

شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی بالاروی موج تنها در سواحل با هندسه متفاوت با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM

مسیح هنرمند^۱، احمد شانه ساززاده^۲، سید مهدی زندی^۳

ahmad.shanehsaz@yahoo.co.uk

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

۲و۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

چکیده

سونامی جان و مال میلیون‌ها نفر انسان که در مجاورت اقیانوس‌ها زندگی می‌کنند را تهدید می‌کند. از این رو تخمین میزان بالآمدگی امواج سونامی از طریق شبیه‌سازی این امواج به روش‌های عددی و آزمایشگاهی ضروری است. با توجه به اینکه اغلب تحقیقات انجام شده و فرمول‌های ارائه شده برای بالاروی موج سونامی دوبعدی هستند، تعیین میزان بالاروی در حالت سه‌بعدی و تعیین تأثیر شکل ساحل در میزان بالاروی ضروری است. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی OpenFOAM انتشار و بالاروی موج سونامی در نزدیکی ساحل با استفاده از موج تنها به عنوان تخمینی از موج سونامی شبیه‌سازی گردیده است. در ابتدا انتشار موج تنها در اطراف یک جزیره به شکل مخروط ناقص شبیه‌سازی گردیده و نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه گردیده است. پس از اطمینان از اعتبار نتایج شبیه‌سازی، به بررسی نقش هندسه ساحل در میزان بالاروی موج پرداخته شده است. بدین منظور با در نظر گرفتن چند شکل متعارف خلیج یا خور و همچنین مد نظر قرار دادن چندین حالت برای نسبت عرض دهانه ورودی به طول خلیج و شیب ساحل، بالاروی موج تنها در دو حالت موج تنهای بدون شکست و موج تنهای شکسته شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند هرچه نسبت عرض دهانه ورودی ساحل به طول ساحل بیشتر باشد، میزان بالاروی موج روی شیب ساحل کمتر است. همچنین سواحل V شکل بیشترین میزان بالاروی موج نسبت به اشکال دیگر برای ساحل را دارند و موج شکسته نسبت به حالت موج تنهای بدون شکست، بالاروی بیشتری دارد. مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی سه‌بعدی با روابط موجود مبتنی بر شبیه‌سازی‌های دوبعدی نشان می‌دهد، نتایج روابط مذکور برای سواحل غیر تخت معتبر نمی‌باشد.

واژگان کلیدی: سونامی، موج تنها، شکل ساحل، نرم‌افزار OpenFOAM، بالاروی موج، شبیه‌سازی سه‌بعدی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۲/۱۴

۱- مقدمه

سونامی زندگی میلیون‌ها نفر انسان که در مجاورت اقیانوس‌ها زندگی می‌کنند را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از این رو شناخت این حادثه طبیعی جهت مدیریت و کنترل انرژی این امواج عظیم ضروری است. سواحل جنوبی کشور ایران نیز در معرض تهدید امواج سونامی ناشی از لغزش افتادگی مکران قرار دارند [۱]. مهمترین عامل وقوع سونامی 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 کم‌عمق^۱ عمل می‌کند. امواج آب‌های کم‌عمق، با سرعتی معادل جذر حاصل ضرب شتاب گرانش زمین در عمق آب حرکت می‌کنند. این رابطه به صورت $c = \sqrt{gd}$ که در آن d عمق آب و g شتاب گرانش زمین می‌باشند، بیان می‌شود. سرعت این امواج به عمق آب بستگی دارد و با نزدیک شدن آن‌ها به آب‌های کم‌عمق ساحلی، سرعت امواج کم شده و با توجه به ثابت ماندن پریرود امواج و در نتیجه کم شدن طول موج، به شدت بر ارتفاع آن‌ها افزوده می‌شود. پروفیل سطح آزاد موج تنها^۲ با دارا بودن طول موج بینهایت، به پروفیل سطح آزاد موج سونامی که دارای طول موج بسیار بلندی است، بسیار نزدیک است. از این رو موج تنها به عنوان نماینده موج سونامی در اکثر شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. موج تنها یا موج تک برای اولین بار توسط جان اسکات راسل^۳ در سال ۱۸۳۴ معرفی گردید. موج تنها در طول زمان انتشار خود، در عمق ثابت، در شکل و میزان ارتفاع موج خود بدون تغییر باقی خواهد ماند [۳]. تحقیقات زیادی جهت شبیه‌سازی موج تنها در آزمایشگاه و یا به روش‌های عددی انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

روش‌های متفاوتی جهت تولید و انتشار موج تنها در آزمایشگاه ارائه گردیده است. از جمله مهمترین این روش‌ها می‌توان به سقوط وزنه و برخورد با سطح آزاد آب [۴] و همچنین آزادسازی حجم مشخصی از سیال در پشت یک مانع [۵] و همچنین حرکت افقی یک پدال قائم توسط موج‌ساز پیستونی [۶ و ۷] اشاره نمود. از میان تمامی روش‌های اشاره شده، تولید موج تنها توسط موج‌ساز

پیستونی، به عنوان یک روش متداول و رایج مورد استفاده قرار می‌گیرد. سینولاکیس (۱۹۸۷) با شبیه‌سازی دوبعدی موج تنها در یک کانال مستطیلی که در انتهای آن یک پیستون موج‌ساز^۴ تعبیه شده بود، میزان حداکثر بالاروی موج بر روی ساحل را برای حدود ۷۶ موج با ارتفاع موج مشخص در عمق آب ثابت و معین اندازه‌گیری نمود [۸]. زلت (۱۹۹۱) با تولید موج تنها در کانال آزمایشگاهی مشابه آنچه سینولاکیس 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 [۹]. چوی و همکاران (۲۰۰۷) گسترش و بالاروی موج تنها پیرامون مخروط ناقص را در آزمایشگاه به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی نمودند. در این تحقیق پروفیل سطح آب در اطراف مخروط ناقص در زمان‌های مختلف ترسیم شده است. همچنین با شبیه‌سازی این آزمایش در نرم‌افزار Flow 3D، صحت نتایج بدست آمده از مدل عددی با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی آزمایشگاهی بررسی گردیده است. نتیجه این تحقیق توانایی بالای نرم‌افزار Flow 3D در شبیه‌سازی سه‌بعدی گسترش و بالاروی موج تنها است [۱۰]. بالدوک و همکاران (۲۰۰۷) به منظور بررسی بالاروی موج سونامی در سواحل غیر تخت، بالاروی موج تنها و N-wave را روی ساحل به شکل‌های مختلف را مورد بررسی قرار داده و میزان بالاروی حداکثر موج روی شیب ساحل را اندازه‌گیری نمودند. هدف از انجام این پژوهش، شبیه‌سازی سونامی استرالیا در سال ۲۰۰۴ است [۱۱]. هیگوریا و همکاران (۲۰۱۳) فرآیندهای مهندسی سواحل را به صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM شبیه‌سازی نموده اند. در این تحقیق اندرکنش موج تنها و مانع مستطیلی متخلخل و همچنین شکست سه‌بعدی موج تنها بر روی شیب ساحل با توپوگرافی مشخص و همچنین اندرکنش موج تنها و مخروط ناقص متخلخل شبیه‌سازی گردیده است و پروفیل سطح آب در اطراف موانع و سازه‌های ساحلی در زمان‌های مختلف ترسیم گشته است. همچنین در این تحقیق پس از مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمایشگاهی، توانایی و دقت بسیار بالای نرم‌افزار OpenFOAM در شبیه‌سازی فرآیندهای ساحلی نشان داده

³John Scott Russel⁴ Piston Wave Maker¹ Shallow Water² Solitary Wave

شکل، ساحل با شکل همگرای U شکل و ساحل با شکل واگرا و همچنین مد نظر قرار دادن سه نسبت ۰/۵ و ۱ و ۱/۵ برای نسبت عرض دهانه ورودی به طول ساحل و در نظر گرفتن دو نسبت ۱:۲۵ و ۱:۱۰۰۰ برای شیب ساحل با طول ساحل به ترتیب ۵۰۰ متر و ۲۱۰۰۰ متر، بالاروی موج تنها روی شیب ساحل در دو حالت موج تنهای بدون شکست با نسبت ارتفاع موج به عمق آب ۰/۱ و موج تنهای شکسته شده با نسبت ارتفاع موج به عمق آب ۰/۳ در دو حالت عمق آب ۱۰ متر و ۱۶ متر، بالاروی موج تنها روی شیب ساحل مورد بررسی قرار گرفته‌است.

انتخاب هندسه و شیب‌های مختلف به گونه‌ای است که در حالتی که طول ۲۱۰۰۰ متر است، طول ساحل، طول دهانه ورودی ساحل، شیب ساحل و عمق آب، همانند مقادیر نظیر در خلیج چابهار انتخاب گشته‌اند تا نتایج حاصل شده با نتایج حاصل شده از انتشار موج تنها در خلیج چابهار با توپوگرافی بستر نسبتاً دقیق، قابل مقایسه باشند. همچنین جهت بررسی خطای روابط ارائه شده برای محاسبه بیشترین میزان بالاروی موج تنها روی شیب ساحل تخت در حالت دوبعدی نسبت به حالت سه‌بعدی، میزان بیشترین بالاروی موج تنها در تمام شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با یکی از جدیدترین روابط ارائه شده توسط زندگی و همکاران (۲۰۱۷) [۱۵] جهت محاسبه بیشترین میزان بالاروی موج تنها روی شیب ساحل تخت در حالت دوبعدی مقایسه گشته است.

۲- معادلات اساسی و شرایط مرزی حاکم بر مسئله در نرم‌افزار OpenFOAM

در حالت کلی معادلات حاکم بر جریان سیالات شامل معادله پیوستگی و معادلات ناویر-استوکس^۳ می‌باشند. معادله پیوستگی به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۶].

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

در این رابطه $\vec{U} = \langle u \ v \ w \rangle^T$ میدان سرعت و ρ چگالی سیال می‌باشند. معادلات ناویر-استوکس هم در فرم برداری به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$\frac{D\vec{U}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + g \vec{\nabla} h + \nu \nabla^2 \vec{U} \quad (2)$$

در این رابطه p تابع توزیع فشار پیزومتریک، ν لزجت

شده است [۱۲]. در تحقیقی دیگر، هیگویرا و همکاران (۲۰۱۴) اندرکنش سه‌بعدی موج تنها و سازه‌های متخلخل ساحلی را با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM شبیه‌سازی نموده‌اند. در این تحقیق به طور خاص اندرکنش موج تنها و موج شکن متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. وی در این تحقیق علاوه بر شبیه‌سازی این فرآیند در نرم‌افزار OpenFOAM، جهت صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، این فرآیند را در محیط آزمایشگاهی شبیه‌سازی نموده است و پس از مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی، توانایی و دقت بالای نرم‌افزار OpenFOAM را نتیجه‌گیری کرده است [۱۳ و ۱۴].

زندگی و همکاران (۲۰۱۷) تولید و انتشار دوبعدی موج تنها بر روی شیب ساحل را با استفاده از روش عددی بدون شبکه^۱ و با استفاده از توابع پایه نمایی^۲ شبیه‌سازی نموده‌اند. از مزایای این روش عددی، استفاده از پتانسیل فشار، بدون شبکه بودن فضای حل و سرعت بالای اجرای برنامه است [۱۵].

اغلب تحقیقات انجام شده برای شبیه‌سازی انتشار و تخمین بالاروی موج سونامی دوبعدی هستند. فرمول‌های تعیین بالاروی موج سونامی نیز مبتنی بر شبیه‌سازی‌های دوبعدی ارائه شده‌اند. لذا اعتبار این فرمول‌ها برای شرایطی که شکل ساحل از حالت تخت، عمود بر انتشار موج خارج می‌گردد، قابل تأمل است. این در حالی است که بسیاری از مراکز با اهمیت ساحلی شامل تجمع انسانی و یا صنعتی، در داخل خلیج‌ها و یا دلتاهای رودخانه‌ها قرار دارند که دارای یک فرورفتگی قابل ملاحظه در ساحل می‌باشند.

در تحقیق حاضر به منظور تعیین اثر شکل ساحل، با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM انتشار و بالاروی موج سونامی در نزدیکی ساحل به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. در این تحقیق در ابتدا، برای تعیین صحت نتایج، انتشار موج تنها در اطراف یک جزیره به شکل مخروط ناقص شبیه‌سازی گشته و نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط چوی و همکاران (۲۰۰۷) مقایسه گردیده‌اند. سپس به بررسی نقش شکل ساحل در میزان بالاروی موج روی شیب ساحل پرداخته شده است. بدین منظور با در نظر گرفتن چند حالت منطقی برای شکل ساحل نظیر ساحل تخت، ساحل با شکل همگرای V

^۲ Exponential Basis Function

^۱ Meshless

۳- معادله حاکم بر حرکت پدال موج‌ساز به منظور تولید موج تنها

با فرض پایدار بودن شکل موج تنها در طول فرآیند تولید، گورینگ^۳ فرمولی برای تعیین حرکت پدال موج‌ساز به منظور تولید موج تنها ارائه داده است [۱۸]. روند معمول تولید موج تنها شامل سرعت حرکت پدال در هر مکان و زمان به همراه متوسط سرعت ذرات افقی سیال در مجاورت پدال، \bar{u} ، برابر با سرعت پدال موج‌ساز به صورت زیر است.

$$\frac{d\xi}{dt} = \bar{u}(\xi, t) \quad (5)$$

در این رابطه $\xi(t)$ موقعیت پدال موج‌ساز در هر زمان است. با تغییر متغیر $X = (ct - \xi)$ در رابطه قبل، رابطه زیر حاصل می‌گردد.

$$\frac{d\xi}{dX} = \frac{\bar{u}(X(\xi))}{c - \bar{u}(X(\xi))} \quad (6)$$

پارامتر \bar{u} به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\frac{d\xi}{dt} = \bar{u}(\xi, t) = \frac{c\eta(X)}{h + \eta(X)} \quad (7)$$

در این رابطه، η تغییر مکان سطح آزاد سیال و h عمق آب است. روش مرسوم جهت تعیین مشخصات موج تنهای تولید شده مبتنی بر معادله حرکت پدال موج‌ساز، روش بوسینسک است [۱۹]. جابجایی سطح آزاد سیال در این تئوری به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\eta = H \operatorname{Sech}^2(KX) \quad (8)$$

در این رابطه، K ضریب کاهنده مرزی، H ارتفاع موج و $X = (ct - \xi)$ می‌باشند. ضریب کاهنده مرزی به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$K = \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} \quad (9)$$

همچنین سرعت موج نیز در این تئوری به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$c = \sqrt{g(h+H)} \quad (10)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی انتشار موج تنها در اطراف یک جزیره به شکل مخروط ناقص

هنرمند و همکاران (۱۳۹۵) اعتبار نتایج نرم‌افزار OpenFOAM در تخمین بالاروی موج سونامی در حالت دوبعدی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی را مورد بررسی قرار دادند [۲۰].

سینماتیکی سیال، g شتاب گرانش زمین و h ارتفاع سیال از خط مبنا می‌باشند.

نرم‌افزار OpenFOAM نرم‌افزاری بسیار توانمند در شبیه‌سازی جریان با سطح آزاد است. این نرم‌افزار در سیستم عامل Linux قابل اجرا است و به صورت متن‌باز در اختیار پژوهشگران قرار گرفته است. زبان برنامه‌نویسی در این نرم‌افزار زبان C++ است. در نرم‌افزار OpenFOAM معادله پیوستگی به صورت رابطه (۱) و معادله غیرخطی اندازه حرکت به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۷].

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U}\vec{U}) - \nabla \cdot (\nu \nabla \vec{U}) = -\nabla p \quad (3)$$

الگوریتم مورد استفاده توسط نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM جهت گسسته‌سازی و حل معادلات حاکم، الگوریتم فشار ضمنی با تقسیم اوبراتور^۱ است. الگوریتم PISO یک روش موثر برای حل معادلات ناویر-استوکس در مسائل جریان ناپایا است. این الگوریتم بر پایه حل معادلات گسسته شده ناویر-استوکس و انجام یک سری عملیات به منظور از بین بردن اثرات خطی‌سازی استوار است. در این تحقیق جهت شبیه‌سازی در نرم‌افزار OpenFOAM از حل‌گر IHFOAM استفاده گردیده است. در نرم‌افزار OpenFOAM جهت نمایش سطح آزاد جریان از پارامتر alpha1 استفاده می‌گردد. در شبیه‌سازی نقاط درون سیال^a سطح آزاد، اگر سیال a را آب و سیال b را هوا فرض کنیم، مقدار alpha1 به صورت زیر است.

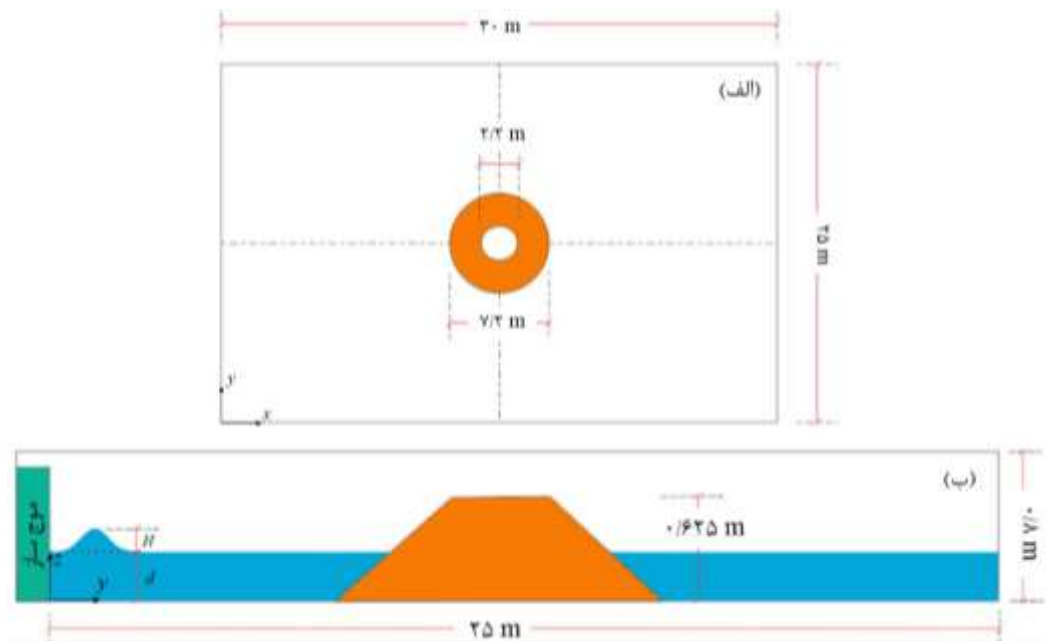
$$\alpha_1 = \frac{V_{fluid(a)}}{V_{cell}} = \begin{cases} 1 & \text{نقاط مشترک بین سیال a و b} \\ 0 < \alpha_1 < 1 & \text{نقاط درون سیال b} \\ 0 & \end{cases} \quad (4)$$

مقدار alpha1 در سلول‌هایی که سطح مشترک بین دو فاز از آن‌ها عبور می‌کند، بین صفر و یک است. شرایط مرزی حاکم بر شبیه‌سازی‌های انجام گرفته توسط نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM به صورت، شرط مرزی inlet برای مرز تولید موج تنها، شرط مرزی atmosphere برای مرز سطح آزاد سیال و شرط مرزی wall برای کلیه سطوح دیگر است. همچنین جهت ترسیم شکل ساحل، پس از ترسیم سه‌بعدی شکل ساحل در نرم‌افزار AutoCAD 3D و گرفتن خروجی stl. از جسم ترسیم شده، با معرفی این فایل به نرم‌افزار OpenFOAM و با استفاده از پوشه snappyHex MeshDict شکل ساحل مورد نظر ترسیم گردیده است.

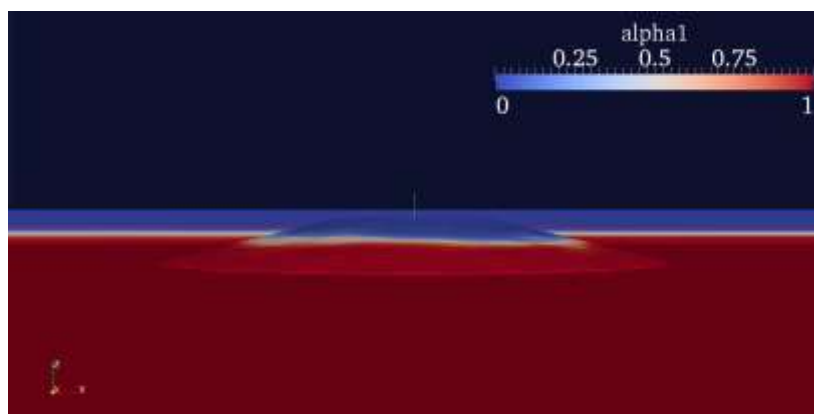
¹ Pressure Implicit with Splitting of Operator (PISO)

محور y و z و 80 شبکه در راستای محور x استفاده گردیده است. شماتیک هندسه کانال آزمایشگاه مورد استفاده در شکل (۱) قابل مشاهده است. در شکل (۲) تصویر تولید هندسه مخروط ناقص در نرم‌افزار OpenFOAM نمایش داده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی شامل ارتفاع سطح آزاد آب در اطراف مخروط ناقص در زمان‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی موجود در شکل (۳) مقایسه گردیده‌اند. در این شکل منحنی‌های هم‌تراز برای زمان‌های مختلف به صورت خط و مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی به صورت نقطه ارائه گردیده است. در این نمودارها هر منحنی نماینده ارتفاع سطح آزاد آب در اطراف مخروط ناقص است که از نتایج شبیه‌سازی بدست آمده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد،

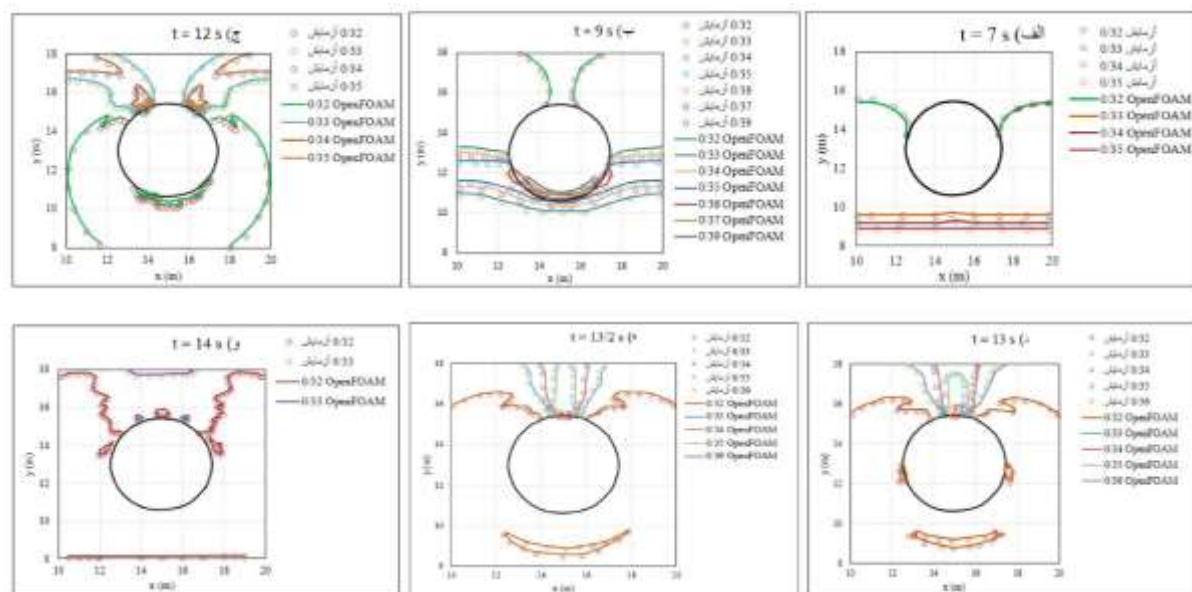
به منظور بررسی اعتبار نتایج شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی انتشار موج سونامی توسط نرم‌افزار، از مشخصات آزمایش طراحی شده توسط چوی و همکاران (۲۰۰۷) استفاده گردیده است. در این آزمایش از یک کانال آزمایش به طول 30 متر، عرض 25 متر و ارتفاع 0.8 متر که در مرکز آن یک مخروط ناقص با ارتفاع 0.625 متر و قطر کوچک $2/2$ متر و قطر بزرگ $7/2$ متر تعبیه شده است، استفاده گردیده است. در این آزمایش با تولید موج تنها با نسبت ارتفاع موج به عمق آب $(\frac{H}{d}) = 0.1$ در کانال آزمایشگاه با عمق آب $(d) = 0.32$ متر، ارتفاع سطح آزاد آب در زمان‌های مختلف در اطراف مخروط ناقص ترسیم گشته است. برای انجام این شبیه‌سازی از 2500 شبکه در راستای محور x ، 2500 شبکه در راستای



شکل (۱) تصویر شماتیک هندسه کانال آزمایش مورد استفاده در آزمایش چوی (۲۰۰۷)، (الف) پلان (ب) مقطع.



شکل (۲) تصویر حداکثر بالاروی موج تنها بر روی مخروط ناقص در نرم‌افزار OpenFOAM.



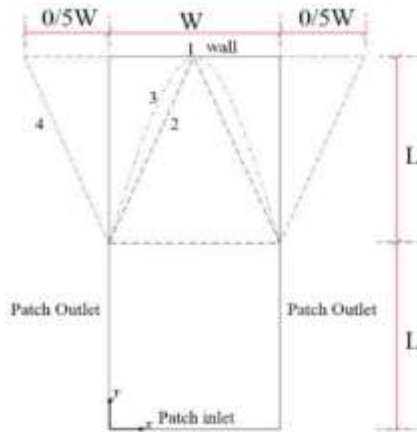
شکل (۳) مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی ارتفاع سطح آزاد آب اطراف مخروط ناقص در آزمایش چوی (۲۰۰۷)،

۰/۵ و ۱ و ۱/۵، میزان حساسیت این نسبت در میزان بالاروی موج تنها روی شیب ساحل بررسی گشته است. همچنین جهت بررسی اثر شکسته یا بدون شکست بودن موج تنها بر میزان بالاروی حداکثر موج تنها روی شیب ساحل، تمام شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در دو حالت موج بدون شکست با نسبت ارتفاع موج به عمق آب ۰/۱ و برای موج شکسته شده با نسبت ارتفاع موج به عمق آب ۰/۳ در دو حالت عمق آب ۱۰ متر و ۱۶ متر برای هر دو حالت، انجام گرفته‌اند. اشکال مختلف در نظر گرفته شده برای ساحل در شکل (۴) نمایش داده شده است. در این شکل ساحل تخت حالت ۱، ۷ شکل حالت ۲، شکل U همگرا و واگرا به ترتیب حالات ۳ و ۴ می‌باشند. در شکل (۵) شرایط مرزی مورد استفاده جهت شبیه‌سازی بالاروی موج روی شیب ساحل با شکل‌های متفاوت نشان داده شده است. در تمام شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای حالت موج بدون شکست از ۳۵۰۰ شبکه در راستای محور x ، ۵۰۰ شبکه در راستای محور y و ۷۰ شبکه در راستای محور z و برای حالت موج شکسته شده از ۴۵۰۰ شبکه در راستای محور x ، ۸۰۰ شبکه در راستای محور y و ۱۰۰ شبکه در راستای محور z استفاده گردیده است. نمادهای استفاده شده برای این قسمت شامل، W برای عرض دهانه ساحل، L برای طول ساحل و R برای میزان ارتفاع بالاروی حداکثر موج روی شیب ساحل نسبت به ارتفاع ساکن اولیه سطح آزاد آب d ، می‌باشند.

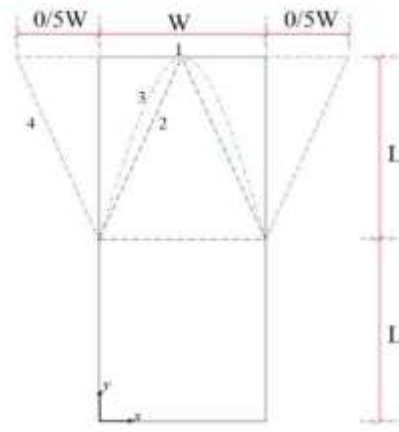
نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی به نتایج آزمایشگاهی موجود بسیار نزدیک می‌باشند و انتشار موج تنها به عنوان نماینده موج سونامی اطراف جزیره به شکل مخروط ناقص با استفاده از نرم‌افزار متن باز OpenFOAM بسیار دقیق شبیه‌سازی گردیده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی بالاروی موج تنها روی شیب ساحل با شکل‌های متفاوت

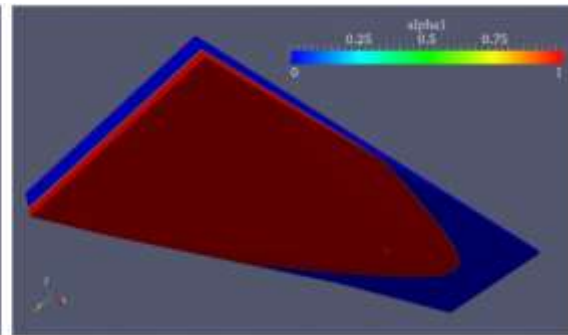
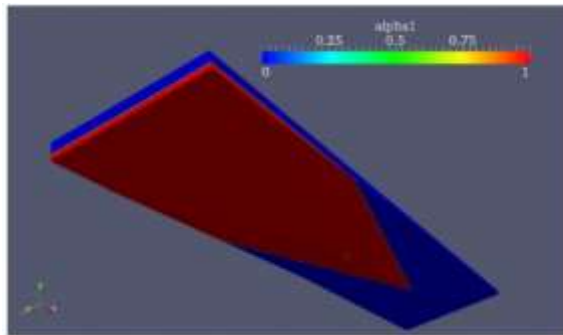
پس از حصول اطمینان از نتایج نرم‌افزار، به منظور بررسی نقش شکل ساحل در میزان بالاروی موج روی شیب ساحل، با در نظر گرفتن چند حالت منطقی برای شکل ساحل نظیر ساحل تخت، ساحل با شکل همگرای ۷ شکل، ساحل با شکل همگرای U شکل و ساحل با شکل واگرا شبیه‌سازی‌های متعددی با در نظر چندین حالت برای شیب ساحل و نسبت ارتفاع موج به عمق آب در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای دو حالت خلیج کوچک مقیاس و خلیج بزرگ مقیاس با ابعاد مشابه ابعاد خلیج چابهار به عنوان یکی از مهمترین خلیج‌ها و بنادر اصلی اقتصادی کشور که در معرض خطر سونامی قرار دارد، در نظر گرفته شده‌اند. در حالت خلیج کوچک مقیاس، طول ساحل ۵۰۰ متر و شیب ساحل ۱:۲۵ و در حالت خلیج بزرگ مقیاس طول ساحل ۲۱۰۰۰ متر و شیب ساحل ۱:۱۰۰۰ می‌باشند. در تمام شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با در نظر گرفتن سه مقدار برای نسبت عرض دهانه ورودی ساحل به طول ساحل



شکل (۵) شرایط مرزی مورد استفاده جهت شبیه‌سازی بالاروی موج روی شیب ساحل با شکل‌های متفاوت.



شکل (۴) اشکال هندسی مختلف در نظر گرفته شده برای شکل ساحل.



شکل (۶) تصویر شبیه‌سازی شکل ساحل همگرای V و U شکل در نرم‌افزار OpenFOAM.

۵-۱- مدل کوچک مقیاس

نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای محاسبه بیشترین میزان بالاروی موج روی شیب ساحل با اشکال مختلف برای حالت موج تنهای بدون شکست برای خلیج کوچک مقیاس در جدول (۱) و برای حالت موج تنهای شکسته شده در جدول (۲) ارائه گردیده‌اند.

جدول (۱) نسبت بیشترین میزان بالاروی موج روی شیب ساحل (R/d) برای حالت موج تنهای بدون شکست برای خلیج کوچک

$$\text{مقیاس } (d = 10m, \frac{H}{d} = 0.1, L = 500m)$$

$\frac{W}{L} = 1.5$	$\frac{W}{L} = 1$	$\frac{W}{L} = 0.5$	شکل ساحل
0.485	0.485	0.485	ساحل تخت (۱)
0.62	0.65	0.75	ساحل همگرای V شکل (۲)
0.51	0.55	0.72	ساحل همگرای U شکل (۳)
0.2	0.285	0.45	ساحل واگرا (۴)
0.48			فرمول حاکم بر انتشار دوبعدی موج تنها [۱۵]

همچنین در تمام اشکال و نمودارها، محورها به صورت دو نسبت بی‌بعد $\frac{R}{d}$ و $\frac{W}{L}$ در نظر گرفته شده‌اند. در شکل (۶) تصویر شبیه‌سازی شکل ساحل همگرای V شکل و U شکل در نرم‌افزار OpenFOAM به صورت نمونه نمایش داده شده‌اند. در تمام حالات موج عمود بر راستای دهانه تابیده می‌شود.

جهت بررسی اختلاف نتایج روابط موجود برای تخمین بالاروی که مبتنی بر آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های دوبعدی است، نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی با مقادیر حاصل از یکی از جدیدترین روابط مذکور نیز مقایسه شده است [۱۵]. این رابطه به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$\frac{R}{d} = 2.19(\cot \beta)^{0.273} \left(\frac{H}{d}\right)^{1.04} \quad (11)$$

در این رابطه β زاویه شیب ساحل است. سایر پارامترها مشابه پارامترهای معرفی شده در این مقاله تعریف می‌شوند. لازم به توضیح است که رابطه (۱۱) برای امواج بدون شکست معتبر است.

همچنین سواحل V شکل بیشترین میزان بالاروی موج نسبت به اشکال دیگر برای ساحل را دارند و در حالت شکست موج تنها نسبت به حالت موج تنهای بدون شکست، بالاروی موج روی شیب ساحل بیشتر است. دلیل این امر را می توان بدین صورت استنباط نمود که هر چه دهانه ورودی ساحل میزان و رشد همگرایی بیشتری داشته باشد، حجم سیال ورودی به سمت ساحل در محدوده کوچکتری وارد می گردند و این امر باعث افزوده شدن ارتفاع موج می گردد. همچنین در حالتی که موج دارای شکست است، انرژی موج نسبت به حالت بدون شکست موج بیشتر است و باعث افزایش میزان بالاروی موج می گردد. از نتایج قابل توجه این مقایسه، تخمین نسبتاً درست رابطه مبتنی بر انتشار دوبعدی در حالت بدون شکست برای ساحل تخت است (۰/۴۸ در مقابل ۰/۴۸۵). حال آنکه این تخمین در مورد موج شکسته برای ساحل تخت با خطای فاحش می گردد (۱/۵۰۷ در مقابل ۰/۸۵) که نشان دهنده اعتبار رابطه صرفاً برای امواج شکسته است. اختلاف نتایج سواحل تخت و سواحل با اشکال مختلف تا حدود ۱۰۰٪ نشان می دهد که از نتایج انتشار دوبعدی برای شرایط سه بعدی که شکل ساحل از حالت تخت فاصله می گیرد، باید احتیاط لازم صورت گیرد.

۵-۲- مدل بزرگ مقیاس

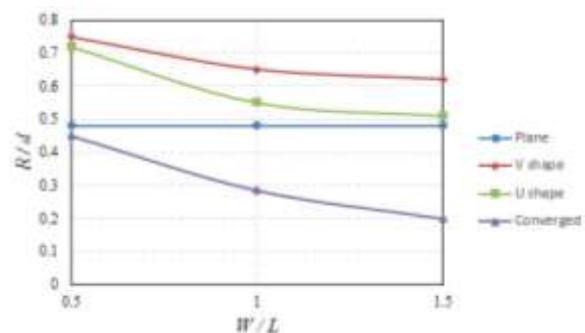
نتایج حاصل از شبیه سازی در حالت موج تنهای شکسته شده و موج تنهای بدون شکست در جدول (۳) ارائه گردیده اند. در این جدول همچنین نتایج برای ابعاد واقعی خلیج چابهار نیز ارائه گردیده است. در شکل (۹) تصویر شبیه سازی انتشار موج در خلیج چابهار با توپوگرافی بستر نسبتاً دقیق همراه با شرایط مرزی مورد استفاده نمایش داده شده اند. همان گونه که از جدول (۳) ملاحظه می گردد، میزان بالاروی برای ساحل V شکل حداکثر است. میزان بالاروی بدست آمده در شبیه سازی واقعی خلیج چابهار نسبت به شبیه سازی ساده سازی شده تخت بیش از ۱۶ درصد بیشتر است. همچنین ملاحظه می گردد که مقدار بدست آمده از فرمول حاکم بر انتشار دوبعدی موج تنها با دیگر نتایج اختلاف زیادی دارد. دلیل این امر در زیاد بودن شیب ساحل در مدل بزرگ مقیاس است که در حدود ۱:۱۰۰۰ مطابق ابعاد خلیج چابهار است، در صورتیکه فرمول حاکم بر انتشار دوبعدی موج تنها برای شیب های در حدود ۱:۲۰ حاکم است [۱۵].

جدول (۲) نسبت بیشترین میزان بالاروی موج روی شیب ساحل (R/d) برای حالت موج تنهای شکسته شده برای خلیج کوچک

$$\text{مقیاس } (d = 10m, \frac{H}{d} = 0.3, L = 500m)$$

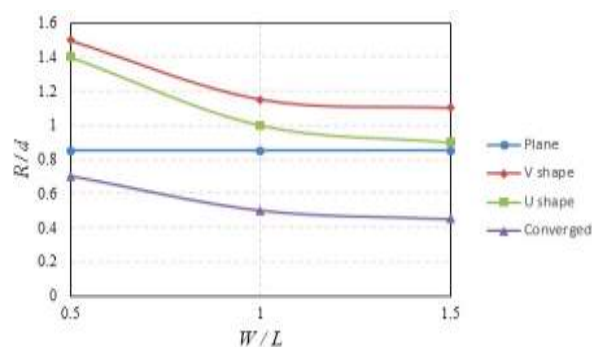
شکل ساحل	$\frac{W}{L} = 0.5$	$\frac{W}{L} = 1$	$\frac{W}{L} = 1.5$
ساحل تخت (۱)	0.85	0.85	0.85
ساحل همگرایی V شکل (۲)	1.5	1.15	1.1
ساحل همگرایی U شکل (۳)	1.4	1	0.9
ساحل واگرا (۴)	0.7	0.5	0.45
فرمول حاکم بر انتشار دوبعدی موج تنها [۱۵]	1.507		

همچنین جهت مقایسه هر چه بهتر نتایج ارائه شده در جداول (۱) و (۲) و مشاهده اثر نسبت عرض دهانه ورودی ساحل به طول ساحل بر میزان بالاروی حداکثر موج روی ساحل با اشکال مختلف، در شکل های (۷) و (۸) نمودار نتایج این دو جدول ترسیم گشته اند. همان گونه که از نتایج ارائه شده در جداول (۱) و (۲) و شکل ها مشاهده می گردد، هر چه نسبت عرض دهانه ورودی ساحل به طول ساحل بیشتر باشد، میزان بالاروی موج روی شیب ساحل کمتر است.



شکل (۷) نمودار تغییرات نسبت بالاروی در نسبت های مختلف

$$\text{عرض به طول خلیج } (d = 10m, \frac{H}{d} = 0.1, L = 500m)$$



شکل (۸) نمودار تغییرات نسبت بالاروی در نسبت های مختلف

$$\text{عرض به طول خلیج } (d = 10m, \frac{H}{d} = 0.3, L = 500m)$$

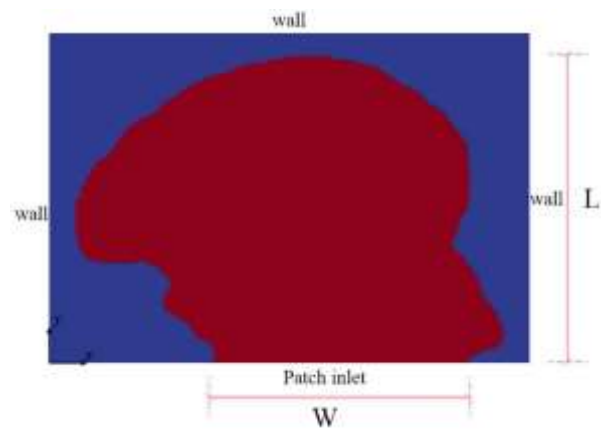
جدول (۳) نسبت بیشترین میزان بالاروی موج روی شیب ساحل (R/d) برای حالت موج تنهای شکسته شده و موج تنهای بدون

شکست برای خلیج بزرگ مقیاس ($d = 16m, W = 18000m, L = 21000m, \frac{W}{L} = 0.85$).

شکل ساحل	$\frac{H}{d} = 0.1$ (بدون شکست)	$\frac{H}{d} = 0.3$ (شکسته)
ساحل تخت (۱)	0.036	0.165
ساحل همگرای V شکل (۲)	0.046	0.195
ساحل همگرای U شکل (۳)	0.044	0.182
ساحل واگرا (۴)	0.031	0.144
خلیج چابهار با توپوگرافی نسبتاً دقیق	0.043	0.21
فرمول حاکم بر انتشار دوبعدی موج تنها [۱۵]	1.136	4.127

سطح آزاد آب در اطراف مخروط ناقص به بررسی نقش شکل ساحل در میزان بالاروی موج روی شیب ساحل پرداخته شده است. بدین منظور با در نظر گرفتن چند حالت متعارف برای شکل ساحل نظیر ساحل تخت، ساحل با شکل همگرای V شکل، ساحل با شکل همگرای U شکل و ساحل با شکل واگرا شبیه‌سازی‌های متعددی با در نظر چندین حالت برای شیب ساحل و نسبت ارتفاع موج به عمق آب در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای دو حالت خلیج کوچک مقیاس و خلیج بزرگ مقیاس در نظر گرفته شده‌اند. همچنین شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در دو حالت موج بدون شکست و موج شکسته شده انجام گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند هرچه نسبت عرض دهانه ورودی ساحل به طول ساحل بیشتر باشد، میزان بالاروی موج روی شیب ساحل کمتر است. همچنین سواحل همگرای V شکل دارای بیشترین میزان بالاروی موج و سواحل واگرا دارای کمترین میزان بالاروی موج نسبت به اشکال دیگر برای ساحل می‌باشند، همچنین در حالت شکست موج تنها نسبت به حالت موج تنهای بدون شکست، بالاروی موج روی شیب ساحل با هر شکل بیشتر است. جهت بررسی میزان اعتبار بیشترین میزان بالاروی موج تنها روی شیب ساحل تخت مبتنی بر شبیه‌سازی‌های دوبعدی و نتایج آزمایشگاهی در کانال، میزان بیشترین بالاروی موج تنها در تمام شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با یکی از روابط به‌روز ارائه شده توسط زندی و همکاران (۲۰۱۷) جهت محاسبه بیشترین میزان بالاروی موج تنها روی شیب ساحل تخت در حالت دوبعدی مقایسه گشته است.

با مشاهده نتایج می‌توان مشاهده نمود که استفاده از روابط حاکم بر انتشار دوبعدی موج تنها به هیچ وجه قابل اعتماد



شکل (۹) تصویر شبیه‌سازی انتشار موج در خلیج چابهار همراه با شرایط مرزی مورد استفاده.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

سواحل جنوبی کشور ایران نیز در معرض خطر امواج سونامی ناشی از لغزش افتادگی مکران قرار دارند. شناخت رفتار امواج سونامی از طریق شبیه‌سازی این امواج به روش‌های عددی و آزمایشگاهی معمولاً به صورت دوبعدی انجام می‌گیرد. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی متن‌باز OpenFOAM انتشار و بالاروی موج سونامی در نزدیکی ساحل با اشکال مختلف هندسی با استفاده از موج تنها به عنوان تخمینی از موج سونامی به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی گردیده است.

در ابتدا انتشار موج تنها در اطراف یک جزیره به شکل مخروط ناقص شبیه‌سازی گردیده و نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود ارائه شده توسط چوی و همکاران (۲۰۰۷) مقایسه گردید. پس از مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی و حصول اطمینان از توانایی بسیار بالای نرم‌افزار OpenFOAM در تعیین ارتفاع

Army Corps of Engineers. Army Coastal Engineering Research Center. Washington, D.C, Technical Memorandum, Vol.33, pp.1-14, 1953.

[7] Wu, N., Tsay, T., and Chen, Y., "Generation of Stable Solitary Waves by a Piston-Type Wave Maker", *Wave Motion*, Vol.51, pp.240-255, 2015.

[8] Synolakis, C.E., "The Runup of Solitary Wave", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.185, pp.523-545, 1987.

[9] Zelt, J.A., "The Run-up of Non-Breaking and Breaking Solitary Waves", *Coastal Engineering*, Vol.15, pp. 205-246, 1991.

[10] Choi, B.-H., Kim, D. C., Pelinovsky, E., Woo, S. B., "Three-Dimensional Simulation of Tsunami Run-up Around Conical Island", *Coastal Engineering*, Vol.54, pp.618-629, 2007.

[11] Baldock, T.E., Barnes, M.P., Guard, P.A., Hie, T., "Modelling Tsunami Inundation on Coastlines with Characteristic Form", 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, Crown Plaza, Gold Coast, Australia, pp.2-7, 2007.

[12] Higuera, P., Lara, J.L., Losada, I.J., "Simulating Coastal Engineering Processes with OpenFOAM", *Coastal Engineering*, Vol.71, pp.119-134, 2013.

[13] Higuera, P., Lara, J.L., Losada, I.J., "Three-Dimensional Intraction of Waves and Porous Coastal Structures using OpenFOAM. Part I: Formulation and Validation", *Coastal Engineering*, Vol.83, pp.243-258, 2014.

[14] Higuera, P., Lara, J.L., Losada, I.J., "Three-Dimensional Intraction of Waves and Porous Coastal Structures using OpenFOAM. Part II: Applications", *Coastal Engineering*, Vol.83, pp.259-270, 2014.

[15] Zandi, S.M., Rafizadeh, A., Shانهساززاده, A., "Numerical Simulation of Non-breaking Solitary Wave Run-up using Exponential bBsis Functions", *Environ Fluid Mech*, 2017.

[16] Li, W.-I., Lam, S.-H., "Principles of Fluid Mechanics", 1964.

[22] FLOW-3D user Manual (Version 9.3), Flow Science Inc, 2008.

[17] OpenFOAM Programmer's Guide, Version 2.1.1, 16th May 2012.

[18] Goring, D.G., "Tsunamis — the Propagation of Long Waves on to a Shelf", Report No. KH-R-38, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, Californi Institute of Technology, Pasadena, CA, pp.763-784, 1978.

[19] Boussinesq, M.J., "Théorie de l'intumescence liquide, Appelée Onde Solitaire ou de Translation, se Propageant Dans un Canal Rectangulaire", C. R. Academic Science Paris, Vol.72, pp.755-759, 1871.

[20] هنرمند، م.، شانهساززاده، ا.، زندی، م.، "شبیه‌سازی عددی دوبعدی شکست موج تنها در نزدیکی ساحل با استفاده از نرم‌افزار متن باز OpenFOAM"، پانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ۲۴ و ۲۵ آذر ۱۳۹۵.

برای حالت انتشار سه‌بعدی نمی‌باشند و تخمین‌ها دست‌پایین می‌باشند. میزان اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی و نتایج بدست آمده از روابط بالاروی، برای موج بدون شکست تا ۳۶ درصد و برای موج شکسته شده تا ۷۰ درصد هم می‌رسد. استفاده از نتایج بالاروی موج از رابطه مبتنی بر انتشار دوبعدی برای خلیج چابهار خطایی در حدود ۱۰۰ درصد دارد. لذا استفاده از روابط حاکم بر انتشار دوبعدی دارای خطای زیاد و در اغلب موارد منجر به تخمین‌های دست پایین می‌گردد. این مقایسه نشان می‌دهد با تغییر شکل ساحل و تبدیل انتشار دوبعدی موج به انتشار سه‌بعدی، تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان بالاروی حداکثر موج روی شیب ساحل صورت می‌گیرد که در پیش‌بینی بالاروی امواج سونامی باید مد نظر قرار گیرد. علاوه بر آن، در نظر گرفتن شکل واقعی ساحل در شبیه‌سازی سه‌بعدی منجر به نتایج دقیق‌تری می‌گردد.

۷- سپاسگزاری

از مهندس امین رفیع‌زاده دانشجوی دکتری سازه دانشگاه اصفهان، جهت همکاری در برنامه‌نویسی حل معادله دیفرانسیل گورینگ حاکم بر حرکت پدال موج‌ساز با استفاده از نظریه بوسینسک تشکر و قدرانی می‌شود.

۸- مراجع

[1] جامی، م.؛ رادان کوهپایی، م.؛ میرزینلی یزدی، ح.؛ کاظمی، ع.، "هندسه فرکتالی گسل‌ها و لرزه‌خیزی در جنوب شرق ایران (مکران)"، اولین همایش ملی توسعه سواحل مکران و اقتدار دریایی جمهوری اسلامی ایران. بهمن ۱۳۹۱.

[2] Madsen, P.A., Fuhrman, D.R., Schaffer, H.A., "on the Solitary Wave Paradigm for Tsunamis" *J. of Geophysical Research*, Vol. 113, pp.1-15, 2008.

[3] Hammack, J.L., and Segur, H., "The Korteweg-de Vries Equation and Water Waves, Part 2". Comparison with Experiments, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 65, pp 289-314, 1987.

[4] Russell, J. S., "Report on Waves". Proc. 14th Meeting of British Association for the Advancement of Science. John Murray. London, pp.311-390, 1845.

[5] Kishi, T.; and Saeki, H., "The Shoaling, Breaking, and Runup of the Solitary Wave on Impermeable Rough Slopes", Proc. 10th Coastal Engineering Conf. Tokyo, ASCE. pp.322-348, 1966.

[6] Hall, J. V.; and Watts, J. W., "Laboratory Investigation of the Vertical Rise of Solitary Waves on Impermeable Slopes", Tech Memo 33. Beach Erosion Board. Office of the Chief of Engineers. U.S.