

## برآورد ضریب کیفیت امواج برشی و گسترش هندسی در زاگرس شمالی به روش وارون سازی تعمیم یافته (GIT)

فاطمه عبدی<sup>۱</sup>، الهام شعبانی<sup>۲\*</sup>، ظاهر حسین شمالی<sup>۲</sup> و متئو پیکوتزی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری زلزله شناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار گروه زلزله شناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشگاه فدریکو سکندو ناپل، ناپل، ایتالیا

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۲)

### چکیده

در مطالعه حاضر با به کارگیری داده های شتاب نگاری از روش وارون سازی تعمیم یافته (GIT) برای بررسی ویژگی تضعیف دامنه موج برشی در ناحیه زاگرس شمالی استفاده شده است. روش وارون سازی تعمیم یافته یکی از روش های متداول برای جداسازی اثر چشمه لرزه ای از اثر مسیر انتشار موج و اثر ساختمان محلی به شمار می آید. به این منظور از تعداد ۲۶۹۹ شکل موج ثبت شده توسط ۲۲۸ ایستگاه شبکه شتاب نگاری کشور (ISMN) مربوط به ۱۵۶۳ زمین لرزه در بازه بزرگای ۳ الی ۷/۳ Mw که در فاصله سال های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹ در منطقه رخ داده اند، استفاده شده است. توابع تضعیف غیر پارامتری به همراه دامنه های طیفی که اثرات چشمه و ساختمان از آنها برداشته شده در ۶۵ نقطه فرکانسی با فواصل لگاریتمی یکسان در بازه فرکانسی ۰.۱ تا ۳۰ هرتز بدست آمده است. با توجه به اهمیت شناخت ضریب کیفیت لرزه ای برای برآورد واقع بینانه خطر زمین لرزه، شبیه سازی جنبش نیرومند زمین و تعیین مدل های جنبش زمین (GMMS)، ضریب  $Q_s$  برای پهنه ی زاگرس شمالی محاسبه شده است. ضریب کیفیت موج برشی  $Q_s(f) = 165f^{0.64}$  با برازش تابع تضعیف غیر پارامتری برای مدل گسترش هندسی وابسته به فرکانس در بازه فرکانسی ۰.۵ تا ۲۵ هرتز تخمین زده شده است. نتایج حاصل بیانگر تضعیف شدید امواج لرزه ای در زاگرس شمالی است که با مطالعات پیشین در منطقه و سایر مناطق فعال تکنونیک ایران و جهان قابل مقایسه است.

کلمه های کلیدی: ضریب کیفیت، موج برشی، تضعیف، روش وارون سازی تعمیم یافته، زاگرس شمالی

## ۱ مقدمه

فلات ایران، به عنوان بخشی از کمربند لرزه‌ای آلپ-همیالیا، با فعالیت لرزه‌ای زیاد شناخته شده است و زمین‌لرزه‌های شدید در منطقه به وقوع پیوسته است. بررسی رخدادهای لرزه‌ای قرن بیستم نشان می‌دهد بیش از ۱۲۰ زمین‌لرزه بزرگ ( $M_w > 6$ ) در فلات ایران رخ داده است که اغلب تلفات و خسارات شدیدی را به همراه داشته‌اند (شاهوار و همکاران، ۲۰۲۱). فلات ایران به مناطق لرزه‌ساخت زمین‌ساختی مختلفی طبقه‌بندی شده است که هر کدام ویژگی‌های زمین‌شناسی، لرزه‌ای و زمین‌ساختی خاص خود را دارند. در اغلب این تقسیم‌بندی‌ها، ناحیه زاگرس به عنوان یکی از ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی شاخص فلات ایران معرفی شده است که می‌توان به مطالعات بربریان (۱۹۷۶) و (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۸) اشاره نمود. کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس به عنوان بخشی از کمربند کوهزایی آلپ-همیالیا، یکی از جوان‌ترین و فعال‌ترین مناطق قاره‌ای زمین است که حدود ۲۰۰۰ کیلومتر از شرق ترکیه در شمال‌غرب تا ناحیه

فرورانش مکران در جنوب شرقی ایران امتداد دارد (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۸). از نظر ساختار زمین‌شناسی، شکل‌گیری رشته‌کوه‌های زاگرس مربوط به همگرایی مداوم صفحه عربستان در جنوب غرب و خردقاره ایران مرکزی در شمال شرق است که بر اثر حرکت به سوی شمال شرق صفحه عربستان-آفریقا نسبت به اوراسیا می‌باشد (آقنابتی، ۱۹۸۳).

ایالت لرزه زمین‌ساختی زاگرس را می‌توان در امتداد گسل کازرون-برازجان با روند شمال-جنوب به دو زیر ایالت زاگرس شمالی و زاگرس جنوبی تقسیم کرد (طاهرینا و همکاران، ۲۰۱۱). منطقه مورد مطالعه در این تحقیق زاگرس شمالی است (شکل ۱ بالا). بر طبق بانک داده‌های مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC)، در بخش شمالی زاگرس از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹ بیش از ۱۰۰ زمین‌لرزه با بزرگای بیشتر از ۵ ثبت شده است که بزرگ‌ترین آنها زمین‌لرزه ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ سرپل ذهاب با بزرگای گشتاوری ۷.۳ می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱. تعداد زمین‌لرزه در هر دسته بندی بزرگا.

محدوده بزرگا	تعداد زمین‌لرزه
$3.0 \leq M_w < 4.0$	744
$4.0 \leq M_w < 5.0$	496
$5.0 \leq M_w < 6.0$	98
$6.0 \leq M_w < 7.0$	5
$7.0 \leq M_w$	1

با توجه به اهمیت شناخت ضریب کیفیت لرزه‌ای برای برآورد واقع‌بینانه خطر زمین‌لرزه، شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین و تعیین مدل‌های جنبش زمین (GMMs)، در مطالعه حاضر از روش حل وارون تعمیم‌یافته برای تخمین فاکتور  $Q_s$  در پهنه‌ی زاگرس شمالی استفاده شده است. روش

وارون‌سازی تعمیم یافته یک روش متداول برای جداسازی اثرات سه‌گانه چشمه لرزه‌ای، مسیر انتشار و ساختگاه محلی به شمار می‌آید. در این مطالعه از روش پردازش پیشنهاد شده توسط اث و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شده است که روش پردازشی غیرپارامتری و یک مرحله‌ای بر پایه تکنیک

وارون سازی تعمیم یافته می باشد.

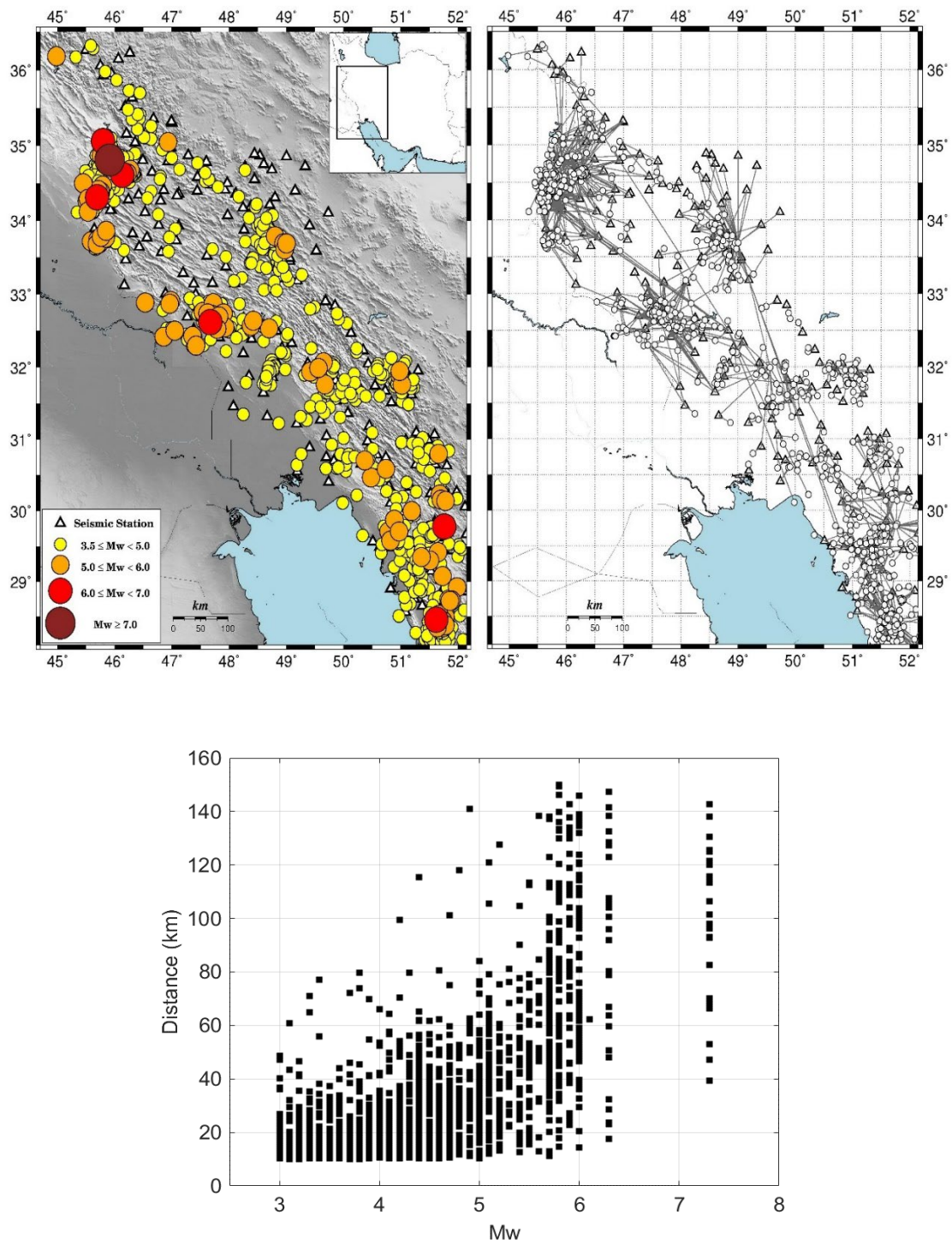
$R > 50$  km تعریف شده است. با اعمال یک تابع پوش کسینوسی پنج درصد به ابتدا و انتهای پنجره موج برشی داده ها به آرامی در مرزها صفر می شوند و از بروز پدیده نشت طیفی ناشی از پنجره گیری در دو لبه ابتدا و انتهای نگاشت جلوگیری می شود. در ادامه، پس از ارائه طیف دامنه تمامی نگاشت ها از روش کنو و اوماچی (۱۹۹۸) برای هموار نمودن طیف استفاده شده است. فیلتر باند پهن باترورث با فرکانس گوشه بالاگذر ۳۰ و فرکانس گوشه پایین گذر ۰.۰۱ به منظور حذف اثرات نوفه اعمال شده است. برای محاسبه نسبت سیگنال به نویز، در هر نگاشت یک پنجره زمانی مساوی با طول سیگنال از بخش پیش از ورود موج P در نظر گرفته شده است و طیف های دامنه نوفه نیز محاسبه گردیده است. نگاشت هایی که نسبت پیشینه قدرمطلق طیف سیگنال به متوسط قدرمطلق پنجره نویز آنها حداقل ۲۰ و بیشتر بودند در این مطالعه استفاده شده اند. برای محاسبه نوفه در هر نگاشت یک پنجره زمانی مساوی با طول سیگنال از بخش پیش از ورود موج P در نظر گرفته شد. طول پنجره ی موج برشی سیگنال ها در محدوده به بازه ی ۲۵-۵ ثانیه است و برای برخی رویدادها/ایستگاه ها نگاشت ثبت شده پیش از ورود موج P مساوی با طول سیگنال موجود نبود.

در مطالعه حاضر، حل وارون 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 دستگاه های مورد استفاده، طیف های فوریه در ۶۵ نقطه فرکانسی با فواصل لگاریتمی یکسان در بازه فرکانسی ۰.۱ تا ۳۰ هرتز درون یابی شده و مورد استفاده قرار می گیرند. در شکل ۲ به عنوان نمونه نگاشت یک زمین لرزه به همراه طیف دامنه پنجره S و نوفه آن ارائه شده است.

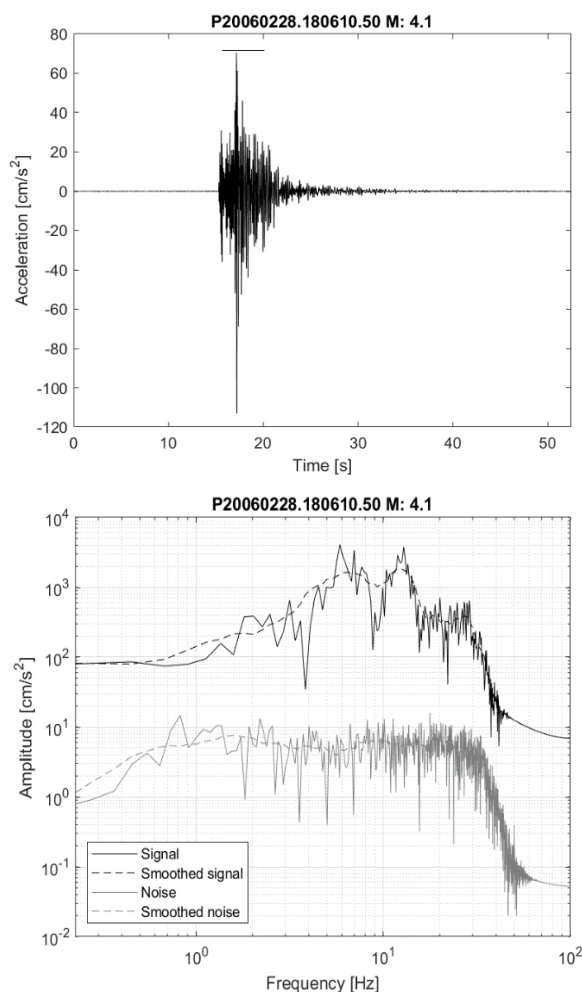
## ۲ بانک داده و پردازش اولیه

در این مطالعه از داده های ۱۵۶۳ زمین لرزه با بزرگای گشتاوری ( $M_w$ ) ۳ تا ۷.۳ که در سالهای ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹ در بخش شمالی زاگرس رخ داده اند، ثبت شده توسط ایستگاه های شبکه شتاب نگاری ایران (ISMN) در فاصله ی کانونی تا ۱۵۰ کیلومتری ثبت شده، استفاده شده است. ایستگاه های شبکه ISMN عمدتاً مجهز به شتاب نگارهای SSA-2 با پاسخ فرکانسی صفر تا ۵۰ هرتز و فرکانس نمونه برداری ۲۰۰ نمونه در ثانیه هستند (شاهوار و همکاران، ۲۰۲۱). شکل ۱-بلا چپ موقعیت ایستگاه ها و زلزله های مورد استفاده در این تحقیق، و بالا راست: مسیر پرتوها از چشمه به ایستگاه را به صورت خطوط خاکستری نشان می دهد. مجموعه داده ها شامل شش رویداد با بزرگای  $M_w \geq 6$ ، از جمله زمین لرزه ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ سرپل ذهاب ( $M_w$  7.3) می باشد. شکل ۱-پایین توزیع فواصل کانونی بر اساس بزرگای زمین لرزه ها و جدول ۱ تعداد زمین لرزه ها در هر دسته بندی بزرگا را نشان می دهد. به منظور یکدست کردن بزرگا، از روابط تجربی معرفی شده تبدیل  $M_L$ ،  $m_b$  و  $M_N$  به  $M_w$  ارائه شده توسط موسوی بفرویی و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شده است.

بعد از انجام پردازش های اولیه شامل تصحیح خط مبنا و میانگین، پنجره زمانی موج برشی براساس پوش انرژی (energy envelope) انتخاب شد؛ مشابه رهیافت پیکوتزی و همکاران (۲۰۱۸) پنجره زمانی موج S از ۰.۰۳ درصد انرژی کل شروع و تا درصدی از انرژی کل به صورت تابعی از فاصله چشمه تا ساختگاه (R) در نظر گرفته می شود، بطوریکه انتهای پنجره زمانی: (الف) تا ۹۰ درصد انرژی کل برای  $R < 25$  km؛ (ب) تا ۸۰ درصد انرژی کل برای  $25 \text{ km} < R < 50$  km و (ج) تا ۷۰ درصد انرژی کل برای



شکل ۱. بالا چپ: منطقه ی مورد مطالعه و موقعیت ایستگاهها و زمین لرزه های مورد استفاده در این مطالعه؛ دایره ها رومرکز رویداد ها و مثلث ها موقعیت ایستگاه های شتابنگاری را نشان می دهند. بالا راست: مسیر پرتوها از چشمه به ایستگاه به صورت خطوط خاکستری نشان داده شده اند. پایین: نمایش تمام فواصل کانونی بر حسب بزرگای گشتاوری زمین لرزه ها.



شکل ۲. بالا: نگاشت شتاب تصحیح شده (مولفه شرقی-غربی) برای زمین‌لرزه ای با بزرگای ۴.۱. محدوده پنجره زمانی S مورد استفاده با خط تیره نشان داده شده است. پایین: نمایش طیفهای نگاشت شتاب و نوفه به همراه طیف هموار شده.

### ۳ شیوهی پژوهش

روش وارون‌سازی تعمیم یافته یک روش متداول برای جداسازی اثرات سه‌گانه چشمه لرزه‌ای، مسیر انتشار و ساختگاه محلی به شمار می‌آید. طیف دامنه فوریه موج برشی به صورت ترکیب خطی طیف چشمه S، تضعیف A، و پاسخ ساختگاه Z در حوزه لگاریتمی در نظر گرفته می‌شود (بیکوتزی و همکاران، ۲۰۱۷).

$$\log U_{ij}(f, M_i, r_{ij}) = \log S_i(f, M_i) + \log A(f, r_{ij}) + \log Z_j(f) \quad (1)$$

که در آن نمادهای i و j نشان دهنده زلزله‌ی i ام و ایستگاه

z ام است؛ M بزرگای رویداد؛ f فرکانس و  $r_{ij}$  فاصله کانونی می‌باشد. برای تعداد N نگاشت ثبت شده از زمین‌لرزه‌های مختلف رابطه بالا یک سیستم خطی از N معادله به فرم کلی  $Am = d$  را تشکیل می‌دهد که در آن d بردار داده شامل دامنه‌های طیفی لگاریتمی، m بردار حاوی پارامترهای مدل و A ماتریس سیستم است.

مسئله وارون حاصل از معادلات فوق معمولاً بیش تخمین است یعنی تعداد معادلات بیشتر از تعداد مجهولات است. در این حالت با توجه به اینکه اغلب یک راه حل یکتا وجود ندارد که همه معادلات یا قیدها را به طور همزمان

رویکرد جایگزین برای حل مسائل وارون دو مرحله‌ای، که توسط اوث و همکاران در سال ۲۰۱۱ معرفی شده است، از معادله (۱) و عملیات وارون‌سازی یک مرحله‌ای بهره می‌برد. در این روش نیز همانند روش یک مرحله‌ای، عملگر تضعیف به صورت یک تابع هموار غیر پارامتری با فاصله در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن در فاصله مرجع برابر با یک است. همچنین، برای حل مشکل درجه آزادی نامعین نیز لازم است یک مقدار ثابت به عنوان پاسخ ساختگاه برای حداقل یک ایستگاه در نظر گرفته شود. درباره نحوه انتخاب ساختگاه‌های مرجع در بخش بعد توضیح داده می‌شود.

اوث و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعات خود با انجام ۱۰۰ حل معکوس وارون یک مرحله‌ای و اعمال مقادیر تصادفی برای شرایط ساختگاه در هر بار حل معکوس، متوجه شدند که تابع تضعیف حاصل از این روش کاملاً مستقل از شرایط اولیه ساختگاه یا طیف‌های چشمه می‌باشد. این مشاهده نشان می‌دهد که می‌توان نتایج پایدار در تحلیل تضعیف لرزه‌ای به دست آورد، حتی اگر ساختگاه مرجع مناسبی در دسترس نباشد. همچنین، مقایسه نتایج تضعیف حاصل از روش یک مرحله‌ای و روش دو مرحله‌ای برای داده‌های برداشت شده در سطح زمین نشان داد که توابع تضعیف به ویژه در فرکانس‌های بالا که اثرات تقویت امواج قوی‌تر ظاهر می‌شوند، به طور مشهودی تفاوت دارند. این تفاوت در نتایج تضعیف حاصل از روش یک مرحله‌ای و روش دو مرحله‌ای برای داده‌های برداشت شده از چاه گمانه مشهود نبوده است. با توجه به مزایای روش غیرپارامتری یک مرحله‌ای، از این روش در مطالعات اخیر GIT در زاگرس و البرز استفاده شده است (احمدزاده و همکاران، ۲۰۱۹؛ دواتگری و همکاران، ۲۰۲۱). در مطالعه حاضر نیز از روش وارون‌سازی تعمیم یافته یک مرحله‌ای بهره گرفته شده است.

برآورده کند، بهترین راه حل استفاده از روش حداقل‌سازی اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده می‌باشد. میزان مشارکت هر یک از عوامل  $S$ ،  $A$  و  $Z$  در طیف فوریه موج برشی را می‌توان با رهیافتهای محاسبات پارامتریک بدست آورد (به عنوان مثال، زولو و همکاران، ۲۰۱۴). در این رهیافتهای هر کدام از توابع ناشناخته مربوط به چشمه و شرایط انتشار از طریق مدل‌های استاندارد بیان می‌شوند. در مقابل رهیافتهای وارون‌سازی غیرپارامتریک، استراتژی‌هایی مبتنی بر داده می‌باشند که به وسیله آنها می‌توان توابع تجربی برای  $S$ ،  $A$  و  $Z$  را استخراج نمود (به عنوان مثال، کاسترو و همکاران، ۱۹۹۰).

کاسترو (۱۹۹۰) یک روش وارون‌سازی دو مرحله‌ای معرفی کرد که در آن هیچ پارامتر بندی مشخصی برای تابع تضعیف در نظر گرفته نمی‌شود و به طور ضمنی همه اثرات تضعیف (شامل گسترش هندسی، ناکشسانی، پراکنش و ...) را شامل می‌شود. بر اساس این فرض که اثرات تضعیف به کندی در زمین تغییر می‌کنند، تابع تضعیف به صورت یک تابع هموار از فاصله در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن در فاصله مرجع  $R_0$  برابر واحد است  $A(f, R_0) = 1$ . در مرحله اول دامنه‌های طیفی مشاهده شده با مدل زیر نشان داده می‌شود:

$$\begin{aligned} \log U_{ij}(f, M_i, R_{ij}) \\ = \log \bar{S}_i(f, M_i) \\ + \log A(f, R_{ij}) \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن  $\bar{S}_i(f, M_i)$  یک فاکتور مقیاس برای چشمه  $i$  و شامل میانگین (لگاریتمی) اثرات ساختگاهی ایستگاه‌هایی هستند که این رویداد را ثبت کرده‌اند و  $A(f, R_{ij})$  تابع تضعیف است که کاهش دامنه‌های طیفی با فاصله را توضیح می‌دهد. پس از حل معادله فوق (برای جزئیات بیشتر کاسترو، ۱۹۹۰ را ببینید)، در مرحله دوم حل وارون نیز اثرات چشمه و ساختگاه جدا می‌شوند که این کار مستلزم معرفی حداقل یک ایستگاه به عنوان ساختگاه مرجع است.

#### ۴ روش تحلیل: وارون سازی و تخمین فاکتور کیفیت

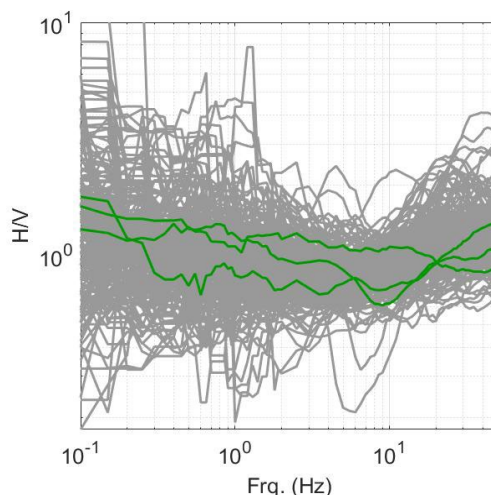
همانطور که در بخش ۴ بیان شد، در حل دستگاه معادلات (۱) به روش وارون سازی تعمیم یافته یک مرحله ای، مدل تضعیف غیر پارامتری به صورت توابع هموار از فاصله فرض می شود که مقدار آن در فاصله مرجع برای همه فرکانس ها برابر یک است. در این مطالعه فاصله مرجع برابر با ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است یعنی  $A(f, 10) = 1$ . علاوه بر این لازم است برای حل درجه آزادی نامعین، یک مقدار ثابت برای حداقل یک ساختگاه یا یک تابع چشمه فرض شود. بنابراین، یک یا چند ایستگاه که شرایط مناسبی از نظر ساختگاه دارند را به عنوان مرجع انتخاب می کنیم. در این حالت پاسخ این ایستگاه یا میانگین چند ایستگاه برابر واحد در نظر گرفته می شود.

برای انتخاب ایستگاه یا ایستگاه های مناسب معمولاً موقعیت زمین شناسی و اطلاعات ژئوتکنیکی ایستگاه ها مد نظر قرار گرفته و ایستگاه های مستقر در ساختگاه سنگی انتخاب می شوند. برای این منظور، از سرعت امواج برشی در ۳۰ متر بالایی ساختگاه ( $V_{S30}$ ) به عنوان یکی از مولفه های اثر گذار در انتخاب ایستگاه های مرجع استفاده شده است. مقادیر این پارامتر از بانک داده های شبکه شتاب نگاری کشور (ISMN) استخراج گردیده است. از آنجاییکه  $V_{S30}$  برای تمامی ایستگاه های شبکه شتاب نگاری محاسبه نشده است؛ برای بررسی دقیق تر وضعیت ساختگاه ایستگاه ها علاوه بر آن، نسبت مولفه افقی به قائم  $H/V$  در هر ایستگاه محاسبه شده است. در روش  $H/V$  فرض می شود که شرایط ساختگاه محلی به طور قابل توجهی بر مؤلفه عمودی حرکت زمین تأثیر نمی گذارد. بنابراین، نسبت مولفه افقی به قائم می تواند به عنوان شاخص برای

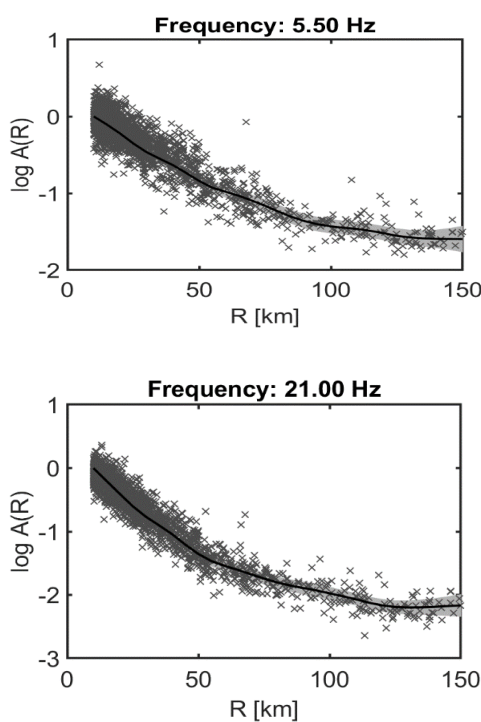
بررسی وضعیت ساختگاه استفاده شود (لرمو و چاوز گارسیا، ۱۹۹۳). برای تعیین ایستگاه های مرجع نسبت طیفی مولفه افقی به قائم برای همه ایستگاه ها محاسبه شد و همراه با اطلاعات  $V_{S30}$  موجود برای ایستگاه ها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت سه ایستگاه اهرم، برازجان و مورموری که  $V_{S30}$  برای آنها به ترتیب ۹۸۸، ۱۳۲۹ و ۸۹۸ متر بر ثانیه گزارش شده است و نسبت  $H/V$  آنها نسبتاً هموار و نزدیک به واحد می باشد به عنوان ایستگاه مرجع انتخاب شدند (شکل ۳).

توابع تضعیف حاصل به همراه دامنه های طیفی که اثرات چشمه و ساختگاه از آنها برداشته شده برای دو فرکانس نمونه در شکل ۴ نشان داده شده اند. دامنه های طیفی مشاهده شده که اثر چشمه و ساختگاه برای آنها حذف شده و با ضربدر نشان داده شده اند و تخمین غیر پارامتریک تضعیف با خط ممتد مشکی نشان داده شده است. منحنی ها به طور یکنواخت با فاصله کاهش می یابند و توابع تضعیف به خوبی افت دامنه های طیفی تصحیح شده با فاصله را توصیف می کنند.

تعداد داده ها در فواصل بیشتر به طور محسوسی کمتر است. نواحی خاکستری رنگ محدوده یک انحراف استاندارد حول مقدار میانگین را نشان می دهد که با استفاده از روش بوت استرپ محاسبه شده است. روش بوت استرپ که توسط افرون در سال ۱۹۷۹ توسعه یافت، یک تکنیک آماری است که توزیع آماری پارامتر مورد نظر را با نمونه گیری مجدد از مجموعه داده اصلی به منظور ارزیابی عدم قطعیت پارامتر مورد نظر تخمین می زند. با تولید چند نمونه بوت استرپ ویژگی هایی مانند خطاهای استاندارد و فواصل اطمینان را می توان تخمین زد.



شکل ۳. نسبت طیفی مولفه افقی به قائم  $H/V$  ایستگاه‌های مرجع با رنگ سبز و مابقی ایستگاه‌ها با رنگ خاکستری نشان داده شده است. نسبت‌های طیفی ایستگاه‌های مرجع تقریباً هموار و نزدیک به یک هستند.



شکل ۴. 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 و با ضربدر نشان داده شده‌اند و تخمین غیرپارامتریک تضعیف با خط ممتد مشکی نشان داده شده است.

نگاشت به صورت جمع برداری دو مولفه شمالی-جنوبی و شرقی-غربی در نظر گرفته شده است. در ادامه با در نظر گرفتن محدوده باند فرکانسی دستگاه‌های مورد استفاده،

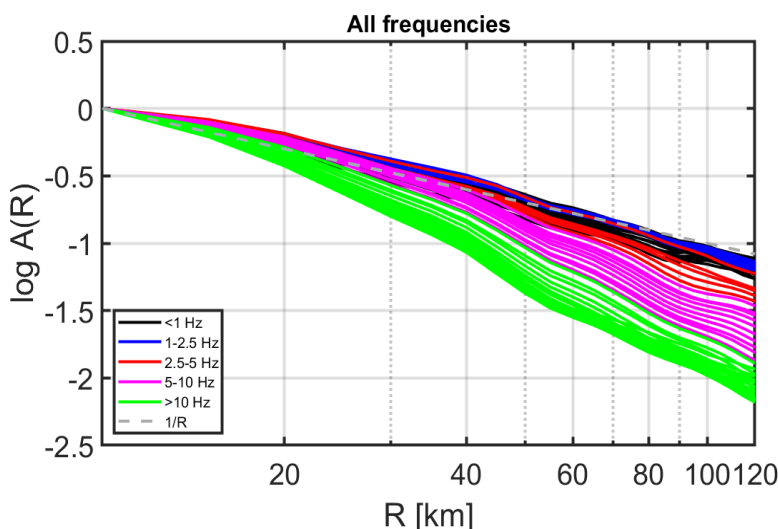
کوچک بودن مقادیر بدست آمده برای انحراف استاندارد بیانگر پایداری توابع تضعیف حاصل می‌باشد. در مطالعه حاضر، حل وارون تنها برای مولفه‌های افقی

نظر گرفته شده 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.

طیف‌های فوریه در ۶۵ نقطه فرکانسی در بازه‌های فرکانسی ۰.۱ تا ۱، ۱.۱ تا ۲، ۲.۵ تا ۱۰ و ۱۱ تا ۳۰ هرتز به ترتیب با گام‌های ۰.۰۵، ۰.۱، ۰.۵ و ۱ هرتز درون‌یابی شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## ۵ نتایج

توابع تضعیف برای تمام ۶۵ نقطه فرکانسی انتخاب شده در این مطالعه، بین ۰.۱ و ۳۰ هرتز در شکل ۵ نمایش داده شده است. تابع  $1/R$  نیز برای مقایسه به شکل اضافه شده است. مقدار لگاریتم تابع تضعیف در فاصله ۱۰ کیلومتر - که به عنوان فاصله مرجع در نظر گرفته شده است، برابر صفر در



شکل ۵. تابع تضعیف غیرپارامتری برحسب فاصله کانونی برای همه فرکانس‌ها در محدوده ۰.۱ تا ۳۰ هرتز. منحنی خط چین تابع  $1/R$  را نشان می‌دهد که برای مقایسه در شکل آورده شده است.

وجود پیچیدگی‌های ساختاری و تبادل (trade-off) در حل معادله (۲)، برای تعیین تابع گسترش هندسی  $G(R) = R^{-n}$  و فاکتور کیفیت موج برشی به صورت توامان، برآزش تابع غیرپارامتری تضعیف به صورت یک منحنی افت یک تکه در بازه فرکانسی ۰.۵ تا ۲۵ هرتز در نظر گرفته می‌شود. یکی از پارامترهای تاثیرگذار در تابع تضعیف (رابطه ۴)، تابع گسترش هندسی می‌باشد. گسترش هندسی به تضعیف و کاهش دامنه‌ی امواج لرزه‌ای متناسب با پیشروی جبهه موج از کانون زمین لرزه و گسترش انرژی در محدوده

توابع 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 برآزش رابطه زیر می‌توان فاکتور کیفیت را تخمین زد:

$$A(f, R) = G(R) \exp \left[ -\frac{\pi f (R - R_0)}{Q(f) v_s} \right] \quad (4)$$

که در آن  $G(R)$  تابع گسترش هندسی،  $R_0$  فاصله کانونی بر حسب کیلومتر، مرجع برای برآزش و  $v_s$  سرعت موج برشی است (احمدزاده و دیگران، ۲۰۱۷). با توجه به

ضریب کیفیت بصورت زیر بدست می‌آید:

$$Q_s(f) = 165 \pm 23f^{0.64 \pm 0.06} \quad (5)$$

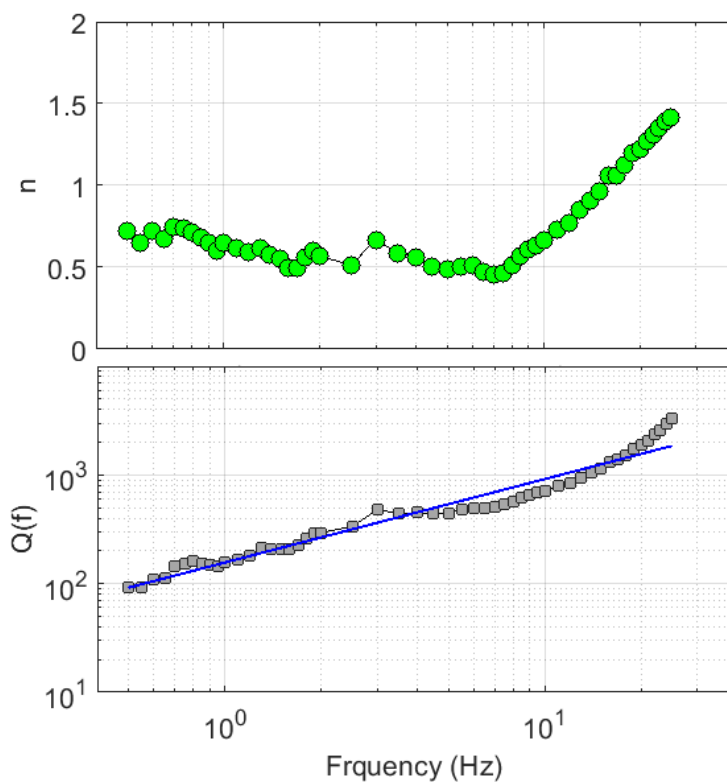
شکل ۶ پایین مقادیر  $Q_s$  نسبت به فرکانس را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه تابع تضعیف غیر پارامتری بدست آمده همه اثرات تضعیف امواج لرزه‌ای را دربردارد، فاکتور کیفیت حاصل نیز همه اثرات تضعیف غیر الاستیک و پراکنش را شامل می‌گردد. مقدار  $N=0.64$  وابستگی فرکانسی تقریباً زیادی را در محدوده مورد مطالعه در زاگرس نشان می‌دهد و با توجه به مطالعه کومار و همکاران (۲۰۰۵) مقدار بدست آمده برای  $Q_s$  در بازه مورد انتظار برای مناطق تکتونیکی فعال قرار می‌گیرد.

## ۶ بحث و نتیجه گیری

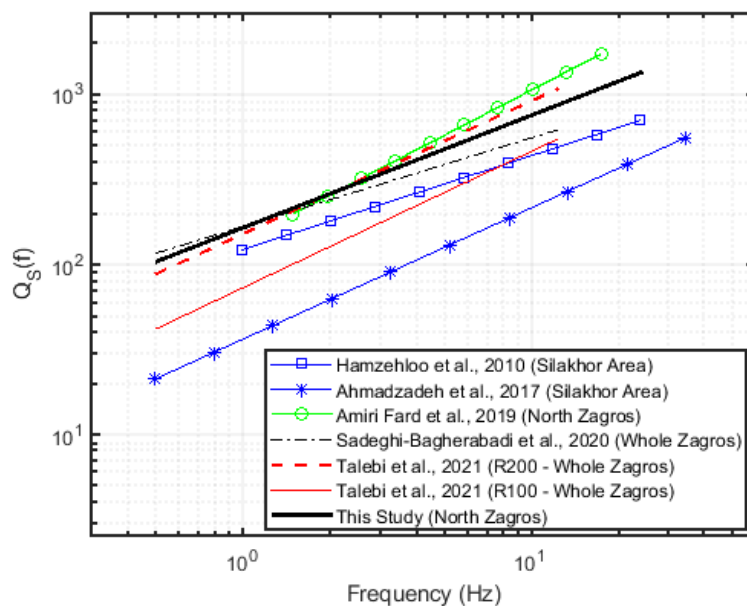
در این مطالعه، از داده‌های شتاب‌نگاری و از روش وارون‌سازی تعمیم‌یافته به منظور تخمین ضریب کیفیت موج برشی در منطقه‌ی زاگرس شمالی استفاده شده است. نتایج این مطالعه با مطالعات دیگری که در زاگرس انجام شده است، مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل ۷ و جدول ۲). همانطور که در شکل ۷ و جدول ۲ مشاهده می‌شود، نتیجه مطالعه حاضر با مطالعات پیشین در منطقه (امیری فرد و همکاران، ۲۰۱۹؛ صادقی باقرآبادی و همکاران، ۲۰۲۰ و طالبی و همکاران، ۲۰۲۱) قابل مقایسه می‌باشد. برای مثال، امیری فرد و همکاران (۲۰۱۹) ضریب کیفیت موج برشی را در زاگرس شمالی در فواصل کمتر از ۱۷۰ کیلومتر و بازه فرکانسی ۱.۵ تا ۱۸ هرتز با تابع  $Q_s(f) = 137f^{0.88}$  تخمین زده‌اند. همچنین، طالبی و همکاران (۲۰۲۱) در کل پهنه‌ی زاگرس در فواصل کمتر از ۲۰۰ کیلومتر و بازه فرکانسی ۰.۵ تا ۱۲.۶ هرتز با تابع  $Q_s(f) = 149f^{0.78}$  به نتایجی رسیده‌اند که با نتایج مطالعه حاضر به خوبی هماهنگی دارد.

وسیعتر اطلاق می‌شود. گسترش هندسی تابع فاصله کانونی  $R$  و ضریب گسترش هندسی  $n$  می‌باشد. مقدار تئوری تابع گسترش هندسی در بخشی از مسیر که منحنی تضعیف متأثر از امواج  $S$  مستقیم است، متناسب با افت دامنه امواج حجمی بوده و ضریب گسترش هندسی برابر با  $n=1$  می‌باشد. در نواحی قاره‌ای معمولاً مرز این فاصله در بازه‌ی ۵۰-۷۰ کیلومتری قرار دارد. فواصل بیشتر تا حدود ۲۰۰-۱۲۰ کیلومتری مرتبط با یک فاصله گذار است که در آن اولین بازتاب‌ها از موهو و ناپیوستگی‌های درون پوسته پس از بازتاب بحرانی به اولین رسیده‌ها ملحق می‌شوند که این موضوع باعث کاهش قابل ملاحظه در نرخ تضعیف شده و تابع گسترش هندسی نیز می‌تواند بازه تغییرات متفاوتی برحسب فرکانس و فاصله داشته باشد. در این مطالعه مقادیر تابع گسترش هندسی را تابع فرکانس  $G(R) = R^{-n(f)}$  در نظر گرفته شده است. شکل ۶ بالا وابستگی فرکانسی مقادیر  $n$  را در بازه فرکانسی ۰.۵ تا ۲۵ هرتز نشان می‌دهد. از فرکانس‌های پایین تا حدود ۸ Hz مقادیر  $n$  در بازه‌ی ۱-۰.۵ متغیر بوده و از فرکانس ۸ Hz بطور قابل ملاحظه‌ای تا مقدار حدود ۱.۵ افزایش می‌یابد. سرعت کاهش دامنه امواج لرزه‌ای با افزایش فاصله به فرکانس امواج بستگی دارد. به طور کلی، امواج با فرکانس بالاتر در مقایسه با امواج با فرکانس پایین، با فاصله سریعتر تضعیف می‌شوند. این پدیده به این دلیل رخ می‌دهد که امواج با فرکانس بالاتر طول موج کوتاه‌تری دارند و بنابراین با انتشار در پوسته زمین با سرعت بیشتری پخش می‌شوند.

در نهایت هدف بدست آوردن ضریب کیفیت وابسته به فرکانس می‌باشد که از شیب رگرسیون حداقل مربعات رابطه (۴) نسبت به فاصله بدست می‌آید و با در نظر گرفتن یک رابطه توانی برای ضریب کیفیت وابسته به فرکانس به صورت  $Q_s(f) = Q_0 f^N$  و برازش آن بر مقادیر ضریب کیفیت، مقادیر  $Q_s$  و  $N$  تخمین زده شده و رابطه نهایی برای



شکل ۶. بالا، مقادیر گسترش هندسی وابسته به فرکانس  $\pi(f)$  پایین، مربع های خاکستری نشان دهنده مقادیر  $Q$  نسبت به فرکانس می باشند. خط ممتد برازش را نشان می دهد.



شکل ۷. مقایسه فاکتور کیفیت موج برشی  $Q_s(f)$  مطالعه حاضر (خط ممتد مشکی) با مطالعات دیگر در زاگرس.

جدول ۲. مدل‌های تضعیف برای زاگرس.

Region	Frequency range (Hz)	Geometrical Spreading	Quality factor	Reference
Silakhor Area (North Zagros)	$1 \leq f \leq 24$	$R^{-1}$	$Q_s(f) = 121f^{0.55}$	Hamzehloo et al. (2010)
Silakhor Area (North Zagros)	$0.5 \leq f \leq 35$	$R^{-1}$	$Q_s(f) = 36f^{0.77}$	Ahmadzadeh et al. (2017)
North Zagros	$1.5 \leq f \leq 18$	$R^{-1}$ $R \leq 100$ $\sqrt{R100}$ $R > 100$	$Q_s(f) = 137f^{0.88}$	(Amiri Fard et al., 2019)
Whole Zagros Area	$0.5 \leq f \leq 12.6$	وابسته به فرکانس	$Q_s(f) = 165f^{0.52}$	(Sadeghi-Bagherabadi et al., 2020)
Whole Zagros Area	$0.5 \leq f \leq 12.6$	$R^{-1}$ $R \leq 100$ $\sqrt{R100}$ $R > 100$	$Q_s(f, r \leq 200km) = 149.4f^{0.78}$ $Q_s(f, r \leq 100km) = 72f^{0.8}$	(Talebi et al., 2021)
North Zagros	$0.5 \leq f \leq 15$	وابسته به فرکانس مطابق شکل ۶	$Q_s(f) = 165f^{0.64}$	This study

## منابع

- Ahmadzadeh, S., Parolai, S., Javan-Doloei, G., and Oth, A. (2017). Attenuation characteristics, source parameters and site effects from inversion of S waves of the March 31, 2006 Silakhor aftershocks in Western Iran. *Annals of Geophysics*, 60(6).
- Amiri Fard, R., Javan Doloei, G., Rahimi, H., and 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., and 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.
- Efron, B., 1979. Bootstrap methods, another look at the jackknife. *Annals of Statistics*, 7, 1-26.
- Hatzfeld, D., Tatar, M., Priestley, K., and Ghafory-Ashtiany, M. (2003). Seismological constraints on the crustal structure beneath the Zagros Mountain belt (Iran). *Geophysical Journal International*, 155(2), 403–410.
- Konno, K., and 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., and 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.
- Lermo, J., and Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(5), 1574–1594.

به‌طور کلی، اختلافات در نتایج مطالعات مختلف می‌تواند به دلیل فرض‌های متفاوت برای تابع گسترش هندسی، استفاده از مولفه‌های قائم، جمع دو مولفه افقی و یا یک مولفه افقی باشد. علاوه بر این اختلاف باند فرکانسی نیز باعث می‌شود هر رابطه عمق‌های مختلفی از زمین را نمونه برداری کند. بدیهی است که فاصله در نظر گرفته شده نیز در مقدار فاکتور کیفیت نقش اساسی دارد. به عنوان مثال، طالبی و همکاران (۲۰۲۱)، برای فواصل کمتر از ۱۰۰ کیلومتر تابع  $Q_s(f) = 72f^{0.8}$  را تخمین زده‌اند، در حالی که احمدزاده و همکاران (۲۰۱۷) در فواصل کمتر از ۴۰ کیلومتر رابطه  $Q_s(f) = 36f^{0.77}$  را پیشنهاد کرده‌اند.

مقدار نسبی پایین ضریب کیفیت موج برشی - مشابه با سایر مناطق فعال تکتونیکی جهان - متناسب با تضعیف بیشتر امواج لرزه‌ای می‌باشد که خود متأثر از عواملی نظیر حرکات پوسته و تکتونیک منطقه، خواص فیزیکی سنگها، چین خوردگی‌ها و ماهیت گسل‌های زاگرس می‌باشد. تخمین دقیق‌تر پارامترهای تضعیف و عوامل موثر بر آن‌ها برای برآورد کارآمدتر خطر لرزه‌ای و کاهش ریسک زمین‌لرزه حائز اهمیت است.

- <https://doi.org/10.1785/BSSA0830051574>.
- Oth, A., Bindi, D., Parolai, S., and 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.
- Mirzaei, N., Gao, M. and Chen Y.T. (1998). Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces. *J. Earthq. Predict. Res.* 7, 465-495.
- Motaghi, K., Shabani, E., and Kalvandi, F. (2017). Underplating along the northern portion of the Zagros suture zone, Iran. *Geophysical Journal International*, 210(1), 375–389.
- Mousavi-Bafrouei, S.H., Mirzaei, N. and 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. and Zollo. (2018) A rapid response magnitude scale for timely assessment of the high frequency seismic radiation. *Scientific Reports* 8, Article number: 8562.
- Picozzi, M., Oth, A., Parolai, S., Bindi, D., De Landro, G., and Amoroso, O. (2017). Accurate estimation of seismic source parameters of induced seismicity by a combined approach of generalized inversion and genetic algorithm: Application to The Geysers geothermal area, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(5), 3916–3933. <https://doi.org/10.1002/2016JB013690>.
- Sadeghi-Bagherabadi, A., Sobouti, F., Pachhai, S., and Aoudia, A. (2020). Estimation of geometrical spreading, quality factor and kappa in the zagros region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 133, 106110.
- Shahvar, M. P., Farzanegan, E., Eshaghi, A., and Mirzaei, H. (2021). II-net: The iran strong motion network. *Seismological Research Letters*, 92(4), 2100–2108.
- Tahernia, N., Khodabin, M., and Mirzaei, N. (2011). Mixed model for interoccurrence times of earthquakes based on the expectation-maximization algorithm. *Acta Geophysica*, 59(5), 872–890
- Talebi, A., Rahimi, H., Moradi, A., Mirzaei, M., and Koulakov, I. (2021). Qp, Qs, Qc, Qi, and Qsc Attenuation Parameters in the Zagros Region, Iran. *Pure and Applied Geophysics*, 178(11), 4487–4505.
- Yaminifard, F., Sedghi, M. H., Gholamzadeh, A., Tatar, M., and Hessami, K. (2012). Active faulting of the southeastern-most Zagros (Iran): Microearthquake seismicity and crustal structure. *Journal of Geodynamics*, 55, 56–65.
- Zollo, A., A. Orefice, and 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.

## Estimation of shear wave quality factor and geometrical spreading applying the generalized inversion technique (GIT) for northern Zagros

Fatemeh Abdi<sup>1</sup>, Elham Shabani<sup>2\*</sup>, Zaher Hossein Shomali<sup>2</sup> and Matteo Picozzi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Associate Professor, University of Naples Federico II, Naples, Italy

(Received: 23 February 2023, Accepted: 02 July 2024)

### Summary

The northern Zagros area in western Iran experiences high seismic activity. In this research, we investigated how shear waves attenuate in this region using the non-parametric generalized inversion technique (GIT). GIT is a data-driven method that separates the different contributions (path, site, and source effects) influencing the recorded ground motion's Fourier amplitude spectra (FAS). The attenuation function in the non-parametric scheme is not predefined (it is only required to be a smooth distance function). This allows assessing the potential complexity of attenuation characteristics without imposing a priori parametric model. We analyzed 2,699 waveforms recorded at hypocentral distances between 10 and 150 km from 228 strong-motion stations of the Iran Strong Motion Network (ISMN). We utilized data from 1,563 local events with moment magnitudes ranging from 3.0 to 7.3 Mw. We computed the Fourier amplitude spectra of acceleration time-series in the 0.1–30 Hz frequency range. The evaluated non-parametric attenuation functions decayed uniformly with distance across the entire frequency range. We performed 100 bootstrap GIT inversions at each frequency and calculated the mean and standard deviation to assess the stability of the inversion results. The quality factor of S waves and the frequency-dependent geometrical spreading were estimated simultaneously by regression to the non-parametric attenuation function in the 10-110 km distance range. We considered 10 km as the reference distance ( $R_0$ ), where the attenuation function equals unity. The corresponding frequency-dependent quality factor was  $Q_s(f) = 165f^{0.64}$  in the 0.5-25 Hz frequency range. This S-wave quality factor model agrees with values for tectonically active regions and previous Zagros studies. The geometrical spreading increased for frequencies above 10 Hz. This result can improve the accuracy of ground motion models (GMMs) used for seismic hazard assessment in the region (Amiri Fard et al., 2019; Sadeghi-Bagherabadi et al., 2020). Overall, the study provides valuable insights into shear wave attenuation in northern Zagros. It highlights using non-parametric techniques like GIT to better understand complex attenuation without imposing parametric models. The findings can inform future research and monitoring efforts in this seismically active area.

**Keywords:** Quality factor, shear wave, attenuation, generalized inversion technique (GIT), northern Zagros