توموگرافی سه بعدی امواج سطحی با تعداد پارامترهای نامعین با استفاده از داده‌های زمین لرزه و نوفه‌های محیطی در البرز مرکزی

فائزه شیرمحمدی[۱]، محمدرضا حاتمی[۲]، امین رحیمی دلخانی[۳]

[۱] فارغ التحصیل دوره دکتری رشته ژئوفیزیک، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، shirmohammadi@ut.ac.ir

[۲] استادیار گروه زلزله شناسی، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، mrhatami@ut.ac.ir

[۳] دانشجوی دوره دکتری، دانشگاه صنعتی دلفت، هلند a.rahimidalkhani@tudelft.nl

چکیده

در این مطالعه توموگرافی امواج ریلی در محدوده البرز مرکزی در عرض جغرافیایی ۳۸/۰-۳۴/۵درجه شمالی و طول جغرافیایی۵۴/۵-۴۸/۵درجه شرقی به روش توموگرافی با تعداد پارامترهای نامعین مورد بررسی قرار گرفته است که روش بسیار نوین در توموگرافی لرزه ای است. این روش مستلزم شبکه‌بندی از پیش تعریف شده و یا تعیین پارامترهایی همچون هموارسازی و میرایی نیست. داده‌های مورد استفاده شامل منحنی پاشش به دست آمده از نوفه‌های محیطی با اعمال تداخل‌سنجی لرزه‌ای و همچنین داده‌های زمین لرزه رخ داده در منطقه مورد بررسی است. روش تداخل‌سنجی لرزه‌ای روشی کارآمد در مطالعات زلزله‌شناسی است و امکان استفاده از نوفه محیطی در این روش به علت تکرار پذیر بودن، محدوده فرکانسی گسترده بسیار حائز اهمیت است. بررسی نتایج توموگرافی به دست آمده، نشان دهنده ایالت‌های لرزه زمین ساختی متفاوت و همچنین ماگمای سرد شده دماوند در عمقی حدود بیست کیلومتری است.

واژه‌های کلیدی: تداخل‌سنجی لرزه‌ای، نوفه محیطی، امواج سطحی، توموگرافی با تعداد پارامترهای نامعین، زمین لرزه، البرز

3D Transdimensional surface wave tomography using ambient noise and earthquake data in the Central Alborz

Faezeh Shirmohammadi [1,2], Mohammad Reza Hatami[1], Amin Rahimi Dalkhani[2]

[1]Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

[2]Delft University of Technology, Delft, the Netherlands

Abstract

In this study, the tomography of Rayleigh waves in the Central Alborz region (latitude 34.5-38°N degrees and longitude 48.5-54.5° E degrees) has been investigated by transdimensional tomography. This method adapts to a non-uniform data coverage without requiring arbitrary regularization such as damping or smoothing. The data includes the dispersion curve obtained from ambient noises by applying seismic interferometry, as well as the data of the earthquakes. Seismic interferometry is an efficient method in seismological studies that estimate the response between two seismic stations using cross-correlation. The results from seismic tomography in this study show the possibility of separating different tectonic seismic regions based on velocity anomalies and the cooled Damavand magma at a depth of about 20 km.

Keywords: Seismic interferometry, Ambient noise, Surface waves, Transdimensional tomography, earthquake, Alborz

۱ مقدمه

توموگرافی لرزه‌ای، ابزاری بسیار قدرتمند جهت شناسایی بی هنجاری‌های ساختاری و همچنین تعیین مدل سرعتی زمین می‌باشد. امروزه برای انجام توموگرافی در مقیاس‌های مختلف جهانی، منطقه ای و یا محلی از روش‌های متفاوتی

نظیر مدل کردن شکل موج، زمانسیر امواج لرزه‌ای، پاشندگی امواج سطحی و غیره استفاده می‌گردد. در این روش‌ها معمولاً منطقه مورد مطالعه به صورت منظم و از قبل باید شبکه‌بندی شود و همچنین در تمامی مراحل وارونسازی نیازمند تعیین مقدار میرایی و هموارسازی است. به جهت رفع این محدودیت‌ها روش توموگرافی با تعداد پارامترهای نامعین (Transdimensional seismic tomography) به تازگی معرفی شده است که روشی بسیار نوین در توموگرافی است که مستلزم شبکه‌بندی از پیش تعریف شده و یا پارامترهایی همچون هموارسازی و میرایی نیست (زانگ و همکاران، ۲۰۲۰، رحیمی دلخانی و همکاران، ۲۰۲۱).

هدف از این مطالعه به دست آوردن نقشه توموگرافی سرعتی امواج ریلی حاصل از نوفه‌های محیطی و زمین لرزه‌ها در گستره البرز مرکزی (عرض جغرافیایی ۳۸/۰-۳۴/۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی۵۴/۵-۴۸/۵ درجه شرقی) با استفاده از روش توموگرافی با تعداد پارامترهای نامعین است.

به منظور استخراج امواج سطحی از نوفه‌های محیطی از روش تداخل‌سنجی لرزه‌ای استفاده شده است. این روش اصل تولید پاسخ لرزه ای جدید مابین دو ایستگاه لرزه‌ای است در حالی که یکی از این ایستگاه‌ها به عنوان چشمه مجازی عمل می‌کند. لازم به ذکر است تاکنون در ایران مطالعات متعددی با استفاده از نوفه‌های محیطی به انجام رسیده است که به لحاظ مقیاس مورد مطالعه، چگالی مسیرهای پرتو و بازه فرکانسی از پژوهش تعریف شده در مطالعه فعلی کاملاً متفاوت هستند.

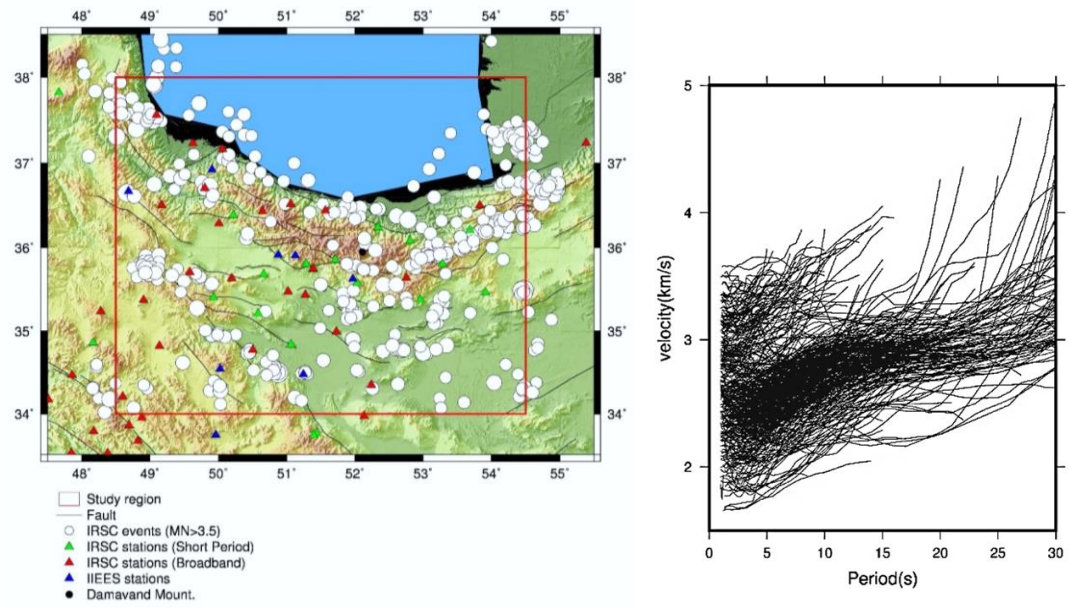
۲ روش تحقیق

برای انجام این مطالعه از داده‌های پیوسته ثبت شده در ۳۴ ایستگاه مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC) و ۶ ایستگاه پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) در بازه زمانی سال ۲۰۱۵-۲۰۱۳ میلادی استفاده شده است. همانطور که ذکر شد برای انجام این پژوهش و به منظور افزایش مسیرهای پرتو علاوه بر داده‌های پیوسته و انجام محاسبات لازم برای تمام جفت ایستگاه‌های ممکن از داده‌های زمین لرزه نیز استفاده می‌شود. داده‌ها شامل زمین لرزه‌هایی با بزرگی بالای ۳.۵ رخ داده در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۸ - ۲۰۰۶/۰۱ و ثبت شده در ایستگاهای ذکر شده هستند. در شکل ۱a محدوده منطقه مورد مطالعه به همراه ایستگاه‌های لرزه‌نگاری دو مرکز ذکر شده و توزیع رومرکز زمین لرزه‌ها نشان داده شده است.

اولین فاز فرآیند آماده سازی داده‌های نوفه محیطی شامل حذف پاسخ دستگاهی، حذف اثر میانه، حذف روند روزانه و اعمال فیلتر میان‌گذر روی لرزه‌نگاشت‌ها، بهنجارش در حوزه زمان و در حوزه فرکانس است و سپس محاسبه تابع همبستگی متقابل ما بین تمام جفت ایستگاه‌های موجود انجام می‌شود. پس از انجام همبستگی متقابل تمام داده‌های موجود برانبارش می‌شوند. سپس منحنی پاشش امواج سطحی حاصل از نوفه‌های محیطی و زمین لرزه‌ها با استفاده از تکنیک فیلتر چندگانه به دست می‌آید. شکل ۱bمنحنی پاشش به دست آمده برای تمامی داده‌ها برای موج عمودی را نشان می‌دهد.

در مرحله بعد با استفاده از روش توموگرافی لرزه ای با تعداد پارامترهای نامعین مدل سرعتی امواج عمودی به دست می آید. در این روش توموگرافی بر خلاف روش معمول دو مرحله ای با به کارگیری شبکه بندی ورونوی متغیر، برگردان همزمان سرعت ، ابعاد هندسه و تعداد سلولها در طی یک مرحله وارونسازی انجام شده و یک مدل سه بعدی از سرعت موج برشی به دست می آید. این روش، یک روش بیزین (Bayesian) است که از سلول های ورونوی (Voronoi cells)

برای تعریف خواص محیط و همچنین الگوریتم پرش برگشت پذیر در زنجیره مارکو مونت کارلو (reversible jump Markov chain Monte Carlo; rj-McMC) استفاده می‌کند که اجازه می دهد پارامتر بندی های متعددی در حوزه مدل انجام شود. این روش نیازی به تعیین هندسه و تعداد سلول های ورونوی (ابعاد فضای جواب) و پارامترهایی همچون میرایی و هموارسازی در حین وارونسازی ندارد. برای بررسی دقیقتر روش پیشنهاد میشود مقاله رحیمی دلخانی و همکاران (۲۰۲۱) مطالعه شود. شکل ۲a نمونه ای شبکه بندی در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل۱. (a) منطقه مورد مطالعه به همراه محل ایستگاه‌های لرزه نگاری و زمین لرزه‌های مورد استفاده، (b) منحنی‌های پاشش امواج سطحی حاصل از نوفه‌های محیطی و زمین لرزه‌ها

۳ نتیجه‌گیری

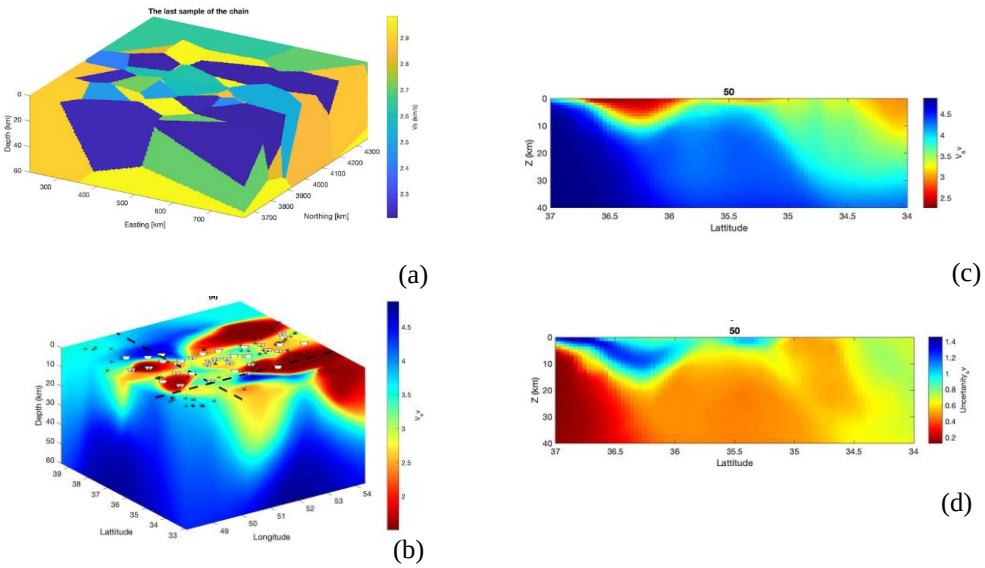
در این بخش نتایج توموگرافی به روش تعداد پارامتر نامعین بررسی می‌شود. همانطور که ذکر شد این روش یک روش یک مرحله ای است و می‌توان تغییرات در عمق را نیز بررسی کرد. در ادامه نقشه توموگرافی سه بعدی به دست آمده و یک مقطع عمودی که نشان دهنده تغییرات عمقی سرعت هستند نمایش داده شده است (شکل۲).

در مقطع نشان داده شده که مربوط به مقطع ۵۰ درجه شرقی است و شامل ایالت لرزه زمین ساختی البرز و بخشی از ایران مرکزی است. در نقشه توموگرافی سرعت موج برشی منطقه البرز و ایران مرکزی به صورت واضح از هم جدا شده اند. نتایج نشان می‌دهد تغییرات ناگهانی در سرعت می‌تواند با زون‌های گسلی فعال در منطقه همخوانی داشته باشد. همچنین این آنومالی تا عمق ده کیلومتری در ناحیه البرز با سرعت بالاتر نسبت به سطح دیده می‌شود و در منطقه ایران مرکزی یک آنومالی با سرعت بیشتر نسبت به البرز با سرعت ۳ تا ۴ کیلومتر بر ثانیه تا اعماق بیشتر و حدود ۱۵ کیلومتر دیده می‌شود که می‌تواند نشان دهنده مرز پوسته بالایی از میانی در این منطقه باشد. علت کمتر بودن سرعت برشی در منطقه البرز مرکزی می‌تواند با وجود گسلش و زون برشی در منطقه البرز مطابقت داشته باشد و تفاوت آن در ایران مرکزی می‌تواند نشان دهنده تغییرات تکتونیکی و تغییر ایالت زمین ساختی و تغییرات پوسته است. همچنین آنومالی با سرعت کمتر در نزدیکی سطح و تا عمق حدوداً سه کیلومتر در البرز می‌تواند نشان دهنده ضخامت رسوبات در این منطقه باشد. نقشه عدم قطعیت‌های سرعت موج قائم در شکل ۲d نشان دهنده صحت نتایج است و در این نقشه‌ها عدم قطعیت‌ها

می‌تواند شاخصه آنومالی‌های شارپ نیز باشد. برای بررسی بیشتر نتایج پیشنهاد می‌شود به مقاله شیرمحمدی و همکاران (۱۴۰۱) مراجعه شود.

خلاصه ای از نتایج پژوهش حاضر در زیر آمده است:

- به صورت کلی نتایج توموگرافی امواج ریلی نشان می‌دهد می‌توان ایالت‌های لرزه زمین ساخت بزرگ مقیاس مانند البرز و ایران مرکزی را از هم تفکیک کرد و البرز معمولاً با آنومالی کم سرعت در عمق ۱۰ کیلومتری دیده می‌شود خصوصاً حوالی تهران و در ایران مرکزی با عمق بیشتر و سرعت بالاتری دیده می‌شود که می‌تواند نشان دهنده گسلش و ترک‌ها در این عمق باشند.
- در اکثر نقاط با عدم قطعیت خوبی نتایج به دست آمده است و همه زنجیره‌ها در این روش همگرا شده اند ولی بررسی پارامتر نویز نشان می‌دهد به احتمال زیاد با عدم قطعیت و خطا در داده روبه رو هستیم و همچنین امکان به دست آوردن منحنی‌های پاشش در همه پریودها برای همه داده‌ها میسر نبوده است و این امر موجب محدود بودن عمق و ابعاد آنومالی‌ها در نقشه توموگرافی خواهد شد.
- در این مطالعه همزمان از داده‌های نوفه محیطی و زلزله استفاده شده است. که استفاده همزمان این دو نوع داده‌ها موجب افزایش مسیرهای پرتو و در نتیجه پایداری نتایج شده است. تداخل سنجی لرزه ای تکنیک قدرتمند برای به دست آوردن پاسخ مخصوصاً امواج سطحی با کیفیت قابل قبول ما بین دو ایستگاه لرزه نگاری از زیر سطح را فراهم می‌کند و می‌تواند اطلاعات جدید فراهم کند و نکته مهم در تداخل سنجی لرزه ای امکان استفاده از نوفه‌های محیطی است که به دلیل تکرار پذیر بودن، عدم نیاز به چشمه در محل، و محدوده فرکانسی گسترده حائز اهمیت است و ترکیب این داده با داده‌های زمین لرزه می‌تواند پوشش داده‌های خوبی در منطقه مورد نظر فراهم کند و فاصله ایستگاهی و کیفیت داده به دست آمده تعیین کننده منحنی‌های پاشش به دست آمده و در نتیجه کیفیت نتایج توموگرافی لرزه ای است.



شکل ۲. (a) نمونه ای از سلول‌بندی ورونوی در روش توموگرافی با پارامترهای نامعین در مولفه عمودی(b) نقشه توموگرافی سه بعدی موج ریلی در منطقه مورد مطالعه (c) نقشه توموگرافی سرعت موج ریلی و (d) نقشه عدم قطعیت موج ریلی در مقطع ۵۰ درجه شرقی

منابع

شیرمحمدی, فائزه, حاتمی, محمدرضا, رحیمی دلخانی, امین. (۱۴۰۱). توموگرافی امواج سطحی و ناهمسانگردی شعاعی با استفاده از تداخل سنجی لرزه ای در گستره البرز مرکزی .مجله ژئوفیزیک ایران doi: 10.30499/ijg.2022.328429.1394

Rahimi Dalkhani, A., Zhang, X., Weemstra, C., 2021, On the Potential of 3D Transdimensional Surface Wave Tomography for Geothermal Prospecting of the Reykjanes Peninsula, Remote Sens., 13.

Zhang, X., Hansteen, F., Curtis, A., de Ridder, 2020, 1-D, 2-D, and 3-D Monte Carlo Ambient Noise Tomography Using a Dense Passive Seismic Array Installed on the North Sea Seabed, J. Geophys. Res. Solid Earth, 125.