

### چکیده

در این پژوهش سعی شده است که پارامترهای لرزه‌ای برای منطقه قم محاسبه گردد. برای نیل به این هدف از روش حل معکوس تعمیم یافته استفاده شده است که در ابتدا توسط اندروز [۱] ارائه شد. برای استفاده از این روش ابتدا بانک داده‌های شتاب‌نگاری ایجاد و داده‌های شتاب‌نگاری همگی از شبکه شتاب‌نگاری سازمان تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی استخراج شد. برای تهیه بانک داده‌ها، تمامی رکوردهای شتاب مربوط به منطقه مورد مطالعه از بقیه رکوردها جدا شد و سپس مؤلفه‌های قائم و افقی هر رکورد استخراج گردید. پس از تهیه بانک داده‌ها، تمامی رکوردها تصحیح شد و موج برشی مستقیم از کل رکورد جداسازی گردید. طیف فوریه برای رکوردهای به دست آمده محاسبه شد و در ۲۰ فرکانس بین ۰/۴ تا ۱۵ هرتز با فواصل لگاریتمی مساوی از طیف فوریه نمونه‌برداری به عمل آمد تا داده‌ها جهت استفاده در الگوریتم حل معکوس تعمیم یافته آماده شوند. با استفاده از روش حل معکوس تعمیم یافته و با استفاده از روش اندروز برای مقید کردن درجه آزادی معادله، ماتریس معلومات و مجهولات مسئله تهیه شد. معادله ماتریسی با کمک روش جداسازی مقادیر تکین حل شد. در محاسبه فاکتور کیفیت امواج برشی مدل گسترش هندسی از مدل معتضدیان [۲] استفاده شده است. اثرات چشمه، مسیر حرکت امواج برشی و تأثیرات ساختگاهی که ایستگاه ثبت کننده در آن واقع شده است هر کدام به‌طور مجزا محاسبه شده‌اند. در این منطقه پارامتر کیفیت امواج برشی برابر  $130f^{0.7}$  محاسبه شده است. مدل استفاده شده برای تحلیل اثر چشمه مدل  $Q^2$  می‌باشد و برای محاسبه افت تنش، فرکانس گوشه، بزرگای گشتاوری و غیره از روش جستجوی نقطه به نقطه استفاده شده است و این پارامترها برای تمامی زلزله‌های بانک داده‌ها محاسبه گردیده‌اند. تشدید ساختگاهی نیز برای تمامی ایستگاه‌های ثبت کننده محاسبه شده است.

**واژگان کلیدی:** حل معکوس تعمیم یافته، پارامترهای جنبش نیرومند زمین، فاکتور کیفیت، افت تنش، اثر ساختگاهی، استان قم.

## تخمین پارامترهای جنبش نیرومند زمین با استفاده از روش حل معکوس تعمیم یافته در منطقه قم

محمد رضا آرم (نویسنده مسئول)

استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ایران، تهران،  
 mharam@aeoi.org.ir

بابک خزاعی مقدم

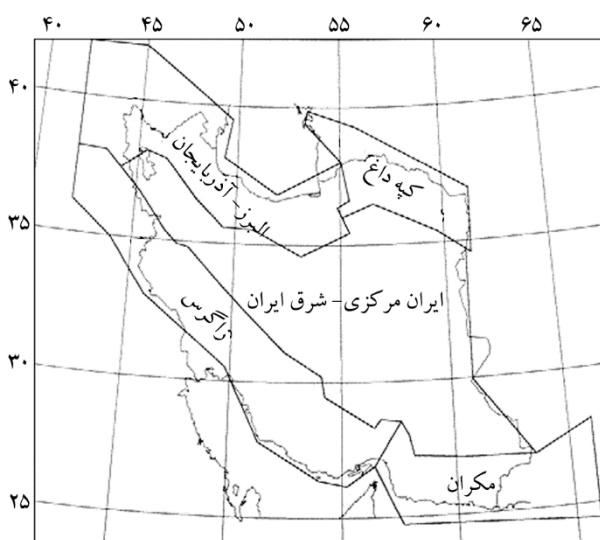
دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

### ۱- مقدمه

که گاه و بیگاه در این مرز و بوم اتفاق می‌افتد حکم می‌کند که تحقیقات و مطالعات گسترده‌تر و دقیق‌تری برای شناخت این زمین لرزه‌ها به خصوص در مناطق پرجمعیت صورت پذیرد. یکی از مناطقی که دارای جمعیت فراوانی بوده و همچنین سازه‌های بسیار مهمی در آن احداث شده است، منطقه قم می‌باشد که تاکنون مطالعات لرزه‌ای کمی در این منطقه انجام پذیرفته است،

امروزه افزایش جمعیت و پیشرفت تکنولوژی و نیاز روزافزون انسان‌ها به منابع مختلف و مکان زندگی سبب شده است نیاز به احداث سازه‌های عمرانی کوچک و بزرگ چه به منظور ارضای نیازهای اولیه مانند مسکن و چه به منظور فراهم آوردن منابع مورد نیاز همچون نیروگاه‌ها و سدها و غیره، بیش از پیش حس شود. علاوه بر آن، لرزه‌خیز بودن کشور عزیزمان ایران و زمین لرزه‌هایی

وجود اینکه مطالعات زیادی در این ایالت در مورد گسل‌ها صورت گرفته است ولی هنوز گسل‌های فعال زیادی در این منطقه ناشناخته مانده‌اند. همخوانی نداشتن سازوکار برخی از زمین‌لرزه‌ها با مکانیسم گسل‌های شناخته شده مؤید این مطلب است [۸]. منطقه مورد مطالعه در محدوده تقریبی ۴۸ تا ۵۲ درجه شرقی و ۳۳ تا ۳۶ درجه شمالی واقع شده است. این منطقه به‌طور عمده در قسمت غربی ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکز و شرق ایران قرار می‌گیرد. این محدوده از نظر فعالیت‌های زمین‌ساختی جزو مناطق جنب‌محسوب می‌شود. گسل‌های این منطقه بیشتر امتدادلغز بوده و روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی را نشان می‌دهند. از گسل‌های اصلی این منطقه می‌توان به گسل‌های ایندس، آوج، قم-زفره و کوشک نصرت اشاره کرد [۸].



شکل (۱): ایالت‌های اصلی لرزه‌زمین‌ساختی ایران ارائه شده توسط میرزایی و همکاران [۷].

### ۳- بانک داده‌ها

در ابتدا لازم به ذکر است که تمام رکوردهای استفاده شده در این پژوهش از رکوردهای شبکه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات مسکن و شهرسازی ایران گرفته شده است. به‌منظور استفاده از روش حل معکوس تعمیم یافته ابتدا لازم است که بانک داده‌ای از رکوردهای شتاب ثبت شده توسط شتاب‌نگارها در این منطقه تهیه شود. برای نیل به این هدف ابتدا تمامی رکوردهای ثبت

در این مطالعه برآورد پارامترهای لرزه‌ای در منطقه قم با استفاده از متداول‌ترین روش در این زمینه یعنی روش معکوس‌سازی تعمیم یافته، صورت گرفته است. این روش ابتدا توسط اندروز مطرح شد و سپس تعمیم یافت [۳]، این روش بر این پایه استوار است که رکورد ثبت شده در ایستگاه لرزه‌نگاری نتیجه کانولوشن سه اثر چشمه تولیدکننده امواج، تأثیرات مسیر حرکت موج و ساختگاه ایستگاه ثبت کننده می‌باشد. با استفاده از مدل‌های پذیرفته شده برای هر کدام از این اثرها و جایگذاری آنها و برخی از مفروضات، می‌توان به معادله خطی از مجهولات رسید که با استفاده از روش‌های حل معکوس قابل حل می‌باشد و در نتیجه اثرات ذکر شده، به‌طور مجزا برآورد می‌گردند. در این مطالعه ابتدا خصوصیات لرزه‌زمین‌ساختی ایران و منطقه قم بررسی می‌شود و چگونگی تهیه بانک داده‌ها مطرح می‌گردد، سپس روش حل معکوس تعمیم یافته بر اساس مطالعات هارتزل [۳] توضیح داده می‌شود و در آخر نتایج به‌دست آمده ذکر می‌گردند.

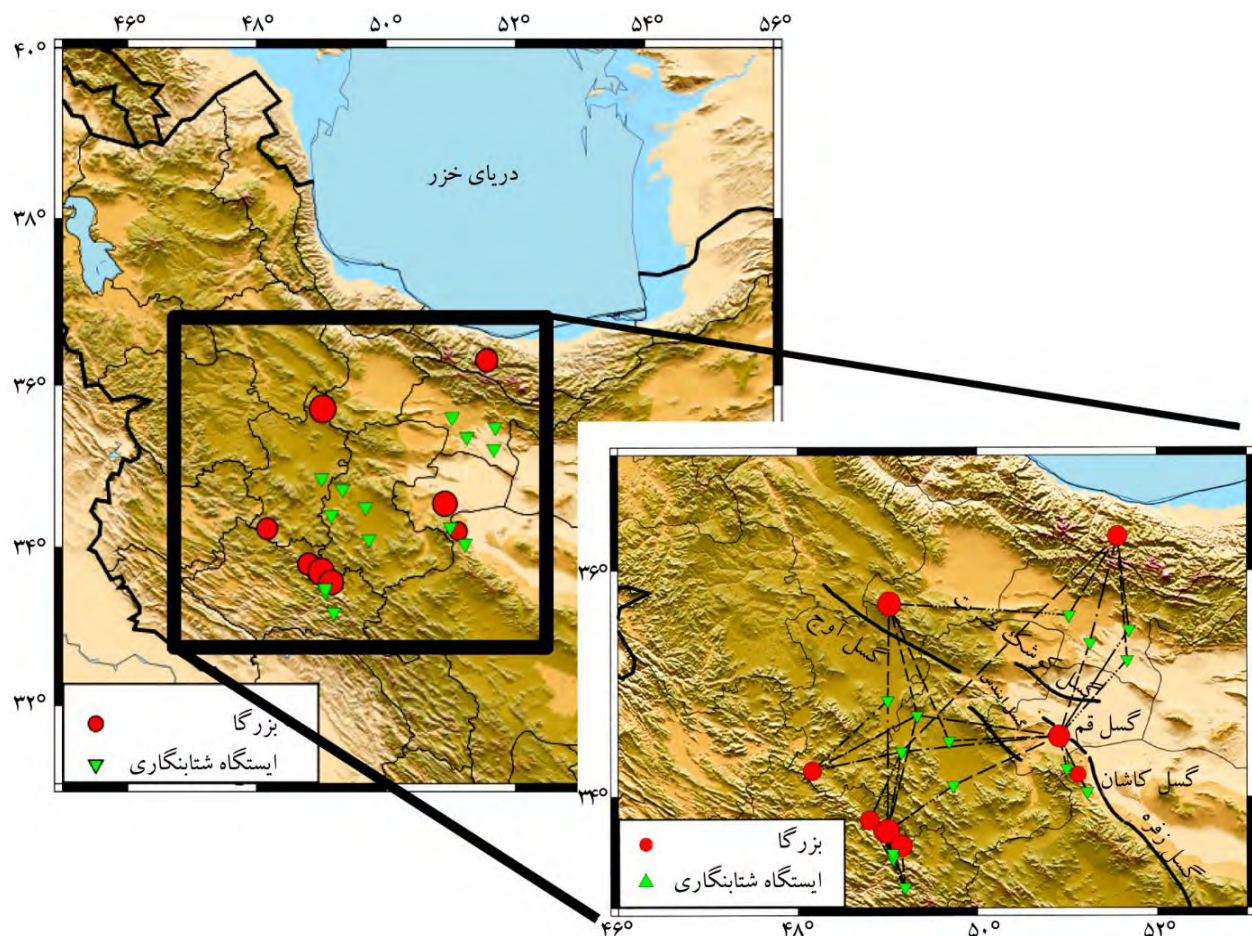
### ۲- لرزه‌زمین‌ساخت منطقه مورد مطالعه

فلات ایران منطقه‌ای است که دارای فعالیت‌های لرزه‌ای زیادی می‌باشد زیرا که در منطقه همگرایی صفحه اوراسیا و صفحه عربی واقع شده است؛ اما مشخصات مشابه منطقه‌ای از نظر لرزه‌زمین‌ساختی موجب شده است که فلات ایران به ایالت‌های مختلف لرزه‌زمین‌ساختی تقسیم‌بندی گردد. تاکنون محققان بسیاری ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی مختلفی را برای ایران ارائه کرده‌اند [۴-۶]. یکی از تقسیماتی که بسیار مورد توجه قرار گرفته است توسط میرزایی و همکاران [۷] ارائه شده است. آنها ایران را به پنج ایالت البرز- آذربایجان، کپه‌داغ، مکران، زاگرس و ایران مرکزی- شرق ایران تقسیم کردند (شکل ۱). پهنه مرکز- شرق ایران بزرگ‌ترین ایالت لرزه‌زمین‌ساختی می‌باشد که منطقه وسیعی از فلات ایران را تشکیل داده است. وجود گسل‌های فعال با طول زیاد مانند درونه، نایبند، نهندان و غیره که دارای مکانیسم‌های مختلفی می‌باشند و فعالیت‌های لرزه‌ای متعددی را در طول تاریخ از خود نشان داده‌اند، از مشخصات برجسته این منطقه می‌باشد. با

و ۱۴ ایستگاه ثبت کننده می باشد، تهیه شده است. نحوه قرارگیری زلزله ها و ایستگاه ها و چگونگی اتصال آنها و نیز گسل های مهم و جوان این منطقه در شکل (۲) نشان داده شده است. در جدول (۱) ایستگاه های بانک داده و در جدول (۲) اطلاعات مربوط به زمین لرزه ها ذکر شده اند.

پس از اینکه بانک داده های نهایی با توجه به شرایط گفته شده تهیه گردید لازم است که پردازش روی تمامی رکوردهای بانک داده صورت پذیرد و از آنجا که ورودی روش حل معکوس تعمیم یافته، محتوای فرکانسی رکوردهای شتاب است، نمونه برداری در فضای فرکانس انجام گیرد. مراحل پردازش رکوردها شامل حذف نوفه (این مرحله برای تهیه بانک داده ها صورت پذیرفته است)، جدا کردن موج برشی مستقیم و در آخر آماده کردن و نمونه برداری از طیف فوریه رکوردهای شتاب می باشد.

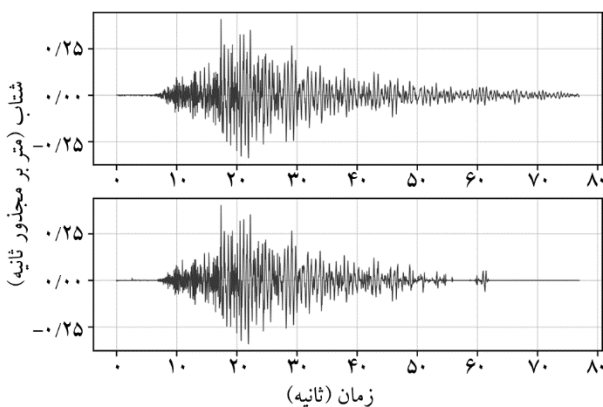
شده در منطقه مورد مطالعه را از بقیه رکوردها جدا می کنیم تا بانک داده های اولیه تشکیل گردد. نیاز است دو شرط بر بانک داده اعمال گردد تا مناسب برای استفاده در روش حل معکوس گردد، یکی شرط اتصال رکوردها به یکدیگر است که برای این بین بردن درجه آزادی معادله ضروری می باشد و دیگری شرط ثبت حداقل دو رکورد توسط ایستگاه ها و ثبت رکورد در حداقل دو ایستگاه برای هر زلزله می باشد که برای بالا بردن دقت جواب ها ضروری است. پس از اعمال این دو شرط، تمامی رکوردها نوفه زدایی می شوند و نیز رکوردهای بی کیفیت در این مرحله جدا می گردند. لازم به ذکر است که شرط اتصال رکوردها و ثبت حداقلی برای ایستگاه ها و زمین لرزه ها باید پس از حذف رکوردها دوباره اعمال شوند. پس از اعمال شرایط ذکر شده، بانک داده های نهایی که شامل ۳۹ رکورد مربوط به ۹ زلزله



شکل (۲): چگونگی اتصال زلزله ها و ایستگاه ها به همراه گسل های اصلی منطقه مورد مطالعه (سمت راست) و نحوه قرارگیری زلزله ها و ایستگاه ها (سمت چپ).

#### ۴- حذف نوفه با استفاده از تحلیل موجک

حذف نوفه در دو مرحله اصلی انجام می‌پذیرد، یکی حذف اثر دستگاه ثبت کننده (شتاب‌نگار) از روی رکوردها می‌باشد که با توجه به اطلاعات مختص به مدل شتاب‌نگار ثبت کننده انجام می‌پذیرد. این مرحله توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی صورت گرفته است. گام دوم از بین بردن نوفه‌هایی است که به دلیل تأثیر گذاری منابع تولید کننده امواج لرزه‌ای مزاحم از جمله جاده‌ها، ماشین‌آلات ساخت‌وساز، شرایط نامساعد جوی و غیره ایجاد می‌گردند. روش مرسوم در حذف نوفه در این مرحله اعمال فیلتر میان‌گذر در فضای فرکانسی بر رکوردها می‌باشد اما این روش دارای کاستی‌هایی می‌باشد که در روش‌های نوین سعی شده برطرف گردند. یکی از این روش‌های نوین برای حذف نوفه، استفاده از تحلیل موجک [۹] می‌باشد، در این مطالعه از این روش برای تصحیح رکوردها استفاده شده تا دقت جواب‌ها بالاتر رود. برتری روش تحلیل موجک را نسبت به روش مرسوم می‌توان در قابلیت حذف نوفه در رکوردهایی که نسبت سیگنال به نویز پایینی دارند (در این حالت به دلیل اینکه نمی‌توان بین محتوای فرکانسی زلزله و نویز تمیز قائل شد، روش مرسوم فیلترینگ کاربرد ندارد) و نیز قابلیت حذف نوفه‌های غیر ایستا (روش مرسوم فیلترینگ، نوفه را در طول رکورد ایستا فرض می‌کند و قابلیت حذف نوفه‌های غیر ایستا را ندارد) دانست. شکل‌های (۳) و (۴) نمونه‌ای از یک رکورد اصلاح شده توسط تحلیل موجک مشاهده می‌شود.



شکل (۳): رکورد اصلاح نشده شتاب (شکل بالا) و رکورد اصلاح شده با استفاده از تحلیل موجک (شکل پایین) برای رکورد ثبت شده در ایستگاه شول‌آباد برای زلزله بروجرد به تاریخ ۲۰۰۶/۳/۳۱ (۱۳۸۵/۱/۱۱).

جدول (۱): اطلاعات ایستگاه‌های بانک داده.

شماره ایستگاه	کد ایستگاه	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	$V_{s30}$	تعداد رکورد
۱	ARK	اراک	۳۴/۱۰۱	۴۹/۷۳۱	۷۱۳	۲
۲	DAS	دره اسبار	۳۳/۴۵	۴۹/۰۶	-	۳
۳	DRD	درود	۳۳/۴۹۱	۴۹/۰۵۹	۷۷۱	۴
۴	FMH	فرمهین	۳۴/۴۹۸	۴۹/۶۸۴	۵۸۹	۲
۵	HAB	حسن‌آباد	۳۵/۳۶۷	۵۱/۲۵۳	۴۵۰	۲
۶	JVD	جوادی‌آباد	۳۵/۲۱۵	۵۱/۶۶۸	-	۲
۷	JQS	جوشقان‌استرک	۳۴/۰۴۵	۵۱/۲۲۲	-	۲
۸	KHD	خنداب	۳۴/۴۰۱	۴۹/۱۵۴	۴۶۶	۵
۹	KMJ	کمیجان	۳۴/۷۲۵	۴۹/۳۲۹	۶۹۱	۴
۱۰	PKD	پاکدشت	۳۵/۴۵۸	۵۱/۶۸۷	۵۰۴	۲
۱۱	GHV	قهاوند	۳۴/۸۵۷	۴۹/۰۰۲	-	۳
۱۲	SUL	شول‌آباد	۳۳/۱۸۴	۴۹/۱۹۲	۱۰۸۴	۴
۱۳	VAH	وحیدیه	۳۵/۶۰۸	۵۱/۰۱۹	۳۰۰	۲
۱۴	VES	وشنوه	۳۴/۲۵۱	۵۰/۹۹۵	-	۲

جدول (۲): اطلاعات مربوط به زمین‌لرزه‌های بانک داده.

تاریخ	نام زلزله	بزرگا	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ایالت لرزه‌زمن ساختی
۱۹۹۸/۸/۲۱	-	۴/۹	۳۴/۲۳	۴۸/۱۶	ایران مرکزی-شرق ایران
۲۰۰۲/۶/۲۲	آوج	۶/۲	۳۵/۷۱	۴۹/۰۲	ایران مرکزی-شرق ایران
۲۰۰۴/۵/۲۸	کجور	۵/۲	۳۶/۳	۵۱/۵۶	البرز-آذربایجان
۲۰۰۶/۳/۳۰	سیلاخور	۵/۲	۳۳/۶۹	۴۸/۹۵	ایران مرکزی-شرق ایران
۲۰۰۶/۳/۳۱	-	۵	۳۳/۷۹	۴۸/۸	ایران مرکزی-شرق ایران
۲۰۰۶/۳/۳۱	سیلاخور	۶/۲	۳۳/۶۹	۴۹	ایران مرکزی-شرق ایران
۲۰۰۷/۳/۶	درود	۵/۶	۳۳/۵۶	۴۹/۱۵	ایران مرکزی-شرق ایران
۲۰۰۷/۶/۱۸	کهنک	۵/۷	۳۴/۵۴	۵۰/۹۴	ایران مرکزی-شرق ایران
۲۰۰۹/۳/۵	سفیددشت	۴/۲	۳۴/۱۹۹	۵۱/۱۱۹	ایران مرکزی-شرق ایران

موج برشی مستقیم می‌باشد. روش معمول در تعیین نقاط شروع و پایان موج برشی، استفاده از روشی است که توسط هوسید [۱۰] معرفی شده است. در این روش نقطه شروع و پایان موج برشی به ترتیب نقاطی هستند که انرژی موج به ۵ و ۹۵ درصد انرژی کل موج می‌رسد (معادلات ۱ و ۲).

$$E(t) = \int_0^t [a(z)]^2 dt \quad (1)$$

$$E_T = \int_0^T [a(t)]^2 dt \quad (2)$$

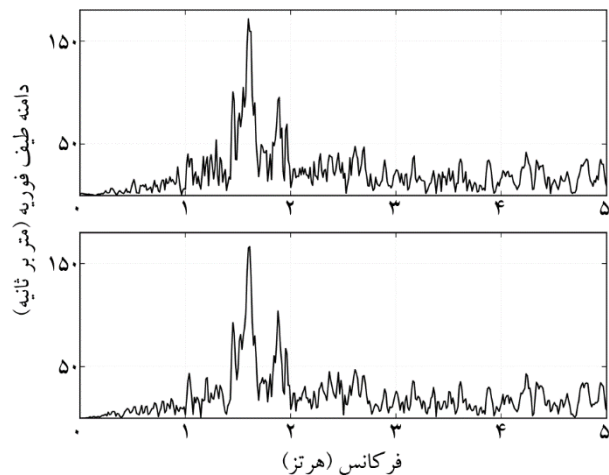
در معادلات (۱) و (۲)  $E(t)$ ، انرژی رکورد در لحظه  $t$ ،  $a(t)$  رکورد شتاب زمین لرزه در لحظه  $t$ ،  $E_T$ ، انرژی کل رکورد و  $T$ ، برابر با زمان کل رکورد می‌باشد؛ اما این روش در تخمین نقطه پایانی موج برشی در حوزه‌های آبرفتی دقیق نیست. برای برطرف کردن این کاستی برای نقطه پایان موج برشی از روش کینوشیتا [۱۱] استفاده شده است. این روش نقطه‌ای که تابع پوش تجمعی شروع به نزول می‌کند را به عنوان نقطه پایانی موج برشی مطرح می‌کند (معادلات ۳ و ۴).

$$e(n) = (b^2(n) + H^2\{b(n)\})^{1/2} \quad (3)$$

$$c(k) = (k^{-1} \sum_{n=1}^k e^2(n))^{1/2} \quad (4)$$

در معادلات (۳) و (۴)،  $e(n)$ ، تابع پوش شتاب،  $b(n)$ ، رکورد شتاب،  $H\{b(n)\}$ ، تبدیل هیلبرت رکورد شتاب و  $c(k)$ ، تابع تجمعی پوش شتاب می‌باشد.

مرحله دوم، جدا کردن موج برشی مستقیم با استفاده از نقاط شروع و پایان تعیین شده است، این مرحله بدان جهت مهم است که جدا کردن به یک باره موج برشی در فضای زمان، باعث ایجاد اعوجاج در فضای فرکانسی و طیف فوریه می‌شود. در این مطالعه برای جداسازی موج برشی، دو تابع کسینوسی<sup>۱</sup> استفاده شده است. طول توابع کسینوسی باید طوری انتخاب شود که نه چنان بزرگ باشد که تعداد زیادی داده‌های ناخواسته (خارج از محدوده موج برشی) وارد داده‌های نهایی کند و نه آن چنان کوچک باشد که باعث اعوجاج در فضای فرکانسی گردد. در این مطالعه طول هر



شکل (۴): طیف فوریه رکورد اصلاح نشده (شکل بالا) و طیف فوریه رکورد اصلاح شده با استفاده از تحلیل موجک (شکل پایین) برای رکورد ثبت شده در ایستگاه شول آباد برای زلزله بروجرد به تاریخ ۱۳۸۵/۱/۱۱ (۲۰۰۶/۳/۳۱).

همان طور که در شکل (۴) مشهود می‌باشد، طیف فوریه به وسیله فیلتر میان گذر اصلاح نشده است بلکه در تمامی طول رکورد، نوفه‌زدایی صورت گرفته است. البته لازم به ذکر است که تمامی رکوردهای استفاده شده در این مطالعه پیش از اضافه شدن به بانک داده‌ها به صورت بصری مورد مشاهده قرار گرفته و رکوردهایی که میزان بالای نوفه در آنها مشهود است یا رکوردها کلیپ شده هستند، از همان ابتدا وارد بانک داده نمی‌شوند؛ به همین دلیل رکوردهای استفاده شده از ابتدا از نسبت سیگنال به نویز بالایی برخوردار هستند.

## ۵- جداسازی موج برشی مستقیم

از آنجا که امواج برشی سهم زیادی از انرژی رکورد را حمل می‌کنند، بسیاری از مطالعات در زمینه تعیین پارامترهای جنبش نیرومند زمین و نیز در زمینه تخمین خطرپذیری لرزه‌ای، با استفاده از امواج برشی صورت پذیرفته‌اند و نیز معادلات مربوطه برای امواج برشی برقرار گردیده‌اند. در این مطالعه نیز برای استفاده از روش حل معکوس تعمیم یافته نیاز است موج برشی مستقیم از بقیه رکورد جدا شود. جداسازی موج برشی مستقیم نیز در دو مرحله صورت می‌پذیرد. مرحله اول تعیین نقاط شروع و پایان



گرفته شده برای نمونه برداری قرار نمی گیرد. در انتها برای به دست آوردن طیف فوریه میانگین دو مؤلفه افقی، از میانگین هندسی دو مؤلفه افقی استفاده شده است. در این مرحله داده‌ها برای استفاده در روش حل معکوس تعمیم یافته آماده می‌باشند.

## ۷- اثرات سازنده رکوردهای شتاب نگاری

به طور کلی آنچه شتاب نگارها ثبت می‌کنند، مؤثر از سه اثر می‌باشد؛ اثر چشمه لرزه‌زا که موج در آنجا تولید می‌شود، اثر مسیری که موج طی می‌کند تا به ایستگاه برسد و اثر محیطی که ایستگاه در آن واقع شده است. این سه اثر در حوزه زمان با عملگر هم آمیخت با یکدیگر ترکیب می‌گردند که با برگرداندن این اثرات به حوزه فرکانسی، این عملگر به ضرب تبدیل می‌شود (معادله ۵) [۱۲].

$$Y(M_0, R, f) = E(M_0, f) \cdot P(R, f) \cdot G(f) \quad (5)$$

در این معادله  $E(M_0, f)$  اثر چشمه بوده که تابعی از ممان لرزه‌ای و فرکانس می‌باشد.  $P(R, f)$  اثر مسیر بوده و تابعی از فاصله ایستگاه تا مرکز زلزله و فرکانس می‌باشد و  $G(f)$  اثر ساختگاه بوده که مستقل از فاصله و وابسته به فرکانس می‌باشد.

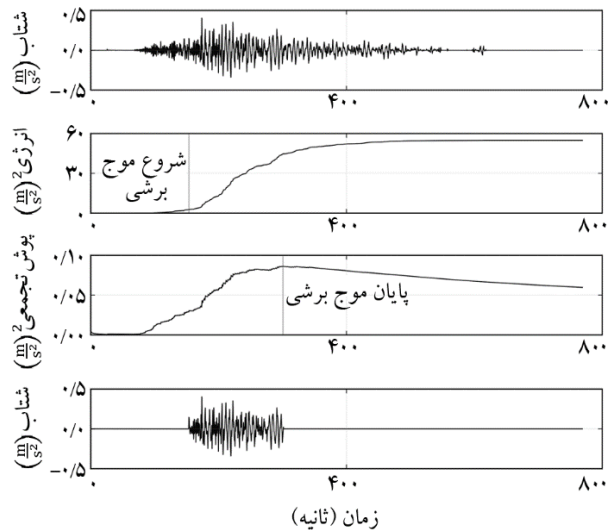
### ۷-۱- اثر مسیر

اثر مسیر خود به دو عامل؛ گسترش مسیر<sup>۴</sup> و کاهندگی غیر الاستیک<sup>۵</sup> تقسیم می‌شود. گسترش مسیر عموماً توسط یک تابع چند ضابطه‌ای بر اساس فاصله ایستگاه تا منبع زلزله معرفی می‌گردد و کاهندگی غیر الاستیک توسط پارامتر کیفیت وابسته به فرکانس بیان می‌شود که نسبت عکس با کاهندگی غیر الاستیک دارد. پس می‌توان  $P(R, f)$  را به صورت معادله (۶) در نظر گرفت.

$$P(R, f) = Z(R) \cdot e^{\frac{-\pi f R}{Q(f) \beta_s}} \quad (6)$$

در این معادله  $Q(f)$  پارامتر کیفیت امواج برشی و  $\beta_s$  سرعت امواج برشی و  $Z(R)$  گسترش مسیر می‌باشند. گسترش مسیر

پنجره کسینوسی به طول ۵ درصد طول رکورد انتخاب شده است و به نقاط شروع و پایان موج برشی اعمال گردیده است. شکل (۵) نشان دهنده مراحل جداسازی موج برشی می‌باشد.

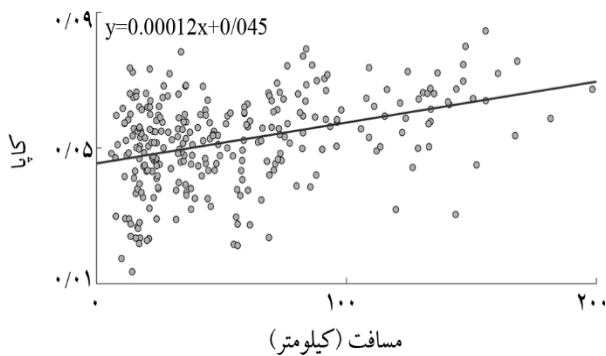


شکل (۵): چگونگی جداسازی موج برشی مستقیم. به ترتیب از بالا: رکورد پیش از جدا کردن موج برشی، نقطه شروع موج برشی در نمودار انرژی موج، نقطه پایان موج برشی در نمودار پوش تجمعی و موج جدا شده.

## ۶- به دست آوردن دامنه طیف فوریه موج برشی مستقیم

پس از جدا کردن موج برشی می‌بایستی از دامنه طیف فوریه نمونه برداری شود و به عنوان ورودی در روش حل معکوس تعمیم یافته استفاده شود. برای نیل به این هدف، ابتدا طیف فوریه برای هر رکورد با به کار بردن روش تبدیل فوریه سریع<sup>۲</sup> به دست آمده و سپس با استفاده از روش میانگین متحرک، طیف فوریه به دست آمده، هموار می‌گردد. در این مرحله نیاز است تا در فرکانس‌های مشخصی از طیف، نمونه برداری شود. ۲۰ فرکانس بین ۰/۴ تا ۱۵ هرتز و با فواصل لگاریتمی مساوی انتخاب شده‌اند تا هم تمامی محتوای فرکانسی رکورد در نظر گرفته شود و هم از گرفتن نوفه باقی مانده در فرکانس‌های خیلی پایین و بالا اجتناب شود. لازم به ذکر است که تعداد نمونه برداری در ثانیه برای رکوردهای استفاده شده برابر ۲۰۰ نمونه در ثانیه می‌باشد و فرکانس نایکویست<sup>۳</sup> برای تمامی رکوردها برابر ۱۰۰ هرتز می‌باشد؛ در نتیجه فرکانس نایکویست در بازه فرکانسی در نظر

قسمت فرکانس بالای طیف فوریه هر کدام برازش می گردد و تمامی شیب های به دست آمده از این نمودارها در نمودار دیگری در مقابل فاصله ایستگاه ثبت کننده از مرکز زلزله رسم می گردند و خطی به نمودار به دست آمده برازش می گردد، عرض از مبدأ خط برازش شده در نمودار به دست آمده بیانگر پارامتر کاهندگی فرکانس های بالا می باشد (برای مؤلفه های افقی و عمودی جداگانه محاسبه می شود).



شکل (۶): نمودار شیب خطوط برازش شده طیف فوریه به صورت لگاریتمی در فرکانس های بالا بر حسب فاصله ایستگاه از چشمه و خط برازش شده بر این نمودار به همراه معادله این خط.

### ۳-۷- اثر چشمه

اثر چشمه لرزه زها در واقع خصوصیات امواج تولید شده در هنگام وقوع زمین لرزه می باشد. این اثر ابتدا به صورت بزرگای زلزله مطرح می شد اما با افزایش شناخت بشر نسبت به گسل ها و نحوه تولید امواج لرزه ای با پارامترهای دقیق تری مانند ممان لرزه ای بیان گردید. برای اولین بار در سال ۱۹۶۷ اکی [۱۴] مدل مجذور امگا را برای طیف چشمه لرزه زها مطرح کرد. این مدل هم اکنون نیز از رایج ترین مدل های مورد استفاده برای چشمه لرزه زهاست. این مدل در شکل (۷) برای دو زلزله به بزرگای ۶/۵ و ۷/۵ نمایش داده شده است. در این مدل با استفاده از مفهوم فرکانس گوشه می توان طیف چشمه را برای بزرگاهای مختلف تحلیل کرد.

به طور کلی به صورت زیر در نظر گرفته می شود [۲].

$$Z(R) = \begin{cases} \frac{R_0}{R} & R \leq R_1 \\ Z(R_1) \left(\frac{R_1}{R}\right)^{p_1} & R_1 \leq R \leq R_2 \\ \vdots & \\ Z(R_n) \left(\frac{R_n}{R}\right)^{p_n} & R_n \leq R \end{cases} \quad (۷)$$

پارامتر کیفیت امواج برشی وابسته به فرکانس عموماً به صورت  $Q=Q_0f^n$  در نظر گرفته می شود. از  $Q_0$  به عنوان معیاری برای میزان فعالیت لرزه ای منطقه استفاده می شود، بدین صورت که هرچه این میزان بیشتر باشد نشان دهنده ی فعالیت کم تر لرزه ای منطقه و هرچه کمتر باشد منطقه از لحاظ لرزه ای فعال تر است.

### ۲-۲- اثر ساختگاه

اثر ساختگاه نیز از دو عامل تشکیل شده است؛ تشدید ساختگاهی و کاهندگی فرکانس بالا. از دیرباز مشخص شده است که یکی از فاکتورهای مهم در میزان قدرت زمین لرزه ها در ساختگاه، تشدید می باشد که ساختگاه، بر امواج زمین لرزه اعمال می کند. این تشدید می تواند باعث خسارت شدید حتی برای زمین لرزه هایی که قدرت کمی دارند، گردد. کاهندگی فرکانس بالا عامل دیگری در اثر ساختگاه می باشد که در فرکانس های بالا (عمدتاً بالای ۱۰ هرتز) روی می دهد. بدین ترتیب  $G(f)$  در معادله (۵) به صورت زیر نوشته می شود:

$$G(f) = A(f) \cdot D(f) \quad (۸)$$

که در آن  $D(f)$ ، کاهندگی فرکانس بالا می باشد و از رابطه (۹) محاسبه می گردد [۱۳].

$$D(f) = \exp(-n\kappa_0 f) \quad (۹)$$

$\kappa_0$ ، پارامتر کاهندگی فرکانس های بالا می باشد و از روش برازش خط به شیب به دست آمده از قسمت فرکانس بالای طیف هر رکورد به دست می آید (شکل ۶). این روش بدین صورت است که ابتدا برای تمامی رکوردهای موجود در بانک داده، خطی به

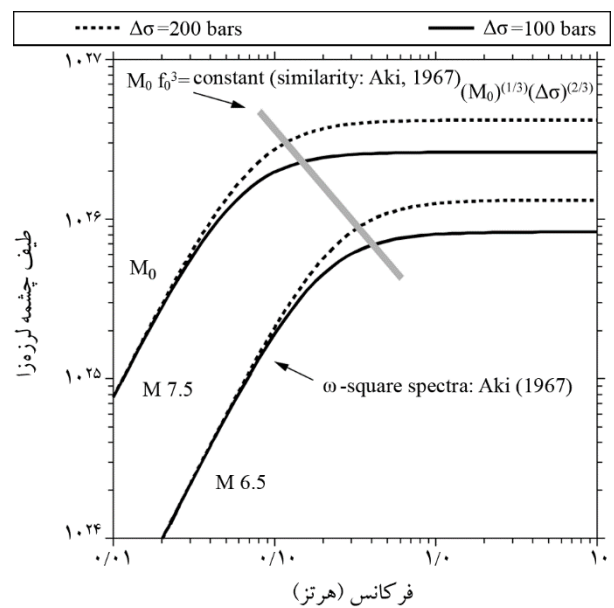
معمولاً برابر با یک کیلومتر در نظر گرفته می شود. تمامی اثرات گفته شده با استفاده از روش حل معکوس تعمیم یافته به طور هم زمان به دست می آیند.

### ۸- روش حل معکوس تعمیم یافته

با جایگزین کردن مدل های گفته شده برای هر اثر در رابطه (۵) و اعمال عملگر لگاریتم به رابطه و ساده سازی آن، معادله زیر حاصل می گردد:

$$\ln(Y_{ij}(f)) = \ln(E_i(f)) \ln(Z(R_{ij})) - \frac{\pi f R_{ij}}{\beta_s} \cdot Q^{-1}(f) + \ln(A_j(f)) - \pi \kappa_0 f \quad (13)$$

در معادله (۵) مشاهده می شود که با ضرب و تقسیم کردن هر تابعی از فرکانس، جواب معادله تغییر نمی کند. این مطلب نشان دهندهی این است که معادله دارای یک درجه آزادی می باشد و باید حل شود تا بتوان به جواب مطلوب مسئله دست یافت. در این مطالعه از روش اندروز برای حذف این درجه آزادی استفاده شده است. در این روش ایستگاهی را به عنوان ایستگاه مرجع در نظر می گیرند و با استفاده از اطلاعات آن ایستگاه درجه آزادی مسئله را حل می کنند. ایستگاه مرجع، ایستگاهی است که پاسخ ساختگاهی را در آن بتوان مقدار از پیش تعیین شده ای فرض کرد. ایستگاه های با ساختگاه سنگی میزان تشدید کمتری را از خود نشان می دهند؛ پس این ایستگاه ها برای انتخاب به عنوان ایستگاه مرجع مناسب می باشند، برای شناخت ایستگاه های با ساختگاه سنگی از سرعت موج برشی در عمق کم (۳۰ متری) استفاده می شود؛ بدین صورت که ساختگاه های با سرعت موج برشی زیاد را ساختگاه های سنگی (بیشتر از ۷۰۰ متر بر ثانیه) و ساختگاه های با سرعت موج برشی کم را ساختگاه های غیر سنگی می دانند. پس از انتخاب ایستگاه مرجع برای حل درجه آزادی، روش کار بدین صورت است که برای ایستگاه مرجع، اثر ساختگاهی معلوم فرض می گردد، پس برای زلزله هایی که این ایستگاه ثبت کرده است، اثر چشمه لرزه زا قابل محاسبه است و با معلوم بودن اثر چشمه لرزه ها را ثبت کرده اند قابل محاسبه است و این روند (با شرط مرتبط



شکل (۷): طیف چشمه لرزه زا برای بزرگهای ۶/۵ و ۷/۵ با استفاده از مدل مجذور امگا [۱۲].

در حالت کلی، معادله طیف چشمه لرزه زا را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$E(M_0, f) = C \cdot M_0 \cdot S(M_0, f) \quad (10)$$

که در آن، C ثابتی است که با رابطه (۱۱) بیان می شود و  $S(M_0, f)$  طیف تغییر مکان چشمه لرزه زا بوده و برای مدل مجذور امگا، توسط رابطه (۱۲) عنوان می شود:

$$C = (R_{\theta\phi})VF / (4\pi\rho_s\beta_s^3R_0) \quad (11)$$

$$S(M_0, f) = \frac{1}{(1 + (\frac{f}{f_0})^2)} \quad (12)$$

در رابطه (۱۱)،  $R_{\theta\phi}$  ضریب الگوی تشعشع می باشد که معمولاً تحت بازه ای مناسب از زوایای مختلف میانگین گرفته می شود؛  $V$  بیانگر سهم کل انرژی موج برشی در مؤلفه های افقی رکورد می باشد که به طور معمول برابر با  $1/\sqrt{2}$  در نظر گرفته می شود؛  $F$  بیانگر اثر سطح آزاد است که تقریباً در تمامی مطالعات برابر با دو در نظر گرفته می شود؛  $\rho_s$  برابر با چگالی محیط در مجاورت گسل می باشد؛  $\beta_s$  برابر با سرعت موج برشی در مجاورت گسل می باشد؛  $R_0$  به عنوان فاصله مرجع تعریف می شود که مقدار آن



ضرایب به صورت ضرب سه ماتریس نوشته می شود و با حذف مقادیر نامعین کننده مسئله، بهترین جواب برای اثرات چشمه، مسیر و ساختگاه به صورت ماتریس ستونی، محاسبه می شود. با توجه به معادله (۱۴)، شکل معادله به صورت  $d=Gm$  می باشد و ماتریس کواریانس به صورت معادله (۱۵) محاسبه می گردد:

$$\text{cov}(m) = [GG^T]\sigma_d^2 \quad (15)$$

در معادله (۱۵)  $\sigma_d^2$  برابر واریانس ماتریس نتایج می باشد. با استفاده از واریانس به دست آمده، انحراف از معیار به دست می آید.

جدول (۳): چگونگی اتصال ایستگاه مرجع با تمامی زلزله ها و ایستگاه های دیگر.

ایستگاه مرجع	ایستگاه مرجع	ایستگاه	زلزله	
اراک	۶ ۸	دره اسبار	۱	
		درود		
		خنداب		۲
		شول آباد		
		کمیجان		۳
		قهقوند		
		فرمهین		۴
		حسن آباد		
		جوآباد		۵
جوشقان استرک				
پاکدشت	۷			
وشنوه				
وحیدیه				

بودن زلزله ها و ایستگاه ها) تا حل کامل اثرات ساختگاهی و اثرات چشمه ها ادامه پیدا می کند. در این مطالعه، ایستگاه اراک به عنوان ایستگاه مرجع انتخاب شده است. این انتخاب بر اساس سرعت موج برشی در این ایستگاه می باشد که بیشتر از ۷۰۰ متر بر ثانیه است. جدول (۳) نمایش دهنده ی چگونگی اتصال ایستگاه مرجع با زلزله ها و دیگر ایستگاه ها می باشد؛ بدین صورت که ایستگاه مرجع که اراک است با زلزله های شماره ۶ و ۸ در ارتباط است (این زلزله ها در این ایستگاه، ثبت شده اند)، و زلزله های شماره ۶ و ۸ در ایستگاه های دیگر نیز ثبت شده اند (ستون سوم جدول) همچنین این ایستگاه ها زلزله های دیگری را نیز ثبت کرده اند (ستون چهارم جدول). در این مرحله تمامی ایستگاه ها و زلزله ها در بانک داده با ایستگاه مرجع در ارتباط هستند.

### ۹- تشکیل ماتریس ضرایب و ماتریس داده ها

با نوشتن معادله (۱۳) برای تمامی رکوردهای بانک داده، یک دستگاه معادلات بیش تعیین شده ایجاد می گردد. این دستگاه معادلات را می توان به صورت ماتریسی نوشت، در این صورت شکل ماتریسی معادله به صورت معادله (۱۴) ظاهر خواهد شد. همان گونه که معادله (۱۴) نشان می دهد، در هر سطر حداکثر سه مؤلفه غیر صفر دیده می شود که در ارتباط با هر کدام از اثرها می باشد. سطر آخر هر سه ماتریس شرط ایستگاه مرجع را برای مسئله اعمال می کند که نشان دهنده ی مقدار از پیش تعیین شده ای برای ایستگاه مرجع می باشد. برای حل معادله ماتریسی روش های متفاوتی موجود است. در این مطالعه از روش جداسازی مقادیر تکین<sup>۷</sup> برای حل معادله استفاده شده است. در این روش، ماتریس

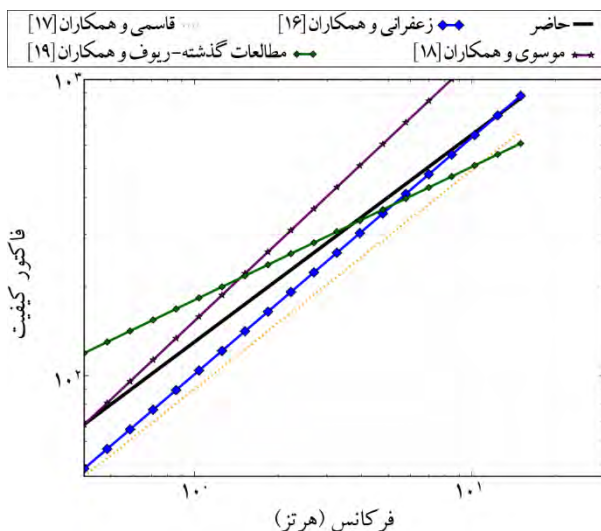
$$[Y] = [A(\text{ایستگاه} | \text{چشمه} | \text{مسیر})][X]$$

$$\begin{bmatrix} d_{11}(f) \\ \vdots \\ d_{ij}(f) \\ \vdots \\ d_{Ij}(f) \\ \hline \ln(rs(f)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(f) & | & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 & | & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{ij}(f) & | & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & | & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{Ij}(f) & | & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & | & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \\ \hline 0 & | & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & | & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q^{-1}(f) \\ \hline \ln(E_1(f)) \\ \vdots \\ \ln(E_I(f)) \\ \hline \ln(A_1(f)) \\ \vdots \\ \ln(A_j(f)) \\ \hline \ln(A_s(f)) \end{bmatrix} \quad (14)$$

شده‌اند. برای مقایسه پارامتر کیفیت به‌دست آمده در این مطالعه با نتایج به‌دست آمده از مطالعات پیشین در این منطقه و مناطق دیگر شکل (۹) ترسیم شده است. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است نتایج این مطالعه در تطابق با روند به‌دست آمده از مطالعات پیشین می‌باشد.

جدول (۴): پارامتر کیفیت به‌دست آمده از مطالعات پیشین در مناطق مختلفی از ایران و همچنین کالیفرنیا در آمریکا و همچنین در ژاپن.

منطقه	معادله پارامتر کیفیت وابسته به فرکانس
البرز [۱۶]	$Q = 101f^{0.8}$
البرز [۱۷]	$Q = 90f^{0.74}$
فلات ایران [۱۸]	$Q = 153f^{0.88}$
کالیفرنیا-آمریکا [۱۹]	$Q = 180f^{0.45}$
ژاپن [۱۵]	$Q = 130f^{0.7}$
این مطالعه	$Q = 130f^{0.7}$



شکل (۹): فاکتور کیفیت به‌دست آمده در این مطالعه در مقایسه با مناطق مختلف ایران و نیز میزان این پارامتر در کالیفرنیا آمریکا.

### ۱-۲- طیف چشمه لرزه‌زا

طیف چشمه لرزه‌زا اثر دیگری است که از حل معادله ماتریسی به‌دست آمده از روش حل معکوس تعمیم یافته به دست می‌آید؛ اما به‌منظور شناخت دقیق پارامترهای لرزه‌ای منطقه لازم است که متغیرهای توصیف کننده چشمه لرزه‌ای از جمله؛ ممان لرزه‌ای،

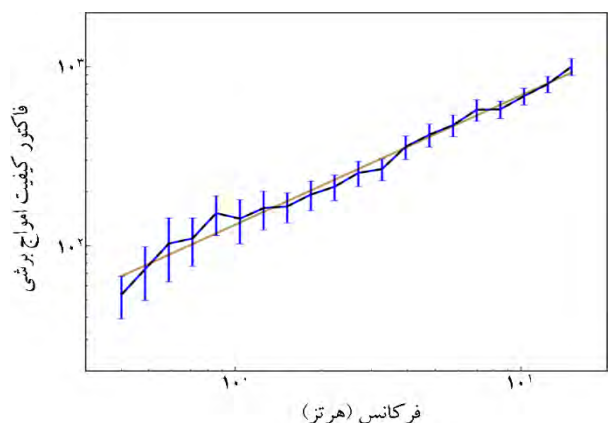
۱-۱۰- نتایج به‌دست آمده از حل معکوس تعمیم یافته پس از به دست آمدن اثرات چشمه، مسیر و ساختگاه، هر کدام را جداگانه مورد تحلیل قرار می‌دهیم.

### ۱-۱- پارامتر کیفیت امواج برشی

همان‌گونه که در معادلات (۶) و (۷) مطرح شد، با فرض گسترش هندسی، تنها، پارامتر کیفیت امواج برشی ( $Q_s(f)$ ) مجهول می‌باشد. تعداد ۲۰ (به تعداد فرکانس‌های در نظر گرفته شده) عضو اول ماتریس جواب برابر پارامتر کیفیت امواج برشی می‌باشند. با برآزش خطی بر نمودار پارامتر کیفیت امواج برشی در برابر فرکانس، معادله پارامتر کیفیت وابسته به فرکانس، محاسبه می‌گردد که در این مطالعه از رابطه (۱۶) تبعیت کی کند (شکل ۸).

$$Q_s(f) = Q_0 f^n = 130f^{0.7} \quad (16)$$

همان‌گونه که گفته شد  $Q_0$  نشان‌دهنده‌ی میزان فعالیت لرزه‌ای منطقه می‌باشد. مطالعات گذشته [۱۵] نشان داده‌اند که  $Q_0$  پایین تر از ۲۰۰ نشان از فعالیت بالای لرزه‌ای منطقه دارد، به دست آمدن ۱۳۰ برای این پارامتر در این منطقه نشان از فعال بودن منطقه مورد بررسی دارد.



شکل (۸): پارامتر کیفیت به‌دست آمده (خط) و مناسب‌ترین خط برازش شده (خط چین) به همراه یک انحراف معیار در هر فرکانس (خطوط آبی).

به دست آوردن پارامتر کیفیت موضوع بسیاری از مطالعات در گذشته بوده است که برخی از آنها در جدول (۴) نمایش داده

بوده و  $M_{0i}$  و  $f_{ci}$  پارامترهای مجهول می باشند. حال برای محاسبه پارامترهای مربوط به هر چشمه از روش جستجوی نقطه به نقطه<sup>۸</sup> استفاده شده است. در این روش بدین صورت عمل می گردد که برای هر پارامتر بازه ای مشخص شده و میزان نرخ ممان لرزه ای برای تمامی نمونه های تعریف شده در این بازه ها محاسبه می شود. تفاوت نرخ ممان لرزه ای محاسبه شده با مقدار مشاهده ای برای هر چشمه با استفاده از روش حداقل مجذور خطاها محاسبه می گردد. مجموعه پارامترهایی که کمترین میزان خطا را ایجاد کند به عنوان پارامترهای مورد قبول برای آن چشمه در نظر گرفته می شود. لازم به ذکر است که برای محاسبه بزرگای گشتاوری، رابطه (۱۹) که بزرگای را به ممان لرزه ای مربوط می سازد، مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲].

$$M_{Wi} = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \quad (19)$$

در شکل (۱۰) نرخ ممان لرزه ای حاصل از معکوس سازی با استفاده از رابطه (۱۶)، برای تمامی زمین لرزه های مورد استفاده در این مطالعه، نشان داده شده است.

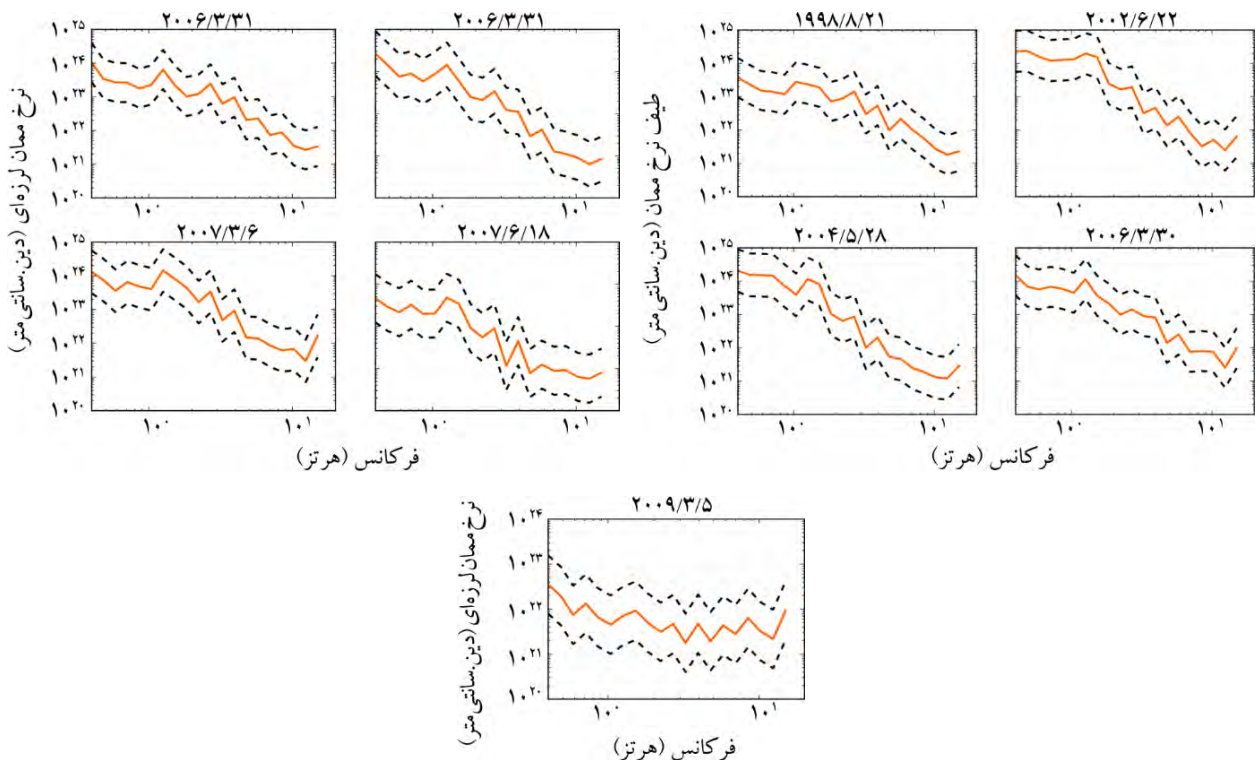
فرکانس گوشه، افت تنش و شعاع گسیختگی برای هر چشمه محاسبه گردند برای نیل به این هدف باید مدل مجذور امگا را برای تمامی چشمه ها در نظر بگیریم. رابطه (۱۷) بیانگر مدل مجذور امگای اکی [۱۴] می باشد که توسط برون [۲۰] تکمیل شده است.

$$E_i(f) = \frac{c4\pi^2 f^2 M_{0i}}{1 + (f/f_{ci})^2} \quad (17)$$

در این رابطه، توان فرکانس گوشه برابر با ۲ می باشد. در این معادله  $M_{0i}$  و  $f_{ci}$  به ترتیب برابر با ممان لرزه ای و فرکانس گوشه می باشند و  $c$  یک پارامتر ثابت بوده که مطابق رابطه (۱۱) تعریف شده است. در این مطالعه مقدار  $R_0$ ،  $\beta_s$ ،  $\rho_s$ ،  $F$ ،  $V$ ،  $R_{\theta\phi}$  برابر با ۰/۵۵،  $1/\sqrt{2}$ ، ۲، ۲/۸، ۲/۸، ۳/۵ کیلومتر بر ثانیه و ۱ کیلومتر انتخاب شده اند [۲۱]. با جایگذاری و مشخص نمودن معلومات و مجهولات، رابطه (۱۸) حاصل می شود:

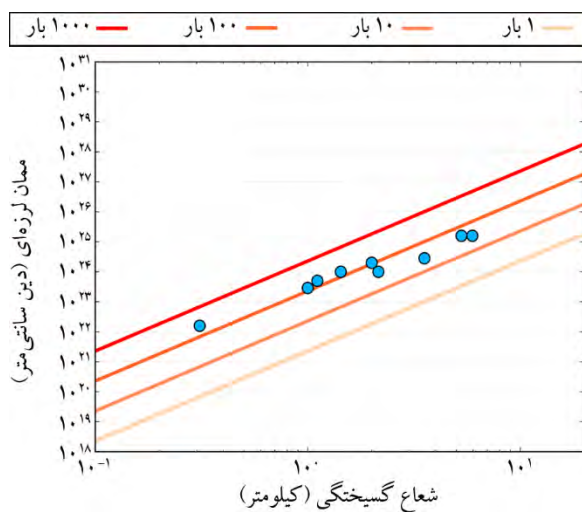
$$\frac{E_i(f)}{c4\pi^2 f^2} = \dot{M}_{0i}(f) = \frac{M_{0i}}{1 + (f/f_{ci})^2} \quad (18)$$

در این رابطه  $\dot{M}_{0i}$  نرخ ممان لرزه ای است که قسمت معلوم



شکل (۱۰): نرخ ممان لرزه ای به دست آمده حاصل از داده های شتاب نگاری (خط) و انحراف از معیار (خط چین) برای تمامی زمین لرزه های بانک داده.

گسیختگی نیز در میزان افت تنش نقش مهمی را ایفا می نمایند. آنچه در شکل (۱۱) مشاهده می شود مؤید این مطلب است. افت تنش منطقه ای با توجه به اینکه چشمه های لرزه زا در یک ایالت زمین ساختی واقع شده اند قابل محاسبه می باشد. افت تنش برای منطقه مورد مطالعه به وسیله برازش خطی بر نمودار ممان لرزه ای در مقابل فرکانس گوشه و استفاده از رابطه (۲۲) [۱۰] محاسبه می گردد. شکل (۱۲) نمایش دهنده ی نمودار فرکانس گوشه- ممان لرزه ای برای مطالعه حاضر می باشد.



شکل (۱۱): نمودار ممان لرزه ای زمین لرزه بر حسب شعاع گسیختگی چشمه لرزه زا به همراه خطوط ثابت افت تنش مربوط به داده های شتاب نگاری برای منطقه قم.

همان طور که قابل پیش بینی می باشد، نرخ ممان لرزه ای در زلزله های آوج و سیلاخور که بزرگای بیشتری دارند، بزرگ تر می باشد.

نتایج به دست آمده از حل اثر چشمه لرزه زا با استفاده از روش جستجوی نقطه به نقطه، در جدول (۵) آورده شده است. لازم به ذکر است که شعاع گسیختگی ( $\Gamma_i$ ) از رابطه (۲۰) به دست می آید.

$$\Gamma_i = \frac{2.34\beta_s}{2\pi f_{ci}} \quad (20)$$

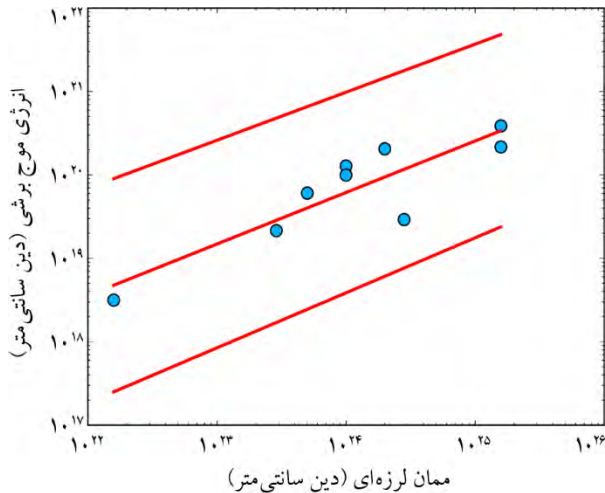
حال برای توصیف هر چه بهتر پارامترهای به دست آمده برای هر چشمه و نیز بر آورد خصوصیات منطقه ای جنبش نیرومند زمین، به تحلیل بیشتر نتایج به دست آمده از جستجوی نقطه به نقطه می پردازیم. نمودار ممان لرزه ای بر حسب شعاع گسیختگی در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. در این نمودار می توان خطوط ثابت افت تنش را با استفاده از رابطه (۲۱) به دست آورد.

$$\Delta\sigma = \frac{7M_{oi}}{16r^3} \times 10^{-21} \quad (21)$$

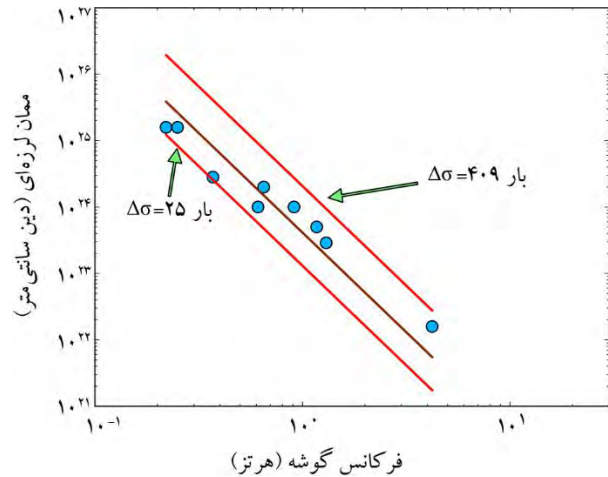
افت تنش یکی از پارامترهای بسیار مهم در تحلیل چشمه لرزه می باشد که معیاری برای نیروی امواج با فرکانس بالا در طیف زلزله می باشد. لازم به ذکر است که افت تنش صرفاً به بزرگای زلزله مربوط نیست بلکه سازوکار کانونی و نیز مساحت

جدول (۵): نتایج به دست آمده از حل اثر چشمه لرزه زا به تفکیک زلزله.

تاریخ وقوع	بزرگای گشتاوری	ممان لرزه ای (دین.ساتی متر)	فرکانس گوشه (هرتز)	افت تنش (بار)	شعاع گسیختگی
۱۹۹۸/۸/۲۱	۴/۹۴	۹/۸۴E+۲۲	۱/۳	۱۲۶	۱
۲۰۰۲/۶/۲۲	۶/۱	۶/۴۰E+۲۳	۰/۲۲	۳۳	۵/۹۵
۲۰۰۴/۵/۲۸	۵/۳	۱/۷۴E+۲۳	۰/۶۱	۴۴	۲/۱۵
۲۰۰۶/۳/۳۰	۵/۳	۲/۶۰E+۲۳	۰/۹۱	۱۵۰	۱/۴۳
۲۰۰۶/۳/۳۱	۵/۱	۱/۶۰E+۲۳	۱/۱۷	۱۶۱	۱/۱۱
۲۰۰۶/۳/۳۱	۶/۱	۷/۸۲E+۲۳	۰/۲۵	۴۷	۵/۲۹
۲۰۰۷/۳/۶	۵/۵	۳/۷۶E+۲۳	۰/۶۵	۱۱۰	۲
۲۰۰۷/۶/۱۸	۵/۶	۲/۶۰E+۲۳	۰/۳۷	۲۸	۳/۵۴
۲۰۰۹/۳/۵	۴/۱	۱/۰۱E+۲۲	۴/۲۱	۲۳۵	۰/۳۱



شکل (۱۳): انرژی موج برشی بر حسب ممان لرزه‌ای برای زمین لرزه‌های موجود در بانک داده (دایره)، به همراه بهترین مدل برازش شده و یک انحراف معیار (خط).



شکل (۱۲): نمودار ممان لرزه‌ای بر حسب فرکانس گوشه برای زمین لرزه‌های موجود مربوط به داده‌های شتاب‌نگاری (دایره) به همراه بهترین مدل برازش شده (خط قهوه‌ای) و نیز یک انحراف معیار برای داده‌ها (خطوط قرمز) برای منطقه قم.

### ۱۰-۳- اثر ساختگاه

اثر تشدید ساختگاهی نیز از ماتریس جواب به دست آمده از حل معادله ماتریسی روش حل معکوس تعمیم یافته برای تمامی ساختگاه‌های مورد مطالعه به دست می‌آید. شکل (۱۴)، طیف تشدید ساختگاه را برای تمامی ایستگاه‌های موجود در این مطالعه نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ایستگاه مرجع از تشدید ساختگاهی فرض شده تبعیت می‌کند.

همان‌طور که گفته شد، تشدید ساختگاهی میزان اثرگذاری ساختگاه در هر ایستگاه بر امواج لرزه‌ای می‌باشد که از دیگر فاکتورهایی می‌باشد که در تحلیل خطر لرزه‌ای و نیز شبیه‌سازی سناریوهای مختلف لرزه‌ای در ساختگاه‌ها، نقش مهمی را ایفا می‌کند. در شکل (۱۴) قابل مشاهده است که به طور مثال در ایستگاه حسن آباد که سرعت موج برشی کم است، میزان تشدید ساختگاهی بالا بوده و یا در ایستگاه درود که سرعت موج برشی بالاست، میزان تشدید ساختگاهی کم می‌باشد.

در این مطالعه افت تنش منطقه‌ای به میزان ۸۱ بار محاسبه شده است.

$$\Delta\sigma = \frac{M_0 f_c^3}{(4.9 \times 10^6 \times \beta_s)^3} \quad (22)$$

افت تنش متوسط منطقه‌ای از جمله فاکتورهایی است که برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف لرزه‌ای و ایجاد رکوردهای شبیه‌سازی شده از اهمیت فراوانی برخوردار است تا بتوان با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده، شناخت بهتری از منطقه و در نهایت تحلیل خطر دقیق‌تری برای منطقه برآورد نمود.

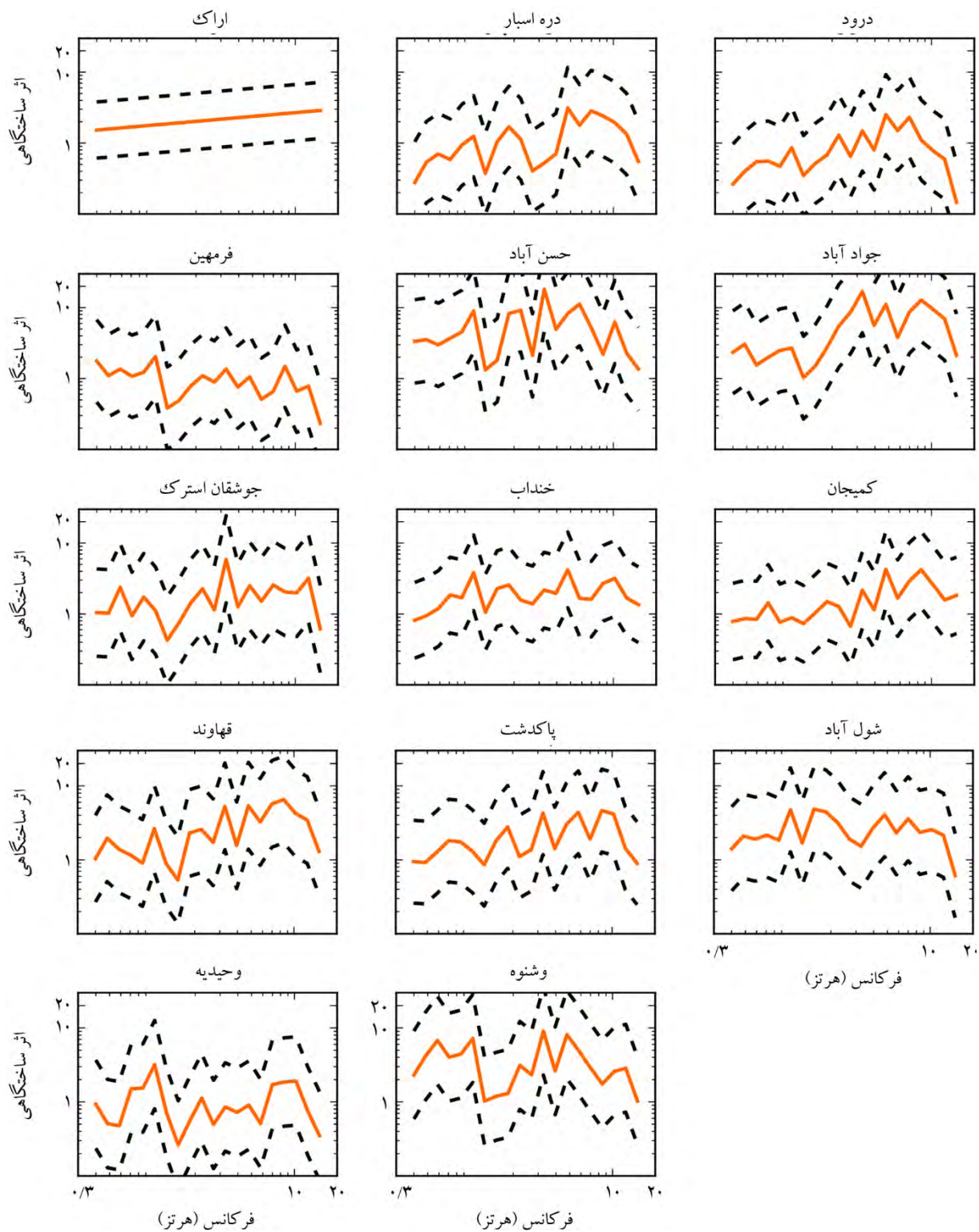
میزان نسبت انرژی موج برشی به ممان لرزه‌ای یکی دیگر از مواردی است که در تحلیل پارامترهای منطقه‌ای چشمه لرزه‌زا از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. شکل (۱۳) این نسبت را برای داده‌های موجود نمایش می‌دهد همچنین بهترین نمودار برازش شده به آنها به همراه یک انحراف معیار نیز در این نمودار نشان داده شده است.

خط برازش شده در شکل (۱۳) از روابط زیر تبعیت می‌کند:

$$E_s / M_0 = 5.8 \times 10^{-5} \quad (23)$$

$$\log(E_s) = -4.2 + \log M_0 \quad (24)$$





شکل (۱۴): تابع تشدید ساختگاه بر حسب فرکانس، به دست آمده از روش معکوس سازی تعمیم یافته (خط پر) به همراه محدوده یک برابری انحراف معیار (خط چین ها).

### ۱۱- نتیجه گیری

پارامترهای لرزه‌ای در مناطق مختلف جهت شناخت هر چه بیشتر لرزه‌زمین ساخت ایران، پارامترهای لرزه‌ای در منطقه قم مورد

در این مطالعه با توجه به نیاز کشورمان به بررسی‌های



2. Motazedian, D. (2006) Region-specific key seismic parameters for earthquakes in Northern Iran. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96**(4), 1383-1395.
3. Hartzell, S. (1992) Site response estimation from earthquake data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**(6), 2308-2327.
4. Berberian, M. (2006) Contribution to the seismotectonics of Iran (part 2). *Geological Survey of Iran*, **39**, 429-517.
5. Nowroozi, A. (1976) Seismotectonic provinces of Iran. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **66**(4), 1249-1276.
6. Khademi, M.R., Nayeri, A. (1976) *Seismotectonic provinces of Iran*. Iranian Committee on Large Dams; Bulletin 6.
7. Mirzaei, N., Mengtan, G., Yuntai, C. (1998) Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismo tectonic provinces. *J. Earthquake Pred. Res.*, **7**(4), 465-95.
8. Babaahmadia, A., Safaei, H., Yassaghi, A., Vafa, H., Naeimi, A., Madanipour, S., Ahmadi, M. (2010) study of Quaternary structures in the Qom region, West Central Iran. *Journal of Geodynamics*, **50**, 355-367.
9. Ansari, A., Noorzad, A., Zare, M., (2007) Application of wavelet multi-resolution analysis for correction of seismic acceleration records, *J. Geophys. Eng.*, **4**(4), 1-16.
10. Husid, P. (1967) *Gravity Effects on the Earthquake Response of Yielding Structures*. Report of Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California.
11. Kinoshita, SH. (1994) Frequency-Dependent Attenuation of Shear Waves in the Crust of the Southern Kanto Area, Japan. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**(5), 1387-1396.
12. Boore, D.M. (1983) Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**(6), 1865-1894.
13. Anderson, J.G. and Hough, S.E. (1984) A Model for the Shape of the Fourier Amplitude Spectrum of Acceleration at High Frequencies. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **74**(5), 1969-1993.

بررسی قرار گرفت. این منطقه از ایران به دلیل موقعیت مهم جغرافیایی و مذهبی و نیز جمعیت بالای آن، مطالعات بیشتر در زمینه پارامترهای جنبش نیرومند زمین را طلب می کند. در این مطالعه در منطقه قم و با به کارگیری روش معکوس سازی تعمیم یافته، بانک داده که شامل داده های جنبش قوی<sup>۹</sup> مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی می باشد، گردآوری شد. با استفاده از روش معکوس سازی تعمیم یافته و کدنویسی های رایانه ای، پارامترهای لرزه ای مانند فاکتور کیفیت امواج برشی، افت تنش، فرکانس گوشه، شعاع گسیختگی و غیره برای تمامی چشمه های لرزه ای بانک داده و نیز میزان تشدید ساختگاهی در تمامی ایستگاه های مورد بررسی به دست آمدند. با تحلیل داده های به دست آمده از زلزله ها، پارامترهای لرزه ای منطقه ای به دست آمدند. فاکتور کیفیت امواج برشی میزان  $Q = 130f^{0.7}$  را در این منطقه نمایش می دهد، این میزان با مطالعات پیشین در ایران و در مناطق دیگر مقایسه شد و در تطابق با این مطالعات قرار دارد، پایین بودن  $Q_0 = 130$  نشانی از بالا بودن فعالیت های لرزه ای در این منطقه می باشد. افت تنش منطقه که به صورت معیاری برای قدرت امواج با فرکانس بالا در طیف لرزه ای در نظر گرفته می شود، به طور متوسط میزان ۸۱ بار را نشان می دهد. وابستگی انرژی موج تولید شده با ممان لرزه ای به صورت معادله  $\log(E_s) = -4.2 + \log M_0$  به دست آمد. اثر تشدید ساختگاهی در فرکانس های مختلف محاسبه شد و نمودار اثر ساختگاهی در ایستگاه های بانک داده ترسیم گردید. نتایج به دست آمده در این مطالعه در یک هرچه بیشتری از منطقه قم به دست می دهد، این نتایج در شبیه سازی سناریوهای مختلف لرزه ای در این منطقه و تولید رکوردهای شبیه سازی شده و نیز ارائه روابط کاهندگی با استفاده از این رکوردها کمک شایانی می نماید.

## مراجع

1. Andrews, D.J. (1986) Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size. *Earthquake Source Mechanics*. American Geophysical Union, **37**, 259-267.

- |                              |                        |  |
|------------------------------|------------------------|--|
| Anelastic Attenuation        | ۵- کاهشدهی غیر الاستیک | 14. Aki, K. (1967) Scaling law of seismic spectrum. <i>J. Geophys. Res.</i> , <b>72</b> (4), 1217-1231.  |
| Overdetermined               | ۶- بیش تعیین شده       | 15. Yoshimoto, K., Sato, H., and Ohtake, M. (1993) Frequency-dependent attenuation of P and S waves in the Kanto area, Japan, based on the coda normalization method. <i>Geophys. J. Int.</i> , <b>114</b> , 165-174.  |
| Singular Value Decomposition | ۷- جداسازی مقادیر تکین | 16. Zafarani, H., Hassani, B. and Ansari, A. (2012) Estimation of earthquake parameters in the Alborz seismic zone, Iran using generalized inversion method. <i>Soil Dynam. Earthq. Eng.</i> , <b>42</b> , 197-218.  |
| Grid Search                  | ۸- جستجوی نقطه به نقطه | 17. Ghasemi, H., Kamalian, N., Hamzehloo, H., Beitollahi, A. (2006) Determination of quality factor of direct shear waves, $Q_s$ , in Alborz region using near-field strong motion records of Kojor earthquake in frequency range of 1~32 Hz. <i>Physics of the Earth and Space</i> , <b>31</b> , 103-112. |
| Strong-Motion                | ۹- جنبش قوی            | 18. Mousavi, M., Zafarani, H., Noorzad, A., Ansari, A., Bargi, KH. (2007) Analysis of Iranian strong motion data using the specific barrier model. <i>J. Geophys. Eng.</i> , <b>4</b> (4), 1-14.   |
|                              |                        | 19. Raoof, M., Herrmann, R.B., and Malagnini, L. (1999) Attenuation and excitation of three-component ground motion in southern California. <i>Bull. Seismol. Soc. Am.</i> , <b>89</b> (4), 888-902.   |
|                              |                        | 20. Brune, J.N. (1970) Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. <i>J. Geophys. Res.</i> , <b>75</b> (26), 4997-5009.   |
|                              |                        | 21. Boore, D. (2003) Simulation of ground motion using the stochastic method. <i>Pure Appl. Geophys.</i> , <b>160</b> , 635-76.  |
|                              |                        | 22. Engdahl, E.R., Jackson, J.A., Myers, S.C., Bergman, E.A., Priestley, K. (2006) Relocation and assessment of seismicity in the Iran region. <i>Geophys. J. Int.</i> , <b>167</b> (2), 761-778.  |

#### واژه نامه

- |                        |                     |
|------------------------|---------------------|
| Cosine Taper           | ۱- تابع کسینوسی     |
| Fast Fourier Transform | ۲- تبدیل فوریه سریع |
| Nyquist Frequency      | ۳- فرکانس نایکوئیست |
| Geometrical Spreading  | ۴- گسترش مسیر       |