

تحلیل خطر احتمالاتی سونامی در امتداد ساحل جنوب شرق ایران

امین رشیدی^۱، و ناصر کشاورز فرج خواه^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲ استادیار، پژوهشکده علوم زمین، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۵)

چکیده

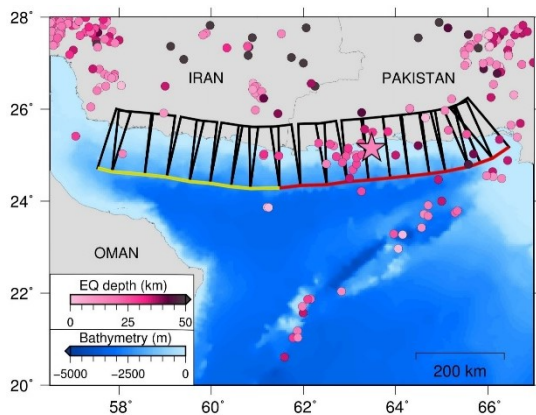
علی‌رغم ابهام در رفتار لرزه‌زایی زون فرورانش مکران در ساحل جنوب شرق ایران که به دلیل لرزه‌خیزی کم آن است، شواهد تاریخی و سونامی سال ۱۹۴۵ میلادی، بیان‌کننده پتانسیل سونامی‌زایی این زون هستند. رخداد سونامی‌های محتمل در آینده، ایران را بیش از هر کشور دیگری در معرض خطر ناشی از آن قرار خواهد داد. تحلیل خطر احتمالاتی سونامی، راهی مؤثر برای ارزیابی خطر ناشی از سونامی‌ها و کمکی جهت برنامه‌ریزی برای آینده است. در این مطالعه، با در نظر گرفتن زون فرورانش مکران، مکران غربی و مکران شرقی به‌عنوان چشمه‌های تولیدکننده سونامی، به برآورد خطر احتمالی سونامی در ساحل جنوب شرق ایران پرداخته شد. سناریوهایی برای وقوع زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای بین ۷/۵ تا ۸/۹ برای مکران غربی و مکران شرقی و سناریوهایی با بزرگای بین ۷/۵ تا ۹/۱ برای کل مکران در نظر گرفته شد. در این تحقیق، از نتایج مدل‌سازی عددی سونامی برای تحلیل خطر احتمالاتی سونامی استفاده شد. نتایج، ساحل کنارک (واقع در استان سیستان و بلوچستان، جنوب شرق ایران) را خطرپذیرترین ناحیه ساحلی در میان نقاط مهم مختلف برای سناریوهای مورد مطالعه نشان داد. کمترین خطرپذیری نیز از آن سیریک (واقع در استان هرمزگان، جنوب ایران) است. نتایج، حاکی از لزوم توجه به خطر درازمدت سونامی در این منطقه مهم از کشور ایران، به‌خصوص ناحیه بین جاسک و بریس است.

واژه‌های کلیدی: مکران، سونامی، جنوب شرق ایران، تحلیل خطر احتمالاتی، مدل‌سازی عددی

۱ مقدمه

زون فرورانش مکران، یک مرز صفحه‌ای همگرا به طول تقریبی ۹۰۰ کیلومتر به موازات سواحل جنوب شرق ایران و جنوب پاکستان است که در امتداد آن، صفحه عربستان به زیر صفحه اوراسیا رانده می‌شود (بایرن و همکاران، ۱۹۹۲ و اسمیت و همکاران، ۲۰۱۲). نرخ همگرایی از ۲/۳ سانتی‌متر در سال در مرز غربی تا ۲/۹ سانتی‌متر در سال در لبه شرقی مکران افزایش می‌یابد (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴). در سالیان اخیر، لرزه‌خیزی و پتانسیل سونامی‌زایی سؤال‌برانگیز این زون فرورانش، سبب افزایش توجه پژوهشگران به اهمیت خطر زمین‌لرزه و سونامی در این منطقه شده است (اُکال و سینولاکیس، ۲۰۰۸؛ حیدرزاده و همکاران، ۲۰۰۸ الف؛ شاه‌حسینی و همکاران، ۲۰۱۱؛ نیتو و همکاران، ۲۰۱۱؛ راجندران و همکاران، ۲۰۱۲؛ هافمن و همکاران، ۲۰۱۳؛ حیدرزاده و ساتاکه، ۲۰۱۴؛ اُکال و همکاران، ۲۰۱۵ و حیدرزاده و ساتاکه، ۲۰۱۷). با وجود ابهام در رفتار لرزه‌زایی مکران که ناشی از لرزه‌خیزی به‌نسبت کم و گوه‌برافزایشی بزرگ آن است (بایرن و همکاران، ۱۹۸۸)، رخداد زمین‌لرزه ۱۹۴۵ و وجود شواهدی نظیر پادگانه‌های جوان دریایی از زمین‌لرزه‌های تاریخی (مانند رویداد سال ۱۰۰۸ و رویداد سال ۱۴۸۳ میلادی)، نمایانگر فعال بودن و سونامی‌خیز بودن این منطقه است (بایرن و همکاران، ۱۹۹۲؛ حیدرزاده و همکاران، ۲۰۰۸ ب؛ اسمیت و همکاران، ۲۰۱۳؛ راجندران و همکاران، ۲۰۱۲). از نظر لرزه‌خیزی، زون فرورانش مکران به دو قطعه شرقی و غربی تقسیم می‌شود (شکل ۱). قطعه شرقی فعال است و زمین‌لرزه ۱۹۴۵ با بزرگای گشتاوری ۸/۱ را تولید کرده است (شکل ۱). این زمین‌لرزه منجر به تولید یک سونامی درخور توجه با امواجی تا ارتفاع ده متر در امتداد سواحل ایران، پاکستان، عمان و هند شد و نزدیک به ۴۰۰۰ نفر نیز کشته شدند (حیدرزاده و همکاران، ۲۰۰۸ ب). پتانسیل قطعه غربی برای تولید

زمین‌لرزه‌های بزرگ و سونامی‌زا به دلیل نداشتن لرزه‌خیزی درخور توجه و نبود رخداد زمین‌لرزه‌ای عمده حداقل در چند قرن گذشته (موسن، ۲۰۰۹)، مبهم است؛ با این حال، یکی از فرضیات مهم برای رفتار کنونی این قطعه، قفل‌شدگی و تجمع انرژی برای تولید زمین‌لرزه‌های بزرگ در آینده است (بایرن و همکاران، ۱۹۹۲؛ ظریفی، ۲۰۰۶؛ مختاری و همکاران، ۲۰۰۸؛ موسن، ۲۰۰۹؛ راجندران و همکاران، ۲۰۱۲؛ اسمیت و همکاران، ۲۰۱۳ و فرولینگ و اسزلیگا، ۲۰۱۶). برقراری این فرض، نقش مهمی در بررسی خطر سونامی در منطقه مکران خواهد داشت چون نشان‌دهنده قابلیت کل زون فرورانش مکران برای ایجاد زمین‌لرزه‌های سونامی‌زا است. شیب بسیار کم زون فرورانش مکران (۲ تا ۸ درجه) (کپ و همکاران، ۲۰۰۰ و شولتر و همکاران، ۲۰۰۲) قابلیت جفت‌شدگی را افزایش می‌دهد. این قابلیت می‌تواند شرایط مناسب برای قفل‌شدگی، تجمع تنش و تولید زمین‌لرزه‌های بزرگ در آینده را فراهم کند (گاتسچر و وستبروک، ۲۰۰۹ و اسمیت و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل ۱. نقشه لرزه‌خیزی مکران برای زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیشتر از ۴/۰ در سال‌های ۱۹۲۶ تا ۲۰۱۶ (ISC، ۲۰۱۱). ستاره، مکان رومرکز زمین‌لرزه سال ۱۹۴۵ مکران را نشان می‌دهد. زمین‌لرزه‌ها با دایره مشخص شده‌اند. که رنگ هر دایره نمایانگر عمق زمین‌لرزه است. خطوط مشکی، مشخص‌کننده مدل چشمه مکران و خطوط زرد و قرمز، متمایزکننده مکران غربی از مکران شرقی هستند.

سونامی‌های ۲۰۰۴ اقیانوس هند و ۲۰۱۱ ژاپن نشان دادند که مقیاس، شدت و اثرهای یک سونامی می‌تواند فراتر از انتظار باشد (سوپاسری و همکاران، ۲۰۱۳ و ساتاکه، ۲۰۱۴). در مناطقی که احتمال وقوع سونامی وجود دارد، باید توجه به خطر سونامی ناشی از سناریوهای خطرناک افزایش یابد. ارزیابی خطر سونامی به‌طور کلی با سه روش صورت می‌پذیرد (گونزالس و همکاران، ۲۰۰۹): حساسیت‌سنجی (Sensitivity Analysis)؛ تحلیل خطر قطعی (راهکار بدترین سناریو) (Deterministic Worst-case) یا (Tsunami hazard assessment scenario approach)؛ تحلیل خطر احتمالاتی (Probabilistic Tsunami hazard assessment, PTHA). روش اول، حساسیت دامنه یا میزان گسترش افقی سونامی در ساحل را نسبت به پارامترها و مشخصات چشمه بررسی می‌کند. در این روش، احتمال هر سناریو در نظر گرفته نمی‌شود (گونزالس و همکاران، ۲۰۰۹). راهکار قطعی (وتوراتو و همکاران، ۲۰۰۷؛ پارسونز، ۲۰۰۸؛ پریست و همکاران، ۲۰۰۹ و ویتز و همکاران، ۲۰۱۳) با در نظر گرفتن سناریوهای خاص (معمولاً بدترین سناریو)، اثرهای آنها را بر نقاط ساحلی خاص محاسبه می‌کند (ال‌حسین و همکاران، ۲۰۱۶). ضعف بالقوه این روش، تأکید بر یک سناریوی اصلی بدون در نظر گرفتن احتمال وقوع سونامی برای تمامی سناریوها در دوره بازگشت‌های مختلف است. برای رفع این نقیصه می‌توان از روش احتمالاتی استفاده کرد. ارزیابی خطر احتمالاتی (PTHA)، ابزار مفیدی را برای ارزیابی خطر سونامی با در نظر گرفتن احتمال سونامی‌ها فراهم می‌کند. هدف این روش، برآورد درست‌نمایی اثر سونامی در یک منطقه، برای محدوده‌ای از سناریوهای محتمل است. PTHA احتمال بیشتر شدن دامنه، بالاروی یا گسترش افقی سونامی را از یک مقدار معین در یک دوره زمانی معین در یک نقطه خاص محاسبه می‌کند. این احتمال را احتمال افزایش

(Probability Of Exceedance) یا POE می‌نامند. این روش توسط لین و تانگ (۱۹۸۲)، ریکیتاکه و آیدا (۱۹۸۸) و داووز و استرلینگ (۲۰۰۱) با تغییر روش تحلیل خطر لرزه‌ای (PSHA) توسعه یافت. در سال‌های اخیر و به‌خصوص بعد از سونامی ۲۰۰۴ اقیانوس هند، توجه به تحلیل خطر احتمالاتی افزایش دوچندان یافته است (برای مثال گیس و پارسونز، ۲۰۰۶؛ پاور و همکاران، ۲۰۰۷؛ ثیو و همکاران، ۲۰۰۷؛ گونزالس و همکاران، ۲۰۰۹؛ گریزو و همکاران، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲؛ سورنس و همکاران، ۲۰۱۲؛ هارسپول و همکاران، ۲۰۱۴ و فوکوتانتی و همکاران، ۲۰۱۶). برخی از پژوهشگران از این روش برای بررسی خطر سونامی در اقیانوس هند و مکران استفاده کرده‌اند (باریدج و همکاران، ۲۰۰۹، حیدرزاده و کیکو، ۲۰۱۱؛ ال‌حسین و همکاران، ۲۰۱۶؛ روشن و همکاران، ۲۰۱۶ و هوچنر و همکاران، ۲۰۱۶). هدف این مطالعه، ارزیابی خطر سونامی در امتداد ساحل جنوب شرق ایران به روش احتمالاتی برای سناریوهای وقوع زمین‌لرزه در کل زون فروانش مکران، مکران غربی و مکران شرقی است. به این منظور، با کمک شبیه‌سازی عددی سونامی، توزیع بیشینه ارتفاع سونامی ناشی از زمین‌لرزه‌ها در امتداد ساحل جنوب شرق ایران تعیین و برای تحلیل خطر احتمالاتی استفاده می‌شود. نتایج این مطالعه در درک خطر سونامی‌های محتمل و شدت احتمالاتی آنها در امتداد ساحل جنوب شرق ایران مفید است.

۲ روش تحقیق

تحلیل خطر احتمالاتی سونامی نیازمند نتایج شبیه‌سازی عددی سونامی و تعیین لرزه‌خیزی در ناحیه مورد مطالعه است. در این مطالعه، ابتدا مدل‌سازی سونامی برای هر سناریو اجرا شد. در مرحله بعد، پس از تعیین لرزه‌خیزی، برای برآورد خطر احتمالاتی در امتداد این ساحل به ترتیب از توزیع ارتفاع سونامی در امتداد ساحل جنوب شرق ایران

و نرخ وقوع سالیانه زمین‌لرزه‌ها استفاده شد. در ادامه، برای تحلیل خطر احتمالاتی سونامی، جزئیات بیشتر راهکار استفاده شده توضیح داده می‌شود.

۲-۱ مدل‌سازی عددی سونامی

زمین‌لرزه‌های سونامی‌زای رخ داده زیر سطح بستر دریا، سبب ایجاد میدان دگرشکلی در بستر دریا و در نتیجه در سطح آب دریا می‌شوند. از آنجا که این امر در مدت زمان بسیار کوتاهی صورت می‌گیرد - که در مقایسه با انتشار موج، به صورت آنی است - تغییر سطح اولیه آب دقیقاً برابر با مقدار جابجایی بستر دریا است (هلیف و سبکی، ۲۰۰۵). برای محاسبه دگرشکلی بستر اقیانوس که به عنوان شرایط اولیه در مدل‌سازی انتشار و بالاروی سونامی به کار می‌رود، از روش اکادا (۱۹۸۵) استفاده شد. در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی سونامی‌ها با استفاده از الگوریتم (Cornell Multigrid Coupled Tsunami) COMCOT (لیو و همکاران، ۱۹۹۸) اجرا شد. این الگوریتم، با به کارگیری روش‌های جهش قورباغه (leap frog) و تفاضلات محدود، معادلات خطی و غیرخطی موج کم‌عمق را در دستگاه‌های مختصات کروی و دکارتی حل می‌کند. تمامی شبیه‌سازی‌ها با طول زمانی ده ساعت و گام زمانی دو ثانیه برای معادلات غیرخطی آب کم‌عمق در دستگاه مختصات کروی انجام و از داده‌های عمق‌سنجی GEBCO با دقت تفکیک یک دقیقه (اسمیت و سندول، ۱۹۹۷؛ بکر و همکاران، ۲۰۰۹) (قابل دسترسی در <http://www.gebco.net/>) برای مدل‌سازی عددی سونامی‌ها استفاده شد.

در این پژوهش، مکران غربی، مکران شرقی و کل زون فرورانش مکران، چشمه‌های زمین‌لرزه محسوب می‌شوند. مدل چشمه به کار گرفته شده در این مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. این مدل شامل بیست قطعه با طول‌های مختلف در امتداد جبهه دگرشکلی مکران

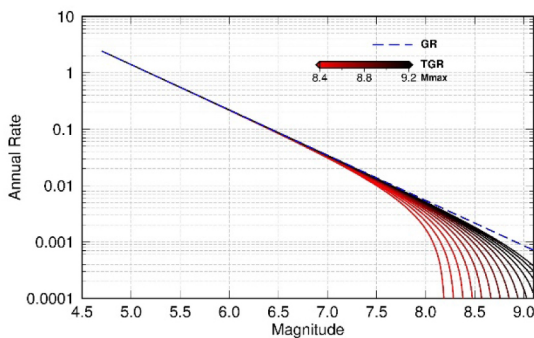
(کوکوسکی و همکاران، ۲۰۰۱) و پهنای ۲۱۰ کیلومتر (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۳) برای هر قطعه است. عمق بالایی گسل ۱۲ کیلومتر و شیب و زاویه لغزش به ترتیب ۷ و ۹۰ درجه براساس آکال و سینولاکیس (۲۰۰۸) در نظر گرفته شد. برای چشمه کل مکران، سناریوهایی با بزرگای بین ۷/۵ تا ۹/۱ و برای چشمه‌های مکران غربی و شرقی، سناریوهایی با بزرگای بین ۷/۵ تا ۸/۹ در نظر گرفته شد. حد بالای بزرگای این چشمه‌ها براساس اسمیت و همکاران (۲۰۱۳) تعیین شده است. اسمیت و همکاران (۲۰۱۳) برای ارزیابی پتانسیل لرزه‌زایی زون فرورانش مکران، یک تحلیل ترمومکانیکی انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که پوشش رسوبی ضخیم، منجر به ایجاد درجه حرارت‌های زیاد بین صفحه‌ای در جبهه دگرشکلی شده که سبب ایجاد پتانسیل لرزه‌زایی ابرراندگی کم‌عمق و کم‌شیب شده است. این امر باعث ایجاد یک زون وسیع لرزه‌زا با قابلیت تولید زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای بین ۸/۹ تا ۹/۱ در سمت دریا در امتداد زون فرورانش مکران می‌شود (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۳). شکل ۲، میدان دگرشکلی حاصل از یک سناریو با بزرگای ۹/۱ و شکل ۳، بیشینه دامنه سونامی حاصله را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، چون بخش عمیق‌تر گسل در پوسته قاره‌ای واقع است، تقریباً اثری از فروافتادگی در سمت دریا مشاهده نمی‌شود که این مسئله نشان‌دهنده موج پیشرو مرتفع (ارتفاع مثبت) است. بیشینه بالاآمدگی برای این سناریو، ۴ متر و بیشینه فروافتادگی ۴- متر است. بیشینه دامنه سونامی (شکل ۳) برای این سناریو، از صفر تا هشت متر تغییر می‌کند. میدان بیشینه ارتفاع (مثبت) موج سونامی ناشی از این سناریو، نمایانگر یک میدان خطر ناحیه‌ای بارز در دریای عمان و دریای عرب است. سواحل ایران، عمان و پاکستان بیش از سایر مناطق در معرض خطر هستند که در میان آنها، بیشینه دامنه امواج سونامی در امتداد سواحل ایران و عمان از

این حالت، نرخ وقوع سالیانه زمین لرزه‌ها باید محاسبه شود؛ بنابراین از رابطه گوتنبرگ-ریشتر قطع شده (the truncated Gutenberg-Richter relation) (کاستینو و همکاران، ۱۹۷۷ و ویچرت، ۱۹۸۰) استفاده شد (شکل ۴):

$$v(M) = v(M_{min}) \left(1 - \frac{1 - e^{-\beta(M - M_{min})}}{1 - e^{-\beta(M_{max} - M_{min})}} \right) \quad (1)$$

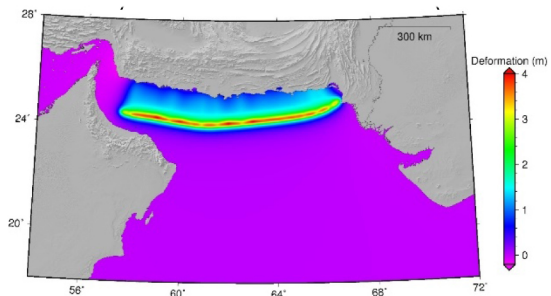
$$M_{min} < M < M_{max}, \quad \beta = b \ln 10$$

که $v(M)$ نرخ وقوع سالیانه رویدادهای با بزرگای بیشتر یا مساوی M است. M_{max} و M_{min} بزرگای کمینه و بیشینه هستند. بزرگای کمینه در این رابطه، بزرگای کمال (magnitude of completeness) لرزه‌خیزی (شکل ۱) است (سورنسن و همکاران، ۲۰۱۲) که با اعمال روش درست‌نمایی بیشینه ویچرت (۱۹۸۰)، برابر با $4/7$ به دست آمد. بزرگای بیشینه نیز براساس اسمیت و همکاران (۲۰۱۳)، به عنوان کران بالایی برای کل مکران $9/2$ و برای مکران غربی و مکران شرقی $9/0$ در نظر گرفته شد. تغییر بزرگای بیشینه می‌تواند سبب تغییر در رابطه گوتنبرگ-ریشتر قطع شده شود (شکل ۴). پارامتر b از روی شیب رابطه گوتنبرگ-ریشتر (شکل ۴) برابر با $0/8$ به دست آمد.

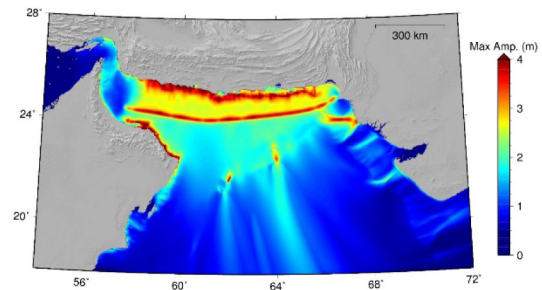


شکل ۴. رابطه به دست آمده بین بزرگا و نرخ وقوع سالیانه برای زون فرورانش مکران. خطوط قرمز، روابط گوتنبرگ-ریشتر قطع شده برحسب بزرگای بیشینه متغیر و خط چین آبی، رابطه گوتنبرگ-ریشتر را برای مقایسه نشان می‌دهد.

شدت و بزرگای بیشتری نسبت به پاکستان برخوردار است. در دریای عمان و دریای عرب، در جایی که تقریباً پشته مورای واقع است، یک تمایز نسبی بین بیشینه دامنه‌های امواج سونامی دیده می‌شود.



شکل ۲. میدان دگرشکلی محاسبه شده (برحسب متر) برای سناریوی با بزرگای $9/1$



شکل ۳. میدان بیشینه دامنه محاسبه شده (برحسب متر) برای یک سناریو با بزرگای $9/1$ برای ده ساعت پس از وقوع زمین لرزه. شرط اولیه در مدل سازی این سناریو، میدان دگرشکلی نشان داده شده در شکل ۲ است.

۲-۲ لرزه‌خیزی

روش احتمالاتی، بزرگا و فرکانس وقوع هر سناریوی تولیدکننده سونامی را در نظر می‌گیرد؛ بنابراین برای ارزیابی خطر سونامی، این روش راهکار مناسب‌تری است (پاناگیساوا و همکاران، ۲۰۰۷). از آنجاکه برای تولید سونامی، باید یک زمین لرزه بزرگ در دریا روی دهد، با فرض اینکه امکان وقوع زمین لرزه سونامی‌زا توسط چشمه سونامی وجود دارد، تعیین احتمال وقوع چنین زمین لرزه‌ای برای ارزیابی احتمالاتی خطر سونامی ضروری است. در

۲-۳ خطر احتمالاتی سونامی

در این مطالعه، با در نظر گرفتن فرآیند پواسونی، برای چشمه‌های متعدد، احتمال اینکه ارتفاع موج در مدت زمان خاص از یک مقدار معین فراتر رود، محاسبه شد. این فرآیند، اجازه محاسبه احتمال وقوع یک ارتفاع موج ناشی از یک سناریوی زمین‌لرزه را می‌دهد. با این فرض که سناریوی سونامی‌زای k_i با نرخ وقوع سالانه v_i از فرآیند پواسونی پیروی می‌کند، احتمال وقوع سالانه آن برابر خواهد بود:

$$P(S_i) = 1 - \exp(-v_i). \quad (2)$$

اگر N تعداد تمامی سناریوها باشد، احتمال کل اینکه ارتفاع سونامی، η ، در نقطه ساحلی (یا خط ساحلی) z ، از یک مقدار معین η_c در یک دوره زمانی معین T فراتر رود، از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$P(\eta \geq \eta_c) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - (1 - \exp(-v_i T)) P(\eta \geq \eta_c | S_i)]. \quad (3)$$

که $P(\eta \geq \eta_c | S_i)$ احتمال این است که ارتفاع سونامی حاصل از سناریوی S_i ، که از مدل‌سازی عددی سونامی به دست آمده است، در نقطه ساحلی (یا خط ساحلی) z ، از مقدار معین η_c فراتر رود:

$$P(\eta \geq \eta_c | S_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } \eta \geq \eta_c \\ 0 & \text{if } \eta < \eta_c \end{cases} \quad (4)$$

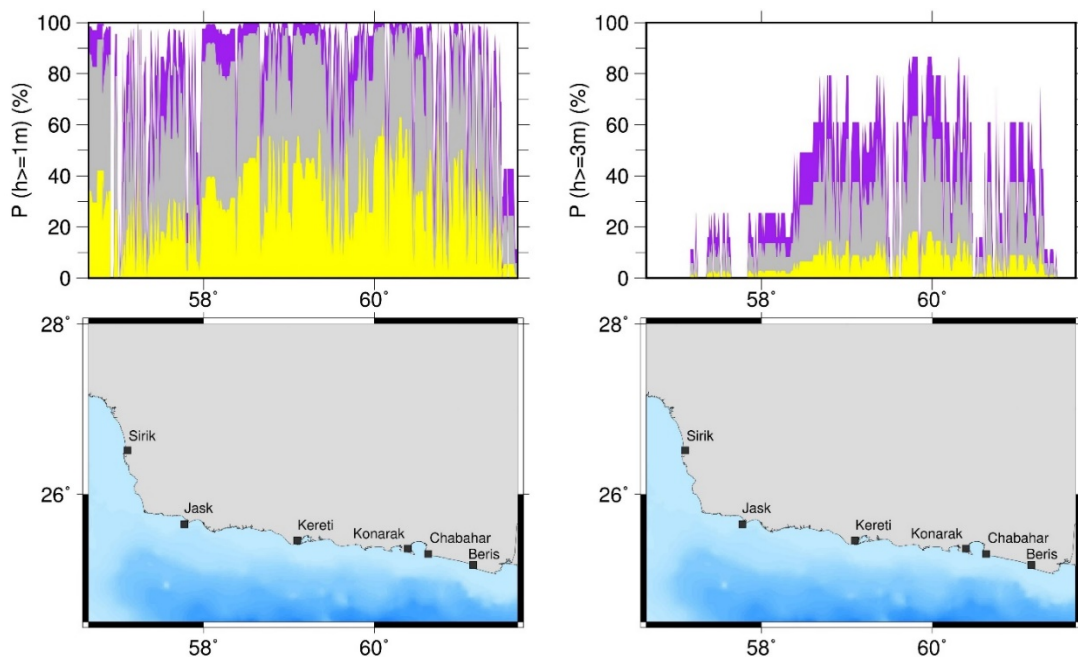
نتایج این مطالعه، علاوه بر محاسبه احتمال افزایش (رابطه ۲) در امتداد ساحل جنوب شرق ایران، شامل احتمال افزایش به صورت تابعی از بیشینه ارتفاع سونامی در دوره‌های زمانی معین در هر نقطه از ساحل جنوب شرق ایران، ارتفاع احتمالاتی سونامی در دوره‌های زمانی معین در امتداد ساحل جنوب شرق ایران و ارتفاع احتمالاتی

سونامی به صورت تابعی از زمان نیز هست. ارتفاع احتمالاتی سونامی (PTH)، ارتفاعی از موج است که یک‌بار در یک زمان معین (دوره بازگشت) مورد انتظار است (برنارد و رایبسون، ۲۰۰۹؛ سورنسن و همکاران، ۲۰۱۲).

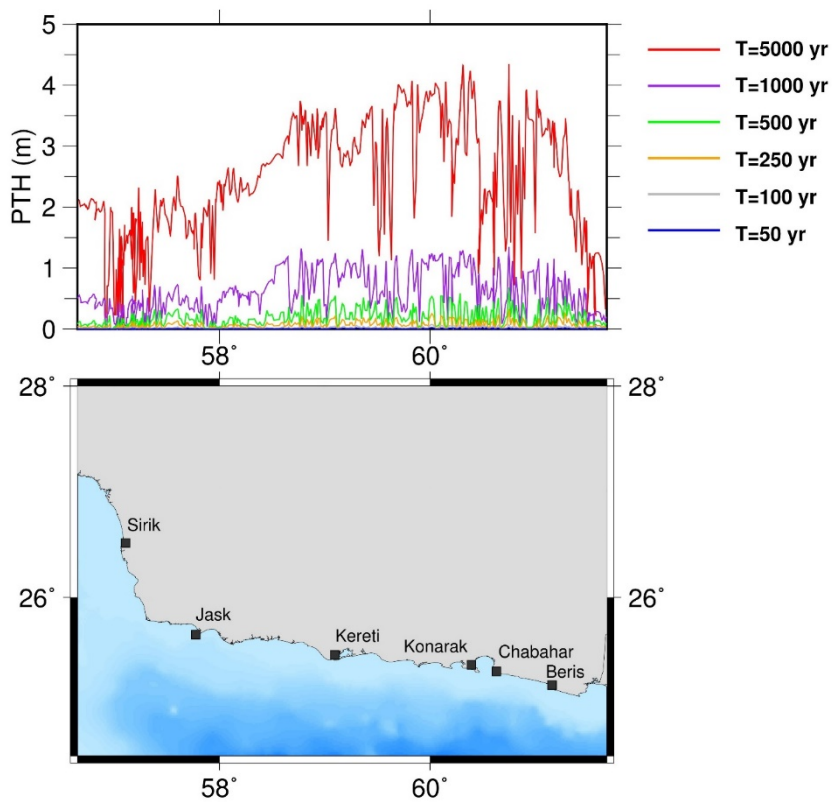
۳ نتایج و بحث

شکل‌های ۵ تا ۹ نتایج تحلیل خطر احتمالاتی در امتداد ساحل جنوب شرق ایران را نشان می‌دهند. در شکل ۵، احتمال افزایش (POE) ارتفاع سونامی از یک و سه متر در ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ سال، به نمایش درآمده است. در دوره‌های زمانی ذکر شده، احتمال افزایش ارتفاع سونامی از یک متر، در امتداد خط ساحلی جنوب شرق ایران، توزیع تقریباً مشابهی دارد. این احتمال با گذشت زمان تشدید می‌شود. بیشینه مقدار آن برای ارتفاع یک متر در ۱۰۰ سال، ۶۳ درصد در حوالی کنارک و چابهار است. میزان آن در ۵۰۰ سال در همین نواحی تقریباً ۱۰۰ درصد است. این مقادیر برای کرتی به ترتیب برابر با ۵۶ و ۹۸ درصد و برای جاسک برابر با ۳۰ و ۸۴ درصد است. POE برای یک متر در ۱۰۰۰ سال، در اغلب نقاط ساحلی مهم، برابر یا در حدود ۱۰۰ درصد است. نکته جالب توجه، زیاد بودن درصد احتمال در غربی‌ترین بخش خط ساحلی است؛ خطرپذیری تجمعی این ناحیه با سایر نواحی قابل مقایسه است. برای اکثر مناطق، خطرپذیری هم در کوتاه‌مدت و هم در بلندمدت، زیاد است.

در امتداد خط ساحلی جنوب شرق ایران، توزیع POE برای سه متر نسبت به یک متر، دامنه کمتری دارد. به‌طور تقریبی، مقدار آن در میانه خط ساحلی، بیشتر از غرب و شرق خط ساحلی است. بیشینه مقادیر POE در ناحیه‌ای بین کنارک و کرتی (۸۷ درصد) رخ می‌دهد. کنارک و غرب آن بیشترین میزان خطرپذیری را در میان نقاط مهم ساحلی دارند. در لبه شرقی و به‌خصوص لبه



شکل ۵. احتمال افزایش ارتفاع سونامی از یک متر (چپ) و سه متر (راست) در دوره‌های زمانی ۱۰۰ سال (زرد رنگ)، ۵۰۰ سال (خاکستری رنگ) و ۱۰۰۰ سال (بنفش رنگ) در امتداد ساحل جنوب شرق ایران

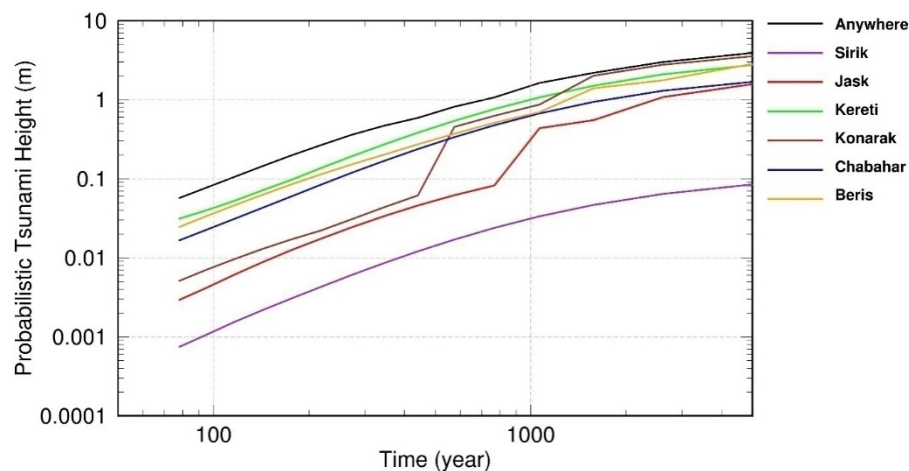


شکل ۶. توزیع ارتفاع احتمالاتی سونامی در دوره‌های زمانی ۵۰ تا ۵۰۰۰ سال در امتداد ساحل جنوب شرق ایران

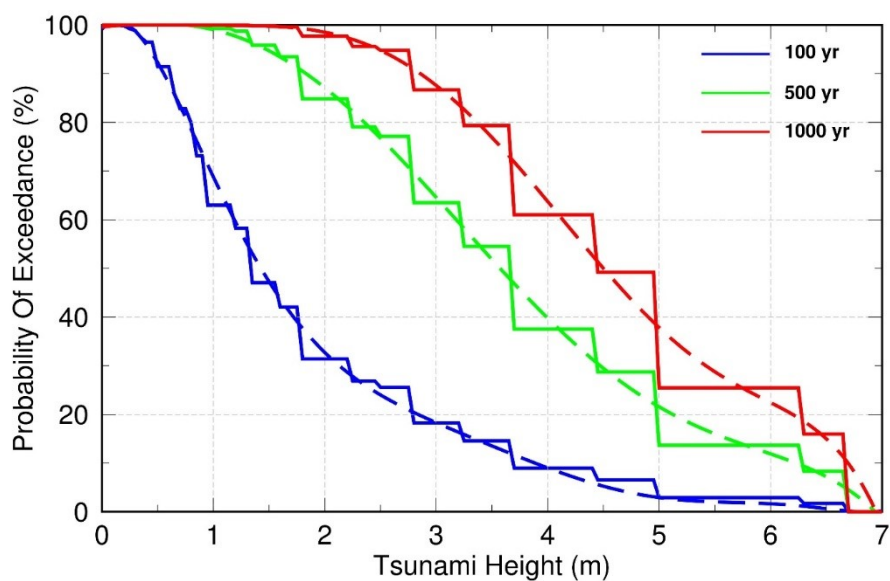
می‌شود، با افزایش دوره زمانی، PTH نیز زیاد می‌شود و مقدار آن در تمامی دوره‌های زمانی، از غرب به شرق خط ساحلی افزایش می‌یابد. PTH در ناحیه بین بریس تا غرب کرتی، بیشتر از سایر مناطق است. بیشینه میزان آن در ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ سال به ترتیب ۰/۱، ۰/۳، ۰/۷، ۱/۵ و ۴/۵ متر است. بیشترین دامنه سونامی در ۵۰۰۰ سال، در سواحل کنارک و چابهار مشاهده می‌شود. مقدار PTH در ۵۰۰۰ سال در امتداد خط ساحلی از ۰/۱ تا ۴/۵ متر تغییر می‌کند. در شکل ۷، ارتفاع احتمالاتی سونامی به صورت تابعی از زمان برای کل خط ساحلی جنوب شرق ایران و برای چند بندر مهم در امتداد خط ساحلی به تصویر کشیده شده است. بیشترین خطر در بین بنادر، متوجه کنارک و کمترین خطر متوجه سیریک است. برخلاف جاسک و کنارک، PTH در بقیه نقاط با گذشت زمان به طور یکنواخت‌تری افزایش می‌یابد. نرخ افزایش خطر در طول زمان در دو بندر جاسک و کنارک بیشتر از سایرین است. PTH در کنارک بعد از ۴۴۱ سال و در جاسک بعد از ۷۶۸ سال، افزایش ناگهانی دارد. کرتی، چابهار و بریس به طور تقریبی، در طول زمان در معرض خطر یکسانی هستند، البته در میان این سه، کرتی در معرض خطر بیشتری قرار دارد.

غربی (به سمت تنگه هرمز) به دلیل مکان نسبی این ناحیه نسبت به چشمه‌های سونامی‌زا، مقدار POE برای سه متر تقریباً صفر است، ولی برای یک متر، مخالف صفر است. برای چابهار، کنارک، کرتی و جاسک، احتمال افزایش ارتفاع سونامی از سه متر در ۱۰۰ سال به ترتیب ۹، ۱۵، ۳ و درصد، در ۵۰۰ سال به ترتیب ۳۸، ۵۵، ۱۳ و درصد و در ۱۰۰۰ سال به ترتیب ۶۱، ۷۹، ۶۱ و ۲۵ درصد است. در کوتاه‌مدت، خطر رخ دادن سونامی با ارتفاع موج بیش از سه متر به نسبت کم است، اما با گذشت زمان و در درازمدت، رویدادها می‌توانند به شدت خطر آفرین باشند و خسارات فراوانی را به ویژه در قسمت مرکزی، بین بریس و جاسک وارد کنند. خطر سونامی در کوتاه‌مدت، تحت کنترل رویدادهای کوچک‌تر است، اما در بلندمدت رویدادهای بزرگ‌تر و نزدیک به بیشینه بزرگ هستند که به شدت بر خطر سونامی تأثیر می‌گذارند. این مسئله لزوم آینده‌نگری، به کارگیری تلاش بیشتر جهت کاهش خطر سونامی در سواحل جنوب شرق ایران به ویژه در اطراف بنادر مهم و توسعه سامانه هشدار سونامی را در آن نواحی می‌رساند.

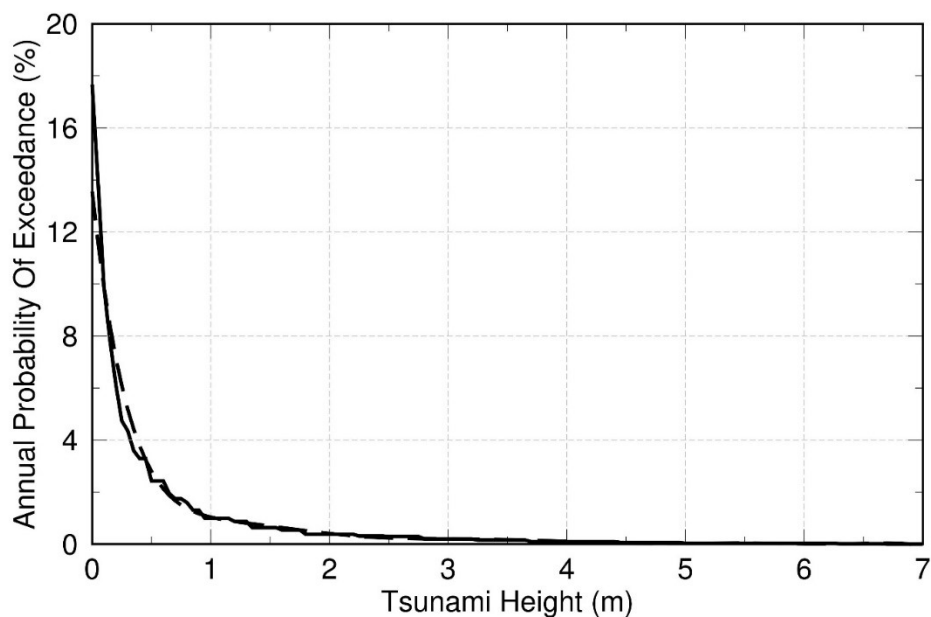
توزیع ارتفاع احتمالاتی (PTH) در امتداد خط ساحلی جنوب شرق ایران در دوره‌های زمانی ۵۰ تا ۵۰۰۰ سال در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده



شکل ۷. ارتفاع احتمالاتی سونامی به صورت تابعی از زمان برای کل خط ساحلی جنوب شرق ایران و برای چند بندر مهم در امتداد خط ساحلی جنوب شرق ایران



شکل ۸. احتمال افزایش در حداقل یک مکان در ساحل جنوب شرق ایران به صورت تابعی از بیشینه ارتفاع در دوره‌های زمانی ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ سال. خط چین، برازش منحنی قوی (Robust Curve Fit) را نشان می‌دهد.



شکل ۹. احتمال سالانه افزایش در حداقل یک مکان در ساحل جنوب شرق ایران به صورت تابعی از بیشینه ارتفاع سونامی

یک متر و بیشتر در ۱۰۰ سال در جنوب شرق ایران تقریباً ۷۰ درصد و در ۵۰۰ و ۱۰۰۰ سال تقریباً ۱۰۰ درصد است. این مقدار برای سه متر در ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ سال به ترتیب ۱۸، ۶۴ و ۸۷ درصد است. مقدار POE برای پنج متر در

شکل ۸ نشان‌دهنده احتمال افزایش (POE) در حداقل یک مکان در ساحل جنوب شرق ایران به صورت تابعی از بیشینه ارتفاع در دوره‌های زمانی ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله است. با توجه به شکل، احتمال رخداد سونامی با ارتفاع

۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ سال به ترتیب ۳، ۱۴ و ۲۵ درصد است. در شکل ۹ احتمال سالیانه افزایش در حداقل یک مکان در ساحل جنوب شرق ایران به صورت تابعی از بیشینه ارتفاع سونامی نمایش داده شده است. احتمال سالیانه رخداد سونامی با ارتفاع یک متر و بیشتر، یک درصد است. این مقدار برای دو متر و سه متر به ترتیب ۰/۴ و ۰/۲ درصد است. مقدار POE سالیانه برای ارتفاع بیش از چهار متر، تقریباً صفر است.

۴ نتیجه‌گیری

به منظور برآورد خطر احتمالی سونامی در ساحل جنوب شرق ایران، مدل چشمه چند قطعه‌ای برای زون فرورانش مکران در نظر گرفته شد. چشمه‌های تولیدکننده سونامی، زون فرورانش مکران، قطعه غربی و قطعه شرقی هستند. سناریوهایی با بزرگای بین ۷/۵ تا ۹/۱ برای کل مکران و سناریوهایی با بزرگای بین ۷/۵ تا ۸/۹ برای مکران غربی و مکران شرقی فرض شد. برای تحلیل خطر احتمالاتی سونامی در امتداد ساحل جنوب شرق ایران، از نتایج مدل‌سازی عددی توزیع ارتفاع سونامی استفاده شد. براساس نتایج، ساحل کنارک خطرپذیرترین ناحیه ساحلی در میان نقاط مهم مختلف برای سناریوهای مورد مطالعه است. کمترین خطرپذیری را نیز سیریک از آن خود می‌کند. احتمال افزایش ارتفاع سونامی از یک متر و سه متر با گذشت زمان افزایش می‌یابد. احتمال افزایش ارتفاع از یک متر در حوالی کنارک بیشترین مقدار خود را دارد. میزان این احتمال در غرب خط ساحلی نیز مقدار درخور توجهی دارد که حاکی از لزوم توجه به تمام طول خط ساحلی جنوب شرقی ایران است. احتمال افزایش ارتفاع سونامی از سه متر، در میانه خط ساحلی نسبت به غرب و شرق آن بیشتر است. بیشینه میزان احتمال در ناحیه‌ای بین کنارک و کرتی رخ می‌دهد. میزان ارتفاع احتمالاتی در امتداد خط ساحلی با گذشت زمان زیاد

می‌شود و مقدار آن نیز از غرب به شرق افزایش می‌یابد، اما در لبه شرقی سیر نزولی دارد. به طور کلی، در ناحیه‌ای بین بریس تا غرب کرتی، بیشینه میزان ارتفاع احتمالاتی رخ می‌دهد. بیشتر انرژی تولید شده از سونامی به ویژه انرژی سونامی‌های حاصل از چشمه مکران غربی به سمت این ناحیه هدایت می‌شود. نواحی با جهت‌گیری عمود بر چشمه گسلی، بیشترین تأثیر را از امواج سونامی ناشی از آن می‌پذیرند. تغییر ارتفاع احتمالاتی با زمان نیز نشان داد که کنارک بیشترین و سیریک کمترین خطر را دارد. مقدار احتمال سالیانه افزایش برای ارتفاع‌های یک، دو و سه متر به ترتیب ۱، ۰/۴ و ۰/۲ درصد به دست آمد. این میزان برای ارتفاع بیش از چهار متر ناچیز یا برابر صفر است. افزایش میزان ارتفاع احتمالاتی با گذشت زمان و زیاد بودن درصد احتمال رخداد ارتفاع بیش از سه متر در ۵۰۰ سال (۶۴ درصد) و ۱۰۰۰ سال (۸۷ درصد)، بیانگر اهمیت آینده‌نگری، توجه به خطر درازمدت سونامی برای برنامه‌ریزی و توسعه سامانه هشدار سونامی در جنوب شرق ایران است.

ارزیابی خطر سونامی صورت گرفته در این مطالعه، تنها بخشی از تلاش مورد نیاز برای مطالعه سونامی در این ناحیه است. مطالعات و تلاش‌های بیشتری در این زمینه با در نظر گرفتن خطر سونامی در کوتاه‌مدت، میان‌مدت و درازمدت ضروری است. در این مطالعه، به دلیل نبود نقشه‌های عمق‌سنجی و توپوگرافی محلی با قدرت تفکیک زیاد، میزان گسترش سونامی در سواحل بررسی نشد. در پژوهش حاضر، نواحی در معرض بیشترین و کمترین خطر سونامی براساس ارتفاع موج و خطر سونامی در خط ساحلی تعیین شدند و انتظار می‌رود که در خشکی نیز به همین صورت باشد، اگرچه امکان بروز رفتار متفاوت موج در حین نفوذ به خشکی وجود دارد. برای ارزیابی خطر احتمالاتی سونامی، محاسبه ارتفاع امواج سونامی در خط ساحلی به تنهایی کفایت می‌کند، اما برای بررسی و

- Frohling, E., and Szeliga, W., 2016, GPS constraints on interplate locking within the Makran subduction zone: *Geophysical Journal International*, **205**, 67-76.
- Fukutani, Y., Suppasri, A., and Imamura, F., 2016, Stochastic analysis and uncertainty assessment of tsunami wave height using a random source parameter model that targets a Tohokutype earthquake fault: *Stochastic Environmental Research and risk Assessment*, **29**(7), 1763-1779.
- Geist, E. L., and Parsons, T., 2006, Probabilistic analysis of tsunami hazards: *Natural Hazards*, **37**(3), 277-314.
- Gonzalez, F. I., Geist, E. L., Jaffe, B., Kanoglu, U., Mofjeld, H., Synolakis, C. E., et al., 2009, Probabilistic tsunami hazard assessment at Seaside, Oregon, for near-and far-field seismic sources: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **114**, C11023, doi:10.1029/2008JC005132.
- Grezio, A., Marzocchi, W., Sandri, L., and Gasparini, P., 2010, A Bayesian procedure for probabilistic tsunami hazard assessment: *Natural Hazards*, **53**(1), 159-174.
- Grezio, A., Gasparini, P., Marzocchi, W., Patera, A., and Tinti, S., 2012, Tsunami risk assessments in Messina, Sicily-Italy: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **12**, 151-163.
- Gutscher, M. A., and Westbrook, G. K., 2009, Great earthquakes in slow subduction, low-taper margins, in *Subduction Zone Geodynamics*, in: Lallemand S., Funicello F. (Eds.): *Subduction Zone Geodynamics*, Springer-Verlag Berlin, Berlin, 119-133.
- Halif, M. N. A., and Sabki, S. N., 2005, The physics of tsunami: Basic understanding of the Indian Ocean disaster: *American Journal of Applied Sciences*, **2**(8), 1188-1193.
- Heidarzadeh, M., Pirooz, M. D., Zaker, N. H., Synolakis, C. E., 2008a, Evaluating tsunami hazard in the northwestern Indian Ocean: *Pure and Applied Geophysics*, **165**(11-12), 2045-2058.
- Heidarzadeh, M., Pirooz, M. D., Zaker, N. H., Yalciner, A. C., Mokhtari, M., and Esmaily, A., 2008b, Historical tsunami in the Makran subduction zone off the southern coasts of Iran and Pakistan and results of numerical modeling: *Ocean Engineering*, **35**(8-9), 774-786.
- Heidarzadeh, M., and Kijko, A., 2011, A probabilistic tsunami hazard assessment for the Makran subduction zone at the تخمین دقیق تر اثر سونامی بر مناطق ساحلی (به ویژه برای سناریوهای قدرتمند)، وجود اطلاعات دقیق عمق سنجی و توپوگرافی محلی ضروری است. در نظر گرفتن چشمه های دیگر نظیر پشته مورای، گسل سنه، گسل میناب - زندان، چشمه های واقع در میدان دور نظیر زون فرورانش سوماترا - آندامن و همچنین هندسه های دیگری از چشمه های مکران، می تواند نتایج متفاوت تری را به همراه داشته باشد. پیشنهاد می شود برای تکمیل پژوهش حاضر، در مطالعات آینده از این چشمه ها استفاده شود.
- ### منابع
- Becker, J. J., Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., et al., 2009, Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: *Srtm30_plus*, *Marine Geodesy*, **32**, 355-371.
- Burbidge, D. R., Cummins, P. R., Mleczko, R., Latief, H., Mokhtari, M., Natawidjaja, D., Rajendran, C. P., and Thomas, C., 2009, A probabilistic tsunami hazard assessment of the Indian Ocean nations, s.l.: *Geoscience Australia Professional Opinion No. 2009/11*. <https://d28rz98at9flks.cloudfront.net/68717/68717.pdf>. Assessed 2 May 2016.
- Byrne, D. E., Sykes, L., and Davis, D. M., 1992, Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone: *Journal of Geophysical Research*, **97**, 449-478.
- Cosentino, P., Ficarra, V., and Luzio, D., 1977, Truncated exponential frequency-magnitude relationship in earthquake statistics: *Bulletin of Seismological Society of America*, **67**, 1615-1623.
- Downes, G. L., and Stirling, M. W., 2001, Groundwork for development of a probabilistic tsunami hazard model for New Zealand, in *International Tsunami Symposium 2001*, edited by E. Bernard, pp. 293-301: *Pacific Marine Environmental Lab.*, Seattle, Wash.
- El-Hussain, I., Omira, R., Al-Rawas, G. A., et al., 2016, Probabilistic tsunami hazard assessment along Oman coast from submarine earthquakes in the Makran subduction zone: *Arabian Journal of Geosciences*, **9**(668), 3-14.

- Mokhtari, M., Fard, I. A., and Hessami, K., 2008, Structural elements of the Makran region, Oman Sea and their potential relevance to tsunamigenesis: *Natural Hazards*, **47**, 185-199.
- Musson, R. M. W., 2009, Subduction in the western Makran: The historian's contribution: *Geological Society of London*, **166**, 387-391.
- Neetu, S., Suresh, I., Shankar, R., Nagarajan, B., Sharma, R., Shenoi, S. S. C., Unnikrishnan, A. S., and Sundar, D., 2011, Trapped waves of the 27 November 1945 Makran tsunami: Observations and numerical modeling: *Natural Hazards*, **59**, 1609-1618.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space: *Bulletin of Seismological Society of America*, **75**, 1135-1154.
- Okal, E. A., and Synolakis, C. E., 2008, Far-field tsunami hazard from mega-thrust earthquakes in the Indian Ocean: *Geophysical Journal International*, **172**, 995-1015.
- Okal, E. A., Fritz, H. M., Hamzeh, M. A., and Ghasemzadeh, J., 2015, Field Survey of the 1945 Makran and 2004 Indian Ocean tsunamis in Baluchistan, Iran: *Pure and Applied Geophysics*, **172**, 3343-3356.
- Parsons, T., 2008, Monte Carlo method for determining earthquake recurrence parameters from short paleoseismic catalogs: Example calculations for California: *Journal Of Geophysical Research*, **113**, B03302, doi:10.1029/2007JB004998.
- Power, W., Downes, G., and Stirling, M., 2007, Estimation of tsunami hazard in New Zealand due to South American earthquakes: *Pure and Applied Geophysics*, **164**(2-3), 547-564.
- Priest, G. R., Goldfinger, C., Wang, K., Witter, R. C., Zhang, Y., and Baptista, A. M., 2009, Tsunami hazard assessment of the Northern Oregon coast: A multi-deterministic approach tested at Cannon Beach, Clatsop County, Oregon: Oregon Department of Geology and Mineral Industries Special Paper 41.
- Rajendran, C. P., Rajendran, K., Hosseini, M. S., Beni, A. N., Nautiyal, C. M., and Andrews, R., 2012, The hazard potential of the western segment of the Makran subduction zone, northern Arabian Sea: *Natural Hazards*, **65**, 219-238.
- northwestern Indian Ocean: *Natural Hazards*, **56**(3), 577-593.
- Heidarzadeh M., and Satake, K., 2014, New insights into the source of the Makran tsunami of 27 November 1945 from tsunami waveforms and coastal deformation data: *Pure and Applied Geophysics*, **172**, 621-640.
- Heidarzadeh, M., and Satake, K., 2017, A combined earthquake-landslide source model for the tsunami from the 27 November 1945 Mw 8.1 Makran earthquake: *Bulletin of Seismological Society of America*, **107**(2), 1-8.
- Hoechner, A., Babeyko, A. Y., and Zamora, N., 2016, Probabilistic tsunami hazard assessment for the Makran region with focus on maximum magnitude assumption: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **16**, 1339-1350. doi:10.5194/nhess-16-1339-2016
- Hoffmann, G., Rupprechter, M., Albalushi, N., Grutzner, C., and Reicherter, K., 2013, The impact of the 1945 Makran tsunami along the coastlines of the Arabian Sea (northern Indian Ocean)-A review: *Zeitschrift für Geomorphologie*, **57**, 257-277.
- Horspool, N., Pranantyo, I., Griffin, J., Latief, H., Natawidjaja, D. H., Kongko, W., et al., 2014, A probabilistic tsunami hazard assessment for Indonesia: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **14**(11), 3105-3122.
- ISC, 2011, Online Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>, International Seismological Centre, Thatcham, UK.
- Kopp, C. J. F., Flueh, E. R., Reichert, C., Kukowski, N., Bialas, J. and Klaeschen, D., 2000, Structure of the Makran subduction zone from wide-angle and reflection seismic data: *Tectonophysics*, **329**, 171-191.
- Kukowski, N., Schillhorn, T., Huhn, K., von Rad, U., Husen, S. and Flueh, E. R., 2001, Morphotectonics and mechanics of the central Makran accretionary wedge off Pakistan: *Marine Geology*, **173**(1-4), 1-19, doi:10.1016/S0025-3227(00)00167-5.
- Lin, I., and Tung, C. C., 1982, A preliminary investigation of tsunami hazard: *Bulletin of Seismological Society of America*, **72**, 2323-2337.
- Liu, P. L. F., Woo, S. B., and Cho, Y. S., 1998, *Computer Programs for Tsunami Propagation and Inundation*, Technical report, Cornell University.

- Suppasri, A., Shuto, N., Imamura, F., et al., 2013, Lessons learned from the 2011 great East Japan tsunami: Performance of tsunami countermeasures, coastal buildings, and tsunami evacuation in Japan: *Pure and Applied Geophysics*, **170**, 993-1018.
- Thio, H. K., Somerville, P., and Ichinose, G., 2007, Probabilistic analysis of strong ground motion and tsunami hazards in Southeast Asia: *Journal of Earthquake and Tsunami*, **1**(2), 119-137.
- Venturato, A. J., Arcas, D., Titov, V. V., Mofjeld, H. O., Chamberlin, C. C., and Gonzalez, F. I., 2007, Tacoma, Washington, tsunami hazard mapping project: Modeling tsunami inundation from Tacoma and Seattle fault earthquakes: NOAA Tech. Memo. OAR PMEL-132, 27 pp.
- Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., and Chery, J., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and Northern Oman: *Geophysical Journal International*, **157**, 381-398.
- Weichert, D. H., 1980, Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes: *Bulletin of Seismological Society of America*, **70**, 1337-1346.
- Witter, R. C., Zhang, Y. J., and Wang, K., 2013, Simulated tsunami inundation for a range of Cascadia megathrust earthquake scenarios at Bandon, Oregon, USA: *Journal of Geosphere*, **9**(6), 1-21.
- Yanagisawa, K., Imamura, F., Sakakiyama, T., Annaka, T., Takeda, T., and Shuto, N., 2007, Tsunami assessment for risk management at nuclear power facilities in Japan, *Pure and Applied Geophysics*, **164**(2-3), 565-576.
- Zarifi, Z., 2006, Unusual subduction zones: Case studies in Colombia and Iran: PhD thesis, University of Bergen, Norway.
- Rikitake, T., and Aida, I., 1988, Tsunami hazard probability in Japan: *Bulletin of Seismological Society of America*, **78**(3), 1268-1278.
- Roshan, A. D., Basu, P. C., and Jangid, R. S., 2016, Tsunami hazard assessment of Indian coast: *Natural Hazards*, **82**, 733-762. doi:10.1007/s11069-016-2216-1
- Satake, K., 2014, Advances in earthquake and tsunami sciences and disaster risk reduction ocean tsunamis: *Geoscience Letters*, **1**, 1-15, since the 2004 Indian.
- Schlüter, H. U., Prexl, A., Gaedicke, Ch., Roesse, H., Reichert, Ch., Meyer, H., and Daniels, C., 2002, The Makran accretionary wedge: sediment thickness and ages and the origin of mud volcanoes: *Marine Geology*, **185**, 219-232.
- Shah-hosseini, M., Morhange, C., Beni, A. N., Marriner, N., Lahijani, H., Hamzeh, M., and Sabatier, F., 2011, Coastal boulders as evidence for high-energy waves on the Iranian coast of Makran: *Marine Geology*, **290**(1-4), 17-28.
- Smith, W. H. F., and Sandwell, D. T., 1997, Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, *Science*, **277**(5334), 1956-1962.
- Smith, G. L., McNeill, L. C., Henstock, T. J., and Bull, J., 2012, The structure and fault activity of the Makran accretionary prism: *Journal of Geophysical Research*, **117**, B07407.
- Smith, G. L., McNeill, L. C., Wang, K., He, J., and Henstock, T. J., 2013, Thermal structure and megathrust seismogenic potential of the Makran subduction zone: *Journal of Geophysical Research*, **40**, 8, 1528-1533.
- Sørensen, M. B., Spada, M., Babeyko, A., Wiemer, S., and Grünthal, G., 2012, Probabilistic tsunami hazard in the Mediterranean Sea: *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, **117**, B01305, doi:10.1029/2010JB008169.

Probabilistic tsunami hazard assessment along the southeastern Iran coast

Amin Rashidi¹, and Keshavarz Farajkhah^{2*}

¹Ph. D. student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

²Assistant Professor, Geoscience Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

(Received: 15 January 2018, Accepted: 07 October 2018)

Summary

Despite the ambiguous tsunamigenic behavior of the Makran Subduction Zone (MSZ), due to the low level of offshore seismicity, historical evidences and the 1945 tsunami in Makran confirm the potential of the MSZ for generating tsunami events. Possible future tsunamis generated by the MSZ will pose the coastlines of Iran to hazard more than any other country. Probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA) is an effective approach to assess hazard from tsunamis and help for planning for the future. In this study, we assess the probabilistic tsunami hazard along the southeastern coast of Iran considering the entire Makran, the western Makran and the eastern Makran tsunamigenic sources.

Tsunami scenarios include earthquakes of magnitudes between 7.5-8.9 for the western and eastern Makran and between 7.5-9.1 for the entire Makran. Both seismicity and tsunami numerical simulation are inputs for probabilistic hazard analysis. Assuming that the tsunami sources are capable of generating tsunamigenic earthquakes, estimating the annual rate of these events is required for PTHA. The truncated Gutenberg-Richter relation (Cosentino et al., 1977 and Weichert, 1980) is used in this study to compute the annual number of the earthquakes. We model tsunamis using the COMCOT well-known algorithm (Liu et al., 1998). The distributions of tsunami heights along the coastline of Iran are used in probabilistic tsunami hazard assessment.

The results of PTHA show that Konarak and Sirik coastlines are posed to the most and least hazard from tsunamis, respectively. The probability of exceeding (POE) 1 and 3 meters increases with time. The probability that tsunami wave height exceeds 3 meters in 500 years is about 0.63 and 0 near the coastlines of Konarak and Sirik, respectively. The maximum POE for 3 meters belongs to the area between Beris and the west of Kereti. Distributions of probabilistic tsunami height along the coastline of Iran also indicate that Konarak and Sirik are the most and least vulnerable shorelines to tsunami hazard, respectively. The annual probability of exceeding 1, 2 and 3 meters are 1, 0.4 and 0.2, respectively. The results indicate the need of attention to tsunami long-term hazard along the southeastern coast of Iran, especially for the area between Jask and Beris.

Our tsunami hazard assessment does not involve the tsunami inundation distances on dry land due to lack of high resolution site-specific bathymetric/topographic maps. Such computations are required in order to estimate the exact impacts of possible future tsunamis on the southeastern coast of Iran. High-resolution hydrographic surveys are required to be done in future for the major ports. Furthermore, future works should consider other possible near-field tsunami sources, such as the Murray Ridge, Minab-Zendan and Sonne faults and far-field tsunami sources, such as the Sumatra-Andaman subduction zone.

Keywords: Makran, tsunami, southeastern Iran, probabilistic hazard assessment, numerical modeling

*Corresponding author:

keshavarzn@ripi.ir