



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

Original Article



Numerical modeling of the Effect of Cylindrical Obstacles on coastal Waves using OpenFOAM

Fatemeh Ghasemi Pirbalouti ¹, Elham Ghanbari Adivi ^{1*}, Rohollah Fatahi Nafchi¹, Ehsan Khavasi ²

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2. Department of Mechanic Engineering, Faculty of Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran.

* Corresponding Author Email: elhamgh44@gmail.com

Received: 30 August 2022

Revise Date: 18 December 2022

Accepted: 24 December 2022

DOI: 10.22113/JMST.2022.354486.2489

ABSTRACT

One of the coastal protection techniques is the use of breakwaters. This study aims to investigate the effect of pile breakwaters on coastal waves. These breakwaters are similar to a porous structure. They are preferred over other impenetrable coastal structures due to their increased roughness and resistance to the current, their relatively low cost, economic savings, greater environmental compatibility, and preservation of natural landscapes. Considering rigid cylindrical obstacles on the coast with constant slopes, the effect of their roughness on flow patterns and waves by numerical modeling in OpenFOAM software was investigated. The method used in flow modeling is the RANS method and $k-\omega$, SST model.

Modeling was performed in two modes with and without barriers for three different heights of wave. The results were compared with laboratory data. The absorbed force for wave height of 6, 9, and 12 cm in the numerical model was 17.14, 4.23, and 7.86 percent, respectively, with the laboratory model. Also, the mean square root of normal error was 0.07, and the correlation coefficient was 0.99, which indicates the conformity of two numerical and laboratory models and the appropriate performance of Open FOAM software in modeling.

Keywords: Coast protection, Pile breakwater, Wave energy, $k - \omega$, SST

1. INTRODUCTION

Coastal zones are dynamic ecosystems where land meets the sea, characterized by their variability due to natural factors and human activities. Climate change has made these areas more susceptible to extreme weather events and natural disasters, such as storms and flooding. Acknowledging the value of our shores, it is imperative to enhance our understanding of coastal engineering and to implement diverse and effective strategies for shoreline protection. Employing breakwaters is one method of safeguarding our beaches. This research examined the impact of Cylindrical Obstacles on wave patterns through computational simulations conducted in the OpenFOAM software.

2. MATERIALS AND METHODS

The numerical model was set up and executed using Open Foam software. For this two-phase flow issue, the interFoam solver, improved with the Volume of the Fluid method, was utilized for simulations. Turbulence in the flow was represented using the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations and the $k-\omega$ SST

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.



turbulence models. The model was performed in two modes with and without barriers for three different heights of wave. Rigid cylindrical obstacles had a diameter of 0.9 cm and a height of 32 cm. They were contracted at a length and width of 45×45 cm and distances of 15×15 cm, with staggered layout. In all three wave heights, the presence of obstacles greatly causes the force of waves to dissipate relative to the unobstructed state.

3. Results

With wave heights of 6, 9, and 12 cm, the obstacles dissipated 47.17, 68.68, and 76.42 percent more than the unobstructed state of wave force, respectively. As the wave height increases, the obstacles absorb more force. At a wave height of 12 cm, obstacles to a wave height of 9 and 6 cm, respectively, 32.35 and 72.45 (compared to no force dimension) absorbed more power. In the discussion of wave mortality in obstacle scenarios compared to unobstructed scenarios, the ability of obstacles to reduce wave height and its mortality averaged 20.88%. The percentage of wave attenuation decreases with increasing wave height, and obstacles reduce a smaller percentage of water height. The highest decrease in wave height was related to the wave height of 6 cm, and the lowest decrease was related to the wave height of 12 cm by 84.44% and 47.98%, respectively. The presence of obstacles in the path of wave movement causes a decrease in the speed of the wave and creates a separation zone behind the barriers. Therefore, the wave passes through the protected area and enters the coastal area over a longer period.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

The results were compared with laboratory data. The absorbed force for wave height of 6, 9, and 12 cm in the numerical model was 17.14, 4.23, and 7.86 percent, respectively, with the laboratory model. Also, the mean square root of normal error was 0.07, and the correlation coefficient was 0.99, which indicates the conformity of two numerical and laboratory models and the appropriate performance of Open FOAM software in modeling. From the general comparison of the results, the creation of an area with rigid cylindrical barriers on the sea face of the coast helps to protect the coast from the advance of the waves and their flooding.



مقاله پژوهشی

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



مدل سازی عددی تأثیر موانع استوانه‌ای بر امواج ساحلی با استفاده از نرم افزار اپن فوم

فاطمه قاسمی پیربلوطی^۱، الهام قنبری عدیوی^{۱*}، روح الله فتاحی نافچی^۱، احسان خواصی^۲

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

۲. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

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

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/JMST.2022.354486.2489

چکیده

یکی از تکنیک‌های حفاظت ساحلی استفاده از انواع موج‌شکن‌هاست. هدف این پژوهش بررسی اثر موج‌شکن‌های شمعی بر امواج ساحلی است. در این پژوهش با در نظر گرفتن موانع استوانه‌ای صلب در ساحل با شیب ثابت، به بررسی تأثیر زبری ناشی از آن‌ها بر الگوی جریان و امواج با مدل سازی عددی در نرم‌افزار OpenFOAM پرداخته شد. روش مورد استفاده در مدل سازی جریان روش RANS و مدل SST، $k - \omega$ است. مدل سازی‌ها در دو حالت با و بدون حضور موانع برای ۳ ارتفاع متفاوت موج ورودی انجام شد. موانع صلب استوانه‌ای دارای قطر ۰/۹ و ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر بوده و در طول و عرض ۴۵ سانتی‌متر و فواصل ۱۵×۱۵ سانتی‌متر و با چیدمان زیگزاکی قرار داده شدند. در هر سه ارتفاع موج، وجود موانع به میزان زیادی باعث استهلاک نیروی امواج نسبت به حالت بدون موانع شده است. با ارتفاع موج ۶، ۹ و ۱۲ سانتی‌متر موانع به ترتیب ۴۷/۱۷، ۶۸/۶۸ و ۷۶/۴۲ درصد بیش‌تر از حالت بدون موانع نیروی موج را مستهلک کرده‌اند. با افزایش ارتفاع موج، موانع نیروی بیش‌تری را جذب کرده‌اند. در ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر موانع نسبت به ارتفاع موج ۹ و ۶ سانتی‌متر به ترتیب ۳۲/۳۵ و ۷۲/۴۵ (نسبت بدون بعد نیرو) درصد نیروی بیش‌تری را جذب کرده‌اند. در بحث میرایی امواج در حالات با موانع نسبت به حالات بدون موانع، توانایی موانع در کاهش ارتفاع موج و میرایی آن به‌طور متوسط ۲۰/۸۸ درصد بوده است. نتایج حاصل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. میزان نیروی جذب شده برای ارتفاع موج ۶، ۹ و ۱۲ سانتی‌متر در مدل عددی به ترتیب ۱۷/۱۴، ۴/۲۳ و ۷/۸۶ درصد با مدل آزمایشگاهی اختلاف دارد، همچنین جذر میانگین مربعات خطای نرمال ۰/۰۷ و ضریب همبستگی ۰/۹۹ به دست آمد که بیانگر تطابق دو مدل عددی و آزمایشگاهی و عملکرد مناسب نرم‌افزار اپن فوم در مدل سازی است.

واژگان کلیدی: انرژی موج، حفاظت ساحلی، موج‌شکن شمعی، SST، $k - \omega$

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

از گذشته تاکنون شهرهای ساحلی با توجه به توسعه فعالیت‌های تجاری و بندرگاهی، تفریحی و گردشگری، استخراج ذخایر نفت و گاز و پالایشگاهی و حمل‌ونقل اهمیت زیادی برای کشورها دارند. کرانه‌های ساحلی در سراسر جهان به دلیل تغییرات آب و هوایی بیش‌تر در معرض مخاطرات طبیعی نظیر سیل قرار دارند. سونامی توهوکو سال ۲۰۱۱ در ژاپن، طوفان سندی سال ۲۰۱۲ در نیویورک که تبعات اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی ناشی از آن‌ها تا سال‌ها ادامه داشت، ضرورت افزایش دانش در مهندسی ساحلی را آشکار نمود. یکی از رویکردهای مهندسی ساحلی حفاظت از سواحل در برابر امواج آب با تکنیک‌های مختلف مانند استفاده از انواع موج‌شکن‌ها است. آن دسته از موج‌شکن‌ها که به شکل شمع‌های صلب، شکاف دار و عمودی و مشابه یک سازهی متخلخل هستند به واسطه‌ی افزایش زبری و مقاومت در برابر جریان، جهت حفاظت ساحل در مقابل امواج، به خاطر هزینه‌ی نسبتاً کم و صرفه‌ی اقتصادی و سازگاری بیش‌تر با محیط‌زیست، حفظ کیفیت آب محیط‌های ساحلی و توانایی حفاظت از چشم‌انداز، نسبت به سایر سازه‌های ساحلی نفوذناپذیر، ترجیح داده می‌شوند. هنگامی که امواج تابشی توسط آرایه‌هایی از موج‌شکن‌های شمع پراکنده می‌شوند، علاوه بر انعکاس موج، اتلاف انرژی به سبب جریان آب از میان شمع‌ها و جدایی در سمت پشت شمع‌ها افزایش می‌یابد و موج با انرژی کم‌تری وارد منطقه‌ی ساحلی می‌شود (Jiang et al., 2015). تعامل بین امواج منظم (سینوسی) و موانع عمودی شکافدار به‌طور گسترده‌ای توسط بسیاری از محققان با روش‌های تجربی Kakuno و Liu (1993) و عددی Isaacson et al. (1998) در طول دهه‌ها بررسی و معمولاً انعکاس، انتقال و اتلاف انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل‌سازی تعاملات بین امواج منفرد و سازه‌های ساحلی نفوذناپذیر توسط بسیاری از محققان در گذشته با مدل‌های میانگین‌گیری شده در عمق، مانند معادلات آب کم‌عمق Wei و Arcas (2011) و معادلات نوع بوسینسک Madsen و Fuhrman (2009) مورد مطالعه قرار گرفته است. در مقایسه با موارد قبلی، مطالعه اندرکنش بین امواج منفرد و موج‌شکن‌های شمع نادر است. از پیشرفت‌های اخیر در فناوری رایانه، رویکردهای معادلات ناویر-استوکس، به‌عنوان مثال، روش‌های متوسط‌گیری رینولتز از معادلات ناویر-استوکس (RANS: Reynolds averaged Navier- stocks) و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES: Large Eddy Simulation)، در بررسی اندرکنش موج منفرد با یک ساختار ساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحقیقات Mo et al. (2007) یکی از مطالعات پیشگام در اعتبار سنجی یک مدل سه‌بعدی، بر اساس معادلات اویلر، برای مطالعه برهم‌کنش موج منفرد با یک شمع منفرد عمودی است. کار آن‌ها به گروهی از سه شمع باریک توسط Mo و Liu (2009) بسط داده شد. Lara et al. (2013) سعی کردند مدل خود با عنوان

IH-FOAM را در نرم‌افزار OpenFOAM برای شبیه‌سازی بالاروی موج و نیرو حول یک و گروهی از سه شمع عمودی توسعه دهند. Xiao و Huang (2014) یک مدل سه‌بعدی بر اساس معادلات RANS برای بررسی انواع مکان‌های تک شمع روی شیب‌ها در معرض شکستن امواج منفرد اعمال کردند. Jiang et al. (2015) با توجه به ایده Lara et al. (2013)، یک مدل مخزن موج عددی سه‌بعدی، مبتنی بر معادله ناویر-استوکس را برای مطالعه موج منفرد سونامی که با یک ردیف شمع برهم‌کنش می‌کند، در نرم‌افزار OpenFOAM توسعه دادند؛ که در آن حرکات سطح آزاد توسط روش کسر حجمی (VOF: Volume of Fluid) ردیابی شد و مدل آشفتگی LES که نیاز به منابع محاسباتی بیشتری نسبت به RANS دارد؛ اما حرکات غیرماندگار در مقیاس بزرگ را به‌طور صریح محاسبه می‌کند، به‌کار برده شد. سپس مدل عددی را با داده‌های آزمایشگاهی و همچنین با داده‌های Yuan و Huang (2010) اعتبار سنجی و مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که اثرات بازدارنده امواج در مقایسه با یک شمع افزایش یافت؛ در نتیجه بالا آمدن موج در جلوی شمع‌های شکافدار بزرگ‌تر بود. منطقه جدایی جریان در پشت شمع‌های شکافدار به‌طور کامل توسعه یافت و ریزش گردابه به دلیل جریان شتاب‌یافته در شکاف شکل گرفت. همچنین Jiang et al. (2019) با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM به مدل‌سازی امواج منفرد در برخورد با یک ردیف شمع شکافدار عمودی بر روی ساحل شیب‌دار پرداختند. مشخصات جریان را برای یک شمع و بار دیگر برای یک ردیف شمع بررسی کردند نتایج نشان داد که ارتفاع موج، آرایش شمع‌ها و شیب ساحل در استهلاک انرژی امواج تأثیر دارد. Jalil-Masir et al. (2021) در آزمایشگاه به بررسی تأثیر چیدمان مختلف موانع استوانه‌ای در برابر امواج منفرد ساحلی پرداختند و نتیجه گرفتند چیدمان زیگزاکی در استهلاک نیروی امواج و کاهش نرخ انتقال رسوب نسبت به چیدمان موازی برتری دارد. Yin et al. (2021) خواص هیدرودینامیکی امواج منفرد و برهم‌کنش با یک موج شکن شمعی تک ردیفه به روش LES را در نرم‌افزار این فوم مدل و بررسی کردند. این مدل عددی با نتایج تجربی صحت سنجی شد. سپس یک مطالعه پارامتریک بر روی تأثیرات ارتفاع موج، نسبت انسداد و قطر شمع به پارامترهای هیدرودینامیکی موج شکن شمع انجام داده و فرمول‌های نیمه تجربی برای ارزیابی سریع و قابل اعتماد این پارامترها ارائه نمودند. Qu et al. (2021) یک مخزن موج عددی بر اساس یک مدل موج غیر هیدرواستاتیک (NH-WAVE) برای مطالعه فعل و انفعالات پیچیده بین پوشش گیاهی سفت و سخت با امواج بلند ارائه دادند و نتایج نشان داد پس از ورود موج به توده گیاهی، دامنه موج به طور متوسط ۳۱٪ و انرژی موج کل به طور متوسط ۴۵٪ کاهش یافت و علاوه بر این، اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک کف در مقایسه با انرژی اتلاف شده توسط پوشش گیاهی بسیار کوچک‌تر است، بنابراین می‌تواند نادیده گرفته شود.

آشفستگی جریان از روش RANS معادلات SST, $k - \omega$ استفاده گردید.

۲. مواد و روش‌ها

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله بقای جرم، بقای اندازه حرکت و بقای انرژی هستند. با حل معادله بقای جرم و اندازه حرکت، میدان‌های سرعت و فشار به دست می‌آیند. در صورتی که سیال تراکم ناپذیر باشد توزیع دما ثابت فرض شده و نیازی به حل معادله انرژی برای تعیین دما نیست. مفهوم فیزیکی معادله پیوستگی، از بین رفتن جرم است. به عبارتی در المان سیال نرخ افزایش جرم برابر با نرخ خالص جرم ورودی است. در حالت کلی معادله پیوستگی یا بقا جرم را به صورت معادله (۱) می‌توان نوشت؛ که در آن t زمان، ρ چگالی، u میدان سرعت سه‌بعدی است. در صورتی که سیال تراکم ناپذیر ($\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$) و جریان سه‌بعدی باشد رابطه (۱) به شکل رابطه (۲) تبدیل می‌شود. u ، v و w به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در سه بعد x ، y و z هستند.

طبق قانون دوم نیوتن، برای یک ذره سیال، نرخ افزایش مومنتم برابر با مجموع نیروهای وارد بر آن ذره است. معادله مومنتم به صورت رابطه (۳) نوشته می‌شود؛ که در آن g شتاب ثقل، T تانسور تنش (برشی، محوری، کشش سطحی) است (Tannehill et al., 1997).

رابطه مومنتم را می‌توان به صورت رابطه (۴) بازنویسی کرد؛ که P فشار، τ تانسور تنش و F نشان‌دهنده مومنتم مربوط به نیروی کشش سطحی است. برای ساده شدن تعریف فشار در مرزها اثر فشار هیدرواستاتیک $\rho g x$ از فشار P کم می‌شود و فشار تعدیل شده P^* با عنوان $P - rgh$ در نرم‌افزار این فوم به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot T \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + F \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\vec{\nabla} P^* = \vec{\nabla} P - \vec{\nabla} (\rho \vec{g} \cdot \vec{x}) \quad \text{رابطه (۵)}$$

به دست آمده است. در مدل $k - \epsilon$ دو معادله اضافی k برای انرژی جنبشی آشفستگی و ϵ برای نرخ استهلاک آشفستگی به کار می‌رود و ویسکوزیته آشفستگی به صورت تابعی از k و ϵ حساب می‌شود، این مدل برای اعداد رینولدز بالا مناسب است.

تابع نام برده به گونه‌ای است که در ناحیه نزدیک دیواره مدل $k - \omega$ را فعال کرده و مقدار یک دارد و در نواحی دور از دیواره مدل $k - \epsilon$ را فعال نموده و مقدار صفر دارد که باعث عملکرد

Valipour et al. (2022) به مدلسازی عددی برخورد امواج با دایک ساحلی به کمک مدل آشفستگی SST, $k - \omega$ در نرم‌افزار OpenFOAM پرداختند. نتایج نشان داد وجود دایک تا ده برابر نسبت به حالت بدون سازه در استهلاک نیرو موج نقش داشته است. در اغلب مطالعات پیشین اثر یک ردیف شمع بر امواج ساحلی در نظر گرفته شده که نیاز به بررسی در تراکم‌های بیش‌تر دارد بنابراین در این پژوهش به مدلسازی عددی برخورد امواج با چهار ردیف مانع صلب استوانه‌ای به کمک نرم‌افزار این فوم برای بررسی کارایی این نوع موج‌شکن در شرایط محیطی مختلف پرداخته شده است. نرم‌افزار این فوم یکی از نرم‌افزارهای متن‌باز برای مدلسازی و شبیه‌سازی جریان سیال با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD: Computational Fluid Dynamics) است که در آن از زبان برنامه‌نویسی C++ در نوشتن اشیا و کدها، حلگرها و کتابخانه‌های نرم‌افزار استفاده شده است. این فوم یک کد متن‌باز و رایگان CFD در زمینه‌های تحقیقاتی است که از جریان دوفازی تراکم ناپذیر پشتیبانی می‌کند و یک ابزار مؤثر و قدرتمند برای بررسی دینامیک پیچیده جریان‌های آبی نظیر امواج نزدیک ساحل است (Jiang et al., 2019).

نرم‌افزار این فوم با استفاده از روش حل عددی حجم محدود (FVM: Finite Volume Method) به شبکه‌بندی‌های ساختاریافته و غیر ساختاریافته سه‌بعدی، سلول‌های چندوجهی نسبت داده و به حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی نظیر معادلات ناویر-استوکس می‌پردازد. انتخاب حلگر مناسب مهم‌ترین اقدام در شبیه‌سازی است و نحوه آماده‌سازی مسئله با توجه به آن مشخص می‌شود. در مسئله حاضر از حلگر اینترفوم استفاده گردید. این حلگر از حلگرهای مدلسازی جریان چندفازی است که قابلیت مدل کردن جریان دوفازی، تراکم ناپذیر، هم‌دما و مخلوط نشدنی را دارد و با روش VOF توسعه یافته است. همچنین برای مدلسازی

برای مدلسازی آشفستگی جریان از مدل RANS استفاده می‌شود. روش RANS مدل‌های متفاوتی دارد که از راه‌های گوناگون مدلسازی ترم‌های اضافی به وجود آمده در معادلات ناویر-استوکس هنگام متوسط گیری زمانی را انجام می‌دهند. یکی از آن‌ها SST, $k - \omega$ است که Menter (1992) برای بهبود مدل ویلکاکس توسعه داد. این مدل با استفاده از ضرب دو مدل $k - \omega$ و $k - \epsilon$ در یک تابع ترکیب‌کننده و سپس جمع با یکدیگر

دقیق‌تری حاصل شد. بنابراین با استفاده از این مدل RANS به مدل‌سازی مسئله حاضر پرداخته می‌شود. مدل $k - \omega$ بر پایه دو معادله انتقال است که یکی برای k و دیگری برای ω هست که به صورت رابطه (۶) و (۷) بیان می‌گردد:

مناسب مدل در نواحی میانی و نزدیک دیواره‌ها می‌شود. همچنین برای بررسی انتقال تنش برشی آشفته، تعریف ویسکوزیته آشفتگی تغییر یافته که باعث پیش‌بینی شروع جدایش تحت گرادین‌های فشار به‌طور دقیق‌تر است (Karimi, 2018). در تحقیقات منتر و نیز با توجه به سایر مطالعات پیشین با مدل $k - \omega$, SST نتایج

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] = \frac{\gamma}{\nu_T} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + 2\rho(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k \beta^*} \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن ε اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی است:

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

σ_k در معادله (۶) و γ ، σ_ω و β در معادله (۷) به صورت روابط (۱۲) تا (۱۵) می‌گردند؛ که در آن σ_{k1} ، σ_{k2} ، $\sigma_{\omega 1}$ ، $\sigma_{\omega 2}$ ، γ_1 ، γ_2 ، β_1 و β_2 ثوابت مدل هستند که به صورت تابعی از نزدیک‌ترین فاصله از دیواره Z و تابع F_1 که به آن تابع ترکیبی (Blending Function) می‌گویند، تعریف می‌گردد. ثوابت مدل برای نواحی درونی و خارجی لایه مرزی در جدول شماره (۱) آورده شده است.

در رابطه (۶)، τ_{ij} تنش رینولدز است که به صورت زیر (رابطه ۱۱) تعریف می‌گردد و u'_i مؤلفه‌های نوسانی سرعت، δ_{ij} دلتای کرونکر (برای $i = j$ ، $\delta_{ij} = 1$ و برای $i \neq j$ ، $\delta_{ij} = 0$) می‌باشد، ν_T ویسکوزیته دینامیکی آشفته (Kinematic Eddy Viscosity) ($\nu_T = \mu_T / \rho$) و β^* یکی از ثوابت مدل آشفتگی است.

$$\tau_{ij} = \mu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\sigma_k = F_1 \sigma_{k1} + (1 - F_1) \sigma_{k2} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\sigma_\omega = F_1 \sigma_{\omega 1} + (1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\gamma = F_1 \gamma_1 + (1 - F_1) \gamma_2 \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\beta = F_1 \beta_1 + (1 - F_1) \beta_2 \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

جدول ۱- ضرایب ثابت در مدل ($k - \omega$, sst)
Table 1- Fixed coefficient in $k - \omega$ sst model

The inner region of the border layer				
β_1	β^*	γ_1	$\sigma_{\omega 1}$	σ_{k1}
0.075	0.09	0.567	0.5	0.85
The outer region of the border layer				
β_2	β^*	γ_2	$\sigma_{\omega 2}$	σ_{k2}
0.0828	0.09	0.463	0.856	1

مطلق گردابه‌ای (Absolute Value of the Vorticity) است. تابع F_2 در معادله (۱۹) یک تابع ترکیبی دیگر است و به صورت رابطه (۲۰) تعریف می‌شود.

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

و در آن:

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega z}; \frac{500\nu}{\omega z^2} \right); \frac{4\rho k \sigma_{\omega 2}}{(CD_{k\omega})z^2} \right] \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$(CD_{k\omega}) = \max \left(2\rho \frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20} \right) \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$\mu_T = \rho \frac{0.3k}{\max(0.3\omega; \Omega F_2)} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

و در آن:

$$\arg_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega z}; \frac{500\nu}{\omega z^2} \right) \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

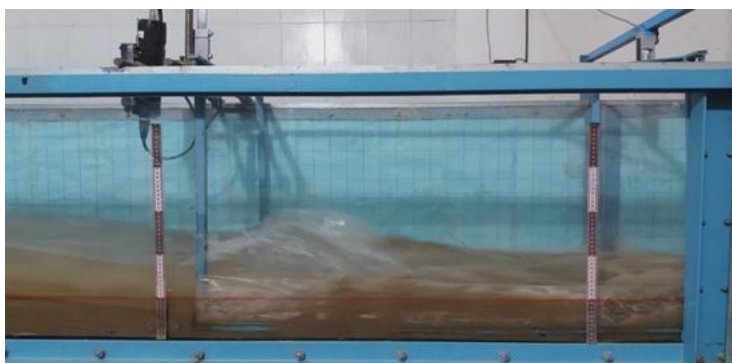
به صورت مثلثی و فواصل بین پوشش 15×15 سانتی‌متر بود. برای ایجاد مخزن تولید موج به فاصله ۲ متر از ابتدای کانال یک صفحه پلاکسی به‌عنوان دریچه کشویی قرار داده شد. سه ارتفاع موج ۶، ۹ و ۱۲ سانتی‌متر با عمق آب پشت دریچه $25/6$ سانتی‌متر و $39/5$ سانتی‌متر و 47 سانتی‌متر از کف بستر به دست آمد. این مدل آزمایشگاهی در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری نیروی موج از نیروسنج و برای اندازه‌گیری سرعت حرکت موج و تعیین الگوی جریان از سرعت‌سنج صوتی داپلر (ADV) استفاده شد.

که در آن k ثابت کارمن (Karman Constant) و برابر با 0.4 است. تابع F_1 نیز برابر است با رابطه (۱۶).

همچنین در مدل $k - \omega$, SST ویسکوزیته آشفتنه (Eddy Viscosity) طبق رابطه (۱۹) محاسبه می‌گردد؛ که در آن Ω مقدار

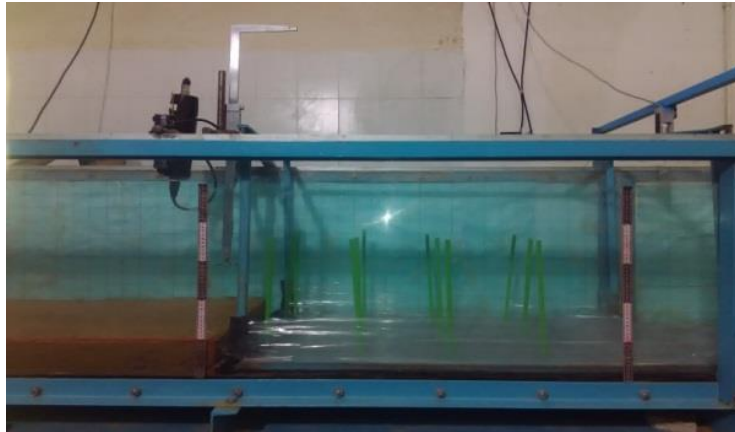
مقادیر F_1 و F_2 در دیواره‌ها برابر یک بوده و به تدریج با افزایش فاصله از دیواره کاهش یافته و به صفر میل می‌کند.

در این پژوهش برای مدل‌سازی عددی تأثیر موانع صلب استوانه‌ای بر کاهش اثرات مخرب امواج در سواحل و عملکرد این فوم در مدل کردن آن از مدل آزمایشگاهی (Mirzakhani, 2020) استفاده شد. مشخصات مدل آزمایشگاهی به شرح زیر است: آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد با مقیاس $1:50$ در کانال با طول 20 متر، عرض 60 سانتی‌متر و ارتفاع 60 سانتی‌متر انجام شد. برای درختان ساحلی از استوانه‌های پلاستیکی با ارتفاع 32 سانتی‌متر، قطر خارجی 9 میلی‌متر و قطر داخلی 7 میلی‌متر استفاده شد. نحوه‌ی چیدمان در عرض پوشش 45 سانتی‌متر



شکل ۱- نمایشی از موج تولیدشده بدون حضور موانع ساحلی

Fig. 1 - A view of the wave generated without the presence of coastal obstacles

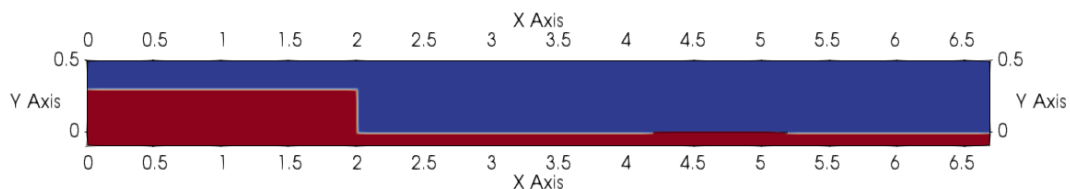


شکل ۲- نمایی از موج تولیدشده با حضور موانع ساحلی

Fig. 2 - A view of the wave generated by the presence of coastal obstacles

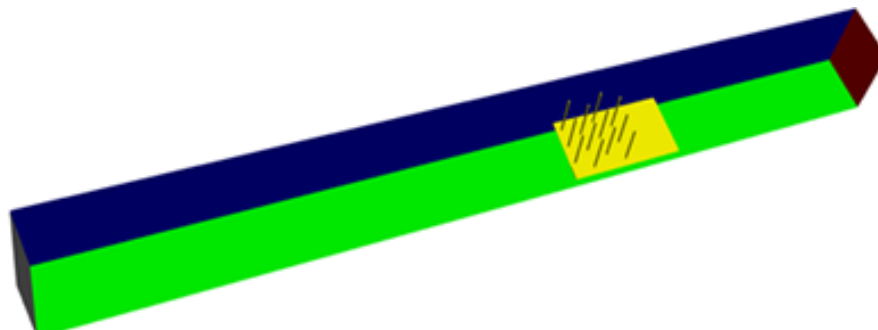
اجسام است که از ابزار اسنپی هگزمش (snappyHexMesh) برای تولید شبکه سه‌بعدی و ریز کردن شبکه در ناحیه موانع استفاده شد. موانع با ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر و قطر ۹ میلی‌متر در فاصله ۵ سانتی‌متری از لبه ساحل با آرایش زیگزاکی، در عرض ۴۰ و طول ۴۵ سانتی‌متر و فواصل ۱۵ سانتی‌متر روی ساحل قرار داده شدند. عمق آب ساکن پای ساحل ۱۰ سانتی‌متر و سه عمق آب ۱۵/۶، ۲۹/۵ و ۳۷ سانتی‌متر در مخزن و بالای سطح آب ساکن تعریف شد. در کل ۶ مدل ساخته شد که ۳ مدل بدون حضور موانع و ۳ مدل در حضور موانع بود.

در مسئله حاضر جهت مدل‌سازی عددی، ابتدا به رسم هندسه اقدام شد. هندسه به صورت یک کانال سه‌بعدی است که در مرحله اول با ابزار بلاک مش (blockMesh) نرم‌افزار اپن فوم شبیه یک مکعب مستطیل ترسیم و به تعدادی بلوک تقسیم و قسمت‌های لازم روی آن تعریف شد شکل (۳) و شبکه‌بندی ابتدایی آن به صورت بلوک‌های شش‌وجهی ایجاد شد. مرحله دوم ایجاد اجسام مورد نظر در این هندسه است، برای ایجاد ساحل و موانع صلب استوانه‌ای با فرمت STL از نرم‌افزار SALOME استفاده و در این فوم فراخوانی شد (شکل ۴). مرحله سوم کوپل هندسه کانال و



شکل ۳- ایجاد هندسه کانال

Fig.3 - Creating channel geometry



شکل ۴- فراخوانی موانع ساحلی با فرمت STL

Fig. 4 - Call coastal obstacles in STL format

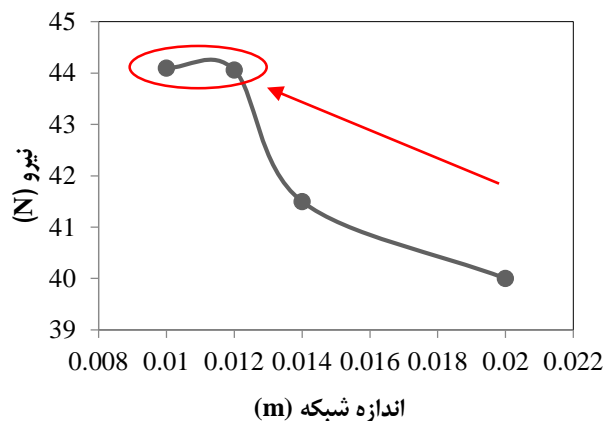
مدل ۱ و ۲ اختلاف زیادی با مدل های ۳ و ۴ دارد به طوری که با تغییر از مدل ۲ به ۳ نیرو ۳/۷۶ درصد افزایش یافت (شکل ۵). همچنین تغییر زیادی در نتایج مدل ۳ نسبت به ۴ مشاهده نمی شود و تنها ۰/۰۹ درصد باهم اختلاف دارند، لذا انتخاب تعداد شبکه کم تر زمان اجرای برنامه را کاهش می دهد بنابراین شبکه بندی مدل ۳ به عنوان مدل نهایی انتخاب گردید. برای اجرای مدل های حاضر، از پردازشگر AMD Rezen 9300x با ۱۲ هسته حقیقی استفاده شد که زمان اجرای هر مدل به طور متوسط ۱۵ ساعت بوده است.

در شبیه سازی عددی کیفیت شبکه بندی بسیار مهم و بر دقت و صحت نتایج تأثیرگذار است. در حل یک مسئله دینامیک سیالات محاسباتی باید استقلال از شبکه وجود داشته باشد یعنی ریزتر کردن شبکه بر تغییرات نتایج بی تأثیر باشد برای آنالیز اندازه شبکه ی استفاده شده در این مطالعه ابتدا مدل ۱ تنظیم و برنامه اجرا شد، سپس مدل های بعدی تنظیم و برنامه برای هر چهار مدل با شرایط یکسان اجرا شد و نتایج آن ها با یکدیگر مقایسه گردید (جدول ۲). مشاهده شد که میزان نیروی جذب شده در برابر امواج توسط موانع برای شبکه بندی درشت

جدول ۲. تعداد و اندازه شبکه در هر مدل

Table 2- Number and size of mesh in each model

Total number of meshes	Mesh size (m)	model
323250	0.02	1
947333	0.014	2
1527950	0.012	3
2589000	0.01	4



شکل ۵- مقایسه نیروی جذب شده در مدل های عددی با تعداد شبکه متفاوت

Fig. 6 - Comparison of adsorption force in numerical models with different mesh

موقعیت های مکانی متفاوت y قرار دارند. در رابطه (۲۲) y فاصله از بستر، u^* سرعت برشی، v لزجت سینماتیکی سیال است.

در مسئله حاضر y^+ برای ساحل و موانع در این فوم محاسبه شده و مقدار متوسط آن ۵۴ است و با توجه به این که در محدوده ۳۰ تا ۳۰۰ قرار دارد مقداری مناسب است (Pope, 2000)

$$y^+ = \frac{y \cdot u^*}{\nu}$$

حساسیت به شرایط مرزی انجام شد بدین صورت که تمام شرایط قابل استفاده برای مؤلفه های مسئله در مدل وارد شد و آن هایی که منجر به نتایج غیر فیزیکی و واگرایی مسئله می شد کنار گذاشته شد و در نهایت شرایط اولیه و مرزی مناسب که در جدول (۳) آورده شده به دست آمد.

یکی از راه های بررسی کیفیت شبکه بندی در جریان های آشفته، عدد بدون بعد y^+ است. y^+ بیانی از کمیت ها را در نگاه نزدیک دیواره به تصویر می کشد. رابطه (۲۲)، با سرعت اصطکاکی متوسط متناسب بوده و مقدار آن برای هر شبیه سازی محاسبه می شود. این بدین معناست که داده های ترسیم شده در یک مقدار یکسان از y^+ ، در

رابطه (۲۲)

پس از تنظیم هندسه و شبکه نوبت تعریف شرایط اولیه و مرزی در پوشه صفر است. مقادیر اولیه نقطه شروعی برای حل مسئله هستند و بر همگرایی مسئله تأثیر دارند. این مقادیر را می توان به کمک سایت هایی نظیر (turbulence calculator ichrom) به دست آورد. شرایط مرزی نیز باید منطبق بر فیزیک مسئله باشد و نقش مهمی در شبیه سازی دارد. برای دستیابی به مدلی مطابق با واقعیت، آنالیز

جدول ۳- شرایط اولیه و مرزی به کار رفته در مدل حاضر

Table 3- Initial and boundary conditions used in the present model

parameter	Boundary condition			initial condition
	Bed and walls	Cylinders And beach	atmosphere	
(U)	noSlip	noSlip	pressureInletOutletVelocity fixedValue: 0	fixedValue:0
(P-rgh)	fixedFluxPressure fixedValue:0	fixedFluxPressure fixedValue:0	totalPressure fixedValue:0	fixedValue:0
(k)	kqRWallFunction fixedValue: 384	kqRWallFunction fixedValue: 384	inletOutlet fixedValue: 384	fixedValue: 384
(ε)	epsilonWallFunction fixedValue: 145121.769	epsilonWallFunction fixedValue: 145121.769	inletOutlet fixedValue: 145121.769	fixedValue: 145121.769
(ω)	omegaWallFunction fixedValue: 10222.025	omegaWallFunction fixedValue: 10222.025	inletOutlet fixedValue: 10222.025	fixedValue: 10222.025
alpha.water	zeroGradient	zeroGradient	inletOutlet fixedValue:0	fixedValue:0

کوچک‌تر از یک باشد. رابطه‌ی عدد کورانت به صورت رابطه (۲۳) است؛ که در آن $|U|$ اندازه سرعت داخل سلول، Δt گام زمانی و Δx اندازه سلول یا عرض فیلتر در جهت سرعت است.

$$Co = \frac{|U| \times \Delta t}{\Delta x}$$

رابطه (۲۳)

۳. نتایج

نیروی وارد شده به ساحل در حالت با و بدون موانع صلب استوانه-ای به کمک نرم افزار این فوم محاسبه و نتایج در جدول (۴) ارائه شده است. برای بررسی تأثیر موانع صلب استوانه‌ای بر کاهش نیروی امواج از پارامتر بی بعد F_t به صورت رابطه (۲۴) استفاده شده است. F_t نیرو در حالت بدون مانع و F_s نیرو در حالت با مانع است.

نتایج در قالب نمودار F_t برحسب ارتفاع موج ورودی در شکل (۶) رسم شده است.

$$F_t = \frac{F_s - F}{F}$$

کاهش نیروی امواج هنگام عبور از ساحل است. در این حالت که فواصل موانع و تعدادشان ثابت، و تنها ارتفاع موج ورودی متغیر است در تمام مدل‌ها با افزایش ارتفاع موج، نیرو افزایش یافته است. به عنوان نمونه طبق نتایج جدول (۴) نیروی جذب شده از امواج در ارتفاع موج ۱۲

تنظیمات اولیه برای حل نمونه که شامل زمان شروع، زمان پایان، فاصله زمانی برای خروجی حل و گام تکرار است در فایل مربوطه انجام گردید. عدد کورانت (Courant number) کمیتی است که برای داشتن دقت در حل و پایداری مسئله به کار می‌رود و باید حین پردازش

عدد کورانت در مسائل مختلف متفاوت است. با سرعت زیاد سیال در یک سلول کوچک حداکثر عدد کورانت حاصل می‌شود که ۰/۸۵ در نظر گرفته شد. در این مسئله مقدار اولیه Δt برابر ۰/۰۰۲ ثانیه در نظر گرفته شد و در مراحل بعدی حلگر گام زمانی را به گونه‌ای محاسبه می‌کند که سه شرط زیر برقرار باشد:

$$\max Co < 0.85$$

$$\max \alpha Co < 0.5$$

$$\max \Delta T < 1$$

$\max \alpha Co$ عدد کورانت مربوط به فصل مشترک

سلول‌هاست.

رابطه (۲۴)

در کل مدل‌های با مانع، نیروهای جذب شده نسبت به حالت بدون مانع افزایش داشته‌اند. در ارتفاع موج‌های ۶، ۹ و ۱۲ سانتی متر نیروی مستهلک شده نسبت به حالت بدون مانع به ترتیب ۴۷/۱۷، ۶۸/۶۸ و ۷۶/۴۲ درصد بیشتر شده است که نشان‌دهنده‌ی تأثیر موانع در

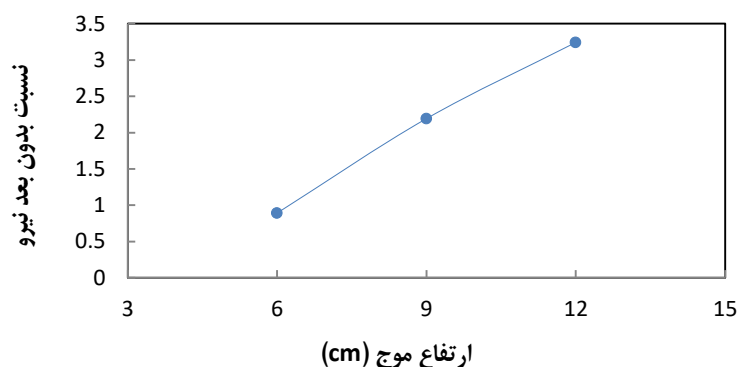
و نیروی درگ زیادتر شده و در نتیجه انرژی بیشتری از موج گرفته می-شود. علاوه بر این با افزایش ارتفاع موج تا حد معینی که وابسته به ارتفاع موانع است، سطح تماس موانع با موج افزایش یافته و از این طریق نیز نیروی درگ موانع افزایش می‌یابد.

سانتی متری نسبت به ارتفاع موج‌های ۶ و ۹ به ترتیب ۷۷/۲۵ و ۳۶/۹۶ درصد افزایش یافته است. زیرا با افزایش ارتفاع موج سرعت آن هنگام برخورد با موانع بیش تر شده، برآمدگی موج حین گذر از ساحل

جدول ۴- مقادیر نیروی جذب شده (نیوتن) از امواج برای ارتفاع موج‌های متفاوت در مدل عددی حاضر

Table 4- Absorbed force values (Newton) from waves for different wave heights in the current numerical model

12	9	6	Wave height (cm)
69.9	44.06	15.09	Absorbed force in obstacle mode
16.48	13.8	8.4	Absorbed force in unobstructed mode



شکل ۶- نمودار Ft برحسب ارتفاع موج ورودی

Fig. 7 - Ft diagram by input wave height

داده‌های مدل عددی از دقت خوبی برخوردار هستند. اختلاف نیرو بین مدل عددی و آزمایشگاهی برای ارتفاع موج‌های ۶، ۹ و ۱۲ به ترتیب ۱۷/۱۴، ۴/۲۳ و ۷/۸۶ درصد است.

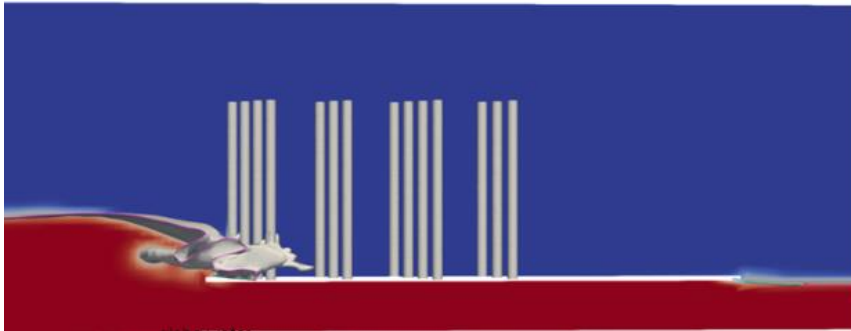
برخورد موج به اولین ردیف موانع و زمان عبور موج از آخرین ردیف موانع در شکل (۷) نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر موانع بر ارتفاع موج می‌توان میرایی موج را در قالب ضریب انتقال موج بررسی کرد، که در ادامه به چگونگی محاسبه این ضریب و مقادیر آن پرداخته شده است.

برای صحت سنجی نتایج این مدل عددی از نتایج پژوهش آزمایشگاهی Mirzakhani (2020) استفاده شد. برای ارزیابی و مقایسه، معیارهای آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، نرمال-سازی جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE) و ضریب همبستگی (R^2) بکار رفته است. بررسی معیارهای نامبرده برای نیروها در جدول (۵) انجام شده و بیانگر تطابق قابل قبول مدل عددی با مدل آزمایشگاهی است. جذر میانگین مربعات خطای نرمال بسیار به صفر نزدیک است و بیانگر دقت نسبتاً بالایی هست. ضریب همبستگی نزدیک به یک است که بیانگر میزان خطای بسیار کمی است و می‌توان نتیجه گرفت که

جدول ۵- مقایسه نیروهای مدل عددی حاضر و مدل آزمایشگاهی (Mirzakhani, 2020)

Table 5- Comparison of the forces of the present numerical model and the laboratory model (Mirzakhani, 2020)

R^2	NRMSE	RMSE	Laboratory force (N)	Numerical Force (N)	Wave height (cm)	Number of obstacles	Intervals (cm)
0.99	0.07	4.09	19.19	15.9	6	14	15×15
			46.01	44.06	9		
			75.87	69.9	12		



a. برخورد موج با اولین ردیف از موانع



b. گذر موج از آخرین ردیف موانع

شکل ۷- (a,b) : برخورد و عبور موج از موانع

Fig. 8 (a, b) - Collision and passing wave of obstacle

موج رابطه (۲۵) می‌توان تأثیر موانع در میرایی موج را بررسی نمود که در آن H_S : ارتفاع موج بعد موانع و H : ارتفاع موج قبل موانع است.

$$K_V = \frac{H_S}{H}$$

ارتفاع آب قبل از موانع و سرعت جریان افزایش می‌یابد و توانایی موانع در مقابله با امواج ثابت است پس ارتفاع آب بیش تری از موانع عبور می‌کند. میزان افزایش ضریب انتقال برای ارتفاع موج ۶ سانتی‌متر نسبت به ارتفاع موج‌های ۹ و ۱۲ سانتی‌متر به ترتیب ۶۳/۹۶ و ۷۰/۰۹ درصد بوده است. یعنی با افزایش ۰/۵ برابری ارتفاع موج ضریب انتقال انرژی ۶۳/۹۶ و با افزایش ۲ برابری ارتفاع موج ضریب انتقال انرژی ۷۰/۰۹ درصد افزایش یافته بنابراین کارایی موانع در ارتفاع موج‌های بالاتر، کاهش می‌یابد.

بنابراین طبق نتایج ضریب K_V ، با افزایش ارتفاع موج ورودی، میرایی موج کاهش می‌یابد. همچنین برای محاسبه‌ی درصد میرایی به صورت مستقیم از رابطه (۲۶) استفاده می‌شود که در مقایسه دو حالت با مانع و بدون مانع ارتفاع موج در ابتدا و انتهای ساحل در نظر گرفته می‌شود.

اکنون به بررسی تأثیر موانع بر کاهش ارتفاع امواج در قالب ضریب انتقال موج (K_V) پرداخته می‌شود. با استفاده از معادله ضریب انتقال رابطه (۲۵)

این ضریب در حالت بدون مانع نسبت ارتفاع موج در انتهای ساحل به ارتفاع موج در ابتدای ساحل است. همچنین هنگام مقایسه حالت با مانع و بدون مانع در هر دو ارتفاع موج در ابتدا و انتهای ساحل در نظر گرفته می‌شود. مقادیر ارتفاع موج و ضریب انتقال موج برای حالت با مانع و بدون مانع در جدول (۶) آورده شده است. به‌طور کلی در حالتی که موانع حضور دارند ضریب انتقال موج نسبت به حالت بدون مانع، کاهش چشمگیری داشته است که نشانگر تأثیر موانع بر کاهش ارتفاع موج بعد از آن‌هاست. بیش‌ترین تأثیر در کاهش ضریب انتقال موج مربوط به ارتفاع موج ۶ سانتی‌متر به میزان ۴۷/۳۱ درصد بوده است. ارتفاع موج ۹ و ۱۲ نیز به ترتیب ۲۴/۴۶ و ۱۶/۵۶ درصد کاهش در ضریب انتقال موج داشته‌اند. در این مسئله که فواصل موانع و تعدادشان ثابت و فقط ارتفاع موج ورودی متغیر است طبق جدول (۶)، در تمام مدل‌ها با افزایش ارتفاع موج، ضریب انتقال افزایش یافته است زیرا

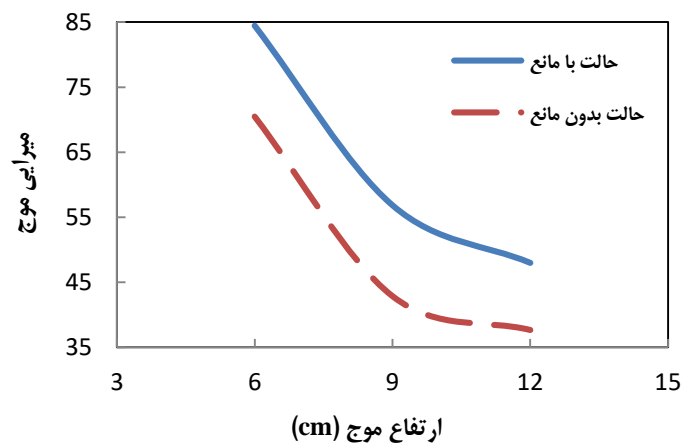
جدول ۶- مقادیر ضریب انتقال موج برای ارتفاع موج‌های متفاوت

Table 6- Wave transfer coefficient values for different wave heights

12	9	6	Wave height (cm)	
0.173	0.139	0.09	Beach wave height (cm)	
0.09	0.06	0.014	Wave height at the end of the beach (cm)	Mode with obstacles
0.52	0.43	0.15	Wave transmission coefficient	
0.17	0.147	0.105	Beach wave height (cm)	
0.106	0.084	0.031	Wave height at the end of the beach (cm)	Unobstructed mode
0.62	0.57	0.29	Wave transmission coefficient	

$$\left(\frac{H-H_s}{H}\right) \times 100$$

رابطه (۲۶)



شکل ۸- میرایی در ارتفاع موج‌های متفاوت

Fig. 8 - damping at different wave heights

یک است که بیانگر میزان خطای کمی است. در مدل عددی میرایی موج های ۶ و ۱۲ سانتی‌متر بیش‌تر از مدل آزمایشگاهی برآورد شده است. درصد میرایی موج برای ارتفاع موج‌های ۶، ۹ و ۱۲ در مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی به ترتیب ۳۵/۵۹- و ۶/۴۷ و ۳۹/۸۸- درصد اختلاف داشته است. علت این اختلاف را می‌توان به احتمال وجود خطا در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی یا عوامل محیطی موثر در آزمایش‌ها مرتبط دانست.

با مدل‌سازی انجام شده نرم‌افزار این فوم قادر است مقادیر سرعت در هر سلول را به ازای دی‌های مختلف محاسبه نماید. توزیع سرعت در کانال برای ارتفاع موج ۹ سانتی‌متر در زمان‌های ورود به ساحل و گذر از ساحل برای حالت با مانع و بدون مانع در شکل (۹) تا d نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است حضور موانع در مسیر حرکت موج باعث کاهش سرعت موج و ایجاد ناحیه جدایی جریان در پشت موانع می‌شود. بنابراین موج در مدت‌زمان

درصد میرایی موج با افزایش ارتفاع موج روند نزولی دارد و موانع درصد کمتری از ارتفاع آب را کاهش می‌دهند شکل (۸). بیشترین کاهش ارتفاع موج مربوط به ارتفاع موج ۶ سانتی‌متر و کمترین کاهش مربوط به ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر به ترتیب به میزان ۸۴/۴۴ و ۴۷/۹۸ درصد بوده است. همچنین میرایی موج در حالت با مانع نسبت به حالت بدون مانع برای ارتفاع موج‌های ۶، ۹ و ۱۲ به ترتیب ۱۶/۵۴، ۲۴/۵۹ و ۲۱/۵۳ درصد افزایش داشته است.

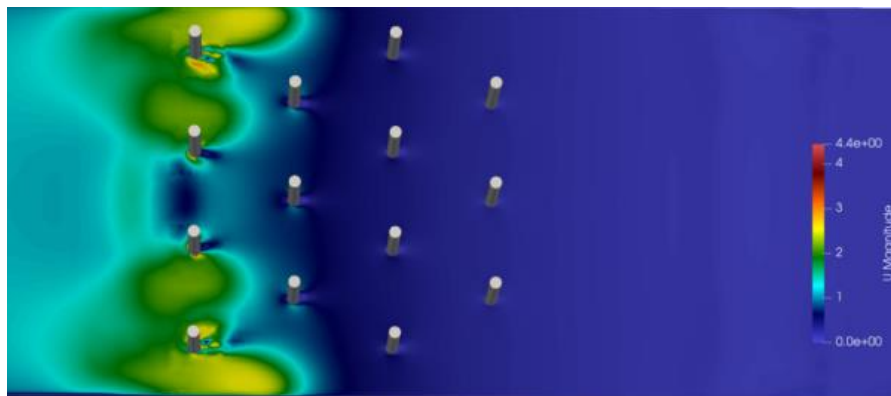
برای مقایسه درصد میرایی موج در مدل عددی با مدل آزمایشگاهی، ارتفاع موج‌ها قبل و بعد موانع در مدل آزمایشگاهی و عددی در جدول (۷) آورده شده و میرایی موج مطابق با رابطه (۲۶) محاسبه شده است. بررسی معیارهای نامبرده برای نیروها انجام شده و بیانگر تطابق قابل قبول مدل عددی با مدل آزمایشگاهی است. جذر میانگین مربعات خطا ۱۴/۱۴ و جذر میانگین مربعات خطای نرمال ۰/۴۴ بیانگر دقت خوبی هست. ضریب همبستگی با مقدار ۰/۷۷ نزدیک به

طولانی تری از منطقه حفاظت شده گذر و وارد منطقه ساحلی می شود. هرچه سرعت کاهش یافته و زمان عبور بیشتر شود تأثیرگذاری موانع ساحلی بر کنترل مشخصه های موج و تضعیف آن ها بیش تر و نمایان تر می گردد.

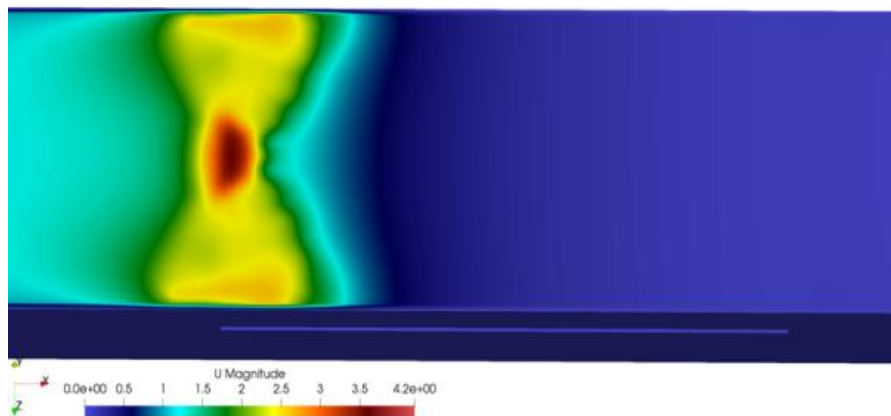
جدول ۷- مقایسه ارتفاع موج ها قبل و بعد موانع

Table 7. Comparison of wave height before and after obstacles

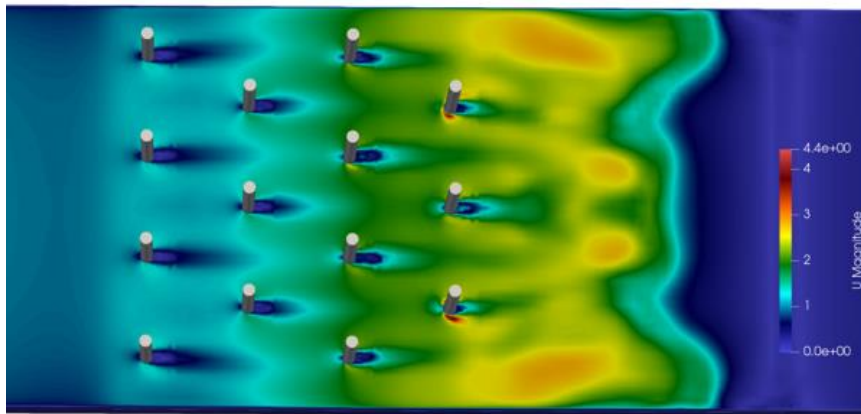
damping (%)	Wave height next obstacles (cm)	Wave height before obstacles (cm)	Wave height (cm)	
78.89	0.019	0.09	6	Numerical model
46.76	0.074	0.139	9	
44.5	0.096	0.173	12	
58.18	2.3	5.5	6	Laboratory model
50	4.5	9	9	
31.81	7.5	11	12	



a. ورود موج به ساحل در حالت با مانع
a. Wave enters the beach in obstacle mode

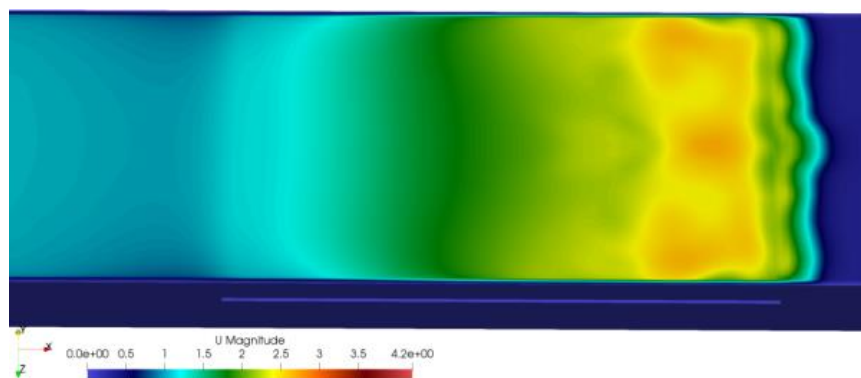


b. ورود موج به ساحل در حالت بدون مانع
b. Wave entering the beach in unobstructed mode



c. گذر موج از ساحل با مانع

c. Wave passing from the beach with obstacles



d. گذر موج از ساحل بدون مانع

d. Wave passing from the beach unimpeded

شکل ۹- (a, b, c, d): توزیع سرعت

Fig. 10, a, b, c and d- Speed Contours

موج‌های بالاتر کاهش می‌یابد. کارایی مدل عددی حاضر در برآورد نیرو و ارتفاع موج عبوری از ساحل با توجه به نتایج آزمایشگاهی تأیید شد. مقدار نرمال‌سازی جذر میانگین مربعات خطا $0.44/$ و ضریب همبستگی $0.77/$ است که بیانگر دقت قابل قبولی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

نتایج این مطالعه با نتایج مطالعات سایر محققین مقایسه و بررسی شد که به آن‌ها اشاره می‌شود:

Nandasena et al. (2012) یک مدل آب کم‌عمق اصلاح شده با عمق دوبردی برای تجزیه و تحلیل کاهش مشخصه‌های امواج بلند مانند سونامی توسط در دو منطقه ساحلی به کار گرفتند: در مدل آن‌ها حداکثر عمق جریان ۱۲ درصد و حداکثر سرعت جریان ۳۵ درصد در پشت پوشش گیاهی نسبت به زمین لخت کاهش یافت. Lou et al. (2018) تأثیر موانع صلب عمودی بر امواج منظم را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که میانگین سرعت جریان موج در حالت با مانع کمتر از حالت بدون مانع است. Wang et al.

۴. بحث

بهترین تطابق نتایج به دست آمده در مدل عددی با مدل آزمایشگاهی برای ارتفاع آب ۹ سانتی‌متر است که نیرو با مدل آزمایشگاهی اختلاف $4/23$ درصد و میرایی اختلاف $6/47$ درصد دارد. در بحث نیروی امواج، ضریب انتقال انرژی و میرایی، در حالات با حضور موانع صلب استوانه‌ای نسبت به حالات بدون مانع، توانایی موانع در کاهش نیروی موج و استهلاک آن به طور متوسط $64/09$ درصد بوده، همچنین وجود موانع باعث کاهش سرعت و ضریب انتقال امواج و افزایش میرایی آن‌ها به طور متوسط و به ترتیب به میزان $29/44$ و $20/88$ درصد نسبت به حالت بدون مانع شده است. افزایش ارتفاع موج ورودی باعث افزایش نیروی جذب شده توسط موانع، افزایش ضریب انتقال موج و کاهش میرایی موج شده است زیرا موج مرتفع‌تر با سرعت بیشتری به موانع برخورد کرده و برآمدگی موج و سطح تماس و نیروی درگ زیاده‌تر می‌شود اما ارتفاع آب بعد موانع نیز بیشتر می‌شود در نتیجه کارایی موانع صلب استوانه‌ای برای حفاظت از سواحل در ارتفاع

ساحل به حفاظت از ساحل در هنگام پیشروی امواج و طغیان آن‌ها کمک می‌کند.

۵. سپاسگزاری

این مقاله از پایان‌نامه کارشناسی ارشد مصوب و دفاع شده در دانشگاه شهرکرد استخراج شده است. اکنون بر خود لازم می‌دانیم مراتب تشکر و قدردانی را از مسئولان دانشگاه که با حمایت مادی و معنوی، ما را در انجام این پژوهش یاری نمودند به عمل آوریم.

References:

- Arcas, D. and Wei, Y., 2011. Evaluation of velocity-related approximations in the nonlinear shallow water equations for the Kuril Islands, 2006 tsunami event at Honolulu, Hawaii. *Geophysical Research Letters*, 38, L12608. <https://doi.org/10.1029/2011GL047083>.
- Fuhrman, D.R. and Madsen, P.A., 2009. Tsunami generation, propagation, and run-up with a high-order Boussinesq model. *Coastal Engineering*, 56, pp. 747–758. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.02.004>.
- Huang, Z. and Yuan, Z., 2010. Transmission of solitary waves through slotted barriers: A laboratory study with analysis by a long wave approximation. *Journal of Hydro-environment Research*, 3, pp. 179–185. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2009.10.009>.
- Isaacson, M., Premasiri, S. and Yang, G., 1998. Wave interactions with vertical slotted barrier. *Journal of Waterway, Coastal, and Ocean Engineering*, 124, pp. 118–126. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733950X\(1998\)124:3\(118\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733950X(1998)124:3(118)).
- Jalil-Masir, H., Fattahi, R., Ghanbari-Adivi, E. and Aghbolaghi, M.A., 2021. Effects of different forest cover configurations on reducing the solitary wave-induced total sediment transport in coastal areas: An experimental study. *Ocean Engineering*, 235, p.109350. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109350>.
- Jiang, C., Yao, Y., Deng, Y. and Deng, B., 2015. Numerical investigation of solitary wave interaction with a row of vertical slotted piles. *Journal of Coastal Research*, 31(6), pp.1502–1511. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00210.1>.
- 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>.
- Kakuno, S. and Liu, P.F., 1993. Scattering of water waves by vertical cylinders. *Journal of Waterway, Coastal, and Ocean Engineering*,

(2019) یک مدل عددی دو بعدی برای بررسی اثر متقابل موج منفرد با سکوه‌های دارای پوشش گیاهی به کمک نرم‌افزار این فوم ارائه دادند که طبق آن به‌طور کلی، کارایی یک سکوی گیاهی (دارای زبری) بهتر از یک سکوی ساده در میرایی موج است. در مدل حاضر نیز حداکثر عمق جریان بعد از موانع به‌طور متوسط ۱۵/۲۵ درصد کاهش داشته است. همچنین کاهش سرعت جریان بعد از موانع ساحلی مشهود است. بنابراین ایجاد منطفه‌ای با موانع صلب استوانه‌ای در وجه روبه دریای

119, pp. 302–322. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1993\)119:3\(302\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1993)119:3(302)).

- Karimi, B., 2018. Numerical simulation of flow through obstacles using open source model openFoam, Thesis, Ramin Agriculture and Natural Resource University of Khuzestan, Iran. 111p. <https://ganj.irandoc.ac.ir/viewer/bf6128d6f50ecef317d2ce0b555c6bb0>. (In Persian).
- Lara, J. L., Higuera, P., Guanche, R. and Losada, I.J., 2013. Wave Interaction with piled structures: Application with IH-FOAM. In *32th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (Nantes, France, ASME), OMAE ,11479*. <https://doi.org/10.1115/OMAE2013-11479>.
- Lou, S., Chen, M., Ma, G., Liu, S. and Zhong, G., 2018. Laboratory study of the effect of vertically varying vegetation density on waves, currents and wave-current interactions. *Ocean Research*, 79, pp.74–87. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.07.012>.
- Mo, W., Irschik, K., Oumeraci, H. and Liu, P. L. -F., 2007. A 3D numerical model for computing non-breaking wave forces on slender piles. *Journal of Engineering Mathematics*, 58, pp.19–30. <https://doi.org/10.1007/s10665-006-9094-6>.
- Mo, W. and Liu, P.L.-F., 2009. Three dimensional numerical simulations for non-breaking solitary wave interacting with a group of slender vertical cylinders. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 1, pp. 20–28. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-003>.
- Menter, Florian R., 1992. Influence of Freestream Values on K-Omega Turbulence Model Predictions. *AIAA journal* 30 (6), pp. 1657-59. <https://doi.org/10.2514/3.11115>.
- Mirzakhani, G., 2020. Experimental Investigation of Rigid Vegetation Effect on the Flow Pattern and Sediment Transport in the Shoreline, Thesis, Shahrekord University, Iran. 117p. (In Persian). <https://ganj.irandoc.ac.ir/viewer/cd59a002c1b4892040f5606ee4eb7e52>.
- Nandasena, N.A.K., Sasaki, Y. and Tanaka, N., 2012. Modeling field observations of the 2011 Great East Japan tsunami: efficacy of artificial and natural structures on tsunami mitigation.

- Coast Eng.* 67, pp.1–13. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.03.009>.
- Pope, S., 2000. *Turbulent Flows*. university of Cambridge, United Kingdom. <http://doi.org/10.1017/CBO9780511840531>
- Qu, K., Lan, G.Y., Sun, W.Y., Jiang, C.B., Yao, Y., Wen, B.H., Xu, Y.Y. and Liu, T.W., 2021. Numerical study on wave attenuation of extreme waves by emergent rigid vegetation patch. *Ocean Engineering*, 239, p.109865. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109865>
- Tannehill, J.C., Anderson, D.A., Pletcher, R.H., 1997. *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Second Edition*, Taylor and Francis Group, Washington, DC. <https://doi.org/10.1201/9781351124027>.
- Valipour, H., Shams, G. and Ghanbari-Adivi, E., Investigating the Amount of Forces Caused by Solitary Waves on Coastal Walls Using OpenFOAM Software. *Journal Of Marine Engineering*, pp.79-93. <http://dx.doi.org/10.52547/marineeng.18.37.1>. (In Persian).
- Wang, Y., Yin, Z. and Liu, Y., 2019. Numerical study of solitary wave interaction with a vegetated platform. *Ocean Engineering* 192, 1065612. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106561>.
- Xiao, H. and Huang, W., 2014. Three-dimensional numerical modeling of solitary wave breaking and force on a cylinder pile in a coastal surf zone. *Journal of Engineering Mechanics*, 141, A4014001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000834](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000834).
- Yin, M., Zhao, X., Luo, M. and Sun, H., 2021. Flow pattern and hydrodynamic parameters of pile breakwater under solitary wave using OpenFOAM. *Ocean Engineering*, 235, p.109381. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109381>.