

حذف اثر ساختگاه از نگاشت‌های ایستگاه‌های سطحی برای بهبود پارامترهای هشدار سریع زمین‌لرزه

محمدعلی سرمدی^۱، رضا حیدری^{۲*}، نوربخش میرزائی^۳ و حمیدرضا سیاه‌کوهی^۴

^۱ دانش‌آموخته دکتری گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ استادیار گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۳ استاد گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۴ استاد گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۲)

چکیده

محاسبه دقیق پارامترهای هشدار سریع زمین‌لرزه نقش مهمی در اعلام خطر واقع‌بینانه و کاهش تلفات ناشی از زمین‌لرزه‌ها دارد. اثر ساختگاه یکی از عوامل تأثیرگذار بر پارامترهای هشدار سریع زمین‌لرزه (شامل τ_{log} ، τ_c ، τ_{ps} و B) است. در این مطالعه برای بررسی اثر ساختگاه بر پارامترهای هشدار سریع زمین‌لرزه از ۱۸۳۰ شتاب‌نگاشت زلزله‌های رخ داده طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۰ ثبت شده در شش ایستگاه شتاب‌نگاری وابسته به شبکه KiK-net ژاپن استفاده شده است. این شتاب‌نگاشت‌ها مربوط به ایستگاه‌های سطحی و درون‌چاهی هستند. در این پژوهش برای حذف اثر ساختگاه از شتاب‌نگاشت‌ها در حوزه زمان-بسامد از تبدیل فوریه پنجره کوتاه (STFT) و واهمامیخت استفاده شد. پس از حذف اثر ساختگاه از شکل موج ایستگاه‌های سطحی، مقادیر همه پارامترهای هشدار سریع زمین‌لرزه مورد نظر و به‌ویژه τ_{ps} ، τ_c و B به مقادیر آنها روی سنگ بستر نزدیک شد و بهبود پیدا کردند. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد پارامترهای هشدار سریع τ_{log} و τ_{ps} نسبت به سایر پارامترهای هشدار سریع زمین‌لرزه، تأثیرپذیری کمتری از اثر ساختگاهی دارند. به‌طور کلی، مقادیر پارامترهای هشدار سریع وابسته به بسامد τ_{ps} و τ_c پس از اصلاح اثر ساختگاه از مؤلفه قائم افزایش می‌یابند. در مقابل، پارامترهای B ، τ_{log} و τ_{ps}^P پس از حذف اثر ساختگاهی در تمامی ایستگاه‌ها کاهش یافتند. پس از اصلاح اثر ساختگاه، اختلاف مقادیر همه پارامترها در محاسبات روی سطح و سنگ بستر کاهش یافت که این نشان‌دهنده بهبود نتایج در مطالعات مربوط به سامانه‌های هشدار سریع زمین‌لرزه در تخمین پارامترهای چشمه زمین‌لرزه است.

واژه‌های کلیدی: هشدار سریع زمین‌لرزه، اثر ساختگاه، تبدیل فوریه پنجره کوتاه، شبکه KiK-net

۱ مقدمه

در حال حاضر، کاهش خطرپذیری زمین‌لرزه‌ای، مستلزم در اولویت قرار دادن مقاوم‌سازی سازه‌ها و ایجاد سامانه‌های هشدار سریع است. پیش‌بینی زمان، مکان و بزرگای زمین‌لرزه‌های آینده هنوز ممکن نیست، ولی فناوری هشدار سریع، توانایی اعلام وقوع زمین‌لرزه را در لحظاتی کوتاه پیش از رسیدن امواج سطحی زمین‌لرزه دارد (کاناموری، ۲۰۰۵). در صورت کافی بودن زمان هشدار، با آمادگی عمومی می‌توان تأسیسات حیاتی و سامانه‌های حمل و نقل را در وضعیت ایمن‌تر قرار داد و عملیات امداد و نجات را بهبود بخشید.

یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که در سامانه‌های هشدار سریع زلزله وجود دارد، تخمین اشتباه پارامترهای چشمه زمین‌لرزه است که ممکن است به از دست رفتن امکان صدور پیام هشدار یا ارسال پیام اشتباه منجر شود. این پارامترها به شدت بر نتایج و میزان تأثیر سامانه هشدار سریع در کاهش خطرپذیری لرزه‌ای اثر می‌گذارند. از اختلاف زمان دریافت امواج فشاری و برشی زمین‌لرزه می‌توان برای فرصت زمان هشدار استفاده کرد (کاناموری، ۲۰۰۵). با فرض سریع بودن زمان هشدار، برای انجام دادن فوری عملیات کاهش خطرپذیری، کافی است بر اساس برآوردهایی که از مشاهدات اولین ثانیه‌های موج P وجود دارد، تصمیم لازم برای فعال کردن یا نکردن ابزار اعلام خطر گرفته شود. برای این تصمیم‌گیری دو نوع خطا ممکن است به وجود آید. نوع اول خطا، فعال نشدن ابزار اعلام خطر در زمانی است که باید فعال شود و نوع دوم خطا هم فعال شدن آن در زمانی است که نباید فعال شود. خطاهای نوع اول را اعلام‌های خطر از دست‌رفته (missed alarms) و خطاهای نوع دوم را اعلام‌های خطر اشتباه (false alarms) می‌نامند (کاناموری، ۲۰۰۵). اثر ساختگاهی، یکی از مهم‌ترین موارد تأثیرگذار در ایجاد چنین خطاهایی در سامانه‌های هشدار سریع است

(اسپالاروسا و همکاران، ۲۰۱۹). اسپالاروسا و همکاران (۲۰۱۹) با در نظر گرفتن اثر ساختگاهی و بیشینه جابه‌جایی ثبت‌شده، تغییرات تصادفی لگاریتم بیشینه سرعت زمین (PGV) را در مطالعات هشدار سریع زمین‌لرزه کاهش دادند. در آن مطالعه مشخص شد دقت و صحت بیشینه سرعت زمین بهینه‌شده، به تفسیر بهتر شیوه‌نامه‌های هشدار برای واکنش خودکار منجر می‌شود. با توجه به اینکه اثر ساختگاه به وضوح بر دامنه و محتوای بسامدی نگاشت زمین‌لرزه تأثیر می‌گذارد، با شناسایی و حذف این اثر می‌توان عملکرد مؤثرتر و مطمئن‌تری را از سامانه‌های هشدار سریع زلزله انتظار داشت. در مطالعه حاضر تلاش می‌شود نقش اثر ساختگاه در تخمین سریع پارامترهای چشمه زمین‌لرزه از بخش ابتدایی موج P، ارزیابی شود تا از دستاورد آن بتوان اعلام خطرهای از دست‌رفته و اشتباه را در سامانه‌های هشدار سریع کمینه کرد. اثر ساختگاه شامل ضریب تقویت (بزرگ‌نمایی) لایه‌های کم‌سرعت و ضریب تضعیف ساختگاه یا نزدیک سطح است (بور، ۲۰۰۳؛ اندرسون و هاف، ۱۹۸۴ و سرمدی و همکاران، ۲۰۲۱).

لی و اسپینوسا-آراندا (۲۰۰۲)، کاناموری (۲۰۰۵) و آلن و همکاران (۲۰۰۹)، مروری کلی بر تاریخچه پژوهش‌های صورت‌گرفته درباره سامانه هشدار سریع ارائه کردند. موضوع سامانه هشدار سریع لرزه‌ای را کوپر در سال ۱۸۶۸، پس از زمین‌لرزه با بزرگای $M=7$ در گسل هایوارد کالیفرنیا مطرح کرد (ناکامورا، ۱۹۸۸). توکسوز و همکاران (۱۹۹۰) یک سامانه هشدار سریع الگو برای زمین‌لرزه‌های شیب‌لغز ارائه کردند که در آن لغزش فقط می‌تواند با جابه‌جایی افقی تقریب زده شود. در اولین استفاده محلی در آمریکا، سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) سامانه هشدار سریعی را برای پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه لوماپریتا در سال ۱۹۸۹ با بزرگای $M_w=6/9$ در سانفرانسیسکو اجرا کرد. ایده برآورد موقعیت بر اساس

اوداکا و همکاران (۲۰۰۳) روشی را برای استفاده در سامانه‌های هشدار سریع زمین‌لرزه آژانس هواشناسی ژاپن معرفی کردند که با استفاده از مدل کردن رفتار افزایش دامنه چند ثانیه ابتدایی موج P قادر است تخمین مناسبی برای فاصله رومرکزی و بزرگای زمین‌لرزه به‌دست آورد. رفتار دامنه فازهای ابتدایی امواج زمین‌لرزه (حدود ۳ ثانیه ابتدایی)، می‌تواند تابع عوامل بسیاری از جمله خصوصیات چشمه زمین‌لرزه و محیط انتشار امواج زمین‌لرزه باشد (مانند جهت‌یافتگی). اوداکا و همکاران (۲۰۰۳) نشان دادند شیب پوش این دامنه‌های ابتدایی به‌خوبی با فاصله رومرکزی (Δ) زمین‌لرزه ارتباط دارد. به همین منظور آنها تابع $y=Bt.exp(-At)$ را تعریف و با استفاده از روش کمترین مربعات، آن را بر مقدار دامنه‌های مشاهده‌شده چند ثانیه ابتدایی نگاشت‌های زمین‌لرزه برازش و پارامترهای A و B را تعیین کردند. در این تابع، پارامتر t زمان رسید موج ابتدایی P و پارامتر B نمایانگر شیب بخش ابتدایی امواج P است. آنها نشان دادند رابطه خطی مناسبی بین $\log \Delta$ و $\log B$ وجود دارد که مستقل از بزرگای زمین‌لرزه است. وقتی پارامتر A مثبت است، مقدار B/Ae برابر بزرگ‌ترین دامنه است. این رفتار معمولاً برای زمین‌لرزه‌های کوچک اتفاق می‌افتد که دامنه آنها به‌سرعت افزایش می‌یابد و بلافاصله پس از دریافت فاز P افت می‌کند. وقتی A منفی است، دامنه به‌صورت نمایی در زمان افزایش می‌یابد که ویژگی زمین‌لرزه‌های بزرگ است (اوداکا و همکاران، ۲۰۰۳).

۲-۲ روش‌های برآورد بر اساس بسامد

به‌طور کلی جنبش زمین‌لرزه‌ای ایجادشده با زمین‌لرزه‌های نیرومند نسبت به زمین‌لرزه‌های کوچک‌تر، حاوی بسامدهای کمتر است. در نتیجه می‌توان بزرگای یک زمین‌لرزه را با استفاده از بسامد غالب یا f^p یک سیگنال تخمین زد. روش‌های متعددی برای محاسبه f^p از

دامنه را کاناموری (۱۹۹۳) معرفی کرد. در این روش یک رابطه تضعیف بر پیشینه دامنه شتاب مشاهده‌شده از داده‌ها برازش می‌شود و پارامترهای بزرگ، عرض و طول جغرافیایی موقعیت رویداد با کمینه کردن خطا بین مشاهدات و مقادیر پیش‌بینی‌شده تعیین می‌شوند.

آلن و کاناموری (۲۰۰۳) سامانه هشدار زمین‌لرزه ElarmS را معرفی کردند که روشی برای شبکه لرزه‌ای کالیفرنیا (CISN) است. این الگوریتم با فرض وجود رابطه خطی بین بزرگای لرزه‌ای و دوره تناوب غالب جنبش زمین، بزرگای رویداد را از دوره تناوب غالب ثانیه‌های اول موج P محاسبه می‌کند. وو و کاناموری (۲۰۰۵)، روشی را بر اساس دوره تناوب غالب و دامنه جابه‌جایی برای سامانه هشدار سریع تایوان معرفی کردند. روش ناحیه‌ای برای هشدار سریع لرزه‌ای در ژاپن و مکزیک استفاده شده است (اوکادا و همکاران، ۲۰۰۳ و اسپینوسا-آراندو و همکاران، ۱۹۹۵).

امروزه تعداد زیادی سامانه هشدار سریع در ژاپن وجود دارد که UrEDAS (شناسایی سریع زمین‌لرزه و سامانه اعلام خطر) مهم‌ترین سامانه موجود است. پیشرفت و توسعه UrEDAS با سامانه اعلام خطر معمولی آغاز شد که راه‌آهن ژاپن (JNR) در میانه دهه ۱۹۶۰ آن را ساخته بود. سامانه اعلام خطر برای جلوگیری از خروج از ریل قطارهای تندرو طراحی شده بود (ناکامورا و توکر، ۱۹۸۸). زمان شروع دریافت اولین فازهای لرزه‌ای از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است؛ زیرا اساس کار سامانه‌های هشدار سریع زلزله، استفاده از پنجره زمانی چند ثانیه اول موج P است. در ادامه تعدادی از روش‌های تعیین پارامترهای هشدار سریع معرفی می‌شود.

۲ روش‌های تعیین پارامترهای اصلی سامانه

هشدار سریع زمین‌لرزه

۱-۲ روش پوش $B-\Delta$

گرفته که در آن پارامتر τ_c در طول پنجره زمانی ۳ ثانیه ابتدایی دریافت موج اندازه گیری شده است. این روش نشان می دهد رابطه مناسبی بین دوره تناوب میانگین و بزرگای زمین لرزه برای داده های تایوان و کالیفرنیا برقرار است (وو و کاناموری، ۲۰۰۵ و وو و همکاران، ۲۰۰۷). شیه و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند استفاده هم زمان از دوره تناوب غالب و دوره تناوب میانگین برای تعیین محتوای بسامدی سیگنال یک زمین لرزه بسیار مناسب تر است. روش دیگر را کاناموری (۲۰۰۵) ارائه کرد که اصلاح شده روش ناکامورا (۱۹۸۸) است و در آن، دوره تناوب میانگین در طول پنجره زمانی ثابت اندازه گیری می شود. اگر $u(t)$ ، جابه جایی زمین باشد، می توان نسبت r را برای مؤلفه قائم این گونه محاسبه کرد:

$$r = \frac{\int_0^{\tau_0} \dot{u}^2(t) dt}{\int_0^{\tau_0} u^2(t) dt} \quad (۴)$$

این انتگرال معمولاً بین صفر تا ۳ ثانیه محاسبه می شود.

حال با استفاده از قضیه پارسوال خواهیم داشت:

$$r = \frac{4\pi^2 \int_0^{\infty} f^2 |\hat{u}(f)|^2 df}{\int_0^{\infty} |\hat{u}(f)|^2 df} = 4\pi^2 \langle f^2 \rangle \quad (۵)$$

و

$$\tau_c = \frac{1}{\sqrt{\langle f^2 \rangle}} = \frac{2\pi}{\sqrt{r}} \quad (۶)$$

۲-۲-۳ دوره تناوب طیفی τ_{log}

زیو (۲۰۱۴) پارامتر جدید τ_{log} را معرفی کرد که در آن تأثیر بسامدهای بالا کاهش یافته است. برای محاسبه این پارامتر، فقط از مؤلفه سرعت و ۴ ثانیه ابتدایی موج P استفاده شده و مجموعه ضرایب طیف توان $P_i(w_i)$ با تبدیل فوریه به دست آمده است. برای کاهش تأثیر بسامد های بالا، باید در بازه ۰/۱ تا ۱۰ هرتز، نمونه برداری مجدد را با فواصل ۰/۱ لگاریتم واحد بسامد انجام داد و مقدار τ_{log} را با رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\log(\tau_{log}) = \frac{\sum_i (P_i^*(w_i) \log(\frac{1}{w_i}))}{\sum_i (P_i^*(w_i))} \quad (۷)$$

قسمت های اولیه نگاشت های لرزه ای پایه گذاری شده و توسعه یافته است. در ادامه این روش ها معرفی می شوند:

۲-۲-۱ دوره تناوب غالب τ_{max}^P

یکی از اولین پارامترهای موج P دریافتی برای تخمین بزرگای زمین لرزه در سامانه های هشدار سریع، دوره تناوب غالب (τ_{max}^P) است (ناکامورا، ۱۹۸۸). این پارامتر بدون اینکه به فاصله کانونی حساسیت نشان دهد، به خوبی بزرگای زمین لرزه را تخمین می زند. مزیت روش این است که در فاصله زمانی خیلی کوتاه از دریافت اولین موج لرزه ای P، بزرگای زمین لرزه را تخمین می زند. در این روش دوره تناوب غالب موج P در زمان i (τ_i^P) از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\tau_i^P = 2\pi \sqrt{X_i / D_i} \quad (۱)$$

که

$$X_i = \alpha X_{i-1} + x_i^2 \quad (۲)$$

$$D_i = \alpha D_{i-1} + \left(\frac{dx}{dt}\right)_i^2 \quad (۳)$$

که x_i داده ثبت شده سرعت زمین، X_i مربع سرعت برانبارش شده (accumulated) زمین، D_i مربع مشتق سرعت زمین و α ضریب یکنواختی است. آلن و کاناموری (۲۰۰۳) با استفاده از ایده ناکامورا درباره تناسب بسامد غالب موج P با بزرگای زمین لرزه، روش ElarmS را ارائه کردند.

۲-۲-۲ دوره تناوب میانگین τ_c

روش تخمین بزرگای زمین لرزه بر اساس اندازه گیری دوره تناوب غالب، به تنهایی چندان دقیق و مطلوب نیست. وو و کاناموری (۲۰۰۵) به جای استفاده از دوره تناوب غالب در تخمین بزرگای زمین لرزه، از میانگین دوره تناوب (τ_c)، در چند ثانیه اول دریافت موج استفاده کردند. این روش بر اساس روش ناکامورا (۱۹۸۸) شکل

زلزله‌های تایوان را مطالعه کردند و میانگین اختلاف را برای بزرگ‌های ۴ تا ۵، ۵ تا ۶ و بیشتر از ۶ به ترتیب ۰/۴۹، ۰/۴۶ و ۰/۳۶ به دست آوردند. بیشترین اختلاف‌ها در ایستگاه‌های حاشیه نواحی رسوبی و دشت‌ها رخ داد. این پژوهشگران نتیجه گرفتند شرایط زمین‌شناسی محلی و اثر ساختگاه در تعیین بزرگای زلزله تأثیرگذار است.

برای تخمین دقیق‌تر بزرگا باید تصحیح اثر ساختگاه بر شکل‌موج زلزله اعمال شود تا اختلاف ناشی از تأثیر شرایط زمین‌شناسی ساختگاه‌های مختلف بر شکل‌موج کمینه شود (یاماموتو و همکاران، ۲۰۰۸). این کار معمولاً با ضرب یک عدد انجام می‌گیرد که به صورت تجربی تخمین زده می‌شود و به بسامد وابسته نیست. برای تخمین دقیق‌تر بزرگا از بیشترین دامنه، شکل‌های طیفی یا محتوای بسامدی، باید شکل‌موج‌ها با توجه به شرایط ساختگاهی (برای مثال، ساختگاه سنگی) و با در نظر گرفتن وابستگی بسامدی عوامل ساختگاهی تصحیح شوند؛ به‌ویژه زمانی که برای تعیین بزرگا تنها تعداد کمی ایستگاه نیاز است. شکل‌موج‌های اصلاح‌شده (با توجه به اثر ساختگاه)، با به‌کارگیری تبدیل فوریه، ضرب ضریب ساختگاه در هر بسامد و سپس عکس تبدیل فوریه تخمین زده می‌شوند (کاپریو و همکاران، ۲۰۱۱). تبدیل فوریه و عکس آن برای بازه‌های زمانی کوچک (برای هر یک ثانیه یا کمتر) روی شکل‌موج‌ها با روش‌های پردازش جدید به صورت زمان واقعی انجام می‌شود (کاپریو و همکاران، ۲۰۱۱).

در این مطالعه، پارامترهایی که در تخمین سریع فاصله رومرکزی و بزرگای زمین‌لرزه در سامانه‌های هشدار سریع زلزله کاربرد دارند $(\tau_c, \tau_{log}, \tau_{PS}, B)$ ، با مهم‌ترین روش‌ها (با تأکید بر سامانه هشدار سریع زلزله ژاپن) و بر اساس داده‌های سطحی و درون‌چاهی محاسبه می‌شوند و با دقت ارزیابی خواهد شد که اثر ساختگاه تا چه میزان بر تخمین پارامترهای چشمه زمین‌لرزه از روی مؤلفه قائم تأثیرگذار است. با لحاظ کردن اثر ساختگاهی

که $P_i^*(W_i)$ توان دوباره نمونه‌برداری شده است.

۲-۴ دوره تناوب طیف توان τ_{ps}

در ادامه مطالعات، دوره تناوب طیف توان τ_{ps} که صورت اصلاح‌شده تعریف پایه دوره تناوب τ_{log} (معادله ۷) است، به صورت زیر تعریف شد (حیدری، ۲۰۱۸):

$$\tau_{ps} = \frac{\sum_i P_i(f_i) \left(\frac{1}{f_i}\right)}{\sum_i P_i(f_i)} \quad (8)$$

که f_i بسامد و $P_i(f_i)$ ضریب طیف توان سرعت $x(nM)$ است که معادل کاهش در نرخ نمونه‌برداری سیگنال اولیه $x(n)$ با ضریب M است. M عدد صحیح است و $x(n)$ قسمت ابتدایی نگاشت سرعت را نشان می‌دهد. حیدری (۲۰۱۸) نشان داد مقادیر τ_{ps} محاسبه‌شده، وابستگی درخور توجهی به دامنه و محتوای بسامدی ندارند و مشابهت بهتری با بزرگای‌های به دست آمده از روش‌های دیگر مبتنی بر بسامد دارند.

۳ تصحیح اثر ساختگاه در پارامترهای هشدار سریع

جنبش زمین در حوزه زمان اغلب با هم‌میخت سهم چشمه، مسیر و ساختگاه مدل‌سازی می‌شود. هرگاه فاصله بین دو ایستگاه در مقایسه با فاصله رومرکزی کم باشد، نسبت طیف جنبش زمین در ایستگاه دوم $(Z_2(f))$ به ایستگاه اول $(Z_1(f))$ برابر است با (هوشیبا، ۲۰۱۳):

$$\frac{Z_2(f)}{Z_1(f)} \cong \frac{S_2(f)}{S_1(f)} \quad (9)$$

که در آن، $S_1(f)$ و $S_2(f)$ به ترتیب اثر ساختگاه در ایستگاه‌های ۱ و ۲ هستند. تحلیل نسبت‌های طیفی از تعداد زیادی زلزله یک مقدار میانگین $\left| \frac{S_2(f)}{S_1(f)} \right|$ خواهد داد. از این تقریب می‌توان برای ایستگاه‌های سطحی و درون‌چاهی استفاده کرد.

کو و همکاران (۲۰۱۸) اختلاف بزرگ‌های تخمین زده شده از داده‌های شتاب‌نگاری سطحی و درون‌چاهی

رومرکز زمین لرزه‌ها در شکل ۱ و مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین تغییرات سرعت موج P و S در زیر ایستگاه‌ها که از وبگاه رسمی شبکه KiK-net استخراج شده، در شکل ۲ نمایش داده شده است.

محدوده بزرگای گشتاوری M_w زلزله‌ها بین ۳ تا ۵ و فاصله رومرکزی آنها کمتر از ۱۰۰ کیلومتر است. پاسخ دستگاهی شتاب‌نگارهای ایستگاه‌های شبکه KiK-net در سطح و درون چاه یکسان است. بسامد طبیعی این شتاب‌نگارها ۴۵۰ Hz و ضریب میرایی آنها ۰/۷۰۷ است (اوی و همکاران، ۲۰۰۴). شکل موج‌های استخراج شده از قبل با فیلتر پایین‌گذر ۳۰ Hz فیلتر شده‌اند و نرخ نمونه‌برداری ۲۰۰ Hz است.

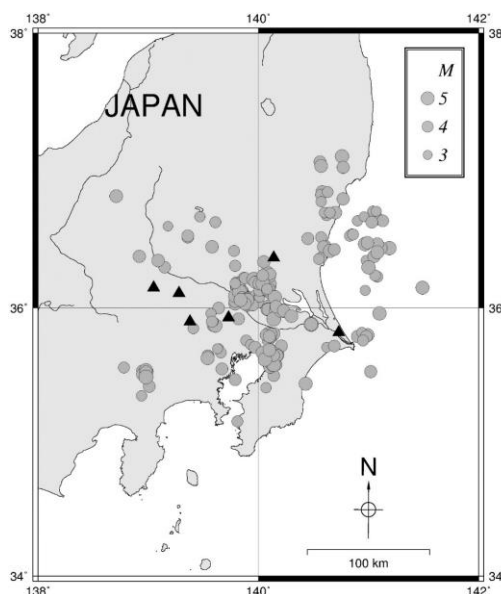
در روش‌های یادشده، نتایج دقیق‌تر و مطمئن‌تری برای سامانه‌های هشدار سریع زلزله ارائه می‌شود. برای حذف اثر ساختگاه از تبدیلات زمان-بسامد (تبدیلات زمان کوتاه فوریه STFT) استفاده خواهد شد.

۴ ناحیه مورد مطالعه و داده‌ها

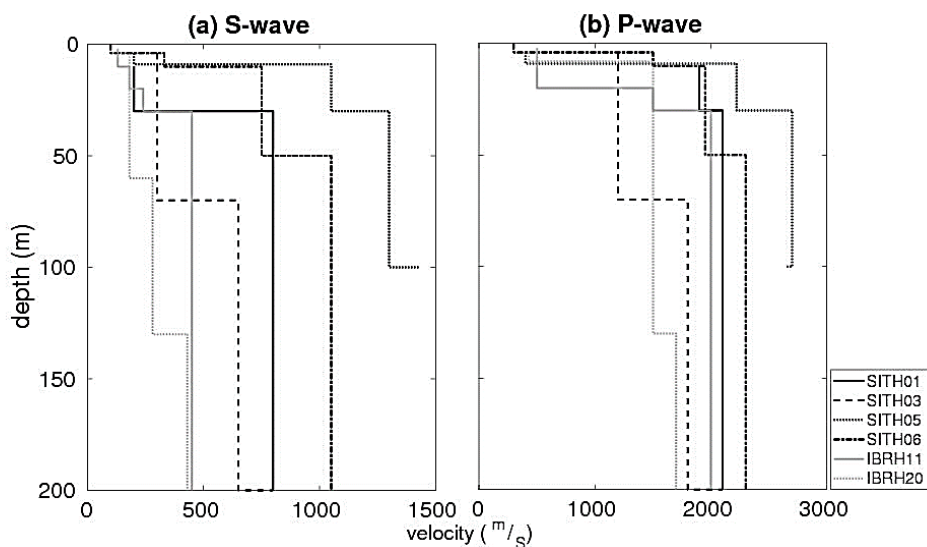
در این مطالعه برای بررسی اثر ساختگاه بر پارامترهای هشدار سریع زمین‌لرزه، از ۱۸۳۰ شتاب‌نگاشت زلزله رخ داده طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۰ ثبت شده در ایستگاه‌های سطحی و درون‌چاهی شش ایستگاه شتاب‌نگاری متعلق به شبکه KiK-net ژاپن (<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>) استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات مکان ایستگاه‌های شتاب‌نگاری مطالعه شده.

ایستگاه	عرض جغرافیایی (°N)	طول جغرافیایی (°E)	ارتفاع (m)	عمق (m)
SITH01	۳۵/۹۲	۱۳۹/۷۳	۸	۳۵۱۰
SITH03	۳۵/۸۹	۱۳۹/۳۸	۵۱	۱۸۰۰
SITH05	۳۶/۱۵	۱۳۹/۰۵	۱۵۰	۱۰۰
SITH06	۳۶/۱۱	۱۳۹/۲۸	۸۰	۲۰۰
IBRH11	۳۶/۳۷	۱۴۰/۱۴	۶۷	۱۰۳
IBRH20	۳۵/۸۲	۱۴۰/۷۳	۶	۹۲۳



شکل ۱. نقشه رومرکز زلزله‌ها (دایره‌های خاکستری) و ایستگاه‌های شتاب‌نگاری (مثلث‌های سیاه) استفاده شده در این مطالعه.



شکل ۲. تغییرات سرعت موج P و S برای شش ایستگاه مطالعه‌شده. برگرفته از وبگاه رسمی شبکه شتاب‌نگاری KiK-net

SITH06 و IBRH11 که بیشترین تغییر سرعت موج P را با عمق دارند، بیشترین مقادیر اثر ساختگاه را نشان داده‌اند. اختلاف سرعت موج P در سطح و درون چاه که ناشی از نوع رسوبات زیرسطحی است، در مقادیر نهایی اثر ساختگاه به‌دست آمده مؤثر است. هرچه این اختلاف بیشتر باشد، مقدار اثر ساختگاه نیز بیشتر می‌شود.

۶ تصحیح اثر ساختگاه روی مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت در ایستگاه سطحی

در این مطالعه با استفاده از ابزار واهمامیخت، اثر ساختگاه در حوزه بسامد از طیف جنبش زمین در ایستگاه سطحی حذف می‌شود؛ یعنی با توجه به مشخص بودن اثر ساختگاه

$S(f)$ و با فرض $S(f) \neq 0$ رابطه زیر برقرار است:

$$Z'(f) = \frac{Z(f)}{S(f)} = \frac{M(f)P(f)S(f)}{S(f)} = M(f)P(f) \quad (10)$$

که $Z(f)$ طیف به‌دست آمده در ایستگاه سطحی است و $M(f)$ و $P(f)$ به ترتیب اثر چشمه و مسیر هستند. به این ترتیب، از $Z'(f)$ که طیف حاصل از واهمامیخت است و اثر ساختگاه از آن حذف شده است، پارامترهای هشدار سریع زلزله به‌دست می‌آید.

۵ روش پژوهش

در این مطالعه برای بررسی تأثیر اثر ساختگاه بر پارامترهای هشدار سریع زمین‌لرزه، شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در ایستگاه‌های سطحی و درون‌چاهی در ژاپن با یکدیگر مقایسه شدند. این شتاب‌نگاشت‌ها پس از تصحیح خط مبنا از یک فیلتر میان‌گذر باتروث (Butterworth) مرتبه ۴ در محدوده بسامدی ۰/۱ تا ۲۰ هرتر عبور داده شدند. پنجره موج P از چهار ثانیه ابتدایی نگاشت انتخاب شد. یک تیپر ۵ درصد کسینوسی برای حذف اعوجاجات ناشی از لبه‌های پنجره زمانی انتخاب شده اعمال شد. سپس نسبت طیفی مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت در سطح و عمق $(V(f)/V_0(f))$ برای همه ایستگاه‌های مورد مطالعه و همه زلزله‌ها اندازه‌گیری شد. این نسبت بیانگر اثر ساختگاه بر مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت است. اثر ساختگاه هموار شده با میانگین‌گیری در بازه بسامدی ۱ Hz برای شش ایستگاه مطالعه‌شده در شکل ۳ نشان داده شده است. برای هر ایستگاه دست‌کم از نگاشت ده زمین‌لرزه استفاده شد که بزرگای گشتاوری آنها در بازه بین ۳ تا ۵ بود. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود ایستگاه‌های SITH05،

شکل ۵ نشان داده شده است. میانگین اختلاف پارامترهای به دست آمده از ایستگاه سطحی و درون چاهی با d و همین مقدار پس از اصلاح اثر ساختگاهی با dm نمایش داده شده است:

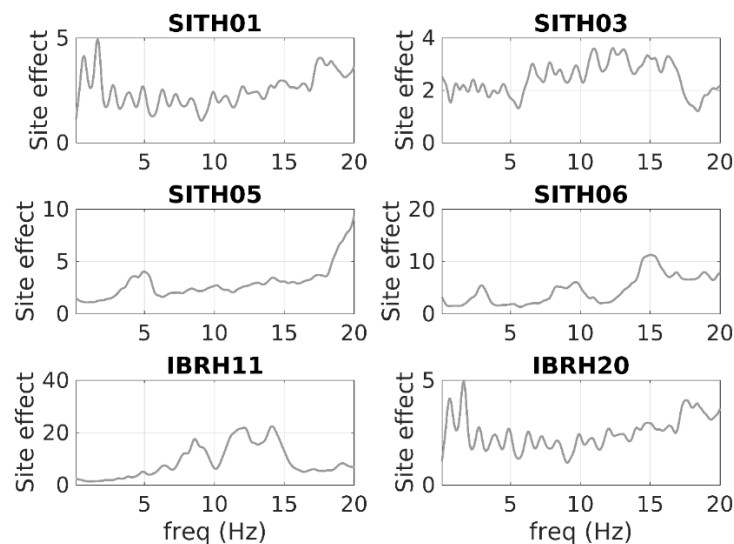
$$d = \overline{X1 - X2}, dm = \overline{X1 - X2m} \quad (11)$$

مقدار پارامتر d منفی به دست آمد (-0.81)؛ بنابراین پارامتر τ_{max}^P در ایستگاه سطحی نسبت به ایستگاه درون چاهی مقدار بیشتری دارد (دایره‌های سیاه). اختلاف مقادیر τ_{max}^P پس از اصلاح اثر ساختگاه در ایستگاه سطحی و درون چاهی کمتر شد ($dm = -0.32$) و مقادیر به سمت خط تساوی تمایل یافتند. با توجه به نتیجه مطالعات گذشته (زیو، ۲۰۱۴ و حیدری، ۲۰۱۸) افزایش مقادیر پارامترهای هشدار سریع وابسته به بسامد باعث می‌شود بزرگ‌تر از مقدار واقعی تخمین زده شود؛ بنابراین با اصلاح اثر ساختگاه انتظار می‌رود در ایستگاه سطحی، مقادیر کمتری برای بزرگ‌تر تخمین زده شود.

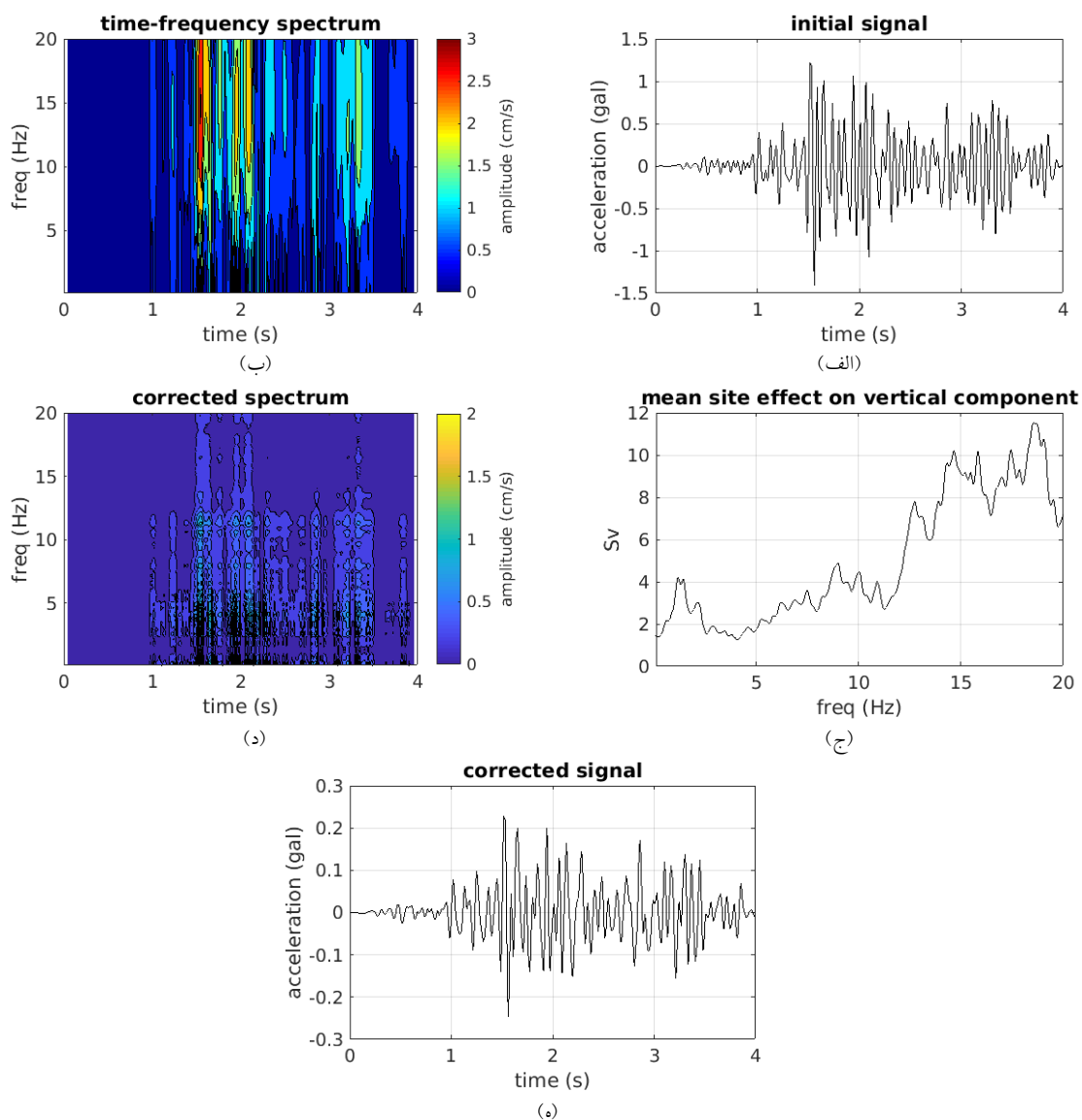
برای نمونه، شکل ۴-الف بخش موج P مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت روی سطح را برای نگاشت زلزله با بزرگای $3/8$ در تاریخ ۹ مه ۲۰۱۰ در ایستگاه SITH06 در فاصله رومرکزی ۵۹ کیلومتر نشان می‌دهد. شکل ۴-ب تبدیل فوریه پنجره کوتاه (STFT) این موج را در حوزه زمان-بسامد نشان می‌دهد. با استفاده از ابزار واهمامیخت، اثر ساختگاه ایستگاه SITH06 (شکل ۴-ج) از طیف زمان-بسامد سیگنال حذف می‌شود. نتیجه حذف اثر ساختگاه در شکل ۴-د نشان داده شده است. سپس سیگنالی که اثر ساختگاهی از روی آن حذف شده است با استفاده از عکس تبدیل فوریه به دست می‌آید (شکل ۴-ه). پارامترهای هشدار سریع زمین‌لرزه، از این سیگنال اصلاح شده به دست می‌آیند.

۱-۶ τ_{max}^P

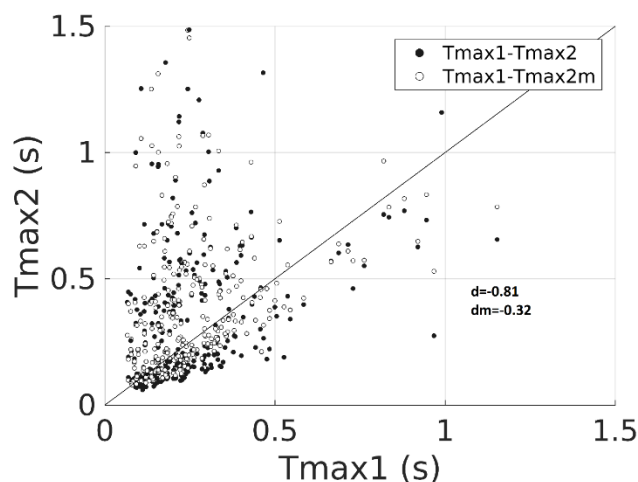
نتایج محاسبه پارامتر هشدار سریع τ_{max}^P از ایستگاه‌های سطحی (T_{max2}) و ایستگاه درون‌چاهی (T_{max1}) در



شکل ۳. اثر ساختگاه هموارشده در مؤلفه قائم شتاب ایستگاه مطالعه‌شده.



شکل ۴. (الف) پنجره موج P در مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت زلزله با بزرگای ۳/۸ در تاریخ ۹ مه ۲۰۱۰ ثبت شده در ایستگاه SITH06 روی حسگر سطحی (ب) تبدیل فوری پنجره کوتاه STFT شتاب‌نگاشت (ج) اثر ساختگاه میانگین برای مؤلفه قائم ایستگاه SITH06 (د) حذف اثر ساختگاه در حوزه زمان-بسامد از نگاشت اولیه (ه) عکس تبدیل فوری و به‌دست‌آوردن شتاب‌نگاشت نهایی که اثر ساختگاه از روی آن حذف شده است.

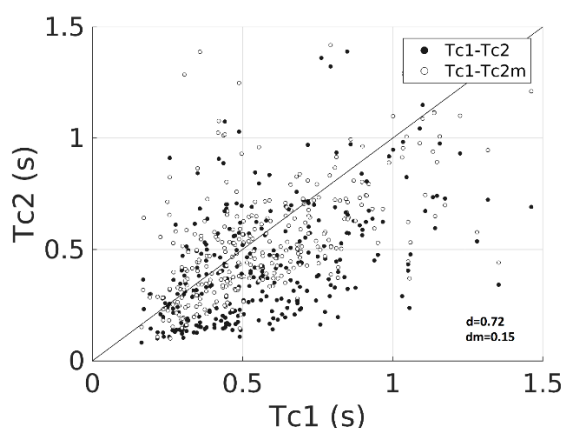


شکل ۵. تغییرات مقادیر T_{max}^P برای ایستگاه درون‌چاهی (T_{max1}) و ایستگاه سطحی (T_{max2}) با دایره‌های سیاه نشان داده شده است. تغییرات مقادیر T_{max}^P در ایستگاه درون‌چاهی (T_{max1}) برحسب مقادیر T_{max}^P پس از اصلاح اثر ساختمان روی مؤلفه سطحی (T_{max2m}) با دایره‌های سفید نشان داده شده است.

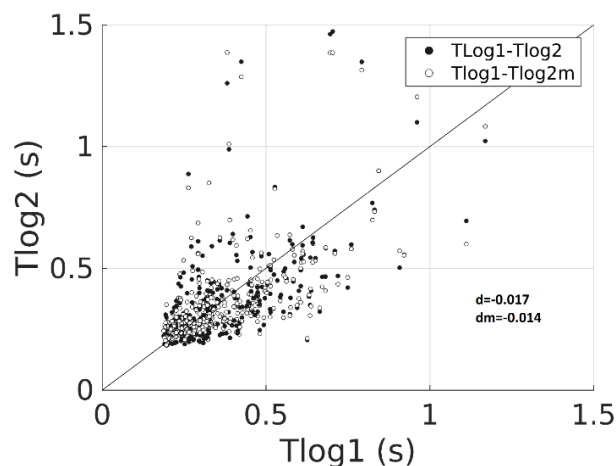
۲-۶ τ_c

پس از اصلاح اثر ساختمان، مقادیر τ_c در ایستگاه سطحی افزایش یافته‌اند و برابری مقادیر τ_c در ایستگاه سطحی و درون‌چاهی بیشتر شده است ($dm = 0.15$). مشاهده می‌شود که مقادیر پارامتر τ_c پس از اصلاح اثر ساختمانی (دایره‌های سفید) به سمت خط تساوی متمایل شده‌اند. با توجه به افزایش این مقادیر پس از اصلاح اثر ساختمان، بزرگ‌گای تخمینی بیشتر خواهد شد.

در شکل ۶ تغییرات مقادیر τ_c در ایستگاه‌های سطحی و درون‌چاهی نشان شده است. در مقایسه با پارامتر T_{max}^P ، بازه تغییرات τ_c بزرگ‌تر است و برخلاف T_{max}^P ، بازه تغییرات پارامتر هشدار سریع زمین‌لرزه در ایستگاه درون‌چاهی گسترده‌تر است. مقادیر τ_c قبل از اصلاح اثر ساختمان در ایستگاه درون‌چاهی بیشتر است ($d = 0.72$).



شکل ۶. تغییرات مقادیر τ_c برای ایستگاه درون‌چاهی ($Tc1$) و ایستگاه سطحی ($Tc2$) با دایره‌های سیاه نشان داده شده است. تغییرات مقادیر τ_c در ایستگاه درون‌چاهی ($Tc1$) برحسب مقادیر τ_c پس از اصلاح اثر ساختمان روی مؤلفه سطحی ($Tc2m$) با دایره‌های سفید نشان داده شده است.



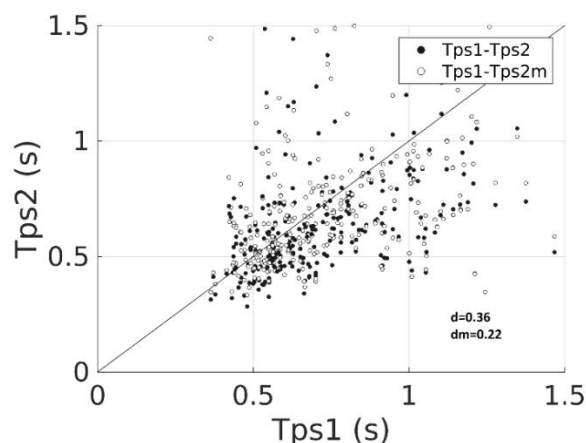
شکل ۷. تغییرات مقادیر τ_{log} برای ایستگاه درون‌چاهی (Tlog1) و ایستگاه سطحی (Tlog2) با دایره‌های سیاه نشان داده شده است. تغییرات مقادیر τ_{log} در ایستگاه درون‌چاهی (Tlog1) برحسب مقادیر τ_{log} پس از اصلاح اثر ساختگاه روی مؤلفه سطحی (Tlog2m) با دایره‌های سفید نشان داده شده است.

۴-۶ τ_{ps}

در شکل ۸ تغییرات پارامتر τ_{ps} در ایستگاه درون‌چاهی (Tps1) و سطحی (Tps2) نشان داده شده است. مشابه پارامتر τ_{log} ، مقادیر τ_{ps} قبل و بعد از اصلاح اثر ساختگاه تغییرات کمی را نشان می‌دهد ($d = 0.36$ و $dm = 0.22$). این پارامتر نیز مشابه τ_{log} چندان متأثر از اثر ساختگاه و ایستگاه سطحی و درون‌چاهی نیست و در بیان مشخصات چشمه زمین‌لرزه، وابستگی کمی به عوامل نزدیک به سطح و ناهمگنی‌ها دارد.

۳-۶ τ_{log}

تغییرات مقادیر τ_{log} در شکل ۷ نشان داده شده است. مقادیر τ_{log} در ایستگاه درون‌چاهی و سطحی روند به‌نسبت یکسانی دارند و نمی‌توان گفت این پارامتر در ایستگاه سطحی با درون‌چاهی تفاوت چشمگیری دارد ($d = -0.017$ و $dm = -0.014$). در این شکل مشاهده می‌شود مقادیر τ_{log} قبل و بعد از اصلاح اثر ساختگاه اختلاف چندانی ندارند و این پارامتر خیلی تحت تأثیر اثر ساختگاه قرار نگرفته است. بازه تغییرات این پارامتر نیز گسترده نیست و نوسان کمتری را در مقایسه با پارامترهای τ_c و τ_{max}^P نشان می‌دهد.

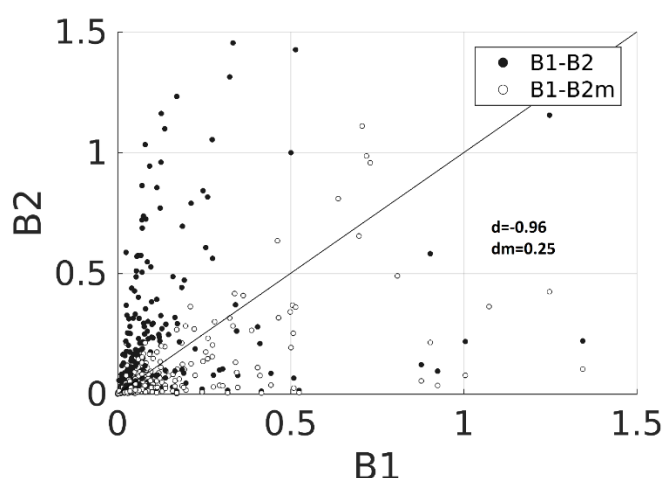


شکل ۸. تغییرات مقادیر τ_{ps} برای ایستگاه درون‌چاهی (Tps1) و ایستگاه سطحی (Tps2) با دایره‌های سیاه نشان داده شده است. تغییرات مقادیر τ_{ps} در ایستگاه درون‌چاهی (Tps1) برحسب مقادیر τ_{ps} پس از اصلاح اثر ساختگاه روی مؤلفه سطحی (Tps2m) با دایره‌های سفید نشان داده شده است.

B ۵-۶

در شکل ۹ تغییرات پارامتر B در ایستگاه درون‌چاهی (B1) و سطحی (B2) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقادیر پارامتر B در ایستگاه سطحی بیشتر از ایستگاه درون‌چاهی است ($d = -0.96$). پس از اصلاح اثر ساختگاهی، مقدار B برای شتاب‌نگاشت‌های روی

سطح (B2m) کاهش می‌یابد ($dm = 0.25$). به این ترتیب مقادیر B برای ایستگاه‌های سطحی و درون‌چاهی به هم نزدیک می‌شود (دایره‌های سفیدرنگ). نتایج ایستگاه سطحی و درون‌چاهی برای این پارامتر هشدار سریع زمین‌لرزه، اختلاف زیادی دارند و اثر ساختگاهی به شدت بر آن تأثیرگذار است.



شکل ۹. تغییرات مقادیر B برای ایستگاه درون‌چاهی (B1) و ایستگاه سطحی (B2) با دایره‌های سیاه نشان داده شده است. تغییرات مقادیر B در ایستگاه درون‌چاهی (B1) برحسب مقادیر B پس از اصلاح اثر ساختگاهی روی مؤلفه سطحی (B2m) با دایره‌های سفید نشان داده شده است.

۷ نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه بهبود پارامترهای هشدار سریع زمین‌لرزه نیازمند شناخت عوامل تأثیرگذار در مقدار آنهاست؛ اثر ساختگاه که پارامتری مؤثر در تفاوت شکل موج امواج ثبت‌شده در ایستگاه سطحی و درون‌چاهی است، در این مطالعه بررسی و پارامترهای هشدار سریع زمین‌لرزه شامل τ_{ps} ، τ_{log} ، τ_c ، τ_{max}^P و درون‌چاهی متعلق به شش ایستگاه شتاب‌نگاری ژاپن مطالعه شد. با توجه به نتایج مشخص شد در حسگر درون‌چاهی، پارامترهای هشدار سریع τ_{ps} و τ_c اغلب بزرگ‌تر هستند. پارامترهای B ، τ_{log} و τ_{max}^P مقادیر بزرگ‌تر را در

حسگر سطحی نشان می‌دهند. با توجه به اختلاف مقادیر این پارامترها در حسگرهای سطحی و درون‌چاهی، نتیجه‌گیری می‌شود پارامترهای اشاره‌شده، از اثر ساختگاهی متأثر هستند. تأثیرات اثر ساختگاه بر این پارامترها با حذف اثر ساختگاه از مؤلفه قائم‌نگاشت سطحی بررسی شد. به این منظور رابطه اثر ساختگاه هر ایستگاه با استفاده از معادله اثر ساختگاه پیشنهادی در این مطالعه محاسبه و مقدار میانگین آن برای هر ایستگاه محاسبه شد. با توجه به نتایج اثر ساختگاه مشخص شد در ایستگاه‌هایی که نسبت سرعت موج P در عمق به سطح بیشتر است، اثر ساختگاه مقادیر بزرگ‌تری را نشان می‌دهد (SITH05، SITH06 و

جناب دکتر قیطانچی و داوران محترم ناشناس سیاست‌گذاریم که با نظرها و پیشنهادهای مفیدشان به پیشرفت مقاله کمک زیادی کردند.

منابع

- Allen, R. M., Gasparini, P., Kamigaichi, O., and Bose, M., 2009, The status of earthquake early warning around the world: An introductory overview: *Seismological Research Letters*, **80**(5), doi:10.1785/gssr1.80.5.682-693.
- Allen, R. M., and Kanamori, H., 2003, The potential for earthquake early warning in Southern California: *Science*, **300**, 786-789.
- Anderson, J., and Hough, S. E., 1984, A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **74**, 1969-1993.
- Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H., 2004, Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net: *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, **4**(3), 65-74.
- Boore, D. M., 2003, Simulation of ground motion using the stochastic method: *Pure and Applied Geophysics*, **160**, 636-676.
- Caprio, M., Lancieri, M., Cua, G. B., Zollo, A., and Wiemer, S., 2011, An evolutionary approach to real-time moment magnitude estimation via inversion of displacement spectra: *Geophysical Research Letters*, **38**, L02301.
- Espinosa-Aranda, J. M., Jimenez, A., Ibarrola, G., Alcantar, F., Aguilar, A., Insotroza, M., and Maldonado, S., 1995, Mexico City seismic alert system: *Seismological Research Letters*, **66**, 42-53.
- Heidari, R., 2018, τ_{ps} a new magnitude scaling parameter for earthquake early warning: *Bulletin of Earthquake Engineering*, **3**, 1165-1177.
- Hoshiba, M., 2013, Real-time correction of frequency-dependent site amplification factors for application to earthquake early warning: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**, 3179-3188.
- Kanamori, H., 1993, Locating earthquakes with amplitude: Application to real-time seismology: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **83**(1), 264-268.
- Kanamori, H., 2005, Real-time seismology and earthquake damage mitigation: *Annual*
- IBRH11). وجود لایه‌های رسوبی کم‌سرعت در سطح، باعث تقویت بیشتر دامنه امواج حجمی عبوری از ساختگاه شده است. جهت حذف اثر ساختگاه از مؤلفه قائم حسگر سطحی، از ابزار واهمامیخت استفاده شد و به این ترتیب شکل موج به گونه‌ای اصلاح شد که اثر ساختگاهی در آن حذف شود. پس از آن، بار دیگر پارامترهای هشدار سریع از شکل موج به دست آمده محاسبه شد.
- در شکل ۶ مشاهده می‌شود τ_c در ایستگاه درون‌چاهی در مقایسه با ایستگاه سطحی بزرگ‌تر است (دایره‌های سیاه توپر)؛ بنابراین بزرگای تخمین زده شده زلزله در ایستگاه سطحی، کمتر از ایستگاه درون‌چاهی است. پس از اصلاح اثر ساختگاهی در ایستگاه سطحی مشاهده می‌شود پارامتر τ_c افزایش یافته و به مقدار به دست آمده از درون چاه نزدیک شده است؛ بنابراین بزرگای تخمین زده شده زلزله در این حالت نیز بزرگ‌تر از حالت قبل است و به مقدار به دست آمده از ایستگاه درون‌چاهی نزدیک‌تر است. این شرایط برای پارامتر هشدار سریع T_{max}^P نیز صادق است.
- با توجه به مقادیر تفاضل میانگین، پارامترهای τ_{log} و τ_{ps} کمترین تأثیر را از اثر ساختگاهی و همچنین ایستگاه‌های سطحی و درون‌چاهی نشان دادند. پارامتر B بیشتر از پارامترهای دیگر به ساختگاه وابسته بود و مقادیر آن پس از اصلاح اثر ساختگاهی کاهش یافت. از نتایج این مطالعه می‌توان دریافت پارامترهای هشدار سریع زمین‌لرزه در مقابل اثر ساختگاه تأثیرپذیری یکسانی ندارند و در استفاده از آنها باید به وابستگی به اثر ساختگاه مرتبط با عوامل نزدیک به سطح توجه داشت.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از مؤسسه تحقیقات ملی علوم زمین و پیشگیری از بلایای ژاپن به دلیل در اختیار قرار دادن داده بسیار قدردانی می‌کنند. همچنین از سردبیر محترم مجله

- Review of Earth Planetary Sciences, **33**(1), 195–214.
- Kuo, C., Wen, K. L., Lin, C. M., Hsiao, N. C., and Chen, D. Y., 2018, Site amplification and the effect on local magnitude determination at stations of the surface-downhole network in Taiwan: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **104**, 106-116.
- Lee, W., and Espinosa-Aranda, J. M., 2002, Earthquake early-warning systems: Current status and perspectives, in Zschau, J., Koppers, A. N., eds., *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*, 409-423.
- Nakamura, Y., 1988, On the Urgent Earthquake Detection and Alarm System (UrEDAS): *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, **VII**, 673–678.
- Nakamura, Y., and B. E. Tucker, 1988, Earthquake warning system for Japan railways' bullet train: implications for disaster prevention in California: *Earthquakes and Volcanoes*, **20**, 140–155.
- Odaka, T., Ashiya, K., Tsukada, S., Sato, S., Ohtake, K., and Nozaka, D., 2003, A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**, 526–532.
- Sarmadi, M. A., Heidari, R., Mirzaei, N., and Siahkoobi, H. R., 2021, A comprehensive study of the Kappa value by borehole and surface strong-motion acceleration records: *Journal of Seismology*, 1-11.
- Shieh, J., Wu, Y., and Allen, R., 2008, A comparison of t_c and t_{max}^p for magnitude estimation in earthquake early warning: *Geophysical Research Letters*, **35**, L20301, doi:10.1029/2008GL035611.
- Spallarossa, D., Kotha, S. R., Picozzi, M., Barani, S., and Bindi, D., 2019, On-site earthquake early warning: a partially non-ergodic perspective from the site effects point of view: *Geophysical Journal International*, **216**(2), 919-934.
- Toksoz, M., Dainty, M., and Bullitt, J., 1990, A prototype earthquake warning system for strike-slip earthquake: *Pure and Applied Geophysics*, **133**, 475-487.
- Wu, Y., and Kanamori, H., 2005, Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**(1), 347–353.
- Wu, Y. M., Hsiao, N. C., Lee, W. H., Teng, T. L., and Shin, T. C., 2007, State of the art and progress in the earthquake early warning system in Taiwan: *Earthquake early warning systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 283-306.
- Yamamoto, S., Rydelek, P., Horiuchi, S., and Wu, C., 2008, On the estimation of seismic intensity in earthquake early warning systems: *Geophysical Research Letters*, **35**, L07302.
- Ziv, A., 2014, New frequency-based realtime magnitude proxy for earthquake early warning: *Geophysical Research Letters*, <https://doi.org/10.1002/2014GL061564>.

Eliminating site effects from surface station records for improving earthquake early warning parameters

Mohammad Ali Sarmadi¹, Reza Heidari^{2*}, Noorbakhsh Mirzaei³ and Hamid Reza Siahkoohi³

¹ Ph.D, Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³ Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 02 April 2021, Accepted: 31 May 2021)

Summary

Earthquake early warning parameters play an important role in issuing of a warning and reducing casualties caused by earthquakes. Site effects are one of the factors that affecting the values of earthquake early warning parameters (τ_{max}^P , τ_c , τ_{log} , τ_{ps} and B). In this study, in order to investigate the site effects on the values of earthquake early warning parameters, 1830 earthquake accelerograms recorded at the six KiK-net accelerometry stations in Japan between 2008 and 2020, were used. These accelerograms were recorded at the surface and borehole stations. Short time Fourier transform (STFT) as well as deconvolution tool were used to remove the site effects from the accelerograms in the time-frequency domain. After removing the site effect from the waveforms of the surface stations, the values of all the earthquake early warning parameters, especially τ_{max}^P , τ_c and B , were improved and became closer to the values obtained from the bedrock. The results show that the early warning parameters τ_{log} and τ_{ps} have the minimal influence from site effects and also behave on surface and borehole stations similarly. In general, the values of the frequency-dependent early warning parameters τ_c and τ_{ps} increase after modifying the site effect on the vertical component. In contrast, the parameters B , τ_{max}^P and τ_{log} were reduced at all stations. After modification of the site effect, the difference between the calculated values of all parameters on the surface and bedrock are decreased, which indicates the improvement of the results of earthquake early warning systems in estimating the earthquake source parameters.

Keywords: Earthquake early warning, site effects, short time Fourier transform, KiK-net

*Corresponding author:

r.heidari61@gmail.com