

تغییرات جانبی ضریب کیفیت امواج کدا قبل و بعد از زلزله بزرگ کوماموتو (Mw7.3) ژاپن

مریم صفاری^۱، مجید معهود^{۲*} و رضاحیدری

^۱دانشجوی دکتری، گروه علوم زمین، دانشگاه علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
^۲استادیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
^۳استادیار، گروه علوم زمین، دانشگاه علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۷)

چکیده

کمیت‌های سرعت انتشار و کاهندگی امواج لرزه‌ای، از پارامترهای فیزیکی مهمی هستند که نحوه انتشار امواج زمین‌لرزه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بررسی دو پارامتر برای تعیین دقیق پارامترهای چشمه زمین‌لرزه و نیز کاهش خطر زمین‌لرزه ضروری هستند. در مطالعه حاضر، تغییرات جانبی زمانی کاهندگی امواج کدا قبل و بعد از زلزله کوماموتو با بزرگای ۷/۳ در منطقه کوماموتو ژاپن مورد بررسی قرار گرفته است. تخمین کاهندگی امواج کدا با استفاده از ۴۷۴ زلزله محلی ثبت شده در ۳۰۶ ایستگاه لرزه‌نگاری با روش تک پراکنش به عقب صورت گرفت. فاصله رومرکزی داده‌ها بین ۱ تا ۲۰۰ کیلومتر و بزرگای بین ۲/۵ تا ۵/۵ است. سپس منطقه مورد مطالعه به بلوک‌هایی با ابعاد $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ درجه تقسیم‌بندی شد و ضریب کیفیت در فرکانس یک هرتز و در زمان گذشت ۳۰ ثانیه برای کل منطقه محاسبه شد. کمترین مقدار ضریب کیفیت حاصل برابر با ۵۲ و بیشترین مقدار برابر با ۲۰۰ است. نتایج نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه از نظر تکونیک به شدت فعال است و نرخ لرزه‌خیزی بالایی دارد. تغییرات جانبی ضریب کیفیت نشان می‌دهند که با دور شدن از کانون زلزله اصلی کوماموتو، ضریب کیفیت افزایش می‌یابد. دلیل این گونه رفتار را می‌توان در خردشدگی سنگ‌ها به دلیل زلزله‌های متعدد، اشباع‌شدگی رسوبات از سیالات و افزایش ناهمگنی در نزدیکی رومرکز زلزله دانست. بررسی مقادیر ضریب کیفیت قبل و بعد از زلزله اصلی، بیانگر کاهش این پارامتر بعد از وقوع زمین‌لرزه است. بعد از زلزله اصلی، تعداد زلزله‌های رخ داده (پس‌لرزه) در منطقه افزایش پیدا می‌کند. افزایش زلزله در منطقه باعث افزایش شکستگی و خردشدگی سنگ‌ها و همچنین اشباع‌شدگی رسوبات می‌شود و در نتیجه کاهش ضریب کیفیت را به همراه دارد. وجود ناهمگنی‌های زیاد موجود در منطقه به دلیل تعداد زیاد زلزله‌ها و شکستگی فراوان بیانگر این موضوع است که قسمت اعظم این کاهندگی ناشی از پراکنش است.

واژه‌های کلیدی: زلزله کوماموتو، کاهندگی، موج کدا، تغییرات جانبی، تغییرات زمانی

۱ مقدمه

کاهندگی (Q^{-1}) یکی از مهم‌ترین خصوصیات امواج لرزه‌ای است که می‌تواند اطلاعات مهمی چون میزان لرزه‌خیزی و ناهمگنی درون پوسته و گوشته فوقانی را فراهم کند (اکی، ۱۹۸۰). سازوکار کلی کاهندگی نسبت به تغییرات فشار و درجه حرارت حساس است و این به معنی این است که Q به صورت تابعی از فشار و درجه حرارت در درون زمین تغییر می‌کند (لی و والاس، ۱۹۹۵). این پارامتر در تحقیقات زلزله‌شناسی مهندسی مانند شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین بررسی ممان و بزرگی زلزله، تعیین روابط کاهندگی و نیز دیگر پژوهش‌های زلزله‌شناسی مانند بررسی تغییرات درونی زمین، برآورد کاهندگی امواج زمین‌لرزه حائز اهمیت است (کومار، ۲۰۰۵). بنابراین، تخمین میرایی موج لرزه‌ای به طور گسترده‌ای برای بررسی مکانیسم منبع زمین لرزه‌ها، تجزیه و تحلیل خطر لرزه‌ای و لرزه‌شناسی مهندسی استفاده شده است (هرمن، ۱۹۸۳؛ چین و اکی، ۱۹۸۸؛ رحیمی و حمزه‌لو، ۲۰۰۸). اگر یک محیط الاستیک را در نظر بگیریم، وقتی موج لرزه‌ای از این محیط عبور می‌کند، انرژی امواج لرزه‌ای پراکنده می‌شود که به پراکنش (scattering) معروف است و در نتیجه برخورد موج با ناهمگنی‌های تصادفی محیط و انحراف از مسیر اصلی است. این درحالی است که در عبور امواج لرزه‌ای از محیط غیر الاستیک، قسمتی از انرژی جنبشی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود و از دست می‌رود که به جذب ذاتی معروف است و ناشی از نقص در کانی‌ها، وجود آب یا دیگر سیالات در محیط‌های متخلخل و وجود اصطکاک است (هوشیبا، ۱۹۹۳؛ اکینچی و همکاران، ۱۹۹۴؛ اشتاین و ویشن، ۲۰۰۲). در نتیجه، کاهندگی امواج لرزه‌ای از جمع پراکنش و جذب ذاتی تشکیل می‌شود ($Q_t^{-1} = Q_{sc}^{-1} + Q_{in}^{-1}$).

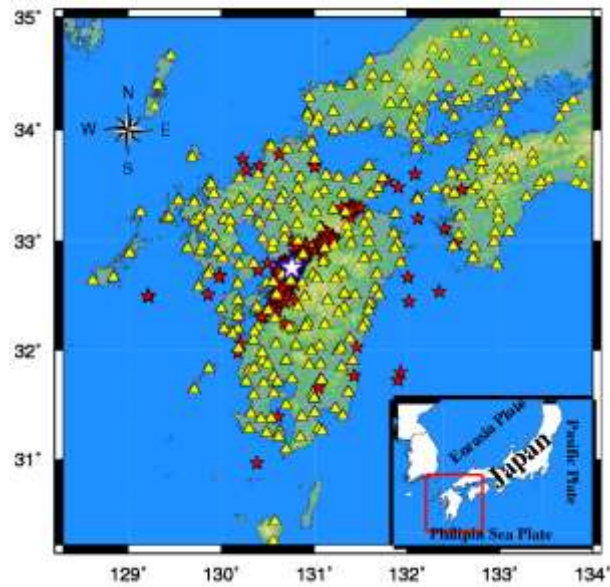
امواج دنباله (کدا) موج برشی، قطاری از ادامه موج

برشی هستند که دامنه آنها با گذشت زمان، با آهنگ کمی کاهش می‌یابد (اکی، ۱۹۷۵). به نظر اکی (۱۹۷۵) این امواج از امواج ناهمدوس پراکنده شده از ناهمگنی‌های تصادفی زمین به وجود می‌آیند و دامنه و محتوی فرکانسی یکسان دارند. کاهندگی امواج کدا (Q_c^{-1}) معمولاً با کاهش نرخ دامنه امواج کدا بررسی می‌شود (معهود و همکاران، ۲۰۰۹؛ امیری فرد و همکاران، ۲۰۱۹). مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که ضریب کیفیت امواج کدا در محدودی فرکانسی ۰/۰۰۱ تا حدود ۱ هرتز اساساً مستقل از فرکانس است، ولی در فرکانس‌های بالاتر با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد (لی و والاس، ۱۹۹۵). مقادیر تخمین زده شده برای Q_c در فرکانس‌های بالای یک هرتز، یک وابستگی به شکل رابطه توانی زیر با فرکانس نشان می‌دهد:

$$Q_c(f) = Q_0(f)^n \quad (1)$$

که در آن، Q_0 مقدار Q_c در فرکانس ۱ هرتز است و n بستگی فرکانسی است. ضریب کیفیت در بسامد مرجع ۱ هرتز در مناطق فعال زمینساختی مقادیر کمی (کمتر از ۲۰۰) دارد. در حالی که مناطق پایدار زمینساختی دارای مقادیر زیاد (بیشتر از ۶۰۰) هستند (صدقتی و پزشکی، ۲۰۱۶).

هدف اصلی این پژوهش، بررسی تغییرات جانبی ضریب کیفیت امواج کدا و بررسی تغییرات زمانی آن در منطقه کوماموتو ژاپن است. زمین لرزه کوماموتو ۲۰۱۶ با رویداد MJ ۶٫۵ در ۱۴ آوریل ۲۰۱۶ رخ داده است. این واقعه شامل یک دسته زمین لرزه‌های کم عمق در مرکز کیوشو ژاپن بود که خسارات فراوانی به خصوص در میاناسو، نیشهارا و ماشیکی به جا گذاشت و شامل زلزله اصلی MJ 7.3 در روز ۱۶ آوریل بود (یوشیکی، ۲۰۱۶) که در شکل ۱ با علامت ستاره آبی‌رنگ نشان داده شده است. این زلزله که در امتداد گسل هینگا و فوتاگاوا اتفاق



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و پراکندگی ایستگاه‌ها و زلزله‌های رخ داده. مثلث‌های زرد ایستگاه‌های مورد استفاده، ستاره‌های قرمز رومرکز زلزله‌ها و ستاره آبی زلزله اصلی کوماموتو با بزرگای ۷٫۳ است.

فرکانس مرکزی f و گذشت زمانی t (که از زمان وقوع زمین لرزه اندازه گیری می‌شود) به صورت زیر است:

$$A(f, t) = S(f)t^{-\alpha}e^{-\frac{\pi f}{Q_c}t} \quad (2)$$

که $S(f)$ پارامتر چشمه، t گذشت زمانی که از زمان وقوع زمین لرزه اندازه گیری می‌شود، α پارامتر گسترش هندسی (که برای امواج حجمی ۱ و برای امواج سطحی ۰٫۵ است)، f فرکانس مرکزی و Q_c ضریب کیفیت امواج کدا است (اکی و چوئت، ۱۹۷۵؛ هاوسکوف و مالون، ۱۹۸۹). در این مدل به دلیل این که امواج کدا، دنباله امواج حجمی S در نظر گرفته می‌شود، مقدار α برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود.

با گرفتن لگاریتم طبیعی از دوطرف رابطه (۲) و ساده‌سازی خواهیم داشت:

$$\ln(A(f, t)) = \ln(S(f)) - \frac{\pi f}{Q_c}t \quad (3)$$

بنابراین با رسم مقدار $\ln(A(f, t))t$ بر حسب t و برازش خط با شیب b ، مقدار Q_c به صورت زیر محاسبه می‌شود (اکی و چوئت، ۱۹۷۵):

$$Q_c = -\frac{\pi f}{b} \quad (4)$$

افتاد، شدت ۷ را در دستگاه‌های جنبش نیرومند زمین ثبت کرد (یوشیکی، ۲۰۱۶).

در این مطالعه به منظور تعیین تغییرات جانبی و زمانی کاهندگی امواج کدا، داده‌های ۴۷۴ زلزله محلی ثبت شده در ایستگاه‌های ثابت شبکه K-NET و KiK-net، مورد پردازش قرار گرفتند. رابطه فرکانسی ضریب کیفیت امواج کدا برای هر رکورد محاسبه شد. سپس تغییرات جانبی و زمانی این پارامتر برای قبل و بعد از زلزله مورد بررسی قرار گرفت و تفسیر شد.

۱ روش

در این مطالعه به منظور برآورد ضریب کیفیت امواج کدا (coda)، از روش تک‌پراکنش به عقب (با فرض ضعیف بودن فرایند پراکنش) اکی و چوئت (۱۹۷۵)، استفاده شد. ایده این روش، بر اساس افت دامنه کدای S بنا شده است که توسط ناهمگنی‌های سرعتی موجود در پوسته و گوشته بالایی به وجود آمده‌اند (اکی، ۱۹۶۹؛ اکی و چوئت، ۱۹۷۵). برطبق این مدل دامنه امواج کدا در

۲ داده مورد استفاده و پردازش آن

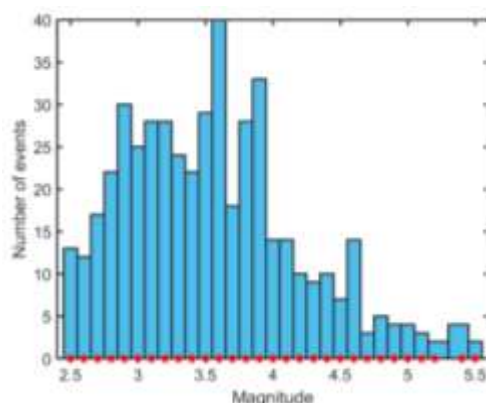
۱-۲ داده

در این مطالعه از داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های ۲ شبکه ثابت K-NET و KiK-net، پراکنده شده در ژاپن استفاده شد. به‌طور کلی تعداد ۱۸۸۱۰ رکورد (۴۷۴ زلزله) ثبت‌شده در ۳۰۶ ایستگاه لرزه‌نگاری با فاصله رو مرکزی کمتر از ۲۰۰ کیلومتر برای تعیین ضریب کیفیت موج کدا مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعه حاضر لرزه‌نگاشت‌های مؤلفه قائم مورد استفاده قرار گرفت، به دلیل این که برآورد کاهندگی امواج کدا مستقل از نوع مؤلفه نگاشت است (معهود و همکاران، ۲۰۰۹؛ هاوسکوف و همکاران، ۲۰۱۶؛ امیری فرد و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین هاوسکوف (۲۰۱۶) نشان داد که ضریب کیفیت موج کدای به‌دست‌آمده از مؤلفه‌های مختلف

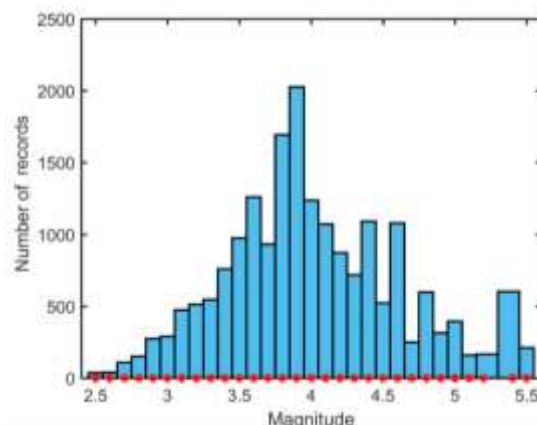
لرزه‌نگارها تفاوت چندانی ندارند. علاوه بر این مؤلفه قائم در این گونه مطالعات کمتر تحت تأثیر اثر سایت قرار می‌گیرند. شکل ۱ پراکندگی رومرکزی زمین‌لرزه‌ها و ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.

در شکل ۲ هیستوگرام بزرگای زمین‌لرزه‌ها و تعداد آنها نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود محدوده بزرگای انتخابی برای این مطالعه بین ۲/۵ تا ۵/۵ است. همچنین تعداد زیادی از زلزله‌ها دارای بزرگای زیر ۴ هستند.

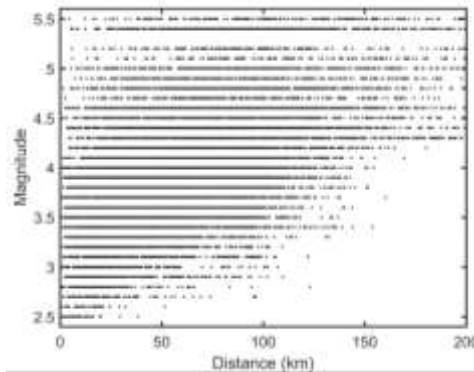
شکل ۳، هیستوگرام تعداد رکوردها بر اساس بزرگای را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴ بزرگای بر حسب فاصله رومرکزی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود با افزایش بزرگای، فاصله رومرکزی ثبت‌شده نیز افزایش می‌یابد.



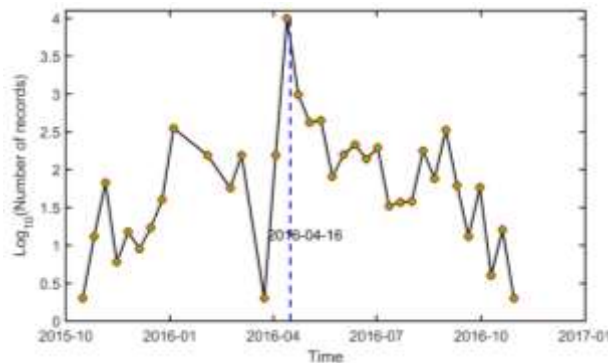
شکل ۲. هیستوگرام بزرگای زلزله‌های مورد استفاده در این مطالعه.



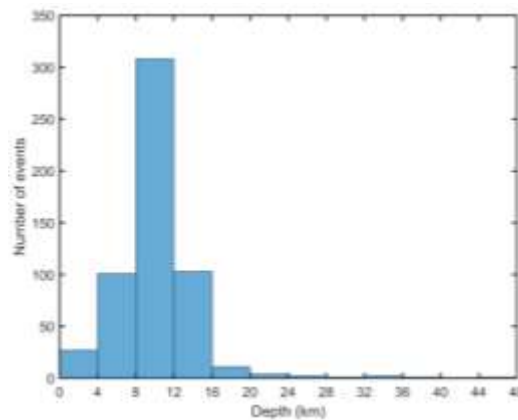
شکل ۳. هیستوگرام بزرگای بر حسب تعداد رکوردهای ثبت‌شده.



شکل ۴. رکوردهای ثبت شده در بازه بزرگ‌گانه‌های مختلف در فواصل رو مرکزی متفاوت.



شکل ۵. نمایش تعداد رکوردهای مورد استفاده برحسب بازه زمانی هر دایره تعداد زلزله‌ها در ۱۰ روز گذشته را نشان می‌دهد.



شکل ۶. فراوانی زلزله‌های مورد استفاده در این مطالعه بر اساس عمق کانونی.

در نهایت عمق زمین لرزه‌های مورد پردازش در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، کمترین و بیشترین عمق زلزله به ترتیب برابر با ۱ و ۴۸ کیلومتر است. در شکل دیده می‌شود که اکثر زلزله‌ها دارای عمق زیر ۱۶ کیلومتر هستند. میانگین عمق کانونی زلزله‌ها برابر با ۹/۷ کیلومتر است.

در شکل ۵، تعداد رکوردها در بازه ده روزه را نشان می‌دهد که از تاریخ ۲۰۱۵/۱۰/۱۶ تا ۲۰۱۶/۱۰/۳۰ در ایستگاه‌ها ثبت شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، با نزدیک شدن به زلزله اصلی کوماموتو (MJ 7.3) تعداد رکوردها افزایش می‌یابد و بعد از وقوع زلزله اصلی روند کاهشی در تعداد رکوردها را مشاهده می‌کنیم.

۲-۲ پردازش داده

به منظور تعیین ضریب کیفیت موج کدا در منطقه مورد مطالعه، مؤلفه قائم رکوردهای ثبت شده در ایستگاه‌ها، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نحوه پردازش این داده‌ها بر اساس روش امیری فرد و همکاران (۲۰۲۰) به شرح زیر است:

۱) تصحیح خط مبنا

۲) فیلتر کردن داده‌ها در بازه فرکانسی مورد نظر.

مطالعات انجام شده در زمینه ضریب کیفیت (رحیمی و حمزه‌لو، ۲۰۰۸؛ معهود و همکاران، ۲۰۰۹؛ امیری فرد و همکاران، ۲۰۱۹)، نشان می‌دهد که ضریب کیفیت امواج لرزه‌ای در فرکانس‌های مختلف، متفاوت است. در این بررسی یک فیلتر میان‌گذر مرتبه ۲ باترورث بر نگاشت‌ها اعمال شد. به منظور تعیین رابطه فرکانسی، ضریب کیفیت در محدوده‌های مختلف فرکانسی تعیین گشت. جدول ۱ مشخصات این محدوده‌های فرکانسی به همراه حدود فرکانس پایین و بالا و فرکانس مرکزی متناظر با هر محدوده، را نشان می‌دهد.

۳) تعیین پوش موج کدا

با توجه به این که برای تعیین تضعیف امواج کدا از برازش خط درجه اول بر لگاریتم روند افت دامنه استفاده می‌کنیم، محاسبه روند افت دامنه حائز اهمیت است. در این مطالعه از روشی که توسط رحیمی و حمزه‌لو (۲۰۰۸) برای تعیین پوش دامنه مورد استفاده قرار گرفته است

استفاده شد. پوش دامنه موج کدا فیلتر شده (در یک بازه بسامدی خاص) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A(f, t) = \sqrt{x(f, t)^2 + H[x(f, t)]^2} \quad (5)$$

که در آن $x(f, t)$ موج کدا در بسامد مرکزی f و $H[x(f, t)]$ تبدیل هیلبرت آن است. از آنجایی که تبدیل هیلبرت پوشی از دامنه‌های تابع ورودی $x(f, t)$ را می‌دهد برای محاسبه روند افت دامنه روش مناسبی به حساب می‌آید.

۴) هموار کردن پوش دامنه

مرحله بعد، هموارسازی پوش موج با استفاده از تابع RMS برای زمان‌های سپری شده بزرگ‌تر از دو برابر زمان رسید موج برشی (2ts) است که با استفاده از یک پنجره متحرک با طول ۵ ثانیه و شیفت زمانی ۱ ثانیه محاسبه می‌گردد. در نهایت پوش موج کدای هموار شده به صورت زیر است:

$$A_c(f, t_l) = rms(Coda\ window) \quad (6)$$

۵) بریدن پوش دامنه هموار شده در بازه زمان گذشت مورد نظر بعد از این که پوش دامنه هموار شده به دست آمد، با استفاده از زمان گذشت ۳۰ ثانیه (بعد از ۲ برابر زمان رسید موج S) داده مورد نظر بریده می‌شود.

جدول ۱. محدوده فرکانس‌های مورد استفاده به همراه فرکانس‌های گوشه و فرکانس مرکزی.

| فرکانس قطع-پایین | فرکانس مرکزی | فرکانس قطع-بالا |
|------------------|--------------|-----------------|
| ۱ | ۱/۵۰ | ۲ |
| ۲ | ۳ | ۴ |
| ۳ | ۴/۵ | ۶ |
| ۴ | ۶ | ۸ |
| ۸ | ۱۲ | ۱۶ |
| ۱۲ | ۱۸ | ۲۴ |

منطقه کوموماتو ژاپن (قبل و بعد از زلزله کوموماتو با بزرگای ۳،۷)، ۴۷۴ زلزله محلی (۱۸۸۱۰ رکورد) ثبت شده در ۳۰۶ ایستگاه مورد پردازش قرار گرفت. با توجه به روش بیان شده در بخش روش‌شناسی، ضریب کیفیت امواج کدا برای تمام رکوردهای موجود، در زمان گذشت (Lapse time) ۳۰ ثانیه و هفت بازه فرکانسی محاسبه گشت. سپس رابطه توانی ضریب کیفیت با فرکانس برای هر رکورد مشخص شد. در مرحله بعد منطقه مورد مطالعه به بلوک‌هایی با ابعاد ۰/۳ درجه در راستای طول جغرافیایی و ۰/۳ درجه در راستای عرض جغرافیایی تقسیم‌بندی شد. برای هر بلوک، ضریب کیفیت در فرکانس ۱ هرتز و پارامتر بستگی فرکانسی (η) به دست آمد. به طوری که، برای هر بلوک تمام رکوردهایی که از آن بلوک گذشته‌اند جداسازی می‌شوند و مقدار میانگین ضریب کیفیت در فرکانس یک هرتز و پارامتر بستگی فرکانسی برای تمام این رکورها محاسبه می‌شود و به مرکز بلوک نسبت داده می‌شود. شکل ۷، تغییرات جانبی ضریب کیفیت و پارامتر بستگی فرکانسی را برای منطقه مورد مطالعه و در کل بازه زمانی مورد پردازش نشان می‌دهد.

همان گونه که در شکل ۷ دیده می‌شود، ضریب کیفیت امواج کدا در فرکانس یک هرتز در کل منطقه مورد مطالعه کمتر از ۲۰۰ است. اکی (۱۹۸۱) نشان داد که ضریب کیفیت در فرکانس یک هرتز با فعالیت تکتونیکی منطقه رابطه دارد، به طوری که اگر این مقدار کمتر از ۲۰۰ باشد منطقه از نظر رژیم تکتونیکی فعال است و اگر بیشتر از ۲۰۰ باشد منطقه غیر فعال است. نتایج حاصل از این مطالعه همخوانی خوبی با گزارشات اکی (۱۹۸۱) دارد و فعالیت تکتونیکی بالای منطقه را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند که هرچقدر از رومرکز زلزله اصلی کوموماتو دور می‌شویم، ضریب کیفیت افزایش می‌یابد. دلیل این گونه رفتار را می‌توان در خردشدگی سنگ‌ها به دلیل

۶) تعیین ضریب کیفیت امواج کدا

بعد از بریدن پوش دامنه هموار شده یک خط درجه اول به این پوش فیت می‌شود. سپس با استفاده از شیب خط فیت شده ضریب کیفیت موج در بازه فرکانسی تعیین شده و همچنین زمان گذشت مشخص شده به دست خواهد آمد.

۷) تعیین رابطه وابستگی فرکانسی ضریب کیفیت

پس از تعیین ضریب کیفیت تمام رکوردها، می‌توان رابطه بستگی فرکانسی ضریب کیفیت را برای ایستگاه‌های مختلف و همچنین منطقه‌های انتخابی مختلف با استفاده از رابطه زیر مشخص کرد (اکی و ساتو، ۱۹۸۵).

$$Q_c = Q_0 f^n \quad (7)$$

که در اینجا Q_0 ضریب کیفیت در فرکانس یک هرتز و n پارامتر بستگی فرکانسی است.

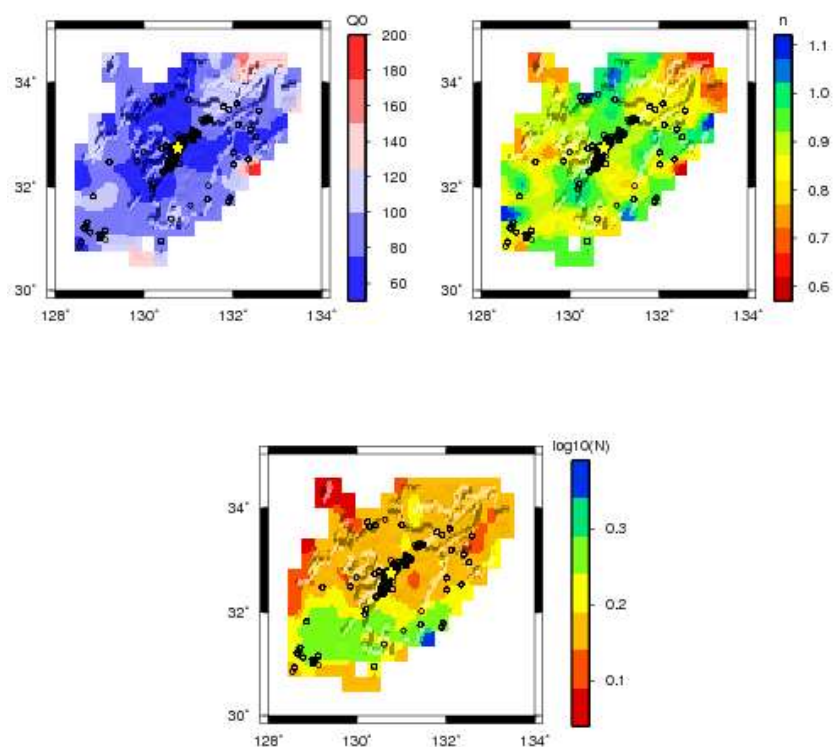
۸) تعیین تغییرات جانبی و زمانی ضریب کیفیت امواج کدا

بعد از تعیین ضریب کیفیت در فرکانس‌های مختلف برای تمام رکوردها، منطقه مورد مطالعه بلوک‌بندی می‌شود و برای هر بلوک مقدار میانگین ضریب کیفیت محاسبه می‌شود. بدین منظور، برای هر بلوک، میانگین ضریب کیفیت در فرکانس‌های مختلف برای رکوردهایی که از بلوک عبور کرده است محاسبه می‌شود و به نقطه مرکز بلوک نسبت داده می‌شود.

۳ نتایج و بحث

۳-۱ تغییرات جانبی ضریب کیفیت امواج کدا

مطالعه ضریب کیفیت امواج کدا اطلاعات مهمی از خواص محیط داخل زمین مثل ساختارهای گرمایی و درجه ذوب بخشی (partial melting) در اختیار ما قرار می‌دهد (هاوسکوف و همکاران، ۱۹۸۹؛ ساتو، ۱۹۹۲). در این مطالعه به منظور برآورد ضریب کیفیت امواج کدا در



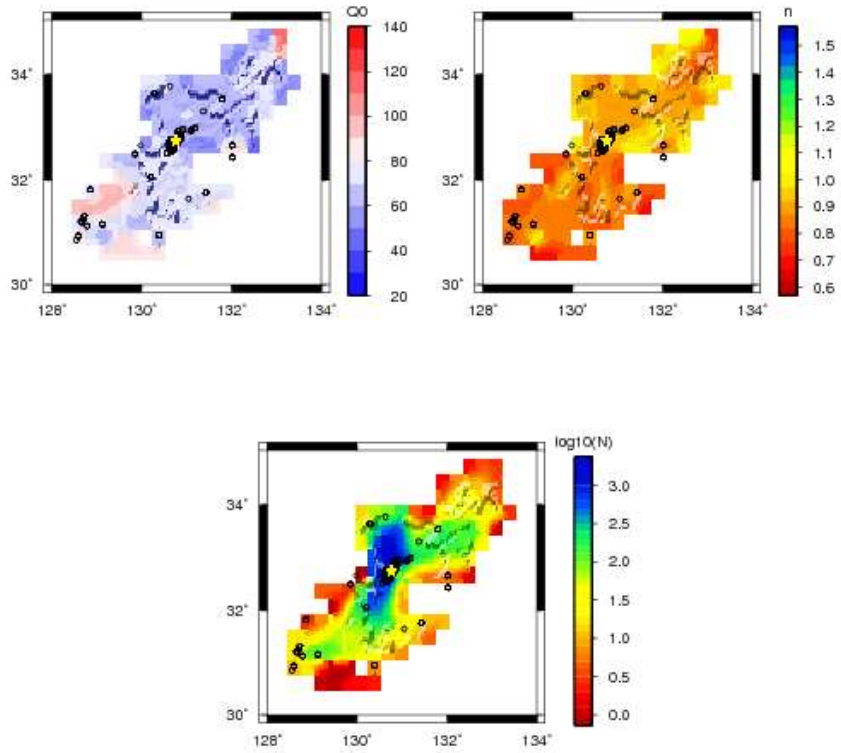
شکل ۷. نمایش تغییرات جانبی ضریب کیفیت امواج کدا در فرکانس یک هرتز و پارامتر بستگی فرکانسی به همراه تعداد رکوردهای عبوری از هر بلوک برای کل دوره‌ای که داده‌ها مورد پردازش قرار گرفته‌اند.

کاهندگی ناشی از تغییر در تنش‌های تکنونیک را فراهم کند (غلامزاده و همکاران، ۲۰۱۴). در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در مورد همبستگی ضریب کیفیت و نرخ لرزه‌خیزی انجام شده است (به‌عنوان مثال، اکی، ۱۹۸۵؛ جین و اکی، ۱۹۸۶). این مطالعات یک همبستگی منفی بین ضریب کیفیت و نرخ لرزه‌خیزی را نشان داده‌اند. در این تحقیق تغییرات زمانی کاهندگی امواج کدا در منطقه کوموماتو ژاپن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، داده‌ها در بازه زمانی از تاریخ ۲۰۱۵/۱۰/۱۶ تا ۲۰۱۶/۱۰/۳۰ مورد پردازش قرار گرفتند. سپس تغییرات جانبی ضریب کیفیت برای قبل و بعد از زلزله اصلی کوموماتو تخمین زده شد. شکل ۸ و ۹ به ترتیب تغییرات جانبی ضریب کیفیت در فرکانس یک هرتز را برای قبل و بعد از زمین‌لرزه اصلی نمایش می‌دهند.

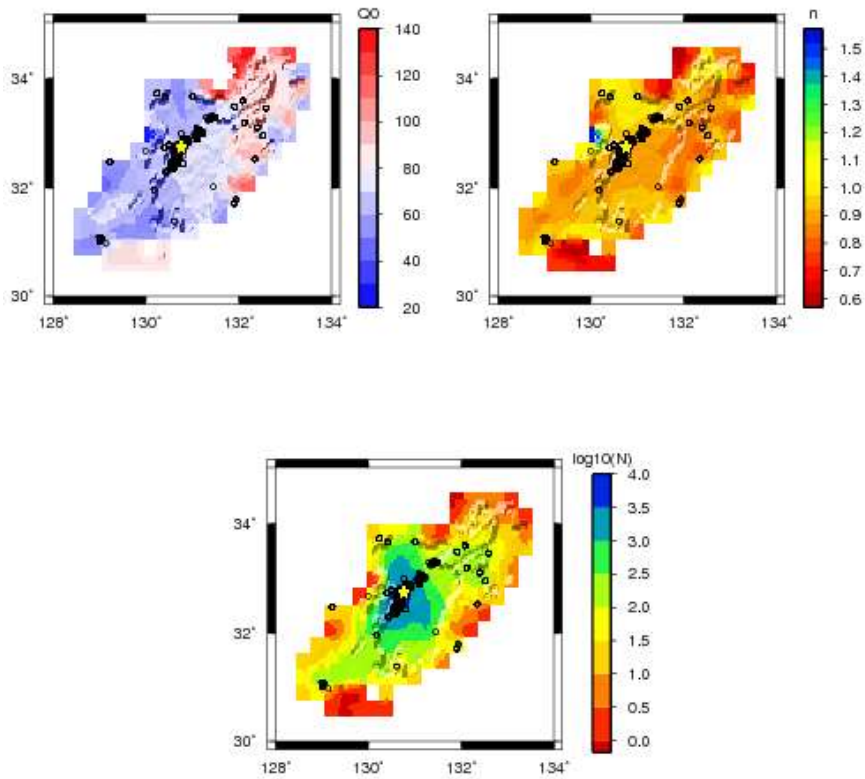
زلزله‌های متعدد، اشباع‌شدگی و افزایش ناهمگنی در نزدیکی رومرکز زلزله دانست. از طرفی مقدار پارامتر n در منطقه از $0/8$ تا 1 متغیر است. مقدار بزرگ‌تر برای این پارامتر، نشان دهنده لرزه‌خیزی بیشتر منطقه است. همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، بلوک‌هایی که پارامتر n بزرگ‌تر است، تعداد زلزله‌های رخ داده در این بلوک‌ها نیز بیشتر است.

۲-۳ تغییرات زمانی ضریب کیفیت امواج کدا

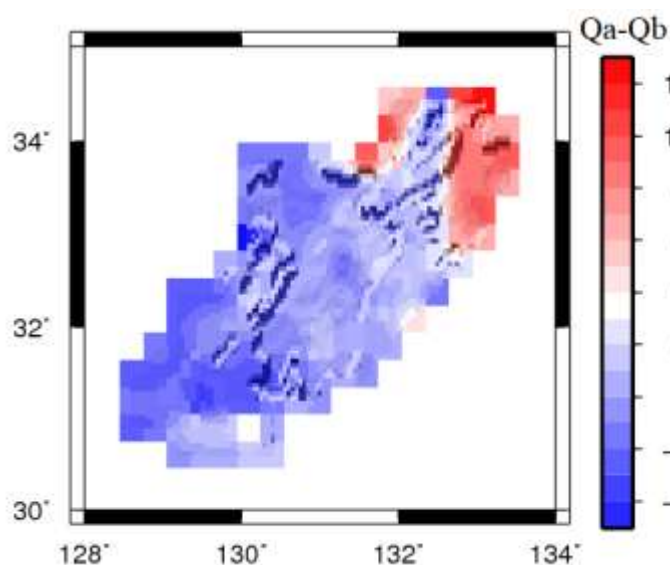
با توجه به همبستگی بین کاهندگی (Q^{-1}) و فعالیت تکنونیک و همچنین حساس‌تر بودن کاهندگی به تغییرات کوچک نسبت به سرعت (اکی، ۱۹۸۵)، مانیتور کردن کاهندگی امواج کدا در طول زمان می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد تغییر زمانی در شکستگی‌ها و



شکل ۸. تغییرات جانبی Q_c در فرکانس یک هرتز و پارامتر n به همراه تعداد رکوردهای عبوری از هر بلوک، قبل از وقوع زلزله اصلی.



شکل ۹. تغییرات جانبی Q_c در فرکانس یک هرتز و پارامتر n به همراه تعداد رکوردهای عبوری از هر بلوک، بعد از وقوع زلزله اصلی.



شکل ۱۰. اختلاف ضریب کیفیت در فرکانس یک هرتز قبل و بعد از زلزله کوموماتو. Q_a ضریب کیفیت بعد از زلزله و Q_b ضریب کیفیت قبل از زلزله است.

این پدیده‌ها کاهش ضریب کیفیت در فرکانس یک هرتز با گذشت زمان است.

قبل از وقوع زلزله به سبب افزایش فشار و تنش، ترک‌های موجود در ناحیه گسلی به هم نزدیک شده و سیالات از این فضاها خارج می‌گردند. در نتیجه به سبب کاهش چگالی ترک‌ها و خروج سیالات، ناهمگنی منطقه کاهش یافته و مقدار Q_c افزایش می‌یابد. پس از وقوع زلزله به سبب خردشدگی منطقه، کاهش تنش، افزایش ترک‌ها و نفوذ سیالات ناهمگنی منطقه افزایش یافته و مقدار Q_c کاهش می‌یابد که این موضوع توسط پادی و همکاران (۲۰۱۳) و جین و اکی (۱۹۹۱) نیز تأیید شده است.

۴ نتیجه‌گیری

در این مطالعه جهت بررسی تغییرات زمانی ضریب کیفیت امواج کدا قبل و بعد از وقوع زلزله کوموماتو ژاپن، از زلزله‌های محلی رخ داده در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. بدین منظور نگاشت‌های زلزله‌های ثبت‌شده از تاریخ ۲۰۱۵/۱۰/۱۶ تا ۲۰۱۶/۱۰/۳۰ مورد بررسی و

به‌منظور بررسی بهتر و آشکارشدن تفاوت‌ها، اختلاف ضریب کیفیت قبل و بعد از زلزله در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است، اختلاف ضریب کیفیت در اکثر مناطق منفی است. این بدین معنی است که ضریب کیفیت قبل از وقوع زمین‌لرزه اصلی کوموماتو در بلوک‌ها بیشتر از ضریب کیفیت بعد از وقوع زمین‌لرزه است.

جین و اکی (۱۹۸۹ و ۱۹۹۳) نشان دادند که با افزایش شکستگی‌ها در منطقه، ضریب کیفیت کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر این، زالیپن و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که افزایش استرس در منطقه باعث افزایش تعداد زلزله‌ها در منطقه و به‌دنبال آن تغییر خصوصیات الاستیکی سنگ‌ها، افزایش ترک‌های ریز، بازشدن ترک‌های موجود و نفوذ سیالات داخل ترک‌ها و افزایش ناهمگنی می‌شود. با توجه به مطالب گفته شده، با نزدیک شدن به زلزله اصلی کوموماتو، افزایش استرس در منطقه را شاهد هستیم که این افزایش استرس باعث افزایش زلزله‌ها در منطقه شده است. از طرفی افزایش زلزله‌ها باعث افزایش شکستگی‌ها در منطقه می‌شود. پیامد

- the Seismological Society of America, 71(6), pp.1687-1700.
- Aki, K. and Chouet, B., 1975, Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects. *Journal of geophysical research*, 80(23), pp.3322-3342.
- Akinci, A., Taktak, A.G. and Ergintav, S., 1994, Attenuation of coda waves in Western Anatolia. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 87(1-2), pp.155-165.
- Amiri Fard, R., Javan Doloei, G., Rahimi, H. and Farrokhi, M., 2019, Attenuation of P and S waves in Western part of Iran. *Geophysical Journal International*, 218(2), pp.1143-1156.
- Fard, R.A., Javan-Doloei, G., Farrokhi, M., Rahimi, H. and Mahood, M., 2020, Coda wave attenuation's dependency on Lapse time and frequency in west of Iran plateau using local earthquakes. *Annals of Geophysics*, 63(4), p.437.
- Gholamzadeh, A., Rahimi, H. and Yaminifard, F., 2014, Spatial and temporal variation of coda-wave attenuation in the Faryab region, southeast of the Sanandaj-Sirjan zone, using aftershocks of the Tiab earthquake of 28 February 2006. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(1), pp.529-539.
- Havskov, J., Malone, S., McClurg, D. and Crosson, R., 1989, Coda Q for the state of Washington. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79(4), pp.1024-1038.
- Havskov, J., Sørensen, M.B., Vales, D., Özyazicioğlu, M., Sánchez, G. and Li, B., 2016, Coda Q in different tectonic areas, influence of processing parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(3), pp.956-970.
- Hoshiba, M., 1993, Separation of scattering attenuation and intrinsic absorption in Japan using the multiple lapse time window analysis of full seismogram envelope. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B9), pp.15809-15824.
- Jin, A. and Aki, K., 1988, Spatial and temporal correlation between coda Q and seismicity in China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(2), pp.741-769.
- Jin, A. and Aki, K., 1991, Case 7A: Observational and Physical Bases for the Coda Q-1 Precursor. *Evaluation of Proposed Earthquake Precursors*, 32, pp.33-53.
- Kumar, N., Parvez, I.A. and Virk, H.S., 2005, Estimation of coda wave attenuation for NW Himalayan region using local
- پردازش قرار گرفته است.
- با استفاده از شکل موج زلزله‌های ثبت شده و با استفاده از تئوری امواج دنباله‌ای، پارامتر کیفیت امواج کدا تخمین زده شد. به منظور تخمین این پارامتر از روش تک پراکنش به عقب اکی و چونت (۱۹۷۵) استفاده شد.
- مقایسه نتایج میانگین ضریب کیفیت قبل و بعد از زلزله نشان می‌دهد که این پارامتر قبل از زلزله مقدار بیشتری را نسبت به بعد از زلزله دارد. وجود این اختلاف به دلیل افزایش خردشدگی‌ها، ترک‌ها و گسیختگی‌ها است که در پی زلزله اصلی و پس‌لرزه‌ها ایجاد می‌شود.
- تجزیه و تحلیل داده‌ها و بررسی ضریب کیفیت، بیان‌گر این موضوع است که منطقه مورد مطالعه از نظر تکنونیک به شدت فعال است. کمترین، بیشترین و میانگین مقدار ضریب کیفیت به دست آمده به ترتیب برابر با ۵۲ و ۲۰۰ و ۸۹ است. عمق کانونی زلزله‌های مورد بررسی کمتر از ۵۰ کیلومتر هستند و اکثر این رخدادها عمقی کمتر از ۲۰ کیلومتر دارند. این موضوع نشان می‌دهد که این زمین‌لرزه‌ها درون پوسته اتفاق افتاده‌اند. از آنجایی که پوسته در این منطقه دارای ناهمگنی‌های زیادی است (مقادیر کم ضریب کیفیت و همچنین تعداد زیاد زلزله‌ها بیانگر این موضوع است) می‌توان نتیجه گرفت که قسمت اعظم ضریب کیفیت به دست آمده ناشی از پراکنش امواج است و جذب ذاتی مقدار کمتری را به خود اختصاص داده است.

مراجع

- Aki, K., 1969, Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. *Journal of geophysical research*, 74(2), pp.615-631.
- Aki, K., 1980, Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 21(1), pp.50-60.
- Aki, K., 1981, Source and scattering effects on the spectra of small local earthquakes. *Bulletin of*

- Sato, H., 1992, Thermal structure of the mantle wedge beneath northeastern Japan: magmatism in an island arc from the combined data of seismic anelasticity and velocity and heat flow. *Journal of volcanology and geothermal research*, 51(3), pp.237-252.
- Savage, B., Komatitsch, D. and Tromp, J., 2010, Effects of 3D attenuation on seismic wave amplitude and phase measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(3), pp.1241-1251.
- Sedaghati, F. and Pezeshk, S., 2016, Estimation of the coda-wave attenuation and geometrical spreading in the New Madrid seismic zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(4), pp.1482-1498.
- Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., Takeda, N., Ochi, T. and Otsubo, M., 2016, Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan. *Earth, Planets and Space*, 68(1), pp.1-12.
- Singh, S. and Herrmann, R.B., 1983, Regionalization of crustal coda Q in the continental United States. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B1), pp.527-538.
- Stein, S. and Wysession, M., 2009, An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure. John Wiley & Sons.
- Tsujiura, M., 1978, Spectral analysis of the coda waves from local earthquakes.
- Zaliapin, I., Jin, A., Liu, Z., Aki, K. and Keilis-Borok, V., 2005, Temporal (Un) correlations between coda Q and seismicity: Multiscale trend analysis. *pure and applied geophysics*, 162(5), pp.827-841.
- earthquakes. *Physics of the earth and planetary interiors*, 151(3-4), pp.243-258.
- Lay, T. and Wallace, T.C., 1995, *Modern global seismology*. Academic. Inc. San Diego, CA.
- Ma'hood, M. and Hamzehloo, H., 2009, Estimation of coda wave attenuation in East Central Iran. *Journal of seismology*, 13(1), pp.125-139.
- Ma'hood, M., Hamzehloo, H. and Doloei, G.J., 2009, Attenuation of high frequency P and S waves in the crust of the East-Central Iran. *Geophysical Journal International*, 179(3), pp.1669-1678.
- Mahood, M. and Hamzehloo, H., 2011, Variation of intrinsic and scattering attenuation of seismic waves with depth in the Bam region, East-Central Iran. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(10), pp.1338-1346.
- Pio Lucente, F., De Gori, P., Margheriti, L., Piccinini, D., Di Bona, M., Chiarabba, C. and Piana Agostinetti, N., 2010, Temporal variation of seismic velocity and anisotropy before the 2009 MW 6.3 L'Aquila earthquake, Italy. *Geology*, 38(11), pp.1015-1018.
- Rahimi, H. and Hamzehloo, H., 2008, Lapse time and frequency-dependent attenuation of coda waves in the Zagros continental collision zone in Southwestern Iran. *Journal of Geophysics and Engineering*, 5(2), pp.173-185.
- Sato, H., 1977, Energy propagation including scattering effects single isotropic scattering approximation. *Journal of Physics of the Earth*, 25(1), pp.27-41.
- Sato, H., 1988, Fractal interpretation of the linear relation between logarithms of maximum amplitude and hypocentral distance. *Geophysical Research Letters*, 15(4), pp.373-375.

Temporal variation of Q factor before and after Kumamoto earthquake

Maryam Saffari¹, Majid Mahod^{2*} and Reza Heidari³

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

² Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received: 08 September 2021, Accepted: 26 February 2022)

Summary

The Kumamoto earthquake with magnitude $M_j=7.3$ was one of the destructive earthquakes in Japan which had more than 273 dead and 2809 injured. Investigation of temporal variation of coda wave attenuation before and after the earthquake, and also evaluating the lateral variation give important information about the crust and upper mantle beneath the studied area. Likewise, Attenuation of the seismic waves along with the velocity of wave propagation are among the important physical parameters that affect the propagation of the seismic waves. Careful investigation of these two parameters is required to determine the exact parameters of the earthquake source and also reduce the risk of earthquakes in the region. In the present study, the lateral changes of coda wave attenuation with time have been investigated. Here we checked the coda wave attenuations before and after the Kumamoto earthquake with the magnitude of 7.3 in the Kumamoto region of Japan. The estimation of Coda wave attenuation was performed using 474 local earthquakes recorded in 306 seismic stations by single back scattering method. This approach assumes that source and station are located at one point. The data used for estimation of attenuation have the epicentral distance between 1 and 200 km and the magnitude between 2.5 and 5.5. In order to considering the lateral variation of coda wave attenuation, the study area was divided into blocks with 0.3×0.3 degree in both dimension and the quality factor was calculated at the frequency of 1 Hz and lapse time of 30 seconds for the entire area. The results show the low quality factor Q_0 and high frequency parameter n . So, the study area is tectonically active and has a high seismicity rate. Lateral changes in the quality factor indicate that the quality factor increases as it moves away from the epicenter of the main Kumamoto earthquake. The reason for this behavior can be attributed to the crushing of rocks due to multiple earthquakes, saturation and increased heterogeneity near the earthquake epicenter. Lateral attenuation changes before and after the main earthquake explain the fact that the quality factor decrease after the earthquake. After the main earthquake, the number of aftershocks occurred is greater than the number of pre-earthquakes. Increased earthquake occurrence in the region increases the fracture, crushes and saturation and as a result, reduces the quality factor. Comparison of the obtained quality factor in the region with other active regions in the world indicates the fact that the studied area is highly tectonically active and has also a high seismicity.

Keywords: Kumamoto earthquake, attenuation, coda wave, lateral changes, time elapse

*Corresponding author:

m.mahood@iiees.ac.ir