برآورد فاکتور کیفیت امواج برشی به روش وارون سازی تعمیم یافته (GIT) در زاگرس شمالی

فاطمه عبدی[۱]، متئو پیکوتزی[۲]، الهام شعبانی[۳]، ظاهرحسین شمالی[۴]
[۱] دانشجوی دکترای زلزله شناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، f.abdi@ut.ac.ir
[۲]دانشیار، دانشگاه فدریکو سکندو ناپل، matteo.picozzi@unina.it
[3]دانشیار گروه زلزله شناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، **eshabani@ut.ac.ir**
[۴]دانشیار گروه زلزله شناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، shomali@ut.ac.ir

چکیده

در مطالعه حاضر برای اولین بار با به‌کارگیری داده‌های شتاب نگاری از روش وارون سازی تعمیم یافته (GIT) برای بررسی ویژگی تضعیف امواج برشی و تخمین فاکتور $\boldsymbol{Q_s}$ در پهنه ی زاگرس شمالی استفاده شده است. به این منظور از ۱۵۰۷ شکل موج ثبت شده توسط ۲۲۹ ایستگاه شبکه شتاب نگاری کشور (ISMN) مربوط به ۸۱۸ زمینلرزه در بازه بزرگی Mw 3–7.3 که در فاصله سالهای ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹ در منطقه رخ داده اند استفاده شده است. فاکتور کیفیت موج برشی $Q_s(f) = 122f^{0.89}$ با برازش تابع تضعیف غیرپارامتری برای مدل گسترش هندسی افت یک تکه در بازه فرکانسی ۲.۵ تا ۱۸ هرتز تخمین زده شده است. این نتیجه با مطالعات پیشین در منطقه و دیگر مناطق فعال تکتونیکی قابل مقایسه است.

واژه‌های کلیدی: موج برشی، تضعیف، روش وارون سازی تعمیم یافته، زاگرس شمالی، فاکتور $\boldsymbol{Q_s}$

Estimation of shear wave quality factor applying Generalized Inversion Technique (GIT) in north Zagros

F.Abdi [1]; M.Picozzi[2]; E.Shabani[3]; Z.H.Shomali[4]

[1]*Phd Student of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran,* f.abdi@ut.ac.ir
[2]*Associate Professor, University of Naples Federico II, Italy, matteo.picozzi@unina.it*
3*Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran,* eshabani@ut.ac.ir
[4]*Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, shomali@ut.ac.ir*

Abstract

In this study the generalized inversion technique (GIT) applied on strong motion data for the first time to investigate the attenuation characteristic of shear waves in the north Zagros region. For this purpose, 1507 waveforms recorded at hypocentral distances between 10 and 150 km from 229 strong-motion stations in the Iran Strong Motion Network (ISMN) and a total of 818 local events recorded with moment magnitudes in the range of Mw 3–7.3 occurred between 2006 and 2019 have been analyzed. The quality factor of S waves is estimated by correcting the non-parametric attenuation function for single decay geometrical spreading. The corresponding frequency-dependent quality factor in the frequency range of 2.5-18 Hz is $Q_s(f) = 122f^{0.89}$ which is in agreement with the quality factor in tectonically active regions. The results of this study are comparable to previous studies in the region.

Keywords: shear wave, attenuation, generalized inversion technique (GIT), north Zagros, Q_s factor

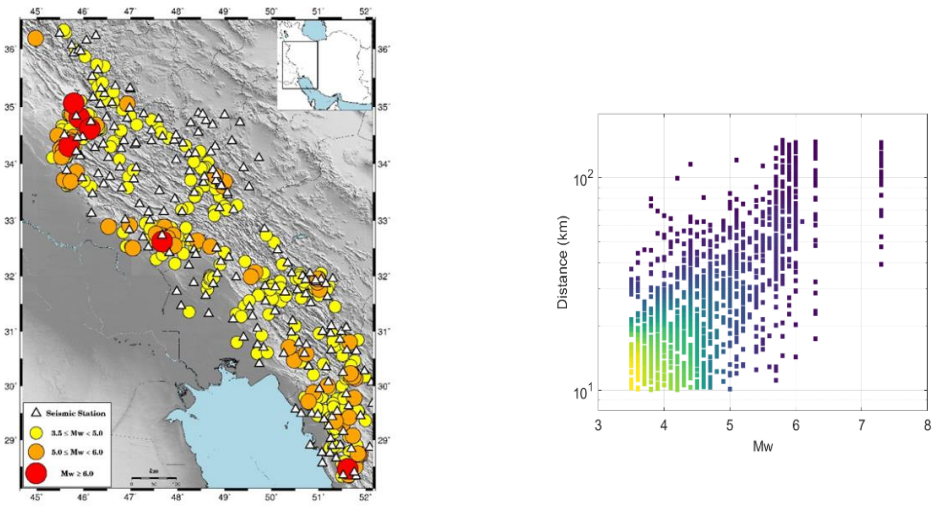
۱ مقدمه

روش وارون سازی تعمیم یافته یک روش متداول برای جداسازی اثرات سه گانه چشمه لرزه ای، مسیر انتشار و ساختگاه محلی به شمار می‌آید. طیف دامنه فوریه موج S به صورت ترکیب خطی طیف چشمه S، تضعیف A، و پاسخ ساختگاه

Z در حوزه لگاریتمی در نظر گرفته می‌شـــود. میزان مشـــارکت هریک از عوامل S، A و Z در طیف فوریه موج S را می‌توان با رهیافت‌های محاسبات پارامتریک بدست آورد (به عنوان مثال زولو و همکاران، ۲۰۱۴). در این رهیافت‌ها هر کدام از توابع ناشـــناخته مربوط به چشـــمه و شـــرایط انتشـــار از طریق مدل‌های اســـتاندارد بیان می‌شـــوند. در مقابل رهیافت‌های وارون ســـازی غیرپارامتریک، اســـتراتژی‌هایی مبتنی بر داده می‌باشـــند که به وســـیله‌ی آنها می‌توان توابع تجربی برای S، A و Z را اســـتخراج نمود (به عنوان مثال کاســـترو و همکاران، ۱۹۹۰). در این مطالعه از روش پردازش پیشـنهاد شـده توسـط اث و همکاران (۲۰۱۱) اسـتفاده شـده اسـت که روش پردازشـی غیر پارامتری و یک مرحله ای بر پایه تکنیک وارون سازی تعمیم یافته می‌باشد. یکی از مزیت‌های اصلی این روش این است که به پیش فرض‌های اولیه برای فرم تابعی اپراتور تضعیف نیازی ندارد که منجر به اجتناب از پیش فرض‌ها روی Q و گسترش هندسی می‌شود، و در نهایت می‌توان روندهای تضـعیف مرتبط با فاصـله (به عنوان مثال اثر امواج ورودی جانبی) را به این ترتیب به‌دسـت آورد.

۲ روش تحقیق

در این مطالعه حدود ۸۰۰ زمینلرزه با بزرگای بین ۳ تا ۷.۳ که در فاصـــله ســـالهای ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹ در بخش شـــمالی زاگرس رخ داده اند و توسط ایستگاه‌های شبکه شتاب نگاری (ISMN) در فاصله‌ی حدود ۱۵۰ کیلومتری از رومرکز ثبت شـده اند به منظور برآورد فاکتور کیفیت موج S مورد بررسـی قرار گرفته اند. بیشـتر شـتاب سـنج‌ها را دسـتگاه‌های SSA-2 تشکیل می‌دهند. که دارای پاسخ فرکانسی صفر تا ۵۰ هرتز بوده و امکان کاربردهای مختلف را فراهم می‌کند. شـکل (۱ الف) موقعیت ایسـتگاه‌ها و زلزله‌های مورد اسـتفاده در این تحقیق را نشـان می‌دهد. مجموعه داده شـامل شـش رویداد با بزرگای $M_w \geq 6$، از جمله زمینلرزه مخرب ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ ســـرپل ذهاب (M_w 7.3) اســـت. شـــکل (۱ ب) توزیع فواصـــل کانونی بر اســـاس بزرگای زمینلرزه ها را نشـــان می‌دهد. در بانک داده‌های شـــتاب نگاری مقیاس بزرگی رویدادها همگن نیسـت؛ بنابراین تبدیل مقیاس بزرگی با اسـتفاده از روابط تجربی معرفی شـده تبدیل m_b، M_L و M_N به M_W ارائه شده توسط موسوی بفرویی و همکاران (۲۰۱۴) انجام شده است.

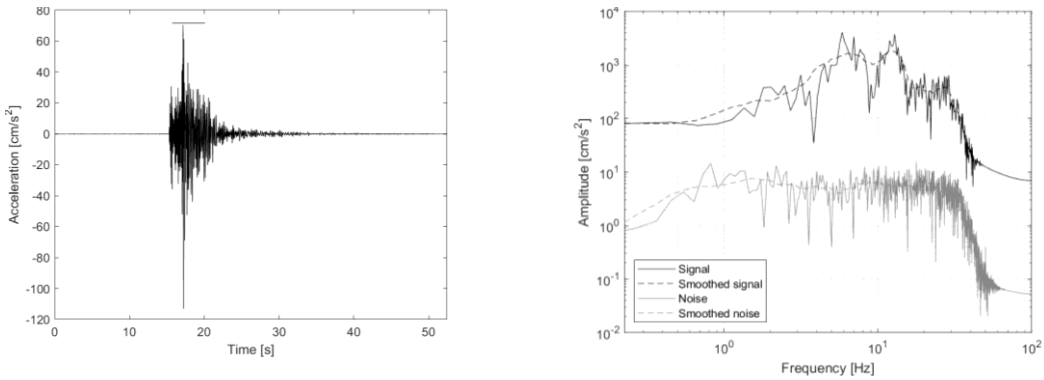


(الف) (ب)

شکل ۱. (الف): منطقه‌ی مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌ها و زمینلرزه های مورد استفاده در این مطالعه؛ دایره‌ها رومرکز رویدادها و مثلث‌ها ایستگاه‌های شتابنگاری را نشان می‌دهند (ب) توزیع فواصل کانونی بر اساس بزرگای زمینلرزه ها.

بعد از پردازش‌های اولیه شامل حذف خط مبنا و میانگین، پنجره زمانی موج برشی براساس پوش انرژی (energy envelope) جدا شد. بدین صورت که پنجره زمانی موج S از ۰.۰۳ درصد انرژی کل شروع و تا درصدهای مختلفی از انرژی کل به صورت تابعی از فاصله چشمه تا ساختگاه (R) در نظر گرفته شد (پیکوتزی و همکاران،۲۰۱۸). برای منظور پنجره‌های مختلف فاز **S** بصورت مقابل بکار رفته است: (i) تا۹۰ درصد انرژی کل وقتی $R < 25$ km؛ (ii) تا۸۰ درصد برای $25 \text{ km} < R < 50$ km و (iii) تا ۷۰ درصد برای $R > 50$ km. برای جلوگیری از پدیده نشت طیفی ناشی از پنجره گیری در دو لبه ابتدا و انتهای رکورد، یک تیپر کسینوسی پنج درصد اعمال می‌شود. سپس، در ابتدا با استفاده از تبدیل فوریه دامنه طیف فوریه برای تمامی رکوردها محاسبه شده و پس از آن برای هموار کردن طیف‌های به دست آمده تابع لگاریتمی ارائه شده توسط کنو و اوماچی (۱۹۹۸) به کار رفته که علاوه بر هموار نمودن طیف، شکل اصلی آن را نیز حفظ می‌کند. برای محاسبه نوفه در هر رکورد یک پنجره زمانی مساوی با طول سیگنال از بخش پیش از ورود موج P در نظر گرفته شد و طیف‌های دامنه نوفه نیز محاسبه گردیده است. در نهایت تنها رکوردهایی مورد استفاده قرار گرفته اند که نسبت سیگنال به نویز آنها حداقل ۸ و بیشتر باشد.

در مطالعه حاضر حل معکوس تنها برای مولفه های افقی نگاشت به صورت جمع برداری دو مولفه شمالی-جنوبی و شرقی-غربی در نظر گرفته شده است. در نهایت با در نظر گرفتن محدوده باند فرکانسی دستگاه‌های مورد استفاده، طیف‌های فوریه در ۶۵ نقطه فرکانسی با فواصل لگاریتمی یکسان در بازه فرکانسی ۰.۱ تا ۳۵ هرتز درون یابی شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل ۲ به عنوان نمونه رکورد یک زمینلرزه به همراه طیف دامنه پنجره S و نوفه آن ارائه شده است.



(الف) (ب)

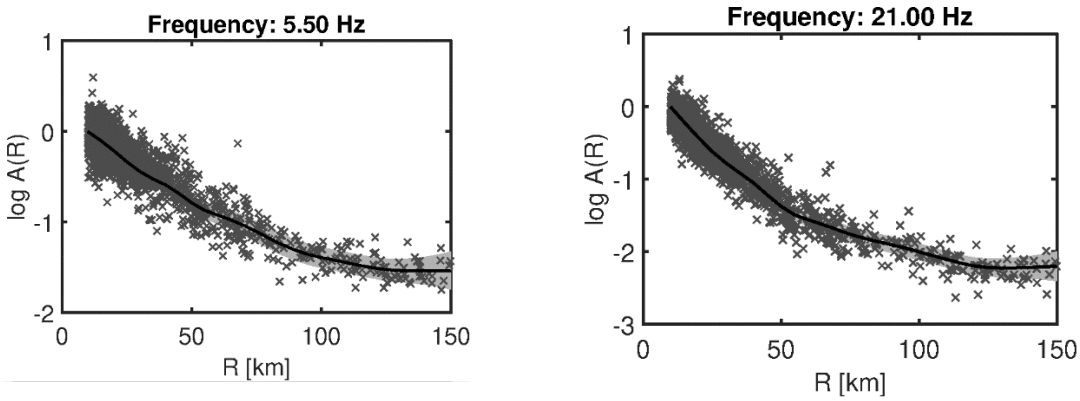
شکل ۲. الف): نگاشت شتاب تصحیح شده (مولفه شرقی-غربی) برای زمینلرزه ای با بزرگی ۴.۱. محدوده پنجره زمانی مورد استفاده با خط تیره نشان داده شده است. (ب): طیف فوریه شتاب محاسبه شده برای سیگنال و نوفه. همچنین طیف فوریه هموار شده نیز برای طیف‌های سیگنال و نویز مشخص شده است.

۳ نتایج

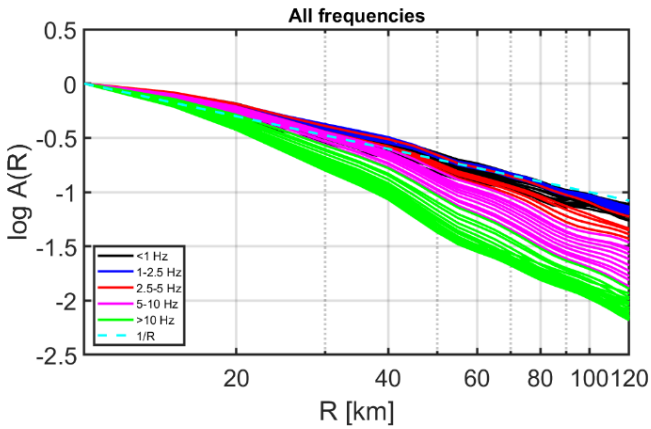
با بکارگیری روش وارون سازی یک مرحله ای بر روی دامنه‌های طیفی رویدادهای انتخاب شده، توابع تضعیف غیر پارامتری برای فرکانس‌های مختلف محاسبه گردیده است. توابع تضعیف حاصل به همراه دامنه‌های طیفی که اثرات چشمه و ساختگاه از آنها برداشته شده برای دو فرکانس نمونه در شکل (۳) نشان داده شده اند. منحنی‌ها به طور یکنواخت با فاصله کاهش می‌یابند و توابع تضعیف به خوبی افت دامنه‌های طیفی تصحیح شده را با فاصله توصیف می‌کنند. تعداد داده‌ها در فواصل بیشتر به طور محسوسی کمتر است، در صورتی که پراکندگی داده‌ها نسبت به فاصله و فرکانس تقریباً یکسان است. نواحی خاکستری رنگ محدوده یک انحراف استاندارد حول مقدار میانگین را نشان می‌دهد که با استفاده از روش بوت استرپ محاسبه شده است. کوچک بودن مقادیر بدست آمده برای انحراف استاندارد بیانگر پایداری توابع تضعیف حاصل می‌باشد.

توابع تضعیف برای تمام ۶۵ نقطه فرکانسی انتخاب شده در این مطالعه، بین ۰.۱ و ۳۵ هرتز در شکل (۴) نمایش داده

شده است. تابع 1/R نیز برای مقایسه به شکل اضافه شده است. با توجه به اینکه فاصله مرجع برابر ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است، مقدار لگاریتم تابع تضعیف در این فاصله برابر صفر است. به طور کلی، همه منحنی‌ها در تمام بازه‌های فرکانسی با افزایش فاصله افت پیدا می‌کنند. همچنین، بجز موارد اختلاف اندکی که در فرکانس‌های زیر ۲.۵ هرتز مشاهده می‌شود منحنی‌های مربوط به فرکانس‌های بالاتر سریع‌تر از فرکانس‌های پایین افت می‌کنند، در حالیکه فرکانس‌های پایین‌تر افت کمتری داشته و کمتر تضعیف می‌شوند. منحنی‌های فرکانس پایین تا فاصله حدوداً ۲۰ کیلومتری مشابه با تابع 1/R کاهش می‌یابند ولی در فواصل بیشتر همه منحنی‌ها در تمام فرکانس‌ها سریع‌تر از 1/R افت می‌کنند.



شکل ۳. توابع تضعیف غیر پارامتری برای ۲ فرکانس منتخب. بخش‌های خاکستری رنگ محدوده یک انحراف استاندارد حول مقدار میانگین را نشان می‌دهد که با استفاده از روش بوت استرپ محاسبه شده است. دامنه‌های طیفی مشاهده شده که اثر چشمه و ساختگاه برای آنها حذف شده با ضربدر نشان داده شده اند.



شکل ۴. تابع تضعیف غیرپارامتری برحسب فاصله کانونی برای همه فرکانس‌ها در محدوده ۰.۱ تا ۳۵ هرتز. منحنی خط چین تابع 1/R را نشان می‌دهد که برای مقایسه در شکل آورده شده است. مقدار تضعیف در فاصله مرجع ۱۰ کیلومتری معادل صفر است.

تابع تضعیف غیرپارامتری بدست آمده تمام اثرات تضعیف مسیر از جمله فاکتور کیفیت و گسترش هندسی را در بردارد. با توجه به این تابع تضعیف و با برازش رابطه زیر می‌توان فاکتور کیفیت را تخمین زد:

$$A(f,R) = G(R)\exp[-\frac{\pi f(R-R_0}{Q(f)\,v_s}] \qquad (۱)$$

که در آن G(R) تابع گسترش هندسی، R فاصله کانونی بر حسب کیلومتر، R_0 فاصله مرجع برای برازش و V_s سرعت

موج برشی است. با توجه به وجود پیچیدگی‌های ساختاری و تبادل (trade-off) در حل معادله (۲) برای تعیین گسترش هندسی ($\frac{R_0}{R^n}$) و فاکتور کیفیت موج برشی به صورت توامان، برازش تابع غیرپارامتری تضعیف به صورت یک منحنی افت یک تکه در بازه فرکانسی ۲.۵ تا ۱۸ هرتز در نظر گرفته می شود. در نهایت فاکتور کیفیت وابسته به فرکانس از شیب برازش حداقل مربعات $log\ A(f,R)\ log\ G(R)$ نسبت به فاصله بدست می آید. سپس با در نظر گرفتن یک رابطه توانی برای فاکتور کیفیت وابسته به فرکانس به صورت $Q(f)=Q_0 f^N$ برازش آن به مقادیر فاکتور کیفیت به دست آمده، مقادیر Q_0 و N تخمین زده شده و رابطه نهایی برای فاکتور کیفیت بصورت زیر بدست می آید:

$$Q_s(f) = 122 f^{0.89} \qquad (۲)$$

با توجه به اینکه تابع تضعیف غیر پارامتری بدست آمده همه اثرات تضعیف امواج لرزه ای را در بر دارد، فاکتور کیفیت حاصل نیز همه اثرات تضعیف غیر الاستیک و پراکنش را شامل می‌گردد. مقدار N=0.89 وابستگی فرکانسی تقریباً زیادی را در محدوده مورد مطالعه در زاگرس نشان می‌دهد و مقدار بدست آمده برای Q_0 در بازه مورد انتظار برای مناطق تکتونیکی فعال قرار می‌گیرد (کومار و همکاران، ۲۰۰۵).

در مطالعه حاضر برای اولین بار با بکارگیری داده‌های شتاب نگاری از روش وارون سازی تعمیم یافته برای تخمین ضریب کیفیت موج برشی در پهنه‌ی زاگرس شمالی استفاده شده است. نتایج این مطالعه با دیگر مطالعاتی که در منطقه زاگرس در سالهای اخیر منتشر شده است (امیری فرد و همکاران، ۲۰۱۹؛ صادقی باقرآبادی و همکاران، ۲۰۲۰ و طالبی و همکاران، ۲۰۲۱) قابل مقایسه می‌باشد. به عنوان مثال، امیری فرد و همکاران (۲۰۱۹) ضریب کیفیت موج برشی را در زاگرس شمالی دربازه فرکانسی ۱.۵ تا ۱۸ هرتز $Q_s(f)=137f^{0.88}$ تخمین زده اند که تطابق زیادی با نتایج مطالعه‌ی حاضر دارد.

منابع

Amiri Fard, R., Javan Doloei, G., Rahimi, H., & Farrokhi, M. (2019). Attenuation of P and S waves in Western part of Iran. *Geophysical Journal International*, *218*(2), 1143–1156.

Castro, R. R., Anderson, J. G., & Singh, S. K. (1990). Site response, attenuation and source spectra of S waves along the Guerrero, Mexico, subduction zone. *Bulletin - Seismological Society of America*, *80*(6 A), 1481–1503.

Konno, K., & Ohmachi, T. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *88*(1), 228–241.

Kumar, N., Parvez, I. A., & Virk, H. S. (2005). Estimation of coda wave attenuation for NW Himalayan region using local earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *151*(3–4), 243–258.

Oth, A., Bindi, D., Parolai, S., & di Giacomo, D. (2011). Spectral analysis of K-NET and KiK-net data in Japan, Part II: On attenuation characteristics, source spectra, and site response of borehole and surface stations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *101*(2), 667–687.

Mousavi-Bafrouei, S.H., Mirzaei, N. & Shabani, E. (2014). A declustered earthquake catalog for the Iranian Plateau, Ann. Geophys., 57(6), S0653.

Picozzi, M., Bindi, D., Spallarossa, D., Di Giacomo, D. & Zollo. (2018) A rapid response magnitude scale for timely assessment of the high frequency seismic radiation. *Scientific Reports* 8, Article number: 8562.

Sadeghi-Bagherabadi, A., Sobouti, F., Pachhai, S., & Aoudia, A. (2020). Estimation of geometrical spreading, quality factor and kappa in the zagros region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *133*, 106110.

Talebi, A., Rahimi, H., Moradi, A., Mirzaei, M., & Koulakov, I. (2021). Qp, Qs, Qc, Qi, and Qsc Attenuation Parameters in the Zagros Region, Iran. *Pure and Applied Geophysics*, *178*(11), 4487–4505.

Zollo, A., A. Orefice, & V. Convertito. (2014). Source parameter scaling and radiation efficiency of micro earthquakes along the Irpinia fault zone in southern Apennines, Italy, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 3256–3275.