مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۷، شماره ۱، ۱۴۰۲، صفحه ۱۴۷-۱۶۲ (مقاله پژوهشی) DOI: 10.30499/IJG.2022.341814.1423

بررسی وابستگی فرکانسی کاهندگی موج لرزه‌ای درشرق-شمال‌شرق ایران

سمیه احمدزاده[۱]، فرحناز منصوری قوام‌آبادی[۲] و غلام جوان دلوئی[۳*]

[۱] پژوهشگر پسادکتری، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله ، صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور، تهران، ایران
[۲] دانش آموخته کارشناسی ارشد زلزله شناسی، پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
[۳] دانشیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰)

چکیده

در این پژوهش با استفاده از شکل موج زمین‌لرزه‌های شرق- شمال شرق ایران و بر اساس روش تک‌پراکنش به عقب، پارامتر کاهندگی مسیر (ضریب کیفیت) امواج دنباله‌ای محاسبه شده است. برای بررسی و تحلیل، از لرزه‌نگاشت سه مؤلفه‌ای زمین‌لرزه‌های یک دهه اخیر شرق کشور استفاده شده است که در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری کوتاه‌دوره و باندپهن مستقر در استان‌های خراسان شمالی، رضوی و جنوبی ثبت شده‌اند. رابطه ضریب کیفیت برای پهنه شمال شرق ایران مطابق پارامترهای بهینه‌شده متناسب با بانک داده پژوهش حاضر برابر با $Q_c = ۱۲۵f^{۰/۷۶}$ محاسبه و تأثیر پارامترهای مختلف در برآورد ضریب کیفیت امواج دنباله‌ای بررسی شده است. مقادیر تخمین‌زده‌شده $Q_o = ۱۲۵$ در پهنه شرق و شمال شرق کشور با مقادیر محاسبه‌شده برای سایر مناطق فعال ایران و جهان همخوانی خوبی دارد. نتایج این پژوهش بیانگر وابستگی فرکانسی ضریب کاهندگی موج در ناحیه شرق- شمال شرق کشور است. با توجه به گستردگی بازه زمین‌لرزه‌های استفاده‌شده در این مطالعه که در شرق و شمال شرق کشور رخ داده‌اند، نتایج حاکی از فعالیت لرزه‌ای و استمرار آن در این ناحیه است.

واژه‌های کلیدی: امواج دنباله‌ای، ضریب کیفیت، روش تک‌پراکنش به عقب، خراسان

* نگارنده رابط: Javandoloei@iiees.ac.ir

۱ مقدمه

هنگام انتشار موج لرزه‌ای در محیط‌های همگن همسانگرد، افت انرژی رخ نمی‌دهد و حرکت موجی که بر اثر منبع ارتعاشی ایجاد شده است، تا بی‌نهایت ادامه خواهد داشت. در مدل واقعی زمین، به دلیل وجود ساختارهای زمین‌شناختی ناهمگن و میرایی ذاتی، از میزان انرژی موج هنگام عبور از درون محیط کاسته می‌شود. یکی از روش‌های متداول محاسبه میزان تضعیف دامنه موج، روش مدل‌سازی کاهندگی امواج با استفاده از ضریب کیفیت است. کاهندگی موج لرزه‌ای با کمیت بدون بعد ضریب کیفیت (Q) اندازه‌گیری می‌شود. این پارامتر که بیانگر نرخ کاهش دامنه موج در مسیر انتشار است، تابعی از فرکانس و طول پنجره زمانی برای تحلیل نگاشت، خصوصیات زمین‌شناسی در مجاورت ایستگاه لرزه‌نگاری و فعالیت زمین‌ساختی منطقه است. امواج دنباله‌ای ثبت‌شده در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری، دربرگیرنده ویژگی‌های ناشی از ناهمگنی‌های تصادفی و نامنظم درون زمین هستند. مطالعه میزان این ناهمگنی‌ها در محیط انتشار با استفاده از امواج دنباله‌ای، که ابزاری کاربردی در زلزله‌شناسی هستند، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در این پژوهش از روش تک‌پراکنش به عقب برای محاسبه ضریب کاهندگی امواج دنباله‌ای لرزه‌نگاشت‌های زمین‌لرزه‌های یک دهه اخیر ناحیه شرق- شمال شرق کشور استفاده شده است و وابستگی فرکانسی ضریب کیفیت و تأثیر پارامترهای مختلف در برآورد ضریب کیفیت امواج دنباله‌ای در منطقه نیز بررسی می‌شود.

۲ برآورد کدا Q با روش تک‌پراکنش به عقب

روش تک‌پراکنش به عقب را آکی و چوئت (۱۹۷۵) برای بررسی و تحلیل امواج دنباله‌ای زمین‌لرزه‌های محلی معرفی کردند. امواج دنباله‌ای که بخش انتهایی نوسانات سیگنال لرزه‌ای رویدادهای محلی و منطقه‌ای را تشکیل می‌دهند، پس از امواج S شروع می‌شوند. این امواج متشکل از امواج ناهماهنگی هستند که ناهمگنی‌ها سبب پراکندگی آنها شده‌اند. تصور بر این است که دامنه امواج دنباله‌ای تنها به دلیل تضعیف ناشی از پدیده پراکنش و گسترش هندسی کاهش می‌یابد. از هنگامی که آکی و چوئت (۱۹۷۵) این مفهوم را معرفی کردند، پژوهشگران در سراسر جهان، بارها میرایی لرزه‌ای را با استفاده از افت امواج دنباله‌ای توصیف و ارزیابی کرده‌اند. اغلب برای تخمین پارامتر کیفیت، روش تک‌پراکنش به عقب به‌کاربرده‌می‌شود. در این روش فرض می‌شود چشمه لرزه‌ای و ایستگاه در یک نقطه واقع شده‌اند و امواج دنباله‌ای، ناشی از یک مرحله پراکنش با زاویه ۱۸۰ درجه هستند. با فرض اینکه امواج دنباله‌ای، امواج S تک‌پراکنش در فواصل کوتاه چشمه- گیرنده هستند، افت دامنه امواج دنباله‌ای $A(f,t)$ برحسب فرکانس مرکزی f و زمان گذشت t (lapse time) با رابطه (۱) بیان می‌شود (آکی و چوئت، ۱۹۷۵):

$$A(f,t) = t^{-\beta} A_0 e^{\frac{-\pi f t}{Q_c(f)}} \qquad (۱)$$

که β پارامتر گسترش هندسی است و معمولاً مقدار آن برای امواج پیکری P و S برابر واحد و برای امواج سطحی برابر ۰/۵ فرض می‌شود. A_0 دامنه اولیه و Q_c ضریب کیفیت امواج دنباله‌ای است. رابطه (۱) را با استفاده از لگاریتم طبیعی می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\ln[A(f,t)] + \beta \ln(t) = \ln(A_0) - \frac{t f \pi}{Q_c(f)} \qquad (۲)$$

با رسم عبارت $\ln[A(f,t)] + \beta \ln(t)$ برحسب t برای یک فرکانس مرکزی معین (با استفاده از فیلتر میان‌گذر حول فرکانس مرکزی)، خط مستقیمی با شیب $-\frac{f\pi}{Q_c(f)}$ به‌دست‌می‌آید. $Q_c(f)$ را می‌توان با روش حداقل مربعات تعیین کرد. عبارت فوق با محاسبه مقادیر ریشه میانگین مربعی (rms) در یک پنجره در حال اجرا با طول مشخص و شروع در یک زمان مشخص (زمان گذشت)

به‌دست‌می‌آید.

این روش متداول‌ترین رهیافت برای تعیین ضریب کیفیت امواج دنباله‌ای است و به روش افت موج دنباله‌ای (Coda Wave Decay, CWD) مشهور است (برای مثال: هاوسکوف و همکاران، ۲۰۱۶ و امیری فرد و همکاران، ۲۰۲۰).

معمولاً فرض می‌شود ضریب کیفیت امواج دنباله‌ای (Q_c) مطابق رابطه (۳) شامل دو بخش پراکندگی و ذاتی است (هاوسکوف و همکاران، ۲۰۱۶):

$$Q_c^{-1} = Q_{sc}^{-1} + Q_i^{-1} \qquad (۳)$$

که Q_{sc} و Q_i به‌ترتیب Q پراکنش و ذاتی هستند.

تمام مطالعات coda Q نشان می‌دهد تضعیف امواج با فرکانس با رابطه زیر افزایش می‌یابد:

$$Q_c = Q_0(f/f_0)^{\alpha} \qquad (۴)$$

که Q_0، مقدار Q در فرکانس مرجع f_0است و α ضریب ثابت است. تقریباً همه مطالعات مقدار f_0را برابر ۱ هرتز درنظرمی‌گیرند و وابستگی فرکانسی آن با رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$Q_c = Q_0 f^{\alpha} \qquad (۵)$$

که Q_0 در این حالت مقدار Q_c در فرکانس ۱ هرتز است. روش محاسبه کدا Q بسته به پارامترهای مختلف پردازشی مورد استفاده می‌تواند نتایج متفاوتی درپی‌داشته‌باشد. به‌نظرمی‌رسد مقادیر کدا Q به هر دو عامل سن زمین‌ساختی و میزان ناهمگنی پوسته بستگی دارد (ساتو و همکاران، ۲۰۱۲). مشخص نیست که این اختلافات تا چه اندازه ناشی از پارامترهای پردازش و تا چه اندازه ناشی از اختلاف واقعی در کدا Q است. گوسف (۱۹۹۵) استدلال کرد که اثر پراکندگی با عمق کاهش می‌یابد. وی مدلی ارائه داد که در آن سهم پراکندگی در Q متناسب با h^{-n} است (h عمق و n عددی ثابت است) و با استفاده از این مدل نشان داد تفاوت اصلی بین بیشتر مطالعات کدا Q تنها به دلیل استفاده از زمان گذشت‌های مختلف است.

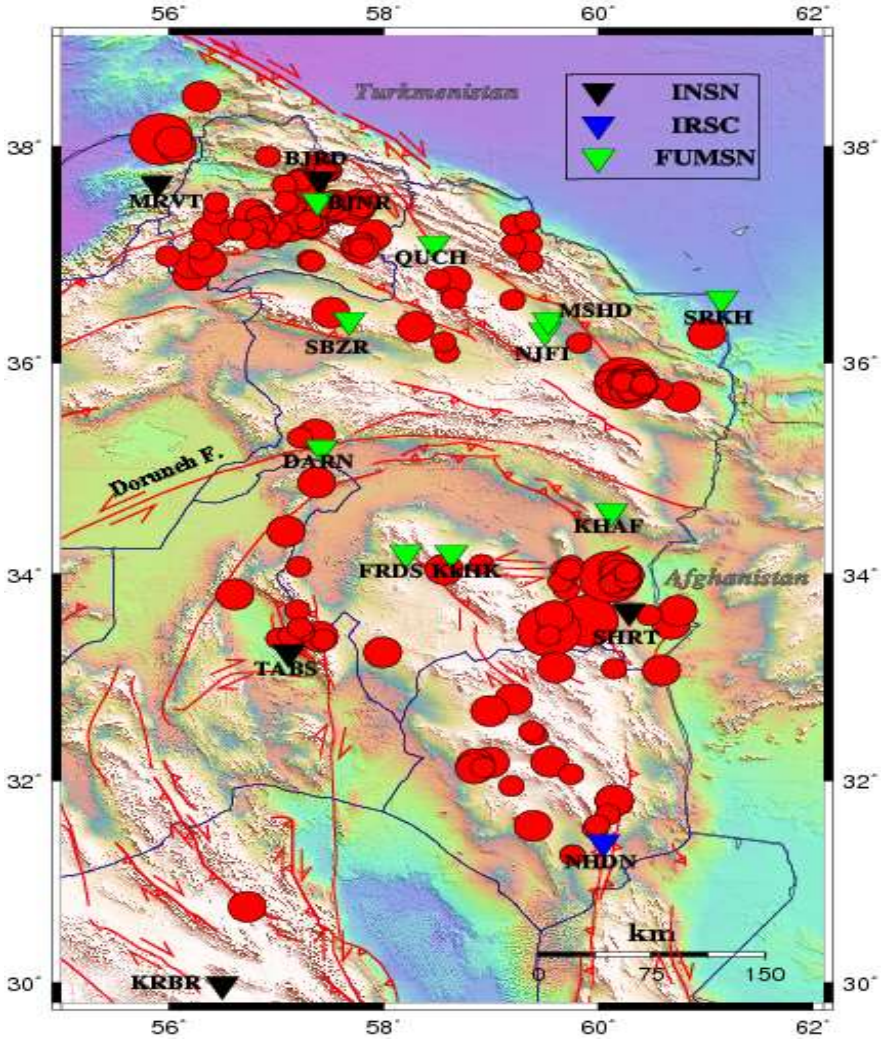
تفاوت در Q_c مشاهده‌شده بین مطالعات مختلف با استفاده از یک زمان گذشت یکسان می‌تواند به‌دلیل متفاوت بودن سایر پارامترهای پردازش یا به دلیل تفاوت واقعی در کدا Q باشد. همچنین افزایش کدا Q با زمان گذشت ممکن است بیانگر ساده بودن مدل تک‌پراکنش برای توصیف افت دامنه کدا باشد (هاوسکوف و همکاران، ۲۰۱۶).

برای مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج سایر نقاط، از روش CWD استفاده شده است. در این راستا، ابتدا با یافتن پارامترهای بهینه و متناسب با بانک داده این پژوهش، محاسبات Q_c انجام شده است. سپس از پارامترهای پیشنهادی هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) برای محاسبه کدا Q استفاده و نتایج در جداول و نمودارهای مجزا برای مقایسه ارائه شده است. همچنین اثر پارامترهای مختلف پردازش بر محاسبه Q_c بررسی و مجموعه بهینه پارامترها محاسبه و معرفی شده است.

۳ داده و پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش که شامل زلزله‌های دستگاهی از سال ۲۰۱۲ تا۲۰۲۰ است، از سه شبکه لرزه‌نگاری استخراج شد. این شبکه‌ها عبارت‌اند از: شبکه ملی لرزه‌نگاری باند پهن ایران (INSN) وابسته به پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله؛ شبکه مرکز ملی لرزه‌نگاری کشوری (IRSC) وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ شبکه لرزه‌نگاری باندپهن دانشگاه فردوسی مشهد (FUMSN). پس از استخراج داده‌ها، لرزه‌نگاشت-های رویدادهای مشابه این سه مرکز با هم تلفیق و رویدادها با استفاده از مدل ساختارسرعتی منطقه (خسروی و همکاران، ۲۰۱۹) دوباره مکان‌یابی شدند.

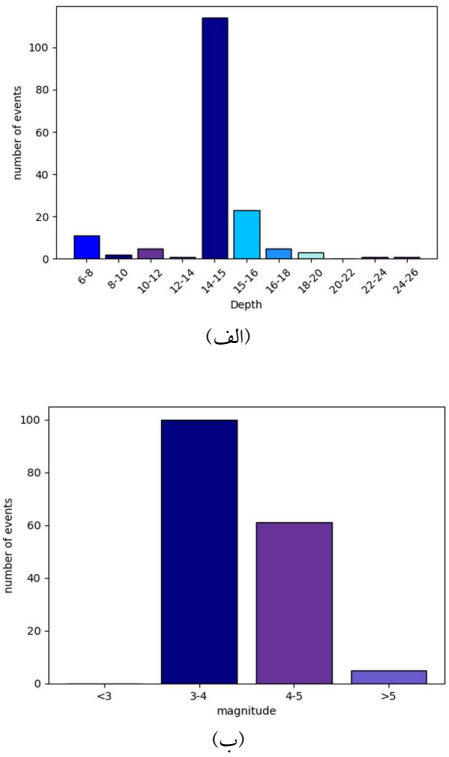
گام نخست برای محاسبه و تحلیل پارامتر Q_c در پهنه شرق و شمال شرق ایران، انتخاب رویدادهایی با فاصله رومرکزی کمتر از ۱۰۰km بود. با درنظرگرفتن این شرط،



شکل ۱. نقشه پراکندگی زمین‌لرزه‌های (دایره های قرمز رنگ) استفاده‌شده برای محاسبه پارامتر Q_c به همراه موقعیت ایستگاه‌های شبکه ملی لرزه‌نگاری باندپهن ایران (INSN)، مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC) و شبکه لرزه‌نگاری باندپهن دانشگاه فردوسی مشهد (FUMSN).

۱۶۶ رویداد انتخاب و اولین پردازش Q_c انجام شد. توزیع ایستگاه‌ها و رویدادهای مورد استفاده برای برآورد Q_c منطقه شرق و شمال شرق ایران در شکل (۱) نشان داده شده است. با استفاده از الگوریتم CODAQ در نرم‌افزار سایزن مقادیر میانگین Q_c در فرکانس‌های مرکزی داده‌شده برآورد شد. مقدار Q در این الگوریتم برای هریک از فرکانس‌ها با استفاده از معادله $Q(f)=Q_0f^{\alpha}$ محاسبه می‌شود. مقدار Q_c در فرکانس مرکزی ۱۰ هرتز نیز محاسبه می‌شود؛ زیرا مقایسه روابط Q(f) همیشه ساده نیست و در فرکانس بالا تفاوت در Q بهتر نمایان می‌شود. این موضوع، وابستگی شدید Q_c را به فرکانس نشان می‌دهد. در پژوهش پیشِ رو سعی شده است پارامترهایی به‌کارگرفته‌شوند که بهترین تطبیق را با منحنی نزولی و بهترین تناسب را با معادله Q(f) داشته باشند. شکل‌های ۲ و ۳ فراوانی زمین‌لرزه‌های

استفاده‌شده برای محاسبه Q_c را به‌ترتیب برحسب عمق و بزرگای آنها نشان می‌دهند. مطابق داده‌ها ، کمینه و بیشینه بزرگا و عمق به‌ترتیب ۳/۱ ، ۶ و ۶ ، ۲۴ کیلومتر است.



شکل ۲. توزیع تعداد زمین‌لرزه‌ها برحسب (الف) عمق (ب) بزرگا برای ۱۶۶رویداد استفاده‌شده در محاسبه پارامتر Q_c.

۴ پردازش داده و روش تحقیق

با انتخاب پارامترهای مناسب، coda Q را می‌توان به‌دست‌آورد. واضح است که بدون استفاده از پارامترهای یکسان، مقایسه منطقی مقادیر coda Q از مطالعات مختلف به‌آسانی میسر نیست. پارامترهای منتخب نهایی این مطالعه از نظر پهنای فیلتر، زمان گذشت و سایر پارامترها، متفاوت از پارامترهای استفاده‌شده در دیگر مطالعات coda Q است؛ بنابراین همان‌طورکه پیشتر اشاره شد، علاوه بر مقایسه نتایج این پژوهش با سایر نقاط جهان، از پارامترهای مرجع مطالعه هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) نیز استفاده شده است.

در جدول ۱ مجموعه پارامترهای مرجع هفت‌گانه برای محاسبه و تحلیل Q_c با روش تک‌پراکنش به عقب ارائه شده است که بر اساس ارزیابی‌های متنوع، انتخاب و در پژوهش حاضر استفاده شده‌اند. در این جدول مقادیر پیشنهادی پارامترهای مرجع در مطالعه هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) نیز جهت مقایسه با محاسبات پارامترهای مرجع این پژوهش آورده شده است.

جدول ۱. پارامترهای مرجع هفت‌گانه برای تحلیل Q_c در پژوهش حاضر و پارامترهای مرجع هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶).

پارامترهای مرجع	پژوهش حاضر	هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶)
گسترش هندسی (β)	۰/۵	۰/۵
پهنای باند فیلتر	۱/۲ اکتاو	۲ اکتاو
زمان گذشت	۴۰ ثانیه	۳۰ ثانیه
پنجره زمانی	۴۰ ثانیه	۳۰ ثانیه
طول پنجره rms	۵ ثانیه	۵ چرخه‌ای
نسبت سیگنال به نوفه	۲≤	۳
ضریب همبستگی	۰/۵ ≤	۰/۶

۴-۱ ارزیابی تغییرات جانبی و ژرفی و تأثیر پارامترهای مختلف بر ضریب کیفیت

بر اساس پردازش‌های انجام‌شده، ارزیابی تغییرات ضریب کیفیت امواج دنباله‌ای Q_c، ابتدا بر مبنای پارامترهای پیشنهادی هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) و سپس بر اساس پارامترهای بهینه‌شده و مرجع پژوهش حاضر انجام شده است (جدول ۲). پارامتر NT در جدول‌های ۲ و ۳ بیانگر جمع کل تعداد Q_c تعیین‌شده در همه فرکانس‌ها است. در جدول ۲، استفاده از هر سه مؤلفه با هم و جداگانه در محاسبات نشان می‌دهد نتایج تقریباً یکسان هستند.

جدول ۲. ارزیابی Q_c برای مؤلفه‌های مختلف (الف) با استفاده از پارامترهای مرجع هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) (ب) با استفاده از پارامترهای مرجع پژوهش حاضر.

(الف)

مؤلفه لرزه‌نگاشت	NT	Q_0	α	Q_{10}
Z, N, E	۲۸۵	۹۰	۰/۸۷	۶۶۹
Z	۹۴	۹۲	۰/۸۵	۶۵۳
N	۹۴	۱۰۳	۰/۸۳	۷۰۲
E	۹۷	۸۴	۰/۸۷	۶۳۱

(ب)

مؤلفه لرزه‌نگاشت	NT	Q_0	α	Q_{10}
Z, N, E	۸۳۷	۱۲۵	۰/۷۶	۷۲۰
Z	۲۵۳	۱۲۱	۰/۸۰	۷۵۶
N	۲۸۳	۱۳۵	۰/۷۲	۷۰۱
E	۳۰۱	۱۲۳	۰/۷۶	۷۰۴

به‌طورکلی مطابق تحقیقات صورت‌گرفته، طیف وسیعی از مقادیر α مشاهده‌شده وجود دارد که ممکن است به فاصله و محدوده فرکانس درنظرگرفته‌شده بستگی داشته باشد (هاوسکوف و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهش حاضر، پارامتر گسترش هندسی برابر ۰/۵ فرض شده است. سایر مقادیر در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. ارزیابی coda Q برای مقادیر مختلف گسترش هندسی (الف) با استفاده از پارامترهای مرجع هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) (ب) با استفاده از پارامترهای مرجع پژوهش حاضر.

(الف)

پارامتر گسترش هندسی	NT	Q_0	α	Q_{10}
۰/۵ مرجع	۲۸۵	۹۰	۰/۸۷	۶۶۹
۰/۷۵	۲۶۱	۱۰۱	۰/۸۷	۷۴۵
۱/۰	۲۱۶	۱۱۱	۰/۸۶	۸۰۹

(ب)

پارامتر گسترش هندسی	NT	Q_0	α	Q_{10}
۰/۵ مرجع	۸۳۷	۱۲۵	۰/۷۶	۷۲۰
۰/۷۵	۷۶۰	۱۳۷	۰/۷۶	۷۸۳
۱/۰	۶۷۹	۱۴۷	۰/۷۷	۸۶۰

مشاهده می‌شود که با افزایش پهنای فیلتر، مقدار Q_0 افزایش می‌یابد و هنگام استفاده از فیلتر ۱/۲ اکتاو، مقدار Q_0 پایدار می‌شود. فیلتر عریض‌تر، نتایج پذیرفتنی‌تری به همراه دارد و در عین حال، تناسب بهتری با منحنی Q(f) دارد؛ بنابراین در پژوهش حاضر از فیلتر ۱/۲ اکتاو استفاده شده است. نتایج ارزیابی‌ها با پهناهای مختلف باند فرکانسی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. ارزیابی coda Q برای مقادیر مختلف پهنای باند فیلتر (الف) با استفاده از پارامترهای مرجع هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) (ب) با استفاده از پارامترهای مرجع پژوهش حاضر.

(الف)

پهنای باند فیلتر (اکتاو)	NT	Q_0	α	Q_{10}
۲/۰ مرجع	۲۸۵	۹۰	۰/۸۷	۶۶۹
۰/۵	۲۷۵	۸۰	۰/۸۴	۵۴۸
۱/۰	۳۱۷	۹۳	۰/۷۸	۵۶۳
۱/۲	۳۲۱	۹۴	۰/۷۸	۵۶۸
۱/۵	۲۸۰	۹۰	۰/۸۶	۶۵۵
۳/۰	۲۹۰	۱۰۳	۰/۷۸	۶۱۷

(ب)

پهنای باند (اکتاو)	NT	Q_0	α	Q_{10}
۱/۲ مرجع	۸۳۷	۱۲۵	۰/۷۶	۷۲۰
۰/۵	۷۱۲	۱۱۴	۰/۷۸	۶۸۶
۱/۰	۸۰۱	۱۲۲	۰/۷۶	۷۰۵
۱/۵	۷۴۳	۱۳۳	۰/۷۱	۶۸۷
۲/۰	۷۵۸	۱۳۹	۰/۷۰	۶۹۷
۳/۰	۷۶۳	۱۴۴	۰/۷۱	۷۴۳

یکی از پارامترهای مهم در برآورد Q_c انتخاب شروع زمان گذشت است. به زمان وقوع تا شروع پنجره موج دنباله‌ای زمان گذشت می‌گویند. نتایج استفاده از مقادیر مختلف زمان گذشت در جدول‌های ۵ و ۶ آورده شده است. برای

بررسی‌های دقیق‌تر، محدوده زمان گذشت ارزیابی‌شده در این جداول نسبت به محدوده پیشنهادی در مطالعه هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) گسترده‌تر فرض شده است. همچنین در مواردی پارامتر زمان گذشت صفر فرض شده است که به معنای آن است که برای شروع پنجره کدا مقدار ثابتی درنظرگرفته‌نشود و برای هر لرزه‌نگاشت همان دو برابر زمان سیر موج S لحاظ شود. گفتنی است طول پنجره انتخاب‌شده برای پردازش Q_c نیز نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. طول پنجره باید به اندازه کافی زیاد باشد تا نتیجه‌ای پایدار تولید کند. مقادیر طول پنجره در جداول ۵ و ۶ آورده شده است.

اغلب حداقل زمان گذشت را دو برابر زمان سیر موج S درنظرمی‌گیرند، اما می‌توان بیشتر از این زمان را هم برای شروع امواج دنباله‌ای درنظرگرفت. در جدول ۷ مقادیر مختلفی از این پارامتر به همراه نتایج آورده شده است.

جدول ۵. ارزیابی coda Q به‌عنوان تابعی از زمان گذشت و طول پنجره زمانی بر اساس پارامترهای مرجع هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶). موارد ستاره‌دار معرف زمان گذشت و طول پنجره زمانی پیشنهادی هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) است.

زمان گذشت (ثانیه)	طول پنجره زمانی(ثانیه)	NT	Q_0	α	Q_{10}
۳۰مرجع	۳۰ مرجع	۲۸۵	۹۰	۰/۸۷	۶۶۹
۰	۲۰	۵۷۷	۸۲	۰/۷۷	۴۸۱
۰	۳۰	۶۵۰	۱۰۱	۰/۷۳	۵۴۷
۰	۴۰	۷۱۸	۱۱۶	۰/۷۳	۶۱۹
۰	۵۰	۶۶۰	۱۳۱	۰/۷۳	۷۰۳
۲۰	۲۰	۸۰	۸۵	۰/۷۰	۴۲۴
۲۰*	۳۰	۸۱	۹۴	۰/۶۸	۴۵۳
۲۰	۴۰	۷۵	۹۶	۰/۷۳	۵۱۲
۲۰	۵۰	۵۱	۱۶۰	۰/۶۲	۶۷۱
۳۰	۲۰	۲۶۲	۸۳	۰/۷۹	۵۱۵
۳۰*	۴۰	۲۸۵	۹۷	۰/۹۱	۷۸۳
۳۰*	۵۰	۲۵۹	۱۱۹	۰/۸۳	۸۱۱
۴۰*	۲۰	۲۲۱	۸۷	۰/۸۲	۵۸۰
۴۰*	۳۰	۲۸۹	۱۰۵	۰/۸۴	۷۲۱
۴۰	۴۰	۳۳۶	۱۲۷	۰/۸۰	۷۹۸
۴۰	۵۰	۳۱۵	۱۴۰	۰/۸۱	۹۰۱
۵۰*	۲۰	۱۷۵	۹۴	۰/۷۸	۵۷۱
۵۰*	۳۰	۲۷۳	۱۱۱	۰/۸۷	۸۱۷
۵۰	۴۰	۳۶۸	۱۳۵	۰/۸۱	۸۷۳
۵۰	۵۰	۴۶۰	۱۷۶	۰/۷۳	۹۳۶
۶۰*	۲۰	۱۷۶	۹۹	۰/۸۰	۶۲۱

جدول ۶. ارزیابی coda Q به‌عنوان تابعی از زمان گذشت و طول پنجره زمانی بر اساس پارامترهای مرجع پژوهش حاضر. موارد ستاره‌دار معرف زمان گذشت و طول پنجره زمانی پیشنهادی هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) است.

زمان گذشت (ثانیه)	طول پنجره زمانی (ثانیه)	NT	Q_0	α	Q_{10}
۴۰ مرجع	۴۰مرجع	۸۳۷	۱۲۵	۰/۷۶	۷۲۰
۰	۲۰	۱۰۸۳	۷۰	۰/۸۲	۴۶۵
۰	۳۰	۱۱۵۴	۹۴	۰/۷۳	۵۰۸
۰	۴۰	۱۱۳۸	۱۱۰	۰/۷۰	۵۴۸
۰	۵۰	۱۰۲۶	۱۲۳	۰/۶۹	۶۰۲
۲۰	۲۰	۳۰۵	۷۱	۰/۸۱	۴۵۵
۲۰*	۳۰	۳۱۵	۸۴	۰/۷۶	۴۸۹
۲۰	۴۰	۳۱۱	۹۸	۰/۷۳	۵۳۰
۲۰	۵۰	۲۸۵	۱۲۰	۰/۶۹	۵۹۲
۳۰	۲۰	۴۵۳	۷۸	۰/۸۰	۴۹۶
۳۰*	۳۰	۴۸۷	۹۷	۰/۷۶	۵۵۷
۳۰*	۴۰	۴۹۴	۱۰۸	۰/۷۶	۶۱۷
۳۰*	۵۰	۴۶۷	۱۲۵	۰/۷۴	۶۸۶
۴۰*	۲۰	۶۲۰	۸۴	۰/۸۴	۵۸۰
۴۰*	۳۰	۷۸۹	۱۱۱	۰/۷۸	۶۶۲
۴۰	۵۰	۷۷۵	۱۴۴	۰/۷۳	۷۷۸
۵۰*	۲۰	۴۴۶	۸۸	۰/۸۴	۶۰۵
۵۰*	۳۰	۶۶۸	۱۱۲	۰/۸۳	۷۵۹
۵۰	۴۰	۷۹۰	۱۳۳	۰/۷۹	۸۲۹
۵۰	۵۰	۷۶۳	۱۵۹	۰/۷۴	۸۷۳
۶۰*	۲۰	۲۶۵	۹۷	۰/۸۴	۶۷۷

جدول ۷. ارزیابی coda Q به‌عنوان تابعی از حداقل زمان گذشت (الف) بر اساس پارامترهای مرجع هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) (ب) با استفاده از پارامترهای مرجع پژوهش حاضر.

(الف)

حداقل زمان گذشت (ثانیه)	NT	Q_0	α	Q_{10}
۲/۰ مرجع	۲۸۵	۹۰	۰/۸۷	۶۶۹
۱/۵	۳۸۸	۹۳	۰/۸۰	۵۹۳
۲/۵	۱۵۸	۹۰	۰/۸۷	۶۷۱

(ب)

حداقل زمان گذشت (ثانیه)	NT	Q_0	α	Q_{10}
۱/۵ مرجع	۸۳۷	۱۲۵	۰/۷۶	۷۲۰
۲/۰	۴۳۰	۱۲۲	۰/۸۱	۷۹۱
۲/۵	۳۴۶	۱۲۳	۰/۸۲	۸۰۵

برای محاسبه ضریب همبستگی، لگاریتم منحنی افت با استفاده از روش کمترین مربعات با یک خط تطبیق داده می‌شود. در جدول ۸ مقادیر دیگر این پارامتر در محاسبات ارزیابی شده است.

از دیگر پارامترهای مورد استفاده در تحلیل Q_c می‌توان به طول پنجره ریشه مربع میانگین (rms) و نسبت سیگنال به نوفه (SNR) اشاره کرد. همان‌طورکه در جداول ۹ و ۱۰مشاهده می‌شود، این دو پارامتر تأثیر اندکی بر مقادیر Q_c دارند.

جدول ۸. ارزیابی تأثیر حداکثر ضریب همبستگی بر coda Q (الف) با استفاده از پارامترهای مرجع هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) (ب) با استفاده از پارامترهای مرجع پژوهش حاضر.

(الف)

حداکثر ضریب همبستگی	NT	Q_0	α	Q_{10}
۰/۶− مرجع	۲۸۵	۹۰	۰/۸۷	۶۶۹
۰/۵−	۳۰۴	۹۴	۰/۸۵	۶۷۱
۰/۷−	۲۴۸	۸۷	۰/۸۷	۶۴۴
۰/۸−	۱۶۴	۷۷	۰/۹۰	۶۱۶
۰/۹−	۴۰	۷۷	۰/۷۷	۴۴۹

(ب)

حداکثر ضریب همبستگی	NT	Q_0	α	Q_{10}
۰/۵− مرجع	۸۳۷	۱۲۵	۰/۷۶	۷۲۰
۰/۶−	۷۳۲	۱۱۶	۰/۷۸	۷۰۲
۰/۷−	۵۶۷	۱۰۷	۰/۸۰	۶۸۲
۰/۸−	۲۹۶	۹۷	۰/۸۰	۶۱۵
۰/۹−	۵۶	۸۷	۰/۷۳	۴۶۸

جدول ۹. ارزیابی تأثیر طول پنجره ریشه مربع میانگین (rms) بر coda Q (الف) با استفاده از پارامترهای مرجع هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) (ب) با استفاده از پارامترهای مرجع پژوهش حاضر.

(الف)

طول پنجره rms	NT	Q_0	α	Q_{10}
مقدارثابت ۵ ثانیه	۲۸۵	۹۰	۰/۸۷	۶۶۹
مقدارثابت ۳ ثانیه	۲۸۰	۹۰	۰/۸۸	۶۷۷
مقدارثابت ۷ ثانیه	۲۸۸	۹۱	۰/۸۶	۶۶۴

(ب)

طول پنجره rms	NT	Q_0	α	Q_{10}
مقدارثابت ۵ ثانیه	۸۳۷	۱۲۵	۰/۷۶	۷۲۰
مقدار ثابت ۳ ثانیه	۸۲۱	۱۲۴	۰/۷۷	۷۲۸
مقدارثابت ۷ ثانیه	۸۳۸	۱۲۶	۰/۷۵	۷۱۶

جدول ۱۰. ارزیابی تأثیر نسبت سیگنال به نوفه (SNR) بر coda Q (الف) با استفاده از پارامترهای مرجع هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) (ب) با استفاده از پارامترهای مرجع پژوهش حاضر.

(الف)

نسبت سیگنال به نوفه	NT	Q_0	α	Q_{10}
پنجره ۳ ثانیه مرجع	۲۸۵	۹۰	۰/۸۷	۶۶۹
پنجره ۲ و ۳ ثانیه	۲۹۲	۹۳	۰/۸۴	۶۴۳
پنجره ۴ و ۳ ثانیه	۲۷۸	۸۸	۰/۹۰	۶۹۸
پنجره ۳ و ۵ ثانیه	۲۸۵	۹۰	۰/۸۷	۶۶۹

(ب)

نسبت سیگنال به نوفه	NT	Q_0	α	Q_{10}
پنجره ۲ و ۵ ثانیه مرجع	۸۳۷	۱۲۵	۰/۷۶	۷۲۰
پنجره ۲ و ۳ ثانیه	۸۲۱	۱۲۴	۰/۷۷	۷۲۸
پنجره ۳ و ۳ ثانیه	۷۷۰	۱۲۴	۰/۷۷	۷۳۴
پنجره ۴ و ۳ ثانیه	۷۳۱	۱۲۳	۰/۷۸	۷۴۳
پنجره ۳ و ۵ ثانیه	۷۸۴	۱۲۴	۰/۷۷	۷۳۰

۴-۲ Q_C تابعی از فرکانس

میانگین ضریب کیفیت امواج دنباله‌ای Q_c به فرکانس‌های مرکزی بستگی شدیدی دارد. در مطالعه هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) از فرکانس‌های مرکزی ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ هرتز با یک فیلتر ۲ اکتاو استفاده شده است که به‌ترتیب پهنای باند ۲-۰/۵، ۴-۱، ۸-۲، ۱۶-۴، و ۳۲-۸ هرتز را ارائه می‌دهد. در پژوهش حاضر از فیلتر ۱/۲ اکتاو استفاده شده است. مشخصات پهنای باند فرکانسی در جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱۱. فرکانس های مرکزی و پهنای باند با فیلتر ۱/۲ اکتاو.

فرکانس قطع پایین(Hz)	فرکانس مرکزی (fc) (Hz)	فرکانس قطع بالا (Hz)
۰/۶۶	۱	۱/۵۲
۱/۳۲	۲	۳/۰۳
۲/۶۴	۴	۶/۰۶
۵/۲۸	۸	۱۲/۱۳
۱۰/۵۶	۱۶	۲۴/۲۵

همچنین مقادیر Q_c حاصل از فرکانس‌های مرکزی و پهنای باند مربوطه در جدول ۱۲ ارائه شده است. NT تعداد نگاشت‌های به‌کاررفته در هر فرکانس و σ انحراف معیار است.

جدول ۱۲. ارزیابی تأثیر فرکانس مرکزی بر coda Q (الف) با استفاده از پارامترهای مرجع هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) (ب) با استفاده از پارامترهای مرجع پژوهش حاضر، علامت ستاره مربوط به مقدارثابت تعداد نگاشت برای فرکانس مرکزی موردنظراست.

(الف)

فرکانس مرکزی (Hz)	NT	$Q_C \pm \sigma$
۱	۳۸	۱۱۳±۴۴
۱/۵	*۵۰	۱۲۹±۳۲
۲	۶۲	۱۶۷±۴۹
۴	۸۴	۲۷۳±۶۷
۸	۸۶	۴۸۱±۹۹
۱۰	*۵۰	۶۶۹±۲۴۵
۱۶	۱۵	۱۱۰۵±۱۹۱

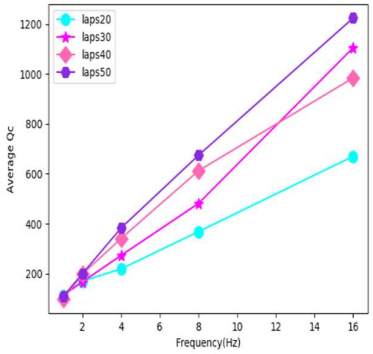
(ب)

فرکانس مرکزی (Hz)	NT	$Q_C \pm \sigma$
۱	۸۹	۱۲۹±۵۴
۱/۵	*۱۵۰	۱۷۱±۴۵
۲	۱۶۸	۲۱۴±۵۸
۴	۲۲۴	۳۵۷±۱۰۰
۸	۲۱۸	۵۷۳±۱۴۶
۱۰	*۱۵۰	۷۲۰±۲۹۳
۱۶	۱۳۸	۱۰۶۹±۴۷۱

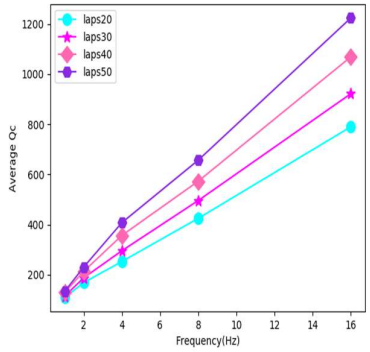
۵ بحث و بررسی نتایج

۵-۱ تغییرات ژرفی کاهندگی (وابستگی Q_c به زمان گذشت)

مقایسه مقادیر میانگین Q_c در زمان گذشت‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ ثانیه در شکل ۳ نشان می‌دهد با افزایش زمان گذشت،



(الف)



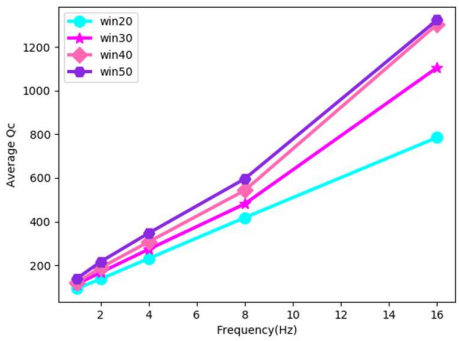
(ب)

شکل ۳. ارزیابی تغییرات Q_c با زمان گذشت و فرکانس (الف) با استفاده از پارامترهای مرجع هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) (ب) با استفاده از پارامترهای مرجع پژوهش حاضر.

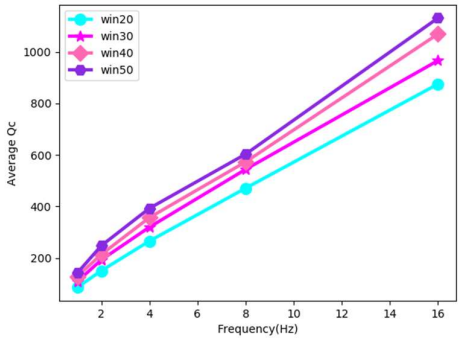
مقدار Q_c افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه مقادیر میانگین Q_c در طول پنجره‌های زمانی ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ ثانیه در شکل ۴ نیز مطابق انتظار نشان می‌دهد با افزایش طول پنجره زمانی، مقدار Q_c افزایش می‌یابد. نمودارها به‌خوبی بیانگر افزایش مقادیر Q_c با افزایش فرکانس هستند. با افزایش زمان گذشت، امواج لرزه‌ای از اعماق بیشتری در زمین عبور می‌کنند. مقادیر ضریب کیفیت Q_c در چهار پنجره زمان گذشت (از ۲۰ تا ۵۰ ثانیه با گام ۱۰ ثانیه) رفتار افزایشی داشته است. افزایش مقادیر Q_c با افزایش زمان گذشت و عمق به معنی این است که با افزایش عمق، از مقدار ناهمگنی زمین کاسته می‌شود.

بررسی نتایج نشان می دهد علیرغم افزایش ضریب کیفیت کدا در چهار پنجره زمانی ۲۰ تا ۵۰ ثانیه با بازه‌های ۱۰ ثانیه‌ای، مقادیر کم Q_0 در پنجره‌های ابتدایی کدا، موید بی‌هنجاری‌های شدید در لایه‌های کم‌ژرفای زمین در محدوده مورد مطالعه است. مقادیر Q_c به همراه روابط فرکانسی آنها نشان می‌دهد منطقه مورد مطالعه از نظر زمین‌ساختی فعال است (شکل‌های ۳ و ۴).

مقایسه سایر پارامترهای مؤثر در تعیین Q_c در نمودارهای ۵- الف تا ۵- و به‌خوبی نمایانگر تغییرات مقدار ضریب کیفیت با تغییر در سایر پارامترهای مورد بحث در پژوهش حاضر است.



(الف)



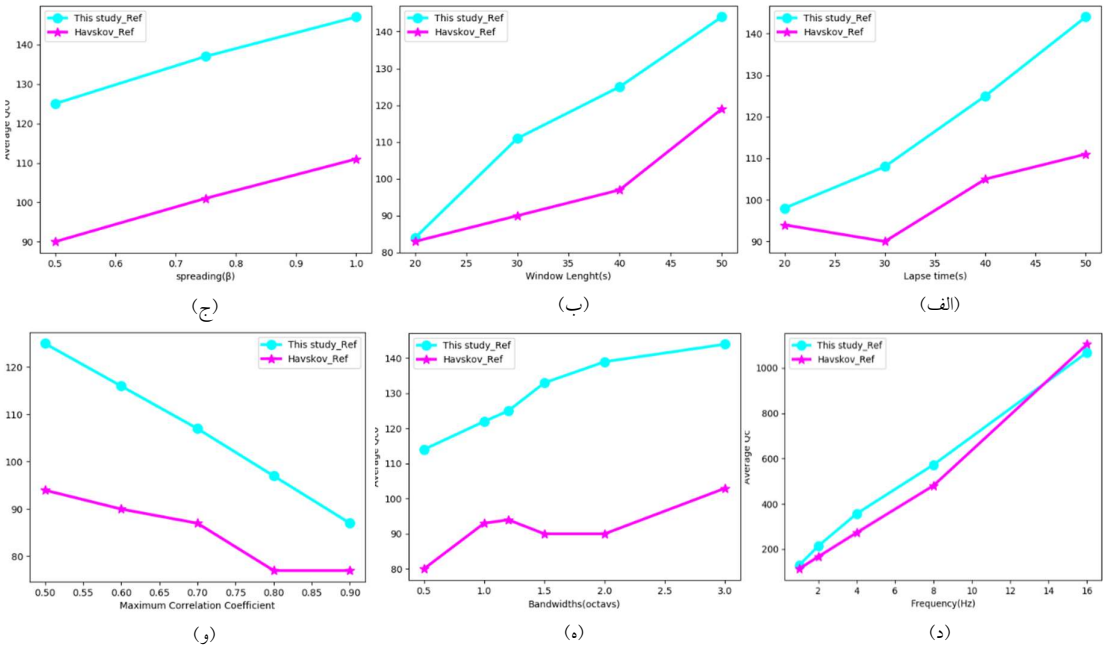
(ب)

شکل ۴. ارزیابی تغییرات Q_c با طول پنجره و فرکانس (الف) با استفاده از پارامترهای مرجع هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) (ب) با استفاده از پارامترهای مرجع پژوهش حاضر.

با توجه به محاسبات این پژوهش به‌خوبی نشان داده شده است که زمان گذشت، طول پنجره و فرکانس تأثیر زیادی بر نتایج دارند و بررسی مقادیر Q_c برحسب فرکانس نشان می‌دهد این مقادیر تابعی از فرکانس هستند و با افزایش فرکانس، افزایش می‌یابند، اما سایر پارامترها مانند پهنای فیلتر، طول پنجره rms، ضریب همبستگی و پارامترگسترش هندسی کمتر تأثیرگذارند که این موضوع با یافته‌های دیگر در این زمینه به‌خوبی سازگار است (شکل ۵). همچنین نسبت سیگنال به نوفه نیز تأثیر کمی در تعیین این پارامتر دارد (جدول ۱۰). پهنای فیلتر، طول پنجره rms و ضریب همبستگی تأثیر شایان توجهی بر Q_0 و تأثیر اندکی بر Q_{10} دارند که نشان می‌دهد این تغییرات تنها یک اثر پردازشی است؛ بنابراین تعیین Q_0 واقعی ممکن است دشوارتر از Q_{10} واقعی باشد (هاوسکوف و همکاران، ۲۰۱۶). ازآنجاکه امواج دنباله‌ای تصادفی هستند و از همه جهت‌ها به سوی ایستگاه حرکت می‌کنند، انتظار می‌رود تفاوتی بین مؤلفه‌های سه‌گانه وجود نداشته باشد (دل پتزو و همکاران، ۱۹۸۵ و ساتو و همکاران، ۲۰۱۲). جدول ۲ نتایج را با استفاده از مؤلفه‌های جداگانه و هر سه مؤلفه نشان می‌دهد. نتایج تقریباً یکسان هستند که بیانگر پایداری روش CWD است.

۵-۲ تغییرات جانبی کاهندگی کدای موج در منطقه

تغییرات Q و α احتمالاً به دلیل عوامل مختلف زمین‌شناسی همچون جنس مواد زیرسطحی، میزان شکستگی‌ها و لرزه‌خیزی منطقه است (هلوگ و همکاران، ۱۹۹۵؛ بیانکو و همکاران، ۱۹۹۹، میچل و همکاران، ۲۰۱۴ و احمدزاده و همکاران، ۲۰۱۷و۲۰۱۹). علاوه‌براین، مقدار Q و α در هر ایستگاه در واقع میانگین این مقادیر در محیط پیرامون ایستگاه است. برای تحلیل دقیق‌تر تغییرات جانبی کاهندگی در سطح منطقه برای شانزده ایستگاه لرزه‌نگاری موجود در مناطق مختلف پهنه شرق و شمال شرق کشور، پارامتر ضریب کیفیت امواج دنباله‌ای جداگانه محاسبه و ارزیابی شد (جدول ۱۳).



شکل ۵. ارزیابی تغییرات Q_c با (الف) زمان گذشت (ب) طول پنجره (ج) گسترش هندسی (د) فرکانس (ه) طول باند فیلتر (و) ضریب همبستگی. نمودار بنفش: نتایج با استفاده از پارامترهای مرجع هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶)؛ نمودار سبز: نتایج با استفاده از پارامترهای مرجع پژوهش حاضر.

نتایج نشان می‌دهد پارامترهای Q_0 و α برای مناطق لرزه‌ای شرق و شمال شرق ایران به‌ترتیب از ۷۹ تا ۲۰۶ و ۰/۵۴ تا ۱/۱ متغیر است (به استثنای ایستگاه KKHK با Q_0=۵۹۴ و α=۰/۲۸). این محدوده از مقادیر نشان‌دهنده لرزه‌خیزی منطقه است. متفاوت بودن مقادیر برای ایستگاه‌های مختلف ناشی از تفاوت در مسیر پرتوها از چشمه تا ایستگاه است. بیشترین مقدار بسامدی ضریب کیفیت مربوط به ایستگاه SRKH با Q_0 = ۲۰۶ و کمترین میزان آن مربوط به ایستگاه DARN با Q_0 = ۷۹ است که گویای جذب زیاد پیرامون این ایستگاه است. همان‌گونه‌که در شکل ۱ دیده می‌شود، ضریب کیفیت ناحیه پهنه گسلی درونه نسبت به سایر مناطق به‌مراتب کمتر و تضعیف در آن بیشتر است که این موضوع با توجه به ویژگی‌های این پهنه گسلی معقول به‌نظرمی‌رسد و جایگاه زمین‌ساختی فعال گسل یادشده را تأیید می‌کند.

۵-۳ وابستگی Q_c به فاصله رومرکزی

امواج دنباله‌ای ثبت‌شده در ایستگاه‌های نزدیک‌تر از محیط‌های کوچک‌تر و محدودتری دریافت شده‌اند،

درحالی‌که امواج ثبت‌شده در ایستگاه‌های دورتر، محیط‌های وسیع‌تر و عمیق‌تری را پوشش می‌دهند؛ بنابراین برای مطالعه ارتباط میرایی با فاصله رومرکزی (R)، پارامتر کیفیت در فرکانس‌های مرکزی تعریف‌شده بررسی شد. در شکل ۶ توزیع مقادیر کدا Q برای شرق و شمال شرق ایران برحسب فاصله رومرکزی در هر باند فرکانسی نشان داده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود تراکم محاسبات این پارامتر در فاصله رومرکزی ۹۰-۴۰ کیلومتر و در فرکانس‌های ۴ و ۸ بیشتر است. همچنین در شکل ۷ توزیع تعداد مقادیر کدا Q محاسبه‌شده برای منطقه در هر باند فرکانسی به‌صورت بافت‌نگار ارائه شده است.

بررسی توزیع مقادیر Q_c در باندهای فرکانسی ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ هرتز نشان می‌دهد با افزایش فرکانس، Q نیز افزایش می‌یابد؛ برای مثال در فرکانس مرکزی ۱۶ هرتز، مقدار Q_c تا حدود ۲۰۰۰ افزایش یافته است (شکل ۷).

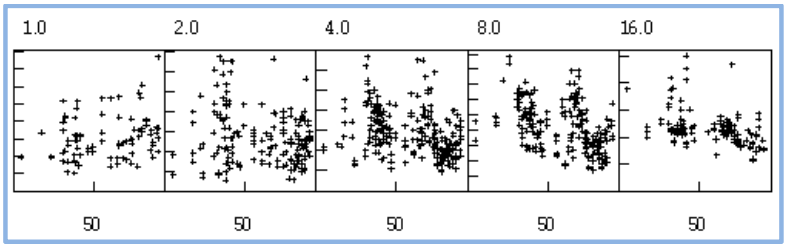
۵-۴ مقایسه Q_c در مناطق مختلف ایران

رابطه Q_c در مطالعات مختلف برای پهنه فلات ایران ارزیابی شده است (برای مثال رحیمی و حمزه‌لو، ۲۰۰۸؛ نجفی‌پور و رحیمی، ۲۰۱۵ و متقی و همکاران، ۲۰۱۷). پژوهش حاضر مطالعه همه‌جانبه‌ای از نظر تعداد پارامترهای مؤثر در برآورد ضریب کیفیت امواج دنباله‌ای ارائه می‌دهد. هنگام مقایسه نتایج مطالعات مختلف باید توجه کرد که تفاوت در روش‌ها، داده‌ها و پارامترهای استفاده‌شده در تعیین ضریب کیفیت (Q) امکان مقایسه دقیق نتایج مطالعات ذکرشده را دشوار می‌کند. باوجوداین، پارامترهای Q_0 و α صرف‌نظر از روش‌های مختلف به‌کاررفته، بیانگر میزان فعالیت زمین‌ساختی منطقه هستند، به‌گونه‌ای‌که مناطق فعال زمین‌ساختی مقدار Q_0 کمتری نسبت به مناطق پایدار دارند. نزدیک بودن مقدار α به عدد ۱، بیانگر تضعیف بیشتر و در نتیجه، فعالیت بیشتر در منطقه است (وودگلد، ۱۹۹۴ و هلوگ و همکاران، ۱۹۹۵).

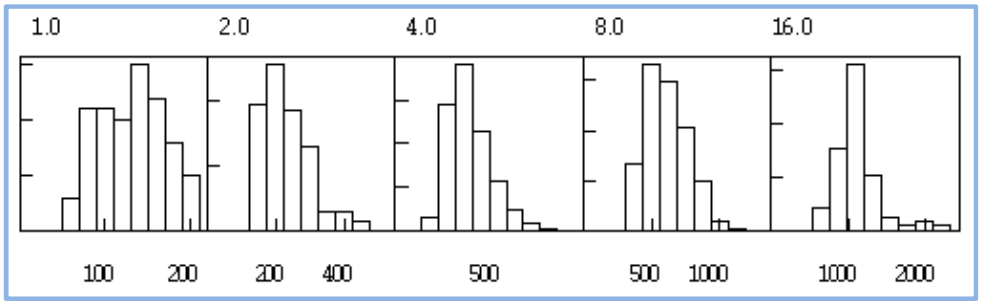
رابطه حاصل از این مطالعه با روابط به‌دست‌آمده از مطالعات دیگر در ایران در شکل ۸ نشان داده شده است. تفاوت در روابط مختلف می‌تواند ناشی از تفاوت در روش‌های مورد استفاده، نوع تابع درنظرگرفته‌شده برای گسترش هندسی، محدوده فرکانسی، فواصل مورد مطالعه و سایر عوامل مؤثر در برآورد ضریب کیفیت باشد.

۵-۵ مقایسه Q_C در مناطق مختلف جهان

هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر پارامترهای مختلف پردازش را در ارزیابی مقادیر Q_c برای مناطق مختلف زمین‌ساختی مطالعه کردند. ایشان از زمین‌لرزه‌های محلی با فاصله رومرکزی کمتر از ۱۰۰ کیلومتر استفاده و پارامتر کاهندگی امواج دنباله‌ای (کدا Q) را در مناطق مختلف شامل جزیره آتشفشانی ژان‌ماین بین نروژ و گرینلند، جنوب غربی نروژ، دره شانشی واقع در شمال چین، آرژانتین، شرق آناتولی واقع در ترکیه و مجمع‌الجزایرآتشفشانی آزور واقع در محل تلاقی صفحات سه‌گانه سنگ‌کره‌ای آمریکای شمالی، اوراسیا و آفریقا برآورد و برای تسهیل در مقایسه نتایج مطالعات خود با سایر مطالعات، پیشنهاد استفاده از پارامترهای یکسان را مطرح کردند.



شکل ۶. توزیع مقادیرکدا Q برای شرق و شمال شرق ایران برحسب فاصله رومرکزی در هر باند فرکانسی. محور x معرف فاصله رومرکزی و محور y معرف کدا Q در فواصل نشان داده شده است. محورy به‌صورت خودکار مقیاس شده است.



شکل ۷. توزیع مقادیر Qc برای شرق و شمال شرق ایران و باند فرکانسی. محور x معرف مقدار Qc و محور y معرف تعداد تعیین‌های Qc در فواصل نشان داده شده است. محور y به‌صورت خودکار مقیاس شده است.

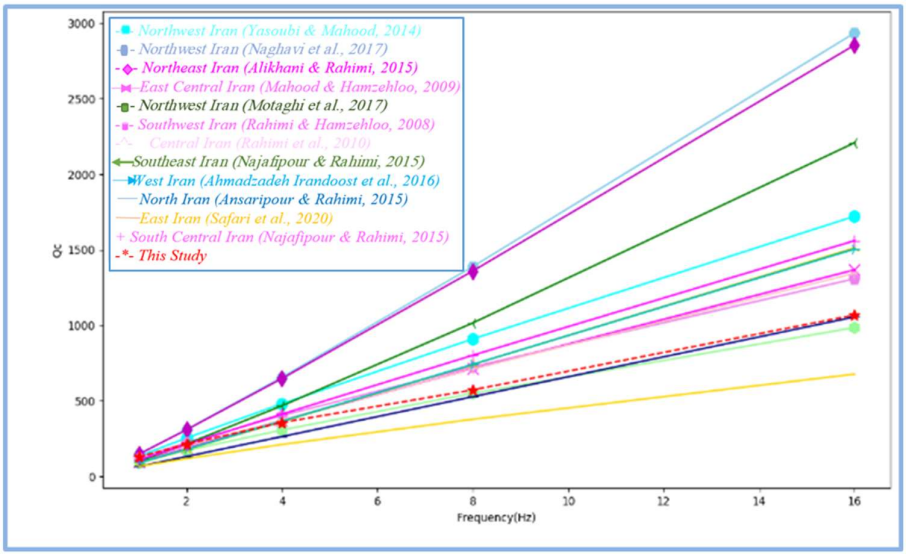
جدول۱۳. مقادیر Q_{10}، Q_0، α، انحراف استاندارد (sd)، ضریب همبستگی و میانگین کل برای ایستگاه منطقه شرق و شمال شرق ایران.

ردیف	ایستگاه	NT	Q10	Q0	sd	α	sd	corr
۱	BJRD	۵۳	۶۱۹	۱۰۶	۲۴	۰/۷۷	۰/۱۲	۰/۹۸
۲	SHRT	۳۰۹	۸۶۲	۱۴۵	۳۵	۰/۷۸	۰/۱۱	۰/۹۹
۳	MRVT	۱۶۲	۶۳۵	۱۲۸	۱۸	۰/۷۰	۰/۰۷	۱
۴	BJNR	۱۵	۶۷۶	۹۵	۱۱	۰/۸۵	۰/۰۹	۱
۵	SBZR	۳۱	۵۳۷	۱۲۹	۳۵	۰/۶۲	۰/۱۹	۰/۹۹
۶	QUCH	۱۱۱	۵۷۹	۱۱۳	۲۱	۰/۷۱	۰/۱۳	۰/۹۷
۷	TABS	۱۰	۸۲۱	۱۳۰	۱۱	۰/۸۰	۰/۰۵	۰/۹۹
۸	FRDS	۱۴	۶۹۴	۱۸۲	۲۷	۰/۵۸	۰/۰۶	۰/۹۷
۹	KKHK	۴	۱۱۲۹	۵۹۴	۱۰۱	۰/۲۸	۰/۰۷	۱
۱۰	NJFI	۱۹	۴۵۵	۱۳۱	۲۴	۰/۵۴	۰/۰۹	۰/۹۸
۱۱	NHDN	۱۰	۷۲۵	۱۸۲	۱۷	۰/۶۰	۰/۰۳	۰/۹۶
۱۲	DARN	۱۹	۹۹۱	۷۹	۱۸	۱/۱	۰/۱۵	۰/۹۹
۱۳	MSHD	۴۳	۶۳۸	۱۶۹	۲۸	۰/۵۸	۰/۰۸	۰/۹۹
۱۴	KHAF	۷	۷۲۸	۱۹۱	۶۲	۰/۵۸	۰/۱۳	۱
۱۵	SRKH	۱۵	۹۵۷	۲۰۶	۲۸	۰/۶۷	۰/۰۷	۰/۹۹
۱۶	KRBR	۱۵	۵۱۲	۹۵	۶	۰/۷۳	۰/۰۲	۱
۱۷	Total	۸۳۷	۷۲۰	۱۲۵	۳۲	۰/۷۶	۰/۱۴	۱

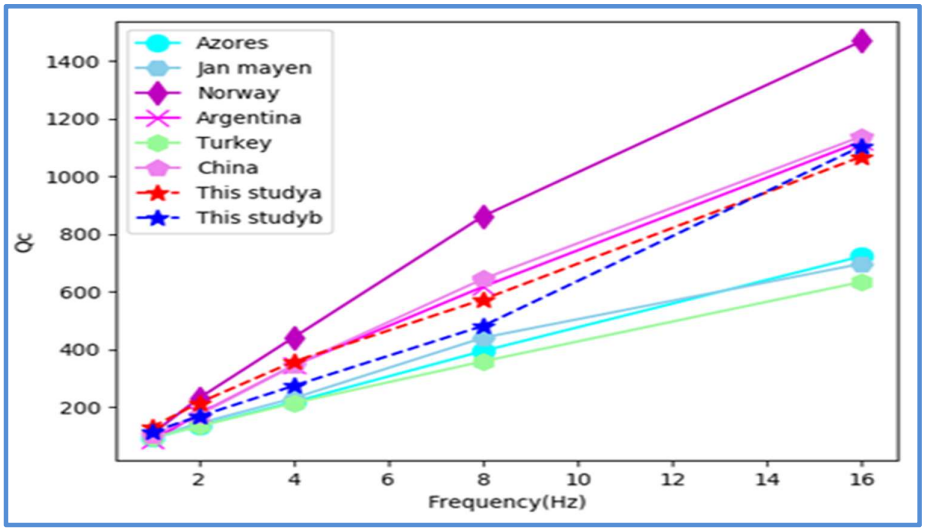
روابط حاصل از این پژوهش در مقایسه با سایر نقاط جهان (هاوسکوف و همکاران، ۲۰۱۶) در شکل ۹ نمایش داده شده است. علاوه بر رابطه مبتنی بر پارامترهای بهینه متناسب با بانک داده این پژوهش (رابطه a)، رابطه حاصل بر اساس پارامترهای پیشنهادی هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) (رابطه b) نیز ارائه شده است. با مقایسه روابط در شکل ۹ ملاحظه می‌شود روابط حاصل از این پژوهش با برخی از روابط ازجمله رابطه ارائه‌شده برای شمال چین و آرژانتین مشابهت بیشتری نسبت به سایر مناطق دارد.

جدول ۱۴. روابط Qc به‌عنوان تابعی از فرکانس، مطالعه حاضر در مقایسه با روابط هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) در سایر مناطق جهان.

منطقه	رابطه Qc	NT
این مطالعه	$Q_c = ۱۲۵ \pm ۳۲f^{۰/۷۶\pm۰/۱۴}$	۸۳۷
آزور	$Q_c = ۸۶ \pm ۵f^{۰/۷\pm۰/۰۴}$	۷۶۷۱
ژاپن	$Q_c = ۹۰ \pm ۵f^{۰/۷۲\pm۰/۰۴}$	۳۰۳۷
نروژ	$Q_c = ۱۲۴ \pm ۷f^{۰/۹۱\pm۰/۰۲}$	۱۷۷۱
آرژانتین	$Q_c = ۸۹ \pm ۴f^{۰/۹۴\pm۰/۰۲}$	۲۲۱۲
ترکیه	$Q_c = ۸۸ \pm ۴f^{۰/۶۶\pm۰/۰۴}$	۱۰۷۸
چین	$Q_c = ۹۹ \pm ۴f^{۰/۸۹\pm۰/۰۲}$	۱۴۰۷



شکل ۸ پارامتر Qc برحسب فرکانس برای مناطق مختلف ایران.



شکل ۹. مقایسه نتایج پژوهش حاضر برای تغییرات Qc برحسب فرکانس در مقایسه با مطالعه هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) در سایرمناطق جهان.

۶ نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف در تعیین ضریب کیفیت امواج دنباله‌ای بررسی شد. برای این منظور داده‌های سه شبکه لرزه‌نگاری در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۰ با یکدیگر تلفیق و پردازش شد. پارامتر کیفیت امواج دنباله‌ای برای منطقه شرق و شمال شرق ایران با استفاده از پارامترهای مرجع این پژوهش برابر با $Q_c = ۱۲۵f^{۰/۷۶}$ برآورد شده است. برای مقایسه نتایج با سایر مطالعات، از پارامترهای مرجع پیشنهادی هاوسکوف و همکاران (۲۰۱۶) نیز برای محاسبه رابطه امواج کدا استفاده شده است که رابطه آن به‌صورت $Q_c = ۹۰f^{۰/۸۷}$ است.

با درنظرگرفتن مقدار Q_0 در مناطق فعال زمین‌ساختی (Q_0<۲۰۰) در مقایسه با مناطق پایدار (برای مثال Q_0>۶۰۰) (یون و همکاران، ۲۰۰۷ و فورد و همکاران، ۲۰۰۸) ملاحظه می‌شود مقادیر تخمین‌زده‌شده Q_0 در این مطالعه از نظر زمین‌ساختی در محدوده سایر مناطق فعال جهان است و با مطالعات صورت‌گرفته برای نواحی فعال زمین‌ساختی دیگر نقاط ایران نیز همخوانی دارد؛ برای مثال نتایج پارامترهای بهینه این پژوهش با نتایج مطالعه علیخانی و رحیمی (۲۰۱۵) برای شمال شرق ایران ($Q_c = ۱۲۰f^{۱/۰۱}$)، معهود و حمزه لو (۲۰۰۹) برای شرق ایران ($Q_c = ۱۰۱f^{۰/۹۴}$) و سفری و همکاران (۲۰۲۰) برای منطقه فریمان ($Q_c = ۶۶f^{۰/۸۴}$) تطابق خوبی دارد. بدیهی است، نتایج محاسبه ضریب کیفیت به عوامل مختلفی ازجمله زمان گذشت، پهنای باند فیلتر، پارامتر گسترش هندسی، فاصله رومرکزی و... وابسته است؛ بنابراین مقایسه دقیق تنها زمانی امکان‌پذیر است که پارامترهای مورد استفاده در روابط مختلف مشابهت داشته باشند. استفاده از روش و پارامترهای پردازش مشابه، امکان اظهارنظر را درباره تفاوت‌های زمین‌ساختی مناطق مختلف هموارتر می‌کند.

تقدیر و تشکر

در این مطالعه از مرکز لرزه‌نگاری کشوری، مرکز ملی شبکه لرزه¬نگاری باند¬پهن ایران و شبکه لرزه‌نگاری باندپهن دانشگاه فردوسی مشهد به دلیل در اختیار قرار دادن لرزه-نگاشت¬های زمین‌لرزه¬های شرق و شمال شرق کشور صمیمانه سپاسگزاری می¬شود. از داوران محترم و سردبیر محترم مجله که با پیشنهادهای خود باعث ارتقاء کیفیت مقاله شده اند، صمیمانه قدردانی می¬شود. نویسنده اول به عنوان پژوهشگر پسادکترا از حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) به شماره طرح ۹۹۰۲۸۴۹۲ برخوردار بوده است.

منابع

Ahmadzadeh, S., Parolai, S., Javan Doloei, G., and Oth, A., 2017, Attenuation characteristics, source parameters and site effects from inversion of S waves of the March 31, 2006 Silakhor aftershocks: Annals of Geophysics, **60**(6), 1-15, DOI: 10.4401/ag-7520.

Ahmadzadeh, S., Javan Doloei, G., Parolai, S., Oth, A., 2019, Non-parametric spectral modelling of source parameters, path attenuation and site effects from broad-band waveforms of the Alborz earthquakes (2005–2017): Geophysical Journal International, **219**(3), 1514-1531, DOI: 10.1093/gji/ggz377.

Ahmadzadeh Irandoost, M., Sobouti, F., and Rahimi, H., 2016, Lateral and depth variations of coda Q in the Zagros region of Iran: Journal of Seismology, **20**(1), 197-211, DOI: 10.1007/s10950-015-9520-1.

Aki, K., and Chouet, B., 1975, Origin of coda waves: Source, attenuation and scattering effects: Journal of Geophysical Research, **80**(23), 3322–3342.

Aki, K., 1980, Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere: Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **85**(B11), 6496-6504.

Alikhani, E., Rahimi, H., 2015, Estimation quality factor of Coda wave in the northeast of Iran: Journal of the Earth and Space Physics, 41(1), 25-33, (Extended Abstract in English). DOI: 10.22059/JESPHYS.2015.53420.

Amiri Fard, R., Javan-Doloei, G., Farrokhi, M., Rahimi, H., and Ma'hood, 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), SE437-SE437.

Ansaripour, M., Habib, R., 2015, Coda waves application in Obtaining the path and source effects: Proceedings of the 7th International Conference on Seismology & Earthquake Engineering, 69-70, 18-15 May 2015, Tehran.

Bianco, F., Castellano, M., Del Pezzo, E., and Ibáñez, J. M., 1999, Attenuation of short-period seismic waves at Mt. Vesuvius, Italy: Geophysical Journal International, **138**, 67–76.

Del Pezzo, E., De Natale, G., Scarcella, G., and Zollo, A., 1985, Qc of three component seismograms of volcanic microearthquakes at Campi Flegrei volcanic area—southern Italy, Pure Appl. Geophys. 123, 683–689.

Ford, S. R., Dreger, D. S., Mayeda, K., Walter, W. R., Malagnini, L., and Phillips, W. S., 2008, Regional attenuation in northern California: A comparison of five 1D Q methods: Bulletin of the Seismological Society of America, **98**(4), 2033-2046.

Gusev, A. A., 1995, Vertical profile of turbidity and coda Q: Geophysical Journal International, **123**(3), 665-672.

Havskov, J., Sǫrensen, M. B., Vales, D., Özyazoǵlu, 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), 956-970.

Hellweg, M., Spudich, P., Fletcher, J. B., and Baker, L. M., 1995, Stability of coda Q in the region of Parkfield, California: View from the US Geological Survey Parkfield dense seismograph array: Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **100**(B2), 2089-2102.

Khosravi, H., Javan Doloei, G., Tatar, M., Safari, M., 2019, Analysis of the Do-Ghaleh Fariman Mw6 Earthquake on 5 April 2017 and its aftershocks based on IIEES local Seismic Network: Journal of the Earth and Space Physics, **45**(3), 487-505, (Extended abstract in English). DOI:10.22059/JESPHYS.2019.264187.1007032.

Ma'hood, M., and Hamzehloo, H., 2009, Estimation of coda wave attenuation in East Central Iran: Journal of Seismology, **13**(1), 125-139, DOI: 10.1007/s10950-008-9130-2.

Mitchell, B. J., Cong, L., and Jemberie, A. L., 2014, Continent-wide maps of Lg coda Q for North America and their relationship to crustal structure and evolution: Bulletin of the Seismological Society of America, **105**(1), 409-419.

Motaghi, K., Zarunizadeh, Z., Rahimi, H., Ghods, A.R., 2017, Estimation of Coda wave attenuation in NW Iran: Iranian Journal of Geophysics, 11(1), 156-170, (Extended Abstract in English).

Naghavi, M., Habib, R., Moradi, A., 2017, Estimation of compressional and shear wave quality factor in North West of Iranian Plateau: Iranian Journal of Geophysics, **10**(4), 97-111.

Najafipour N., Rahimi, H., 2015, Estimation of quality factor of coda waves in Makran region, southeast of Iran: Iranian Journal of Geophysics, **9**(2), 96-116, (Extended Abstract in English). DOI: 20.1001.1.20080336.1394.9.2.8.8.

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), 173–185.

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**(3), 1643–1654.

Safari, M., Doloei, G.J., Mahood, M., Khosravi, H., Tatar, M., 2020, Estimation of Seismic Wave Attenuation in Fariman Region: Bulletin of Earthquake Science and Engineering, **7**(3), 1-12, (Extended Abstract in English).

Sato, H., Fehler, M. C., and Maeda, T., 2012, Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth: Springer.

Wood Gold, C. R. D., 1994, Coda Q in the Charlevoix, Quebec, region: Lapse-time dependence and spatial and temporal comparisons: Bulletin of the Seismological Society of America, **84**(4), 1123–1131.

Yasoubi Rostami, H., Mahood, M., and .Ansari, A., 2014, Qc estimation for North-West Iran: Proceedings of 16th Iranian Conference on Geophysics, 466-470, 12-14 May 2014, Tehran, National Iranian Geophysical Society.

Yun, S., Lee, W.S., Lee, K., and Noh, M.H., 2007, Spatial distribution of coda Q in South Korea: Bulletin of the Seismological Society of America, **97**(3), 1012–1018.

Investigation of frequency dependence of seismic coda wave quality factor in the east-northeast of Iran

Somayeh Ahmadzadeh[1], Farahnaz Mansouri Ghavamabadi [2] and Gholam Javan Doloei [3*]

[1]*Postdoctoral Researcher, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran*
[2]*M.Sc., International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran*
[3]*Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran*

(Received: 10 May 2022, Accepted: 11 September 2022)

Summary

In this study, coda wave decay parameter, coda Q, is evaluated using waveform data of three networks in the east and northeast of Iran based on the single-scattering method. The database includes 300 earthquakes with magnitudes in the range of 2.5-6.0 recorded in 2012 to 2020. The waveforms were gathered from the Iranain Seismological Center (IRSC) of the University of Tehran, National center of Broadband Seismic Network of Iran (BIN) at the International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) and Seismological Earthquake Research Center of the Ferdowsi University of Mashhad (FUMSN). The coda Q for the east-northeast of Iran was calculated as $Q_c = 125f^{0.76}$ for a lapse time of 40s and optimal parameters of our database. We also evaluated coda Q based on parameters proposed by Havskov et al. (2016) as $Q_c = 90f^{0.87}$ and as can be seen, the difference in the parameters leads to the different results. Furthermore, the effect of different parameters in estimating the quality factor of coda waves was investigated. The frequency dependence of the wave attenuation coefficient is evident in this region. Considering the 10-year interval of earthquakes used in the east and northeast of of Iran in this study, the obtained results indicate high seismicity rate and continuous seismic activity in the study area.

Recently some studies have been conducted to study the seismic wave propagation effects in this region. For example, Safari et al. (2020) investigated the attenuation of seismic waves in the Fariman region based on 122 local earthquakes recorded in a temporary dense seismic network of IIEES. Based on this research, the frequency relationship $Q_c = 66f^{0.84}$ for a lapse time of 20s was obtained.

The results of the quality factor studies depend on tectonic regime of the study area and various proccesing factors, such as: the lapse time, filter bandwidth, the window length, etc. Therefore, accurate comparison is only possible when similar parameters are considered in different studies.

We compared our results with several studies in different regions of Iran and other parts of the world. The estimated values of Q_0 in this area are in the same range of active regions of the world (Q_0 <200) and is near to the results of studies conducted for another active regions of Iran. The results of our study are in good agreement with previous studies and indicate the strong frequency dependency in attenuation of seismic waves in northeast of Iran Plateaue. The observed small differences in coda Q estimates originate from differnet tectonic rigions and processing parameters.

Keywords: Coda waves, quality factor, single scattering method, waveform, earthquake

*Corresponding author: javandoloei@iiees.ac.ir