

توموگرافی سه بعدی دورلرز امواج P بر روی فلات ایران

محمد ویسی^۱، فرهاد ثبوتی^۲، مجید عباسی^۳، اسماعیل شهبانیان^۴

^۱دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه - زنجان، m.veisi@iasbs.ac.ir

^۲دانشیار، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه - زنجان، farhads@iasbs.ac.ir

^۳استادیار، گروه مهندسی نقشه برداری، دانشگاه زنجان، madjid.abbasi@znu.ac.ir

^۴دانشیار، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه - زنجان، shabanian@iasbs.ac.ir

چکیده

فلات ایران یکی از پیچیده‌ترین مناطق تکتونیکی در جهان است. وجود اسلب‌های باقی‌مانده از فرورانش اقیانوس نئوتتیس، فرایندهای درون گوشته پس از برخورد و احتمالاً زمان‌های متفاوت برخورد و جدایش اسلب باعث پیچیدگی گوشته‌ی بالایی در فلات ایران شده است. در این تحقیق برای یافتن ساختار گوشته بالایی در فلات ایران، یک توموگرافی سه بعدی دورلرز امواج P ارائه شده است. در مرحله‌ی اول روشی برای وارون‌سازی همزمان داده‌های شبکه‌های مختلف لرزه‌ای ارائه شده است. برای محاسبه‌ی تصحیحات مربوطه، توابع گیرنده بر روی شبکه‌های لرزه‌ای محاسبه شده است. با استفاده از یک مدل مصنوعی شطرنجی، مناطقی که در آن تغییرات سرعت بهتر محاسبه می‌شوند مشخص شده است. در نهایت، سعی شده که با استفاده از توموگرافی ارائه شده، مکان اسلب‌های جدا شده در سه بخش غربی، میانی و شرقی زاگرس مشخص شود. **واژه‌های کلیدی:** توموگرافی سه بعدی، ساختار گوشته، جدایش اسلب، تکتونیک قاره‌ای، مرز لبتوسفر- آستنوسفر، توابع گیرنده

3D P wave teleseismic tomography of Iranian Plateau

M. Veisi¹, F. Sobouti², M. Abbasi³, E. Shabanian⁴

¹Ph.D student, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, m.veisi@iasbs.ac.ir

²Associate Professor, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, farhads@iasbs.ac.ir

³Assistant Professor, University of Zanjan, madjid.abbasi@znu.ac.ir

⁴Associate Professor, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, shabanian@iasbs.ac.ir

Abstract

Iranian plateau is one of the most complex tectonic areas in the world. Remnants of the Neotethys Ocean slab, process of continent-continent collision in the mantle and the difference in the timing of slab-breakoff and collision in this area yield a complex system in the upper and lower mantle. For determination of structures in this area we present a 3D teleseismic tomography. We first propose a method for inverting five seismic networks simultaneously. For correcting the traveltimes data we calculate the receiver function on three temporary networks. Then we perform a checkerboard test for finding the best resolved part of our model. We try to find the slab remnants of the Neotethys Ocean underneath the western, middle and eastern parts of Iranian plateau.

Keywords: 3D Tomography; Structure of Mantle; Slab-Breakoff; Continental Tectonics; Lithosphere-Asthenosphere Boundary; Receiver Functions

۱ مقدمه

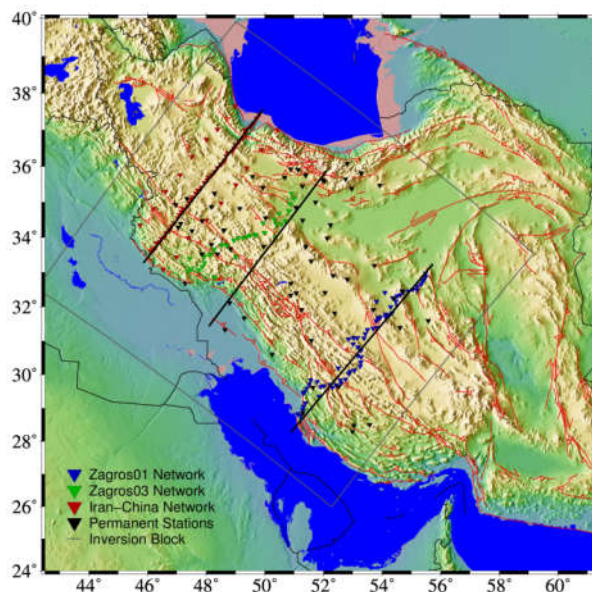
رشته کوه زاگرس بخشی از کمربند کوهزاد آلپ-همیمالیا است که به دلیل برخورد صفحه‌ی عربی به اوراسیا ایجاد شده است. نرخ همگرایی در زاگرس در حدود ۲۵ میلیمتر در سال توسط ورنانت (۲۰۰۴) تخمین زده شده است. یکی از مسایل مهم در فهم تکامل برخورد قاره-قاره، ساختار گوشته در این مناطق است. روش‌های لرزه‌ای مانند توابع گیرنده و توموگرافی امواج دورلرز می‌توانند یک تخمین از ساختار گوشته بالایی ارائه دهند. تا کنون مطالعات زیادی برای تعیین ساختار گوشته در منطقه برخوردی زاگرس انجام شده است (کاوایانی و همکاران ۲۰۰۷، شادمنان و شمالی ۲۰۱۰ و شمالی و همکاران ۲۰۱۱). هافکنشید و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی سناریوهای مختلف برخورد در زاگرس و همیمالیا پرداختند. این محققین زمان برخورد صفحه عربی به اوراسیا را ۴۰ میلیون سال پیش در نظر گرفتند. پاول و همکاران (۲۰۱۰) توابع گیرنده و توموگرافی زمان‌رسید نسبی دورلرز را بر روی شبکه‌های زاگرس ۰.۱ و زاگرس ۰.۳ (شکل ۱) محاسبه کردند. این محققین با استفاده از نتایج توابع

گیرنده به این نتیجه رسیدند که در زیر منطقه سنندج-سیرجان پوسته به مقدار قابل توجهی ضخیم شده است. همچنین تصاویر توموگرافی ارائه شده در این تحقیق بیانگر یک زون پرسرعت در زیر قسمت عربی زاگرس و زون کم سرعت در زیر ایران مرکزی است.

با اینکه مطالعات زیادی برای تعیین ساختار گوشته بر روی ایران انجام گرفته است، هنوز سؤالاتی مانند مکان اسلب فرورنده، وجود جدادگی اسلب و تفاوت‌های گوشته در زاگرس میانی، شرقی و غربی در فلات ایران بدون پاسخ مانده است. در این تحقیق با استفاده از توموگرافی سه بعدی امواج دورلرز سعی بر تعیین ساختارهای گوشته در زیر فلات ایران داریم.

۲ روش تحقیق

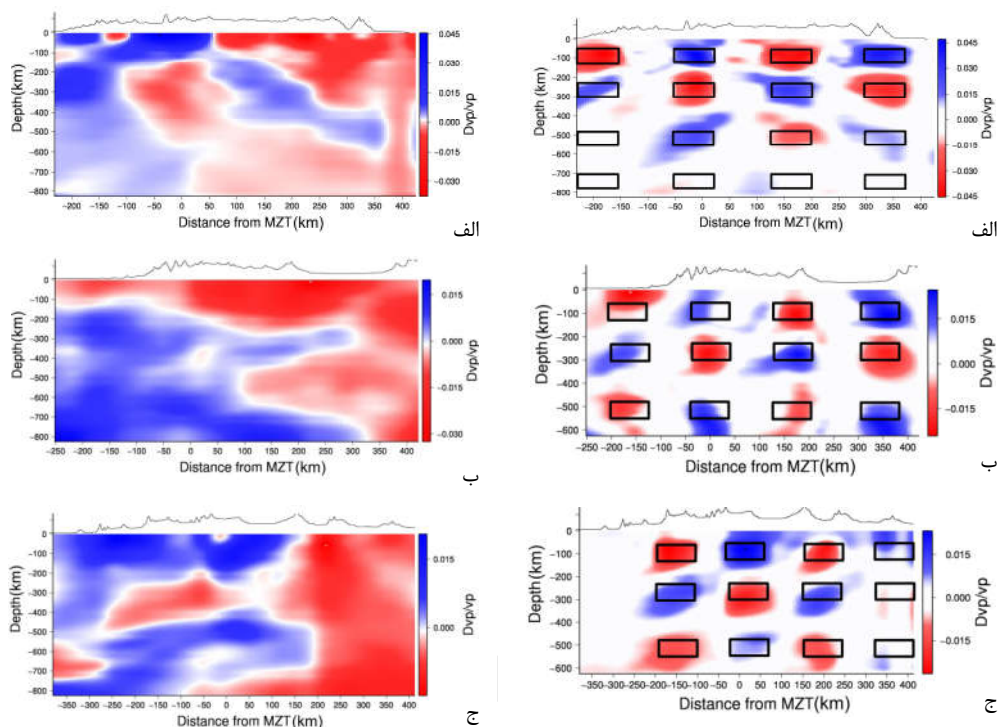
داده‌های استفاده شده در این تحقیق شامل ۲۴۰۰۰ پرتو موج دورلرز P ثبت شده در ایستگاه‌های زاگرس ۱، زاگرس ۰۳، ایران-چین، ایستگاه‌های ثابت موسسه ژئوفیزیک و پژوهشگاه زلزله شناسی است. زمان رسید نسبی این داده‌ها با استفاده از متد ارائه شده توسط چورت (۲۰۰۲) محاسبه شده است. قبل از انجام توموگرافی لازم است که تصحیحات مربوط به تغییرات عمق موهو در منطقه، ارتفاع ایستگاه‌ها و تصحیح مربوط به تغییرات شعاع زمین بر روی داده‌ها اعمال شود. برای محاسبه‌ی تصحیح عمق موهو بر روی سه شبکه‌ی موقت، توابع گیرنده محاسبه شده و پس از مهاجرت به عمق، تغییرات عمق موهو در زیر این شبکه‌ها تعیین شده است. عمق موهو در بین شبکه‌های موقت از روی مدل Crust1.0 محاسبه شده است.



شکل ۱. محل ایستگاه‌های ثابت، شبکه‌های موقت و بلوک وارون‌سازی، مکان پروفیل‌های شمال غربی، میانی و جنوب شرقی

پس از محاسبه تصحیح ارتفاع ایستگاه‌ها و تصحیح تغییرات مکانی شعاع زمین، تصحیح عمق موهو با استفاده از اختلاف زمان عبوری عمق موهو مدل AK135 و عمق موهو، محاسبه شده است. در این تحقیق برای تعیین ماتریس ضرایب از روش ارائه شده توسط اکی و همکاران (۱۹۷۷) استفاده شده است. در این روش برای وارون‌سازی نیاز به این است که محیط مورد مطالعه سلول‌بندی شود. در این تحقیق منطقه‌ی مورد مطالعه با سلول‌هایی به اندازه $25^{\circ} \times 25^{\circ} \times 25^{\circ}$ کیلومتر شبکه بندی شده است. به منظور وارون‌سازی همزمان شبکه‌های مختلف لازم است که مقدار میانگین زمان عبوری پرتوهای مختلف یک رخداد در یک سلول از مقدار زمان عبوری یک پرتو مربوط به همان رخداد در همان سلول کم شود. در واقع ماتریس ضرایب شامل تغییرات زمان عبوری پرتوها نسبت به زمان عبوری میانگین یک رخداد است. برای از بین بردن تکینگی ماتریس ضرایب، تخمین مناسب تغییرات نسبی سرعت در قسمت‌های فرومعین بلوک وارون‌سازی و هموارسازی مدل نهایی دو قید Damping و Smoothing به ماتریس ضرایب اضافه شده است. در نهایت داده‌های زمان‌رسید نسبی با استفاده از روش LSQR که توسط پیچ و سندرز (۱۹۸۲) ارائه شده است، وارون می‌شود.

برای تخمین مقدار کشیدگی در مدل نهایی، تعیین محل‌هایی که پارامترهای مجهول به خوبی تخمین زده می‌شود و تعیین کوچکترین آنومالی که در فرایند وارون‌سازی تخمین‌زده می‌شود، یک تست شطرنجی با استفاده از پرتوها در منطقه مورد مطالعه انجام شده است (شکل ۲). توموگرافی سه بعدی امواج P دورلرز در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار کاهش RMS پس از وارون‌سازی برابر ۵۱ درصد است.



شکل ۳. نتایج توموگرافی زمان‌رسید نسبی دورلرز امواج P. الف. پروفیل شمال غربی ب. پروفیل میانی ج. پروفیل جنوب شرقی

شکل ۲. نتایج تست شطرنجی الف. پروفیل شمال غربی ب. پروفیل میانی ج. پروفیل جنوب شرقی

۳ نتیجه‌گیری

شکل ۳ الف بیانگر توموگرافی بر روی شمال غرب ایران در زیر ایستگاه‌های میانی شبکه ایران-چین است. در این شکل مقادیر نسبی پر سرعت در زیر قسمت عربی زاگرس دیده می‌شود این قسمت پر سرعت تا ۵۰ کیلومتری شمال گسله اصلی زاگرس کشیده شده است. یک آنومالی پر سرعت در زیر ۱۵۰ کیلومتری شمال گسله اصلی زاگرس دیده می‌شود. پیوستگی این آنومالی در این ناحیه با توجه به مقدار کشیدگی در توموگرافی دورلرز قابل تعیین نیست. دامنه این آنومالی در قسمت غربی پروفیل ایران-چین بیشتر است. هرچه به سمت شرق حرکت کنیم دامنه این آنومالی کمتر می‌شود و در نهایت در زیر قسمت شرقی ناپدید می‌شود. شیب، اندازه و محل وجود این آنومالی با زمان جدایش اسلب و سرعت غرق شدن اسلب ارائه شده توسط هافکنشید و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت دارد. بنابراین احتمالاً وجود این آنومالی مربوط به لیتوسفر فرورونده اقیانوسی است. با توجه به مدل مصنوعی در قسمت میانی زاگرس (شکل ۲ ب)، آنومالی بدست آمده در اعماق بیشتر از ۱۰۰ کیلومتر در پروفیل میانی معتبرتر است. در این پروفیل برای اعماق بیشتر از ۱۰۰ کیلومتر، بیشتر آنامولی‌ها نشان دهنده مناطق پرسرعت هستند. مرز بالایی این آنومالی پر سرعت با عمق لیتوسفر بدست آمده در کار متقی و همکاران (۲۰۱۷) به طور تقریبی مطابقت دارد. آنومالی‌های پر سرعت در اعماق بیشتر از ۲۰۰ کیلومتر در زیر لیتوسفر عربی را می‌توان به دو صورت تفسیر کرد. این آنومالی ممکن است نشان‌گر باقی‌مانده اسلب غرق شده نئوتتیس باشد که در گذر زمان به اعماق زیادتر فرورفته است. از سوی دیگر، توموگرافی بیجوارد (۱۹۹۸) آنومالی‌های پرسرعتی در عمق بیشتر از ۱۰۰۰ کیلومتری در این منطقه نشان می‌دهد که ممکن

است با این مشاهده‌ی ما بی‌ارتباط نباشد؛ آنومالی‌هایی که در عمق ۸۰۰ کیلومتری دیده می‌شود می‌تواند نتیجه نفوذ این آنومالی‌ها از اعماق زیاد به کف پروفیل میانی باشد. شکل ۳ نشان دهنده توموگرافی در زیر شبکه زاگرس ۰۱ است. در اعماق کمتر از ۳۰۰ کیلومتر در زیر گسله اصلی زاگرس یک آنومالی سرد به شکل V دیده می‌شود. این آنومالی توسط متقی و همکاران (۲۰۱۷) تقریباً در همین عمق دیده شده است. در زیر این پروفیل، آنومالی پر سرعت مشخص دیگری در عمق ۵۰۰ تا ۷۰۰ کیلومتری دیده می‌شود. آگارد و همکاران (۲۰۱۱) تقریباً در همین راستا با استفاده از تصاویر توموگرافی و داده‌های زمین‌شناسی به این نتیجه رسیدند که آخرین جدایش اسلب زودتر از قسمت شمال غربی رخ داده است. بنابراین، آنومالی پر سرعت بدست آمده در عمق ۵۰۰ کیلومتری می‌تواند نتیجه آخرین جدایش اسلب در این بخش از منطقه باشد.

۴ منابع

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B., Wortel, R., 2011, Zagros orogeny : a subduction-dominated process: *Geol. Mag.* **148** (5e6), 692e725.
- Aki, K., Christoffersson, A., & Husebye, E. S., 1977, Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere: *Journal of Geophysical Research*, **82**, 277.
- Bijwaard, H., Spakman, W., & Engdahl, E. R., 1998, Closing the gap between regional and global travel time tomography: *Journal of Geophysical Research*, **103**, 30055.
- Chevrot, S., 2002, Optimal measurement of relative and absolute delay times by simulated annealing: *Geophysical Journal International*, **151**, 164–171.
- Hafkenscheid, E., Wortel, M. J. R., & Spakman, W., 2006, Subduction history of the Tethyan region derived from seismic tomography and tectonic reconstructions: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **111**, 1–26.
- Kaviani, a., Paul, a., Bourova, E., Hatzfeld, D., Pedersen, H., & Mokhtari, M., 2007, A strong seismic velocity contrast in the shallow mantle across the Zagros collision zone (Iran): *Geophysical Journal International*, **171**, 399–410.
- Motaghi, K., Shabaniyan, E., & Kalvandi, F., 2017, Underplating along the northern portion of the Zagros suture zone, Iran: *Geophysical Journal International*, **210**, 375–389.
- Motaghi, K., Shabaniyan, E., Tatar, M., Cuffaro, M., & Doglioni, C., 2017, Tectonophysics The south Zagros suture zone in teleseismic images. *Tectonophysics*, **694**, 292–301.
- Paige, C. C., & Saunders, M. A., 1982., LSQR: An Algorithm for Sparse Linear Equations and Sparse Least Squares: *ACM Trans. Math. Softw.* **8**, 43–71.
- Paul, A., Hatzfeld, D., Kaviani, A., Tatar, M., & Catherine, P., 2010, Seismic imaging of the lithospheric structure of the Zagros mountain belt (Iran): *Tectonic and Stratigraphic Evolution of Zagros and Makran During the Meso-Cenozoic*, **330**, pp. 5–18, eds Leturmy, P. & Robin, C., Geological Society, Special Publications.
- Shad, N., & Shomali, H., 2010, Upper mantle S-velocity structure and Moho depth variations across Zagros belt , Arabian – Eurasian plate boundary: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **180**, 92–103.
- Shomali, Z. H., Keshvari, F., Hassanzadeh, J., & Mirzaei, N., 2011, Lithospheric structure beneath the Zagros collision zone resolved by non-linear teleseismic tomography: *Geophysical Journal International*, **187**, 394–406.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinid, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. & Chery, J., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman, *Geophysical Journal International* **157**, 381–98.