بررسی ناهمسانگردی سمتی اعماق کم پوسته در تهران، ایران

تقی شیرزاد[۱]، فرزام یمینی‌فرد[۲]، مجتبی نقوی[۳]
[۱]استادیار، موسسه ژئوفیزیک آکادمی علوم لهستان، taghishirzadiraj@gmail.com
[۲]دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، faryam@iiees.as.ir
[۳]فارغ‌التحصیل، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، mojtabanaghavi@ut.ac.ir

چکیده

در این مطالعه از داده‌های انتخابی زمین‌لرزه‌های با بزرگی‌های کمتر از ۴ برای محاسبه ساختار سرعتی و ناهمسانگردی سمتی در اعماق کمتر از ۳ کیلومتر، در گستره تهران استفاده شده است. این زمین‌لرزه‌ها در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸ توسط ایستگاه‌های شبکه لرزه نگاری سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران ثبت شده‌اند. نتایج مدل سرعتی، بیانگر ناحیه‌ای کم سرعت در رسوبات واحد زمین‌شناسی هزاردره می‌باشد که بیانگر ضخامت زیاد این رسوبات می‌باشد. همچنین خردشدگی در انتهای شمالی گسل پارچین، بخش‌هایی از گسل ری، و تقاطع گسل‌های کوثر-شمال تهران مشهود می‌باشد. از طرفی جهت‌گیری‌های ناهمسانگردی سمتی، در حوزه تهران موازی با راستای گسل‌های شمال تهران و ری می‌باشد، در حالیکه این راستاها در دیواره شرقی گسل پارچین چرخیده است.

واژه‌های کلیدی: منحنی پاشندگی، سرعت گروه، موج ریلی، توموگرافی، ناهمسانگردی سمتی، تهران

Shallow Crustal Azimuthal Anisotropy in Tehran, Iran

Taghi Shirzad[1], Farzam Yaminifard[2], Mojtaba Naghavi[3]
[1] *Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, 30-130, Warsaw, Poland, taghishirzadiraj@gmail.com;*
[2] *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, 19537 14453, Iran, faryam@iiees.ac.ir*
[3] *Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, 14155-6466, Iran, mojtabanaghavi@ut.ac.ir*

Abstract

The micro-earthquakes (M<4) data has been used to obtain velocity structure and azimuthal anisotropy in the Tehran region up to 3 km depth. These earthquakes were recorded by the Tehran Disaster Mitigation and Management Organization (TDMMO) seismic stations between 2006-2018. Strict criteria were applied (including minimum and maximum epicentral distances, signal-to-noise ratio, two times of wavelength for each epicentral distance, etc.) for selecting a subset of data. The velocity model indicates a low velocity anomaly near the Hezardareh geological units which is caused by a thick sedimentary layer. Also, the crushing zone appears as a low velocity anomaly in the north part of Parchin, Rey, and the junction of Kosar-North Tehran faults. However, the fast direction is parallel with North Tehran-Rey in the Tehran basin, while it rotates in the east part of the Parchin fault.

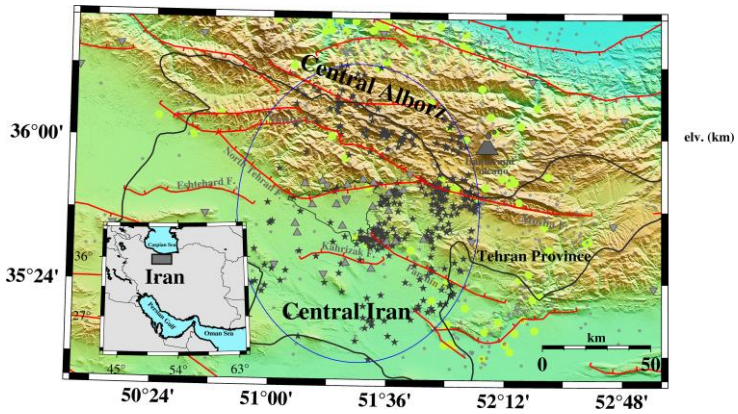
Keywords: dispersion curve, group velocity, Rayleigh wave, tomography, azimuthal anisotropy, Tehran

۱ مقدمه

امروزه با بررسی زمین‌لرزه‌های محلی، می‌توان ویژگی‌های فیزیکی پوسته نزدیک سطح زمین را فراهم آورد. شکل‌موج این رویدادهای محلی، با عبور از ساختارهای مختلف نزدیک سطح، بر روی ایستگاه‌ها زلزله‌نگاری ثبت می‌گردند. در دنیای امروز، با گردآوری این شکل‌موج‌ها و تجزیه و تحلیل آنها، ویژگی‌ها ساختار زمین (نظیر ضخامت آبرفت‌ها، گسل‌ها، شکستگی‌های خرد و غیره) محاسبه شده، و در راستای افق‌های کلان توسعه لحاظ می‌گردد. بدیهی است با توجه با گسترش روز افزون ساختار شهری، صنایع حیاتی اقتصادی-نظامی، محاسبه‌ی این مدل‌ها و ساختارها، در کلان شهری مانند تهران نیز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

در این مطالعه، از زمین‌لرزه‌های ثبت شده بر روی مولفه قائم ایستگاه‌های سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران (TDMMO) استفاده شده است. این شبکه، دارای ۱۹ ایستگاه زلزله‌نگاری پریود کوتاه CK-1 با فاصله نمونه برداری ۷۱.۴۳ نمونه بر ثانیه می‌باشد که در گستره تهران استقرار یافته است. مثلث‌های خاکستری در شکل ۱، این ایستگاه‌ها را نشان می‌دهند. بیش از ۵،۰۰۰ زمین‌لرزه بین سالهای ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۸ توسط این شبکه‌ی ثبت و با کمک ایستگاه‌های موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران تعیین محل شده‌اند. در گام نخست پالایش داده‌ها، تمامی زمین‌لرزه‌ها با بزرگی کمتر از ۱.۸ را از ادامه پردازش‌های آتی در این مطالعه حذف می‌نماییم. زیرا، منحنی‌های پاشندگی امواج سطحی بر اساس طیف ساطع شده چشمه‌های لرزه‌ای قابل حصول می‌باشد و بزرگی زمین‌لرزه‌ها (تابع چشمه آنها) رابطه‌ی مستقیمی با گستره طیف ساطع شده دارد. از طرفی، تمامی خرد زمین‌لرزه‌ها با عدم قطعیت مکان‌یابی بیش از ۲ کیلومتر (σ≥2km) و گاف زاویه سمتی gap Azimuth≥180° را حذف می‌نماییم. همچنین، با توجه به آنکه در این مطالعه از امواج سطحی استفاده می‌شود، لذا تمامی شکل‌موج‌هایی که فاصله رومرکزی، Δ، آنها با ایستگاه ثبت‌کننده بیش از ۶۰ و کمتر از ۱۵ کیلومتر باشد را از مجموعه داده‌های خود حذف می‌نماییم ($15 \leq \Delta \leq 60$ km). زیرا دامنه امواج سطحی این خرد زمین‌لرزه‌ها (شیرزاد و همکاران ۲۰۱۸)، در فواصلی بیش از ۶۰ کیلومتر بسیار ضعیف می‌گردد. از طرفی، در فواصل کمتر از ۱۵ کیلومتر (با در نظر داشتن عمق رویداد و فرکانس)، امواج سطحی به خوبی بر روی نگاشت‌ها نمایان نمی‌گردد (نقوی و همکاران ۲۰۱۹). در مرحله بعدی پالایش داده‌ها، تمامی شکل‌موج‌ها با نسبت سیگنال به نویز SNR≤4 از ادامه فرآیند پردازش حذف می‌گردند.

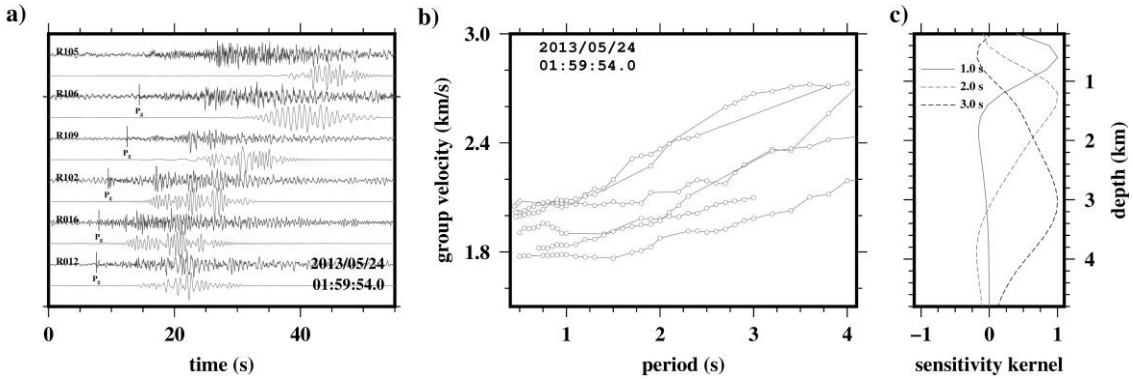
گستره تهران، با واقع شدن در حاشیه شمالی ایران مرکزی و لبه جنوبی البرز مرکزی (آلن و همکاران ۲۰۰۳) در بردارنده گسل‌های بسیاری است (شکل ۱). سابقه زمین‌های تاریخی این گستره (بربریان و یت ۲۰۱۶) نشان داده است که این گسل‌ها، پتانسیل زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی ۶.۵ و بیشتر را دارا می‌باشند (دوایر سبز روشن در شکل ۱). با توجه به ضخامت نهشته‌های آبرفتی در این گستره، مشاهده گسل‌هایی اصلی و ثانویه با طول کوچک، کمی دشوار می‌باشد. توموگرافی زمین‌لرزه‌های محلی با استفاده از ناهمسانگردی سمتی ابزار مناسبی است که می‌تواند علاوه بر ساختارهای سرعتی مرتبط با نهشته‌های آبرفتی و گسل‌ها، سمت‌گیری خرد شکستگی‌ها در این ساختارها را نیز، مشخص نماید. در این مطالعه، با استفاده از مجموعه شکل موج‌های تفکیک/جدا شده، منحنی‌های پاشندگی سرعت گروه موج ری‌لی را محاسبه می‌نماییم. در مرحله بعد، با استفاده از این منحنی‌های پاشندگی، نقشه‌های سرعت و راستای سرعت‌بیشتر (Fast Direction) را تعیین می‌نماییم.



شکل ۱. گستره مورد مطالعه. زمین لرزه‌ها با ستاره مشخص شده‌اند. پالایش داده‌ها برای داخل محدوده مشخص شده با خط آبی انجام شده است. ایستگاه‌های TDMMO و IrSC با مثلث و مثلث‌های وارونه خاکستری مشخص شده است. گسل‌های شناخته شده با خطوط قرمز و آتشفشان دماوند با نماد آتشفشان مشخص شده است. دوایر سبز روشن، زمین‌لرزه‌های تاریخی را نشان می‌دهند (بربریان و یت ۲۰۱۶).

۲ روش تحقیق

با توجه به آنکه موج ری‌لی از تداخل سازنده امواج طولی اولیه (P-wave) و ثانویه عرضی (Sv) تشکیل شده است، در طول مسیر انتشار دچار پاشش بر اساس محتوای فرکانسی می‌شود. لذا تحلیل‌های زمان-فرکانس (Frequency-Time Analysis, FTAN) می‌توانند منحنی‌های پاشندگی سرعت گروه-پریود را فراهم آورند. در این مطالعه با استفاده از بسته نرم‌افزاری هرمن و آمون (۲۰۱۳)، منحنی پاشندگی سرعت گروه امواج ری‌لی مجموعه داده پالایش شده را محاسبه می‌نمایم. با توجه به آنکه تحلیل‌های زمان-فرکانس از فیلترهای چندگانه گائوسی استفاده می‌کنند، که منجر به عدم قطعیت در حوزه زمان-فرکانس می‌گردد. بنابراین با انتخاب بهینه ضرایب گائوسی، α، می‌توان منحنی پاشندگی را محاسبه نمود (شاپیرو و سینگ ۱۹۹۹). در این مطالعه از ضرایب گائوسی ۳ و ۶ بترتیب برای فواصل رومرکزی تا ۳۰ و بزرگ‌تر از ۳۰ کیلومتر استفاده شده است (نقوی و همکاران ۲۰۱۹). شکل‌های 2a و 2b، بترتیب شکل‌موج‌ها و منحنی پاشندگی‌ها از رویداد زمین‌لرزه ۲۰۱۳.۰۵.۲۴ در ساعت ۰۱:۵۹:۵۴ را نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های مختلف شبکه‌ی TDMMO به ثبت رسیده است.



شکل ۲. (a) شکل‌موج‌های زمین‌لرزه ۲۰۱۳.۰۵.۲۴ در ساعت ۰۱:۵۹:۵۴.۰ که در ایستگاه‌های TDMMO ثبت شده‌اند، با خطوط خاکستری پررنگ مشخص شده است. سیگنال‌های تمییز شده‌ی بعد از آنالیز زمان-فرکانس برای هر شکل‌موج، در زیر همان سیگنال و با خطوط خاکستری روشن ترسیم شده است. (b) منحنی‌های پاشندگی. (c) تابع حساسیت بصورت تابعی از عمق.

توموگرافی لرزه ای شامل دو بخش اصلی مسئله مستقیم (forward problem) و وارون‌سازی (inversion) می‌باشد (راولینسون ۲۰۰۵). در این مطالعه، برای حل مسئله مستقیم و بدست آوردن داده محاسبه‌ای، از روش سریع‌ترین پیشروی (fast marching method; FMM) استفاده می‌شود (راولینسون و سامبریج ۲۰۰۵). بخش وارون سازی با استفاده از روش زیرفضا (subspace) برای کمینه کردن اختلاف داده‌ی مشاهده‌ای و داده‌ی محاسبه‌ای انجام می‌گردد. برای این منظور، منطقه مورد مطالعه را با سلول‌های ۲.۵×۲.۵ کیلومتری تقسیم‌بندی نموده و مقدار سرعت ثابت به این سلول‌های جغرافیایی نسبت داده می‌شود. این مقادیر سرعت ثابت، از مطالعه پیشین شیرزاد و همکاران (۲۰۱۸) استخراج می‌گردد. همچنین، مقدار بهینه‌ی پارامترهای منظم‌سازی (regularization parameters) با استفاده از منحنی‌های L-شکل استاندارد تعیین می‌گردند. شکل ۳، نتایج توموگرافی در پریودهای ۱ و ۳ ثانیه را نشان می‌دهد. با توجه به توابع حساسیت محاسبه شده (شکل 2c)، بیشینه دامنه این توابع تا اعماق ۴ کیلومتر برای گستره تهران می‌باشد. لذا نتایج توموگرافی برای اعماق سطح تا ۴ کیلومتر قابل اعتنا می‌باشند.

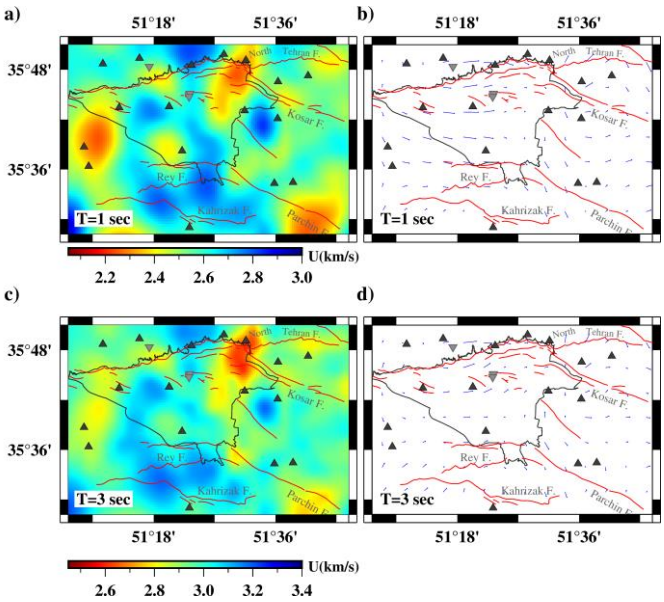
۳ نتیجه‌گیری

نتایج نقشه‌های سرعت گروه موج ری‌لی در گستره تهران، بیانگر ناهنجاری‌های تقریباً کم سرعت در حوضه تهران می‌باشد.

این نواحی کم سرعت می‌تواند بر ضخامت نهشته‌های آبرفتی در این حوزه دلالت نماید. از طرفی، ناهنجاری‌های کم‌سرعت در تقاطع گسل‌های شمال تهران-مشاء مشهود می‌باشد که در بخش نهشته‌های زمین‌شناسی هزاردره قرار دارد. از طرفی این نواحی کم سرعت در تقاطع گسل‌های کوثر- شمال‌تهران، و انتهای شمالی گسل پارچین نیز قابل ملاحظه می‌باشد که می‌تواند دال بر خرد شدگی تا اعماق سه کیلومتر را داشته باشد. همچنین، بخش شمالی گسل ری نیز دارای خردشدگی در نهشته‌های آبرفتی با ناهنجاری کم سرعت نمایان شده است. نتایج جهت سریع سرعت مبیّن خرد شکستگی‌های شرقی-غربی (موازی با گسل شمال تهران) در حوزه تهران می‌باشد. این جهت‌ها، در نزدیکی تقاطع گسل‌های کوثر-شمال تهران و شمال‌تهران-مشاء تغییر جهت داده و بصورت شمالی-جنوبی ظاهر می‌گردند که بیانگر تغییر استرس در اطراف این تقاطع‌ها می‌باشد. از طرفی، در بخش نواحی اطراف دیواره شرقی گسل پارچین، این جهت‌های سریع سرعت راستایی موازی با گسل را دارند.

تقدیر و تشکر

این مطالعه با استفاده از شکل‌موج‌های ثبت شده در شبکه لرزه نگاری سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران انجام شده است. تمامی شکل‌ها با استفاده از برنامه GMT نسخه ۶.۲ (*https://www.soest.hawaii.edu/gmt*) ترسیم شده است.



شکل ۳. نقشه‌های سرعت گروه و راستای سریع سرعت در پریودهای ۱ و ۳ ثانیه. ایستگاه‌ها، گسل‌های شناخته شده، محدوده‌ی شهر تهران بترتیب با مثلث، خطوط قرمز و خط سیاه مشخص شده است.

منابع

Allen, M.B., Ghassemi, M.R., Shahrabi, M., and Qorashi, M., 2003. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. J. Struct. Geol. 25, 659–672.

Berberian, M., and Yeats, R.S., 2016. Tehran: An earthquake time bomb. Geol. Soc. Am 45(7), 671. https://doi.org/10.1130/2016.2525(04.

Herrmann, R.B. & Ammon, C.J., 2013. Computer Programs in Seismology– Surface Waves, Receiver Functions and Crustal Structure, Saint Louis University. Available at: http://www.eas.slu.edu/People/RBHerrmann/ComputerPrograms.html (last access: 2013 December 21).

Naghavi, M., Hatami, M., Shirzad, T., and Rahimi, H., 2019. Radial Anisotropy in the Upper Crust Beneath the Tehran Basin and Surrounding Regions. Pure Appl. Geophys. 176, 787–800. https://doi.org/10.1007/s00024-018-1986-7

Rawlinson, N., 2005. FMST: Fast Marching Surface Tomography Package, Research School of Earth Sciences, Australian National University, Canberra ACT 0200.

Rawlinson, N., and M. Sambridge, 2005, The fast marching method: An effective tool for tomographic imaging and tracking multiple phases in complex layered media, Explor. Geophys. 36, 341–350.

Shapiro, N.M., and Singh, S.K., 1999. Short note: a systematic error in estimating surface-wave group-velocity dispersion curve and a procedure for its correlation, Bull. seism. Soc. Am., 89(4), 1138–1142.

Shirzad, T., Naghavi, M. and Yaminifard, F., 2018, Shallow/upper crustal shear wave structure of the Tehran region (Central Alborz, Iran) from the inversion of Rayleigh wave dispersion measurements. J Seismol 22, 1409–1421. https://doi.org/10.1007/s10950-018-9774-5