

تأثیر نسبت دامنه‌ی S/P در برآورد سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌های کوچک

پروانه صادق نوجه‌ده^۱، خسرو مقتصدآذر^۲

^۱ کارشناس ارشد ژئودزی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، sadegh.p92@ms.tabrizu.ac.ir
^۲ استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، moghtased@tabrizu.ac.ir

چکیده

سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها گویای اطلاعاتی از هندسه و بردار لغزش صفحه گسل و توزیع تنش در منطقه می‌باشد، که برای مطالعات ژئودینامیک، لرزه‌زمین‌ساخت و تحلیل خطر منطقه کاربرد دارد. در این پژوهش، برای بررسی اینکه آیا داده‌ی نسبت دامنه امواج S/P، سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های کوچک را بهبود می‌بخشد، زمین‌لرزه‌ای بزرگ انتخاب شده است تا برآورد سازوکار کانونی آن به روش وارون‌سازی تانسور ممان ممکن باشد. نتیجه‌ی حاصل برای زمین‌لرزه‌ی بزرگ قابل‌تعمیم به زمین‌لرزه‌های کوچک می‌باشد. سازوکار کانونی اولین رویداد اصلی زمین‌لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان به سه روش، وارون‌سازی تانسور ممان، پلاریتی موج P و نسبت دامنه S/P با پلاریتی موج P محاسبه شده است. عدم قطعیت حل تانسور ممان گویای قابل‌اعتماد بودن حل می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که سازوکار کانونی روش نسبت دامنه امواج S/P با پلاریتی موج P و وارون‌سازی تانسور ممان نسبتاً مشابه می‌باشند. واژه‌های کلیدی: سازوکار کانونی، زمین‌لرزه‌های کوچک، پلاریتی اولین رسید موج P، نسبت دامنه‌ی امواج S/P، وارون‌سازی تانسور ممان، زمین‌لرزه‌ی اهر-ورزقان

Effect of S/P Amplitude Ratios on Estimating Focal mechanisms of Small Earthquakes

Parvaneh Sadegh Nojehdeh¹, Khosro Moghtased-Azar²

¹ Master of Geodesy, Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran ² Assistant Professor, Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The focal mechanisms of earthquakes describe the fault plane orientation, slip vector and stress distribution in the region which can be exploited for studying geodynamic, seismotectonic, and seismic hazard analysis. In this study, to test whether S/P-wave amplitude ratio can improve the focal mechanisms of small earthquakes, a large earthquake has been selected so it can be possible to compute the focal mechanism using moment tensor inversion. The result for a large earthquake can be extended to small earthquakes. The focal mechanism of the first main event of the Varzaghan-Ahar earthquake occurred on 11 August 2012 has been calculated using three methods including, moment tensor inversion, P-wave polarity and S/P amplitude ratio with P-wave polarity. The uncertainty of the moment tensor solution demonstrates that the solution is reliable. The results demonstrate that two solutions including the S/P amplitude ratio with P-wave polarity and moment tensor inversion have rather same outcomes.

Keywords: Focal mechanism, Small Earthquakes, P-wave First Motion Polarity, S/P-wave amplitude ratio, Moment Tensor Inversion, Varzaghan-Ahar Earthquake

۱ مقدمه

سازوکار کانونی زمین‌لرزه گویای تغییرشکل در منطقه ناشی از انتشار امواج لرزه‌ای می‌باشد. یکی از مهمترین اطلاعات برای مطالعه چشمه‌ی زمین‌لرزه‌ها، شکل موج ثبت شده در ایستگاه‌های لرزه‌ای است، که مشاهداتی نظیر پلاریتی اولین رسید موج P، دامنه امواج P و S را می‌توان استخراج کرد. همچنین می‌توان همه یا بخشی از شکل موج را برای مدلسازی مورد استفاده قرار داد. برای برآورد سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها، علاوه بر شکل موج زمین‌لرزه‌ها، نیازمند آگاهی از موقعیت کانون، زمان وقوع

زمین‌لرزه و مدل سرعت منطقه می‌باشیم. سازوکار کانونی از حل مسئله معکوس نتیجه می‌شود، که برای این منظور می‌توان از روش‌های وارون‌سازی یا مدلسازی مستقیم استفاده کرد.

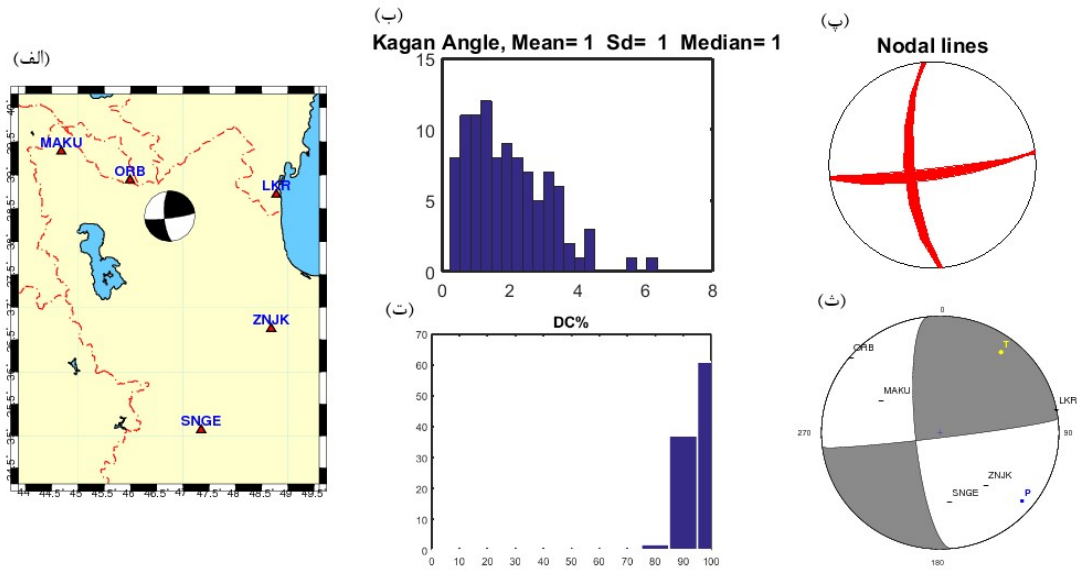
سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های بزرگ ($M_w > 3$) معمولاً از روش وارون‌سازی تانسور ممان تعیین می‌گردد. بیشتر زمین‌لرزه‌ها که با دستگاه‌های محلی و ناحیه‌ای ثبت می‌شوند، کوچک بوده ($M_w < 3$) و به‌آسانی قابل مطالعه با روش وارون‌سازی تانسور ممان نمی‌باشند. از طرفی زمین‌لرزه‌های کوچک به دلیل وقوع مکرر آن‌ها برای مطالعه زمین‌ساخت منطقه و تعیین توزیع تنش استفاده می‌شوند. برای این زمین‌لرزه‌ها می‌توان روش‌هایی نظیر پلاریتی اولین رسید موج P، دامنه‌ی مطلق امواج P و S و یا نسبت دامنه امواج S/P را به‌کار برد. ریزنبرگ و آپنهایم (۱۹۸۵) روشی برای برآورد سازوکار کانونی با استفاده از مشاهده پلاریتی موج P ارائه دادند که با مدلسازی چشمه نقطه‌ای و دو جفت نیرو، سازوکار کانونی را به روش مدلسازی مستقیم برآورد می‌کند. روش هاردبک و شیپیر (۲۰۰۲) برای برآورد سازوکار کانونی چشمه نقطه‌ای و دو جفت نیرو با استفاده از مشاهده پلاریتی موج P، علاوه بر خطا در مشاهده پلاریتی موج P، خطای ممکن در محاسبه زاویه خروجی را نیز در نظر می‌گیرد. هاردبک و شیپیر (۲۰۰۳) نسبت دامنه S/P را به‌عنوان کانسترنیت، به روش قبلی خود افزودند. روش اسنک (۲۰۰۳) با مدلسازی چشمه نقطه‌ای و دو جفت نیرو، با استفاده از مشاهدات پلاریتی امواج P، SV و SH و نسبت دامنه SV/P، SH/P و SV/SH سازوکار کانونی را تعیین می‌کند.

هدف از این پژوهش بررسی تأثیر افزودن مشاهدات نسبت دامنه S/P به پلاریتی موج P در برآورد سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌های کوچک، می‌باشد. از یک زمین‌لرزه‌ی بزرگ به‌عنوان مثال عددی استفاده می‌شود، تا امکان مدلسازی شکل موج و وارون‌سازی مهیا شده و نتایج با روش پلاریتی موج P و روش نسبت دامنه S/P با پلاریتی موج P مقایسه گردد. نتیجه‌ی حاصل برای زمین‌لرزه‌ی بزرگ قابل تعمیم به زمین‌لرزه‌های کوچک می‌باشد. برای این منظور، اولین رویداد اصلی زمین‌لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان با بزرگی $M_w = 6.4$ در ساعت ۱۵:۲۳:۱۲ (به وقت UTC) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ابتدا سازوکار کانونی زمین‌لرزه با برنامه آیزولا برآورد و عدم قطعیت آن بررسی می‌گردد. مجدداً سازوکار این زمین‌لرزه به روش پلاریتی موج P و روش نسبت دامنه S/P با پلاریتی موج P برآورد می‌گردد.

۲ روش تحقیق

در این بخش ابتدا روش وارون‌سازی تانسور ممان (برنامه‌ی آیزولا)، سپس روش پلاریتی اولین رسید موج P (FPFIT) و در نهایت روش نسبت دامنه S/P با پلاریتی موج P (HASH) شرح می‌گردد. همچنین سازوکار کانونی اولین رویداد اصلی زمین‌لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان به هر سه روش محاسبه می‌گردد.

اساس به‌کار رفته در برنامه‌ی آیزولا وارون‌سازی شکل موج کامل محلی و ناحیه‌ای، بر اساس روش کیکوچی و کاناموری (۱۹۹۱) می‌باشد و توابع گرین به روش عدد موج گسسته بوشن (۱۹۸۱) محاسبه می‌شود. در این برنامه ضرایب مؤلفه‌های تانسور ممان به روش کمترین مربعات و موقعیت نقطه و زمان ثقل به روش الگوریتم جستجوی شبکه برآورد می‌شود (سوکوس و زاهرادنیک، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۳). با توجه به اهمیت عدم قطعیت سازوکار کانونی در دهه‌ی اخیر، در نسخه‌ی ۲۰۱۳ آیزولا کدی برای این منظور اضافه شده است (زاهرادنیک و کستودیو، ۲۰۱۲). برای برآورد سازوکار کانونی در برنامه آیزولا از موقعیت کانون، زمان وقوع زمین‌لرزه، مدل سرعت و داده‌های لرزه‌ای باندپهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و داده‌های مرکز لرزه‌نگاری جمهوری آذربایجان استفاده شده است. فرآیند وارون‌سازی طی سه مرحله با فرض تابع زمانی چشمه‌ی دلتا (Delta) و باند فرکانسی $0.055 - 0.15$ انجام شده است. ابتدا جستجو در زیر امتداد رومرکز به منظور برآورد عمق ثقل انجام شد، سپس در صفحه‌ای به عمق ثقل در شبکه‌ای با فواصل ۱۰ کیلومتری موقعیت مسطحاتی ثقل تعیین و در نهایت با فرض شبکه‌ای با فواصل ۱ کیلومتری موقعیت مسطحاتی بهتر ثقل به‌دست آمد. به‌طوریکه طول و عرض جغرافیایی به ترتیب $46/75.05$ و $38/38.69$ و عمق ۴ کیلومتر نتیجه شد. همچنین میزان دوجفت نیرو و بازه‌انش واریانس (Variance Reduction) به ترتیب ۹۴ و ۸۲ درصد به‌دست آمد. شکل ۱ نشانگر نتایج وارون‌سازی تانسور ممان، اعم از سازوکار کانونی برآورد شده به همراه ایستگاه‌های لرزه‌ای، عدم قطعیت حل و تطابق پلاریتی موج P ایستگاه‌ها در سازوکار کانونی برآورد شده می‌باشد. زوایای راستا، شیب و ریک (Rake) به ترتیب برابر ۸۳، ۸۳ و ۱۶۲ می‌باشد.



شکل ۱. الف) ایستگاه‌های لرزه‌ای مورد استفاده و سازوکار کانونی برآورد شده (در موقعیت رومرکز). ب) نمودار هیستوگرام K-angle (کوچکترین زاویه‌ی بین بردارهای لغزش دو DC). پ) مجموعه‌ای از حل‌های قابل قبول با توجه به عدم قطعیت حل، نزدیک بودن صفحات به همدیگر بیانگر کوچک بودن خطا و دقت بالای نتایج می‌باشد. ت) میزان درصد دوجفت‌نیرو برای صفحات در شکل (پ). ث) نمایش پلاریتی اولین رسید موج P در ایستگاه‌ها، که نشانگر تطابق خوب پلاریتی ایستگاه‌ها با حل تانسور ممان ثقل می‌باشد.

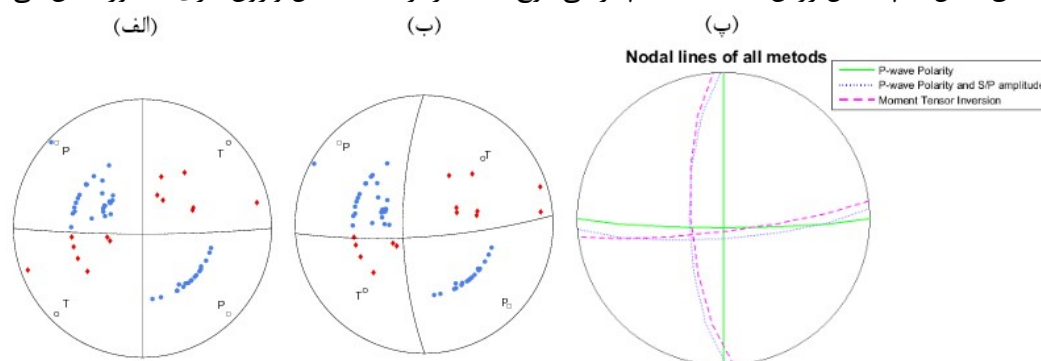
FPFIT سازوکار کانونی که بهترین برازش را به مشاهدات پلاریتی موج P دارد، تعیین می‌کند. وارون‌سازی با اجرای الگوریتم جستجوی شبکه که مجموع وزن‌دار و نرمالایز شده اختلاف پلاریتی‌های مشاهداتی و محاسباتی را مینیمم می‌کند، انجام می‌شود. به عبارتی مدلی که تابع زیر را مینیمم می‌کند، حل موردنظر است (ریزنبرگ و آپنه‌ایم، ۱۹۸۵):

$$F' = \frac{\sum_{k=1}^N |p_o^k - p_t^{i,k}| w_o^k - w_t^{i,k}}{\sum_{k=1}^N |w_o^k - w_t^{i,k}|} \quad (1)$$

که در آن N تعداد مشاهدات، p_o^k پلاریتی مشاهداتی موج P در ایستگاه k، $p_t^{i,k}$ پلاریتی محاسباتی موج P در ایستگاه k و متناظر با مدل i (راستا، شیب و ریک)، w_o^k وزن مشاهداتی و $w_t^{i,k}$ وزن محاسباتی که معادل با ریشه‌ی مربعی و نرمالایز شده دامنه موج P می‌باشد. وزن مشاهداتی بر اساس کیفیت پلاریتی موج P و وزن محاسباتی بر اساس فاصله از صفحات گرهی تعیین می‌شود. برای برآورد سازوکار کانونی با این روش، از موقعیت کانون و مدل سرعت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و ۵۸ ایستگاه لرزه‌ای که قرائت پلاریتی در آن‌ها ممکن بود، استفاده شده است. شکل ۲. الف) نشانگر پلاریتی این ایستگاه‌ها و صفحات گرهی (راستا ۹۰، شیب ۸۵ و ریک ۱۸۰) است.

برنامه HASH با مدلسازی چشمه نقطه‌ای و دوجفت نیرو، سازوکار کانونی که بهترین برازش را به مشاهدات پلاریتی موج P و نسبت دامنه امواج S/P دارد، برآورد می‌کند. علاوه بر اضافه شدن مشاهدات نسبت دامنه S/P، روش برآورد سازوکار کانونی HASH با روش FPFIT، متفاوت است. چنانچه با فرض خطای پلاریتی موج P و نسبت دامنه امواج S/P سازوکارهای کانونی پایدار باشد، ممکن است با در نظر گرفتن تغییرات کوچک در موقعیت کانون یا مدل سرعت ناپایدار شود. بر این اساس در این روش علاوه بر فرض خطای پلاریتی موج P و نسبت دامنه امواج S/P، خطا در زوایای خروجی نیز در نظر گرفته می‌شود. در این روش برای موقعیت اولیه چشمه و یک مدل سرعت، آزمون و زاویه خروجی محاسبه و با اجرای الگوریتم جستجوی شبکه، مجموعه‌ای از سازوکارهای کانونی به دست می‌آیند. چندین بار الگوریتم برای ترکیب‌های مختلف موقعیت چشمه و مدل سرعت تکرار می‌شود و هر بار سازوکارهای مورد قبول ذخیره می‌شوند. حل نهایی با میانگین‌گیری از جواب‌های مورد قبول به دست می‌آید. در صورتی که چندین حل برای سازوکار کانونی برآورد شود، حل محتمل‌تر به عنوان حل نهایی تعیین می‌شود (هاردبک و شیرر، ۲۰۰۳). برای برآورد سازوکار کانونی با این روش، از موقعیت کانون پژوهشگاه بین‌المللی

زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و از هر سه مدل سرعت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و مدل سرعتی منطقه تبریز (مرادی و همکاران، ۲۰۱۱) استفاده شده است. در این روش علاوه بر گردآوری مشاهدات پلاریتی، نسبت دامنه S/P نیز مشاهده شده است. شکل ۲.ب نشانگر پلاریتی این ایستگاه‌ها و صفحات گرهی (راستا ۸۶، شیب ۷۹ و ریک ۱۶۱) است. شکل ۲.پ سازوکار کانونی هر سه روش را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲.پ، حل روش دامنه S/P با پلاریتی موج P بسیار نزدیک به حل وارون‌سازی تانسور ممان می‌باشد.



شکل ۲. نمایش پلاریتی موج P ایستگاه‌ها، صفحات گرهی و موقعیت محورهای کشش (T) و فشارش (P) برآورد شده به روش پلاریتی اولین رسید موج P (الف)، و به روش نسبت دامنه امواج S/P با پلاریتی موج P (ب). (پ) سازوکار کانونی برآورد شده به هر سه روش.

۳ نتیجه‌گیری

در این پژوهش سازوکار کانونی اولین رویداد اصلی زمین‌لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان به سه روش، با برنامه‌ی آیزولا، روش پلاریتی موج P و دامنه S/P با پلاریتی موج P انجام گردید. در برنامه‌ی آیزولا، عدم قطعیت به‌منظور بررسی کیفیت حل انجام شد. ارزیابی عدم قطعیت بیانگر دقت بالای نتیجه‌ی حل وارون‌سازی تانسور ممان می‌باشد. با مشاهده‌ی پلاریتی موج P در تعداد زیادی از ایستگاه‌های اطراف رومرکز، سازوکار این زمین‌لرزه به روش FPFIT تعیین گردید. مجدداً با اضافه کردن نسبت دامنه S/P به مشاهدات پلاریتی موج P، سازوکار کانونی به روش HASH برآورد شد. با مقایسه‌ی سازوکار حاصل از وارون‌سازی تانسور ممان با سازوکار پلاریتی موج P و دامنه S/P با پلاریتی موج P می‌توان پی به بهبود حل با افزودن نسبت دامنه S/P به مشاهدات پلاریتی موج P برد. لازم به ذکر است در روش HASH خطا در زوایای خروجی نیز در نظر گرفته شد. بنابراین به‌منظور بهبود سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها -به‌ویژه زمین‌لرزه‌های کوچک- می‌توان مشاهدات نسبت دامنه S/P را به مشاهدات پلاریتی موج P افزود.

منابع

- Bouchon, M., 1981, A simple method to calculation green's function for elastic layered media, Bull. Seismol. Soc. Am., 71, 959-971.
- Hardebeck, J. L., and Shearer, P. M., 2002, A New Method for Determining First-Motion Focal Mechanisms: Bull. Seism. Soc. Am., 92, 2264-2276.
- Hardebeck, J. L., and Shearer, P. M., 2003, Using S/P amplitude ratios for to constrain the focal mechanisms of small earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 93, 2434-2444.
- Kikuchi, M., Kanamori, H., 1991, Inversion of complex body waves; III. Bull. Seismol. Soc. Am., 81, 2335-2350.
- Moradi, A., Hatzfeld, D., and Tatar, M., 2011, Microseismicity and seismotectonics of North Tabriz fault (Iran), Tectonophysics, 506, 22-30.
- Reasenber, P., and D. Oppenheimer, 1985, FPFIT, FPLOT, and FPPAGE: FORTRAN computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 85-739, 109pp.
- Snoke, J. A., 2003, FOCMEC: FOCal MEchanism determinations, in International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, W. H. K. Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, and C. Kisslinger (Editors), Academic Press, San Diego, Chapter 85.12.
- Sokos, E. N., and Zahradník, J., 2008, ISOLA a FORTRAN code and a MATLAB GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data, Comput. Geosci. 34, 967-977.
- Sokos, E. N., and Zahradník, J., 2013, Evaluating Centroid-Moment-Tensor Uncertainty in the New Version of ISOLA Software, Seismol. Res. Lett., 84, 656-665.
- Zahradnik, J., Custodio, S., 2012, Moment Tensor Resolvability: Application to Southwest Iberia. Bull. Seism. Soc. Am., 102, 1235-1254.