

## آنالیز طیفی داده های شتابنگاشتی زلزله کجور- فیروزآباد (۲۰۰۴)

حبیب رحیمی ، نصرالله کمالیان، حسین حمزه لو

### چکیده

زلزله به بزرگی  $M_w = 6.2$  (USGS) در ۲۸ می ۲۰۰۴ مناطق غربی استان مازندران را لرزاند که شوک اصلی آن توسط ۱۴۵ ایستگاه شتابنگاری مرکز تحقیقات مسکن ثبت شد. در این مطالعه با استفاده از شتابنگاشتهای حرکت تنومند زمین ثبت شده در اطراف رومرکز زلزله کجور پارامترهای چشمه، ضریب جذب امواج فرکانس بالا و پارامتر افت طیفی،  $K$ ، برای ۱۲ ایستگاه از ۱۴۵ ایستگاهی که رکوردهای ثبت شده، سیگنال به نویز و توزیع رومرکزی خوبی داشتند، تعیین شد. پارامترهای چشمه به روش بهینه سازی غیر خطی بین طیف جابجائی بدست آمده از طیف شتاب برای هر رکورد، با ترکیب مدل آشفتگی چشمه با یک مدل توانی برای ضریب جذب امواج فرکانس بالا بدست آمد. ضریب جذب امواج فرکانس بالا، با استفاده از

مدل کاهیدگی دامنه از رابطه  $A(f, r) = G(r) \cdot e^{-\frac{\pi f}{Q\beta}}$  که  $G(r)$  معرف گسترش هندسی است، بدست آمد.

مقدار میانگین تخمین زده شده برای ضریب جذب، در رنج فرکانسی (۲-۲۵) هرتز ۱۸۵ بدست آمد و پارامترهای چشمه بصورت

$$M_0 = 1.16 * 10^{25} \text{ dyn} - \text{cm} , r = 5.6 \text{ km} , \Delta u = 39 \text{ cm} , \Delta \sigma = 40 \text{ bar} , T_d = 3.9 \text{ sec}$$

تخمین زده شدند. بزرگی ممان از رابطه کاناموری ( $M_w = 6.1$ )، بدست آمد که سازگاری خوبی با مقادیر بدست آمده توسط دانشگاه Harvard ( $M_w = 6.3$ ) به روش CMT و سازمان زمین شناسی آمریکا USGS ( $M_w = 6.2$ ) دارد.

**کلمات کلیدی:** پارامترهای چشمه، فاکتور کیفیت، پارامتر افت طیفی، روش طیفی چشمه، کجور، فیروزآباد.

### Spectral Analysis of acceleration recorded in Kojour-firozabad earthquake (2004)

#### Abstract

The Kojour\_firozabad earthquake in 28 May 2004 with magnitude ( $M_w=6.2$ ) in south Mazandaran province in north of Iran occurred and the main shock recorded in 145 strong motion acceleration building house research center (BHRC).

In the study, the strong motion records are used to obtain an estimate of source parameters, high frequency attenuation and spectral decay parameter for 12 stations from 145 stations that is good S/N ratio and azimuthally distribution. The source parameters are obtained by fitting the data by a dislocation source model combined with an exponential model for the attenuation. The source parameter estimated here

$$(M_0 = 1.16 * 10^{25} \text{ dyn} - \text{cm} , r = 5.6 \text{ km} , \Delta u = 39 \text{ cm} , \Delta \sigma = 40 \text{ bar} , T_d = 3.9 \text{ sec} )$$

and estimated moment magnitude ( $M_w = 6.1$ ) agree well with values obtained previously from Harvard university by CMT method. The high frequency attenuation obtained by used from Amplitude spectral method that can be written as

$$A(f, r) = G(r) e^{\frac{-\pi f}{Q\beta}}$$

That here  $G(r)$  is geometrical spreading. Estimates of path averaged crustal shear wave quality factors give results in the rang 68 to 383, and mean of spectral decay parameters for two horizontal components in the rang 0.06 sec to 0.11 sec.

## مقدمه

شوئك اصلي زلزله كجور-فيروزآباد (۲۰۰۴) با بزرگي Mw=6.2 و رو مركز (51/57N, 36.28E)، بر طبق گزارش سازمان زمین شناسي آمریکا (USGS) قرار داشته و عمق كانوني آن ۲۸ km گزارش شده است. فلات ایران يك زون نسبتاً عريض با دگرشكلي فشارشي در طول كمربند فعال لرزه خيز آلپ-هماليا واقع شده است كه مابين حرکات همگراي صفحه عربستان در جنوب غربي و اوراسيا در شمال شرقي به تله افتاده است و رشته كوههاي البرز در شمال ایران نیز در كمربند آلپ-هماليا واقع شده اند كه ما بين بلوك جنوب كاسپين در شمال و فلات مركزي ایران واقع شده كه ساختار البرز را در دو دوره پركامبرين و آلپين شكل داده است.

منطقه كلانلرزه اي زمينلرزه كجور-فيروزآباد (۲۰۰۴)، در ناحيه لرزه زمينساختي البرز واقع شده است و ساختارهاي تشكيل دهنده كمربند چين خورده البرز در بخش غربي عموماً داراي روند شمال غرب-جنوب شرق و در بخش شرقي البرز اين ساختارها داراي روند شمال شرق-جنوب غرب هستند كه محل تلاقي اين ساختارها، محل تشكيل آتشفشان و قله كواترنر دماوند است. در پهنه شمال غربي البرز راستاي غالب گسلها، شمال غرب-جنوب شرق با سازوكار رانديگي و گاهي با مولفه راستالغز است. زلزله كجور-فيروزآباد (۲۰۰۴) از فعاليت يكي از دو گسل شمال البرز يا كجور طبق گزارشهاي USGS يا Harvard مي باشد و مطالعه سايزموتكتونيك البرز عمق زمين لرزه هاي رويداده را كم تا متوسط نشان مي دهد.

در اين مطالعه ضريب جذب امواج لرزه اي برشي فرکانس بالا از دامنه طيفي مولفه هاي افقي شتابنگاشتها به روش رگرسيون خطي (كمترين مربعات) بدست آمده و پارامتر افت طيفي،  $\kappa$ ، براي دو مولفه افقي از دامنه طيفي شتاب به روش كمترين مربعات تعيين گرديد و پارامترهاي چشمه زلزله به روش طيفي، و بهينه سازي غير خطي بين مدل آشفتگي چشمه براون<sup>۱</sup> (۱۹۷۰، ۱۹۷۱) و طيف جابجائي بدست آمده از طيف شتاب مولفه هاي افقي، تخمين زده شد.

## مدل آشفتگي چشمه براون<sup>۱</sup> (۱۹۷۰ و ۱۹۷۱)

مدلي كه براي آشفتگي چشمه زلزله توسط براون (۱۹۷۱) براي طيف جابجايي ميدان دور با يك جمله تواني

براي تضعيف امواج فرکانس بالا ارائه شده به صورت زير بيان مي شود

$$|D(w)| = \frac{2M_0 R_{\theta\phi} C}{4\pi\beta^3 R [1 + (w/w_c)^2]} e^{-wR/2Q\beta} \quad (1)$$

كه  $M_0$  ممان لرزه اي،  $R_{\theta\phi}$  الگوي تششع چشمه زلزله، C فاکتورکاهشی برای افراز انرژی در دو مؤلفه افقي ( $C = 1/\sqrt{2}$ ) و Q فاکتور کیفیت میانگین مسیر<sup>۲</sup> برای امواج فرکانس بالا، شامل تضعيف بواسطه پراكنش و جذب ذاتي است، R تابع گسترش هندسي،  $\beta$  سرعت موج برشي،  $\omega_c = 2\pi f_c$  فرکانس گوشه و  $\rho$  چگالي مواد پوسته اطراف چشمه زلزله است.

1. Brune (1970, 1971).  
1. Dislocation source Model  
2. Path averaged Quality factor

### بردارش داده ها و تعیین پنجره موج برشی

شوک اصلی زلزله کجور فیروز آباد توسط ۱۴۵ ایستگاه شتابنگاری مرکز تحقیقات مسکن (BHRC) ثبت شده (شکل ۱) که دستگاههای شتابنگار ثبت کننده از نوع آنالوگ SS-1 و دیجیتال SSA-2 با قدرت تفکیک 12 bits و فرکانس طبیعی ۵۰ هرتز با پاسخ فرکانسی هموار در بازه (۰-۵۰) هرتز می باشند. اثرات مربوط به میرایی و فرکانس طبیعی سیستم بروی نگاشته اعمال و لذا اثرات دستگاهی از رکوردها حذف شده و مولفه شعاعی برای هر ایستگاه بر مبنای مولفه های افقی ثبت شده تعیین گردید. سپس طبق روش ارائه شده توسط Kinoshita (۱۹۹۴) برای انتخاب پنجره موج SH، سری زمانی حاصل،  $b(n)$ ، توسط فیلتر باترورث باندگذر مرتبه چهار در باند فرکانسی (۲-۲۵) هرتز فیلتر و از رابطه ۲ پوش شتاب بدست آمد.

$$e(n) = \{b^2(n) + H^2(b(n))\}^{0.5} \quad (2)$$

که  $H(b(n))$  تبدیل هیلبرت سری زمانی  $b(n)$  است. سری زمانی  $e(n)$  با شروع رسید فاز موج  $s$  رفتار صعودی داشته و در انتهای موج  $s$  شروع به نزول می کند. برای مشخص شدن دقیق انتهای موج  $s$  و برآورد آن بصورت اتوماتیک، سری زمانی ریشه میانگین مجموع مربعات افزایشی<sup>۱</sup> از سری زمانی  $e(n)$  بصورت زیر بدست آمد.

$$C(l) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^l e^2(k)} \quad (3)$$

زمان رسید موج  $s$ ،  $(T_0)$ ، برای رکوردها از مولفه های افقی بصورت تجربی مشخص و زمان انتهای موج  $s$ ،  $(T_e)$  طبق الگوریتم Kinoshita (۱۹۹۴)، زمانی است که سری زمانی  $c(n)$  شروع به نزول می کند که در شکل (۲) برای مولفه افقی نشان داده شده است.

### برآورد سیگنال به نویز رکوردها

برای برآورد سیگنال به نویز، ابتدا همه مولفه های افقی نسبت سیگنال به نویزشان از رابطه

$$R_{sn} = \frac{s(f)/t_s}{n(f)/t_n} \quad (4)$$

تعیین گردیده است که  $s(f)$  دامنه طیفی پنجره موج  $s$  (سیگنال)،  $n(f)$  دامنه طیفی پنجره نویز،  $t_s$  طول پنجره زمانی سیگنال برحسب ثانیه و  $t_n$  طول پنجره زمانی نویز برحسب ثانیه می باشد. به دلیل مشخص نبودن رسید موج  $p$ ، پنجره نویز از ۵ ثانیه انتهای رکوردها گرفته شده و رکوردهائی که در بازه فرکانسی (۰-۲۵) هرتز نسبت سیگنال به نویز بالایی داشتند انتخاب شدند که در شکل ۳ نسبت سیگنال به نویز این رکوردها برحسب فرکانس آورده شده است.

### بردارش داده ها و تخمین $K$ و $Q$

برای تخمین  $Q$  هر دو مولفه افقی شتاب نگاشته، تصحیح خط مبنای مرتبه صفر شده و سپس توسط فیلتر باترورث باندگذر مرتبه ۴ با باند فرکانسی ۲-۲۵ هرتز فیلتر شدند. (1998 Olafsson, s) پنجره موج برشی برای رکوردها با استفاده از الگوریتم kinoshita (1994) انتخاب و کساین تییر ۱۰٪ روی آنها اعمال گردیده و سپس محتوای فرکانسی موج برشی از طیف فوریه پنجره موج برشی بدست آمد.

نمودار لگاریتم دامنه طیفی هر دو مولفه افقی رکوردها برحسب فرکانس در شکل ۳ آورده شده است. با توجه به روابط زیر:

$$A(f, r) = G(r) \cdot e^{\frac{-\pi f r}{Q\beta}} \quad (5)$$

$$G(r) = \begin{cases} 10 / r & r < r_0 \\ 10 / \sqrt{r \cdot r_0} & r \geq r_0 \end{cases}$$

$$\ln(A(f, r)) = \ln(G(r)) - \frac{\pi f r}{Q\beta} \quad (6)$$

برای هر ایستگاه، می‌توان  $Q$  را بر مبنای شیب خط برازش داده شده مابین لگاریتم طیف دامنه و فرکانس با استفاده از روش کمترین مربعات به دست آورد که نتایج در شکل ۴ و جدول ۱ آورده شده است. برای برآورد پارامتر افت طیفی،  $K$ ، برای مولفه‌های افقی ۱۲ شتاب نگاشت حاصله از تکان اصلی زلزله کجور-فیروزآباد که نسبت سیگنال به نویز خوبی داشتند از روش پیشنهاد شده توسط اندرسون و کواس (۱۹۸۴) استفاده گردید.

برای این منظور لگاریتم دامنه طیفی هر دو مولفه بر حسب فرکانس در رنج فرکانسی ۲۰-۱ هرتز رسم شده و پارامتر افت طیفی بر مبنای شیب خط برازش داده شده بین لگاریتم طیف دامنه و فرکانس،  $K$ ، بر اساس رابطه ۷ برای مولفه‌های افقی

$$\ln(A(f)) = \ln(A_0) - \pi k f \quad f > f_E \quad (7)$$

ایستگاه‌ها تعیین گردید. در شکل ۴ نمودارها و در جدول ۱ نتایج مربوطه آورده شده است.

### بردازش داده‌ها و تخمین $M_0, f_c$

برای تعیین پارامترهای چشمه تکان اصلی زلزله کجور-فیروزآباد، روش بهینه سازی غیر خطی بین مدل آشفتگی چشمه براون (۱۹۷۰) و طیف دامنه جابجایی حاصله از شتابنگاشت‌های زلزله کجور-فیروزآباد استفاده شد بطوریکه ابتدا از بین ۱۱ شتابنگاشت ثبت شده از شوک اصلی زلزله کجور-فیروزآباد ۱۲ ایستگاه ذکر شده در جدول ۱ که نسبت سیگنال به نویز خوبی داشتند برای برآورد پارامترهای چشمه مورد استفاده قرارگرفت و هر دو مولفه افقی اشان با یک فیلتر پایین گذر باترورت مرتبه ۴ با فرکانس قطع ۲۵ هرتز، فیلتر شدند.

از رابطه بین طیف شتاب و طیف جابجایی  $|D(\omega)| = \frac{|A(\omega)|}{\omega^2}$ ، طیف جابجایی دامنه موج برشی برای همه مولفه‌های افقی بدست آمد و با استفاده از مقادیر فاکتورهای کیفیت بدست آمده برای ۱۲ ایستگاه و نیز مدل آشفتگی چشمه براون (۱۹۷۰) بکار گرفته شده توسط اولافسون (۱۹۹۸) معادله دامنه طیفی جابجایی موج برشی با استفاده از رابطه زیر:

$$|D(\omega)| = \frac{2M_0 R_{\theta\phi} c}{4\pi\beta^3 \rho R \cdot (\omega / \omega_c)^2} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{\omega R}{2Q\beta}\right) \quad (8)$$

برحسب دو مجهول  $M_0$  و  $f_c$  بدست آمد که برای مقادیر مطلوب  $M_0$  و  $f_c$  برای مولفه های افقی رکوردها، ضریب همبستگی<sup>۱</sup> بین دو منحنی درجه دوم فیت شده (به روش کمترین مربعات) به دامنه های طیفی داده ها و مدل آشفتگی چشمه براون (۱۹۷۰)، ماکزیمم است.

و لذا میانگین مقادیر  $M_0$  و  $f_c$  برای هر دو مولفه افقی رکوردها، بدست آورده شد که نتایج حاصله در جدول ۱ آورده شده است و ضمناً در شکل ۵ برای ۱۲ ایستگاه مطلوب، منحنی فیت شده به مدل، همراه دامنه طیفی جایجائی بدست آمده از طیف شتاب آورده شده است.

ممان لرزه ای ( $M_0 = 1.16 * 10^{25} \text{ dyn - cm}$ ) از میانگین لگاریتمی ۱۲ ایستگاه مربوطه با توجه به رابطه ۹، Archuleta (۱۹۸۲)، حاصل شد.

$$M_0 = \text{anti log} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log(M_{0i}) \right\} \quad (9)$$

که  $N = (\text{number of record}) * 2$  می باشد. و با استفاده از رابطه کاناموری (۱۹۷۹)

$$M_w = \frac{2}{3} \log(M_0) - 10/7 \quad (10)$$

بزرگی ممان  $M_w = 6.1$  حاصل شد و با توجه به مدل چشمه براون (۱۹۷۰) و رابطه مدل شعاع گسل دایروی

با  $f_c$ ، از رابطه  $r = \frac{0.37\beta}{f_c}$ ، شعاع گسل مسبب زلزله قشم  $r = 5.6 \text{ km}$  تعیین گردید. افت استرس با

استفاده از رابطه براون (۱۹۷۰)،  $\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3}$ ، برای زلزله قشم،  $\Delta\sigma = 40 \text{ bar}$  بدست آمد و میانگین لغزش

$$\Delta U = \frac{M_0}{\pi^2 \mu} \quad \text{، روی گسل در حین زلزله قشم از رابطه براون (۱۹۷۰)}$$

حاصل شد ( $\mu = \rho\beta^2$   $\mu = 3.5 * 10^{11} \text{ dyn / cm}^2$ )  $\Delta u = 39 \text{ cm}$

با فرض گسل دایروی مدل براون (۱۹۷۰)، طول زمانی چشمه  $T_d = 3.8 \text{ sec}$  از رابطه  $T_d = \frac{2r}{v_r}$  که

$v_r = 0.85\beta$  (سرعت شکستگی) بدست آمد که با نتیجه بدست آمده از رابطه  $T_d = \frac{1}{f_c}$  ( $T_d = 3.9 \text{ sec}$ ) سازگار است. (Hanks, McGire 1981)

## نتایج

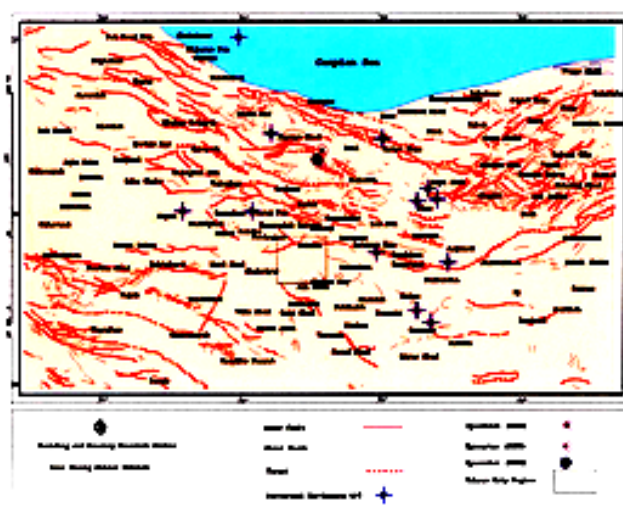
با توجه به اهمیت برآورد پارامترهای چشمه و محیط در مباحث مهندسی زلزله، در این مطالعه با استفاده از روش بهینه سازی غیر خطی بین دامنه طیفی آشفتگی چشمه و رابطه براون (۱۹۷۰) پارامترهای چشمه زلزله قشم بدست آمد که سازگاری خوبی با نتایج بدست آمده از مطالعات قبلی دارد و روش قابل قبولی برای برآورد پارامترهای چشمه می باشد.

مقدار میانگین لگاریتمی بزرگی ممان بدست آمده از ۱۲ ایستگاه ( $M_w = 6.1$ )، سازگاری خوبی با مقادیر گزارش شده از مراکز USGS ( $M_w = 6.2$ ) و Harvard ( $M_w = 6.3$ ) دارد.

با توجه به مقدار میانگین ضریب جذب بدست آمده برای ۱۲ ایستگاه ( $Q = 185$ )، منطقه البرز مرکزی در زمره مناطق فعال لرزه خیز جهان قرار دارد و پارامتر افت طیفی،  $K$ ، با توجه به اینکه برای تک زلزله می باشد بیشتر منعکس کننده اثرات جنس سایت ثبت کننده می باشد که برای ۱۲ ایستگاه مذکور مقدار  $K$  بدست آمده در رنج  $\kappa = 0.06\text{sec}$  تا  $\kappa = 0.11\text{sec}$  می باشد.

## مراجع

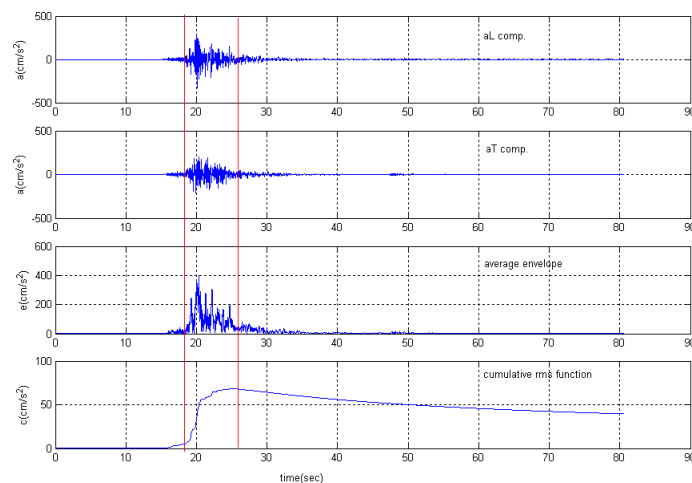
1. Olafsson, S. and Sigbjornsson, R. and Einarsson, P. (1998). Estimation of source parameters and  $Q$  from Acceleration recorded in the Vanafjoll Earthquake in south Iceland, Bull. seism. soc. Am. 88, No. 2, pp. 556-563.
2. Brune, J. N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake. J. Geophys. Res. 75, 4997-5009.
3. Brune, J. N. (1971). correction. J. Geophys. Res. 76, 5002.
4. Hanks, T. C. and M. Wyss. The use of body wave spectra in the determination of seismic source parameters. Bull. seism. Soc. Am. 62. 561-589.
5. Gokia Gokia, Romacho. M. D, Jimenez. A. (2003). Determination of near surface attenuation, with  $K$  parameter to obtain the seismic Moment, stress drop, source dimension, and seismic energy for micro earthquakes in the Granada Basin. J. physics of the Earth and planetary interiors. 141. 9-26.
6. Dutta. U, Biswas. N. N, Adams D. A, Papageorgiou. A. (2004). Analysis of  $s$ -wave attenuation in south-central Alaska, Bull. seism. soc. Am. 94. 1. 16-28.
7. Zare. M. Hamzelo. H. (2003). A study of the strong Ground Motions of 26 December 2003 Bam Earthquake: Mw 6.5. (SPECIAL ISSUE ON Bam Earthquake) J. ISEE. 33.
8. Louvan. E and Kiratzi. (2001). source parameters of the 7 September 1999 Athens (Greece) earthquake based on teleseismic data. J. Balkan Geophysical society. V. 4. N. 3. 51-60.



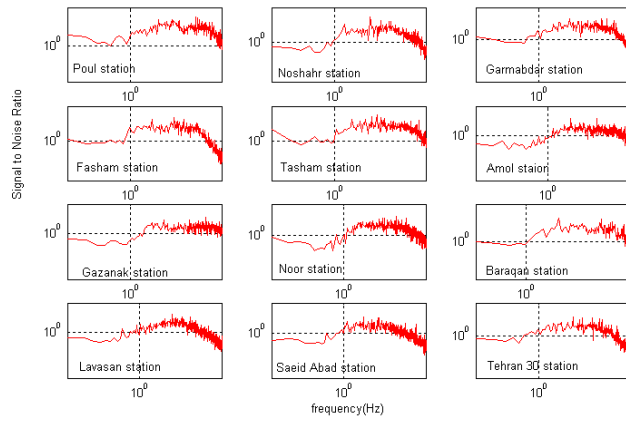
شکل-۱ توزیع ایستگاههای گیرنده زلزله کجور-فیروزآباد (۲۰۰۴)

جدول (۱). مقادیر فاکتور کیفیت، پارامتر افت طیفی  $\kappa$  و پارامترهای چشمه بدست آمده برای ۱۲ ایستگاه زلزله کجور-فیروزآباد

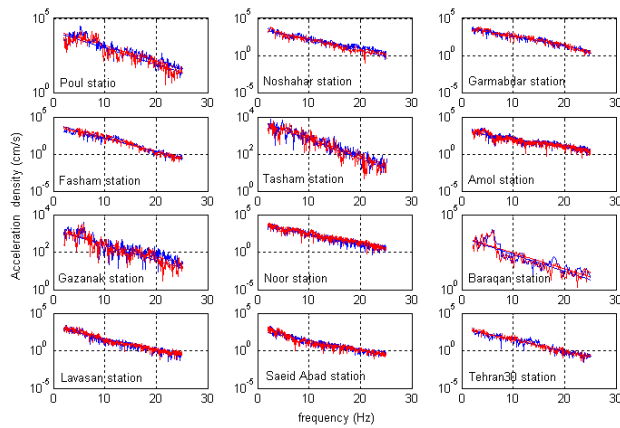
ایستگاه	R(km)	$Mo(dyn-cm) * 10^{25}$	$M_w$	$f_c (Hz)$	r(km)	$\Delta\sigma(bar)$	$\Delta u(cm)$	Q	$\kappa(sec)$
Poul	۱۷	۰/۵۶	۵/۸	۰/۳	۳/۹	۴۲	۳۴	۶۸	۰/۰۸
Noshahr	۳۹	۱/۱۲	۶	۰/۲	۶/۸	۱۵	۲۲	۱۱۳	۰/۱
Garmabdar	۲۵	۰/۷۹	۵/۹	۰/۳	۴/۳	۴۴	۳۹	۱۰۶	۰/۱
Fasham	۴۱	۰/۷۹	۵/۹	۰/۳	۴/۳	۴۴	۳۹	۹۱	۰/۱
Talegan	۷۳	۲/۳۲	۶/۲	۰/۲	۵/۴	۶۱	۶۹	۲۸۹	۰/۰۷
Amol	۷۱	۱/۵۸	۶/۱	۰/۲	۷/۴	۱۷	۲۶	۲۵۸	۰/۰۸
Gazanak	۷۴	۱/۱۲	۶	۰/۳	۴/۳	۶۲	۵۵	۲۸۳	۰/۰۶
Noor	۵۱	۱/۱۲	۶	۰/۳	۴/۵	۵۳	۴۹	۱۵۵	۰/۰۹
Baraqan	۶۹	۱/۱۲	۶	۰/۴	۳/۷	۹۷	۷۴	۲۴۷	۰/۰۸
Lavasan	۵۸	۱/۱۲	۶	۰/۲	۶/۷	۱۵	۲۲	۱۴۹	۰/۱۱
Saeid Abad	۷۹	۱/۵۸	۶/۱	۰/۱	۱۰/۱	۶	۱۳	۲۳۰	۰/۰۹
Tehran30	۵۴	۰/۷۹	۵/۹	۰/۲	۵/۸	۱۷	۲۱	۱۳۷	۰/۱۱



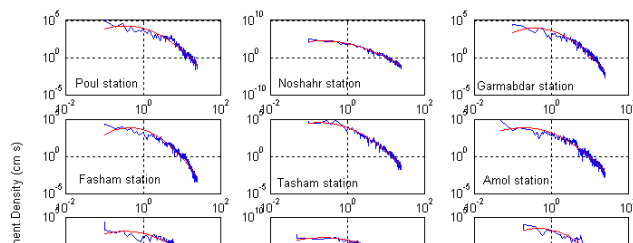
شکل-۲. تعیین پنجره موج برشی به روش (kinoshita 1994)



شکل ۳- برآورد نسبت سیگنال به نویز برای مولفه افقی رکوردهای زلزله کجور-فیروزآباد (۲۰۰۴).



شکل ۴- برآورد فاکتور کیفیت و  $\kappa$  برای مولفه های افقی ۶ ایستگاه زلزله کجور-فیروزآباد (۲۰۰۴).





شکل ۵. فیت مدل آشفتگی چشمه به طیف جابجایی داده ها

#### نویسندگان:

- حبيب رحيمي ۱و۳ ، نصرالله كمالیان ۱، حسين حمزه لو۲  
۱- موسسه ژئوفيزيك دانشگاه تهران.  
۲- پژوهشگاه بين المللي زلزله شناسي و مهندسي زلزله  
۳-مديريت زمين شناسي دريايي سازمان زمين شناسي