

بررسی عددی تاثیر استفاده از طرح ترکیبی دیوار ساحلی و جنگل ساحلی در حفاظت و پایداری سواحل

صبا بهرامی سامانی^۱، غلامرضا شمس قهفرخی^{۲*}، الهام قنبری عدیوی^۳، نریمان مهرانفر^۴

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، saba.bahrami2021@gmail.com

^{۲*} عضو هیات علمی گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، g.shams@sku.ac.ir

^۳ عضو هیات علمی گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، ghanbariadiivi@sku.ac.ir

^۴ دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده پلی تکنیک مونترال کانادا nariman.mehranfar@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نارنجیه مقاله: تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲	باتوجه به اهمیت استراتژیک مناطق ساحلی از جنبه‌های مختلف، حفاظت از آن‌ها در برابر امواج یک ضرورت در مدیریت و توسعه پایدار سواحل محسوب می‌شود. در این تحقیق تلاش شده است تا در کنار سازه‌های حفاظتی، روشی کارآمد منطبق بر محیط زیست سواحل، مانند استفاده از درخت نیز بررسی شود و در مقایسه با روش صرفا ساختاری، استهلاک امواج ساحلی و در نتیجه حفاظت از سواحل به نحو جامع‌تری مورد بررسی قرار گیرد. روش مورد استفاده در مدل‌سازی جریان براساس معادلات ناویر - استوکس میانگین‌گیری شده رینولدز (RANS) و مدل (k- ω , SST) است که در بستر نرم‌افزار Open FOAM انجام شده است. سازه دیوار ساحلی در ترکیب با درختان تحت تاثیر ۵ ارتفاع موج ورودی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی انجام شده با کمک مدل عددی نشان داد که میرایی و تضعیف امواج در شرایط ذکر شده در مقایسه با ساحل بدون حفاظت نتایج قابل قبولی را ارائه داده است. در بیشترین تاثیر گذاری میزان تضعیف امواج از نظر نیرو، وجود سازه دیوار ساحلی و پوشش جنگلی توانسته تا به میزان ۲/۱ برابر نسبت به ساحل بدون مانع به جذب نیروی امواج کمک نماید و از طرفی ارتفاع موج عبوری از ساحل را نیز ۴/۳۶ برابر نسبت به حالت بدون مانع، بیشتر کاهش دهد. نتایج مدل‌های عددی با مدل متناظر آزمایشگاهی مقایسه شد. در این مقایسه جذر میانگین مربعات خطای نرمال ۰/۴۲ و ضریب تبیین ۰/۹۸ بدست آمد که بیانگر دقت خوب مدل عددی و عملکرد مناسب نرم‌افزار Open FOAM در مدل‌سازی پدیده مورد بررسی است.

Numerical investigation of the effect of using a combined design of coastal wall and coastal forest in the protection and beaches stability

Saba Bahrami Samani¹, GolamReza Shams Ghahfarokhi^{2*}, Elham Ghanbari Adivi³, Nariman Mehranfar⁴

¹ MSC Student, Department of Water And Hydraulic structure, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, saba.bahrami2021@gmail.com

^{2*} Assistant Professor, Department of Hydraulic structure, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, g.shams@sku.ac.ir

³ Assistant Professor, Department of Water Science Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran,

elhamgh44@gmail.com

⁴ Ph.D. student, Department of Civil, Mining, and Geology, Polytechnique Montreal, Montreal, Quebec, Canada, nariman.mehranfar@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 20 Jun 2023

Accepted: 16 Aug 2023

Keywords:

Wave attenuation

ABSTRACT

Due to the strategic importance of coastal areas from various aspects, their protection against waves is considered a necessity in the management and sustainable development of beaches, in this research, an attempt has been made to investigate the effective method of protecting the coastal environment, such as trees, in addition to protective structures and compared to the purely structural method, the depreciation of coastal

sustainable development
coastal protection
Open FOAM

waves and as a result the protection of beaches should be investigated in a more comprehensive way. The method used in the flow modeling is Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) and (k- ω , SST) model, which is done in Open FOAM software platform. The coastal wall structure of the coastal dike structure in combination with trees was investigated under the influence of 5 different incoming wave heights. The research done with the help of the numerical model showed that the damping and weakening of the waves in the mentioned conditions compared to the beach without protection has provided acceptable results. In the most influencing of wave weakening in terms of power, the presence of coastal wall structure, dyke structure and forest cover of the coastal forest was able to help absorb the force of the waves by 1.2 times compared to the unobstructed beach, and on the other hand, the height of the wave passing by the beach was also 4.36 times compared to unobstructed mode, reduce further. The results were compared with the laboratory data. The results of numerical models were compared with the corresponding laboratory model. In this comparison, the root mean square of the normal error was 0.42 and the correlation coefficient was 0.98, which indicates the good accuracy of the numerical model and the appropriate performance of the Open FOAM software in modeling.

۱ - مقدمه

امواج مهم‌ترین عامل در تغییر هندسه سواحل می‌باشند، بنابراین نقش مهمی در طراحی بنادر، آبراهه‌ها، سازه‌های حفاظت ساحلی و سایر اقدامات ساحلی دارند. میزان قابل توجهی از انرژی امواج در کرانه‌های ساحلی مستهلک شده که باعث شکل‌دهی سواحل، انتقال مواد رسوبی کف دریا به سمت ساحل و یا در امتداد نوار ساحلی می‌گردد و همچنین موجب اعمال نیرو به سازه‌های ساحلی و تخریب آن‌ها می‌شود [۱]. هنگامی که یک سازه به حد نهایی تحمل خود می‌رسد آسیب دیده و خرابی‌ها و خسارات جبران‌ناپذیری از جمله شکست سازه را به دنبال خواهد داشت پس لازم است با شناخت عوامل تخریب، این خسارات تا حد امکان کاهش داد. گزینه‌های مختلفی برای طراحی و اجرا سازه‌های حفاظتی وجود دارد. دو روش سازه‌ای و غیرسازه‌ای از اقداماتی هستند که ساحل را در مقابل امواج دریا از پدیده فرسایش محافظت می‌کنند. روش‌هایی مانند استفاده از موج‌شکن‌ها، دیوارهای ساحلی و دستک‌ها، از نوع سازه‌ای و استفاده از صخره‌های مصنوعی، پوشش گیاهی و تثبیت ساحلی، از نوع غیرسازه‌ای می‌باشد. از مکانیسم‌های ساده و اقتصادی مقابله با امواج که باعث جلوگیری از ورود امواج به منطقه مورد نظر می‌شود، می‌توان به انعکاس موج به سمت دریا، شکست موج و ایجاد آشفتگی در درون بدنه سازه و یا زیست‌سازه متخلخل اشاره نمود.

قنبری عدیوی و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی اثر استفاده از جنگل ساحلی به منظور استفاده از آن به عنوان یک زیست‌سازه متخلخل برای کاهش اثر مخرب امواج سواحل پرداختند، نتایج نشان داد که در برخی شرایط پوشش جنگلی می‌تواند جایگزین مناسبی برای سازه‌های صلب مانند دیوار ساحلی و موج‌شکن‌های سازه‌ای نیز باشد [۲]. صالحی و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی اثر پوشش درختی در کاهش نیروی امواج ورودی به ساحل پرداختند، نتایج نشان داد که پوشش درختی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش نیروی امواج ورودی به ساحل دارند به طوری که بین ۴۳ تا ۳۱۸ درصد، جذب نیروی امواج توسط این پوشش درختی نسبت به شرایط ساحل بدون حفاظت اتفاق افتاد [۳].

لی (۲۰۲۱)، باثو (۲۰۱۱)، راجندران و کثیرسان (۲۰۰۵) در تحقیقات میدانی، پوشش گیاهی ساحلی را به عنوان یک مانع طبیعی در برابر کاهش شدت امواج معرفی نمودند [۴-۵-۶]. قطعا در برخی شرایط استفاده از پوشش گیاهی جنگلی به تنهایی کارایی لازم در حفاظت از سواحل را نخواهد داشت، بنابراین، لازم است که با اجرای سازه‌های مکانیکی همراه باشد؛ به این شیوه، روش ترکیبی گویند. این گونه اقدامات در قسمت‌هایی که فرسایش بیشتر است، از پوشش‌های حفاظتی سازه‌ای و در قسمت‌هایی که فرسایش کمتری رخ می‌دهد از روش‌های بیولوژیکی استفاده می‌شود. به دلیل اهمیت حفاظت از ساحل، محققان و مهندسان مطالعات زیادی را در زمینه روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای و ترکیب آن‌ها انجام دادند که در ادامه به چند مورد از مطالعات انجام شده به صورت سازه‌ای و یا ترکیبی نیز پرداخته شده است. رضاپوران و همکاران (۱۴۰۱) در یک طرح حفاظتی ترکیبی سازه پوشش جنگلی اقدام به بررسی رفتار ساحل در شرایط مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که میزان میرایی موج و نیرو در شرایط مختلف در این طرح در مقایسه با ساحل بدون موانع افزایش چشمگیری داشته است [۷]. در تحقیقی دیگر اثر موقعیت قرارگیری سازه در ساحل بر میزان استهلاک امواج نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کارایی بیشتر طرح حفاظتی را در زمانی که این طرح در ساحل خشکی اجرا شده باشد در مقایسه به ساحل نزدیک به دریا، گزارش داد [۸].

ساعدی و همکاران (۱۳۸۹)، نوجاس و همکاران (۲۰۱۶) و واقفی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی ضمن بررسی تأثیر سازه ساحلی بر روی کاهش ارتفاع موج اثر شیب سازه را مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان داد که با تغییر هندسه سازه میزان استهلاک امواج نیز تغییر قابل توجهی دارد [۹-۱۰-۱۱].

گارسسیا و همکاران (۲۰۱۸) به مطالعه ترکیب سازه‌های سخت و پوشش گیاهی پرداختند، نتایج نشان داد که با وجود اینکه استحکام سازه‌های سخت بهتر است، ولی کاربرد پوشش گیاهی جنگلی از نظر زیست‌محیطی نسبت به سازه‌های سخت می‌تواند اقتصادی‌تر باشد [۱۲].

دارد. در ادامه به تعدادی از این پژوهش‌های انجام شده، به صورت عددی اشاره شده است.

تانگ و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی عددی اثر پوشش گیاهی صلب با شرایط متفاوت، در برابر امواج متناوب پرداختند، نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که پوشش گیاهی صلب باعث کاهش طول موج شده و انرژی موج با افزایش قطر ساقه و تراکم ساقه‌ها رو به کاهش است [۱۹].

لی (۲۰۱۹) در نرم افزار Open FOAM جریان یک موج منفرد و میرایی آن را در یک ساحل دارای شیب، بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی با دقت قابل قبولی شبیه سازی نمود [۲۰]. وانگ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثر متقابل موج منفرد با سکوها دارای پوشش گیاهی به صورت مدل عددی دوبعدی، بر اساس حل کننده‌ی جریان مبتنی بر دینامیک اولیری به کمک نرم افزار Open FOAM^۱ پرداختند، نتایج نشان داد که کارایی یک سکوی گیاهی (دارای زبری) بهتر از یک سکوی ساده در میرایی موج است [۲۱].

ولی پور و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی تاثیر امواج بر روی یک دایک ساحلی با نرم افزار Open FOAM پرداختند. مدل سازی در دو حالت کلی با سازه و بدون سازه انجام شد و نتایج نشان داد که میزان جذب نیرو نسبت به حالت بدون سازه تا ۱۰ برابر افزایش یافته است. بررسی‌های انجام شده دقت قابل قبول نرم افزار در مدل سازی امواج ساحلی را نشان داد [۲۲]. آن‌ها همچنین در تحقیقی دیگر به بررسی عملکرد این طرح بر میرایی امواج پرداختند. نتایج حاصله نشان دهنده تاثیر حضور سازه در کاهش ارتفاع موج عبوری از ساحل می باشد [۲۳].

چانگبو (۲۰۱۹) در مطالعات عددی در زمینه‌ی بررسی امواج منفرد بر روی یک ردیف شمع شکافدار عمودی در نرم افزار Open FOAM در شرایط مختلف قرارگیری شمع‌ها به عنوان سازه‌های حفاظت از سواحل پرداختند، نتایج نشان داد که ارتفاع موج، آرایش شمع‌ها و شیب ساحل می تواند بر روی استهلاک انرژی اثر گذار باشد. نتایج آن‌ها همچنین تایید کننده دقت مدل سازی نرم افزار مورد استفاده، می باشد [۲۴]. مشاهدات میدانی پس از رویدادهای شدید آب و هوایی نشان داده است که پوشش گیاهی به عنوان یک نوع مانع طبیعی ساحلی می تواند به طور موثر از شدت موج‌های سهمگین

میرزاخانی و همکاران (۲۰۲۳) به مطالعه آزمایشگاهی بر اثر پوشش گیاهی صلب بر روی الگوی جریان پرداختند، نتایج نشان داد که موانع تاثیر بسزایی در جذب نیرو و استهلاک انرژی امواج دارند [۱۳]. در تکمیل این کار جلیل مصیر و همکاران (۲۰۲۱) مطالعاتی بر روی پوشش منعطف و تاثیرگذاری آن بر میرایی امواج، انجام دادند [۱۴].

تانا کا و همکاران (۲۰۱۴) به مطالعه بر روی اثر ترکیبی خاکریز و پوشش جنگلی بر کاهش سونامی با یک مدل معادله غیرخطی پرداختند، نتایج نشان داد که ترکیب خاکریز با ارتفاع بلند، پوشش جنگل و تپه‌ی شنی تاثیر بسزایی در برابر سونامی می تواند داشته باشد [۱۵].

ایگاراشی و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقات خود بر روی یک سیستم ترکیبی شمع و خاکریز در جهت استهلاک انرژی موج‌های بلند پرداختند، نتایج نشان داد که هرچه ارتفاع خاکریز بلندتر و ارتفاع و قطر موانع بیشتر شود، استهلاک انرژی موج نیز بیشتر می شود [۱۶].

مناطق ساحلی اکوسیستم‌های رابط بین زمین و دریا را تشکیل می دهند [۱۷-۱۸]. امروزه به طور گسترده، بررسی تضعیف امواج در ساحل مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. بررسی این موضوع با توجه به عدم قطعیت‌های موجود و پیچیدگی پارامترهای موثر بر پدیده نیاز به صرف زمان و هزینه بسیاری دارد. به طوری که در بررسی‌های صحرایی با توجه به فقدان داده‌های منظم و بلند مدت، محقق نیاز به بررسی دوره‌ای مشخصی دارد که گاهی زمان و هزینه زیادی را شامل می شود از این رو کارهای آزمایشگاهی بیشتری نسبت به کارهای صحرایی در این خصوص تعریف شده است. از طرفی بررسی عددی این موضوع به دلیل همان پیچیدگی‌های اشاره شده بسیار سخت و یا با دقت پایینی همراه است، البته تا کنون محققانی در این زمینه اقدام به استفاده از مدل سازی‌های عددی نمودند. یکی از نرم افزارهایی که امروزه برای مدل سازی و شبیه سازی مسائل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۲) نظر مهندسان و کاربران را به خود جلب کرده است، نرم افزار متن باز رایگان Open FOAM است. نتیجه‌ی تحقیقات مهندسان حاکی از آن است که سرعت و دقت Open FOAM در بسیاری از مسائل مهندسی، عملکرد بهتری نسبت به سایر نرم افزارهای تجاری

موجود به عنوان معیاری برای ارزیابی مدل مورد استفاده، مقایسه نمود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تعریف مسائل در Open FOAM

نرم افزار Open FOAM با استفاده از روش حل عددی حجم محدود (FVM^۴) به شبکه محاسباتی^۵ ساختاریافته و غیرساختاریافته سه بعدی، سلول‌های چند وجهی نسبت داده شده و به حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی می‌پردازد. نرم افزار Open FOAM به سه بخش تقسیم می‌شود:

- پیش پردازش: شامل انتخاب حلگر مناسب، طراحی هندسه، اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه، ثابت‌های فیزیکی، گام زمانی مناسب، میزان دقت محاسبات، نحوه کنترل و بررسی فرآیند حل در حین اجرای نرم افزار و مشخص کردن نوع خروجی و نحوه ذخیره آن
- پردازش: اجرای حلگر انتخابی
- پس پردازش: نمایش خروجی‌ها و دامنه‌ی حل، رسم نمودارها، تهیه انیمیشن و تصویر

که در مدل سازی انجام شده به هریک از این سه بخش به طور مجزا باید پرداخته شود. در ابتدا برای پیش پردازش مدل لازم است تا با امکانات این نرم افزار و معادلات مورد نیاز جهت پدیده مورد بررسی و انتخاب روش حل مناسب آشنا شد. سپس با انتخاب شرایط مرزی متناسب با پدیده و همین طور نوع حلگر مدل را برای اجرا آماده نمود.

۲-۲- معادلات حاکم

به منظور مدل سازی در نرم افزار Open FOAM از حلگر دو فازي interFoam استفاده شده است، که بر اساس معادلات پیوستگی و مومنت عمل می‌کند. در حالت کلی معادله پیوستگی یا بقاء جرم را به صورت رابطه (۱) می‌توان نوشت:

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

که در آن t زمان، ρ چگالی، u میدان سرعت سه بعدی است.

بکاهد در نتیجه نقش خوبی در حفاظت طبیعی از ساحل ایفا نماید. نتایج مدل عددی بررسی شده توسط کیو و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که پوشش گیاهی سفت و سخت می‌تواند به طور موثر حداکثر دامنه موج متمرکز را تا ۳۱ درصد و کل انرژی موج را تا ۴۵ درصد کاهش دهد. آن‌ها در انتها بیان داشتند که پوشش گیاهی ساحلی می‌تواند به طور موثر ساحل را در مقابل امواج شدید محافظت نماید [۲۵]. قاسمی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی اثر موج شکن‌های شمعی بر امواج ساحلی و تأثیر زبری ناشی از آن‌ها بر الگوی جریان و امواج با مدل سازی عددی در نرم افزار OpenFOAM با روش مدل سازی RANS^۳ پرداختند. مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود نشان دهنده دقت مدل انتخابی در مدل سازی پدیده مورد نظر می‌باشد [۲۶]. آن‌ها همچنین در تکمیل کار خود به استفاده از مدل LES برای مدل سازی شرایط مشابه با تحقیق قبل پرداختند، بررسی های انجام شده بیانگر تطابق قابل قبول نتایج دو مدل عددی و آزمایشگاهی و عملکرد مناسب نرم افزار Open FOAM در مدل سازی است [۲۷].

یکی از مزیت‌های نرم افزار OpenFOAM وجود کتابخانه‌های از پیش تعریف شده در این نرم افزار است که برای پدیده های شناخته شده و مرسوم در زمینه تخصصی مورد نظر به صورت کدهای آماده وجود دارد. یکی از مسایلی که به صورت از پیش تعریف شده در این مدل وجود دارد مسئله شکست سد است که محققان بسیاری برای بررسی دینامیک موج در ساحل از آن استفاده نمودند. از این مسئله برای بررسی برهم کنش بین موج با سازه‌ها و موانع ساحلی از جمله پوشش گیاهی، مشابه تحقیقات ژائو و همکاران [۲۸] استفاده می‌شود [۲۹].

از بررسی پیشینه موضوع، اهمیت مدل سازی موج در ساحل و لزوم حفاظت سواحل کاملاً آشکار است. لذا در این پژوهش به تاثیر استفاده همزمان از طرح‌های سازه‌ای در ترکیب با طرح‌های مبتنی بر طبیعت و مدل سازی عددی این طرح ترکیبی پرداخته می‌شود. در اینجا به طور خاص مد نظر است که با استفاده از نرم افزار Open FOAM میزان نیروهای وارد بر سازه دیوار و جنگل ساحلی، ناشی از امواج را مدل سازی نمود و تاثیر سازه دیوار و جنگل ساحلی را در استهلاک امواج محاسبه نمود و همچنین نتایج را با نتایج آزمایشگاهی

$$\frac{\partial(u)}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) - \nabla \cdot (v\nabla_u) - \nabla_u \cdot \nabla_v = -\nabla_p + f \quad (8)$$

$$\frac{\partial(u)}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) = -\frac{1}{\rho} + \nabla_p \cdot \nabla \cdot (v\nabla_u) + g + \frac{F_s}{\rho} \quad (9)$$

در رابطه مومنوم، F_s نشان دهنده نیروی کشش سطحی است [۳۰].

۲-۴- مدل سازی آشفتگی

جریان های آشفته جریان هایی ناپایدار با حرکات غیر تکرار شونده اند و دارای گردابه های متغیر با مکان و زمان هستند. حل این نوع جریانات موضوعی چالش برانگیز است، و از آن جا که بیشترین مسائل مربوط به کاربردهای سیال دارای جریان آشفته است، همواره تلاش های پیوسته ای در جهت حل این نوع جریانات انجام می شود. از جمله روش هایی که امروزه مطرح هستند عبارت اند از:

- معادلات ناویرستوکس متوسط گیری شده رینولدز (RANS)
- روش شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES^7)
- شبیه سازی عددی مستقیم (DNS^8)

در شبیه سازی عددی مستقیم، جریان با همه گردابه های کوچک و بزرگ موجود در آن به صورت مستقیم حل می شود که به همین دلیل دقت بسیار بالایی دارد و از طرفی حجم محاسبات بسیار بالایی خواهد داشت و در نتیجه زمان و هزینه محاسباتی زیادی را نیز بدنال خواهد داشت. در روش شبیه سازی LES ، که به نوعی حد وسط روش DNS و $RANS$ است، از معادلات متوسط گیری مکانی استفاده می شود و گردابه های بزرگ را به صورت مستقیم حل می کند اما گردابه های کوچک مدل سازی می شود. این روش نیز غالباً دقیق تر از روش $RANS$ است اما به دلیل هزینه محاسباتی زیاد، کمتر مورد استفاده قرار می گیرد. در مدل های آشفتگی

معادله مومنوم به صورت رابطه (۱) نوشته می شود:

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot T \quad (2)$$

که در آن g شتاب ثقل، T تانسور تنش (برشی، محوری، کشش سطحی) است.

۲-۳- روش کسر حجم سیال

این مدل یک تکنیک در جهت شبیه سازی دقیق سطح آزاد با استفاده از یک شبکه محاسباتی اولیه ثابت به شمار می رود که برای دو یا چند سیال غیر قابل اختلاط با یکدیگر طراحی شده است. (VOF^6) یا روش کسر حجم سیال، روشی است که در آن مرز مشترک دو سیال به صورت ضمنی ردیابی می شود. روابط زیر در این جهت آورده شده است.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(u)}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) = -\nabla_p + \nabla \cdot T + f \quad (4)$$

در رابطه پیوستگی، T تانسور فشار انحرافی است که می تواند برای جریان تراکم ناپذیر به صورت رابطه (۵) تعریف گردد:

$$T = 2\nu s \quad (5)$$

در این رابطه S میانگین نرخ تانسور کرنش است که به صورت رابطه (۶) تعریف می شود.

$$S = 0.5(\nabla_u(\nabla_u)^T) \quad (6)$$

قسمت تنش در معادله (۶) برای سیال نیوتنی و تراکم ناپذیر را می توان با کمک عملکرد دیورژانس (حاصل ضرب عملگر مشتق با یک بردار) در محاسبات برداری به صورت رابطه (۷) تعریف کرد:

$$\nabla \cdot T = \nabla \cdot (v\nabla_u) + \nabla_u \cdot \nabla_v \quad (7)$$

در این رابطه بالا f نیروی خارجی است که شامل نیروی گرانش نیز هست، همچنین u بردار سرعت، v ویسکوزیته و p فشار است. معادله انتقال جرم (۲) را می توان با استفاده از رابطه (۷) به فرمت رابطه (۸) نوشت:

استفاده بر روی یک صفحه یک متری متحرک نصب شده بود، بدین ترتیب که ابتدا دو ردیف درخت و سپس سازه و بعد از آن مجدد یک ردیف درخت دیگر قرار داشت. این بازه متحرک با مکانیسمی مبتنی بر ممنتام امکان اندازه‌گیری نیروی امواج به صورت مستقیم را فراهم آورده بود.



شکل ۱- نمای کلی از محل قرارگیری پوشش گیاهی جنگلی نسبت به سازه دیوار ساحلی - جهت جریان در شکل با فلش نمایش داده شده است.

۲-۶- تعریف مدل آزمایشگاهی در محیط نرم افزار

در پژوهش حاضر جهت مدل سازی عددی، رسم هندسه به صورت یک کانال سه بعدی انجام شد. در ابتدا با ابزار بلاک‌مش^{۱۰} در نرم افزار Open FOAM، یک مکعب مستطیل ترسیم و به تعدادی بلوک تقسیم شد (شکل ۲) و شبکه محاسباتی ابتدایی آن به صورت بلوک‌های شش‌وجهی ایجاد گردید. سپس اجسام مورد نیاز اعم از ساحل، سازه ساحلی و پوشش جنگلی ایجاد شده در نرم افزار SALOME با فرمت STL در Open FOAM فراخوانی شد. مرحله بعدی کوپل^{۱۱} هندسه کانال و اجسام است که از ابزار اسنپی‌هگزمش^{۱۲} برای تولید شبکه محاسباتی سه بعدی و ریز کردن شبکه محاسباتی در نواحی سازه دیوار ساحلی و پوشش گیاهی جنگلی استفاده شد. شبیه سازی‌ها در دو حالت، حالت اول سازه دیوار ساحلی به همراه پوشش گیاهی جنگلی (ST) و حالت دوم بدون سازه دیوار ساحلی و پوشش گیاهی جنگلی (0)، مورد بررسی قرار گرفت. در کل ۱۰ حالت برای شبیه سازی در نرم افزار تعریف شد. در تمامی این حالات ارتفاع سازه ثابت و برابر ۷/۵ سانتی متر و با پنج ارتفاع موج پای ساحل معادل با ۶، ۷/۵، ۹، ۱۰/۵ و ۱۲ سانتی متر

RANS، معادلات در جهت برآورد مقدار متوسط زمانی و نوسانات متلاطم جریان حل می‌شوند و میدان لحظه‌ای به صورت جمع مولفه‌های متوسط و نوسانی تعریف می‌شود، بنابراین زمان انجام محاسبات کمتری نیاز دارد. در پژوهش حاضر از روش مدل سازی RANS که از دقت محاسباتی قابل قبولی برخوردار است، استفاده شده است. مدل RANS دارای مدل‌های متفاوتی است که یکی از آن‌ها $k - \omega, SST$ است که برای بهبود مدل ویلکاکس توسعه داده شد [۳۱]. در واقع این مدل RANS با استفاده از ضرب دو مدل $k - \omega$ و $k - \varepsilon$ در یک تابع ترکیب‌کننده و سپس جمع آن‌ها با یکدیگر به دست آمده است. در این روابط k برای انرژی جنبشی آشفتگی، ε برای نرخ استهلاك آشفتگی و ω برای نرخ استهلاك مخصوص به کار می‌رود. 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 [۳۲]، [۳۳].

۲-۵- مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش برای مدل سازی عددی تاثیر سازه دیوار ساحلی و جنگل ساحلی بر کاهش اثرات مخرب امواج در سواحل و عملکرد نرم افزار Open FOAM در مدل کردن آن از نمونه آزمایشگاهی رضایپوران استفاده شد [۳۴].

مشخصات مدل آزمایشگاهی به شرح زیر است:

مدل آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد در فلوم دارای مقطع مستطیلی به عرض ۰/۶ متر، ارتفاع دیواره ۰/۶ متر و طول ۲۰ متر پیاده سازی و آزمایش شد مطابق شکل (۱). جنس دیواره‌های فلوم از پلکسی گلاس^۹ و کف فلوم به صورت فلز صیقل و صاف می‌باشد. ۲ متر از کانال به منظور ایجاد مخزنی که بتواند ارتفاع مورد نیاز برای ایجاد موج را تامین نماید، در نظر گرفته شده بود. با کمک دو دریچه این بخش از سایر قسمت‌های کانال جدا گردید. یکی از این دریچه‌ها ثابت و دیگری به صورت متحرک با سرعت باز شدگی بالا (ناگهانی) جهت ایجاد موج منفرد مبتنی بر مکانیسم شکست سد، تعبیه شده بود. سازه و پوشش جنگلی مورد

با سازه و جنگل است. بعد از بازه‌ی ساحلی مورد بررسی هم به صورت متغیر حداقل ۲ متر فاصله برای انتقال موج عبوری از ساحل در مدل عددی نظر گرفته شد. جدول (۱) و (۲) پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش را نشان می‌دهند. قابل تاکید است که ارتفاع موج‌های انتخابی در این بررسی بر اساس مقیاس استفاده شده در کار آزمایشگاهی تعیین شده‌اند، به گونه‌ای که این ارتفاع‌ها بر اساس مقیاس و براساس هدف این پژوهش، در محدوده امواج بلند ساحلی قرار گیرند (۳-۱۵متر).

در نظر گرفته شد و خصوصیات پوشش با ۱۲ عدد درخت (در ۳ ردیف)، ارتفاع کلی حدود ۰/۲۵ متر و قطر کمتر از ۲۰ میلی‌متر و عرض تاج پوشش ۱۰ سانتی‌متر، در نظر گرفته شد.

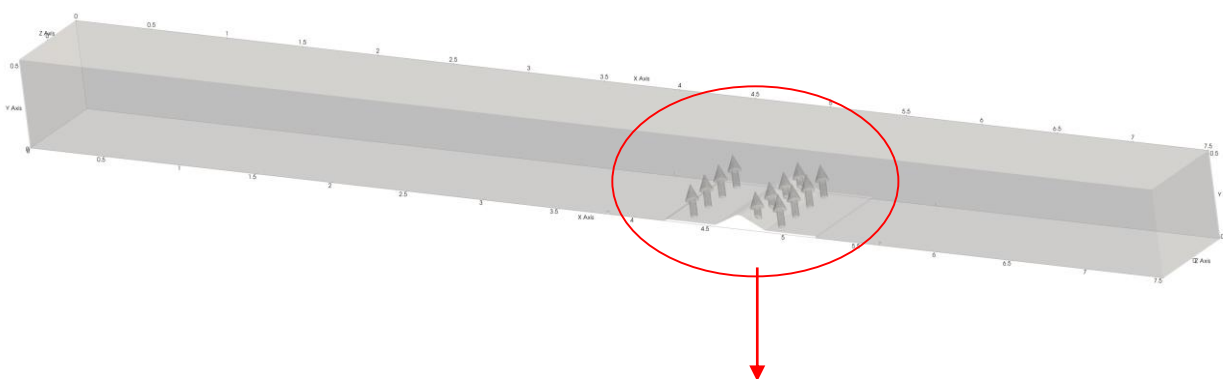
با توجه به عرض فلوم که ۶۰ سانتی‌متر است عرض فضای مدل‌سازی در راستای محور Z از ۰/۳- متر تا ۰/۳+ متر در نظر گرفته شده است. از نقطه‌ی $x=0$ تا $x=2$ متر طول مخزن تامین هد موج، از نقطه $x=2$ تا $x=4.2$ متر طول ساحل قبل از برخورد موج تولید شده به ابتدای ساحل یک متری مورد نظر، از $x=4.2$ تا $x=5.2$ متر هم طول ساحل حفاظت شده

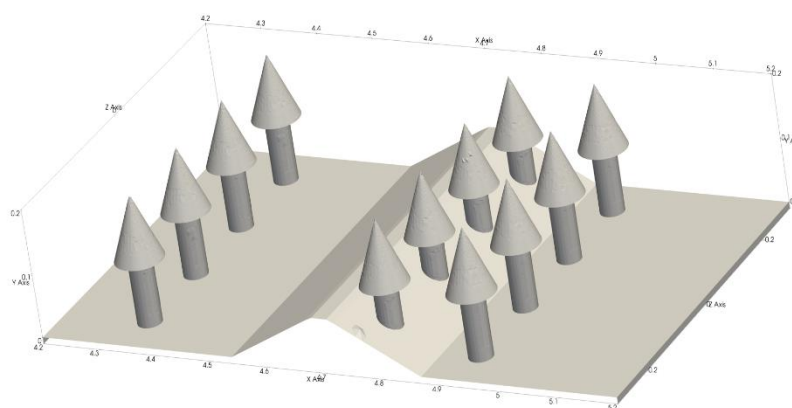
جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای سازه‌ای در این پژوهش

محدوده تغییرات	نماد پارامتر	پارامتر
$Z=1$	$S = 1/z$	شیب جانبی سازه
۰/۵	$(m)x$	موقعیت سازه در بازه یک متری ساحل
۷/۵	$H_s (cm)$	ارتفاع سازه

جدول ۲- محدوده تغییرات پارامترهای پوشش گیاهی در این پژوهش

مقدار پارامتر در این پژوهش	نماد پارامتر	پارامتر متغیر
۰/۲۵۵، ۰/۳۲۲، ۰/۳۹۵، ۰/۴۲۷ و ۰/۴۷۰	H	ارتفاع اولیه موج
در طول آزمایش ثابت و افقی	S%	شیب ساحل
۱۲ عدد درخت	n	تعداد پوشش گیاهی
۲۵ سانتی متر	h_v	ارتفاع پوشش
15×15	$W \times B$	فواصل بین پوشش در طول و در عرض
۲ سانتی‌متر	D	قطر پوشش گیاهی
۴ عدد در سمت چپ و ۸ عدد در سمت راست سازه	C	چیدمان پوشش
۱	-	دیوار ساحلی





شکل ۲- نمای داخلی فلوام مدل سازی شده در محیط نرم افزار OpenFOAM از روبه رو

۲-۷- آنالیز حساسیت به اندازه شبکه

کیفیت شبکه محاسباتی بر دقت و صحت نتایج موثر است. در حل مسائل هیدرودینامیک سیالات محاسباتی ساین انتخابی برای شبکه محاسباتی باید به گونه ای باشد که ریزتر کردن شبکه محاسباتی تاثیری بر روی نتایج نداشته باشد. برای بررسی اندازه شبکه محاسباتی استفاده شده در این پژوهش ابتدا یک مدل مشخص به ازای ۴ ساین مختلف شبکه محاسباتی تنظیم و اجرا شد (مطابق جدول ۳). نتایج حاصله از هر شبیه سازی^{۱۳} به ازای پارامتر نیروی موج با هم و با نتایج واقعی مقایسه شد. در نهایت شبکه محاسباتی که بیشترین تطابق با واقعیت را داشته و از طرفی ریزتر شدن آن تاثیر چندانی بر دقت محاسبات نداشته، به عنوان ساین شبکه محاسباتی در کلیه شبیه سازی ها انتخاب گردید. همان طور که در جدول (۳) قابل ملاحظه است از مدل یک تا مدل ۳ به ازای تغییر ساین شبکه محاسباتی، تغییرات پارامتر نیرو قابل ملاحظه بوده ولی از مدل ۳ به مدل ۴ می توان گفت عملاً تغییر ساین شبکه تاثیر چندانی بر مقدار پارامتر نیرو نداشته و روند تغییرات به یک همگرایی انجامیده و از طرفی با مقدار واقعی (معادل ۶۴/۷ نیوتن) اختلاف ناچیزی دارد، لذا ساین شبکه مربوط به مدل ۳ به عنوان ساین مدل نهایی انتخاب گردید.

جدول (۳): آنالیز حساسیت به اندازه شبکه براساس نیروی موج

مدل	اندازه شبکه محاسباتی (متر)	نیروی موج وارده به سازه (نیوتن)
۱	۰/۰۲۵	۴۱/۲
۲	۰/۰۲۰	۴۸/۶
۳	۰/۰۱۲	۶۳/۲۳
۴	۰/۰۱۰	۶۳/۷۱

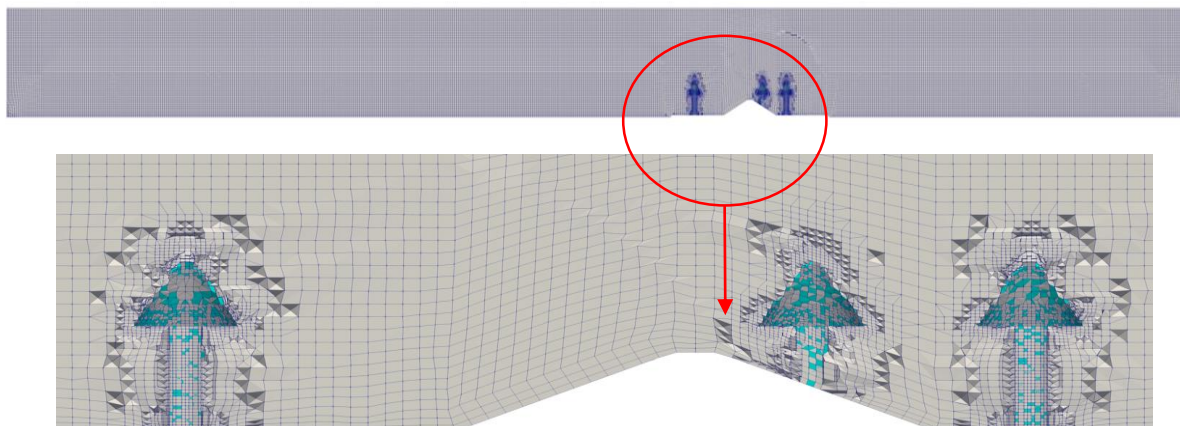
در جریان های آشفته، یکی از راه های بررسی کیفیت ساین شبکه محاسباتی انتخابی، عدد بدون بعد y^+ است. y^+ را می توان به صورت رابطه (۱۰) تعریف کرد، که در واقع بیانی از کمیت ها در نزدیک دیواره را نشان می دهد و مقدار آن برای هر شبیه سازی محاسبه می شود.

$$y^+ = \frac{y \cdot u^*}{\nu} \quad (10)$$

در مسئله حاضر y^+ برای ساحل و موانع در Open FOAM محاسبه گردید که مقدار متوسط آن ۱۳۰ به دست آمد. بر اساس مقدار مناسب توصیه شده توسط پاپ [۳۵]، این عدد در محدوده مناسب قرار دارد.

قابل ذکر است که برای اجرای مدل های حاضر، از پردازشگر AMD Rezen 9300x با ۱۲ هسته حقیقی استفاده شد و زمان اجرای هر مدل به طور متوسط ۱۸ ساعت به طول انجامید.

شکل (۴) شبکه محاسباتی انتخابی بر روی مدل مورد بررسی را نشان داده است.



شکل ۳- شبکه محاسباتی اطراف موانع

آزمایشگاه که منطبق بر پدیده شکست سد می باشد در مدل عددی نیز برای مدل سازی این نیمرخ موج از پدیده شکست سد که یکی از کتابخانه های موجود در نرم افزار می باشد، استفاده گردید [۲۲]، [۳۳].

۲-۹- شرایط اولیه و مرزی

شرایط مرزی باید منطبق بر فیزیک مسئله و روش حل باشد و نقش مهمی در شبیه سازی دارد. در اینجا برای دستیابی به مدلی مطابق با واقعیت، آنالیز حساسیت به شرایط مرزی انجام شد به این صورت که تمام شرایط قابل استفاده برای مؤلفه های مسئله در مدل وارد شد و آن هایی که منجر به نتایج غیرفیزیکی و واگرایی مسئله می شد کنار گذاشته شد و در نهایت شرایط اولیه و مرزی مناسب به شرح زیر در جدول (۴) به کار گرفته شد.

در اینجا قابل تاکید است که به دلیل استفاده از پدیده شکست سد در نرم افزار برای شبیه سازی موج مورد بررسی، نیازی به تعریف موج و شرایط مرزی مختص آن نمی باشد. همانطور که در مقدمه اشاره گردید این روش برای موج های با نیمرخ موج منفرد در مطالعات گذشته نیز استفاده شده است.

۲-۸- مدل سازی موج

با افزایش ارتفاع موج و افزایش زبری بستر به ترتیب افزایش سرعت ذرات موج و کاهش سرعت انتشار موج اتفاق می افتد و در نهایت در یک زمان با برابر شدن این دو سرعت و پس از آن با پیشی گرفتن سرعت ذرات در قله موج از سرعت ذرات پای موج، باعث فروپاشی و یا اصطلاحاً شکست موج می شود. در این پژوهش فرض بر آن است که با پیشروی موج در منطقه آب های کم عمق، سرعت ذرات موج افزایش و سرعت انتشار موج کاهش می یابد. زمانی که سرعت ذرات موج با سرعت انشار موج برابر شود موج نامتقارن شده و تیزی آن افزایش می یابد و به حالت حدی ناپایدار رسیده و شکست موج اتفاق خواهد افتاد [۳۶]. موج شکسته شده با ایجاد تلاطم انرژی خود را از دست خواهد داد.

امواج مورد بررسی در این پژوهش از نوع امواج بلند در محدوده آب های کم عمق ساحلی می باشد که از نظریه موج منفرد^{۱۴} در مورد شبیه سازی این امواج استفاده می شود. آخرین نیمرخ قبل از شکست موج، موج منفرد می باشد [۳۲]. در این پژوهش باتوجه به نوع موج مورد بررسی که از نوع موج بلند و ناگهانی است و همچنین براساس شیوه ایجاد آن در

جدول ۴- شرایط مرزی در مدلسازی عددی

مرز	U	P	K	ω	ε	alpha.water
-----	---	---	---	----------	---------------	-------------

دیوار سمت چپ	عدم لغزش	فشار شار ثابت	تابع دیواره کا کیو آر	تابع دیواره امگا	تابع دیواره اپسیلون	مقدار یکنواخت صفر
دیوار سمت راست	عدم لغزش	فشار شار ثابت	تابع دیواره کا کیو آر	تابع دیواره امگا	تابع دیواره اپسیلون	مقدار یکنواخت صفر
بستر	عدم لغزش	فشار شار ثابت	تابع دیواره کا کیو آر	تابع دیواره امگا	تابع دیواره اپسیلون	مقدار یکنواخت صفر
سطح آب (اتمسفیر)	فشار ورودی خروجی سرعت	فشار کل	ورودی خروجی	تابع دیواره امگا	ورودی خروجی	ورودی خروجی
درخت و پلیت	عدم لغزش	فشار شار ثابت	تابع دیواره کا کیو آر	تابع دیواره امگا	تابع دیواره اپسیلون	مقدار یکنواخت صفر
دایک	عدم لغزش	فشار شار ثابت	تابع دیواره کا کیو آر	تابع دیواره امگا	تابع دیواره اپسیلون	مقدار یکنواخت صفر
جلو و عقب	عدم لغزش	فشار شار ثابت	تابع دیواره کا کیو آر	تابع دیواره امگا	تابع دیواره اپسیلون	مقدار یکنواخت صفر

$\omega^+, \varepsilon^+, R^+, q^+, k^+$ که برای جریان آرام تا آشفته مقدار مشخصی دارند استفاده شده و معادله مربوط به آن را تعیین می‌کند.

- شرط مرزی گرادیان صفر^{۲۳}: گرادیان عمود بر میدان در مرز، صفر در نظر گرفته می‌شود.

۱۰-۲ محاسبه نیروی موج

برای بررسی نیروی اعمال شده به هر مانع طبیعی می‌توان از تئوری موج و یا معادلات اساسی دینامیک سیالات استفاده نمود. در این پژوهش برای این منظور از روش معادلات دینامیک سیالات موجود در نرم‌افزار Open FOAM استفاده شده است.

۲-۱۱ آنالیز آماری نتایج

برای مقایسه و ارزیابی میزان نیروی وارد به سازه دیوار ساحلی و پوشش جنگلی و ارتفاع موج ثبت شده در نرم‌افزار Open FOAM با مقادیر آزمایشگاهی، از معیارهای آماری، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE²⁴)، نرمال سازی جذر میانگین

- شرط مرزی فشار ورودی خروجی سرعت^{۱۵}: با مشخص بودن فشار در مرز، مقدار سرعت از جریان در راستای ورودی-خروجی به دست می‌آید.
- شرط مرزی عدم لغزش^{۱۶}: مقدار پارامتر در مرز به‌طور یکنواخت صفر می‌باشد.
- شرط مرزی فشار شار ثابت^{۱۷}: با شرط گرادیان صفر یکسان است و برای میدان اسکالر فشار به کار برده می‌شود، اثر فشار را اندازه و سپس و سرعت را بر اساس آن تنظیم می‌کند.
- شرط مرزی فشار کل^{۱۸}: معادلات سرعت طوری تنظیم می‌شوند که فشار کل با مقدار وارد شده در آن برابر باشد.
- شرط مرزی ورودی خروجی^{۱۹}: جریان به‌صورت یک‌طرفه می‌باشد و از بیرون وارد میدان نمی‌شود.
- شرط مرزی تابع دیواره کا کیو آر^{۲۰}، تابع دیواره اپسیلون^{۲۱} و تابع دیواره امگا^{۲۲}: برای محاسبه‌ی هریک از پارامترهای $k, q, R, \varepsilon, \omega$ از پارامترهای

نیروی وارد شده به ساحل در حالت با مانع (سازه دیوار ساحلی و پوشش گیاهی جنگلی) و حالت بدون مانع با نرم افزار Open FOAM محاسبه شده است. برای بررسی تاثیر موانع بر کاهش نیروی امواج از پارامتر بدون بعد نیرو (F_t) که به صورت رابطه (۱۴) است، استفاده گردید.

$$F_t = \frac{F_s - F}{F} \quad (14)$$

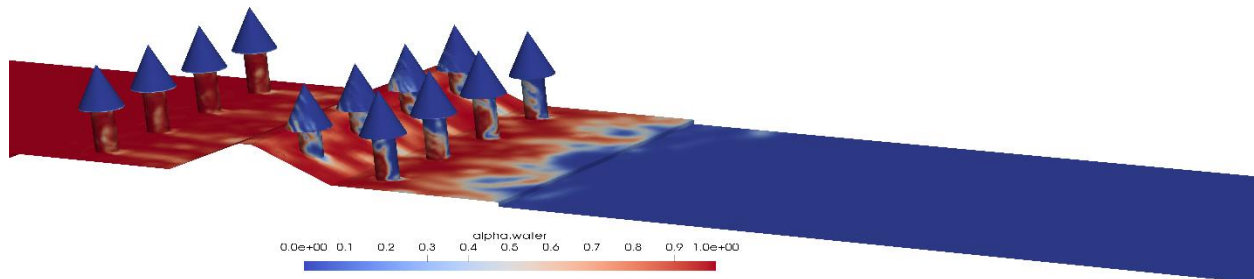
در این رابطه (F_s) و F به ترتیب نیرو در حالت با مانع و نیرو در حالت بدون مانع است.

۲-۱۲-۲ میرایی موج

برای بررسی میزان تغییرات ارتفاع موج از پارامتر میرایی موج که طبق رابطه (۱۵) تعریف می شود استفاده گردید. در این نسبت، اختلاف ارتفاع موج در ابتدا و انتهای ساحل تقسیم بر ارتفاع موج در ابتدای ساحل مد نظر است.

$$\left(\frac{H - H_s}{H} \right) \times 10 \quad (15)$$

در این رابطه H و H_s به ترتیب ارتفاع اولیه موج و ارتفاع ثانویه موج پس از عبور از محدوده مورد بررسی می باشد. شکل (۴) میرایی موج را در شرایط زمانی $t=1.7s$ و در ارتفاع اولیه موج 0.255 متر نشان می دهد.



شکل ۴- میرایی موج یا تغییرات ارتفاع موج قبل و بعد از درختان و سازه در زمان $t=1.7s$ و در ارتفاع موج 0.255

میرایی موج، به تاثیر گذاری این موانع بر افزایش میرایی پرداخته شده است.

۲-۱۳- پیشروی موج در ساحل

مربعات خطا ($NRMSE^{25}$) و ضریب تبیین (R^2) به صورت معادلات زیر استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (11)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{O_{max} - O_{min}} \quad (12)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_m)(P_i - \bar{P}_m)}{(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_m)^2)^{0.5} (\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_m)^2)^{0.5}} \quad (13)$$

در این رابطه P_i داده های آزمایشگاهی، O_i داده های عددی، N تعداد داده ها، \bar{O}_m میانگین داده های عددی و \bar{P}_m مقدار میانگین داده های آزمایشگاهی، O_{max} بیشترین مقدار داده های عددی و O_{min} کمترین مقدار داده های عددی است. زمانی که مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال به صفر برسد نشان دهنده بالا بودن دقت پیش بینی است. ضریب تبیین مقداری بین -1 و $+1$ دارد. مقدار $+1$ نشان دهنده محاسبات بدون خطا است.

۲-۱۲-۲ کارایی موانع از منظر نیرو و ارتفاع موج

۲-۱۲-۲ نیروی موج

باتوجه به شکل (۴)، تغییرات ارتفاع موج قبل از موانع سازه دیوار ساحلی و پوشش جنگلی بیشترین مقدار خود و بعد از موانع کمترین ارتفاع موج را دارد که در بخش بررسی نتایج

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

بعد از بررسی مقادیر نیروی محاسبه شده در نرم افزار Open FOAM به مقایسه آن‌ها با مقادیر نیروهای آزمایشگاهی پرداخته شده است تا از این طریق صحت مدل سازی انجام شده بررسی گردد. در جدول (۶)، بررسی معیارهای گفته شده برای نیروها انجام شده که بیانگر تطابق قابل قبول مدل عددی با مدل آزمایشگاهی است، نشان داده شده است.

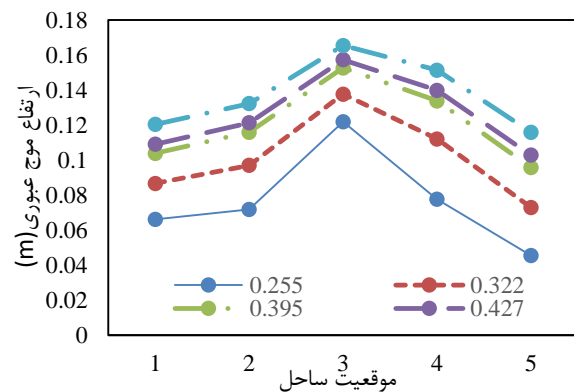
جذر میانگین مربعات خطای نرمال در مدل کوچک تر از یک و مساوی با ۰/۴۲ است که مقداری مناسب و بیانگر دقت نسبتاً بالای مدل عددی است. ضریب تبیین بالاتر از ۰/۹۸ است که بیانگر میزان خطای بسیار کمی است. اختلاف نیرو بین مدل عددی و آزمایشگاهی برای ۵ ارتفاع موج مورد بررسی به طور متوسط معادل ۱۹ درصد است.

از مقایسه نتایج بدست آمده از مدل عددی مشخص گردید که با افزایش تقریباً ۱۸ درصدی در ارتفاع اولیه موج رسیده به ساحل میزان نیروی جذب شده از امواج رشد ۳۰ درصدی داشته و طبعاً این رشد نشان از کارایی بیشتر طرح حفاظتی مورد استفاده در ارتفاع موج های بزرگتر مورد بررسی در این پژوهش را دارد. اما این نکته را نیز باید تاکید نمود که شدت این رشد روند متفاوتی دارد و با بزرگتر شدن ارتفاع امواج شدت رشد در نرخ جذب نیرو کاهش یافته است.

در شکل (۵)، وضعیت موج عبوری از ساحل در شرایط بدون مانع در نقاط مختلف ساحل قابل ملاحظه است. این وضعیت به عنوان شرایط شاهد بر عملکرد سازه دیوار ساحلی و پوشش جنگلی در این پژوهش در نظر گرفته شد. جدول (۵) موقعیت های مورد بررسی در ساحل (محدوده یک متری مدل شده) را نشان می دهد. قابل ذکر است صفر مختصات افقی نقطه شروع مخزن تامین هد موج می باشد و موقعیت های ذکر شده در ادامه، موقعیت ابتدا و انتها و چند نقطه میانی از ساحل حفاظت شده است.

جدول ۵- موقعیت ساحل (متر)

h1	h2	h3	h4	h5
4.325	4.445	4.595	4.885	5.005



شکل ۵- پیشروی موج در ساحل قبل از نصب موانع

جدول ۶- مقایسه نیروهای عددی و آزمایشگاهی

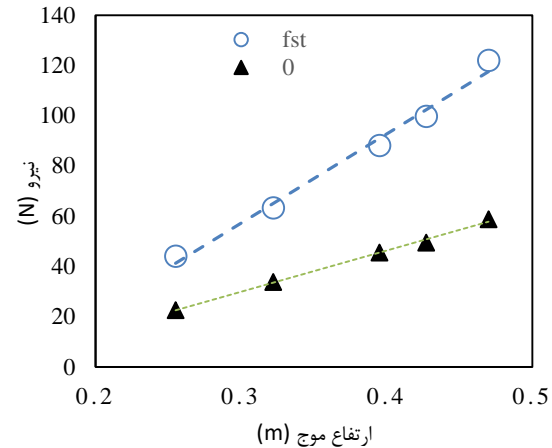
R ²	NRMSE	RMSE	Laboratory force (N)	Numerical force (N)	wave height (m)	Type of protection
0.98	0.42	32.89	64.71	44.01	0.255	Structure and forest (ST)
			64.76	63.23	0.322	
			105.12	88.14	0.395	
			130.21	99.75	0.427	
			154.55	122.03	0.47	

ارتفاع موج ورودی در شکل (۷) برای حالت سازه دیوار ساحلی و پوشش جنگلی (ST) و حالت بدون مانع (0) ارائه شده است.

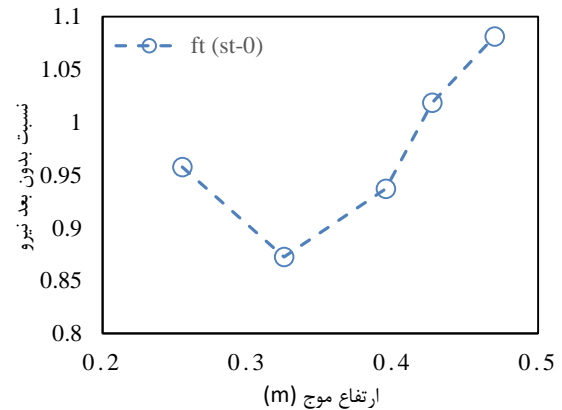
۳-۲- بررسی نیروی امواج

باتوجه به شکل (۶) می توان گفت که حالتی که ساحل دارای سازه دیوار ساحلی و پوشش جنگلی است نیروی موج جذب شده نسبت به حالت بدون مانع، افزایش چشمگیری داشته است، که نشانگر تاثیر قابل قبول موانع بر کاهش نیروی موج بعد از آن‌ها است. نتایج در قالب نمودار تغییرات F_t برحسب

نتیجه کارایی طرح حفاظتی ترکیبی، نیز بیشتر می‌شود. به صورت میانگین می‌توان گفت در بین حالات مورد بررسی در این پژوهش مقدار نیروی مستهلک شده در شرایط حضور موانع معادل ۱۹۷ درصد حالت بدون مانع است. وقتی موج از ساحل بدون مانع عبور می‌کند عملاً چون عامل مقاومتی به جز بستر ساحل در برابر آن وجود ندارد تنها بخش کمی از نیرو صرف غلبه بر این مقاومت می‌شود اما در ساحل دارای موانع موج برای عبور از این بازه نیاز به صرف نیروی بیشتری دارد. بنابراین با زیاد شدن موانع در واقع نیروی مقاوم در برابر نیروی محرک موج بیشتر شده و موج برای عبور ناگزیر از صرف بیشتر نیروی خود می‌شود و در نهایت موج عبوری از این بازه، موجی با نیروی کمتر و ضعیف‌تر می‌باشد. بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی انجام شده در این تحقیق نیز به نوعی تایید کننده این روند می‌باشد. از طرفی با افزایش ارتفاع موج تا حد معینی که در اینجا معادل ۰/۴۲۷ متر می‌باشد میزان عملکرد موانع و تاثیرگذاری آن‌ها نیز بیشتر شده و از این ارتفاع به بعد تاثیر گذاری کمتر شده است. این میزان تاثیرگذاری تاییدی بر انجام طرح‌های حفاظت از سواحل می‌باشد و می‌تواند به توسعه پایدار سواحل کمک بسیاری بنماید. البته برای پیاده‌سازی این‌گونه طرح‌ها نیاز به بررسی‌های بیشتر و حتی اجرای طرح‌هایی به صورت پایلوت می‌باشد. به هر حال مدل عددی با دقت قابل قبول فرصتی را فراهم نموده تا بتوان کلیه پارامترهای موثر را ابتدا بررسی نمود، سپس نسبت بین این پارامترها و شدت اثرگذاری آن‌ها را تعیین نمود و بعد در پیاده سازی طرح پایلوت با صرف وقت و هزینه کمتر، بهتر بتوان به طرح مناسب برای حفاظت از سواحل در مقابل امواج دست یافت.



شکل ۶- نیروی جذب شده توسط ساحل و موانع

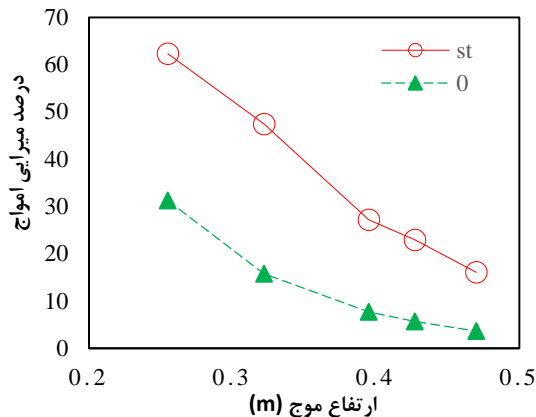


شکل ۷- نسبت بدون بعد نیرو برای ارتفاع موج‌های متفاوت

باتوجه به جدول (۷) در حالت با مانع، نیروی جذب شده توسط ساحل و موانع نسبت به ساحل بدون مانع افزایش قابل قبولی داشته است. نتایج نشان دهنده تاثیر موانع در کاهش نیروی امواج، و همچنین نشان دهنده این است که هرچه ارتفاع موج بیشتر شود درصد نیروی مستهلک شده و در

جدول ۷- مقادیر نیروی مستهلک شده نسبت به حالت بدون مانع

نوع حفاظت	ارتفاع موج (m)	نیرو (N)	نیروی مستهلک شده نسبت به بدون مانع (%)
Structure and forest (ST)	0.255	44.01	195.74
	0.322	63.23	187.24
	0.395	88.14	193.70
	0.427	99.75	201.83
	0.47	122.03	208.05



شکل ۸- درصد میرایی موج در حالت‌های مختلف

۳-۳ بررسی میرایی موج

باتوجه به شکل (۸) می‌توان اظهار نمود، حالتی که ساحل دارای سازه‌دیوار ساحلی و پوشش جنگلی (ST) است میرایی موج نسبت به حالت بدون مانع (0)، کاهش چشمگیری داشته است، که نشانگر تاثیر موانع بر کاهش ارتفاع موج بعد از آن‌ها است. تا جایی که در محدوده یک متری ساحل مورد بررسی، حضور موانع توانسته است ۳/۳۶ برابر بیشتر نسبت به حالت ساحل بدون مانع، تاثیرگذار واقع شود.

باتوجه به جدول (۸) میرایی موج در حالت سازه‌دیوار ساحلی و پوشش جنگلی ساحلی برای پنج ارتفاع موج ۰/۳۲۲، ۰/۲۵۵، ۰/۳۹۵، ۰/۴۲۷ و ۰/۴۷۰ متر به میزان متوسط ۲۳۸/۴ درصد نسبت به حالت بدون مانع افزایش یافته است.

جدول ۸ - مقادیر میزان اثر گذاری سازه و جنگل ساحلی در نرخ کاهش ارتفاع موج نسبت به حالت بدون موانع

ارتفاع موج (m)	درصد اثرگذاری موانع	نوع حفاظت
0.255	99.26	Structure and forest (ST)
0.322	200.86	
0.395	252.57	
0.427	302.91	
0.47	336.33	

استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM پرداخته شد. نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

- نتایج نیروهای استخراج شده از مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید. در این بررسی مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال ۰/۴۲ و ضریب تبیین ۰/۹۸ بدست آمد که بیانگر دقت قابل قبول نتایج استخراج شده از مدل عددی می‌باشد.
- در مورد نیروی امواج، در مقایسه بین حالت سازه‌دیوار ساحلی و پوشش جنگلی نسبت به حالت بدون موانع در ساحل، توانایی موانع در کاهش نیروی موج و استهلاک آن به‌طور متوسط در بین کلیه حالات، معادل ۱۹۷ درصد رشد نسبت به حالت بدون موانع نشان داده است.
- در بحث مقایسه نیروها به‌صورت بدون بعد، مشخص شد که با افزایش ارتفاع موج ورودی میزان جذب نیرو نیز افزایش یافته است، که این روند بیانگر

بنابراین موج عبوری از ساحل با موانع تقریباً معادل ۲/۴ برابر نسبت به حالت ساحل بدون مانع، ارتفاع کمتری خواهد داشت که این خود نشان از عملکرد مناسب موانع در تضعیف امواج از نظر ارتفاع موج عبوری دارد. هر چه ارتفاع موج عبوری بیشتر کاهش داده شود خطرات ناشی از این موج در سواحل نیز کمتر خواهد شد و به توسعه سواحل و حفاظت از آن‌ها در مقابل تخریب ناشی از امواج کمک بیشتری می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به این که حفاظت از سواحل در برابر امواج مخرب یکی از ضروریات توسعه شهری در دنیای امروزی به شمار می‌آید، پیدا کردن بهترین روش حفاظت که هم از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد و هم کمترین آسیب را به محیط طبیعی وارد کند بسیار مهم می‌باشد. در پژوهش حاضر به بررسی استفاده از سازه‌دیوار ساحلی و پوشش جنگلی با

Engineering, Tehran. Tehran University of Science and Technology. 116 pages. (in Persian).

2- 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)

3- Salehi, R., Fattahi, R., GhanbariAdivi, E., Asadi, M. (2021), *Laboratory study of a coastal protection plan against waves using the green belt*, Amphibious Science and Technology, 2(2), pp. 41-53. doi: 10.22034/jamst.2021.246245(in Persian)

4-Li, J., Meilan Qi., and David, R Fuhrman.(2019), *Numerical Modeling of Flow and Morphology Induced by a Solitary Wave on a Sloping Beach*. Applied Ocean Research 82 , 259-273. 10.1016/j.apor.2018.11.007

5-Khathiresan, K., Rajendran, N.(2005). *Coastal mangrove forests mitigated tsunami*.65: 601-606. 10.1016/j.ecss.2005.06.022

6-Bao, T.Q.(2011), *Effect of mangrove forest structures on Wave attenuation in coastal Vietnam*, Oceanologia. 53(3): 807-818. 10.5697/oc.53-3.807

7- Rezapooran, A., GhanbariAdivi, E., Fattahi, R.(2023), *Performance Comparison of Hybrid Protection Methods in Weakening coast Waves*. 10 (18) :1-12URL: <http://ijmt.ir/article-1-808-en.html>. (in Persian)

8- Rezapooran, A., GhanbariAdivi, E., Fattahi, R. (2022). *Laboratory investigation of damping and reduction of sea wave force when hitting a coastal wall structure*, Iranian journal of Marine technology, pp. -. doi: 10.22034/ijmt.2022.543746.1758(in Persian)

9- Saedi, H., Shafiifar, M., Aghtoman, M.(2011), *The effect of the initial slope of the structure on the amount of wave overflow from formable coastal walls*. Journal of Civil Engineering and Mapping, 44(5), pp.657-666, (in Persian)

10- Noujas, V.,Thomas, K,V.and Badarees, K,O .(2016),*Shoreline management plan for a mudbank dominated coast*.Elsevier.Ocean Engineering:47-65. 10.1016/j.oceaneng.2015.12.006

11- Vaghefi, M., Moghadesi, N., Mahdi-Mirza, N., Adib, A.,(2007), *The performance of concrete structures in coastal protection. The first international conference on impermeable*

کارایی بیشتر طرح حفاظتی استفاده شده در صورت وقوع ارتفاع موج‌های بزرگتر می‌باشد.

- علاوه بر نیروی موج ارتفاع موج و میزان میرایی آن نیز به‌عنوان یک فاکتور مهم در کنترل اثر تخریبی موج در ساحل نیز بررسی گردید. میرایی موج، در حالت با موانع نسبت به حالت بدون موانع، افزایش قابل توجهی معادل ۳/۳۶ برابر داشته است. از طرفی نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع موج ورودی، میرایی موج هنگام برخورد امواج به ساحل کاهش می‌یابد.

۵- کلیدواژگان

- 1- Open Source Field Operation and Manipulation
- 2- Computational Fluid Dynamics
- 3- Reynolds Average Navier- Stokes (RANS)
- 4- Finite Element Method
- 5- Computational grid/mesh
- 6- Volume Of Fluid
- 7- Large-Eddy Simulation (LES)
- 8- Direct Numerical Simulations (DNS)
- 9- Plexiglass
- 10- BlockMesh
- 11- Couple
- 12- SnappyHexMesh
- 13- simulation
- 14-Solitary Wave
- 15-pressureInletOutletVelocity
- 16- noSlip
- 17- fixedFluxPressure
- 18-totalPressure
- 19- inletOutlet
- 20-kqRWallFunction
- 21- omegaWallFunction
- 22- epsilonWallFunction
- 23-zeroGradient
- 24- Root-mean-square deviation (RMSE)
- 25- Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

۶- منابع

- 1- Hashemi-javan, S. (2007), *Numerical simulation of wave breaking phenomenon on submerged breakwater*, Master's thesis. The field of hydraulic structures. Faculty of Civil

- 20-Lee, W, K. and Tay,S,H,X. Ooi,S.K., Friees, D,A.(2021) , *Potential Short Wave Atenuation Function of Disturbed Mangroves*. 248, p.10674.
- 21- Wang, Y., Yin, Z., and Liu, Y. (2019), *Numerical study of solitary wave interaction with a vegetated platform*. *Ocean Engineering* 192 . 1065612. 10.1016/j.oceaneng.2019.106561
- 22_Valipor,H.Shams_Ghahfarokhi,G.Ghanbari_Adivi, E.(2023), *Investigating the amount of forces caused by solitary waves on coastal walls using OpenFOAM software:1-15*. 10.52547/marineeng.18.37.1 (in Persian)
- 23- valipour, H., shams, G., Ghanbari Adivi, E., mehranfar, N. (2023), *Investigating on the effect of coastal dyke in reducing wave height using OpenFOAM open source software*, *Journal of Marine Science and Technology*, pp. -. doi: 10.22113/jmst.2022.330793.2468(in Persian)
- 24- Jiang, Changbo, Xiaojian Liu, Yu Yao, and Bin Deng(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, no. 1: 530-541. 10.1016/j.ijnaoe.2018.09.007
- 25-Qu, K., Lan, G.Y., Sun, W.Y., Jiang, C.B., Yao, Y., Wen, B.H., Xu, Y.Y. and Liu, T.W., (2021), *Numerical study on wave attenuation of extreme waves by emergent rigid vegetation patch*. *Ocean Engineering*, 239, p.109865. 10.1016/j.oceaneng.2021.109865
- 26-Ghasemi_Pirbaloti, F. and Ghanbari_Adivi, E, Fatahi-Nafchi, R.(2023) , *Numerical modeling of the effect of cylindrical obstacles on coastal waves using OpenFoam software*. *Journal of Marine Science and Technology*, pp. -. doi: 10.22113/jmst.2022.354486.2489 (in Persian)
- 27- GhasemiPirbalooti, F., Fattahi, R. (2022), *The effect of cylindrical piles on coastal waves using large eddy simulation (LES)*. *Amphibious Science and Technology*, 3(3), pp. 1-13. doi: 10.22034/jamst.2022.543784.1080(in Persian)
- 28-Huang, L., Li, Y., Benites-Munoz, D., Windt, C.W., Feichtner, A., Tavakoli, S., Davidson, J., Paredes, R., Quintuna, T., Ransley, E. and Colombo, M., (2022). *A review on the modelling of wave-structure interactions based on OpenFOAM*. *OpenFOAMJournal*. (2), pp.116-142. Doi: 10.51560/ofj.v2.65 <https://doi.org/10.51560/ofj.v2.65>
- concrete in drinking water storage tanks*. Gilan. (in Persian)
- 12- Gracia, A, (2018), *Use of Ecosystems in Coastal Erosion Management*. *Ocean & coastal management* 156: 277-897. 10.1016/j.ocecoaman.2017.07.009
- 13- Mirzakhani, C.(2023) , *Laboratory investigation of the effect of solid vegetation on the flow pattern and sediment transport in the coastline*. Master's thesis in water engineering . School of Agriculture. Shahrekord University. (in Persian)
- 14- 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*. *Ocean Engineering* 235 .109350. 10.1016/j.oceaneng.2021.109350. (in Persian)
- 15-Tanaka, N., Yasuda, S., Iimura, K. and Yagisawa, J. (2014), *Combined effects of coastal forest and sea embankment on reducing the washout region of houses in the Great East Japan tsunami*. *Hydro-environ. Res.* 8:270-280. 10.1016/j.jher.2013.10.001
- 16- Igarashi, Y., Tanaka, N., and Takehito Z.(2018), *Changes in Flow Structures and Energy Reduction through Compound Tsunami Mitigation System with Embankment and Lined Piles*. *Ocean Engineering* 164 .722-732. 10.1016/j.oceaneng.2018.07.003
- 17- Gonçalves, Sílvia C, Pedro M Anastácio, and João C Marques., (2013), *Talitrid and Tyloid Crustaceans Bioecology as a Tool to Monitor and Assess Sandy Beaches*, *Ecological Quality Condition*." *Ecological indicators* 29 : 549-557. 10.1016/j.ecolind.2013.01.035
- 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 , 279-299. 10.1007/s11852-013-0232-9
- 19- Tang,J., Shena, 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. 10.1016/j.coastaleng.2016.12.004

- 29-Y.-P. Zhao, C.-W. Bi, Y.-X. Liu, G.-H. Dong, and F.-K. Gui,(2014). *Numerical simulation of interaction between waves and net panel using porous media model*. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, vol. 8, no. 1, p. 116–126,. 10.1080/19942060.2014.11015502
- 30- Tannehill, J.C., Anderson, D.A., Pletcher, R.H. (1997) , *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Second Edition, Taylor and Francis Group, Washington, DC. P 1-714*.
- 31- Menter, Florian R. (1992), *Influence of Freestream Values on K-Omega Turbulence Model Predictions*. AIAA journal 30, no. 6: 1657-1659. 10.2514/3.11115
- 32- 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: 369-384. 10.1016/j.jweia.2018.06.010
- 33- Sorenson, RM. (2006), *Basic Coastal Engineering. Spring Science and Business Media, New York*. 10.1007/b101261
- 34- 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>
- 35-Pope,S.(2000), *Turbulent Flows.university of Cambridge*.United Kingdom.
- 36- 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)