



Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>

Original Article



Investigating the effect of coastal dyke in reducing wave height using OpenFOAM open source software

Hossein Valipour¹, Gholamreza Shams¹, Elham Ghanbari Adivi^{2*}, Nariman Mehranfar³

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
3. Department of Civil Engineering Faculty of Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran.

* Corresponding Author Email: elhamgh44@gmail.com

Received: 31 January 2021

Revise Date: 25 December 2021

Accepted: 8 January 2022

DOI: 10.22113/JMST.2022.266984.2411

Abstract

In the design and construction of structures, especially water structures, and contact with any problematic soils, many issues and problems may arise during construction or operation, eventually leading to local destruction or destruction of the structure. Iran is one of the countries that, due to its special arid and semi-arid climatic conditions as well as its geology, many types of problematic soils are found in it, so the existence of this category of soils has been the source of many destructions and damages caused in There have been all kinds of structures, especially water structures in the country. To achieve the goals of the present research, tests were conducted on the soils of the construction site of Ramhormoz canals in three sections to identify the mineral type and morphology of the tested samples and to investigate the effect of different additives on the mechanical properties of the soil samples. The results of the research show that there are changes in the paste limit for all related samples, the lowest value for the sample with 5% lime is an increase of 3.58 and the highest value for the sample with 7% cement is an increase of 9.65. The changes in internal friction angle for all samples show that the lowest value related to the sample with 7% cement is equal to 0.1% increase and the highest value related to the sample with 7% cement is equal to 24.9% increase.

Keywords: Problematic soils. Stabilize, dissolvability, mineral, limit of elasticity

1. INTRODUCTION

In the design and construction of structures, especially water structures, and contact with any problematic soils, many issues and problems may arise during construction or operation, eventually leading to local destruction or destruction of the structure. Iran is one of the countries that, due to its special arid and semi-arid climatic conditions as well as its geology, many types of problematic soils are found in it, so the existence of this category of soils has been the source of many destructions and damages caused in There have been all kinds of structures, especially water structures in the country.

2. METHOD AND MATERIAL

To achieve the objectives of the present research, field sampling was done after studying the previous

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



research, and then relevant laboratory studies were carried out by transferring the prepared samples to the laboratory. Laboratory studies of the current research in three sections: mineralogy of samples with XRD device, morphology of samples with SEM device; and Granulation of the samples was done by LPSA method. For sampling for the present research, data collection was done from the Ramhormoz region located in Khuzestan province, which has chalk soils and is the place where various water transfer structures are implemented. In this research, manual boreholes were dug from a depth of -30 (minus 30 cm) from the base level to a depth of -60 (minus 60 cm) and the information about the state of the soil layer was obtained by sampling the mentioned boreholes by performing the necessary tests. From the soil composition that was sampled from the mentioned places with 3 types of solid materials including: a- The combination of soil with type 2 cement with a combination of 2, 5%, and 7% by volume. b- Mixing the soil with slaked lime with a combination of 5% and 7% by volume. C - Mixing the soil with slag with 3 with a combination of 5% and 7% by volume.

3. Results

The results of this research show that the changes in the paste limit for all the samples show that the lowest value for the sample with 5% lime is a 3.58% increase and the highest value for the sample with 8% cement is a 9.65% increase. Also, the changes in the dry density of compaction show that the lowest value of the sample with 7% cement is equal to a 22% decrease and the highest value of the sample with 7% slag is equal to a 6% increase. The changes in adhesion coefficient show that the lowest value of the sample with 5% cement is a 15.4% decrease and the highest value of the sample with 5% slag is a 450% increase. The changes in the internal friction angle show that the lowest value corresponding to the sample with 5% and 7% lime, 5% and 7% slag, and the highest value corresponding to the sample with 5% cement is equal to a 5.8% increase.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

In general, the most important reactions of lime with soil can be divided into four categories: a) flocculation, b) carbonation, 3) ion exchange, and d) pozzolanic reactions, and each of these changes can be Even in a short period observed in the soil. In the event of any of the presented reactions, changes can be observed in the optimum moisture content, specific weight, reduction in plasticity indices, and increase in unconfined compressive strength. The mixture of lime and clay with the cation exchange reaction of clay minerals and as a result, coagulation of its fine particles, provides suitable conditions by which the flocculated clay particles together cause the formation of larger particles. This process involves the hydration reaction of quicklime. After this initial rapid reaction, more permanent reactions begin, such as the pozzolanic reaction in which materials impregnated with cement are used, the best performance of the samples is expected in a longer time. Hydration reactions are effective at temperatures above 20 degrees Celsius, at higher stages this reaction causes an increase in resistance through the formation of hydrated calcium silicate and hydrated calcium aluminate silicate from hydration and pozzolanic reactions. The formation of these compounds increases resistance. Considering that the soil of the study area is gypsum, therefore, among the mechanical parameters of the soil, the coefficient of adhesion can be considered as the most important parameter. Therefore, based on the above explanation and based on the results obtained, mineral slag is added to the soil of the study area. It can be a suitable solution to solve the mentioned soil problem.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors of the article express their gratitude to Khorramshahr University of Marine Sciences and Technology and Khuzestan Water and Power Organization for their financial and spiritual support of this research.



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



بررسی تاثیر دایک ساحلی در کاهش ارتفاع امواج با استفاده از نرم افزار متن باز OpenFOAM

حسین ولی پور^۱، غلامرضا شمس^۱، الهام قنبری عدیوی^{۲*}، نریمان مهرانفر^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: elhamgh44@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/JMST.2022.266984.2411

چکیده

توسعه پایدار، اقدامات مهندسی و انتخاب متناسب‌ترین روش حفاظت جهت ساماندهی و تثبیت سواحل، در گروهی آگاهی از رفتار امواج در سواحل می‌باشد. از جمله روش‌های سازه‌ای حفاظتی می‌توان به دیوارهای ساحلی اشاره کرد که با ایجاد میرایی در امواج ارتفاع موج عبوری از ساحل را تضعیف می‌نماید. با توجه به رویکرد مدل سازی عددی در این پژوهش، از نتایج آزمایشگاهی جهت بررسی کارایی نرم افزار متن باز Open FOAM و مدل آشفتگی $K-\omega$ SST در مدل سازی رفتار امواج وارده بر بدنه دایک ساحلی استفاده شد. با در نظر گرفتن شرایط مختلف برای مدلسازی، مجموعاً تعداد ۴۵ آزمایش جهت اجرای برنامه انتخاب شد. در نهایت نتایج با یافته‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید که نشان‌دهنده توانایی مدل عددی در برآورد ارتفاع موج عبوری از ساحل پس از برخورد با سازه دایک می‌باشد. با افزایش ارتفاع موج، ارتفاع آب قبل از سازه افزایش می‌یابد اما تاثیر آن بر ارتفاع آب بعد از سازه بیشتر است زیرا در یک ارتفاع ثابت از سازه وقتی ارتفاع موج زیاد شود میزان آب عبوری افزایش می‌یابد. بنابراین وقتی ارتفاع آب بعد از سازه افزایش یابد اختلاف آن با ارتفاع قبل کاهش پیدا می‌کند و به همین خاطر میرایی موج، از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی‌متر روند کاهشی دارد و سازه موجود، میزان کمتری از ارتفاع آب را کاهش می‌دهد. از مقایسه کلی نتایج می‌توان گفت که سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر کارایی بیشتری در میرایی موج دارد و مقدار بیشتری از ارتفاع آب را کاهش می‌دهد.

واژگان کلیدی: حفاظت ساحل، میرایی موج، مدل‌سازی عددی، سازه‌ی دایک

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



۱. مقدمه

امروزه حمل و نقل دریایی یکی از مهم‌ترین روش‌های انتقال کالا و افراد است و اقتصاد دنیا نیز در ارتباط تنگاتنگی با حمل و نقل دریایی است، که همین موضوع نیاز بشر به حفاظت از سواحل به روش‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای را دو چندان می‌کند. سواحل هر کشور اهمیت ویژه‌ای از دیدگاه توسعه اقتصادی، ارتباطات ملی و بین‌المللی و حتی سیاسی دارند و یکی از موقعیت‌های تمرکز فعالیت هستند. کشور ما نیز با داشتن ۵۸۰۰ کیلومتر خط ساحلی در شمال و جنوب و افزون بر این سواحل دریاچه‌های داخلی و تالاب‌ها، از امکانات ویژه‌ای برای توسعه فعالیت‌های بندری، تجاری و حمل و نقل برخوردار شده است. فهم شرایط در مدیریت نواحی ساحلی فوق‌العاده مهم است. بخش قابل توجهی از جمعیت جهان در حاشیه سواحل سکونت دارند و بسیاری دیگر به طور مرتب از سواحل استفاده می‌کنند. این مسأله، فشار زیادی را در توسعه خانه‌سازی و تهییدات تفریحی در سواحل و حفاظت ساحل از طوفان‌ها و طغیان امواجی چون سونامی فراهم می‌سازد. امواج مهم‌ترین عامل در تعیین وضعیت هندسی سواحل هستند و نیز دارای تأثیر عمده‌ای در طراحی بنادر، آبراهه‌ها و سازه‌های ساحلی هستند. مقدار قابل توجهی از انرژی امواج در کرانه‌های ساحلی مستهلک می‌شود که منجر به شکل‌دهی سواحل، طبقه‌بندی و جابجایی مواد رسوبی کف دریا به سوی ساحل یا به طرف دریا و یا در امتداد ساحل و اعمال بسیاری از نیروهای ایجاد شده به سازه‌های دریایی و ساحلی می‌شود. به‌طور کلی حفاظت از سواحل بر مبنای حفاظت سازه‌ای و غیرسازه‌ای است. کاهش اثر امواج بر مناطق ساحلی از جمله موضوعات مهم در مهندسی سواحل به‌شمار می‌رود. از این‌رو ابزار و روش‌های مختلف حفاظت، شامل موج‌شکن‌ها، آبشکن‌ها و دیوارها و صخره‌های مصنوعی، مورد مطالعه قرار گرفته و توسعه یافته‌اند (Ghanbari Adivi and Fathi-moghadam, 2015). سازه‌های سخت ساحلی مانند دیوار ساحلی، موج‌شکن و غیره، اثرات منفی بر روی اکوسیستم ساحلی می‌گذارند و همچنین از لحاظ اقتصادی دارای هزینه‌های بالایی هستند، ولی با این‌وجود دارای مقاومت و پایداری بالایی در برابر امواج دریا هستند که تحت شرایط محیطی فعلی و آینده جهان استفاده از آن‌ها به‌منظور جلوگیری از تخریب و فرسایش سواحل انکار ناپذیر است (Gracia et al., 2018).

پوشش ساحلی به عنوان یک مانع طبیعی در بسیاری از مناطق ساحلی، به عنوان محافظ زمین در مقابل اثرات موج و فرسایش ساحلی عمل می‌کند. پوشش ساحلی بر خواص موج تاثیر می‌گذارد و مطالعات مربوط به این موضوع در گستره وسیعی صورت گرفته است که عمدتاً بر ضعف موج تمرکز دارد (Akgul et al., 2013). Zarei et al. (2017) بیان کردند که سیر تکامل حفاظت سواحل طی دوران مختلف تغییر از رویکردهای سازه‌ای به تقویت سواحل بوده است. یکی از این راه‌حل‌های طبیعی برای مقابله با امواج سونامی استفاده از پوشش گیاهی (کمر بند سبز) است که به

طور قابل توجهی توسط مهندسين به عنوان چاره‌ای برای کاهش خطرات این پدیده در نظر گرفته شده است. کاهش اثرات مخرب امواج در میان یک پوشش درختی با تراکم‌های متفاوت مانند ایجاد جریان آشفته در داخل بدنه یک سازه متخلخل است.

هر چند که پوشش گیاهی از لحاظ اقتصادی، زیست محیطی و زیبایی شناختی بر روش سازه‌ای برتری دارد اما برخی مواقع ناچار به استفاده از این روش هستیم. این روش را به شکل‌های مختلف از جمله روش مستقیم و غیر مستقیم در تثبیت سواحل تقسیم‌بندی می‌کنند. در روش مستقیم از سازه تثبیت کننده به طور مستقیم و به شکل پوشش بدنه بر روی ساحل استفاده می‌کنند و در روش غیرمستقیم تثبیت رودخانه‌ها توسط احداث سازه‌های عرضی در طول ساحل فرسایش‌پذیر انجام می‌گیرد. در این سازه‌ها سرعت آب هنگام برخورد با سازه کم شده و جریان پس از چرخش به سازه بعدی برخورد می‌کند و به این شکل نیروی فرسایش آب مستهلک می‌شود.

با توجه به شرایط اقلیمی و موقعیت مکانی سواحل در کشور ما، در بسیاری موارد استفاده از پوشش گیاهی و تثبیت بیولوژیک به تنهایی فاقد کارایی مناسب بوده و لازم است با اجرای سازه مکانیکی و به روش ترکیبی محدودده ساحل یا حاشیه رودخانه تثبیت شود. در این‌گونه اقدامات در قسمت‌هایی که فرسایش بیشتر است از پوشش‌های حفاظتی استفاده می‌شود و در قسمت‌هایی که فرسایش کمتری رخ می‌دهد از روش‌های بیولوژیکی بهره می‌برند. اهمیت حفاظت از سواحل منجر به این شد که مطالعات زیادی در این زمینه صورت گیرد و مهندسان به بررسی و استفاده از روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای برای حفاظت سواحل اقدام نمودند که در ادامه به چند مورد از مطالعات انجام شده در این زمینه، پرداخته می‌شود.

Hashemi Javan (2007) بیان کرد که امواج مهم‌ترین عامل در تعیین وضعیت هندسی سواحل هستند و نیز نقش عمده‌ای در طراحی بنادر، آبراهه‌ها، سازه‌های حفاظت ساحلی و سایر کارهای دریایی دارند. میزان قابل توجهی از انرژی امواج در کرانه‌های ساحلی مستهلک شده، منجر به شکل‌دهی سواحل، انتقال مواد رسوبی کف دریا به سمت ساحل، بالعکس و یا در امتداد نوار ساحلی، اعمال نیرو به سازه‌های ساحلی و تخریب آن‌ها می‌گردد.

Motamedinejad و Fathi-moghadam (2018) بیان کردند که بخش وسیعی از خسارات وارده به تاسیسات و سازه‌های ساحلی ناشی از مسائل مربوط به فرایند فرسایش و رسوب‌گذاری در سواحل است.

Davoodi et al. (2017) بیان کردند که به‌کارگیری روش‌های سازه‌ای مانند انواع موج‌شکن به‌منظور حفاظت از سواحل در مقابل امواج بلند، به‌ویژه در مناطقی که اجرای آن را غیر ممکن می‌نماید، به‌دلیل برهم‌زدن تعادل اکولوژیکی و شرایط زیست محیطی، اثرهای زیان‌باری را برجای می‌گذارد.

کننده انرژی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تجربی نشان می دهد که تخلخل به طور قابل توجهی فشارهای دینامیکی را تحت تاثیر قرار می دهد به خصوص در نزدیکی سطح آزاد، اما نزدیکتر به بستر این اثر کمتر است. علاوه بر این، نیروها در پانل جلویی در حالت موج شکن دو صفحه ای ۲۰-۲۵ درصد بیشتر از یک دیوار متخلخل تنها است.

Jiang et al. (2017) به بررسی اثر متقابل بین موج منفرد (سونامی) و دیوارهای دریایی پرداختند. دیوارهای دریایی معمول-ترین سازه مورد استفاده در مناطق ساحلی برای حفاظت از چشم انداز و امکانات ساحلی است. مطالعات متقابل بین امواج منفرد شبیه سونامی و دیواره های دریایی در پژوهش ها نسبتا نادر است. در این مطالعه، یک مدل عددی سه بعدی بر اساس Open FOAM برای بررسی امواج منفرد شبیه سونامی که بر روی دیوار دریایی با مقطع مستطیل شکل منتشر می شوند، توسعه داده شد. معادلات ناویر استوکس برای جریان تراکم ناپذیر دو فازی، روشهای $k - \epsilon$ برای مدل آشفتگی و از روش حجم سیال (VOF) برای ردیابی سطح آزاد، استفاده شد. مطالعات آزمایشگاهی برای اندازه گیری برخی از ویژگی های هیدرودینامیکی مرتبط با امواج منفرد انجام شد. سپس این مدل با داده های آزمایشگاهی تأیید و صحت سنجی شد و توافق های خوبی برای سطح آزاد، سرعت و فشار دینامیکی در اطراف دیوارهای دریایی یافت شد. سرانجام، یک سری آزمایش-های عددی برای تجزیه و تحلیل سیر تکامل میدان های موج و جریان، دبی جریان سرریز شده و همچنین فشار موج (نیرو) در اطراف دیوارهای دریایی انجام شد، توجه ویژه ای به اثرات عرض تاج دیوار دریایی می شود. یافته های ما به بهبود درک وقوع آسیب-های ناشی از سونامی در مجاورت دیوارهای دریایی مانند برخورد موج و آب شستگی موضعی کمک می کند.

Igarashi et al. (2018) از یک سیستم ترکیبی متشکل از یک خاکریز و شمع (pile) برای استهلاک انرژی موج های بلند استفاده کردند و مشاهده نمودند که میزان استهلاک انرژی به آرایش شمع ها، ارتفاع و قطر آن ها و همچنین به ارتفاع خاکریز بستگی دارد. هر چه ارتفاع خاکریز بیشتر و همچنین ارتفاع و قطر شمع ها نیز بیشتر باشد انرژی موج بیشتر مستهلک می شود.

Jiang et al. (2019) امواج منفرد را در برخورد با یک ردیف شمع شکاف دار عمودی در نرم افزار Open FOAM مدل کردند و مشخصات جریان را یکبار برای یک شمع و یکبار برای یک ردیف شمع بررسی کردند و بیان کردند که ارتفاع موج، آرایش شمع ها و شیب ساحل در استهلاک انرژی تاثیرگذار است.

Li et al. (2019) از یک مدل عددی کامل (هیدرودینامیکی و مورفولوژیکی) بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی متن باز (Open FOAM) برای شبیه سازی جریان یک موج منفرد در یک ساحل شیب دار استفاده کردند. مدل هیدرودینامیکی بر مبنای معادلات ناویر استوکس و مدل آشفتگی RANS و $k-\omega$ و با

Ghanbari Adivi و Fathi-Moghadam (2015) بیان کردند که کاهش اثر امواج بر مناطق ساحلی از جمله موضوعات مهم در مهندسی سواحل به شمار می رود. از این رو ابزار و روش های مختلف حفاظت، شامل موج شکن ها، آب شکن ها و دیوارها و صخره-های مصنوعی، مورد مطالعه قرار گرفته و توسعه یافته اند (Ghanbari Adivi and Fathi-moghadam, 2015).

Nielsen (2001) بیان کرد که سازه های بسیاری وجود دارد که در حال حاضر برای محافظت از ساحل مورد استفاده قرار می-گیرند. این موارد شامل دیوارهای دریایی، روش های مصنوعی، دیوارهای تفکیک شده، موج شکن ها و تپه شنی برای تثبیت ورودی جریان است.

Honarmand et al. (2019) در تحقیق خود، با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی متن باز Open FOAM، انتشار و بالاروی موج سونامی در نزدیکی ساحل توسط موج تنها به عنوان تخمینی از موج سونامی در شرایط مختلف را شبیه سازی کردند. سپس نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با داده های آزمایشگاهی را مقایسه کردند. نرم افزار OpenFOAM نشان داد که با دقت قابل قبولی توانایی شبیه سازی عددی انتشار و بالاروی موج و همچنین تغییرات ارتفاعی سطح آزاد آب در شرایط مختلف را دارد.

Pouriamehr (2017) به بررسی حفاظت از سواحل رودخانه ها و معرفی و کاربرد انواع آب شکن ها در امر حفاظت از سواحل پرداخت. آب شکن ها سازه هایی مستقیم هستند که معمولا به طور قائم و گاهی نیز اریب بر خط ساحل احداث می شوند. کارایی این سازه ها در تله اندازی رسوبات کرانه ای به میزان پیشروی آن ها در دریا بستگی دارد. از جمله تاثیرات این سازه ها در راستای حفاظت سواحل می توان به دور ساختن جریان از سواحل، کاهش سرعت جریان در نزدیکی سواحل، توسعه فرایند رسوب گذاری جریان در اطراف ساحل، کاهش و یا تنظیم عرض رودخانه اشاره کرد.

Smallegan et al. (2016) با استفاده از مدل سازی فیزیکی، تاثیر شیب دیواره های سازه و ارتفاع موج عبوری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از این بود که با کاهش شیب سازه میزان سرریزی امواج از روی سازه ی موج شکن کاهش می یابد.

Elbisy et al. (2016) عملکرد هیدرودینامیکی چند ردیف موج شکن شکاف دار را در برخورد با امواج مدل کردند و در مدل سازی از تکنیک حداقل مربعات خطا استفاده کردند و در شرایط مختلف سه پارامتر ضریب بازتاب، ضریب انتقال و ضریب استهلاک انرژی را مورد بررسی قرار دادند. افزایش تخلخل باعث افزایش ضریب انتقال و بازتاب می شود همچنین آرایش موج شکن ها، قطر و ارتفاع آن ها در استهلاک انرژی تاثیرگذار است.

Alkhalidi et al. (2015) فشارها و نیروهای موج وارد بر موج شکن های عمودی متخلخل به عنوان سازه های مستهلک

موج است سپس داده‌های به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

به طور کلی می‌توان گفت که مدل‌سازی عددی یک پدیده فیزیکی در نرم‌افزار Open FOAM به سه بخش تقسیم می‌شود. • پیش پردازش (Pre-Processing): شامل تعیین حلگر، فراهم‌سازی هندسه، شرایط مرزی و شرایط اولیه، ثابت‌های فیزیکی، تعیین گام زمانی، تعیین میزان دقت در محاسبات، نحوه‌ی کنترل و بررسی فرآیند حل در حین اجرای برنامه و مشخص نمودن نوع خروجی و نحوه‌ی ذخیره‌ی آن.

• پردازش (Processing): اجرای حلگر یا برنامه.

• پس پردازش (Post-Processing): نمایش خروجی برنامه و دامنه‌ی حل، رسم نمودار، تهیه انیمیشن و تصویر.

۲. مواد و روش‌ها

روش کسر حجمی سیال یک تکنیک جهت شبیه‌سازی دقیق سطح آزاد با استفاده از یک مش اولیری ثابت است. این روش جهت دو یا چند سیال غیرقابل اختلاط با یکدیگر طراحی شده است. VOF یا روش کسر حجم سیال (Volume of fraction)، روشی است که در آن مرز مشترک دو سیال به صورت ضمنی ردیابی می‌شود. در این روش مرز از روی کمیت α که در شبکه اولیری ذخیره می‌شود مشخص می‌شود و این کمیت مشخص می‌کند که کدام سیال در آن مکان وجود دارد. حرکت مرز با جابجایی (Advection) کمیت موردنظر در سیال به دست می‌آید. از مزایای این روش، حل معادلات حاکم بر سیال و مرز بر روی یک شبکه است که باعث ساده‌تر شدن اعمال آن می‌گردد. فرمول‌بندی مدل VOF بر این اصل استوار است که فازهای مختلف باهم ترکیب نمی‌شوند. در تعیین سطح آزاد از یک تابع متغیر به نام α (کسر حجمی سیال) استفاده می‌شود. به این صورت که در سلولی که پر از سیال است مقدار α برابر ۱ و در سلول خالی از سیال این مقدار برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. در سلول‌های نواحی مرز مشترک بین دو فاز، مقدار α بین ۰ و ۱ است (رابطه ۱).

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{سلول پر از سیال باشد} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{سلول ترکیبی از هوا و سیال باشد} \\ 0 & \text{سلول پر از هوا (خالی از سیال) باشد} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱)}$$

معادلات بقا شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت است. سیال مورد بررسی در این تحقیق نیوتونی در نظر گرفته شده است. در نرم‌افزار Open FOAM اولین گام شبیه‌سازی عددی، انتخاب حلگر مناسب با شرایط پدیده است. مسأله‌ی اندرکنش بین موج و دیوار ساحلی، به صورت جریان دوفازی برای سیال تراکم‌ناپذیر و آشفته است. در نرم‌افزار Open FOAM، حلگر استاندارد برای

استفاده از روش حجم سیال (VOF) بسته شده است. آن‌ها در شبیه‌سازی خود از رسوبات‌بستر (Bed Load) و همچنین از بارمعلق (Suspended Load) که در شکل‌گیری ساحل تاثیر گذار هستند استفاده کردند. مدل عددی Li et al. (2019) در برابر مدل آزمایشگاهی و تغییرات مورفولوژیکی تحت موج منفرد، صحت-سنجی شده (Validate) و معتبر است. شبیه‌سازی بستر صلب (Rigid) نشان می‌دهد که مدل عددی می‌تواند نتایج مشاهده شده در آزمایشگاه، از جمله شکست موج و پرش هیدرولیکی (Hydraulic Jump) و غیره را به طور منطقی بازتولید کند (Li et al., 2019).

Amini و Solaimani (2018) تاثیر آرایش یکنواخت و غیریکنواخت شمع‌ها را بر روی میزان آب‌شستگی پایه‌ی پل بررسی کردند و بیان کردند که با افزایش فاصله یکنواخت و عرضی (عمود بر جریان) شمع‌ها حداکثر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد در حالی که تغییر فاصله در راستای جریان تاثیر چندانی ندارد.

Shen و Stone (2002) آزمایشات خود را بر روی مجموعه‌ای از سیلندرهای استوانه‌ای زبر در یک کانال روباز انجام دادند. مطالعات آزمایشگاهی خود را بر روی مجموعه‌ی زیادی از سیلندر-های مستغرق و غیر مستغرق و همچنین با سایزهای مختلف و آرایش‌های مختلف انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت جریان تحت تاثیر عواملی چون آرایش استوانه‌ها، طول و قطر استوانه‌ها و عمق جریان است.

مناطق ساحلی اکوسیستم‌های رابط بین زمین و دریا را تشکیل می‌دهند (Leewis et al., 2012; Goncalves et al., 2013; Martins et al., 2013). سکونت ۲۰ درصد از جمعیت جهان در فاصله ۲۵ کیلومتری و ۴۰ درصد از جمعیت جهان در فاصله ۱۰۰ کیلومتری دریا و همچنین وجود بیش از ۱۲ درصد کل ذخایر نفتی جهان و ۲۵ درصد کل منابع گاز جهان در نواحی ساحلی، تاثیر حفاظت از سواحل را در نگهداری منابع طبیعی و اموال عمومی و غیره بهتر می‌توان درک کرد. هدف از این مطالعه مدل کردن برخورد امواج با سازه‌ی دایک و بررسی میزان نیروی وارد به سازه‌ی ساحلی و همچنین بررسی تاثیر سازه‌ی ساحلی در استهلاک انرژی

نرم‌افزار Open FOAM از روش حجم محدود جهت گسسته‌سازی فضای دامنه و تبدیل معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری استفاده می‌کند. در این مطالعه، از معادلات سیال تراکم‌ناپذیر همراه با رویکرد VOF به عنوان مدل ریاضی جریان با در نظر گرفتن فرضیاتی از جمله تراکم‌ناپذیر بودن سیال، کانال و سازه‌ی نفوذ ناپذیر و شکست موج در ابتدای ساحل، استفاده شده است.

میانگین نرخ تانسور کرنش است که به صورت رابطه (۵) تعریف می‌گردد.

بخش تنش در رابطه (۵) برای سیال نیوتنی و غیرقابل تراکم، را می‌توان با کمک عملگر دیورژانس در محاسبات برداری به صورت رابطه (۶) تعریف کرد.

f در رابطه (۳) بخش نیروی خارجی است که شامل نیروی گرانش هم می‌تواند باشد. از طرفی u بردار سرعت، v ویسکوزیته و p فشار هستند. رابطه انتقال جرم (۳) را می‌توان به کمک رابطه (۶) به فرمت رابطه (۷) باز نویسی کرد.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\frac{\partial(u)}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) = -\nabla p + \nabla \cdot T + f \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$T = 2v \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$S = 0.5[\nabla u + (\nabla u)^T] \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\nabla \cdot T = \nabla \cdot (v\nabla u) + \nabla u \cdot \nabla v \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\frac{\partial(u)}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) - \nabla \cdot (v\nabla u) - \nabla u \cdot \nabla v = -\nabla p + f \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot (v(\nabla u + (\nabla u)^T)) + g + \frac{F_s}{\rho} \quad \text{رابطه (۸)}$$

مقیاس‌های کوچک در روش LES از اهمیت کمتری نسبت به روش RANS برخوردار است. روش LES در مقایسه با DNS نیز مزایایی دارد. از آنجاکه LES با مقیاس‌های بزرگ سروکار دارد، لذا می‌تواند با استفاده از شبکه‌بندی بزرگ، نتایج قابل مقایسه‌ای را نسبت به DNS به دست دهد، درحالی‌که DNS از LES بسیار پرهزینه‌تر است. با توجه به اینکه جریان مورد بررسی در این مسئله آشفته است از روش RANS و مدل $k - \omega sst$ برای مدل‌سازی جریان آشفته استفاده شده است. معادلات آشفته‌گی $k - \omega sst$ برای اولین بار توسط Menter (1992) توسعه داده شدند. این معادلات از مزیت‌های مدل $k - \omega$ برای نزدیک دیواره‌ها و درون لایه مرزی و از مزیت‌های مدل $k - \varepsilon$ برای جریان‌های آزاد استفاده کرده است (Penttinen et al., 2011; An and Fung, 2018). در حالت کلی می‌توان گفت این معادلات به صورت ترکیبی از دو مدل مذکور استفاده می‌کنند به این صورت که به کمک یک تابع ترکیبی این دو سری معادله ترکیب شده که در نزدیک جداره و در نزدیک لایه مرزی از معادلات $k - \omega$ استفاده کرده و در جریان‌های آزاد و دور از جداره‌ها از معادلات $k - \varepsilon$ استفاده می‌کند. همچنین مقدار ویسکوزیته آشفته‌گی به کمک روابط انتقال تنش برشی آشفته‌گی (Turbulent shear stress) تعریف می‌گردد. معادلات این مدل به صورت روابط (۹) و (۱۰) است.

روابط (۹) و (۱۰) به ترتیب به نام‌های معادله k و معادله ω شناخته می‌شوند که در آن‌ها S به کمک رابطه (۳) محاسبه می‌گردد. این معادلات برای جریان‌های با رینولدز بالا استخراج شده‌اند. در

حل جریان چندفازی، حلگر اینترفوم (interFoam) است. در حلگر اینترفوم فرض بر این است که هر یک از این فازها تراکم‌ناپذیر و هم‌دما بوده و باهم آمیخته نمی‌شوند. این حلگر، معادلات متوسط-گیری شده‌ی ناور استوکس (رینولدز) (Reynolds-Average Navier-Stokes Equation (RANS)) را به طور هم‌زمان با معادله‌ی پیوستگی برای میدان سرعت و توزیع فشار در جریان آشفته حل می‌کند (روابط ۲ و ۳).

T در رابطه (۳) تانسور فشار انحرافی است که می‌تواند برای جریان تراکم‌ناپذیر به صورت زیر تعریف گردد (رابطه ۴) که S

$$\text{در رابطه (۸) } F_s \text{ بیانگر نیروی کشش سطحی است.}$$

$$\text{در نهایت به کمک رابطه مومنتوم (۸) و رابطه پیوستگی (۲)}$$

$$\text{می‌توان میدان جریان را حل کرد.}$$

$$\text{مدل‌سازی جریان‌های آشفته همواره از مباحث چالش برانگیز}$$

$$\text{بوده است. از آنجا که بیشتر مسائل شامل کاربردهای سیال دارای}$$

$$\text{جریان آشفته است، همواره تلاش پیوسته‌ای برای حل این نوع}$$

$$\text{جریان‌ها صورت می‌گیرد. روش‌های عددی که امروزه به‌طور}$$

$$\text{گسترده مطرح بوده و از آن‌ها استفاده می‌شوند عبارت‌اند از:}$$

$$\text{– معادلات ناور استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز}$$

$$\text{– (RANS: Reynolds Average Navier-Stokes)}$$

$$\text{– روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES: Large-Eddy}$$

$$\text{Simulation)}$$

$$\text{– شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS: Direct Numerical}$$

$$\text{Simulation)}$$

$$\text{از نظر ماهیت محاسبات، روش LES بین RANS و DNS}$$

$$\text{محسوب می‌شود. در روش RANS با متوسط‌گیری زمانی، مقادیر}$$

$$\text{متوسط متغیرها محاسبه می‌شود اما روش DNS بدون هیچ‌گونه}$$

$$\text{مدل‌سازی و با اعمال شبکه‌بندی در حد کوچک‌ترین مقیاس‌ها، با}$$

$$\text{عنوان آزمایشگاه عددی شهرت یافته است. در روش RANS}$$

$$\text{پارامترها به دو جمله نوسانی و متوسط تبدیل می‌شوند و جمله}$$

$$\text{نوسانی که شامل تمامی مقادیر نوسان است مدل‌سازی می‌شود.}$$

$$\text{مزیت LES نسبت به RANS در آن است که ابتدا مقیاس‌های}$$

$$\text{بزرگ از مقیاس‌های کوچک جدا شده و سپس نوسان موجود در}$$

$$\text{مقیاس‌های کوچک مدل‌سازی می‌شوند. لذا تأثیر مدل‌سازی}$$

گردابه‌ای آشفتگی (Turbulent eddy viscosity) از رابطه (۱۳) بدست می‌آید. در این رابطه، F_2 را تابع ترکیبی دوم می‌نامند که به کمک رابطه (۱۴) قابل محاسبه است. همچنین در رابطه (۹)، \tilde{p}_k برای اجتناب از تولید پارامترهای آشفتگی در مناطق بدون تحرک (Stagnation regions) تعریف شده است که از رابطه (۱۵) و (۱۶) بدست می‌آید.

$$\frac{\partial(k)}{\partial t} + \nabla \cdot (Uk) = \nabla \cdot [(v + \sigma_k v_t) \nabla k] + \tilde{p}_k - \beta^* k \omega \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\frac{\partial(\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (U\omega) = \nabla \cdot [(v + \sigma_\omega v_t) \nabla \omega] + \alpha S^2 - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} (\nabla k) (\nabla \omega) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$CD_{k\omega} = \max(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} (\nabla k) (\nabla \omega), 10^{-10}) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$v_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\tilde{p}_k = \min(p, 10^* \beta^* \rho k \omega) \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$p_k = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\alpha = \alpha_1 F + \alpha_2 (1 - F) \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

زیر قرار گرفته و ضرائب مدل $k - \omega SST$ را محاسبه می‌کنند. کلیه ضرائب ثابت به کار رفته در معادلات بالا در جدول ۱ آورده شده است.

این معادلات F_1 تابع ترکیبی بوده که به صورت روابط (۱۱) و (۱۲) تعریف می‌گردد.

در معادلات (۱۱) و (۱۲)، γ برابر با فاصله نزدیک‌ترین دیوار به این نقطه است. F_1 در فواصل بسیار دور از دیواره‌ها برابر با صفر بوده (مدل $k - \varepsilon$) و در لایه مرزی و نزدیکی جداره‌ها به عدد یک (مدل $k - \omega$) تغییر می‌کند. بعد از محاسبه روابط بالا ویسکوزیته

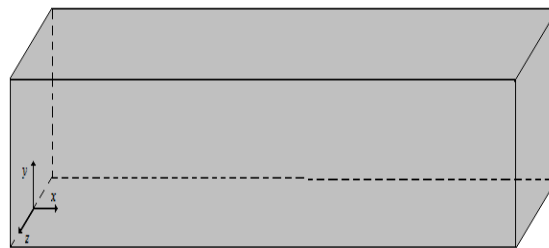
در رابطه (۱۶)، i, j جهت‌های محورهای مختصات هستند. تمامی ضرائب ثابت به کمک رابطه ترکیبی (۱۶) بدست می‌آیند که به صورت خودکار بین مدل‌های $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ تغییر می‌کنند به این صورت که به جای α (رابطه ۱۷) مقادیر ضرائب ثابت جدول

جدول ۱- ضرائب ثابت در مدل k- ω sst
Table 1- Fixed coefficient in k- ω sst model

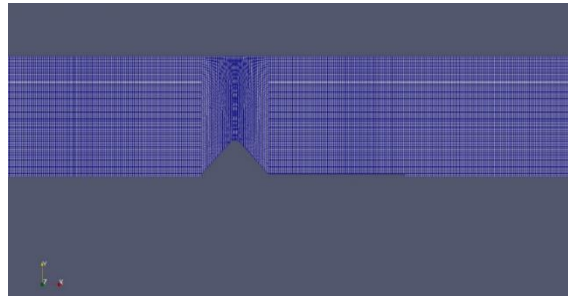
β^*	α_1	β_1	σ_{k1}	$\sigma_{\omega 1}$	α_2	β_2	σ_{k1}	$\sigma_{\omega 2}$
0.09	5.9	3.40	0.85	0.5	0.44	0.0828	1	0.856

امکان ریز کردن شبکه در مناطق با گرادیان زیاد بدون صرف زمان قابل توجهی اشاره کرد (Balogh et al., 2012).
هندسه مسئله در این مدل‌سازی یک فلووم سه‌بعدی است که با فضایی شبیه یک مکعب مستطیل شبیه‌سازی شده است.

در این شبیه‌سازی از بلوک‌های شش وجهی (Hexahedral) جهت شبکه بندی هندسه استفاده گردید. از مزیت‌های این شبکه بندی می‌توان به عدم وجود محدودیت در شکل حجم کنترل و



شکل ۱- فضای شبیه سازی
Fig. 1- Simulation space



شکل ۲- نمایش مش بندی فلوام و اطراف سازه دایک

Fig. 2 - Show the flum meshes and around the dyke structure

در شبیه سازی پروژه خود از مش یکنواخت با سایز یکنواخت (۰/۰۱) استفاده شد. در این نرم افزار برای کنترل پایداری از عدد کورانت برای محاسبه حداکثر گام زمانی استفاده گردید. عدد کورانت میزان سرعت عبوری سیال از هر سلول را بیان می کند. اگر این عدد از یک بزرگتر باشد سرعت ذره بسیار بالاست (Farzin et al., 2013). در این صورت ذره در کمتر از یک گام زمانی از سلول عبور می کند. این قضیه به ناپایداری حل می انجامد. عدد کورانت در این تحقیق ۰/۸۵ و بر اساس آن گام زمانی ۰/۰۰۰۲ ثانیه در نظر گرفته شد. این گام زمانی با توجه به پیشینه عددی کورانت محاسبه گردید و قابل افزایش است. در این شبیه سازی از الگوریتم *pimple* برای کوپل فشار-سرعت استفاده می شود. برای ترم مشتق اول زمان از طرح گسسته سازی مرتبه ی دوم Euler - Crankicolson و برای ترم های گرادیان و لاپلاسیان، از طرح درون یابی Gauss Linear استفاده گردید. برای ترم های دیورژانس نیز طرح مرتبه اول Gauss Upwind به کار گرفته شد.

برای انتخاب شرایط مرزی به شرح زیر اقدام شد:

عمق جریان در مرز بالادست به دو قسمت آب و هوا تقسیم بندی و شرط سرعت ورودی به آن ها اعمال گردید. در مرز بالای فضای شبیه سازی شرط مرزی فشار اتمسفر و برای مرز پایین دست نیز شرط مرزی گرادیان صفر (Zero Gradient) انتخاب گردیدند. در مورد بستر شرط مرزی لغزشی و برای دیواره ها شرط مرزی غیر لغزشی استفاده گردید.

دو روش در درک نیروی موج اعمال شده به هر مانع طبیعی وجود دارد. یکی استفاده از تئوری موج و دوم با استفاده از معادله های اساسی دینامیک سیال است که در اینجا با استفاده از معادلات دینامیک سیال به بررسی نیروی کشش موج بر روی سازه پرداخته شد.

برای بررسی نیروی کشش موج با استفاده از معادلات دینامیک سیال از نرم افزار Open FOAM استفاده شد.

به منظور مدل سازی سازه های ساحلی و امواج، از نرم افزارهای Open Source Field Operation and (Open Foam Manipulation) و CATIA (Computer Aided Three-

این مدل سازی، پارامترها به سه دسته طبقه بندی می شوند. دسته اول پارامترهای مربوط به کانال اصلی نظیر، ارتفاع (y) و عرض کانال (B) و ارتفاع آب پایه یا همان عمق ساکن آب پای ساحلی (y₀). دسته دوم پارامترهای مربوط به سازه ساحلی مورد بررسی مانند، طول ساحل مورد بررسی (L)، موقعیت قرارگیری سازه روی ساحل (x)، ارتفاع سازه (H_s) و شیب وجه جلویی سازه (S) که در این جا مساوی شیب وجه پشتی سازه است. دسته آخر پارامترهای مربوط به موج است که عبارتند از: ارتفاع موج ورودی (H_{in}) و سرعت موج ورودی (V). این پارامترها مورد ارزیابی قرار می گیرند تا شرایط بهینه، از نظر کاهش حداکثری انرژی و میرایی امواج تعیین گردد. به طور کلی در پدیده مورد بررسی در این پژوهش، فرض بر این است که با پیش روی موج در ناحیه آب های کم عمق (Shallow water)، سرعت ذرات موج تحت تاثیر کاهش ژرفا (کاهش عمق آب) افزایش یافته، سرعت انتشار (پیشروی) موج نیز کاهش می یابد. در لحظه ای که سرعت ذرات موج با سرعت انتشار موج برابر گردد، موج تقارن خود را از دست داده، تیزی آن افزایش می یابد و در یک حالت حدی، ناپایدار شده و شکست موج حاصل گردد (Sorenson, 2006). امواج سونامی به دلیل طول موج های بسیار بلند (بیش از صد کیلومتر)، حتی در آب های بسیار عمیق (به علت نسبت عمق آب به طول موج کمتر از ۰/۰۵) تحت عنوان امواج آب کم عمق یا امواج بلند (Long Wave) مورد بررسی قرار می گیرند. در آب های کم عمق با توجه به تئوری امواج دامنه کوتاه، سرعت موج مستقل از دوره زمانی موج بوده و فقط وابسته به عمق آب می باشد (Dean and Dalrymple, 1991). امواج بلند از جمله سونامی در آزمایشگاه غالباً به صورت یک موج منفرد چه از لحاظ تئوری و چه از لحاظ فیزیکی مدل می شوند (Mohammadi, 2009). از این رو در مدل سازی این امواج صرفاً ارتفاع موج مدل می گردد (Fathi-Moghadam et al., 2018).

روش کار به این صورت است که در ابتدا اطلاعات مرتبط تهیه و جمع آوری می گردد. سپس جهت تولید هندسه و شبکه محاسباتی اقدام می گردد. در مرحله بعد پارامترهای حل عددی در نرم افزار

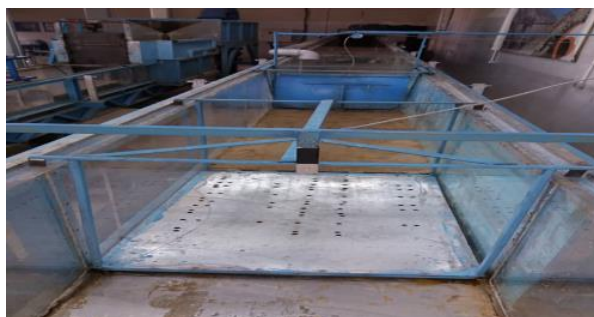
ابتدایی و انتهایی وجود دارد. شکل (۴) نمای کلی کانال را نشان می‌دهد.

دایک مورد استفاده برای مدل‌سازی دارای مشخصات هندسی از قبیل ارتفاع (H_s)، قاعده پایین (L_b)، قاعده بالا (L_c) و شیب وجه بالادست $Z:1$ است (شکل ۵).

در ادامه در جدول (۲) شرح پارامترهای مورد استفاده در آزمایش‌ها و محدوده آن‌ها ارائه شده است.

تنظیم می‌شود و در ادامه شبیه‌سازی برخورد موج با سازه‌ی دایک ساحلی انجام خواهد شد. در نهایت داده‌های خروجی از مدل عددی تحلیل و بررسی شده و با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه خواهد شد. نتایج آزمایشگاهی از آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد (Rezapooran et al., 2023) به دست آمده است. آزمایش‌ها با مقیاس $1:50$ در فلوم (کانال) با طول 20 متر، عرض 60 سانتی‌متر و ارتفاع 60 سانتی‌متر انجام شده است. فلوم دارای کف فلزی و دیواره‌های شیشه‌ای از جنس فایبرگلاس است و امکان تغییر شیب کف آن به کمک دو عدد چک

صفحه متحرک ساحلی



دریچه ایجاد موج



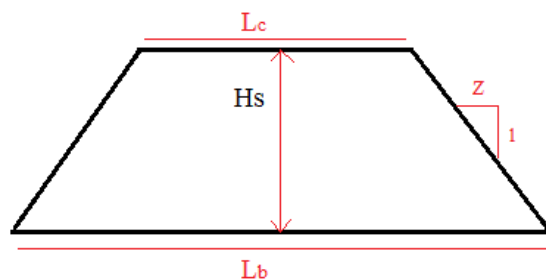
شکل ۳- نمایی از فلوم موج در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد

Fig. 3- View of wave flume in Shahrekord University hydraulic laboratory



شکل ۴- برخورد و عبور آب از روی دایک در آزمایشگاه

Fig.4- Collision and passage of water over the dyke in the laboratory



شکل ۵- طرح شماتیک دایک ساحلی مورد نظر جهت مدل سازی

Fig. 5 - Schematic design of coastal dykes for modeling

جدول ۲- محدوده تغییرات پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش

Table 2- Range of changes in the parameters studied in this research

parameter	The scope of the investigated parameter
L_c	3 cm
L_b	33 cm
L	1 m
$S=1/z$	$z = 1, 1.5, 2$
x	$0, L/2, L$
H_s (cm)	7.5, 10, 15
H_w (cm)	6, 7.5, 9, 10.5, 12
height of water in tank(cm)	39, 34.7, 31.5, 24.2, 17

۴- کمک به فهم فیزیک مسئله و استخراج معادلات حاکم با استفاده از آنالیز ابعادی می توان پدیده را به صورت رابطه ای بین چند گروه بی بعد که تعدادشان کمتر از تعداد متغیرها است فرموله کرد. به این ترتیب تعداد آزمایشات لازم به منظور تعیین رابطه بین متغیرها کمتر شده و غالباً نوع آزمایشات نیز ساده تر می شوند. روش های مختلفی برای تحلیل ابعادی وجود دارد که از جمله آنها می توان به نظریه باکینگهام، روش تشابه و استفاده از معادله دیفرانسیل اشاره کرد. اگرچه تئوری باکینگهام نسبت به سایر روش ها دارای راندمان کمتری است، اما به دلیل اینکه کاربرد آن آسان تر است در این پژوهش نیز از این روش برای تحلیل داده ها استفاده شده است.

با توجه به هدف این پژوهش در مدل کردن امواج بلند در نزدیکی ساحل و با توجه به تئوری موج حاکم، از شبیه سازی مدل موج منفرد در این جا استفاده شده است. در این روش شبیه سازی موج، صرفاً بر اساس ارتفاع مشخصه موج عمل می شود در نتیجه پارامترهای موج بر این اساس انتخاب گردید. در جدول ۳ پارامترهای موثر بر میرایی موج و نیروی موج آورده شده است.

در این پژوهش بطور کلی با توجه به سه شکل مختلف برای موج شکن و سه حالت برای موقعیت قرارگیری سازه روی ساحل و پنج ارتفاع مختلف موج در نهایت تعداد کل آزمایش ها، معادل ۴۵ آزمایش برآورد شد.

آنالیز ابعادی تکنیک بی بعد سازی کمیت ها به منظور تجزیه تحلیل و تفسیر داده ها است. با استفاده از نمایش داده های بی بعد شده می توان حجم زیادی از جداول خروجی ها را در یک مجموعه منحنی و یا حتی یک منحنی نمایش داد. تحلیل ابعادی روشی برای کاهش تعداد و پیچیدگی متغیرهای آزمایشگاهی موثر بر یک پدیده فیزیکی با استفاده از تکنیک متراکم سازی است. با بهره گیری از تحلیل ابعادی می توان به تجزیه و تحلیل مسائل مکانیک سیالات با استفاده از پارامترها و متغیرهای بی بعد پرداخت. از آنالیز ابعادی در حالات زیر می توان استفاده کرد:

- ۱- انتقال از یک سیستم آحاد به سیستم دیگر
- ۲- کاهش تعداد متغیرهای لازم در یک برنامه آزمایشگاهی
- ۳- تعیین اصول طراحی مدل ها با استفاده از مفهوم تشابه و تعیین مقیاس لازم برای خواص سیال و ابعاد مختلف فیزیکی

جدول ۳- معرفی پارامترهای موثر بر میرایی و نیروی موج

Table3 - Introduction of parameters affecting damping and wave force

Index	Dimention	parameter
H_w	L	Wave height
H_{dam}	L	Tank height
H_s	L	Structure height
z	-	Structure slope
X	L	Position of structure
V_w	LT^{-1}	Wave velocity
ρ_w	ML^{-3}	Mass density
μ_w	$ML^{-1}T^{-1}$	Dynamic viscosity
g	LT^{-2}	gravity
σ	MT^{-2}	Surface tension
F	MLT^{-2}	Wave tensile force

نوشت سپس دو کسر $\frac{H_{w2}}{H_s}$ و $\frac{H_{w1}}{H_s}$ را داریم که از تقسیم آن‌ها بر هم مقدار $\frac{H_{w1}}{H_{w2}}$ حاصل می‌شود. اگر تفاضل ارتفاع آب قبل و بعد را تقسیم بر ارتفاع آب قبل ضرب در صد بکنیم (* $\frac{H_{w1}-H_{w2}}{H_{w1}}$) (100 درصد میرایی موج به دست می‌آید که در ادامه از آن استفاده خواهد شد.

به منظور مقایسه و ارزیابی میزان نیروی وارد به سازه و ارتفاع موج ثبت شده در OpenFOAM با مقادیر آزمایشگاهی، از معیار-های آماری، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، نرمال سازی جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE) و ضریب همبستگی (R^2)، به صورت روابط (۲۱) تا (۲۳) استفاده گردید. که O_i داده‌ی عددی، P_i مقدار آزمایشگاهی، N تعداد داده‌ها، \bar{O}_m مقدار میانگین داده-های عددی و \bar{P}_m مقدار میانگین آزمایشگاهی، O_{max} بیش‌ترین مقدار داده‌های عددی و O_{min} کم‌ترین مقدار داده‌های عددی است.

پارامترهای موثر در مسئله میرایی موج و نیروی موج به صورت رابطه (۱۸) است:

با توجه به ثابت بودن عرض بالایی و پایینی سازه می‌توان گفت که شیب سازه و ارتفاع سازه به صورت متناظر با هم تغییر کرده و می‌توان یکی از آن‌ها را نوشت. ارتفاع مخزن و ارتفاع موج نیز به همین صورت است یعنی برای دستیابی به ارتفاع موج مورد نظر ارتفاع مخزن تغییر می‌کند پس یکی از آن‌ها را می‌نویسیم. به خاطر افقی بودن ساحل می‌توان از شیب ساحل هم صرف نظر کرد (رابطه ۱۹).

با استفاده از روش پی‌باکینگهام در تحلیل ابعادی و انتخاب H_s, ρ_w, V_w به عنوان متغیرهای تکراری و انتخاب سیستم MLT ، گروه‌های بدون بعد مطابق رابطه (۲۰) استخراج گردید.

نسبت بدون بعد $\frac{H_w}{H_s}$ ، در واقع نسبت بدون بعد ارتفاع موج است که در ادامه از آن استفاده خواهد شد. مقدار H_w را می‌توان به دو شکل H_{w1} (ارتفاع آب قبل سازه) و H_{w2} (ارتفاع آب بعد سازه)

$$f_1(H_w, H_{dam}, H_s, z, X, V_w, \rho_w, \mu_w, g, \sigma, S, F) = 0 \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$f_1(H_w, H_s, X, V_w, \rho_w, \mu_w, g, \sigma, F) = 0 \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$g\left(\frac{H_w}{H_s}, \frac{X}{H_s}, \frac{\mu_w}{V_w \cdot H_s \cdot \rho_w}, \frac{g \cdot H_s}{V_w^2}, \frac{\sigma}{V_w^2 \cdot H_s \cdot \rho_w}, \frac{F}{V_w^2 \cdot H_s^2 \cdot \rho_w}\right) = 0 \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2)} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{O_{max} - O_{min}} \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_m)(P_i - \bar{P}_m)}{(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_m)^2)^{0.5} (\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_m)^2)^{0.5}} \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، نشانگر بالا بودن دقت پیش‌بینی است. همچنین مقدار ضریب همبستگی بین ۱- تا ۱ می‌باشد و مقدار ۱ بیان‌کننده پیش‌بینی بدون خطا است.

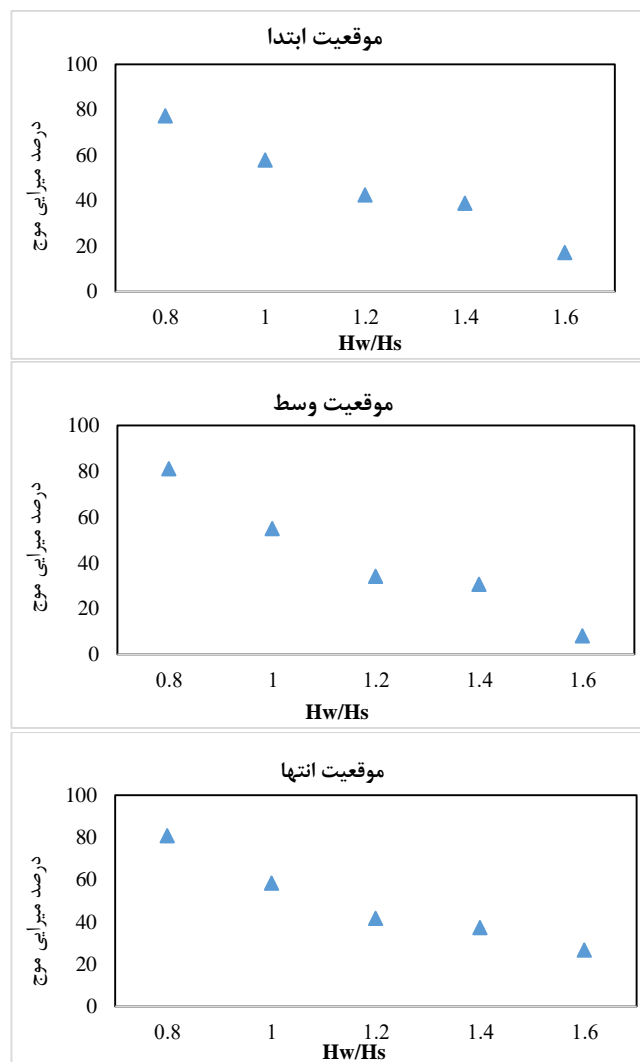
۳. نتایج و بحث

آنالیز حساسیت مش بندی در گام نخست انجام شد. برای رسیدن به همگرایی در مقدار یک متغیر، سایز مش را تغییر داده و جواب بررسی گردید سپس دوباره سایز مش تغییر یافت و این فرایند چندین بار تکرار گردید تا عدم تاثیر سایز مش بر نتایج حاصل گردید از این مرحله به بعد جوابها خیلی به هم نزدیک شده و عملاً تغییر سایز مش تاثیر محسوس در نتیجه ندارد و این سایز مش به عنوان سایز مش مدل های مورد بررسی انتخاب گردید. در اینجا بررسی ها برای متغیر ارتفاع موج انجام گرفت.

یکی از مسائل مهم در شبیه سازی های جریان آشفتنه، خصوصاً در مواقعی که پدیده های نزدیک دیواره دارای اهمیت است، حضور تعداد کافی سلول در لایه مرزی، برای مشاهده گرادیان و پروفیل سرعت است. در بیشتر جریان ها، لایه مرزی به صورت بی بعد در گستره ای از y^+ قرار دارد. با توجه به گرادیان بالای سرعت در این فاصله، بسته به نوع دیدگاه نزدیک دیواره، حداقل تعداد مشخصی سلول در راستای عمود بر سطح نیاز است. پس از شبیه سازی مشخص شد که مقدار y^+ برای دیوار سمت چپ برابر با $32/016$ ، دیوار سمت راست $35/47$ ، بستر $44/2$ و دایک $52/53$ است.

شکل ۶- لحظه ی شروع آزمایش ($t=0$)

Fig. 6- The moment of starting

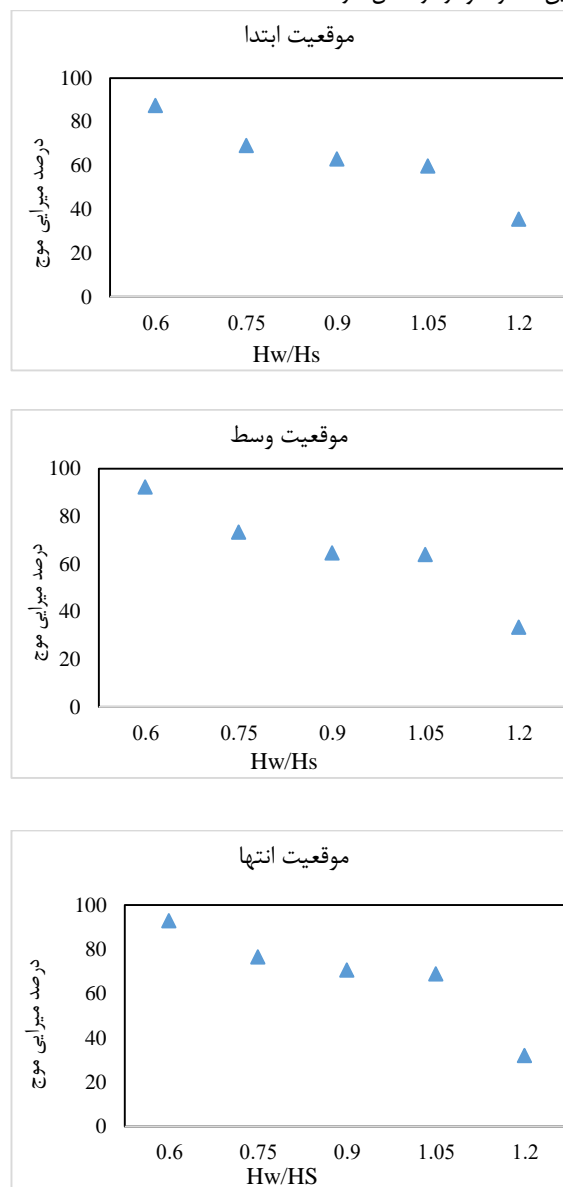


شکل ۷- درصد میرایی موج برای سازه ی ۷/۵ در سه موقعیت

Fig. 7- Percentage of wave damping for structures in three positions

ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی متر روند کاهشی دارد و سازه درصد کمتری از ارتفاع آب را کاهش می دهد. برای سازه ۷/۵ از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی متر، درصد میرایی موج برای موقعیت ابتدا از ۷۷/۲۲ تا ۱۷/۱۳ درصد، موقعیت وسط از ۸۱/۲ تا ۸/۱۵ درصد و موقعیت انتها از ۸۰/۷۴ تا ۲۶/۶ درصد کمتر شده است. بیشترین درصد میرایی موج معمولا برای ارتفاع موج ۶ و کمترین برای ۱۲ است. بیشترین درصد میرایی موج برای سازه ۷/۵ مربوط به ارتفاع موج ۶ سانتی متر و موقعیت وسط است که برابر با ۸۱/۲ درصد است. کمترین درصد میرایی موج برای سازه ۷/۵ مربوط به ارتفاع موج ۱۲ سانتی متر و موقعیت وسط است که برابر با ۸/۱۵ درصد است.

جهت بررسی تاثیر دایک در میرایی موج، در شکل شماره ۶ وضعیت موج برخوردی به سازه در لحظه ابتدایی آزمایش نمایش داده شده است. شکل ۷ نشان دهنده درصد میرایی موج برای سازه ۷/۵ در سه موقعیت است. محور افق بیانگر نسبت بدون بعد موج یا ارتفاع موج تقسیم بر ارتفاع سازه $(\frac{H_w}{H_s})$ است. محور قائم نیز بیانگر درصد میرایی موج $(100 * \frac{\text{ارتفاع بعد - ارتفاع قبل}}{\text{ارتفاع قبل}})$ است. با افزایش ارتفاع موج، ارتفاع آب قبل از سازه افزایش می یابد اما تاثیر آن بر ارتفاع آب بعد از سازه بیشتر است زیرا در یک ارتفاع ثابت از سازه وقتی ارتفاع موج زیاد شود میزان آب عبوری افزایش می یابد. بنابراین وقتی ارتفاع آب بعد از سازه افزایش یابد اختلاف آن با ارتفاع قبل کاهش پیدا می کند و به همین خاطر نمودار در شکل ۷ از

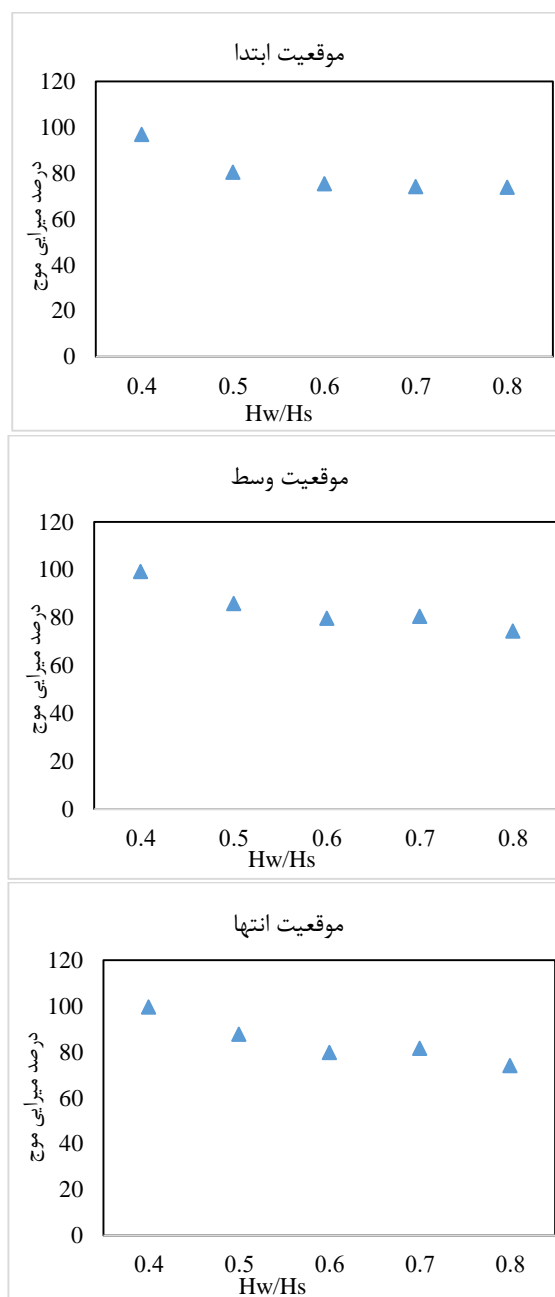


شکل ۸- درصد میرایی موج برای سازه ۱۰ در سه موقعیت

Fig. 8- Percentage of wave damping for structure 10 in three positions

ابتدا از ۸۷/۴۸ تا ۳۵/۵۹ درصد، موقعیت وسط از ۹۴/۴۲ تا ۳۳/۵۶ درصد و موقعیت انتها از ۹۲/۹۴ تا ۳۲/۰۷ درصد، کمتر شده است. بیشترین درصد میرایی موج معمولا برای ارتفاع موج ۶ و کمترین برای ۱۲ است. بیشترین درصد میرایی موج برای سازه‌ی ۱۰ مربوط به ارتفاع موج ۶ سانتی‌متر و موقعیت انتها است که برابر با ۹۲/۹۴ درصد است. کمترین درصد میرایی موج برای سازه‌ی ۱۰ مربوط به ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر و موقعیت انتها است که برابر با ۳۲/۰۷ درصد است.

شکل ۸ نشان‌دهنده درصد میرایی موج برای سازه‌ی ۱۰ در سه موقعیت است. با افزایش ارتفاع موج، ارتفاع آب قبل از سازه افزایش می‌یابد اما تاثیر آن بر ارتفاع آب بعد از سازه بیشتر است زیرا در یک ارتفاع ثابت از سازه وقتی ارتفاع موج زیاد شود میزان آب عبوری افزایش می‌یابد. بنابراین وقتی ارتفاع آب بعد از سازه افزایش یابد اختلاف آن با ارتفاع قبل کاهش پیدا می‌کند و به همین خاطر نمودار در شکل ۸ از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی‌متر روند کاهشی دارد و سازه درصد کمتری از ارتفاع آب را کاهش می‌دهد. برای سازه ۱۰ از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی‌متر، درصد میرایی موج برای موقعیت



شکل ۹- درصد میرایی موج برای سازه‌ی ۱۵ در سه موقعیت

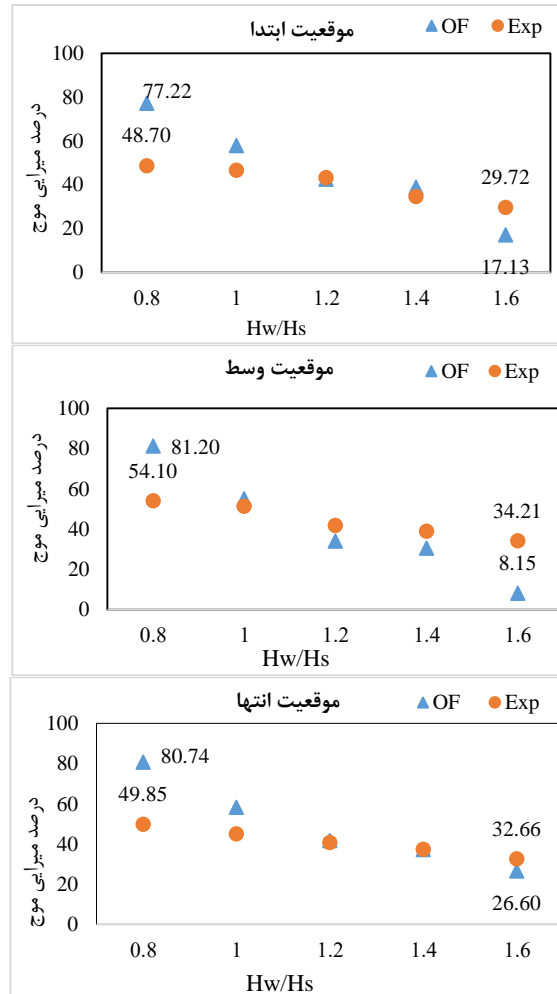
Fig. 9 - Wave damping percentage for structure 15 in three positions

ارتفاع موج ۱۲ سانتی متر و موقعیت ابتدا است که برابر با ۷۳/۸۷ درصد است.

در کل می توان گفت که سازه ی با ارتفاع ۱۵ سانتی متر کارایی بیشتری در میرایی موج دارد یا درصد بیشتری از ارتفاع آب را کاهش می دهد. بیشترین درصد میرایی موج مربوط به سازه ۱۵، موقعیت انتها و ارتفاع موج ۶ سانتی متر است که برابر ۹۹/۵۳ درصد است. کمترین درصد میرایی موج مربوط به سازه ۷/۵، موقعیت وسط و ارتفاع موج ۱۲ سانتی متر است که برابر ۸/۱۴ درصد است.

پس از بررسی داده های ارتفاع محاسبه شده در نرم افزار OpenFOAM و ارائه ی نمودارها و جدول های مربوطه به مقایسه ی داده های ارتفاع و درصد میرایی موج محاسبه شده در OpenFOAM و مقادیر آزمایشگاهی (Rezapooran et al, 2023) اقدام شد. نتایج آزمایشگاهی توسط رضاپوران در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد برداشت شده است.

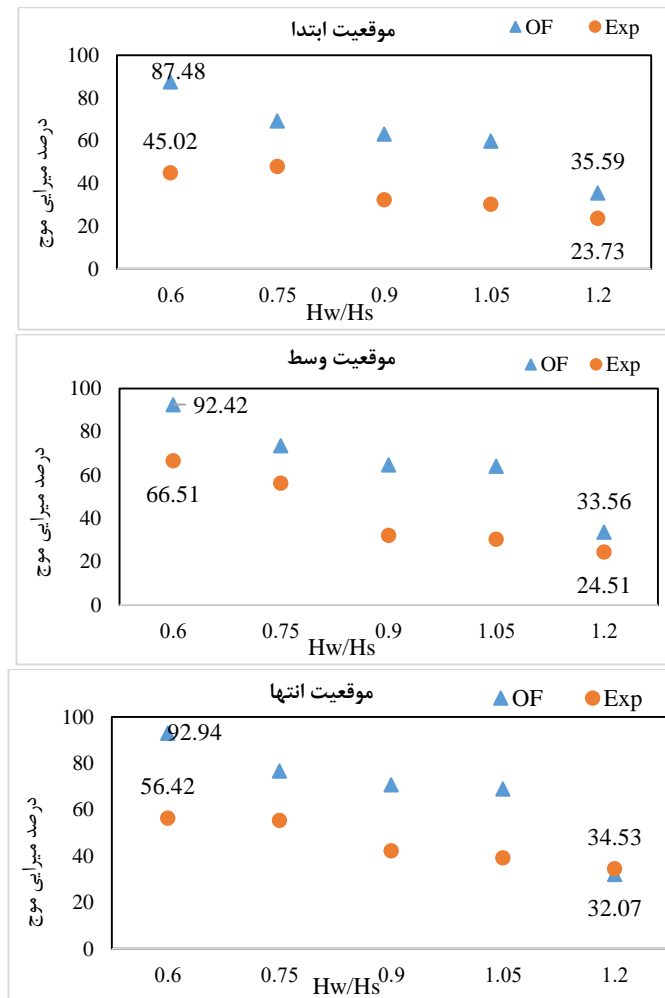
شکل ۹ نشان دهنده درصد میرایی موج برای سازه ی ۱۵ در سه موقعیت است. با افزایش ارتفاع موج، ارتفاع آب قبل از سازه افزایش می یابد اما تاثیر آن بر ارتفاع آب بعد از سازه بیشتر است زیرا در یک ارتفاع ثابت از سازه وقتی ارتفاع موج زیاد شود میزان آب عبوری افزایش می یابد. بنابراین وقتی ارتفاع آب بعد از سازه افزایش یابد اختلاف آن با ارتفاع قبل کاهش پیدا می کند و به همین خاطر نمودار در شکل ۹ از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی متر روند کاهشی دارد و سازه درصد کمتری از ارتفاع آب را کاهش می دهد. برای سازه ۱۵ از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی متر، درصد میرایی موج برای موقعیت ابتدا از ۹۶/۸۸ تا ۷۳/۸۷ درصد، موقعیت وسط از ۹۹/۱۹ تا ۷۴/۳۷ درصد و موقعیت انتها از ۹۹/۵۳ تا ۷۴/۱۲ درصد، کمتر شده است. بیشترین درصد میرایی موج معمولا برای ارتفاع موج ۶ و کمترین برای ۱۲ است. بیشترین درصد میرایی موج برای سازه ی ۱۵ مربوط به ارتفاع موج ۶ سانتی متر و موقعیت انتها است که برابر با ۹۹/۵۳ درصد است. کمترین درصد میرایی موج برای سازه ی ۱۵ مربوط به



شکل ۱۰- مقایسه درصد میرایی موج بین مدل عددی و آزمایشگاهی برای سازه ی ۷/۵ در سه موقعیت
 Fig. 10 - Comparison of wave damping percentage between numerical and laboratory model for (7.5) structure in three positions

در شکل ۱۱ مقایسه‌ی درصد میرایی موج بین مدل عددی و آزمایشگاهی برای سازه ۱۰ را در سه موقعیت مشاهده می‌کنیم. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان گفت که مدل عددی ازدقت قابل قبولی برخوردار است و تطبیق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد اما سازه‌ی ۱۰ به نسبت دو سازه‌ی دیگر تطبیق کمتری دارد. با توجه به ثابت بودن ارتفاع سازه با افزایش ارتفاع موج میزان درصد میرایی موج $(100 * \frac{\text{ارتفاع بعد - ارتفاع قبل}}{\text{ارتفاع قبل}})$ کاهش می‌یابد (چون میزان آب عبوری افزایش یافته و اختلاف آن با ارتفاع قبل کم می‌شود). به همین خاطر نمودار از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی‌متر روند کاهشی دارد. بیشترین اختلاف بین داده‌های مدل عددی و آزمایشگاهی در سازه‌ی ۱۰ مربوط به موقعیت وسط و ارتفاع موج ۱۰/۵ سانتی‌متر است. مقدار نرمال سازی جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE) برای سازه‌ی با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر در سه موقعیت ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۰/۲۴۸ ، ۰/۲۴۱ و ۰/۲۸۲ است.

در شکل ۱۰ مقایسه‌ی درصد میرایی موج بین مدل عددی و آزمایشگاهی برای سازه ۷/۵ را در سه موقعیت مشاهده می‌کنیم. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان گفت که مدل عددی ازدقت قابل قبولی برخوردار است و تطبیق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. با توجه به ثابت بودن ارتفاع سازه با افزایش ارتفاع موج میزان درصد میرایی موج $(100 * \frac{\text{ارتفاع بعد - ارتفاع قبل}}{\text{ارتفاع قبل}})$ کاهش می‌یابد (چون میزان آب عبوری افزایش یافته و اختلاف آن با ارتفاع قبل کم می‌شود). به همین خاطر نمودار از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی‌متر روند کاهشی دارد. بیشترین اختلاف بین داده‌های مدل عددی و آزمایشگاهی در سازه‌ی ۷/۵ مربوط به موقعیت وسط و ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر است. مقدار نرمال سازی جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE) برای سازه‌ی با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر در سه موقعیت ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۰/۲۴۸ ، ۰/۲۴۱ و ۰/۲۸۲ است.

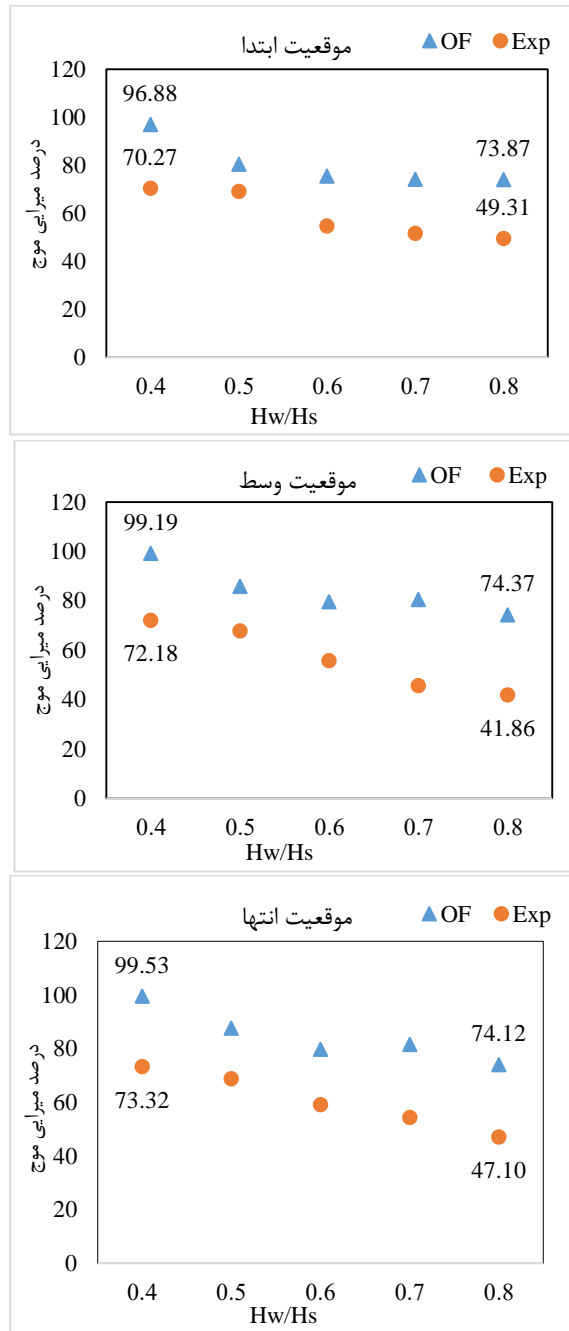


شکل ۱۱- مقایسه درصد میرایی موج بین مدل عددی و آزمایشگاهی برای سازه‌ی ۱۰ در سه موقعیت

Fig. 11- Comparison of wave damping percentage between numerical and laboratory models for structure 10 in three position

می‌شود). به همین خاطر نمودار از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی‌متر روند کاهشی دارد. بیشترین اختلاف بین داده‌های مدل عددی و آزمایشگاهی در سازه‌ی ۱۵ مربوط به موقعیت وسط و ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر است. مقدار نرمال سازی جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE) برای سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در سه موقعیت ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۰/۹۴۹۶ ، ۱/۱۲۴ و ۰/۹۵۴ است.

در شکل ۱۲ مقایسه‌ی درصد میرایی موج بین مدل عددی و آزمایشگاهی برای سازه ۱۵ را در سه موقعیت مشاهده می‌کنیم. با توجه به شکل ۱۲ می‌توان گفت که مدل عددی از دقت قابل قبولی برخوردار است و تطبیق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. با توجه به ثابت بودن ارتفاع سازه با افزایش ارتفاع موج میزان درصد میرایی موج $(100 * \frac{\text{ارتفاع بعد - ارتفاع قبل}}{\text{ارتفاع قبل}})$ کاهش می‌یابد (چون میزان آب عبوری افزایش یافته و اختلاف آن با ارتفاع قبل کم



شکل ۱۲- مقایسه درصد میرایی موج بین مدل عددی و آزمایشگاهی برای سازه‌ی ۱۵ سانتی‌متر در سه موقعیت
 Fig. 12- Comparison of wave damping percentage between numerical and laboratory models for structure 15 cm in three positions

برای سازه ۱۰ از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی متر، درصد میرایی موج برای موقعیت ابتدا از ۸۷/۴۸ تا ۳۵/۵۹ درصد، موقعیت وسط از ۹۲/۴۲ تا ۳۳/۵۶ درصد و موقعیت انتها از ۹۲/۹۴ تا ۳۲/۰۷۳ درصد، کمتر شده است.

برای سازه ۱۵ از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی متر، درصد میرایی موج برای موقعیت ابتدا از ۹۶/۸۸ تا ۷۳/۸۷ درصد، موقعیت وسط از ۹۹/۱۹ تا ۷۴/۳۷ درصد و موقعیت انتها از ۹۹/۵۳ تا ۷۴/۱۲ درصد، کمتر شده است.

در کل می توان گفت که سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی متر کارایی بیشتری در میرایی موج دارد یا درصد بیشتری از ارتفاع آب را کاهش می دهد. بیشترین درصد میرایی موج مربوط به سازه ۱۵، موقعیت انتها و ارتفاع موج ۶ سانتی متر است که برابر ۹۹/۵۳ درصد است. کمترین درصد میرایی موج مربوط به سازه ۷/۵، موقعیت وسط و ارتفاع موج ۱۲ سانتی متر است که برابر ۸/۱۴ درصد است.

با توجه به شکل‌ها می توان گفت که مدل عددی در برآورد ارتفاع موج از دقت قابل قبولی برخوردار است. سازه‌ی ۷/۵ نسبت به دو سازه‌ی دیگر تطبیق بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی دارد. کمترین مقدار نرمال سازی جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE) برای هر سه سازه مربوط به سازه‌ی با ارتفاع ۷/۵ سانتی متر و موقعیت وسط است که برابر با ۰/۲۴ است.

در کل با توجه به شکل‌ها می توان گفت که مدل عددی از دقت قابل قبولی برخوردار است. سازه‌ی ۷/۵ نسبت به دو سازه‌ی دیگر از تطبیق بیشتری برخوردار است. کمترین مقدار نرمال سازی جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE) برای هر سه سازه مربوط به سازه‌ی با ارتفاع ۷/۵ سانتی متر و موقعیت وسط است که برابر با ۰/۲۴۱ است.

۴. نتیجه گیری

با افزایش ارتفاع موج، ارتفاع آب قبل از سازه افزایش می یابد اما تاثیر آن بر ارتفاع آب بعد از سازه بیشتر است زیرا در یک ارتفاع ثابت از سازه وقتی ارتفاع موج زیاد شود میزان آب عبوری افزایش می یابد. بنابراین وقتی ارتفاع آب بعد از سازه افزایش یابد اختلاف آن با ارتفاع قبل کاهش پیدا می کند و به همین خاطر نمودار درصد میرایی موج، از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی متر روند کاهشی دارد و سازه درصد کمتری از ارتفاع آب را کاهش می دهد. برای سازه ۷/۵ از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی متر، درصد میرایی موج برای موقعیت ابتدا از ۷۷/۲۲ تا ۱۷/۱۳ درصد، موقعیت وسط از ۸۱/۲ تا ۸/۱۴ درصد و موقعیت انتها از ۸۰/۷۴ تا ۲۶/۵۹ درصد کمتر شده است. بیشترین درصد میرایی موج معمولاً برای ارتفاع موج ۶ و کمترین برای ۱۲ است.

References:

- Akgul, M.A., Yilmazer, D., Oguz, E., Kabdasli, M.S. and Yagci, O., 2013. The effect of an emergent vegetation (ie Phragmites Australis) on wave attenuation and wave kinematics. *Journal of Coastal Research*, 65, pp.147-152. DOI: 10.2112/SI65-026.1
- Alkhalidi, M., Neelamani, S. and Assad, A.I.A.H., 2015. Wave pressures and forces on slotted vertical wave barriers. *Ocean Engineering*, 108, pp.578-583. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.044>. (In Persian).
- Amini, A. and Solaimani, N., 2018. The effects of uniform and nonuniform pile spacing variations on local scour at pile groups. *Marine Georesources & Geotechnology*, 36(7), pp.861-866. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2017.1392658>.
- An, K. and Fung, J.C.H., 2018. An improved SST $k-\omega$ model for pollutant dispersion simulations within an isothermal boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 179, pp.369-384. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.06.010>. (In Persian).
- Balogh, M., Parente, A. and Benocci, C., 2012. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an Enhanced $k-\epsilon$ model and wall function formulation: Implementation and comparison for fluent and OpenFOAM. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 104, pp.360-368. doi: 10.1016/j.jweia.2012.02.023.
- Davoodi, L., Fthi Moghadam, M., Ahadiyan, J., Kashefi Poor, S. M., 2017. The Effect of Coastal Forest on Variations of Broken Wave Force and Inundation Depth. *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(1-1), pp. 185-199. doi: 10.22055/jise.2017.12966. (In Persian).
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., 1991. *Water wave mechanics for engineers and scientists* (Vol. 2). world scientific publishing company. <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/1232#t=oc>
- Elbisy, M.S., Mlybari, E.M. and Helal, M.M., 2016. Hydrodynamic performance of multiple-row slotted breakwaters. *Journal of Marine Science and Application*, 15, pp.123-135. DOI: 10.1007/s11804-016-1358-6
- Farzin, S., Alizadeh, M. and Hassanzadeh, Y., 2013. Numerical Simulation of Unsteady One-Dimensional Dam-Break Flows Using Tvd Maccormack Scheme. In *7th National Congress on Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan* (Vol. 8). <https://www.academia>.

- edu/download/31502285/7NCCE_article_2013.pdf.
- Fathi-Moghadam, M., Davoudi, L. and Motamedi-Nezhad, A., 2018. Modeling of solitary breaking wave force absorption by coastal trees. *Ocean Engineering*, 169, pp.87-98. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.09.021>.
- Ghanbari Adivi A, and Fathi Moghaddam M., 2015. The effect of vegetation on the group tensile strength of trees and the resistance of cover to coastal waves. *Scientific Journal of Agriculture, Irrigation Science and Engineering*. 38(2), pp. 103-112. Doi:10.22055/JISE.2015.11352. (In Persian).
- Gonçalves, S.C., Anastácio, P.M. and Marques, J.C., 2013. Talitrid and Tyloid crustaceans bioecology as a tool to monitor and assess sandy beaches' ecological quality condition. *Ecological indicators*, 29, pp.549-557. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.035>.
- Gracia, A.D., Rangel-Buitrago, N., Oakley, J.A. and Williams, A.T., 2018. Use of ecosystems in coastal erosion management. *Ocean & coastal management*, 156, pp.277-289. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.07.009>.
- Hashemi Javan S., 2007. *Numerical simulation of the phenomenon of wave failure on submerged breakwater. Master Thesis. String of hydraulic structures*. Tehran School of Civil Engineering. Tehran University of Science and Technology. (In Persian).
- Honarmand, M., Shanehsazzadeh, A., Zandi, M. and Vahida, A., 2019. Numerical Simulation and Experimental Study on Tsunami Propagation and Run-up and the Influence of Submerged Breakwater on Run-up. *Journal of Oceanography*, 9(36), pp.31-38. Doi: 10.29252/JOC.2019.9.625. (In Persian).
- Igarashi, Y., Tanaka, N. and Zaha, T., 2018. Changes in flow structures and energy reduction through compound tsunami mitigation system with embankment and lined piles. *Ocean Engineering*, 164, pp.722-732. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.07.003>.
- Jiang, C., Liu, X., Yao, Y. and Deng, B., 2019. Numerical investigation of solitary wave interaction with a row of vertical slotted piles on a sloping beach. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(1), pp.530-541. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2018.09.007>.
- Jiang, C., Liu, X., Yao, Y., Deng, B. and Chen, J., 2017. Numerical investigation of tsunami-like solitary wave interaction with a seawall. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 11(01), p.1740006. <https://doi.org/10.1142/S1793431117400061>.
- Leewis, L., van Bodegom, P.M., Rozema, J. and Janssen, G.M., 2012. Does beach nourishment have long-term effects on intertidal macroinvertebrate species abundance? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 113, pp.172-181. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.07.021>.
- Li, J., Qi, M. and Fuhrman, D.R., 2019. Numerical modeling of flow and morphology induced by a solitary wave on a sloping beach. *Applied Ocean Research*, 82, pp.259-273. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.11.007>.
- Martins, M.C., Neto, C.S. and Costa, J.C., 2013. The meaning of mainland Portugal beaches and dunes' psammophilic plant communities: a contribution to tourism management and nature conservation. *Journal of Coastal Conservation*, 17, pp.279-299. <https://doi.org/10.1007/s11852-013-0232-9>.
- Menter, F.R., 1992. Influence of freestream values on k-omega turbulence model predictions. *AIAA journal*, 30(6), pp.1657-1659. https://cd.fsbstu.ru/agarbaruk/doc/1992_Menter_Influence%20of%20Freestream%20Values%20on%20k-w%20Turbulence%20Model%20Predictions.pdf
- Mohammadi, S.M., 2009. *Laboratory generation and physics of propagation of solitary waves and water surface depressions* (Doctoral dissertation, Clemson University). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009PhDT.194M/abstract>
- Motamedi Nezhad, A., Fathi-Moghadam, M., 2018. Effect of coast slope on solitary breaking waves attenuation by coastal vegetation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(1), pp. 111-123. doi: 10.22059/ijswr.2018.221628.667585. (In Persian).
- Nielsen, L., 2001. *Newcastle Coastal Zone Management Plan: Coastal Engineering Advice*. Technical report for Umwelt (Australia) Pty Ltd. www.newcastle.nsw.gov.au
- Penttinen, O., Yasari, E. and Nilsson, H., 2011. A pimplefoam tutorial for channel flow, with respect to different LES models. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 23(2), pp.1-23. https://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2011/OlofPenttinen/projectReport.pdf
- Pouriamehr, E., 2017. Study of protection of river banks and introduction and application of different types of breakwaters in the protection of beaches. *International Conference on Contemporary Iranian Civil Engineering, Architecture and Urban Planning*. Tehran, Iran. <https://www.tpbin.com/article/65147>. (In Persian).
- Rezapooran, A., Ghanbariadiivi, E., Fattahi, R., 2023. Laboratory investigation of damping and reduction of sea wave force when hitting a coastal wall structure. *Iranian journal of Marine technology*, 10(2), pp. 62-76. doi: 10.22034/ijmt.2022.543746.1758. (In Persian).

- Smallegan, S.M., Irish, J.L., Van Dongeren, A.R. and Den Bieman, J.P., 2016. Morphological response of a sandy barrier island with a buried seawall during Hurricane Sandy. *Coastal Engineering*, 110, pp.102-110. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.01.005>.
- Sorenson, R.M., 2006. Basic Coastal Engineering. Spring Science and Business Media, New York. <https://doi.org/10.1007/b101261>.
- Stone, B.M. and Shen, H.T., 2002. Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness. *Journal of hydraulic engineering*, 128(5), pp.500-506. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:5\(500\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:5(500)).
- Zarei, M., Fathimoghadam, M., davoodi, L. 2017. Effect of coastal vegetation on attenuation of non-breaking solitary wave force in sloping coast lines. *Irrigation and Water Engineering*, 7(2), pp. 62-75. https://www.waterjournal.ir/article_74028.html?lang=fa. (in Persian)