# 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]دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکدهٔ 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، ghanbariadivi@sku.ac.ir
[۴] دانشجوی دکتری سازه های هیدرولیکی، دانشکده پلی تکنیک مونترال کانادا nariman.mehranfar@gmail.com

**اطلاعات مقاله**

*تاریخچه مقاله:*
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

*کلمات کلیدی:*
میرایی موج
توسعه پایدار
حفاظت سواحل
اپنفوم

**چکیده**

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 محیط‌زیست 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. سازه‌دیوارساحلی 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 سازه‌دیوارساحلی و پوشش‌جنگلی 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 Samani[1], GolamReza Shams Ghahfarokhi [2*]Elham Ghanbari Adivi [3], Nariman Mehranfar[4]**

[1] MSC Student, Department ofWater 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

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

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.

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]

[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

**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 می شود[۱]. هنگامی که یک سازه به حد نهایی تحمل خود می‌رسد آسیب دیده و خرابی‌ها و خسارات جبران ناپذیری از جمله شکست سازه را به دنبال خواهد داشت پس لازم است با شناخت عوامل تخریب، این خسارات تا حد امکان کاهش داد. گزینه های مختلفی برای طراحی و اجرا سازه های 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 موج شکن‌ها، دیوارهای ساحلی و دستک‌ها، از نوع سازه‌ای و استفاده از صخره‌های مصنوعی، پوشش‌گیاهی و تثبیت ساحلی، از نوع غیر سازه‌ای می‌باشد. از مکانیسم‌های ساده و اقتصادی مقابله با امواج که باعث جلوگیری از ورود امواج به منطقه مورد نظر می شود، 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 پوشش‌جنگلی 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 پوشش‌درختی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش نیروی امواج ورودی به ساحل دارند به‌طوری که بین ۴۳ تا ۳۱۸ درصد، جذب نیروی امواج توسط این پوشش درختی نسبت به شرایط ساحل بدون حفاظت اتفاق افتاد [۳].

لی (۲۰۲۱)، بائو(۲۰۱۱)، راجندران و کثیرسان(۲۰۰۵) در تحقیقات میدانی، پوشش‌گیاهی ساحلی را به عنوان یک مانع طبیعی در برابر کاهش شدت امواج معرفی نمودند[۶-۵-۴]. قطعا در برخی شرایط استفاده از پوشش‌گیاهی 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. این‌گونه 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 غیر سازه‌ای 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 تاثیر 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 [۱۱-۱۰-۹].

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

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

میرزاخانی و همکاران (۲۰۲۳) به مطالعه آزمایشگاهی بر اثر پوشش‌گیاهی 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].

تاناکا و همکاران (۲۰۱۴) به مطالعه بر روی اثر ترکیبی خاک‌ریز و پوشش‌جنگلی بر کاهش سونامی با یک مدل معادله غیرخطی پرداختند، نتایج نشان داد که ترکیب خاک‌ریز با ارتفاع بلند، پوشش‌جنگل و تپه‌ی شنی تاثیر بسزایی در برابر سونامی می‌تواند 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 می‌شود[۱۶].

مناطق ساحلی اکوسیستم‌های رابط بین زمین و دریا را تشکیل می‌دهند [۱۸-۱۷]. 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. به‌طوری که در بررسی‌های صحرایی با توجه به فقدان داده‌های منظم و بلند مدت، محقق نیاز به بررسی دوره‌ای مشخصی دارد که گاها زمان و هزینه زیادی را شامل می‌شود از این‌رو کارهای آزمایشگاهی بیشتری نسبت به کارهای صحرایی در این خصوص تعریف شده است. از طرفی بررسی عددی این موضوع به‌دلیل همان پیچیدگی‌های اشاره شده بسیار سخت و یا با دقت پایینی همراه است، البته تا کنون محققانی در این زمینه اقدام به استفاده از مدل‌سازی‌های عددی نمودند. یکی از نرم‌افزارهایی که امروزه برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی مسائل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD[2]) نظر مهندسان و کاربران را به خود جلب کرده است، نرم‌افزار 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 نرم‌افزارهای تجاری دارد. در ادامه به تعدای از این پژوهش‌های انجام شده، به‌صورت عددی اشاره شده است.

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

لی(۲۰۱۹) در نرم‌افزار Open FOAM جریان یک موج منفرد و میرایی آن را در یک ساحل دارای شیب، بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی نمود [۲۰].

وانگ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثر متقابل موج منفرد با سکوهای دارای پوشش‌گیاهی به‌صورت مدل عددی دوبعدی، بر اساس حل‌کننده‌ی جریان مبتنی بر دینامیک اویلری به کمک نرم‌افزار Open FOAM[1] پرداختند، نتایج نشان داد که کارایی یک سکوی گیاهی (دارای زبری) بهتر از یک سکوی ساده در میرایی موج است[۲۱].

ولی‌پور و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی تاثیر امواج بر روی یک دایک‌ساحلی با نرم‌افزار Open FOAM پرداختند. مدل‌سازی 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 نرم‌افزار در مدل‌سازی 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 می‌باشد[۲۳].

چانگبو (۲۰۱۹) در مطالعات عددی در زمینه‌ی بررسی امواج منفرد بر روی یک ردیف شمع شکاف‌دار عمودی در نرم‌افزار Open FOAM در شرایط مختلف قرارگیری شمع‌ها به‌عنوان سازه‌های حفاظت از سواحل پرداختند، نتایج نشان داد که ارتفاع موج، آرایش شمع‌ها و شیب ساحل می‌تواند بر روی استهلاک انرژی اثر گذار باشد. نتایج آنها همچنین تایید کننده دقت مدل‌سازی نرم‌افزار مورد استفاده، می‌باشد[۲۴].

مشاهدات میدانی پس از رویدادهای شدید آب و هوایی نشان داده است که پوشش‌گیاهی به عنوان یک نوع مانع طبیعی ساحلی می‌تواند به طور موثر از شدت موج‌های سهمگین

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 پوشش‌گیاهی 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 پوشش‌گیاهی ساحلی می‌تواند به طور موثر ساحل را در مقابل امواج شدید محافظت نماید [۲۵].

قاسمی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی اثر موج‌شکن‌های شمعی بر امواج ساحلی و تأثیر زبری ناشی از آن‌ها بر الگوی جریان و امواج با مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار OpenFOAM با روش مدل‌سازی RANS[3] پرداختند. مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود نشان دهنده دقت مدل انتخابی در مدل‌سازی پدیده مورد نظر می‌باشد[۲۶]. آن‌ها همچنین در تکمیل کار خود به استفاده از مدل LES برای مدل‌سازی شرایط مشابه با تحقیق قبل پرداختند، بررسی های انجام شده بیانگر تطابق قابل قبول نتایج دو مدل عددی و آزمایشگاهی و عملکرد مناسب نرم‌افزار Open FOAM در مدل‌سازی است[۲۷].

یکی از مزیت‌های نرم‌افزار OpenFOAM وجود کتابخانه‌های از پیش تعریف شده در این نرم‌افزار است که برای پدیده های شناخته شده و مرسوم در زمینه تخصصی مورد نظر به‌صورت کدهای آماده وجود دارد. یکی از مسایلی که به‌صورت 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 برهم‌کنش بین موج با سازه‌ها و موانع ساحلی از جمله پوشش‌گیاهی، مشابه تحقیقات ژائو و همکاران [۲۸] استفاده می‌شود[۲۹].

از بررسی پیشینه موضوع، اهمیت مدل‌سازی موج در ساحل و لزوم حفاظت سواحل کاملا آشکار است. لذا در این پژوهش به تاثیر استفاده همزمان از طرح‌های سازه‌ای در ترکیب با طرح‌های مبتنی بر طبیعت و مدل‌سازی عددی این طرح ترکیبی پرداخته می‌شود. در اینجا به‌طور خاص مد نظر است که با استفاده از نرم‌افزار Open FOAM میزان نیروهای وارد بر سازه‌دیوار و جنگل‌ساحلی، ناشی از امواج را مدل‌سازی نمود و تاثیر سازه‌دیوار و جنگل ساحلی را در استهلاک امواج محاسبه نمود و همچنین نتایج را با نتایج آزمایشگاهی موجود به عنوان معیاری برای ارزیابی مدل مورداستفاده، مقایسه نمود.

## ۲ - مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تعریف مسائل در Open FOAM

نرم‌افزار Open FOAM با استفاده از روش حل عددی حجم محدود (FVM[4]) به شبکه‌محاسباتی[5] ساختاریافته و غیرساختاریافته سه‌بعدی، سلول‌های چند وجهی نسبت داده شده و به حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی می‌پردازد. نرم‌افزار Open FOAM به سه بخش تقسیم می‌شود:

- پیش‌پردازش : 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 نرم‌افزار و مشخص کردن نوع خروجی و نحوه ذخیره آن
- پردازش: اجرای حلگر انتخابی
- پس‌پردازش: نمایش خروجی‌ها و دامنه‌ی حل، رسم نمودارها، تهیه انیمیشن و تصویر

که در مدل‌سازی انجام شده به هریک از این سه بخش به‌طور مجزا باید پرداخته شود. در ابتدا برای پیش پردازش مدل لازم است تا با امکانات این نرم‌افزار 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 رابرای اجرا آماده نمود.

### ۲-۲- معادلات حاکم

به منظور مدل‌سازی در نرم‌افزار Open FOAM از حلگر دو فازی interFoam استفاده شده است، که بر اساس معادلات پیوستگی و مومنتم عمل می‌کند. در حالت کلی معادله پیوستگی یا بقاء جرم را به‌صورت رابطه (۱) می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}.(\rho \vec{u}) = 0 \qquad (۱)$$

که در آن $t$ زمان، $\rho$چگالی، $u$ میدان سرعت سه‌بعدی است.

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

معادله مومنتم به‌صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla}.(\rho \vec{u}\vec{u}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla}.T \qquad (۲)$$

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 شبیه‌سازی دقیق سطح آزاد با استفاده از یک شبکه‌محاسباتی اویلری ثابت به شمار می‌رود که برای دو یا چند سیال غیرقابل اختلاط با یک‌دیگر طراحی شده است. (VOF[6]) یا روش کسر حجم سیال، روشی است که در آن مرز مشترک دو سیال به‌صورت ضمنی ردیابی می‌شود. روابط زیر در این جهت آورده شده است.

$$\nabla \cdot u = 0 \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial_{(u)}}{\partial_t} + \nabla \cdot (uu) = -\nabla_p + \nabla \cdot T + f \qquad (۴)$$

در رابطه پیوستگی، T تانسور فشار انحرافی است که می‌تواند برای جریان تراکم ناپذیر به‌صورت رابطه (۵) تعریف گردد:

$$T = 2vs \qquad (۵)$$

در این رابطه s میانگین نرخ تانسور کرنش است که به‌صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$S = 0 \cdot 5(\nabla_u(\nabla_u)^T) \qquad (۶)$$

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

$$\nabla \cdot T = \nabla \cdot (v\nabla_u) + \nabla_u \cdot \nabla_v \qquad (۷)$$

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 می‌توان با استفاده از رابطه (۷) به فرمت رابطه (۸) نوشت:

$$\frac{\partial_{(u)}}{\partial_t} + \nabla \cdot (uu) - \nabla \cdot (v\nabla_u) - \nabla_u \cdot \nabla_v = -\nabla_p + f \qquad (۸)$$

$$\frac{\partial_{(u)}}{\partial_t} + \nabla \cdot (uu) = -\frac{1}{\rho} + \nabla_p \cdot \nabla \cdot (v\nabla_u) + g + \frac{F_s}{\rho} \qquad (۹)$$

در رابطه مومنتوم، Fs نشان دهنده نیروی کشش سطحی است[۳۰].

### ۲-۴- مدل‌سازی آشفتگی

جریان‌های آشفته جریان‌هایی ناپایدار با حرکات غیرتکرارشونده‌اند و دارای گردابه‌های متغیر با مکان و زمان هستند. حل این نوع جریانات موضوعی چالش برانگیز است، و از آن‌جا که بیشترین مسائل مربوط به کاربردهای سیال دارای جریان آشفته است، همواره تلاش‌های پیوسته‌ای در جهت حل این نوع جریانات انجام می‌شود. از جمله روش‌هایی که امروزه مطرح هستند عبارت‌اند از:

- معادلات ناویرستوکس متوسط‌گیری شده رینولدز (RANS)
- روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES[7])
- شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS[8])

در شبیه‌سازی عددی مستقیم، جریان با همه گردابه های کوچک و بزرگ موجود در آن به صورت مستقیم حل می‌شود که به‌همین دلیل دقت بسیار بالایی دارد و از طرفی حجم محاسبات بسیار بالایی خواهد داشت و در نتیجه زمان و هزینه محاسباتی زیادی را نیز بدنبال خواهد داشت. در روش شبیه سازی LES، که به نوعی حد وسط روش DNS و RANS است، از معادلات متوسط‌گیری مکانی استفاده می‌شود و گردابه‌های بزرگ را به‌صورت مستقیم حل می‌کند اما گردابه‌های کوچک مدل‌سازی می‌شود. این روش نیز غالبا دقیق‌تر از روش RANS است اما به دلیل هزینه محاسباتی زیاد، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدل‌های آشفتگی

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]

[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

RANS، معادلات در جهت برآورد مقدار متوسط زمانی و نوسانات متلاطم جریان حل می‌شوند و میدان لحظه‌ای به‌صورت جمع مولفه‌های متوسط و نوسانی تعریف می‌شود، بنابراین زمان انجام محاسبات کمتری نیاز دارد. در پژوهش حاضر از روش مدل‌سازی RANS که از دقت محاسباتی قابل قبولی برخوردار است، استفاده شده است. . مدل RANS دارای مدل‌های متفاوتی است که یکی از آن‌ها $SST$،$k-\omega$ 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 به‌دست آمده است. در این روابط k برای انرژی جنبشی آشفتگی، $\varepsilon$ برای نرخ استهلاک آشفتگی و $\omega$ برای نرخ استهلاک 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 مدل‌سازی عددی تاثیر سازه‌دیوارساحلی و جنگل‌ساحلی بر کاهش اثرات مخرب امواج در سواحل و عمکرد نرم‌افزار Open FOAM در مدل کردن آن از نمونه آزمایشگاهی رضاپوران 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 پیاده‌سازی و آزمایش شد مطابق شکل (۱). جنس دیواره‌های فلوم از پلکسی‌گلاس[۹] و کف فلوم به‌صورت 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 به‌صورت متحرک با سرعت بازشدگی بالا (ناگهانی) جهت ایجاد موج منفرد مبتنی بر مکانیسم شکست سد، تعبیه شده بود. سازه و پوشش‌جنگلی مورد 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 ممنتم امکان اندازه‌گیری نیروی امواج به‌صورت مستقیم را فراهم آورده بود.




**شکل ۱- نمای کلی از محل قرارگیری پوشش‌گیاهی جنگلی نسبت به سازه‌دیوارساحلی-**
**جهت جریان در شکل با فلش نمایش داده شده است.**

## ۲-۶- تعریف مدل آزمایشگاهی در محیط نرم‌افزار

در پژوهش حاضر جهت مدل‌سازی عددی، رسم هندسه به صورت یک کانال سه‌بعدی انجام شد. در ابتدا با ابزار بلاک‌مش[۱۰] در نرم‌افزار Open FOAM، یک مکعب مستطیل ترسیم و به تعدادی بلوک تقسیم شد (شکل ۲) و شبکه‌محاسباتی ابتدایی آن به‌صورت بلوک‌های شش‌وجهی ایجاد گردید. سپس اجسام مورد نیاز اعم از ساحل، سازه‌ساحلی و پوشش‌جنگلی ایجاد شده در نرم‌افزار 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 شبکه‌محاسباتی سه‌بعدی و ریز کردن شبکه‌محاسباتی در نواحی سازه‌دیوارساحلی و پوشش‌گیاهی جنگلی استفاده شد. شبیه‌سازی‌ها در دو حالت، حالت اول سازه‌دیوارساحلی به همراه پوشش‌گیاهی جنگلی(ST) و حالت دوم بدون سازه‌دیوارساحلی و پوشش‌گیاهی جنگلی(0)، مورد بررسی قرار گرفت. در کل ۱۰ حالت برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار تعریف شد. در تمامی این حالات ارتفاع سازه ثابت و برابر ۷/۵ سانتی‌متر و با پنج ارتفاع موج پای ساحل معادل با ۶، ۷/۵، ۹، ۱۰/۵ و ۱۲ سانتی‌متر

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.

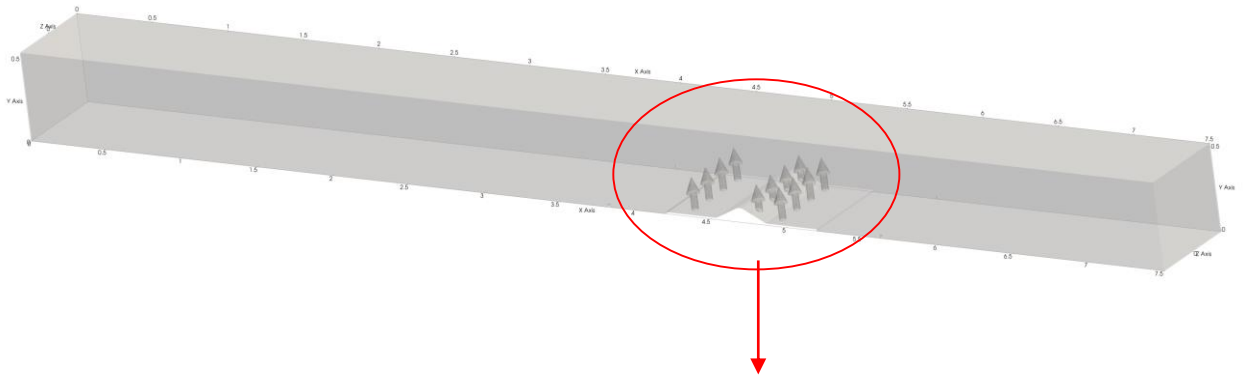
با توجه به عرض فلوم که ۶۰ سانتی‌متر است عرض فضای مدل‌سازی در راستای محورz از ۰/۳- متر تا ۰/۳+ متر در نظر گرفته شده است. از نقطه‌ی x=0 تا x=2 متر طول مخزن تامین هد موج، از نقطه x=2 تا x=4.2 متر طول ساحل قبل از برخورد موج تولید شده به ابتدای ساحل یک متری مورد نظر، از x=4.2 تا x=5.2 متر هم طول ساحل حفاظت شده 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، به‌گونه‌ای که این ارتفاع‌ها بر اساس مقیاس و براساس هدف این پژوهش، در محدوده امواج بلند ساحلی قرار گیرند (۳-۱۵متر).

**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 |

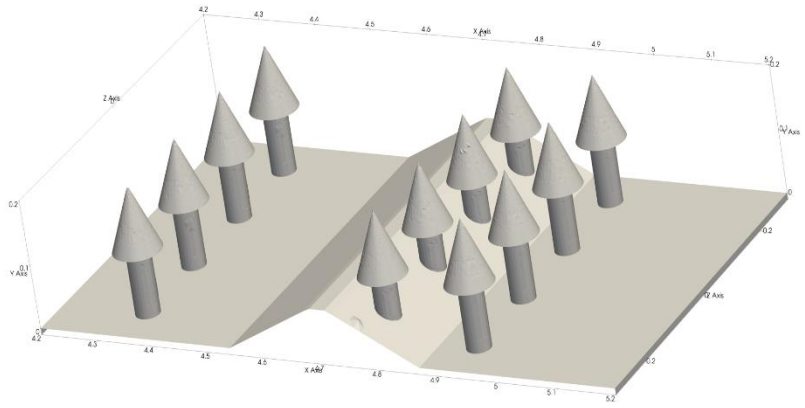
**جدول۲- محدوده تغییرات پارامترهای پوشش‌گیاهی در این پژوهش**

| 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 |
| ۱۵ × ۱۵ | W×B | فواصل بین پوشش در طول و در عرض |
| ۲سانتیمتر | D | قطر پوشش گیاهی |
| ۴ عدد در سمت چپ و ۸ عدد در سمت راست سازه | C | چیدمان پوشش |
| ۱ | - | دیوار ساحلی |





[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]



**شکل۲- نمای داخلی فلوم مدل‌سازی شده در محیط نرم افزار OpenFOAM از روبه‌رو**

## ۲-۷- آنالیز حساسیت به اندازه‌شبکه

کیفت شبکه‌محاسباتی بر دقت و صحت نتایج موثر است. در حل مسائل هیدرودینامیک سیالات محاسباتی سایز انتخابی برای شبکه‌محاسباتی باید به‌گونه‌ای باشد که ریزتر کردن شبکه‌محاسباتی تاثیری بر روی نتایج نداشته باشد. برای بررسی اندازه شبکه‌محاسباتی استفاده شده در این پژوهش ابتدا یک مدل مشخص به ازای ۴ سایز مختلف شبکه‌محاسباتی تنظیم و اجرا شد(مطابق جدول ۳). نتایج حاصله از هر شبیه‌سازی[۱۳] به ازای پارامتر نیروی موج با هم و با نتایج واقعی مقایسه شد. در نهایت شبکه‌محاسباتی که بیشترین تطابق با واقعیت را داشته و از طرفی ریزتر شدن آن تاثیر چندانی بر دقت محاسبات نداشته، به‌عنوان سایز شبکه‌محاسباتی در کلیه شبیه‌سازی‌ها انتخاب گردید. همان‌طور که در جدول (۳) قابل ملاحظه است از مدل یک تا مدل ۳ به ازای تغییر سایز شبکه محاسباتی، تغییرات پارامتر نیرو قابل ملاحظه بوده ولی از مدل ۳ به مدل ۴ می‌توان گفت عملا تغییر سایز شبکه تاثیر چندانی بر مقدار پارامتر نیرو نداشته و روند تغییرات به یک همگرایی انجامیده و از طرفی با مقدار واقعی (معادل۶۴/۷ نیوتن) اختلاف ناچیزی دارد، لذا سایز شبکه مربوط به مدل ۳ به‌عنوان سایز مدل نهایی انتخاب گردید.

**جدول (۳): آنالیزحساسیت 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 جریان‌های آشفته، یکی از راه‌های بررسی کیفیت سایز شبکه‌محاسباتی انتخابی، عدد بدون بعد $y^+$ است. $y^+$ را می‌توان به‌صورت رابطه (۱۰) تعریف کرد، که در واقع بیانی از کمیت‌ها در نزدیک دیواره را نشان می‌دهد و مقدار آن برای هر شبیه‌سازی محاسبه می‌شود.

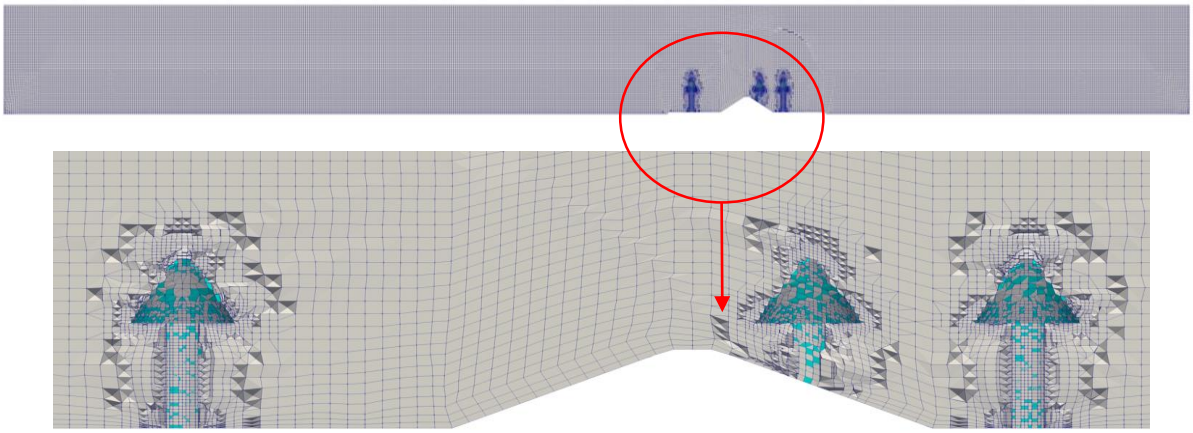
$$y^+ = \frac{y.u^*}{v} \qquad (۱۰)$$

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

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

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

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



**شکل ۳- شبکه‌محاسباتی اطراف موانع**

### ۲-۸- مدل‌سازی موج

با افزایش ارتفاع موج و افزایش زبری بستر به ترتیب افزایش سرعت ذرات موج و کاهش سرعت انتشار موج اتفاق می‌افتد 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 اصطلاحا شکست موج می‌شود. در این پژوهش فرض بر آن است که با پیشروی موج در منطقه آب‌های کم‌عمق، سرعت ذرات موج افزایش و سرعت انتشار موج کاهش می‌یابد. زمانی که سرعت ذرات موج با سرعت انشار موج برابر شود موج نامتقارن شده و تیزی آن افزایش می‌یابد 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 آب‌های کم‌عمق ساحلی می‌باشد که از نظریه موج منفرد[۱۴] در مورد شبیه‌سازی این امواج استفاده می‌شود. آخرین نیم‌رخ قبل از شکست موج، موج منفرد می‌باشد[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 آزمایشگاه که منطبق بر پدیده شکست سد می‌باشد در مدل عددی نیز برای مدل‌سازی این نیم‌رخ موج از پدیده شکست سد که یکی از کتابخانه‌های موجود در نرم‌افزار می‌باشد، 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 شبیه‌سازی 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 مؤلفه‌های مسئله در مدل وارد شد و آن‌هایی که منجر به نتایج غیرفیزیکی و واگرایی مسئله می‌شد کنار گذاشته شد و درنهایت شرایط اولیه و مرزی مناسب به شرح زیر در جدول (۴) به کار گرفته شد.

در اینجا قابل تاکید است که به‌دلیل استفاده از پدیده شکست سد در نرم‌افزار برای شبیه‌سازی موج مورد بررسی، نیازی به تعریف موج و شرایط مرزی مختص آن نمی‌باشد. همانطور که در مقدمه اشاره گردید این روش برای موج‌های با نیم‌رخ موج منفرد در مطالعات گذشته نیز استفاده شده است.

**جدول ۴- شرایط مرزی در مدلسازی عددی**

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



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 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(اتمسفر) | 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 |

- 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 ،ε و ω از پارامترهای $k^+$،$q^+$،$R^+$،$\varepsilon^+$ و $\omega^+$ 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.

### ۲-۱۰ 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 سازه‌دیوارساحلی و پوشش‌جنگلی و ارتفاع موج ثبت شده در نرم‌افزار Open FOAM با مقادیر آزمایشگاهی، از معیارهای آماری، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE[24])، نرمال‌سازی جذر میانگین

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

مربعات خطا (NRMSE[25]) و ضریب تبیین ($R^2$) به‌صورت معادلات زیر استفاده شد:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{N}}(\Sigma_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}}(\mathrm{P_i} - \mathrm{O_i})^2} \quad (۱۱)$$

$$\mathrm{NRMSE} = \frac{\mathrm{RMSE}}{\mathrm{O_{max}} - \mathrm{O_{min}}} \quad (۱۲)$$

$$R^2 = \frac{\Sigma_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}}(\mathrm{O_i} - \overline{\mathrm{O}}_{\mathrm{m}})(\mathrm{P_i} - \overline{\mathrm{P}}_{\mathrm{m}})}{(\Sigma_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}}(\mathrm{O_i} - \overline{\mathrm{O}}_{\mathrm{m}})^2)^{0.5}(\Sigma_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}}(\mathrm{P_i} - \overline{\mathrm{P}}_{\mathrm{m}})^2)^{0.5})} \quad (۱۳)$$

در این رابطه $\mathrm{P_i}$ داده‌های آزمایشگاهی، $\mathrm{O_i}$ داده‌های عددی، $N$ تعداد داده‌ها، $\bar{O}_m$ میانگین داده‌های عددی و $\bar{P}_m$ مقدار میانگین داده‌های آزمایشگاهی، $O_{max}$ بیش‌ترین مقدار داده‌های عددی و $O_{min}$ کم‌ترین مقدار داده‌های عددی است. زمانی که مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال به صفر برسد نشان دهنده بالا بودن دقت پیش‌بینی است. ضریب تبیین مقداری بین ۱- و ۱+ دارد. مقدار ۱+ نشان دهنده محاسبات بدون خطا است.

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

### ۲-۱۲-۱ نیروی موج

نیروی وارد شده به ساحل در حالت با مانع (سازه‌دیوارساحلی و پوشش‌گیاهی جنگلی) و حالت بدون مانع با نرم‌افزار 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.

$$F_t = \frac{F_s - F}{F} \quad (۱۴)$$

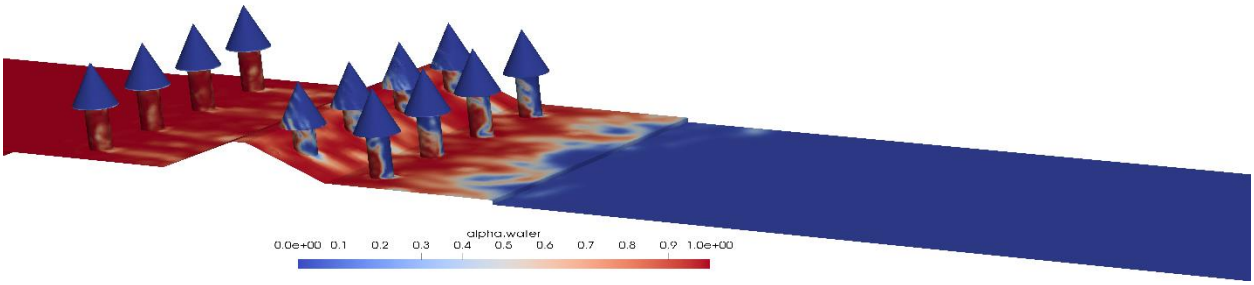
در این رابطه $(F_s)$ و F به ترتیب نیرو در حالت با مانع و نیرو در حالت بدون مانع است.

### ۲-۱۲-۲ میرایی موج

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

$$\left(\frac{H - H_s}{H}\right) \times 10 \quad (۱۵)$$

در این رابطه H و $H_s$ به ترتیب ارتفاع اولیه موج و ارتفاع ثانویه موج پس از عبور از محدوده مورد بررسی می‌باشد.
شکل (۴) میرایی موج را در شرایط زمانی t=1.7s و در ارتفاع اولیه موج ۰/۲۵۵ متر نشان می‌دهد.




**شکل ۴- میرایی موج یا تغییرات ارتفاع موج قبل و بعد از درختان و سازه در زمان t=1.7s و در ارتفاع موج ۰/۲۲۵**

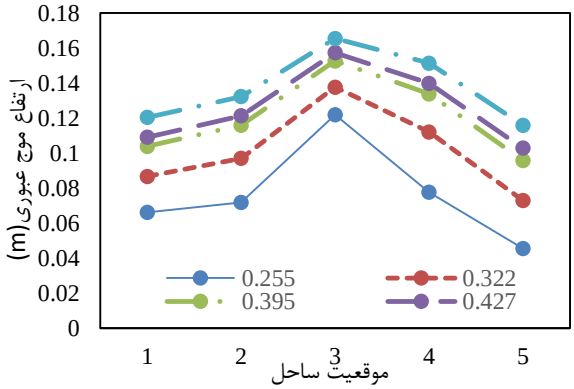
باتوجه به شکل (۴)، تغییرات ارتفاع موج قبل از موانع سازه‌دیوار ساحلی و پوشش‌جنگلی بیشترین مقدار خود و بعد از موانع کمترین ارتفاع موج را دارد که در بخش بررسی نتایج میرایی موج، به تاثیر گذاری این موانع بر افزایش میرایی پرداخته شده است.

## ۲-۱۳- پیشروی موج در ساحل

در شکل(۵)، وضعیت موج عبوری از ساحل در شرایط بدون مانع در نقاط مختلف ساحل قابل ملاحظه است. این وضعیت به‌عنوان شرایط شاهد بر عملکرد سازه‌دیوار ساحلی و پوشش‌جنگلی در این پژوهش در نظر گرفته شد. جدول (۵) موقعیت‌های مورد بررسی در ساحل (محدوده یک متری مدل شده) را نشان می‌دهد. قابل ذکر است صفر مختصات افقی نقطه شروع مخزن تامین هد موج می‌باشد 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 |




**شکل۵ - پیشروی موج در ساحل قبل از نصب موانع**

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

بعد از بررسی مقادیر نیروی محاسبه شده در نرم‌افزار Open FOAM به مقایسه آن‌ها با مقادیر نیروهای آزمایشگاهی پرداخته شده است تا از این طریق صحت مدل‌سازی 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 کوچک‌تر 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 به‌طور متوسط معادل ۱۹ درصد است.

از مقایسه نتایج بدست آمده از مدل عددی مشخص گردید که با افزایش تقریبا ۱۸ درصدی در ارتفاع اولیه موج رسیده به ساحل میزان نیروی جذب شده از امواج رشد ۳۰ درصدی داشته و طبعا این رشد نشان از کارایی بیشتر طرح حفاظتی مورد استفاده در ارتفاع موج‌های 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.

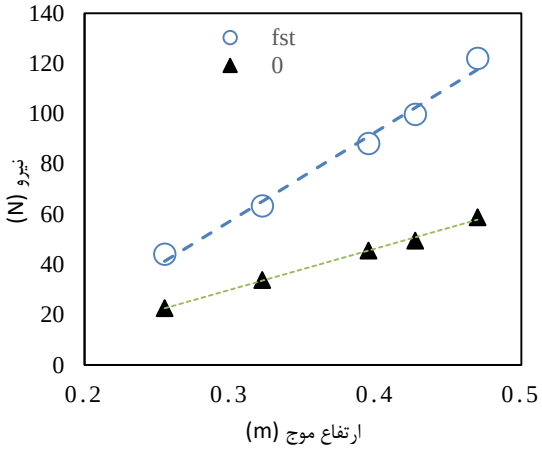
**جدول ۶-مقایسه نیروهای عددی و آزمایشگاهی**

| $R^2$ | 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 | |

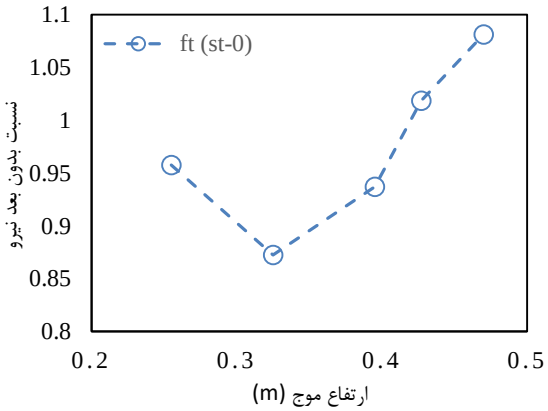
### ۳-۲- بررسی نیروی امواج

باتوجه به شکل (۶) می‌توان گفت که حالتی که ساحل دارای سازه‌دیوار ساحلی و پوشش‌جنگلی 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 ارتفاع موج ورودی در شکل (۷) برای حالت سازه‌دیوارساحلی و پوشش‌جنگلی(ST) و حالت بدون مانع (0) ارائه شده است.

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]




**شکل۶ - نیروی جذب شده توسط ساحل و موانع**




**شکل۷ - 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 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 عملا چون عامل مقاومتی به‌جز 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 هرحال 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.

**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 |



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]

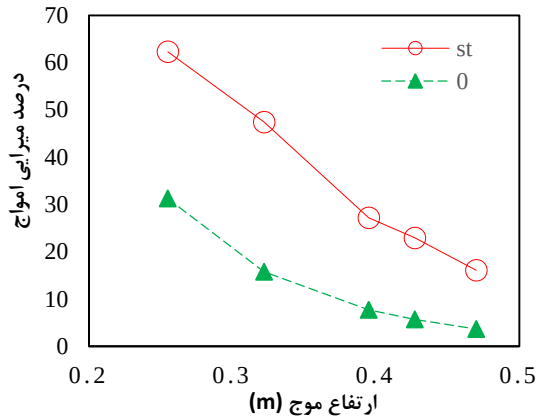
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]

[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

## ۳-۳ بررسی میرایی موج

باتوجه به شکل (۸) می‌توان اظهار نمود، حالتی که ساحل دارای سازه‌دیوار ساحلی و پوشش‌جنگلی (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 پوشش‌جنگلی ساحلی برای پنج ارتفاع موج ۰/۲۵۵، ۰/۳۲۲، ۰/۳۹۵، ۰/۴۲۷ و ۰/۴۷۰ متر به میزان متوسط ۲۳۸/۴ درصد نسبت به حالت بدون مانع افزایش یافته است.




**شکل۸– درصد میرایی موج در حالت‌های مختلف**

**جدول۸ – مقادیر میزان اثر گذاری سازه و جنگل ساحلی در نرخ کاهش ارتفاع موج نسبت به حالت بدون موانع**

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

بنابراین موج عبوری از ساحل با موانع تقریبا 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 پوشش‌جنگلی با 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 پوشش‌جنگلی 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

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]
[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]
[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

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 توجه‌ای 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 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*

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]

[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]

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. I*nternational 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 Tylid 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.univercity 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)

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24 ]

[ DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.6.2 ]

[ DOI: 10.61186/marineeng.19.39.79 ]