یادداشت فنی

شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی تولید و انتشار موج سونامی ناشی از لغزش صفحات مکران و تخمین بالاروی موج در خلیج چابهار و سواحل مکران

مسیح هنرمند[۱] ، احمد شانه‌ساززاده[۲*] ، سید مهدی زندی[۳]

[۱] کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه اصفهان، honarmand.masih@yahoo.com
[۲*] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir
[۳] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، s.m.zandi@eng.ui.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۵

کلمات کلیدی:
سونامی
فرو افتادگی مکران
خلیج چابهار
الگوریتم اوکادا
Flow 3D

چکیده

فرورانش مکران در شمال‌غرب اقیانوس هند و در مجاورت سواحل جنوبی ایران و پاکستان منشاء ایجاد سونامی در سواحل جنوبی ایران است. در این تحقیق با در نظر گرفتن بزرگا و عمق‌کانونی زلزله سال ۱۹۴۵ میلادی مکران، ابتدا موج سونامی اولیه بر اساس الگوریتم پیشرفته اوکادا تولید و سپس گسترش این موج در دریای عمان به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D در دو مرحله‌ی سراسری و منطقه‌ای شبیه‌سازی شده است. بر اساس نتایج مدل سراسری، زمان گسترش موج و میزان بالاروی آن در بنادر اصلی اقیانوس هند و شمال دریای عمان برآورد گردیده است که با اطلاعات تاریخی موجود سازگاری منطقی دارد. رویکرد اتخاذ شده در این مقاله شامل تولید دقیق موج سونامی با استفاده از الگوریتم اوکادا و شبیه سازی سه بعدی انتشار در دو مرحله سراسری و منطقه ای، یک راه حل قابل اطمینان برای تخمین بالاروی موج سونامی در سواحل کشور در اثر سناریوهای مختلف فرو نشست مکران ارائه می دهد.

Three Dimensional Numerical Simulation of Tsunami Generation and Propagation Due to Makran Subduction and run-up on Chabahar Bay and Makran Coasts

Masih Honarmand[1], Ahmad shanehsazzadeh[2*], Seyed Mahdi Zandi[3]

[1] Postgraduate Student in Water and Hydraulic Structures, Department of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan; honarmand.masih@yahoo.com
[2] Assistant professor, Department of Civil Engineering, University of Isfahan; a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir*
[3] Assistant professor, Department of Civil Engineering, University of Isfahan; s.m.zandi@eng.ui.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 10 Jul. 2018
Accepted: 26 Jun. 2019

Keywords:
Tsunami
Makran Subduction
Chabahar Bay
OKADA Algorithm
Flow 3D

ABSTRACT

Makran subduction located at the northwest of the Indian Ocean nearby the southern coast of Iran and Pakistan. Makran subduction is the source of tsunamis that threaten southern coast of Iran. In this article, generation and propagation of 1945's tsunami initiated by Makran subduction is simulated. For the three dimensional generation of the wave, advanced algorithm of Okada is adopted. The CFD based software of Flow 3D is applied for global and regional numerical simulation of tsunami wave propagation. In the first stage the 3D propagation of the wave in Oman sea and Indan Ocean is simulated. The presented approach in this paper including the accurate 3D generation of the tsunami wave using the Okada algorithm and two stages propagation in the global and regional models results in a more accurate results in terms of time duration and tsunami wave run-up.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.3.1]

۱ - مقدمه

در پی وقوع سونامی‌های عظیم و هولناک در سال‌های اخیر که خسارات وصف‌ناپذیری را بر جوامع انسانی تحمیل کرد، بررسی وقوع احتمالی سونامی و اتخاذ پیش‌بینی‌های لازم بیش از هر زمان دیگری ضروری به نظر می‌رسد. مهم‌ترین عامل ایجاد سونامی وقوع زمین‌لرزه در نواحی فرورانش یا همان مرز صفحات تکتونیک پوسته‌ی زمین است. یکی از نواحی فرورانش زمین به نام مکران، در شمال غرب اقیانوس هند و در مجاورت سواحل جنوبی ایران و پاکستان، در اثر برخورد صفحه‌ی عربی به صفحه‌ی اوراسیا شکل گرفته و از نزدیکی تنگه‌ی هرمز تا کراچی به طول تقریبی ۹۰۰ کیلومتر امتداد یافته است. مجموعه‌ی اطلاعات به دست آمده از شواهد تاریخی، از وقوع سونامی‌های لرزه‌ای در ناحیه‌ی فرورانش مکران در گذشته و احتمال وقوع آنها در آینده حکایت دارد. برجسته‌ترین این موارد به زلزله و سونامی همراه آن در سال ۱۹۴۵ مربوط می‌شود که حداقل ۴۰۰۰ کشته در سواحل پاکستان، هند، ایران و عمان بر جای گذاشت. زلزله‌ی رخ داده در سال ۱۹۴۵ در اثر لغزش صفحات مکران در بستر اقیانوس هند دارای بزرگای ۸/۱ ریشتر و عمق کانونی ۱۵ کیلومتر بوده است که محل وقوع آن در طول جغرافیایی ۶۳/۶۰۱ درجه و عرض جغرافیایی ۲۴/۹۲۷ گزارش گردیده است [۱و۲و۳].

موضوع حائز اهمیت در شبیه سازی تولید و انتشار موج سونامی، تقریب دقیق پروفیل موج سونامی تولید شده در دریا در اثر حرکت صفحات بستر دریا بر روی یکدیگر می‌باشد. برای اولین بار جان اسکات را سل (۱۸۳۴) موج تنها[1] با طول موج بینهایت را به عنوان تخمینی برای موج سونامی معرفی نمود [۴]. موج تنها در بسیاری از تحقیقات انجام شده به منظور بررسی انتشار سونامی و تخمین میزان بالاروی مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. با این وجود اخیراً محققین استفاده از موج تنها برای معادل سازی سونامی را مورد تشکیک قرار داده اند [۶].

باید توجه داشت که در زمان وقوع سونامی بر اثر وقوع زلزله در بستر دریا و حرکت صفحات بستر دریا بر روی یکدیگر، موج تولید شده در ابتدا نیم‌رخ سه‌بعدی داشته و گسترش آن نیز در ابتدای شروع گسترش موج به صورت سه‌بعدی و در تمام جهت‌ها است. به همین دلیل موج تنها به دلیل ماهیت دو بعدی و انتشار در راستای تولید خود و عدم گسترش در جهات مختلف، نمی‌توانند نماینده‌ی موج سونامی به صورت واقعی باشند. لذا لازمست با در نظر گرفتن نیم‌رخ سطح آزاد آب به صورت سه‌بعدی برای نمایش نیم‌رخ موج سونامی در لحظه‌ی وقوع زلزله، به این موج اجازه‌ی گسترش در همه‌ی جهت‌ها داده شود [۱].

جهت تعیین پروفیل اولیه موج سونامی در محل تولید، ابتدا تعیین تغییر شکل بستر دریا در اثر وقوع زلزله با بزرگا و فاصله‌ی کانونی مشخص از بستر دریا ضروری است. سپس با استفاده از روابط ریاضی حاکم بر اندرکنش سیالات و جامدات در تئوری مکانیک محیط‌های پیوسته، رابطه‌ای میان نیم‌رخ سطح آزاد آب در اثر تغییر شکل بستر دریا در اثر وقوع زلزله بدست می‌آید. نتیجه‌ی پژوهش های انجام شده در این راستا، منجر به ارائه روابطی شده است که با مشخص بودن بزرگای زلزله و همچنین عمق کانونی زلزله از بستر دریا، نیم‌رخ سه‌بعدی موج حاصل شده روی سطح آزاد جریان در اثر تغییر شکل بستر را مشخص نماید و این موج می‌تواند به صورت آزاد به تمام جهت‌ها گسترش یابد. اوکادا (۱۹۸۵) با استفاده از حل معادله‌ی حاکم بر تغییر شکل نیم فضای همگن الاستیک و همچنین در نظر گرفتن اثر روابط تعادل برای حرکت صفحات بستر دریا بر روی یکدیگر در اثر زلزله، روابطی جهت محاسبه‌ی تغییر شکل بستر دریا در اثر وقوع زلزله در عمق کانونی مشخص و با مشخص بودن میزان جابجایی و زاویه‌ی حرکت صفحات گسل بر روی یکدیگر، ارائه نمود. این روابط قادر خواهند بود میزان جابجایی هر نقطه از بستر دریا در سه راستای مختصات دکارتی در اثر وقوع انواع لغزش ها را محاسبه نمایند. همچنین وی روابطی جهت محاسبه‌ی کرنش بوجود آمده در نقاط مختلف گسل ایجاد شده در بستر دریا ارائه نمود [۷و۸]. حیدرزاده و همکاران (۲۰۰۸) با مدل سازی سونامی محتمل در سواحل جنوبی ایران در حاشیه‌ی اقیانوس هند، با به کار بردن الگوریتم مانسینها و اسمالی [۷و۹] به منظور محاسبه‌ی نیم‌رخ اولیه‌ی موج سونامی ناشی از زلزله در بستر دریا، واقعه‌ی سونامی رخ داده در اقیانوس هند و در اثر گسل مکران در سال ۱۹۴۵ را با استفاده از نرم‌افزار Tunami که به حل معادله‌ی پیوستگی و معادله‌ی حاکم بر آب کم عمق می‌پردازد، گسترش موج سونامی را مورد مطالعه قرار دادند [۳]. اکبرپور جنت و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر انتشار موج ناشی از گسل مکران و وقوع زلزله با بزرگاهای مختلف در طول گسل مکران را بر بندر جاسک مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از نرم‌افزار GEOWAVE به منظور شبیه‌سازی انتشار موج سونامی استفاده شده است و برای هر بزرگای زلزله، تغییرات ارتفاع موج در بندر جاسک گزارش شده است [۱۰]. همچنین وی در تحقیقی دیگر (۲۰۱۷) به بررسی تأثیر انتشار موج سونامی ناشی از لغزش صفحات مکران بر خلیج چابهار پرداخت. در این تحقیق فرض شده است طول پروفیل اولیه‌ی موج سونامی برابر طول گسل مکران می‌باشد و پس از شبیه‌سازی انتشار موج در خلیج چابهار در چندین نقطه اطراف خلیج چابهار بالاروی موج محاسبه و گزارش شده است [۱۱]. در تحقیق مذکور و اکثر تحقیق‌های انجام شده بر روی سونامی ناشی از گسل مکران، تغییر شکل بستر و موج سونامی تولید شده با دقت کافی شبیه سازی نشده است. همچنین، جهت بررسی انتشار و بالاروی موج سونامی ناشی از گسل مکران، توپوگرافی بستر خلیج و همچنین توپوگرافی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.3.1]

ساحل خلیج چابهار با دقت کافی به مدل عددی معرفی نشده و لذا نتایج حاصل شده اطمینان بخش نمی‌باشند. در این تحقیق تغییر شکل بستر دریا با استفاده از الگوریتم اوکادا شبیه سازی شده است. سپس با کاربرد نرم افزار Flow 3D با در نظر گرفتن یک مدل سراسری شامل توپوگرافی اقیانوس هند در اطراف گسل مکران جهت شبیه سازی انتشار موج سونامی تا رسیدن به ابتدای خلیج چابهار و یک مدل منطقه‌ای شامل توپوگرافی نسبتاً دقیق بستر خلیج چابهار جهت شبیه سازی انتشار موج داخل خلیج، دقت شبیه‌سازی انتشار موج در خلیج چابهار افزایش یافته است. همچنین در اکثر تحقیق‌های انجام شده، به جهت افزایش سرعت حل روش عددی، به حل معادله‌ی حاکم بر آب کم عمق در کنار معادله‌ی پیوستگی[۲] پرداخته می‌شود. در این تحقیق با حل دقیق تر معادله‌ی پیوستگی و معادلات ناویر – استوکس[۳]، انتظار می‌رود دقت حل معادلات به مراتب افزایش یابد. همچنین در این تحقیق با استفاده از مدل محلی با شبکه‌ی ریزتر و استفاده از توپوگرافی دقیق‌تر سعی شده است دقت انتشار موج در خلیج چابهار و تخمین بالاروی موج در بندر چابهار و بندر کنارک از تحقیق‌های گذشته افزایش یابد.

۲- تولید موج اولیه‌ی سونامی با استفاده از الگوریتم OKADA

مهمترین عامل ایجاد سونامی در اقیانوس‌ها، تولید زلزله در زیر بستر اقیانوس و در اثر آن حرکت صفحات گسل بستر دریا بر روی یکدیگر و تغییر شکل بستر اقیانوس می‌باشد. به دلیل تراکم‌ناپذیر بودن آب، تغییر شکل کف بستر اقیانوس به سطح آزاد آب منتقل شده و موج اولیه‌ی سونامی تشکیل می‌گردد و در اثر شتاب ثقل زمین این موج منتشر می‌گردد. اوکادا الگوریتمی جهت محاسبه‌ی تغییر شکل سه‌بعدی کف بستر دریا در اثر وقوع زلزله با بزرگا و عمق کانونی مشخص ارائه نمود. با استفاده از این الگوریتم، تغییر شکل هر نقطه با مختصات مشخص در بستر اقیانوس در هر جهت مختصاتی قابل محاسبه است. [۸]. لازم به ذکر است در شبیه سازی‌های انتشار سونامی ناشی از لغزش صفحات زیر بستر دریا و استفاده از الگوریتم‌هایی که میزان جابجایی بستر اقیانوس را با در اختیار داشتن بزرگا و عمق کانونی زلزله تعیین می‌نمایند، میزان جابجایی بستر اقیانوس در راستای قائم مورد استفاده قرار می‌گیرد و میزان جابجایی بستر اقیانوس در راستاهای افقی حائز اهمیت کمتری است. دلیل این امر، پهناور بودن بستر اقیانوس در حدود چند صد کیلومتر و در مقابل آن جابجایی بستر اقیانوس در محل رخداد زلزله در حدود چند متر می‌باشد که قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.

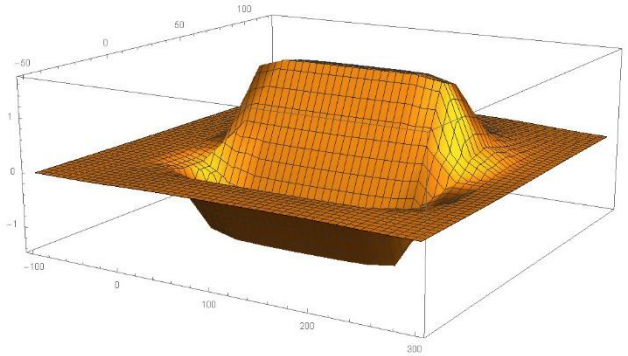
۳ - معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال و شبیه سازی انتشار سونامی در نرم‌افزار Flow 3D

نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی مدل Flow 3D توانایی بالایی در شبیه سازی جریان آب، انتقال رسوب و آبشستگی دارد و مدل مناسبی برای شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی است. نرم‌افزار Flow 3D نرم‌افزاری توانمند در شبیه‌سازی اندرکنش سیال و سازه نیز هست. در حالت کلی معادلات حاکم بر جریان سیالات شامل معادله‌ی پیوستگی و معادلات ناویر- استوکس می‌باشند [۱۲]. نرم‌افزار Flow 3D کاربرد فراوانی در شبیه‌سازی حرکت سیال با سطح آزاد دارد [۱۰]. اعتبار نتایج نرم‌افزار در انتشار و بالاروی موج در مراجع مختلف مورد تایید قرار گرفته است [۵و۱۳].

۴- نتایج شبیه سازی انتشار موج سونامی ناشی از لغزش صفحات مکران در اقیانوس هند و تأثیر آن بر خلیج چابهار و سواحل مکران

در این تحقیق به شبیه‌سازی تولید، گسترش و بالاروی موج سونامی سال ۱۹۴۵ ناشی از گسل مکران در اقیانوس هند پرداخته شده است. گسل ایجاد شده در کف بستر اقیانوس در این نقطه دارای زاویه‌ی لغزش ۷ درجه و زاویه‌ی ۹۰ درجه بین بردار جابجایی گسل و امتداد طولی صفحه‌ی شکست می‌باشد [۳].

در ابتدا با استفاده از الگوریتم اوکادا تغیرات کف بستر دریا که به عنوان پروفیل موج اولیه‌ی سونامی در نظر گرفته می‌شود، شبیه سازی و محاسبه می شود. در شکل ۱ تغییرات سه‌بعدی این جابجایی که توسط نرم‌افزار Mathematica کد نویسی، محاسبه و ترسیم شده است، نمایش داده شده است.



شکل ۱- تغییرات کف بستر دریا در اثر وقوع زلزله با بزرگای ۸/۱ ریشتر و عمق کانونی ۱۵ کیلومتر و زاویه‌ی لغزش گسل ۷ درجه در فروافتادگی مکران

بر اساس شبیه سازی انجام شده بیشترین میزان جابجایی مثبت ۱/۷۱۴ متر و بیشترین میزان جابجایی منفی ۱/۴۵۳ متر می‌باشد. با توجه به اینکه آب سیال تراکم ناپذیر می باشد، تغییرات بستر به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

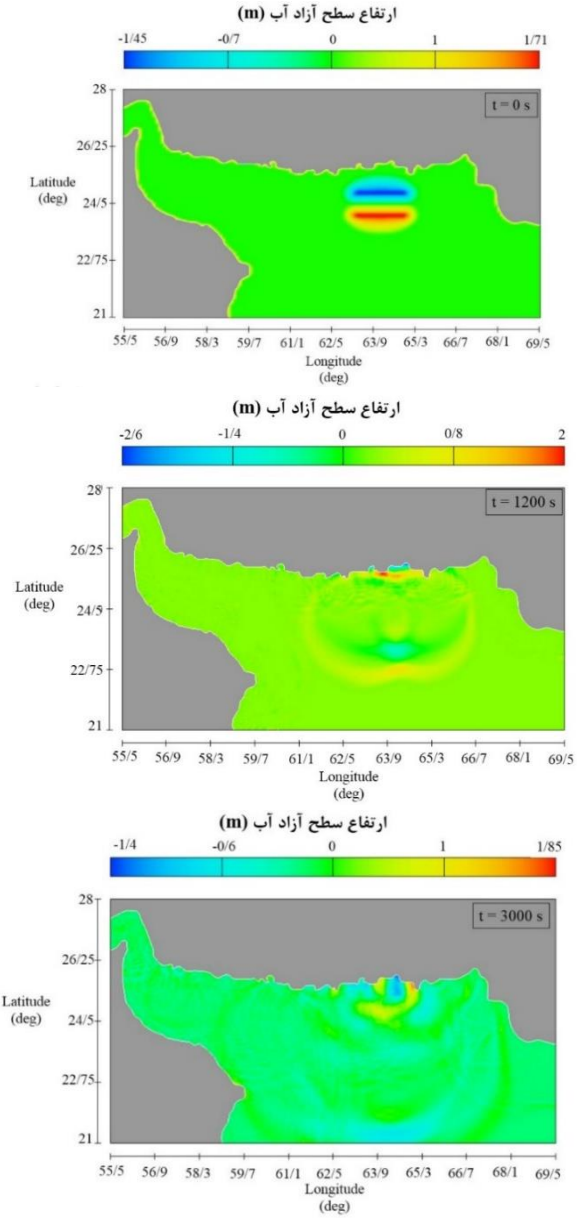
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.3.1]

صورت مستقیم به سطح آب منتقل می گردد و سونامی مشابه با تغییرات بستر تولید می شود.

جهت انتشار موج سونامی، در این تحقیق در ابتدا انتشار موج سونامی در یک مدل سراسری با شبکه حل درشت در اقیانوس هند در اطراف گسل مکران تا ابتدای خلیج چابهار استفاده گردیده است. سپس با معرفی تغییرات سطح آزاد آب در ابتدای خلیج چابهار به عنوان ورودی به یک مدل منطقه‌ای با شبکه حل ریز شامل توپوگرافی (ژرفاسنجی) نسبتاً دقیق بستر خلیج چابهار، انتشار موج در خلیج چابهار با دقت نسبتاً بالایی شبیه‌سازی گردیده است. در مدل سراسری اطلاعات توپوگرافی بستر اقیانوس از نرم‌افزار Google Earth استخراج گردیده و در مدل منطقه ای اطلاعات بستر خلیج بر اساس برداشت دقیق محلی می باشد. جهت معرفی توپوگرافی بستر به نرم افزار Flow 3D، با استفاده از نرم‌افزار Geocontext Profiler اطلاعات به صورت مختصات دکارتی تبدیل گردیده است. سپس با استفاده از نرم‌افزار Surfer این نقاط به صورت نقاطی با فواصل مساوی تبدیل شده و با استفاده از نرم‌افزار Catia با عبور صفحه‌ی صلب از این نقاط، توپوگرافی بستر اقیانوس به صورت فایل stl. ذخیره گردیده و به نرم‌افزار Flow 3D معرفی گردیده است. نتایج شبیه‌سازی هر قسمت به صورت مجزا در ادامه ارائه می‌گردد.

۴-۱- نتایج شبیه‌سازی انتشار موج سونامی ناشی از لغزش صفحات مکران در اقیانوس هند (مدل سراسری)

به منظور شبیه‌سازی انتشار موج سونامی ناشی از لغزش صفحات مکران در اقیانوس هند با استخراج توپوگرافی بستر اقیانوس هند در اطراف گسل مکران و معرفی آن به نرم‌افزار، کانتور توپوگرافی بستر اقیانوس بدست می‌آید. با قرار دادن موج اولیه‌ی سونامی روی سطح آزاد آب با استفاده از گزینه‌ی Fluid Region در نرم‌افزار Flow 3D ، موج اولیه‌ی سونامی آماده‌ی انتشار در ناحیه‌ی مورد بررسی می‌شود. جهت انجام فرآیند شبیه‌سازی از مدل آشفتگی k-ε استفاده گردیده است. در نرم افزار Flow 3D به منظور ریزتر نمودن شبکه‌ی مش‌بندی در نزدیک سطح آزاد آب، از دو صفحه‌ی مش با اندازه‌ی مش ۱ متر در ارتفاع ۱/۷۱۴ متر و ۱/۴۵۳- متر استفاده گردیده است. همچنین از ۱۰۰۰ شبکه در راستای محور x ، ۷۰۰ شبکه در راستای محور y و ۵۰ شبکه در راستای محور z استفاده گردیده است. به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی در اطراف خلیج چابهار، در ناحیه‌ی محصور به ۶۰ تا ۶۱ درجه‌ی شرقی و ۲۵ تا ۲۵/۵ درجه‌ی شمالی از ۲۰۰ مش در دو راستای x و y استفاده شده است. ابعاد شبکه‌ی بهینه حل در این بخش ۱/۴ کیلومتر می‌باشد [۱۳]. در شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی به صورت توالی زمانی انتشار موج سونامی در اقیانوس هند و در اطراف گسل مکران از ابتدا تا زمان t=3000s نمایش داده شده است. در این شکل مقادیر مثبت بالاآمدگی و مقادیر منفی فرو رفت آب نسبت به سطح تراز اولیه می‌باشد. با مقایسه‌ی نحوه‌ی انتشار موج سونامی در این تحقیق با تحقیق‌های مشابه صورت گرفته در گذشته [۱ و ۲ و ۳ و ۱۰ و ۱۱] مشاهده می‌شود انتشار موج در مدل سراسری توسط نرم‌افزار Flow 3D به خوبی شبیه‌سازی شده و انتشار موج که به صورت امواج واگرا با موج‌های مثبت و منفی پی در پی در سایر تحقیق‌های گذشته گزارش گردیده، در این تحقیق نیز مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود هر چه موج از محل انتشار خود دور می‌شود از میزان ارتفاع آن کاسته می‌گردد که این نتیجه در اشکال شکل ۲ نیز به وضوح مشاهده می‌گردد.



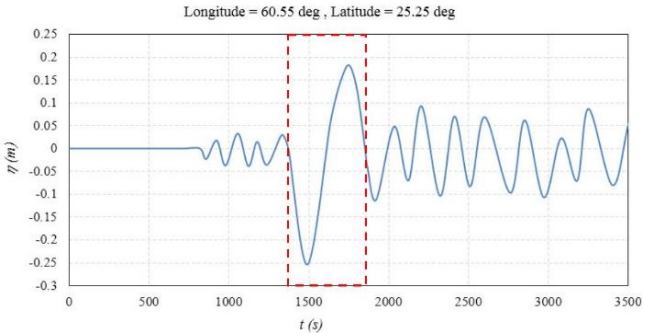
شکل ۲- نتایج شبیه‌سازی انتشار موج سونامی در اقیانوس هند و در اطراف گسل مکران در نرم‌افزار Flow 3D

پس از انجام شبیه‌سازی مدل سراسری، سری زمانی تغییرات سطح آزاد آب در در نقطه‌ی ابتدایی خلیج چابهار به مختصات ۶۰/۵۵

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.3.1]

درجه‌ی شرقی و ۲۵/۲۵ درجه‌ی شمالی مطابق شکل ۳ استخراج گردید. عمق آب در این نقطه تقریباً ۲۲/۷ متر می‌باشد.

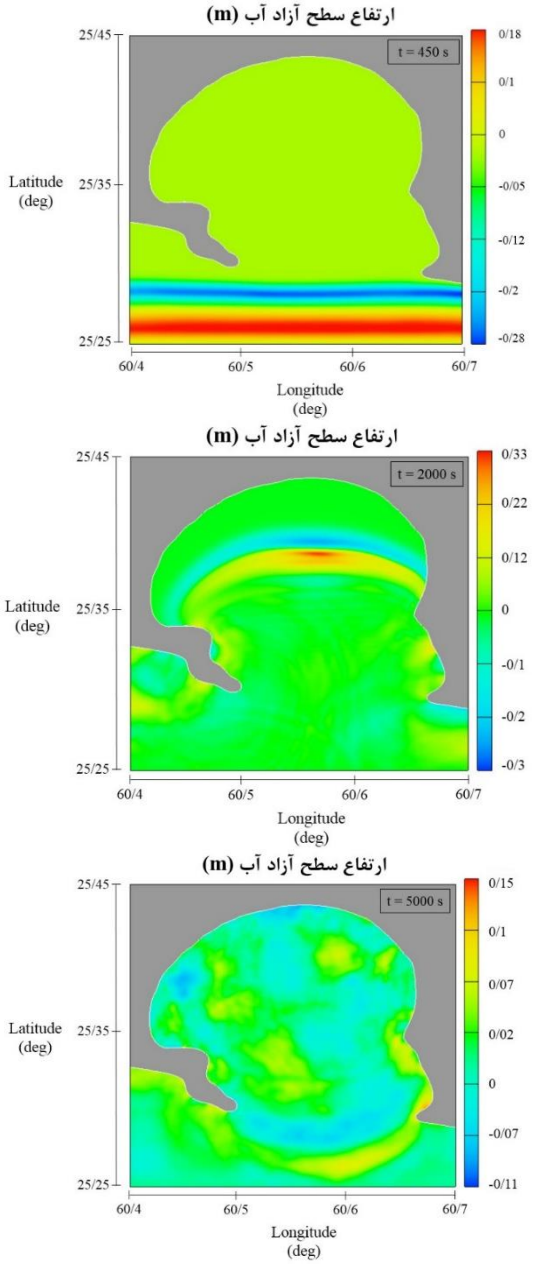


شکل ۳- تغییرات سطح آزاد آب در طول زمان در ابتدای خلیج چابهار مستخرج از مدل سراسری

در این شکل تغییرات سطح آزاد آب در ابتدای خلیج چابهار در فاصله‌ی زمانی عبور اولین موج به همراه ارتفاع منفی و مثبت پی در پی که شامل ریز موج‌های اولیه‌ی حاصل از انتشار موج سونامی که ارتفاع موج مثبت و منفی کمی دارند و همچنین موج‌هایی که حاصل از برگشت موج‌هایی که با برخورد به شیب ساحل نیز می‌باشند نشان داده شده است. به منظور معرفی تغییرات سطح آزاد آب در ابتدای خلیج چابهار به مدل منطقه‌ای، تغییرات سطح آزاد آب در فاصله‌ی زمانی عبور اولین موج اصلی با ارتفاع منفی و مثبت پی در پی مد نظر قرار گرفت. این بخش از موج سونامی، تغییرات سطح آزاد آب در فاصله‌ی زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۸۵۰ پس از شروع شبیه‌سازی است که در شکل ۳ در مستطیل قرمز رنگ مشخص شده‌اند.

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی انتشار موج سونامی ناشی از لغزش صفحات مکران در خلیج چابهار (مدل منطقه‌ای)

به منظور شبیه سازی هر چه دقیق‌تر انتشار موج سونامی ناشی از لغزش صفحات مکران در خلیج چابهار، موج سونامی اصلی عبور کرده از ابتدای خلیج چابهار مطابق شکل ۳ به عنوان ورودی به مدل شامل توپوگرافی نسبتاً دقیق بستر خلیج چابهار معرفی می‌گردد. جهت انجام شبیه‌سازی از دو صفحه‌ی مش با اندازه‌ی مش ۰/۰۱ متر در ارتفاع ۰/۲ متر و ۰/۳- متر استفاده گردیده است. همچنین از ۱۲۰۰ شبکه در راستای محور x ، ۱۲۰۰ شبکه در راستای محور y و ۱۵۰ شبکه در راستای محور z استفاده گردیده است. ابعاد شبکه‌ی بهینه حل در این بخش ۲۵/۵۳ متر می‌باشد. در شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی به صورت توالی زمانی انتشار موج سونامی در خلیج چابهار از ابتدا تا زمان t=5000s نمایش داده شده است.



شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی انتشار موج سونامی ناشی از گسل مکران در خلیج چابهار در نرم‌افزار Flow 3D

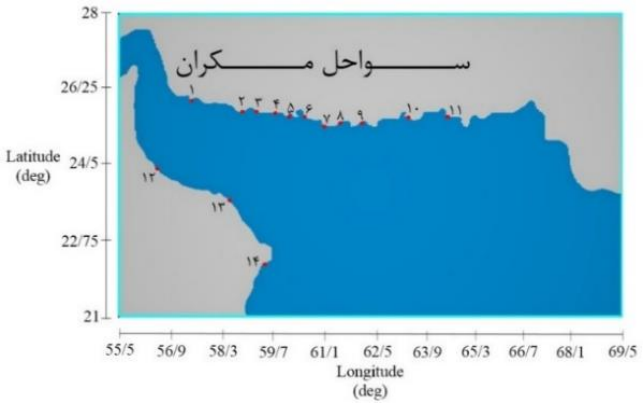
۴-۳- تأثیر موج سونامی ناشی از لغزش صفحات مکران در اقیانوس هند بر خلیج چابهار، سواحل مکران و خورهای مهم جنوب ایران

محل بنادر اصلی واقع در این سواحل در شکل ۵ و اسامی متناظر و نتایج شبیه سازی منطقه ای انتشار موج سونامی شامل بیشترین میزان ارتفاع موج رسیده به این بنادر و مدت زمان رسیدن این موج به بندر مربوطه از ابتدای شروع فرآیند انتشار موج سونامی در جدول (۱) نمایش داده شده‌اند. در این شکل نقطه‌ی ۸ واقع بر خور گواتر، نقاط ۵ و ۶ واقع بر خورهای منطقه‌ی چابهار و نقاط ۲ و ۳ و ۴ واقع بر خورهای منطقه دلتای رودخانه‌ی جگین می‌باشند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.3.1]

مقادیر قابل ملاحظه بالاروی موج در سواحل پاکستان (بیش از ۴ متر) و مقدار نسبتاً اندک آن در سواحل ایران، با آمارهای تلفات گزارش شده از سونامی سال ۱۹۴۵ مکران سازگاری منطقی دارد.



شکل ۵- محل بنادر مهم اطراف اقیانوس هند و دریای عمان در محدوده سونامی مکران

جهت بررسی دقیق تأثیر موج سونامی مکران بر دو بندر چابهار (۶۰/۶ درجه‌ی شرقی و ۲۵/۲۲ درجه‌ی شمالی) و کنارک (۶۰/۴۲ درجه‌ی شرقی و ۲۵/۳ درجه‌ی شمالی) که از بنادر اقتصادی مهم و در حال توسعه ایران هستند و موقعیت آنها در شکل (۵) نشان داده شده است، از نتایج مدل منطقه ای در خلیج چابهار استفاده شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی مدل منطقه‌ای، بیشترین ارتفاع موج رسیده به بندر و مدت زمان رسیدن موج از شروع زمان انتشار موج سونامی به بندر در اثر فروافتادگی مکران، به ترتیب برای بندر چابهار ۰/۴۷۵ متر و ۲۲۲۰ ثانیه و برای بندر کنارک ۰/۱ متر و ۳۹۷۰ ثانیه بدست آمده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، برای بندر چابهار که در دو شبیه‌سازی سراسری و منطقه‌ای حضور دارد، نتایج این دو شبیه‌سازی برای تخمین بیشترین ارتفاع موج رسیده به بندر ۱۵/۸ درصد با یکدیگر تفاوت دارند که این موضوع نشان می‌دهد دقیق‌تر شدن توپوگرافی بستر خلیج چابهار و همچنین ریزتر شدن ابعاد شبکه‌ی حل در مدل منطقه‌ای نسبت به مدل سراسری در ناحیه‌ی خلیج چابهار، بر دقت تخمین ارتفاع موج افزوده است.

۵ – بحث و نتیجه‌گیری

کشور ایران در معرض این پدیده مخرب سونامی قرار دارد و لذا شبیه سازی گزینه های محتمل آن جهت طراحی اقدامات پیشگیرانه از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این تحقیق با شبیه‌سازی انتشار موج سونامی سال ۱۹۴۵ مکران سعی شده است رفتار این موج مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور با استفاده از اطلاعات زمین لرزه سال ۱۹۴۵ مکران، با استفاده از الگوریتم پیشرفته اوکادا موج اولیه‌ی سونامی تولید گردید. سپس با انتشار این موج در محدوده‌ی یک مدل سراسری با استفاده از نرم افزار هیدرودینامیک Flow 3D، بیشترین ارتفاع موج در بنادر مهم اطراف اقیانوس هند و دریای عمان و همچنین مدت زمان رسیدن موج اصلی سونامی به این بنادر از ابتدای شروع فرآیند انتشار موج محاسبه گردید. با استفاده از مدل سراسری، تغییرات سطح آزاد آب در ابتدای خلیج چابهار استخراج گردید. سپس با معرفی این تغییرات به یک مدل منطقه‌ای شامل شبکه‌ی حل ریزتر از مدل سراسری و همچنین توپوگرافی نسبتاً دقیق بستر خلیج چابهار، به طور ویژه اثر موج سونامی مکران بر دو بندر مهم

جدول ۱- تأثیر سونامی مکران بر بنادر مهم اطراف اقیانوس هند و دریای عمان

شماره ی بندر	نام کشور	نام بندر	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	بیشترین ارتفاع موج (متر)	زمان رسیدن موج (ثانیه)
۱	ایران	جاسک	۵۷/۷۶	۲۵/۶۲	۰/۰۱۲	۲۴۰۰
۲		کرتی	۵۹/۰۹	۲۵/۳۴	۰/۰۳۵	۲۳۵۰
۳		کلک	۵۹/۳۷	۲۵/۲۹	۰/۰۵۵	۲۳۰۰
۴		بیر	۵۹/۸۱	۲۵/۳۲	۰/۰۸۲	۲۲۵۰
۵		گوردیم	۶۰/۱۲	۲۵/۲۹	۰/۱۳۵	۲۲۰۰
۶		چابهار	۶۰/۶	۲۵/۲۲	**۰/۴**	۲۱۰۰
۷		بریس	۶۱/۱۷	۲۵/۰۵	۰/۷۵	۱۸۰۰
۸	پاکستان	جوانی	۶۱/۷۵	۲۴/۹۲	۱/۵۵	۱۵۰۰
۹		گوادار	۶۲/۳۳	۲۵/۰۲	۱/۷۸	۱۲۰۰
۱۰		پسنی	۶۳/۴۹	۲۵/۰۶	۳/۹۵	۱۱۰۰
۱۱		اورمارا	۶۴/۶۴	۲۵/۰۸	**۴/۲۵**	۱۰۰۰
۱۲	عمان	سوهار	۵۶/۸۳	۲۴/۳۶	۰/۰۳۳	۲۱۵۰
۱۳		ماسکات	۵۸/۶۵	۲۳/۶۴	۰/۰۴۷	۱۹۵۰
۱۴		سور	۵۹/۵۴	۲۲/۶۴	۰/۰۵۵	۱۸۰۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.3.1]

اقتصادی کشور به نام بندر چابهار و بندر کنارک بررسی شد. رویکرد ارائه شده در این مقاله شامل تولید دقیق موج سونامی با استفاده از الگوریتم اوکادا و شـــبیه ســـازی مرحله ای انتشـــار در مدل های سراسری و منطقه ای می تواند به عنوان یک راه حل قابل اطمینان برای تخمین بالاروی موج ســـونامی در ســـواحل کشـــور در اثر سناریوهای فرو نشست مکران با بزرگا و عمق‌کانونی زلزله های محتمل مختلف مورد توجه قرار گیرد که نتایج آن در مقاله های آتی ارائه می گردد.

۶- کلید واژگان

1- Solitary Wave
2- Continuity Equation
3- Navier – Stokes Equations

۷- مراجع

1- Heidarzadeh, M. and Kijko, A., (2011), *A probabilistic tsunami hazard assessment for the Makran subduction zone at the northwestern Indian Ocean*, Natural Hazards, 56 (3). pp. 577-593. ISSN: 0921-030X.

2- Heidarzadeh, M., Pirooz, MD. and Zaker, NH., (2009), *Modeling the near-field effects of the worst-case tsunami in the Makran subduction zone*, Ocean Engineering, 36 (5). pp. 368 - 376. ISSN: 0029-8018.

3- Heidarzadeh, M., Dolatshahi Pirooz, M. and Hadjizadeh zaker, N., (2007), *Evaluating the potential for tsunami generation in southern Iran*, Internatinal Journal of Civil Engineering, Vol. 5, No. 4.

4- Wu, N., Tsay, T. and Chen, Y., (2015), *Generation of stable solitary waves by a piston-type wave maker*, Wave Motion, 51: pp. 240-255.

5- Choi, B.-H., Kim, D. C., Pelinovsky, E. and Woo, S. B., (2007), *Three-dimensional simulation of tsunami run-up around conical island*, Coastal Engineering., 54, pp. 618-629.

6- Tadepalli, S. and Synolakis, C.E., (1923), *The run-up of N-wave on sloping beaches*, Mathematical and Physical Science, 445, p. 99-112.

7- Mansinha, L. and Smylie, D.E., (1971), *The displacement field of inclined faults*, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 61, p.1433-1440.

8- Okada, M., (1985), *Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space*, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 74, p. 1135-1154.

9- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., (1994), *New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement*, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, p. 974-1002.

10- Akbarpour Jannat, M.R. and Rastgoftar, E., (2015), *Numerical Modeling of Tsunami Waves Associated With Worst Earthquake Scenarios of the Makran Subduction Zone in the Jask Port, Iran*, Journal of the Persian Gulf, Vol. 6, No. 22, pp. 35-48.

11- Akbarpour Jannat, M.R., Rastgoftar, E. and Asano, T., (2017), *Tsunami Assessment for Inundation Risk Management at Chabahar Bay Facilities in Iran*, international journal of coastal & offshore engineering, Vol. 1, No. 2, p. 27-39.

12- FLOW-3D user manual (Version 9.3), Flow Science Inc, 2008.

13- Honarmand, M., (2017), *Three Dimensional Numerical Simulation of Tsunami Wave Propagation in Coastal Area*, Master's Thesis, Department of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Iran, 247P.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.3.1]