شبیه‌سازی دو بعدی انتشار امواج Lg در حوضه خزر جنوبی

محمد عنایت گورچین قلعه[۱]، عبدالرضا قدس[۲]

[۱]دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، m.enayat@iasbs.ac.ir
[۲]دانشیار دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، aghods@iasbs.ac.ir

چکیده

موج Lg بزرگ‌ترین دامنه را در فواصل منطقه‌ای برای زلزله‌هایی که در درون پوسته قاره‌ای اتفاق می‌افتند دارد. موج Lg در مناطقی با پوسته قاره‌ای تخت به خوبی تشکیل و منتشر می‌شود ولی دامنه‌ی آن در هنگام عبور از مناطقی با تغییرات شدید ضخامت پوسته به شدت کاهش می‌یابد. به عنوان مثال موج Lg از حوضه خزر جنوبی که از یک لایه ضخیم از رسوبات بر روی پوسته شبیه‌اقیانوسی تشکیل شده است عبور نمی‌کند. برای بررسی این رفتار موج Lg ما از شبیه‌سازی موج SH در دو بعد استفاده کردیم. برای شبیه‌سازی از روش تفاضل محدود مرتبه چهار برای حل معادله موج استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد دامنه موج لاو تشکیل شده در پوسته قاره‌ای به هنگام عبور از حوضه خزر به شدت کاهش می‌یابد. همچنین امواج لاو برای زلزله‌هایی که در داخل حوضه اتفاق می‌افتند تشکیل نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، موج Lg، تفاضل‌های محدود مرتبه چهار، حوضه خزر جنوبی، موج لاو

2D Lg Wave Propagation Simulation in South Caspian Basin

M. Enayat [1], A. R. Ghods [2]

[1]Master Student of Geophysics,Institute for Advanced Studies in Basic Science, Zanjan, Iran
[2]Associate Professor,Institute for Advanced Studies in Basic Science, Zanjan, Iran

Abstract

Lg waves have the largest amplitudes in regional seismograms of the events within the continental crust. Lg waves are formed efficiently within the flat continental crust but their amplitudes reduce drastically while passing through regions with sudden crustal changes. For example it has been shown already that Lg waves are not passing through South Caspian Basin crust. To find why Lg wave blockage in South Caspian Basin, we have simulated Lg wave formation by finite difference numerical simulation of SH wave propagation in two dimensions. We solve SH wave equation using fourth order finite difference method. Our results show that the amplitude of the Lg waves of an event within the continental crust severely diminishes while passing through the South Caspian basin. We have also shown that for events happening within the oceanic-like South Caspian basin, no Lg waves forms neither within the basin nor outside of it.

Keywords: Simulation, Lg Wave, Forth Order Finite Difference, South Caspian Basin, Love Wave

مقدمه

امواج Lg بزرگترین دامنه موج برشی را در فواصل منطقه‌ای برای زلزله‌های درون پوسته‌ای دارند. این امواج غالبا بر روی مولفه افقی ثبت می‌شوند ولی بر روی سایر مولفه‌ها هم دامنه قابل توجهی دارند. در این کار منظور از موج Lg، امواج لاوی هستند که در پوسته تشکیل و منتشر می‌شوند.تغیرات جانبی پوسته مانند نازک‌شدگی پوسته، ضخیم‌شدگی پوسته و کاهندگی زیاد منطقه نقش مهمی در انتشار و دامنه این امواج دارند و موج Lg در پوسته اقیانوسی منتشر نمی‌شود (روزایکین و همکاران ۱۹۷۷).حضور بارز موج Lg بر روی لرزه‌نگاشت، نتیجه‌ی انتشار آن در پوسته‌ی ضخیم قاره‌ای است(پرس و اوینگ ۱۹۵۲). در نواحی قاره‌ای پایدار مانند سپرها، موج Lg تا فواصل بیشتر از ۴۰۰۰ کیلومتر هم منتشر می‌شود و کاربرد عمده‌ی این موج در تخمین بزرگا و گشتاور لرزه‌ای زلزله‌های منطقه‌ای است (هرمن و کیجکو ۱۹۸۳). کاهش دامنه موج Lg به هنگام عبور از ناهمگنی‌های پوسته به دلیل نشت کردن انرژی این موج به درون گوشته است. موج لاو در صورتی تشکیل می‌شود که زاویه

پرتو برخوردی بیشتر از زاویه بحرانی باشد. تغییرات در ضخامت پوسته باعث می‌شود تا زاویه برخوردی کمتر از زاویه بحرانی شود و انرژی موج به پوسته نشت کند.

در این مطالعه رفتار موج لاو به هنگام عبور از حوضه خزر جنوبی بررسی شده است. بر اساس مشاهدات دامنه امواج لاو زلزله-های قاره‌ای بعد از عبور از این حوضه به شدت کاهش می‌یابد و زلزله‌هایی که در درون این حوضه اتفاق می‌افتند موج Lg تشکیل نمی‌دهند. این حوضه دارای ضخامت رسوبات در حدود ۲۰ کیلومتر است و دارای یک پوسته‌ای شبه‌اقیانوسی به ضخامت حدود ۱۸ کیلومتر است(مانجینو و پریستلی ۱۹۹۶).

روش تحقیق

در این مطالعه برای شبیه‌سازی موج لاو، انتشار موج SH در دو بعد شبیه‌سازی شده است. برای این کار انتشار در صفحه xz و محور ارتعاش y در نظر گرفته شده است. پس از ساده‌سازی معادله موج الاستیک، معادله موج SHبه صورت زیر خواهد بود (شیرر ۲۰۰۹):

$$\rho \frac{\partial u_y^2}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial u_y}{\partial z}\right) \quad (۱$$

که در آن ρ چگالی، u جابجایی، μ ضریب سختی و t زمان است. در ادامه با استفاده از روش تفاضل‌های محدود این معادله را گسسته می‌کنیم.

در شبیه‌سازی‌های بزرگ مقیاس به دلیل انباشت خطای حاصل از تقریب بسط تیلور میزان ریپل‌ها (Ripple) به قدری زیاد می‌شود که تشخیص جبهه موج اصلی سخت می‌شود. یکی از کارهایی که می‌توان انجام داد، کوچک کردن فاصله نقاط شبکه است. به عنوان مثال بجای استفاده از ۲۰ نقطه به ازای کوچک‌ترین طول موج، از ۳۰، ۴۰ و یا حتی بیشتر استفاده کرد (شیرر ۲۰۰۹). اما این کار باعث افزایش میزان حافظه استفاده شده در اجرای برنامه برای یک محیط با ابعاد ثابت می‌شود که به دلیل محدودیت میزان حافظه این کار به صرفه نیست. همچنین این کار به شدت زمان اجرای برنامه را طولانی می‌کند. روش دیگر استفاده از معادلات تفاضل‌های محدود از مرتبه بالاتر است. در این روش به جای استفاده از دو نقطه همسایه، از چهار نقطه استفاده می‌شود. رابطه گسسته‌سازی مشتق دوم برای مرتبه چهار به صورت زیر است:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{-f(x+2\mathrm{d}x) - f(x-2dx) + 16f(x+dx) + 16f(x-dx) - 30f(x_0)}{12\Delta x^2} \quad (۲$$

ابتدا با استفاده از روش مشتقات جزئی معادله را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم تا بتوانیم از معادلات تفاضل‌های محدود مرتبه چهار استفاده کنیم:

$$\rho \frac{\partial u_y^2}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial \mu}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial u_y}{\partial x}\right) + \mu\left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial \mu}{\partial z}\right)\left(\frac{\partial u_y}{\partial z}\right) + \mu\left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2}\right) \quad (۳$$

پس از گسسته‌سازی شکل کلی رابطه گسسته شده به صورت زیر خواهد بود:

$$u_P^N = a_P u_P - u_P^O + a_E u_E + a_{EE} u_{EE} + a_W u_W + a_{WW} u_{WW} + a_N u_N + a_{NN} u_{NN} + a_S u_S + a_{SS} u_{SS} \quad (۴$$

که در آن ضرایب a_E، a_{EE}، a_W، a_{WW}، a_N، a_{NN}، a_S، a_{SS} و a_P با کمی اعمال جبری قابل محاسبه هستند. برای اعمال شرط مرزی سطح آزاد از ویژگی‌های سطح آزاد استفاده می‌کنیم. در سطح زمین استرس برشی صفر است:

$$\sigma \quad (۵$$

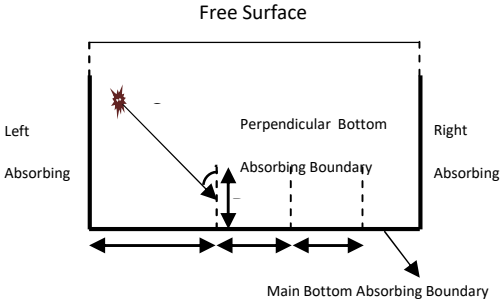
در اینجا با استفاده از رابطه گسسته‌سازی مرتبه چهار (رابطه ۳) شرط مرزی سطح آزاد به صورت زیر برقرار می‌شود:

$$u \quad (۶$$

که در آن L اندیس آخرین نقطه بر روی سطح زمین است.

برای اعمال شرط مرزی خورنده به مقداردهی به دو نطقه مرزی احتیاج داریم. نقطه آخر را با استفاده از شرط مرزی کلیتون (۱۹۷۷)، مقدار دهی می‌کنیم و نقطه ماقبل آخر را از طریق روش حل معادله موج با مرتبه خطا دو محاسبه می‌کنیم. شرط مرزی کلیتون در زوایای برخورد زیاد نسبت به محور عمود بر مرز عملکرد پایینی دارد. از آنجا که برای شبیه‌سازی موج Lg نیاز به شبکه‌های عریض داریم، برای مرز خورنده پایین همیشه با این مشکل روبرو هستیم. برای حل این مشکل از تعدادی شرط مرزی خورنده عمود بر مرز خورنده اصلی استفاده می‌کنیم (شکل ۱).

حوضه خزر جنوبی از جنوب به کوه‌های البرز، از شمال به گسل آبشرون- بالکان، از شرق به کپه داغ و از غرب به تالش و حوضه‌ی کورا و قفقاز بزرگ محدود می‌شود. حوضه‌ی خزر جنوبی با رسوباتی به ضخامت در حدود ۲۰ کیلومتر پوشیده شده که جزء ضخیم‌ترین رسوبات در زمین است (آلن و همکاران ۲۰۰۳). حوضه خزر جنوبی زیر رسوباتش، یک پوسته‌ی غیرعادی دارد.این پوسته شبه‌اقیانوسی یک لایه بازالت به ضخامت ۱۲ تا ۱۸ کیلومتر است (مانجینو و پریستلی، ۱۹۹۶). در مدل‌سازی که پریستلی و همکاران (۲۰۰۱) انجام دادند، انتشار امواج ریلی عبوری از این حوضه را برای امواج با فرکانس غالب ۰.۰۵ هرتز مورد بررسی قرار دادند. در مدل‌استفاده شده برای این حوضه، مرز بین حوضه و پوسته قاره‌ای برخلاف مدل دیواره‌های قائم استفاده شده توسط پریستلی و همکاران (۲۰۰۱)، دارای شیب ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر سرعت، چگالی و ضخامت لایه‌ها با اندکی تغییر نسبت به مدل پریسنلی و همکاران (۲۰۰۱) قرار داده شده است (جدول ۱). مدل دیواره‌های شیب‌دار برگرفته از نتایج حاصل از توابع گیرنده محاسبه شده در لبه‌های این حوضه است که شیب تقریبا ۴۵ درجه را نشان می‌دهد (ارتباط شخصی با دکتر فرهاد ثبوتی).

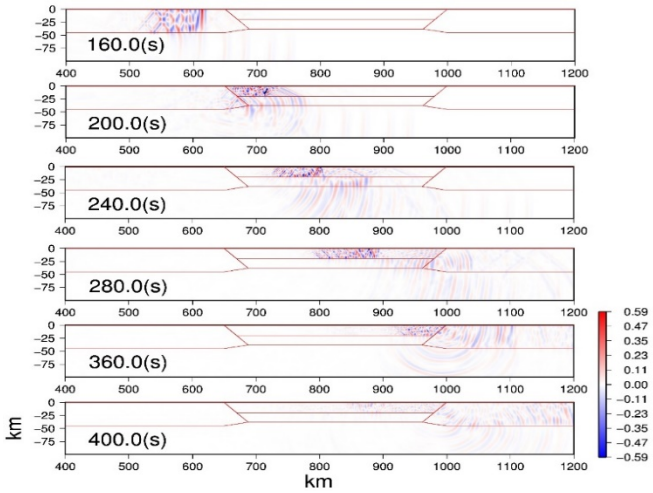


شکل ۱ ساختار کلی مرزهای مختلف در شبکه

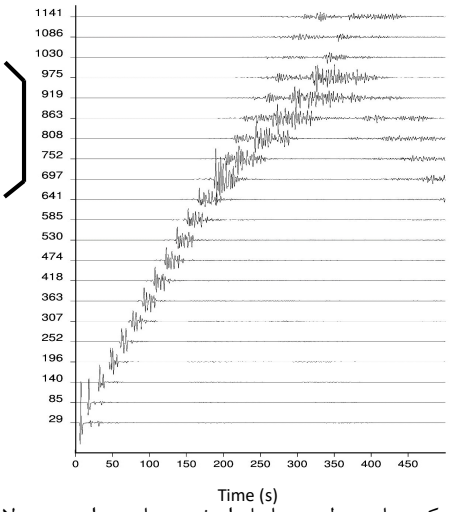
جدول ۱مشخصات مدل استفاده شده برای شبیه‌سازی

	Density kg/m^3	Velocity km/s	Thickness km
Sedimentary Layer	2300	2.2	20
Semi-Oceanic Crust	3150	4.3	18
Continental Crust	2820	3.7	45
Mantle	3370	4.7	…

در شکل ۲ نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای مدل با دیواره‌های شیب‌دار نشان داده شده است. شیب مرزها باعث می‌شود به هنگام خروج قطار موج از آنومالی، زاویه پرتوها نسبت به خط عمود بر مرز پوسته و گوشته کم شود در نتیجه زاویه برخورد پرتوها کم‌تر از زاویه بحرانی شده و انرژی موج به گوشته نشت می‌کند. شکل ۳ رکوردهای سطحی حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. قطار موج لاو رسیده به آنومالی در چندین جا دچار کاهش انرژی می‌شود. اولین کاهش انرژی به هنگام ورود به آنومالی به دلیل انعکاس از مرز آنومالی اتفاق میافتد. دومین کاهش انرژی به دلیل اختلاف بالای سرعتی بین پوسته شبه اقیانوسی و لایه رسوبی اتفاق می‌افتد. چون اختلاف سرعت موج زیاد است بخشی از انرژی که به پوسته شبه اقیانوسی وارد می‌شود سریعتر از بخش دیگر آن که به لایه رسوبی وارد می‌شود از آنومالی عبور می‌کند. بخشی از انرژی که وارد لایه رسوبی می‌شود، به هنگام خروج از این لایه بازتاب می‌شود و انرژی قطار موج کم می‌شود. پس از خروج قطار موج از حوضه خزر به دلیل افزایش ضخامت لایه انعکاس پیوسته از مرز بین دو لایه دچار اختلال می‌شود و باعث از بین رفتن الگوهای تداخلی می‌شود. همچنین اختلاف سرعت کم پوسته شبه‌اقیانوسی و گوشته باعث بزرگ شدن زاویه بحرانی شده و منجربه نشت بیشتر انرژی وارد شده به پوسته شبه‌اقیانوسی به گوشته می‌شود.طبق مشاهدات انجام شده امواج Lg برای حالتی که زلزله در داخل حوضه اتفاق می‌افتد نیز مشاهده نمی‌شوند. زلزله‌ها در درون این حوضه معمولا دارای عمق زیاد و مربوط به پوسته شبه‌اقیانوسی هستند (ارتباط شخصی با دکتر عبدالرضا قدس). شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد برای زلزله‌هایی که در پوسته شبه‌اقیانوسی رخ می‌دهد موج Lg تشکیل نمی‌شود.همچنین اگر پهنای موجک مناسب باشد و زلزله در داخل رسوبات رخ دهد، موج Lg تشکیل شده به هنگام ورود به پوسته قاره‌ای به دلیل افزایش ضخامت موجبر دچار اختلال شده و به سرعت میرا می‌شود.



شکل ۲ انتشار و عبور امواج لاو از حوضه خزر جنوبی. رنگ‌ها نشانگر دامنه امواج، محور عمودی عمق به کیلومتر را نشان می‌دهد. اعداد سمت چپ هر تصویر زمان سپری شده از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۳ رکوردهای سطحی حاصل از شبیه سازی. دامنه موج لاو به هنگام عبور از حوضه خزر (مرز شیب‌دار) کم می‌شود. محور عمودی فاصله کانونی هر ایستگاه و محور عمودی زمان را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد دامنه موج لاو تشکیل شده در پوسته قاره‌ای به هنگام عبور از حوضه خزر به شدت کاهش می‌یابد. وجود اختلاف سرعت زیاد بین رسوبات ضخیم این حوضه و پوسته شبه اقیانوسی آن باعث تقسیم انرژی قطار موج می‌شود. اختلاف سرعتی کم بین گوشته و پوسته شبه اقیانوسی باعث افزایش زاویه بحرانی و در نتیجه نشت انرژی قطار موج تشکیلی به گوشته می‌شود. وجود مرزهای سرعتی جانبی باعث بازتاب از این مرزها و درنتیجه کاهش انرژی قطار موج عبوری می‌شود. همچنین برای زلزله‌هایی که در داخل حضه اتفاق می‌افتند موج Lg تشکیل نمی‌شود و یا اگر تشکیل شود دامنه آن به هنگام عبور از حوضه به سرعت میرا می‌شود.

منابع

Allen, M. B., Ghassemi, M., Sharabi, M., and Qorashi, M., 2003, Accommodation of late Cenozoic oblique hortening in the Alborz Range, northern Iran: Journal of Structural Geology, **25**, 659–672.

Clayton, R. and Engquist, B., 1977,Absorbing boundary condition for acoustic and elastic wave equations: Bulletin of Seismological Society of America, **67**, 1529-1540.

Hermann, R. B., and Kijko, A., 1983, Modeling Some Empirical Vertical Component Lg Relations:Bulletin of the Seismological Society of America, **73**, 157-171.

Mangino, S., and Priestley, K., 1996, Seismic Studies of the Caspian Basin and Surrounding Regions:Geophys. J. Int., **133**, 630–648.

Press, F., and Ewing, M., 1952, Two Slow Surface Waves across North America:Bulletin of Seismological Society of America, **42**, 219-228.

Ruzaikin, A. I., Nersesov, I. L., Khalturin, V. I., and Molnar, P., 1977, Propagation of Lg and lateral variations of crustal structure in Asia:J. Geophys. Res., **82**, 307-316.

Shearer, P. M., 2009, Introduction to Seismology: Cambridge University Press, p. 215.