

بر آورد کاهندگی امواج کدا (Q_c^{-1}) در شمال زون سندج - سیرجان

رضا امامی، مهدی رضاپور^۲ و رضا رضایی^۳

^۱دانشجوی دکترا، گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲دانشیار، گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱

چکیده

مطالعه تحلیل خطر زمین‌لرزه و نیز برآورد جنبش نیرومند زمین و از طرفی بررسی ساختار زمین نیازمند شناخت و برآورد کاهندگی امواج زمین‌لرزه است. کاهندگی امواج لرزه‌ای به همراه سرعت انتشار امواج، از پارامترهای فیزیکی مهمی تلقی می‌شوند که نحوه انتشار امواج زمین‌لرزه را تحت تأثیر قرار می‌دهند که به تبع آن برای تعیین دقیق پارامترهای چشمه زمین‌لرزه و نیز کاهش خطر زمین‌لرزه در منطقه مورد نیاز هستند. برای محاسبه کاهندگی (Q_c^{-1}) از ضریب کیفیت لرزه‌ای (Q) استفاده می‌شود که از پارامترهای مهم علم زلزله‌شناسی است. در این مطالعه ضریب کیفیت با استفاده از دو روش تک‌پراکنش به عقب و تک‌پراکنش همسانگرد برای شمال زون سندج - سیرجان برآورد شد. مقادیر بزرگ‌تر نشان‌دهنده همگنی بیشتر در لایه‌های کم‌عمق زمین است و لذا در بررسی‌های تحلیل خطر می‌توان از این نتایج بهره برد. برای این کار از نداشتن‌های ثبت شده در ایستگاه‌های مراکز لرزه‌نگاری داخل استفاده شده است که در ناحیه مورد مطالعه با طول جغرافیایی ۴۸ تا ۵۰ و عرض جغرافیایی ۳۸ تا ۴۰ درجه قرار دارند. در این تحقیق از داده‌های با فاصله رومرکزی کمتر از ۲۰۰ کیلومتر و نسبت سیگنال به نوفه مساوی و بیشتر از ۳ استفاده شد تا شکل موج‌های مناسب به کار گرفته شود. به دلیل برداشت حجمی، امواج کدا از محیط تغییرات امواج کدا در دو حالت جانبی و عمقی بررسی شد و در نهایت نتایج با مقادیر به دست آمده برای مناطق دیگر ایران و جهان مورد مقایسه قرار گرفت. برای بررسی تغییرات جانبی پس از اعمال فیلتر میان‌گذر بر نداشتن‌های لرزه‌ای در ۱۰ باند بسامدی، مقادیر ضریب کیفیت برآورد شد و در نهایت میانگین مقادیر ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی در منطقه با استفاده از داده‌های با فواصل کمتر از ۲۰۰ کیلومتر و به کارگیری روش‌های تک‌پراکنش به عقب و روش تک‌پراکنش همسانگرد به ترتیب $Q_c = 149 \pm 9^{f^{0.66 \pm 0.03}}$ و $Q_c = 152 \pm 12^{f^{0.66 \pm 0.03}}$ به دست آمد. همچنین مقایسه بین نتایج منطقه مورد مطالعه با مقادیر به دست آمده در منطقه ایران مرکزی، البرز و زاگرس ($Q_c = 79f^{0.07}$) و جنوب خاوری زاگرس ($Q_c = 72f^{1.19}$) حاکی از همگنی بیشتر در لایه‌های کم‌عمق و لرزه‌خیزی کمتر نسبت به نواحی ایران مرکزی، البرز و زاگرس است. با توجه به اینکه با افزایش طول پنجره زمانی امواج از اعماق بیشتر عبور می‌کنند، بنابراین برای ارزیابی تغییرات عمقی ضریب کیفیت در منطقه، از ۱۱ پنجره زمانی کدا (از ۱۰ تا ۶۰ ثانیه با گام ۵ ثانیه) استفاده شد. به طوری که نتایج نشان می‌دهد مقادیر ضریب کیفیت در زمان‌های کاهندگی ۱۰ تا ۶۰ ثانیه به‌طور میانگین رفتار افزایشی خود را حفظ کرده‌اند. در پنجره‌های ابتدایی کدا مقادیر کم Q_0 نشانگر ناهمگنی شدید در لایه‌های کم‌عمق زمین است.

کلیدواژه‌ها: ضریب کیفیت، امواج کدا، زون سندج - سیرجان، تک‌پراکنش به عقب، تک‌پراکنش همسانگرد.

*نویسنده مسئول: مهدی رضاپور

E-mail: rezapour@ut.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

نقوی و همکاران (۱۳۹۵) در شمال باختر ایران ($Q_c = 147f^{0.08}$)، علیخانی و رحیمی (۱۳۹۴) در شمال خاور ایران ($Q_c = 120f^{0.01}$)، نجفی‌پور و رحیمی (۱۳۹۴) در جنوب خاور زاگرس ($Q_c = 72f^{1.19}$)، راستگو و همکاران (۱۳۹۰) در ناحیه هرمزگان ($Q_c = 61f^{0.09}$) (Rahimi et al., 2010)، البرز و ایران مرکزی ($Q_c = 79f^{0.07}$) برای البرز و $Q_c = 94f^{0.97}$ برای ایران مرکزی) و (Rahimi and Hamzehloo, 2008) در جنوب باختر ایران ($Q_c = 124f^{0.85}$) اشاره کرد. روش‌های گوناگونی برای برآورد ضریب کیفیت امواج P و S و کدای زمین‌لرزه‌های محلی وجود دارد. بعضی از این روش‌ها نسبت به تأثیرات کاهندگی، حساس‌ترند و برخی دیگر حساسیت کمتری دارند. به همین دلیل روش‌های متفاوت، نتایج متفاوتی خواهند داشت. کاهندگی برآورد شده از روی دامنه امواج مستقیم، شامل اثرات هر دو فرایند پراکنش و جذب ذاتی بوده؛ در حالی که کاهندگی برآورد شده از روی دامنه امواج کدا عمدتاً ناشی از جذب ذاتی است (Tselentis, 1998; Mukhopadhyay and Tyagi, 2008).

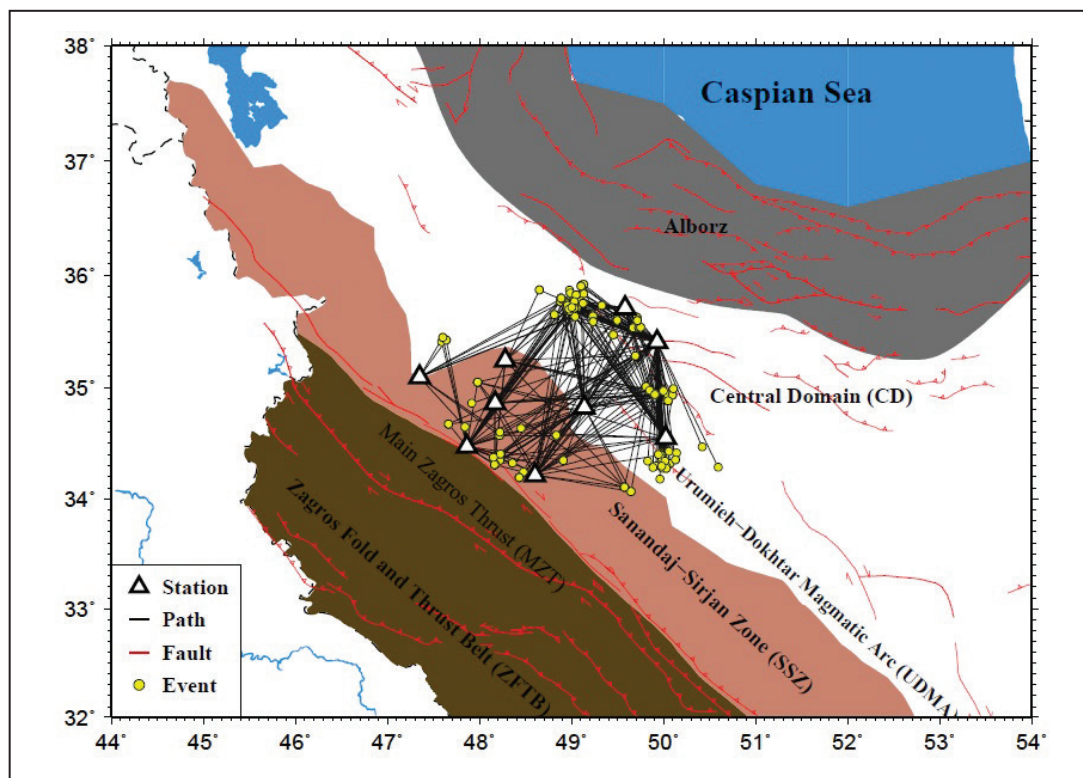
ناحیه مورد بررسی در این پژوهش، شمال زون سندج - سیرجان در باختر ایران است که از لحاظ جغرافیایی به‌صورت کمربندی با راستای شمال باختری - جنوب خاوری، به طول تقریبی ۲۰۰ کیلومتر و عرض تقریبی ۲۰۰ کیلومتر بین ۴۸ تا ۵۰ طول خاوری و ۳۴ تا ۳۶ عرض شمالی واقع شده است. شکل ۱ موقعیت رومرکز زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در برآورد Q_c و مسیر موج‌های عبوری بین محل وقوع زمین‌لرزه و گیرنده را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. این زون به‌عنوان پرتکاپوترین زون ساختاری در ایران بخشی از کوهزاد زاگرس و سامانه کوهزاد

در تحقیقات زلزله‌شناسی مهندسی مانند شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین، برآورد خطر زمین‌لرزه، تعیین روابط کاهندگی و نیز دیگر پژوهش‌های زلزله‌شناسی مانند بررسی تغییرات درونی زمین، برآورد کاهندگی امواج زمین‌لرزه حائز اهمیت است. با داشتن ضریب کیفیت ناحیه می‌توان به کیفیت جنس زمین و چگونگی فعالیت لرزه‌خیزی در آن ناحیه پی برد. همچنین با استفاده از این ضریب می‌توان برای محاسبه دیگر پارامترهای زمین‌لرزه از جمله سرعت، ممان و بزرگی کمک گرفت. امواج لرزه‌ای در هنگام عبور از زمین با محیط‌های ناهمگن، ناهمسانگرد و غیرکشنان برهمکنش دارند و بدیهی است که با شناخت تأثیر این عوامل روی نداشتن‌های لرزه‌ای می‌توان اطلاعات فراوانی از درون زمین به دست آورد. تاکنون تحقیقات بسیاری برای برآورد کاهندگی امواج درونی و کدا در مناطق گوناگونی از جهان انجام شده است. تحقیقات صورت گرفته بیانگر آن است که کاهندگی امواج زمین‌لرزه با لرزه‌خیزی و پیچیدگی‌های زمین‌ساختی هر منطقه در ارتباط است. به طوری که نواحی لرزه‌خیز و فعال زمین‌ساختی که دارای شارش گرمایی نسبتاً زیادی هستند، کاهندگی بیشتری نسبت به نواحی پایدار زمین‌ساختی دارند (Sato and Fehler, 1998). مطابق این تحقیقات، ضریب کیفیت در بسامد مرجع ۱ هرتر (Q_0)، در مناطق فعال زمین‌ساختی مقادیر کمی (کمتر از ۲۰۰) دارد. در حالی که مناطق پایدار زمین‌ساختی دارای مقادیر Q_0 زیاد (بیشتر از ۶۰۰) هستند (Sedaghati and Pezeshk, 2016). در ایران نیز تحقیقاتی برای برآورد ضریب کیفیت امواج لرزه‌ای با استفاده از زمین‌لرزه‌های محلی صورت گرفته است. از مطالعات انجام شده برای تعیین ضریب کیفیت امواج کدا می‌توان به

سخت شده و به همین دلیل به‌عنوان گستره‌ای غیر لرزه‌زا مطرح شده است (Berberian, 1976)؛ بر اساس زمین‌لرزه‌های کمی که در این پهنه رخ می‌دهد، تصور می‌شود که سنندج-سیرجان همانند یک بلوک سخت شده عمل می‌کند (Jackson and McKenzie, 1984) و این در حالی است که در بخش‌هایی از این پهنه ساختاری گسل‌هایی مشخص شده‌اند که بعضی از آنها نشانگر جابه‌جایی راست‌لغز راست‌بر در رسوبات کواترنری هستند (Sheikholeslami et al., 2003). برخی بر این باورند که حرکت عهد حاضر این گسل‌ها غیر لرزه‌زاست و به همین دلیل این پهنه ساختاری با وجود قرارگیری در مجاورت بلافضل کمربند جوان زاگرس به‌عنوان پهنه‌ای غیر لرزه‌زا مطرح می‌شود (صفری و همکاران، ۱۳۹۴).

همان‌طور که ذکر شد برآورد جذب امواج لرزه‌ای توسط محققین مختلف در پهنه‌های گوناگون فلات ایران انجام شده است، اما تاکنون برای شمال زون سنندج-سیرجان مطالعه مقادیر جذب امواج لرزه‌ای به‌صورت جانبی و عمقی برآورد شده است، انجام چنین مطالعه‌ای در این پهنه با توجه به نبود مطالعه جامع راجع به نحوه زون فرورانش و ساختارهای سرعتی و جذب امری ضروری و لازم می‌نماید.

آلپ-همالیاست که در اثر همگرایی میان بخش شمالی گندوانا با بلوک‌های سیمین و جنوب اوراسیا شکل گرفته است (Berberian and King, 1981)؛ به دلیل اینکه در زون سنندج-سیرجان، پدیده‌های دگرگونی، ماگماتیسم و زمین‌ساخت پی‌درپی و هم‌آهنگ با فازهای زمین‌ساختی شناخته شده در مقیاس جهانی در بیشترین مقدار است. از همین رو این زون، ناآرام‌ترین و به گفته‌ای دیگر پویاترین پهنه زمین‌ساختی ایران است (آقائاتی، ۱۳۸۳). پهنه ساختاری سنندج-سیرجان باریکه‌ای از جنوب باختری ایران میانی است که در حد فاصل خردقاره ایران مرکزی و کمربند کوهزاد زاگرس قرار گرفته است به‌گونه‌ای که بسیاری بر این باور هستند که پهنه زمین‌درز، بین خردقاره ایران مرکزی و صفحه عربی در این پهنه ساختاری قرار گرفته است (Stöcklin, 1968; Berberian, 1976). ویژگی‌های سنگی و ساختاری سنندج-سیرجان معرف یک گودی ژرف و یا کافت میان‌بلوکی در سپر پرکامبرین ایران و عربستان است. به همین دلیل ویژگی‌های زمین‌شناختی آن با پهنه‌های مجاور تفاوت‌های آشکاری دارد (آقائاتی، ۱۳۸۳). با توجه به اینکه از دیرباز این باور وجود داشته که پی‌سنگ این گستره طی فازهای کوهزایی سیمین و لارامید



شکل ۱- توزیع زمین‌لرزه‌های روی داده و ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مورد استفاده در این مطالعه به همراه پوشش کل مسیر پرتوهای با فاصله رومرکزی کمتر از ۲۰۰ کیلومتر.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، برای برآورد ضریب کیفیت امواج کدای S و بررسی تغییرات جانبی و عمقی آن از دو روش تک‌پراکنش به عقب (Aki and Chouet, 1975) و تک‌پراکنش همسانگرد (Sato, 1977) در شمال زون سنندج-سیرجان استفاده شد که در زیر به‌صورت مختصر در مورد این روش‌ها توضیح داده شده است.

۲-۱. روش تک‌پراکنش به عقب برای برآورد ضریب کیفیت امواج کدا

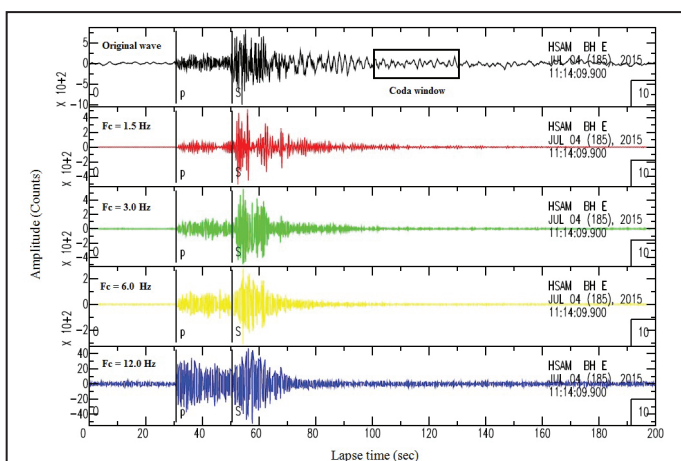
رایج‌ترین روش محاسبه پارامتر کیفیت امواج کدا روش تک‌پراکنش به عقب ارائه شده توسط Aki (1969) و Aki and Chouet (1975) است. ایشان مشاهده کردند که در بخش ابتدایی لرزه‌نگاشت‌ها، با زیاد شدن فاصله از مرکز زمین‌لرزه، دامنه

کاهش می‌یابد، همچنین محتوای بسامدی این بخش از شکل موج، برای فواصل مختلف متفاوت است. در برابر آن بخش پایانی هر شکل موج، برای فواصل رومرکزی مختلف، دامنه و محتوای بسامدی مشابهی دارند و جهت انتشار آنها به همه طرف و به‌صورت تصادفی انجام می‌شد. ایشان این امواج را امواج دنباله‌ای (Coda Waves) نامیدند. بر پایه مطالعات انجام شده، برای برآورد مقادیر قابل اعتماد ضریب کیفیت امواج کدا، شروع ابتدای پنجره کدا برای هر شکل موج باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که محتوای طیف بسامدی موج کدای ثبت شده از هر زمین‌لرزه در ایستگاه‌های مختلف تقریباً یکسان باشد. بر پایه مطالعات پژوهشگران، گذشت زمانی

۳- پردازش داده‌ها

در این مطالعه برای برآورد ضریب کیفیت امواج کدا و بررسی تغییرات جانبی و عمقی آن در ناحیه شمال زون سنندج- سیرجان از لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده در ایستگاه‌های مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC) و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIIES) و همچنین از داده زمین‌لرزه‌های محلی با فاصله رومرکزی کمتر از ۲۰۰ کیلومتر و با بزرگای ۳ تا ۴/۸ رخ داده در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶ استفاده شد (شکل ۲). در نهایت داده‌های ۹ ایستگاه متعلق به مرکز لرزه‌نگاری کشوری (۷ ایستگاه) و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۲ ایستگاه) با نسبت سیگنال به نوفه بالاتر از ۳ که شامل ۱۰۵ زمین‌لرزه است، مورد ارزیابی قرار گرفت. از آنجا که امواج کدا در اثر پراکندگی امواج برشی تولید می‌شوند و این امر باعث انتشار موج در همه جهات می‌شود، لذا امواج کدا در هر سه مؤلفه لرزه‌نگاشت به خوبی ثبت می‌شود (Sato and Fehler, 1998) و از هر سه مؤلفه می‌توان برای برآورد ضریب کیفیت کدا استفاده کرد. در این تحقیق از مؤلفه خاوری-باختری (E-W) استفاده شد. چون با توجه به معیار در نظر گرفته شده بیشترین داده مربوط به مؤلفه خاوری-باختری است. برای محاسبه ضریب کیفیت کدا ۱۰ باند بسامدی - به ترتیبی که در جدول ۱ آمده است- انتخاب و از فیلتر میان‌گذر باتروث مرتبه ۴ برای اعمال فیلتر بسامدی روی نگاشت‌های لرزه‌ای استفاده شد. باندهای بسامدی باید به صورت افزایش باشند تا مقدار انرژی همه باندها تقریباً یکسان بماند و تأثیر افت‌وخیز دامنه در بسامدهای زیاد از بین برود (Rautian and Khalturin, 1978). برای هر یک از لرزه‌نگاشت‌ها مقدار Q_c در ۱۰ باند بسامدی با بسامدهای مرکزی ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ هرترتز، به ازای پنجره‌های گذشت زمانی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ ثانیه برآورد شده است.

شکل ۳ نشان‌دهنده فیلتر شدن یک لرزه‌نگاشت ثبت شده توسط ایستگاه RAZ (رازگان) در ۴ باند بسامدی ۱/۵، ۳، ۶ و ۱۲ به ازای پنجره گذشت زمانی ۳۰ ثانیه است. شکل ۴ نمونه‌ای از تعیین روابط وابستگی بسامدی ضریب کیفیت امواج کدا را با برازش خط درجه اول به روش کمترین مربعات بر مقادیر میانگین Q_c نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمایش لرزه‌نگاشت اصلی (بالا) ثبت شده در ایستگاه HSAM برای زمین‌لرزه رخ داده در طول جغرافیایی $10^{\circ} 49'$ خاوری و عرض جغرافیایی $35^{\circ} 77'$ شمالی در تاریخ چهار جولای ۲۰۱۵ به همراه پنجره کدای ۳۰ ثانیه (بالا داخل کادر) مورد استفاده در محاسبه Q_c . چهار لرزه‌نگاشت رسم شده به رنگ‌های قرمز، سبز، زرد و آبی لرزه‌نگاشت‌های فیلتر شده به ترتیب در بسامدهای مرکزی ۱/۵، ۳، ۶ و ۱۲ را نشان می‌دهند.

دو برابر زمان رسید موج برشی را می‌توان به عنوان ابتدای پنجره کدا در نظر گرفت (Rautian and Khalturin, 1978; Havskov and Ottemoller, 2003). با توجه به رابطه بسامدی ضریب کیفیت امواج $Q_c = Q_0 f^n$ ، متغیر بستگی بسامدی (n) متغیر مهمی برای برآورد میزان ناهمگنی لایه‌ها و فعالیت زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه است (Aki, 1980). در این روش فرض بر این است که چشمه لرزه‌ای و ایستگاه در یک نقطه واقع شده‌اند. دامنه امواج کدا $A(f, t)$ در بسامد مرکزی f به عنوان تابعی از زمان سپری شده t ، محاسبه شده از زمان رخداد زمین‌لرزه به صورت زیر نشان داده می‌شود (Aki and Chouet, 1975):

$$Ac(f, t) = S(f) t^{-a} \exp(-\pi f t / Q_c(f)) \quad (1)$$

که در رابطه فوق، $S(f)$ تابع چشمه در بسامد f (که ثابت در نظر گرفته می‌شود و مستقل از زمان سپری شده و الگوی تشعشع است)، α فاکتور گسترش هندسی (برای امواج حجمی ۱ در نظر گرفته می‌شود) و Q_c بیانگر پارامتر کیفیت امواج کداست. معادله ۱ را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت (Aki and Chouet, 1975):

$$\ln[A_c(f, t) t] = c - b t \quad (2)$$

که در رابطه فوق b و c به ترتیب مساوی با $\pi f / Q_c$ و $-\ln(S(f))$ هستند. شیب خط برازش شده بین $\ln(Ac(f, t) * t)$ و مقدار Q_c را برای بسامد مورد نظر و پنجره زمانی سپری شده به دست می‌دهد.

۲- روش تک‌پراکنش همسانگرد برای برآورد ضریب کیفیت امواج کدا

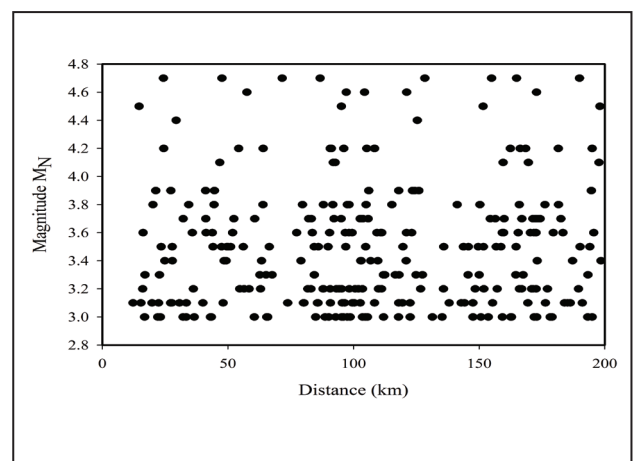
روش دیگر تخمین پارامتر کیفیت امواج کدا، روش تک‌پراکنش همسانگرد است. این روش کلی‌تر از روش تک‌پراکنش به عقب است که در آن برخلاف روش تک‌پراکنش به عقب، چشمه لرزه‌ای و ایستگاه دارای فاصله r از هم هستند و پراکنش در تمام جهات یکسان بوده و همسانگرد است. در این روش از رابطه زیر جهت تخمین پارامتر کیفیت امواج کدا استفاده می‌شود (Sato, 1977):

$$\ln[A_c(f, t) r / \sqrt{K(a)}] = \ln(S(f)) - (\pi f t) / Q_c(f) \quad (3)$$

در رابطه فوق مقدار پارامتر K به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K(a) = 1/a \ln[(a+1)/(a-1)]; a = t/t_0, t > 2t_0 \quad (4)$$

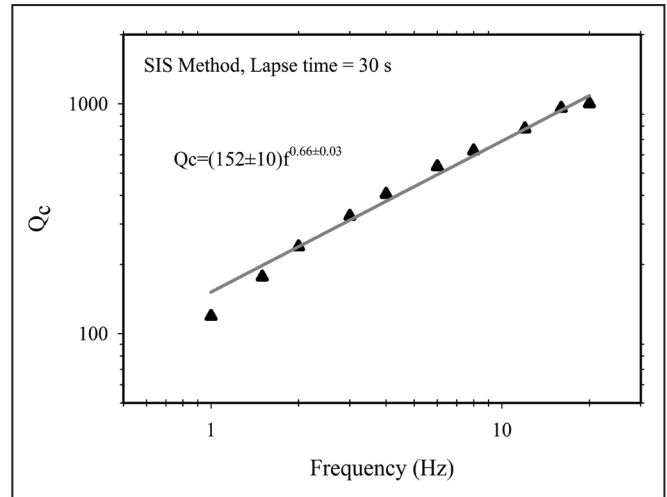
که در آن t_0 زمان سیر امواج برشی است. رابطه فوق برای زمان‌های رسید بیش از زمان رسید امواج برشی صحیح است.



شکل ۲- نمودار توزیع بزرگی (M_N) زمین‌لرزه‌ها نسبت به فاصله رومرکزی از چشمه تا ایستگاه.

جدول ۱- باندهای بسامدی انتخاب شده برای برآورد کاهندگی به همراه حدود پایین و بالای هر باند.

| حد بالای بازه بسامدی (هرتز) | بسامد مرکزی (هرتز) | حد پایین بازه بسامدی (هرتز) |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|
| ۱/۳۳ | ۱ | ۰/۶۷ |
| ۲ | ۱/۵ | ۱ |
| ۲/۶۷ | ۲ | ۱/۳۳ |
| ۴ | ۳ | ۲ |
| ۵/۳۳ | ۴ | ۲/۶۷ |
| ۸ | ۶ | ۴ |
| ۱۰/۶۷ | ۸ | ۵/۳۳ |
| ۱۶ | ۱۲ | ۸ |
| ۲۱/۳۳ | ۱۶ | ۱۰/۶۷ |
| ۲۴ | ۲۰ | ۱۶ |

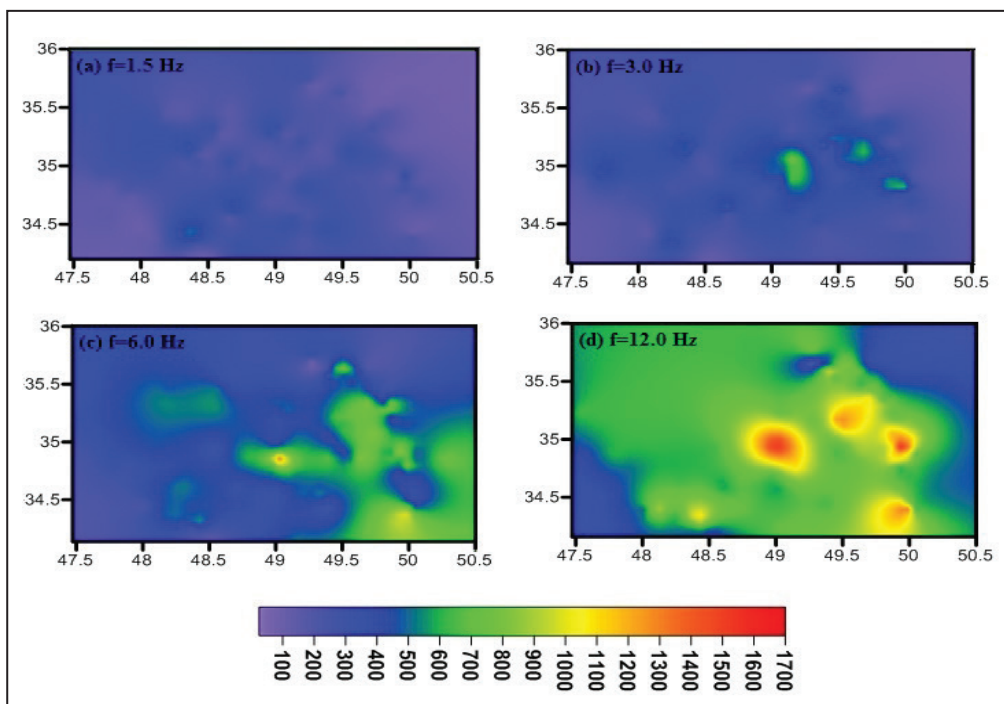


شکل ۴- نمونه‌ای از تعیین روابط وابستگی بسامدی ضریب کیفیت امواج کدا با برازش خط درجه اول به روش کمترین مربعات بر مقادیر میانگین Q_c در هر بسامد.

۴- تغییرات جانبی کاهندگی کدا در منطقه

n برای هر ایستگاه به ازای دو روش مورد استفاده در جدول ۱ مشخص شده است. شکل ۵ نقشه توزیع فضایی Q_c را به ازای بسامدهای ۱/۵، ۳، ۶ و ۱۲ هرتز نشان می‌دهد که بر اساس این شکل با افزایش بسامد مقدار Q_c افزایش می‌یابد. مناطق شمال خاور و جنوب باختر شکل ۵ به دلیل نبود داده (مسیر چشمه- ایستگاه) با رنگ آبی نشان داده شده که معرف ضریب کیفیت پایین است. به غیر از بسامد ۱/۵ هرتز مقادیر پایین ضریب کیفیت کدا با باختر منطقه (زاگرس) و مقادیر بالا با خاور (ایران مرکزی) منطقه منطبق است. دلیل این مسئله را می‌توان بالا بودن لرزه‌خیزی و ناهمگنی پوسته و لیتوسفر در باختر منطقه مورد مطالعه بیان کرد. با افزایش بسامد، اختلاف مقادیر ضریب کیفیت کدا در خاور و باختر منطقه بیشتر می‌شود که نشان می‌دهد در بسامدهای بالا عواملی کاهندگی امواج کدا تأثیر گذارتر بوده‌اند.

با توجه به اینکه امواج پراکنشی دامنه نفوذ بیشتری دارند و تا عمق ۲۰۰ کیلومتر را پوشش می‌دهند، لذا تا حدودی می‌توان خصوصیات لرزه‌زمین‌ساختی لایه‌های کم‌عمق را با استفاده از آنها برآورد کرد. برای بررسی مشخصات کاهندگی سنگ‌کره (لیتوسفر) باید از پنجره‌های کدا با طول زمانی کم استفاده کرد. به علت مقادیر پایدارتر پنجره‌های ۲۵ و ۳۰ ثانیه به نسبت دیگر پنجره‌های ابتدایی (Havskov and Ottemoller, 2003)، طول پنجره ۳۰ ثانیه برای برآورد ضریب کیفیت کدا و بررسی تغییرات جانبی آن در نظر گرفته شد (جدول ۲). تغییرات Q_0 و n را می‌توان ناشی از عوامل گوناگون زمین‌شناسی چون جنس مواد زیرسطحی، میزان شکستگی‌ها و لرزه‌خیزی منطقه دانست (Rahimi et al., 2010). مقدار Q_0 و n هر ایستگاه نشانگر میانگین این مقادیر در محیط پیرامونی ایستگاه است. مقادیر Q_0



شکل ۵- نقشه مقادیر Q_c به ازای بسامدهای ۱/۵، ۳، ۶ و ۱۲ هرتز در پنجره زمانی ۳۰ ثانیه، با افزایش بسامد ضریب کیفیت امواج کدا (Q_c) افزایش یافته است. به طوری که این افزایش در مرکز و جنوب خاور منطقه بیشتر است.

جدول ۲- مقدر ضریب کیفیت در بسامد مرجع ۱ هرتز (Q_0) و پارامتر کاهندگی (n) و نتایج آنالیز آماری شامل ضریب همبستگی (R^2) و انحراف معیار (σ) برای داده‌های کمتر از فواصل ۲۰۰ کیلومتر و زمان گذشت ۳۰ ثانیه.

| ایستگاه | عرض جغرافیایی (درجه) | طول جغرافیایی (درجه) | روش | $Q_0 \pm \sigma$ | $n \pm \sigma$ | فاصله میانگین (کیلومتر) | تعداد رکورد | R^2 |
|---------|----------------------|----------------------|-----|------------------|----------------|-------------------------|-------------|--------|
| ASAO* | 34.547 | 50.025 | SBS | 168±22 | 0.62±0.06 | 82 | 39 | 0.9424 |
| | | | SIS | 164±25 | 0.63±0.07 | | | 0.9314 |
| BZA | 34.470 | 47.861 | SBS | 106±13 | 0.78±0.05 | 78 | 33 | 0.9626 |
| | | | SIS | 106±14 | 0.78±0.05 | | | 0.9624 |
| HAGD | 34.822 | 49.139 | SBS | 154±9 | 0.63±0.02 | 89 | 36 | 0.9888 |
| | | | SIS | 160±9 | 0.62±0.03 | | | 0.9878 |
| HALM | 34.860 | 48.168 | SBS | 179±14 | 0.54±0.03 | 101 | 14 | 0.9662 |
| | | | SIS | 188±14 | 0.53±0.03 | | | 0.9682 |
| HSAM | 34.212 | 48.602 | SBS | 160±13 | 0.64±0.04 | 112 | 25 | 0.9781 |
| | | | SIS | 160±13 | 0.65±0.04 | | | 0.9763 |
| HSRG | 35.242 | 48.548 | SBS | 156±24 | 0.63±0.08 | 116 | 11 | 0.9083 |
| | | | SIS | 163±26 | 0.62±0.08 | | | 0.8976 |
| QABG | 35.708 | 49.582 | SBS | 8±130 | 0.03±0.69 | 66 | 23 | 0.9892 |
| | | | SIS | 126±8 | 0.71±0.03 | | | 0.9882 |
| RAZ | 35.405 | 49.929 | SBS | 14±148 | 0.69±0.04 | 89 | 86 | 0.9749 |
| | | | SIS | 153±15 | 0.68±0.04 | | | 0.9723 |
| SNGE* | 35.093 | 47.347 | SBS | 141±9 | 0.56±0.03 | 105 | 10 | 0.9760 |
| | | | SIS | 146±10 | 0.55±0.03 | | | 0.9775 |

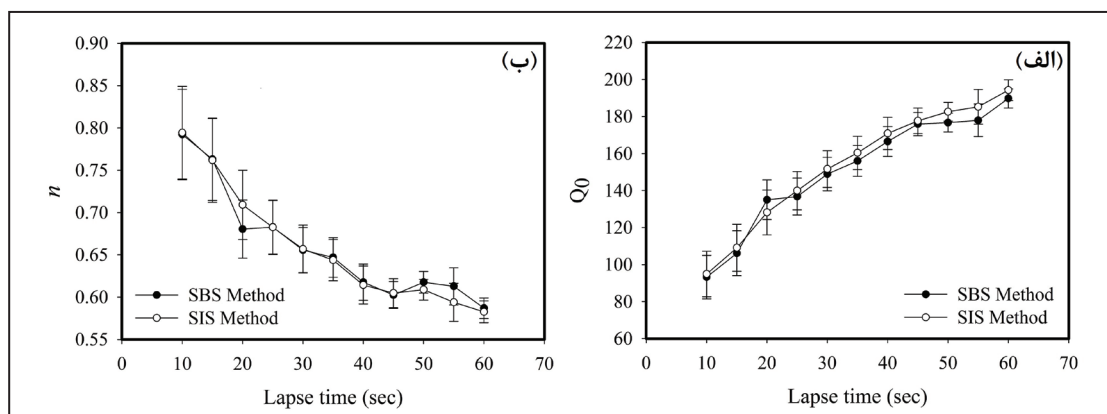
* ایستگاه‌های مربوط به پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

۵- تغییرات عمقی کاهندگی کدا در منطقه

دامنه عبوری از اعماق کمتر کاهش یافته‌اند. تغییر شیب منحنی افزایشی Q_0 و افزایشی n بسیار مهم است. به علت اینکه ضریب کیفیت به خواص کشسانی محیط بستگی دارد، لذا تغییر قابل توجه در منحنی Q_0 و n (شکستگی در روند) می‌تواند اطلاعات مفیدی از تغییرات کشسانی محیط در اختیار بگذارد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، تغییرات ضریب کیفیت با افزایش پنجره زمانی سپری شده و در نتیجه عمق افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است تغییرات ضریب کیفیت امواج کدا نسبت به افزایش بسامد برای دو روش تک‌پراکنش به عقب و تک‌پراکنش همسانگرد برای فواصل کمتر از ۲۰۰ کیلومتر حالت افزایشی دارد؛ و طبق جدول ۳ مقادیر به دست آمده از روش تک‌پراکنش به عقب نسبت به روش تک‌پراکنش همسانگرد کمتر است و این روند در تمامی بسامدها دیده می‌شود.

تفاوت روند افت دامنه در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی امواج کدا به تفاوت در میزان کاهندگی لایه‌های سطحی و عمیق زمین برمی‌گردد (Roecker et al., 1982). در بررسی‌های صورت گرفته، مشاهده شد که عموماً با افزایش زمان پنجره کدا، مقدار ضریب کیفیت نیز افزایش می‌یابد (Havskov et al., 1989) (جدول ۳). در این مطالعه برای ارزیابی تغییرات عمقی ضریب کیفیت، از ۱۱ پنجره زمانی کدا (از ۱۰ تا ۶۰ با گام ۵ ثانیه) استفاده شد که مقادیر Q_0 و n به دست آمده در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، مقادیر ضریب کیفیت در زمان‌های کاهندگی ۱۰ تا ۶۰ ثانیه به‌طور میانگین رفتار افزایشی خود را حفظ کرده‌اند. علت افزایش ضریب کیفیت با افزایش طول پنجره گذشت زمانی این است که با افزایش طول پنجره، بیشتر امواج عبوری از اعماق بیشتر که همگن‌ترند دریافت می‌شوند. بنابراین همگنی بیشتر لایه‌های عمیق نسبت به لایه‌های با عمق کمتر باعث می‌شود که



شکل ۶- مقایسه روند تغییرات (الف) Q_0 و (ب) n نسبت به زمان سپری شده در شمال زون سنندج- سیرجان برای فواصل رومرکزی کمتر از ۲۰۰ کیلومتر. وجود مناطق با جذب بالا در دو پنجره گذشت زمانی ۲۵ و ۵۵ ثانیه مشخص است.

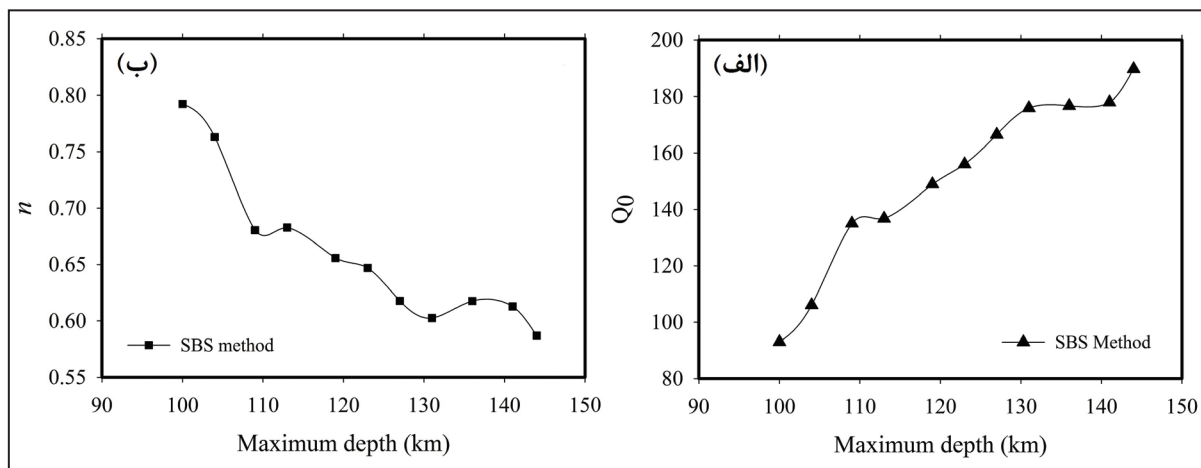
جدول ۳- مقادیر میانگین ضریب کیفیت امواج کدا در بسامد ۱ ثانیه (Q_0) و ضریب n به همراه انحراف معیار (σ) آنها در ۱۱ پنجره گذشت زمانی با استفاده از دو روش تک‌پراکنش به عقب (SBS) و تک‌پراکنش همسانگرد (SIS) برای فواصل کمتر از ۲۰۰ کیلومتر.

| طول پنجره کدا (ثانیه) | SBS | | | SIS | | |
|-----------------------|------------------|----------------|--------|------------------|----------------|--------|
| | $Q_c \pm \sigma$ | $n \pm \sigma$ | R^2 | $Q_c \pm \sigma$ | $n \pm \sigma$ | R^2 |
| 10 | 93±12 | 0.79±0.05 | 0.9697 | 95±12 | 0.79±0.05 | 0.9684 |
| 15 | 106±12 | 0.76±0.05 | 0.9727 | 109±13 | 0.76±0.05 | 0.9715 |
| 20 | 135±11 | 0.68±0.03 | 0.9822 | 128±12 | 0.71±0.04 | 0.9772 |
| 25 | 137±10 | 0.68±0.03 | 0.9849 | 140±10 | 0.68±0.03 | 0.9845 |
| 30 | 149±9 | 0.66±0.03 | 0.9883 | 152±10 | 0.66±0.03 | 0.9868 |
| 35 | 156±8 | 0.65±0.02 | 0.9907 | 160±9 | 0.64±0.02 | 0.9896 |
| 40 | 167±8 | 0.62±0.02 | 0.9913 | 171±7 | 0.61±0.02 | 0.9904 |
| 45 | 176±6 | 0.60±0.02 | 0.9949 | 178±5 | 0.60±0.02 | 0.9941 |
| 50 | 177±5 | 0.62±0.01 | 0.9969 | 183±5 | 0.61±0.01 | 0.9970 |
| 55 | 178±9 | 0.61±0.02 | 0.9905 | 185±9 | 0.59±0.02 | 0.9894 |
| 60 | 190±5 | 0.59±0.01 | 0.9968 | 194±6 | 0.58±0.01 | 0.9963 |

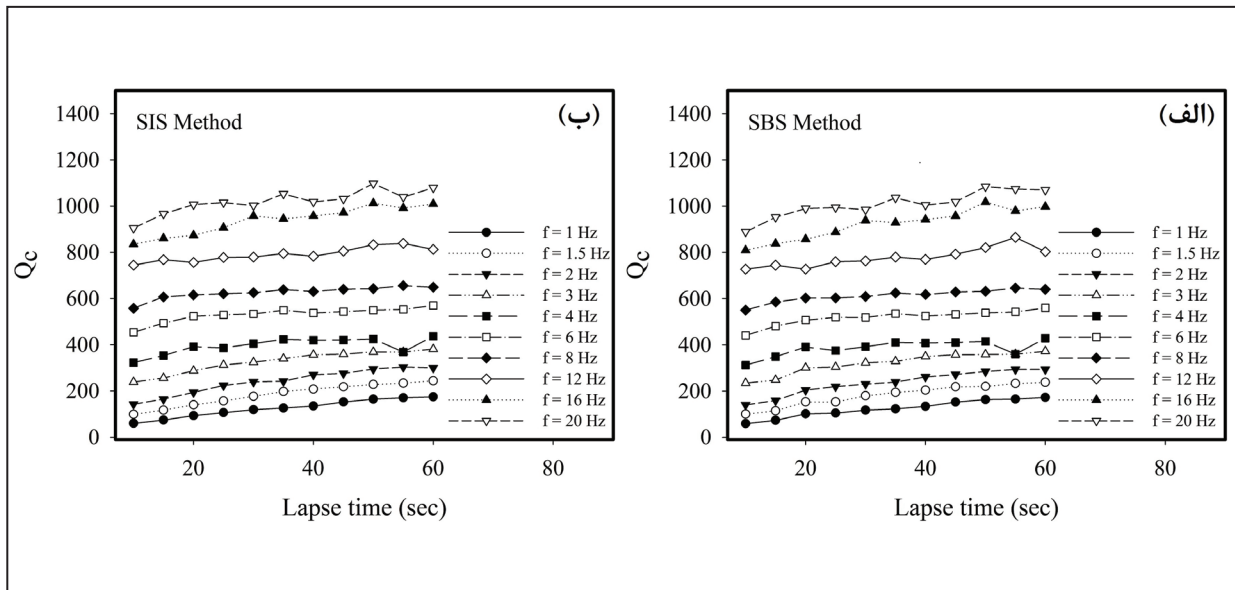
یافته است. این امر می‌تواند دلیلی بر وجود لیتوسفر گرم‌تر و در عین حال نازک‌تر باشد. در عین حال در مطالعات انجام گرفته توسط Alinaghi et al. (2007) چنین بی‌هنجاری‌های منفی مشاهده شده است. Maggi and Priestley (2005) یک لایه کم‌سرعت تا عمق ۱۵۰ کیلومتر زیر فلات ایران گزارش کرده‌اند. همچنین مطالعات Motaghi et al. (2017) نشان می‌دهد که میانگین عمق موهو و مرز لیتوسفر-آستونسفر (LAB; Lithosphere Astonsphere Boundry) در منطقه مورد مطالعه به ترتیب تقریباً ۵۰ و ۱۵۰ کیلومتر است (Motaghi et al., 2017).

در شکل ۸ تغییرات مقدار ضریب کیفیت امواج کدا نسبت به پنجره گذشت زمانی برای ۱۰ بسامد مورد بررسی رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مقدار ضریب کیفیت برای تمامی بسامدها نسبت به پنجره گذشت زمانی روند افزایشی دارد. در شکل ۹ با محاسبه مقادیر میانگین Q_c همه لرزه‌نگاشت‌ها به ازای ۱۰ بسامد مرکزی در ۱۱ پنجره گذشت زمانی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ ثانیه، برای مقادیر رابطه وابستگی بسامدی Q_c برای هر پنجره گذشت زمانی تعیین شده است.

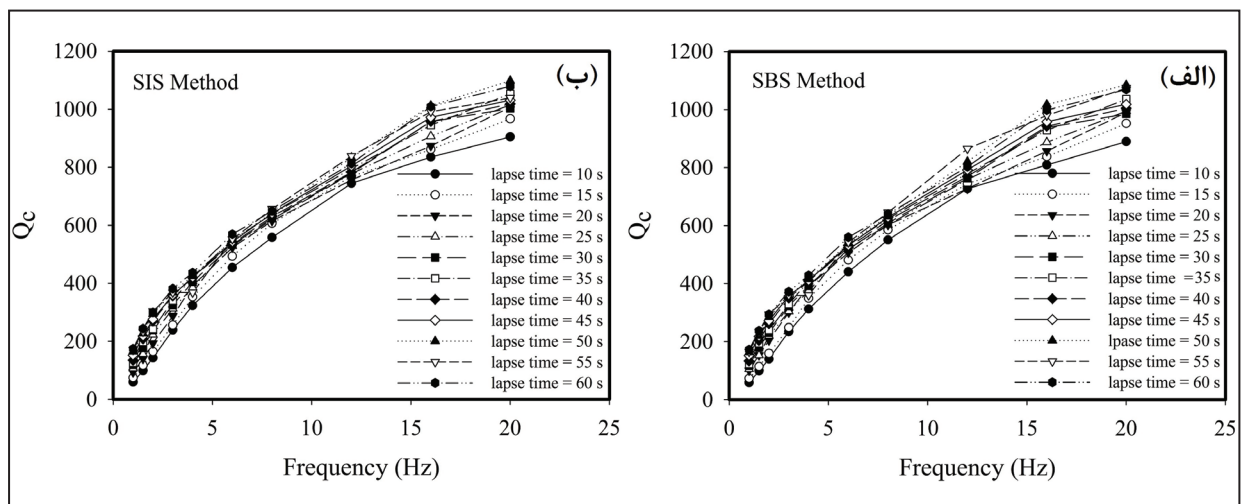
برای برآورد موقعیت فضایی پراکنده‌ها از رابطه Pulli (1984) استفاده شد. در این روش بر اساس مدل تک‌پراکنش موج درونی در یک بیضی گون رابطه‌ای به دست می‌آید که در آن بیشترین عمق میانگین بیضی گون نشان‌دهنده عمق پراکنش موج کداست. در این مدل چشمه زمین لرزه و ایستگاه، دو نقطه کانونی بیضی گون $a_1 = \beta t/2$ و $a_2 = (a_1^2 - r^2/4)^{1/2}$ هستند. که در آن a_1 نیم‌محور بزرگ بیضی گون، r فاصله Q_0 میان چشمه تا گیرنده، β سرعت موج برشی، t میانگین زمان کاهندگی، t_0 ابتدای پنجره کدا و w طول پنجره کداست. همچنین برای محاسبه حداکثر عمق پراکنده‌ها از فرمول $h = h_{av} + a_2$ استفاده شد که در آن h_{av} میانگین عمق زمین لرزه‌هاست. شیب نمودار در دو پنجره گذشت زمانی ۲۵ و ۵۵ ثانیه با افت مواجه می‌شود که به ترتیب نشان‌دهنده وجود مناطقی با جذب بالا و سرعت کم در اعماق ۱۱۰ و ۱۴۰ کیلومتر این ناحیه است (شکل ۷). بر اساس مدل‌های توپوگرافی جهانی (Bijwaard et al., 1998; Bijwaard and Spakman, 2000) یک بی‌هنجاری سرعت منفی در زیر ایران مرکزی مشاهده می‌شود که به درون زاگرس امتداد



شکل ۷- تغییرات: الف) Q_0 (در ۱ هرتر) و ب) n نسبت به عمق در شمال زون سنندج- سیرجان برای فواصل رومرکزی پایین‌تر از ۲۰۰ کیلومتر. وجود مناطقی با جذب بالا در اعماق ۱۱۰ و ۱۴۰ کیلومتر مشخص است.



شکل ۸- تغییرات ضریب کیفیت امواج کدا (Q_c) نسبت به پنجره گذشت زمانی برای بسامدهای ۱ تا ۲۰ هرتز با دو روش: الف) تک پراکنش به عقب و ب) تک پراکنش همسانگرد.



شکل ۹- تغییرات ضریب کیفیت امواج کدا (Q_c) نسبت به بسامد برای پنجره‌های گذشت زمانی ۱۰ تا ۶۰ ثانیه با دو روش: الف) تک پراکنش به عقب و ب) تک پراکنش همسانگرد.

۶- مقایسه نتایج با دیگر مناطق

با توجه به اینکه جذب امواج کدا با شکستگی‌ها و لرزه‌خیزی در یک ناحیه رابطه مستقیم دارد، در مطالعات گوناگون به مثابه پارامتری برای دسته‌بندی نواحی فعال و غیرفعال به لحاظ لرزه‌خیزی به کار می‌رود. روابط وابستگی بسامدی ضریب کیفیت امواج کدا به صورت طبقه‌بندی شده نسبت به لرزه‌خیزی برای بعضی مناطق ایران و جهان در جدول ۴ آورده شده است. به عنوان مثال برای ناحیه زون خاوری گسل آناطولی در ترکیه مقدار ضریب کیفیت امواج کدا به صورت $Q_c = 57.5f^{0.82}$ برآورد شده است (Sertçelik, 2012). این ناحیه یک ناحیه لرزه‌خیز و شاهد زمین‌لرزه‌های فراوانی با بزرگی متوسط در ۴۰ سال گذشته بوده است (Sertçelik, 2012). مقایسه نتایج حاصل از برآورد ضریب کیفیت در این مطالعه با مطالعات صورت گرفته برای مناطق دیگر ایران و دیگر نقاط دنیا (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که مقادیر Q_0 به دست آمده برای منطقه شمال زون سنندج- سیرجان همگی زیر ۲۰۰ بوده و نشانگر فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی بالاست. در این مطالعه برای قسمت شمالی زون سنندج- سیرجان در زمان گذشت ۳۰ ثانیه، $Q_c = 149 \pm 9f^{0.66 \pm 0.03}$ و $Q_c = 152 \pm 10f^{0.66 \pm 0.03}$ به ترتیب از روش‌های تک پراکنش به عقب (SBS) و تک پراکنش همسانگرد (SIS) برآورد شده است که با توجه به مطالعات

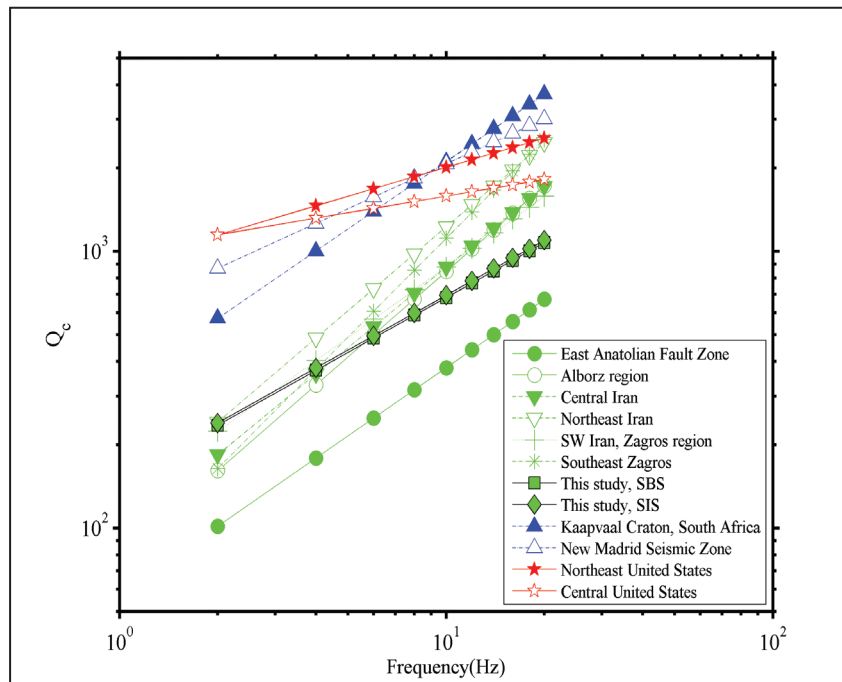
(Rahimi et al. (2010) نشان می‌دهد این منطقه نسبت به البرز و ایران مرکزی لرزه‌خیزی پایین تری دارد.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مقادیر ضریب کیفیت امواج کدا به روش تک پراکنش به عقب (SBS) و تک پراکنش همسانگرد (SIS) برای شمال زون سنندج- سیرجان تعیین شد. علاوه بر نوع روش، عامل بعدی در نظر گرفته شده فاصله بود. انتخاب فاصله رومرکزی با توجه به این واقعیت است که ایستگاه‌های واقع شده در فاصله نزدیک‌تر، امواج کدایی که دریافت می‌کنند از محیط‌های کوچک‌تر و محدودتری دریافت شده‌اند. اما آنهایی که در فاصله رومرکزی دورتری هستند، محیط‌های وسیع‌تر و عمیق‌تری را پوشش می‌دهند؛ بنابراین برای مطالعه خواص میرایی از ناحیه‌های مورد تحقیق با عمق و جزئیات بیشتر، از داده‌های با فاصله رومرکزی کمتر از ۲۰۰ کیلومتر استفاده و Q_c در ۱۱ پنجره گذشت زمانی محاسبه شد. رابطه بسامدی به دست آمده برای امواج کدا برای شمال زون سنندج- سیرجان به ازای پنجره گذشت زمانی ۱۰ تا ۶۰ ثانیه از $Q_c = 93 \pm 12f^{0.79 \pm 0.05}$ تا $Q_c = 190 \pm 5f^{0.59 \pm 0.01}$ و از $Q_c = 95 \pm 12f^{0.79 \pm 0.05}$ تا

به طوری که با وجود قرارگیری در مجاورت کمربند جوان زاگرس توسط برخی محققان به عنوان پهنه‌ای غیر لرزه‌زا مطرح می‌شود. ولی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در تمامی روابط به دست آمده مقادیر ضریب کیفیت در بسامد مرجع $1/0$ هرتز (Q_0)، کمتر از 200 است که این امر نشان می‌دهد که ناحیه مورد مطالعه علاوه بر اینکه از نظر زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی کاملاً فعال بوده، دارای کاهیدگی و ناهمگنی بالایی نیز است. به طوری که نتایج به دست آمده با ساختار رسوبی در این ناحیه مطابقت دارد. البته علاوه بر لرزه‌خیزی عوامل دیگری از جمله جنس سنگ‌ها، شکستگی‌ها، عمق رسوبات و میزان دما نیز در مقدار ضریب کیفیت مؤثر هستند.

به ترتیب از روش‌های تک‌پراکنش به عقب و تک‌پراکنش همسانگرد برای فواصل کمتر از 200 کیلومتر تغییر می‌کند. به طوری که رابطه ضریب کیفیت وابسته به بسامد در منطقه به‌طور میانگین با روش تک‌پراکنش به عقب $Q_c = 149 \pm 9f^{0.66 \pm 0.03}$ و با روش تک‌پراکنش همسانگرد $Q_c = 152 \pm 10f^{0.66 \pm 0.03}$ به دست آمد که با توجه به مقادیر به دست آمده در مطالعات پیشین برای مناطق مختلف ایران حاکی از همگنی بیشتر در لایه‌های کم‌عمق و لرزه‌خیزی کمتر نسبت به نواحی ایران مرکزی، البرز و زاگرس است. چنانچه قبلاً ذکر شد، بر اساس زمین‌لرزه‌های کمی که در پهنه سنندج- سیرجان رخ می‌دهد، تصور می‌شود که این پهنه ساختاری همانند یک بلوک سخت شده عمل می‌کند.



شکل ۱۰- مقایسه رابطه وابستگی بسامدی Q_c به دست آمده در این مطالعه در شمال پهنه سنندج- سیرجان از دو روش SBS و SIS با دیگر مناطق ایران و جهان.

جدول ۴- مقادیر به دست آمده برای نقاط مختلف ایران و جهان.

| شماره | لرزه‌خیزی | منطقه | مرجع | Q_c | n | طول پنجره کدا (نانیه) |
|-------|-----------|-----------------------------------|------------------------------|-------|------|-----------------------|
| 1 | Active | East Anatolian Fault Zone, Turkey | Sertçelik (2012) | 58 | 0.82 | - |
| 2 | Active | Alborz Region | Rahimi et al. (2010) | 79 | 1.07 | 25 |
| 3 | Active | Central Iran | Rahimi et al. (2010) | 94 | 0.97 | 25 |
| 4 | Active | Northeast Iran | علیخانی و رحیمی (۱۳۹۴) | 120 | 1.01 | 30 |
| 5 | Active | SW Iran, Zagros region | Rahimi and Hamzehloo (2008) | 124 | 0.85 | - |
| 6 | Active | Southeast Zagros | نجفیپور و رحیمی (۱۳۹۴) | 72 | 1.19 | 30 |
| 7 | Active | This study, SBS Method | - | 149 | 0.66 | 30 |
| 8 | Active | This study, SIS Method | - | 152 | 0.66 | 30 |
| 9 | Moderate | Kaapvaal Craton, South Africa | Birch et al. (2015) | 327 | 0.81 | - |
| 10 | Moderate | New Madrid Seismic Zone | Sedaghati and Pezeshk (2016) | 598 | 0.54 | 40 |
| 11 | Stable | Northeast United States | Singh and Hermann (1983) | 900 | 0.35 | - |
| 12 | Stable | Central United States | Singh and Hermann (1983) | 1000 | 0.20 | - |

سپاسگزاری

بدین وسیله از مرکز لرزه‌نگاری کشوری و همچنین شبکه ملی باند پهن ایران وابسته به پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله که شکل موج‌های زلزله‌های مورد استفاده در این پژوهش را در اختیار نگارندگان قرار دادند، تشکر و قدردانی می‌شود.

کتابنگاری

- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
 راستگو، م.، حمزه‌لو، ح.، رضاپور، م. و رحیمی، ح.، ۱۳۹۰- برآورد ضریب کیفیت امواج برشی و کدا در ناحیه هرمزگان، جنوب ایران. مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۵، شماره ۴، ص. ۱۱۱ تا ۱۳۱.
 صفری، ح.، قاسمی، م. ر. و بهرامی، م.، ۱۳۹۴- بررسی لرزه‌خیز بودن حرکات عهد حاضر در پهنه‌بندی ساختاری سنندج- سیرجان با استفاده از فناوری های سنجش از دور و GIS، فصلنامه علوم زمین، سال بیست و چهارم، شماره ۹۵، ص. ۲۶۵ تا ۲۷۲.
 علیخانی، ع. و رحیمی، ح.، ۱۳۹۴- برآورد ضریب کیفیت امواج کدا در شمال خاور ایران، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۱، شماره ۱، ص. ۲۵ تا ۳۳.
 نجفی‌پور، ن. و رحیمی، ح.، ۱۳۹۴- برآورد ضریب کیفیت امواج کدا در منطقه مکران، جنوب خاور ایران، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۹، شماره ۲، ص. ۹۶ تا ۱۱۶.
 تقوی، م.، رحیمی، ح. و مرادی، ع.، ۱۳۹۵- تعیین ضریب کیفیت امواج کدا در پهنه شمال باختری فلات ایران، فصلنامه علوم زمین، شماره ۱۰۰، ص. ۲۷۱ تا ۲۸۰.

References

- Aki, K., 1969- Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. *Journal of geophysical research*, 74(2): p. 615- 631.
 Aki, K., 1980- Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz. *Phys. Earth planet In.*, 21, 50- 60.
 Aki, K. and Chouet, B., 1975- Origin of the Coda waves: Source attenuation and Scattering effects, *J. Geophy. Res.*, 80, 3322- 3342.
 Alavi, M., 1996- Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz Mountain System in Iran. *Journal of Geodynamics*, 21(1), 1- 33
 Alinaghi, A., Koulakov, I. and Thybo, H., 2007- Seismic tomographic imaging of P and S-waves velocity perturbations in the upper mantle beneath Iran, *Geophys. J. Int.*, 169, 1089- 1102.
 Berberian, M. and King, G., 1981- Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Science*, 18, 210- 265.
 Berberian, M., 1976- Contribution to the seismo-tectonic of Iran, *Geo. Sur. Iran, Rep No: 39*, 518 P.
 Bijwaard, H. and Spakman, W., 2000- Nonlinear global P-wave tomography by iterated linearized inversion: *Geophys. J. Int.*, 141(1), 71- 82.
 Bijwaard, H., Spakman, W. and Engdahl, E. R., 1998- Closing the gap between regional and global travel time tomography: *J. Geophys. Res.*, 103, 30055- 30078.
 Birch, D. J., Cichowicz A. and Grobberlaar D., 2015- Q-coda estimation in the Kaapvaal Craton, *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM)*, 115, 541- 548.
 Brunet, M. F., Wilmsen, M. and Granath, J. W., (eds) 2009- South Caspian to Central Iran Basins. *Geological Society, London, Special Publications*, 312.
 Havskov, J. and Ottemoller, L., 2003- SEISAN: the earthquake analysis software for windows, Solaris, Linux, and Mac OSX Version 8.0, 244 pp.
 Havskov, J., Malone, S., Mc. Clury, D. and Crosson, R., 1989- Coda-Q for the state of Washington, *Bull. seism. Soc. Am.*, 79, 1024- 1038.
 Jackson, J. A. and McKenzie, D. P., 1984- Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between Western Turkey and Pakistan, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 77, 185- 264.
 Maggi, A. and Priestley, K., 2005- Surface waveform tomography of the Turkish Iranian plateau: *Geophysical Journal International*, v. 160, p. 1068- 1080.
 Motaghi, K., Shabanian, E., Tatar, M., Cuffaro, M. and Doglioni, C., 2017- The south Zagros suture zone in teleseismic images, *Tectonophysics* 694, p. 292- 301.
 Mukhopadhyay, S. and Tyagi, C., 2008- Variation of intrinsic and scattering attenuation with depth in NW Himalayas: *Geophys. J. Int.*, 172, 1055- 1065.
 Pulli, J. J., 1984- Attenuation of Coda Waves in New England. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74: 1149- 1166.
 Rahimi, H. and Hamzehloo, H., 2008- Lapse time and frequencydependent attenuation of coda waves in the Zagros continental collision zone in Southwestern Iran: *J. Geophys. Eng.*, 5, 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): p. 1643- 1654.

- Rautian, T. G. and Khalturin, V. I., 1978- The use of the coda for determination of the earthquake source spectrum. *Bull. seism. Soc. Am* 68: 923- 948.
- Roecker, S. W., Tucker, B., King, J. and Hartzfeld, D., 1982- Estimates of Q in central Asia as a function of frequency and depth using the Coda of locally recorded earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 129- 149.
- Sato, H., 1977- Energy propagation including scattering effects: Single isotropic approximation. *J. Phys. Earth*, 25: p. 27- 41.
- Sato, H. and Fehler, M. C., 1998- *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth*, Springer, New York.
- 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*, Vol. 106, No. 4, pp. 1482- 1498.
- Sengör, A. M. C., 1990- A new model for the Late Paleozoic-Mesozoic tectonic evolution of Iran and implications for Oman. In: Robertson, A. H., Searle, M. P. and Ries, A. C. (eds) *The Geology and Tectonics of the Oman region*. Geological Society, London, Special Publications, 49, 797- 831.
- Sertçelik, F., 2012- Estimation of coda wave attenuation in the east Anatolia fault zone, Turkey, *Pure Appl. Geophys.* 169, 1189- 1204.
- Sheikholeslami, R., Bellon, H., Emami, H., Sazehei, M. and Pique, A., 2003- Nouvelles donnees structurales et datations 40k-40Ar sules roches metamorphiques de la region de Neyriz (zone de Sanandaj-Sirjan, Iran meridional. Leurinteret dansle carde du domaine neoThethysien du Moyen Orient, *Compates Rendus Geoscience*, 335, 981- 991.
- Singh, S. and Herrmann, R. B., 1983- Regionalization of crustal coda Q in the continental United States, *J. Geophys. Res.* 88, no. B1, 527- 538.
- Stöcklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG Bulletin*, 52, 1229- 1258.
- Tselentis, G. A., 1998- Intrinsic and scattering seismic attenuation in W. Greece: *Pure Appl. Geophys.*, 153, 703- 712.

Estimation of Coda wave attenuation (Q_c^{-1}) in the North of Sanandaj-Sirjan zone, Iran

R. Emami¹, M. Rezapour^{2*} and R. Rezaei³

¹Ph.D. Student, Department of Seismology, Institute of Geophysics University of Tehran, Tehran, Iran

²Associate Professor, Department of Seismology, Institute of Geophysics University of Tehran, Tehran, Iran

³M.Sc., Institute of Geophysics University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2018 April 30

Accepted: 2018 September 23

Abstract

The attenuation of seismic waves, as a basic physical parameter is one of the important properties of the earth's structure. Therefore, for a realistic seismic hazard analysis and the simulation of strong ground motions and for studying the regional earth structure, the estimation of the seismic attenuation has a fundamental and inevitable role. The attenuation of the seismic waves is defined by the inverse of quality factor (Q^{-1}) while quality factor (Q) is the wave transmission quality of the medium. In this study, the quality factor was estimated by using two single-back-scattering and single-isotropic-scattering methods. The larger values indicate more homogeneity in the shallow layers of the earth, and therefore, these results can be used in hazard analysis assessment. For this purpose, the seismograms of earthquakes recorded at the stations of the Iranian Seismological Center (IRSC) and the International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) at the longitude of 48 to 50 and latitude of 38 to 40 degrees have been used in the present study. In this work, the high-quality seismograms with signal-to-noise ratios (SNR) of equal or greater than 3 and epicentral distances less than 200 km were used. The variation of coda wave attenuation was investigated in both lateral and depth, and the results were compared with the obtained values for other regions of Iran and the world. To investigate the lateral variations, after applying the band-pass filter on waveforms in 10 frequency bands, the quality factor was estimated. Finally, the mean values of the quality factor and frequency dependence factor in the region, using data with epicentral distances less than 200 km by using two Single-Back-Scattering and Single-Isotropic-Scattering methods obtained $Q_c = 149 \pm 9f^{0.66} \pm 0.03$ and $Q_c = 152 \pm 12f^{0.66} \pm 0.03$, respectively. The comparison of these results with the values have been obtained for Central Iran ($Q_c = 94f^{0.97}$), Alborz ($Q_c = 79f^{1.07}$) and Southeast Zagros ($Q_c = 72f^{1.19}$) indicate that the study area is more homogeneity in the shallow depth layers and it has less seismicity than Central Iran, Alborz, and Zagros. Also, to investigate the depth variation of attenuation in this study, the coda quality factor Q_c was estimated for 11 coda window lengths, which are taken from 10 to 60 s with an increment of 5 s. In the lower window lengths, the low Q_0 values represent high heterogeneity in the shallow depths layers of the earth.

Keywords: Quality factor, Coda waves, Sanandaj-Sirjan zone, Single-Back-Scattering, Single-Isotropic-Scattering.

For Persian Version see pages 91 to 100

*Corresponding author: M. Rezapour; E-mail: rezapour@ut.ac.ir