Archive of SID

بررسی ناهمسانگردی آزیموتی لرزه‌ای موج P در عرض زاگرس

فروغ کشوری[۱] و ظاهرحسین شمالی[۲*]

[۱] دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران
[۲] استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

keshvari@ut.ac.ir, shomali@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۴/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۶/۳۰)

چکیده

ناهمسانگردی آزیموتی لرزه‌ای با استفاده از باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی موج P مربوط به زمین‌لرزه‌های دورلرزه‌ای رسیده به ایستگاه‌های نیم‌رخی در عرض زاگرس (نیم‌رخ زاگرس) تا عمق ۴۶۰ کیلومتر مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، داده‌های موجود در آزیموت پشتی بین ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه با کم‌کردن ۱۸۰ درجه به بازه آزیموت پشتی بین ۰ تا ۱۸۰ درجه منتقل شدند. سپس، این داده‌ها برای هر ایستگاه برحسب آزیموت پشتی رسم شدند و منحنی چندجمله‌ای درجه چهار به آنها برازش شد. بیشینه و کمینه این منحنی‌ها به ترتیب، بیانگر جهت سرعت زیاد و کم پرتوهای رسیده به آن ایستگاه هستند. نتایج نشان می‌دهد که جهت سرعت سریع در زیر ایران مرکزی و کمان ماگمایی ارومیه–دختر در جهت شمال غرب–جنوب شرق قرار دارد. جهت‌های سریع در ایستگاه‌های زیر زاگرس و زون سنندج–سیرجان در راستای شمال شرق–جنوب غرب قرار دارند که عمود بر امتداد جهت‌های سریع تعیین‌شده برای بخش شمال شرقی نیم‌رخ است.

واژه‌های کلیدی: امواج درونی، جریان‌های همرفتی سست‌کره، ساختار گوشته بالایی، ناهمسانگردی آزیموتی

P-wave azimuthal seismic anisotropy across the Zagros

Forough Keshvari[1], and Zaher Hossein Shomali[1*]

[1] *Department of Earth physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*

(Received: 03 July 2010, accepted: 21 September 2010)

Summary

The Zagros Fold and Thrust Belt (ZFTB), a part of the Alpine-Himalayan mountain chain, is an orogenic response to the ongoing northward convergence of the Arabian plate towards the Iranian micro continent. This young and active deforming belt located in western and southwestern Iran is a remarkable place to study the processes occurring in convergence zones during early stages of continent collisions. From northeast to southwest, the tectonic units of the Zagros collision zone consist of 1) the Uromieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), 2) the Sanandaj-Sirjan Zone (SSZ), and 3) the ZFTB. Main Zagros Thrust (MZT), a suture between the Iranian and Arabian plates separates the ZFTB and SSZ units.

[*] Corresponding author: shomali@ut.ac.ir نگارنده رابط:

www.SID.ir

Archive of SID

Physical properties in an anisotropic media, in contrast to those in an isotropic media, depend on direction; that is, they vary as a function of orientation. Seismic anisotropy occurs when seismic waves propagate faster in one direction than another. The presence of seismic anisotropy in the upper mantle normally depends on the lattice-preferred orientation (LPO) of mineral crystals. Asthenospheric convection flow beneath continents and olivine mineral LPO are the main reasons for anisotropy in this part of mantle. Olivine crystals, as a dominant mineral in the upper mantle, tend to align with the mantle convection. Models obtained for Earth anisotropy show that anisotropy has an axis of cylindrical symmetry. Anisotropy with a horizontal axis of symmetry is called Horizontal Transverse Isotropy (HTI). In such a medium, there is no anisotropy in directions perpendicular to the symmetry axis.

In this paper, azimuthal anisotropy was studied in the upper mantle beneath a profile across the Zagros (Zagros profile) to a depth of 460 km using teleseismic P-wave relative residuals. Fifty-six teleseismic earthquakes were selected with epicentral distances between 30° and 90° and with magnitudes greater than 5.5. The data were corrected for the effect of crustal structure before inversion. Using P-residuals (residual spheres), attempts were first made to group 66 seismic stations along the Zagros profile, based on the directional dependence of the data. The stations were divided into seven groups, and rose diagrams were constructed for these data confirmed the result of residual spheres.

It is necessary to note that when two rays propagate in opposite directions along the same ray path, it is expected that they have similar relative travel times. Thus, subtracting 180° from back-azimuths between 180° and 360°, they are mapped in back-azimuths between 0° and 180° and conduced to data augmentation. The relative residuals obtained were plotted related to back-azimuths beneath each station and then a 4-degree polynomial curve was fit to the data from

$tt = P_0 + P_1\theta + P_2\,\theta^2 + P_3\,\theta^3 + P_4\,\theta^4$,

where tt is the arrival-time relative residuals (s), θ is the back-azimuth (degree), and P_0, P_1, P_2, P_3 and P_4 are the curve coefficients for the 4-degree polynomial curve. The fast velocity direction is analogous to the minimum of relative residuals in the curve and vice versa; the maximum of the relative residuals is correlated with the slow axis of anisotropy. The results indicate that the orogen-parallel fast velocity direction (NW-SE) in the upper mantle beneath Central Iran and the UDMA change to orogen-normal (NE-SW) beneath ZFTB and SSZ.

Key words: Asthenospheric flow, azimuthal anisotropy, body waves, upper mantle structure

۱ مقدمه

رشته‌کوه‌های زاگرس واقع در غرب و جنوب غربی ایران، نمونه‌ای ویژه از کمربندهای چین و گسل در دنیا است که در اثر برخورد قاره‌ای بین صفحه عربستان و اوراسیا به وجود آمده است. همگرایی این دو صفحه، با گذر از مراحل فرورانش پوسته اقیانوسی و فرارانش افیولیت‌ها به مرحله برخورد قاره‌ای رسیده است (آگارد و همکاران، ۲۰۰۵) که به نظر هاتزفلد و همکاران (۲۰۰۳) در مراحل اولیه برخورد قاره‌ای قرار دارد. واحدهای زمین‌ساختی زون برخوردی زاگرس از شمال شرق به جنوب غرب عبارت‌اند از: کمان ماگمایی ارومیه-دختر، زون سنندج-سیرجان و کمربند چین و گسل زاگرس که این واحدها از سمت شمال شرق به ایران مرکزی منتهی می‌شوند. بسیاری از محققان، گسل MZT را درحکم زون بخیه بین دو صفحه عربستان و ایران مرکزی در نظر گرفته‌اند که به عقیده آگارد و همکاران (۲۰۰۵) تا موهو ادامه دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

ناهمسانگردی در سرعت‌های لرزه‌ای در گوشته بالایی، عمدتا به خصوصیات ذاتی کانی‌های تشکیل‌دهنده آن بستگی دارد (بابوشکا و پلومروا، ۲۰۰۱). جهت‌یافتگی این کانی‌ها (مانند کانی اولیوین که کانی غالب گوشته بالایی است) و همچنین وجود برخی ناهمگنی‌ها مانند زبانه فرورانشی در گوشته بالایی سبب بروز تغییرات در سرعت موج لرزه‌ای در جهت‌های خاصی می‌شود. یکی از روش‌های بررسی ناهمسانگردی، وابستگی آزیموتی یا رسم باقی‌مانده‌های زمان‌رسیدهای نسبی به صورت دایره‌های باقی‌مانده‌ها (residual sphere) در هر ایستگاه لرزه‌ای است که به بررسی ناهمسانگردی امواج حجمی کمک شایانی می‌کند (بابوشکا و پلومروا، ۱۹۹۲). این مطلب در بابوشکا و پلومروا (۱۹۹۲) به تفصیل بیان شده است. بررسی ناهمسانگردی در ایران به روش شکاف امواج SKS را کاویانی و همکاران (۲۰۰۹) به‌انجام رسانده‌اند که بخشی از نتایج حاصل از آن به وجود همسانگردی ظاهری در زاگرس و زون سنندج-سیرجان و محور سریع ناهمسانگردی با جهت شمال غربی-جنوب شرقی در ایران مرکزی و کمان ماگمایی ارومیه-دختر اشاره می‌کند.

به‌طورکلی، جریان‌های همرفتی سست‌کره در زیر قاره‌ها و خط‌شدگی کانی‌های اولیوین در راستای این جریان‌ها دلیل وجود ناهمسانگردی در این بخش است و سرعت در امتداد این جریان‌ها بیشترین مقدار را دارد. این ناهمسانگردی روی داده‌های زمان‌سیر پرتوهای دورلرزه‌ای که با زاویه تقریبا عمودی وارد منطقه مورد بررسی می‌شوند، تاثیر کمی دارد. بنابراین، وجود وابستگی آزیموتی این داده‌ها بیانگر وجود ناهمسانگردی در بخش سنگ‌سپهر است (پلومروا و همکاران، ۲۰۰۲). مدل‌های به دست‌آمده برای ناهمسانگردی زمین نشان می‌دهند که ناهمسانگردی اغلب، دارای تقارن استوانه‌ای است. ناهمسانگردی با محور افقی، همسانگردی عرضی افقی (HTI) یا ناهمسانگردی آزیموتی نام دارد. در چنین محیطی، در جهت عمود بر محور تقارن، همسانگردی وجود دارد. هدف از این تحقیق، بررسی رابطه بین باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی و آزیموت پشتی (back-azimuth) در ایستگاه‌های متفاوت با استفاده از برازش منحنی است. این مسئله امکان وجود ناهمسانگردی آزیموتی را در زیر ایستگاه‌ها مورد تحقیق قرار می‌دهد. این پژوهش جهت محورهای سرعت زیاد و کم را در منطقه مشخص می‌کند. برای بررسی این ناهمسانگردی، از باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی موج P که در امتداد نیم‌رخی از بوشهر تا شمال شرق شهر یزد ثبت شده است، استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که تصحیح پوسته روی این داده‌ها صورت گرفته است.

۲ داده‌ها و روش

در این تحقیق از داده‌های زمان‌رسید نسبی موج P مربوط به ۵۵ زمین‌لرزه دورلرزه‌ای که با آزیموت‌های متفاوت به ایستگاه‌های لرزه‌ای نیم‌رخ بوشهر-پشت‌بادام رسیده‌اند، استفاده شده است. این داده‌ها از نوامبر ۲۰۰۰ تا آوریل ۲۰۰۱ ازسوی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله از ایران و دانشگاه ژوزف فوریه از فرانسه در امتداد این نیم‌رخ برداشت شدند (برای اطلاعات بیشتر به پال و همکاران (۲۰۰۶) و کاویانی و همکاران (۲۰۰۷) مراجعه شود). زمین‌لرزه‌های انتخاب‌شده، بزرگی بیش از ۵/۵، فاصله رومرکزی بین ۳۰ تا ۹۰ درجه دارند و زاویه ورود موج P به ایستگاه‌های گوناگون بین ۱۸ و ۳۹ درجه نسبت به محور قائم تغییر می‌کند. رومرکز این زمین‌لرزه‌ها و مسیر دایره بزرگ آنها در شکل ۱ نشان داده شده است. رنگ دایره‌ها، مقدار میانگین باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی را برای هر زمین‌لرزه نشان می‌دهد. روش محاسبه باقی‌مانده زمان‌رسیدهای نسبی نیز، در کشوری و همکاران (۱۳۸۸) به طور کامل بیان شده است. محاسبه این

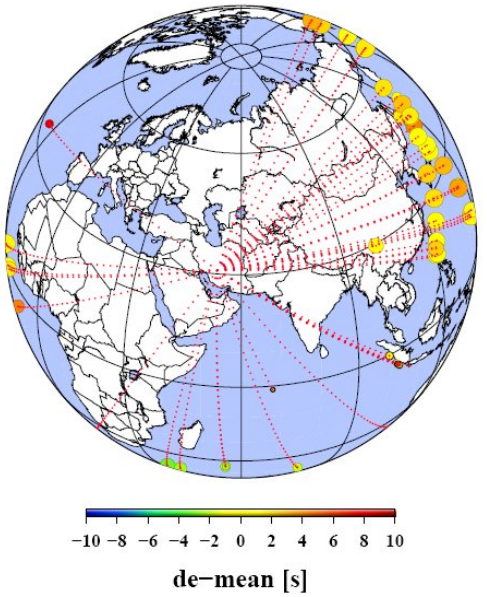
www.SID.ir

Archive of SID

باقی‌مانده‌ها، تاثیر چشمه و مسیر پرتو در گوشته پایینی را بر داده‌های زمان‌رسید کمینه می‌کند. بزرگی دایره‌ها نیز، میزان کاهش واریانس برای هر زمین‌لرزه را نشان می‌دهد که بیانگر میزان برآورد داده‌ها در حین وارون‌سازی است. همچنین، تاثیر بی‌هنجاری‌های پوسته روی داده‌های زمان‌رسید موج P با استفاده از مدل پوسته جهانی CRUST2.0 (باسین و همکاران، ۲۰۰۰؛ لسکه و همکاران، ۲۰۰۱) کمینه شده است. به کمک این داده‌ها، ناهمسانگردی آزیموتی گوشته بالایی در زیر نیم‌رخ زاگرس برای ۶۵ ایستگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور، پرتوهای رسیده به هر ایستگاه از سایر پرتوها جدا می‌شود. سپس، باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی هر ایستگاه برحسب آزیموت پشتی رسم و منحنی چندجمله‌ای به داده‌ها برازش می‌شود. این منحنی‌ها می‌توانند اطلاعات مهمی در مورد جهت‌های سرعت زیاد و کم در زیر هر ایستگاه را به‌دست دهند. درواقع، بیشینه این منحنی‌ها که با مقادیر مثبت باقی‌مانده‌های زمان‌رسید متناظر است، جهت سرعت کم و کمینه منحنی‌ها، جهت سرعت زیاد را نشان می‌دهد (کول و همکاران، ۲۰۰۲).

۳ نتایج

برای به‌دست آوردن دید کلی از ساختار سرعت به‌دست آمده برای موج P (شمالی، مکاتبات شخصی) در منطقه ابتدا، تصویر باقی‌مانده‌های زمان‌رسید در هر ایستگاه با توجه به آزیموت پشتی و زاویه تابش پرتوها نسبت به محور قائم در دایره باقی‌مانده‌ها (بابوشکا و پلومروا، ۲۰۰۱) و رزدیاگرام آنها در شکل‌های ۲-الف و ب رسم شده است. رسم این دایره‌ها کمک می‌کند تا ایستگاه‌هایی که از الگوی ناهمسانگردی مشابهی پیروی می‌کنند، مشخص شوند. چون باقی‌مانده‌های زمان‌رسید دورلرزه‌ای عمدتا برای بررسی ساختار سرعت ناشی از ناهمگنی‌ها به کار می‌رود، شناخت الگوی ناهمسانگردی منطقه می‌تواند به تفسیر نتایج حاصل از توموگرافی کمک شایانی کند. باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی در شکل ۲-الف به صورت لوزی نشان داده شده‌اند. لوزی‌های آبی‌رنگ نشان می‌دهند که باقی‌مانده زمان‌رسیدها منفی‌اند؛ یعنی، امواج لرزه‌ای مشاهده‌ای سریع‌تر از امواج نظری (در مدل زمینه IASP91) به ایستگاه‌ها رسیده‌اند (مناطق با سرعت نسبی بالا). برعکس، لوزی‌های سرخ‌رنگ بیانگر باقی‌مانده‌های زمان‌رسید مثبت و مربوط به امواج لرزه‌ای هستند که دیرتر از امواج نظری به ایستگاه‌ها می‌رسند (مناطق با سرعت نسبی کم). بزرگی این علائم برابر با مقدار باقی‌مانده‌های زمان‌رسید و فاصله آنها نشان‌دهنده زاویه تابش پرتوها است. باقی‌مانده‌های زمان‌رسید بین ۰/۳± ثانیه با علامت + نشان داده شده است. در شکل ۲-الف، ایستگاه‌هایی که الگوی باقی‌مانده‌های زمان‌رسید مشابهی برحسب آزیموت پشتی پرتوها دارند با یک رنگ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱. رومرکز زمین‌لرزه‌های استفاده‌شده در این تحقیق. مسیر دایره بزرگ این زمین‌لرزه‌های توسط خطوط نقطه‌چین به رنگ سرخ نشان داده شده است. رنگ دایره‌های رومرکز زمین‌لرزه‌ها، میانگین باقی‌مانده‌های نسبی مربوط به هر زمین‌لرزه برای داده‌های واقعی P و بزرگی دایره‌ها، میزان کاهش واریانس را برای هر زمین‌لرزه را نشان می‌دهد.

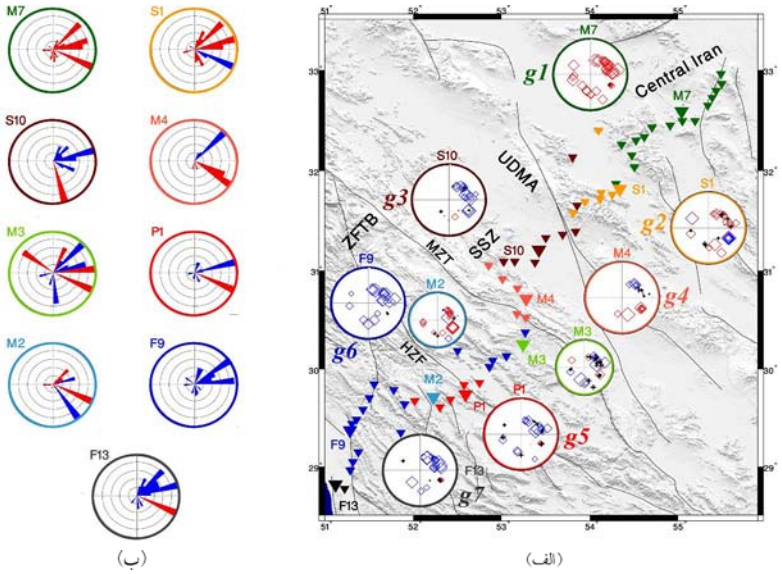
www.SID.ir

Archive of SID

دایره باقی‌مانده‌های مربوط به یکی از ایستگاه‌های هریک از این گروه‌ها (که با مثلثی بزرگ‌تر نسبت به بقیه نشان داده شده است) با رنگ مشابه با آن گروه به نمایش درآمده است. گروه‌های آبی و سبز به‌ترتیب در جنوب غرب و شمال شرق نیم‌رخ، همسانگردی ظاهری نشان می‌دهند. یعنی، برای مثال زمان‌رسیدهای رسیده از همه آزیموت‌های پشتی در گروه آبی (گروه g6) مثبت است. برای گروه سبزرنگ (گروه g1 در زیر ایران مرکزی) نیز، همه باقی‌مانده زمان‌رسیدها منفی هستند. سایر گروه‌ها (از گسل زاگرس مرتفع به سمت شمال شرق تا زیر کمان ماگمایی ارومیه-دختر) ترکیبی از باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی مثبت و منفی را به‌دست می‌دهند. برای مثال، در گروه g4 (شکل ۲-الف)، باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی رسیده از سمت شمال شرقی سریع‌تر و پرتوهای رسیده از سمت جنوب شرقی، دیرتر از پرتوهای نظری می‌رسند. باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی برای ایستگاه‌های نماینده هر گروه به صورت رزدیاگرام در شکل ۲-ب نشان داده شده است. رزدیاگرام‌ها به‌خوبی نشان می‌دهند که پرتوهای رسیده از زمین‌لرزه‌های بخش جنوب غربی به مراتب کمتر از سایر بخش‌ها است.

با چنین دیدگاهی در مورد الگوهای متفاوت باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی، شکل ۳، تصویر منحنی‌های چندجمله‌ای برازش‌شده را برای نه ایستگاه معرفی‌شده در شکل ۲-الف نشان می‌دهد. در واقع، این ضرایب مربوط به منحنی‌های چندجمله‌ای است که به صورت کلی زیر نشان داده می‌شوند:

$$tt = P_0 + P_1\theta + P_2\theta^2 + P_3\,\theta^3 + P_4\,\theta^4, \qquad (۱)$$



شکل ۲. (الف) دایره باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی با توجه آزیموت پشتی و زاویه تابش نسبت به محور قائم برای تعدادی از ایستگاه‌ها. مثلث‌های وارونه، محل ایستگاه‌های لرزه‌ای نیم‌رخ زاگرس را نشان می‌دهند. اسامی ایستگاه‌هایی که الگوی مشابهی را مشخص می‌سازند (با نمادهای $g1$ تا $g7$ نشان داده شده‌اند) با یک رنگ نشان داده شده است و یک دایره باقی‌مانده‌ها درحکم نماینده هر گروه رسم شده است. لوزی‌های آبی و سرخ‌رنگ به ترتیب، باقی‌مانده‌های زمان‌رسید منفی و مثبت را نشان می‌دهند. علامت + مربوط به باقی‌مانده‌های بین ۰/۳± ثانیه هستند. دو ایستگاه M2 و M3، الگویی متفاوت از سایر ایستگاه‌ها را نشان می‌دهند، (ب) رزدیاگرام ایستگاه‌های نشان‌داده‌شده در شکل ۲-الف. خط‌های آبی و سرخ‌رنگ به ترتیب، مربوط به باقی‌مانده‌های زمان‌رسید منفی و مثبت هستند.

www.SID.ir

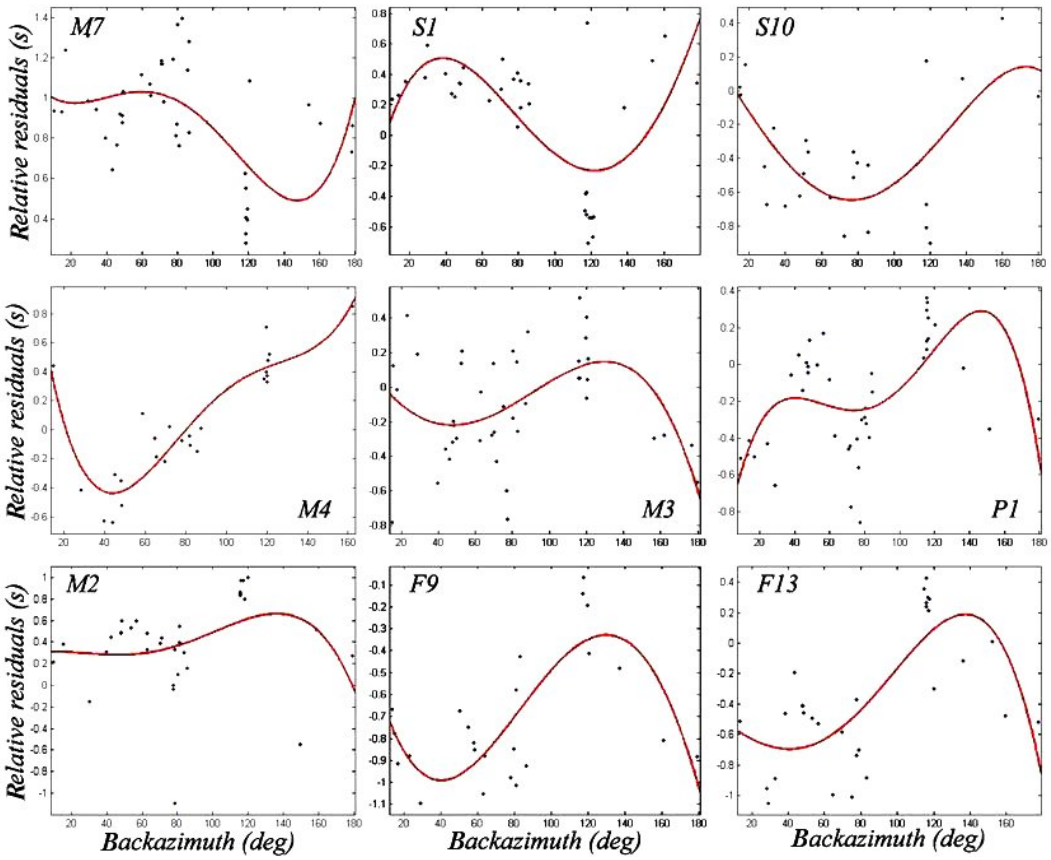
Archive of SID

که tt باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی (بر حسب ثانیه) و θ آزیموت پشتی (بر حسب درجه) را نشان می‌دهد. در این تحقیق از چندجمله‌ای‌های درجه چهار استفاده شده است که نسبت به سایر چندجمله‌ای‌ها دارای R^2 بیشتری (که در آمار، ضریب تعیین (determination) نام دارد) بود. چندجمله‌ای‌های درجه‌چهار با فرمول به دست‌آمده ژیوونسکی و اندرسون (۱۹۸۳) برای ارتباط بین باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی و آزیموت پشتی در زیر ایستگاه‌ها، همخوانی خوبی دارد. درجات بالای چندجمله‌ای‌ها با اینکه ضریب تعیین بالاتری دارند، به منحنی به دست‌آمده از این رابطه شباهت ندارند. ضرایب P (از P_0 تا P_4) برای هر ایستگاه در جدول ۱ به نمایش در آمده است. منحنی‌های رسم شده در شکل ۳، وابستگی آزیموتی پرتوهای رسیده به ایستگاه‌ها را نشان می‌دهند. نکته قابلِ‌توجه در شکل ۳ این است که زاویه آزیموت پشتی بین ۰ تا ۱۸۰ درجه در نظر گرفته شده است. چون تعداد داده‌ها در بخش غربی دایره‌های زمان‌رسید (شکل ۲-ب) کمتر از بخش شرقی است، داده‌های بین زوایه‌های آزیموت پشتی ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه با کم‌کردن ۱۸۰ درجه به محدوده زاویه‌ای ۰ تا ۱۸۰ درجه منتقل شدند. چون، به دلیل ناهمسانگردی آزیموتی انتظار می‌رود که پرتوهایی که در مسیر ربع‌های دایره‌ای مخالف حرکت می‌کنند، زمان‌سیرهای مشابه داشته باشند (کول و همکاران، ۲۰۰۲). یعنی، پرتوهایی که در امتداد ربع چهارم (بین آزیموت‌های پشتی ۲۷۰ و ۳۶۰ درجه) حرکت می‌کنند، باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی مشابه با پرتوهایی که در امتداد ربع دوم (بین آزیموت‌های پشتی ۹۰ و ۱۸۰ درجه) منتشر می‌شوند، داشته باشد. جهت سرعت زیاد و مقدار آن (اختلاف بین بیشینه و کمینه منحنی) در نمودارهای شکل ۳ که متناظر با مقادیر کمینه باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی است، در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. این نتایج، امکان وجود ناهمسانگردی آزیموتی در گوشته بالایی در زیر ایستگاه‌های نیم‌رخ را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ایستگاه‌های M7 و S1 (نماینده گروه‌های g1 و g2، شکل ۲-الف) الگوی ناهمسانگردی مشابهی را نشان می‌دهند. جهت‌های سریع موج P در سایر گروه‌ها نیز، مانند یکدیگر است. به‌عبارت‌دیگر، از نظر ناهمسانگردی آزیموتی، منطقه مورد بررسی به دو بخش شمال شرقی و جنوب غربی تقسیم می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، جهت سرعت زیاد برای گروه‌های g1 و g2، در جهت شمال غرب-جنوب شرق و برای سایر گروه‌ها، در جهت شمال شرق-جنوب غرب است. نکته جالب توجه این است که علی‌رغم این مسئله که در گروه‌های g1 و g6 به ترتیب، فقط باقی‌مانده‌های زمان رسید مثبت و منفی وجود داشت که حاکی از وجود همسانگردی ظاهری است (شکل ۲-الف)، ناهمسانگردی آزیموتی مشخصی در زیر ایستگاه‌های مربوطه مشاهده می‌شود (شکل ۴). متاسفانه، پوشش آزیموتی پرتوهای رسیده به ایستگاه‌های گروه g4 کافی نیست؛ با وجود این، به نظر می‌رسد که جهت سرعت زیاد در این گروه به صورت شمال شرق-جنوب غرب باشد. تک‌ایستگاه‌های M2 و M3 که الگوی مشابهی از نظر باقی‌مانده‌های زمان‌رسید با ایستگاه‌های مجاور خود نداشتند (شکل ۲-الف)، جهت سرعت زیاد مشابه با این ایستگاه‌های مجاور را نشان می‌دهند. جهت سرعت زیاد در امتداد پروفیل در ایستگاه‌های گروه g3 تغییر می‌کند. به طوری‌که در چند ایستگاه شمالی این گروه، جهت سرعت زیاد مانند گروه‌های g1 و g2 (بخش شمالی نیم‌رخ)،روند شمال غرب-جنوب شرق دارد؛ ولی، برای بقیه ایستگاه‌های این گروه (شامل S10)، جهت‌های سریع شمال شرق-جنوب غرب به دست آمده است (شکل ۴).

جهت سرعت‌های بالا که در زیر ایستگاه‌های ایران مرکزی و کمان ماگمایی ارومیه-دختر در جهت شمال غرب-جنوب شرق مشاهده شده است، با تحقیقات

www.SID.ir

Archive of SID



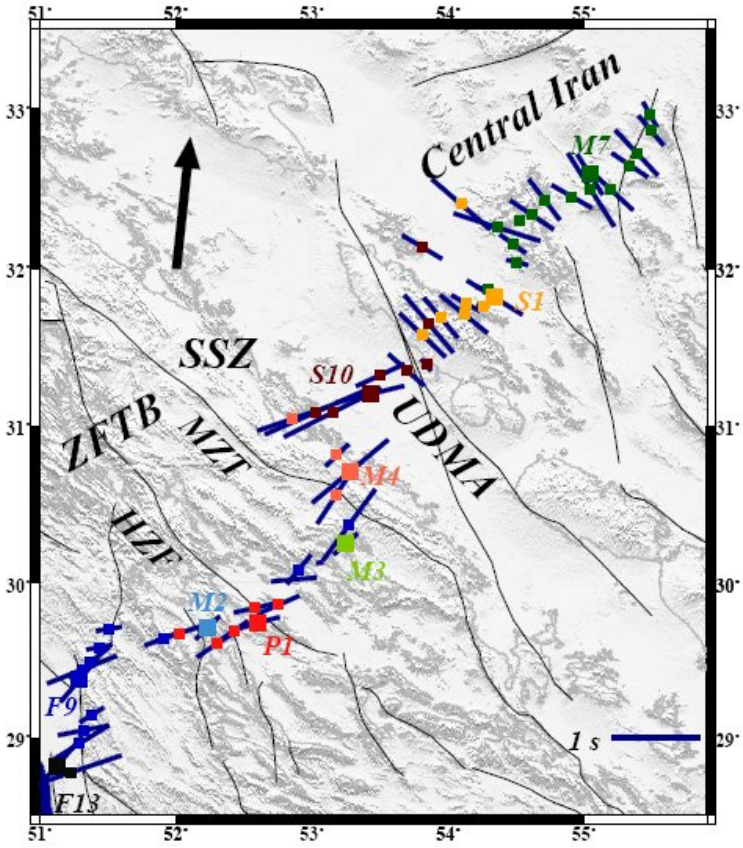
شکل ۳. منحنی‌های برازش‌شده به باقی‌مانده‌های زمان‌رسید نسبی برحسب آزیموت پشتی.

جدول ۱. ضرایب منحنی چندجمله‌ای برازش‌شده به برخی از ایستگاه‌های نیم‌رخ زاگرس و جهت محور سرعت بالا.

نام ایستگاه	P0	P1	P2	P3	P4	Fast axis (deg)	R^2
M7	$۱/۴\ ۱۰^{-۸}$	$۴/۵\ ۱۰^{-۶}$	−۰/۰۰۰۴	۰/۰۱	۰/۲	۱۴۸	۰/۳
S1	$-۸/۵\ ۱۰^{-۹}$	$۵/۳\ ۱۰^{-۶}$	−۰/۰۰۰۹	۰/۰۵	۰/۴	۱۲۲	۰/۵
S10	$-۸/۱\ ۱۰^{-۹}$	$۲/۳\ ۱۰^{-۶}$	$-۶/۳\ ۱۰^{-۵}$	−۰/۰۲	۰/۶	۶۵	۰/۴
M3	$-۳/۷\ ۱۰^{-۹}$	$-۱/۲\ ۱۰^{-۹}$	۰/۰۰۰۲	−۰/۰۲	۰/۳	۴۸	۰/۳
M2	$۹/۸\ ۱۰^{-۹}$	$۲/۵\ ۱۰^{-۶}$	۰/۰۰۰۲	−۰/۰۰۳	−۰/۰۹	۴۶	۰/۱
P1	$-۳\ ۱۰^{-۸}$	$۱\ ۱۰^{-۵}$	۰/۰۰۱	−۰/۰۵	−۰/۸	۷۴	۰/۳
F9	$۳/۴\ ۱۰^{-۹}$	$-۲/۹\ ۱۰^{-۶}$	۰/۰۰۰۶	−۰/۰۳	−۰/۳۳	۴۰	۰/۶
F13	$-۱/۲\ ۱۰^{-۸}$	$۲/۴\ ۱۰^{-۶}$	$-۸/۸\ ۱۰^{-۶}$	۰/۰۰۸	−۰/۱	۴۱	۰/۶

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴. جهت سرعت زیاد و مقدار ناهمسانگردی برای ایستگاه‌های نیم‌رخ زاگرس. مقدار این ناهمسانگردی با محاسبه اختلاف بین بیشینه و کمینه منحنی برحسب ثانیه محاسبه شده است. پیکان سیاه‌رنگ (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴) جهت حرکت صفحه عربستان نسبت به اوراسیا را نشان می‌دهد.

ناهمسانگردی SKS برای ایران مرکزی (کاویانی و همکاران، ۲۰۰۹) که مربوط به ایستگاه‌های همین نیم‌رخ است، همخوانی خوبی دارد. با توجه به اینکه جهت به دست آمده در ایران مرکزی با حرکت مطلق صفحات زمین‌ساختی همخوانی ندارد، کاویانی و همکاران (۲۰۰۹) نتیجه گرفتند که احتمالا این ناهمسانگردی مشاهده‌شده، منشا سنگ‌سپهری دارد. جهت‌های سرعت زیاد در زیر ایستگاه‌های زون سنندج-سیرجان و کمربند چین و گسل زاگرس با همسانگردی ظاهری به‌دست آمده در این مناطق در تحقیق پیش‌گفته متفاوت است. این جهت‌ها با حرکت مطلق صفحات زمین‌ساختی در چارچوب بدون چرخش خالص (no-net rotation frame) و تحقیقات ناهمسانگردی در غرب آناتولی (ساندوول و همکاران، ۲۰۰۳) همخوانی دارد. همچنین، با جهت حرکت نسبی صفحه عربستان نسبت به اوراسیا که ورنانت و همکاران (۲۰۰۴) تعیین کرده‌اند، تقریبا همخوانی دارد؛ ولی، با جهت‌های سریع شمالی-جنوبی تعیین‌شده برای صفحه عربستان (هانسن و همکاران، ۲۰۰۶) مغایر است. در این حالت مطابق با شکل ۴ می‌توان منطقه مورد بررسی را به صورت دو منطقه متفاوت از نظر ناهمسانگردی در نظر گرفت که به نظر می‌آید با مرز بین سنندج-سیرجان و کمان ماگمایی ارومیه-دختر از هم جدا می‌شوند. این ناهمسانگردی‌ها به احتمال زیاد به صورت فسیل در سنگ‌سپهر وجود دارند. لازم به ذکر است که در بررسی

www.SID.ir

Archive of SID

ناهمسانگردی به روش شکاف امواج SKS، چون پرتوها به صورت قائم حرکت می‌کنند، نمی‌توان ناهمسانگردی تعیین‌شده را به بخش خاصی از پرتو نسبت داد. در واقع، این ناهمسانگردی ممکن است به گوشته بالایی متعلق باشد یا مربوط به وجود ناهمسانگردی در مرز گوشته و هسته (CMB) بیرونی باشد. در بررسی‌های ناهمسانگردی آزیموتی، چون از داده‌های زمان‌رسید نسبی در منطقه مورد بررسی استفاده می‌شود، می‌توان اظهار داشت که به احتمال زیاد ناهمسانگردی به دست‌آمده ناشی از گوشته بالایی است.

۴ نتیجه‌گیری

ناهمسانگردی آزیموتی در نیم‌رخی در عرض زاگرس از بوشهر تا شمال شرق شهر یزد با استفاده از داده‌های زمان‌رسید نسبی امواج P دورلرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به دست‌آمده را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

-وجود ناهمسانگردی آزیموتی در جهت شمال غرب-جنوب شرق در زیر ایستگاه‌های ایران مرکزی و کمان ماگمایی ارومیه-دختر که در زون سنندج-سیرجان، به طور ناگهانی در مرز SSZ و UDMA به جهت شمال شرق-جنوب غرب تغییر می‌کند. این تغییر در زیر زاگرس نیز، ادامه می‌یابد.

-همخوانی نتایج به دست‌آمده در شمال شرق نیم‌رخ با تحقیقات ناهمسانگردی امواج SKS (کاویانی و همکاران، ۲۰۰۹) در این منطقه.

-وجود ناهمسانگردی آزیموتی در ایستگاه‌های زیر SSZ و ZFTB بر خلاف تحقیق کاویانی و همکاران (۲۰۰۹). در تحقیق پیش‌گفته، ناهمسانگردی در این منطقه صفر برآورد شده بود.

-همخوانی ناهمسانگردی آزیموتی SSZ و ZFTB با تحقیقات صورت گرفته در غرب آناتولی و همچنین با حرکت نسبی صفحه عربستان نسبت به اوراسیا.

منابع

کشوری، ف.، شمالی، ظ. ح.، و میرزائی، ن.، ۱۳۸۸، بررسی تاثیر بی‌هنجاری‌های عمیق بر ساختار گوشته بالایی در توموگرافی زمان‌رسید امواج درونی به روش ACH، مجله ژئوفیزیک ایران، **۳**، (۱)، ۵۹-۷۳.

Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., and Mouthereau, F., 2005, Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation: Int. J. Earth Sci., **94**, 401-419.

Babuška, V., and Plomerová, J., 1992, The lithosphere in central Europe-seismological and petrological aspects: Tectonophysics, **207**, 141-163.

Babuška, V., and Plomerová, J., 2001, Subcrustal lithosphere around the Saxothuringian - Moldanubian Suture Zone-a model derived from anisotropy of seismic wave velocities: Tectonophysics, **332**, 185-199.

Bassin, C., Laske, G., and Masters, G., 2000, The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America: EOS Transactions American Geophysical Union, **81**, F897.

Cole, P. B., Minshull, T. A., and Whitmarsh, R. B., 2002, Azimuthal seismic anisotropy in a zone of exhumed continental mantle, West Iberia margin: Geophys. J. Int., **151**, 517-533.

Dziewonski, A. M., and Anderson, D. L., 1983, Travel times and station corrections for P waves at teleseismic distances: J. Geophys. Res., **88**, 3295-3314.

Hansen, H., Schwartz, S., Al-Amri, A., and Rodgers, A., 2006, Combined plate motion and density-driven flow in the asthenosphere beneath Saudi Arabia: evidence from shear-wave splitting and seismic anisotropy: Geology, **34**, 869-872.

Hatzfeld, D., Tatar, M., Priestley, K., and Ghafory-Ashtiany, M., 2003, Seismological constraints on the crustal structure beneath the Zagros Mountain belt (Iran): Geophys. J. Int., **155**,403-410.

www.SID.ir

Archive of SID

Paul, A., Kaviani, A., Hatzfeld, D., Vergne, J., and Mokhtari, M., 2006, Seismological evidence for crustal-scale thrusting in the Zagros mountain belt (Iran): Geophys. J. Int., **166**, 227-237.

Plomerová, J., Babuška, V., Vecsey, L., Kouba, D., and TOR Working Group, 2002, Seismic anisotropy of the lithosphere around the Trans-European Suture Zone (TESZ) based on teleseismic body-wave data of the TOR experiment: Tectonophysics, **360**, 89-114.

Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., and Chéry, J., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman: Geophys. J. Int., **157**, 381-398.

Sandvol, E., Turkelli, N., Zor, E., Gok, R., Bekler, T., Gurbuz, C., Seber, D., and Barazangi, M., 2003, Shear wave splitting in a young continent-continent collision: an example from Eastern Turkey: Geophys. Res. Lett., **30,** (24), 8041-8044.

Kaviani, A., Paul, A., Bourova, E., Hatzfeld, D., Pedersen, H., and Mokhtari, M., 2007, A strong seismic velocity contrast in the shallow mantle across the Zagros collision zone (Iran): Geophys. J. Int., **171**, 399-410.

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**, 371-378.

Laske, G., Masters, G., and Reif, C, 2001, A global crustal model at 2x2 degrees: http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/rem.html.

www.SID.ir