

# مدل جدید جنبش نیرومند زمین برای پیش بینی بیشینه شتاب، طیف های شبه شتاب و طیف های جابجایی در ایران

۳۰ متر فوقانی پروفیل خاک) در مدل توسعه یافته در نظر گرفته شد. توزیع باقیمانده های بدست آمده، شامل باقیمانده های میان رویدادی، ایستگاه به ایستگاه و رویداد-ایستگاه تصحیح شده، هیچ گونه سوگیری قابل توجهی را برای مدل توسعه یافته نشان نداد.

## واژگان کلیدی:

مدل جنبش نیرومند زمین، معادلات پیش بینی جنبش زمین، طیف شبه شتاب، طیف جابجایی الاستیک، طیف جابجایی غیرالاستیک، پایگاه داده زلزله های ایران.

علیرضا حاجی پور<sup>۱</sup>، حسن علیجانی مقدم<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد زلزله،

دانشکده مهندسی عمران،

دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد، دانشکده مهندسی

عمران، دانشگاه صنعتی شریف

پست الکترونیکی نویسندگان:

-۱

[Alirezahajipour.official@gmail.com](mailto:Alirezahajipour.official@gmail.com)

-۲ [hsmoghaddam@yahoo.com](mailto:hsmoghaddam@yahoo.com)

## چکیده:

در این مطالعه یک مدل جدید جنبش زمین برای ایران، به منظور پیش بینی بیشینه شتاب زمین، طیف های شبه شتاب در میرایی های ۰.۲، ۰.۵ و ۱.۰ درصد و طیف های جابجایی با نسبت مقاومت به وزن ۰/۰۵ تا ۰/۳، در دوره های تناوبی ۰/۰۴ تا ۴ ثانیه توسعه می یابد. پایگاه داده این مطالعه شامل ۶۵۹ رکورد از ۱۱۵ رویداد اصلی و پوسته ای کم عمق رخ داده در ایران از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۲۲ با محدوده بزرگ  $5 \leq Mw \leq 7.4$  و فاصله رومرکزی تا ۲۰۰ کیلومتر است. ضرایب اثر تصادفی در مدل رگرسیون اثر مختلط برای ثبت تغییرات منطقه ای میان مناطق پنجگانه فلات ایران تعریف شدند و هیچگونه تفاوت آماری در بین این مناطق تشخیص داده نشد. اثرات غیرخطی ساختگاه با استفاده از پارامتر  $V_{S30}$  (متوسط سرعت موج برشی در

\* حسن علیجانی مقدم، استاد دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی شریف.  
ایمیل: [hsmoghaddam@yahoo.com](mailto:hsmoghaddam@yahoo.com) (نویسنده مسئول مقاله)

## ۱ - مقدمه

این مطالعه یک مدل جدید جنبش زمین<sup>۱</sup> را برای ایران ارائه می‌نماید. فلات ایران منطقه‌ای است که مرتباً زلزله‌های متوسط تا بزرگ با عمق کانونی کمتر از ۳۵ کیلومتر را تجربه کرده است و از این رو همواره مورد توجه محققان و زلزله‌شناسان بوده است. علاوه بر آن فلات ایران در کمربند آلپ-همیالیا واقع شده است که یکی از مناطق تکتونیکی فعال در جهان بوده و با حرکت صفحه عربستان از شمال به سمت اورآسیا، دارای گسل‌های امتدادلغز و معکوس با زلزله‌های مکرر و بزرگ است.

در مناطق با لرزه‌خیزی بالا مانند فلات ایران، از مدل‌های ریاضی برای مرتبط کردن شاخص‌های شدت جنبش زمین<sup>۲</sup> مانند پیشینه شتاب زمین<sup>۳</sup> و یا طیف شبه‌شتاب با میرایی<sup>۵</sup> درصد، با چندین پارامتر لرزه‌ای یک زلزله، به‌عنوان مثال بزرگای زلزله و فاصله منبع تا ایستگاه، استفاده می‌شود. زلزله‌های ایران عمدتاً با گسل امتدادلغز و معکوس مشخص می‌شوند و محققان مختلف فلات ایران را بر اساس لرزه‌خیزی و ویژگی‌های ژئوفیزیکی به چندین منطقه تکتونیکی تقسیم کرده‌اند. در حال حاضر در رابطه با چگونگی تقسیم‌بندی فلات ایران به مناطق مختلف تکتونیکی، در بین محققان اجماعی وجود ندارد. برخی نویسندگان استان‌های ساده‌ای را پیشنهاد کردند (مانند [۱] و [۲]). برخی دیگر مانند [۳]، ایران را به مناطق تکتونیکی بیشتری تقسیم‌بندی کردند. در این مطالعه، پنج منطقه لرزه‌زمین‌ساختی، که توسط میراژئی و همکاران [۴] بر اساس همه داده‌های لرزه‌ای، ژئوفیزیکی، زمین‌شناسی و تکتونیکی پیشنهاد شده است، در نظر گرفته شد: (۱) زاگرس که یک منطقه برخورد قاره‌ای-قاره‌ای از صفحه عرب و ریزقاره مرکزی ایران است. (۲) البرز-آذربایجان که در شمال و شمال غرب ایران قرار دارد و بخشی از کمربند لرزه‌ای آلپ-همیالیا است. (۳) کوپه داغ که آن نیز بخشی از کمربند لرزه‌ای آلپ-همیالیا است. (۴) صفحه مرکزی-شرقی ایران که تحت همگرایی مناطق فوق قرار گرفته است و (۵) سواحل مکران که بخشی از سواحل جنوبی ایران است. هر منطقه اغلب دارای زلزله‌های متوسط تا بزرگ است و برخی محققان مانند [۵] و [۶] ترجیح دادند روابط کاهندگی یا معادلات پیش‌بینی جنبش زمین<sup>۴</sup> را برای مناطق

خاصی ارائه دهند. با این وجود اکثر داده‌های لرزه‌ای ایران در مناطق (۱)، (۲) و (۴) و تعداد کمی از آنها در (۳) و (۵) ثبت شده‌اند. زارع و همکاران [۷]، نوروزی [۸] و قاسمی و همکاران [۹] مناطق تکتونیکی را بصورت متفاوتی گروه‌بندی کردند و برای هر زیرمجموعه به‌طور جداگانه مدل‌هایی را توسعه دادند. محققان متعدد دیگری مانند سقراط و همکاران [۱۰]، زعفرانی و سقراط [۱۱] و صدقاتی و پزشک [۱۲] مدل‌هایی را برای مناطق خاصی با رژیم‌های تکتونیکی همگن ارائه داده‌اند. استفاده از روش تحلیل واریانس در [۹] و [۱۳] نشان داد که جنبش زمین در البرز مرکزی ایران و مناطق زاگرس را می‌توان در یک مجموعه ترکیب کرد. نتایج مشابهی در فرج‌پور و همکاران [۱۴] برای مناطق مختلف فلات ایران حاصل شد. تمرکز مطالعه حاضر بر روی توسعه یک مدل جدید جنبش زمین برای پیش‌بینی طیف‌های شبه‌شتاب و جابجایی است که در آن تفاوت‌های منطقه‌ای در فلات ایران بررسی می‌شود.

## ۲ - پیشینه مدل‌های جنبش زمین برای ایران

تعداد کمی مدل جنبش زمین برای فلات ایران با توجه به تنوع پایگاه‌داده‌ها و مناطق مختلف فلات ایران ایجاد شده است [۱۴]. اولین مدل جنبش زمین که تنها رکوردهای ایران در نظر گرفته و مقادیر طیفی را تخمین می‌زند، در سال ۱۹۹۹ توسط زارع و همکاران [۷] منتشر شده است [۹]. آنها داده‌های خود را به دو مجموعه البرز مرکزی و زاگرس تقسیم‌بندی کرده و روابط جداگانه‌ای برای هر منطقه توسعه دادند ولی منحنی‌های کاهندگی با توجه به انحرافات استاندارد تخمینی دو رابطه، مشابه بوده و تفاوت‌های ناچیزی را نشان داد. نوروزی [۸] با استفاده از پایگاه‌داده حاوی ۲۷۹ ورودی از حدود ۳۰ منطقه لرزه‌زمین‌ساختی در سراسر ایران، مدل خود را توسعه داد و پیشینه شتاب زمین را برای مولفه افقی و قائم برآورد کرد. قاسمی و همکاران [۹] مدلی را برای تخمین طیف شبه‌شتاب برای ایران و اورآسیای غربی از یک مجموعه داده بزرگ پیشنهاد کردند. آنها ۷۱۶ رکورد سه مولفه‌ای به‌دست آمده از ۲۰۰ زلزله با  $M \geq 5$  را تحلیل کردند. علاوه بر داده‌های ایرانی، ۱۷۷ رکورد سه مولفه‌ای از اورآسیای غربی و داده‌های زلزله کوبه، برای افزایش مجموعه داده‌های ایرانی، مورد تحلیل قرار گرفت. صدقاتی و پزشک [۱۲] با استفاده از داده‌های

<sup>۲</sup> Peak Ground Acceleration (PGA)

<sup>۴</sup> Ground Motion Prediction Equations (GMPEs)

<sup>۱</sup> Ground Motion Model (GMM)

<sup>۳</sup> Ground-Motion Intensity Measures (GMIMs)

به طوری که طبق گزارش مرجع [۱۸] در میان تمام روابط کاهندگی توسعه یافته از سال ۱۹۶۴ تا ۲۰۲۱، تنها ۶ مدل برای پیش بینی طیف غیرالاستیک توسعه یافته است و در این میان نیز سهم فلات ایران تنها یک مدل ارائه شده توسط حسنی و همکاران [۱۵] است. بنابراین در این مطالعه علاوه بر توسعه مدل برای پیش بینی طیف های الاستیک، معادلات برای پیش بینی طیف های غیرالاستیک نیز توسعه می یابند. طیف های غیرالاستیک مورد بحث در این مطالعه طیف های جابجایی با نسبت مقاومت به وزن ثابت ( $f_y/w$ ) هستند. در واقع این نوع طیف ها هر دو نوع پاسخ الاستیک و غیرالاستیک را می توانند در بر بگیرند، چراکه در تعریف منحنی نیرو-تغییر شکل آنها هیچ وابستگی به تحریک زلزله در نظر گرفته نشده است و به دنبال آن نیز هیچ تضمینی مبنی بر غیرالاستیک شدن پاسخ وجود ندارد، بلکه تنها پتانسیل غیرالاستیک شدن پاسخ در آنها گنجانده شده است.

### ۳ - پایگاه داده انتخاب شده و مشخصات آن

پایگاه داده مورد استفاده در این مطالعه، یک مجموعه داده یکپارچه از حرکات زمین زلزله های پوسته ای کم عمق رخ داده از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۲۲ در ایران است. با در نظر گرفتن دو ویژگی اساسی، یعنی شناخته شده بودن و قابل اعتماد بودن داده ها، در مجموع اطلاعات لرزه ای ۶۵۹ رکورد جنبش نیرومند سه مولفه ای از ۱۱۵ رویداد اصلی با بزرگای گشتاوری  $M \geq 5$  و فاصله رومرکزی  $REPI \leq 200km$  جمع آوری شدند. رکوردهای جنبش نیرومند اصلاح نشده از شبکه شتاب نگاری ایران بدست آمدند و اصلاح خط مبنا و عملیات فیلتر این رکوردها با استفاده از بازه های فرکانسی پیشنهادی قدرتی و همکاران [۱۹] در نرم افزار *Seismosignal* انجام شد.

اکثر ایستگاه های موجود در شبکه شتاب نگاری ایران، مشابه شبکه های دیگر، اطلاعات ژئوتکنیکی محدودی دارند. معمولاً شرایط ساختگاه با استفاده از سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی پروفیل خاک  $V_{S30}$ ، به عنوان متغیری در ارزیابی روابط تجربی برای پیش بینی ضرایب تقویت غیرخطی برای طیف های هدف تعیین می شود. ایستگاه های ایرانی  $V_{S30}$  را برای ۵۴۸ ایستگاه از ۱۴۴۱ ایستگاه اندازه گیری کرده اند. در مرجع [۲۰] روشی را برای تخمین سرعت موج برشی با استفاده از شیب توپوگرافی به عنوان نماینده  $V_{S30}$  در

شبکه شتاب نگاری ایران<sup>۱</sup> و پایگاه داده ای متشکل از ۱۵۵۱ زلزله ایرانی، مدل خود را که شامل یک عبارت خطی تابع پارامتر  $V_{S30}$  برای مدل سازی پاسخ ساختگاه است، ایجاد کردند. حسنی و همکاران [۱۵] مدلی برای تخمین طیف جابجایی غیرالاستیک مقاومت ثابت (ضریب کاهش<sup>۲</sup> ثابت) در ایران ارائه دادند. آنها با استفاده از پایگاه داده ای شامل ۸۰۶ رکورد از ۳۳۰ زلزله ایران، سه معادله جداگانه برای زاگرس، البرز-ایران مرکزی و کل پهنه ایران ارائه دادند. فرج پور و همکاران [۱۴] با استفاده از شکل معادلاتی شبیه شکل معادلات [۱۲] و [۱۶]، مدلی را به منظور پیش بینی بیشینه شتاب زمین و طیف شبه شتاب با میرایی ۵ درصد برای کل ایران، به همراه بررسی تفاوت های منطقه ای در فلات ایران ارائه دادند. پایگاه داده آنها در مجموع ۱۳۵۶ رکورد از ۲۰۸ رویداد ایرانی از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۳ و ۴ رویداد از ترکیه و یونان، با  $M \geq 4.8$  و فاصله گسیختگی تا ۴۰۰ کیلومتر را شامل می شود. تفاوت های منطقه ای معناداری در بین مناطق پنجگانه فلات ایران (مناطق مورد بحث در [۴]) مشاهده نشد، اما با این وجود آنها مطالعات بعدی را به بررسی بیشتر این موضوع توصیه کردند. زعفرانی و سقراط [۱۷] با استناد به نتایج [۱۴] مدل واحدی را برای پیش بینی طیف شبه شتاب در کل ایران براساس بزرگا، فاصله، نوع گسلش و اثر ساختگاه ارائه دادند. آنها علاوه بر رویدادهای داخل ایران، از چندین رویداد غیر ایرانی برای پر کردن خلأ داده های ایرانی در بزرگای بزرگ و فواصل نزدیک استفاده کردند. رویکردی که در مطالعاتی نظیر [۹] و [۱۴] نیز استفاده شده است. فهرست جامعی از مدل های جنبش زمین توسعه یافته برای کل جهان و ایران، به همراه توضیحات و محدودیت های آنها را می توان در [۱۸] پیدا کرد. بررسی تاریخچه روابط کاهندگی در سرتاسر دنیا، به ویژه در فلات ایران، نشان می دهد بسیاری از معادلات جنبش زمین برای پیش بینی طیف شبه شتاب با میرایی ۵ درصد توسعه یافته اند که فرض اساسی آنها رفتار کاملاً الاستیک سازه در طول زلزله ها است. با این حال تجربه نشان داده است تحت تحریک زلزله، سازه ها می توانند بسته به شدت زلزله و مشخصه های رفتاری خود، رفتار الاستیک یا غیرالاستیک داشته باشند. با وجود این که معادلات فراوانی برای پیش بینی طیف های الاستیک توسعه یافته اند، اما تعداد مدل های توسعه یافته برای پیش بینی طیف های غیرالاستیک بسیار کمتر است.

<sup>۲</sup> Reduction Factor

<sup>۱</sup> Iran Strong Motion Network (ISMN)

ایستگاه‌هایی که داده‌های اندازه‌گیری شده وجود ندارد، معرفی شده است که در این مطالعه از تخمین‌های این روش برای ایستگاه‌های فاقد  $V_{S30}$  اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود (حدود ۶۴ درصد از داده‌ها). یک رویکرد مشابه در [۱۴] و [۱۶] استفاده شده است. به‌طور کلی در این مطالعه از رویکرد فرچ‌پور و همکاران [۲۱] برای جمع‌آوری اطلاعات رویدادها استفاده شده است. پایگاه‌داده‌های مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی<sup>۱</sup> (BHRC)، مرکز لرزه‌نگاری کشوری<sup>۲</sup> (IRSC)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله<sup>۳</sup> (IIIES)، مرکز ملی اطلاعات زلزله<sup>۴</sup> (NEIC) و پایگاه‌داده جهانی‌هاروارد<sup>۵</sup> (HRV/CMT)، در این مطالعه منابع اصلی در تعیین مشخصات لرزه‌ای رویدادهای ایران از جمله نوع گسلش بودند. ابعاد و هندسه گسیختگی‌ها با فرض مستطیلی بودن صفحه گسیختگی، با استفاده از روابط ارائه‌شده در [۲۲] و [۲۳] تعیین شدند. بزرگای مختصات جغرافیایی رومرکز زلزله، از پایگاه‌داده BHRC جمع‌آوری شد. در مواردی که مقیاس بزرگای گشتاوری برای رویدادها گزارش نشده بود، از گزارش‌های پایگاه جهانی‌هاروارد استفاده شد. رویدادها و رکوردهای انتخاب‌شده برحسب مختصات جغرافیایی رومرکز و ایستگاه‌ها در قالب پنج منطقه فوق‌الذکر برای بررسی اثرات تفاوت‌های منطقه‌ای دسته‌بندی شدند. همچنین با توجه به اهمیت رویدادهای بزرگ و تعداد کم آنها، سعی شد تمام رویدادهای بزرگ رخ داده در ایران به‌همراه تمام رکوردهای آنها، در پایگاه‌داده گنجانده شوند. پایگاه‌داده جنبش نیرومند شامل خصوصیات زمین‌شناسی ساختگاه، ویژگی‌های لرزه‌ای، هندسه گسلش، سازوکار کانونی و معیارهای فاصله رومرکزی و کانونی (به ترتیب  $R_{HYP}$ ,  $R_{EPI}$ ) است. در انتخاب و جمع‌آوری رویدادها و رکوردهای این پایگاه‌داده معیارهای زیر، هم‌تراز با معیارهای [۱۴] و [۱۶]، در نظر گرفته شدند:

۱. زمین‌لرزه‌های رخ داده در ایران از سال میلادی ۱۹۷۶ تا ۲۰۲۲
۲. زمین‌لرزه‌های پوسته‌ای با عمق کانونی حداکثر ۳۵ کیلومتر
۳. زمین‌لرزه‌های با بزرگای گشتاوری در محدوده  $5 \leq Mw \leq 7.4$
۴. زمین‌لرزه‌های با حداقل سه رکورد ثبت‌شده و قابل‌دسترسی در شبکه شتاب‌نگاری ایران

۵. زمین‌لرزه‌هایی که بر اساس الگوریتم ارائه‌شده در [۲۴] به‌عنوان رویداد اصلی تشخیص داده شدند.
۶. رکوردهای ثبت‌شده در فاصله رومرکزی ۰ تا ۲۰۰ کیلومتر پس از اعمال معیارهای بالا، موارد زیر نیز از پایگاه‌داده حذف شدند:
۷. زمین‌لرزه‌هایی که سازوکار کانونی، شیب و سایر زوایا و صفحات گسلی آنها در پایگاه‌داده CMT و NEIC مشخص نشده‌اند.
۸. رکوردهایی که یکی از سه مولفه آنها در شبکه‌شتاب‌نگاری ایران ثبت نشده‌اند.

در این مطالعه ۲۱ دوره تناوبی طیفی برای پیش‌بینی مقادیر طیفی، شامل ۰/۴، ۰/۴۲، ۰/۴۴، ۰/۴۶، ۰/۴۸، ۰/۵، ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵، ۱/۵، ۱/۷۵، ۲، ۳ و ۴ ثانیه در نظر گرفته شدند. طیف‌های شبه‌شتاب و جابجایی الاستیک رکوردهای پایگاه‌داده برای نسبت‌های میرایی ۲، ۵ و ۱۰ درصد و طیف‌های جابجایی با پتانسیل پاسخ غیرالاستیک نیز با فرض سیستم الاستیک پلاستیک کامل (معادل رفتار دوخطی با شیب ثانویه صفر در منحنی نیرو-تغییرشکل) و میرایی ۵ درصد، برای نسبت‌های مقاومت به وزن ( $f_y/w$ ) برابر با ۰/۵، ۰/۷، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ با استفاده از تحلیل‌های الاستیک و غیرالاستیک به کمک نرم‌افزارهای *OpenSees* و *Seismospect* محاسبه شدند.

شکل (۱) توزیع جغرافیایی ایستگاه‌ها و رویدادهای این مطالعه و شکل (۲) توزیع بزرگای گشتاوری در مقابل فاصله رومرکزی رکوردهای منتخب را نشان می‌دهد. این شکل‌ها همچنین توزیع داده‌ها را از نظر شرایط خاک (توزیع  $V_{S30}$ ) نشان می‌دهند. استاندارد ۲۸۰۰ [۲۵] آیین‌نامه طراحی ایران است که طرح طبقه‌بندی ساختگاه مشابهی با [۲۶] دارد. همانطور که نشان داده شده است، پایگاه‌داده در تمامی گروه‌ها پراکنده است و خاک نوع II ( $375 \text{ m/s}$ ) را در پایگاه‌داده دارد. همچنین شکل (۲) نشان می‌دهد با وجود این‌که تمام رکوردهای ثبت‌شده در شبکه شتاب‌نگاری ایران از زلزله‌های بزرگ ایران در پایگاه‌داده در نظر گرفته شده است، اما همچنان در فواصل نزدیک و بزرگ‌های بزرگ خلأ قابل‌توجهی وجود دارد.

<sup>۱</sup> International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIIES)

<sup>۲</sup> National Earthquake Information Center (NEIC)

<sup>۳</sup> Harvard GCMT catalog (HRV/CMT)

<sup>۱</sup> The Building and Housing Research Center (BHRC)

<sup>۲</sup> Iranian Seismological Center, Institute of Geophysics, University of Tehran (IRSC)

می‌کنند و برای استفاده از آنها کافیسیت ماتریس‌های متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و متغیر پاسخ به نرم‌افزار معرفی شود. در این پژوهش رگرسیون در هر دوره تناوب مستقل از سایر دوره‌های تناوب انجام شد و همچنین تفاوت‌های منطقه‌ای در قسمت اثر تصادفی رگرسیون‌های اثر مختلط نیز در نظر گرفته شد. معیارهای اطلاعاتی آکیاک و بیژین<sup>۱</sup> (به ترتیب  $AIC$  و  $BIC$ ) و لگاریتم احتمالات آنها که تابعی از سادگی و دقت فرم معادلات هستند با یکدیگر مقایسه شدند تا یک قالب مناسب از میان تمام قالب‌های کاندید که در حین سادگی بهترین برازش را با داده‌ها داشته باشد، انتخاب شود.

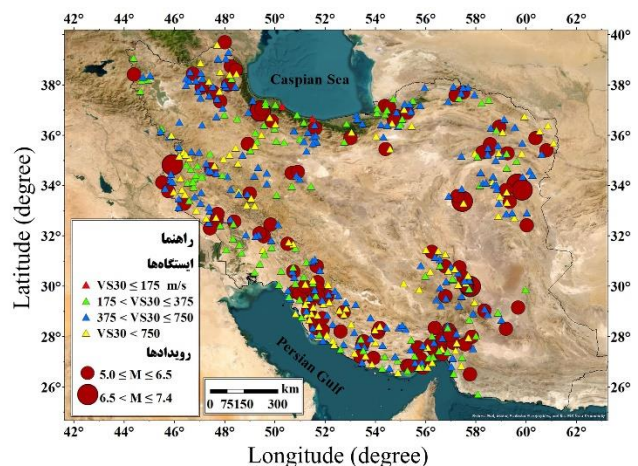
تابع رگرسیون غیرخطی زیر توسط [۲۸] برای ارائه یک مدل جنبش زمین مبتنی بر الگوریتم اثر مختلط پیشنهاد شده است:

$$\ln Y = f(X_{es}, \theta) + \Delta B + \Delta W \quad (1)$$

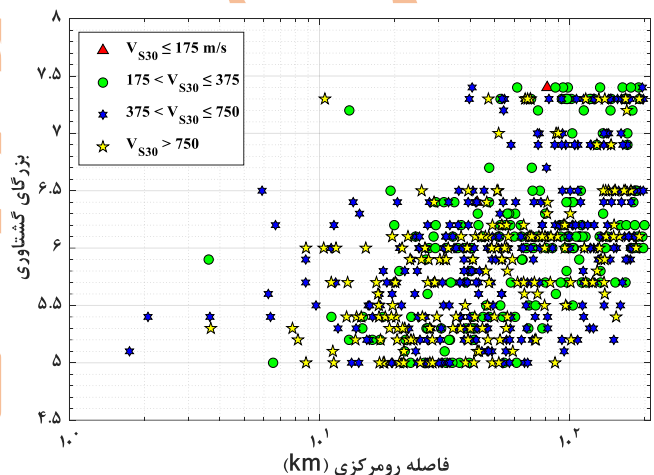
که  $f(X_{es}, \theta)$  همان مدل جنبش زمین است و  $X_{es}$  بردار متغیرهای مستقل نظیر بزرگای زلزله و فاصله ایستگاه تا منبع است،  $e$  و  $s$  به ترتیب برای مشاهده زمین‌لرزه  $e$  رکوردشده در ایستگاه  $s$  استفاده می‌شود.  $\theta$  یک بردار از اثرات ثابت برای ضرایب رگرسیون است.  $\Delta B$  تغییرپذیری میان‌رویدادی است که تفاوت سطح میانه جنبش نیرومند زمین برای یک رویداد و سطح مورد انتظار برای آن رویداد را نشان می‌دهد و  $\Delta W$  متغیر درون‌رویدادی است که نشان‌دهنده تفاوت بین جنبش نیرومند زمین مشاهده‌شده و جنبش میانه زمین برای یک رویداد معین است [۲۸]. اثرات تصادفی و خطای تصادفی به صورت نرمال با میانگین صفر توزیع می‌شوند. بر اساس این مباحث، قالب زیر در این مطالعه پیشنهاد شد:

$$\ln(y) = f_{source} + f_{path} + f_{site} + \delta B_e + \delta_{S2S} + \varepsilon \quad (2)$$

که  $\ln(y)$  لگاریتم طبیعی شاخص‌های جنبش زمین مدنظر است (در این مطالعه بیشینه شتاب زمین و مقادیر طیفی شبه‌شتاب  $(g)$  و جابجایی (متر) در دوره تناوبی، میرایی و نسبت‌های مقاومت به وزن مشخص). لازم به اشاره است که شاخص‌های جنبش زمین در این مطالعه بر اساس میانگین هندسی دو مولفه افقی ثبت‌شده در نظر گرفته می‌شوند. به پیروی از نام‌گذاری [۲۸]،  $\delta B_e$  و  $\delta_{S2S}$  اثرات تصادفی برای توصیف باقیمانده میان‌رویدادی و باقیمانده ایستگاه به ایستگاه هستند و هر دو دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف



شکل ۱: توزیع جغرافیایی ایستگاه‌ها و رویدادهای پایگاه‌داده این مطالعه



شکل ۲: توزیع بزرگای گشتاوری در مقابل فاصله رومرکزی رکوردهای منتخب

#### ۴- قالب مدل جنبش زمین

انتخاب یک قالب مناسب یک گام مهم در زمینه توسعه و واسنجی مدل‌های جنبش زمین است. در ابتدا کار با یک قالب شبیه به [۱۴] و [۱۶] شروع شد که برآورد مناسبی از جنبش زمین برای فلات ایران را نشان می‌دهند و سادگی آنها در کنار قابلیت آنها در پیش‌بینی جنبش زمین، در [۱۴] و [۱۶] بحث شده است. به پیروی از [۱۴] الگوریتم اثر مختلط توسعه‌یافته توسط [۲۷] که در نرم‌افزار *Matlab* با توابع "*fitlmatrix*" و "*nlmefit*" پیاده شده است، به عنوان یک رویکرد اصلی برای تعیین ضرایب، استفاده شد. این دو تابع به ترتیب رویکرد خطی و غیر خطی رگرسیون اثر مختلط را پیاده

<sup>۱</sup> Akaike and Bayesian information criteria

استاندارد به ترتیب  $\tau$  و  $\phi_{SS}$  هستند [۲۸].  $\varepsilon$  باقیمانده تصحیح شده رویداد-ایستگاه بوده که دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف استاندارد  $\phi_{SS}$  است.  $f_{source}$ ،  $f_{site}$  و  $f_{path}$  به ترتیب توابع منبع، توابع ایستگاه و مسیر هستند. تابع منبع از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$f_{source} = f_{magnitude} + f_{SOF} + f_{dip} + f_{hyp} \quad (۳)$$

که تابعی از عبارت‌های بزرگا زلزله  $f_{magnitude}$  نوع گسلس  $f_{SOF}$ ، زاویه شیب گسلس  $f_{dip}$  و عمق کانونی  $f_{hyp}$  است. هر یک از عبارت‌ها و جزئیات آن در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند.

#### ۴-۱- بزرگا

مقیاس‌بندی بزرگا شامل یک مدل دوخطی با یک عبارت درجه دوم است. عبارت بزرگا به صورت زیر تعریف شد:

$$f_{magnitude} = \begin{cases} z_1 + z_2(M - M_h) + z_3(M - M_h)^2; & M \leq M_h \\ z_1 + z_4(M - M_h) + z_3(M - M_h)^2; & M > M_h \end{cases} \quad (۴)$$

که در آن  $M$  بزرگای گشتاوری و  $M_h$  بزرگای لولا<sup>۱</sup> بوده و برابر  $۶/۵$  انتخاب شد. همچنین ضرایب  $z_1$  تا  $z_4$  ضرایب رگرسیونی مربوط به اثرات ثابت در رگرسیون هستند. همه ضرایب اثرات ثابت تابعی از دوره تناوبی طیفی بوده و به طور مستقل برای هر نوع طیفی حاصل می‌شوند. این قالب بزرگا و همچنین مقدار  $۶/۵$  برای  $M_h$  پس از آزمودن مدل‌های مختلف دیگر، نظیر مدل تک ضابطه‌ای و مدل دو ضابطه‌ای خطی (مشابه [۱۲])، و مقادیر  $M_h$  مختلف، به دلیل تطابق بیشتر آن با مشاهدات انتخاب شد. مدل خطی درجه دوم می‌تواند ویژگی‌های مختلف مقیاس‌بندی بزرگا را در نظر بگیرد. یک ویژگی مهم مقیاس‌بندی بزرگا، میزان اشباع با بزرگا در فواصل کوتاه است [۱۴]. اشباع بزرگا<sup>۲</sup> نشان‌دهنده کاهش دامنه حرکت زمین با افزایش بزرگاست. در این پژوهش ضریب  $z_4$  به مقادیر منفی محدود نشد تا در صورت وجود اشباع بیش از حد در مجموعه داده‌ها، ثبت شود.

#### ۴-۲- نوع گسلس

تفاوت‌های مهمی بین سازوکارهای کانونی امتدادلغز و معکوس در [۱۲] و [۱۴] پیدا نشد (مقادیر  $p$  نشان داد که از نظر آماری ناچیز هستند). در این مطالعه قالب‌های مختلفی برای عبارت گسلس در نظر گرفته شد (حتی حذف آن از مدل) و دقت مدل در حالات مختلف

مقایسه شد. سرانجام این عبارت با توجه به تنوع گسلس‌ها در ایران به صورت زیر و شبیه آنچه در [۱۶] در نظر گرفته شده بود، تعریف شد.

$$f_{SOF} = f_{fl,M} (z_8 f_{RV} + z_9 f_{SS})$$

$$f_{fl,M} = \begin{cases} M - 5; & M \leq 6 \\ 1; & M > 6 \end{cases} \quad (۵)$$

که در آن  $f_{fl,M}$  تابعی از بزرگای زلزله بوده و ضرایب  $z_8$  و  $z_9$  ضرایب اثرات ثابت هستند.  $f_{RV}$  متغیر نشان‌دهنده گسلس معکوس و معکوس-مایل بوده که  $f_{RV}=1$  برای  $۱۵۰ < \lambda < ۳۰$  و در سایر موارد  $f_{RV}=0$  است.  $f_{SS}$  نیز متغیر نشان‌دهنده گسلس امتدادلغز بوده که  $f_{SS}=1$  برای  $۱۸۰ < \lambda < ۱۵۰$  و  $۳۰ < \lambda < ۳۰$  و  $۱۵۰ < \lambda < ۱۸۰$  و در سایر موارد  $f_{SS}=0$  است.

#### ۴-۳- شیب گسیختگی

به طور معمول رکوردهای ثبت شده از زلزله‌های کوچک وابستگی شدیدی به شیب صفحه گسیختگی دارند [۱۶]. این اثر به صورت زیر توسط یک عبارت شیب گسیختگی و یک ضریب  $z_{12}$  تعریف شد:

$$f_{dip} = \begin{cases} z_{12} \delta; & M \leq M_{h1} \\ z_{12} (5.5 - M) \delta; & M_{h1} < M \leq M_{h2} \\ 0; & M > M_{h2} \end{cases} \quad (۶)$$

که در آن  $M_{h1}=4$  و  $M_{h2}=8.5$  نقاط لولا بزرگا و  $\delta$  (برحسب درجه) متوسط شیب صفحه گسیختگی است.

#### ۴-۴- عمق کانونی

در این مطالعه از یک قالب عمق کانونی شبیه قالب پیشنهادی [۱۵] استفاده شد، بر اساس آنچه داده‌ها نشان داد از یک بزرگای لولای ( $M_h=6.5$ ) به صورت زیر استفاده شد.

$$f_{hyp} = f_{hyp,H} f_{hyp,M}$$

$$f_{hyp,H} = \begin{cases} 0; & Z_{HYP} \leq 7 \\ Z_{HYP} - 7; & 7 < Z_{HYP} \leq 20 \\ 13; & Z_{HYP} > 20 \end{cases} \quad (۷)$$

$$f_{hyp,M} = \begin{cases} z_{10} + (z_{11} - z_{10})(M - 6.5); & M \leq M_h \\ z_{11}; & M > M_h \end{cases}$$

<sup>۱</sup> Magnitude saturation

<sup>۲</sup> Hinge magnitude points

#### ۴-۵ - کاهندگی هندسی<sup>۱</sup>

عبارت مسیر در مدل‌های جنبش زمین به دو قسمت تقسیم می‌شود که معمولاً با عناوین کاهندگی هندسی و کاهندگی غیرالاستیک<sup>۲</sup> شناخته می‌شوند. با این حال عبارت مسیر یکسانی در فواصل گسیختگی کمتر از ۸۰ کیلومتر در [۱۴] و [۱۶] در نظر گرفته شد. در این مطالعه، با وجود تخمین هندسه منبع، به دلیل فرضیات ساده‌کننده در محاسبه آن و وابستگی آن به روابط تخمینی، آنها در معادلات دخیل نشدند و بجای فاصله گسیختگی از معیارهای ساده‌تر و در دسترس‌تری نظیر فاصله رومرکزی استفاده شد تا استفاده از معادلات ساده‌تر شود. همچنین با توجه به دقت پایین گزارش‌ها برای عمق کانونی رویدادها، فاصله رومرکزی به فاصله کانونی ترجیح داده شد و از آن در عبارت مسیر به‌عنوان متغیر پیش‌بینی‌کننده استفاده شد. در این مطالعه به پیروی از [۱۴] اثرات کاهندگی هندسی برای جلوگیری از تبادل با کاهندگی غیرالاستیک جدا شد. کاهندگی هندسی زوال دامنه را به دلیل گسترش سطح جبهه امواج هنگام انتشار از منبع مدل می‌کند که به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$f_{geometric} = (z_5 + z_6 M) \ln(\sqrt{R_{EPI}^2 + z_7^2}) \quad (8)$$

$R_{EPI}$  فاصله رومرکزی است و  $z_5$ ،  $z_6$  و  $z_7$  (عمق مجازی) ضرایب اثرات ثابت هستند.

#### ۴-۶ - کاهندگی غیرالاستیک

کاهندگی غیرالاستیک کاهش دامنه را به دلیل تبدیل انرژی موج الاستیک به گرما مدل می‌کند و معمولاً به فرکانس وابسته است. رفتار جنبش زمین در فواصل دور از منبع، با کاهندگی غیرالاستیک کنترل می‌شود. عبارت کاهندگی غیرالاستیک به شرح زیر است:

$$f_{an} = \begin{cases} (z_{13} - \Delta z_{13})(R_{EPI} - 80); & R_{EPI} > 80 \\ 0; & R_{EPI} \leq 80 \end{cases} \quad (9)$$

به دلیل پراکندگی داده‌ها، بین گسترش هندسی و عبارت کاهندگی غیرالاستیک مبادله وجود دارد، لذا ضریب  $z_{13}$  به صفر یا منفی محدود شد. به منظور در نظر گرفتن تفاوت‌های منطقه‌ای، از یک اثر تصادفی که توسط  $\Delta z_{13}$  در مدل رگرسیونی اثر مختلط نشان داده شده است، استفاده شد. اثر تصادفی نشان‌دهنده تفاوت بین پنج منطقه فوق‌الذکر

است. نتایج حاصل و تحلیل آماری نشان داد که پایه آماری قوی مبنی بر وجود تفاوت‌های منطقه‌ای بین پنج منطقه مورد بحث وجود ندارد. نتیجه‌گیری مشابهی توسط [۹]، [۱۲] و [۱۴] انجام گرفته است.

#### ۴-۷ - پاسخ سطحی ایستگاه

مدل پارامتری ضرایب تقویت غیرخطی [۲۹]، که تابع بیشینه شتاب در سنگ‌بستر و  $V_{S30}$  است، در این مطالعه دنبال شد و به پیروی از [۱۴] و [۱۶] از رابطه (۱۰) برای عبارت پاسخ سطحی ایستگاه استفاده شد. در این رابطه،  $PGA_{Rock}(g)$  مقدار میانه پیش‌بینی بیشینه شتاب در سنگ‌بستر،  $k_i$  ضرایب مدل وابسته به دوره تناوبی و  $c=1.88$  و  $n=1.18$  ضرایب مدل مستقل از دوره تناوبی بوده و هر سه به لحاظ نظری محدود هستند.  $z_{14}$  نیز یک ضریب اثرات ثابت است. ضرایب عبارت غیرخطی پاسخ سطحی ایستگاه  $k_1$ ،  $k_2$  و  $n$  تعیین شده توسط [۳۰] برای محدود کردن عبارت پاسخ سطحی ایستگاه استفاده شدند. برای تعیین بیشینه شتاب سنگ‌بستر ابتدا مجموعه داده‌ها جدا شده و رکوردهایی انتخاب شدند که در ایستگاه‌هایی با  $V_{S30}=760 m/s$  و بالاتر ثبت شده باشند. سپس از رگرسیون اثر ترکیبی استفاده شده و همه ضرایب رگرسیون با نادیده گرفتن عبارت پاسخ سطحی ایستگاه، تعیین شدند. این ضرایب رگرسیون برای تخمین بیشینه شتاب سنگ‌بستر (ضرایب  $z_{13}$  تا  $z_{17}$ ) در کنار سایر ضرایب در جدول (۱) ارائه شده است. این ضرایب و روابط (۲) تا (۹) برای تعیین بیشینه شتاب سنگ‌بستر برای مرحله بعدی رگرسیون به‌منظور یافتن  $z_{13}$  تا  $z_{14}$  برای همه شرایط ایستگاه برای بیشینه شتاب زمین و مقادیر طیفی استفاده می‌شوند. در میان مدل‌های توسعه‌یافته قبلی برای ایران، تنها فرج‌پور و همکاران [۱۴] اثرات غیرخطی تقویت ساختگاه را در نظر گرفته است. در این مطالعه به پیروی از [۱۴]، دو عبارت خطی و غیرخطی برای پاسخ ایستگاه در نظر گرفته شد. بین پیش‌بینی‌های خطی و غیرخطی پاسخ ایستگاه بر اساس نوع خاک، به‌ویژه برای بزرگ‌های بزرگ و فواصل نزدیک، که برای ایستگاه‌های خاک نرم مهم است، تفاوت‌هایی وجود دارد. گنجاندن بخش خطی و غیرخطی جنبش زمین در تحلیل پاسخ ایستگاه می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر پاسخ شتاب تاثیر بگذارد. این موضوع در [۱۴] دنبال شده و نشان داده شده است که تفاوت عمده‌ای

<sup>۲</sup> Anelastic attenuation

<sup>۱</sup> Geometric attenuation

$$f_{site} = \begin{cases} z_{14} \ln\left(\frac{V_{S30}}{k_1}\right) + k_2 \left\{ \ln \left[ PGA_{Rock} + c \left(\frac{V_{S30}}{k_1}\right)^n \right] - \ln [PGA_{Rock} + c] \right\}; & V_{S30} \leq k_1 \\ (z_{14} + k_2 n) \ln\left(\frac{V_{S30}}{k_1}\right); & V_{S30} > k_1 \end{cases} \quad (10)$$

منتخب می‌پردازد. برای طیف‌های جابجایی در این مطالعه، از آنجا که طیف‌های مقاومت به وزن ثابت غیرالاستیک شدن پاسخ را تضمین نمی‌کنند، بنابراین انتظار می‌رود معادلات نیز طیف‌هایی با هر دو نوع پاسخ الاستیک و غیرالاستیک را تخمین بزنند. ضرایب رگرسیونی و انحرافات استاندارد مدل پیشنهادی، در پیش‌بینی طیف شبه‌شتاب با میرایی ۵ درصد و طیف جابجایی با نسبت مقاومت به وزن ۰/۱ در جداول (۱)، (۲)، (۳) و (۴) ارائه شده است. ضرایب رگرسیونی و انحرافات استاندارد طیف‌های شبه‌شتاب در میرایی‌های ۲ و ۱۰ درصد و طیف‌های جابجایی با نسبت مقاومت به وزن برابر با ۰/۰۵، ۰/۰۷، ۰/۲ و ۰/۳ در جداول پیوست آورده شده است.

هنگام انجام مطالعات خطر لرزه‌ای دو نوع عدم قطعیت در نظر گرفته می‌شود: شناختی<sup>۱</sup> و ذاتی<sup>۲</sup>. عدم قطعیت ذاتی، تغییرپذیری ناشی از فرآیند فیزیکی طبیعی است. عدم قطعیت شناختی ناشی از عدم آگاهی در مورد زلزله و اثرات آن است. عدم قطعیت‌های ذاتی مستقیماً در ارزیابی احتمالی خطر لرزه‌ای اعمال می‌شوند و عدم قطعیت‌های شناختی نیز معمولاً با ترکیب چندین مدل در یک

جدول ۱: ضرایب رگرسیونی مدل پیشنهادی در تخمین بیشینه شتاب سنگ‌بستر، بیشینه شتاب زمین و طیف شبه‌شتاب با میرایی ۵٪

T(sec)	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>	Z <sub>7</sub>	Z <sub>8</sub>	Z <sub>9</sub>	Z <sub>10</sub>	Z <sub>11</sub>	Z <sub>12</sub>	Z <sub>13</sub>	Z <sub>14</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
PGA <sub>rock</sub> (g)	۱,۲۵۸۶	۰,۸۱۳	۰,۱۰۰۹	۰,۰۷۶۸	-۱,۱۰۳	۰,۰۱۴۱	۳,۲۸۷۸	۰,۱۲۵۳	۰,۱۸۶۲	۰,۲۳۷	۰,۴۰۴۴	۰,۰۰۳۵	.	.	.	.
PGA(g)	۲,۱۴۱۵	۱,۱۶۵	۰,۲۰۸۶	۱,۹۲۵۹	-۰,۶۶۷	۰,۱۱۷۴	۷,۴۹۵۱	۰,۱۳۴۴	۰,۰۳۰۶	۰,۲۷۴۸	۰,۲۹۷۲	۰,۰۰۱۷	.	۱,۲۸۲۳	۸۶۵	۱,۱۸۶
۰,۰۴	۲,۶۱۸	۰,۸۸۱۳	۰,۲۲۵۶	۱,۶۵۱۶	۱,۱۴۲۵	۰,۰۵۵۹	۸,۳۸۰۸	۰,۱۹۳۳	۰,۰۱۴۴	۰,۲۹۸۳	۰,۳۳۶۲	۰,۰۰۰۲	.	۱,۳۷۲۳	۸۶۵	۱,۱۸۶
۰,۰۴۲	۲,۶۴۸۹	۰,۸۵۲۳	۰,۲۱۹۴	۱,۵۸۴۳	۱,۲۳۵۸	۰,۰۴۰۶	۸,۳۵۶۲	۰,۱۹۸۱	۰,۰۲۱۱	۰,۲۹۱۴	۰,۳۲۴۸	۰,۰۰۰۲	.	۱,۴۱۷۸	۸۶۵	۱,۲۱۹
۰,۰۴۴	۲,۷۹۹۷	۰,۹۱۲۴	۰,۲۱۱۶	۱,۶۳۸۴	۱,۱۷۷۳	۰,۰۵۴۳	۸,۳۶۷۸	۰,۲۰۲۹	۰,۰۳۴۲	۰,۲۸۸۷	۰,۳۲۴۳	۰,۰۰۰۱۸	.	۱,۴۸۱۴	۹۰۸	۱,۲۷۳
۰,۰۴۶	۲,۹۱۵	۰,۹۷۸۵	۰,۱۹۴۷	۱,۶۶۶۷	۱,۱۵۲۶	۰,۰۶۱۱	۸,۳۸۲۷	۰,۲۱۴۹	۰,۰۴۴۱	۰,۲۹۲	۰,۳۲۶۹	۰,۰۰۰۱۹	.	۱,۵۱۴۶	۹۵۷	۱,۲۹۷
۰,۰۴۸	۲,۹۴۴۳	۱,۰۲۷۲	۰,۱۷۴۲	۱,۶۷۵۸	۱,۱۴۰۶	۰,۰۶۳۳	۸,۱۶۳۶	۰,۲۱۸۸	۰,۰۴۵۱	۰,۲۹۷۴	۰,۳۳۰۳	۰,۰۰۰۲۱	.	۱,۵۴۷۶	۱۰۰۵	۱,۳۲۲
۰,۰۵	۳,۰۰۶۴	۱,۰۵۹	۰,۱۶۹۴	۱,۷۱۰۷	۱,۱۱۳۳	۰,۰۶۹۳	۷,۹۸۱۶	۰,۲۱۰۵	۰,۰۳۶۳	۰,۲۹۵۶	۰,۳۲۷۹	۰,۰۰۰۲۱	.	۱,۵۷۴۴	۱۰۵۴	۱,۳۴۶
۰,۱	۴,۳۴۷	۱,۶۱۵۸	۰,۰۱۶۹	۱,۹۲۰۹	۰,۵۶۸۶	۰,۱۷۷۷	۱۰,۵۵۲۲	۰,۲۴۸۵	-۰,۱۰۲	۰,۲۲۲۹	۰,۲۶۲۷	۰,۰۰۰۰۶	.	۱,۸۹۹۴	۱۰۳۲	۱,۶۲۴
۰,۱۵	۴,۱۲۸۵	۱,۵۴۷	۰,۰۷۴۳	۲,۱۵۳۶	۰,۵۵۱۸	۰,۱۶۱۷	۹,۶۹۲۵	۰,۱۸۵۹	۰,۰۷۸۴	۰,۱۱۰۹	۰,۰۰۸۵	۰,۰۰۰۱۹	.	۲,۱۶۵۱	۸۷۸	۱,۹۳۱
۰,۲	۳,۳۸۸۳	۱,۶۰۷	۰,۱۰۵۲	۲,۲۶۸	۰,۳۰۴۱	۰,۱۸۴۹	۸,۷۸۴۹	۰,۱۱۶۶	۰,۰۱۴۵	۰,۲۲۷۹	۰,۲۱۵۸	۰,۰۰۰۰۴	.	۲,۳۹۶۹	۷۴۸	۲,۱۸۸
۰,۲۵	۲,۷۵۴۴	۱,۴۶۴۸	۰,۱۱۸۷	۲,۱۲۴۶	-۰,۴۱۸	۰,۱۴۸۲	۷,۱۹۲۸	۰,۱۲۲۴	۰,۰۴۰۱	۰,۲۶۱۱	۰,۲۵۳۵	۰,۰۰۰۰۵	.	۲,۵۶۷۶	۶۵۴	۲,۳۸۱
۰,۳	۲,۴۲۵	۱,۵۲۰۷	-۰,۲۰۹	۲,۲۹۱	-	۰,۲۰۱۸	۷,۳۰۷۸	۰,۱۲۸۲	۰,۰۷۸۷	۰,۳۱۱۷	۰,۳۰۱۹	۰,۰۰۰۱۸	.	۲,۶۶۱۴	۵۸۷	۲,۵۱۸
۰,۴	۱,۴۵۹	۱,۵۸۹۷	۰,۲۰۷۴	۲,۰۹۳۷	۰,۰۱۶۹	۰,۱۸۲۴	۵,۳۲۲۷	۰,۱۳۷۴	۰,۱۵۹۵	۰,۴۲۱۶	۰,۴۴۶۳	۰,۰۰۰۴۹	.	۲,۷۸۸۲	۵۰۳	۲,۶۵۷

<sup>۲</sup> Aleatory Uncertainty

<sup>۱</sup> Epistemic Uncertainty



0.5	1.0425	1.2398	-	2.2692	-	-	6.0262	-	0.696	0.2106	0.4202	0.4165	0.0047	0.27746	457	-
0.75	0.2248	0.6105	-0.1117	1.9827	-0.6523	-0.1412	7.1288	0.087	0.2987	0.4608	0.5423	0.0051	0.24361	410	2.401	
1	-	0.527	-0.6455	1.6944	-0.6784	-0.574	7.0095	0.1102	0.3906	0.5565	0.7145	0.0075	1.8795	400	1.955	
1.25	-0.2725	1.0004	-0.5148	1.6284	-0.5149	-0.828	6.79	0.0691	0.3787	0.5218	0.6892	0.0066	1.2798	400	-1.49	
1.5	-0.7156	0.9922	-0.4852	1.5079	-0.7607	-0.046	7.5472	0.1035	0.4445	0.5564	0.7082	0.0068	0.6996	400	1.025	
1.75	-0.2248	1.2319	-	1.5821	-0.5232	-0.082	7.5862	0.121	0.4506	0.4741	0.611	0.0045	0.2676	400	-0.662	
2	0.9106	1.4569	-0.2156	1.4084	-0.629	-	7.7429	0.1662	0.436	0.4357	0.5657	0.0026	-	400	-0.299	
3	1.6127	1.8228	-0.0416	1.4754	-0.765	-	8.0065	0.1717	0.4579	0.3526	0.4262	0.0012	-	400	-	
4	-	1.841	0.0847	1.1406	-0.9475	0.0162	8.0952	0.1668	0.4197	0.2287	0.3247	0.0002	-	400	-	
	2.2647	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0011	0.4291	-	-

جدول ۲: ضرایب رگرسیونی مدل پیشنهادی در تخمین طیف جابجایی با نسبت مقاومت به وزن ۱/۸

T(sec)	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	k1	k2
0.04	2.05	5.2376	0.1102	6.2401	2.7465	-	2.8279	-	-	0.1925	0.1928	-0.002	-	1.2341	865	-
0.042	2.0876	5.1244	0.0952	6.1746	2.6622	-0.8941	2.9146	-0.3622	0.2077	0.1805	0.1829	-	-	1.2382	865	1.186
0.044	2.1069	5.0498	0.0897	6.0999	2.6064	-0.8784	2.9114	-0.3608	0.2196	0.1762	0.1802	0.0022	-	1.4554	908	1.219
0.046	2.0962	5.0212	0.1028	6.0401	2.5508	-0.8659	2.8995	-0.3611	0.2302	0.1802	0.1828	0.0025	-	1.4845	957	1.272
0.048	2.0522	4.9695	0.1006	5.9818	2.5116	-0.8528	2.8877	-0.3674	0.2368	0.1802	0.1828	0.0022	-	1.4845	957	1.297
0.05	2.0322	4.9114	0.0959	5.928	2.4802	-0.8442	2.8852	-0.3572	0.2429	0.1999	0.2076	0.0017	-	1.5117	1005	1.222
0.1	1.7567	4.2402	0.225	6.8261	2.1141	-0.8367	2.852	-0.3464	0.2001	0.2081	0.2179	0.0016	-	1.5249	1054	1.246
0.15	1.0154	3.7592	0.1566	4.467	1.7258	-0.7061	5.2702	0.3097	0.1717	0.2056	0.2312	0.0011	-	1.8452	1022	1.624
0.2	0.106	3.279	0.1515	2.9828	1.5874	-0.5871	5.0722	0.2072	0.1701	0.1365	0.2956	0.0025	-	2.1009	878	1.921
0.25	-	2.0191	0.0222	2.7712	1.2586	-0.5298	4.9864	0.1211	0.1827	0.2091	0.2924	0.0002	-	2.2454	748	2.188
0.3	-0.2795	2.07	-	2.6567	1.1118	-0.4525	4.922	0.0722	0.1827	0.2308	0.3141	0.0002	-	2.5262	654	2.281
0.3	0.6245	2.07	0.0899	2.6567	1.1118	-0.4077	4.6177	0.1105	0.1771	0.2304	0.2959	0.0022	-	2.6512	587	2.518
0.4	-	2.4965	-	2.182	1.0986	-	2.6422	0.2256	0.1788	0.2256	0.4305	0.0047	-	2.7796	502	2.657
0.5	-0.8922	2.2472	0.2664	2.2685	0.9255	-0.3518	5.6669	0.0661	0.2369	0.2368	0.4426	0.0042	-	2.7691	457	-
0.75	-1.571	1.0092	0.5282	2.2461	-	-0.2518	6.2102	0.0782	0.2801	0.2801	0.4704	0.0049	-	2.4484	410	2.669
1	-	0.6245	-0.5282	1.8535	-0.2368	-0.2229	6.6822	0.1089	0.2721	0.5221	0.6647	0.0069	-	1.8825	400	2.401
1.25	1.6621	-0.8245	-0.6249	-	-0.5892	-0.2022	7.2268	0.0722	0.3522	0.492	0.6271	0.0059	-	1.2789	400	1.955
1.5	-	0.9227	0.5242	-	-0.6728	-0.559	8.0742	0.0976	0.4208	0.5352	0.6824	0.0062	-	0.7025	400	-1.49
1.5	1.2666	-	0.5016	-0.8255	-0.2356	-	8.0742	0.0976	0.4208	0.5352	0.6824	0.0062	-	0.7025	400	1.025
1.75	0.9752	1.2692	0.2592	1.5875	-0.405	-0.706	7.984	0.1255	0.4289	0.4492	0.5771	0.004	-	0.2679	400	-0.662
2	-0.9522	1.2548	-	1.2452	-	-	8.0687	0.1622	0.422	0.4216	0.5476	0.0024	-	400	-	-0.299
3	-	1.805	-	1.4588	-	-0.7421	-	0.455	0.1721	0.4522	0.3412	0.0012	-	0.1619	400	-
4	-	1.841	0.0847	1.1849	-0.8109	-0.247	8.1762	0.1668	0.4212	0.2277	0.3179	0.0006	-0.001	-	400	-
	0.828	-	-	-	-0.4422	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4277	-	-

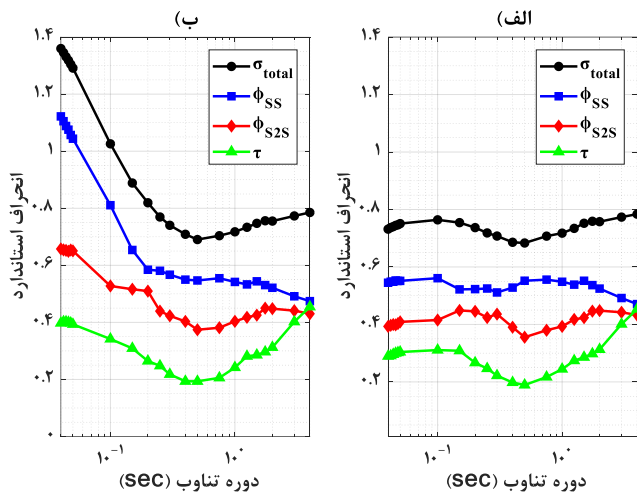
جدول ۳: انحرافات استاندارد و ضریب اثر تصادفی مدل پیشنهادی در تخمین بیشینه شتاب سنگ‌بستر، بیشینه شتاب زمین و طیف شبه‌شتاب با میرایی ۵٪

0.2	0.7369	0.2666	0.4456	0.5229	-
0.25	0.7184	0.2464	0.4229	0.525	-
0.3	0.7076	0.2219	0.4259	0.5112	-
0.4	0.6859	0.1979	0.3902	0.5282	-
0.5	0.6824	0.1892	0.3555	0.5521	-
0.75	0.7072	0.2169	0.3797	0.5559	-
1	0.7177	0.2445	0.3921	0.5485	-
1.25	0.7242	0.2729	0.4172	0.5285	-
1.5	0.7521	0.2857	0.4222	0.552	-
1.75	0.759	0.2978	0.4462	0.5368	-
2	0.7576	0.3129	0.4481	0.5247	-
3	0.7725	0.4009	0.4422	0.4919	-
4	0.7829	0.4522	0.4228	0.4708	-

T(sec)	$\sigma_{total}$	$\tau$	$\phi_{srs}$	$\phi_{ss}$	$\Delta z_{12}$
PGA <sub>rock</sub> (g)	0.7287	-	-	-	-
PGA(g)	0.6896	0.2508	0.2676	0.5268	-
0.04	0.7317	0.2894	0.2921	0.5451	-
0.042	0.7371	0.2911	0.2970	0.5486	-
0.044	0.7404	0.2957	0.2997	0.5486	-
0.046	0.7446	0.2998	0.2985	0.5529	-
0.048	0.7467	0.3019	0.3020	0.5514	-
0.05	0.7509	0.3040	0.3088	0.5516	-
0.1	0.764	0.3108	0.4152	0.5609	-
0.15	0.7542	0.3084	0.4487	0.522	-

انحراف استاندارد ایستگاه به ایستگاه  $\phi_{S2S}$  و (۳) انحراف استاندارد تک ایستگاهی درون‌رویدادی  $\phi_{SS}$  نام‌گذاری شدند. شکل (۳) این انحرافات استاندارد را به‌عنوان تابعی از دوره تناوبی در تخمین طیف شبه‌شتاب با میرایی ۵ درصد و طیف جابجایی با پتانسیل پاسخ غیرالاستیک در نسبت مقاومت به وزن ۰/۱ نمایش می‌دهد. انحرافات استاندارد در این شکل در واحدهای لگاریتم طبیعی آورده شده‌اند تا بتوان آنها را به‌راحتی با انحرافات استاندارد موجود در ادبیات مقایسه کرد. مقادیر انحرافات استاندارد حاصل در این مطالعه در تخمین طیف شبه‌شتاب با میرایی ۵ درصد اندکی کمتر از مقادیر انحرافات استاندارد حاصل در [۱۴] هستند. مقادیر انحرافات استاندارد بالا در دوره‌های تناوبی کوتاه در طیف‌های جابجایی، با توجه به مقادیر کوچک جابجایی و پراکندگی بالای آنها در این دوره‌های تناوبی قابل توجه هستند.

شکل (۴) وابستگی مدل پیشنهادی به  $V_{S30}$  را در تخمین طیف شبه‌شتاب با میرایی ۵ درصد در بزرگای ۶ و ۷ نشان می‌دهد. مقادیر



شکل ۳: تغییرات انحرافات استاندارد کل و مولفه‌های آن در مقابل دوره تناوب، در تخمین الف) طیف شبه‌شتاب با میرایی ۵ درصد و ب) طیف جابجایی با نسبت مقاومت به وزن ۰/۱ (انحرافات استاندارد در واحد لگاریتمی ارائه شده‌اند)

درخت منطق<sup>۱</sup> در نظر گرفته می‌شوند [۱۴]. در این مطالعه با پیروی از نام‌گذاری [۲۸]، سیگمای ارگودیک به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_{ergodic} = \sqrt{\tau^2 + \phi^2} \quad (11)$$

که در آن  $\tau$  انحراف استاندارد میان‌رویدادی و  $\phi$  انحراف استاندارد درون‌رویدادی است. باقیمانده درون‌رویدادی را می‌توان به دو بخش جدول ۴: انحرافات استاندارد و ضریب اثر تصادفی مدل پیشنهادی در تخمین طیف جابجایی با نسبت مقاومت به وزن ۰/۱

T(sec)	$\sigma_{total}$	$\tau$	$\phi_{S2S}$	$\phi_{SS}$	$\Delta z_{17}$
۰,۰۴	۱,۳۵۹۸	۰,۳۹۷۴	۰,۶۵۷۴	۱,۱۲۲	.
۰,۰۴۲	۱,۳۴۵۶	۰,۴۰۲۲	۰,۶۵۴۰	۱,۱۰۵۱	.
۰,۰۴۴	۱,۳۳۱	۰,۴۰۲۰	۰,۶۵۲۳	۱,۰۸۸۳	.
۰,۰۴۶	۱,۳۱۸۳	۰,۴۰۰۲	۰,۶۴۹۱	۱,۰۷۵۴	.
۰,۰۴۸	۱,۳۰۴۶	۰,۳۹۷۷	۰,۶۴۵۳	۱,۰۵۶۸	.
۰,۰۵	۱,۲۹۱۳	۰,۳۹۳۲	۰,۶۴۰۶	۱,۰۴۳۸	.
۰,۱	۱,۰۲۵۸	۰,۳۴۱۷	۰,۵۲۷۶	۰,۸۱۰۷	.
۰,۱۵	۰,۸۸۸۵	۰,۳۰۹۰	۰,۵۱۶۲	۰,۶۵۳۸	.
۰,۲	۰,۸۱۹۳	۰,۲۶۴۵	۰,۵۰۹۶	۰,۵۸۴۵	.
۰,۲۵	۰,۷۶۹۴	۰,۲۴۷۷	۰,۴۳۹۵	۰,۵۸۰۹	.
۰,۳	۰,۷۴۰۳	۰,۲۱۷۹	۰,۴۳۲۱	۰,۵۶۷۱	.
۰,۴	۰,۷۰۸۸	۰,۱۹۳۵	۰,۴۰۳۳	۰,۵۴۹۸	.
۰,۵	۰,۶۹۰۳	۰,۱۹۳۴	۰,۳۷۴۲	۰,۵۴۶۹	.
۰,۷۵	۰,۷۰۳۸	۰,۲۰۵۶	۰,۳۸۱۳	۰,۵۵۴۷	.
۱	۰,۷۱۷۵	۰,۲۴۱۷	۰,۴۰۳۶	۰,۵۴۱۸	.
۱,۲۵	۰,۷۳۳۳	۰,۲۸۱۳	۰,۴۱۷۷	۰,۵۳۳۱	.
۱,۵	۰,۷۴۷۲	۰,۳۸۵۶	۰,۴۲۵۴	۰,۵۴۳۹	.
۱,۷۵	۰,۷۵۶۲	۰,۲۹۶۴	۰,۴۴۹۸	۰,۵۳۰۷	.
۲	۰,۷۵۵۱	۰,۳۱۲۴	۰,۴۴۸۱	۰,۵۲۱۳	.
۳	۰,۷۷۳۱	۰,۴۰۲۰	۰,۴۴۲۱	۰,۴۹۱۵	.
۴	۰,۷۸۵۲	۰,۴۵۴۴	۰,۴۳۰۲	۰,۴۷۴۴	.

باقیمانده رویداد-ایستگاه تصحیح‌شده ( $\delta WS_{es}$ ) و باقیمانده ایستگاه به ایستگاه ( $\delta S_{2S}$ ) تجزیه کرد. انحراف استاندارد  $\delta S_{2S}$  و  $\delta WS_{es}$  به ترتیب با  $\phi_{SS}$  و  $\phi_{S2S}$  نشان داده شده است، که

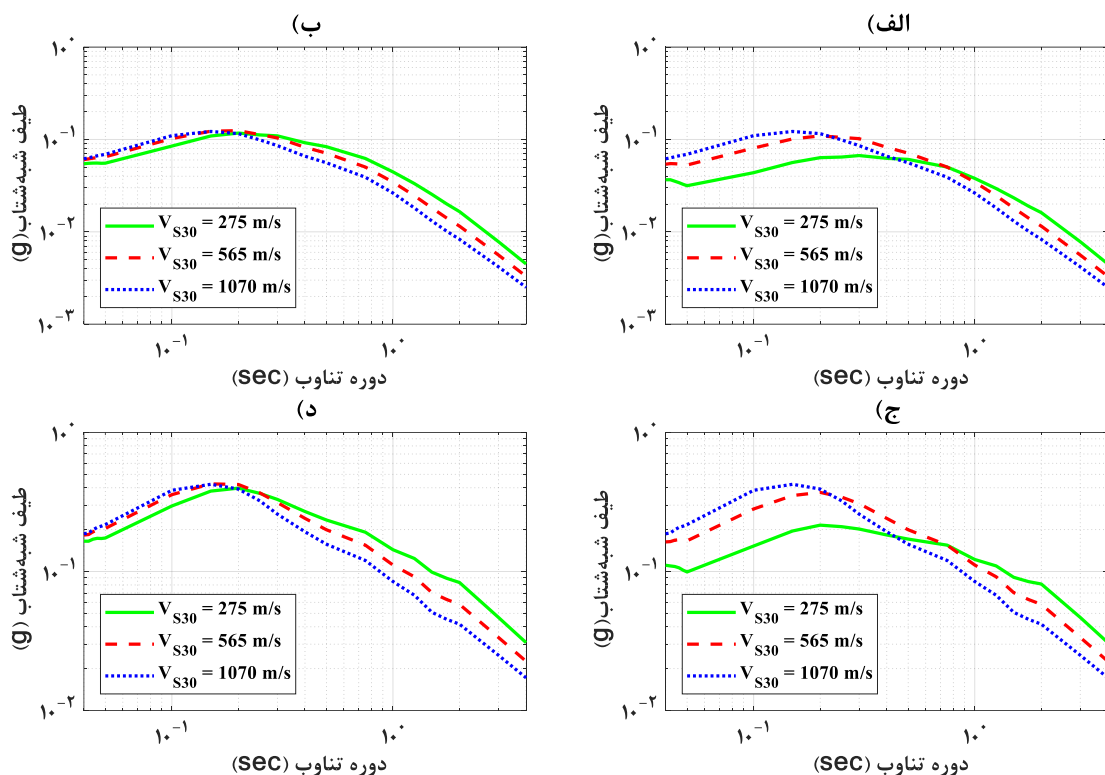
$$\phi^2 = \phi_{SS}^2 + \phi_{S2S}^2 \quad (12)$$

لذا معادله ۱۱ به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\sigma_{ergodic} = \sqrt{\tau^2 + \phi_{SS}^2 + \phi_{S2S}^2} \quad (13)$$

به پیروی از [۱۲] یک تکنیک مولفه واریانس مدل اثر مختلط برای تجزیه خطای مدل به سه بخش، استفاده شد که با استفاده از اصطلاحات [۲۶] به‌صورت، (۱) انحراف استاندارد میان‌رویدادی  $\tau$ ، (۲)

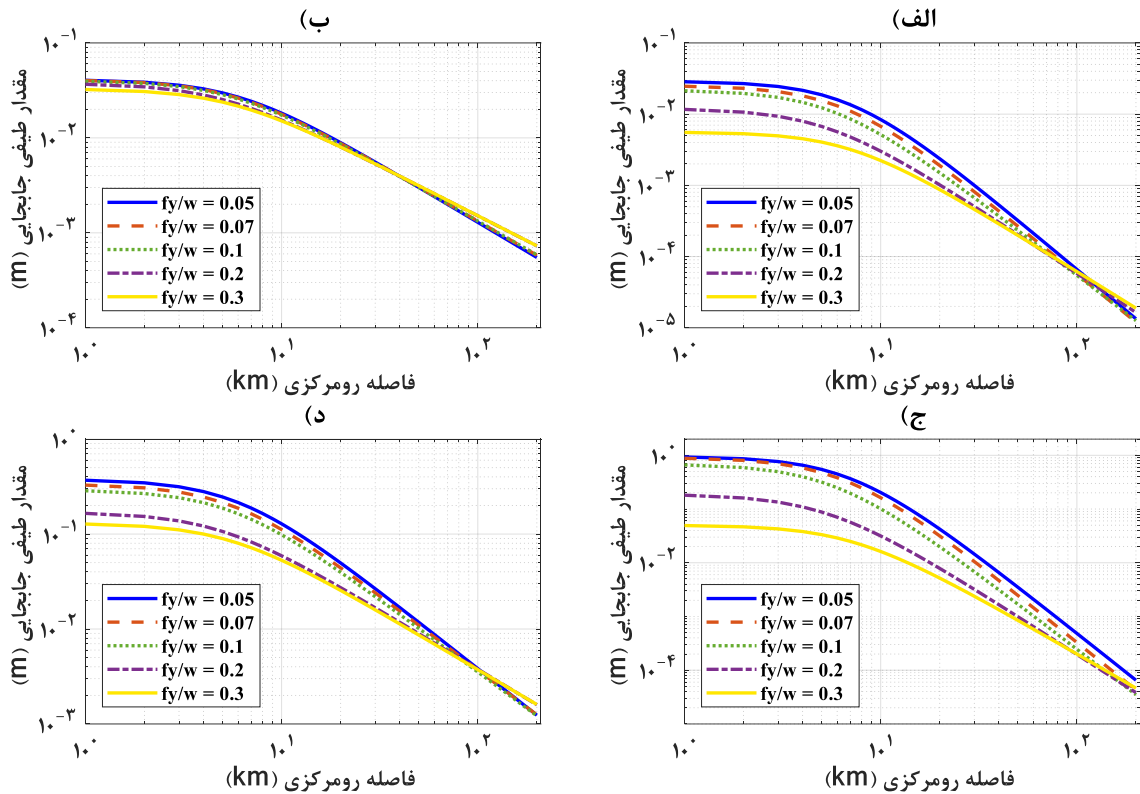
<sup>۱</sup> Logic tree



شکل ۴: وابستگی مدل پیشنهادی در پیش‌بینی طیف شبه‌شتاب با میرایی ۵ درصد به  $V_{S30}$ ، در فاصله رومرکزی ۴۰ کیلومتری و الف) بزرگای ۶ و بیشینه شتاب سنگ‌بستر ۰.۵g، ب) بزرگای ۶ و بیشینه شتاب سنگ‌بستر ۰.۱g، ج) بزرگای ۷ و بیشینه شتاب سنگ‌بستر ۰.۵g و د) بزرگای ۷ و بیشینه شتاب سنگ‌بستر ۰.۱g.

شکل (۵) کاهش‌دهنده‌ی مقادیر طیفی جابجایی در دوره تناوبی ۰/۱ و ۰/۵ ثانیه را به‌عنوان تابعی از فاصله رومرکزی در بزرگای گشتاوری ۶ و ۷ برای نسبت‌های مختلف مقاومت به وزن در نظر گرفته‌شده نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد در بزرگای کوچک و یا فواصل دور مقادیر طیفی جابجایی در نسبت‌های مختلف مقاومت به وزن به یکدیگر نزدیکتر هستند، این نکته به‌خصوص در دوره‌های تناوبی بلند مشخص‌تر می‌شود. چراکه از طرفی حرکات زمین در فواصل دور از منبع به علت تضعیف آنها، به‌ندرت منجر به پاسخ غیرالاستیک می‌شوند و در این فواصل اکثراً پاسخ‌ها از نوع الاستیک هستند و از طرفی دیگر در دوره‌های تناوبی بلند، به‌دلیل نرمی سازه، رکوردهای با بزرگای کوچک، به‌ندرت منجر به پاسخ غیرالاستیک می‌شوند. درحالی‌که در دوره‌های تناوبی کوتاه اینگونه نیست و غالباً پاسخ‌ها از نوع غیرالاستیک هستند. برای مجموعه رکوردهای این پایگاه داده، در دوره‌های تناوبی میانی (تقریباً ۰/۱ تا ۰/۵ ثانیه) بیشترین تعداد و در دوره‌های تناوبی بلند کمترین تعداد

$V_{S30}$  انتخاب‌شده، به‌عنوان نماینده هر رده ساختمانی در آیین‌نامه ۲۸۰۰، در شکل نشان داده شده‌اند. در شکل (۴) برای حصول طیف‌ها بیشینه شتاب سنگ‌بستر برابر با ۰.۱g و ۰.۵g و فاصله رومرکزی برابر با ۴۰ کیلومتر در نظر گرفته شدند. نمودارهای این شکل در واقع نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های مدل به ازای مقادیر خاصی از پارامترهای پیش‌بینی‌کننده هستند. این شکل نشان می‌دهد در دوره‌های تناوبی کوتاه خاک‌های سخت ( $V_{S30}$  بیشتر) مقادیر طیفی شبه‌شتاب بیشتری نسبت به خاک‌های نرم ( $V_{S30}$  کمتر) دارند و این نکته در دوره‌های تناوبی بلند برعکس می‌شود. همچنین کاملاً مشهود است که در بزرگای بزرگ و بیشینه شتاب‌های سنگ‌بستر بزرگ اثرات رده ساختمانی بیشتر نمایان شده است. بررسی وابستگی سایر طیف‌های هدف به  $V_{S30}$  نتایج مشابهی را منجر شدند. نتیجه‌گیری و نمودارهای مشابهی در بررسی تاثیر  $V_{S30}$  در تخمین طیف‌های شبه‌شتاب در [۱۶] ارائه شده است.



شکل ۵: کاهندگی مقادیر طیفی جابجایی با پتانسیل پاسخ غیرالاستیک به عنوان تابعی از فاصله در نسبت‌های مقاومت به وزن ۰/۰۵، ۰/۰۷، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ و در الف) دوره‌های تناوب ۰/۱ ثانیه و بزرگای ۶، ب) دوره تناوب ۰/۵ ثانیه و بزرگای ۶، ج) دوره تناوب ۰/۱ ثانیه و بزرگای ۷ و د) دوره تناوب ۰/۵ ثانیه و بزرگای ۷

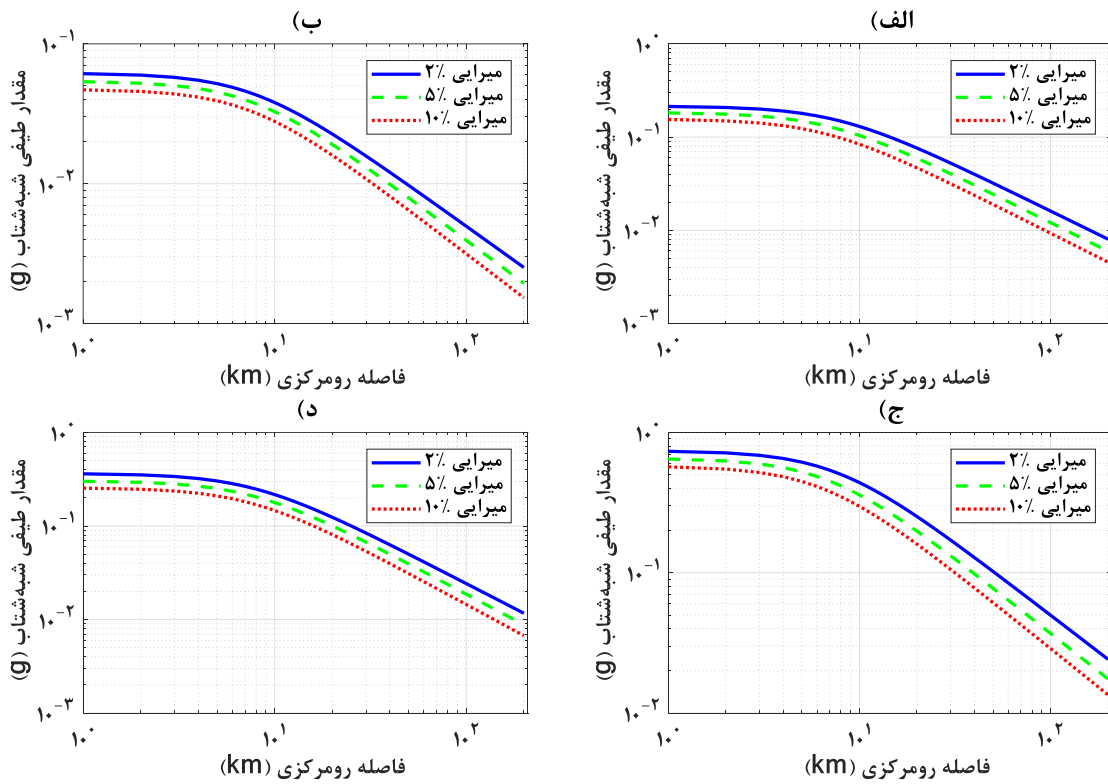
تخمین آنها نیز منجر به باقیمانده‌هایی با انحرافات استاندارد کمتر می‌شود.

شکل‌های (۷) و (۸) ویژگی‌های مقیاس‌بندی بزرگا را نشان می‌دهند که توسط مدل این مطالعه در  $R_{EPI}=20, 60, 120$  کیلومتر و  $V_{S30}$  برابر ۷۶۰ متر بر ثانیه برای طیف شبه‌شتاب با میرایی ۵ درصد و طیف جابجایی با نسبت مقاومت به وزن ۰/۱ پیش‌بینی شده است. شکل (۷) نشان می‌دهند که مدل توسعه‌یافته در بزرگای بزرگ، فواصل کوتاه و دوره‌های تناوبی کوتاه، اشباع بیش از حد زیادی را نشان نمی‌دهد. از آنجایی که اتفاق نظر بین محققان و زلزله‌شناسان برای جلوگیری از اشباع بیش از حد در مدل‌های جنبش زمین است (به‌عنوان مثال، به [۱۵] و [۱۲] مراجعه کنید)، رویکرد این مطالعه منطقی به نظر می‌رسد. رفتار مشابهی با در نظر گرفتن سایر مقادیر  $V_{S30}$  مشاهده شد. در شکل (۸) خطوط بریده بیانگر جابجایی تسلیم هستند و برای تشخیص نوع پاسخ طیفی ترسیم شده‌اند. به‌طوری که

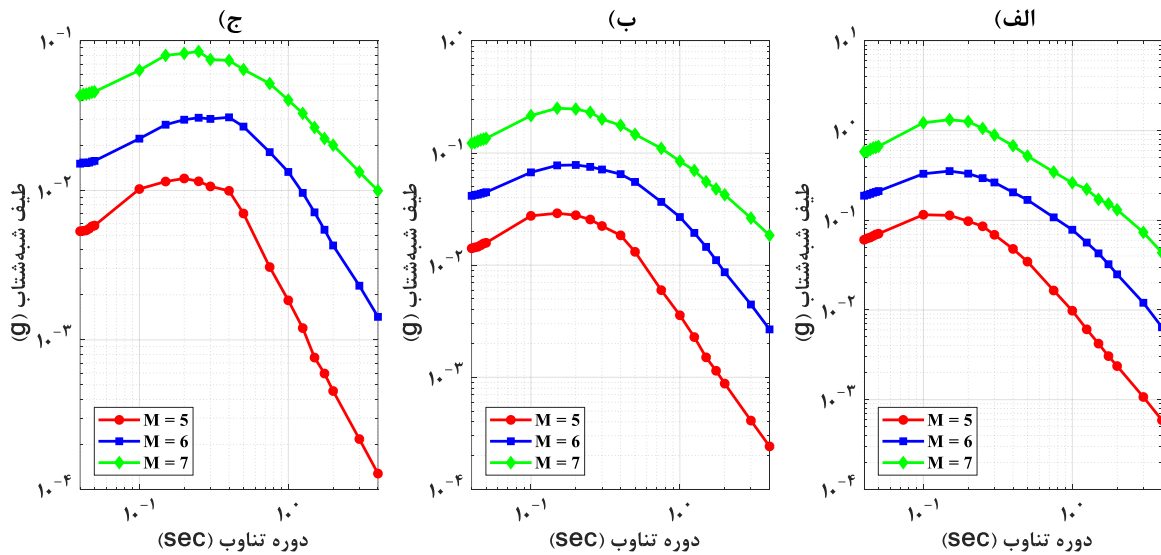
رکوردها با پاسخ غیرالاستیک وجود دارد. لذا در دوره‌های تناوبی بلند اکثراً پاسخ‌ها از نوع الاستیک بوده و از این‌رو طیف‌های تخمینی مدل پیشنهادی نیز رفتاری مشابه دارند.

شکل (۶) مقادیر طیفی شبه‌شتاب پیش‌بینی‌شده در دوره‌های تناوبی ۱ و ۲ ثانیه و برای میرایی‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق انتظار با افزایش میرایی مقادیر طیفی پیش‌بینی‌شده در تمامی موارد کاهش می‌یابد. همچنین مقایسه انحراف استاندارد مدل پیشنهادی در پیش‌بینی طیف‌های شبه‌شتاب با میرایی‌های مختلف، نشان داد با افزایش میرایی مقادیر طیفی پیش‌بینی‌شده در تمامی موارد کاهش می‌یابد. همچنین مقایسه انحراف استاندارد مدل پیشنهادی در پیش‌بینی طیف‌های شبه‌شتاب با میرایی‌های مختلف، نشان داد با افزایش میرایی انحراف استاندارد معادلات کاهش می‌یابد، چراکه در طیف‌های پاسخ رکوردها با میرایی‌های بزرگتر مقادیر طیفی به‌لحاظ بزرگی به هم نزدیکتر هستند و در نتیجه پراکندگی کمتری دارند و

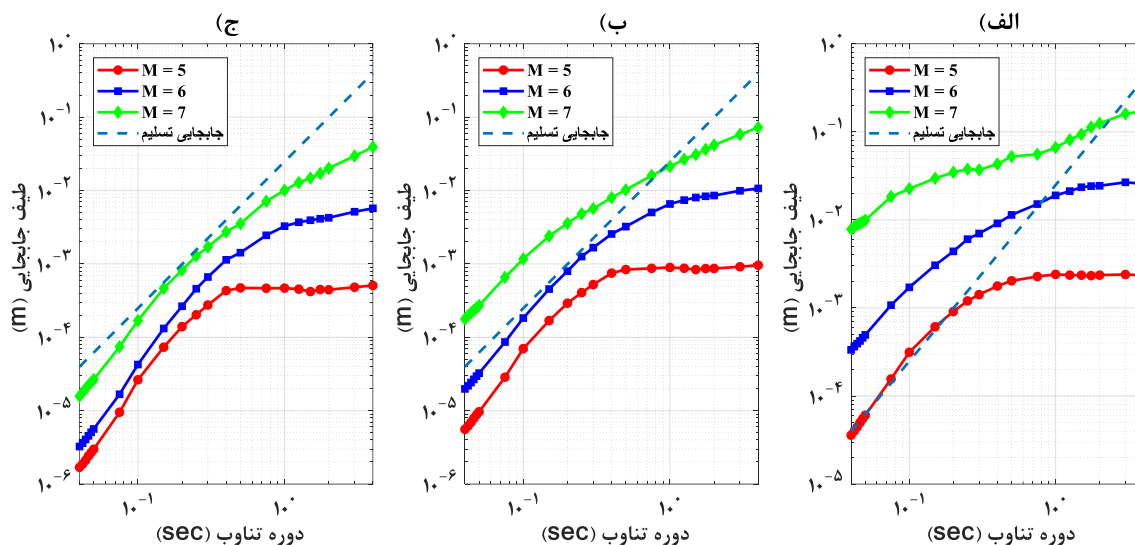
کمتر از آن نیز از نوع الاستیک است.



شکل ۶: کاهندگی مقادیر طیفی شبه‌شتاب به‌عنوان تابعی از فاصله در میرایی‌های ۲، ۵ و ۱۰ درصد و در الف) دوره تناوب ۱ ثانیه و بزرگای ۶، ب) دوره تناوب ۲ ثانیه و بزرگای ۶، ج) دوره تناوب ۱ ثانیه و بزرگای ۷ و د) دوره تناوب ۲ ثانیه و بزرگای ۷



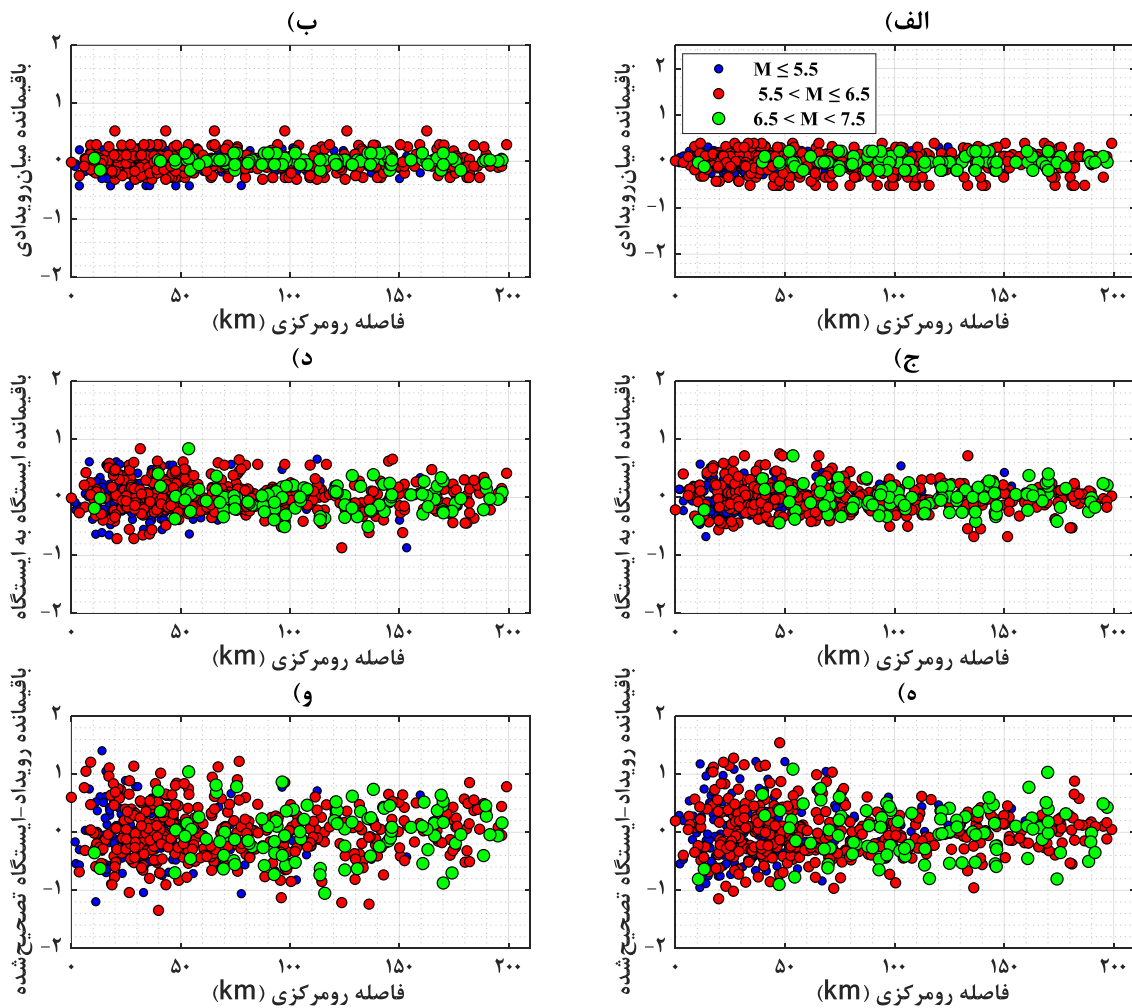
شکل ۷: طیف‌های شبه‌شتاب پیش‌بینی‌شده با میرایی ۵ درصد، در بزرگای ۵، ۶ و ۷،  $V_{S30}=760\text{ m/s}$  و در الف) فاصله رومرکزی ۲۰ کیلومتری، ب) فاصله رومرکزی ۶۰ کیلومتری و ج) در فاصله رومرکزی ۱۲۰ کیلومتری



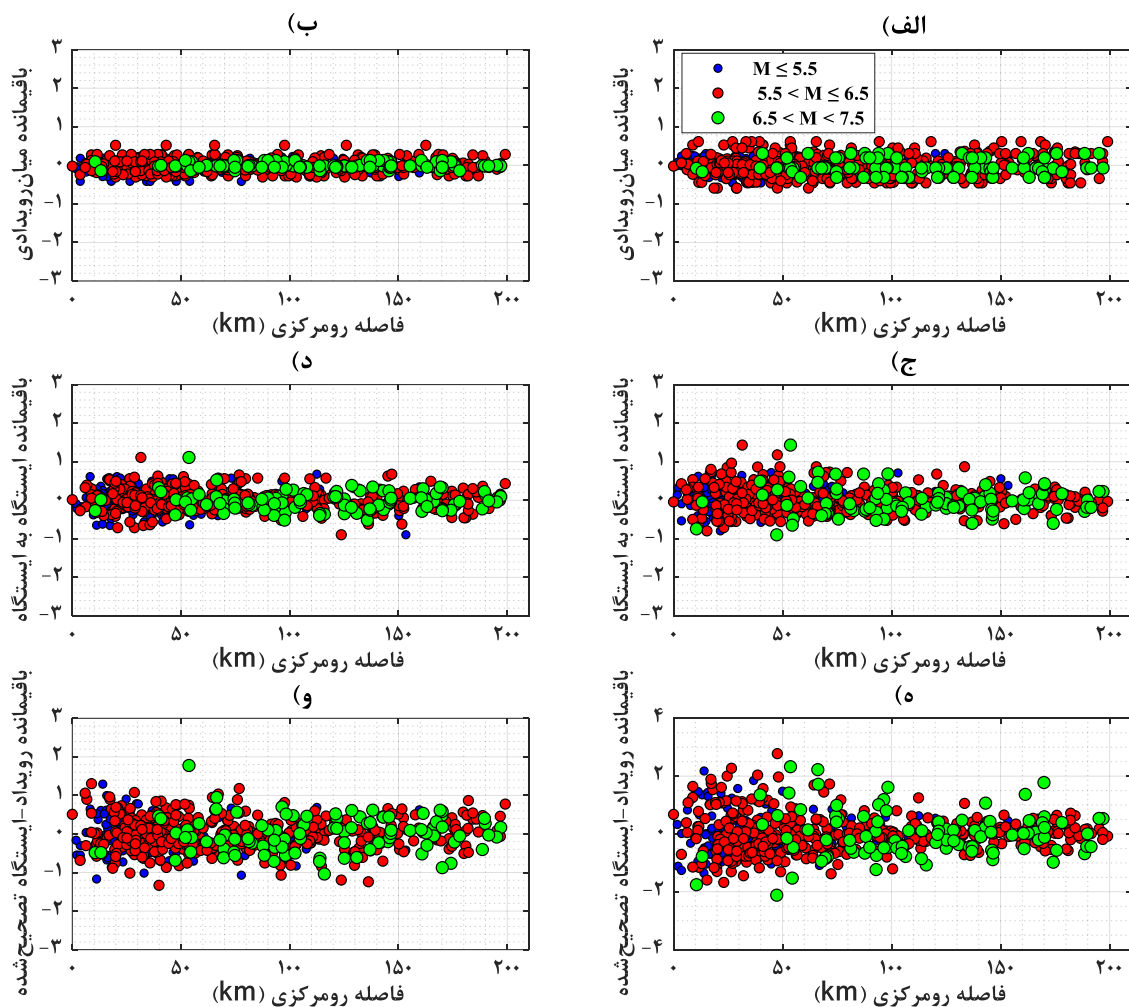
شکل ۸: طیف‌های جایجایی پیش‌بینی شده با نسبت مقاومت به وزن ۰/۱، در بزرگای ۵، ۶ و ۷،  $V_{S30}=760\text{ m/s}$  و در الف) فاصله رومرکزی ۲۰ کیلومتری، ب) فاصله رومرکزی ۶۰ کیلومتری و ج) فاصله رومرکزی ۱۲۰ کیلومتری

شکل (۸) نشان می‌دهد مطابق انتظار در طیف‌های جایجایی تخمین زده شده هر دو نوع پاسخ الاستیک و غیرالاستیک وجود دارند. علاوه بر این، در فواصل دور و بزرگای کوچک غالباً جایجایی از نوع الاستیک است و به ندرت در این محدوده‌ها می‌توان پاسخ طیفی از نوع غیرالاستیک یافت. این شکل به خوبی اهمیت فواصل نزدیک و بزرگای بزرگ را نشان می‌دهد. توزیع باقیمانده‌های میان‌رویدادی، ایستگاه به ایستگاه و رویداد-ایستگاه تصحیح شده به ترتیب در مقابل بزرگا،  $V_{S30}$  و فاصله، به ترتیب مناسب بودن یا نبودن مقیاس بندی بزرگای منبع، مقیاس بندی  $V_{S30}$  ایستگاه و مقیاس بندی فاصله را در مدل پیشنهادی توصیف می‌کنند. شکل‌های (۹) و (۱۰) توزیع باقیمانده‌های میان‌رویدادی، ایستگاه به ایستگاه و رویداد-ایستگاه تصحیح شده را در برابر فاصله رومرکزی نشان می‌دهند تا اعتبار میانه مدل این مطالعه برای پیشینه شتاب زمین و مقدار طیفی شبه‌شتاب با میرایی ۵ درصد در دوره تناوبی از معیار فاصله ساده‌تر در مدل پیشنهادی قابل انتظار بود.

۱/۰ ثانیه و طیف جایجایی با نسبت مقاومت به وزن ۰/۱ در دوره تناوبی ۰/۱ و ۱ ثانیه به عنوان تابعی از فاصله رومرکزی بررسی کند. در این مطالعه، در ارائه نمودارهای توزیع باقیمانده‌ها از [۱۴] پیروی شده است اما در هر صورت شکل‌های بیشتر در پیوست جهت بررسی‌های بیشتر اعتبار میانه مدل در میرایی‌ها و نسبت‌های مقاومت به وزن مختلف در مقابل سایر پارامترهای مدل، ارائه شده است. ارزیابی این اشکال توزیع تصادفی باقیمانده‌ها را منجر می‌شود، که نشان می‌دهد هیچ سوگیری و هیچ روند قابل توجهی وجود ندارد و پیش‌بینی‌های مدل با مشاهدات مطابقت خوبی دارند. البته می‌توان اشاره کرد که در فواصل کوتاه و مخصوصاً در پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین اندکی محدوده باقیمانده‌ها بزرگتر است که با توجه به استفاده از معیار فاصله ساده‌تر در مدل پیشنهادی قابل انتظار بود.



شکل ۹: توزیع باقیمانده‌های میان‌رویدادی، ایستگاه به ایستگاه و رویداد-ایستگاه تصحیح‌شده مدل پیشنهادی در مقابل فاصله رومرکزی در تخمین بیشینه‌شتاب (به ترتیب الف، ج و ه) و مقدار طیفی شبه‌شتاب با میرایی ۵ درصد در دوره تناوب ۱ ثانیه (به ترتیب ب، د و و). باقیمانده‌ها در واحد لگاریتمی هستند و رنگ و اندازه نقاط بیانگر بزرگی بزرگای آنهاست.



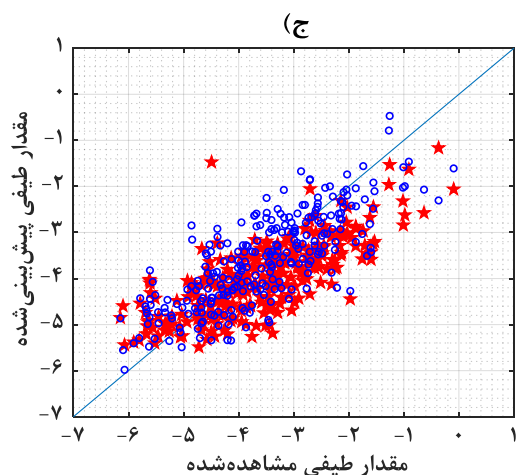
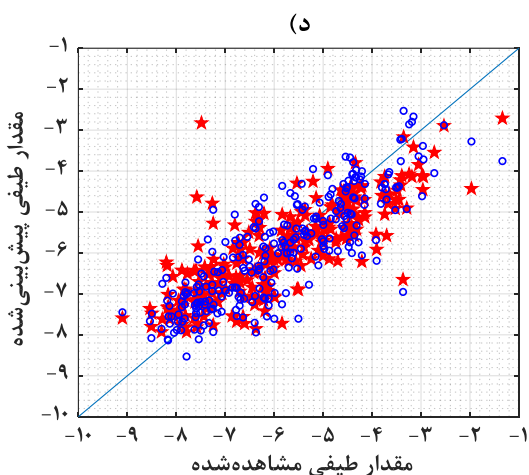
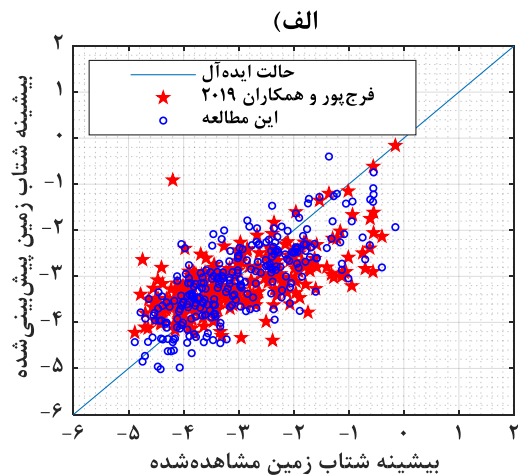
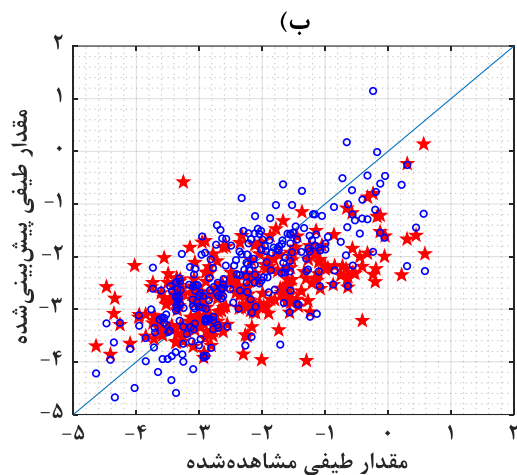
شکل ۱۰: توزیع باقیمانده‌های میان‌رویدادی، ایستگاه به ایستگاه و رویداد-ایستگاه تصحیح‌شده مدل پیشنهادی در تخمین مقدار طیفی جابجایی با نسبت مقاومت به وزن ۰/۱ در مقابل فاصله رومرکزی در دوره تناوب ۰/۱ ثانیه (به ترتیب الف، ج، و ه) و در دوره تناوب ۱ ثانیه (به ترتیب ب، د، و و). باقیمانده‌ها در واحد لگاریتمی هستند و رنگ و اندازه نقاط بیانگر بزرگی بزرگای آنهاست.

## ۶ - مقایسه با مدل‌های قبلی

مدل توسعه‌یافته در این مطالعه با مدل فرچ‌پور و همکاران [۱۴] مقایسه می‌شود. مدل [۱۴] رویدادهای ایرانی بعد از سال ۲۰۱۳ را شامل نمی‌شود، در حالیکه مدل این مطالعه آخرین رویدادهای ایران را نیز در بر می‌گیرد. مقایسه مدل‌ها می‌تواند شامل مقایسه میان‌پیش‌بینی‌ها و انحرافات استاندارد مدل‌ها باشد. با توجه به این‌که مدل‌های توسعه‌یافته پیشین تنها بر روی طیف شبه‌شتاب با میرایی ۵ درصد و بیشینه‌های حرکتی زمین متمرکز بوده‌اند، بنابراین امکان مقایسه مدل‌ها تنها در این زمینه‌ها وجود دارد. از طرفی دیگر معیار

فاصله مورد استفاده در [۱۴]، فاصله گسیختگی ( $R_{RUP}$ ) است، اما در این مطالعه از معیار فاصله رومرکزی استفاده شده است و تخمینی از  $R_{RUP}$  برای رکوردها وجود ندارد. بنابراین مقایسه میان‌مدل‌ها به این صورت انجام شد که ابتدا رکوردهای مشترک بین پایگاه‌داده [۱۴] و پایگاه‌داده این مطالعه انتخاب شدند. این مجموعه شامل ۲۶۵ رکورد شد. سپس میان‌مقادیر تخمین‌زده‌شده برای هر رکورد با استفاده از پایگاه‌داده و معادلات هر مدل به‌طور مجزا محاسبه شدند. سرانجام میان‌مقادیر تخمینی هر مدل با مقادیر مشاهده‌شده مقایسه می‌شوند. شکل (۱۱) این مقایسه را برای بیشینه شتاب زمین و مقادیر طیفی شبه‌شتاب در دوره‌های تناوبی ۰/۱، ۱ و ۴ ثانیه برحسب لگاریتم





شکل ۱۱: مقایسه میانه تخمین‌های مدل این مطالعه و مدل فرج‌پور و همکاران [۱۴] با مقادیر مشاهده‌شده در الف) بیشینه شتاب زمین، ب) مقدار طیفی شبه‌شتاب در دوره تناوب ۰/۱ ثانیه، ج) مقدار طیفی شبه‌شتاب در دوره تناوب ۱ ثانیه و د) مقدار طیفی به‌شتاب در دوره تناوب ۴ ثانیه (نتایج در واحد لگاریتمی ارائه شده‌اند)

انحرافات استاندارد حاصل نیز نشان می‌دهد مقادیر انحرافات استاندارد این مطالعه قدری کمتر از مقادیر انحرافات استاندارد [۱۴] است. تفاوت‌های دو مدل می‌تواند از تفاوت در کمیت و کیفیت پایگاه‌داده‌های مورد استفاده و شکل معادلات نشأت بگیرد.

## ۷- نتیجه‌گیری

مدل جنبش زمین این مطالعه برای ایران بر اساس یک پایگاه‌داده به‌روز از جنبش نیرومند زمین ایران که رویدادهای مهم تقریباً ۵۰ سال اخیر را در بر می‌گیرد، توسعه یافته است. مجموعه داده‌های مورد استفاده شامل ۶۵۹ رکورد از ۱۱۵ رویداد اصلی با

طبیعی  $g$  نشان می‌دهد. در نمودارهای این شکل محور افقی و محور قائم به ترتیب مقادیر مشاهده‌شده و میانه پیش‌بینی شده هستند. نیم‌ساز نمودارها حالت ایده‌آل است که روی آن مقادیر مشاهده‌شده و مقادیر میانه پیش‌بینی برابر هستند. نقاط آبی رنگ و نقاط قرمز رنگ در هر نمودار مقادیر مشاهده‌شده در مقابل میانه پیش‌بینی شده را به ترتیب برای مدل این مطالعه و مدل [۱۴] نشان می‌دهد. دو مدل مقادیر نزدیک بهم را در بیشتر موارد پیش‌بینی می‌کنند. با این وجود در برخی موارد تفاوت‌ها زیاد است. به‌طور کلی به‌نظر می‌رسد پیش‌بینی‌های این مطالعه اندکی به خط ایده‌آل نزدیکتر هستند، اما این برتری جزئی در تمام محدوده داده‌ها وجود ندارد. مقایسه

## منابع

- [۱] Stöcklin, J. "Structural history and tectonics of Iran: a review", *AAPG bulletin*, ۵۲(۷), pp. ۱۲۲۹-۱۲۵۸ (۱۹۶۸).
- [۲] Takin, M. "Iranian geology and continental drift in the Middle East", *nature*, ۲۳۵(۵۳۳۴), pp. ۱۴۷-۱۵۰ (۱۹۷۲).
- [۳] Nowroozi, A. A. "Seismotectonic provinces of Iran", *Bulletin of the Seismological Society of America*, ۶۶(۴), pp. ۱۲۴۹-۱۲۷۶ (۱۹۷۶).
- [۴] Mirzaei, N., Mengtan, G., & Yuntai, C. "Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces", *Journal of earthquake prediction research*, ۷, pp. ۴۶۵-۴۹۵ (۱۹۹۸).
- [۵] Makiabadi, H.Y., Nasrabadi, A. and Sepahvand, M.R. "Attenuation of ground-motion spectral amplitudes in central and eastern Iran", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 310, p. ۱۰۶۵۹۸ (۲۰۲۱).
- [۶] Pourzeynali, S. and Khadivyan, A. "Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Peak and Spectral Accelerations for Alborz Zone of Iran", *Journal of Earthquake Engineering*, 26(۱۴), pp. ۷۴۶۹-۷۴۸۵ (۲۰۲۲).
- [۷] Zare, M., Bard, P.Y. and Ghafory-Ashtiany, M. "Site characterizations for the Iranian strong motion network", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۱۸(۲), pp. ۱۰۱-۱۲۳ (۱۹۹۹).
- [۸] Nowroozi, A. A. "Attenuation Relations for Peak Horizontal and Vertical Accelerations of Earthquake Ground Motion in Iran: A Preliminary Analysis", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, ۷(۲), pp. ۱۰۹-۱۲۸ (۲۰۰۵).
- [۹] Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y. and Koketsu, K. "An empirical spectral ground-motion model for Iran", *Journal of Seismology*, ۱۳(۴), pp. ۴۹۹-۵۵۱ (۲۰۰۹).
- [۱۰] Soghrat, M. R., Khaji, N., & Zafarani, H. "Simulation of strong ground motion in northern Iran using the specific barrier model", *Geophysical Journal International*, ۱۸۸(۲), pp. ۶۴۵-۶۷۹ (۲۰۱۲).
- [۱۱] Zafarani, H., & Soghrat, M. "Simulation of ground motion in the Zagros region of Iran using the specific barrier model and the stochastic method", *Bulletin of the Seismological Society of America*, ۱۰۲(۵), pp. ۲۰۳۱-۲۰۴۵ (۲۰۱۲).

سازوکارهای کانونی امتدادلغز و معکوس بوده که بر اساس آنها محدوده بزرگای گشتاوری مدل ۷.۴ × ۵ است و محدوده فاصله رومرکزی ۰ تا ۲۰۰ کیلومتر است. مدل این پژوهش علاوه بر پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین و طیف شبه‌شتاب افقی با میرایی ۲ و ۵ و ۱۰ درصد، قادر به تخمین طیف جابجایی با نسبت مقاومت به وزن ۰/۰۵ تا ۰/۳ برای دوره‌های تناوبی حداکثر تا ۴/۰ ثانیه برای ایران است. چنین قابلیت‌هایی در هیچ‌کدام از مدل‌های توسعه‌یافته قبلی گنجانده نشده است و تنها طیف‌های شبه‌شتاب مدنظر بوده است. این درحالی‌است که طیف‌های شبه‌شتاب هنگام ورود به محدوده غیرالاستیک کارایی خود را از دست می‌دهند و در این محدوده‌ها معیارهایی نظیر جابجایی باید مورد پیش‌بینی و استفاده قرار گیرند. دستاوردهای این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که مدل‌های جنبش زمین می‌توانند چنین قابلیت‌هایی را داشته باشند و در محدوده‌های غیرالاستیک نیز به پیش‌بینی پاسخ‌های سازه بپردازند. در مدل توسعه‌یافته، پنج منطقه لرزه‌زمین‌ساختی مختلف در فلات ایران در نظر گرفته شد، اما تجزیه و تحلیل آماری اثرات تصادفی با استفاده از روش رگرسیون اثر مختلط نشان داد که تفاوت‌های منطقه‌ای در تغییرات برآوردشده برحسب پایگاه‌داده و شکل معادلات این مطالعه ناچیز هستند. با این وجود با توجه به تعداد پایین رکوردهای مناطق کوه‌داغ و مکران در پایگاه‌داده این مطالعه، استفاده از مدل در این مناطق به‌شرط بررسی بیشتر توصیه می‌گردد. یک پاسخ غیرخطی ساختگاه در مدل پیشنهادی گنجانده شد. توزیع باقیمانده‌های به‌دست آمده با در نظر گرفتن باقیمانده‌های میان‌رویدادی، ایستگاه به ایستگاه و رویداد-ایستگاه تصحیح‌شده هیچ روند و سوگیری قابل تشخیصی را برای مدل پیشنهادی نشان ندادند. بر اساس تجزیه و تحلیل باقیمانده‌ها، پیش‌بینی‌های مدل توسعه‌یافته به‌خوبی با پایگاه‌داده مطابقت دارد و برای پایگاه‌داده مناسب است. براساس نتایج بخش ۶، مدل این مطالعه ضمن در بر گرفتن آخرین رویدادهای رخداد در ایران و با وجود استفاده از معیار فاصله ابتدایی‌تر نسبت به فرج‌پور و همکاران [۱۴]، که کارایی و سهولت در استفاده از آن را منجر می‌شود، نتایجی سازگار با مدل [۱۴] را نشان داد و در نتیجه مدل این پژوهش می‌تواند همراه با [۱۴] و سایر مدل‌های منتشرشده اخیر در انجام مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای و برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های معرفتی لازم استفاده شود.

- catalog for Iran”, *Arabian Journal of Geosciences*, 11, pp. 1-16 (2018).
- [22] Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. “New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement”, *Bulletin of the seismological Society of America*, 82(4), pp. 974-1002 (1994).
- [23] Kaklamanos, J., Baise, L. G., & Boore, D. M. “Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice”, *Earthquake Spectra*, 27(4), pp. 1219-1235 (2011).
- [24] Gardner, J. K., & Knopoff, L. “Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?”, *Bulletin of the seismological society of America*, 64(2), pp. 1363-1367 (1974).
- [25] *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, Standard No. 2800, 3rd Revision, Building & Housing Research Center, Iran (2014) (In Persian).
- [26] National Earthquake Hazards Reduction Program (US), & Building Seismic Safety Council (US). *NEHRP Recommended Provisions (National Earthquake Hazards Reduction Program) for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*. Building Seismic Safety Council (2001).
- [27] Lindstrom, M. J., & Bates, D. M. “Nonlinear mixed effects models for repeated measures data”, *Biometrics*, pp. 673-687 (1990).
- [28] Atik, L. A., Abrahamson, N., Bommer, J. J., Scherbaum, F., Cotton, F., & Kuehn, N. “The variability of ground-motion prediction models and its components”, *Seismological Research Letters*, 81(2), pp. 794-801 (2010).
- [29] Walling, M., Silva, W., & Abrahamson, N. “Nonlinear site amplification factors for constraining the NGA models”, *Earthquake spectra*, 24(1), pp. 243-255 (2008).
- [30] Silva, W. J. “Site response simulations for the NGA project”, *Report prepared for the Pacific Earthquake Engineering Research Center* (2005).
- [31] Sedaghati, F., & Pezeshk, S. “Partially nonergodic empirical ground-motion models for predicting horizontal and vertical PGV, PGA, and 5% damped linear acceleration response spectra using data from the Iranian plateau”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), pp. 934-948 (2017).
- [32] Kotha, S. R., Bindi, D., & Cotton, F. “Partially non-ergodic region specific GMPE for Europe and Middle-East”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14, pp. 1245-1263 (2016).
- [33] Farajpour, Z., Pezeshk, S., & Zare, M. “A new empirical ground-motion model for Iran”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(2), pp. 732-744 (2019).
- [34] Hassani, N., Ghodrati Amiri, G., Baramia, M., & Sinaeian, F. “Ground motion prediction equation for inelastic spectral displacement in Iran”, *Scientia Iranica*, 24(1), pp. 164-182 (2017).
- [35] Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. “NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra”, *Earthquake Spectra*, 30(3), pp. 1087-1115 (2014).
- [36] Zafarani, H. and Soghrat, M.R. “An Empirical Spectral Ground-Motion Model for Iran Using Truncated Iranian Strong-Motion Database Enriched by Near-Field Records”, *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 1-24 (2023).
- [37] Douglas, J. “Ground motion prediction equations 1964-2021”, *Department of Civil and Environmental Engineering University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom* (2021).
- [38] Ghodrati Amiri, G., Zahedi, M., Mahdavian, A. and Gholami, S. “Appropriate frequency band for correcting Iranian accelerograms in direct site condition”, *Journal of Faculty of Engineering, University of Tehran*, 33(2), pp. 231-249 (2004) (In Persian).
- [39] Heath, D. C., Wald, D. J., Worden, C. B., Thompson, E. M., & Smoczyk, G. M. “A global hybrid VS 30 map with a topographic slope-based default and regional map insets”, *Earthquake Spectra*, 36(3), pp. 1570-1584 (2020).
- [40] Farajpour, Z., Zare, M., Pezeshk, S., Ansari, A., & Farzanegan, E. “Near-source strong motion database

# **A new strong ground motion model for predicting Peak Ground Acceleration (PGA), pseudo-acceleration spectra and displacement spectra in Iran**

## **Abstract:**

Due to the inelasticity of the ground and geometric expansion, seismic waves are reduced by moving away from the center of wave propagation, which is called the attenuation of seismic waves. Therefore, the ground motions that occur at the site of the structures are different from the ground motions that are emitted from the source. The upcoming study investigates the attenuation of seismic waves in the geographical area of Iran based on the accelerogram data of Iran.

In this study, a new ground motion model (GMM) for Iran is developed to estimate peak ground acceleration (PGA), pseudo-acceleration spectral values (PSA) in 2, 5, and 10 percent damping, and displacement spectral values (Sd) at 21 oscillator periods ranging from 0.04 s to 4 s. The displacement spectra considered in this research are the displacement spectra with constant resistance-to-weight ratio, which includes both types of elastic and inelastic displacement. Also, the considered resistance-to-weight ratios include five ratios from 0.05 to 0.3. The database of this study includes 659 records of 115 shallow crustal mainshocks that occurred in Iran from 1976 to 2022 with a magnitude range of  $5 \leq M_w \leq 7.4$  and an epicentral distance range of 0 to 200 km. Random-effect coefficients were defined in the mixed-effect regression model for regional differences among the five regions of the Iranian plateau, and no statistical differences were detected among these regions. The effects of nonlinear response of the site soil are taken into account in the developed GMM using the  $V_{sr}$  parameter (average shear wave velocity in the upper 30 meters of the soil profile). The residuals of the proposed GMM are decomposed into three between-event, site-to-site and event-site-corrected components, and their distributions are examined against the predictor variables. The distribution of residuals obtained showed no significant bias for the developed GMM. The output of this research is a GMM for Iran, which can be used to estimate the spectrum of pseudo-elastic acceleration and the spectrum of elastic and inelastic displacement.

**Keywords:** Strong Ground Motion Model, Ground Motion Prediction Equations, Pseudo-Acceleration Spectrum, Elastic Displacement Spectrum, Inelastic Displacement Spectrum, Iran Earthquake Catalog.