

## تغییرات زمانی ضریب $Q$ قبل و بعد از وقوع زلزله اهر-ورزان

مجید معهود

استادیار، مرکز پیش‌بینی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، [m.mahood@iiees.ac.ir](mailto:m.mahood@iiees.ac.ir)

### چکیده

برای بررسی تغییرات زمانی ضریب  $Q_c$  قبل و بعد از وقوع زلزله اهر-ورزان، نگاشتهای ثبت شده زلزله‌های شمال غرب در شبکه محلی آذربایجان (تبریز) موسسه زئوفیزیک به مدت ۱۱ ماه (شش ماه و نیم قبل از وقوع زلزله و پنج ماه و نیم پس از وقوع زلزله) مورد بررسی و برداش قرار گرفته است. به منظور بررسی تغییرات زمانی ضریب کیفیت، میزان تغییرات  $Q_c$  یعنی  $(dQ_c)$  در هر ماه نسبت به ماه قبل برای پنجره‌های زمانی مختلف (۱۰ تا ۴۰ ثانیه) بررسی شده است و مشاهده شد که مقدار متوسط  $Q_c$  در پنجره‌های زمانی مختلف، قبل و پس از وقوع زلزله تغییرات روشی داشته و این مقادیر پس از زلزله نسبت به بازه زمانی قبل از زلزله کاهش یافته است. برای بیشتر زمانها افزایش مقدار  $Q_c$  از ماه سوم آغاز شده و تا ماه هفتم افزایش-کوچکی نسبت به ماه قبل داشته است. برای پنجره‌های زمانی ۳۰ و ۴۰ ثانیه ۱۱ روز قبل از وقوع زلزله مقدار  $Q_c$  افزایش ناگهانی داشته که برای پنجره زمانی ۳۰ ثانیه، افزایش بیشتری مشاهده شده است.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی، تغییرات ضریب کیفیت، امواج دنباله‌ای، اهر-ورزان،  $Q_c$ .

## Temporal Variation of $Q$ Factor Before and after Earthquakes

Majid Mahood

Assistant Professor, Earthquake prediction center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology,  
[m.mahood@iiees.ac.ir](mailto:m.mahood@iiees.ac.ir)

### Abstract

Observed time-varying properties of the Earth's crust before and after large earthquakes are correlated with the increase in stress. Co- and postseismic slip of the great earthquakes can give rise to temporal changes in the medium either due to strong ground motion damaging near-surface sediment layer or stress perturbations modulating crack density and/or fluid movement at depth. Such time-varying crustal properties can result in a fractional change in seismic wave attenuation and velocity. The spatial and temporal variations of coda attenuation ( $Q_c$ ) were studied in the source region of the Ahar-Varzaghan ( $M_w$  6.5, 2012) earthquake. The  $Q_c$  values were determined from the amplitude decay rate of the S-wave coda in narrower overlapping frequency bands in the range  $f=1\text{--}24$  Hz using different lapse time windows from 10 to 40 s, based on a single back-scattering model for regional earthquakes recorded in a period from February 2012 to January 2013, including pre- and postseismic period. We found that the value of  $Q_c$  increases 11 days before mainshock and decreases after that. Temporal changes in  $Q_c$  in this earthquake imply variations of crack density and pore-fluid saturation in the ruptured fault zone. The reduction in  $Q_c$  following this event indicates high pore fluid saturation within the fractured fault zone due to the postseismic fluid redistribution. Approaching the earthquake, we observed clear variations in the seismic wave propagation properties. The elastic properties of rocks in the fault region underwent a sharp change before the earthquake. From our observations, we infer that a complex sequence of dilatancy-diffusion processes takes place and that fluids play a key role in the fault failure process.

**Keywords:** Precursor, Variation of  $Q$ , Coda waves, Ahar-Varzaghan,  $Q_c$ .

### ۱ مقدمه

در روشهای پیش‌بینی کوتاه مدت زلزله به دنبال نشانه‌هایی هستیم که نزدیک بودن زمان رویداد زلزله را نمایان می‌سازند، چنین علائمی به عنوان پیش‌بین نشانگر بیان می‌شوند. تغییرات در پارامتر  $Q$  و تغییرات موقعی  $V_p/V_s$  قبل از وقوع زلزله‌های

بزرگی در دنیا مشاهده شده است. این تغییرات به عنوان تغییرات خصوصیات سنگ تحت استرس رخ می‌دهد. با نزدیک شدن انرژی ذخیره شده به مقدار لازم برای شکستگی اصلی، سنگهای تحت تنش به صورت مختصر شروع به شکستن می‌کنند (ساوچ، ۲۰۱۰). تغییرات ناهمگنیها، پارامترهای انبیوزتروپی و ناهمسانگردی، ایجاد درز و ترکهای جدید، باز شدن درز و ترکهای موجود که می‌تواند به سبب تغییرات میدان تنش زمین لرزه ایجاد شود و نفوذ سیالات درون زمین به درز و ترکها و افزایش فشار منفذی، باعث تغییر خصوصیات فیزیکی محیط می‌شود. این نفوذ سیالات در ترکهای ریز باعث ایجاد تغییر در شرایط استرس و فشار منفذی منطقه خواهد شد که حتی تغییر جهت در ترکها را سبب شده است.

در این مقاله جهت تعیین تغییرات زمانی ضریب  $Q_c$  قبل و بعد از وقوع زلزله اهر-ورزان، از زلزله‌های محلی رخداده در ناحیه آذربایجان و شمال غرب ایران استفاده شده است. بدین منظور نگاشتهای زلزله‌های ثبت شده در شبکه محلی آذربایجان (تبیز) موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به مدت ۱۱ ماه (۱۳۹۷/۱/۱-۲۰۱۴/۲/۱)، شش ماه و نیم قبل از وقوع زلزله و پنج ماه و نیم پس از وقوع زلزله) مورد بررسی و پردازش قرار گرفته است. جهت بالا بردن تعداد مسیرهای مورد استفاده از زلزله‌های محلی ثبت شده توسط ایستگاه‌های دائمی شبکه لرزه‌نگاری پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله موجود در منطقه نیز استفاده گردیده است.

## ۲ روش تحقیق

با استفاده از شکل موج زلزله‌های محلی ثبت شده و با استفاده از تئوری امواج دنباله‌ای، پارامتر  $Q_c$  به روش تک پراکنش به عقب (آکی و چوت، ۱۹۷۵) تخمین زده شده است. طبق این مدل امواج کدا از پراکنش به عقب امواج حجمی توسط ناهمگنی‌های نامنظم و تصادفی موجود در پوسته و قسمت بالایی گوشته زمین تولید می‌شوند. دامنه امواج کدا  $A(f,t)$  در یک نگاشت لرزه‌ای در فرکانس مرکزی ( $f$ ) و در سیگنال با پهنای باند محدود می‌تواند به عنوان تابعی از زمان سپری شده ( $t$ ) که از زمان واقعی رویداد زمین‌لرزه اندازه‌گیری می‌شود به صورت زیر بیان می‌شود (آکی و چوت، ۱۹۷۵):

$$A(f,t) = S(f)t^{-\alpha} \exp\left(-\frac{\pi ft}{Q_c(f)}\right) \quad (1)$$

$$\ln[A(f,t)] = \ln[S(f)] - \ln t - \left(\frac{\pi f}{Q_c}\right)t \quad (2)$$

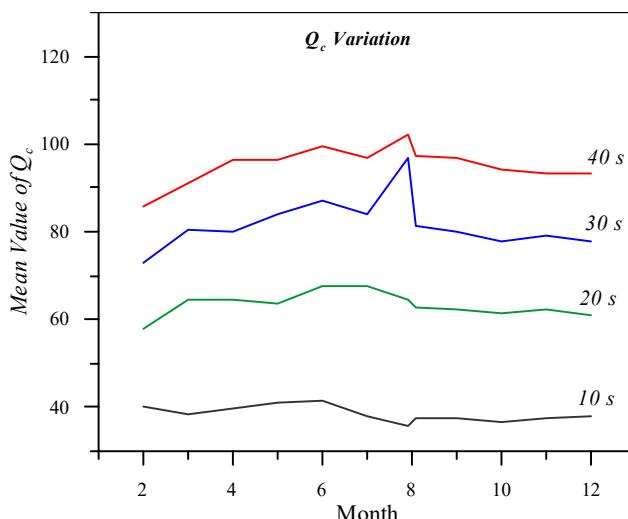
$$\ln[A(f,t)t] = c - bt \quad (3)$$

رابطه فوق بیانگر رابطه‌ای خطی بین  $\ln[A(f,t)t]$  و  $t$  می‌باشد. بنابراین شبی خط مستقیم برآش شده بین مقادیر  $b = \pi f/Q_c$  در فرکانس‌های مختلف را بدست می‌دهد. مقادیر محاسبه شده پارامتر کیفیت، مشابه مناطق فعال از نظر لرزه‌خیزی مشاهده گردید (معهود و امیری، ۲۰۱۷، معهود و همکاران، ۲۰۱۶).

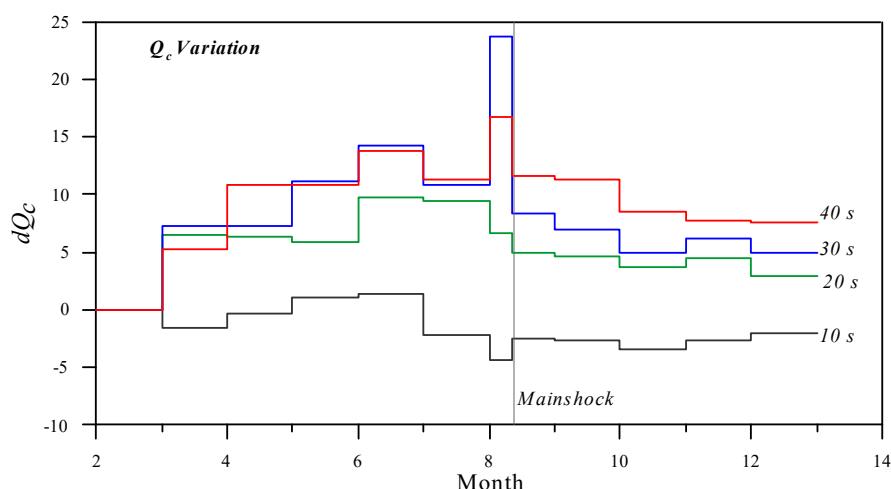
در شکل (۱) تغییرات زمانی مقادیر محاسبه شده  $Q_c$  در هر ماه برای پنجره‌های زمانی مختلف قبل و پس از زلزله مشاهده می‌شود. در پنجره زمانی ۳۰ ثانیه، افزایش مقدار  $Q_c$  یک ماه قبل از وقوع زلزله به وضوح مشاهده می‌شود. این افزایش با دامنه کمتری برای زمان ۴۰ ثانیه نیز مشاهده شده ولی برای زمان ۲۰ ثانیه تغییرات جزئی بوده در حالیکه در زمان ۱۰ ثانیه بر عکس زمانهای دیگر کاهش مقدار  $Q_c$  را شاهد هستیم. در شکل (۲) میزان تغییرات  $Q_c$  (یعنی  $dQ_c$ ) در هر ماه نسبت به ماه قبل را برای پنجره‌های زمانی مختلف قبل و پس از زلزله بررسی شده است و مشاهده می‌شود که مقدار متوسط  $Q_c$  در پنجره‌های زمانی مختلف، قبل و پس از وقوع زلزله تغییرات روشنی داشته و این مقادیر به جز در زمان ۱۰ ثانیه، پس از زلزله نسبت به بازه زمانی قبل از زلزله کاهش یافته است. برای زمانهای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ثانیه افزایش مقدار  $Q_c$  از ماه سوم آغاز شده و تا ماه هفتم در هر ماه افزایش کوچکی نسبت به ماه قبل دارد. در ماه هشتم، برای زمانهای ۳۰ و ۴۰ ثانیه ۱۱ روز قبل از وقوع زلزله مقدار  $Q_c$  افزایش ناگهانی داشته که برای ۳۰ ثانیه این افزایش، مقدار بیشتری داشته است. برای زمانهای ۱۰ و ۲۰ ثانیه بر عکس زمانهای دیگر کاهش مقدار  $Q_c$  را در این ماه شاهد هستیم. در زمانهای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ثانیه

پس از وقوع زلزله، مقدار  $Q_c$  کاهش یافته ولی در زمان ۱۰ ثانیه  $Q_c$  بعد از زلزله افزایش کمی داشته است. با افزایش پنجره زمانی، امواج کدا از عمق بیشتری عبور می‌کنند. نتایج نشان می‌دهند که پنجره زمانی ۳۰ ثانیه در این مورد مناسب بوده و

امواج از منطقه کانونی عبور کرده که تحت تاثیر تغییرات تنش قرار داشته اند. درینجره زمانی ۱۰ ثانیه امواج از لایه های سطحی و عمق کمتری عبور کرده و حساسیت کمتری نسبت به تغییرات تنش در عمق کانونی نشان می دهدند. قبل از وقوع زلزله به سبب افزایش فشار و تنش، ترکهای موجود در ناحیه گسلی به هم نزدیک شده و سیالات از این فضاهای خارج می گردند درنتیجه به سبب کاهش چگالی ترکها و خروج سیالات، ناهمگنی منطقه کاهش یافته و مقدار  $Q_c$  افزایش می یابد. پس از وقوع زلزله به سبب خردشیدگی منطقه، کاهش تنش، افزایش ترکها و نفوذ سیالات ناهمگنی منطقه افزایش یافته و مقدار  $Q_c$  کاهش می یابد که این موضوع توسط پادهای و همکاران (۲۰۱۳)، معهود و حمزه لو (۲۰۰۹) و جاین و آکی (۱۹۹۱) نیز تحت مدل اتساع تایید شده است.



شکل ۱. تغییرات زمانی مقادیر محاسبه شده  $Q_c$  در هر ماه برای پنجره های زمانی مختلف قبل و پس از زلزله



شکل ۲. میزان تغییرات  $Q_c$  در هر ماه نسبت به ماه قبل برای پنجره های زمانی مختلف قبل و پس از زلزله. خط عمودی نشان دهنده زمان وقوع زلزله ۲۰۱۲/۸/۱۱ اهر-ورزقان می باشد.

لاکن و همکاران (۲۰۱۰) برخی شواهد زلزله شناسی و نیز تغییرات موقتی سرعت امواج لرزه ای و ناهمسانگردی را قبل از وقوع زلزله L'Aquila (۲۰۰۹) ایتالیا مورد بررسی قراردادند. شش ماه قبل از زلزله پیشلرزه هایی به صورت خوش ای درجهت شمال غربی-جنوب شرقی در منطقه رخ داده بود. تغییرات مشاهده شده در خصوصیات گسترش امواج لرزه ای و خصوصیات الاستیکی سنگها یک هفته قبل از زلزله در ناحیه کانونی، به فرایند پیچیده اتساع، افزایش حجم ترکها و نقش مهم

سیالات نسبت داده شد. یو و همکاران (۲۰۱۳) تغییرات موقتی سرعت در پوسته را برای زلزله‌های بزرگ  $M_w$  Sumatra (۲۰۰۴) و Nias-Simeulue (۹.۲, ۲۰۰۵) مورد بررسی قراردادند. با مطالعه امواج کدای P و S و بررسی پارامترهای مربوط به فاکتور کیفیت و سرعت امواج لرزه‌ای، تغییرات مشاهده شده به افزایش چگالی ترکهای ایجاد شده و نفوذ سیالات درون زمین ارتباط داده می‌شود. پادهای و همکاران (۲۰۱۳) به مطالعه تغییرات موقتی زمانی-فضایی  $Q_c$  قبل و بعد از زلزله-های سالهای ۲۰۰۵ و ۲۰۰۸ ( $Mw$  ۷.۲ و ۷.۰) در منطقه توهوکو ژاپن پرداختند. بامطالعه ۴۰۰ زلزله قبل و پس از وقوع زلزله‌های موردنظر مشاهده کردند که متوسط مقادیر  $Q_c$  قبل از زلزله با تغییرات کمتر از ۱۰٪ تقریباً بدون تغییر بوده و با نتایج مطالعات گذشته همخوانی دارد. ولی بعد از زلزله ۲۰۱۱ توهوکو، در برخی ایستگاه‌های شمالی در فرکانس ۱/۲۵ تا ۳/۵ هرتز متوسط مقادیر  $Q_c$  به مقدار ۱۰ تا ۱۶٪ کاهش یافته است.

### ۳ نتیجه‌گیری

مقادیر  $Q_c$  نسبت به دو بازه زمانی قبل و بعد از زلزله تغییرات واضحی داشته‌اند. از ماه ۲ تا نزدیک شدن به زمان زلزله (اواسط ماه ۸)، مقادیر  $Q_c$  با گذشت زمان در هر بازه زمانی افزایش کمی یافته است. این روند افزایش در پنجره زمانی مختلف، متفاوت می‌باشد. از اواسط ماه ۸ (پس از وقوع زلزله) تا انتهای سال ۲۰۱۲، مقادیر  $Q_c$  با گذشت زمان در هر بازه زمانی کاهش کمی داشته است. در ماه هشتم، برای زمانهای ۳۰ و ۴۰ ثانیه ۱۱ روز قبل از وقوع زلزله مقدار  $Q_c$  افزایش ناگهانی داشته که برای پنجره زمانی ۳۰ ثانیه افزایش بیشتری مشاهده می‌شود و در نتیجه پنجره زمانی ۳۰ ثانیه در این مورد مناسب بوده و امواج از منطقه کانونی عبور کرده که تحت تاثیر تغییرات تنفس قرار داشته‌اند. پس از وقوع زلزله تنفس در منطقه تغییر کرده که سبب افزایش حجم سنگها به دلیل ایجاد ترکهای کوچک یا دوباره بازشدن ترکهای موجود می‌گردد و به دنبال آن کاهش فاکتور کیفیت منطقه بعد از زلزله مشاهده می‌شود.

### تقدیر و تشکر

مقاله حاضر از پژوهشی با عنوان "تغییرات زمانی ضریب  $Q$  و نسبت  $V_p/V_s$  قبل و بعد از وقوع زلزله" در پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله استخراج شده و نگارنده از حمایتهای انجام شده تشکر می‌نماید.

### منابع

- Aki, K., and Chouet, B., 1975. "Origin of Coda Waves: Source, Attenuation and Scattering Effects". *J. Geophys. Res.* 80, 3322–3342 .
- Mahood, M. and Hamzehloo, H., 2009. "Estimation of coda wave attenuation in East Central Iran", *J. Seismol.*, 13, 125–139.
- Mahood, M., 2014. "Attenuation of high-frequency seismic waves in Eastern Iran". *Pure Appl. Geophys.*, 171: 2225 - 2240.
- Mahood, M. and Amiri, S., 2017. "Estimation of Quality Factor ( $Q_\beta$ ) Using Accelerograms of Ahar-Varzaghan Earthquakes, Northwestern Iran". *IJGE*, 3(3): 73-84.
- Mahood, M., Mokhtari, M., and Zafarani, H., 2016. "Prediction of Magnitude and Epicentral Distance from a Single Seismic Record: A Case Study of the Ahar-Varzaghan Earthquake". *IJGE*, 2(4): 208-213.
- Padhy S, Takemura S, Takemoto T, Maeda T, Furumura T., 2013. "Spatial and temporal variation in coda attenuation associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japan (Mw 9) earthquake". *Bull. Seismol. Soc. Am.* 103:1411–1428.
- Savage, M., K., 2010, "The role of fluids in earthquake generation in the 2009 Mw 6.3 L'Aquila, Italy, earthquake and its foreshocks", *Geology*, 38, 1055-1056.
- Lucente, F., Gori, P., Margheriti, L., Piccinini, D., Bona, M., 2010. "Temporal variation of seismic velocity and anisotropy before the 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake, Italy". *Geology*, 38, 11, 1015–1018.
- Jin, A. and K. Aki, 1991. "Observational and physical basis for coda precursor", in Evaluation of Proposed Earthquake Precursors (ed. M. Wyss), AGU, Washington, D. C., 33-46.
- Yu, W. C., Teh-Ru Alex Song, and Paul G. Silver, 2013, "Temporal Velocity Changes in the Crust Associated with the Great Sumatra Earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 5, 2797–2809.