

شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی انتشار و بالاروی موج سونامی و بررسی عملکرد موج شکن مستغرق در کاهش بالاروی

مسیح هنرمند^۱، احمد شانه‌ساززاده^{۲*}، سید مهدی زندی^۳، آرمان وحید^۴

- ۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه اصفهان، پست الکترونیکی: honarmand.masih@yahoo.com
- ۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، پست الکترونیکی: a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir
- ۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، پست الکترونیکی: s.m.zandi@eng.ui.ac.ir
- ۴- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه اصفهان، پست الکترونیکی: armanvahida@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۷/۸/۲۸

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۱۰

چکیده

در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی متن‌باز OpenFOAM، انتشار و بالاروی موج سونامی در نزدیکی ساحل توسط موج تنها به عنوان تخمینی از موج سونامی در شرایط مختلف شبیه‌سازی گردید. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شدند. در ابتدا انتشار و بالاروی موج تنهای بدون شکست و سپس موج تنهای شکسته شده به صورت شبیه‌سازی عددی دوبعدی مورد بررسی قرار گرفتند. کاهش بالاروی موج تنها در اثر وجود مانع مستغرق در مسیر موج در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد و سپس با شبیه‌سازی عددی این پدیده، میزان اعتبار نتایج و دقت شبیه‌سازی عددی در شرایط آشفته‌گی در جریان بر اثر شکست موج و با وجود مانع در مسیر جریان مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که وجود مانع مستغرق می‌تواند تا ۱۹/۷ درصد بالاروی را کاهش دهد. همچنین نرم‌افزار OpenFOAM نشان داد که با دقت قابل قبولی توانایی شبیه‌سازی عددی انتشار و بالاروی موج و همچنین تغییرات ارتفاعی سطح آزاد آب در شرایط مختلف را دارد.

کلمات کلیدی: سونامی، موج تنها، بالاروی موج، انتشار موج، موج شکن مستغرق، OpenFOAM.

۱. مقدمه

ناشی از لغزش افتادگی مکران قرار دارند. سونامی در محل تولید خود دارای انرژی فوق‌العاده‌ای است که این انرژی در ساحل باعث ایجاد خسارات جانی و مالی زیادی می‌گردد. بنابراین تخمین بالاروی سونامی در سواحل که در معرض خطر سونامی قرار دارند از جمله سواحل دریای عمان و خلیج چابهار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مهمترین عامل وقوع سونامی

سونامی زندگی میلیون‌ها انسان را که در مجاورت اقیانوس‌ها زندگی می‌کنند، تهدید می‌کند. از این رو شناخت این حادثه‌ی طبیعی جهت مدیریت و کنترل انرژی این امواج عظیم ضروری است. سواحل جنوبی کشور ایران نیز در معرض امواج سونامی

همکاران (۲۰۱۳) گسترش و بالاروی موج را به صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM شبیه‌سازی نمودند. در این تحقیق اندرکنش موج تنها و مانع مستطیلی متخلخل و همچنین شکست سه‌بعدی موج تنها روی شیب ساحل با توپوگرافی مشخص و همچنین اندرکنش موج تنها و مخروط ناقص متخلخل شبیه‌سازی گردید و پروفیل سطح آب در اطراف موانع و سازه‌های ساحلی در زمان‌های مختلف ترسیم گشته است. Higuera و همکاران (۲۰۱۴) اندرکنش سه‌بعدی موج تنها و سازه‌های متخلخل ساحلی را با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM به صورت عددی و به صورت آزمایشگاهی شبیه‌سازی نمودند. در این تحقیق به طور خاص اندرکنش موج تنها و موج‌شکن متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است.

در مقاله حاضر به منظور تکمیل اعتبارسنجی نرم افزار OpenFOAM و بررسی عملکرد موج شکن مستغرق در کاهش بالاروی، نتایج نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM در گستره‌ای از شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. این کار با استفاده از اطلاعات بالاروی موج تنها در شرایط مختلف حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در مراجع و همچنین با برداشت داده‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه اصفهان انجام شد. سپس میزان اعتبار نتایج و دقت نرم‌افزار در شبیه‌سازی عددی دوبعدی پدیده‌ی انتشار و بالاروی موج هنگام به وجود آمدن آشفتگی در جریان بر اثر شکست موج و یا وجود مانع در مسیر جریان بررسی شدند. در این راستا بررسی فواصل مختلف مانع تا خط ساحل که منجر به انواع مختلف شکست موج سونامی می‌گردد، حائز اهمیت است که در این مقاله به آن توجه گردید.

۲. روش کار

معادلات حاکم بر جریان سیالات شامل معادله‌ی پیوستگی و معادلات ناویر-استوکس^۶ هستند (Li and Lam, 1964). در این تحقیق از نرم‌افزار OpenFOAM 2.1.1 روی سیستم عامل Linux و محیط GeekoCFD SUSE Studio جهت حل عددی معادلات مذکور استفاده گردید. الگوریتم مورد استفاده در نرم‌افزار OpenFOAM به منظور گسسته‌سازی معادلات حاکم

حرکت و افتادگی بستر دریا و ایجاد امواج زلزله ناشی از آن در بستر دریا است. امواج سونامی، امواجی با طول موج بسیار بلند هستند که حتی در آب‌های عمیق اقیانوس‌ها هم به صورت موج آب‌های کم عمق^۱ عمل می‌کنند. سرعت این امواج تنها به عمق آب بستگی دارد، با نزدیک شدن آنها به آب‌های کم عمق ساحلی، سرعت امواج کم شده و با توجه به ثابت ماندن دوره تناوب (پریود) امواج و در نتیجه کم شدن طول موج، به شدت بر ارتفاع آنها افزوده می‌شود. به دلیل دوره تناوب طولانی و طول موج بسیار بلند امواج سونامی، این امواج معمولاً به صورت یک موج تنها^۲ تقریب زده می‌شوند (Madsen et al., 2008). موج تنها برای اولین بار توسط Russell (1845) معرفی گردید. موج تنها در طول زمان انتشار خود، در عمق ثابت، در شکل و میزان ارتفاع موج خود بدون تغییر باقی خواهد ماند (Hammack and Segur, 1987). تحقیقات زیادی جهت شبیه‌سازی موج تنها در آزمایشگاه و یا به روش‌های عددی انجام شده است. Synolakis (1987) با شبیه‌سازی دوبعدی موج تنها در کانال مستطیلی که در انتهای آن پیستون موج‌ساز^۳ تعبیه شده بود، میزان حداکثر بالاروی موج روی ساحل را برای حدود ۷۶ موج با ارتفاع موج مشخص در عمق آب ثابت اندازه‌گیری نمود. Zelt (1991) با تولید موج تنها در کانال آزمایشگاهی مشابه آنچه Synolakis (1987) استفاده نموده بود، شکست موج تنها را در آزمایشگاه شبیه‌سازی نمود. در این آزمایش ارتفاع آب ۰/۲۱ متر و نسبت ارتفاع موج به عمق آب ۰/۲۸ در نظر گرفته شده است. در این تحقیق با ارائه‌ی روش عددی جهت محاسبه‌ی ارتفاع سطح آب، صحت این روش با نتایج آزمایشگاهی بررسی شد. Dong و Huang (۲۰۰۱) با شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی شکست موج تنها در اثر عبور از روی مانع مستغرق مستطیلی، صحت روش عددی خود را با مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی بررسی نمودند. زندی و همکاران (۱۳۹۵) تولید و انتشار دوبعدی موج تنها روی شیب ساحل را با استفاده از روش عددی بدون شبکه^۴ و با استفاده از توابع پایه‌ی نمایی^۵ شبیه‌سازی نمودند. از مزایای این روش عددی، استفاده از پتانسیل فشار، بدون شبکه بودن فضای حل و همچنین سرعت بالای اجرای برنامه است. Higuera

¹ Shallow Water

² Solitary Wave

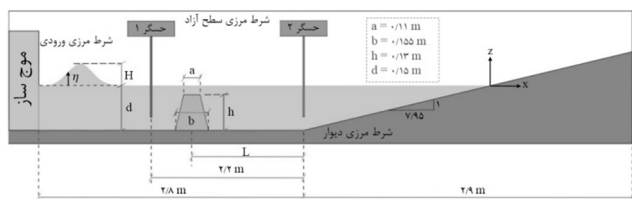
³ Piston Wave Maker

⁴ Meshless

⁵ Exponential Basis Function

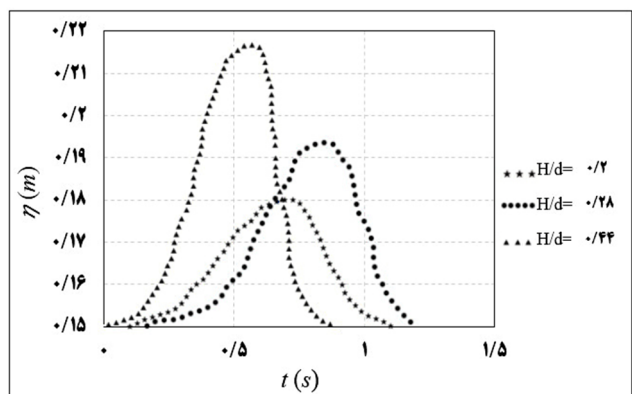
⁶ Navier-Stokes

قرار گرفت. بنابراین در مجموع ۱۵ آزمایش (۵ حالت مانع و ۳ حالت موج) مورد بررسی قرار گرفت (وحیدا و شانه‌ساززاده، ۱۳۹۶). از دو حسگر^۲ برای ثبت تغییرات سطح آزاد آب در طول زمان استفاده گردید. از حسگر شماره ۱ برای ثبت تغییرات سطح آزاد آب قبل از مانع و از حسگر شماره ۲ برای ثبت تغییرات سطح آزاد آب بعد از مانع استفاده شد. همچنین سرعت لحظه‌ای آب بلافاصله بعد از پدال موج‌ساز توسط دستگاه سرعت‌سنج لحظه‌ای مبتنی بر عملکرد لوله‌ی پیتوت^۳ (مرادی، ۱۳۹۶) اندازه‌گیری شد.



شکل ۱: نمای کلی آزمایش بالاروی موج تنها با وجود مانع مستغرق

نمودارهای تغییرات زمانی سطح آزاد آب (η) و سرعت در راستای محور طولی (u) در محل حسگر ۱ به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، امواج ایجاد شده تا حدودی نسبت به موج تنها انحراف دارند. با توجه به اینکه شرایط مشابه آزمایشگاهی برای ورودی شبیه‌سازی عددی فراهم می‌گردد، این اختلاف در نتیجه‌گیری این تحقیق مبنی بر صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی تأثیری نمی‌گذارد. لازم به توضیح است، موج سونامی نیز در واقع بر موج تنها دقیقاً منطبق نیست.



شکل ۲: نمودار تغییرات سطح آزاد آب

بر جریان دوفازی، الگوریتم فشار ضمنی با تقسیم اپراتور^۱ OpenFOAM (Programmer's Guide, 2017) بود. کانال آزمایش به صورت مکعب مستطیل توسط دستور blockMeshDict تولید شد و هندسه‌ی شیب ساحل و مانع مستغرق توسط ابزار snappyHexMeshDict تولید و شبکه‌بندی گردیدند. همچنین از حل‌گر IHFOAM جهت شبیه‌سازی جریان با سطح آزاد و از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ جهت حل معادلات حاکم در شرایط آشفتگی استفاده شد. مدل دو معادله‌ای آشفتگی استاندارد $k-\epsilon$ رایج‌ترین مدل آشفتگی است که به دلیل سادگی، دقت بالا و هزینه محاسباتی پایین در مسائل مشابه مورد توجه قرار گرفته است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش انتشار و بالاروی موج تنها روی شیب ساحل با وجود مانع مستغرق

از روش‌های کاهش بالاروی موج سونامی، ایجاد موانع مستغرق در نزدیکی ساحل است (Irtem et al., 2011). موانع مستغرق باعث شکست زودهنگام موج سونامی شده و با استهلاک انرژی آن باعث کاهش بالاروی می‌شود. به منظور بررسی عملکرد مانع مستغرق در کاهش بالاروی سونامی، آزمایش‌های متنوعی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه اصفهان انجام شد (وحیدا و شانه‌ساززاده، ۱۳۹۶). مقطع عرضی کانال آزمایشگاهی، مانع و محل دستگاه‌های اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب قبل و بعد از مانع به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. شیب $۱:۷/۹۵$ افقی در مقابل ۱ قائم در انتهای کانال از جنس سرامیک با ضریب زبری $۰/۰۱۴۳$ (Jaromin et al., 2011) برای اندازه‌گیری بالاروی در نظر گرفته شده است. موج‌های تنها با نسبت ارتفاع موج به عمق آب H/d برابر $۰/۲$ و $۰/۲۸$ مورد آزمایش قرار گرفتند. در مرحله‌ی اول مانعی در مسیر موج قرار داده نشد و انتشار موج و بالاروی آن بررسی گردید. سپس مانع دوزنقه‌ای شکل - مشابه با موج‌شکن مستغرق - به گونه‌ای در مسیر موج قرار داده شد که محور مانع در فواصل $۰/۱۵$ ، $۰/۵۵$ ، $۰/۹۵$ و $۱/۳۵$ متری از ابتدای شیب ساحل (L)

² Wave Gage

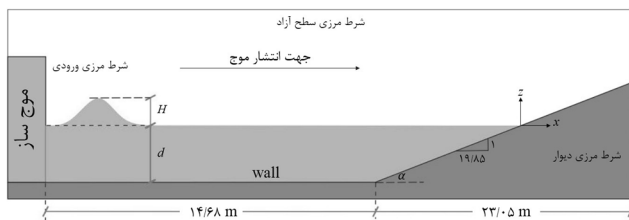
³ Pitot Tube

¹ Pressure Implicit with Splitting of Operator (PISO)

برابر 0.31 متر و نسبت ارتفاع موج به عمق آب (H/d) برابر 0.19 است. جهت انجام شبیه‌سازی تعداد شبکه حل استفاده شده در نرم‌افزار در راستای محور x برابر 2500 و در راستای محور z برابر 30 عدد انتخاب گردید. جهت نمایش زمان وقوع هر پروفیل، مطابق آنچه توسط (Synolakis, 1987) صورت گرفته است، پارامتر زمان توسط رابطه‌ی زیر بی‌بعد گردید.

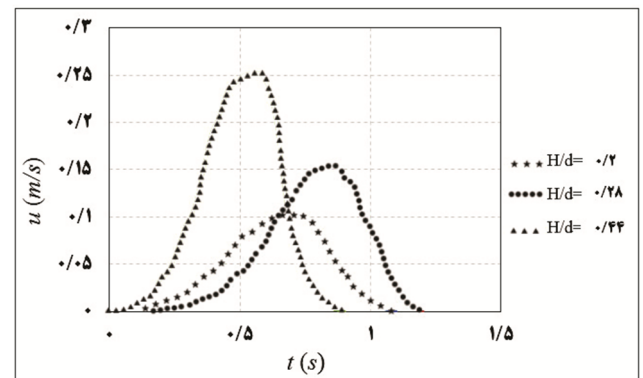
$$\frac{t - t_0}{\sqrt{\frac{d}{g}}} = T \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، t زمان محاسباتی وقوع پروفیل سطح آب بر حسب ثانیه و t_0 زمان رسیدن موج تنها به پای شیب بر حسب ثانیه هستند. در این شبیه‌سازی مقدار t_0 برابر 14 ثانیه بدست آمد. همچنین محور طول‌ها به صورت $(x-x_0)/d$ نمایش داده شد که در آن x فاصله‌ی هر نقطه از پای شیب و x_0 فاصله‌ی محل برخورد سطح آب با شیب ساحل از پای شیب هستند ($x_0 = d.Cota$)، پروفیل همین‌طور محور عرض‌ها به صورت η/d نمایش داده شد. پروفیل سطح آب در زمان‌های متفاوت در شکل ۵ ترسیم شده‌اند (خط ممتد سمت راست اشکال، خط شیب ساحل است). چنانچه ملاحظه می‌شود، انطباق بسیار خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی مشاهده می‌گردد. ارتفاع بالاروی نسبی (R/d) که در آن R بیشترین ارتفاع بالاروی است، مقدار مشاهده و نرم‌افزار OpenFOAM به ترتیب برابر 0.78 و 0.778 بدست آمد. با مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی عددی، می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار OpenFOAM توانسته مقدار بالاروی حداکثر موج تنهای بدون شکست را با دقت بسیار بالا تخمین بزند.



شکل ۴: مشخصات کانال آزمایش (Synolakis, 1987) و (Zelt, 1991)

Zelt (1991) آزمایشی برای شبیه‌سازی انتشار و بالاروی موج تنهای شکسته شده در کانال آزمایشگاه مطابق شکل ۶ انجام داد. در این شبیه‌سازی ارتفاع آب d برابر 0.21 متر و نسبت ارتفاع موج به عمق آب (H/d) برابر 0.28 بود. جهت انجام شبیه‌سازی



شکل ۳: نمودار تغییرات سرعت افقی

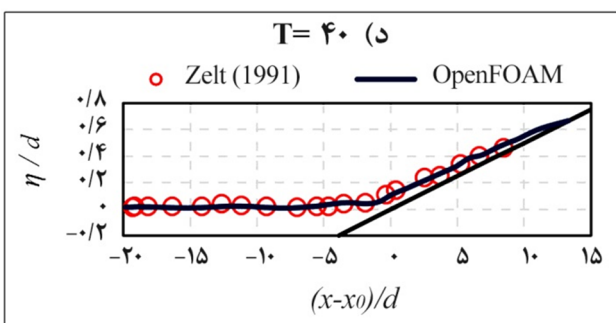
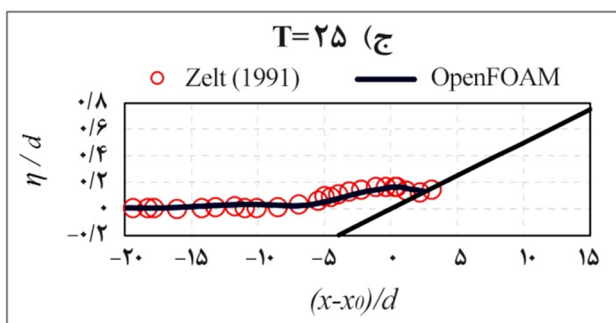
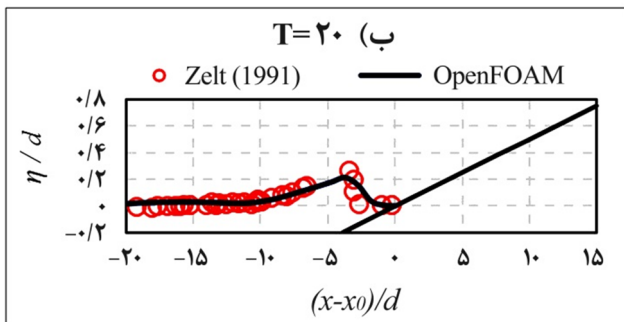
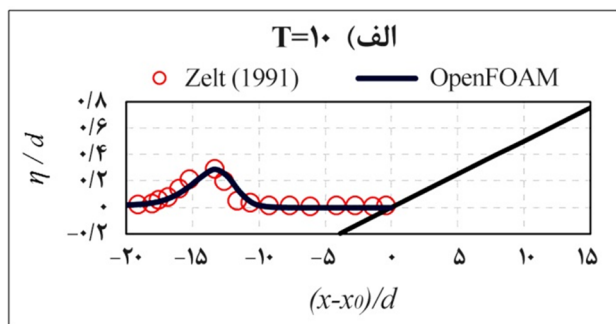
۳-۲ نتایج شبیه‌سازی عددی، صحت‌سنجی و بحث

جهت شبیه‌سازی دوبعدی انتشار و بالاروی موج سونامی با استفاده از موج تنها، مشابه با شرایط آزمایش‌های قابل استناد در مراجع و همچنین اندازه‌گیری‌های انجام شده در آزمایشگاه، ۵ حالت در نرم‌افزار OpenFOAM به صورت عددی شبیه‌سازی گردید. این ۵ حالت شامل آزمایش (Synolakis, 1987) برای شبیه‌سازی انتشار و بالاروی دوبعدی موج تنهای بدون شکست، آزمایش (Zelt, 1991) برای شبیه‌سازی انتشار و بالاروی دوبعدی موج تنهای شکسته شده و سه آزمایش طراحی شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه اصفهان به منظور شبیه‌سازی انتشار و بالاروی موج تنها در اثر وجود مانع مستغرق در مسیر موج هستند. در هر شبیه‌سازی پس از حساسیت‌سنجی تعداد شبکه‌های حل^۱ در هر راستای مختصاتی، با اطمینان از تولید دقیق ارتفاع موج تولید شده در نزدیکی پدال و همچنین مطابقت نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود، کمترین میزان تعداد شبکه حل مورد استفاده برای هر نمونه‌ی شبیه‌سازی شده انتخاب گردید. در ادامه به صورت مجزا، مشخصات و نتایج هر شبیه‌سازی ارائه شده است.

۳-۲-۱ شبیه‌سازی گسترش و بالاروی موج تنها روی شیب ساحل

به منظور راستی آزمایی نتایج شبیه‌سازی دوبعدی گسترش موج تنها، آزمایش جامع (Synolakis, 1987) برای موج تنهای بدون شکست در نرم‌افزار OpenFOAM شبیه‌سازی گردید. مشخصات کانال آزمایشگاه و شرایط مرزی مورد استفاده در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این شبیه‌سازی ارتفاع آب d

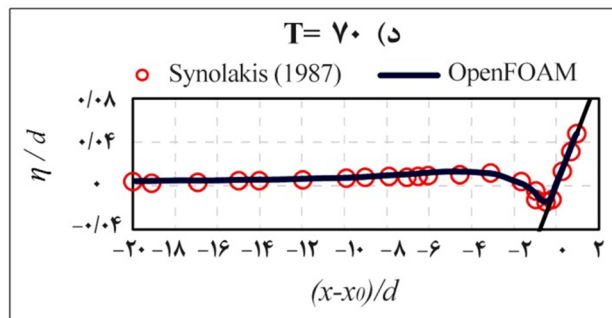
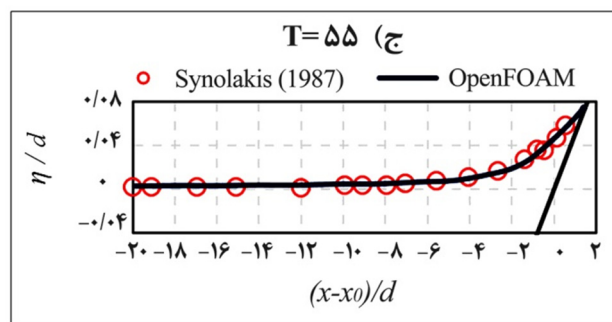
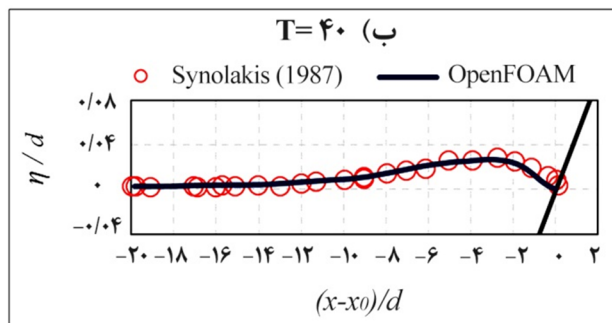
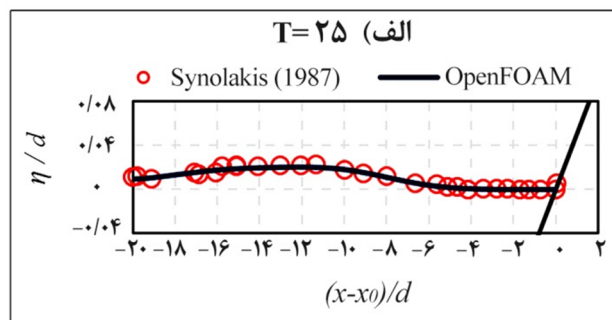
¹ Mesh



شکل ۶: نتایج شبیه‌سازی دوبعدی موج تنهای شکسته شده ($H/d=0.28$, $d=0.21$ m)

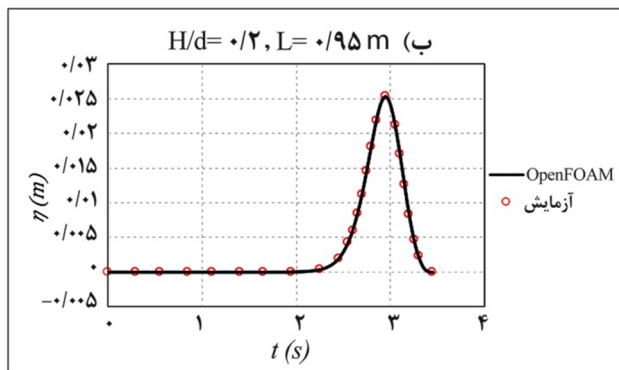
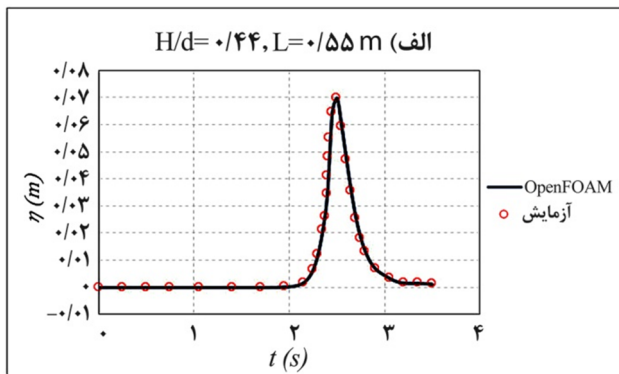
ارتفاع بالاروی نسبی (R/d) در آزمایشگاه و نرم‌افزار OpenFOAM به ترتیب برابر 0.82 و 0.817 بدست آمد. بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی و مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در آزمایشگاه، توانایی نرم‌افزار در شبیه‌سازی پدیده‌ی انتشار و بالاروی موج تنهای شکسته شده اثبات می‌شود.

تعداد شبکه حل استفاده شده در نرم‌افزار در راستای محور x برابر 3000 عدد و در راستای محور z برابر 40 عدد، انتخاب گردیدند. در این شبیه‌سازی مقدار t_0 برابر $11/75$ ثانیه بود. نمودارهای پروفیل سطح آزاد آب در زمان‌های متفاوت در شکل ۶ ترسیم شدند که از تطابق خوب نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی حکایت می‌کنند (خط ممتد سمت راست شکل‌ها، بیانگر خط شیب ساحل است).



شکل ۷: نتایج شبیه‌سازی دوبعدی موج تنهای بدون شکست ($H/d=0.19$, $d=0.3097$ m)

۳-۲-۲ شبیه‌سازی انتشار و بالاروی موج تنها روی شیب ساحل با وجود مانع مستغرق



شکل ۷: نمودار تغییرات سطح آب در طول زمان تا عبور موج تنها در ابتدای شیب ساحل

جدول ۱: حداکثر بالاروی نسبی موج روی شیب ساحل (R/d) و تاثیر مانع مستغرق بر میزان بالاروی

شماره آزمایش	$L(m)$	H/d	R/d		درصد کاهش بالاروی (%)
			OpenFOAM	آزمایش	
۱		-/۲	-/۷	-/۷۱	-
۲	بدون مانع	-/۲۸	-/۹۹	۱/۰۲	۲/۲
۳		-/۴۴	۱/۲۲	۱/۲۵	۲/۳
۴		-/۲	-/۵۹	-/۶	۲/۳
۵	-/۱۵	-/۲۸	-/۹۱	-/۹۳	۲/۱
۶		-/۴۴	۱/۱۴	۱/۱۶	۱/۹
۷		-/۲	-/۵۸	-/۵۹	۱/۸
۸	-/۵۵	-/۲۸	-/۱۹	-/۹	۱/۹
۹		-/۴۴	۱/۰۹	۱/۱	۱/۸
۱۰		-/۲	-/۵۷	-/۵۸	۱/۶
۱۱	-/۹۵	-/۲۸	-/۱۸۵	-/۱۸۶	۱/۵
۱۲		-/۴۴	۱/۰۵	۱/۰۶	۱/۷
۱۳		-/۲	-/۵۶	-/۵۷	۱/۴
۱۴	۱/۳۵	-/۲۸	-/۱۸۳	-/۱۸۵	۱/۶
۱۵		-/۴۴	۱/۰۱	۱/۰۳	۱/۵

۴. نتیجه‌گیری

سواحل دریا‌های بزرگ و اقیانوس‌ها از جمله سواحل

به منظور بررسی میزان اعتبار نتایج و دقت شبیه‌سازی عددی دوبعدی پدیده‌ی انتشار و بالاروی موج هنگام به وجود آمدن آشفتگی در جریان، نتایج آزمایش‌های انجام شده در شرایط وجود مانع، مورد توجه قرار گرفت. به منظور شبیه‌سازی آزمایش‌های انجام گرفته در نرم‌افزار OpenFOAM، تغییرات سرعت جریان در راستای محور x در طول زمان تشکیل پروفیل موج، توسط سرعت سنج که در محل حسگر شماره‌ی ۱ نصب شده بود (شکل ۱)، برداشت گردید. سپس به عنوان سرعت ورودی موج به نرم‌افزار OpenFOAM معرفی شد (شکل ۵). جهت انجام شبیه‌سازی تعداد شبکه حل استفاده شده در نرم‌افزار، در راستای محور x برابر ۵۰۰۰ عدد و در راستای محور z برابر ۳۰۰ عدد، انتخاب شدند.

به منظور تعیین دقت کیفی نرم‌افزار OpenFOAM در تخمین تغییرات سطح آزاد آب در طول زمان در هر نقطه‌ی مشخص، از مقایسه‌ی نتایج در محل حسگر شماره‌ی ۲ که بعد از مانع نصب شد، استفاده گردید. در نمودارهای شکل ۷ دو نمونه از تغییرات سطح آزاد آب در طول زمان حاصل از نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی برای چند حالت نمونه مقایسه شدند. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، نرم‌افزار OpenFOAM به خوبی توانسته است تغییرات سطح آزاد آب در طول زمان را در ابتدای شیب ساحل تخمین بزند.

نتایج نسبت بی‌بعد حداکثر ارتفاع بالاروی موج روی شیب ساحل به عمق آب (R/d) در شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی و عددی و همچنین میزان خطای نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی ($e\%$)، برای تمامی حالات، در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، نرم‌افزار OpenFOAM توانسته است حداکثر ارتفاع بالاروی موج روی شیب ساحل را به خوبی تخمین بزند و در بیشترین حالت ۲/۳ درصد خطا صورت گرفته است که قابل چشم‌پوشی است. با مقایسه‌ی نسبت بالاروی در حالت بدون مانع و شرایطی که مانع در بهترین موقعیت قرار دارد (آزمایش‌های ۱ و ۱۳) نشان می‌دهد که مانع توانسته است تا ۱۹/۷ درصد بالاروی را کاهش دهد.

۹۳ صفحه.

وحید، آ؛ شانه‌ساززاده، ا.، ۱۳۹۶. بررسی آزمایشگاهی عملکرد موج‌شکن‌های مستغرق جهت حفاظت از شهرهای ساحلی در مقابل موج سونامی. پنجمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، دی ماه ۹۶، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. ۱۲ صفحه.

Hammack, J.L.; Segur, H., 1987. The Korteweg-de vries equation and water waves, part 2. Comparison with experiments. *Journal of Fluid Mechanics*, 65: 289-314PP.

Huang, C.J.; Dong, C.M., 2001. On the interaction of a solitary wave and a submerged dike. *Coastal Engineering*, 43: 265-286PP.

Higuera, P.; Lara, J.L.; Losada, I.J., 2013. Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM. *Coastal Engineering*, 71: 119-134PP.

Higuera, P.; Lara, J.L.; Losada, I.J., 2014. Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM. Part II: Applications. *Coastal Engineering*, 83: 259-270PP.

Item, E.; Seyfioglu, E.; Kabdasli, S., 2011. Experimental investigation on the effects of submerged breakwaters on tsunami run-up height. *Journal of Coastal Research*, 64: 516-520PP.

Jaromin, K.; Jilati, A.; Widomski, M.; Lagod, G., 2011. Materials, exploitation manners and roughness coefficient in gravitational sanitation conduits. *Journal of Ecological Chemistry and Engineering*, 18: 853-863PP.

Li, W.I.; Lam, S.H., 1964. Principles of fluid mechanics. Addison-Wesley Publishing Company, London. 372P.

Madsen, P.A.; Fuhrman, D.R.; Schaffer, H.A., 2008. On the solitary wave paradigm for tsunamis. *Journal of Geophysical Research*, 113: 1-22PP.

OpenFOAM Programmer's Guide., 2017. Version 2.1.1, 24th July. <http://openfoam.org>.

جنوبی ایران، در معرض امواج سونامی ناشی از لغزش افتادگی^۱ ناشی از گسل قرار دارند. تخمین بالاروی موج و اقداماتی که میزان آن را کاهش دهد از اولویت‌های مهندسی سواحل جهت بررسی ابعاد و کنترل این مخاطره می‌باشد. در این تحقیق شبیه‌سازی انتشار و بالاروی دوبعدی موج سونامی در نزدیکی ساحل با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM در شرایط مختلف در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در مواردی که آزمایش‌های معتبر وجود داشت، به مراجع مربوطه استناد شد و در شرایط خاص ایجاد مانع مستغرق در مقابل موج سونامی جهت کاهش بالاروی آن، آزمایش‌هایی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه اصفهان انجام گرفت. نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می‌دهند نرم‌افزار OpenFOAM در حالت موج بدون شکست، موج شکسته و هنگامی که مانعی در مسیر موج وجود دارد و باعث شکست زود هنگام موج می‌گردد، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد، به طوری که خطای محاسبه‌ی بالاروی نسبی کمتر از ۲/۳ درصد است. همچنین تغییرات ارتفاعی سطح آزاد آب، شامل محل و پروفیل شکست موج به خوبی شبیه‌سازی می‌شوند. همچنین یک مانع در مقابل موج سونامی، در صورتی که محل آن درست انتخاب شود، میزان بالاروی آن را تا ۱۹/۷ درصد می‌تواند کاهش دهد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱، هر چه موج شکن از ابتدای شیب ساحل دورتر باشد، میزان کاهش بالاروی موج بیشتر است. تحقیق حاضر نشان می‌دهد که استفاده از موج‌شکن مستغرق روش کارآمد برای کاهش مقدار بالاروی سونامی است. بدیهی است تعیین میزان عملکرد این روش در شرایط مختلف موج و ساحل، موکول به تحقیقات پارامتری بیشتری است.

منابع

زند، م؛ رفیع زاده، ا؛ شانه‌ساززاده، ا.، ۱۳۹۵. شبیه‌سازی انتشار موج تنها به روش بدون شبکه با استفاده از توابع پایه نمایی. نشریه اقیانوس‌شناسی، سال هفتم، شماره ۲۵. صفحات ۱ تا ۱۱.

مرادی، م، ۱۳۹۶. بررسی آزمایشگاهی انتقال رسوبات درشت‌دانه در منطقه‌ی بالاروی امواج. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان.

¹ Subduction

of Fluid Mechanics, 185: 523-545PP.

Zelt, J.A., 1991. The run-up of non-breaking and breaking solitary waves. Coastal Engineering, 15: 205-246PP.

Russell, J.S., 1845. Report on waves. Processing. 14th meeting of British association for the advancement of science. John Murray. London, 311-390PP.

Synolakis, C.E., 1987. The runup of solitary wave. Journal