تخمین سریع فاصله کانونی زمین‌لرزه با استفاده از بخش ابتدایی موج P، برای زمین‌لرزه‌های ایران

رضا حیدری
استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه ژئوفیزیک، تهران، ایران
r.heidari@srbiau.ac.ir

کلید واژه‌ها: *تخمین سریع، فاصله رومرکزی، پوش خط، رگرسیون، موج* P

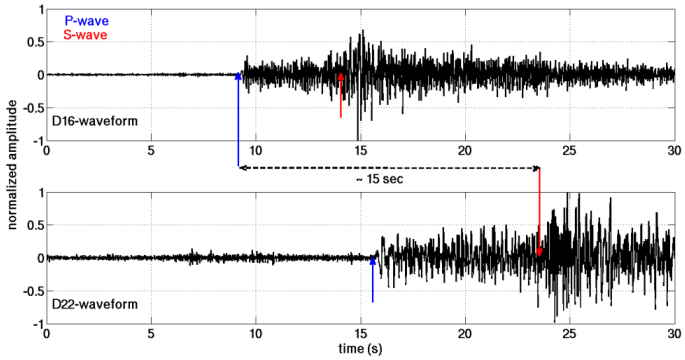
چکیده

تخمین سریع فاصله رومرکزی و بزرگی زمینلرزه یکی از مهمترین پردازش‌های برخط در سامانه‌های رایج هشدار سریع زمینلرزه در دنیا محسوب می‌شود. در این مطالعه با استفاده از نگاشت‌های چند زمینلرزه مهم در ایران به بررسی قابلیت اجرایی شدن یکی از مطرح‌ترین روش‌های تخمین سریع فاصله رومرکزی زمینلرزه جهت استفاده در سامانه‌های هشدار سریع زمینلرزه در کشور پرداخته شده است. آژانس هواشناسی ژاپن (JMA)، در طراحی سامانه هشدار از روشی موسوم به روش B-Δ استفاده می‌کند که در تخمین سریع فاصله کانونی زمینلرزه، تاکنون عملکرد قابل قبولی را نشان داده است. استفاده از نگاشت‌های زمینلرزه‌های بزرگ ایران در این روش، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌کند که می‌توان در سامانه‌های هشدار سریع زمینلرزه آتی به کار گرفته شود. همچنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که علی‌رغم تفاوت قابل ملاحظه در رفتار لرزه‌زمینساختی و تکتونیکی حاکم در کشورهای ژاپن و ایران؛ روابط به دست آمده در تخمین سریع فاصله رومرکزی برای دو منطقه نسبتاً مشابه هستند. اگرچه استفاده از نگاشت زمینلرزه‌های آتی، باعث دقیق‌تر شدن نتایج ارائه شده در این مطالعه خواهد شد.

مقدمه

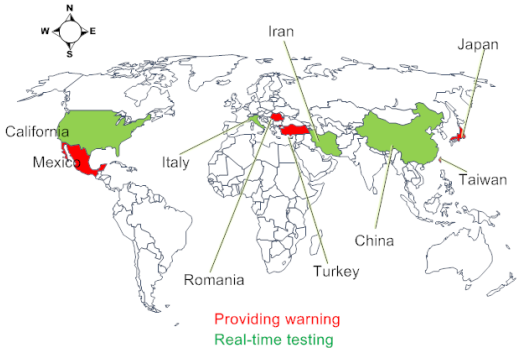
در سالیان گذشته تلفات جانی و مالی بسیار زیادی به سبب رویداد زمینلرزه‌های مخرب در نقاط زیادی از پهنه ایران زمین رویداده است و در مقابل پیشرفت‌های بسیار کمی برای مقابله با خسارات ناشی از این پدیده طبیعی انجام شده است. بطورکلی، زمینلرزه‌ها از پرنقش‌ترین رویدادهای طبیعی در ایجاد تلفات و خسارات هستند که مدیریت بحران‌های ناشی از آن، امری بسیار مشکل است. متأسفانه پیش‌بینی دقیق زمینلرزه (به معنی تعیین دقیق زمان و مکان رخداد یک زمینلرزه و بزرگی آن)، با دانش و دانسته‌های فعلی بشر امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین، برای مقابله با خسارات ناشی از زمینلرزه‌های مخرب در شرایط کنونی یک سامانه هشدار سریع زمینلرزه (Early Warning System Earthquake)، می‌تواند در کاهش خسارات جانی و مالی زمینلرزه نقش پر اهمیتی داشته باشد. یک سامانه هشدار سریع زمینلرزه، مجموعه‌ای است از سخت‌افزارها و نرم‌افزارها که به صورت برخط (Real-Time)، به تجزیه و تحلیل نگاشت‌های یک زمینلرزه در حال وقوع می‌پردازد و در صورت مخرب بودن آن اقدام به ارسال پیام هشدار به مناطق در معرض خطر می‌کند (قبل از رسیدن جنبش‌های نیرومند زمین به محل مورد نظر). ایده ابتدایی سامانه‌های هشدار سریع زمینلرزه در حدود ۱۴۰ سال پیش توسط Cooper (1868)، مطرح شد و بعدها با پیشرفت‌های بشر در زمینه شبکه‌های ارتباطی به اجرا درآمد. اساس کار بسیاری از سامانه‌های هشدار سریع به این صورت است که اولین موج دریافتیP به صورت تقریبی برای زمینلرزه‌های کم عمق با سرعتی حدود ۱/۷ برابر امواج S و سطحی (معمولاً دامنه و در نتیجه آن انرژی امواج S نسبت به امواج P بزرگتر و مخرب‌تر است)، حرکت می‌کند و تأخیر دریافت امواج P و S در هر ایستگاه به فاصله کانونی، عمق و مدل سرعتی پوسته زمینلرزه بستگی دارد. به عنوان مثال دو نگاشت زمینلرزه ۲۰۱۱ شریف‌آباد تهران که در فاصله تقریبی حدود ۱۷ کیلومتر در امتداد گسلش قرار دارند؛ به خوبی نشان می‌دهد که اختلاف زمان دریافت بین فازهای ابتدایی در ایستگاه اول با امواج مخرب در ایستگاه دوم به قدری است که می‌توان برای مناطق پیرامون ایستگاه دوم زمان هشداری در حدود ۱۰-۱۲ ثانیه ایجاد نمود. این زمان تأخیر برای اعلام هشدار قبل از رسیدن امواج مخرب زمینلرزه (موج S و امواج سطحی)، بسیار مناسب و کمک‌کننده می‌باشد. امروزه سامانه‌های هشدار سریع زمینلرزه در بسیاری از مناطق مستعد رخداد زمینلرزه در جهان گسترش یافته و روش‌های متفاوتی برای افزایش

دقت و سرعت اعلام هشدار توسعه یافته است. مطالعات مربوط به سامانه‌های هشدار سریع زمینلرزه در کشورهای زلزله‌خیز بسیاری همچون ژاپن، ترکیه، رومانی، تایوان، مکزیک و آمریکا در حال پیگیری و توسعه است (شکل۲).



شکل۱: نگاشت مربوط به زمینلرزه ۲۰۱۱ میلادی شریف‌آباد تهران با بزرگی M_L ۴/۱ در محل دو ایستگاه با فاصله تقریبی ۱۷ کیلومتر. اختلاف زمان بین دریافت P در ایستگاه اول و زمان مشاهده شدن موج S در محل ایستگاه دوم حدود ۱۵ ثانیه است که امکان ایجاد هشدار حدود ۱۰-۱۲ ثانیه را برای مناطق اطراف ایستگاه دوم ایجاد می‌کند.

در چند ساله اخیر، سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران (TDMMO)، با همکاری آژانس بین‌المللی همکاری‌های ژاپن (JICA)، اقدام به راه‌اندازی سامانه هشدار سریع زمینلرزه برای شهر تهران نموده است که تست‌های ابتدایی آن شروع شده است. به همین دلیل می‌توان کشور ایران را به عنوان یکی دیگر از مناطقی نام برد که بزودی از سامانه هشدار سریع زمینلرزه اجرایی بهره‌برداری خواهد نمود. بر این اساس نیاز است تا با دقت فراوان نیازهای کلی این سامانه هشدار سریع ارزیابی گشته و به مرور زمان رفع گردند. در این مقاله تلاش شده است که به یکی از نیازهای چنین سامانه‌هایی در کشور پاسخ داده شود. با توجه به فقدان نگاشت زمینلرزه‌های بزرگ برای شهر تهران، امکان بررسی روش‌های متداول تخمین سریع بزرگی و فاصله رومرکزی زمینلرزه با استفاده از داده‌های این منطقه تکتونیکی، میسر نیست. بنابراین، نگارنده تلاش کرده است تا با استفاده از نگاشت‌های زمینلرزه‌های مهم و پراهمیت رویداده در سایر نقاط کشور به ارزیابی این روش و میزان آن در ایران بپردازد.



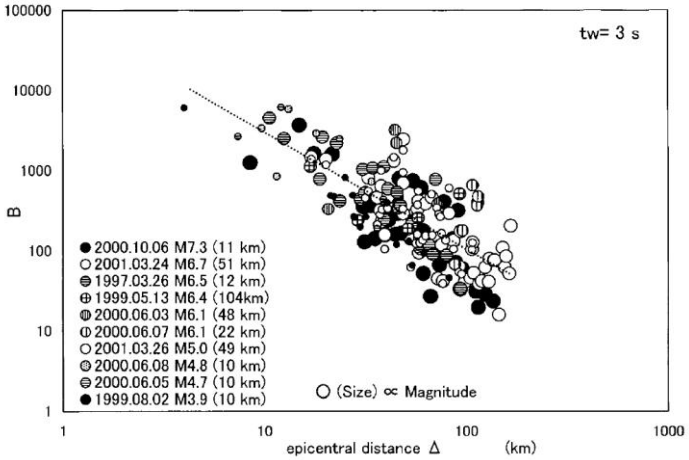
شکل ۲: کشورهایی که تا سال ۲۰۱۴ از سامانه هشدار سریع زمینلرزه استفاده می‌کنند و یا در حال طراحی الگوریتم بهینه‌ای برای این سامانه منطبق با شرایط خاص خود می‌باشند. در ایران نیز این مطالعات در تهران در حال اجرا و بررسی‌های برخط است.

بطورکلی، یکی از حیاتی‌ترین پارامترهای لازم در سامانه‌های هشدار سریع زمینلرزه دنیا که بایستی با سرعت و دقت محاسبه گردد؛ فاصله رومرکزی کانون زمینلرزه است. از این پارامتر در تخمین سریع شدت زمینلرزه در مکان‌های متفاوت اطراف کانون زمینلرزه و صدور هشدار استفاده می‌شود که برای این منظور از یک رابطه کاهندگی بصورت تابعی از بزرگی و فاصله رومرکزی زمینلرزه استفاده می‌شود. با توجه به هدف سامانه‌های هشدار سریع زمینلرزه طبیعی است که این تخمین بایستی در فاصله زمانی بسیار کوتاهی پس از وقوع زمینلرزه انجام شود. اگرچه توزیع ایستگاهی متراکم و مناسب می‌تواند این زمان را تا حد بسیار زیادی کم کند؛ استفاده از چند ثانیه ابتدایی موج P، عامل بسیار مهمی برای افزایش زمان هشدار محسوب می‌شود. بنابراین، تخمین فاصله کانونی زمینلرزه در هر ایستگاه از روی تقریباً ۳-۵ ثانیه ابتدایی موج P، انجام می‌شود. به عنوان مثال سامانه تشخیص و هشدار فوری زمینلرزه ژاپن (UrEDAS)، که برای توقف سریع قطارهای سریع‌السیر در ژاپن اجرایی شده است؛ از پنجره زمانی کوتاه از ابتدایی فازهای اولیه دریافتی برای تخمین بزرگی و فاصله رومرکزی زمینلرزه استفاده می‌کند

(Bito and Nakamua, 1986; Nakamura, 1988). در این مطالعه تلاش شده است تا به این پرسش پاسخ داده شود که آیا می‌توان برای سامانه‌های واکنش سریع زمینلرزه‌های آتی در ایران از چنین روشی استفاده نمود.

روش B-Δ

بطور کلی پوش امواج لرزه‌ای تابع بسیاری از عوامل وابسته به چشمه زمینلرزه و محیط انتشار امواج لرزه‌ای بوده و در ایستگاه‌های مختلف شکل‌های متفاوتی از خود را نمایش می‌دهد. بر همین اساس Odaka et al., (2003)، روش B-Δ را ارائه نمودند که در تخمین فاصله رومرکزی کانون زمینلرزه بخوبی عمل می‌کند. آنها نشان دادند که پوش بخش ابتدایی موج P ارتباط مشخصی با بزرگی زمینلرزه و فاصله رومرکزی زمینلرزه‌ها از خود نشان می‌دهد. بر این اساس آنها تابعی را به شکل Bt•exp(_At) بر پوش چند ثانیه ابتدایی امواج دریافتی برازش نمودند. نتایج نشان می‌داد که پارامتر B در این رابطه ارتباط مشخصی با فاصله رومرکزی زمینلرزه‌ها دارد که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: رابطه بین مقادیر B و فاصله رومرکزی زمینلرزه‌های ژاپن که در گوشه همین شکل لیست شده‌اند. این شکل رابطه خطی مناسبی بین مقادیر این دو پارامتر نشان می‌دهد (Odaka et al., (2003)).

داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه و به منظور ارزیابی کارایی روش شرح داده شده با استفاده از داده‌های موجود در کاتالوگ زمینلرزه‌های دستگاهی بزرگ در ایران، نگاشت‌های هفت زمینلرزه بزرگ ایران انتخاب گردید. این زمینلرزه‌ها در جدول۱، لیست شده‌اند. نگاشت‌های شتاب این زمینلرزه‌ها که در ایستگاه‌های شتابنگاری شبکه شتابنگاری کشور وابسته به مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ثبت شده‌اند؛ پس از تصحیح خط میانگین، مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای ارزیابی بهتر این روش از مولفه‌های قائم ثبت شده نگاشت‌ها استفاده گردید.

جدول ۱: لیست زمینلرزه‌های مورد استفاده در این مطالعه

نام زمینلرزه	تاریخ و ساعت	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)
چنگوره- آوج	20020622-0258	35.63	48.93
بم	20031226-0156	29.00	58.33
کجور- فیروزآباد	20040528-1238	36.30	51.56
محمدآباد ریگان	20110127-0838	28.24	59.06
اهر- ورزقان (۱)	20120811-1223	38.49	46.86
اهر- ورزقان (۲)	20120811-1234	38.44	46.77
شنبه	20130409-1152	28.50	51.59

روش پردازش

در این مطالعه به منظور برازش پوش Bt•exp(_At) بر بخش ابتدایی موج P، موارد زیر به ترتیب انجام شد:

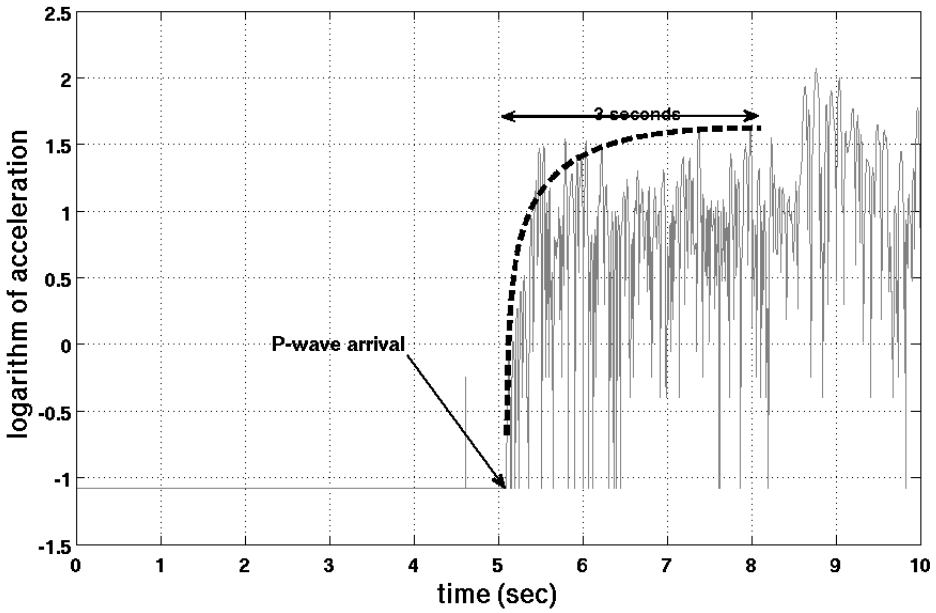
۱- نگاشت‌های مولفه‌های قائم زمینلرزه‌های ذکر شده در جدول ۱ تصحیح گردید. برای این منظور خط اثر میانگین از روی آن برداشته شد.

۲- با استفاده از مدل‌های سرعتی موجود، زمان رسید موج P، با دقت بر روی نگاشت‌ها قرائت گردید و پنجره زمانی ۳ ثانیه‌ای برای ادامه پردازش‌ها در نظر گرفته شد.

۳- مقدار قدر مطلق دامنه نگاشت‌ها محاسبه گردید و به خاطر بررسی‌های دقیق‌تر از لگاریتم این دامنه‌ها استفاده شد. به جهت جلوگیری از خطا در مقادیر صفر دامنه، مقادیر بسیار جزئی به دامنه‌ها اضافه گردید.

۴- در نهایت در حوزه لگاریتمی، بهترین پوش به شکل Bt•exp(At) بر دامنه‌های آماده شده با استفاده از روش کمترین مربعات برازش گردید و در انتها مقادیر B (به عنوان شیب پوش)، برای هر نگاشت استخراج گردید. در شکل ۴ نمونه‌ای از این محاسبات نشان داده شده است. با توجه به وابسته به زمان بودن پوش مطرح شده در این مطالعه، تعیین دقیق زمان رسید موج P از حساس‌ترین موارد لازم در انجام این پژوهش است. به منظور جلوگیری از اثرات نامطلوب بریدن سیگنال از یک تیپر کسینوسی ۵ درصد در دولبه انتهایی سیگنال‌های بریده شده استفاده شد.

۵- در پایان مقادیر پارامتر B محاسبه شده برای هر نگاشت زمینلرزه، در مقابل فاصله رومرکزی زمینلرزه ترسیم شد و یکبار دیگر با استفاده از روش کمترین مربعات، بهترین خط بر داده‌ها برازش گردید (شکل ۵). به منظور مقایسه نتایج روش مذکور بر روی داده‌های ژاپن و ایران، بهترین برازش‌های مذکور در شکل ۵ نشان داده شده است.

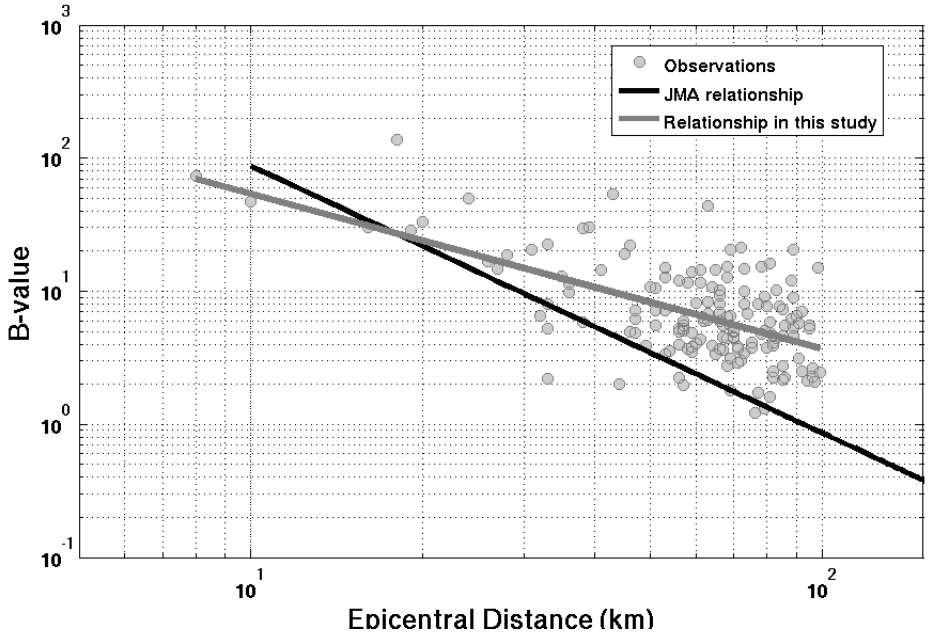


شکل۴: نمونه‌ای از پردازش‌های انجام شده در این مطالعه به منظور تخمین پارامتر B. یک پوش نمایی با استفاده از روش کمترین مربعات بر لگاریتم مقدار مطلق ۳ ثانیه ابتدایی موج P، با استفاده از روش کمترین مربعات برازش شده است. شیب این پوش نمایانگر پارامتر B بوده و بطور سیستماتیک تابعی از فاصله رومرکزی زمینلرزه‌ها است.

نتیجه‌گیری

Odaka et al., (2003)، نشان دادند که فاصله رومرکزی زمینلرزه را می‌توان با استفاده از شیب در حال رشد چند ثانیه ابتدایی موج P، بدست آورد. از این تخمین سریع در سامانه‌های هشدار سریع زمینلرزه استفاده می‌شود. موضوع پر اهمیت این است که این شیب کاملاً از بزرگی زمینلرزه مستقل بوده و صرفاً تابعی از فاصله می‌باشد. از این رابطه در سامانه هشدار سریع زمینلرزه ژاپن با دقت قابل قبولی استفاده می‌شود. حال آنکه در تهران نیز این سامانه در حال عملیاتی شدن است؛ در حالیکه داده‌های زمینلرزه‌های دستگاهی بزرگی در این منطقه وجود ندارد. بنابراین، به منظور ارزیابی این روش برای استفاده در تهران، از نگاشت زمینلرزه‌های مهم و بزرگ رویداده در کل پهنه ایران زمین از سال ۲۰۰۲ تاکنون استفاده شد.

$$BF = (Bf1 + Bf2)/2 \qquad (۱)$$



شکل۴: ایجاد رابطه خطی بین مقادیر پارامتر B و فاصله رومرکزی زمینلرزه‌ها بر اساس داده‌های زمینلرزه‌های پر اهمیت در ایران. دایره‌های طوسی نشان دهنده مقادیر منفرد اندازه‌گیری شده در این مطالعه است. خط ممتد طوسی رنگ بهترین برازش خطی را بر اساس پارامترهای اندازه‌گیری شده از زمینلرزه‌های ایران نشان می‌دهد و خط سیاه رنگ رابطه خطی به کار برده شده در سامانه هشدار سریع زمینلرزه ژاپن در تخمین سریع فاصله کانونی است.

فهرست مراجع

Bito Y and Nakamura Y (1986) Urgent earthquake detection and alarm system, in Civil Engineering in Japan, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, 103–116

Nakamura Y (1988) On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS), in Proceedings of Ninth World Conference on earthquake Engineering, Japan, Vol. VII, 673–678

Toshikazu O, Kimitoshi A, Shin'ya T, Shinji S, Kazuo O and Daisuke N (2003) A New Method of Quickly stimating Epicentral Distance and Magnitude from a Single Seismic Record, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 1, pp. 526–532