

برآورد ضریب کیفیت امواج کدا در شمال شرق ایران

عماد علیخانی^۱ و حبیب رحیمی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۱۲/۱۹، پذیرش نهایی: ۹۳/۱۱/۲۸)

چکیده

تضعیف امواج لرزه‌ای یکی از خواص مهم ساختار زمین بشمار می‌رود. برای محاسبه تضعیف از ضریب کیفیت لرزه‌ای استفاده می‌شود که از پارامترهای مهم علم زلزله‌شناسی است. همچنین برای برآورد واقع‌بینانه خطر زمین‌لرزه‌ها و شبیه‌سازی حرکات نیرومند زمین و از طرفی بررسی ساختار زمین برآورد پارامتر جذب امواج لرزه‌ای نقش اساسی و اجتناب‌ناپذیر دارد. با توجه به لرزه‌خیز بودن همه نقاط کشور ایران، برآورد پارامترهای مرتبط با زمین‌لرزه در نواحی گوناگون آن ضروری است. در این بررسی ضریب کیفیت امواج کدا را در گستره شمال شرق ایران و با استفاده از روش تک‌پراکنش به عقب (اکی، ۱۹۸۰) برآورد کرده‌ایم. 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 نگاشت‌های ثبت شده در شبکه مرکز لرزه‌نگاری کشوری در ناحیه موردنظر با مختصات طولی ۵۴ تا ۶۱ و عرضی ۳۲ تا ۳۸ درجه استفاده شده است. همچنین در این بررسی نشان داده شد که امواج کدا عمق نفوذ بیش از ۲۰۰ کیلومتر دارند لذا از داده‌های با رومرکز زیر ۲۰۰ کیلومتر استفاده شد. برای همه داده‌ها نسبت سیگنال به نوفه ۲٫۵ اعمال شد تا شکل موج‌های مناسب به کار گرفته شود و داده‌های خراب در محاسبات لحاظ نشود. بررسی امواج کدا در دو حالت جانبی و عمقی بررسی شد و در نهایت نتایج با منطقه‌ای دیگر از ایران مورد مقایسه قرار گرفت. برای بررسی تغییرات جانبی پس از اعمال فیلتر میان‌گذر بر نگاشت‌های لرزه‌ای در ۷ باند بسامدی، در نهایت میانگین مقادیر ضریب کیفیت و وابستگی بسامدی در منطقه به صورت زیر حاصل شد: $Q_c = 120 * f^{1.01}$.

همچنین برای ارزیابی تغییرات عمقی ضریب کیفیت در منطقه، از ۱۸ پنجره زمانی کدا از ۵ تا ۹۰ ثانیه و با گام ۵ ثانیه استفاده شد که مقادیر کم Q_0 در پنجره‌های ابتدایی کدا، نشانگر ناهمگنی شدید در لایه‌های کم‌عمق زمین است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقادیر مربوط به ایستگاه‌های مستقر در زون ایران مرکزی نسبت به ایستگاه‌های موجود در زون کپه‌داغ دارای مقادیر ضریب کیفیت بیشتر و در نتیجه تضعیف کمتر هستند که این امر با توجه به خصوصیات این دو زون منطقی به نظر می‌رسد. در ادامه با استفاده از روش پولی، حداکثر عمق پراکنش در منطقه به دست آمد. همچنین با مقایسه نتایج بین منطقه موردنظر و زون سندج-سیرجان مشاهده شد که ضریب کیفیت در منطقه مورد بررسی بزرگ‌تر از زون سندج-سیرجان است که این امر با توجه به ساختار زمین‌شناسی این دو منطقه نتیجه‌ای منطقی به نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: ضریب کیفیت، امواج کدا، تک‌پراکنش به عقب، لرزه‌خیزی، تضعیف

Estimation quality factor of Coda wave in the northeast of Iran

Alikhani, E.¹ and Rahimi, H.²

¹M.Sc. Student, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Assistant Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 10 Mar 2014, Accepted: 17 Feb 2015)

Summary

Seismic waves when crossing the Earth in heterogeneous and anisotropic environments, having interaction. Recognizing the impact of these factors on the seismograms help us to find out more information about interior of the Earth. Coda waves are the main reason for the random heterogeneities in earth. Local earthquakes in the northeast region of Iran with

epicentral distance less than 200 km is used with magnitude range of 2 - 6 recorded in period 2006 to 2013. Finally, data for five stations which have $(S/N) \geq 2.5$ (15441 earthquakes) were chosen. In this study, the attenuation parameters, Q , were estimated using the single scattering models. Aki and Chouet (1975) proposed a single backscattering model to explain the coda waves as a superposition of secondary waves from randomly distributed heterogeneities. The decrease of coda wave amplitude with lapse time at a particular frequency is due to energy attenuation and geometrical spreading, and is independent of earthquake source, path effect and site amplification (Aki, 1969). Generally, the Q factor increases with frequency (Mitchell, 1981) following the relation $Q = Q_0 (f/f_0)^n$ where Q_0 is the quality factor at the reference frequency f_0 (generally 1 Hz) and n is the frequency parameter, which is close to 1 and varies from region to region depending on the heterogeneity of the medium (Aki, 1980). This relation indicates that the attenuation of seismic waves with the passage of time (distance from source) is different for different frequencies. Hence, the seismic data are first bandpass-filtered to calculate the attenuation. In the present study, the attenuation of the S-coda wave (Figure 5) is calculated at seven central frequencies after getting bandpass-filtered using a Butterworth four pole filter as given in Table 1.

The amplitude of the coda wave at lapse time t seconds from the origin time for a bandpass-filtered seismogram at central frequency f is related to the attenuation parameter Q by the following equation:

$$A(f, t) = C(f) t^{-\alpha} \exp(-\pi f t / Q_c)$$

Where $C(f)$ is the coda source factor at frequency f , which is independent of time and radiation pattern, α is the geometrical spreading parameter and is equal to 1.0, 0.5 or 0.75 for body waves, surface waves or diffusive waves, respectively (Sato and Fehler, 1998), $Q_c(f)$ is the quality factor of coda waves. As coda waves are backscattered body waves, $\alpha = 1$. Equation (1) can then be rewritten as:

$$\ln[A(f, t) t^\alpha] = \ln K(f) - (\pi f / Q_c) t$$

Q_c is determined from the slope (b) of a least-squares straight-line fit between $\ln(A(f, t) t)$ versus t , using the relation $Q_c(f) = \frac{\pi \cdot f}{b}$

Shows different steps involved in the computation of $Q_c(f)$ from the RMS values of amplitude with time. According to Rautian and Khalturin (1978), the above relation is valid for lapse times greater than twice the S-wave travel time for avoiding the data of the direct S-wave. Sato (1977) introduced the source receiver offset in a single scattering model so that the coda analysis begins after the arrival of the shear wave. In the present study, the time envelope for the coda decay observation is taken at twice the time of S-wave ($2t_s$) from the origin time of the event.

Q_0 and n values indicate the average values for each station in the surroundings of the station. As an outcome, average of quality factors and frequency-dependents, is given by: $Q_c = 120 * f^{1.01}$

In addition, to evaluate the variation in depth direction, we used the quality factor of 18 Coda windows from five to 90 seconds by 5 seconds step. Low values of Q_0 in the initial Q-coda windows, indicating strong heterogeneity in the shallow layers of the Earth. The results in studying region have been compared with another zone in Iran (SSZ) (Figure 8).

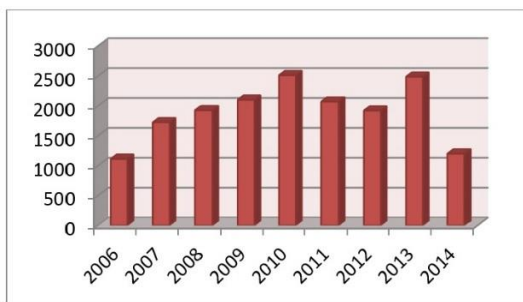
Keywords: Quality factor, Q-coda, Single Back-Scattering, Seismicity, Attenuation

۱ مقدمه

لرزه‌ای استفاده می‌شود که از پارامترهای مهم دانش زلزله‌شناسی است. با داشتن مقدار ضریب کیفیت در هر

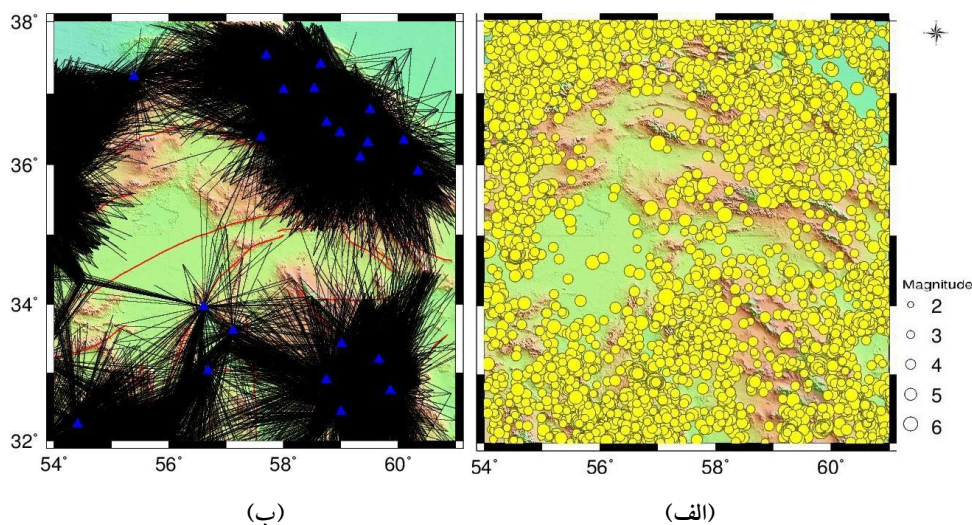
تضعیف امواج لرزه‌ای یکی از خواص مهم ساختار زمین بشمار می‌رود. برای محاسبه تضعیف از ضریب کیفیت

مربوط به سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۴ انتخاب شده‌اند. در نهایت داده‌های ۲۶ ایستگاه با نسبت سیگنال به نوفه بالاتر از ۲/۵ که شامل ۱۵۴۴۱ زمین‌لرزه است، مورد ارزیابی قرار گرفت. از آنجا که امواج کدا در اثر پراکندگی امواج مستقیم برشی تولید می‌شوند و این امر باعث انتشار موج در همه جهت‌ها می‌شود، لذا امواج کدا در هر سه مولفه لرزه‌نگاشت به خوبی ثبت می‌شود (ساتو و فهلر، ۱۹۹۸) و از هر سه مولفه برای برآورد ضریب کیفیت کدا می‌توان استفاده کرد. در این تحقیق از مولفه شرقی - غربی (E) استفاده کرده‌ایم و در نهایت تعداد ۹۹۷۸۲ شکل موج مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۲ مسیر موج‌های عبوری بین محل وقوع زمین‌لرزه و گیرنده رسم شده است.



شکل ۱. تعداد زمین‌لرزه‌های مورد بررسی در برآورد ضریب کیفیت امواج کدا در منطقه به تفکیک سال.

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 زلزله از جمله سرعت، ممان و بزرگی کمک گرفت. امواج لرزه‌ای در هنگام عبور از زمین با محیط‌های ناهمگن، ناهمسانگرد و غیرکشسان برهمکنش دارند و بدیهی است که با شناخت تاثیر این عوامل روی نگاشت‌های لرزه‌ای می‌توان اطلاعات فراوانی از درون زمین به دست آورد. اصلی‌ترین نشانه از ناهمگنی‌های تصادفی با بسامد زیاد در زمین، ظهور امواج کدا در نگاشت‌ها است. امواج کدا به امواجی اطلاق می‌شود که پس از موج‌های اصلی و در ادامه آنها نمایان می‌شوند و اصلی‌ترین علت ایجاد آنها پراکنش است. مقادیر بزرگ‌تر ضریب کیفیت این امواج نشان‌دهنده همگنی بیشتر در لایه‌های کم‌عمق زمین است. در این بررسی برای برآورد ضریب کیفیت امواج کدا و بررسی تغییرات جانبی و عمقی آن در ناحیه شمال شرق ایران از نگاشت‌های لرزه‌ای ایستگاه‌های شبکه مرکز لرزه‌نگاری کشوری و از روش پراکنش به عقب‌اکی و چوت (۱۹۷۵) استفاده شده است. همچنین زمین‌لرزه‌های محلی با فاصله رومرکزی کمتر از ۲۰۰ کیلومتر و با بزرگای بین ۲ تا ۶ و

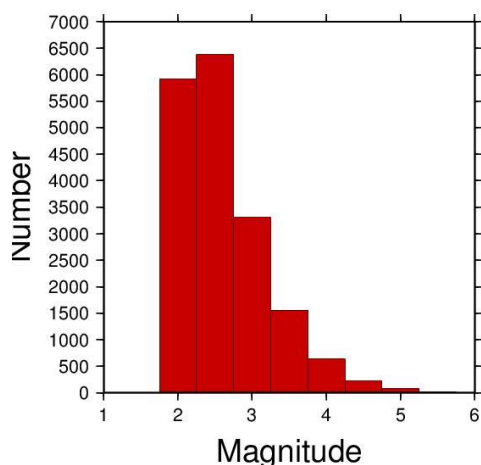


شکل ۲. (الف) ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مورد استفاده و توزیع زمین‌لرزه‌ها و (ب) پوشش کل مسیر پرتوهای با فاصله رومرکزی کمتر از ۲۰۰ کیلومتر.

۲ روش تحقیق

برای محاسبه ضریب کیفیت کدا انتخاب و از فیلتر میان گذر باترورت مرتبه ۴ برای اعمال فیلتر بسامدی روی نگاشت‌های لرزه‌ای استفاده شد.

باندهای بسامدی باید به صورت افزایشی باشد تا مقدار انرژی همه باندها تقریباً یکسان بماند و تاثیر آفت و خیز دامنه در بسامدهای زیاد از بین برود (رائوتین و خالتورین، ۱۹۷۸). همچنین برای بررسی نوفه در نگاشت لرزه‌ای به نسبت سیگنال به نوفه باید توجه داشت که در این بررسی به طور میانگین نسبت سیگنال به نوفه در پنجره‌های گوناگون، ۲/۵ در نظر گرفته شد.



شکل ۳. نمودار فراوانی زمین لرزه‌ها براساس بزرگی.

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

حد بالای بازه بسامدی (هرتز)	فرکانس مرکزی (هرتز)	حد پایین بازه بسامدی (هرتز)
۲	۱/۵	۱
۴	۳	۲
۶	۴/۵	۳
۸	۶	۴
۱۲	۹	۶
۱۶	۱۲	۸
۲۴	۱۸	۱۲

همان‌طور که گفته شد در این تحقیق برای برآورد ضریب کیفیت از روش تک‌پراکنش به عقب‌اکی و چوت (۱۹۷۵) استفاده شده است. بر طبق این روش در ابتدا باید پنجره کدا را تعیین کرد. با توجه به اینکه ابتدای این پنجره باید جایی باشد که طیف بسامدی کدای ثبت شده از یک رخداد لرزه‌ای در ایستگاه‌های گوناگون تقریباً یکسان باشد، لذا زمان کاهندگی دو برابر زمان رسید موج برشی را می‌توان در حکم ابتدای پنجره کدا در نظر گرفت (رائوتین و خالتورین، ۱۹۷۸) لذا ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Taup ابتدای موج برشی تعیین شد.

بر اساس این روش امواج کدا از پراکنش به عقب امواج حجمی بر اثر ناهمگنی‌های تصادفی موجود در پوسته و گوشته بالایی زمین به وجود می‌آیند. در این روش اساس کار روی دامنه امواج کدا است. در واقع روند آفت دامنه حائز اهمیت است.

$$A(f, t) = C(f) t^{-\alpha} \exp(-\pi f t / Q_c) \quad (1)$$

که در آن، $C(f)$ ضریب چشمه امواج کدا، α ضریب هندسی که برای امواج حجمی برابر ۱ و برای امواج سطحی برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود، t زمان کاهندگی (از زمان وقوع زمین لرزه) و Q_c ضریب کیفیت امواج کدا است. برای محاسبه $A(f, t)$ با استفاده از روش ریشه میانگین مربعات (RMS)، دامنه امواج کدای فیلتر شده، هموار می‌شود (روکر و همکاران، ۱۹۸۲). با گرفتن لگاریتم طبیعی از رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$\ln[A(f, t) t^\alpha] = \ln C(f) - (\pi f / Q_c) t \quad (2)$$

بر اساس رابطه (۲) برای امواج کدا با رسم نمودار $\ln[A(f, t) t^\alpha]$ بر حسب t و با برازش خط درجه اول (با شیب b) به روش کمترین مربعات، Q_c به ازای هر بسامد مرکزی به دست می‌آید ($Q_c = -\pi f / b$).

هفت باند بسامدی به ترتیبی که در جدول ۱ آمده است

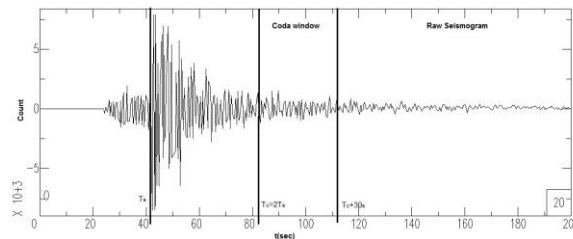
۳ تغییرات جانبی کاهندگی کدا در منطقه

با توجه به میل نفوذ امواج لرزه‌ای به اعماق بیشتر، هرچه فاصله رومرکزی زمین لرزه نسبت به ایستگاه‌های ثبت کننده بیشتر باشد، موج به اعماق بیشتر نفوذ می‌کنند و اطلاعات مسیرهای گذرنده از لایه‌های پایین تر را در اختیار خواهند گذاشت. لذا، با انتخاب داده با فاصله رومرکزی کمتر از ۲۰۰ کیلومتر، اطلاعات کاهندگی بیشتری از لایه‌های کم عمق (پوسته) را مدنظر قرار دادیم. برای بررسی مشخصات کاهندگی سنگ گره (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 کدا (هاوسکف و اوتمولر، ۲۰۰۳)، طول

پنجره ۳۰ ثانیه را برای برآورد ضریب کیفیت کدا و بررسی تغییرات جانبی آن در نظر گرفتیم (شکل ۴).

در شکل ۵ مقادیر میانگین Q_0 و n و میزان همبستگی خط برازش شده با مقادیر میانگین ضرایب کیفیت هفت باند بسامدی برای ۶ ایستگاه نشان داده شده است. تغییرات Q_0 و n را می‌توان ناشی از عوامل گوناگون زمین شناسی چون جنس مواد زیرسطحی، میزان شکستگی‌ها و لرزه‌خیزی منطقه دانست (رحیمی و همکاران، ۲۰۱۰).

مقدار میانگین ضرایب کیفیت در هفت باند بسامدی (میان ۱ تا ۲۴ هرتز) در ۲۱ ایستگاه به دست آمد و با نتایج به دست آمده در منطقه زاگرس که با روش مشابه احمدزاده (۱۳۹۲) برآورد شده، مقایسه شده است (جدول ۲).



شکل ۴. نمونه‌ای از نگاشت لرزه‌ای ثبت شده که با خط چین ابتدای موج برشی (T_s)، ابتدای پنجره کدا (T_c) و طول پنجره کدا (T_c+30s) مشخص شده است.

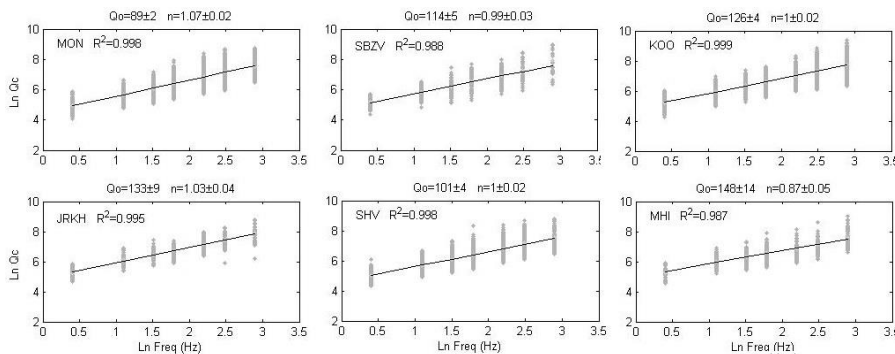
جدول ۲. الف) میانگین ضریب کیفیت در هفت باند بسامدی برای هر ایستگاه و ب) نتایج به دست آمده از روش احمدزاده (۱۳۹۲) در منطقه زاگرس.

(ب)

#	Station	Q_0	n	R^2
1	PIR	92±7	1.00±0.04	0.993
2	GAR	143±7	0.67±0.03	0.976
3	KLNJ	72±3	0.96±0.03	0.989
4	ROKH	94±10	1.01±0.06	0.980
5	ZNGN	107±17	0.85±0.09	0.942
6	SHGR	94±10	1.13±0.03	0.996
7	KHMZ	120±7	0.76±0.03	0.992
8	HSAM	81±5	0.94±0.03	0.988
9	BZA	86±6	0.93±0.04	0.992
10	SNGE	90±9	0.82±0.06	0.976
11	KMR	86±2	0.97±0.02	0.997
12	DHR	91±3	1.02±0.02	0.998
13	KOM	82±3	1.01±0.02	0.998
14	GHG	85±2	1.03±0.01	0.999
15	VIS	93±6	0.90±0.04	0.990
16	LIN	93±5	0.87±0.03	0.996
17	DOB	85±8	0.85±0.06	0.978
18	KFM	86±5	1.03±0.03	0.996
19	BRJ	89±10	1.01±0.08	0.955
20	AHRM	88±6	1.13±0.04	0.996
21	SHI	97±3	0.87±0.02	0.993

(الف)

#	Station	Q_0	n	R^2
1	AFRZ	96±2	1.19±0.01	0.999
2	DAH	103±5	0.95±0.03	0.996
3	MON	89±2	1.07±0.02	0.998
4	TEG	117±6	1.05±0.03	0.993
5	JRKH	133±9	1.03±0.04	0.995
6	KRD	120±7	1.02±0.03	0.994
7	KOO	126±4	1±0.02	0.999
8	MOG	127±7	0.99±0.03	0.996
9	MYA	123±8	1.06±0.04	0.995
10	AKL	118±2	0.97±0.01	0.999
11	SFR	102±2	0.98±0.01	0.999
12	PAY	123±2	0.94±0.01	0.999
13	EMG	113±2	1.04±0.01	0.999
14	SRO	125±5	1.03±0.02	0.998
15	SBZV	114±5	0.99±0.03	0.988
16	TNSJ	154±14	0.94±0.05	0.99
17	MHI	148±14	0.87±0.05	0.987
18	TPRV	149±12	1±0.04	0.994
19	SHV	101±4	1±0.02	0.998
20	TKDS	122±10	1.02±0.04	0.994
21	CHK	123±12	1.1±0.05	0.991



شکل ۵. نتایج حاصل از برآورد ضریب کیفیت در باندهای بسامدی هفت گانه در ۶ ایستگاه.

۴ تغییرات عمقی کاهندگی کدا در منطقه

تفاوت روند افت دامنه در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی امواج کدا به تفاوت در میزان کاهندگی لایه‌های سطحی و عمیق زمین بر می‌گردد (روکر و همکاران، ۱۹۸۲). در بررسی‌هایی که صورت گرفته، مشاهده شده است که عموماً با افزایش زمان کاهندگی پنجره کدا، مقدار ضریب کیفیت نیز افزایش می‌یابد (هاوسکوف و همکاران، ۱۹۸۹). در این بررسی برای ارزیابی تغییرات عمقی ضریب کیفیت، از ۱۸ پنجره زمانی کدا (از ۵ تا ۹۰ ثانیه با گام ۵ ثانیه) استفاده کردیم که نتایج آن در شکل ۶ آمده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، مقادیر ضریب کیفیت در زمان‌های کاهندگی ۵ تا ۹۰ ثانیه رفتار افزایشی خود را حفظ کرده‌اند. علت افزایش ضریب کیفیت در زمان‌های کاهندگی بزرگ‌تر، همگی بیشتر لایه‌های عمیق نسبت به لایه‌های با عمق کمتر است.

بیضی گون هستند.

$$h = h_{av} + a_2 \quad (۳)$$

در این رابطه، h_{av} میانگین عمق رخدادها و a_2 نیم‌محور کوچک بیضی گون است. از روابط هندسی یک بیضی مسطح داریم:

$$a_2 = (a_1^2 - r^2 / 4)^{1/2}, a_1 = \beta t / 2, t = t_c + w / 2 \quad (۴)$$

که در آن، a_1 نیم‌محور بزرگ بیضی گون، r فاصله میان چشمه تا گیرنده (میانگین فاصله رومرکزی)، β سرعت موج برشی، t میانگین زمان کاهندگی، t_c ابتدای پنجره کدا و w طول پنجره کدا است. برای محاسبه حداکثر عمق پراکنش سرعت موج برشی به‌طور میانگین $3/5$ کیلومتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین محاسبه عمق میانگین زمین‌لرزه‌ها (h_{av})، ابتدای پنجره کدا (t_c) و میانگین فاصله رومرکزی (r) در منطقه حداکثر عمق نفوذ امواج پراکنشی به‌دست آمد (شکل ۸).

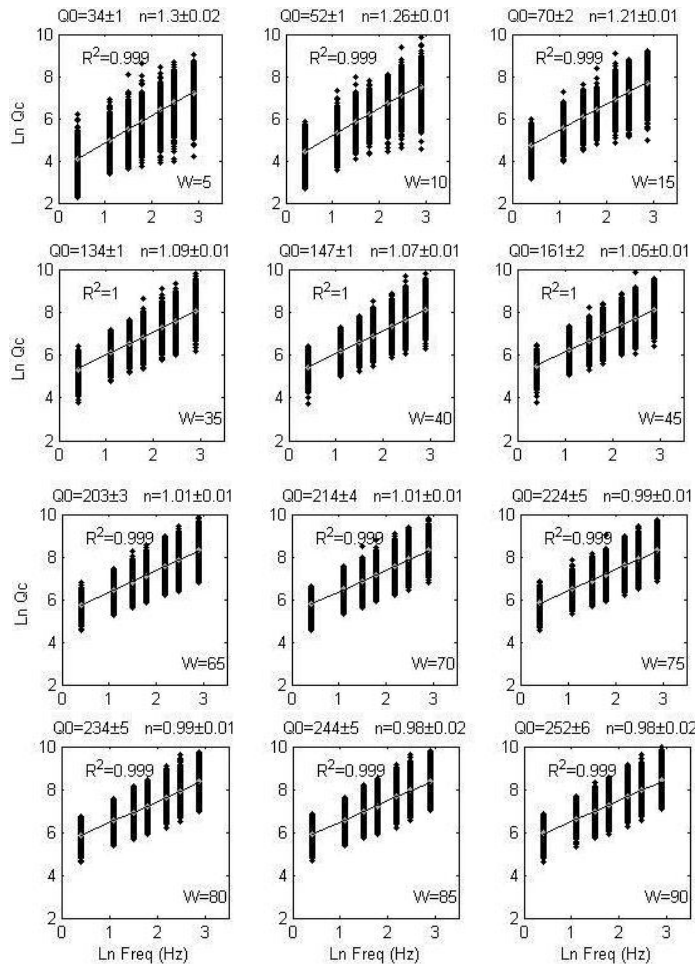
تغییر شیب منحنی افزایشی Q_0 و افزایشی n بسیار مهم است. به علت اینکه ضریب کیفیت به خواص کشسانی محیط بستگی دارد لذا تغییر قابل توجه در منحنی Q_0 و n (شکستگی در روند) با عمق (شکل ۸) می‌تواند اطلاعات مفیدی از تغییرات عمقی کشسانی محیط در اختیار بگذارد. در شکل ۸ مشخص است که در عمق حدود ۱۷۰ کیلومتر روند افزایشی Q_0 کند شده است و این نشانگر ناهمگنی بیشتر در این عمق است.

۵ برآورد بیشترین عمق پراکنش متناسب با طول پنجره کدا

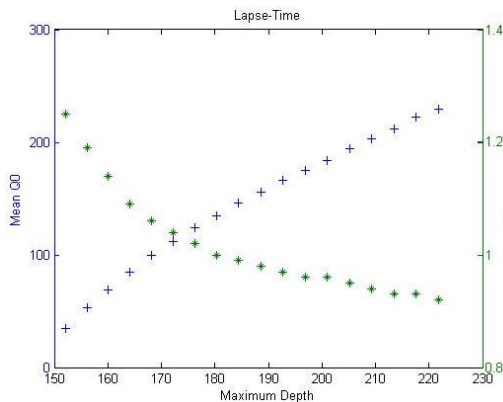
برای برآورد موقعیت فضایی پراکننده‌ها از رابطه پولی (۱۹۸۴) استفاده می‌کنیم. در این روش براساس مدل تک‌پراکنش موج حجمی در یک بیضی گون رابطه‌ای به‌دست می‌آید که در آن بیشترین عمق میانگین بیضی گون نشان‌دهنده عمق پراکنش موج کدا است (شکل ۷). در این مدل پولی چشمه زمین‌لرزه و ایستگاه، دو نقطه کانونی

همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات عمقی در شمال شرق ایران نسبت به زون سندج-سیرجان (SSZ) همگنی بیشتری دارد و دارای ضریب کیفیت بزرگ‌تری است.

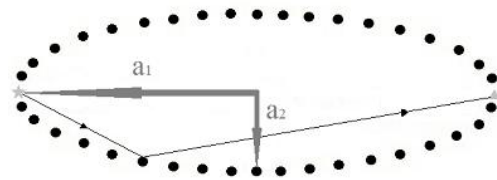
به‌منظور درک بهتر نتایج، در شکل ۹ تغییرات عمقی کاهندگی‌های به‌دست آمده در زون سندج-سیرجان زاگرس (احمدزاده، ۱۳۹۲) در پنجره‌های زمانی گوناگون با کار صورت گرفته در این تحقیق، مقایسه شده است.



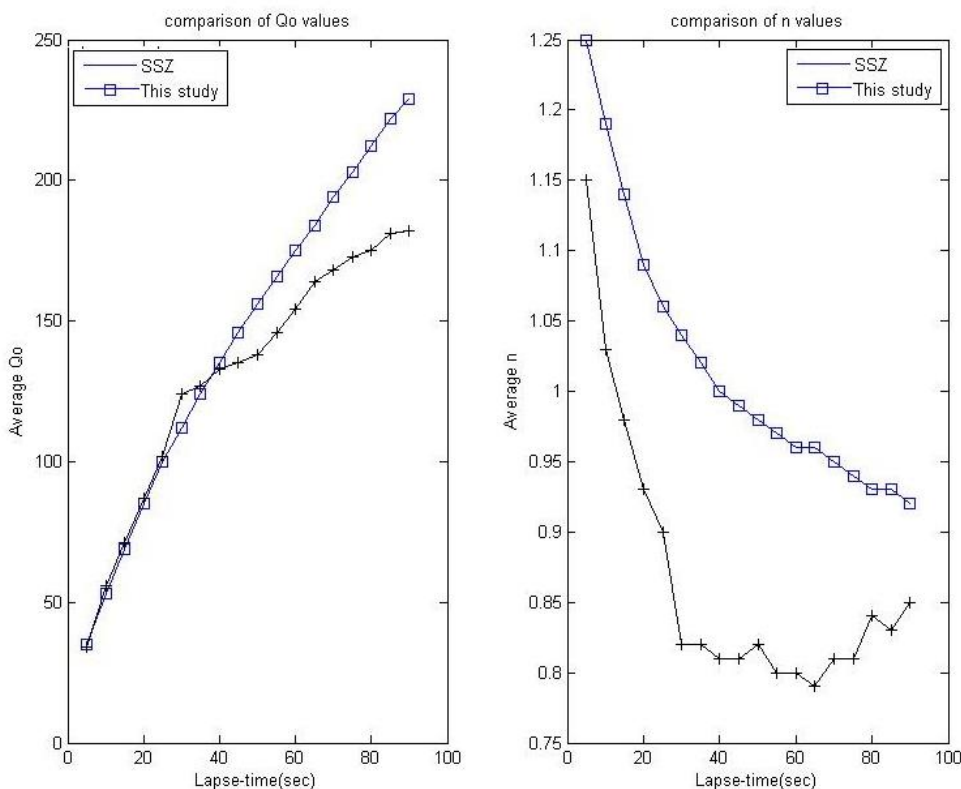
شکل ۶. نتایج حاصل از برآورد ضریب کیفیت وابسته به بسامد در پنجره‌های زمانی ۱۸ پنجره زمانی.



شکل ۸. تغییرات Q_0 و n با افزایش عمق و حداکثر عمق پراکنش.



شکل ۷. طرحی ساده از نحوه پراکنش موج مستقیم برشی (مدل تک‌پراکنش به عقب)، ستاره نشانگر چشمه، مثلث نشانگر ایستگاه و دایره‌ها نشانگر موقعیت پراکنده‌ها در محیط بیضی گون است.



شکل ۹. مقایسه روند تغییرات Q_0 (چپ)، n (وسط) در منطقه مورد بررسی (آبی) و زون سندج-سیرجان (سیاه)

۶ نتیجه گیری

کیفیت به دست آمده نیز این موضوع را تایید می کند. همچنین همان طور که از جدول ۲ مشخص است، تغییرات جانبی ضریب کیفیت امواج کدا در منطقه شمال شرق نسبت به منطقه زاگرس مقادیر بیشتری دارد که این نشان دهنده همگنی بیشتر در این زون نسبت به منطقه زاگرس است. برای درک بیشتر این موضوع تغییرات عمقی کاهندگی کدا نیز در دو منطقه مطابق شکل ۹ مقایسه شد. همان طور که در شکل ۹ مشخص است، تا پنجره زمانی ۳۰ ثانیه تقریباً دو منطقه، تغییرات یکسانی را نشان می دهند که حاکی از ناهمگنی شدید در لایه های کم عمق دو ناحیه است. این در حالی است که از پنجره ۳۰ ثانیه به بعد تفاوت فاحشی بین دو ناحیه وجود دارد که نشان دهنده ناهمگنی بیشتر در لایه های زیرین پوسته در زون سندج-سیرجان است. علت انتخاب پنجره ۳۰ ثانیه برای محاسبه تغییرات جانبی نیز همین موضوع است. اما روند تغییرات پارامتر وابستگی بسامدی (n) و ارون تغییرات Q_0 است، یعنی به طور کلی با افزایش زمان کاهندگی پنجره کدا، مقدار n

مقدار Q_0 و n هر ایستگاه نشانگر میانگین این مقادیر در محیط پیرامونی ایستگاه است. رابطه ضریب کیفیت وابسته به بسامد در منطقه به طور میانگین برابر $Q_c = 120 * f^{1.01}$ به دست آمد که با توجه به مقدار به دست آمده در منطقه زاگرس $(Q_c = 89 * f^{1.02})$ حاکی از همگنی بیشتر در لایه های کم عمق نسبت به زون زاگرس است (شکل ۹). با توجه به اینکه امواج پراکنشی دامنه نفوذ بیشتری دارند و تا عمق ۲۰۰ کیلومتر را پوشش می دهند، لذا، تا حدودی می توان خصوصیات لرزه زمین ساختی لایه های کم عمق را با استفاده از آنها برآورد کرد. در این بررسی نیز با توجه به اینکه از نظر لرزه زمین ساختی، لایه های کم عمق در ناحیه ایران مرکزی همگن تر از ناحیه کپه داغ است، لذا، ایستگاه هایی که به زون لرزه زمین ساختی ایران مرکزی تعلق دارند، ناهمگنی کمتری در لایه های کم عمق خود نسبت به ایستگاه های موجود در زون کپه داغ دارند. مقادیر ضریب

- earthquake analysis software for windows, Solaris, Linux, and Mac OSX Version 8.0, 244 pp.
- Mitchell, B. J., 1981, Regional variation and frequency dependence of Q_b in the crust of the United States, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **71**, 1531-1538.
- Pulli, J. J., 1984. Attenuation of Coda Waves in New England. *Bull. Seism. Soc. Am.* **74**, 1149-1166.
- Rahimi, H., Motaghi, K., Mukhopadhyay, S. and Hamzehloo, H., 2010, Variation of coda wave attenuation in the Alborz region and central Iran, *Geophys. J. Int.*, **181**, 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**, 923-943.
- 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, Single isotropic scattering model including wave conversions, Simple theoretical model of the short-period body wave propagation. *J. Phys. Earth*, **25**, 163-176.
- Sato, H. and Fehler, M. C., 1998, *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth*, Springer, New York.
- [Http://irsc.ut.ac.ir](http://irsc.ut.ac.ir)
- کاهش می‌یابد، لذا زمان‌های کاهندگی اولیه، محیطی با ناهمگنی‌های زیاد در لایه‌های کم عمق منطقه را نشان می‌دهد.
- مراجع
- احمدزاده، م.، ۱۳۹۲، بررسی تغییرات جانبی جذب امواج لرزه‌ای در منطقه زاگرس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.
- Aki, K., 1969, Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves, *J. geophys. Res.*, **74**, 615-631.
- Aki, K. and Chouet, B., 1975, Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects, *J. Geophys. Res.*, **80**, 3322-3342. the southern Apennine zone, Italy, *Geophys. J. Int.*, **150**, 10-22.
- Aki, K., 1980, Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz., *Phys. Earth planet Inter.*, **21**, 50-60.
- Aki, K. and Richards, P. (1980), *Quantitative Seismology, I and II*. (W. H. Freeman and Co., San Francisco).
- 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.
- Havskov, J. and Ottemoller, L., 2003, SEISAN: the