

## Research Paper

# Numerical Study of Simple Pile Effect on the Coastal Waves Dissipation

Fateme Ghasemi Pirbalouti<sup>1</sup>, Elham Ghanbari Adivi<sup>2\*</sup>, Rohollah Fatahi Nafchi<sup>3</sup>, Nariman Mehranfar<sup>4</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. graduate of Water structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Iran. Email: Faghasemi959@gmail.com

<sup>1</sup> Assistant Prof, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Iran. \* Corresponding Author. Email: ghanbariadiivi@sku.ac.ir

<sup>1</sup> Associate Prof, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Iran. Email: fattahi@sku.ac.ir

<sup>4</sup> Ph.D. student of hydraulic structures, Department of Civil, Mining and Geology, Faculty of Polytechnique, Montreal University, Quebec, Canada. Email: Nariman.mehranfar@gmail.com



10.22125/IWE.2022.356768.1662

Received:  
**August 18, 2022**

Accepted:  
**November 20, 2022**

Available online:  
**August 23, 2023**

**Keywords:**  
Wave energy, Coast protection, Numerical modeling, Pile breakwater, Open Foam

## Abstract

One of the ways to protect beaches is to use pile breakwater. Simple pile breakwater is like rigid cylindrical obstacles. In this study, considering the simple piles on the coast with constant slope, their effects on waves were investigated by numerical modeling in OpenFOAM software. In line with flow turbulence modeling, Reynolds average method of Navier-Stokes equations (RANS) and  $k-\omega$ , SST models were used. 15 models were performed in scenarios with and without piles for 3 different heights of input wave. The piles had a diameter of 0.9 cm and a height of 32 cm and were contracted at widths of 30 and 60 cm and distances of  $5 \times 5$  and  $15 \times 15$  cm and with staggered layout. According to the results, in all the models with piles, there is an average increase of 75.16% in the power consumption of waves and a decrease of 62.88% in the energy transfer coefficient of waves compared to the case without piles. At the same width and distances, the piles have attracted more power by increasing the height of the wave, but the energy transfer coefficient has increased. In the same width and height of the entry wave, by reducing the distances of piles from  $15 \times 15$  to  $5 \times 5$ , the absorption of force increased and the wave energy transfer coefficient decreased. The results were compared with laboratory data. The closest results for wave force were models with width of 60 and distances of  $5 \times 5$  with the mean square root of normal error of 0.15 and correlation coefficient 0.96 to the laboratory model, which indicates the good accuracy of numerical model and appropriate performance of OpenFOAM software in modeling.

## 1. Introduction

Coastal areas form dynamic ecosystems at the land-sea interface. An important feature of these areas is their variability due to the exposure to many natural and human-made pressures. Among several non-structural and structural coast protection methods, the latter have detrimental effects on coastal environment.

With climate change, coastal regions around the world are more exposed to extreme events and natural hazards such as storms and floods. Therefore, considering the importance of beaches, increasing knowledge in coastal engineering and protecting coastal shores with different and efficient techniques is necessary. One of the ways to protect beaches is to use pile breakwater. Simple pile breakwater are

\* Corresponding Author: Elham Ghanbari Adivi  
Address: Department of Water Engineering, Shahrekord University, Iran

Email: ghanbariadiivi@sku.ac.ir  
Tel: 09166077037

like rigid cylindrical obstacles. In this study, considering the simple piles on the coast with constant slope, their effects on waves were investigated by numerical modeling in OpenFOAM software.

## 2. Materials and Methods

Setting and executing the numerical model was done by Open Foam software. Since in this problem, the flow is a two-phase type, interFoam solver which extended by Volume of Fluid method was used for modeling. In line with flow turbulence modeling, Reynolds average method of Navier-Stokes equations (RANS) and  $k-\omega$ , SST models were used. 15 models were performed in scenarios with and without piles for 3 different heights of input wave. The piles had a diameter of 0.9 cm and a height of 32 cm and were contracted at widths of 30 and 60 cm and distances of  $5 \times 5$  and  $15 \times 15$  cm and with staggered layout. Then, the results of this numerical model were measured by other research laboratory results by the criteria of the mean square root of normal error squares and the correlation coefficient of the accuracy and efficiency of the numerical model. The waves studied in this research were created based on the dam break phenomena.

## 3. Results

In all the models with piles, there is an average increase of 75.16% in the power consumption of waves and a decrease of 62.88% in the energy transfer coefficient of waves compared to the case without piles. At the same width and distances, the piles have attracted more power by increasing the height of the wave, but the energy transfer coefficient has increased. In the same width and height of the entry wave, by reducing the distances of piles from  $15 \times 15$  to  $5 \times 5$ , the absorption of force increased and the wave energy transfer coefficient decreased

## 4. Discussion and Conclusion

According to the results, in larger widths and denser arrangement of piles, the force changes, energy transfer coefficient and speed are higher and the efficiency of the obstacles has improved. The results were compared with laboratory data. The closest results for wave force were models with width of 60 and distances of  $5 \times 5$  with the mean square root of normal error of 0.15 and correlation coefficient 0.96 to the laboratory model, which indicates the good accuracy of numerical model and appropriate performance of OpenFOAM software in modeling.

## 5. Six important references

- 1) Menter Florian, R. 1992. Influence of Freestream Values on K-Omega Turbulence Model Predictions. AIAA journal 30, no. 6: 1657-59.
- 2) Mirzakhani, G. 2020. Experimental Investigation of Rigid Vegetation Effect on the Flow Pattern and Sediment Transport in the Shoreline. Master Thesis. Water Engineering- Water Structures. Faculty of Agriculture, Shahrekord University.
- 3) Ghanbari Adivi, E. 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. Volume 38. Issue2, Pages: 103-112. In Persian.
- 4) 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): 1502-1511.
- 5) 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): 530-541.
- 6) 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, 67:1-13.

## Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

## Acknowledgments

This study was funded by the University of Shahrekord, Iran. The financial support of this organization is appreciated (GN: 141/3107).



## مطالعه عددی عملکرد شمع‌های ساده در تضعیف امواج ساحلی

فاطمه قاسمی پیربلوطی<sup>۱</sup>، الهام قنبری عدیوی<sup>۲\*</sup>، روح الله فتاحی<sup>۳</sup>، نریمان مهرانفر<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۲۷ / ۱۴۰۱/۰۵

تاریخ پذیرش: ۲۸ / ۱۴۰۱/۰۸

مقاله پژوهشی برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد

### چکیده

یکی از راهکارهایی که برای حفاظت از سواحل وجود دارد استفاده از موج‌شکن‌های شمعی است. موج‌شکن شمعی ساده همچون موانع صلب استوانه‌ای است. در این پژوهش با در نظر گرفتن شمع‌های ساده در ساحل با شیب ثابت، به بررسی اثر آن‌ها بر امواج با مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار اپن فوم پرداخته شد. برای مدل‌سازی آشفتگی جریان از روش متوسط گیری رینولدز از معادلات ناویر-استوکس (RANS) و مدل  $k - \omega, SST$  استفاده شد. ۱۵ مدل در حالات با و بدون حضور شمع‌ها برای ۳ ارتفاع متفاوت موج ورودی انجام شد. شمع‌ها دارای قطر ۰/۹ و ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر بوده و در عرض‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر و فواصل ۵×۵ و ۱۵×۱۵ سانتی‌متر و با چیدمان زیگزاکی قرار داده شدند. طبق نتایج در همه مدل‌های با شمع به میزان متوسط ۷۵/۱۶ درصد افزایش استهلاک نیروی امواج و ۶۲/۸۸ درصد کاهش ضریب انتقال انرژی امواج نسبت به حالت بدون شمع صورت گرفته است. در عرض محدوده یکسان و فاصله‌ی ثابت میان شمع‌ها در مدل‌هایی که ارتفاع موج ورودی‌شان بیش‌تر است نیروی بیش‌تری نیز جذب می‌شود اما ضریب انتقال انرژی افزایش یافته است. در عرض و ارتفاع موج ورودی یکسان با کاهش فواصل شمع‌ها از ۱۵×۱۵ به ۵×۵ جذب نیرو افزایش و ضریب انتقال انرژی موج کاهش یافته است. نتایج حاصل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. نزدیک‌ترین نتیجه برای نیرو موج را مدل‌های با عرض ۶۰ و فواصل ۵×۵ با جذر میانگین مربعات خطای نرمال ۰/۱۵ و ضریب همبستگی ۰/۹۶ به مدل آزمایشگاهی داشته‌اند که بیانگر دقت خوب مدل عددی و عملکرد مناسب نرم‌افزار اپن فوم در مدل‌سازی است.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی موج، حفاظت ساحل، مدل‌سازی عددی، موج‌شکن شمع، اپن فوم

<sup>۱</sup> فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ایران

Email: Faghasemi959@gmail.com

Email: ghanbariadiivi@sku

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ایران

Email: fattahi@sku.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، ایران

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، گروه عمران، معدن و زمین‌شناسی، دانشکده پلی‌تکنیک، دانشگاه مونترال، کبک، کانادا

Nariman.mehranfar@gmail.com



## مقدمه

شهرهای ساحلی و بنادر به دلیل فعالیت‌های گردشگری، تجاری و بندرگاهی، حمل‌ونقل، استخراج ذخایر نفت و گاز و پالایشگاهی حائز اهمیت هستند. با تغییرات آب و هوایی کره زمین مناطق ساحلی در سراسر جهان بیش‌تر در معرض رویدادهای شدید و مخاطرات طبیعی مانند طوفان-های حاره‌ای و سیل قرار دارند. نمونه‌هایی از این وقایع در جهان مانند سونامی توهوکو سال ۲۰۱۱ در ژاپن و طوفان گونو سال ۱۳۸۶ در ایران سواحل جنوب شرقی و جریانات چرخنده حاره‌ای (شاهین سال ۱۴۰۰ در شرق و جنوب شرقی) و موارد بسیار دیگری وجود دارد که از زمان رخداد تا به حال اثرات سوئی بر محیط‌زیست و اقتصاد داشته‌اند. بنابراین با توجه به اهمیت سواحل، افزایش دانش در مهندسی ساحلی و حفاظت از کرانه‌های ساحلی با فنون مختلف و کارآمد ضروری است. از رویکردهای مهندسی ساحلی می‌توان حفاظت از سواحل در برابر امواج آب با انواع موج‌شکن‌ها را نام برد. موج‌شکن‌هایی به شکل شمع‌های صلب، عمودی و شکاف‌دار که مشابه یک سازه‌ی متخلخل عمل می‌کنند با افزایش زبری و مقاومت در برابر جریان آب، جهت حفاظت از ساحل به کار می‌روند. مزیت این نوع موج‌شکن‌ها نسبت به سایر سازه‌های ساحلی، سازگاری بیش‌تر با محیط‌زیست، حفظ کیفیت آب محیط‌های ساحلی، حفظ چشم‌اندازهای طبیعی و هزینه نسبتاً کم و صرفه اقتصادی است (Jiang et al. 2015). هنگام برخورد امواج به آرایه‌هایی از موج‌شکن‌های شمع، پراکندگی جریان رخ داده و علاوه بر انعکاس موج، با عبور جریان از میان شمع‌ها و جدایی در سمت پشت شمع‌ها اتلاف انرژی افزایش می‌یابد و موج با انرژی کم‌تری وارد منطقه ساحلی می‌شود (Jiang et al. 2015). تعامل بین امواج منظم (سینوسی) و موانع عمودی شکاف‌دار و مسئله انعکاس، انتقال و اتلاف انرژی موج، توسط بسیاری از محققان با روش‌های تجربی (Kakuno and Liu 1993)، و عددی (Isaacson et al. 1998) مورد مطالعه قرار گرفته است. تعاملات بین امواج منفرد و سازه‌های ساحلی نفوذ ناپذیر

نیز توسط بسیاری از محققان در گذشته مدل‌سازی شده از جمله مدل‌های میانگین‌گیری شده در عمق، مانند معادلات آب کم‌عمق (Arcas and Wei 2011) و معادلات نوع Boussinesq (Fuhrman and Madsen 2009). اما مطالعه تعامل بین امواج منفرد و موج‌شکن‌های شمع نادر است. با پیشرفت‌های اخیر تکنولوژی رایانه، رویکردهای معادلات ناویر-استوکس مانند روش‌های متوسط‌گیری رینولدز از معادلات ناویر-استوکس ( $RANS^1$ ) و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ ( $LES^2$ )، در بررسی اندرکنش موج منفرد با یک ساختار ساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مطالعات پیشگام در این زمینه می‌توان کار (Mo et al. 2007) که اعتبار سنجی یک مدل سه‌بعدی بر اساس معادلات اویلر، برای مطالعه برهم‌کنش موج منفرد با یک شمع منفرد عمودی است را نام برد. (Mo and Liu 2009) کار آن‌ها را به گروهی از سه شمع باریک بسط دادند. (Lara et al. 2013) مدل خود را با عنوان IH - FOAM در نرم-افزار اپن فوم<sup>3</sup> برای شبیه‌سازی بالاروی موج و نیرو حول یک و گروهی از سه شمع عمودی توسعه دادند. (Xiao and 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 لارا و همکاران، یک مدل عددی سه‌بعدی نرم‌افزار اپن فوم، مبتنی بر معادله ناویر-استوکس را برای مطالعه موج منفرد سونامی که با یک ردیف شمع برهم‌کنش می‌کند، توسعه دادند که در آن حرکات سطح آزاد توسط روش VOF ردیابی شد و مدل آشفتگی LES به‌کاربرده شد. سپس مدل عددی را با داده‌های آزمایشگاهی خود و همچنین با داده‌های (Huang and Yuan 2010) صحت سنجی و مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که اثرات بازدارنده امواج در مقایسه با یک شمع افزایش یافت و بالا آمدن موج در جلوی شمع‌های شکاف‌دار بزرگ‌تر بود. جدایی جریان در پشت شمع‌های شکاف‌دار به‌طور کامل توسعه یافت و ریزش گردابه به دلیل جریان شتاب‌یافته در شکاف‌ها شکل گرفت. همچنین

<sup>2</sup>.Large Eddy Simulation

<sup>3</sup>.OpenFOAM

<sup>1</sup>.Reynolds averaged Navier- stocks



سلول‌های چند وجهی نسبت داده و به حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی نظیر معادلات ناویر-استوکس می‌پردازد. برای حل مسئله به کمک این فوم سه مرحله وجود دارد: پیش‌پردازش<sup>۲</sup>، اجرا یا پردازش<sup>۳</sup> و پس پردازش<sup>۴</sup>. در مرحله پیش‌پردازش کاربر باید شرایط اولیه و مرزی، شبکه‌بندی هندسه، تعریف خصوصیات سیالات و آشفتگی را انجام دهد. در مرحله اجرا کاربر تنظیمات لازم از جمله مدل‌های عددی موردنظر، روش گسسته‌سازی<sup>۵</sup> معادلات و خروجی‌های موردنیاز را در حلگرها اعمال می‌کند و عملیات حل آغاز می‌گردد. و در مرحله آخر نتایج حاصل را که به صورت داده‌های خام هستند با نرم‌افزار پاراوو<sup>۶</sup> که نرم‌افزار نمایش داده‌ها بوده و این فوم از آن استفاده می‌کند به صورت گرافیکی مشاهده و برداشت کند (Sarreshtehdari and varedi, 2012).

مهم‌ترین اقدام در شبیه‌سازی انتخاب حلگر مناسب است و نحوه آماده‌سازی مسئله با توجه به آن مشخص می‌شود. در این پژوهش از حلگر اینترفوم که از حلگرهای مدل-سازی جریان چند فازی است و قابلیت مدل کردن جریان دوفازی، تراکم ناپذیر، هم‌دما و مخلوط نشدنی را دارد و با روش (VOF) توسعه یافته استفاده گردید. برای مدل‌سازی آشفتگی جریان، روش RANS و مدل  $k - \omega, SST^7$  آن به کار برده شد.

### مواد و روش‌ها:

#### مشخصات مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش برای بررسی عملکرد این فوم در مدل‌سازی عددی تأثیر شمع‌های صلب استوانه‌ای بر کاهش اثرات مخرب امواج در سواحل از مدل آزمایشگاهی (Mirzakhani, 2020) استفاده و نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید. مشخصات مدل آزمایشگاهی به شرح زیر است:

آزمایشات در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد با مقیاس ۱:۵۰ در کانال با طول ۲۰ متر و عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. شمع‌های ساحلی استوانه‌های

(Jiang et al. 2019) با استفاده از نرم‌افزار این فوم 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) با روش آزمایشگاهی به بررسی اثر چیدمان مختلف موانع استوانه‌ای در برابر امواج منفرد ساحلی پرداختند و در نتیجه برتری چیدمان زیگزاکی را در استهلاک نیروی امواج و کاهش نرخ انتقال رسوب گزارش دادند. (Valipour et al. 2022) به شبیه‌سازی برخورد موج با دایک ساحلی با نرم‌افزار این فوم پرداختند. مدل‌سازی در دو شرایط کلی با سازه و بدون سازه و برای سه ارتفاع سازه، سه موقعیت متفاوت قرارگیری سازه و پنج ارتفاع موج انجام گردید و نتایج نشان داد که استهلاک نیروها نسبت به حالت بدون سازه تا ۱۰ برابر افزایش پیدا کرده است. بیش‌تر مطالعات پیشین بر روی تعامل تک شمع یا یک ردیف شمع با امواج انجام شده و هیچ‌کدام به تأثیر آرایه‌های مختلف شمع‌ها نپرداختند که نیاز به بررسی بیش‌تر دارد بنابراین در این پژوهش مدل-سازی عددی شمع‌های ساده با تراکم و فواصل مختلف در برابر امواج ساحلی با ارتفاع متفاوت انجام می‌شود که در پژوهش‌های پیشین کم‌تر به آن پرداخته شده است.

یکی از نرم‌افزارهای تحقیقاتی و متن‌باز که برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی جریان سیال به روش (CFD) به کار می‌رود نرم‌افزار این فوم است که در نوشتن اشیا و کدها، حلگرها و کتابخانه‌های آن از زبان برنامه‌نویسی C++ استفاده شده است. این فوم از طریق حلگر اینترفوم<sup>۱</sup> از جریان دوفازی تراکم ناپذیر پشتیبانی می‌کند و برای بررسی دینامیک پیچیده جریان‌های آبی نظیر امواج ساحلی، یک ابزار مفید و قدرتمند است (Jiang et al. 2019). نرم‌افزار این فوم با استفاده از روش حل عددی حجم محدود (FVM) به شبکه‌بندی‌های ساختار یافته و غیر ساختار یافته سه‌بعدی،

<sup>5</sup>. Discrete

<sup>9</sup>.paraview

<sup>10</sup>.Shear-Stress Transport

<sup>1</sup>.interFoam

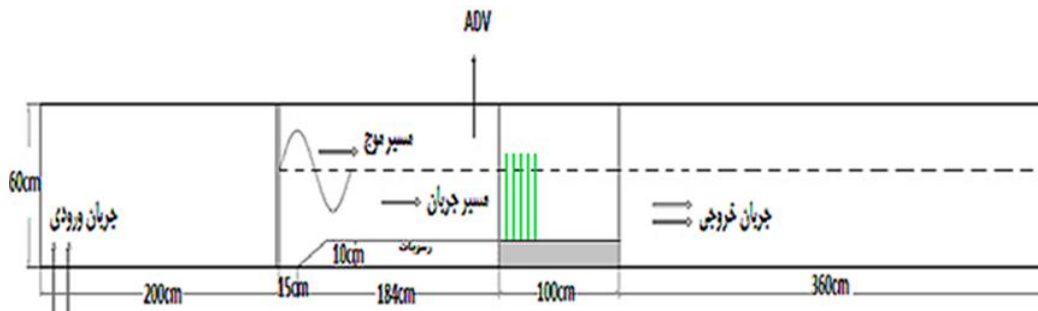
<sup>2</sup>.preprocess

<sup>3</sup>.run

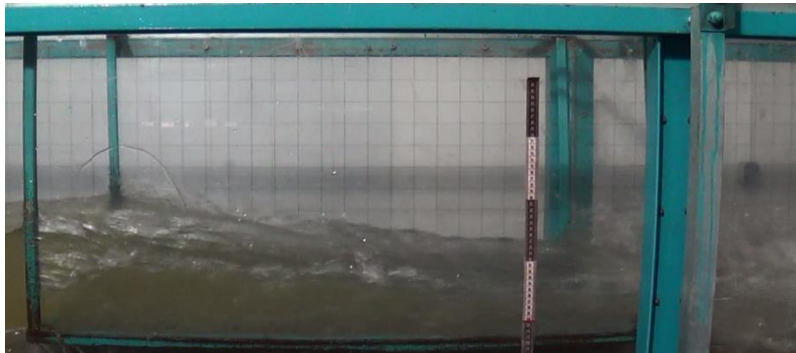
<sup>4</sup>.postprocess

پای ساحل می‌شکنند. شکل‌های (۱) تا (۳) این مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری نیروی موج از نیروسنج با کلاس دقت اندازه‌گیری C3 و خطای ۰/۰۲۳ درصد و برای اندازه‌گیری سرعت حرکت موج و تعیین الگوی جریان از سرعت سنج صوتی داپلر (ADV) استفاده شد.

پلاستیکی با ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر، قطر خارجی ۹ میلی‌متر بودند. نحوه‌ی چیدمان زیگزاکی با فواصل بین شمع‌های ۱۵×۱۵ و ۵×۵ سانتی‌متر در عرض‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر بود. به فاصله‌ی ۲ متر از ابتدای کانال یک صفحه پلاستیکی به‌عنوان دریچه کشویی برای ایجاد مخزن تولید موج قرار داده شد و سه ارتفاع موج ۶، ۹ و ۱۲ سانتی‌متر با تنظیم ارتفاع آب پشت دریچه از کف کانال به دست آمد که در



شکل (۱): کانال مستطیلی و شمع‌های ساحلی مورد استفاده در آزمایشات (Mirzakhani, 2020)



شکل (۲): نمایی از موج تولید شده بدون حضور شمع‌ها (Mirzakhani, 2020)



شکل (۳): نمایی از ساحل با وجود شمع‌ها در بالاترین تراکم (Mirzakhani, 2020)

دست می‌آید. برای سیال تراکم ناپذیر نیازی به حل معادله انرژی برای تعیین دما نیست زیرا توزیع دما ثابت فرض شده است. مفهوم فیزیکی معادله بقای جرم یا پیوستگی، از بین نرفتن جرم است. به عبارتی در المان سیال نرخ افزایش جرم برابر با نرخ خالص جرم ورودی

### معادلات حاکم

#### معادلات جریان

معادله بقای جرم، بقای اندازه حرکت و بقای انرژی، معادلات حاکم بر جریان سیال هستند. با حل معادلات بقای جرم و اندازه حرکت، میدان‌های سرعت و فشار به

ویسکوزیته آشفتگی به صورت تابعی از  $k$  و  $\varepsilon$  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  $k - \varepsilon$  را فعال نموده و مقدار صفر دارد که باعث عملکرد مناسب مدل در نواحی میانی و نزدیک دیواره‌ها می‌شود. همچنین برای بررسی انتقال تنش برشی آشفتگی، تعریف ویسکوزیته آشفتگی تغییر یافته که باعث پیش‌بینی شروع جدایش تحت گرادیان‌های فشار به طور دقیق‌تر است (Karimi, 2018). در تحقیقات منتر و نیز با توجه به سایر مطالعات پیشین با مدل  $k - \omega$ , SST نتایج 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  $\omega$  هست که به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] = \frac{\gamma}{\nu_T} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + 2\rho(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (7)$$

که در آن:

$$k = \frac{1}{2} u'_i u'_i \quad (8)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k \beta^*} \quad (9)$$

و  $\varepsilon$  اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی است:

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \quad (10)$$

در معادله (۶)،  $\tau_{ij}$  تنش رینولدز است که به صورت زیر

است. در حالت کلی معادله پیوستگی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

و در آن  $t$  زمان،  $\rho$  چگالی،  $u$  میدان سرعت سه‌بعدی است. برای سیال تراکم ناپذیر ( $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ ) و جریان سه‌بعدی، رابطه (۱) به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$u, v$  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 زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot T \quad (3)$$

که در آن  $g$  شتاب ثقل،  $T$  تانسور تنش (برشی، محوری، کشش سطحی) است (Tannehill et al. 1997). رابطه مومنتم را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + F \quad (4)$$

که  $P$  فشار،  $\tau$  تانسور تنش و  $F$  نشان‌دهنده مومنتم مربوط به نیروی کشش سطحی است. برای ساده شدن تعریف فشار در مرزها اثر فشار هیدرو استاتیک  $\rho g x$  از فشار  $P$  کم می‌شود و فشار تعدیل شده  $P^*$  با عنوان  $P - rgh$  در نرم‌افزار اپن فوم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{\nabla} P^* = \vec{\nabla} P - \vec{\nabla}(\rho \vec{g} \cdot \vec{x}) = \vec{\nabla} P - \rho \vec{g} - \vec{g} \cdot \vec{x} \vec{\nabla} \rho \quad (5)$$

## ۲-۲- معادلات آشفتگی

برای مدل‌سازی آشفتگی 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 متوسط‌گیری زمانی را انجام می‌دهند. یکی از آن‌ها  $k - \omega$ , SST است که (Menter, 1992) برای بهبود مدل ویلکاکس توسعه داد. این مدل با استفاده از ضرب دو مدل  $k - \omega$  و  $k - \varepsilon$  در یک تابع ترکیب‌کننده و سپس جمع با یکدیگر به دست آمده است. در مدل  $k - \varepsilon$  دو معادله اضافی  $k$  برای انرژی جنبشی آشفتگی و  $\varepsilon$  برای نرخ استهلاک آشفتگی به کار می‌رود و



تعریف می‌گردد:

### مشخصات مدل عددی

#### رسم هندسه و تولید شبکه<sup>۳</sup>

برای مدل‌سازی مسئله حاضر از مثال شکست سد (dam break) خود نرم‌افزار این فوم استفاده شد. در این مدل هندسه به صورت یک کانال سه‌بعدی در نظر گرفته شد که ابتدا با ابزار بلاک مش<sup>۴</sup> نرم‌افزار این فوم شبیه یک مکعب مستطیل ترسیم و به تعدادی بلوک تقسیم و قسمت‌های لازم روی آن تعریف شد شکل (۴). سپس شبکه‌بندی ابتدایی آن به صورت بلوک‌های شش‌وجهی<sup>۵</sup> ایجاد شد شکل (۵). مرحله بعد ایجاد اجسام مورد نظر در این هندسه است، برای ایجاد ساحل و شمع‌ها با فرمت STL از نرم‌افزار

سالومه<sup>۶</sup> استفاده و در این فوم فراخوانی شد. مرحله آخر کوپل هندسه کانال و اجسام است که از ابزار اسنپی هگزمش<sup>۷</sup> برای تولید شبکه سه بعدی و ریز کردن شبکه در ناحیه شمع‌ها استفاده شد شکل (۶). شمع‌ها با ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر و قطر ۹ میلی‌متر در فاصله ۵ سانتی‌متری از لبه ساحل با آرایش زیگزاکی، در عرض ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر با فواصل بین موانع ۱۵×۱۵ و ۵×۵ سانتی‌متر روی ساحل قرار داده شدند. ساحل به صورت افقی و فاقد شیب است. 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 برای ایجاد موج ورودی با ارتفاع ۹، ۶ و ۱۲ سانتی‌متر تعریف شد. در کل ۱۵ مدل ساخته شد که ۳ مدل بدون حضور شمع‌ها بود.

$$\tau_{ij} = \mu_T \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (11)$$

$u_i'$  مؤلفه‌های نوسانی سرعت،  $\delta_{ij}$  دلتای کرونکر (برای  $i = j$ ،  $\delta_{ij} = 1$  و برای  $i \neq j$ ،  $\delta_{ij} = 0$  می‌باشد)،  $\nu_T$  ویسکوزیته دینامیکی آشفته<sup>۱</sup> ( $\nu_T = \mu_T / \rho$ ) و  $\beta^*$  یکی از ثوابت مدل آشفته‌گی است.

$\sigma_k$  در معادله (۶) و  $\sigma_\omega$ ،  $\gamma$  و  $\beta$  در معادله (۷) به صورت زیر تعریف می‌گردند:

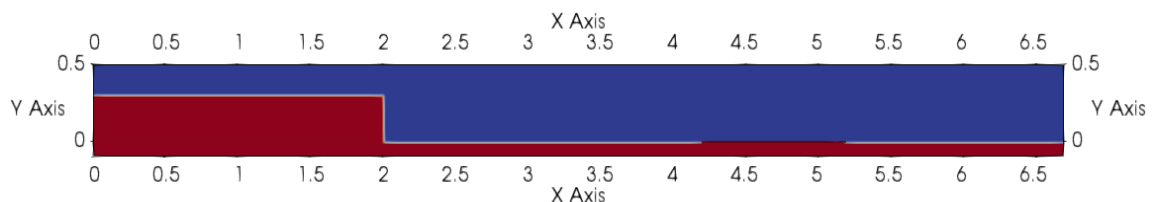
$$\sigma_k = F_1 \sigma_{k1} + (1 - F_1) \sigma_{k2} \quad (12)$$

$$\sigma_\omega = F_1 \sigma_{\omega1} + (1 - F_1) \sigma_{\omega2} \quad (13)$$

$$\gamma = F_1 \gamma_1 + (1 - F_1) \gamma_2 \quad (14)$$

$$\beta = F_1 \beta_1 + (1 - F_1) \beta_2 \quad (15)$$

که در آن  $\sigma_{k1}$ ،  $\sigma_{k2}$ ،  $\sigma_{\omega1}$ ،  $\sigma_{\omega2}$ ،  $\gamma_1$ ،  $\gamma_2$ ،  $\beta_1$  و  $\beta_2$  ثوابت مدل هستند که به صورت تابعی از نزدیک‌ترین فاصله از دیواره  $Z$  و تابع  $F_1$  که به آن تابع ترکیبی<sup>۲</sup> می‌گویند، تعریف می‌گردد. برای اطلاع از چگونگی تعیین این ضرایب به (Menter, 1992) مراجعه گردد.



شکل (۴): ایجاد هندسه کانال و ساحل

<sup>5</sup> Hexahedral

<sup>6</sup> Salome

<sup>7</sup> snappyHexMesh

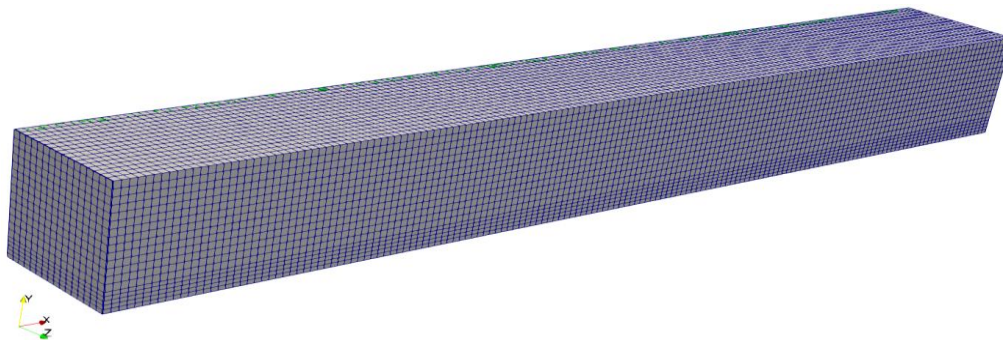
<sup>1</sup> Kinematic Eddy Viscosity

<sup>2</sup> Blending Function

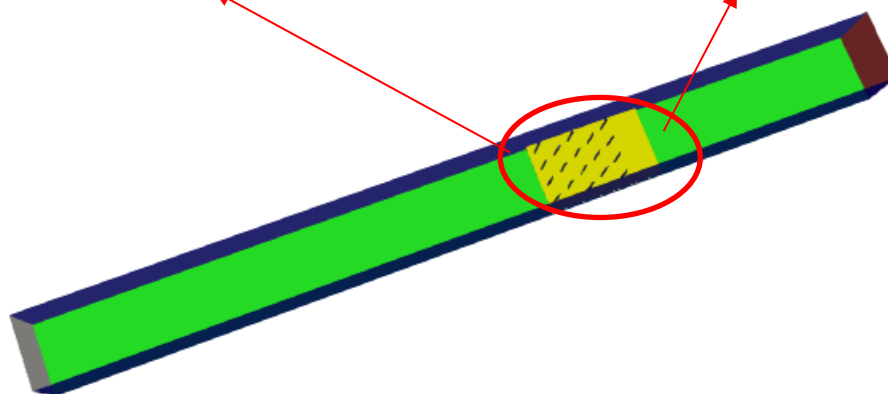
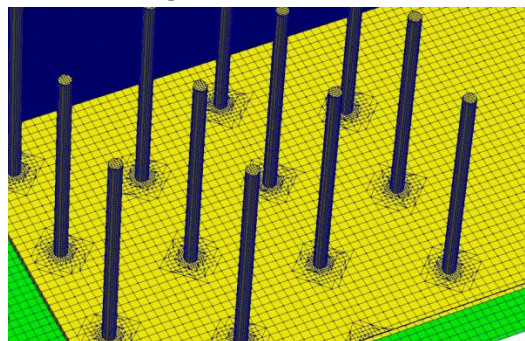
<sup>3</sup> mesh

<sup>4</sup> blockMesh





شکل (۵): شبکه‌بندی ابتدایی کانال



شکل (۶): موقعیت موانع ساحلی و شبکه ایجاد شده اطراف شمع‌ها، در فلوم مورد بررسی

۳ و ۴ دارد به طوری که با تغییر از مدل ۲ به ۳ نیرو ۱۴/۴۶ درصد افزایش یافت. همچنین تغییر بسیاری در نتایج مدل ۳ نسبت به ۴ مشاهده نمی‌شود و تنها ۰/۴ درصد با هم اختلاف دارند، چون با انتخاب تعداد شبکه کم‌تر زمان اجرای برنامه کاهش می‌یابد بنابراین شبکه‌بندی مدل ۳ به‌عنوان مدل نهایی انتخاب شد.

#### آنالیز حساسیت به اندازه شبکه

در مدل عددی کیفیت شبکه‌بندی بر دقت و صحت نتایج تأثیر مهمی دارد. حل یک مسئله دینامیک سیالات محاسباتی باید مستقل از اندازه شبکه باشد یعنی ریزتر کردن شبکه تأثیری بر نتایج نداشته باشد. برای آنالیز اندازه شبکه استفاده شده در این پژوهش ابتدا مدل ۱ مطابق با جدول (۱) تنظیم و اجرا شد، سپس مدل‌های بعدی تنظیم و برنامه برای هر چهار مدل با شرایط یکسان اجرا شد و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. مشاهده شد که میزان نیروی جذب شده در برابر امواج توسط موانع برای شبکه‌بندی درشت مدل ۱ و ۲ اختلاف زیادی با مدل‌های



داده شد؛ شرط مرزی مؤلفه فشار برای دیواره‌ها و بستر کانال، ساحل و شمع‌ها، fixedFluxPressure و برای سطح آب، totalPressure با مقادیر ثابت صفر تنظیم شد.

### گسسته سازی معادلات

روش حجم محدود با گسسته سازی دامنه محاسبات و معادلات حاکم بر مسئله، جریان سیال و شرایط حاکم بر آن را تحلیل می‌کند. فرم کلی معادله ناویر-استوکس به شکل رابطه (۱۶) است. برای گسسته سازی جمله مشتق اول زمان از طرح مرتبه‌ی دوم Euler// Crankicolson، جمله‌های گرادیان از طرح cellMDLimited Gauss linear، جمله‌های دیورژانس از طرح مرتبه اول Gauss upwind، Gauss linear و Gauss Minmod، و برای جمله لاپلاسیان از طرح Gauss linear limited استفاده شد.

$$\int_{V_P} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \int_{V_P} \nabla \cdot (\rho u \phi) dV - \int_{V_P} \nabla \cdot (\rho \Gamma_\phi \nabla \phi) dV = \int_{V_P} S_\phi(\phi) dV \quad (16)$$

### کنترل حل

در این مدل‌سازی برای کنترل حل معادلات از معیار عدد کورانت<sup>۴</sup> استفاده می‌شود. معیار عدد کورانت برای بررسی دقت در حل و پایداری مسئله به کار می‌رود. حین پردازش عدد کورانت باید کوچک‌تر از یک باشد. این عدد در مسائل مختلف متفاوت است. در این مسئله حداکثر عدد کورانت ۰/۸۵ و مقدار اولیه  $\Delta t$  برابر ۰/۰۰۰۲ ثانیه در نظر گرفته شد؛ 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.

جدول (۱): تعداد و اندازه شبکه در هر مدل

مدل	اندازه شبکه (متر)	تعداد کل شبکه	نیروی وارده به سازه (نیوتن)
۱	۰/۰۲	۳۲۳۲۵۰	۱۲/۲
۲	۰/۰۱۴	۹۴۷۳۳۳	۱۳/۶
۳	۰/۰۱۲	۱۵۲۷۹۵۰	۱۵/۹
۴	۰/۰۱	۲۵۸۹۰۰۰	۱۵/۹۷

### بررسی $y^+$

در جریان‌های آشفته برای بررسی کیفیت شبکه‌بندی، عدد بدون بعد  $y^+ = \frac{y \cdot u^*}{\nu}$  به کار می‌رود.  $y^+$  بیانگر از کمیت‌ها را در نگاه نزدیک دیواره به تصویر می‌کشد و با سرعت اصطکاکی متوسط متناسب بوده و مقدار آن برای هر شبیه‌سازی محاسبه می‌شود که در این رابطه  $y$  فاصله از بستر،  $u^*$  سرعت برشی،  $\nu$  لزجت سینماتیکی سیال است. در این مسئله  $y^+$  برای ساحل و شمع‌ها توسط این فوم محاسبه شده و مقدار میانگین آن ۵۴ است و با توجه به این‌که در محدوده ۳۰ تا ۳۰۰ قرار دارد مقداری مناسب به شمار می‌رود (Pope, 2000).

### مقادیر اولیه<sup>۱</sup> و شرایط مرزی<sup>۲</sup>

مقادیر اولیه نقطه شروعی برای حل مسئله هستند. شرایط مرزی نیز نقش مهمی در مدل‌سازی داشته و باید منطبق بر فیزیک مسئله باشند. این مقادیر را می‌توان به کمک سایت‌هایی نظیر (turbulence calculator) به دست آورد. برای دستیابی به مدلی مطابق با واقعیت، آنالیز حساسیت به شرایط مرزی انجام شد بدین صورت که تمام شرایط قابل استفاده برای مؤلفه‌های مسئله در مدل وارد شد و آن‌هایی که منجر به نتایج غیر فیزیکی و واگرایی مسئله می‌شد کنار گذاشته شد و در نهایت مقادیر اولیه و شرایط مرزی مناسب انتخاب شد. مقدار اولیه مؤلفه سرعت و فشار، مقدار ثابت<sup>۳</sup> صفر وارد شد. شرط مرزی مؤلفه سرعت برای دیواره‌ها و بستر کانال، ساحل و شمع-ها، noSlip و برای سطح آب، pressureInletOutletVelocity با مقدار ثابت صفر قرار

3. fixedValue

4. Courant number

1. initial values  
2. boundary conditions



به  $15 \times 15$ ،  $72/36$  درصد افزایش یافته است. در واقع افزایش تعداد ردیف شمع‌ها در مقابل امواج، باعث ایجاد مقاومت بیشتری در مقابل نیروی امواج شده و در نتیجه نیروی بیشتری از امواج گرفته است.

حالت دوم: فواصل شمع‌ها و عرض محدوده ثابت، ارتفاع موج ورودی متغیر. در تمام مدل‌ها با افزایش ارتفاع موج، نیرو افزایش یافته است. به‌عنوان نمونه طبق نتایج جدول (۴) نیروی جذب شده از امواج در عرض  $60$  و فواصل  $5 \times 5$ ، ارتفاع موج  $12$  سانتی‌متر نسبت به ارتفاع موج  $9$  سانتی‌متر  $20/95$  درصد و ارتفاع موج  $9$  سانتی‌متر نسبت به ارتفاع موج  $6$  سانتی‌متر  $55/12$  درصد و در فواصل  $15 \times 15$  به ترتیب به میزان  $26/6$  و  $57/44$  درصد افزایش داشته است. زیرا با افزایش ارتفاع موج سرعت آن هنگام برخورد با شمع‌ها بیشتر شده، برآمدگی موج حین گذر از ساحل و نیروی درگ زیادتر شده و در نتیجه نیروی بیش‌تری از موج گرفته می‌شود. علاوه بر این با افزایش ارتفاع موج تا حد معینی که وابسته به ارتفاع شمع‌هاست، سطح تماس شمع‌ها با موج افزایش یافته و از این طریق نیز نیروی درگ شمع‌ها افزایش می‌یابد.

حالت سوم: ارتفاع موج و فواصل شمع‌ها ثابت، عرض محدوده متغیر. با توجه به نتایج، در یک فاصله ثابت شمع‌ها، با افزایش عرض محدوده‌ی دارای شمع، نیرو افزایش یافته است. زیرا تعداد ردیف بیش‌تری از شمع‌ها در مقابل موج قرار دارند و نیروی بیش‌تری را جذب می‌کنند. در عرض  $60$  و فواصل  $5 \times 5$  نسبت بدون بعد نیرو به میزان متوسط برای هر سه ارتفاع موج ورودی نسبت به عرض  $30$ ،  $17/64$  درصد و در فواصل  $15 \times 15$ ،  $24/03$  درصد افزایش یافته است. به‌عنوان نمونه در ارتفاع موج  $12$  و فاصله  $15 \times 15$ ، نسبت بی‌بعد نیرو در عرض  $60$  سانتی‌متر نسبت به عرض  $30$  افزایش  $24/67$  درصدی داشته است. نتایج به تفکیک در جدول (۵) آورده شده است.

## نتایج و بحث

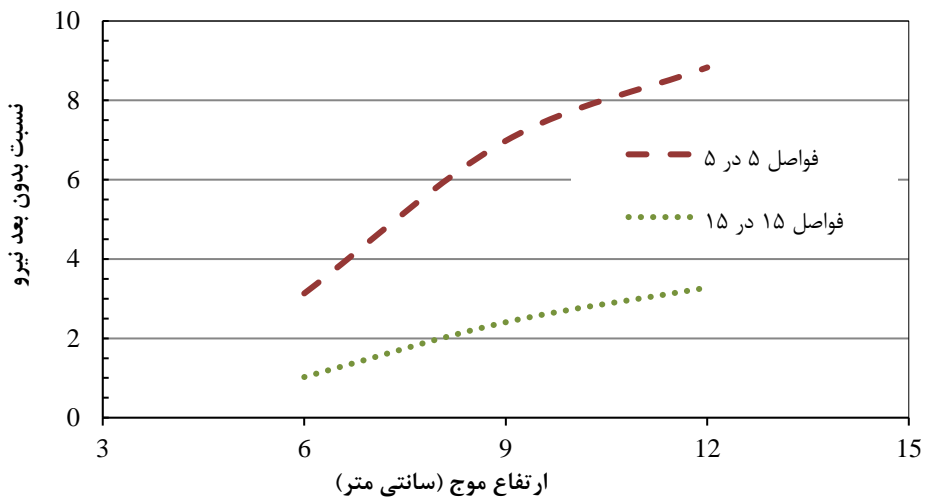
### اثر شمع‌ها بر کاهش نیروی امواج

نرم‌افزار این فوم نیروی وارد شده به ساحل در حالت با و بدون شمع‌ها را محاسبه کرده و نتایج در جدول (۲) ارائه شده است. برای بررسی تأثیر شمع‌ها بر کاهش نیروی امواج از پارامتر بی‌بعد  $F_t$  به صورت رابطه  $(F_t = \frac{F_s - F}{F})$  استفاده شد (که در آن  $F$ : نیرو در حالت بدون شمع و  $F_s$ : نیرو در حالت با حضور شمع می‌باشد). نتایج در قالب نمودار  $F_t$  بر حسب ارتفاع موج ورودی در شکل (۵) رسم شده است.

در کل مدل‌های با حضور شمع، نیروهای جذب شده نسبت به حالت بدون شمع افزایش داشته‌اند. به‌عنوان نمونه با توجه به جدول ۴ در عرض  $60$  و مدل‌ها با فواصل شمع  $5 \times 5$  و ارتفاع موج‌های  $6$ ،  $9$  و  $12$  نیروی مستهلک شده به ترتیب  $75/8$ ،  $87/47$  و  $89/83$  درصد و در مدل‌ها با فواصل  $15 \times 15$  به ترتیب  $50/59$ ،  $70/64$  و  $76/62$  درصد نسبت به حالت بدون شمع بیش‌تر شده است که نشان دهنده‌ی تأثیر شمع‌ها در کاهش نیروی امواج هنگام عبور از ساحل است.

برای بررسی تأثیر حضور شمع‌ها با چینش‌های متفاوت بر نیروی امواج سه حالت بررسی شده است:

حالت اول: ارتفاع موج و عرض محدوده ثابت، فواصل شمع‌ها متغیر. هنگامی که عرض محدوده ثابت و فواصل متغیر است، تراکم شمع‌ها تغییر می‌کند. با کاهش فواصل و افزایش تراکم، نیروی به دست آمده افزایش یافته است. نتایج در جدول (۳) ارائه شده. در عرض  $30$  به‌طور متوسط برای هر سه ارتفاع موج با کاهش فواصل شمع‌ها از  $15 \times 15$  به  $5 \times 5$  نسبت بدون بعد نیرو  $67/64$  درصد و در عرض  $60$ ،  $65/24$  درصد افزایش یافته. به‌عنوان نمونه در عرض  $30$  و ارتفاع موج  $6$  سانتی‌متر، نسبت بی‌بعد نیرو در فاصله  $5 \times 5$  نسبت



شکل (۵): نمودار  $F_t$  بر حسب ارتفاع موج ورودی عرض ۶۰ سانتی‌متر در مدل عددی حاضر

جدول (۲): مقادیر نیروی جذب‌شده از امواج در حالت‌های با و بدون شمع‌ها در مدل عددی حاضر

فواصل (سانتی‌متر)	عرض (سانتی‌متر)	تعداد ردیف	ارتفاع موج (سانتی‌متر)	نیرو (نیوتن)	نیروی مستهلک‌شده نسبت به حالت بدون شمع (درصد)
			۶	۳۳/۵۵	۷۴/۹۶
	۳۰	۷	۹	۸۵/۹	۸۳/۹۳
			۱۲	۱۲۸	۸۷/۱۲
۵×۵			۶	۳۴/۷۱	۷۵/۸
	۶۰	۱۳	۹	۱۱۰/۱۲	۸۷/۴۷
			۱۲	۱۶۲	۸۹/۸۳
			۶	۱۵/۳۵	۴۵/۲۸
	۳۰	۳	۹	۳۸/۸۱	۶۴/۴۴
۱۵×۱۵			۱۲	۵۵/۲۴	۷۰/۱۷
			۶	۱۶/۵	۵۰/۵۹
	۶۰	۵	۹	۴۷	۷۰/۶۹
			۱۲	۷۰/۵	۷۶/۶۲
			۶	۴/۸	
حالت بدون شمع			۹	۸/۱۳	
			۱۲	۱۶/۴۸	



جدول (۳): نرخ افزایش نسبت بدون بعد نیرو به ازای کاهش فواصل بین شمع‌ها از ۱۵×۱۵ به ۵×۵ در مدل عددی حاضر

فواصل (سانتی‌متر)	عرض (سانتی‌متر)	تعداد ردیف	ارتفاع موج (سانتی‌متر)	نیرو (نیوتن)	$F_t$	نرخ افزایش $F_t$ به ازای کاهش فواصل بین شمع‌ها (درصد)
			۶	۳۳/۵۵	۲/۹۹	۷۲/۳۶
	۳۰	۷	۹	۸۵/۹	۵/۲۲	۶۵/۳۱
۵×۵			۱۲	۱۲۸	۶/۷۷	۶۵/۲۴
			۶	۳۴/۷۱	۳/۱۳	۶۷/۳۱
	۶۰	۱۳	۹	۱۱۰/۱۲	۶/۹۸	۶۵/۵۳
			۱۲	۱۶۲	۸/۸۳	۶۲/۸۸
			۶	۱۵/۳۵	۰/۸۳	
	۳۰	۳	۹	۳۸/۸۱	۱/۸۱	
۱۵×۱۵			۱۲	۵۵/۲۴	۲/۳۵	
			۶	۱۶/۵	۱/۰۲	
	۶۰	۵	۹	۴۷	۲/۴	
			۱۲	۷۰/۵	۳/۲۸	
			۶	۸/۴		
حالت	بدون	شمع	۹	۱۳/۸		
			۱۲	۱۶/۴۸		

جدول (۴): نرخ افزایش نسبت بدون بعد نیرو در ارتفاع موج‌های متفاوت در مدل عددی حاضر

فواصل (سانتی‌متر)	عرض (سانتی‌متر)	تعداد ردیف	ارتفاع موج (سانتی‌متر)	$F_t$	نرخ افزایش $F_t$ به ازای افزایش ارتفاع موج (درصد)
			۶	۲/۹۹	۴۲/۶۹
	۳۰	۷	۹	۵/۲۲	۲۲/۷۹
۵×۵			۱۲	۶/۷۷	
			۶	۳/۱۳	
	۶۰	۱۳	۹	۶/۹۸	۵۵/۱۲
			۱۲	۸/۸۳	۲۰/۹۵
			۶	۰/۸۳	
	۳۰	۳	۹	۱/۸۱	۵۴/۳۵
۱۵×۱۵			۱۲	۲/۳۵	۲۲/۹۴
			۶	۱/۰۲	
	۶۰	۵	۹	۲/۴	۵۷/۴۴
			۱۲	۳/۲۸	۲۶/۶



جدول (۵): نرخ افزایش نسبت بدون بعد نیرو در اثر افزایش دو برابری عرض از ۳۰ به ۶۰ سانتی‌متر در مدل عددی حاضر

فواصل (سانتی‌متر)	عرض (سانتی‌متر)	تعداد ردیف	ارتفاع موج (سانتی‌متر)	$F_t$	نرخ افزایش $F_t$ در اثر افزایش دوبرابری عرض (درصد)
۵×۵	۳۰	۶	۶	۲/۹۹	
		۷	۹	۵/۲۲	
		۱۲	۱۲	۶/۷۷	
	۶۰	۶	۶	۳/۱۳	۴/۴۱
		۱۳	۹	۶/۹۸	۲۵/۱۴
		۱۲	۱۲	۸/۸۳	۲۳/۳۶
۱۵×۱۵	۳۰	۳	۹	۱/۸۱	
		۱۲	۱۲	۲/۳۵	
		۶	۶	۱/۰۲	۱۹/۱۹
	۶۰	۵	۹	۲/۴	۲۴/۶۷
		۱۲	۱۲	۳/۲۸	۲۸/۲۵

خطا (NRMSE) و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) بکار رفته و نتایج در جدول (۶) ارائه شده است. نزدیک بودن مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال به صفر نشان دهنده بالا بودن دقت پیش‌بینی است. همچنین ضریب همبستگی مقداری بین ۱- تا ۱ دارد و مقدار ۱ بیان‌کننده پیش‌بینی بدون خطا است.

مقایسه نیروهای به دست آمده در مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

برای صحت‌سنجی نتایج این مدل عددی از نتایج پژوهش آزمایشگاهی (Mirzakhani, 2020) استفاده شد. برای ارزیابی و مقایسه، معیارهای آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، نرمال‌سازی جذر میانگین مربعات

جدول (۶): مقایسه نیروهای مدل عددی حاضر و مدل آزمایشگاهی (Mirzakhani, 2020)

R	NRMSE	RMSE	نیرو (نیوتن)		ارتفاع موج (سانتی‌متر)	عرض (سانتی‌متر)	فواصل (سانتی‌متر)	
			آزمایشگاهی	عددی				
۰/۹۹	۰/۲۴	۲۲/۸۵	۲۲/۶	۳۳/۵۵	۶	۳۰	۵×۵	
			۶۲/۳۴	۸۵/۹	۹			
			۹۸/۱۴	۱۲۸	۱۲			
	۰/۹۶	۰/۱۵	۱۸/۶	۳۸/۷۱	۳۴/۷۱	۶		۶۰
				۹۵/۲۳	۱۱۰/۱۲	۹		
				۱۹۰/۲۹	۱۶۲	۱۲		
۰/۹۹	۰/۲۶	۱۰/۲۹	۱۷/۰۹	۱۵/۳۵	۶	۳۰	۱۵×۱۵	
			۴۳/۳	۳۸/۸۱	۹			
			۷۲/۴۱	۵۵/۲۴	۱۲			
		۶						
			۲۲/۲۱	۱۶/۵				



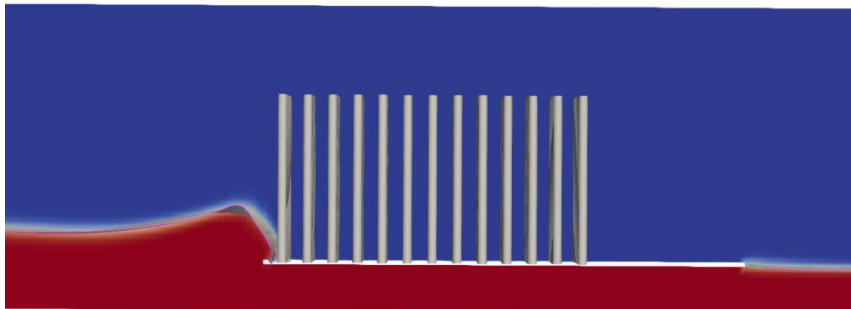
۰/۹۹	۰/۲۴	۱۲/۹۸	۵۵/۳۶	۴۷	۹	۶۰
			۹۰/۵۸	۷۰/۵	۱۲	

### اثر شمع‌ها بر جذب و استهلاك انرژی موج در قالب ضریب انتقال انرژی ( $K_t$ )

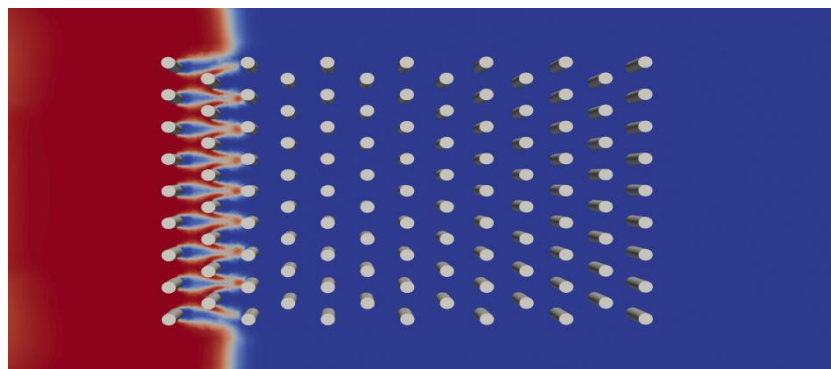
برای بررسی تأثیر شمع‌ها در جذب و استهلاك انرژی موج در این پژوهش از ضریب انتقال انرژی به صورت رابطه  $(K_t = \frac{E_s}{E})$  که نسبت انرژی موج بعد از شمع‌ها به انرژی موج قبل از شمع‌ها است، استفاده شد. با در نظر گرفتن فرضیات ساده شونده و بر اساس مدل‌سازی انجام شده، انرژی موج از رابطه  $(E = \frac{\rho g H^2}{8})$  محاسبه گردید. ارتفاع موج در سه نقطه ابتدای ساحل (قبل شمع‌ها)، بعد شمع‌ها و انتهای ساحل توسط مدل تعیین شده است. به عنوان مثال شکل (۶) برخورد موج ورودی با ارتفاع ۶ سانتی‌متر را با شمع‌ها در عرض ۶۰ و فواصل ۵×۵ نمایش می‌دهد.

مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال در همه مدل‌ها کمتر از ۰/۲۷ است که مقداری مناسب و بیانگر دقت نسبتاً بالایی هست. ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۹۵ است که بیانگر میزان خطای بسیار کمی است.

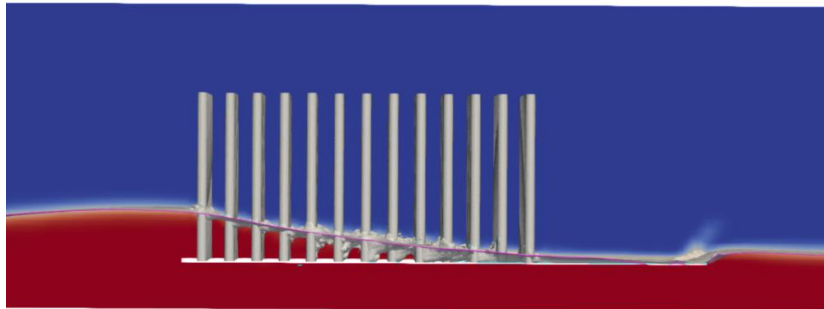
نزدیک‌ترین نتایج به مدل آزمایشگاهی را مدل‌های عرض ۶۰ با فواصل موانع ۵×۵ با مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال ۰/۱۵ داشته و در این تراکم اختلاف نیرو با مدل آزمایشگاهی برای سه ارتفاع موج ورودی به میزان متوسط ۱۳/۶۱ درصد است که مدل با ارتفاع موج ۶ سانتی‌متر نزدیک‌ترین نتیجه را داشته است. بنابراین مدل عددی به خوبی توانسته شرایط آزمایشگاهی را مدل کند.



الف- برخورد به اولین ردیف شمع‌ها از نمای روبرو



ب- عبور از ردیف‌های اول شمع‌ها از نمای بالا



ج- عبور از آخرین ردیف شمع‌ها

شکل (۶، الف - ج): برخورد موج با ارتفاع ۶ سانتی‌متر با فواصل شمع ۵×۵

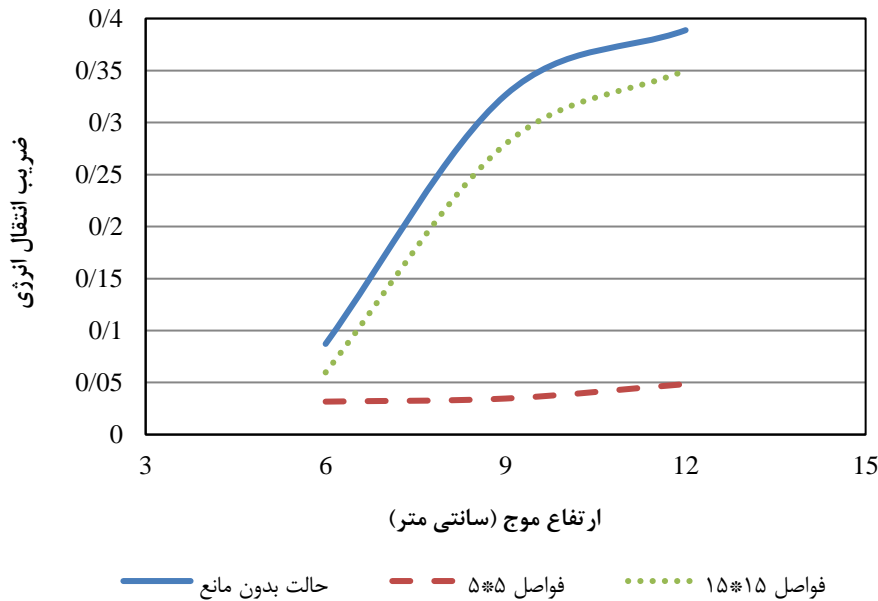
شده است که نشان دهنده تأثیر شمع‌ها در کاهش انرژی امواج هنگام عبور از ساحل است. بنابراین با افزایش تراکم شمع‌ها کاهش بیش‌تری در ضریب انتقال انرژی نسبت به حالت بدون شمع مشاهده می‌شود که نشانگر تأثیر شمع‌ها بر جذب و استهلاک انرژی موج از طریق ایجاد اصطکاک و زبری است. در شکل (۷) ضریب انتقال انرژی برحسب ارتفاع موج برای حالت بدون شمع و حالات با حضور شمع قابل مشاهده است.

برای مقایسه حالت با حضور شمع و بدون شمع ساحل، ضریب انتقال انرژی به صورت نسبت انرژی موج ایجاد شده در انتهای ساحل افقی به انرژی موج در ابتدای ساحل در نظر گرفته شده و نتایج در جدول (۷) ارائه شده است. در تمام حالات با حضور شمع‌ها، ضریب انتقال انرژی موج نسبت به حالات بدون شمع کاهش داشته است. در مدل با عرض ۶۰ و فواصل ۵×۵، ارتفاع موج‌های ۶، ۹ و ۱۲ سانتی-متر ضریب انتقال انرژی نسبت به حالت بدون شمع به ترتیب ۸۸/۱۴، ۸۶/۱۴ و ۸۴/۴۷ درصد و در مدل با فواصل ۱۵×۱۵ به ترتیب ۶۳/۷۴، ۲۷/۷۵ و ۲۷/۰۵ درصد کم‌تر

جدول (۷): ضریب انتقال انرژی موج در حالت با و بدون حضور شمع در مدل عددی حاضر

متوسط نرخ کاهش $K_t$	نرخ کاهش $K_t$ (درصد)	$K_t$	ارتفاع موج (سانتی‌متر)				عرض (سانتی‌متر)	فواصل (سانتی‌متر)
			انتهای ساحل	ابتدای ساحل	ورودی	عرض		
	۸۵/۵۵	۰/۰۱۲	۰/۰۱۱	۰/۰۹۸	۶			
۶۸/۲۶	۶۴/۴۹	۰/۱۱۶	۰/۰۶۳	۰/۱۸۵	۹	۳۰		
	۵۴/۷۴	۰/۱۷۶	۰/۰۹۹	۰/۲۳۶	۱۲		۵×۵	
	۸۸/۱۴	۰/۰۱	۰/۰۱۲	۰/۱۱۸	۶			
۸۶/۲۴	۸۶/۱۴	۰/۰۴۵	۰/۰۴	۰/۱۸۸	۹	۶۰		
	۸۴/۴۷	۰/۰۶	۰/۰۵۸	۰/۲۳۶	۱۲			
	۱۴/۶۷	۰/۰۷۴	۰/۰۳	۰/۱۱	۶			
۳۴/۷۲	۴۴/۶۸	۰/۱۸۱	۰/۰۶۸	۰/۱۶	۹	۳۰		
	۴۴/۸۳	۰/۲۱۴	۰/۰۸۸	۰/۱۹	۱۲		۱۵×۱۵	
	۶۳/۷۴	۰/۰۳۲	۰/۰۱۶	۰/۰۹	۶			
۳۹/۵۱	۲۷/۷۵	۰/۲۳۶	۰/۰۶۸	۰/۱۴	۹	۶۰		
	۲۷/۰۵	۰/۲۸۴	۰/۰۹	۰/۱۶۹	۱۲			
		۰/۰۸۷	۰/۰۳۱	۰/۱۰۵	۶			
		۰/۳۲۶	۰/۰۸۴	۰/۱۴۷	۹		حالت بدون شمع	
		۰/۳۸۹	۰/۱۰۶	۰/۱۷	۱۲			





شکل (۷): نسبت  $K_t$  برای حالات با و بدون شمع در عرض ۶۰ با فواصل متفاوت شمع‌ها در مدل عددی حاضر

بیش‌تری از شمع‌ها عبور کرده و چون ارتفاع آب با انرژی موج متناسب است انرژی بیش‌تری از موج منتقل می‌شود. بنابراین کارایی شمع‌ها در ارتفاع موج‌های بالاتر، در استهلاک انرژی موج کاهش می‌یابد. به‌عنوان نمونه طبق نتایج جدول (۸) در عرض ۶۰ و فاصله  $5 \times 5$  ضریب انتقال انرژی برای ارتفاع موج ۱۲ نسبت به ۹ سانتی‌متر  $28/61$  درصد و ارتفاع موج ۹ نسبت به ۶ سانتی‌متر  $8/62$  درصد افزایش یافته است.

برای بررسی تأثیر حضور شمع‌ها بر ضریب انتقال انرژی موج دو حالت بررسی شده است و برای محاسبه ضریب انتقال انرژی، نسبت انرژی موج بعد از شمع‌ها به انرژی موج ابتدای ساحل در نظر گرفته شده است:

حالت اول: فواصل شمع‌ها و عرض محدوده ثابت، ارتفاع موج ورودی متغیر. در تمام مدل‌های عددی با افزایش ارتفاع موج، ضریب انتقال انرژی افزایش یافته است زیرا ارتفاع آب قبل از شمع‌ها و سرعت جریان افزایش می‌یابد درحالی‌که توانایی شمع‌ها در مقابله با امواج ثابت است، ارتفاع آب

جدول (۸): نرخ افزایش ضریب انتقال انرژی در ارتفاع موج‌های متفاوت در مدل عددی حاضر



ارتفاع موج (سانتی متر)						
فواصل (سانتی متر)	عرض (سانتی متر)	ورودی	ابتدای ساحل	بعد موانع	$K_t$	نرخ افزایش $K_t$ (درصد)
		۶	۰/۰۹۸		۰/۰۱۷	
	۳۰	۹	۰/۱۸۵	۰/۰۵۴	۰/۰۸۵	۷۹/۳۵
۵×۵		۱۲	۰/۲۳۶	۰/۰۷۵	۰/۱۰۱	۱۵/۶۴
		۶	۰/۱۱۸	۰/۰۲۱	۰/۰۳۲	
	۶۰	۹	۰/۱۸۸	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۸/۶۲
		۱۲	۰/۲۳۶	۰/۰۵۲	۰/۰۴۸	۲۸/۶۱
		۶	۰/۱۱	۰/۰۵۲	۰/۲۲۳	
	۳۰	۹	۰/۱۶	۰/۱۰۵	۰/۴۳۱	۴۸/۱۱
۱۵×۱۵		۱۲	۰/۱۹	۰/۱۳۸	۰/۵۲۷	۱۸/۳۶
		۶	۰/۰۹	۰/۰۲۲	۰/۰۶	
	۶۰	۹	۰/۱۴	۰/۰۷۴	۰/۲۷۹	۷۸/۶۱
		۱۲	۰/۱۶۹	۰/۱	۰/۳۵	۲۰/۲

انرژی به یک نزدیک تر است. نتایج در جدول (۹) ارائه شده است. در عرض ۳۰ با کاهش فاصله از ۱۵×۱۵ به ۵×۵ ضریب انتقال انرژی به میزان متوسط ۸۴/۴ درصد و در عرض ۶۰، ۷۳/۵۷ درصد کاهش ضریب انتقال انرژی موج رخ داده است. بیشترین مقدار کاهش ضریب انتقال انرژی ۹۲/۱۲ درصد و مربوط به عرض ۳۰ و ارتفاع موج ۶ سانتی-متر است که از ۰/۲۲۳ به ۰/۰۱۷ رسیده است.

حالت دوم: ارتفاع موج و عرض محدوده ثابت، فواصل شمع-ها متغیر. با کاهش فاصله میان شمعها و افزایش تراکم، ضریب انتقال انرژی موج کاهش می‌یابد. زیرا تعداد ردیف بیشتری از شمعها در مقابل جریان قرار دارد که با افزایش اصطکاک و زبری باعث کاهش انرژی موج می‌شوند. در تراکم‌های پایین مقاومت کمتری در مقابل جریان وجود دارد و کاهش در ارتفاع موج کم‌تر شده و ضریب انتقال

جدول (۹): نرخ کاهش ضریب انتقال انرژی در فواصل مختلف در مدل عددی حاضر

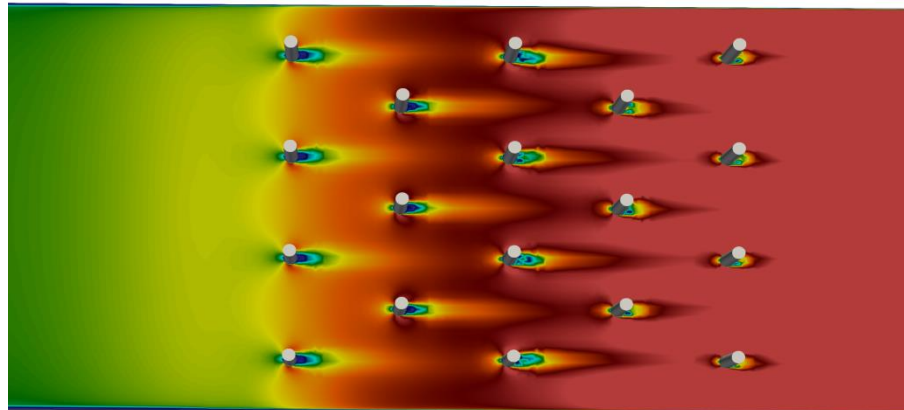
فواصل (سانتی متر)	عرض (سانتی متر)	تعداد ردیف	ارتفاع موج (سانتی متر)	$K_t$	نرخ کاهش $K_t$ (درصد)
			۶	۰/۰۱۷	۹۲/۱۲
	۳۰	۷	۹	۰/۰۸۵	۸۰/۲۲
۵×۵			۱۲	۰/۱۰۱	۸۰/۸۵
			۶	۰/۰۳۲	۴۶/۹۹
	۶۰	۱۳	۹	۰/۰۳۵	۸۷/۵۹
			۱۲	۰/۰۴۸	۸۶/۱۳
			۶	۰/۲۲۳	
	۳۰	۳	۹	۰/۴۳۱	
۱۵×۱۵			۱۲	۰/۵۲۷	
			۶	۰/۰۶	
	۶۰	۵	۹	۰/۲۷۹	
			۱۲	۰/۳۵	



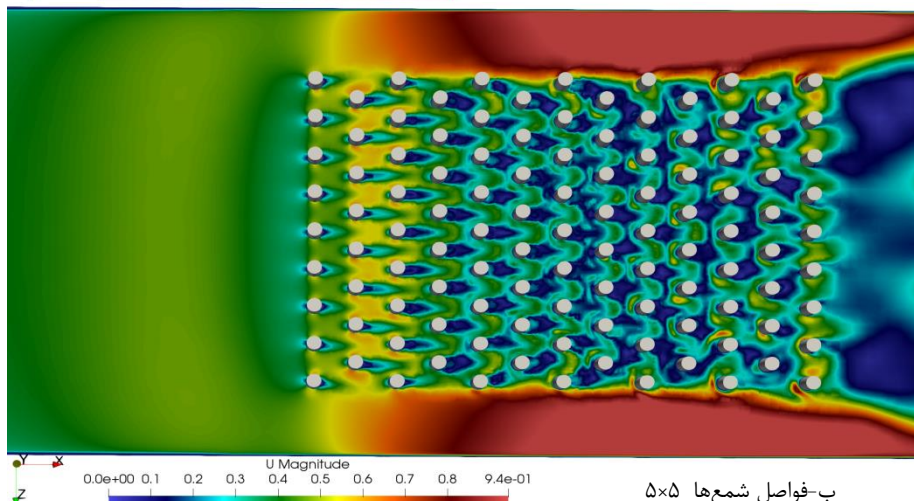
### تأثیر شمع‌ها بر سرعت جریان

با مدل‌سازی انجام شده نرم‌افزار اپن فوم قادر است مقادیر سرعت در هر سلول را محاسبه نماید. در شکل (۸) توزیع سرعت در کانال برای ارتفاع موج ۶ سانتی‌متر در زمان‌های ورود به ساحل و گذر از ساحل برای حالت بدون شمع و با شمع‌ها عرض ۶۰ با فواصل ۱۵×۱۵ و ۵×۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است با حضور شمع‌ها در مسیر حرکت موج، پس از عبور تاج موج از شمع-ها، ناحیه جدایش در پشت آن‌ها و گردابه‌هایی به شکل متقارن در اطراف شمع‌ها ایجاد شده و سرعت موج کاهش می‌یابد. با کاهش فواصل شمع‌ها از ۱۵×۱۵ به ۵×۵ و بیش-

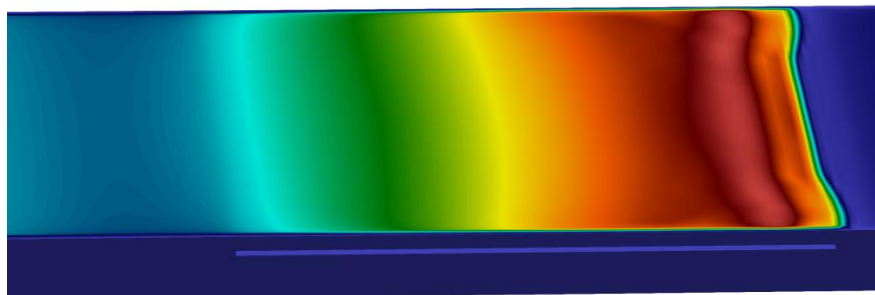
تر شدن تعداد شمع‌ها در مقابل موج، سرعت موج نیز کاهش بیشتری دارد. در شکل (۹) نیز بردارهای سرعت جریان برای حالت بدون شمع و فاصله شمع ۵×۵ در مقطع و گام زمانی واحد نمایش داده شده؛ وجود شمع‌ها باعث آشفتگی جریان می‌شود، خطوط جریان هنگام برخورد با شمع‌ها از مسیر خود منحرف شده و بردارهای سرعت که در حالت بدون شمع مسیر مستقیم افقی داشتند در راستایی غیر از مسیر مستقیم خود منتشر می‌شوند که باعث کاهش سرعت جریان می‌شود. بنابراین موج در مدت‌زمان طولانی‌تری از منطقه حفاظت شده ساحل گذر می‌کند، هر چه سرعت موج کاهش و زمان عبور افزایش یابد اهمیت وجود شمع‌های ساحلی نمایان‌تر می‌گردد.



الف- فواصل شمع‌ها ۱۵×۱۵



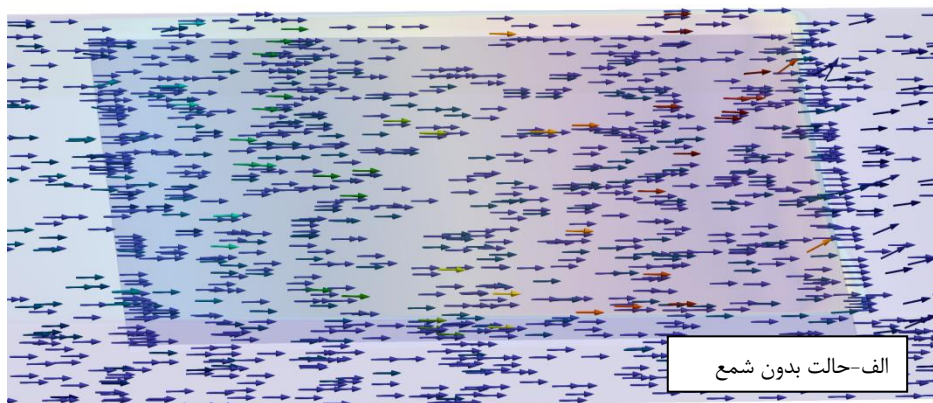
ب- فواصل شمع‌ها ۵×۵



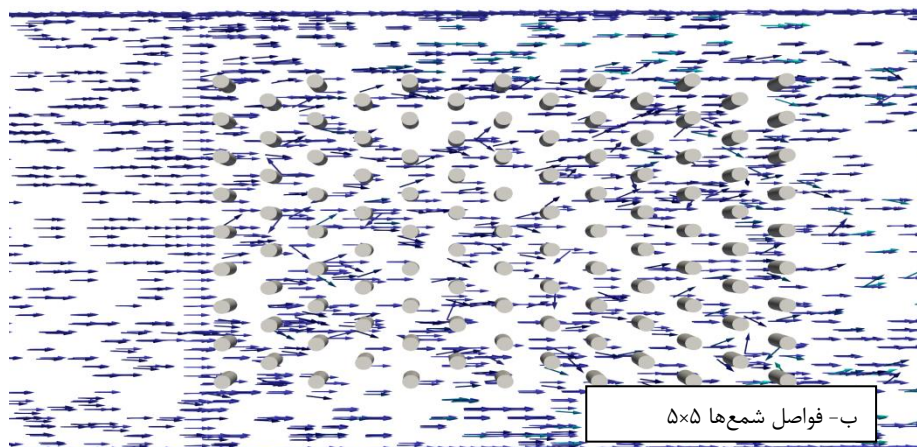
ج-حالت بدون شمع



شکل (۸، الف-ج): توزیع سرعت موج با ارتفاع ۶ سانتی‌متر برای حالت‌های با شمع عرض ۶۰ و بدون شمع



الف-حالت بدون شمع



ب- فواصل شمع‌ها ۵×۵

شکل (۹، الف و ب): بردارهای سرعت موج با ارتفاع ۶ سانتی‌متر، در حالت‌های بدون شمع و فاصله شمع‌ها ۵×۵



استوانه‌های دارای قطر ۰/۹ و ارتفاع ۳۲ سانتی‌متر بوده و در فواصل ۵×۵ و ۱۵×۱۵ سانتی‌متر در عرض‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر با چیدمان زیگزاکی قرار داده شدند. ۱۵ مدل اجرا شده که نتایج آن به‌طور کامل و در قالب جداول و نمودارها ارائه گردید، در ادامه خلاصه‌ای از نتایج آورده می‌شود.

در بحث نیرو، بیش‌ترین مقادیر جذب نیرو را مدل‌های با فواصل ۵×۵ داشته‌اند و از میان آن‌ها مدل با عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر، بالاترین میزان جذب نیرو را نسبت به مدل‌های بدون شمع دارد. می‌توان نتیجه گرفت در عرض ثابت با کاهش فاصله میان شمع‌ها و افزایش تراکم، نیرو افزایش می‌یابد به‌عنوان نمونه نسبت بی‌بعد نیرو در فاصله ۵×۵ نسبت به ۱۵×۱۵ در عرض ۶۰ و ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر از ۳/۲۸ به ۸/۸۳ رسیده و ۶۲/۸۸ درصد افزایش یافته است. همچنین با عرض محدوده یکسان و فاصله‌ی ثابت میان شمع‌ها در مدل‌هایی که ارتفاع موج ورودی‌شان بیش‌تر است نیروی بیش‌تری نیز جذب می‌شود به‌عنوان نمونه نیروی جذب شده از امواج در عرض ۶۰ و فواصل ۱۵×۱۵، در مدل با ارتفاع موج ۹ سانتی‌متر نسبت به مدل با ارتفاع موج ۶ سانتی‌متر ۵۷/۴۴ درصد افزایش داشته است.

مقایسه نتایج نیروهای مدل عددی با مدل آزمایشگاهی (Mirzakhani, 2020) بیانگر دقت مناسب مدل عددی در برآورد نیروها است. جذر میانگین مربعات خطای نرمال در تمام مدل‌ها کوچک‌تر از ۰/۲۷ است که مقداری مناسب و بیانگر دقت نسبتاً بالا و ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۹۵ است که بیانگر میزان خطای کمی است. نزدیک‌ترین نتیجه به مدل آزمایشگاهی را مدل‌های با عرض ۶۰ و فواصل ۵×۵ سانتی‌متر با جذر میانگین مربعات خطای نرمال ۰/۱۵ دارند که دقت بالای مدل عددی را نشان می‌دهد.

در بحث انرژی موج، مقادیر کاهش ضریب انتقال انرژی نسبت به حالت بدون شمع به میزان متوسط ۸۶/۲۴ درصد است.

در بحث سرعت جریان، در تمام مدل‌ها حضور شمع‌ها در مسیر حرکت جریان و عبور تاج موج از شمع‌ها، باعث ایجاد آشفتگی و ناحیه جدایش در پشت شمع‌ها و گردابه‌هایی به شکل متقارن در اطراف شده و سرعت موج کاهش

## مقایسه نتایج مدل عددی حاضر با نتایج سایر پژوهش‌ها

طبق نتایج مدل عددی (Huang et al. 2011) میزان عبور موج با کاهش فاصله بین شمع‌ها کاهش می‌یابد؛ در اینجا نیز با توجه به نتایج ارتفاع موج، با کاهش فواصل از ۱۵×۱۵ به ۵×۵ ضریب عبور موج کاهش یافت به‌عنوان نمونه در عرض ۶۰ ارتفاع موج ۹ سانتی‌متر ضریب عبور موج از ۰/۵۳ به ۰/۱۹ رسیده و ۶۴/۷۸ درصد کاهش یافته است. مطابق با نتایج (GhanbariAdivi and Fathimoghdam, 2015) که استهلاك نیروی امواج در حالتی که شمع‌ها فواصل ۵×۵ دارند به‌طور متوسط ۱/۳ برابر بیش‌تر از حالت ۱۰×۱۰ است، در این پژوهش نیز در حالت ۵×۵ نسبت به حالت ۱۵×۱۵ به‌طور متوسط ۲/۹ برابر استهلاك نیروی بیش‌تری صورت گرفته است. طبق نتایج (Tang et al. 2017)، انرژی موج با افزایش تراکم شمع‌ها کاهش یافته؛ در این پژوهش نیز طبق جدول (۹) با افزایش تراکم شمع‌ها در فواصل ۵×۵ و همچنین با تغییر فواصل از ۱۵×۱۵ به ۵×۵ در یک عرض ثابت، ضریب انتقال انرژی کاهش یافته و در نتیجه انرژی موج عبوری از ساحل و شمع‌ها کاهش یافته است. در مدل (Nandasena et al. 2012) حداکثر عمق جریان ۱۲ درصد و حداکثر سرعت جریان ۳۵ درصد در پشت پوشش گیاهی نسبت به زمین بدون پوشش کاهش یافت؛ در این پژوهش نیز بیش‌ترین کاهش عمق جریان مربوط به تراکم ۲۷۳ و ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر بوده که نسبت به حالت بدون شمع ۶۴/۰۹ درصد کاهش داشته است. (Lou et al. 2018) از مدل آزمایشگاهی خود نتیجه گرفتند که میانگین سرعت جریان موج در حالت با شمع کم‌تر از حالت بدون شمع است، در این پژوهش نیز کاهش سرعت جریان در حالت‌های با شمع نسبت به بدون شمع مطابق با شکل (۹) مشهود است.

## نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، بررسی تأثیر شمع‌های صلب استوانه‌ای در ساحل با شیب ثابت، بر الگوی جریان و حرکت امواج با مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار اپن فوم است. مدل‌سازی‌ها در دو حالت با و بدون حضور شمع برای ۳ ارتفاع متفاوت موج ورودی انجام شد. شمع‌های صلب



است. بنابراین می‌توان از شمع‌های صلب استوانه‌ای شکل به‌عنوان موج‌شکن سازه‌ای سازگار با محیط‌زیست در سواحل و بنادر استفاده نمود و اثر تخریبی امواج را در شرایط آب‌وهوایی نامساعد کاهش داد.

و برای بررسی‌های دقیق‌تر و کاهش زمان و هزینه‌های اجرایی، ابتدا مدل‌سازی عددی را در نرم‌افزار این فوم انجام داد و بعد حالات مطلوب‌تر را مورد بررسی آزمایشگاهی یا میدانی در مقیاس کوچک‌تر قرار داد و سپس برای عملی نمودن طرح در سواحل دارای قابلیت اجرا، تصمیم‌گیری نمود.

می‌یابد و در زمان طولانی‌تری نسبت به حالت بدون شمع از ساحل گذر می‌کند. این کاهش سرعت با کاهش فواصل موانع از  $15 \times 15$  به  $5 \times 5$  و بیش‌تر شدن تعداد شمع‌ها در مقابل موج، افزایش می‌یابد.

هنگام برخورد امواج به ساحل مقداری از انرژی آن‌ها صرف نیروی وارد به موانع شده و چون موانع انعطاف‌ناپذیرند فشار زیادی را متحمل می‌شوند که باعث اتلاف نیرو و انرژی موج و کاهش ارتفاع و سرعت موج بعد از شمع‌ها شده و باعث کاهش اثر تخریبی امواج می‌شود. در عرض‌های بیش‌تر و چیدمان متراکم‌تر تغییرات نیرو، ضریب انتقال انرژی و سرعت بیش‌تر بوده و کارایی موانع بهتر شده

## منابع

- سررشته داری، ع. و واردی، س. ر. ۱۳۹۱. مدل‌سازی جریان سیالات و انتقال حرارت با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM. انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- قنبری عدیوی، ا. و فتحی‌مقدم، م. ۱۳۹۴. تأثیر پوشش گیاهی بر میزان ضریب کشش گروهی درختان و مقاومت پوشش در مقابل امواج ساحلی. مجله علمی کشاورزی علوم و مهندسی آبیاری، دوره ۳۸، شماره ۲، ص ۱۱۲-۱۰۳.
- کریمی، ب. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از موانع با استفاده از مدل کد منبع باز این فوم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب. دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی. دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان.
- ولی پور، ح. شمس، غ. قنبری عدیوی، ا. ۱۴۰۱. بررسی میزان نیروهای ناشی از امواج منفرد بر دیوارهای ساحلی با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM. نشریه مهندسی دریا، سال هجدهم، شماره ۳۶، ص ۹۳-۷۹.
- میرزاحانی، گ. ۱۳۹۹. بررسی آزمایشگاهی تأثیر پوشش گیاهی صلب بر الگوی جریان و انتقال رسوب در خط ساحلی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب. دانشکده کشاورزی. دانشگاه شهرکرد. ایران.
- 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.
- Fuhrman, D.R. and Madsen, P.A. 2009. Tsunami generation, propagation, and run-up with a high-order Boussinesq model. *Coastal Engineering*, 56: 747-758.
- 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: 179-185.
- Liu, H., Ghidaoui, M.S., Huang, Z., Yuan, Z. and Wang, J. 2011. Numerical investigation of the interactions between solitary waves and pile breakwaters using BGK-based methods. *Computers & Mathematics with Applications*, Volume 61, Issue 12: 3668-3677.
- Isaacson, M., Premasiri, S. and Yang, G. 1998. Wave interactions with vertical slotted barrier. *Journal of Waterway, Coastal, and Ocean Engineering*, 124: 118-126.
- Jalil-Masir, H., Fattahi, R., Ghanbari-Adivi, E. and Asadi-Aghbolaghi, M. 2021. Effects of different forest cover configurations on reducing the solitary wave-induced total sediment transport in coastal areas: An experimental study. *Journal Elsevier. Ocean Engineering*, 235(1), 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): 1502-1511.



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): 530-541.

14. Kakuno, S. and Liu, P.F. 1993. Scattering of water waves by vertical cylinders. *Journal of Waterway, Coastal, and Ocean Engineering*, 119: 302-322.

Lara, J. L., Higuera, P., Guanache R. and Losada I.J. 2013. Wave Interaction with piled structures: Application with IH-FOAM. *Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (Nantes, France, ASME), OMAE 2013-11479.*

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. *Applied Ocean Research*, 79:74-87.

Menter Florian, R. 1992. Influence of Freestream Values on K-Omega Turbulence Model Predictions. *AIAA journal* 30, no. 6: 1657-59.

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*, 58:19-30.

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: 20-28.

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*, 67:1-13.

Pope, S. 2000. *Turbulent Flows*. University of Cambridge, United Kingdom

Tannehill, J.C., Anderson, D.A. and Pletcher, R.H. 1997. *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Second Edition, Taylor and Francis Group, Washington, DC.

Tang, J., Shen, Y., Causon, D.M., Qian, L. and Mingham C.G. 2017. Numerical study of periodic long wave run-up on a rigid vegetation sloping Beach. *Coastal Engineering*, 121, 158-166.

Wang, Y., Yin, Z. and Liu, Y. 2019. Numerical study of solitary wave interaction with a vegetated platform. *Ocean Engineering*, 192.1065612.

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. A401400