

## انرژی امواج سونامی ناشی از حرکت بستر دریا در زون فرورانش مکران

امین رشیدی<sup>۱</sup>، ظاهرحسین شمالي<sup>۲</sup>، دنيس دوتیخ<sup>۳</sup> و ناصر کشاورز فرج خواه<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، [amin.rashidi@ut.ac.ir](mailto:amin.rashidi@ut.ac.ir)

<sup>۲</sup>دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، [shomali@ut.ac.ir](mailto:shomali@ut.ac.ir)

<sup>۳</sup>محقق CNRS، دانشگاه سووا فرانسه، [denys.dutykh@crans.org](mailto:denys.dutykh@crans.org)

<sup>۴</sup>استادیار، پژوهشگاه صنعت نفت، [keshavarzn@ripi.ir](mailto:keshavarzn@ripi.ir)

### چکیده

یکی از ویژگی‌های سونامی، انرژی امواج سونامی است. محاسبه آن روشی برای اندازه‌گیری توان سونامی‌ها می‌باشد. با این حال چندان به آن پرداخته نشده و مورد محاسبه قرار نمی‌گیرد. در این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی سونامی، انرژی امواج سونامی تولیدشده توسط حرکت بستر دریا برای یک مدل چشمی سونامی‌زا شامل کل طول فرورانش مکران برآورد شد. زون فرورانش به ۲۰ قطعه با پهنای ۲۱۰ کیلومتر و طول‌های مختلف تقسیم گردید. نتایج نشان می‌دهد گسترش انرژی سونامی الگوی انتشار امواج سونامی را دنبال می‌کند. تبادلات میان انرژی‌های پتانسیل و جنبشی در نتایج دیده می‌شود. انرژی پتانسیل با گذشت زمان کاهش می‌یابد، اما مولفه جنبشی انرژی برای اثرگذاری سونامی بر سواحل حفظ می‌شود. مقدار انرژی امواج سونامی تنها ۰.۳۳٪ درصد انرژی لرزه‌ای آزادشده از چشمی زمین‌لرزه را شامل می‌شود. به عنوان یک نتیجه به ازای یک واحد افزایش در بزرگی زمین‌لرزه، انرژی سونامی مربوطه ۱۰۰۰ برابر بیشتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سونامی، انرژی، شبیه‌سازی، سونامی‌زا، مکران، زمین‌لرزه.

## Tsunami waves energy produced by seafloor displacement in the Makran subduction zone

Rashidi, A.<sup>1</sup>, Shomali, Z. H.<sup>2</sup>, Dutykh, D.<sup>3</sup> and Keshavarz Farajkhah, N.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>PhD Student, Institute of Geophysics, University of Tehran

<sup>2</sup>Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran

<sup>3</sup> CNRS researcher, Université Savoie Mont Blanc

<sup>4</sup>Assistant Professor, Research Institute of Petroleum Industry (RIP)

### Abstract

One of the tsunami characteristics is tsunami wave energy. Computation of tsunami wave energy is a way to measure the power of tsunamis. However, the energy of tsunami is not usually calculated and discussed. Using tsunami simulation, we evaluate the tsunami wave energy generated by the sea bottom motion for a tsunamigenic source model involving the full length of the Makran Subduction Zone. The full rupture of the plate boundary is divided into 20 segments: width of order of 210 km but with various lengths. The tsunami energy radiation follows the tsunami propagation pattern. The exchanges between kinetic and potential energies are observed in the results. While the potential energy of tsunami waves weakens with time, the kinetic component of energy becomes stable to impact the coasts. The amount of tsunami wave energy represents only 0.33% of seismic energy released from the earthquake source. For every increase in magnitude by 1 unit, the associated tsunami wave energy becomes 1000 times greater.

**Keywords:** Tsunami, energy, simulation, tsunamigenic, Makran, earthquake.

## ۱ مقدمه

اثرات مخرب سونامی‌های ۲۰۰۴ اقیانوس هند و ۲۰۱۱ ژاپن باعث شد تا محققین به مطالعه ویژگی‌های مختلف امواج سونامی بپردازنند. یکی از این ویژگی‌ها انرژی امواج سونامی می‌باشد. به محض اینکه یک زمین‌لرزه بزرگ در زیر دریا اتفاق می‌افتد، انتقال انرژی لرزه‌ای آن به داخل آب دریا سبب تولید سونامی می‌شود. انرژی امواج سونامی شامل بخش انتقال یافته انرژی لرزه‌ای به داخل آب می‌باشد. محاسبه انرژی امواج سونامی روشی برای اندازه‌گیری توان یک سونامی است و منعکس‌کننده پتانسیل چشمۀ تولید کننده آن می‌باشد. بر خلاف سایر ویژگی‌های سونامی (نظیر زمان‌سیر، دامنه، سرعت و غیره)، انرژی امواج سونامی کم‌تر مورد مطالعه قرار گرفته است. با این حال در برخی مطالعات به مبحث آن پرداخته شده است (برای مثال وارد، ۱۹۸۰؛ اکال و سینولاکیس، ۲۰۰۳؛ دوتیخ و همکاران، ۲۰۱۲).

زمین‌لرزه‌های بزرگ کم‌عمق در زون‌های فروزانش دلیل عمدۀ سونامی‌های مخرب می‌باشند (ساتاکه و تانیوکا، ۱۹۹۹). فروزانش صفحه عربی به زیر صفحه اوراسیا در شمال غرب اقیانوس هند سبب ایجاد زون فروزانش مکران با طول ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر شده است. به لحاظ لرزه‌خیزی مکران به دو قطعه غربی و شرقی تقسیم شده است. با وجود رفتار لرزه‌خیزی مورد بحث زون فروزانش مکران، تولید سونامی ۱۹۴۵ میلادی و شواهد زمین‌لرزه‌های تاریخی بیانگر قابلیت آن در تولید زمین‌لرزه‌های بین صفحه‌ای و سونامی در آینده می‌باشد. هدف این مطالعه محاسبه انرژی امواج سونامی برای یک مدل چشمۀ سونامی‌زا از کل طول مکران و برآورد تغییر آن در زمان می‌باشد.

## ۲ روش تحقیق

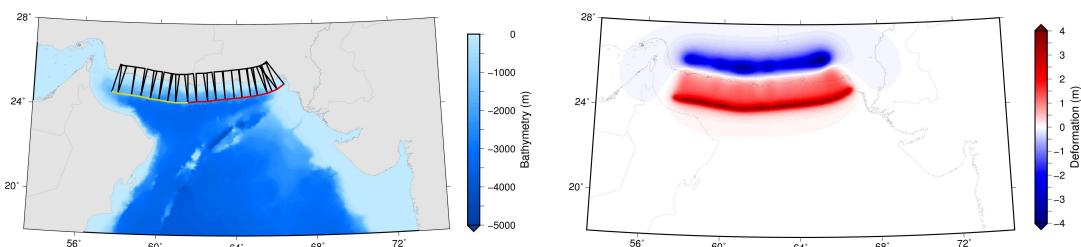
پس از ایجاد زمین‌لرزه و تولید سونامی، انرژی سونامی در سرتاسر ستون آب توزیع می‌شود. قدرت یک سونامی وابسته به نوع و خصوصیات چشمۀ آن است. هرچه چشمۀ سونامی قوی‌تر باشد حجم بیشتری از آب را جابجا می‌کند. مراحل توزیع انرژی سونامی به سه بخش اصلی تقسیم می‌شود: ۱) انرژی سونامی در ابتدای تولید آن از نوع پتانسیل است، ۲) سپس انرژی سونامی به دو بخش پتانسیل و جنبشی تقسیم می‌شود و ۳) در نهایت مولفه پتانسیل انرژی سونامی نیز تبدیل به انرژی جنبشی می‌شود. در این مطالعه بر اساس مطالعه دوتیخ و دیاس (۲۰۰۹)، انرژی کل و انرژی‌های پتانسیل و جنبشی امواج سونامی محاسبه شده است. دوتیخ و دیاس (۲۰۰۹) با استفاده از معادلات دینامیک سیالات غیر متراکم؛ انرژی  $E$  را به صورت جمع انرژی‌های جنبشی  $K$  و پتانسیل  $\Pi$  فرمول‌بندی کردند:

$$(1) \quad E(t) = K(t) + \Pi(t) = \frac{\rho}{2} \iint_{\Omega} [g\eta^2 + H(u^2 + v^2)] dx dy$$

که  $\rho$  چگالی آب دریا،  $g$  شتاب جاذبه و  $\eta$  سطح آزاد آب است.  $H$  جمع عمق آب و سطح آزاد آب و  $u$  و  $v$  مولفه‌های سرعت در جهت‌های  $x$  و  $y$  و  $\Omega$  بیانگر دامنه محاسباتی (گرید عمق‌سنجدی) می‌باشند.

برای برآورد انرژی امواج سونامی، از مدلسازی عددی سونامی با استفاده از الگوریتم COMCOT (لیو و همکاران، ۱۹۹۸) برای یک چشمۀ سونامی‌زا شامل کل طول زون فروزانش مکران استفاده شد (شکل ۱). کل پهنه فروزانش به ۲۰ قطعه تقسیم شد و برای هر قطعه لغزش ۱۰ متر در نظر گرفته شد (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۳). مدلسازی سونامی با استفاده از داده‌های عمق‌سنجدی GEBCO با دقت تفکیک ۱ دقیقه (قابل دسترسی در <http://www.gebco.net/>) و گام زمانی ۲ ثانیه و برای معادلات غیرخطی آب کم‌عمق در دستگاه مختصات کروی انجام شد.

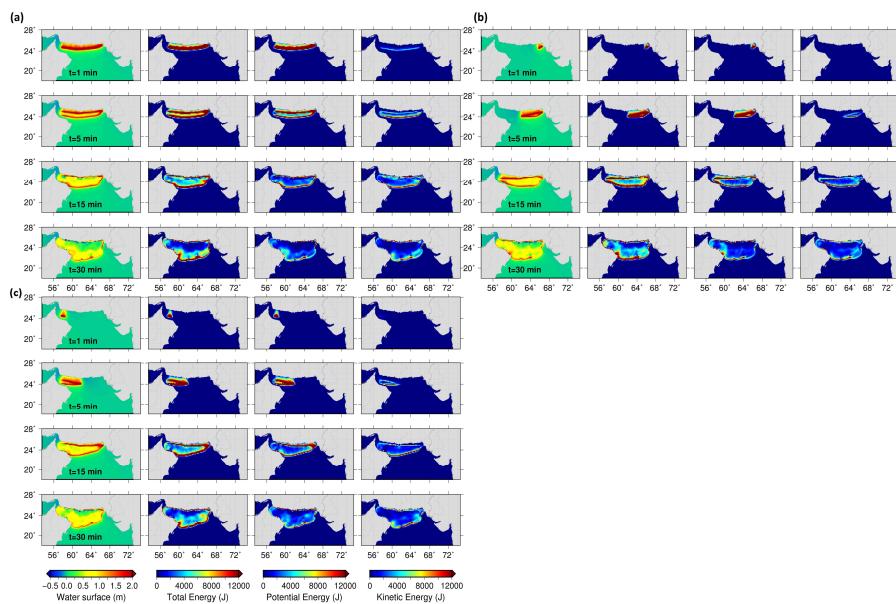
جابجایی عمودی بستر دریا توسط زمین‌لرزه‌های زیردریا به عنوان شرایط اولیه برای مدلسازی عددی سونامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در این مطالعه از الگوریتم اکادا (۱۹۸۵) برای محاسبه آن استفاده شد (شکل ۱). راهکار معمول در مدلسازی سونامی، در نظر گرفتن دگرشکلی استاتیک برای بستر دریا و در نتیجه نادیده گرفتن وابستگی زمانی جابجایی بستر دریا می‌باشد. در این مطالعه اثر دینامیکی فرآیند شکست و توسعه تدریجی دگرشکلی بستر در نظر گرفته شد. بدین منظور زمان فعال شدگی هر قطعه با شروع شکست از مرکز قطعه اول با در نظر گرفتن سرعت شکست  $1/5$  کیلومتر بر ثانیه در دو جهت امتداد گسل و مخالف امتداد گسل محاسبه شد.



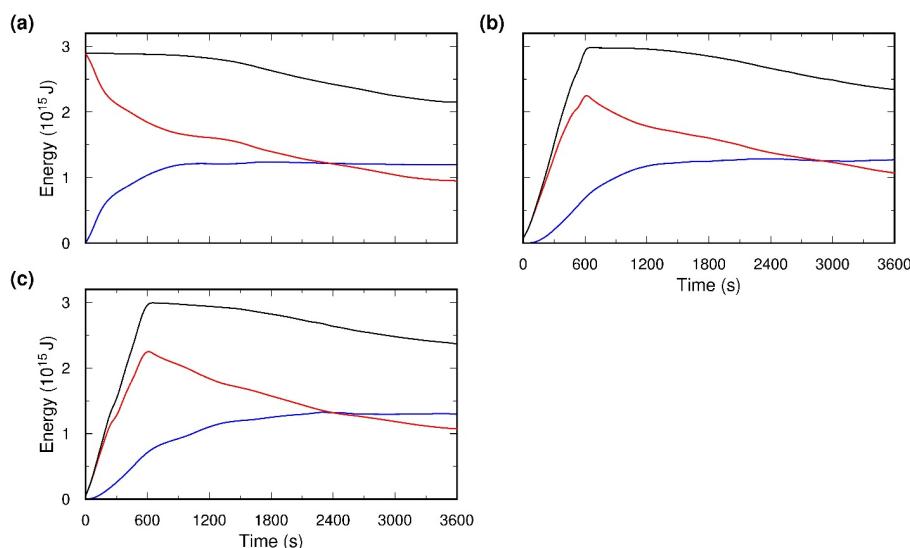
شکل ۱. چپ: مدل چشمی سونامی برای زون فرورانش مکران. خطوط مشکی رنگ مشخص‌کننده مدل چشمی مکران و خطوط زرد و قرمز رنگ تمایز‌کننده مکران غربی از مکران شرقی می‌باشند. راست: دگرشکلی استاتیک ایجادشده توسط چشمی مکران.

شکل ۲ توزیع ارتفاع سطح آب، انرژی کل و انرژی‌های پتانسیل و جنبشی امواج سونامی را در زمان‌های مختلف برای سناریوهای استاتیک و دینامیک نشان می‌دهد. نحوه گسترش انرژی سونامی دنبال‌کننده الگوی انتشار امواج سونامی است. توزیع انرژی سونامی به مولفه‌های پتانسیل و جنبشی و تبادلات میان آن‌ها در زمان‌های مختلف به خوبی دیده می‌شود. شکل ۳ تغییرات انرژی سونامی را به عنوان تابعی از زمان نشان می‌دهد. انرژی امواج سونامی با زمان کاهش می‌یابد. تحت شرایط ایده‌آل، انرژی کل بعد از اتمام فرآیند دگرشکلی بستر دریا ثابت می‌ماند، اما انرژی سونامی به دلیل عوامل پاشنده آن نظیر اصطکاک بستر دریا، تغییرات عمق آب و غیره دچار افت و کاهندگی می‌شود.

به منظور به دست آوردن رابطه بین بزرگی زمین‌لرزه و انرژی، علاوه بر خود کل زون فرورانش مکران، چشمی آن به دو قسمت مکران غربی و شرقی نیز تقسیم شد (شکل ۱) و انرژی سونامی برای بزرگی‌های مختلف در چشممه‌های مکران غربی، مکران شرقی و همچنین کل زون فرورانش مکران محاسبه شد. رابطه میانگین بین بزرگی زمین‌لرزه ( $Mw$ ) و انرژی (بر حسب ژول) برای مدل چشمی سونامی‌زا به صورت  $E = 2.98Mw - 11.49 \log E + 3.86$  (  $Mw = 0.34 \log E + 3.86$  ) به دست آمد که نشان می‌دهد به ازای یک واحد افزایش در بزرگی، انرژی سونامی متضاظر با آن  $10^{0.34} \times 10^{1.49}$  برابر بزرگ‌تر می‌شود. بیشینه سطح انرژی (شکل ۳) به عنوان مقدار انرژی سونامی در نظر گرفته می‌شود که برای سناریوهای استاتیک و دینامیک تقریباً برابر با  $10^{15} \times 10^{17}$  ژول می‌باشد. انرژی لرزه‌ای منتشرشده برای مدل چشمی سونامی در این مطالعه برابر  $10^{17} \times 10^{17}$  ژول می‌باشد که نشان می‌دهد که تنها ۰/۳۳ درصد انرژی لرزه‌ای تبدیل به انرژی امواج سونامی و منجر به تشکیل سونامی شده است.



شکل ۲. توزیع ارتفاع سطح آب، انرژی کل و انرژی‌های پتانسیل و جنبشی امواج سونامی را در زمان‌های مختلف برای سناریوهای استاتیک (a) و دینامیک با انتشار شکست در جهت امتداد گسل (b) و خلاف جهت آن (c).



شکل ۳. انرژی‌های کل (منحنی مشکی)، پتانسیل (منحنی قرمز) و جنبشی (منحنی آبی) به عنوان تابعی از زمان برای سناریوهای استاتیک (a) و دینامیک با انتشار شکست در جهت امتداد گسل (b) و خلاف جهت آن (c).

### ۳ نتیجه‌گیری

یکی از راهکارهای نوین و مفید در مطالعات سونامی، برآورد انرژی امواج سونامی ناشی از جابجایی بستر در اثر زمین‌لرزه‌های سونامی‌زا می‌باشد. در این مطالعه انرژی موج سونامی برای یک چشم‌های فرضی سونامی‌زا برای سناریوهای استاتیک و دینامیک بر اساس مدل‌سازی عددی سونامی انجام شد. فرآیند توزیع انرژی سونامی بین انرژی‌های پتانسیل و جنبشی به خوبی دیده شد. انرژی امواج سونامی با گذشت زمان افت می‌کند و پس از توقف دگرشکلی بستر دریا ثابت باقی نمی‌ماند. با این حال، در حالیکه انرژی پتانسیل امواج سونامی کاهش می‌یابد، مولفه جنبشی انرژی امواج پس از مدتی به منظور اثربخشی بر سواحل به صورت پایدار در می‌آید. نسبت درصد انرژی امواج سونامی به انرژی لرزه‌ای برابر با  $0/33$  به دست آمد. رابطه بین بزرگی زمین‌لرزه و انرژی موج سونامی برای چشم‌های سونامی‌زا در این مطالعه تعیین شد. به ازای یک واحد افزایش بزرگی زمین‌لرزه، انرژی موج سونامی  $1000$  برابر می‌شود.

### منابع

- Dutykh, D., and Dias, F., 2009, Energy of tsunami waves generated by bottom motion, *Proceedings of the Royal Society A*, **465**, 725-744.
- Dutykh, D., Mitsotakis, D., Chubarov, L. B., and Shokin, Y. I., 2012, On the contribution of the horizontal seabed displacements into the tsunami generation process, *Ocean Modelling*, **56**, 43-56.
- 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., 2003, A theoretical comparison of tsunamis from dislocations and landslides. *Pure Appl. Geophys.*, **160**, 2177-2188.
- Satake, K., and Tanioka, Y., 1999, Sources of Tsunami and Tsunamigenic Earthquakes in Subduction Zones, *Pure Appl. Geophys.*, **154**, 467-483.
- 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.
- Ward, S. N., 1980, Relationship of tsunami generation and an earthquake source. *J. Phys. Earth*, **28**, 441-474.