بررسی میزان نیروهای ناشی از امواج منفرد بر دیوارهای ساحلی با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM

حسین ولی پور [۱]، غلامرضا شمس*[۲]، الهام قنبری عدیوی[۳]

[۱] دانشجو، کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهرکرد، hossein.v.s75@gmail.com
[۲] استادیار، سازه های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهرکرد نویسنده مسئول: g.shams@sku.ac.ir
[۳] استادیار سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، ghanbariadivi@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۸/۴

کلمات کلیدی:
حفاظت ساحل
نیرو موج
مدل‌سازی عددی
سازه‌ی دایک
اپنفوم

چکیده

دیوارهای ساحلی یکی از روش‌های حفاظت ساحل در مقابل فرسایش ساحلی و نیروهای مخرب امواج است. هدف این پژوهش شبیه‌سازی برخورد موج با دایک ساحلی و مقایسه نتایج با مدل آزمایشگاهی است. برای شبیه سازی میزان نیروی مستهلک شده ی موج توسط دایک ساحلی از نرم‌افزار متن‌باز Open FOAM و مدل آشفتگی K-ω SST استفاده شد. با در نظر گرفتن شرایط مختلف برای مدل‌سازی، مجموعا تعداد ۴۵ آزمایش جهت اجرای برنامه انتخاب شد. 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. نتایج نشان داد که جذب نیروها نسبت به حالت بدون سازه افزایش پیدا کرده‌اند و می‌توان گفت که وجود سازه توانسته تا ۱۰ برابر نسبت به حالت بدون سازه در استهلاک نیروی موج نقش داشته باشد. شدت تغییرات نیروی وارد به سازه تابعی از ارتفاع موج است و با افزایش میزان ارتفاع موج این شدت تاثیر گذاری کاهش می‌یابد. تحت ارتفاع‌های متفاوت موج هرچه سازه از مخزن ایجاد موج دورتر باشد میزان نیروی وارد به سازه کاهش می‌یابد.

Investigating the amount of forces caused by solitary waves on coastal walls using OpenFOAM software

Hossein ValiPour[1], Golamreza Shams*[2], Elham Ghanbari-Adivi[3]

[1]MSC Student, Department of Hydraulic structure, Shahrekord University
[2] Assistant Professor, Department of Hydraulic structure, Shahrekord University, Corresponding author: g.shams@sku.ac.ir
[3]Assistant Professor, Department of Water Science Engineering, Shahrekord University

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 21 Jul 2022
Accepted: 26 Oct 2022

Keywords:
Coast protection
Power of the wave
Numerical modeling
Dyke structure
OpenFOAM

ABSTRACT

Coastal walls (dyke) are one of the methods of protecting the coast against coastal erosion and destructive forces of waves. The purpose of this study is to simulate the wave collision with the coastal dyke and compare the results with the laboratory model. Open FOAM open source software and K-ω SST turbulence model were used to simulate the amount of wave consumed by the coastal dyke. Taking into account the different conditions for modeling, a total of 45 experiments were selected to run the program. Modeling was performed in two general conditions with and without structures and for 3 heights of the structure, 3 different positions of the structure and 5 wave heights. The results showed that the absorption of forces has increased compared to the unstructured state and it can be said that the presence of the structure has been able to play a role in the dissipation of wave force up to 10 times compared to the unstructured state. The intensity of force changes in the structure is a function of wave height and this effect decreases with increasing wave height. Under different wave heights, the farther the structure is from the wave generating tank, the less force is applied to the structure.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]

۱ - مقدمه

امروزه امواج مهم‌ترین عامل در تعیین وضعیت هندسی سواحل هستند و نیز دارای تأثیر عمده‌ای در طراحی بنادر، آبراهه‌ها و سازه-های ساحلی هستند. مقدار قابل توجهی از انرژی امواج در کرانه‌های ساحلی مستهلک می‌شود که منجر به شکل‌دهی سواحل، طبقه-بندی و جابجایی مواد رسوبی کف دریا به سوی ساحل یا به طرف دریا و یا در امتداد ساحل و اعمال بسیاری از نیروهای ایجاد شده به سازه‌های دریایی و ساحلی می‌شود. در حالت کلی می‌توان روش‌های حفاظت از ساحل را به سه روش کلی بیولوژیکی، سازه-ای و ترکیبی تقسیم بندی کرد که در ادامه به طور خلاصه به هر کدام از روش‌ها پرداخته شده است.

پوشش ساحلی به عنوان یک مانع طبیعی در بسیاری از مناطق ساحلی، به عنوان محافظ زمین در مقابل اثرات موج و فرسایش ساحلی عمل‌می‌کند. پوشش ساحلی بر خواص موج تاثیر می‌گذارد و مطالعات مربوط به این موضوع در گستره وسیعی صورت گرفته است که عمدتاً بر تضعیف موج تمرکز دارد [۱].

زارعی و همکاران بیان نمودند که سیر تکامل حفاظت سواحل طی دوران مختلف تغییر از رویکردهای سازه‌ای به تقویت سواحل بوده است. [۲].

هر چند که پوشش گیاهی از لحاظ اقتصادی، زیست محیطی و زیبایی شناختی بر روش سازه‌ای برتری دارد اما برخی مواقع به اجبار می بایست از این روش استفاده نمود.

با توجه به اینکه مناطق خشک و نیمه‌خشک بخش وسیعی از کشور ما را تشکیل می‌دهد بنابراین بخش اعظم و تعداد زیادی رودخانه های ایران در طول سال بسیار کم آب بوده و به تبعیت از آن پوشش گیاهی نیز اندک است، از این‌رو با توجه به شرایط و موقعیت مکانی، در بسیاری موارد استفاده از پوشش گیاهی و تثبیت بیولوژیک به تنهایی فاقد کارایی مناسب بوده و لازم است با اجرای سازه مکانیکی و به روش ترکیبی محدوده ساحل یا حاشیه رودخانه تثبیت شود. دراین‌گونه اقدامات در قسمت‌هایی که فرسایش بیشتر است از پوشش‌های حفاظتی استفاده می‌شود و در قسمت‌هایی که فرسایش کمتری رخ می‌دهد از روش‌های بیولوژیکی بهره می‌برند. اهمیت حفاظت از سواحل منجر به این شد که مطالعات زیادی در این زمینه صورت گیرد و مهندسان به سمت روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای برای حفاظت سواحل رفتند که در ادامه به چند مورد از مطالعات انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود.

هاشمی بیان می‌کند که امواج مهم‌ترین عامل در تعیین وضعیت هندسی سواحل هستند و نیز نقش عمده‌ای در طراحی بنادر، آبراهه-ها، سازه‌های حفاظت ساحلی و سایر کارهای دریایی دارند. [۳].

عفتی و لشته نشایی به بررسی نیروهای امواج بر موج شکن های سنگی پرداختند. موج شکن ها سازه‌های باریکی با طول‌ها و ارتفاع-های متفاوت هستند، معمولا به صورت عمود بر خط ساحل جهت محافظت از یک منطقه ساحلی، بندر، لنگرگاه یا حوضچه آرامش جهت حفاظت از امواج ساخته می‌شود. [۴].

قنبری و فتحی‌مقدم بیان کردند که کاهش اثر امواج بر مناطق ساحلی از جمله موضوعات مهم در مهندسی سواحل به‌شمار می-رود. از این‌رو ابزار و روش‌های مختلف حفاظت، شامل موج‌شکن‌ها، آبشکن‌ها و دیوارها و صخره‌های مصنوعی، مورد مطالعه قرار گرفته و توسعه یافته‌اند[۵].

ایگاراشی و همکاران از یک سیستم ترکیبی متشکل از یک سازه خاکریز و شمع برای استهلاک انرژی موج‌های بلند استفاده کردند و مشاهده نمودند که میزان استهلاک انرژی به آرایش شمع‌ها، ارتفاع و قطر آن‌ها و هم‌چنین به ارتفاع خاکریز بستگی دارد. هر چه ارتفاع خاکریز بیشتر و هم‌چنین ارتفاع و قطر شمع‌ها نیز بیشتر باشد انرژی موج بیشتر مستهلک می‌شود [۶].

هنرمند و همکاران در تحقیق خود، با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی متن‌باز اپن‌فوم، انتشار و بالاروی موج سونامی در نزدیکی ساحل توسط موج منفرد به عنوان تخمینی از موج سونامی در شرایط مختلف را شبیه‌سازی کردند. [۷].

موسی و همکاران عملکرد هیدرودینامیکی چند ردیف موج¬شکن شکاف‌دار را در برخورد با امواج مدل کردند، افزایش تخلخل باعث افزایش ضریب انتقال و بازتاب می‌شود هم‌چنین آرایش موج-شکن-ها، قطر و ارتفاع آن‌ها در استهلاک انرژی تاثیرگذار است[۸].

چانگ‌بو و همکاران به بررسی اثر متقابل بین موج منفرد(سونامی) و دیوارهای دریایی پرداختند. در این مطالعه، یک مدل عددی سه بعدی بر اساس اپن‌فوم برای بررسی امواج منفرد شبیه سونامی که بر روی دیوار دریایی با مقطع مستطیل شکل منتشر می‌شوند ، توسعه داده شد [۹].

نصیرایی و همکاران نیروهای موج بلند (سونامی) روی موج شکن های کیسون با استفاده از مدل سازی عددی را بررسی نمودند نتایج حاکی از دقت مدل عددی در برآورد نیروی امواج داشت همچنین آنها در بررسی خود اظهار داشتند که نیرو تابعی از دامنه موج، عمق آب و دوره موج است. بررسی های انجام شده نشان داد که امواج شکسته شده نیروی بسیار بیشتری به سازه وارد می‌نماید[۱۱ و ۱۰].

در بررسی دیگری لطف الهی و نصیرایی با مقایسه سازه های مختلف با استفاده از مدل عددی نشان دادند که سازه های منحنی و شیبدار در مقایسه با سازه کیسون در شرایط یکسان در اثر شکست موج نیروی بیشتری بر بدنه آنها تحمیل می‌شود [۱۲].

چانگ‌بو و همکاران امواج منفرد را در برخورد با یک ردیف شمع شکاف‌دار عمودی در نرم‌افزار اپن‌فوم مدل کردند و مشخصات جریان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]

را یک‌بار برای یک شمع و یک‌بار برای یک ردیف شمع بررسی کردند و بیان کردند که ارتفاع موج، آرایش شمع‌ها و شیب ساحل در استهلاک انرژی تاثیرگذار است [۱۳].

لی و همکاران از یک مدل عددی کامل (هیدرودینامیکی و مورفولوژیکی) بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی متن-باز(اپن‌فوم) برای شبیه‌سازی جریان یک موج منفرد در یک ساحل شیب‌دار استفاده کردند [۱۴].

هوانگ و چن، بارهای وارد شده به یک اسکله به همراه یک موج-شکن شمع مدل‌سازی کردند. با افزایش ارتفاع موج میزان جریان سرریزی هم افزایش می‌یابد. در مقایسه با سطح بدون پوشش، سطحی که دارای پوشش قلوه‌سنگ است به میزان زیادی آب-شستگی را کاهش می‌دهد[۱۵].

مناطق ساحلی اکوسیستم‌های رابط بین زمین و دریا را تشکیل می-دهند [۱۸-۱۶]. سکونت ۲۰ درصد از جمعیت جهان در فاصله ۲۵ کیلومتری و ۴۰ درصد از جمعیت جهان در فاصله ۱۰۰ کیلومتری دریا و هم‌چنین وجود بیش از ۱۲ درصد کل ذخایر نفتی جهان و ۲۵ درصد کل منابع گاز جهان در نواحی ساحلی، تاثیر حفاظت از سواحل را در نگهداری منابع طبیعی و اموال عمومی و غیره بهتر می‌توان درک کرد. هدف از این مطالعه مدل کردن برخورد امواج با سازه‌ی دایک و بررسی میزان نیروی وارد به سازه¬ی ساحلی و هم‌چنین بررسی تاثیر سازه‌ی ساحلی در استهلاک انرژی موج است سپس داده‌های به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- بیان مسئله

دینامیک سیالات محاسباتی یکی از بزرگترین زمینه‌هایی است که مکانیک قدیم را به علوم رایانه و توانمندی‌های نوین محاسباتی در سده جدید میلادی وصل می‌کند در این روش با تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای حاکم بر سیالات به معادلات جبری امکان حل عددی این معادلات فراهم می‌شود سپس با تقسیم ناحیه مورد نظر برای تحلیل به المان‌های کوچکتر و اعمال شرایط مرزی برای گره-های مرزی با اعمال تقریب‌هایی یک دستگاه معادلات خطی به دست می‌آید که با حل این دستگاه معادلات جبری، میدان سرعت، فشار و دما در ناحیه مورد نظر به دست می‌آید. بررسی بارهای هیدرودینامیک وارد بر سازه، امروزه به کمک تکنیک¬های قدرتمند در دینامیک سیالات محاسباتی و با بهره‌گیری از روش‌های عددی با دقت بالا در مقایسه با روش-های آزمایشگاهی پرهزینه، مورد توجه قرار گرفته‌است. نرم‌افزار اپن‌فوم یکی از معروفترین نرم¬افزارهای متن¬باز تحلیل CFD است. تمامی حلگرها، کتابخانه‌ها، اشیا و کدهای نرم‌افزار با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C++ نوشته شده‌است. در نرم‌افزار اپن‌فوم برای مدل‌سازی هر زیر شاخه از مکانیک سیالات، نیاز به تعریف و وارد کردن پارامترهای مساله است و سپس حل آغاز می‌شود. استفاده از امکانات این کتابخانه و همچنین امکان کدنویسی در این نرم افزار و تعریف شرایط جدید از جمله موضوع مورد بحث در این تحقیق از دلایل تمایل به استفاده از این نرم افزار است.

۲-۱-۱- روش‌های مدل‌سازی جریان چند فاز

اولین گام در حل هر مسئله‌ی چند فازه تعیین این مطلب است که هر یک از این فازها دارای چه ویژگی‌ها و شرایطی است. امروزه عمدتاً از دو روش محاسباتی روش اوبلری – لاگرانژی[1] و روش اویلری – اوریلری[2] جهت جریان‌های چند فاز استفاده می‌شود.

۲-۱-۲- روش کسر حجم سیال (VOF)

این مدل یک تکنیک جهت شبیه‌سازی دقیق سطح آزاد با استفاده از یک مش اویلری ثابت است. این روش جهت دو یا چند سیال غیرقابل اختلاط با یکدیگر طراحی‌شده است.VOF یا روش کسر حجم سیال، روشی است که در آن مرز مشترک دو سیال به‌صورت ضمنی ردیابی می‌شود. در این روش مرز از روی کمیت α که در شبکه اویلری ذخیره می‌شود مشخص می‌شود و این کمیت مشخص می‌کند که کدام سیال در آن مکان وجود دارد. در تعیین سطح آزاد از یک تابع متغیر به نام α (کسر حجمی[3] سیال) استفاده می‌شو که مقدار آن وقتی سلول پر از سیال باشد معادل یک وقتی پر از هوا باشد معادل صفر و اگر ترکیبی از هوا و سیال باشد مقداری بین صفر و یک خواهد بود.

۲-۲- معادلات حاکم

نرم‌افزار اپن‌فوم از روش حجم محدود جهت گسسته‌سازی فضای دامنه و تبدیل معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری استفاده می-کند. در این مطالعه، از معادلات سیال تراکم ناپذیر همراه با رویکرد کسر حجم سیال (VOF) به عنوان مدل ریاضی جریان با در نظر گرفتن فرضیاتی از جمله تراکم ناپذیر بودن سیال، کانال و سازه‌ی نفوذ ناپذیر و شکست موج در ابتدای ساحل (باتوجه به مدلسازی موج بر مبنای پدیده شکست سد)، استفاده شده است. معادلات بقا شامل معادلات پیوستگی[4] و اندازه حرکت[5] است. سیال مورد بررسی در این تحقیق نیوتونی در نظر گرفته‌شده است.

۲-۲-۱- معادلات جریان

به منظور مدل‌سازی در نرم‌افزار اپن‌فوم از حلگر دو فازی interFoam استفاده شده است. این حلگر یک حلگر دوفازی، حل نشدنی و همراه با اعمال نیروی کشش سطحی است که بر اساس معادلات پیوستگی و مومنتم عمل می‌کند.

$$\nabla . u = 0 \qquad (1)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]

$$\frac{\partial_{(u)}}{\partial_t} + \nabla.(uu) = -\nabla_p + \nabla.T + f \quad (۲)$$

T در معادله (۲) تانسور فشار انحرافی[۶] است که می‌تواند برای جریان تراکم ناپذیر به صورت زیر تعریف گردد.

$$T = 2vs \quad (۳)$$

که S میانگین نرخ تانسور کرنش[۷] است که به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\mathrm{S} = 0.5[\nabla_u + (\nabla_u)^T] \quad (۴)$$

بخش تنش در معادله (۱۰) برای سیال نیوتنی و غیرقابل تراکم، را می‌توان با کمک عملگر دیورژانس در محاسبات برداری[۸] به صورت زیر تعریف کرد.

$$\nabla.\mathrm{T} = \nabla.(\mathrm{v}\nabla_u) + \nabla_u.\nabla_v \quad (۵)$$

f در معادله (۲) بخش نیروی خارجی است که شامل نیروی گرانش هم می‌تواند باشد. از طرفی u بردار سرعت، v ویسکوزیته و p فشار هستند. معادله انتقال جرم (۲) را می‌توان به کمک رابطه (۵) به فرمت رابطه (۶) باز نویسی کرد.

$$\frac{\partial_{(u)}}{\partial_t} + \nabla.(\mathrm{uu}) - \nabla.(\mathrm{v}\nabla_u) - \nabla_u.\nabla_v = -\nabla_p + f \quad (۶)$$

$$\frac{\partial_u}{\partial t} + \nabla.(uu) = -\frac{1}{\rho}\nabla_p + \nabla.\left(v(\nabla u + (\nabla u)^T)\right) + g + \frac{F_S}{\bar{\rho}} \quad (۷)$$

F_S بیانگر نیروی کشش سطحی است.

در نهایت به کمک رابطه مومنتوم (۷) و رابطه پیوستگی (۱) می‌توان میدان جریان را حل کرد.

۲-۳- مدل‌سازی آشفتگی

مدل‌سازی جریان‌های آشفته همواره از مباحث چالش برانگیز بوده است. از آنجا که بیشتر مسائل شامل کاربردهای سیال دارای جریان آشفته است، همواره تلاش پیوسته‌ای برای حل این نوع جریان‌ها صورت می‌گیرد. روش‌های عددی که امروزه به‌طور گسترده مطرح بوده و از آن‌ها استفاده می‌شوند عبارت‌اند از:

- معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده رینولدز[۹] (RANS)
- روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ[۱۰] (LES)
- شبیه‌سازی عددی مستقیم[۱۱] (DNS)

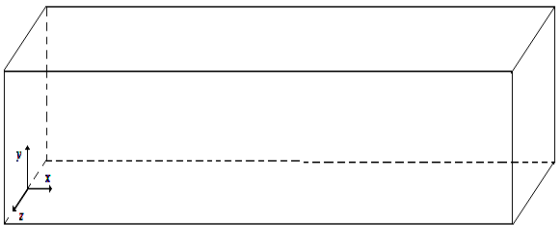
با توجه به اینکه جریان مورد بررسی در این مسئله آشفته است از روش RANS و مدل $k-\omega\ sst$ برای مدل‌سازی جریان آشفته استفاده شده است.

معادلات آشفتگی $k-\omega\ sst$ برای اولین بار توسط منتر[۱۲] توسعه داده شدند[۱۹]. این معادلات از مزیت‌های مدل $k-\omega$ برای نزدیک دیواره‌ها و درون لایه مرزی و از مزیت‌های مدل $k-\varepsilon$ برای جریان‌های آزاد استفاده کرده است [۲۱و۲۰]. در حالت کلی می‌توان گفت این معادلات به صورت ترکیبی از دو مدل مذکور استفاده می‌کنند به این صورت که به کمک یک تابع ترکیبی این دو سری معادله ترکیب شده که در نزدیک جداره و نزدیک لایه مرزی از معادلات $k-\omega$ استفاده کرده و در جریان‌های آزاد و دور از جداره‌ها از معادلات $k-\varepsilon$ استفاده می‌کند. در اینجا به علت وجود هندسه پیچیده مدلسازی که بخشی از جریان خصوصا در بالای سازه ارتفاعی نسبتا کمی داشته و برخی نقاط از کانال اصلی خصوصا بعد از دریچه عمقی زیاد دارد، به منظور محاسبه دقیق ویسکوزیته آشفتگی از مدل $k-\omega\ sst$ استفاده شد. در واقع علت استفاده از این مدل این است که این مدل در هندسه‌های پیچیده به خوبی عمل کرده و مقدار ویسکوزیته آشفتگی را بدرستی حدس می‌زند.

۲-۴- مشخصات مدل عددی

نرم‌افزار اپن‌فوم از روش حجم محدود جهت گسسته‌سازی فضای دامنه و تبدیل معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری استفاده می‌کند. برای حل جریان‌های دو فازی در این نرم‌افزار از حلگر interFoam استفاده می‌شود. در این شبیه‌سازی از بلوک‌های شش وجهی (Hexahedral) جهت شبکه بندی هندسه استفاده گردید. از مزیت‌های این شبکه بندی می‌توان به عدم وجود محدودیت در شکل حجم کنترل و امکان ریز کردن شبکه در مناطق با گرادیان زیاد بدون صرف زمان قابل توجهی اشاره کرد [۲۲].

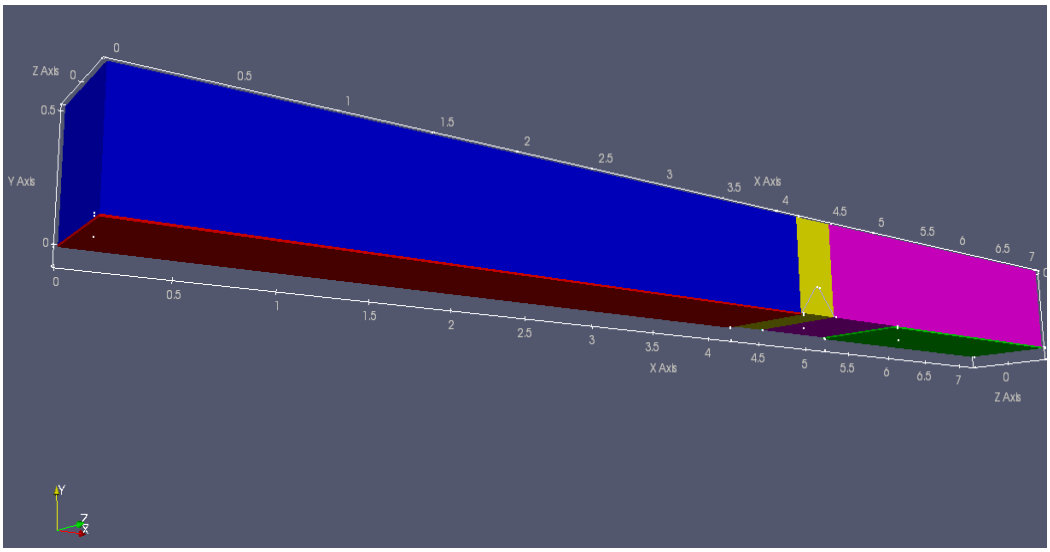
هندسه مسئله در این مدل‌سازی یک فلوم سه‌بعدی است که با فضایی شبیه یک مکعب مستطیل شبیه‌سازی شده است.



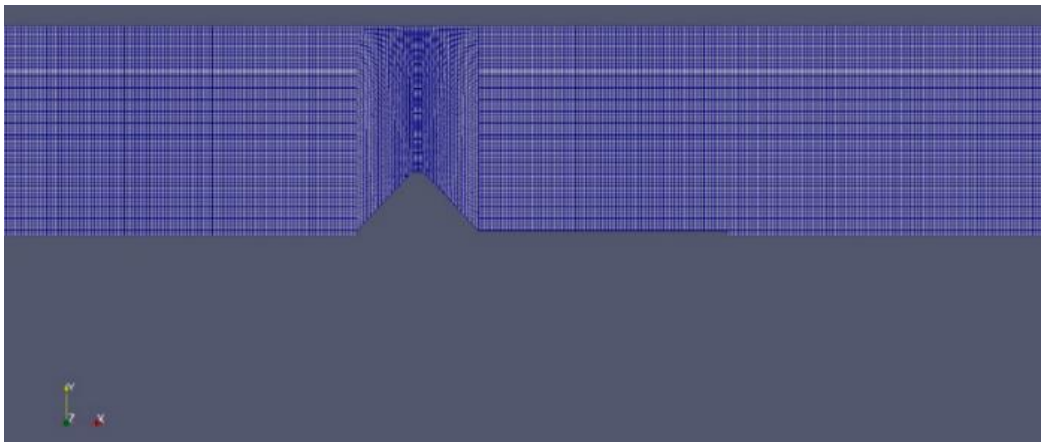
شکل ۱- فضای مدل‌سازی فلوم

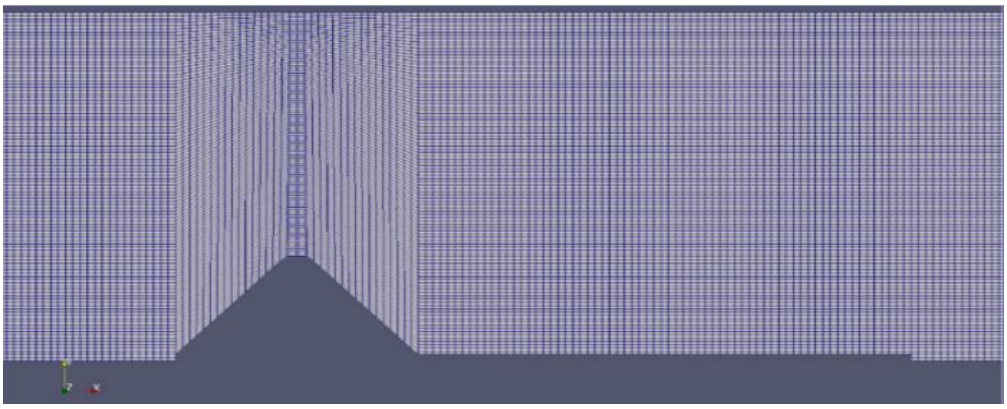
فضای مدل‌سازی که در شکل ۱ ارائه شد، فضای کلی مدل‌سازی است که در نرم‌افزار به چند بلوک تقسیم شده است (شکل ۲). با توجه به عرض فلوم که ۶۰ سانتی‌متر است عرض فضای مدل‌سازی در راستای محور z از ۳/- متر تا ۳/+ متر است. از نقطه‌ی x=0 تا x=2 متر طول مخزن تامین هد موج، از نقطه x=2 تا x=4.2 متر طول ساحل قبل از برخورد موج به سازه، از x=4.2 تا x=5.2 متر هم طول ساحل حفاظت شده با سازه است. بعد از بازه‌ی ساحلی مورد بررسی هم به طور دلخواه ۲ متر فاصله در نظر گرفته شد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]



شکل ۲- نحوه بلوک بندی فلوم





شکل ۳- نمایش مش‌بندی فلوم و اطراف سازه‌ی دایک

در شبیه‌سازی پروژه از مش یکنواخت با سایز یکنواخت (۰/۰۱ متر) پس از آنالیز حساسیت به‌اندازه شبکه (ریزتر کردن شبکه بر تغییرات نتایج بی‌تأثیر باشد) استفاده شد که نهایتا در کل تعداد مش‌ها برابر ۷۷۱۵۹ شد. در این نرم افزار برای کنترل پایداری از عدد کورانت برای محاسبه حداکثر گام زمانی استفاده گردید. عدد کورانت بیانگر نسبت سرعت به تغییرات مکان به زمان($\frac{\partial x}{\partial t}$) است و بدون بعد است. اگر این عدد از یک بزرگتر باشد سرعت ذره بسیار بالاست [۲۳]. در این صورت ذره در کمتر از یک گام زمانی از سلول عبور می‌کند. این قضیه به ناپایداری حل می‌انجامد. گام زمانی در این تحقیق ۰/۰۰۰۲ ثانیه در نظر گرفته شد. این گام زمانی با توجه به پیشینه عددی کورانت محاسبه گردید و قابل افزایش است. در این شبیه‌سازی از الگوریتم Pimple برای کوپل فشار-سرعت استفاده می‌شود. Pimple از ترکیب Piso و Simple بدست آمده و به صورت ترکیبی بین این دو الگوریتم عمل می‌کند. Simple برای جریان ماندگار (steady) و Piso برای جریان غیرماندگار (unsteady) است. برای ترم مشتق اول زمان از طرح گسسته‌سازی مرتبه‌ی دوم -

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]

Euler Crankicolson و برای ترم‌های گرادیان و لاپلاسین، از طرح درون یابی Gauss Linear استفاده گردید. برای ترم‌های دیورژانس نیز طرح مرتبه اول Gauss Upwind به کار گرفته شد.

۲-۴-۱- مدلسازی موج

برآوردن اهداف مطالعه حاضر، مستلزم تولید امواج شکسته شده می‌باشد. وقتی ارتفاع موج افزایش یابد و یا بدلیلی زبری بستر افزایش یابد (مشابه پیشروی موج در ساحل) هرکدام بترتیب منجر به افزایش سرعت ذرات موج و کاهش سرعت انتشار موج شده که در نهایت در زمان برابری این دو سرعت و پس از آن با پیشی گرفتن سرعت ذرات در قله موج از سرعت ذرات پای موج، منجر به فروپاشی و یا اصطلاحا شکست موج خواهد شد. بطورکلی در پدیده مورد بررسی در این پژوهش نیز فرض بر این است که با پیشروی موج در ناحیه آب‌های کم عمق ساحلی، سرعت ذرات موج تحت تأثیر کاهش ژرفا (کاهش عمق آب) افزایش یافته، سرعت انتشار (پیشروی) موج نیز کاهش می‌یابد. در لحظه‌ای که سرعت ذرات موج با سرعت انتشار موج برابر گردد، موج تقارن خود را از دست داده، تیزی آن افزایش می‌یابد و در یک حالت حدی ناپایدار شده و شکست موج حاصل می‌گردد[۲۴]. یک موج شکسته شده انرژی خود را با ایجاد تلاطم از دست داده و می‌تواند منجر به کنده شدن و یا جابجایی رسوبات گردد.

از آنجا که امواج مورد بررسی در این پژوهش امواج بلند (موج سونامی) در محدوده آب‌های کم عمق ساحلی می‌باشد از نظریه موج منفرد در مورد شبیه سازی این امواج در آزمایشگاه استفاده شد. در چنین شرایطی با توجه به مطالعات چگینی آخرین نمیرخ قبل از شکست موج، موج منفرد می‌باشد. بنابراین با توجه به این نکته در این پژوهش از امواج منفرد برای شبیه سازی استفاده شده که در مدل عددی برای مدلسازی این نیمرخ موج از مدلسازی مربوط به پدیده شکست سد استفاده شد چرا که در اثر شکست سد، موج ناگهانی با ماهیت مشابه با موج ایجاد شده در تحقیق آزمایشگاهی مربوط به این بررسی، ایجاد می‌شود[۲۵].

۲-۴-۲- شرایط مرزی

در جدول شماره ۲ شرایط مرزی مورد استفاده پس از بررسی و آنالیز حساسیت به شرایط مرزی مختلف ارائه شده است

جدول ۲- شرایط مرزی در مدل‌سازی عددی

مرز	U	P	K	ω	ε	alpha.water
Left wall	noslip	fixedFluxPressure	kqRWallFunction	omegaWallFunction	epsilonWallFunction	zeroGradient
Right wall	noslip	fixedFluxPressure	kqRWallFunction	omegaWallFunction	epsilonWallFunction	zeroGradient
bed	slip	fixedFluxPressure	kqRWallFunction	omegaWallFunction	epsilonWallFunction	zeroGradient
Atmosphere	pressureInletOutletVelocity	totalPressure	inletOutlet	inletOutlet	inletOutlet	inletOutlet
dike	noslip	fixedFluxPressure	kqRWallFunction	omegaWallFunction	epsilonWallFunction;	zeroGradient
Front and back	empty;//noSlip	empty;//fixedFluxPressure	empty;// kqRWallFunction	empty;//omegaWallFunction	empty;//epsilonWallFunction	empty;//zeroGradient

۲-۴-۳- نیروی کشش موج بر روی سازه

دو روش کلی در تعیین میزان نیروی اعمال شده ناشی از موج به هر مانع طبیعی وجود دارد. یکی استفاده از تئوری‌های موج و دیگری با استفاده از معادله‌های اساسی دینامیک سیال است [۲۴]، که در اینجا با استفاده از معادلات دینامیک سیال (CFD) به بررسی موضوع پرداخته شد. قابل تاکید است که در اینجا برای بررسی میزان نیروی موج وارده بر سازه با استفاده از معادلات دینامیک سیال، از نرم‌افزار اپن‌فوم استفاده شد.

۲-۴-۴- مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی فیزیکی

به منظور مدل‌سازی سازه‌های ساحلی و امواج، از نرم‌افزارهای OpenFOAM[۱۳] و CATIA[۱۴] استفاده خواهد شد. در این مدل‌سازی، پارامترها به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند. دسته اول پارامتر‌های مربوط به کانال اصلی نظیر، ارتفاع (y) و عرض کانال (B) و ارتفاع آب‌پایه یا همان عمق ساکن آب پای ساحل (y_0). دسته دوم

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]

پارامترهای مربوط به سازه ساحلی مورد بررسی مانند، طول ساحل مورد بررسی (L)، موقعیت قرارگیری سازه روی ساحل (x)، ارتفاع سازه (H_s) و شیب وجه جلویی سازه(S) که در این‌جا مساوی شیب وجه پشتی سازه است. دسته آخر پارامترهای مربوط به موج است که عبارتند از: ارتفاع موج ورودی (H_w) و سرعت موج ورودی (V). این پارامترها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند تا شرایط بهینه، از نظر کاهش حداکثری انرژی و میرایی امواج تعیین گردد.

روش کار به این صورت است که در ابتدا اطلاعات مرتبط تهیه و جمع‌آوری می‌گردد. سپس جهت تولید هندسه و شبکه محاسباتی اقدام می‌گردد. در مرحله بعد پارامترهای حل عددی در نرم‌افزار تنظیم می‌شود و در ادامه شبیه‌سازی برخورد موج با سازه‌ی دایک ساحلی انجام خواهدشد. در نهایت داده‌های خروجی از مدل عددی تحلیل و بررسی شده و با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه خواهدشد. نتایج آزمایشگاهی از آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد به دست آمده‌است. آزمایش‌ها با مقیاس ۱:۵۰ در فلوم (کانال) با طول ۲۰ متر، عرض ۶۰ سانتی متر و ارتفاع ۶۰ سانتی متر انجام شده است. فلوم دارای کف فلزی و دیواره‌های شیشه‌ای از جنس فایبرگلاس است و امکان تغییر شیب کف آن به کمک دو عدد جک ابتدایی و انتهایی وجود دارد [۲۶]. روش اندازه-گیری نیرو در آزمایشگاه با سازوکار مشخص و با استفاده از یک فلوم دارای کف متحرک و لودسل انجام شده است، جهت اطلاع از جزییات کار آزمایشگاهی به تحقیق رضاپوران و همکاران [۲۶] مراجعه شود. قابل ذکر است که با توجه به ماهیت نیروی مورد بررسی و متغیر بودن آن تابعی از ارتفاع موج، هم در تحقیق فیزیکی و هم در بررسی های عددی، ماکزیمم نیروی ناشی از یک ارتفاع مشخص موج در هر حالت مورد بررسی مد نظر قرار گرفته شده است.

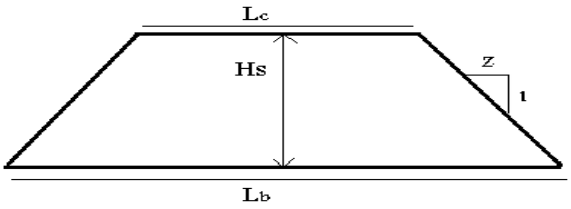
شکل (۴) نمای کلی کانال را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمایی از فلوم موج و دایک در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]

دایک مورد استفاده برای مدل‌سازی دارای مشخصات هندسی از قبیل ارتفاع(H_s)، قاعده پایین (L_b) قاعده بالا(L_c) و شیب وجه بالادست z:۱ است (مطابق شکل ۵).



شکل ۵- طرح شماتیک دایک ساحلی مورد نظر جهت مدل‌سازی

با توجه به ۳ شکل مختلف برای موج‌شکن و ۳ حالت برای موقعیت قرارگیری سازه روی ساحل و ۵ ارتفاع مختلف موج در نهایت تعداد کل آزمایش‌ها، معادل ۴۵ آزمایش برآورد شد. در اینجا مقدار Lc، Lb و L بترتیب معادل ۳، ۳۳ و ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد.
در ادامه در جدول (۳) شرح پارامترهای مورد استفاده در آزمایش‌ها و محدوده آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۳- محدوده تغییرات پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش

پارامتر	محدوده تغییرات
S=1/z	۱، ۱/۵، ۲
x	0 , $L/2$, L
Hs (cm)	۷/۵ ، ۱۰ ، ۱۵
Hw (cm)	۶ ، ۷/۵ ، ۹ ،۱۰/۵ ، ۱۲

در اینجا موقعیت‌های مختلف قرارگیری سازه با توجه به اهمیت محل قرار گیری سازه ساحلی در مواجهه با امواج در نظر گرفته شده است و موقعیت ابتدا و انتهای در واقع دوری و نزدیکی به امواج را نشان می‌دهد. در موقعیت صفر، امواج بلافاصله پس از شکست به سازه برخورد می‌نمایند و در موقعیت x معادل یک امواج شکسته شده پس از طی مسیری به سازه حفاظتی مورد نظر برخورد می‌کنند و مقایسه این سه حالت کمک می‌کند تا بهترین تصمیم برای محل قرارگیری این دست سازه‌ها تعیین گردد.

۲-۵- تحلیل ابعادی

در جدول ۴ پارامترهای موثر بر میرایی موج و نیروی موج آورده شده است.

جدول۴- معرفی پارامترهای موثر بر میرایی و نیروی موج

پارامتر	ابعاد	نماد
ارتفاع موج	L	H_w
ارتفاع مخزن	L	H_{dam}
ارتفاع سازه	L	H_s
شیب سازه	-	z
موقعیت قرار گیری	L	X
سرعت موج	LT^{-1}	V_w
دانسیته جرمی	ML^{-3}	ρ_w
لزجت دینامیکی	$ML^{-1}T^{-1}$	μ_w
شتاب ثقل	LT^{-2}	g
کشش سطحی	MT^{-2}	σ
نیروی کششی موج	MLT^{-2}	F

پارامترهای مؤثر در مسئله میرایی موج و نیروی موج بصورت زیر است:

$$f_1(H_w, H_{dam}, H_s, z, X, V_w, \rho_w, \mu_w, g, \sigma, S, F) = 0 \quad (۸)$$

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

$$f_1 = (H_w, H_s, X, V_w, \rho_w, \mu_w, g, \sigma, F) = 0 \quad (۹)$$

با استفاده از روش پی‌باکینگهام در تحلیل ابعادی گروه‌های بدون بعد مطابق رابطه (۱۰) استخراج گردید.

$$g\left(\frac{H_w}{H_s}, \frac{X}{H_s}, \frac{\mu_w}{V_w.H_s.\rho_w}, \frac{g.H_s}{{V_w}^2}, \frac{\sigma}{{V_w}^2.H_s.\rho_w}, \frac{F}{{V_w}^2.{H_s}^2.\rho_w}\right) = 0 \quad (۱۰)$$

F بیانگر میزان نیروی موج (نیروی کششی[۱۵]موج بر سازه) است که می‌توان آن را به دو شکل یعنی نیروی کشش موج وارد به سازه و نیروی کشش موج در حالت بدون سازه در نظر گرفت، که ازتقسیم آن‌ها برهم ($\frac{F}{F_0}$) شدت تغییرات نیرو یا نرخ جذب نیرو به دست می‌آید که در ادامه استفاده خواهد شد.

۲-۶- آنالیز آماری

به منظور مقایسه و ارزیابی میزان نیروی وارد به سازه و ارتفاع موج ثبت شده در اپن‌فوم با مقادیر آزمایشگاهی [۲۶]، از معیارهای آماری، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و نرمال‌سازی جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE) استفاده گردید. مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نشانگر بالا بودن دقت پیش‌بینی است.

۳- نتایج و بحث

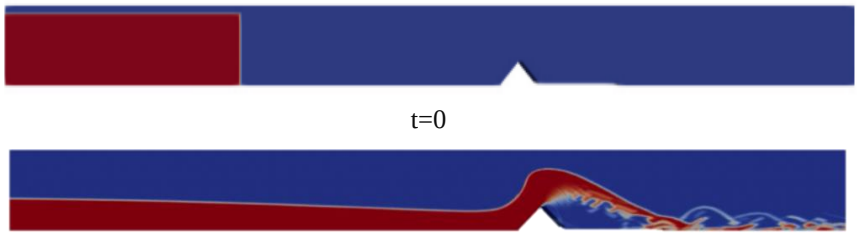
۳-۱-آنالیز حساسیت مش‌بندی

۳-۱-۱- بررسی y^+

یکی از مسائل مهم در شبیه‌سازی‌های جریان آشفته، خصوصاً در مواقعی که پدیده‌های نزدیک دیواره دارای اهمیت است، حضور تعداد کافی سلول در لایه مرزی، برای مشاهده گرادیان و پروفیل سرعت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]

است و برای ارزیابی مدل از بررسی این مقادیر استفاده می‌شود. در بیشتر جریان‌ها، لایه مرزی به صورت بی بعد در گستره‌ای از y^+ قرار دارد. با توجه به گرادیان بالای سرعت در این فاصله، بسته به نوع دیدگاه نزدیک دیواره، حداقل تعداد مشخصی سلول در راستای عمود بر سطح نیاز است. پس از شبیه‌سازی مشخص شد که مقدار y^+ برای دیوار سمت چپ برابر با ۳۲/۰۱۶، دیوار سمت راست ۳۵/۴۷، بستر ۴۴/۲ و دایک ۵۲/۵۳ است و با توجه به این‌که در محدوده ۳۰ تا ۳۰۰ قرار دارد مقداری مناسب است [۲۷].



شکل ۶- لحظه‌ی شروع آزمایش (t=0) و لحظه‌ی عبور آب از سازه

۳-۲- بررسی نیروهای ناشی از فشار سیال وارد به سازه

۳-۲-۱- سازه ۷/۵

میزان نیروهای ناشی از فشار سیال وارد به سازه با ارتفاع ۷/۵ سانتی-متر در موقعیت‌های ابتدا (x=0)، وسط (x=0.5) و انتهای(x=1) محدوده ساحلی مورد بررسی و ارتفاع‌های متفاوت موج در نرم‌افزار اپن‌فوم بررسی گردید.

۳-۲-۱-۱- بررسی تاثیر افزایش ارتفاع موج بر شدت تغییرات نیرو

میزان نیروی وارد به ساحل در محدوده مورد بررسی درحالت بدون سازه، F0 و در حالت با سازه F است و F/F0 میزان نرخ جذب نیرو است. محور افق بیانگر نسبت بدون بعد موج یا ارتفاع موج تقسیم بر ارتفاع سازه ($\frac{H_w}{H_s}$) است. به طور کلی نیروها نسبت به حالت بدون سازه افزایش پیدا کرده‌اند و می‌توان گفت که وجود سازه باعث جذب نیرو شده است. این مطلب نشان از تأثیر چشم‌گیر سازه‌ی ساحلی در کاهش انرژی و نیروی امواج بلند دارد. طبق نتایج بدست آمده، میزان نیروی ناشی از فشار سیال وارد به سازه با افزایش ارتفاع موج، افزایش پیدا می‌کند. به گونه‌ای که میزان نیروی وارد به سازه‌ی با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر در موقعیت ابتدا از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی-متر به مقدار ۱۰۰/۳۵ درصد افزایش پیدا کرده است و هم‌چنین در موقعیت وسط و انتها نیز به ترتیب به میزان ۱۰۴/۹ و ۱۰۸/۲۵ درصد افزایش پیدا کرده است. بیشترین نیروی وارد به سازه‌ی با ارتفاع ۷/۵سانتی‌متر مربوط به موقعیت ابتدای صفحه و ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر است که برابر با ۶۹/۷۶ نیوتن است. کمترین نیروی وارد به سازه‌ی با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر مربوط به موقعیت انتهای صفحه و ارتفاع موج ۶ سانتی‌متر است که برابر با ۳۰/۳ نیوتن است.

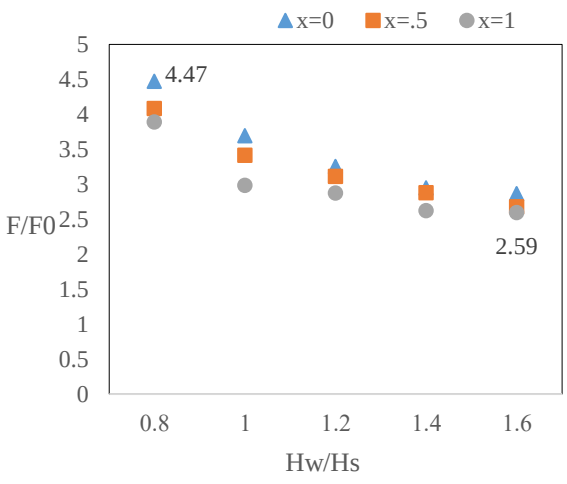
مطابق شکل ۸ شدت تغییرات نیرو برای سازه با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی متر روند کاهشی داشته است. شدت تغییرات نیروی وارد به سازه تابعی از ارتفاع موج است و با افزایش میزان ارتفاع موج این شدت تاثیر گذاری کاهش می‌یابد. به طوری‌که برای موقعیت ابتدا، وسط و انتها به ترتیب به میزان ۳۵/۸۷ ، ۳۴/۱۵و ۳۳/۳ درصد کاهش یافته است.

۳-۲-۱-۲- بررسی تاثیر موقعیت سازه بر مقدار نیرو

مطابق شکل ۸ می‌توان گفت که برای سازه‌ی با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر تحت ارتفاع‌های متفاوت موج هرچه سازه از مخزن ایجاد موج دورتر باشد میزان نیروی وارد به سازه هر چند به میزان کم ولی کاهش می‌یابد به طور واضح نیروی وارد به سازه در موقعیت ابتدا، وسط و انتها روند کاهشی دارد. شکل ۷ لحظه عبور آب از روی سازه ۷/۵ در اپن‌فوم را نشان می‌دهد.



شکل ۷- لحظه عبور آب از روی سازه ۷/۵ در محیط OpenFOAM



شکل ۸- نیروهای ناشی از فشار وارد به سازه ۷.۵ سانتی‌متر در موقعیت‌های مختلف روی صفحه متحرک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]

[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]

۳-۲-۲- سازه ۱۰

۳-۲-۲-۱- بررسی تاثیر افزایش ارتفاع موج بر شدت تغییرات نیرو

مطابق نتایج به طور کلی نیروها نسبت به حالت بدون سازه افزایش پیدا کرده‌اند. این مطلب نشان از تأثیر چشم‌گیر سازه‌ی ساحلی در کاهش انرژی و نیروی امواج بلند دارد. طبق جدول ۶ میزان نیروی ناشی از فشار سیال وارد به سازه با افزایش ارتفاع موج، افزایش پیدا می‌کند. به گونه‌ای که میزان نیروی وارد به سازه‌ی با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در موقعیت ابتدا از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی‌متر به مقدار ۸۲/۹۴ درصد افزایش پیدا کرده است و هم‌چنین در موقعیت وسط و انتها نیز به ترتیب به میزان ۱۰۷/۷۵ و ۱۱۶/۶ درصد افزایش پیدا کرده است. بیشترین نیروی وارد به سازه‌ی با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر مربوط به موقعیت ابتدای صفحه و ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر است که برابر با ۹۲/۱۸ نیوتن است. کمترین نیروی وارد به سازه‌ی با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر مربوط به موقعیت انتهای صفحه و ارتفاع موج ۶ سانتی‌متر است که برابر با ۴۰/۹۱ نیوتن است.

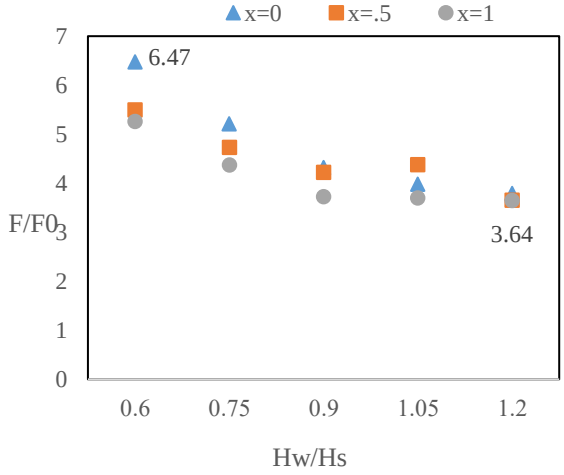
مطابق شکل ۱۰ شدت تغییرات نیرو برای سازه با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی متر روند کاهشی داشته است. شدت تغییرات نیروی وارد به سازه تابعی از ارتفاع موج است و با افزایش میزان ارتفاع موج این شدت تاثیر گذاری کاهش می‌یابد. به طوری‌که برای موقعیت ابتدا، وسط و انتها به ترتیب به میزان ۴۱/۴۲ ، ۳۳/۵۱ و ۳۰/۶۶ درصد کاهش یافته است.

۳-۲-۲-۲- بررسی تاثیر موقعیت سازه بر نیرو

مطابق جدول۶ و شکل ۱۰ می‌توان گفت که برای سازه‌ی با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر تحت ارتفاع‌های متفاوت موج هرچه سازه از مخزن ایجاد موج دورتر باشد میزان نیروی وارد به سازه هر چند به میزان کم ولی کاهش می‌یابد به طور واضح نیروی وارد به سازه در موقعیت ابتدا، وسط و انتها روند کاهشی دارد. شکل ۹ لحظه عبور آب از روی سازه ۱۰ در اپن‌فوم را نشان می‌دهد.



شکل ۹- لحظه عبور آب از روی سازه ۱۰ در محیط OpenFOAM



شکل ۱۰- نیروهای ناشی از فشار وارد به سازه ۱۰ سانتی‌متر در موقعیت‌های مختلف روی صفحه متحرک

۳-۲-۳- سازه ۱۵

۳-۲-۳-۱- بررسی تاثیر افزایش ارتفاع موج بر شدت تغییرات نیرو

مطابق نتایج میزان نیروی ناشی از فشار سیال وارد به سازه با افزایش ارتفاع موج، افزایش پیدا می‌کند. به گونه‌ای که میزان نیروی وارد به سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در موقعیت ابتدا از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی‌متر به مقدار ۱۱۹/۲۵ درصد افزایش پیدا کرده است و هم‌چنین در موقعیت وسط و انتها نیز به ترتیب به میزان ۱۴۶/۲۶و ۱۳۰/۷۴ درصد افزایش پیدا کرده است. بیشترین نیروی وارد به سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر مربوط به موقعیت ابتدای صفحه و ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر است که برابر با ۱۶۴/۰۰۵ نیوتن است. کمترین نیروی وارد به سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر مربوط به موقعیت انتهای صفحه و ارتفاع موج ۶ سانتی‌متر است که برابر با ۵۶/۶ نیوتن است.

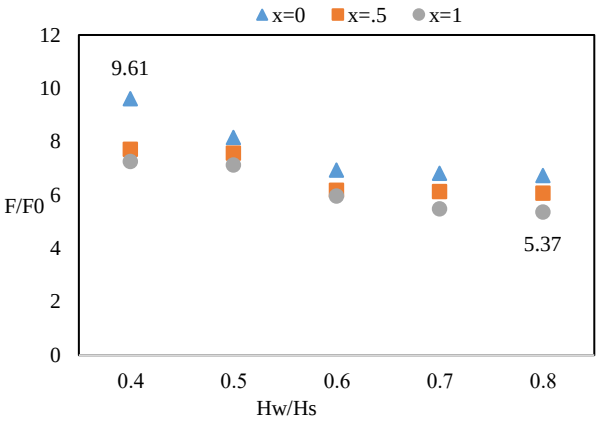
مطابق شکل ۱۲ شدت تغییرات نیرو برای سازه با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی متر روند کاهشی داشته است. شدت تغییرات نیروی وارد به سازه تابعی از ارتفاع موج است و با افزایش میزان ارتفاع موج این شدت تاثیر گذاری کاهش می‌یابد. به طوری‌که برای موقعیت ابتدا، وسط و انتها به ترتیب به میزان ۲۹/۹ ، ۲۰/۸۸ و ۲۶/۰۳ درصد کاهش یافته است.

۳-۲-۳-۲- بررسی تاثیر موقعیت سازه بر نیرو

مطابق جدول۷ و شکل۱۲می‌توان گفت که برای سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر تحت ارتفاع‌های متفاوت موج هرچه سازه از مخزن ایجاد موج دورتر باشد میزان نیروی وارد به سازه هر چند به میزان کم ولی کاهش می‌یابد به طور واضح، نیروی وارد به سازه در موقعیت ابتدا، وسط و انتها روند کاهشی دارد. شکل ۱۱ لحظه عبور آب از روی سازه ۱۵ در اپن‌فوم را نشان می‌دهد.



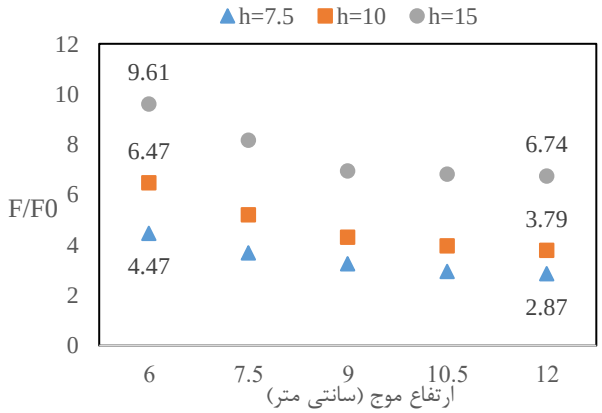
شکل ۱۱- لحظه عبور آب از روی سازه ۱۵ در محیط OpenFOAM



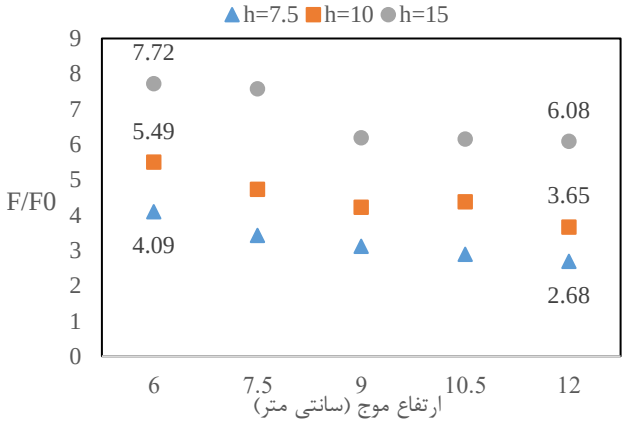
شکل ۱۲- نیروهای ناشی از فشار وارد به سازه ۱۵ سانتی‌متر در موقعیت‌های مختلف روی صفحه متحرک

۳-۳- بررسی تاثیر ارتفاع سازه بر جذب نیرو

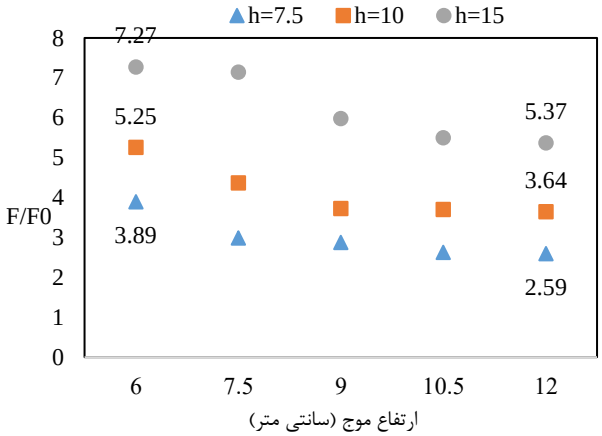
تاثیر ارتفاع موج و موقعیت دایک در جذب نیرو بررسی گردید. در ادامه تاثیر ارتفاع سازه مورد بررسی قرار گرفته شده است. شکل‌های ۱۳،۱۴و ۱۵ میزان نیروی وارد به سازه با ارتفاع متفاوت در سه موقعیت را نشان می‌دهند.



شکل ۱۳- بررسی تاثیر ارتفاع سازه بر میزان نیروی ناشی از فشار وارد بر سازه درموقعیت ابتدای صفحه



شکل۱۴- بررسی تاثیر ارتفاع سازه بر میزان نیروی ناشی از فشار وارد بر سازه در موقعیت وسط صفحه



شکل۱۵- بررسی تاثیر ارتفاع سازه بر میزان نیروی ناشی از فشار وارد بر سازه در موقعیت انتهای صفحه

با توجه به شکل‌ها می‌توان گفت که هر چه ارتفاع سازه بیشتر می‌شود میزان نیروی ناشی از فشار سیال وارد بر سازه نیز بیشتر می‌شود. مطابق شکل‌ها در هر ارتفاع موج و در هر موقعیت (x= 0, 0.5, 1) میزان نیروی ناشی از فشار سیال وارد به سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر بیشتر از دو سازه‌ی دیگر (۱۰و ۷.۵) است. این مورد می‌تواند ناشی از آن باشد که هر چه ارتفاع سازه بیشتر می‌شود سطح تماس سازه با آب بیشتر می‌شود بنابراین میزان نیروی وارد به سازه نیز افزایش می‌یابد.

در کل می‌توان گفت که بیشترین نیروی ناشی از فشار سیال وارد به هر سه سازه مربوط به سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر، موقعیت ابتدا و ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر است که برابر با ۱۶۴/۰۰۵ نیوتن است. کمترین میزان نیرو هم مربوط به سازه‌ی با ارتفاع ۷.۵ سانتی‌متر، موقعیت انتها و ارتفاع موج ۶ سانتی‌متر است که برابر با ۳۰/۳ نیوتن است. در هر ارتفاع موج و در هر موقعیت (x= 0, 0.5, 1) میزان نیروی ناشی از فشار سیال وارد به سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر بیشتر از دو سازه‌ی دیگر (۱۰و ۷.۵) است. تحت ارتفاع‌های متفاوت موج هرچه سازه از مخزن ایجاد موج دورتر باشد میزان نیروی وارد به سازه هر چند به میزان کم ولی کاهش می‌یابد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]

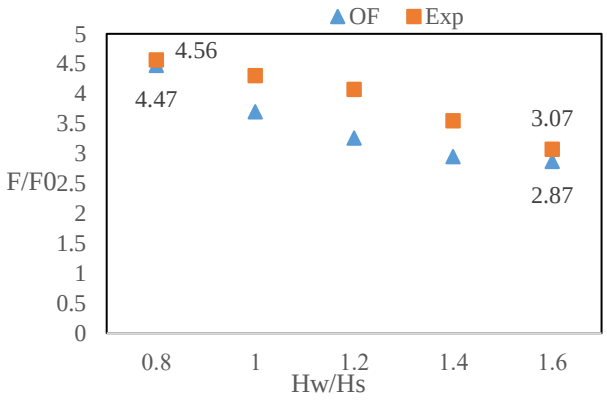
۳-۴- مقایسه نیروهای مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

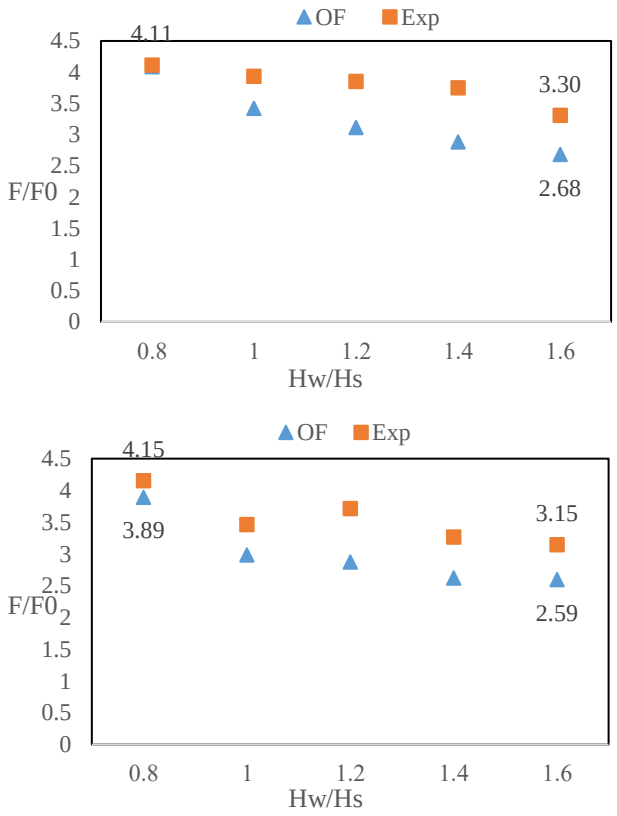
پس از بررسی مقادیر نیروی محاسبه شده در نرم‌افزار اپن‌فوم و ارائه‌ی نمودارها به مقایسه‌ی این نیروهای محاسبه شده با مقادیر آزمایشگاهی [۲۲] پرداخته شده است.

جدول ۵- نیروهای محاسبه شده در OpenFOAM و آزمایشگاه در حالت بدون سازه

ارتفاع موج (cm)	F0 اپن فوم (نیوتن)	F0 آزمایشگاه [۲۶] (نیوتن)
۱۲	۲۴/۳۲	۲۵/۶۸
۱۰/۵	۲۰/۶۸	۱۹/۷۳
۹	۱۷/۹۸	۱۶/۰۵
۷/۵	۱۲/۳	۱۱/۸۳
۶	۷/۷۹	۸/۲۷

در شکل ۱۶ مقایسه‌ی F/F0 بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی برای سازه ۷/۵ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۱۶ می‌توان گفت که برای سازه با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر داده‌های مدل عددی از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. با توجه به شکل ۱۶ بیشترین درصد اختلاف نسبت نیرو به نیروی بدون سازه ($\left(\frac{\frac{F}{F_0}Exp-\frac{F}{F_0}OF}{\frac{F}{F_0}Exp}*100\right)$) بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی در سازه با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر در موقعیت ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۲۰، ۲۳/۱ و ۲۲/۶۴ درصد است. کمترین درصد اختلاف بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی در سازه با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر در موقعیت ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۱/۹۳، ۶۵/ و ۶/۲۵ درصد است. مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای سازه با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر در موقعیت‌های ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۰/۵۳۵ ، ۰/۶۲۴ و ۰/۵۸۶ است. مقدار نرمال سازی جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE) برای سازه با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر در موقعیت‌های ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۰/۳۳۳ ، ۰/۴۴۴ و ۰/۴۵۲ است.



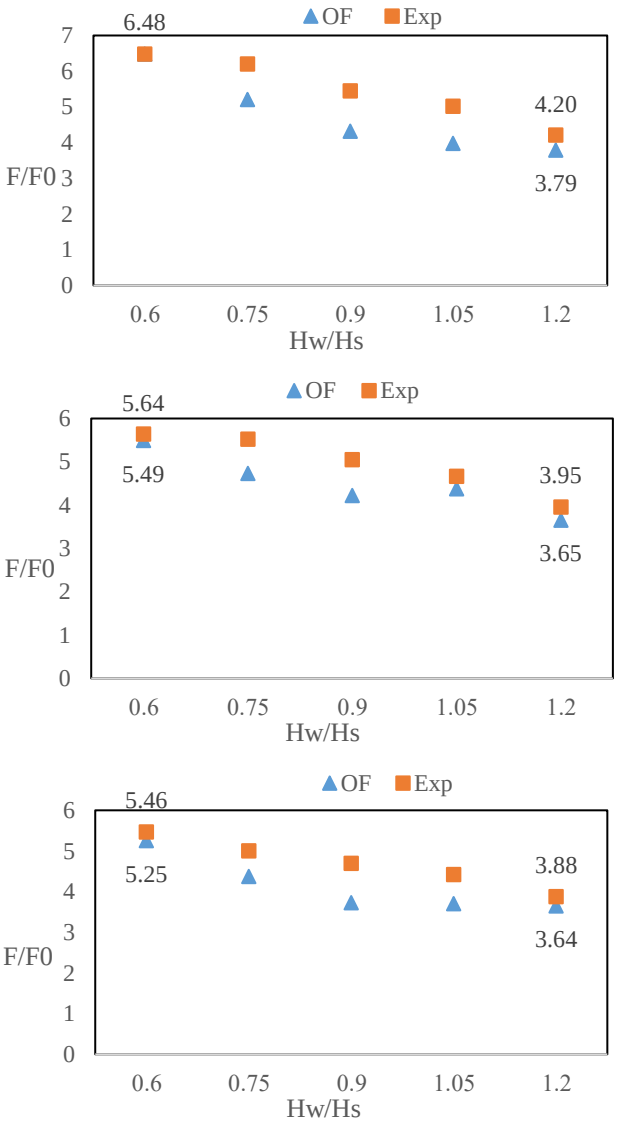


شکل ۱۶- مقایسه نیروهای مدل عددی با آزمایشگاهی برای سازه ۷/۵ در موقعیت‌های مختلف

در شکل ۱۷ مقایسه‌ی F/F0 بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی برای سازه ۱۰ مشاهده می‌شود با توجه به شکل ۱۷ می‌توان گفت که برای سازه با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر داده‌های مدل عددی از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. با توجه به شکل ۱۷ بیشترین درصد اختلاف نسبت نیرو به نیروی بدون سازه بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی در سازه با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در موقعیت ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۲۰/۸، ۱۶/۴۲و ۲۰/۷۱ درصد است. کمترین درصد اختلاف بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی در سازه با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در موقعیت ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۰۷۳/ ، ۲/۵۶و ۳/۸۵درصد است. مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای سازه با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در موقعیت‌های ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۰/۸۳۹، ۰/۵۴۹ و ۰/۶۲۵ است. مقدار نرمال سازی جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE) برای سازه با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در موقعیت‌های ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۰/۳۱۳ ، ۰/۲۹۸ و ۰/۳۸۸ است.

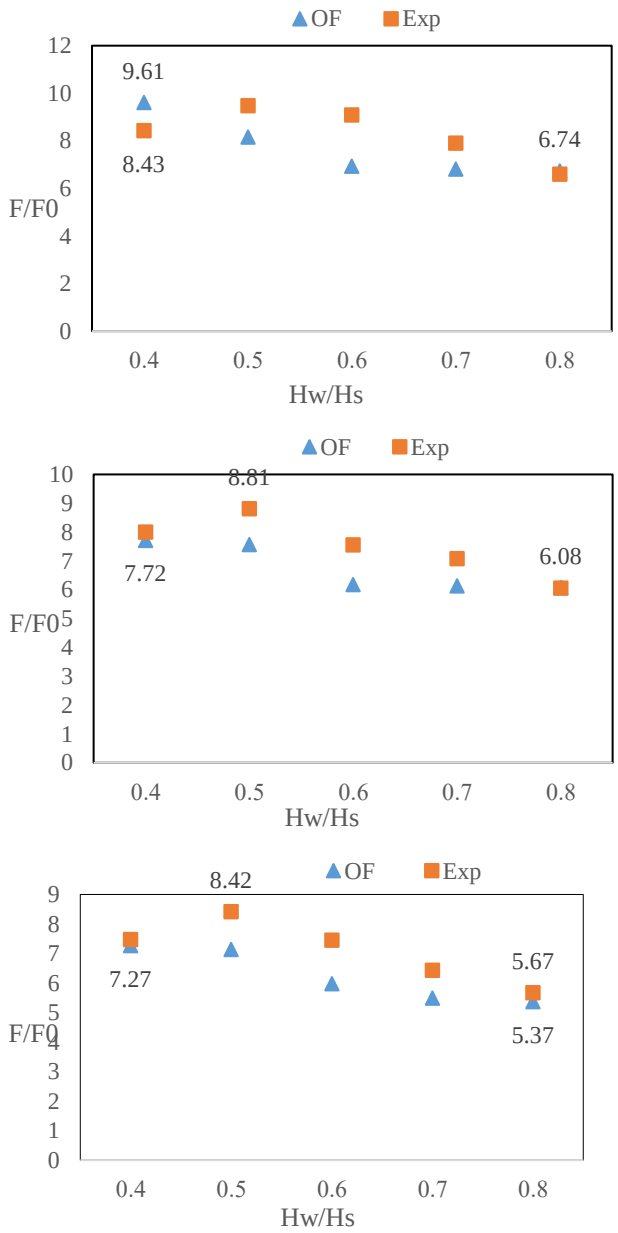
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]



شکل ۱۷- مقایسه نیروهای مدل عددی با آزمایشگاهی برای سازه ۱۰ در موقعیت‌های مختلف

در شکل ۱۸ مقایسه‌ی F/F0 بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی برای سازه ۱۵ مشاهده می‌شود با توجه به شکل ۱۸ می‌توان گفت که برای سازه با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر داده‌های مدل عددی از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. با توجه به شکل ۱۸ بیشترین درصد اختلاف نسبت نیرو به نیروی بدون سازه بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی در سازه با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در موقعیت ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۲۳/۶۱، ۱۸/۲۱و۱۹/۸ درصد است. کمترین درصد اختلاف بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی در سازه با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در موقعیت ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۲/۲ ، ۰/۴۱ و ۲/۸درصد است. مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای سازه با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در موقعیت‌های ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۱/۳۳۵ ، ۰/۹۳۸ و ۰/۹۸۳ است. مقدار نرمال سازی جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE) برای سازه با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در موقعیت‌های ابتدا، وسط و انتها به ترتیب برابر با ۰/۴۶۵ ، ۰/۵۷۴ و ۰/۵۱۸ است.



شکل ۱۸- مقایسه نیروهای مدل عددی با آزمایشگاهی برای سازه ۱۵ در موقعیت‌های مختلف

با توجه به شکل‌ها می‌توان گفت که مدل عددی در هر سه سازه و در هر سه موقعیت از دقت قابل قبولی برخوردار است. بیشترین میزان اختلاف بین داده‌های مدل عددی و آزمایشگاهی مربوط به سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر، موقعیت ابتدا و ارتفاع موج ۹ است که برابر با ۲۳/۶۱ درصد است. کمترین میزان اختلاف نیز مربوط به سازه‌ی با ارتفاع ۱۰، موقعیت ابتدا و ارتفاع موج ۶ است که برابر با ۰/۰۷۳ درصد است. در کل می‌توان گفت که سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در هر سه موقعیت و هر پنج ارتفاع موج نسبت به دو سازه‌ی دیگر تطبیق بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی دارد. کمترین میزان جذر میانگین مربعات خطا مربوط به سازه‌ی با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر و موقعیت ابتدای صفحه است که برابر با ۰/۵۳۵ است. کمترین میزان

نرمال‌سازی جذر میانگین مربعات خطا مربوط به سازه‌ی ۱۰و موقعیت وسط است که برابر با ۰/۲۹۸ است.

۴- نتیجه‌گیری

میزان نیروی ناشی از فشار سیال وارد به سازه با افزایش ارتفاع موج، افزایش پیدا می‌کند. شدت تغییرات نیرو برای سازه از ارتفاع موج ۶ تا ۱۲ سانتی متر روند کاهشی داشته است. شدت تغییرات نیروی وارد به سازه تابعی از ارتفاع موج است و با افزایش میزان ارتفاع موج این شدت تاثیر گذاری کاهش می‌یابد.

تحت ارتفاع‌های متفاوت موج هرچه سازه از مخزن ایجاد موج دورتر باشد میزان نیروی وارد به سازه هر چند به میزان کم ولی کاهش می‌یابد به طور واضح، نیروی وارد به سازه در موقعیت ابتدا، وسط و انتها روند کاهشی دارد.

در کل می‌توان گفت که بیشترین نیروی ناشی از فشار سیال وارد به هر سه سازه مربوط به سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر، موقعیت ابتدا و ارتفاع موج ۱۲ سانتی‌متر است که برابر با ۱۶۴/۰۰۵ نیوتن است. کمترین میزان نیرو هم مربوط به سازه‌ی با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر، موقعیت انتها و ارتفاع موج ۶ سانتی‌متر است که برابر با ۳۰/۳ نیوتن است. در هر ارتفاع موج و در هر موقعیت میزان نیروی ناشی از فشار سیال وارد به سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر بیشتر از دو سازه‌ی دیگر (۱۰و ۷/۵) است.

با توجه به شکل‌ها نتایج می‌توان گفت که داده‌های مدل عددی از دقت قابل قبولی برخوردار هستند.

بیشترین میزان اختلاف بین داده‌های مدل عددی و آزمایشگاهی مربوط به سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر، موقعیت ابتدا و ارتفاع موج ۹ است که برابر با ۲۳/۶۱ درصد است. کمترین میزان اختلاف نیز مربوط به سازه‌ی با ارتفاع ۱۰، موقعیت ابتدا و ارتفاع موج ۶ است که برابر با ۰/۰۷۳ درصد است. در کل می‌توان گفت که سازه‌ی با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر نسبت به دو سازه‌ی دیگر تطبیق بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی دارد. کمترین میزان جذر میانگین مربعات خطا مربوط به سازه‌ی با ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر و موقعیت ابتدای صفحه است که برابر با ۰/۵۳است. کمترین میزان نرمال‌سازی جذر میانگین مربعات خطا مربوط به سازه‌ی ۱۰و موقعیت وسط است که برابر با ۰/۲۹۸ است.

۵- تشکر و قدردانی

این پژوهش تحت حمایت مالی دانشگاه شهرکرد انجام شده است. محققین ایم مقاله، بدینوسیله قدردان این همراهی می‌باشند.

کلیدواژگان

1- Euler-Langrange approach
2- Euler-Euler approach
3- Volume fraction
4- Continuity Equations
5- Momentum Equations
6- Deviatoric stress tensor
7- Mean rate of strain tensor
8- Divergence operation in vector calculus
9- Reynolds Average Navier- Stokes (RANS)
10- Large-Eddy Simulation (LES)
11- Direct Numerical Simulations (DNS)
12- Menter
13-Open Source Field Operation and Manipulation
14- Computer Aided Three-dimensional Interactive Application
15- Drag force

منابع

1- Akgul, M Adil, Didem Yilmazer, Elif Oguz, M Sedat Kabdasli, and Oral Yagci, (2013), *The Effect of an Emergent Vegetation (Ie Phragmistes Australis) on Wave Attenuation and Wave Kinematics*. Journal of Coastal Research, no. 65 (10065): 147-52

2- Zarei, M., Fathimoghadam, M., davoodi, L. (2017), *Effect of coastal vegetation on attenuation of non-breaking solitary wave force in sloping coast lines*, Irrigation and Water Engineering, 7(2), pp. 62-75. (in Persian)

3- Hashemi-Javan, S. (2007), *Numerical simulation of wave breaking phenomenon on submerged breakwater*, Master's thesis. Field of hydraulic structures. Faculty of Civil Engineering, Tehran. Tehran University of Science and Technology, 116 pages, (in Persian)

4-Effati, M. and Lashte-Neshaei, M.A., (2008), *The effect of wave and earthquake forces on stone breakwaters*. The 7th Iranian Hydraulic Conference. Tehran Iranian Hydraulic Association. University of Water and Electricity Industry, (in Persian)

5- Ghanbari_Adivi, E. and Fathi_Moghadam, M. (2015), *Vegetation impact on the drag coefficient and resistance of trees against shore waves*, Journal of Irrigation and Water Engineering, 2(38):103-112, (in Persian)

6- Igarashi, Yoshiya, Norio Tanaka, and Takehito Zaha. *Changes in Flow Structures and Energy Reduction through Compound Tsunami Mitigation System with Embankment and Lined Piles*." Ocean Engineering 164 (2018): 722-32.

7- Honarmand, M., Arman, V., Zandi, S.M. and Shanehsazzade, A., (2018), *Numerical and experimental simulation of tsunami wave propagation and upwelling and investigation of submerged breakwater performance in reducing upwelling*, Journal of Oceanography, 9(36):31-38. (in Persian)

8- Elbisy, Moussa S, Ehab M Mlybari, and Medhat M Helal, (2016), *Hydrodynamic Performance of*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]

21- Penttinen, Olle, Ehsan Yasari, and Håkan Nilsson. (2011), *A Pimplefoam Tutorial for Channel Flow, with Respect to Different Les Models.* Practice Periodical on Structural Design and Construction 23, no. 2: 1-23.
22- Balogh, Miklós, Alessandro Parente, and Carlo Benocci. *Rans Simulation of Abl Flow over Complex Terrains Applying an Enhanced K-E Model and Wall Function Formulation: Implementation and Comparison for Fluent and Openfoam.*(2012), Journal of wind engineering and industrial aerodynamics 104 : 360-68.
23- Farzin, S, M Alizadeh, and Y Hassanzadeh. (2013), *Numerical Simulation of Unsteady One-Dimensional Dam-Break Flows Using Tvd Maccormack Scheme*. 7th National Congress on Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, 2013.1-8.
24- Sorenson, RM. (2006), *Basic Coastal Engineering. Spring Science and Business Media*, New York.
25- Mohammadi firuz, S., Morovati, H., Torabi Azad, M. (2014). *Study and analyse of the stability of Rubble mound break water in Nowshahr port by environmental and structural parameters*, Iranian Journal of Marine Science and Technology, 18(70), pp. 1-1, (in Persian)
26- Rezapooran, A., Ghanbari-Adivi, E. and Fattahi, Rohollah. (2022), *Laboratory study of coastal protection using breakwater structure in comparison with the combination of dyke structure and tree cover*, 12th International River Engineering Conference،https://civilica.com/doc/1451051
27- Pope,S.(2000) .*Turbulent Flows.univercity of Cambridge.*United Kingdom.
Multiple-Row Slotted Breakwaters. Journal of Marine Science and Application 15, no. 2 (2016): 123-35.
9- Jiang, Changbo, Xiaojian Liu, Yu Yao, Bin Deng, and Jie Chen (2017), *Numerical Investigation of Tsunami-Like Solitary Wave Interaction with a Seawall*." Journal of Earthquake and Tsunami 11, no. 01: 1740006.
10- Nassiraei, H. (2013), *Numerical modeling of forces acting on caisson breakwaters from long waves*, Master's thesis. Field of marine structures. Faculty of Civil and Environmental Engineering. Tarbiat Modares University. 74 pages. (in Persian)
11-Nassiraei, H., Heidarzadeh, M. and Shafieefar, M., 2016. *Numerical Simulation of Long Waves (Tsunami) Forces on Caisson Breakwaters*
12- Lotfollahi-Yaghin, M.A. and Nassiraei, H., 2016. *Numerical Simulation of Tsunami Waves Forces on Coastal Structures*. Journal of Oceanography, 6(24), pp.23-30. (in Persian)
13- Jiang, Changbo, Xiaojian Liu, Yu Yao, and Bin Deng. *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, no. 1 (2019): 530-41.
14- Li, Jinzhao, Meilan Qi, and David R Fuhrman. *Numerical Modeling of Flow and Morphology Induced by a Solitary Wave on a Sloping Beach*. Applied Ocean Research 82 (2019): 259-73.
15- Huang, Jianjun, and Guoping Chen. *Experimental Modeling of Wave Load on a Pile-Supported Wharf with Pile Breakwater*. Ocean Engineering 201 (2020): 107149.
16- Gonçalves, Sílvia C, Pedro M Anastácio, and João C Marques., (2013), *Talitrid and Tylid Crustaceans Bioecology as a Tool to Monitor and Assess Sandy Beaches*, Ecological Quality Condition." Ecological indicators 29 : 549-57.
17- Leewis, Lies, Peter M van Bodegom, Jelte Rozema, and Gerard M Janssen. (2012), *Does Beach Nourishment Have Long-Term Effects on Intertidal Macroinvertebrate Species Abundance?*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 113 : 172-81.
18- Martins, Mónica C, Carlos S Neto, and José C Costa., (2013), *The Meaning of Mainland Portugal Beaches and Dunes' Psammophilic Plant Communities: A Contribution to Tourism Management and Nature Conservation*. Journal of Coastal Conservation 17, no. 3 (2013): 279-99.
19- Menter, Florian R. *Influence of Freestream Values on K-Omega Turbulence Model Predictions*. (1992), AIAA journal 30, no. 6: 1657-59.
20- An, Karl, and J Chi Hung Fung. (2018), *An Improved Sst K− Ω Model for Pollutant Dispersion Simulations within an Isothermal Boundary Layer*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 179: 369-84

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.37.1.6]
[DOI: 10.52547/marineeng.18.37.1]