ناهمسانگردی لرزه‌ای با استفاده از امواج S مستقیم دورلرز در غرب ایران

شیوا آروین[۱]، فرهاد ثبوتی[۱]، فردریک تیلمان[۲]، تونا ایکن[۳]

۱دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران. shivarvn@gmail. om

[۲]دپارتمان ژئوفیزیک، مرکز علوم زمین آلمان، پتسدام، آلمان.

[۳]دپارنمان مهندسی ژئوفیزیک، دانشکده معدن، دانشگاه فنی استانبول، استانبول، ترکیه.

چکیده

در این مطالعه ما به منظور بررسی دگرشکلی‌های گوشته در منطقه برخوری عربی-اوراسیا در غرب ایران، به بررسی اشتقاق موج برشی بر روی امواج دور لرز S مستقیم ثبت شده در ۶۳ ایستگاه باند پهن شبکه موقت ایران-چین پرداخته‌ایم. ما از تکنیک ایستگاه مرجع برای غلبه بر احتمال آلودگی ناشی از ناهمسانگردی سمت چشمه لرزه‌ای بر روی امواج S استفاده کرده‌ایم. میانگین زمان تاخیر برای کل منطقه ۱/۳۷±۰/۲ ثانیه بدست آمده است. جهت قطبش سریع بدست آمده راستای شمال‌شرق-جنوب‌غربی را در منطقه البرز نشان می‌دهد. با پیشروی به سمت ایران مرکزی بردارها چرخیده و یک روند شرقی-غربی را نشان داده و در ادامه در زاگرس این چرخش ادامه داشته و راستای محور سریع هم راستا با روند کوهزاد بوده و جهت شمال‌غرب- جنوب‌شرقی را نشان می‌دهند. امواج S مستقیم به دلیل زاویه ورودی بزرگ‌تر نسبت به فاز SK(K)S بیشتر تحت تاثیر ساختار آستنوسفر قرار خواهند گرفت، که در نتیجه یک منطقه نفوذ بزرگتری برای میانگین پارامترهای ناهمسانگردی در هر ایستگاه را در بر دارند. ما پیشنهاد می‌کنیم که ناهمسانگردی مشاهده شده عمدتاً توسط فابریک‌های LPO توسعه یافته ناشی از برش لایه آستنوسفر، در پاسخ به حرکت لیتوسفر نسبت به گوشته عمیق‌تر کنترل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ناهمسانگردی لرزه‌ای، اشتقاق موج برشی، امواج S مستقیم دورلرز، برخورد قاره‌ای.

Seismic anisotropy inferred from teleseismic direct S waves beneath Western Iran

Shiva Arvin [1], Farhad Sobouti[1], Frederik Tilmann[2], Tuna Eken[3]

[1]Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran.
shivarvn@gmail.com
[2]Department of Geophysics, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, Germany
[3]Department of Geophysical Engineering, Faculty of Mines, Istanbul Technical University, Maslak/Istanbul, Turkey

Abstract

We present the results of a shear wave splitting analysis performed on the teleseismic direct S wave recordings of 63 broadband stations belonging to the Iran-China temporary network to investigate the mantle deformation on the Arabia-Eurasia collision zone in Western Iran. We used the Reference Station Technique to overcome potential contamination from the source-side anisotropy on the direct S-wave signals. The average splitting delay time over the entire region was found to be 1.37 ± 0.2 s for the direct S wave. The fast polarization directions have the northeast-southwest trend in the Alborz region, and in Central Iran, they rotated and showed an east-west trend. In the Zagros, the direction of the fast axes tends to be aligned with the Zagros Mountain and showed a northwest-southeast direction.The direct S-waves, have a larger footprint and therefore average over a larger region, and relative to the SK(K)S phases, are influenced more strongly by the asthenospheric fabric due to their larger angles of incidence, which results in a larger zone of influence for station average anisotropy parameters. We propose that the observed anisotropy is mainly controlled by the LPO fabric developed due to the shearing of the asthenospheric layer in response to the motion of the lithosphere relative to the deeper mantle.

Keywords: Seismic anisotropy, shear wave splitting, Teleseismic direct S waves, Continental collision.

۱ مقدمه

تکتونیک حال حاضر ایران نتیجه برخورد قاره‌ای میان صفحات عربی و اوراسیا است. راندگی در حال جریان لبه صفحه عربی به زیر ایران مرکزی (پاول و همکاران، ۲۰۱۰؛ متقی و همکاران، ۲۰۱۷)، منجر به تشکیل یک فلات کوه‌زایی وسیع شده که توسط کمربند چین خورده-رانده زاگرس در جنوب و کوه‌های البرز و کپه داغ در شمال محصور شده است. با توجه به پیچیدگی‌های تکتونیک سطحی در منطقه فلات ایران، به خصوص در عبور از مرزهای تکتونیکی، بررسی دقیق‌تر ساختارهای گوشته بالایی و لیتوسفر به منظور درک بهتر تکامل تکتونیکی منطقه، حائز اهمیت می‌باشد. دگرشکلی‌های لیتوسفر و گوشته به طور قابل توجهی می‌توانند با اندازه‌گیری‌های ناهمسانگردی لرزه‌ای مورد بررسی قرار گیرند.

تا کنون مطالعات متعددی به منظور بررسی ناهمسانگردی لرزه‌ای در گوشته بالایی در سراسر و همچنین به طور موردی در بخش‌های مختلفی از فلات ایران انجام شده است. عمده این مطالعات با استفاده از تجزیه و تحلیل اشتقاق موج برشی SK(K)S انجام شده‌اند (سدیدخوی و همکاران، ۲۰۰۸؛ کاویانی و همکاران، ۲۰۰۹؛ صادقی-باقرآبادی و همکاران، ۲۰۱۸a,b؛ کاویانی و همکاران، ۲۰۲۱؛ آروین و همکاران، ۲۰۲۱؛ گآو و همکاران، ۲۰۲۲). این مطالعات الگوهای پیچیده‌ای را در پارامترهای اشتقاق اندازه‌گیری شده نشان دادند. الگوی ناهمسانگردی بدست آمده در مطالعات پیشین بیان می‌کند که ناهمسانگردی در بخش‌های شمالی و شمال‌غرب ایران، البرز، تالش، شمال شرق ایران دارای منشا آستنوسفری است درحالی که در زاگرس و بخش‌هایی از ایران مرکزی، دگرشکلی‌ها منشا لیتوسفری داشته و ناشی از زون‌های برشی و کوتاه شدگی‌های عمودی در منطقه است. صادقی-باقرآبادی و همکاران (۲۰۱۸a,b) و کاویانی و همکاران (۲۰۲۱) ناهمسانگردی مشاهده شده در بخش‌هایی از ایران مرکزی در مجاورت زاگرس را ناشی از جریانات کوچک مقیاس ایجاد شده به علت قرارگیری لیتوسفیر نازک ایران مرکزی در کنار لیتوسفر ضخیم زاگرس دانستند. مطالعه آروین و همکاران (۲۰۲۱) در منطقه شمال‌غرب ایران علاوه بر استفاده از فاز لرزه‌ای SK(K)S، ناهمسانگردی لرزه‌ای را با استفاده از امواج S مستقیم دور لرز نیز محاسبه کردند. آنها بیان کردند از آنجا که امواج SK(K)S منطقه نسبتاً باریکتری را به نسبت امواج S حول ایستگاه‌ها نمونه برداری می‌کند، بنابراین قادر به تشخیص تغییرات محتمل در ویژگی‌های ناهمسانگردی در بلوک‌های همسایه هستند، خصوصاً اگر این تغییرات در داخل لیتوسفر اتفاق افتاده باشد. بر این اساس، امواج SK(K)S، ناهمسانگردی قوی ناشی از زون‌های برشی در درون لیتوسفر در حاشیه ایران مرکزی را به خوبی مشاهده کرده‌اند، در حالی که آنها به طور محلی اثر میدان جریان آستنوسفر زیرین را غامض دانستند. اما امواج S همچنان حساس به الگوی بزرگ مقیاس جریان آستنوسفری باقی مانده است. تفاوت در راستای محورهای سریع بدست آمده از امواج SK(K)S و امواج S مستقیم در عبور از مرز تکنونیکی البرز و ایران مرکزی مشاهده شده و متاسفانه پروفیل‌های لرزه‌ای مورد بررسی در مطالعه آروین و همکاران (۲۰۲۱) به اندازه کافی طولانی نبودند که بتوان این چرخش در محورها را در طول ایران مرکزی دنبال کرد.

الگوهای پیچیده مشاهده شده از محورهای سریع بدست آمده توسط امواج SK(K)S در راستای پروفیل لرزه‌ای ایران-چین (صادقی-باقرآبادی، ۲۰۱۸a,b)، چرخش‌های مشاهده شده و اختلاف راستای سریع بدست آمده از دو فاز لرزه‌ای S و SK(K)S در عبور از البرز به ایران مرکزی (آروین و همکاران، ۲۰۲۱)، لزوم مطالعات بیشتر ناهمسانگردی در راستای این پروفیل را مسلم می‌کند.

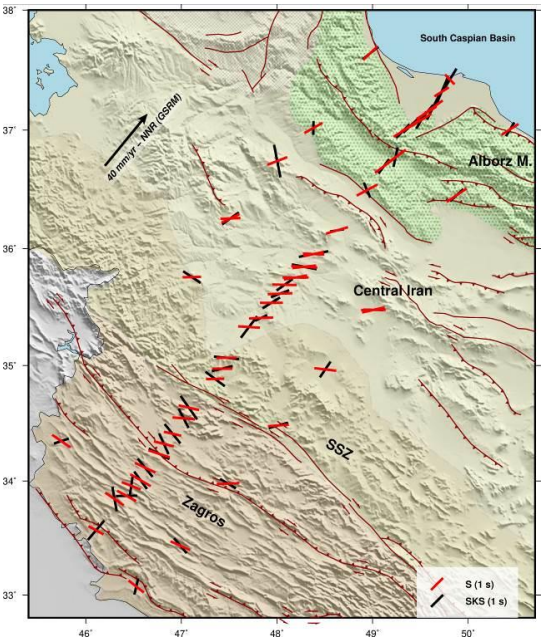
۲ روش تحقیق

در این پژوهش از داده‌های لرزه‌نگاری ۶۳ ایستگاه شبکه‌ی موقت ایران-چین در بازه زمانی ۲۰۱۳ الی ۲۰۱۴ استفاده شده است. این شبکه به شکل یک پروفیل سه خطی با راستای شمال شرقی- جنوب غربی آرایش یافته است. برای بررسی ناهمسانگردی لرزه‌ای با استفاده از فاز لرزه‌ای S مستقیم دورلرز به روش ایستگاه مرجع (ایکن و تیلمان، ۲۰۱۴) از شکل موج‌های مربوط به زلزله‌های دورلرز با بزرگای بالای ۵/۵ که در فاصله‌ی رومرکزی ۲۵ تا ۸۰ درجه‌ای از هر ایستگاه که

در بازه زمانی کارکرد هر ایستگاه رخ داده‌اند، استفاده شده است.
امواج لرزه‌ای S به دلیل نحوه تولید و مسیری که از چشمه تا ایستگاه طی می‌کنند در خطر آلودگی ناهمسانگردی در نواحی چشمه لرزه‌ای قرار دارند. برای از بین بردن این آلودگی از روش ایستگاه مرجع استفاده شده است. این تکنیک از امواج برشی مستقیم که در یک جفت ایستگاه ثبت شده‌اند بهره گرفته و بعد از تصحیح اعمال شده در ایستگاه مرجع به بیشینه همبستگی میان لرزه نگاشت در ایستگاه مرجع و هدف، برای شناخت ناهمسانگردی در اطراف چشمه لرزه‌ای، وابسته است و در نهایت در ایستگاه هدف پارامترهای ناهمسانگردی به کمک یک جستجوی شبکه‌ای بدست خواهد آمد.
در ابتدا بعد از حذف اثر دستگاهی از روی لرزه نگاشت‌ها، به بررسی کیفی آنها به صورت چشمی پرداخته شد و تمامی لرزه‌نگاشت‌هایی که از کیفیت پایین و نویز بالا برخوردار بودند حذف گردیدند. برای حداقل کردن اثر امواج کدا و فازهای منکسره یک پنجره به طول ۴۵ ثانیه، ۱۵ ثانیه قبل و ۳۰ ثانیه بعد از زمان رسید فاز لرزه‌ای S ، بر روی لرزهنگاشت ها به عنوان پنجره محاسباتی انتخاب شد. تمامی رخدادهایی که فاصله زمان رسیدی فاز S و SK(K)S کمتر از ۳۰ ثانیه بود حذف گردیدند. یک فیلتر میان‌گذر با بازه فرکانسی ۰/۲-۰/۰۳ بر روی لرزه‌نگاشت‌ها اعمال شد. سپس در مرحله بعد تمامی جفت ایستگاه‌هایی که فاصله میان آنها کمتر از ۳۰۰ کیلومتر بودند شناسایی شدند، با در نظر گرفتن این فاصله میان ایستگاهی می‌توان یقین داشت که اثر مسیر و چشمه برای یک رویداد خاص در هر دو ایستگاه برابر است. روش ایستگاه مرجع بر یک دانش قبلی مطمئن از مقدار ناهمسانگردی در ایستگاه مرجع استوار است، که این دانش قبلی از مطالعه صادقی-باقرآبادی (۲۰۱۸a) برداشت شده است. به علت طول بیش از ۳۰۰ کیلومتری پروفیل لرزه‌ای برای شروع ۳ ایستگاه از بخش شمالی پروفیل (البرز) و ۳ ایستگاه از بخش جنوبی پروفیل (زاگرس) به عنوان ایستگاه مرجع در نظر گرفته شده که بعد از تکرارهای بالاتر ایستگاه‌های دیگر بنابر شرایطی ویژه در روند محاسبات به عنوان ایستگاه مرجع وارد شدند.

۳ نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده برای پارامترهای ناهمسانگردی گوشته با استفاده از روش ایستگاه مرجع در شکل ۱ دیده می‌شود. محورهای سریع سه امتداد مجزا در سه منطقه تکتونیکی البرز (روند شمال‌شرق-جنوب‌غربی)، ایران مرکزی (شرقی-غربی) و زاگرس (شمال‌غرب-جنوب‌شرقی) نشان می‌دهند. نکته قابل توجه این است که چرخش‌های ناگهانی مشاهده شده در محورهای سریع بدست آمده از مطالعات پیشین SK(K)S در ایران مرکزی، منطقه سنندج-سیرجان و زاگرس در محورهای سریع بدست آمده از فاز لرزه‌ای S مستقیم دور لرز دیده نمی‌شود، بلکه تغییر روند محورهای سریع از با عبور از منطقه‌های تکتونیکی البرز، ایران مرکزی و زاگرس بسیار نرم رخ داده‌اند.
امتداد محورهای سریع بدست آمده در البرز با روند ناهمسانگردی مشاهده شده در مطالعات قبلی در این منطقه و همچنین با جهت حرکت مطلق صفحات (N39ºE) کاملاً همخوانی دارد. راستای سریع مشاهده شده در ایران مرکزی می‌تواند تحت تاثیر میدان‌های جریان کوچک مقیاس تشکیل شده در گوشته زیر لیتوسفر با تغییر ضخامت ناگهانی باشد. از آنجا که ضخامت لیتوسفیر در مناطق البرز و ایران مرکزی نازک است، و با توجه به این که امواج S مستقیم دورلرز نسبت به امواج SK(K)S زمان بیشتری را در آستنوسفر طی می‌کند می‌توان منشا ناهمسانگردی مشاهده شده از فازS را به راستای جریان آستنوسفری در زیر این مناطق نسبت داد. در مقابل در زاگرس، لیتوسفر بسیار ضخیم آن، همخوانی بردارهای ناهمسانگردی هر دو فاز لرزه‌ای SK(K)S و S و نیز همخوانی با روند کوهزاد که مبین همخوانی با روند برگوارگی ناشی از کوتاه شدگی در کوهزاد است، می‌توانند تاییدی بر منشا لیتوسفری برای ناهمسانگردی مشاهده شده باشند.



شکل ۱. پارامترهای ناهمسانگردی مشاهده شده در این پژوهش با استفاده از امواج S مستقیم دورلرز (بردارهای قرمز) در مقایسه با پارامترهای ناهمسانگردی مطالعه صادقی-باقرآبادی (۲۰۱۸a) با استفاده از امواج SK(K)S (بردارهای مشکی).

منابع

Arvin, S., Sobouti, F., Priestley, K., Ghods, A., Motaghi, K., Tilmann, F. and Eken, T., 2021. Seismic anisotropy and mantle deformation in NW Iran inferred from splitting measurements of SK (K) S and direct S phases. *Geophysical Journal International*, *226*(2), pp.1417-1431.

Eken, T. and Tilmann, F., 2014. The Use of Direct Shear Waves in Quantifying Seismic Anisotropy: Exploiting Regional Arrays. Bulletin of the Seismological Society of America, 104(6), pp.2644-2661.

Gao, Y., Chen, L., Talebian, M., Wu, Z., Wang, X., Lan, H., Ai, Y., Jiang, M., Hou, G., Khatib, M.M. and Xiao, W., 2022. Nature and structural heterogeneities of the lithosphere control the continental deformation in the northeastern and eastern Iranian plateau as revealed by shear-wave splitting observations. *Earth and Planetary Science Letters*, *578*, p.117284.

Kaviani, A., Hatzfeld, D., Paul, A., Tatar, M. and Priestley, K., 2009. Shear-wave splitting, lithospheric anisotropy, and mantle deformation beneath the Arabia-Eurasia collision zone in Iran. Earth and Planetary Science Letters, 286(3-4), pp.371-378.

Kaviani, A., Mahmoodabadi, M., Rümpker, G., Pilia, S., Tatar, M., Nilfouroushan, F., Yamini-Fard, F., Moradi, A. and Ali, M.Y., 2021. Mantle-flow diversion beneath the Iranian plateau induced by Zagros' lithospheric keel. *Scientific reports*, *11*(1), pp.1-12.

Motaghi, K., Shabanian, E. and Kalvandi, F., 2017. Underplating along the northern portion of the Zagros suture zone, Iran. Geophysical Journal International, 210(1), pp.375-389.

Paul, A., Hatzfeld, D., Kaviani, A., Tatar, M. and Péquegnat, C., 2010. Seismic imaging of the lithospheric structure of the Zagros mountain belt (Iran). Geological Society, London, Special Publications, 330(1), pp.5-18.

Sadeghi-Bagherabadi, A., Margheriti, L., Aoudia, A. and Sobouti, F., 2018b. Seismic anisotropy and its geodynamic implications in Iran, the easternmost part of the Tethyan Belt. Tectonics, 37(12), pp.4377-4395.

Sadeghi-Bagherabadi, A., Sobouti, F., Ghods, A., Motaghi, K., Talebian, M., Chen, L., Jiang, M., Ai, Y. and He, Y., 2018a. Upper mantle anisotropy and deformation beneath the major thrust-and-fold belts of Zagros and Alborz and the Iranian Plateau. Geophysical Journal International, 214(3), pp.1913-1918.

Sadidkhouy, A., Javan-Doloei, G. and Siahkoohi, H.R., 2008. Seismic anisotropy in the crust and upper mantle of the Central Alborz Region, Iran. *Tectonophysics*, 456(3-4), pp.194-205.