

مطالعه الگوی انتشار امواج سونامی و برآورد زمان رسیدن آن به سواحل جنوبی ایران برای استفاده در سامانه هشدار سونامی

محمد حیدرزاده^{۱*}، محرم دولتشاهی پیروز^۲، ناصر حاجی‌زاده ناگر^۳

۱- فارغ‌التحصیل دکترا، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- استادیار، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

*تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵

heidarz@ut.ac.ir

(دریافت مقاله: دی ۱۳۸۵، پذیرش مقاله: دی ۱۳۸۷)

چکیده- در این مقاله با استفاده از نظریه امواج بلند، مدلی کامپیوتری برای پیش‌بینی الگوی انتشار امواج سونامی و برآورد زمان رسیدن آن به سواحل جنوبی ایران ارائه شده است. با توجه به پتانسیل سونامی خیزی در منطقه مکران در جنوب ایران، توسعه سیستم‌های هشدار سونامی در این منطقه ضروری است. در این راستا، یکی از پایه‌ای‌ترین اطلاعات مورد نیاز برای توسعه چنین سیستم‌هایی، الگوی انتشار امواج سونامی و زمان رسیدن آن به نواحی ساحلی است. به این منظور، پس از صحت‌سنجی نتایج مدل تهیه شده، از آن برای سواحل جنوبی ایران استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که امواج سونامی ناشی از منطقه فرورانش مکران در مدت زمانی حدود ۱۵ دقیقه سواحل جنوبی ایران را مورد حمله قرار می‌دهند. این مسئله بدان معناست که هر گونه سیستم هشدار سونامی در این منطقه باید بتواند در مدت زمانی حدود ۱۵ دقیقه اعلان خطر مورد نیاز را صادر کند. نتایج و روش‌های ارائه شده در این مقاله را می‌توان در توسعه بانک اطلاعاتی زمان رسیدن امواج سونامی به سواحل جنوبی ایران - که یکی از اصلی‌ترین مؤلفه‌های سیستم‌های هشدار سونامی است - مورد استفاده قرار داد.

کلید واژگان: ناحیه فرورانش، زمین لرزه، سونامی، انتشار سونامی، امواج ثقلی بلند، زمان رسیدن سونامی.

۱- مقدمه

به‌عنوان اصلی‌ترین نواحی سونامی‌خیز در این اقیانوس

شناخته شده‌اند [۱].

در شکل ۱، این دو ناحیه سونامی‌خیز نشان داده شده است. ناحیه فرورانش اندونزی در چند سال اخیر منشأ سه سونامی بزرگ بوده است که عبارتند از سونامی ۲۶ دسامبر سال ۲۰۰۴، سونامی ۲۸ مارس سال ۲۰۰۵ و ۱۷ جولای

سواحل جنوبی ایران در معرض خطر سونامی‌های میدان نزدیک - که از منطقه سونامی‌خیز مکران سرچشمه می‌گیرند - قرار دارد. منطقه فرورانش^۱ مکران یکی از دو ناحیه فرورانش موجود در منطقه اقیانوس هند است که

1. Subduction Zone

لرزه مهیب دیگر در این منطقه گزارش شده [۶، ۷] اما اطلاعاتی در مورد وقوع سونامی بر اثر زمین لرزه‌های فوق در این منطقه در دسترس نیست.

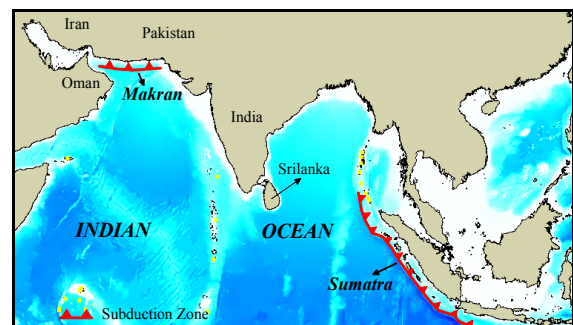
اگر چه اطلاعات تاریخی درباره وقوع سونامی در منطقه مکران ناکامل است و بسیاری از وقایع مهم ثبت و گزارش نشده، اما اطلاعات موجود نشان می‌دهند که ناحیه فرورانش مکران از نظر تکنونیک، پتانسیل ایجاد زمین لرزه‌هایی را با بزرگی بیش از ۸ دارد که می‌توانند سونامی‌های مخربی را مشابه آنچه در سال ۱۹۴۵ اتفاق افتاد به وجود آورند.

بنابراین خطر سونامی ناشی از منطقه فرورانش مکران برای سواحل جنوبی ایران خطری جدی به‌شمار می‌رود و توسعه سیستم‌های هشدار سونامی ضروری است [۸]. در این راستا، یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های سیستم هشدار سونامی عبارت است از تعیین الگوی انتشار امواج سونامی و نیز محاسبه زمان رسیدن این امواج به نقاط مختلف در خط ساحلی.

سیستم هشدار سونامی باید مجهز به یک بانک اطلاعاتی در زمینه زمان رسیدن امواج سونامی به نواحی ساحلی باشد که این بانک اطلاعاتی بر اساس در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای منبع زمین لرزه تهیه شده باشد. هم‌چنین شبیه‌سازی الگوی انتشار امواج سونامی، مسیر ترجیحی حرکت امواج سونامی را مشخص کرده و نشان می‌دهد که با توجه به هر سناریوی مشخص، امواج سونامی در چه جهتی متمرکز شده و کدام نواحی بیشترین آسیب را خواهند دید. از آنجاکه سیستم‌های هشدار سونامی بر مبنای زمان رسیدن اولین موج سونامی بنا می‌شوند، آنچه در این تحقیق مورد بحث قرار می‌گیرد، زمان رسیدن اولین موج سونامی به ساحل است، نه زمان رسیدن بزرگترین موج.

سال ۲۰۰۶. این سه سونامی بر اثر وقوع زمین لرزه‌هایی با بزرگی به ترتیب ۹/۳، ۸/۷ و ۷/۷ در محل ناحیه فرورانش سوماترا شکل گرفته بودند و به ترتیب ۲۲۵۰۰۰، ۱۰۰۰ و ۴۰۳ کشته بر جای نهادند که این نشان دهنده پتانسیل سونامی خیزی بالای این ناحیه است [۲، ۳].

دیگر ناحیه فرورانش مهم موجود در منطقه اقیانوس هند، ناحیه مکران است [۱]. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ناحیه فرورانش مکران در نزدیکی سواحل ایران، عمان، پاکستان و هند با طولی در حدود ۹۰۰ کیلومتر [۴] در امتداد شرقی - غربی گسترش یافته است. در این ناحیه، صفحه اقیانوسی عمان به زیر صفحه قاره‌ای ایران فرورانش می‌کند.

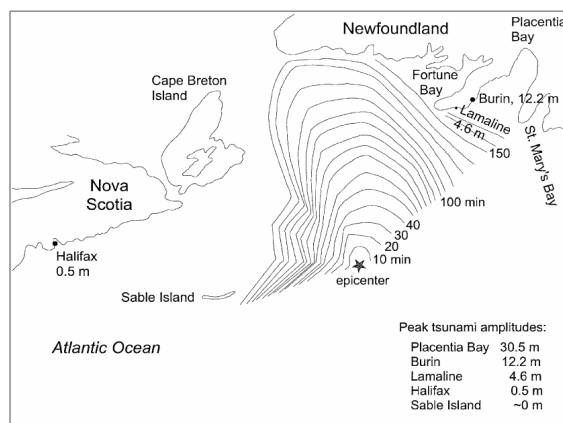


شکل ۱ نواحی فرورانش موجود در اقیانوس هند شامل ناحیه سوماترا در شرق و ناحیه مکران در شمال

داده‌های تاریخی نشان می‌دهد که آخرین سونامی بزرگ ثبت شده در منطقه مکران در ۲۸ نوامبر سال ۱۹۴۵ اتفاق افتاد که حداقل ۴۰۰۰ کشته در سواحل پاکستان، هند، ایران و عمان برجای گذاشت [۵]. این سونامی بر اثر وقوع زمین لرزه‌ای با بزرگی ۸/۱ به وجود آمده بود [۶]. امبرسز و ملویل (۱۹۸۲) [۶] سونامی دیگری را در اواخر دسامبر سال ۱۸۹۷ میلادی در سواحل مکران گزارش کرده‌اند که البته جزئیاتی چندانی را ارائه نکرده‌اند. در این زمینه، وقوع چند زمین

رسیدن امواج سونامی به ۳۰ نقطه ساحلی را با فرض وقوع سونامی در منطقه نیوفاندلند محاسبه کرد. روش او برای استخراج این منحنی‌ها، بر مشاهدات محلی و تجربی مبتنی بود.

مورتی (۱۹۷۷) [۱۰] نشان داد که از آنجا که امواج سونامی از امواج بلند به‌شمار می‌روند، زمان رسیدن امواج سونامی به خط ساحلی، فقط تابعی از عمق آب اقیانوس است. ساتاکی (۱۹۸۸) [۱۱] ضمن بررسی تأثیر عمق آب اقیانوس بر الگوی انتشار امواج سونامی، روش تعقیب پسر و شعاع موج را در مطالعه سونامی معرفی کرد. کاربرد مهم روش ارائه شده توسط ساتاکی، در تخمین محل منبع تولید سونامی است. بدین ترتیب که با در دست داشتن زمان رسیدن موج سونامی به موج‌سنج خاص، موج مذکور را به‌صورت پسر و از محل موج‌سنج مذکور تا زمان صفر تعقیب می‌کنند. تریفوناک و همکاران (۲۰۰۲) [۱۲] با استفاده از نظریه مورتی، نحوه انتشار و زمان رسیدن امواج سونامی ناشی از زمین لرزه سال ۱۹۲۹ را در منطقه گرنند بنکر شبیه‌سازی کردند.



شکل ۲ شبیه‌سازی الگوی انتشار و زمان رسیدن امواج به خط ساحلی در منطقه گرنند بنکر (تریفوناک و همکاران، ۲۰۰۲ [۱۱]).

در این تحقیق، مدل ساده‌ای برای مدلسازی الگوی انتشار و محاسبه زمان رسیدن اولین موج سونامی به خط ساحلی ارائه شده است. مزیت مهم مدل تهیه شده آن است که بدون نیاز به مدل‌های لرزه‌ای و هیدرودینامیک، با دقت خوبی می‌تواند زمان رسیدن اولین موج سونامی به خط ساحلی و الگوی انتشار آن را پیش‌بینی کند. از این‌رو، در مواردی که محاسبه زمان رسیدن اولین موج به خط ساحلی مطلوب باشد (مانند سیستم‌های هشدار سونامی)، با استفاده از مدل ارائه شده می‌توان اطلاعات مذکور را به سهولت به‌دست آورد. به‌علاوه، در مواردی که اطلاعات کافی و دقیقی در زمینه تکتونیک و زمین‌شناسی منطقه وجود ندارد یا مدل‌های هیدرودینامیک و لرزه‌ای برای منطقه هنوز توسعه نیافته‌اند، مدل ارائه شده می‌تواند اطلاعات مفیدی را در زمینه الگوی انتشار و زمان رسیدن سونامی به‌دست دهد. مدل ارائه شده می‌تواند به‌عنوان بخشی از سیستم هشدار سونامی در سواحل جنوبی ایران به‌شمار رود.

۲- مروری کوتاه بر کارهای تحقیقاتی مشابه

به‌منظور تخمین مناطق آسیب‌پذیر از سونامی، شبیه‌سازی الگوی انتشار امواج سونامی و زمان رسیدن امواج از کانون زمین لرزه مادر به خط ساحلی ضروری است. پارامترهای فوق، از مهم‌ترین مؤلفه‌های سیستم هشدار سونامی به‌شمار می‌روند. سابقه مطالعات مرتبط با محاسبه زمان رسیدن امواج سونامی به خط ساحلی به اواسط دهه ۶۰ میلادی - مقارن با توسعه اولین سیستم هشدار سونامی دنیا در منطقه اقیانوس آرام - باز می‌گردد.

برنینگ‌هاوزن (۱۹۶۸) [۹] با بررسی سابقه وقوع سونامی در سواحل شرقی ایالات متحده جمع‌آوری اطلاعات موج‌سنج‌های موجود در منطقه، منحنی‌های زمان

از آنجا که فاصله ناحیه سونامی خیز سوماترا از سواحل جنوبی ایران بیش از ۵۰۰۰ کیلومتر است، سونامی ناشی از آن، سونامی میدان دور برای سواحل ایران به شمار می‌رود. در حالی که سونامی ناشی از منطقه مکران، سونامی میدان نزدیک است. شواهد علمی و نیز بررسی‌های میدانی نشان می‌دهند که خطر سونامی‌های میدان دور برای سواحل جنوبی ایران ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است که از میان این شواهد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

الف- بررسی الگوی انتشار سونامی‌های با منشأ زمین‌لرزه در میدان دور نشان‌دهنده این حقیقت است که در این حالت، انتشار امواج مخرب سونامی کاملاً جهت‌دار^۱ است [۲۰]. به بیان دیگر، امواج اصلی سونامی که دارای بیشترین قدرت تخریبی هستند، در میدان دور در یک جهت خاص انتشار یافته و در آن جهت دارای بیشترین دامنه، ارتفاع موج و انرژی هستند. در نتیجه، بیشترین خسارات ناشی از سونامی نیز در آن جهت خاص وارد خواهد شد. بن‌ماهیم و روزنمن (۱۹۷۲) [۲۰] نشان دادند که این جهت خاص، جهت عمود بر امتداد گسل است. نمونه مشهور این مسأله، سونامی سهمگین ۱۹۶۴ آلاسکا است که علی‌رغم وقوع زمین‌لرزه در نواحی دور از ساحل ایالت آلاسکا، سواحل ایالت کالیفرنیا - که در فاصله بیش از ۳۵۰۰ کیلومتری از منبع زمین‌لرزه قرار گرفته بودند - مورد حمله امواج سهمگین سونامی قرار گرفتند [۲۰].

بنابراین در صورت وقوع زمین‌لرزه در منطقه فرورانش سوماترا، سونامی ناشی از آن، در میدان دور به صورت الگوی نمایش داده شده در شکل ۳ منتشر خواهد شد. همانطور که از این شکل برمی‌آید، در صورت وقوع سونامی در ناحیه شمالی منطقه سوماترا

نتیجه این شبیه‌سازی در شکل ۲ نشان داده شده است. فرناندز و همکاران (۲۰۰۴) [۱۳] منحنی‌های زمان رسیدن امواج سونامی به نواحی ساحلی السالوادور را محاسبه کردند. ویزرت (۱۹۹۰) [۱۴] منحنی‌های زمان رسیدن امواج سونامی را برای منطقه حوزه دریای کارائیب ارائه کرد. مدر (۲۰۰۱) [۱۵] منحنی‌های زمان رسیدن امواج سونامی به سواحل را برای حادثه سونامی لاپالما محاسبه کرد. مندز و همکاران (۱۹۹۹) [۱۶] با استفاده از روش تعقیب پسر و شعاع موج، به تعیین منبع سونامی‌های رخ داده در سواحل پرتغال پرداختند. کوشیمورا و همکاران (۲۰۰۱) [۱۷] منحنی‌های زمان رسیدن امواج سونامی به سواحل را برای حادثه سونامی ۱۹۹۶ در منطقه ایرین جایا ارائه کردند.

حمودا (۲۰۰۶) [۱۸] با در نظر گرفتن منابع سونامی خیز در نواحی دور از ساحل مصر، نمودارهای زمان رسیدن امواج سونامی را برای این سواحل ارائه کرد. او از روش مدل‌سازی کامل سونامی - که شامل ترکیبی از مدل لرزه‌ای و هیدرودینامیک است - استفاده کرد.

۳- سونامی میدان دور و میدان نزدیک در سواحل جنوبی ایران

به‌طور کلی، امواج سونامی - که مسافت انتشار آنها بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر باشد - به‌عنوان سونامی میدان دور شناخته می‌شوند و امواجی که مسافت انتشار آنها کمتر از این مقدار باشد، به‌عنوان سونامی میدان نزدیک شناخته می‌شوند [۱۹]. علت تقسیم‌بندی فوق آن است که هنگامی که مسافت انتشار امواج سونامی از حدود ۱۰۰۰ کیلومتر بیشتر می‌شود، الگوی انتشار امواج سونامی دچار تغییراتی می‌شود که در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت.

1. Directive

۴- مبانی نظری

ساده‌ترین و مفیدترین نظریه برای بررسی امواج ثقلی - که امواج سونامی یکی از آنها است - نظریه موج خطی است که اولین بار توسط ایری^۱ [۲۲] معرفی شد. با به‌کارگیری این نظریه و در نظر گرفتن فرضیات مورد نیاز - که به تفصیل در [۲۲] مورد بحث قرار گرفته است - سرعت موج از رابطه (۱) به‌دست می‌آید [۲۲].

$$C = \sqrt{\left(\frac{gL}{2\pi}\right) \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (1)$$

در رابطه فوق، g شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه، L طول موج بر حسب متر، C سرعت موج بر حسب متر بر ثانیه و d عمق آب ساکن بر حسب متر است. این پارامترها در طرحواره شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به عمق نسبی امواج (نسبت عمق آب ساکن به طول موج d/L)، آنها را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد که عبارتند از [۲۲]:

۱- امواج آبهای عمیق که در آنها $d/L > 0.5$

۲- امواج آبهای کم‌عمق که در آنها $d/L < 0.05$

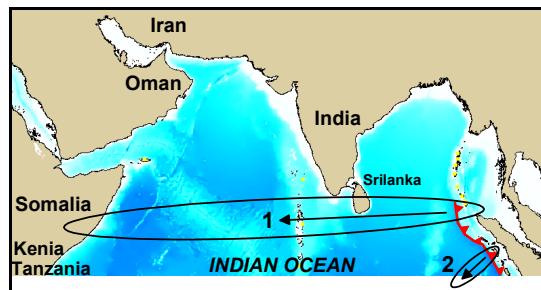
۳- امواج آبهای متوسط برای حالت $0.05 < d/L < 0.5$

امواج سونامی معمولاً دارای طول موج‌های بسیار بلند در حدود چند صد کیلومتر هستند. به‌عنوان مثال برای سونامی بزرگ سال ۲۰۰۴ در سواحل اندونزی، طول موج حدود ۶۷۰ کیلومتر گزارش شده است [۲۳]. در حالی که عمق متوسط آب اقیانوس‌ها در حدود ۴ کیلومتر است.

(سناریوی ۱ در شکل ۳)، امواج ایجاد شده، پس از برخورد با سریلانکا و هند، در میدان دور، سواحل کشورهای افریقایی مانند سومالی، تانزانیا و کنیا را مورد حمله قرار می‌دهند. همچنین، در صورت وقوع سایر سناریوها مشاهده می‌شود که سواحل جنوبی ایران از امواج حاصل مصون می‌ماند (شکل ۳).

ب- اطلاعات به‌دست آمده از سونامی بزرگ سال ۲۰۰۴ در منطقه اندونزی نیز مؤید مطالب اشاره شده در بند الف است. زمین لرزه مادر سونامی سال ۲۰۰۴ در قسمت شمالی منطقه فرورانش اندونزی رخ داده بود و بنابر توضیحات بند الف، پیش‌بینی می‌شد که این سونامی در میدان دور، کشورهای افریقایی سومالی، تانزانیا و کنیا را مورد حمله قرار دهد. بررسی اطلاعات میدانی نشان می‌دهد که سونامی فوق، در میدان دور، ۲۹۸ کشته در سواحل سومالی بر جای نهاد. تلفات گزارش شده از تانزانیا و کنیا نیز به ترتیب ۱۰ و ۱ نفر است [۲۱]. ضمن آنکه در سایر کشورهای میدان دور مانند عمان و ایران و سایر کشورهای افریقایی، اگر چه امواج سونامی مشاهده شده، اما آسیب‌های جانی و مالی بر جای نگذاشت.

با توجه به توضیحات فوق، خطر سونامی‌های میدان دور برای سواحل جنوبی ایران ناچیز بوده و لذا در این مطالعه مورد بحث قرار نمی‌گیرد.



شکل ۳ الگوی انتشار سونامی ناحیه سوماترا در میدان دور

1. Airy

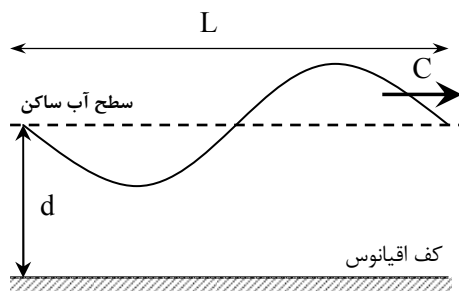
۱- چگونگی شبیه‌سازی زمان رسیدن این امواج به خط ساحلی؛

۲- چگونگی شبیه‌سازی الگوی حرکت امواج سونامی. در بخش پیشین، شبیه‌سازی زمان رسیدن امواج سونامی به تفصیل مورد بحث قرار گرفت و اشاره شد که برای این منظور از معادله (۲) استفاده می‌شود.

مطالعه نحوه حرکت و الگوی انتشار امواج سونامی. نشان می‌دهد که این امواج، از منبع زمین لرزه به صورت شعاعی در همه جهات منتشر می‌شوند [۲۴، ۲۵]. بنابراین، در این مطالعه به منظور تهیه مدل، الگوی انتشار شعاعی مورد توجه قرار می‌گیرد که طرحواره‌ای از آن در شکل ۵ آورده شده است.

مدل تهیه شده، در ابتدا اطلاعات مربوط به عمق آب اقیانوس را به صورت فایل متنی، به عنوان ورودی دریافت می‌کند. بانک‌های اطلاعاتی مختلف، اطلاعات عمق اقیانوس را معمولاً به صورت فایل متنی متشکل از سه ستون - که به ترتیب طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و عمق آب اقیانوس است - در اختیار قرار می‌دهند.

مدل، پس از دریافت اطلاعات عمق آب اقیانوس، برای انجام تحلیل‌های بعدی، آنها را به یک شبکه از اعداد تبدیل می‌کند. در گام بعدی، کانون زمین لرزه مادر، به مدل معرفی می‌شود. با معرفی کانون زمین لرزه، با توجه به الگوی نشان داده شده در شکل ۵، سونامی در همه جهات منتشر می‌شود. زاویه بین دو شعاع متوالی قابل تغییر بوده و کاربر می‌تواند بسته به دقت مورد نیاز و شرایط حاکم بر مسأله، آن را کم یا زیاد کند. سپس، روی هر خط یا شعاع انتشار، با استفاده از رابطه ۲، زمان رسیدن سونامی به خط ساحل محاسبه قرار می‌شود.



شکل ۴ تعریف پارامترهای موج

حداکثر عمق آب اقیانوس‌ها در حدود ۱۱ کیلومتر است. بنابراین، نسبت d/L برای امواج سونامی حدود $0/01$ تخمین زده می‌شود و از این رو، امواج سونامی به عنوان امواج آب کم عمق طبقه‌بندی می‌شوند. برای امواج آب کم عمق می‌توان نشان داد که سرعت موج از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲۲]:

$$C = \sqrt{gd} \quad (2)$$

رابطه (۲)، سرعت حرکت امواج سونامی را به دست می‌دهد. این رابطه نشان می‌دهد که سرعت امواج سونامی فقط تابع عمق آب اقیانوس است. بدیهی است که رابطه (۲) زمان رسیدن اولین موج سونامی را به خط ساحلی به دست می‌دهد.

با توجه به موارد فوق، رابطه (۲) - که زمان رسیدن اولین موج سونامی به خط ساحلی را به دست می‌دهد - مبنای تهیه منحنی‌های زمان رسیدن امواج سونامی به خط ساحلی ایران قرار می‌گیرد.

۵- تهیه مدل

برای تهیه مدلی برای شبیه‌سازی الگوی انتشار امواج سونامی و نیز محاسبه زمان رسیدن این امواج به نقاط مختلف خط ساحلی، دو نکته زیر حائز اهمیت است:

پس از محاسبه زمان، نقطه موردنظر بر روی مسیر S ، به کمک روابط ۴ و ۵ بر روی محورهای X و Y تصویر می‌شود (شکل ۵) تا بتوان به وسیله شبکه‌ای کردن اطلاعات، آنها را با سهولت بیشتری ترسیم کرد.

$$X_i = \Delta L(s_i) \cdot \cos(\theta) \quad (4)$$

$$Y_i = \Delta L(s_i) \cdot \sin(\theta) \quad (5)$$

۵-۱- انعکاس، انکسار و تفرق امواج در برخورد با سواحل

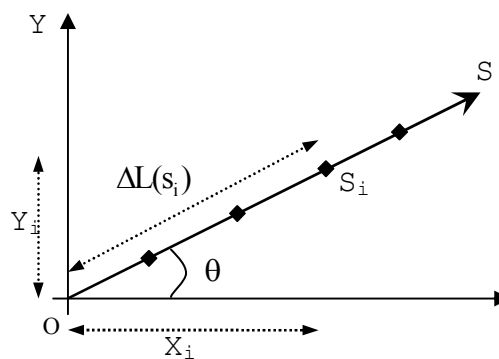
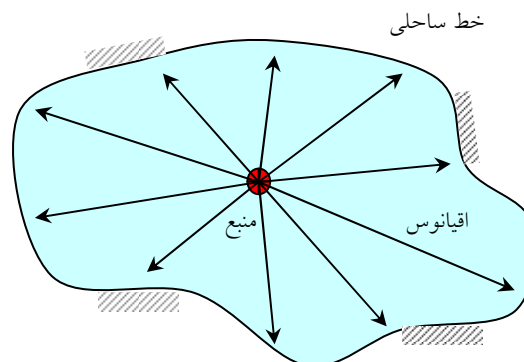
هنگامی که موج به صورت مورب به خط ساحلی یا سازه ساحلی برخورد می‌کند، انعکاس موج پدید می‌آید که موجب تغییر جهت انتشار و نیز تغییر ارتفاع امواج می‌شود. با توجه به اینکه در این مطالعه، زمان رسیدن اولین موج به خط ساحلی موردنظر است، بنابراین مسأله انعکاس موج تأثیری بر نتایج این مطالعه نخواهد داشت، زیرا از یک سو با توجه به معادله (۲)، از آنجا که سرعت حرکت موج سونامی فقط تابعی از عمق آب اقیانوس است، لذا تغییر ارتفاع موج بر اثر برخورد با خط ساحلی تأثیری بر زمان رسیدن امواج به ساحل ندارد.

از سوی دیگر، با توجه به اینکه الگوی انتشار امواج سونامی به صورت شعاعی است (شکل ۵)، لذا مسأله انعکاس موج - اگر چه موجب ایجاد آشفتگی امواج در نزدیکی خط ساحلی می‌شود - اما نمی‌تواند بر زمان رسیدن اولین موج به خط ساحلی تأثیر بگذارد. در این زمینه، شکل ۶ نشان می‌دهد که یک شعاع سونامی در مسیر OA حرکت کرده و خط ساحلی را در نقطه A قطع می‌کند. شعاع مذکور بر اثر برخورد با خط ساحلی، منعکس شده و این بار در مسیر AB حرکت کرده و به نقطه B در روی خط ساحلی می‌رسد. در این مثال،

با توجه به تغییر عمق آب اقیانوس از یک نقطه به نقطه دیگر، رابطه ۲ به صورت رابطه ۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر خط یا شعاع انتشار فرضی که آن را S می‌نامیم، به مقاطع مختلفی تقسیم و در هر مقطع، زمان حرکت سونامی محاسبه می‌شود. زمان کلی رسیدن سونامی به یک نقطه ساحلی در روی هر خط، مجموع زمانهای محاسبه شده است:

$$T = \sum \frac{\Delta L(s)}{\sqrt{gd(s)}} \quad (3)$$

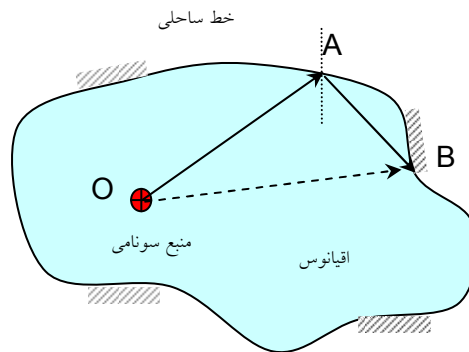
در این رابطه ۳، T زمان رسیدن امواج سونامی به خط ساحلی، g شتاب ثقل، $\Delta L(s)$ یک مقطع از مسیر حرکت، S مسیر حرکت سونامی بر روی یک شعاع و $d(s)$ متوسط عمق آب اقیانوس در فاصله $\Delta L(s)$ است.



شکل ۵ الگوی انتشار امواج سونامی در مدل ما

انکسار و تفرق امواج، یکی دیگر از آثار ناشی از نزدیک شدن امواج به آبهای کم عمق است. به دلیل کم شدن سرعت موج بر اثر کم شدن عمق آب، انکسار موج در آبهای کم عمق روی خواهد داد. نتیجه این پدیده، خمش تاجهای موج به نحوی است که آنها به جهت یابی ترازهای بستر نزدیک می شوند. مهم ترین اثر این دو پدیده، تأثیر آنها بر ارتفاع موج است [۲۲]. از آنجاکه سرعت حرکت موج سونامی با توجه به رابطه ۴، فقط تابعی از عمق آب اقیانوس است، لذا پدیده های انکسار و تفرق موج تأثیر زیادی بر زمان رسیدن اولین موج سونامی به خط ساحلی ندارند. اضافه می شود که اثر پدیده انکسار در جهت ضریب اطمینان است و لذا در نظر نگرفتن این پدیده، باعث ایجاد خطای زیادی نمی شود.

نمی توان زمان رسیدن موج سونامی به نقطه B را از مسیر OAB حساب کرد. زیرا با توجه به حرکت شعاعی امواج، موج سونامی قبلاً از طریق مسیر OB به نقطه B رسیده و زمان صحیح رسیدن اولین موج سونامی به نقطه B، باید از مسیر OB محاسبه شود.



شکل ۶ تأثیر نداشتن انعکاس امواج بر زمان رسیدن اولین موج

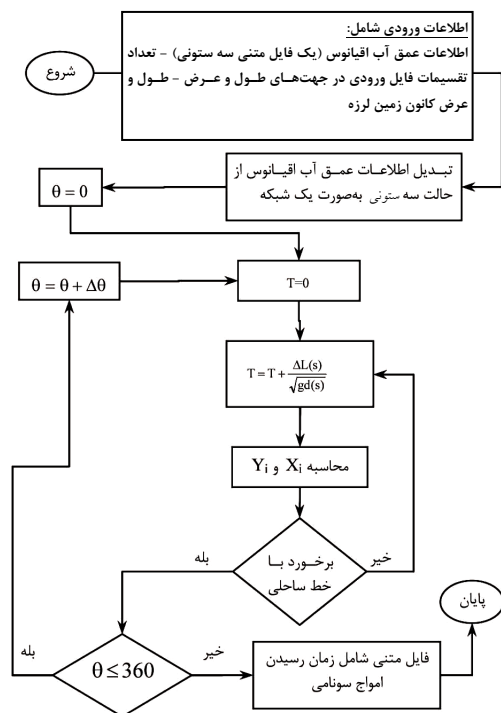
۲-۵- روندنما

با توجه به توضیحات فوق، روندنمای مدل تهیه شده در شکل ۷ ارائه شده است.

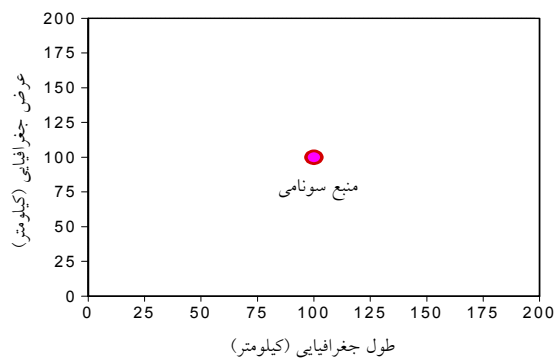
۳-۵- صحت سنجی مدل

به منظور بررسی صحت عملکرد مدل تهیه شده، ضروری است که عملکرد آن در دو زمینه شبیه سازی صحیح الگوی انتشار و نیز تخمین زمان رسیدن امواج سونامی به خط ساحلی بررسی شود. برای این منظور، حوضچه ای به شکل مربع با ابعاد ۲۰۰ کیلومتر - که عمق آب در تمام نقاط آن برابر ۱۰۰۰ متر است - در نظر گرفته می شود که کانون زمین لرزه نیز در مرکز آن قرار داده می شود (شکل ۸- الف).

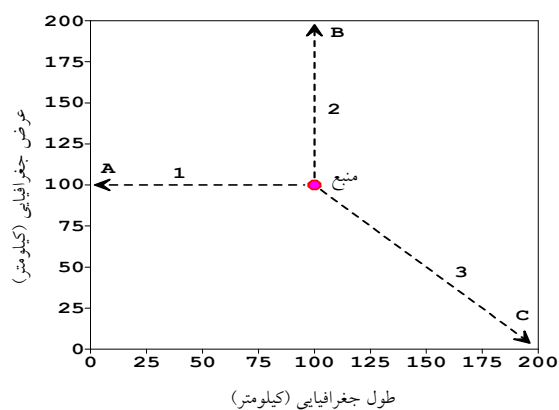
دامنه محاسباتی در دو جهت به ۱۰۰ قسمت تقسیم شده و بنابراین هر المان ابعاد ۲ در ۲ کیلومتر خواهد



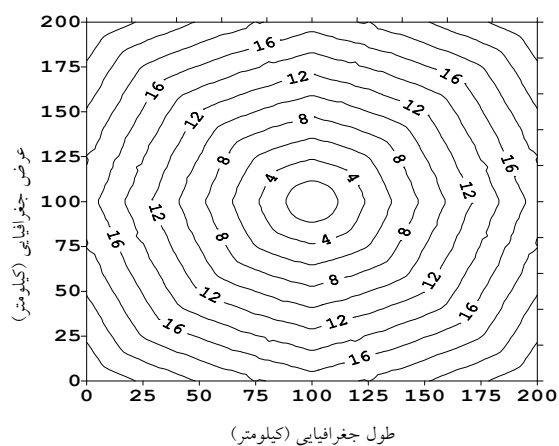
شکل ۷ روندنمای مدل



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸ الف) حوضچه آزمایشی با عمق آب ۱۰۰۰ متر، ب) در نظر گرفتن سه مسیر برای کنترل محاسبه زمان، ج) نتیجه اجرای برنامه برای حوضچه آزمایشی (اعداد مندرج بر روی منحنی‌ها بر حسب دقیقه است).

داشت. شکل ۸- ج نتایج حاصل از اجرای برنامه را برای حوضچه مذکور نشان می‌دهد. اعداد مندرج بر روی منحنی‌ها، بر حسب دقیقه است. از آنجاکه عمق آب در تمامی نقاط حوضچه برابرند، امواج سونامی با سرعت یکسان در تمام جهت‌ها منتشر می‌شوند. در نتیجه، الگوی انتشار امواج حول کانون زمین لرزه کاملاً متقارن خواهد بود. نتیجه اجرای برنامه که در شکل ۸- ج نشان داده شده، مؤید مطلب فوق است.

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، الگوی انتشار امواج سونامی حول منبع سونامی کاملاً متقارن بوده که این نشان‌دهنده صحت برنامه تهیه شده در پیش‌بینی الگوی انتشار است. در مرحله بعدی ضروری است که زمانهای محاسبه شده نیز مورد بررسی قرار گیرند. برای این منظور، سه مسیر که در شکل شماره ۸- ب نمایش داده شده، انتخاب شده و زمانهای محاسبه شده توسط مدل در روی آنها بررسی می‌شود.

بدیهی است که با توجه به رابطه ۲ و با عنایت به اینکه سرعت موج در تمامی قسمتهای حوضچه برابر $\sqrt{9/81 \times 1000}$ متر بر ثانیه است، امواج سونامی باید به ترتیب پس از $23/8$ و $16/83$ دقیقه به نقاط A و C برسند. هم‌چنین زمان رسیدن موج به نقطه B برابر با زمان رسیدن موج به نقطه A است. اضافه می‌شود که از آنجاکه فواصل نقاط شبکه محاسباتی منظم بوده و عمق آب نیز همواره ثابت است، نمودار زمان - مسافت باید کاملاً خطی باشد. در شکل ۹ زمانهای محاسبه شده توسط برنامه در سه جهت یاد شده نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، موارد پیش‌بینی شده محقق شده است.

۶- اطلاعات عمق آب اقیانوس در منطقه مکران

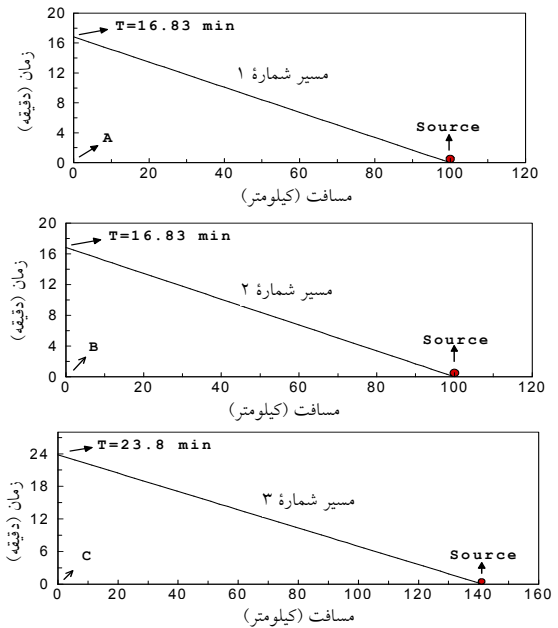
در این مطالعه، اطلاعات عمق آب اقیانوس از اطلس الکترونیکی جبکو^۱ نسخه سال ۲۰۰۳ که پنجمین نسخه آن است، استخراج شده است. این اطلس، مهم‌ترین، کامل‌ترین و به‌روزترین بانک اطلاعاتی موجود در زمینه اطلاعات عمق آب اقیانوس‌ها است. این بانک اطلاعاتی، محصول همکاری مشترک کمیسیون بین‌الدولی اقیانوس‌شناسی^۲، سازمان بین‌المللی هیدروگرافی^۳ و مرکز داده‌های اقیانوس‌شناسی انگلستان است [۲۶]. شبکه اطلاعات عمق اقیانوس ارائه شده توسط جبکو، دارای دو سطح وضوح شامل وضوح یک و پنج دقیقه‌ای، به ترتیب معادل وضوح ۱۸۵۰ و ۹۲۵۰ متر است. در این مطالعه از شبکه با دقت یک دقیقه‌ای استفاده می‌شود که در شکل ۱۰- الف نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که عمق آب اقیانوس در نواحی دور از ساحل ایران در حدود ۳۰۰۰ متر است. با نزدیک شدن به نواحی ساحلی، عمق آب به شدت کاهش می‌یابد.

منحنی‌های هم‌عمق نشان می‌دهد که در فاصله حدود ۶۰ کیلومتری از خط ساحلی، عمق آب به حدود ۱۰۰۰ متر و در فاصله حدود ۳۰ کیلومتری به ۵۰۰ متر می‌رسد.

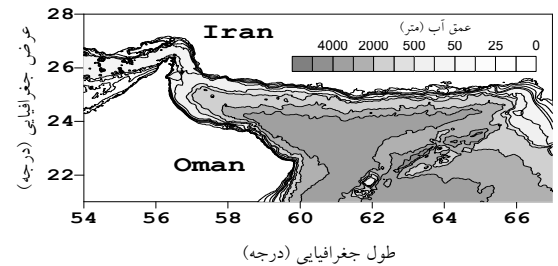
جدول ۱ موقعیت پنج سناریوی مختلف برای کانون زمین لرزه

شماره سناریو	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	نزدیکترین محل مسکونی
۱	۵۸	۲۴/۷۵	جاسک (ایران)
۲	۵۹	۲۴/۵۰	کوچ (ایران)
۳	۶۰	۲۴/۶۷	تنگ (ایران)
۴	۶۱	۲۴/۶۷	کاجو (ایران)
۵	۶۲	۲۴/۵۰	پیشوکان (پاکستان)

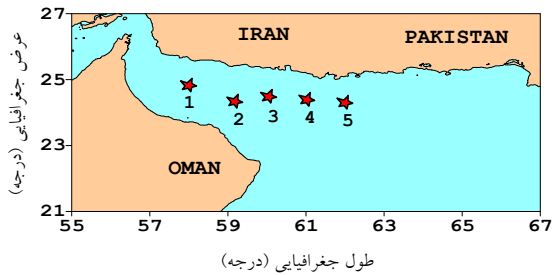
1. General Bathymetric Charts of the Oceans (GEBCO)
2. Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC)
3. International Hydrographic Organization (IHO)



شکل ۹ نمودار زمان - مسافت در روی سه مسیر مختلف



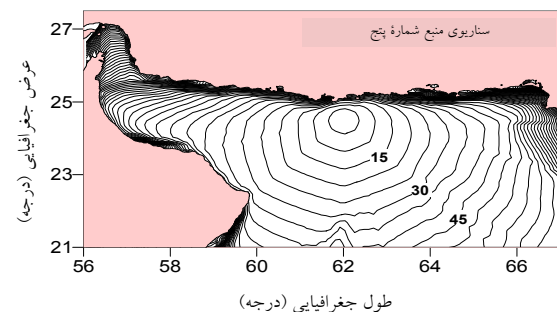
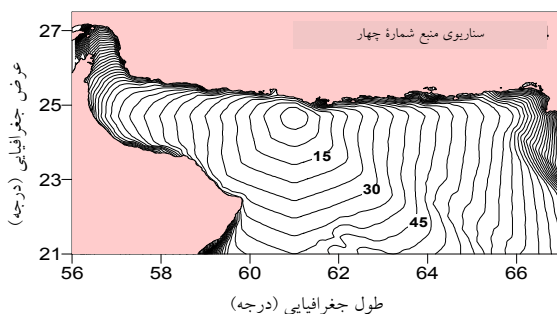
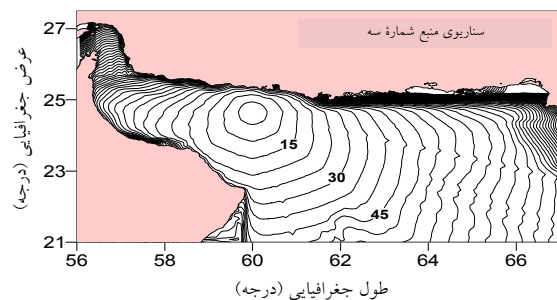
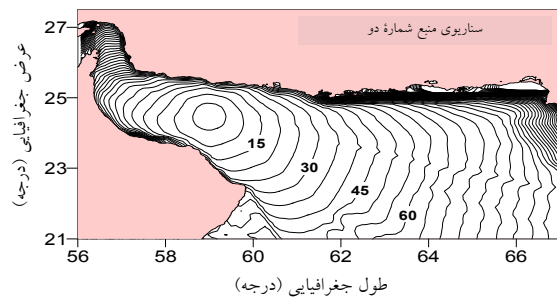
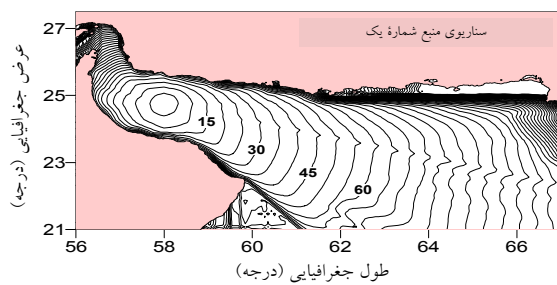
(الف)



(ب)

شکل ۱۰ الف) اطلاعات عمق آب اقیانوس برای منطقه مکران

با استفاده از داده‌های با دقت یک دقیقه از بانک اطلاعاتی GEBCO، ب) نمایش شماتیک سناریوهای مختلف برای منبع سونامی



شکل ۱۱ انتشار امواج سونامی از منابع مختلف سونامی را

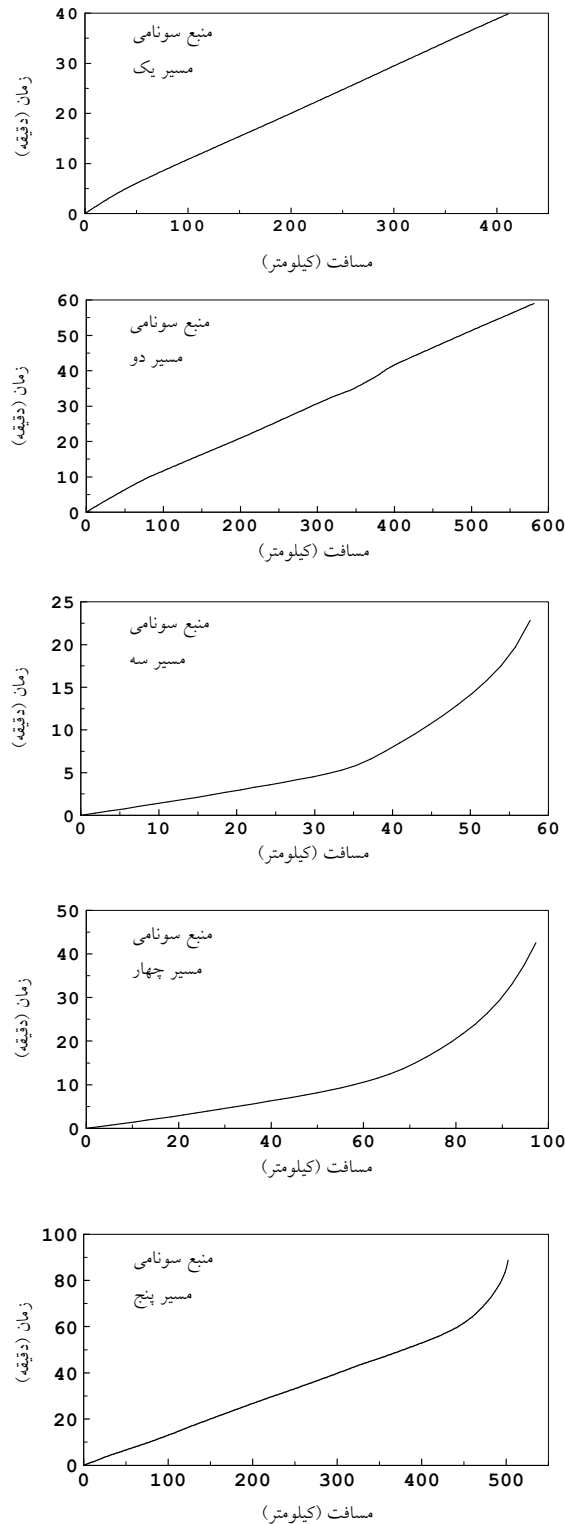
منطقه تنگه هرمز بسیار کم عمق و عمق متوسط آن در حدود ۷۰ متر است. بررسی منحنی های هم عمق در شکل ۱۰- الف نشان می دهد که به خلاف سواحل ایران، در سواحل عمان روند کاهش عمق با نزدیک شدن به خط ساحلی تدریجی نیست. در سواحل عمان، عمق متوسط ۱۰۰۰ متر در فاصله حدود ۱۰ کیلومتری از خط ساحل واقع شده است.

۷- به کارگیری مدل برای سواحل جنوبی ایران

به منظور بررسی الگوی انتشار و محاسبه زمان رسیدن امواج سونامی به سواحل جنوبی ایران، در ابتدا، نواحی سونامی زای موجود در ناحیه مکران مشخص می شود. بیرن و همکاران (۱۹۹۲) [۷] گزارش کرده اند که جبهه تغییر شکلی فعال^۱ در منطقه مکران در حدود کاتورتور عمق آب ۳۰۰۰ متری واقع شده است. با توجه به شکل ۱۰- الف، پنج ناحیه سونامی زا انتخاب شده و مدل تهیه شده برای هر یک از این سناریوها اجرا می شود. نواحی سونامی زای فوق، به طور خلاصه در جدول ۱ فهرست شده و طرحواره ای از آن در شکل ۱۰- ب نشان داده شده است.

شکل ۱۱، نتیجه اجرای مدل را برای سواحل جنوبی ایران با توجه به سناریوهای مختلف نشان می دهد. فاصله زمانی بین دو منحنی متوالی، برابر ۵ دقیقه است. در جدول ۲، زمان رسیدن اولین موج سونامی به چند نقطه مرجع واقع در سواحل جنوبی ایران، با توجه به سناریوهای مختلف ارائه شده است. شکل ۱۲- الف موقعیت نقاط مرجع انتخاب شده را نشان می دهد. شکل ۱۳، نمودار زمان - مسافت را برای چند مسیر دلخواه برای حالت سناریوی ۴ نشان می دهد. مسیرهای مورد نظر، در شکل ۱۲- ب مشخص شده است.

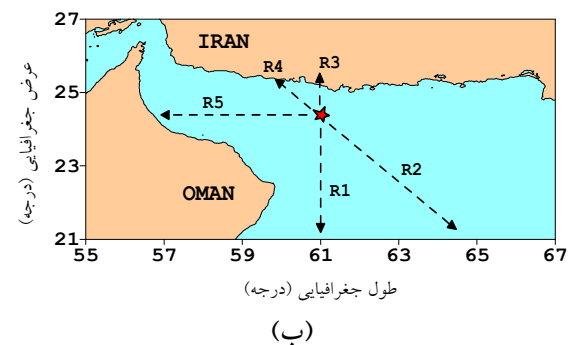
1. Active Deformation Front



شکل ۱۳ نمودار زمان حرکت - مسافت برای مسیرهای مختلف

جدول ۲ محاسبه زمان رسیدن اولین موج سونامی به نقاط مرجع بر حسب دقیقه

شماره نقطه مرجع	نام نزدیکترین محل مسکنی	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳	سناریوی ۴	سناریوی ۵
۱	لاری	۵۶/۴۰	۲۶/۹۸	۱۳۹	۱۵۳	۱۷۰	۱۸۴	۱۹۳
۲	سیریک	۵۶/۹۷	۲۶/۶۸	۱۰۱	۱۱۶	۱۳۱	۱۴۶	۱۵۶
۳	جاسک	۵۷/۷۶	۲۵/۶۲	۲۳	۳۶	۵۰	۶۴	۷۶
۴	کرتی	۵۹/۰۹	۲۵/۳۵	۲۴	۲۰	۲۹	۴۳	۵۶
۵	کلک	۵۹/۳۷	۲۵/۲۲	۳۶	۲۵	۲۴	۳۸	۵۲
۶	بیر	۵۹/۸۱	۲۵/۳۳	۴۱	۲۶	۱۹	۳۰	۴۵
۷	گوردیم	۶۰/۱۲	۲۵/۳۰	۴۱	۲۶	۱۶	۲۶	۴۱
۸	چابهار	۶۰/۶۰	۲۵/۲۵	۵۴	۳۶	۲۳	۱۹	۳۴
۹	بریس	۶۱/۱۷	۲۵/۰۷	۶۱	۴۱	۲۸	۱۵	۳۷



شکل ۱۲ الف) موقعیت نقاط مرجع انتخاب شده در سواحل ایران، ب) مسیرهای مرجع برای ترسیم نمودار زمان حرکت - مسافت

۸- مقایسه نتایج مدل با نتایج مدل سازی لرزه‌ای و هیدرودینامیک سونامی

اعلان صحیح خطر سونامی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. اعلان‌های نادرست از یک سو موجب از دست رفتن اعتماد عمومی نسبت به سیستم هشدار سونامی شده و از سوی دیگر، موجب افزایش صدمات جانی و مالی ناشی از سونامی خواهد شد. بنابراین، با توجه به حساسیت بالای زمان رسیدن امواج سونامی در جهت اعلان به موقع و صحیح خطر سونامی، در این قسمت نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج مدل سازی کامل امواج سونامی که با کمک ترکیبی از مدل‌های لرزه‌ای و هیدرودینامیک انجام می‌شود، مقایسه می‌گردد.

بدین منظور فرض می‌شود که زمین لرزه‌ای با بزرگی ۸ در محل منبع ۴ اتفاق بیفتد. با مدل سازی سونامی ناشی از آن، زمان رسیدن امواج سونامی به نقاط مرجع نشان داده شده در شکل ۱۲- الف محاسبه و سپس با زمانهای به دست آمده در جدول ۲ مقایسه می‌شود.

به منظور مدل سازی سونامی، نخست باید عامل ایجاد سونامی - که زمین لرزه است - مدل سازی شود. مقدار و الگوی تغییر شکل کف اقیانوس، پارامتری کلیدی در مدل سازی سونامی به شمار می‌رود. در این راستا، با استفاده از مدل‌های لرزه‌ای، تغییر شکل کف اقیانوس بر اثر وقوع زمین لرزه محاسبه می‌شود. در این مطالعه، برای مدل سازی مرحله تولید سونامی، از مدل ارائه شده توسط حیدرزاده و همکاران (۱۳۸۵) [۲۷] استفاده می‌شود.

بر مبنای مطالعات حیدرزاده و همکاران (۱۳۸۵)، در صورت وقوع زمین لرزه‌ای با بزرگی ۸، کف اقیانوس در منطقه فرورانش مکران دچار بالا آمدگی برابر ۱/۴۵ و افتی برابر ۰/۸۷ متر خواهد شد [۲۷]. شکل ۱۴- الف مقطع عرضی از کف اقیانوس پس از وقوع زمین لرزه مذکور را - که از [۲۷] برگرفته شده - نشان می‌دهد.

تغییر شکل کف اقیانوس ارائه شده در شکل ۱۴- الف، به عنوان شرایط اولیه برای مدل سازی انتشار امواج سونامی به شمار می‌رود. به منظور مدل سازی انتشار سونامی باید معادلات حاکم بر حرکت ذرات آب - که به معادلات آب کم عمق معروف است - با در نظر گرفتن تغییر شکل کف اقیانوس به عنوان شرط اولیه، حل شود.

در اینجا از روش ارائه شده توسط گوتو و همکاران (۱۹۹۷) [۲۸] - که در [۲۸] مورد بحث قرار گرفته - برای حل معادلات حاکم بر حرکت سونامی استفاده می‌شود. گوتو و همکاران (۱۹۹۷) به پیشنهاد و کمک مالی کمیسیون بین‌دولتی اقیانوس شناسی^۱ (وابسته به یونسکو) و با عنوان برنامه بین‌المللی مدل سازی سونامی برای مبادله^۲، مدلی را برای مدل سازی انتشار سونامی تهیه کردند. مدل مذکور به کمک روش اختلاف محدود و با در نظر گرفتن مش بندی غیر ساختار یافته تهیه شده است. این مدل سپس اصلاح شده و به مدل تونامی^۳ معروف شد.

1. Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC)

2. Tsunami Inundation Modeling for Exchange (TIME)

3. Tohoku University's Numerical Analysis Model for investigation of Tsunamis (TUNAMI)

شکل ۱۴- ب وضعیت انتشار سونامی مذکور را ۱۰ دقیقه پس از وقوع زمین لرزه نشان می‌دهد که از [۱] گرفته شده است. شکل ۱۴- ج تاریخچه زمانی امواج سونامی را در نقاط مرجع ۱ تا ۴ نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در صورت وقوع زمین لرزه‌ای با بزرگی ۸ در محل منبع ۴، اولین موج سونامی پس از ۴۰، ۶۰، ۱۵۰ و ۱۹۰ دقیقه به ترتیب به نقاط مرجع ۴ تا ۱ خواهد رسید. جدول ۳ نتایج به‌دست آمده برای زمان رسیدن اولین موج سونامی به ساحل را با زمان به‌دست آمده از مدل‌سازی کامل سونامی مقایسه می‌کند. جدول ۳ نشان می‌دهد که متوسط خطای حاصل در حدود ۵ درصد است که با توجه به ابعاد مسأله، مناسب و قابل قبول است.

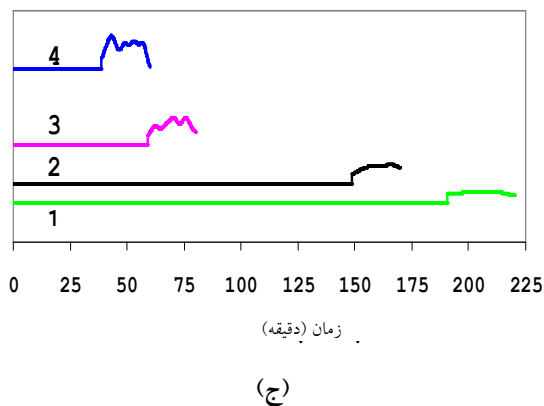
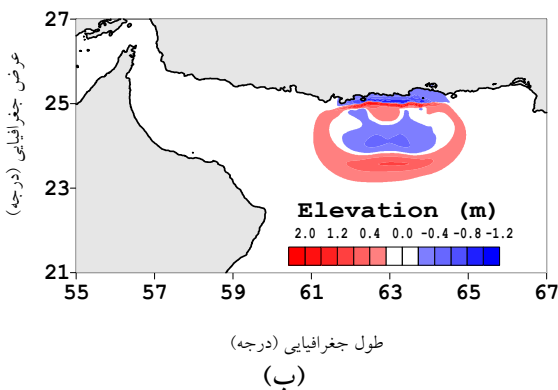
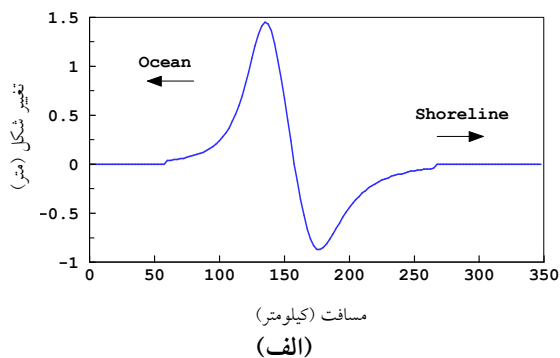
جدول ۳ مقایسه نتایج مدل با نتیجه مدل‌سازی کامل سونامی

شماره نقاط مرجع	نتیجه به‌دست آمده از مدل (دقیقه)	نتیجه مدل‌سازی سونامی (دقیقه)	خطا (%)
۱	۱۸۴	۱۹۰	۳
۲	۱۴۶	۱۵۰	۳
۳	۶۴	۶۰	۶
۴	۴۳	۴۰	۷
۵	۳۸	۳۶	۵
۶	۳۰	۲۷	۱۰
۷	۲۶	۲۴	۸
۸	۱۹	۱۸	۵
۹	۱۵	۱۵	۰

۹- تفسیر نتایج

با بررسی نتایج ارائه شده در فوق، جمع‌بندی زیر را می‌توان ارائه کرد.

۱- با بررسی زمان‌های ارائه شده در جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که در صورت وقوع زمین لرزه در منطقه فرورانش مکران، اولین موج سونامی در مدت حدود ۱۵ دقیقه نزدیکترین نقطه ساحلی ایران را مورد حمله قرار



شکل ۱۴ الف) مدل‌سازی مرحله تولید سونامی در مقطع عرضی کف اقیانوس پس از وقوع زمین لرزه [۲۸]، ب) وضعیت انتشار سونامی ۱۰ دقیقه پس از وقوع زمین لرزه [۲۹]، ج) تاریخچه زمانی ارتفاع امواج سونامی برای نقاط [۱ - ۴] در صورت وقوع زمین لرزه‌ای با بزرگی ۸ در محل منبع ۴

کند می‌شود. با کند شدن حرکت سونامی، امواج سونامی بخش قابل توجهی از انرژی خود را از دست داده و لذا زودتر مستهلک می‌شوند. بررسیها نشان می‌دهد که نرخ استهلاک انرژی امواج سونامی به‌طور معکوس تابعی از طول موج است. بنابراین هنگامی که سونامی به آبهای کم‌عمق وارد می‌شود، با کاهش طول موج سونامی، انرژی امواج با نرخ بالاتری مستهلک می‌شود. در صورتی که با ناحیه‌ای کم‌عمق و وسیع روبه‌رو باشیم (مانند منطقه تنگه هرمز و خلیج فارس) این نرخ استهلاک انرژی شدیدتر خواهد بود.

۴- نمودار مسافت - زمان ارائه شده در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که هنگامی که سونامی به سمت اقیانوس منتشر می‌شود (مسیرهای ۱ و ۲ در شکل ۱۳)، امواج از سرعت بالایی برخوردار بوده (حدود ۶۰۰ کیلومتر بر ساعت) و در مدت زمان کوتاهی، مسافتی طولانی را طی می‌کنند. در این حالت، نمودار مسافت - زمان تقریباً خطی است. از سوی دیگر، هنگامی که سونامی به سمت نواحی ساحلی انتشار می‌یابد، با توجه به کاهش تدریجی عمق آب اقیانوس، سرعت امواج سونامی نیز کاهش یافته و از حدود ۶۰۰ کیلومتر بر ساعت به حدود ۵۰ کیلومتر بر ساعت در نواحی ساحلی کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۳، نمودار مسافت - زمان در این حالت به‌صورت نمایی است.

۵- نتایج و روشهای ارائه شده در این مقاله را می‌توان در توسعه بانک اطلاعاتی زمان رسیدن امواج سونامی به سواحل جنوبی ایران - که یکی از اصلی‌ترین مؤلفه‌های سیستم‌های هشدار سونامی است - به‌کار گرفت. برای این منظور، ضروری است که تمامی سناریوهای محتمل برای منبع زمین لرزه مورد توجه قرار گیرد. همچنین، زمان رسیدن امواج سونامی برای تعداد بیشتری از نقاط ساحلی

خواهد داد. جدول ۲ نشان می‌دهد که در صورت وقوع زمین لرزه در محل منبع ۳، زمان رسیدن اولین موج سونامی به سواحل جنوبی ایران حدود ۱۶ دقیقه تخمین زده می‌شود و منطقه گوردیم، اولین نقطه ساحلی ایران است که مورد حمله سونامی قرار می‌گیرد. همچنین در صورت وقوع زمین لرزه در محل منبع ۴، منطقه بربیس پس از ۱۵ دقیقه مورد حمله امواج سونامی قرار خواهد گرفت. این بدین معنا است که هر گونه سیستم هشدار سونامی در این منطقه باید بتواند در مدت زمانی در حدود ۱۵ دقیقه اعلان‌خطر مورد نیاز را صادر کند. یادآوری می‌شود که زمانهای اعلام شده، زمان رسیدن اولین موج است و اولین موج سونامی، ممکن است بزرگترین موج سونامی نباشد.

۲- اگر چه منبع زمین لرزه در سناریوی ۱، در غربی‌ترین نقطه منطقه مکران قرار داده شده، اما زمان رسیدن امواج سونامی به سواحل در این سناریو، بیش از سایر سناریوها است که این ناشی از عمق کم آب اقیانوس در این ناحیه است. با کاهش عمق آب اقیانوس، با توجه به رابطه ۲، سرعت حرکت امواج کاهش یافته و در نتیجه زمان رسیدن موج به خط ساحلی افزایش خواهد یافت.

۳- بررسی منحنی انتشار سونامی که در شکل ۱۱ ارائه شده، نشان می‌دهد که در نزدیکی نواحی تنگه هرمز و ابتدای خلیج فارس، منحنی‌های زمان رسیدن امواج سونامی بسیار به هم نزدیک و فشرده می‌شوند. به بیان دیگر، فواصل بین منحنی‌ها به شدت کاهش می‌یابد. همان‌طور که در بند قبل اشاره شد، این ناشی از کاهش عمق آب اقیانوس در این ناحیه است. متوسط عمق آب در منطقه تنگه هرمز در حدود ۷۰ متر و در منطقه خلیج فارس در حدود ۵۰ متر است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که وقتی سونامی به آبهای بسیار کم‌عمق وارد می‌شود، بسیار

off the southern coasts of Iran and Pakistan and results of numerical modeling”, Ocean Engineering, Vol. 35, No. 8-9, pp. 774-786.

- [2] Geist E. L., Titov V. V. and Synolakis C. E., (2006), “Tsunami: Wave of Change”, Scientific American, January 2006, pp. 56-63.
- [3] <http://earthquake.usgs.gov>.
- [4] Pararas-Carayannis G., (2004), “The Earthquake and Tsunami of 28 November 1945 in Southern Pakistan”, International Conference HAZARDS 2004, 2-4 Dec., Hyderabad, India.
- [5] Heidarzadeh, M., Pirooz, M. D., Zaker, N. H., Yalciner, A. C., (2008), “Preliminary estimation of the tsunami hazards associated with the Makran subduction zone at the northwestern Indian Ocean”, Natural Hazards, Vol. 48, No. 2, pp. 229-243.
- [6] Ambraseys N. N. and Melville C. P., (1982), “A History of Persian Earthquakes”, Cambridge University Press, Britain.
- [7] Byrne D. E., Sykes L. R., Davis D. M., (1992), “Great Thrust Earthquakes and Aseismic Slip along the Plate Boundary of the Makran Subduction Zone”, Journal OF Geophysical Research, Vol. 97, No. B1, pp. 449-478.

باید مورد محاسبه قرار گیرد. در مجموع، برای استفاده عملی در سیستم هشدار سونامی، جدولی مشابه با جدول ۲ تهیه می‌شود.

۱۰- نتیجه‌گیری

با توجه به وجود خطر سونامی در سواحل جنوبی ایران، در این مقاله زمان رسیدن امواج سونامی احتمالی به این سواحل به منظور استفاده در سیستم هشدار سونامی، محاسبه شده است. از آنجاکه برای صدور اعلان هشدار سونامی، آگاهی از زمان رسیدن اولین موج سونامی اهمیت دارد، در این تحقیق مدلی برای پیش‌بینی زمان رسیدن اولین موج سونامی به خط ساحلی ارائه شده است. نتایج به دست آمده از مدل، نشان می‌دهد که در صورت وقوع زمین لرزه در ناحیه فرورانش مکران، زمان رسیدن اولین موج سونامی به سواحل جنوبی ایران در حدود ۱۵ دقیقه است. این بدان معنا است که هر گونه سیستم هشدار سونامی در این منطقه باید بتواند در مدت زمانی در حدود ۱۵ دقیقه اعلان خطر مورد نیاز را صادر کند. بررسی نحوه انتشار امواج سونامی در منطقه تنگه هرمز نشان می‌دهد که با توجه به کاهش عمق آب اقیانوس در این ناحیه، سرعت امواج سونامی به شدت کاهش یافته و بسیار کند می‌شود. با کند شدن حرکت سونامی، امواج سونامی بخش قابل توجهی از انرژی خود را از دست می‌دهند و لذا زودتر مستهلک می‌شود.

۱۱- منابع

- [1] Heidarzadeh, M., Pirooz, M. D., Zaker, N. H., Yalciner, A. C., Mokhtari, M., and Esmaeily, A., (2008), “Historical tsunami in the Makran subduction zone

- dor”, Geological Society of America, Special Paper No. 375.
- [14] Weissert T. P., (1990), “Tsunami Travel Time Charts for the Caribbean”, *Sc. of Tsunami Hazards*, Vol. 8, No. 2, pp. 67-78.
- [15] Mader C. L., (2001), “Modeling the La Palma Landslide Tsunami”, *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 19, pp. 150-170.
- [16] Mendes V. L., Baptista M. A., Miranda J. M., and Miranda P. M. A., (1999), “Can Hydrodynamic Modeling of Tsunami Contribute to Tsunami Risk Assessment”, *Phys. Chem. Earth A*, Vol. 24, No. 2, pp. 139-144.
- [17] Koshimura S. I., Imamura F., and Shuto N., (2001), “Characteristics of Tsunamis Propagating over Oceanic Ridges: Numerical Simulation of the 1996 Irian Jaya Earthquake Tsunami”, *Natural Hazards*, Vol. 24, pp. 213–229.
- [18] Hamouda A. Z., (2006), “Numerical computations of 1303 tsunamigenic propagation towards Alexandria, Egyptian Coast”, *Journal of African Earth Sciences*, Article in Press.
- [19] Mercado A., and McCann W., (1998), “Numerical Simulation of 1918 Puerto Rico Tsunami”, *Natural Hazards*, Vol. 18, pp. 57-76.
- [8] Heidarzadeh, M., Pirooz, M. D., Zaker, N. H., Synolakis, C. E., (2008), “Evaluating tsunami hazard in the northwestern Indian Ocean”, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 165, No. 11-12, pp. 2045-2058.
- [9] Berninghausen, W. H., (1968), “Tsunamis and Seismic Seiches Reported from the Western North and South Atlantic and the Coastal Waters of North Western Europe”, U. S. Naval Oceanographic Office, Geology Section, Marine Environmental Branch, Oceanographic Analysis Division. Informal Report IR #68-85, 48 p.
- [10] Murty, T. S., (1977), “Seismic Sea Waves Tsunamis”, Bulletin 198, Dept. of Fisheries and the Environment, Fisheries and Marine Service, Ottawa, Canada, 337 pp.
- [11] Satake, K., (1988), “Effects of Bathymetry on Tsunami Propagation: Application of Ray Tracing to Tsunamis”, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 126, pp. 28– 35.
- [12] Trifunac M. D., Hayir A., and Todorovska M. I., (2002), “Was Grand Banks Event of 1929 a Slump Spreading in Two Directions?”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, pp. 349–360.
- [13] Fernandez M., Ortiz M. F., and Mura R., (2004), “Tsunami Hazards in El Salva-

- physical Research, Vol. 108, No. B4, 2215.
- [26] IOC, IHO, and BODC, 2003, "Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas", published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans; British Oceanographic Data Centre, Liverpool.
- [27] محمد حیدرزاده، محرم دولتشاهی، ناصر حاجی‌زاده و محمد مختاری. (۱۳۸۷)، «ارزیابی پتانسیل سونامی‌خیزی و ارائه ساختار یک سیستم هشدار سونامی برای سواحل جنوبی ایران در حاشیه اقیانوس هند»، جلد ۴۴، صص ۵۸-۴۵ نشریه علمی و پژوهشی شریف.
- [28] Goto C., Ogawa Y., Shuto N., and Ima-mura F., (1997), "Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme (IUGG/IOC Time Project)", IOC Manual, UNESCO, No. 35.
- [20] Ben Menahem A., and Rosenman M., (1972), "Amplitude Patterns of Tsunami Waves from Submarine Earthquakes", J. Geophys. Res., Vol. 77, pp. 3097-3128.
- [21] AFP, (2005), "Death toll in Asian Tsunami Disaster", http://story.news.yahoo.com/news?tmpl=story2&u=/afp/20050305/wl_asia_afp/asiaquaketoll
- [۲۲] برگگی، خسرو. (۱۳۷۹)، «اصول مهندسی دریا»، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، چاپ اول.
- [23] Zahibo N., Pelinovsky E., Talipova T., Kozelkov A., Kurkin A., (2005), "Analytical and Numerical Study of Nonlinear effects at Tsunami Modeling", Applied Mathematics and Computation, Vol. 174, pp. 795-809.
- [24] Baptista M. A., Miranda P. M. A., Miranda J. M., and Victor L.M., (1998), "Constraints on the Source of the 1755 Lisbon Tsunami Inferred from Numerical Modeling of Historical Data on the Source of the 1755 Lisbon Tsunami", J. Geodynamics, Vol. 25, No. 2, pp. 159-174.
- [25] Ortiz M., Bilham R., (2003), "Source area and rupture parameters of the 31 December 1881 Mw = 7.9 Car Nicobar earthquake estimated from tsunamis recorded in the Bay of Bengal", Journal of Geo-