

ارزیابی شبیه‌سازی محور خطر احتمالاتی سونامی برای ساحل جنوب‌شرق ایران

امین رشیدی^۱، ظاهرحسین شمالی^۲، ناصر کشاورز فرجخواه^۳

^۱دانشجوی دکتری، مؤسسه زئوفیزیک دانشگاه تهران، amin.rashidi@ut.ac.ir

^۲دانشیار، مؤسسه زئوفیزیک دانشگاه تهران، shomali@ut.ac.ir

^۳استادیار، پژوهشگاه صنعت نفت، keshavarzn@ripi.ir

چکیده

در میان تمامی سواحل مکران، ساحل جنوب‌شرق ایران بیش از همه در معرض خطر ناشی از سونامی‌های محتمل در آینده قرار خواهد گرفت. ارزیابی خطر سونامی به روش احتمالاتی ابزاری مفید و موثر را برای بررسی خطر ناشی از سونامی‌های آینده فراهم می‌کند. در این مطالعه، خطر احتمالاتی سونامی برای ساحل جنوب‌شرق ایران با استفاده از نتایج شبیه‌سازی عددی سونامی برآورد شد. زون فروزانش مکران، مکران غربی و مکران شرقی به عنوان چشمه‌های تولیدکننده سونامی در نظر گرفته شدند. بر اساس نتایج؛ سواحل کنارک و سیریک به ترتیب در معرض بیشترین و کمترین خطر ناشی از سونامی قرار دارند. احتمال افزایش ارتفاع سونامی از سه متر در ۵۰۰ سال در حوالی سواحل کنارک و سیریک به ترتیب تقریباً برابر با ۰/۶۳ و صفر می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده لزوم توجه به خطر درازمدت سونامی در امتداد جنوب‌شرق ایران به خصوص در ناحیه بین جاسک و بریس می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مکران، سونامی، جنوب‌شرق ایران، ارزیابی خطر سونامی، روش احتمالاتی، شبیه‌سازی عددی.

Simulation-based probabilistic tsunami hazard assessment for the southeastern Iran coast

Rashidi, A.¹, Shomali, Z. H.², Keshavarz Farajkhah, N.³

¹PhD Student, Institute of Geophysics, University of Tehran

²Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran

³Assistant Professor, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

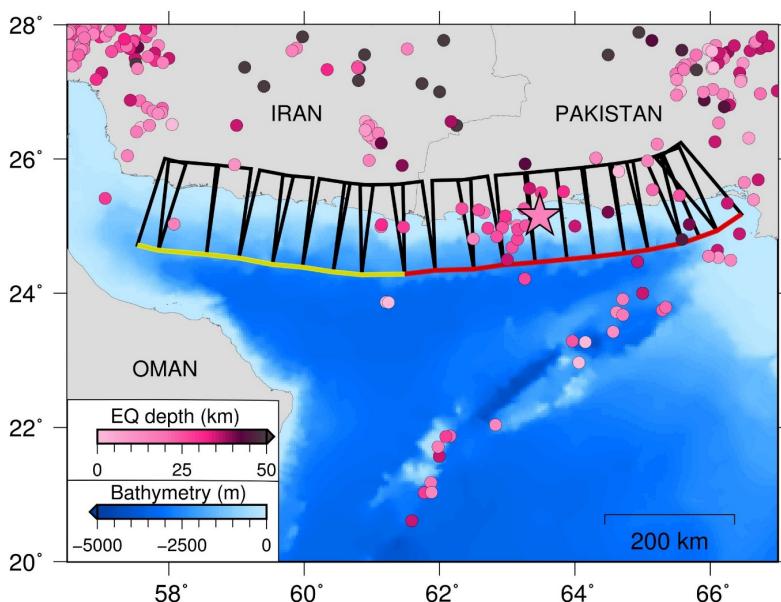
Abstract

Among all Makran coastlines, the southeastern coastline of Iran is exposed to most of the hazard from possible future tsunamis generated by the Makran subduction zone. Tsunami hazard assessment using the probabilistic approach is a useful and effective tool to investigate hazard for future tsunamis. In this study, the probabilistic tsunami hazard for the southeastern coast of Iran is assessed using the results of tsunami numerical simulations. The entire Makran subduction zone, the western Makran and the eastern Makran are considered as tsunamigenic sources. Konarak and Sirik coastlines are posed to the most and least hazard from tsunamis. 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 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.

Keywords: Makran, tsunami, southeastern Iran, tsunami hazard assessment, probabilistic approach, numerical simulation.

۱ مقدمه

زون فرورانش مکران با طول تقریبی ۹۰۰ کیلومتر، به لحاظ لرزه‌خیزی به دو قطعه شرقی و غربی تقسیم می‌شود (شکل ۱). قطعه شرقی فعال بوده و سونامی ۱۹۴۵ با بزرگی گشتاوری (M_w) ۸/۱ را تولید کرده است که منجر به کشته شدن حدود ۴۰۰۰ نفر شد. با وجود ابهام در پتانسیل لرزه‌هایی و سونامی‌زایی قطعه غربی، رفتار کنونی این قطعه می‌تواند نشان‌دهنده قفل شدگی و تجمع انرژی برای تولید زمین‌لرزه‌ای بزرگ و در نتیجه سونامی در آینده باشد (راجندران و همکاران، ۲۰۱۳). برقراری این فرض می‌تواند نشان‌دهنده قابلیت کل زون فرورانش مکران برای ایجاد زمین‌لرزه‌های سونامی‌زا باشد. توجه به خطر سونامی بایستی در مناطق دارای احتمال وقوع سونامی افزایش یابد. تحلیل خطر احتمالاتی سونامی (ریکیتاکه و آیدا، ۱۹۸۸؛ داونز و استرلینگ، ۲۰۰۱) ابزار مفیدی را برای ارزیابی خطر سونامی با در نظر گرفتن احتمال سونامی‌ها فراهم می‌کند. هدف این مطالعه ارزیابی خطر سونامی در امتداد ساحل جنوب شرق ایران به روش احتمالاتی می‌باشد. نتایج از حاصل از این مطالعه در درک خطر سونامی‌های محتمل در امتداد ساحل جنوب شرق ایران مفید می‌باشد.



شکل ۱. نقشه لرزه‌خیزی مکران برای زمین‌لرزه‌های با بزرگی بالاتر از ۴/۰ بین سال‌های ۱۹۲۶ تا ۲۰۱۶ (ISC، ۲۰۱۱). ستاره مکان رومرکر زمین‌لرزه سال ۱۹۴۵ مکران را نشان می‌دهد. زمین‌لرزه‌ها با دوایر مشخص شده‌اند که رنگ آن‌ها نمایانگر عمق می‌باشد. خطوط مشکی رنگ مشخص‌کننده مدل چشمۀ مکران و خطوط زرد و قرمز رنگ تمایز‌کننده مکران غربی از مکران شرقی می‌باشد.

۲ روش تحقیق

تحلیل خطر احتمالاتی سونامی نیازمند نتایج شبیه‌سازی عددی سونامی و لرزه‌خیزی در ناحیه مورد مطالعه است. چشمۀ‌های زمین‌لرزه شامل کل زون فرورانش مکران، مکران غربی و مکران شرقی می‌باشند. مدل چشمۀ مورد استفاده به کار گرفته شده در شکل ۱ نشان داده شده است که برگرفته از مطالعات آکال و سینولاکیس (۲۰۰۸) و اسمیت و همکاران (۲۰۱۳) می‌باشد. برای چشمۀ کل مکران سناریوهایی با بزرگی‌های بین ۷/۵ تا ۹/۱ و برای چشمۀ‌های مکران غربی و شرقی سناریوهایی با بزرگی‌های بین ۷/۵ تا ۸/۹ در نظر گرفته شد. به منظور محاسبه شرایط اولیه میدان نزدیک در شبیه‌سازی سونامی از الگوریتم اکادا (۱۹۸۵) استفاده شد. شبیه‌سازی عددی سونامی‌ها با استفاده از الگوریتم COMCOT (لیو و همکاران، ۱۹۹۸) با طول زمانی برابر با ۱۰ ساعت، گام زمانی ۲ ثانیه و برای معادلات غیرخطی آب کم‌عمق انجام شد. داده‌های عمق سنجی GEBCO با دقیقیت ۱ دقیقه (قابل دسترسی در <http://www.gebco.net/>) برای مدل سازی عددی مورد استفاده قرار گرفت.

تعیین نرخ وقوع سالیانه زمین‌لرزه‌های سونامی‌زا برای ارزیابی احتمالاتی خطر سونامی مورد نیاز می‌باشد. رابطه گوتنبرگ-ریشر قطع شده (سورنسن و همکاران، ۲۰۱۲) بدین منظور مورد استفاده قرار گرفت. بزرگی کمینه برای این رابطه برابر با

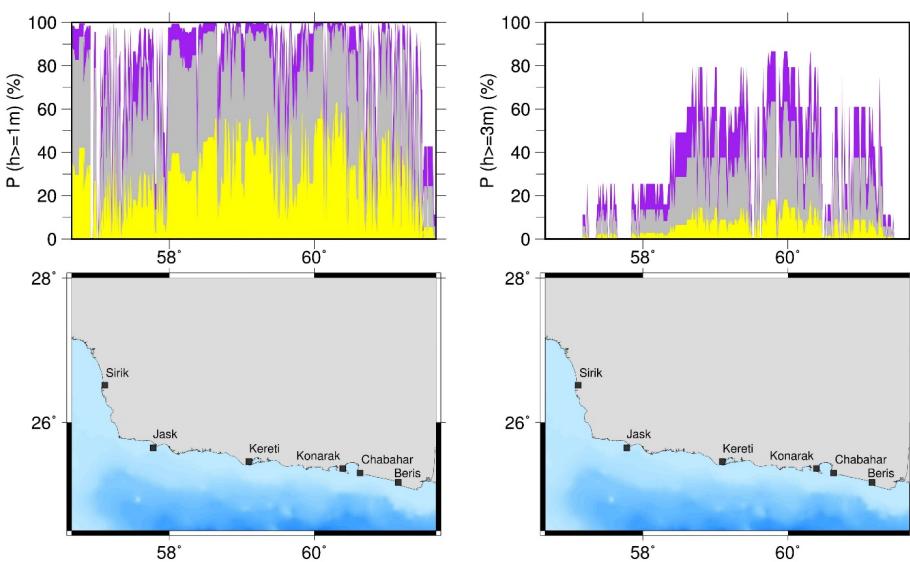
بزرگی کامل شدگی (magnitude of completeness) لرزه خیزی مورد استفاده است که برابر با $4/7$ به دست آمد. بزرگی بیشینه نیز بر اساس اسمیت و همکاران (۲۰۱۳) برای کل مکران برابر با $9/2$ و برای مکران غربی و مکران شرقی برابر با $9/0$ در نظر گرفته شد. پارامتر b از روی شب رابطه گوتنبرگ-ریشتر برابر با $0/8$ به دست آمد.

توزیع ارتفاع سونامی در امتداد ساحل جنوب شرق ایران به عنوان نتیجه حاصل از مدلسازی عددی سونامی برای برآورده خطر احتمالاتی در امتداد این ساحل مورد استفاده قرار گرفت. با در نظر گرفتن تمامی سناریوها با تعداد مجموع N ، احتمال کل اینکه ارتفاع سونامی، η ، در نقطه ساحلی (یا خط ساحلی) i از یک مقدار معین η_c در یک دوره زمانی معین T فراتر رود به این صورت به دست می‌آید

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

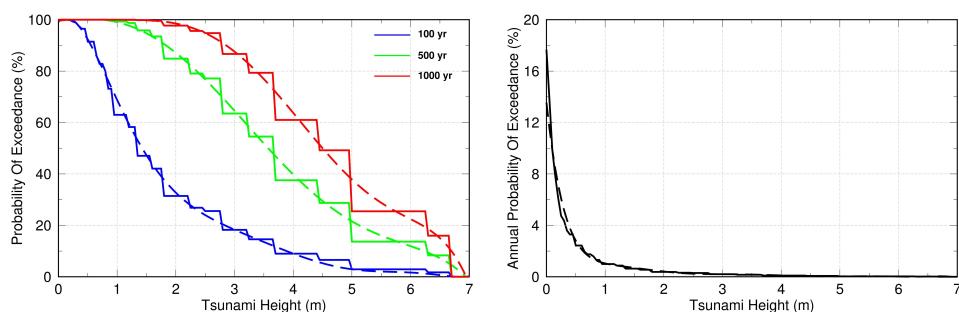
که v_i نرخ وقوع سالیانه سناریو S_i و $P(\eta \geq \eta_c | S_i)$ احتمال اینکه ارتفاع سونامی حاصل از سناریو S_i (که از مدلسازی عددی سونامی به دست آمده) در نقطه ساحلی (یا خط ساحلی) i از مقدار معین η_c فراتر رود می‌باشد که برابر است با $1 - \exp(-v_i T)$. اگر $\eta_c > \eta$ و صفر اگر $\eta_c < \eta$.

شکل‌های ۲ و ۳ نتایج حاصل از تحلیل خطر احتمالاتی در امتداد ساحل جنوب شرق ایران را نشان می‌دهد. در شکل ۲ احتمال افزایش (Probability Of Exceedance, POE) ارتفاع سونامی از یک و سه متر در دوره‌های زمانی 100 ، 500 و 1000 سال در امتداد ساحل جنوب شرق ایران به نمایش درآمده است. بیشینه مقدار آن برای ارتفاع ۱ متر در 100 سال برابر با 63 درصد و در حوالی کنارک و چابهار است. میزان آن در 500 سال در همین نواحی تقریباً برابر با 100 درصد می‌باشد. توزیع POE برای ۳ متر در امتداد خط ساحلی جنوب شرق ایران نسبت به ۱ متر از دامنه کمتری برخوردار است. بیشینه مقادیر آن در ناحیه‌ای بین کنارک و کرتی (برابر با 63 درصد در 500 سال و 87 درصد در 1000 سال) رخ می‌دهد. کنارک و غرب آن بیشترین میزان خطرپذیری را در میان نقاط مهم ساحلی در بردارد. خطر سونامی‌های با امواج سه متر به بالا در کوتاه‌مدت نسبتاً کم می‌باشد اما با گذشت زمان و در درازمدت رویدادها می‌توانند به شدت خطرآفرین بوده و خسارات فراوانی را به خصوص در قسمت مرکزی، بین برس و جاسک وارد کنند. خطر سونامی در کوتاه‌مدت تحت کنترل رویدادهای کوچک‌تر است، اما در بلندمدت رویدادهای بزرگ‌تر و نزدیک به بیشینه بزرگی هستند که به شدت بر خطر سونامی تاثیر می‌گذارند.



شکل ۲. احتمال افزایش ارتفاع سونامی از یک متر (چپ) و سه متر (راست) در دوره‌های زمانی 100 سال (زرد رنگ)، 500 سال (حکستری رنگ) و 1000 سال (بنفش رنگ) در امتداد ساحل جنوب شرق ایران

شکل ۳ نشان‌دهنده احتمال افزایش (POE) در حداقل یک مکان در ساحل جنوب شرق ایران به عنوان تابعی از بیشینه ارتفاع در دوره‌های زمانی ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله و به طور سالیانه می‌باشد. با توجه به شکل، احتمال رخداد سونامی با ارتفاع ۱ متر یا بیشتر در ۱۰۰ سال در جنوب شرق ایران تقریباً برابر با ۷۰ درصد و در ۵۰۰ و ۱۰۰۰ سال تقریباً برابر با ۱۰۰ درصد می‌باشد. این مقدار برای ۳ متر در ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ سال به ترتیب برابر با ۱۸، ۶۴ و ۸۷ درصد می‌باشد. مقدار POE برای ۵ متر در ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ سال به ترتیب برابر با ۳، ۱۴ و ۲۵ درصد می‌باشد. احتمال رخداد سونامی با ارتفاع ۱ متر یا بیشتر به طور سالیانه برابر با ۱ درصد می‌باشد. این مقدار برای ۲ متر و ۳ متر برابر با ۰/۴ و ۰/۲ درصد به ترتیب می‌باشد.



شکل ۳. احتمال افزایش در حداقل یک مکان در ساحل جنوب شرق ایران به عنوان تابعی از بیشینه ارتفاع در دوره‌های زمانی ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ سال (چپ) و سالیانه (راست). خط‌چین برآش منحنی قوی (Robust Curve Fit) را نشان می‌دهد.

۳ نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل، ساحل کنارک به عنوان خطرپذیرترین ناحیه ساحلی در میان نقاط مهم مختلف برای سناریوهای مورد مطالعه تعیین می‌شود. 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. احتمال افزایش ارتفاع سونامی از سه متر در میانه خط ساحلی نسبت به غرب و شرق بیشتر می‌باشد. بیشینه میزان آن در ناحیه‌ای بین کنارک و کرتی رخ می‌دهد. مقدار احتمال سالیانه افزایش برای ارتفاع‌های ۱، ۲ و ۳ متر به ترتیب برابر با ۱، ۰/۴ و ۰/۲ درصد به دست آمد. نتایج به دست آمده بیانگر اهمیت آینده‌نگری، توجه به خطر درازمدت سونامی به منظور برنامه‌ریزی و توسعه سامانه هشدار سونامی در جنوب شرق ایران می‌باشد.

منابع

- 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.
- Liu, P. L. F., Woo, S. B., and Cho, Y. S., 1998, Computer Programs for Tsunami Propagation and Inundation: Technical report, Cornell University.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space: Bull. seism. Soc. Am., **75**, 1135-1154.
- Okal, E. A., and Synolakis, C. E., 2008, Far-field tsunami hazard from mega-thrust earthquakes in the Indian Ocean: Geophys. J. Int., **172**, 995-1015.
- 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: Nat Hazards, **65**, 219-238.
- Rikitake, T., and Aida I., 1988, Tsunami hazard probability in Japan: Bull Seismol Soc Am **78**, (3), 1268-1278.
- 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: J. Geophys. Res., **40**, 1528-1533.
- Sørensen, M. B., Spada, M., Babeyko, A., Wiemer, S., and Grünthal, G., 2012, Probabilistic tsunami hazard in the Mediterranean Sea: J. Geophys. Res.-Sol. Ea., **117**, B01305, doi:10.1029/2010JB008169