدود ۱۷ درصدی این ضریب در مدل‌های کیسونی ساده حفره‌دار و دنداندار دوزنقه‌ای شکل با حفره در تمامی سطوح، شدت میدان موج ایستاده در جلوی سازه کاهش یافته است که این امر خود به کاهش دامنه نوسانات فشار کمک می‌کند. همچنین ایجاد حفره در این مدل‌ها باعث کاهش قابل توجهی در بیشینه روگذری و روگذری تجمعی نسبت به حالت کیسون ساده می‌شود. مجموعه این رفتار نشان می‌شود که ایجاد حفرات می‌تواند فشار وارد شده، ضریب انعکاس و روگذری موج از موج‌شکن را همزمان کاهش دهد.

در ادامه مقادیر P_{m0} در شرایط موجی مختلف برای هندسه‌های حفره‌دار گزارش می‌شود. شرایط مبنا در این شکل مشابه شکل (۱۱) است و فقط موارد اختلاف با این شرایط راهنمای شکل نمایش داده شده است. بطور مشابه، راهنمای $T_p=7$ نمایانگر موج با دوره‌ی تناوب ۷ ثانیه، ارتفاع مشخصه ۰/۱۸ متر و عمق ۰/۸ متر است.

مطابق نتایج ارائه شده در شکل (۱۵) ایجاد حفره در هندسه باعث کاهش نیروی کلی وارده بر کیسون‌ها می‌شود. هرچه تعداد حفره‌ها بیشتر باشد کاهش این مقدار بیشتر خواهد بود. در هندسه دنداندار دوزنقه‌ای این موضوع که حفره در سطوح عقبی و یا جلویی باشد تاثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد.

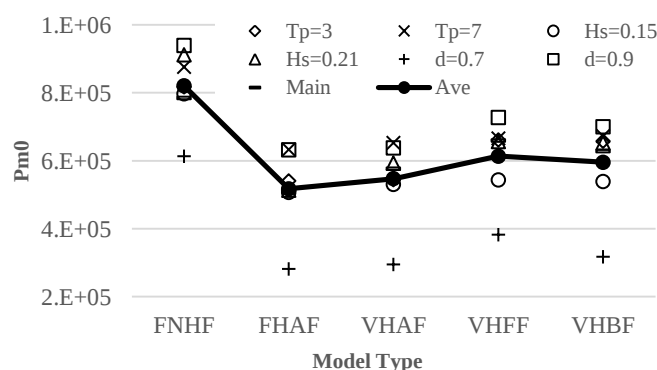
۵- نتیجه‌گیری

همان‌طور که از نتایج به دست آمده مشخص است، ایجاد حفره روی بدنه کیسون‌ها عملکرد هیدرولیکی را بهبود بخشیده است. کیسون دنداندار دوزنقه‌ای با حفره در تمامی سطوح عملکرد بهتری در خصوص کاهش میزان روگذری داشته است به گونه‌ای



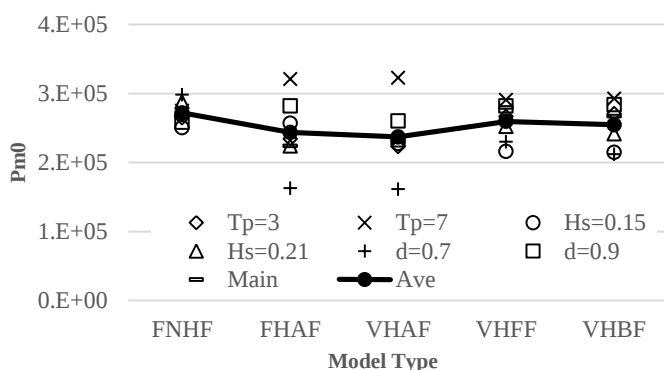
a) Pressure gauge 1 (PG1)

(الف) فشارسنج ۱ (PG1)



b) Pressure gauge 4 (PG4)

(ب) فشارسنج ۴ (PG4)



c) Pressure gauge 9 (PG9)

(پ) فشارسنج ۹ (PG9)

شکل ۱۵. مقادیر P_{m0} برای شرایط موجی مختلف هندسه‌های حفره‌دارFig. 15. P_{m0} values for different wave conditions of perforated geometries

قدردانی نویسندگان

از داوران محترم بابت بررسی مقاله و ارائه نقطه نظرات سازنده تشکر می‌شود.

تعارض منافع

در این پژوهش، هیچ تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

امید کرباسی: انجام تحلیل‌ها، نرم افزار، تصویرسازی، نوشتن متن اولیه و ویرایش‌ها.

حسن اکبری: ایده و مفهوم، روش شناسی، نظارت و مدیریت تحقیق، نوشتن متن اولیه و ویرایش‌ها.

منابع مالی

این تحقیق بدون پشتیبانی منابع مالی و در قالب پژوهش دانشگاهی انجام شده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در انجام این تحقیق، نوشتن متن آن و ویرایش‌ها از هیچ ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

که این مدل نسبت به کیسون ساده حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد کاهش روگذری تجمعی و برای بیشینه‌ی روگذری ۲۰ تا ۷۰ درصد کاهش را در شرایط موجی مورد مطالعه به همراه داشته است. میزان کاهش این دو متغیر برای کیسون ساده با حفره ۴۰ تا ۵۰ درصد برای روگذری تجمعی و ۲۰ تا ۸۰ درصد برای روگذری بیشینه بوده است. کیسون مکعبی ساده با حفره عملکرد بهتری در کاهش فشار بیشینه دارد. میزان کاهش فشار بیشینه در این حالت برای سه ایستگاه مورد سنجش، ۷،۶، ۱۷،۳ و ۵،۹ درصد کاهش نسبت به مدل ساده بوده است. همچنین درصد کاهش این متغیر برای کیسون دندانه‌دار با حفره در تمامی سطوح به ترتیب ۶،۹، ۱۵،۵ و ۵،۲ بوده است. عملکرد این دو مدل در کاهش ضریب انعکاس تقریباً مشابه یکدیگر بوده و درصد کاهش ضریب انعکاس در هر دو حالت ۱۷ درصد بوده است. با بررسی تمامی نتایج می‌توان نتیجه گرفت که مدل کیسون دندانه‌دار دوزنقه‌ای با حفره در تمامی سطوح نسبت به سه مدل دیگر بهبود بیشتری در عملکرد هیدرولیکی کیسون‌ها ایجاد کرده است و می‌توان آن را به عنوان مدل بهینه حاصل از پژوهش حاضر معرفی کرد.

References

- [1] Jarlan, G.E., 1961. A perforated vertical wall breakwater. *The Dock and Harbour Authority*, (486), pp.394-398.
- [2] Misra, S., Narayanaswamy, M., Bayram, A. and Shi, F., 2011. Optimization of Caisson Breakwater Superstructure Geometry using a 2DV Rans-VOF Numerical Model. *Coastal Engineering Proceedings*, (32), p.49. doi: 10.9753/icce.v32.structures.49
- [3] Tofany, N., Ahmad, M.F., Mamat, M. and Mohd-Lokman, H., 2016. The effects of wave activity on overtopping and scouring on a vertical breakwater. *Ocean Engineering*, 116, pp.295-311. doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.03.007
- [4] Hieu, P.D. and Vinh, P.N., 2012. Numerical study of wave overtopping of a seawall supported by porous structures. *Applied Mathematical Modelling*, 36(6), pp.2803-2813. doi: 10.1016/j.apm.2011.09.065
- [5] López, I., Rosa-Santos, P., Moreira, C. and Taveira-Pinto, F., 2018. RANS-VOF modelling of the hydraulic performance of the LOWREB caisson. *Coastal Engineering*, 140, pp.161-174. doi: 10.1016/j.coastaleng.2018.07.006
- [6] Di Lauro, E., Maza, M., Lara, J.L., Losada, I.J., Contestabile, P. and Vicinanza, D., 2020. Advantages of an innovative vertical breakwater with an overtopping wave energy converter. *Coastal Engineering*, 159, p.103713. doi: 10.1016/j.coastaleng.2020.103713
- [7] van Gent, M.R., 2021. Influence of oblique wave attack on wave overtopping at caisson breakwaters with sea and swell conditions. *Coastal Engineering*, 164, p.103834. doi: 10.1016/j.coastaleng.2020.103834
- [8] Suh, K.D., Park, J.K. and Park, W.S., 2006. Wave reflection from partially perforated-wall caisson breakwater. *Ocean Engineering*, 33(2), pp.264-280. doi: 10.1016/j.oceaneng.2004.11.015
- [9] Ghasemi Zadeh, M. and Ketabdari, M., 2016. Effect of hole shapes of perforated breakwaters on incident wave energy damping using numerical method. *Iranian Journal of Marine Technology*, 2(2), pp.65-73.
- [10] Amirabadi, R. and Ghasemi, A., 2018. Numerical modeling investigation of irregular wave interaction with perforated caisson breakwater. *Journal of Marine Engineering*, 14(27), pp.69-79. (In Persian).
- [11] Ciocan, C.S., Taveira-Pinto, F., das Neves, L. and Rosa-Santos, P., 2017. Experimental study of the hydraulic efficiency of a novel perforated-wall caisson concept, the LOWREB. *Coastal Engineering*, 126, pp.69-80. doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.06.001
- [12] Liu, X., Liu, Y., Li, H., Wang, X. and Zhao, Y., 2018.

- Experimental study of mean overtopping discharge at perforated caissons for non-impulsive waves. *Science China Technological Sciences*, 61, pp.711-723. doi: 10.1007/s11431-017-9206-5
- [13] Liu, X., Liu, Y., Lin, P. and Li, A.J., 2021. Numerical simulation of wave overtopping above perforated caisson breakwaters. *Coastal Engineering*, 163, p.103795. doi: 10.1016/j.coastaleng.2020.103795
- [14] Zhao, P., Sun, D. and 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, pp.1-14. doi: 10.1155/2021/8845331
- [15] Ghasemi, A., Amirabadi, R., Kamalian, U.R. and Mazyak, A.R., 2023. Numerical modeling investigation of perforated geometry of caisson breakwater under irregular waves by considering porous media. *Ocean Engineering*, 269, p.113558. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.113558
- [16] Liu, X., Liu, Y., Lin, P. and 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
- [17] Lee, B.W., Baek, D., Ha, T., Lee, K.J. and 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), pp.167-174. doi: 10.2112/JCOASTRES-D-22TM-00004.1
- [18] Mane, V., Rao, S. and 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
- [19] Lara, J.L., Losada, I.J. and Guanche, R., 2008. Wave interaction with low-mound breakwaters using a RANS model. *Ocean Engineering*, 35(13), pp.1388-1400.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Karbasi, O. and Akbari, H., 2026. Improving the Hydraulic Performance of a Composite Perforated Caisson Breakwater by Changing the Front Face Geometry. *Modares Civil Engineering journal*, 26(4), pp.81-94.

