

بر آورد ضریب کیفیت موج برشی در ناحیه زوج زمین لرزه‌های ۱۳۹۱ اهر - ورزقان با استفاده از داده‌های پس لرزه‌ای

جعفر جاقوری^۱، حسین صادقی^۲ و سید کیوان حسینی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات زمین لرزه‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم؛ مرکز تحقیقات زمین لرزه‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۳ استادیار، مرکز تحقیقات زمین لرزه‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۳

چکیده

ضریب کیفیت موج برشی Q_s از جمله پارامترهای کلیدی یک ناحیه لرزه‌خیز جهت مطالعات زلزله‌شناسی و زلزله‌شناسی مهندسی است. در مطالعه حاضر این ضریب در ناحیه زوج زمین لرزه‌های ۱۳۹۱ اهر - ورزقان با استفاده از روش معکوس تعمیم یافته بر مبنای پنجره امواج برشی حاصل از پس لرزه‌های این دو زمین لرزه بررسی شده است. ۲۸۶۰ رکورد سه مؤلفه‌ای باند پهن و ۵۴۰ رکورد تک مؤلفه‌ای باند کوتاه از ۱۶۵۰ پس لرزه با بزرگی M_c بین ۰/۲ تا ۳/۰ استفاده شد. رکوردها حاصل از ثبت پس لرزه‌ها در مدت ۲۹ روز توسط شبکه لرزه‌نگاری موقت مرکز تحقیقات زمین لرزه‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد در ۵ ایستگاه باند پهن و ۵ ایستگاه دور کوتاه است. از آنجایی که روش معکوس تعمیم یافته برای حذف اثر چشمه به ساختگاه مرجع نیازمند است، انتخاب ساختگاه مرجع با استفاده از نتایج روش نسبت طیفی $(\frac{H}{V})$ در ایستگاه‌های باند پهن و همچنین موقعیت توپوگرافی ایستگاه‌ها انجام شد. وابستگی بسامدی ضریب کیفیت موج برشی در محدوده ۰/۱ تا ۱۰ هرتز مطالعه و به رابطه $Q_s = 43f^{1.52}$ برازش داده شد. این مقدار پایین ضریب کیفیت موج برشی و وابستگی شدید بسامدی را می‌توان به ناهمگنی بسیار زیاد پوسته و لرزه‌خیزی فعال منطقه نسبت داد.

کلیدواژه‌ها: ضریب کیفیت، موج برشی، اهر - ورزقان، پس لرزه، معکوس تعمیم یافته.

* نویسنده مسئول: حسین صادقی

E-mail: sadeghi@um.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

از جمله مطالعات اساسی در زلزله‌شناسی و زلزله‌شناسی مهندسی بررسی چگونگی کاهیدگی دامنه امواج لرزه‌ای حاصل از یک زمین لرزه در حین عبور از زمین است. کاهیدگی امواج لرزه‌ای اطلاعات مهمی را در ارتباط با خصوصیات محیط انتشار موج در اختیار قرار می‌دهد که در تعیین پارامترهای چشمه لرزه‌ای و پیش‌بینی و شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین مورد نیاز است. دامنه امواج لرزه‌ای توسط الگوی انتشار از چشمه زمین لرزه، اثر مسیر، اثر ساختگاه ناشی از زمین‌شناسی نزدیک سطح زمین و توپوگرافی کنترل می‌شود. اثر مسیر در افت انرژی امواج لرزه‌ای را می‌توان به سه عامل اصلی گسترش هندسی، جذب در محیط غیرکشسان و پراکندگی نسبت داد. عامل اول مستقل از بسامد است در حالی که دو عامل دیگر که با ضریب کیفیت Q توصیف می‌شوند، اغلب به بسامد وابستگی دارند. این وابستگی معمولاً به فرم رابطه توانی (رابطه ۱) نشان داده می‌شود (Aki, 1980a):

$$Q(f) = Q_0 f^\alpha \quad (1)$$

که Q_0 و α از برازش مقادیر تخمین زده شده Q در بسامدهای مختلف به دست می‌آید. ضریب کیفیت یک کمیت بدون بعد است که تغییرات شدیدی در لیتوسفر نواحی مختلف زمین دارد. مقدار بالای Q یعنی اینکه دامنه موج، کاهش قابل ملاحظه‌ای با فاصله ندارد، در حالی که مقدار پایین Q به معنای کاهش قابل ملاحظه دامنه امواج با فاصله است. مطالعات متنوعی جهت تعیین ضریب کاهیدگی با استفاده از امواج فشارشی (Q_p)، امواج برشی (Q_s) و امواج کدا (Q_0) انجام شده است (Aki and Chouet, 1975; Aki, 1980b; Yoshimoto et al., 1993). همچنین وابستگی بسامدی ضریب Q در این مطالعات و توسط محققین زیادی در نقاط مختلف جهان مشخص شده است (Sato and Matsumura, 1980; Gupta et al., 1995; Motazedian, 2006). ضریب کیفیت برای انتشار امواج P کمتر از امواج S در لیتوسفر می‌باشد و تقریباً $\frac{Q_p}{Q_s} = 1.5$ به دست می‌آید (Kvamme and Havskov, 1989). مقادیر Q_s و Q_0 اغلب مشابه و نزدیک به هم هستند (Sato et al., 2002). مقاله حاضر ضریب کیفیت امواج برشی (Q_s) را در ناحیه زوج زمین لرزه‌های ۲۱

۲- داده‌ها و روش کار

مرداد ۱۳۹۱ اهر - ورزقان مورد مطالعه قرار داده است. این دو زمین لرزه از جدیدترین وقایع مخرب در پهنه لرزه‌خیز شمال ایران و در البرز غربی هستند که پیش از این شاهد زمین لرزه‌های مخرب و اسفناک متعددی بوده است. روشی که جهت تخمین همزمان اثرات چشمه لرزه‌ای، مسیر و ساختگاه استفاده شده روش وارون طیفی بوده که بر اساس طیف فوریه دامنه حرکت زمین بنا شده است. نخستین بار Andrews (1986) این روش و ضریب گسترش هندسی معادل با اثر مسیر را معرفی کرد اما Iwata and Irikura (1988) با اضافه کردن ضریب کیفیت، آن را بهبود بخشید.

به دنبال وقوع دو زمین لرزه در تاریخ ۲۱ مردادماه ۱۳۹۱، به ترتیب با بزرگی‌های گشتاوری ۶/۵ و ۶/۳ و با فاصله زمانی ۱۱ دقیقه در منطقه اهر - ورزقان در شمال غرب ایران، مرکز تحقیقات زمین لرزه‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد با نصب یک شبکه لرزه‌نگاری موقت متشکل از ۱۰ ایستگاه (۵ ایستگاه باند پهن و ۵ ایستگاه باند کوتاه) در مدت ۲۹ روز از تاریخ ۹۱/۷/۴ تا ۹۱/۸/۳ اقدام به ثبت پس لرزه‌های این زمین لرزه‌ها نمود. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های شبکه موقت لرزه‌نگاری را نسبت به رومرکز پس لرزه‌های ثبت شده نشان می‌دهد. وضعیت زمین‌شناسی سطحی ایستگاه‌ها نیز در جدول ۱ فهرست شده است (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۳). به منظور جداسازی تأثیر هر کدام از سه پارامتر چشمه، مسیر و ساختگاه محلی در نگاشت لرزه‌ای، روش وارون تعمیم یافته معرفی شده توسط Andrews (1986) که در برخی منابع از آن تحت عنوان روش وارون طیفی هم یاد می‌شود، مورد استفاده قرار گرفت. این روش جهت تعیین ضریب کیفیت و اثرات ساختگاهی در مناطق مختلف از جمله در ایران به کار رفته است (Zarean et al., 2008; Zafarani et al., 2012).

دامنه حرکت زمین حاصل از یک زمین لرزه به صورت کانولوشن اثر منبع، اثر مسیر و اثر ساختگاه در حوزه زمان است که در حوزه بسامد به صورت حاصلضرب هر یک از این اثرات در یک سیستم خطی مستقل از زمان می‌باشد (رابطه ۲):

$$A_{ij}(f) = S_i(f) G_j(f) P_{ij}(f) \quad (2)$$

فاصله کانونی رکوردهای مورد استفاده بین ۱/۳ تا ۴۱ کیلومتر است. اولین مرحله انتخاب پنجره موج برشی می‌باشد. پنجره موج برشی از زمان اولین رسید موج S تا زمان دو برابری سیر موج S انتخاب شد که شروع امواج کدا بر مبنای الگوریتم Rautian and Khalutrin (1978) است. با اعمال تیر کسینوسی ۵٪ دو انتهای پنجره سیگنال مورد نظر هموار می‌شود و به صفر میل می‌کند و خطای ناشی از برش قسمتی از نداشت کاهش می‌یابد (Yefei et al., 2013).

مرحله بعد تهیه طیف دامنه فوریه و اعمال فیلتر میان گذر با توجه به نسبت سیگنال به نویز (بزرگ‌تر از ۳) و بسامد گوشه در هر طیف است. اگر چه برای کاهش اثر ساختگاه تمام ایستگاه‌ها در محل‌های سنگی و سخت نصب شدند (جدول ۱). با این وجود برای انتخاب یک ایستگاه به عنوان مرجع، از روش نسبت طیف افقی به قائم استفاده شد.

برای تخمین پارامترهای مجهول، وارون‌سازی به صورتی اجرا می‌شود که خطای $|Gm=d|^2$ کمینه شود که در اینجا از روش کمترین مربعات به صورت $m=(G^T G)^{-1} G^T d$ با استفاده از تجزیه مقادیر منفرد استفاده شد (Menke, 1984). انحراف معیار (σ) پارامترهای مدل به وسیله درایه‌های قطری ماتریس کواریانس از $cov(m)=\sigma^2 [G^T G]^{-1}$ قابل محاسبه است. (Field and Jacob (1995) درستی این روش را جهت تخمین اثرساختگاهی بررسی کرده‌اند. از میان مجموعه پس‌لرزه‌های ثبت شده، نداشت‌های مربوط به ۱۶۵۰ پس‌لرزه با بزرگی بین ۰/۲ تا ۳/۰ پردازش شدند که تعیین محل آنها حداقل توسط چهار ایستگاه به انجام رسیده بود. در این مرحله ایستگاه SP2 به علت نداشتن نداشت لرزه‌ای از فهرست پردازش ایستگاه‌های مورد مطالعه خارج شد. ۲۸۶۰ رکورد سه مؤلفه‌ای از ۵ ایستگاه باند پهن و ۵۴۰ رکورد تک مؤلفه‌ای از ۴ ایستگاه باند کوتاه مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱- موقعیت و لیتولوژی ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری موقت مرکز تحقیقات زمین لرزه‌شناسی (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۳).

ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع (متر)	سنگ‌شناسی
BB1	۴۶/۵۵۴۶۶	۳۸/۵۱۷۳۶	۱۸۲۰	گنگلومرا
BB2	۴۶/۹۳۳۰۰	۳۸/۵۴۷۵۲	۱۶۹۶	آندزیت
BB3	۴۶/۹۹۳۵۱	۳۸/۳۳۰۵۲	۱۸۶۳	مارن و سیلتستون
BB4	۴۶/۵۳۶۰۳	۳۸/۳۴۲۳۰	۲۲۶۰	ماسه‌سنگ
BB5	۴۶/۶۹۸۶۱	۳۸/۴۲۱۴۵	۱۹۱۰	گنگلومرای آتشفشانی
SP1	۴۶/۵۹۲۰۴	۳۸/۴۴۰۳۵	۲۱۰۰	توف و برش آتشفشانی
SP2	۴۶/۷۶۸۱۹	۳۸/۴۷۹۶۳	۲۰۶۴	بازالت
SP3	۴۶/۸۴۴۸۴	۳۸/۴۳۰۹۳	۱۷۵۴	مارن ماسه‌ای
SP4	۴۶/۸۵۹۳۶	۳۸/۳۹۴۷۴	۱۶۹۲	شیل
SP5	۴۶/۶۴۷۹۲	۳۸/۳۳۲۷۵	۱۷۷۴	ماسه‌سنگ و گنگلومرا

به صورت ریشه میانگین مربعات دامنه طیفی دو مؤلفه افقی برای ایستگاه‌های باند پهن و مؤلفه قائم برای ایستگاه‌های باند کوتاه نسبت به دامنه طیفی مؤلفه قائم ساختگاه مرجع به دست می‌آید.

۳- بحث

با بهره‌گیری از نسبت طیف افقی به قائم $(\frac{H}{V})$ ، ایستگاه باند پهن BB2 که پاسخ ساختگاهی تقریباً ثابتی را در محدوده تمام بسامدها نشان می‌دهد، به عنوان ایستگاه مرجع انتخاب شد (شکل ۳). این ویژگی جهت انتخاب ایستگاه مرجع در مطالعات دیگر نیز استفاده شده است (Ren et al., 2013). از طرفی اثر توپوگرافی در تقویت دامنه امواج کاملاً مشاهده شده است. به طوری که بیشترین تقویت در نقاط بالای دامنه و کمترین تقویت در نقاط پست می‌باشد (Wang et al., 2018). جدول ۱ نشان می‌دهد که در میان ایستگاه‌ها، ایستگاه BB2 کمترین ارتفاع را از سطح دریا دارد و از این نظر هم می‌تواند ایستگاه مناسبی به عنوان مرجع باشد.

پس از بازسازی معادله ۶ با استفاده از طیف دامنه موج برشی، مسئله وارون خطی در ۱۰۰ نقطه در محدوده بسامدی ۰/۱ تا ۱۰ هرتر حل شد. کاهش‌گی ناشی از گسترش هندسی امواج S در ناحیه مورد مطالعه با توجه به فاصله کانونی کم پس‌لرزه‌ها در مقایسه با دو برابری عمق موهو (Hermann and Kijko, 1983)، به صورت تک‌مقدار $(\frac{1}{R_{ij}})$ در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه تعداد پارامترهای مجهول بسیار

نسبت طیف افقی به قائم (H/VS) یا به عبارت دیگر روش تک‌ایستگاهی توسط Nakamura (1989) به صورت رابطه ۷ معرفی و استفاده از آن در تخمین اثرات ساختگاهی به خصوص در تفسیر رکوردهای حاصل از نویز لرزه‌ای محیطی (میکروتومور) و در مناطق با نرخ لرزه‌خیزی پایین کاملاً فراگیر شده است:

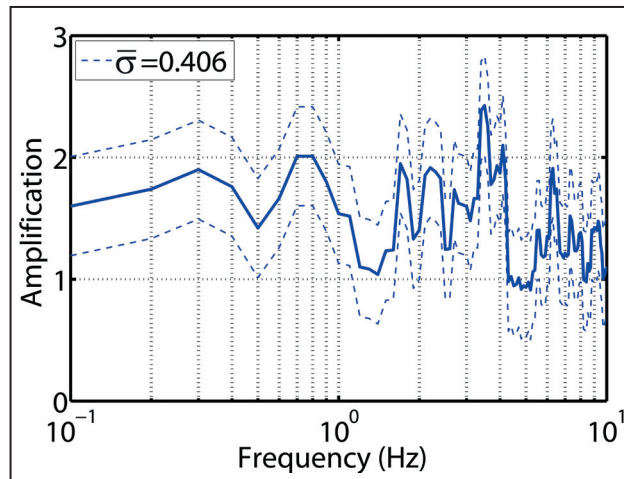
$$HVS_{ij}(f_k) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{NS_{ij}(f_k)^2 + EW_{ij}(f_k)^2}{V_{ij}(f_k)}} \quad (7)$$

در این رابطه EW ، NS و V به ترتیب دامنه طیفی حرکت زمین در مؤلفه‌های افقی شمال-جنوب و شرق-غرب و مؤلفه قائم هستند. روش ناکامورا امروزه در پردازش داده‌های جنبش ضعیف و همچنین نیرومند به کار می‌رود. ولی باید توجه داشت که این روش در بسامدهای بالا به علت آلوده شدن مؤلفه قائم در اثر عوامل انتشار موج همچون فازهای چندگانه انعکاس و فازهای تبدیلی ناشی از هندسه بستر، کارایی کافی را ندارد. در صورتی که خصوصیات زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه ساده باشد، در محدوده بسامدی ۰/۳ تا ۱۰ هرتر نتایج حاصل قابل اعتماد خواهند بود (Lermo and Chavez-Garcia, 1993).

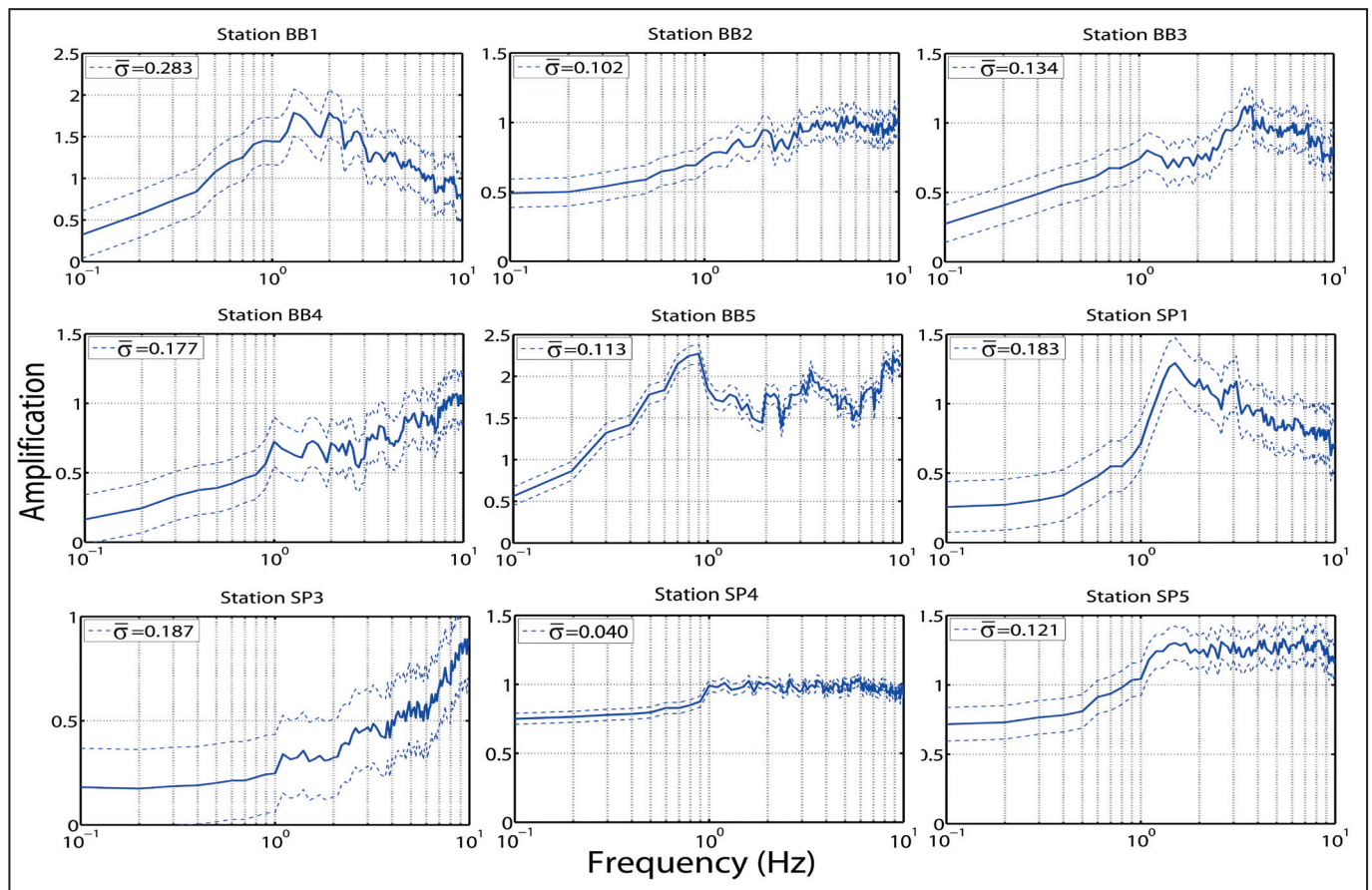
با توجه به اینکه تنها ۵ ایستگاه باند پهن ۳ مؤلفه‌ای هستند، استفاده از روش نسبت طیفی برای انتخاب ایستگاه مرجع محدود به این ایستگاه‌ها می‌شود. پس از انتخاب ایستگاه مرجع، بردار معلومات (d) در معادله ۶ از نسبت دامنه طیفی پنجره موج برشی،

موقت لرزه‌نگاری نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود به علت قرارگیری ایستگاه‌ها بر روی ساختمان‌های سخت و سنگی میزان تقویت دامنه امواج ناشی از ساختمان محلی ناچیز و به جز در محل ایستگاه BB5 کمتر از ۲ است. تغییرات شدید تقویت در بسامدهای کمتر از ۱ هرتز می‌تواند به علت اثر الگوی انتشار از چشمه باشد. وابستگی بسامدی الگوی انتشار توسط مطالعات متعددی تحلیل شده است (Takemura et al., 2009).

کمتر از تعداد معادلات خطی است، یک مسئله فرامعین وجود خواهد داشت. این قبیل مسائل معمولاً حل دقیقی ندارند و با وارون‌سازی مسئله، پارامترهای مجهول طوری تخمین زده می‌شوند که کمترین خطا بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی به دست آید. ضرایب بزرگنمایی ساختمان در ۹ ایستگاه و همچنین ضریب کیفیت موج برشی در محدوده بسامدی ۱ تا ۱۰ هرتز به طور همزمان تعیین شد. شکل ۴ طیف اثرات ساختمانی را در محل ایستگاه‌های



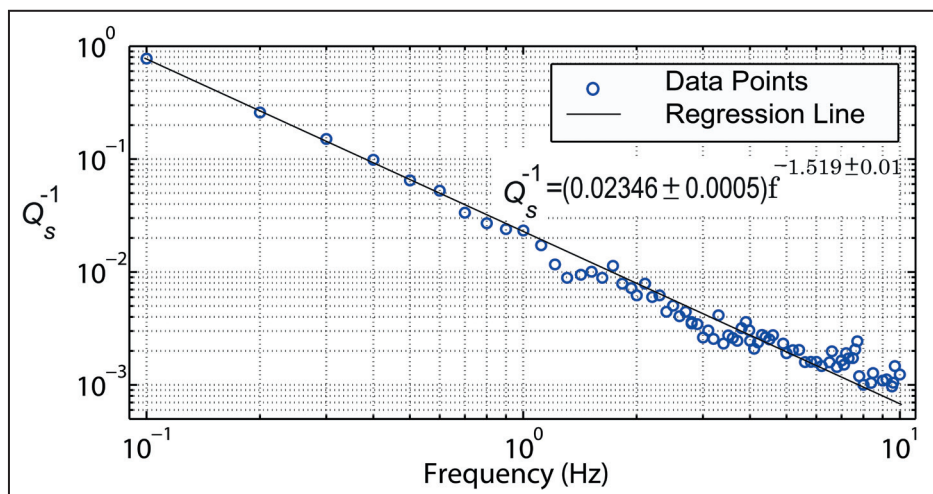
شکل ۳- نسبت طیفی ($\frac{H}{V}$) در ایستگاه BB2 به عنوان ایستگاه مرجع.



شکل ۴- نتایج اثر ساختمانی در محل ایستگاه‌های شبکه موقت لرزه‌نگاری حاصل از روش وارون طیفی.

را در ضریب کیفیت وابسته به بسامد ایفا می‌نماید. ضریب کیفیت وابسته به بسامد برای بسامدهای بالای ۱ هرتز از قانون توانی رابطه ۱ تبعیت می‌کند. در این رابطه Q_0 مقدار Q در بسامد ۱ هرتز است که ناهمگنی محیط را نشان می‌دهد و ثابت α در ارتباط با فعالیت تکتونیکی و لرزه‌خیزی ناحیه است (Singh and Herrman, 1983; Kvamme and Havskov, 1989; Ambeh and Fairhead, 1989). فعال مقادیر پایین‌تر Q_0 و بالاتر α را نسبت به نواحی پایدار (craton) نشان می‌دهند (Aki, 1980b; Benz et al., 1997; Mandal and Rastogi, 1998).

در شکل ۵ ارتباط لگاریتمی بین Q_s^{-1} محاسبه شده با بسامد دیده می‌شود. برازش خطی رابطه وابستگی بسامدی ضریب کیفیت امواج برشی را در ناحیه مورد مطالعه به صورت $Q_s = 43f^{1.52}$ نشان می‌دهد.



شکل ۵- رابطه بسامدی ضریب کیفیت که با پیروی از قانون توانی به داده‌های تخمین زده شده از روش وارون طیفی برازش شده است.

زده است، این تخمین همخوانی خوبی با تابع کیفیت موج برشی برای پهنه لرزه‌خیز شمال ایران دارد که توسط Motazedian (2006) به صورت $Q_s = 87f^{1.46}$ ارائه شده است. همچنین در نواحی پیرامون گسل تبریز که در غرب البرز و نزدیک به ناحیه زمین‌لرزه اهر- ورزقان قرار دارد، رابطه ضریب کیفیت $Q_c = 49f^{1.32}$ توسط نقوی و همکاران (۱۳۹۵) به دست آمده است. آنها علت این کاهش را ناهمگنی زیاد و جریان گرمایی گشته بالایی در پهنه لرزه‌خیز گسل شمال تبریز و نواحی پیرامون آن معرفی می‌کنند.

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر وابستگی بسامدی ضریب کیفیت موج برشی برای ناحیه زوج زمین‌لرزه‌های ۱۳۹۱ اهر- ورزقان به صورت رابطه $Q_s = 43f^{1.52}$ به دست آمده است. مقادیر تخمین زده شده برای $Q_0 (=43)$ و $\alpha (=1.52)$ به ترتیب پایین‌تر و بالاتر از میانگین مقادیر به دست آمده برای مناطق فعال لرزه‌خیز در جهان هستند. این نتیجه بیانگر ناهمگنی بسیار زیاد لیتوسفر در زیر ناحیه زمین‌لرزه‌های اهر- ورزقان و فعالیت بسیار بالای تکتونیکی است. محدوده تغییرات Q_s در بازه بسامدی ۱ تا ۱۰ هرتز از ۴۳ تا ۱۴۲۴ است. مقادیر پایین Q_s در بسامدهای پایین به معنای کاهش قابل توجه دامنه و افت شدید انرژی لرزه‌ای با فاصله است که آن را می‌توان با احتمال حضور سنگ‌های نرم و داغ تفسیر کرد.

(Hanks and McGuire 1981) نشان دادند اثر الگوی انتشار در دامنه بسامدهای بالا برای زمین‌لرزه‌های کوچک ناچیز است. افزون بر این، در این مطالعه فرض شد که اثر الگوی انتشار چشمه در تقویت و تضعیف دامنه‌ها در مجموعه داده‌هایی که با آزمون و زاویه پرتاب متفاوت ثبت شده‌اند، میانگین‌گیری و حذف شده است. فرض مذکور در صورتی که چشمه‌های لرزه‌ای به صورت یکنواخت در اطراف ایستگاه‌ها توزیع شده باشند و یا توزیع ایستگاه‌ها اطراف چشمه‌های لرزه‌ای یکنواخت باشد در فرایند وارون‌سازی به جا خواهد بود. ولی در صورت عدم یکنواختی کامل توزیع آزمون‌های و زاویه پرتاب، الگوی انتشار در بسامدهای پایین به خصوص پایین‌تر از ۱ هرتز تأثیر خود را خواهد داشت (Takemura et al., 2009). در محدوده بسامدی بالاتر از ۱ هرتز یک تقویت تقریباً یکنواخت در نتایج به دست آمده است که مهم‌ترین سهم

با توجه به اینکه مقدار Q_0 برای نواحی لرزه‌خیز کمتر از ۲۰۰ بوده (Aki and Chouet, 1975) و α برای اکثر مناطق فعال حدود ۱ است (Mandal and Rastogi, 1998)، بنابراین نتیجه به دست آمده معرف ناهمگنی بسیار زیاد و فعالیت تکتونیکی بسیار بالای پهنه در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. انحراف معیار کم در برازش انجام شده می‌تواند بیانگر تغییرات کم مقدار Q به صورت جانبی و یا در فواصل کانونی مختلف با توجه به داده‌های مورد بررسی باشد. نتایج مطالعه (Zafarani et al. 2012) نیز به انحراف معیار بسیار کمتر ضریب کیفیت موج برشی برازش شده در غرب البرز نسبت به شرق آن اشاره دارد. جهت بررسی قابلیت صحت نتایج به دست آمده مقایسه‌ای با برخی از مطالعات انجام شده در البرز و شمال ایران انجام شد. در این مقایسه با توجه به مشابهت و نزدیکی Q_c و Q_s (Aki, 1980b) از مقادیر هر دو ضریب کیفیت استفاده شده است. (Rahimi et al. 2010) علاوه بر مشاهده تغییرات جانبی کم در Q_c ، میانگین ضریب کیفیت امواج کدا برای ناحیه البرز را به صورت $Q_c = 79f^{1.07}$ تخمین زدند. در مطالعه نقوی و همکاران (۱۳۹۵) ضریب کیفیت امواج کدا برای شمال غرب ایران از رابطه بسامدی $Q_c = 147f^{1.08}$ پیروی می‌کند. (Zafarani et al. 2012) و قاسمی و همکاران (۱۳۸۴) ضریب کیفیت موج برشی را به ترتیب $Q_s = 116f^{0.67}$ برای غرب البرز و $Q_s = 90f^{0.74}$ برای شمال ایران ارائه کردند. اگر چه در مقایسه با این مطالعات، رابطه بسامدی ارائه شده در مطالعه حاضر به طور مشخصی Q_0 پایین‌تر و α بالاتر و در نتیجه تضعیف به مراتب بالاتری را تخمین

کتابنگاری

سلطانی، ت.، حسینی، س. ک. و صادقی، ح.، ۱۳۹۳- بررسی پس‌لرزه‌های زلزله ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر- ورزقان و معرفی گسل مسیب آن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مرکز تحقیقات زمین‌لرزه‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

قاسمی، ه.، کمالیان، ن.، حمزه‌لو، ح. و بیت‌اللهی، ع.، ۱۳۸۴- تعیین فاکتور کیفیت امواج برشی مستقیم، Q_p ، در منطقه البرز به کمک داده‌های میدان نزدیک حرکت نیرومند زمین لرزه کجور در محدوده بسامدی ۱ تا ۳۲ هرتز، مجله فیزیک زمین و فضا، ۱۰۳، صص. ۱۱۲ تا ۱۳۱.

نقوی، م.، رحیمی، ح. و مرادی، ع.، ۱۳۹۵- تعیین ضریب کیفیت امواج کدا در پهنه شمال باختری فلات ایران، مجله علوم زمین، ۱۰۰، صص. ۲۷۱ تا ۲۸۰.

References

- Aki, K. and Chouet, B., 1975- Origin of coda waves: Source, attenuation, and scattering effects, *Journal of Geophysical Research*, 80: 3322- 3342.
- Aki, K., 1980a- Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 21: 50- 60.
- Aki, K., 1980b- Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere, *Journal of Geophysical Research*, 85: 6496- 6504.
- Ambeg, B. and Fairhead, J. D., 1989- Coda-Q Estimates in the Mount Cameroon Volcanic Region, West Africa, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79: 1589- 1600.
- Andrews, D. J., 1986- Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, in *Earthquake Source Mechanics*. Shamita, D., Boatwright, D. and Scholtz, C. H. (Editors), American Geophysical Union, Washington, D.C., 6, pp. 259- 267.
- Benz, H., Frankel, A. and Boore, D., 1997- Regional Lg attenuation in the continental United States, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87: 600- 619.
- Dutta, U., Biswas, N., Martirosyan, A., Papageorgiou, A. and Kinoshita, S., 2003- Estimation of earthquake source parameters and site response in Anchorage, Alaska from strong motion network data using generalized inversion method. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 137: 13- 29.
- Field, E. H. and Jacob, K. H., 1995- A comparison and test of various site response estimate techniques, including three are non reference-site dependent, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85: 1127-1143.
- Gupta, S. C., Singh, V. N. and Kumar, A., 1995- Attenuation of coda waves in the Garhwal Himalaya, India, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 87: 247- 253.
- Hanks, T. C. and McGuire, R. K., 1981- The character of high frequency strong ground motion *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71: 2071- 2095.
- Havskov, J. and Ottemöller, L., 2010- *Routine Data Processing in Earthquake Seismology, With Sample Data, Exercises and Software*. Springer.
- Herrmann, R. B. and Kijko, A., 1983- Modeling some empirical vertical component Lg relations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75: 157- 171.
- Iwata, T. and Irikura, K., 1988- Source Parameters of the 1983 Earthquake Sequence”, *Journal of Physics of the Earth*, 36: 155- 184.
- Kvamme, L. B. and Havskov, J., 1989- Q in southern Norway. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79: 1575- 1588.
- Lermo, J. and Chavez- Garcia, F. J., 1993- Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin Seismological Society of America*, 83: 1574- 1594.
- Mandal, P. and Rastogi, B. K., 1998- A frequency-dependent relation of coda Q_c for Koyna-Warna region, India, *Pure and Applied Geophysics*, 153: 163- 177.
- Menke, W., 1984- *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*, Academic Press, New York.
- Motazedian, D., 2006- Region-Specific Key Seismic Parameters for Earthquakes in Northern Iran, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96: 1383- 1395.
- Nakamura, Y., 1989- A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report Railway Tech. Res. Inst.* 30 (1): 25- 30.
- Rahimi, H., Motaghi, K., Mukhopadhyay, S. and Hamzehloo, H., 2010- Variation of coda wave attenuation in the Alborz region and central Iran. *Geophysical Journal International*, 181: 1643- 1654.
- Rautian, T. G. and Khalturin, V. I., 1978- The use of the coda for determination of the earthquake source spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68: 923- 948.
- Ren, Y. F., Wen, R. Z., Yamanaka, H. and Kashima, T., 2013- Site effects by generalized inversion technique using strong motion recordings of the 2008 Wenchuan earthquake, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 12: 165- 184.
- Sato, H. and Matsumura, S., 1980- Q-1 value for S-waves under the Kanto district in Japan, *Zisin*, 33: 541- 543.
- Sato, H., Fehler, M. and Wu, R., 2002- Scattering and attenuation of seismic waves in the lithosphere. *International handbook of earthquake and engineering seismology*. Academic Press, San Diego, 81A, pp. 195- 208.
- Singh, S. and Herrman, R. B., 1983- Regionalization of Crustal Coda Q in the Continental United States, *Journal of Geophysical Research*, 88: 527- 538.
- Takemura, S., Furumura, T. and Saito T., 2009- Distortion of the apparent S-wave radiation pattern in the high-frequency wavefield: Tottori-Ken Seibu, Japan, earthquake of 2000, *Geophysical Journal International*, 178: 950- 961.
- Wang, H., Yefei R. and Ruizhi W., 2018- Source parameters, path attenuation and site effects from strong-motion recordings of the Wenchuan aftershocks (2008–2013) using a non-parametric generalized inversion technique, *Geophysical Journal International*, 212: 872- 890.
- Yefei, R., Ruizhi, W., Yamanaka, H. and Kashima, T., 2013- Site effects by generalized inversion technique using strong motion recordings of the 2008 Wenchuan earthquake, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 12: 166- 184.
- Yoshimoto, K., Sato, H. and Ohtake, M., 1993- Frequency dependent attenuation of P and S waves in the Kanto area, Japan, based on the coda normalization method, *Geophysical Journal International*, 114: 165- 174.
- Zafarani, H. , Hassani, B. and Ansari, A., 2012- Estimation of earthquake parameters in the Alborz seismic zone, Iran using generalized inversion method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 42: 197- 218.
- Zarean, A., Sadeghi, H. and Haghshenas, E., 2008- Estimation of Site Response and Q_s Factor in the Khorasan Seismic Network Using Inversion Method, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 10(2): 101- 107.

Estimation of shear wave quality factor in the region of the 2012 Ahar-Varzaghan twin earthquakes using aftershock data

J. Jaghouri¹, H. Sadeghi^{2*} and S. K. Hosseini³

¹M. Sc., Earthquake Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

²Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science; Earthquake Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³Assistant Professor, Earthquake Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 2018 August 12

Accepted: 2019 February 12

Abstract

The shear wave quality factor Q_s is one of the key parameters for earthquake and engineering seismology studies. In the present study, this factor was investigated in the region of the 2012 Ahar-Varzaghan twin earthquakes. We used a generalized inverse method based on the shear wave windows of the aftershocks of these two earthquakes. 2860 records of broadband three-components and 540 records of short-period single-component from 1,650 aftershocks with a magnitude of $M_c = 0.2$ to 3.0 were used. The records of the aftershocks obtained within 29 days by a temporal seismic network by the Earthquake Research Center - Ferdowsi University of Mashhad at five broad-band and five short-period stations. Since the generalized inverse method needs a reference site to remove the source effect, the choice of the reference site was done using the results of the H/V spectral ratio method at the broad-band stations, as well as the topographic location of the stations. The frequency dependence of the Q_s was regressed in the range of 0.1 to 10 Hz and as $Q_s = 43f^{1.52}$. This low Q_s value and high frequency-dependency can be attributed to the high heterogeneity of the crust and the active seismicity of the region.

Keywords: Quality factor, Shear wave, Ahar-Varzaghan, Aftershocks, Generalized inverse.

For Persian Version see pages 123 to 128

*Corresponding author: H. Sadeghi; E-mail: sadeghi@um.ac.ir