

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 هرترتز 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 ساختمانی 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 ساختمانی نیز برای تمامی ایستگاه‌های ثبت کننده محاسبه شده است.

واژگان کلیدی: حل معکوس تعمیم یافته، پارامترهای جنبش نیرومند زمین، فاکتور کیفیت، افت تنش، اثر ساختمانی، 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

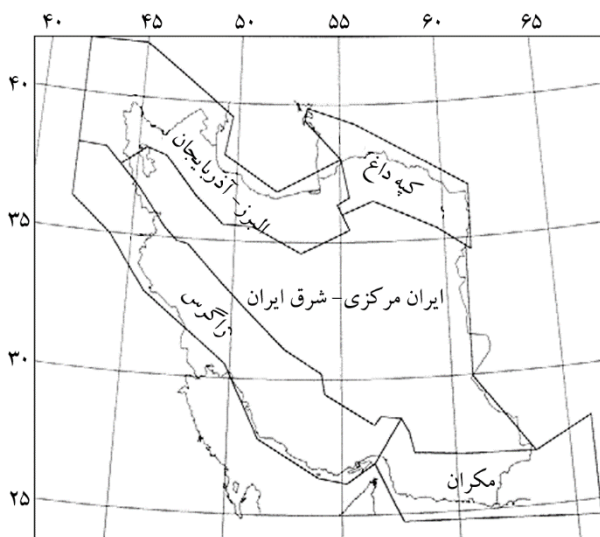
مهندسی زلزله، تهران

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 زمین‌لرزه‌ها 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 زمین‌لرزه‌هایی

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.

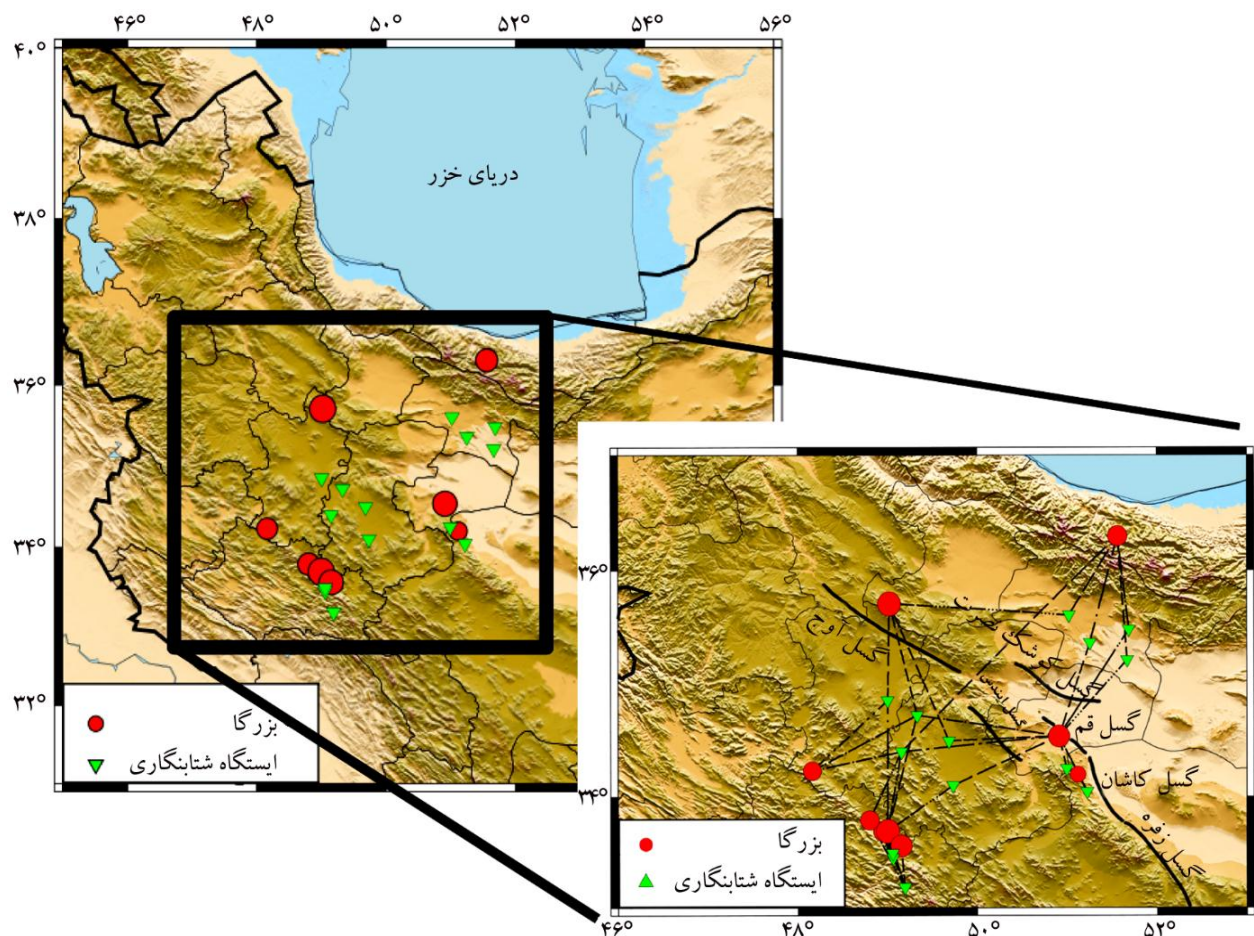
۲- لرزه‌زمین‌ساخت منطقه مورد مطالعه

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).

جدول (۱): اطلاعات ایستگاه‌های بانک داده.

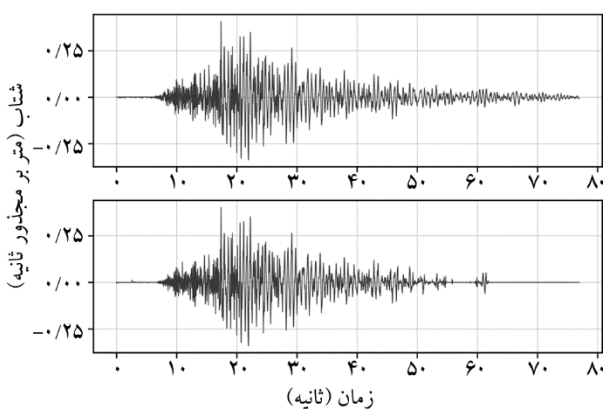
شماره ایستگاه	کد ایستگاه	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	V_{s30}	تعداد رکورد
۱	ARK	اراک	۳۴/۱۰۱	۴۹/۷۳۱	۷۱۳	۲
۲	DAS	دره اسبار	۳۳/۴۵	۴۹/۰۶	-	۳
۳	DRD	درود	۳۳/۴۹۱	۴۹/۰۵۹	۷۷۱	۴
۴	FMH	فرمهین	۳۴/۴۹۸	۴۹/۶۸۴	۵۸۹	۲
۵	HAB	حسن آباد	۳۵/۳۶۷	۵۱/۲۵۳	۴۵۰	۲
۶	JVD	جوادآباد	۳۵/۲۱۵	۵۱/۶۶۸	-	۲
۷	JQS	جوشقان استرک	۳۴/۰۴۵	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	شول آباد	۳۳/۱۸۴	۴۹/۱۹۲	۱۰۸۴	۴
۱۳	VAH	وحیدیه	۳۵/۶۰۸	۵۱/۰۱۹	۳۰۰	۲
۱۴	VES	وشنوه	۳۴/۲۵۱	۵۰/۹۹۵	-	۲

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.

جدول (۲): اطلاعات مربوط به زمین لرزه‌های 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	کپک	۵/۷	۳۴/۵۴	۵۰/۹۴	ایران مرکزی- شرق ایران
۲۰۰۹/۳/۵	سفیددشت	۴/۲	۳۴/۱۹۹	۵۱/۱۱۹	ایران مرکزی- شرق ایران



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 شول آباد برای زلزله بروجرد به تاریخ ۲۰۰۶/۳/۳۱ (۱۳۸۵/۱/۱۱).

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).

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

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

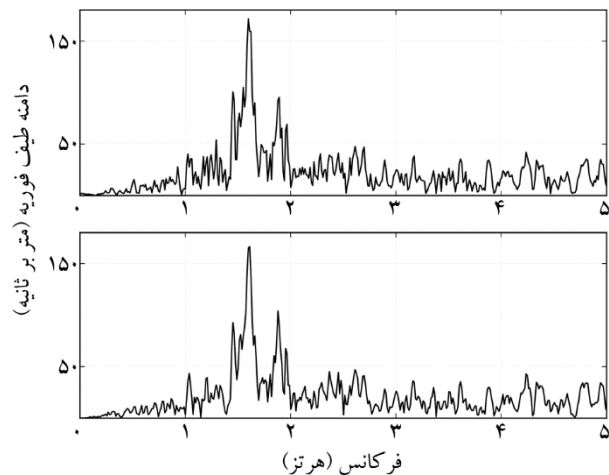
در معادلات (۱) و (۲) $E(t)$ ، انرژی رکورد در لحظه t ، $a(t)$ رکورد شتاب زمین لرزه در لحظه t ، E_T ، انرژی کل رکورد و T ، برابر با زمان کل رکورد می‌باشد؛ اما این روش در تخمین نقطه پایانی موج برشی در حوزه‌های آبرفتی دقیق نیست. برای برطرف کردن این کاستی برای نقطه پایان موج برشی از روش کینوشیتا [۱۱] استفاده 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 یک‌باره 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^۱ 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 آن‌چنان 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).

همان‌طور که در شکل (۴) مشهود می‌باشد، طیف فوریه به وسیله فیلتر میان‌گذر 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 شتاب‌نگاری

به طور کلی آنچه شتاب‌نگارها 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.

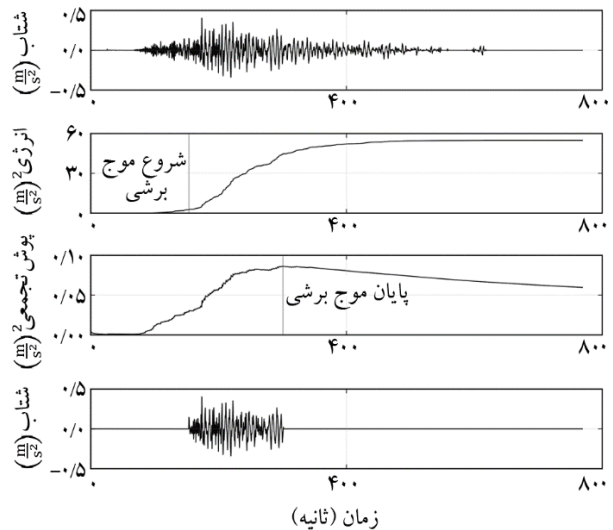
۷-۱- اثر مسیر

اثر مسیر خود به دو عامل؛ گسترش مسیر^۴ و کاهندگی غیر الاستیک^۵ 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 β_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) نشان‌دهنده مراحل جداسازی موج برشی می‌باشد.

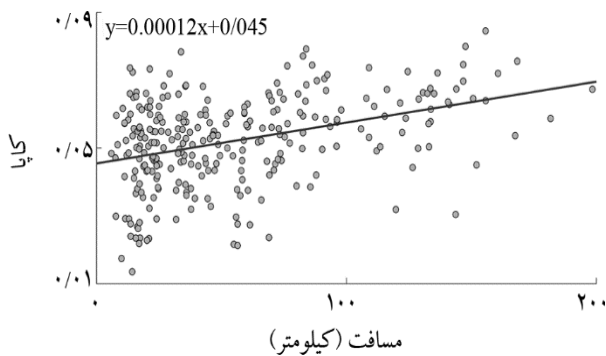


شکل (۵): چگونگی جداسازی موج برشی مستقیم. به ترتیب از بالا: رکورد پیش از جدا کردن موج برشی، نقطه شروع موج برشی در نمودار انرژی موج، نقطه پایان موج برشی در نمودار پوش تجمعی و موج جدا شده.

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^۲ 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 باقی‌مانده 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^۳ برای تمامی رکوردها برابر ۱۰۰ هرتز می‌باشد؛ در نتیجه فرکانس نایکویست در بازه فرکانسی در نظر

قسمت فرکانس بالای طیف فوریه هر کدام برازش می‌گردد و تمامی شیب‌های به‌دست آمده از این نمودارها در نمودار دیگری در مقابل فاصله ایستگاه ثبت کننده از مرکز زلزله رسم می‌گردند و خطی به نمودار به‌دست آمده برازش می‌گردد، عرض از مبدأ خط برازش شده در نمودار به‌دست آمده بیانگر پارامتر کاهندگی فرکانس‌های بالا می‌باشد (برای مؤلفه‌های افقی و عمودی جداگانه محاسبه می‌شود).



شکل (۶): نمودار شیب خطوط برازش شده طیف فوریه به‌صورت لگاریتمی در فرکانس‌های 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 لرزه‌زا در واقع خصوصیات امواج تولید شده در هنگام وقوع زمین لرزه می‌باشد. این اثر ابتدا به صورت بزرگای زلزله مطرح می‌شد اما با افزایش شناخت بشر نسبت به گسل‌ها و نحوه تولید امواج لرزه‌ای با پارامترهای دقیق‌تری مانند ممان لرزه‌ای بیان گردید. برای اولین بار در سال ۱۹۶۷ اکی [۱۴] مدل مجذور امگا را برای طیف چشمه لرزه‌زا مطرح کرد. این مدل هم‌اکنون نیز از رایج‌ترین مدل‌های مورد استفاده برای چشمه لرزه‌زاست. 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 می‌توان طیف چشمه را برای بزرگاهای مختلف تحلیل کرد.

به‌طور کلی به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [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 به‌صورت $Q=Q_0f^n$ در نظر گرفته می‌شود. از Q_0 به‌عنوان معیاری برای میزان فعالیت لرزه‌ای منطقه استفاده می‌شود، بدین صورت که هرچه این میزان بیشتر باشد نشان‌دهنده‌ی فعالیت کم‌تر لرزه‌ای منطقه و هرچه کمتر باشد منطقه از لحاظ لرزه‌ای فعال‌تر 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 لرزه‌ها در ساختگاه، تشدید می‌باشد که ساختگاه، بر امواج زمین لرزه اعمال می‌کند. این تشدید می‌تواند باعث خسارت شدید حتی برای زمین لرزه‌هایی که قدرت کمی دارند، گردد. کاهندگی فرکانس بالا عامل دیگری در اثر ساختگاه می‌باشد که در فرکانس‌های بالا (عمدتاً بالای ۱۰ هرتز) روی می‌دهد. بدین ترتیب $G(f)$ در معادله (۵) به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$G(f) = A(f) \cdot D(f) \quad (۸)$$

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

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

κ_0 ، پارامتر کاهندگی فرکانس‌های بالا می‌باشد و از روش برازش خط به شیب به‌دست آمده از قسمت فرکانس بالای طیف هر رکورد به دست می‌آید (شکل ۶). این روش بدین صورت است که ابتدا برای تمامی رکوردهای موجود در بانک داده، خطی به

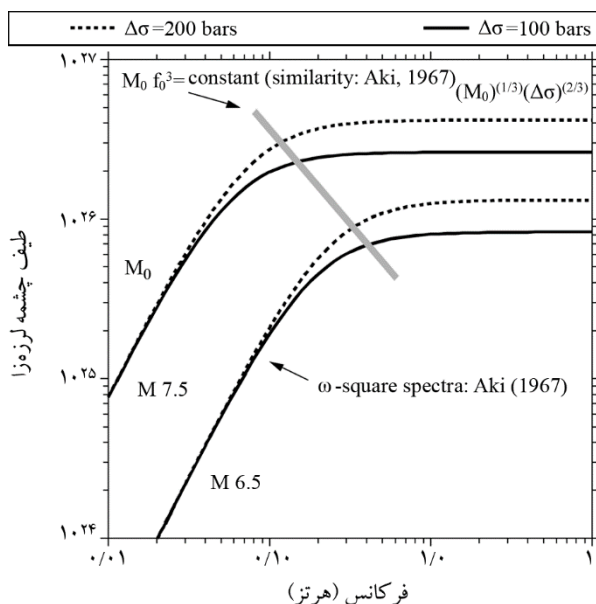
معمولاً برابر با یک کیلومتر در نظر گرفته می‌شود. تمامی اثرات گفته شده با استفاده از روش حل معکوس تعمیم یافته به‌طور هم‌زمان به دست می‌آیند.

۸- روش حل معکوس تعمیم یافته

با جایگزین کردن مدل‌های گفته شده برای هر اثر در رابطه (۵) و اعمال عملگر لگاریتم به رابطه و ساده‌سازی آن، معادله زیر حاصل می‌گردد:

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

در معادله (۵) مشاهده می‌شود که با ضرب و تقسیم کردن هر تابعی از فرکانس، جواب معادله تغییر نمی‌کند. این مطلب نشان‌دهنده‌ی این است که معادله دارای یک درجه آزادی می‌باشد 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 به‌عنوان ایستگاه مرجع در نظر می‌گیرند و با استفاده از اطلاعات آن ایستگاه درجه آزادی مسئله را حل می‌کنند. ایستگاه مرجع، ایستگاهی است که پاسخ ساختگاهی را در آن بتوان مقدار از پیش تعیین شده‌ای فرض کرد. ایستگاه‌های با ساختگاه سنگی میزان تشدید کمتری را از خود نشان می‌دهند؛ پس این ایستگاه‌ها برای انتخاب به‌عنوان ایستگاه مرجع مناسب می‌باشند، برای شناخت ایستگاه‌های با ساختگاه سنگی از سرعت موج برشی در عمق کم (۳۰ متری) استفاده می‌شود؛ بدین صورت که ساختگاه‌های با سرعت موج برشی زیاد را ساختگاه‌های سنگی (بیشتر از ۷۰۰ متر بر ثانیه) و ساختگاه‌های با سرعت موج برشی کم را ساختگاه‌های غیر سنگی می‌دانند. پس از انتخاب ایستگاه مرجع برای حل درجه آزادی، روش کار بدین صورت است که برای ایستگاه مرجع، اثر ساختگاهی معلوم فرض می‌گردد، پس برای زلزله‌هایی که این ایستگاه ثبت کرده است، اثر چشمه لرزه‌زا قابل محاسبه است و با معلوم بودن اثر چشمه لرزه‌ها را ثبت کرده‌اند قابل محاسبه است و این روند (با شرط مرتبط



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

در حالت کلی، معادله طیف چشمه لرزه‌زا را می‌توان به‌صورت 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 می‌شود و $S(M_0, f)$ طیف تغییر مکان چشمه لرزه‌زا بوده و برای مدل مجذور امگا، توسط رابطه (۱۲) عنوان می‌شود:

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

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

در رابطه (۱۱)، $R_{\theta\phi}$ ضریب الگوی تشعشع می‌باشد که معمولاً تحت بازه‌ای مناسب از زوایای مختلف میانگین گرفته می‌شود؛ V بیانگر سهم کل انرژی موج برشی در مؤلفه‌های افقی رکورد می‌باشد که به‌طور معمول برابر با $1/\sqrt{2}$ در نظر گرفته می‌شود؛ F بیانگر اثر سطح آزاد است که تقریباً در تمامی مطالعات برابر با دو در نظر گرفته می‌شود؛ ρ_s برابر با چگالی محیط در مجاورت گسل می‌باشد؛ β_s برابر با سرعت موج برشی در مجاورت گسل می‌باشد؛ R_0 به‌عنوان فاصله مرجع تعریف می‌شود 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) σ_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	زلزله های ثبت شده در ایستگاه مرجع
اراک	دره اسبار	۶ ۸
	۱ درود	
	۲ خنداب	
	۳ شول آباد	
	۴ کمیجان	
	۵ قهاوند	
	۶ فرمهین	
	۷ حسن آباد	
	۸ جوادآباد	
۹ جوشقان استرک		
	پاکدشت	
	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^۷ برای حل معادله استفاده شده است. در این روش، ماتریس

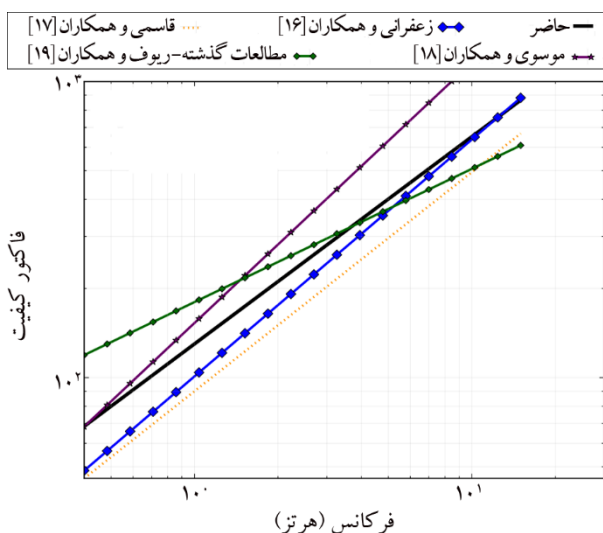
$$[Y] = [A(\text{ایستگاه} | \text{چشمه} | \text{مسیر})][X]$$

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

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.

۱۰-۲- 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،

۱۰-۱- نتایج به‌دست آمده از حل معکوس تعمیم یافته

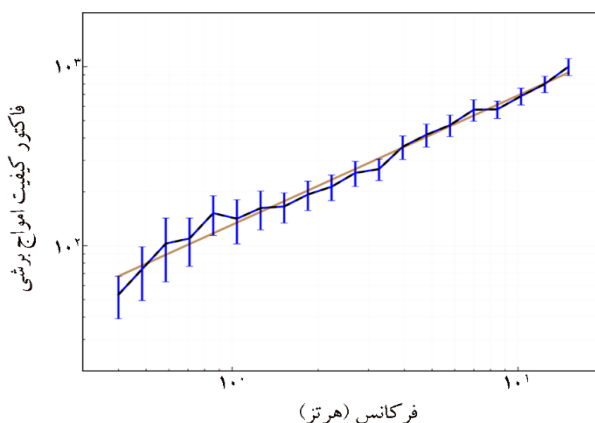
پس از به دست آمدن اثرات چشمه، مسیر و ساختگاه، هر کدام را جداگانه مورد تحلیل قرار می‌دهیم.

۱۰-۱-۱- 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 برازش 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 پایین‌تر 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 می‌باشند. حال برای محاسبه پارامترهای مربوط به هر چشمه از روش جستجوی نقطه به نقطه^۸ استفاده شده است. در این روش بدین صورت عمل می‌گردد که برای هر پارامتر بازه‌ای مشخص شده و میزان نرخ ممان لرزه‌ای برای تمامی نمونه‌های تعریف شده در این بازه‌ها محاسبه می‌شود. تفاوت نرخ ممان لرزه‌ای محاسبه شده با مقدار مشاهده‌ای برای هر چشمه با استفاده از روش حداقل مجذور خطاها محاسبه می‌گردد. مجموعه پارامترهایی که کمترین میزان خطا را ایجاد کند به عنوان پارامترهای مورد قبول برای آن چشمه در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که برای محاسبه بزرگای گشتاوری، رابطه (۱۹) که بزرگای را به ممان لرزه‌ای مربوط می‌سازد، مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲].

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

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

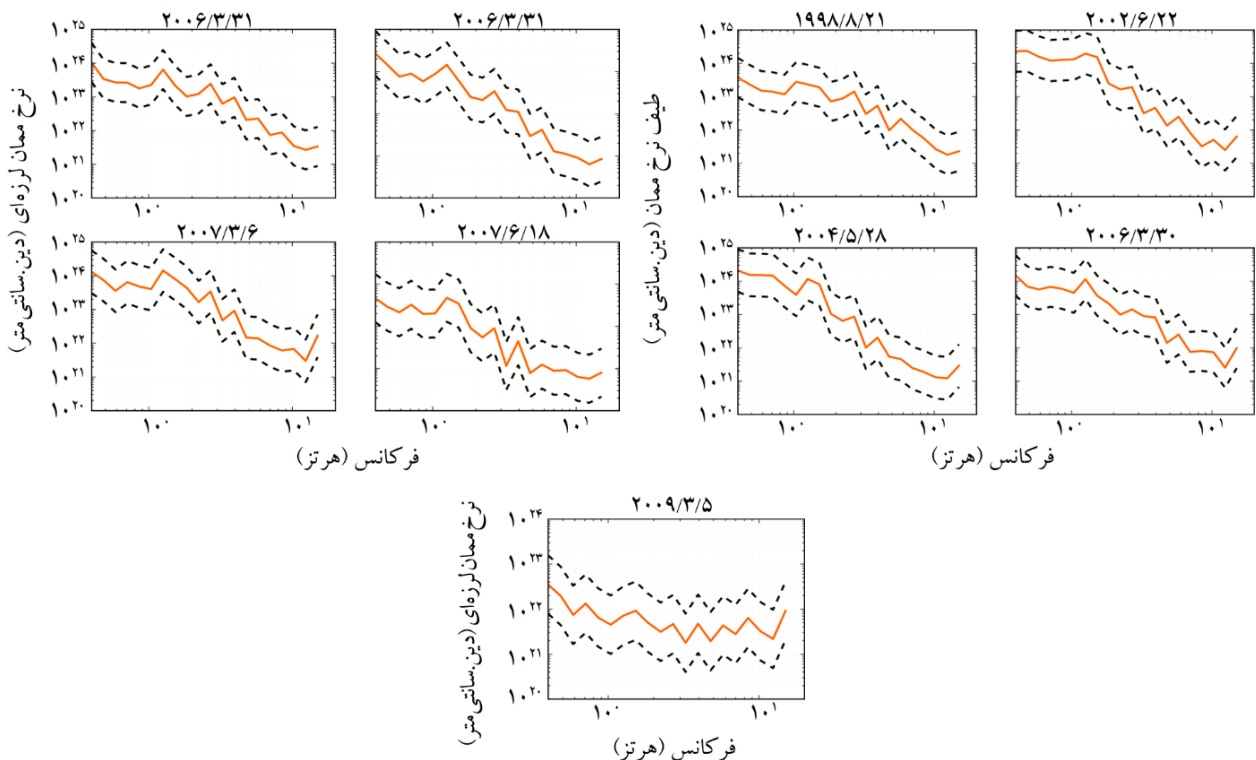
فرکانس گوشه، افت تنش و شعاع گسیختگی برای هر چشمه محاسبه گردند برای نیل به این هدف باید مدل مجذور امگا را برای تمامی چشمه‌ها در نظر بگیریم. رابطه (۱۷) بیانگر مدل مجذور امگای اکی [۱۴] می‌باشد که توسط برون [۲۰] تکمیل شده است.

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

در این رابطه، توان فرکانس گوشه برابر با ۲ می‌باشد. در این معادله M_{0i} و f_{ci} به ترتیب برابر با ممان لرزه‌ای و فرکانس گوشه می‌باشند و c یک پارامتر ثابت بوده که مطابق رابطه (۱۱) تعریف شده است. در این مطالعه مقدار R_0 ، β_s ، ρ_s ، F ، V ، $R_{\theta\phi}$ برابر با ۰/۵۵، $1/\sqrt{2}$ ، ۲، ۲/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۳/۵ کیلومتر بر ثانیه و ۱ کیلومتر انتخاب شده‌اند [۲۱]. با جایگذاری و مشخص نمودن معلومات و مجهولات، رابطه (۱۸) حاصل می‌شود:

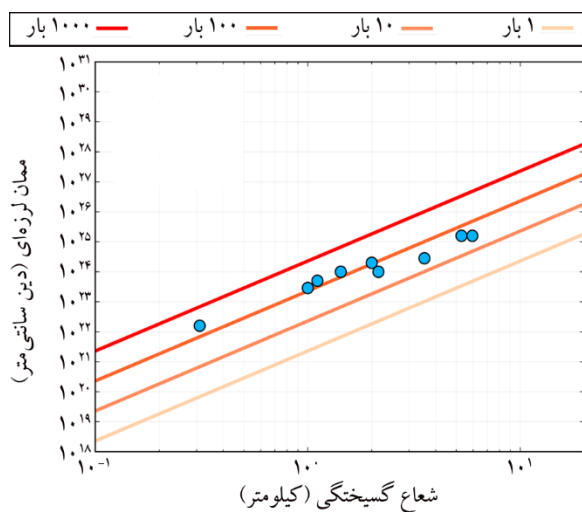
$$\frac{E_i(f)}{c4\pi^2 f^2} = \dot{M}_{0i}(f) = \frac{M_{0i}}{1 + (f/f_{ci})^2} \quad (18)$$

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



شکل (۱۰): نرخ ممان لرزه‌ای به دست آمده حاصل از داده‌های شتاب‌نگاری (خط) و انحراف از معیار (خط چین) برای تمامی زمین لرزه‌های بانک داده.

گسیختگی نیز در میزان افت تنش نقش مهمی را ایفا می‌نمایند. آنچه در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود مؤید این مطلب است. افت تنش منطقه‌ای با توجه به اینکه چشمه‌های لرزه‌زا در یک ایالت زمین‌ساختی واقع شده‌اند قابل محاسبه می‌باشد. افت تنش برای منطقه مورد مطالعه به وسیله برازش خطی بر نمودار ممان لرزه‌ای در مقابل فرکانس گوشه و استفاده از رابطه (۲۲) [۱۰] محاسبه می‌گردد. شکل (۱۲) نمایش‌دهنده نمودار فرکانس گوشه-ممان لرزه‌ای برای مطالعه حاضر می‌باشد.



شکل (۱۱): نمودار ممان لرزه‌ای زمین لرزه بر حسب شعاع گسیختگی چشمه لرزه‌زا به همراه خطوط ثابت افت تنش مربوط به داده‌های شتاب‌نگاری برای منطقه قم.

همان‌طور که قابل پیش‌بینی می‌باشد، نرخ ممان لرزه‌ای در زلزله‌های آوج و سیلاخور که بزرگای بیشتری دارند، بزرگ‌تر می‌باشد.

نتایج به‌دست‌آمده از حل اثر چشمه لرزه‌زا با استفاده از روش جستجوی نقطه‌به‌نقطه، در جدول (۵) آورده شده است. لازم به ذکر است که شعاع گسیختگی (Γ_i) از رابطه (۲۰) به دست می‌آید.

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

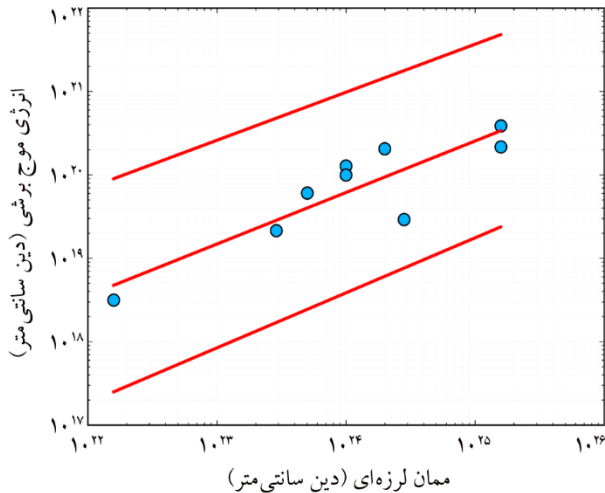
حال برای توصیف هر چه بهتر پارامترهای به‌دست‌آمده برای هر چشمه و نیز برآورد خصوصیات منطقه‌ای جنبش نیرومند زمین، به تحلیل بیشتر نتایج به‌دست‌آمده از جستجوی نقطه‌به‌نقطه می‌پردازیم. نمودار ممان لرزه‌ای بر حسب شعاع گسیختگی در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. در این نمودار می‌توان خطوط ثابت افت تنش را با استفاده از رابطه (۲۱) به دست آورد.

$$\Delta\sigma = \frac{7M_{0i}}{16r^3} \times 10^{-21} \quad (21)$$

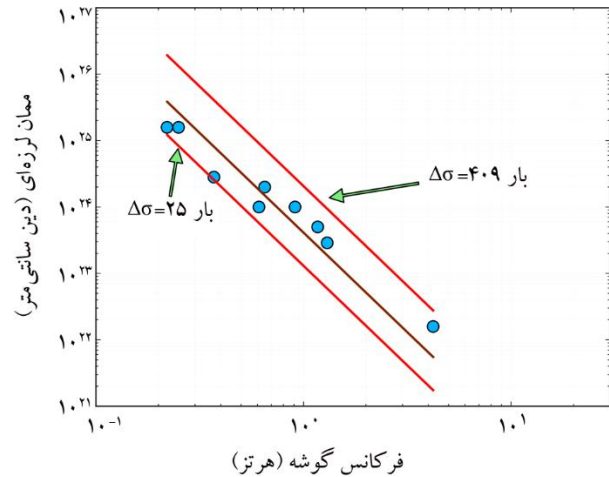
افت تنش یکی از پارامترهای بسیار مهم در تحلیل چشمه لرزه‌زا می‌باشد که معیاری برای نیروی امواج با فرکانس بالا در طیف زلزله می‌باشد. لازم به ذکر است که افت تنش صرفاً به بزرگای زلزله مربوط نیست بلکه سازوکار کانونی و نیز مساحت

جدول (۵): نتایج به‌دست‌آمده از حل اثر چشمه لرزه‌زا به تفکیک زلزله.

تاریخ وقوع	بزرگای گشتاوری	ممان لرزه‌ای (دین.ساتی.متر)	فرکانس گوشه (هرتز)	افت تنش (بار)	شعاع گسیختگی
۱۹۹۸/۸/۲۱	۴/۹۴	$9/84E+22$	۱/۳	۱۲۶	۱
۲۰۰۲/۶/۲۲	۶/۱	$6/40E+23$	۰/۲۲	۳۳	۵/۹۵
۲۰۰۴/۵/۲۸	۵/۳	$1/74E+23$	۰/۶۱	۴۴	۲/۱۵
۲۰۰۶/۳/۳۰	۵/۳	$2/60E+23$	۰/۹۱	۱۵۰	۱/۴۳
۲۰۰۶/۳/۳۱	۵/۱	$1/60E+23$	۱/۱۷	۱۶۱	۱/۱۱
۲۰۰۶/۳/۳۱	۶/۱	$7/82E+23$	۰/۲۵	۴۷	۵/۲۹
۲۰۰۷/۳/۶	۵/۵	$3/76E+23$	۰/۶۵	۱۱۰	۲
۲۰۰۷/۶/۱۸	۵/۶	$2/60E+23$	۰/۳۷	۲۸	۳/۵۴
۲۰۰۹/۳/۵	۴/۱	$1/01E+22$	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.

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

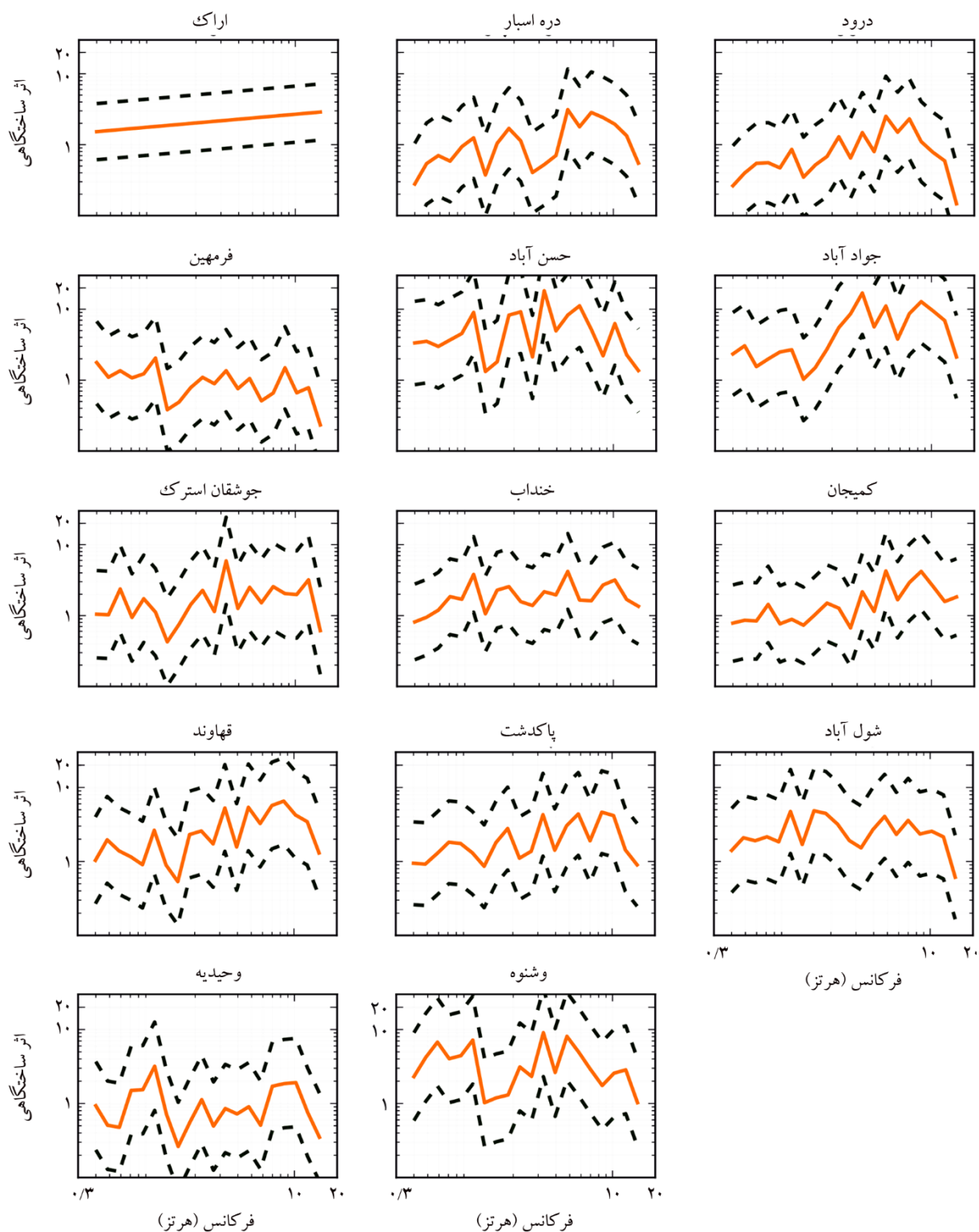
افت تنش متوسط منطقه‌ای از جمله فاکتورهایی است که برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف لرزه‌ای و ایجاد رکوردهای شبیه‌سازی شده از اهمیت فراوانی برخوردار است تا بتوان با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده، شناخت بهتری از منطقه و در نهایت تحلیل خطر دقیق‌تری برای منطقه برآورد نمود.

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 برابر 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 می‌کند. در این مطالعه در منطقه قم و با به کارگیری روش معکوس سازی تعمیم یافته، بانک داده که شامل داده‌های جنبش قوی^۹ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی می‌باشد، گردآوری شد. با استفاده از روش معکوس سازی تعمیم یافته و کدنویسی‌های رایانه‌ای، پارامترهای لرزه‌ای مانند فاکتور کیفیت امواج برشی، افت تنش، فرکانس گوشه، شعاع گسیختگی و غیره برای تمامی چشمه‌های لرزه‌ای بانک داده و نیز میزان تشدید ساختگاهی در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی به دست آمدند. با تحلیل داده‌های به دست آمده از زلزله‌ها، پارامترهای لرزه‌ای منطقه‌ای به دست آمدند. فاکتور کیفیت امواج برشی میزان $Q = 130f^{0.7}$ را در این منطقه نمایش می‌دهد، 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 فعالیت‌های لرزه‌ای در این منطقه می‌باشد. افت تنش منطقه که به صورت معیاری برای قدرت امواج با فرکانس بالا در طیف لرزه‌ای در نظر گرفته می‌شود، به طور متوسط میزان ۸۱ بار را نشان می‌دهد. وابستگی انرژی موج تولید شده با ممان لرزه‌ای به صورت معادله $\log(E_s) = -4.2 + \log M_0$ به دست آمد. اثر تشدید ساختگاهی در فرکانس‌های مختلف محاسبه شد و نمودار اثر ساختگاهی در ایستگاه‌های بانک داده ترسیم گردید. نتایج به دست آمده در این مطالعه در یک هرچه بیشتری از منطقه قم به دست می‌دهد، این نتایج در شبیه‌سازی سناریوهای مختلف لرزه‌ای در این منطقه و تولید رکوردهای شبیه‌سازی شده و نیز ارائه روابط کاهندگی با استفاده از این رکوردها کمک شایانی می‌نماید.

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- کاهش دگی غیر الاستیک | 14. Aki, K. (1967) Scaling law of seismic spectrum. <i>J. Geophys. Res.</i> , 72 (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> , 114 , 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> , 42 , 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> , 31 , 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> , 4 (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> , 89 (4), 888-902. |
| | | 20. Brune, J.N. (1970) Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. <i>J. Geophys. Res.</i> , 75 (26), 4997-5009. |
| | | 21. Boore, D. (2003) Simulation of ground motion using the stochastic method. <i>Pure Appl. Geophys.</i> , 160 , 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> , 167 (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 |