

رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین (رابطه‌ی کاهندگی) برای شتاب طیفی زلزله‌های ایران

نعمت حسینی* (استادیار)

پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

غلامرضا قدرتی‌امیری (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مجید بورانیا (دانشجوی دکتری)

پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

فریدون سینانیان (استادیار)

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

حسن جهانیان (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۴
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۲۱-۱۱

یکی از مهم‌ترین داده‌ها برای طراحی لرزه‌ی سازه‌ها، طیف طراحی است. امروزه در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ی عموماً از طیف‌های طراحی کشسان استفاده می‌شود. متداول‌ترین روش‌های تهیه‌ی طیف طراحی، تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالاتی و تعیینی هستند که در آن از روابط پیش‌بینی حرکت زمین استفاده می‌شود. با گسترش شبکه‌ی شتاب‌نگاری کشور و افزایش داده‌های ثبت شده از زلزله‌های رخ داده در ایران، تهیه‌ی رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین براساس داده‌های جدید و با دقت بیشتر ضروری است. در این نوشتار، رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین برای طیف شتاب در ایران پیشنهاد شده است. برای این پیشنهاد تعداد ۸۰۶ رکورد مربوط به 33° زمین‌لرزه مورد استفاده قرار گرفته است. زلزله‌های انتخاب شده، بزرگای بیش از ۴ و کمتر از $7/3$ و تقریباً $9/8$ آن‌ها فاصله‌ی رومرکز کمتر از 20° کیلومتر دارند. براساس شرایط زمین‌ساختی ایران، ۳ رابطه‌ی مستقل برای کل ایران، ناحیه‌ی زاگرس و البرز - ایران مرکزی ارائه شده است.

n_hassani@sbu.ac.ir
ghodrati@iust.ac.ir
m_bararnia@sbu.ac.ir
sinaiean@yahoo.com
civil.hassanjahanian@gmail.com

واژگان کلیدی: رابطه‌ی کاهندگی، شتاب طیفی، زاگرس، البرز، ایران.

۱. مقدمه

می‌آیند، دقت آنها به میزان بسیار زیادی به تعداد و کیفیت داده‌ها بستگی دارد.

در پژوهشی در سال 2010 با استفاده از ۷۲۵ رکورد از زلزله‌های ثبت شده در ایران تا سال 2007 ، رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین برای شتاب طیفی ارائه کردند. آنها با توجه به متوسط سرعت موج برشی تا عمق 30 متر، ساخت‌گاه‌ها را به دو دسته‌ی سنگ و خاک تقسیم کردند. به‌علاوه با توجه به شرایط زمین‌ساختی ایران، داده‌ها را به دو قسمت زاگرس و البرز - ایران مرکزی تقسیم کردند.^[۱]

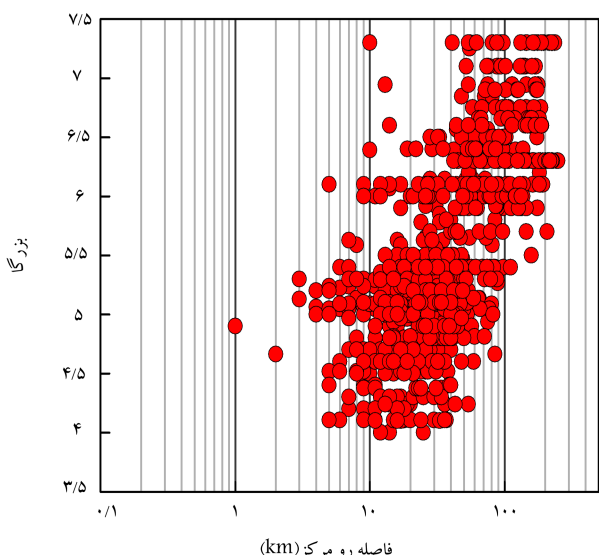
در مطالعه‌ی دیگری در سال (2009) رابطه‌ی برای شتاب طیفی ایران با استفاده از ۷۱۶ رکورد حاصل از 200 زلزله با بزرگای بیش از ۵ ارائه کردند. آنها نیز ساخت‌گاه‌ها را به دو دسته‌ی خاک و سنگ تقسیم کردند.^[۲] همچنین در سال 2012 ، پژوهشگرانی با در نظر گرفتن ۳۵۱ رکورد ثبت شده در ایران با بزرگای بیش از ۵، رابطه‌ی برای شتاب طیفی ناحیه‌ی زاگرس و البرز - ایران مرکزی ارائه و ساخت‌گاه‌ها را به ۳ دسته تقسیم کردند، و نیز در رابطه‌ی آنها اثر نوع گسل در نظر گرفته شده است.^[۳] این نوشتار در ادامه‌ی پژوهش‌های مؤلف دوم است که در پژوهش‌های پیشین

طیف‌های طراحی ارتجاعی به‌صورت گسترده‌ی در تحلیل دینامیکی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند و به همین دلیل، جایگاه خاصی در مهندسی زلزله دارند. طیف‌های طراحی مشخصه‌ی از سطح نیروی طراحی لرزه‌ی یا تغییرشکل به‌صورت تابعی از زمان تناوب ارتعاش طبیعی و نسبت میرایی هستند،^[۱] که این دو مورد، جزء پارامترهای تأثیرگذار در پاسخ سازه‌ها در زمان زلزله هستند. در مواردی که سازه‌ی موردنظر اهمیت خاصی داشته باشد، برای به‌دست‌آوردن طیف‌های طراحی از روش‌های تحلیل خطر احتمالاتی و تعیینی استفاده می‌شود.

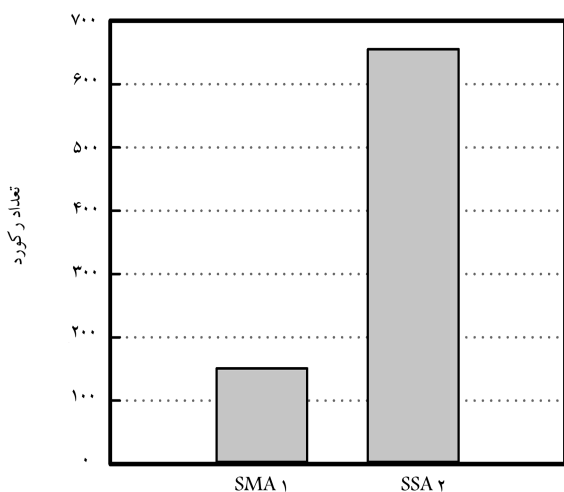
روابط پیش‌بینی حرکت زمین در روش‌های تحلیل خطر تعیینی و احتمالاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. چنین روابطی، پارامترهای زمین‌لرزه (شتاب طیفی، بیشترین شتاب زمین‌لرزه و...) را به خصوصیات همانند: بزرگای فاصله‌ی ساخت‌گاه تا منبع، شرایط نوع خاک ساخت‌گاه و دیگر عوامل تأثیرگذار مرتبط می‌کند. به‌دلیل آنکه این روابط براساس داده‌های ثبت شده از زلزله‌های گذشته به‌دست

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۲/۱۴، اصلاحیه ۱۳۹۲/۴/۱۳، پذیرش ۱۳۹۲/۵/۱۲.



شکل ۱. توزیع رکوردهای مورد استفاده در این مطالعه برحسب فاصله و بزرگا.



شکل ۲. توزیع رکوردهای انتخابی براساس نوع دستگاه ثبت.

این نوشتار، سه رابطه‌ی کاهندگی برای ناحیه‌ی ایران، زاگرس و البرز - ایران مرکزی ارائه شده است که به دلیل عدم هم‌گرایی در مرحله‌ی برازش، در دو رابطه‌ی آخر از فاصله‌ی کانونی استفاده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، داده‌های بزرگ‌تراز بزرگای ۶/۵ در فاصله‌ی کمتر از ۳۰ کیلومتر، کم است. علاوه بر این شکل ۲، توزیع رکوردهای انتخابی را به صورت تابعی از نوع دستگاه ثبت داده‌ها نشان می‌دهد. در این نوشتار سعی بر آن است تا با انتخاب رکوردهای ثبت شده توسط دستگاه‌های دیجیتال (SSA۲)، که کیفیت بالاتری دارند، از به‌وجود آمدن خطاهای مربوط به مشکلات کیفیت کم داده‌ها جلوگیری شود.

مطالعات گوناگونی در مورد شرایط زمین‌ساختی و استان‌های لرزه‌ی زمین‌ساختی ایران صورت گرفته است. از جمله در پژوهشی ایران را به ۴ ناحیه‌ی بزرگ زمین‌ساختی زاگرس، ایران مرکزی، البرز و کپه داغ تقسیم کرده‌اند.^[۸] در مطالعات دیگری نیز ایران به دو ناحیه‌ی کلی تقسیم شده است.^[۹،۱۰] این دو ناحیه شامل زاگرس و ایران غیر از ناحیه‌ی زاگرس است، که به آن البرز - ایران مرکزی گفته می‌شود.

خود روابطی برای شتاب طیفی و بیشترین شتاب زمین‌لرزه ارائه کرده‌اند. با توجه به افزایش داده‌های ثبت شده از زلزله‌های رخ داده در ایران و بهبود کیفیت داده‌ها، در این نوشتار سعی شده است از این دو ویژگی اساسی که در بهبود دقت روابط پیش‌بینی حرکت زمین نقش به‌سزایی دارند، بیشترین بهره‌برداری شود. با توجه به توضیحات داده شده، به روابط جدید پیش‌بینی حرکت زمین، که براساس داده‌های جدید به دست آمده باشند، نیاز است.

۲. داده‌های زمین‌لرزه و اصلاح آن‌ها

انتخاب داده‌ها برای ارائه‌ی یک رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین به چندین پارامتر وابسته است. این پارامترها شامل: کیفیت داده‌های ثبت شده، بزرگا، فاصله، نوع ساخت‌گاه، گسل مسبب و... می‌شود. داده‌های ثبت شده در ایران از نظر دستگاری به ۲ دسته‌ی آنالوگ (SMA۱) و دیجیتال (SSA۲) تقسیم می‌شود. کیفیت داده‌های ثبت شده توسط دستگاه‌های آنالوگ در سال‌های قبل از ۱۹۹۴ میلادی، در اغلب موارد کیفیت چندان مناسبی ندارند. به همین دلیل در این نوشتار سعی بر آن بوده است تا با حذف این دسته از رکوردها از به‌وجود آمدن خطاهای مربوط به آن جلوگیری شود.

امروزه در روابط پیش‌بینی زمین‌لرزه از بزرگای ممان استفاده می‌شود. یکی از دلایل مهم آن را می‌توان اشباع‌نشدن آن در رخداد‌های بزرگ بر شمرد. این مزیت باعث شده است که از بزرگای ممان به طور گسترده در روابط پیش‌بینی حرکت زمین استفاده شود. در کاتالوگ زمین‌لرزه‌های ایران برای بسیاری از رخداد‌های سال‌های اخیر، بزرگای ممان توسط سازمان‌های مسئول گزارش شده است. به دلیل اینکه بخش قابل توجهی از داده‌های مورد استفاده شامل این رویدادهاست، بر این اساس در رابطه‌ی پیشنهادی نیز از بزرگای ممان برای توصیف اندازه‌ی زلزله استفاده شده است. برای رخداد‌هایی که بزرگای ممان آن‌ها گزارش نشده است (که بیشتر آن‌ها مربوط به رخداد‌های قبل از سال ۱۹۹۴ هستند)، روابط مناسب جهت تبدیل کردن دیگر بزرگاها به بزرگای ممان به کار رفته است.^[۶،۷] در این نوشتار زلزله‌هایی انتخاب شده‌اند که دارای بزرگای ممان بیش از ۴ هستند.

معیارهای گوناگونی برای تعیین فاصله‌ی منبع تا ساخت‌گاه وجود دارد. بسته به آنکه منبع لرزه‌زا، نقطه‌یی یا محدود در نظر گرفته شود، معیارهای اندازه‌گیری فاصله‌ی منبع تا ساخت‌گاه متفاوت هستند. متأسفانه در کاتالوگ زلزله‌های ایران به دلیل کمبود اطلاعات در مورد گسل‌های مسبب، فقط فاصله‌ی رومرکز و ژرفای کانونی گزارش شده است. برای به دست آوردن فاصله‌ی کانونی می‌توان از ژرفای کانونی و فاصله‌ی رومرکز استفاده کرد.

به دو دلیل برای اندازه‌گیری فاصله‌ی ساخت‌گاه تا منبع، از فاصله‌ی رومرکز استفاده شده است:

- برای زلزله‌های با بزرگای $M_w \leq 6$ ، به دلیل صفحه‌ی گسیختگی کوچک، فاصله‌ی رومرکز با r_{zb} برابر است.^[۷] کوتاه‌ترین فاصله تا تصویر قائم سطح گسیختگی گسل است.
 - جهت محاسبه‌ی فاصله‌ی رومرکز نیازی به محاسبه‌ی ژرفای زلزله نیست. محاسبه‌ی ژرفای زلزله می‌تواند با خطای بزرگی همراه باشد.^[۷]
- با توجه به توضیحات داده شده و تذکر این نکته که بخش قابل توجهی از رخداد‌های موجود، بزرگای کمتر از ۶ دارند (شکل ۱)، جهت اندازه‌گیری مسافت منبع تا ساخت‌گاه، انتخاب فاصله‌ی رومرکز مناسب‌تر از فاصله‌ی کانونی است. در

گروه دوم: ساخت‌گاه با خاک سخت $75^{\circ} < V_{r0} \leq 375$ ،
گروه سوم: ساخت‌گاه با خاک نرم $175 \leq V_{r0}$.

در شکل ۴، تعداد رکوردهای ناحیه‌ی زاگرس و البرز - ایران مرکزی براساس تقسیم‌بندی شرایط ساخت‌گاه ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ الف مشاهده می‌شود، تعداد رکوردهای ثبت‌شده برای ناحیه‌ی زاگرس در ساخت‌گاه نوع ۳ کم است. به همین منظور در رابطه‌ی ارائه‌شده برای ناحیه‌ی زاگرس از دو دسته‌بندی خاک و سنگ استفاده شده است. ساخت‌گاه ۱ به‌عنوان سنگ و مجموع رکوردهای ساخت‌گاه نوع ۲ و ۳ به‌عنوان خاک در نظر گرفته شده‌اند.

در کاتالوگ زمین‌لرزه‌های ایران برای تعداد اندکی از رکوردها، مشخصات گسل‌های مسبب موجود است، به همین دلیل نوع گسل و دیگر پارامترهای وابسته به آن در رابطه‌ی پیشنهادی در نظر گرفته نشده است. در انتها، ۸۰۶ رکورد از ۳۳۰ رخداد انتخاب شده‌اند.

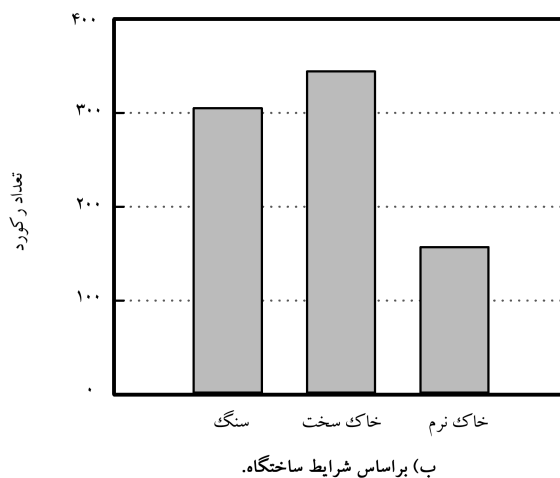
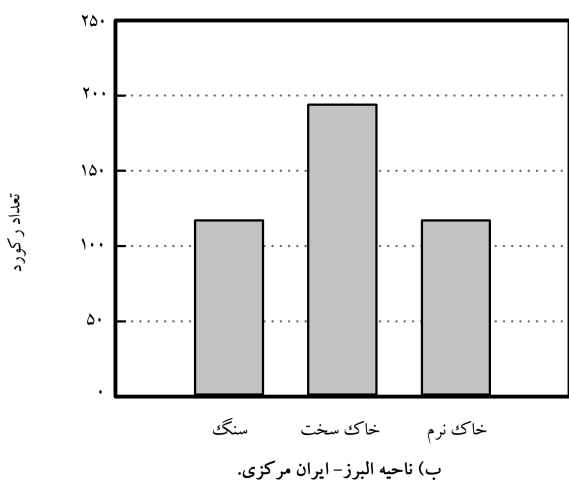
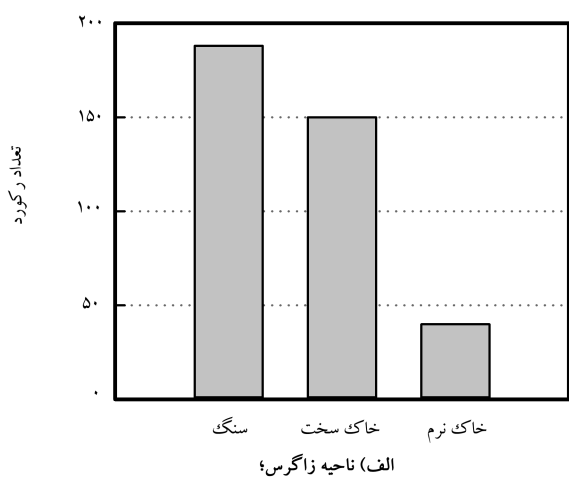
همان‌طور که در بخش‌های پیشین به آن اشاره شده است، داده‌های زلزله در ایران توسط دو دستگاه SMA۱ و SSA۲ ثبت شده‌اند. به همین دلیل جهت پردازش داده‌ها، نوع دستگاه ثبت باید در نظر گرفته شود. هر یک از رکوردها به‌صورت جداگانه با استفاده از روش‌های ذکرشده در مرجع^[۱۴] و پیشنهادهای موجود در مرجع^[۱۵] اصلاح شده‌اند.

پردازش داده‌ها شامل دو بخش اصلاح خط مبنا و فیلترکردن می‌شود. در

بسامد رخداد زلزله در ناحیه‌ی زاگرس زیاد است، اما شدت و بزرگای کمی دارد. در مقابل، زلزله در ناحیه‌ی البرز - ایران مرکزی دارای بسامد رخداد کم و بزرگای بالاست. با توجه به موارد ذکرشده، سه رابطه‌ی کاهندگی ارائه می‌شود، که عبارت‌اند از: ۱. رابطه‌ی کاهندگی برای کل ایران، ۲. رابطه‌ی کاهندگی برای ناحیه‌ی زاگرس، ۳. رابطه‌ی کاهندگی برای ناحیه‌ی البرز - ایران مرکزی. در شکل ۳ الف تعداد رکوردهای مورد استفاده در این مطالعه برحسب شرایط زمین‌ساختی نشان داده شده است.

شرایط محلی ساخت‌گاه در کلیه‌ی خصوصیات مهم حرکت نیرومند زمین شامل: دامنه، محتوای فرکانسی و مدت زمان دوام زلزله اثر قابل ملاحظه‌ی می‌گذارد. میزان تأثیر، تابع هندسه، خواص مصالح لایه‌های سطحی، توپوگرافی ساخت‌گاه و خصوصیات حرکت ورودی است. در آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله‌ی ایران (استاندارد ۲۸۰۰)^[۱۶]، ساخت‌گاه‌ها براساس میانگین سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متری (V_{r0}) به ۴ دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. در تقسیم‌بندی ساخت‌گاه‌ها در این نوشتار نیز از مقادیر میانگین سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر (V_{r0}) استفاده شده است، که مقادیر آن براساس مراجع^[۱۱-۱۳] به‌دست آمده است. برای تطابق این رابطه با معیارهای استاندارد ۲۸۰۰^[۱۶]، از این تقسیم‌بندی جهت بررسی اثر نوع ساخت‌گاه استفاده شده است (شکل ۳ ب):

گروه اول: ساخت‌گاه سنگ $75^{\circ} \geq V_{r0}$



شکل ۴. توزیع رکوردهای ناحیه‌ی زاگرس و البرز براساس شرایط ساخت‌گاهی.

شکل ۳. توزیع رکوردهای انتخابی.

اصلاح خط مبنا از روش خط مبنای تکه‌بندی استفاده شده است.^[۱۴] جهت فیلترکردن نگاشت‌ها از فیلتر برش بالا و پایین استفاده و نوع فیلتر نیز acausal انتخاب شده است.^[۱۴] پردازش شتاب نگاشت‌ها با نرم‌افزار USDP^[۱۶] انجام شده است. به علاوه نسبت کمترین بسامد قابل استفاده به بسامد فیلتر برش پایین ۱/۲ انتخاب شده است، تا اطمینان حاصل شود که مقادیر طیفی تحت تأثیر فیلتر نیستند.

۳. متغیر پاسخ

هدف از این نوشتار ارائه‌ی یک رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین برای مقادیر طیفی شتاب در ناحیه‌ی ایران است و به این منظور از داده‌های زلزله‌های رخ داده در ایران استفاده شده است. جهت بدست آوردن طیف پاسخ شتاب، رفتار سیستم‌های یک‌درجه آزادی، کشسان با میرایی و اسکوز برابر ۵٪ میرایی بحرانی در نظر گرفته شده است. مقادیر طیفی برای ۱۶ دوره‌ی تناوب مابین مقادیر ۰/۰۶ تا ۴ ثانیه به دست آمده است. این فرآیند برای تمام رکوردهای انتخابی تکرار شده است. جهت برازش منحنی، از میانگین هندسی دو مؤلفه‌ی افقی استفاده شده است.

۴. رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین

پارامترهای شناخته و ناشناخته‌ی زیادی وجود دارند که در پارامترهای حرکت زمین تأثیرگذارند. در رابطه‌ی پیشنهادی، سعی شده است تا براساس داده‌های موجود تأثیر این پارامترها در نظر گرفته شود. با توجه به محدودیت‌های موجود در داده‌های زلزله‌های ایران اثر بزرگا، فاصله و نوع ساخت‌گاه مستقیماً در نظر گرفته شده است. اثر شرایط تکتونیک با تقسیم ایران به دو ناحیه‌ی زاگرس و البرز - ایران مرکزی نیز ملحوظ شده است.

۱.۴. معادله برای کل ایران

فرم و عبارات موجود در معادلات پیش‌بینی حرکت زمین تحت تأثیر اطلاعات موجود در کاتالوگ زمین‌لرزه‌های مورد استفاده قرار دارد. بدین معنا که هر اندازه اطلاعات موجود درباره‌ی زلزله، گسل مسبب و هندسه‌ی صفحه‌ی گسیختگی و دیگر پارامترهای تأثیرگذار بیشتر باشد، با اضافه شدن عبارات به معادلات، دقت آن‌ها افزایش می‌یابد. معادله‌ی ۱ به دلیل محدودیت‌های اطلاعات موجود انتخاب شده است:

$$\log(Y) = a_1 + a_2 M_w + a_3 \log \sqrt{d_{epi}^2 + a_4^2} + a_5 S_S + a_6 S_A + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن، Y پارامتر زمین‌لرزه (شتاب طیفی)، M_w بزرگای ممان، d_{epi} فاصله‌ی رومرکز، پارامترهای a_1 تا a_6 ضرایب رگرسیون هستند، که محاسبه می‌شوند. S_S و S_A ضرایب ساخت‌گاه هستند که به ترتیب برای ساخت‌گاه نوع اول: صفر و صفر، برای ساخت‌گاه نوع دوم: صفر و ۱، و نیز برای ساخت‌گاه نوع سوم: ۱ و صفر هستند. عبارات اصلی انتخاب شده در این رابطه براساس رابطه‌ی پیشنهادی در پژوهشی در سال ۲۰۰۵ انتخاب شده است.^[۱۷] از جمله‌ی نرخ کاهش وابسته به بزرگا، به دلیل آنکه ضرایب آن به درستی برآورد نمی‌شد، صرف‌نظر شده است. همچنین ε عبارت خطا با میانگین صفر و انحراف معیار کل σ_T است. انحراف معیار کل نیز از رابطه‌ی

۲ محاسبه می‌شود:

$$\sigma_T = \sqrt{\tau^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

که در آن، τ انحراف معیار بین رویداد و σ انحراف معیار درون رویداد است. برای هر دوره‌ی تناوب، ضرایب a_1 تا a_6 و انحراف معیارهای τ و σ با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی اثر مختلط^۱ (رگرسیون اثر رندم) محاسبه می‌شود.^[۱۷] بدین منظور از نرم‌افزار R^[۱۸] و روش بیشینه‌ی درست‌نمایی^۲ استفاده شده است، تا مقادیر ضرایب رابطه‌ی ۱ به دست آید. برای برازش رابطه‌های ارائه شده برای ناحیه‌های زاگرس و البرز - ایران مرکزی نیز از همین روش استفاده شده است. مقادیر هر یک از ضرایب رابطه‌ی ۱ در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۴. معادله برای ناحیه‌ی زاگرس

فرم ریاضی معادله‌ی انتخابی به صورت رابطه‌ی ۳ است:

$$\log(Y) = a_1 + a_2 M_w + a_3 \log \sqrt{d_{epi}^2 + h_{hypo}^2} + a_4 S_S + \varepsilon \quad (3)$$

که در آن، Y پارامتر زمین‌لرزه (شتاب طیفی)، M_w بزرگای ممان، d_{epi} فاصله‌ی رومرکز، h_{hypo} عمق کانونی، پارامترهای a_1 تا a_5 ضرایب رگرسیون هستند که محاسبه می‌شوند، S_S ضریب ساخت‌گاه است که برای ساخت‌گاه نوع اول صفر، و برای ساخت‌گاه نوع دوم و سوم برابر ۱ است. همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، شرایط ساخت‌گاه در رابطه‌ی ۳ نسبت به رابطه‌ی ۱ به دلیل کم بودن تعداد رکوردهای ثبت شده در ساخت‌گاه نوع ۳ دارای تغییرات است. در این رابطه به دلیل عدم همگرایی در برازش در حالت استفاده از فاصله رومرکز، از فاصله‌ی کانونی استفاده شده است. ضرایب رابطه‌ی ۳ در جدول ۲ ارائه شده است. ε عبارت خطا با میانگین صفر و انحراف معیار کل σ_T است که در رابطه‌ی ۲ تعریف شده است.

جدول ۱. ضرایب رابطه‌ی ۱ برای کل ایران.

T (sec)	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
۰/۰۶	۲/۱۳۳	۰/۲۴۴	-۱/۰۲۶	۱۲/۶۲۹	-۰/۰۲۶	۰/۰۲۸
۰/۰۷۵	۲/۲۲۳	۰/۲۴۷	-۱/۰۵۰	۱۲/۶۲۸	-۰/۰۲۹	۰/۰۱۷
۰/۱	۲/۴۲۸	۰/۲۴۶	-۱/۰۹۹	۱۷/۹۵۰	-۰/۰۳۲	۰/۰۳۵
۰/۱۵	۲/۰۸۱	۰/۲۸۰	-۰/۹۹۷	۱۶/۸۱۸	۰/۰۲۲	۰/۰۷۸
۰/۲	۱/۷۶۶	۰/۳۱۱	-۰/۹۲۶	۱۷/۱۹۸	۰/۰۳۲	۰/۰۷۹
۰/۲۵	۱/۴۹۵	۰/۳۳۲	-۰/۸۷۸	۱۶/۶۲۰	۰/۰۷۳	۰/۱۰۱
۰/۳	۱/۲۷۰	۰/۳۴۹	-۰/۸۴۱	۱۶/۵۸۹	۰/۱۰۳	۰/۱۰۱
۰/۴	۰/۷۴۲	۰/۳۹۴	۰/۷۷۶	۱۳/۸۴۵	۰/۱۴۷	۰/۱۱۴
۰/۵	۰/۲۴۹	۰/۴۴۲	-۰/۷۱۱	۱۱/۴۴۳	۰/۱۴۷	۰/۱۰۴
۰/۷۵	-۰/۵۴۴	۰/۵۳۵	-۰/۷۰۱	۱۱/۱۷۹	۰/۱۸۲	۰/۰۹۰
۱	-۱/۲۲۸	۰/۶۰۲	۰/۶۳۶	۸/۱۴۱	۰/۱۸۷	۰/۰۹۱
۱/۲۵	-۱/۶۲۲	۰/۶۴۲	-۰/۶۳۱	۷/۹۹۴	۰/۲۱۰	۰/۰۸۴
۱/۵	-۱/۹۳۰	۰/۶۶۸	-۰/۶۱۸	۷/۷۸۸	۰/۲۰۵	۰/۰۸۰
۲	-۲/۴۲۸	۰/۷۱۰	-۰/۵۸۶	۵/۶۸۶	۰/۲۱۶	۰/۰۸۰
۳	-۲/۹۰۹	۰/۷۵۸	-۰/۶۰۴	۵/۶۳۲	۰/۲۱۲	۰/۰۹۵
۴	-۳/۲۵۱	۰/۷۹۶	-۰/۶۵۲	۵/۰۹۶	۰/۱۹۵	۰/۱۲۱

جدول ۲. ضرایب رابطه‌ی ۳ برای ناحیه‌ی زاگرس.

T (sec)	a_1	a_2	a_3	a_4
۰٫۰۶	۱٫۹۸۷	۰٫۱۷۷	-۰٫۶۲۹	-۰٫۰۱۸
۰٫۰۷۵	۲٫۰۳۲	۰٫۱۹۱	-۰٫۶۵۹	-۰٫۰۱۷
۰٫۱	۲٫۰۲۰	۰٫۱۸۱	-۰٫۵۷۹	۰٫۰۱۶
۰٫۱۵	۱٫۷۱۵	۰٫۲۵۶	-۰٫۶۳۸	۰٫۰۴۵
۰٫۲	۱٫۴۰۵	۰٫۳۰۵	-۰٫۶۳۵	۰٫۰۴۱
۰٫۲۵	۱٫۱۰۹	۰٫۳۴۹	-۰٫۶۴۸	۰٫۰۶۸
۰٫۳	۰٫۸۱۲	۰٫۳۷۴	-۰٫۵۹۸	۰٫۰۷۸
۰٫۴	۰٫۳۴۹	۰٫۴۲۸	-۰٫۵۹۳	۰٫۰۹۴
۰٫۵	-۰٫۰۳۵	۰٫۵۰۰	-۰٫۶۷۱	۰٫۰۸۸
۰٫۷۵	-۰٫۷۴۷	۰٫۵۸۲	-۰٫۶۸۱	۰٫۰۹۹
۱	-۱٫۳۶۴	۰٫۶۶۰	-۰٫۷۰۲	۰٫۱۳۲
۱٫۲۵	-۱٫۷۹۹	۰٫۷۱۱	-۰٫۷۱۵	۰٫۱۳۱
۱٫۵	-۲٫۰۲۸	۰٫۷۲۸	-۰٫۷۲۷	۰٫۱۴۰
۲	-۲٫۴۳۸	۰٫۷۶۳	-۰٫۷۳۶	۰٫۱۳۱
۳	-۲٫۴۸۹	۰٫۷۱۸	-۰٫۷۱۷	۰٫۱۵۱
۴	-۲٫۶۲۰	۰٫۷۲۸	-۰٫۷۸۵	۰٫۱۴۰

جدول ۳. ضرایب رابطه‌ی ۴ برای ناحیه‌ی البرز - ایران مرکزی.

T (sec)	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
۰٫۰۶	۲٫۴۰۸	۰٫۲۲۵	-۱٫۱۰۸	۰٫۰۳۳	۰٫۰۵۲
۰٫۰۷۵	۲٫۵۰۲	۰٫۲۲۸	-۱٫۱۳۱	۰٫۰۱۸	۰٫۰۴۵
۰٫۱	۲٫۳۹۹	۰٫۲۴۱	-۱٫۰۶۹	۰٫۰۱۳	۰٫۰۵۹
۰٫۱۵	۲٫۱۸۳	۰٫۲۵۲	-۰٫۹۶۲	۰٫۰۷۷	۰٫۱۱۶
۰٫۲	۱٫۸۴۰	۰٫۲۷۶	-۰٫۸۶۰	۰٫۱۱۲	۰٫۱۲۰
۰٫۲۵	۱٫۵۹۹	۰٫۲۹۵	-۰٫۸۱۷	۰٫۱۶۷	۰٫۱۳۲
۰٫۳	۱٫۴۲۱	۰٫۳۰۸	-۰٫۷۹۳	۰٫۲۰۲	۰٫۱۱۳
۰٫۴	۱٫۰۴۷	۰٫۳۵۴	-۰٫۸۱۷	۰٫۲۴۹	۰٫۱۳۲
۰٫۵	۰٫۵۹۳	۰٫۴۰۳	-۰٫۷۷۷	۰٫۲۴۷	۰٫۱۳۳
۰٫۷۵	-۰٫۲۳۵	۰٫۵۰۲	-۰٫۷۶۸	۰٫۲۸۴	۰٫۱۱۵
۱	-۰٫۸۱۵	۰٫۵۶۶	-۰٫۷۴۰	۰٫۲۷۶	۰٫۱۰۲
۱٫۲۵	-۱٫۱۶۸	۰٫۶۰۴	-۰٫۷۴۶	۰٫۲۹۲	۰٫۰۸۳
۱٫۵	-۱٫۴۷۵	۰٫۶۳۳	-۰٫۷۲۷	۰٫۲۷۴	۰٫۰۶۵
۲	-۱٫۹۱۵	۰٫۶۶۷	-۰٫۶۹۵	۰٫۲۷۲	۰٫۰۷۵
۳	-۲٫۴۵۳	۰٫۷۳۲	-۰٫۷۴۸	۰٫۲۸۱	۰٫۱۱۵
۴	-۲٫۸۳۱	۰٫۷۸۵	-۰٫۸۳۲	۰٫۲۵۱	۰٫۱۷۱

جدول ۴. انحراف معیار رابطه‌های ۳، ۱ و ۴ برای کل ایران، زاگرس و البرز - ایران مرکزی.

$T(s)$	ایران			زاگرس			البرز - ایران مرکزی		
	σ_T	σ	τ	σ_T	σ	τ	σ_T	σ	τ
۰٫۰۶	۰٫۱۴	۰٫۲۹	۰٫۳۲	۰٫۱۲	۰٫۳۵	۰٫۳۷	۰٫۱۹	۰٫۲۵	۰٫۳۲
۰٫۰۷۵	۰٫۱۴	۰٫۲۹	۰٫۳۲	۰٫۱۴	۰٫۳۵	۰٫۳۷	۰٫۱۹	۰٫۲۶	۰٫۳۲
۰٫۱	۰٫۱۲	۰٫۳۰	۰٫۳۲	۰٫۱۲	۰٫۳۴	۰٫۳۶	۰٫۱۳	۰٫۲۷	۰٫۳۰
۰٫۱۵	۰٫۱۱	۰٫۲۹	۰٫۳۱	۰٫۱۴	۰٫۳۲	۰٫۳۵	۰٫۱۰	۰٫۲۷	۰٫۲۹
۰٫۲	۰٫۰۹	۰٫۳۰	۰٫۳۱	۰٫۱۱	۰٫۳۴	۰٫۳۶	۰٫۰۷	۰٫۲۷	۰٫۲۸
۰٫۲۵	۰٫۱۰	۰٫۳۰	۰٫۳۱	۰٫۱۳	۰٫۳۴	۰٫۳۶	۰٫۰۶	۰٫۲۷	۰٫۲۸
۰٫۳	۰٫۱۲	۰٫۳۰	۰٫۳۲	۰٫۱۳	۰٫۳۴	۰٫۳۷	۰٫۰۸	۰٫۲۷	۰٫۲۸
۰٫۴	۰٫۱۷	۰٫۳۰	۰٫۳۴	۰٫۱۴	۰٫۳۴	۰٫۳۷	۰٫۱۷	۰٫۲۶	۰٫۳۱
۰٫۵	۰٫۲۰	۰٫۲۹	۰٫۳۵	۰٫۱۸	۰٫۳۲	۰٫۳۷	۰٫۱۹	۰٫۲۷	۰٫۳۳
۰٫۷۵	۰٫۲۱	۰٫۳۰	۰٫۳۷	۰٫۱۶	۰٫۳۴	۰٫۳۸	۰٫۲۱	۰٫۲۸	۰٫۳۵
۱	۰٫۲۲	۰٫۳۱	۰٫۳۸	۰٫۱۶	۰٫۳۵	۰٫۳۸	۰٫۲۲	۰٫۲۸	۰٫۳۵
۱٫۲۵	۰٫۲۴	۰٫۳۱	۰٫۳۹	۰٫۲۰	۰٫۳۴	۰٫۳۹	۰٫۲۳	۰٫۲۹	۰٫۳۷
۱٫۵	۰٫۲۴	۰٫۳۲	۰٫۴۰	۰٫۲۱	۰٫۳۴	۰٫۴۰	۰٫۲۳	۰٫۳۱	۰٫۳۸
۲	۰٫۲۴	۰٫۳۱	۰٫۳۹	۰٫۲۱	۰٫۳۴	۰٫۴۰	۰٫۲۲	۰٫۳۰	۰٫۳۷
۳	۰٫۲۲	۰٫۲۸	۰٫۳۶	۰٫۲۱	۰٫۲۹	۰٫۳۶	۰٫۲۱	۰٫۲۸	۰٫۳۵
۴	۰٫۲۱	۰٫۲۸	۰٫۳۵	۰٫۱۵	۰٫۳۰	۰٫۳۳	۰٫۲۱	۰٫۲۷	۰٫۳۴

۳.۴. معادله برای ناحیه‌ی البرز - ایران مرکزی

فرم ریاضی معادله‌ی انتخابی به صورت رابطه‌ی ۴ است:

$$\log(Y) = a_1 + a_2 M_w + a_3 \log \sqrt{d_{epi}^r + h_{hypo}^2} + a_4 S_S + a_5 S_A + \varepsilon \quad (4)$$

که در آن، Y پارامتر زمین لرزه (شتاب طیفی)، M_w بزرگای ممان، d_{epi} فاصله‌ی رومرکز، h_{hypo} عمق کانونی، پارامترهای a_1 تا a_5 ضرایب رگرسیون هستند که محاسبه می‌شوند، S_A و S_S ضرایب ساخت‌گاه هستند که به ترتیب برای ساخت‌گاه نوع اول صفر و صفر، برای ساخت‌گاه نوع دوم: صفر و ۱، برای ساخت‌گاه نوع سوم: ۱ و صفر هستند. ε عبارت خطا با میانگین صفر و انحراف معیار کل σ_T است که در رابطه‌ی ۲ تعریف شده است.

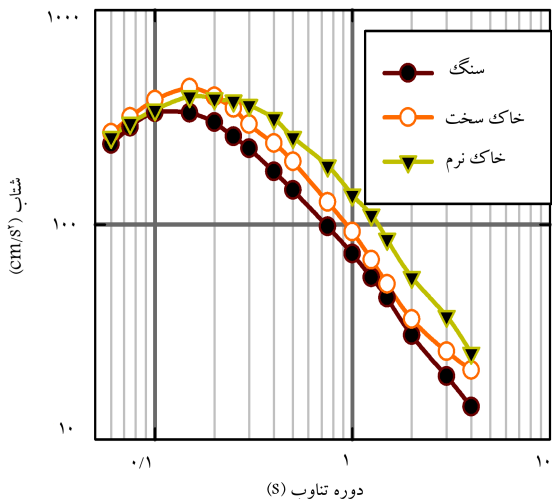
تنها تغییر به وجود آمده در معادله‌ی ۴ مربوط به عبارت فاصله است، که در بخش قبل دلایل آن ذکر شده است. ضرایب رابطه‌ی ۴ در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار انحراف معیار مرتبط با هر یک از روابط ۱، ۳، ۴، براساس رابطه‌ی ۲ محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است.

۵. مثال عددی از رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین برای

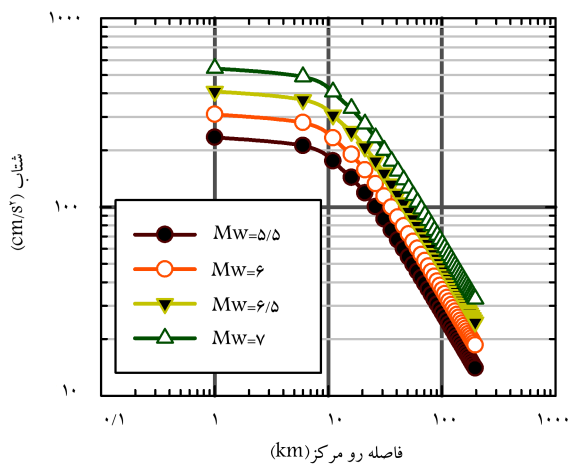
طیف شتاب

براساس رابطه‌های پیشنهاد شده، طیف شتاب برای کل ایران و زلزله‌ی با بزرگای

بزرگای ۶/۵، فاصله رو مرکز ۲۰ km
عمق کانونی ۱۰ km



شکل ۷. طیف شتاب براساس رابطه‌ی ۴ برای ناحیه‌ی البرز-ایران مرکزی و شرایط ساخت‌گاهی گوناگون.

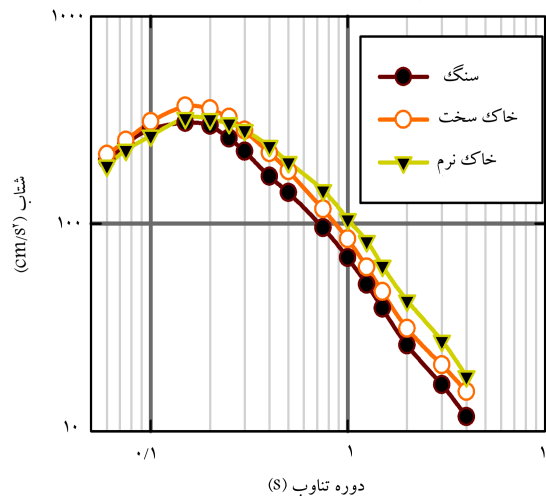


شکل ۸. تغییرات شتاب با فاصله برای کل ایران، ساخت‌گاه نوع ۲.
شکل ۹. طیف شتاب براساس رابطه‌ی ۴ برای ناحیه‌ی البرز-ایران مرکزی و شرایط ساخت‌گاهی گوناگون.

۶/۵، فاصله‌ی رومرکز ۲۰ کیلومتر به‌دست آمده و بر حسب شرایط ساخت‌گاهی متفاوت در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش دوره‌ی تناوب، مقادیر شتاب برای خاک نرم، بیش از مقادیر متناظر در ساخت‌گاه‌های دیگر است. به‌علاوه در شکل‌های ۶ و ۷ طیف شتاب به ترتیب در ناحیه‌ی زاگرس و البرز - ایران مرکزی برای زلزله‌ی بزرگای ۶، فاصله‌ی رومرکز ۲۰ کیلومتر، عمق کانونی ۱۰ کیلومتر و شرایط ساخت‌گاهی متفاوت ارائه شده است.

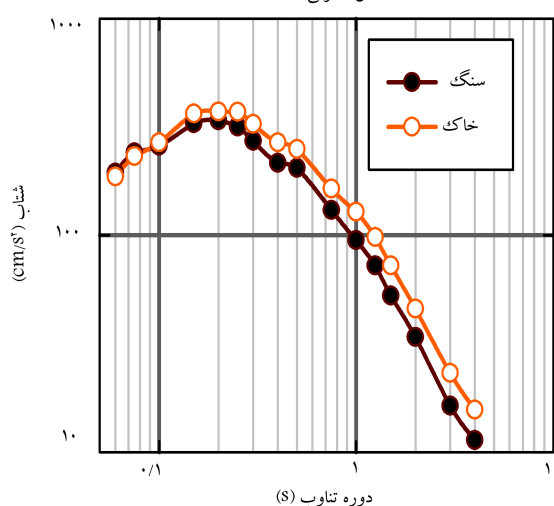
در شکل ۸ کاهندگی شتاب با فاصله برای کل ایران و دوره‌تنباهای ۰/۶ و ۱ و ثانیه نشان داده شده است. در این شکل نرخ کاهش شتاب زلزله، برای دوره‌تنباهای کم (۰/۶ ثانیه) و دوره‌تنباهای زیاد (۱ ثانیه) قابل مشاهده است. در شکل ۹ نیز کاهش شتاب با فاصله برای مناطق زاگرس و البرز - ایران مرکزی نیز ارائه شده است.

بزرگای ۶/۵، فاصله رو مرکز ۲۰ km

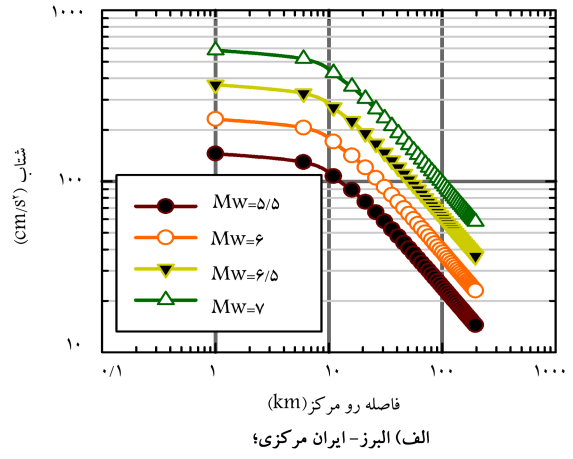
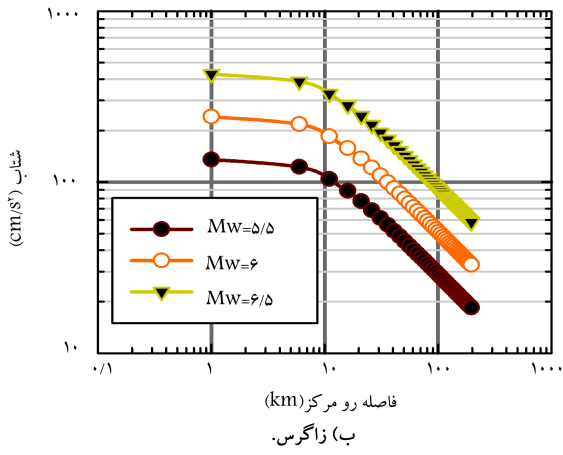


شکل ۵. طیف شتاب براساس رابطه‌ی ۱ و شرایط ساخت‌گاهی متفاوت برای کل ایران.

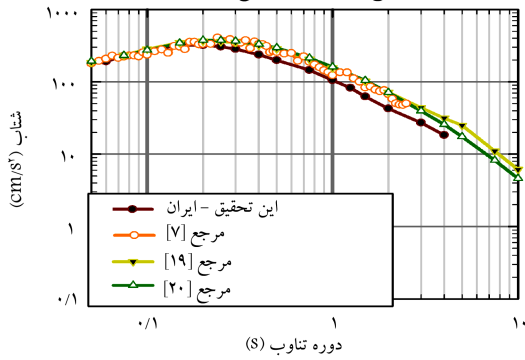
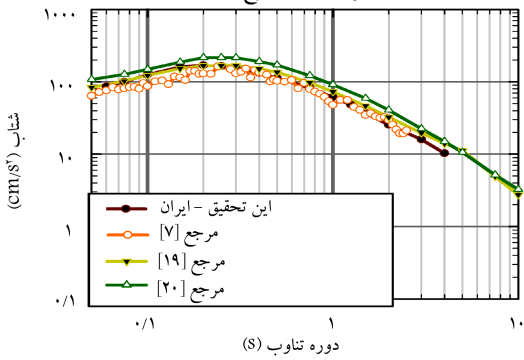
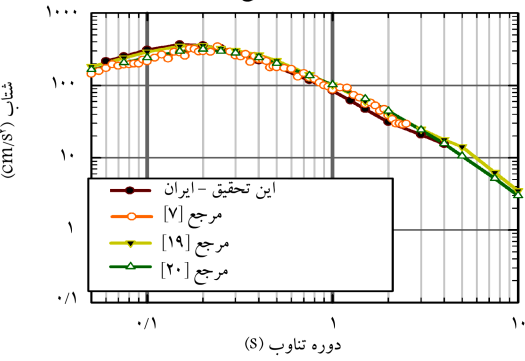
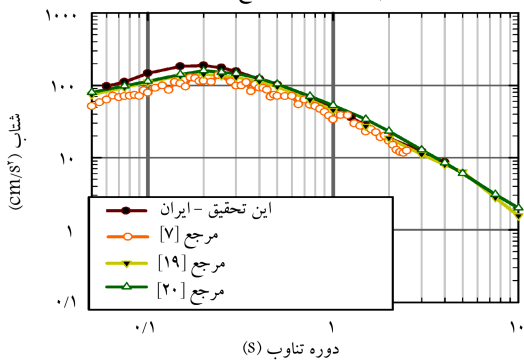
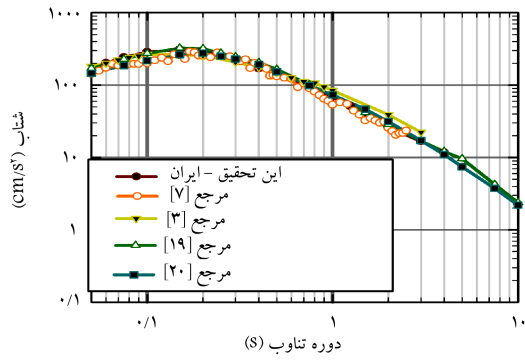
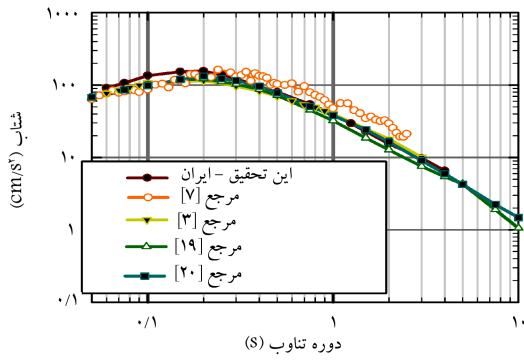
بزرگای ۶/۵، فاصله رو مرکز ۲۰ km
عمق کانونی ۱۰ km



شکل ۶. طیف شتاب براساس رابطه‌ی ۳ برای ناحیه‌ی زاگرس و شرایط ساخت‌گاهی متفاوت.



شکل ۹. تغییرات شتاب با فاصله، دوره‌ی تناوب ۰/۵ ثانیه ساختگاه نوع ۲.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی رابطه‌ی ارائه شده در این نوشتار برای ایران و روابط پیشنهادی پژوهشگران دیگر: ستون راست برای بزرگای ۶/۵ و فاصله‌ی ۲۰ کیلومتر، ستون سمت چپ برای بزرگای ۶/۵ و فاصله‌ی ۵۰ کیلومتر (جهت مقایسه با رابطه‌ی مراجع [۲۰] و [۱۹] نوع گسل امتداد لغز در نظر گرفته شده است).

۶. مقایسه با روابط ارائه‌شده‌ی سایر پژوهشگران

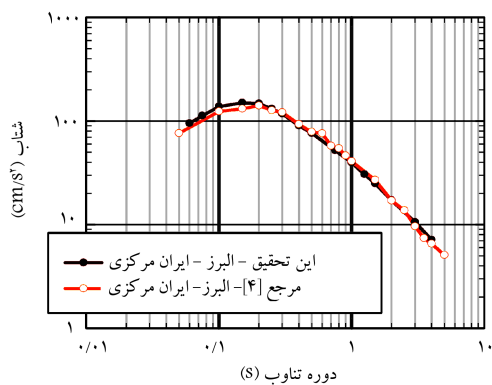
جهت مقایسه از تعدادی روابط ارائه‌شده در سال‌های اخیر توسط پژوهشگران گوناگون استفاده شده است. به این منظور رابطه‌های انتخابی به ۲ دسته تقسیم شده‌اند: گروه نخست شامل روابطی است که براساس داده‌های ثبت‌شده در ایران به دست آمده‌اند. [۲-۲] گروه دوم روابطی که در آنها از تعدادی داده‌های ثبت‌شده در ایران استفاده شده است. [۲-۱۹، ۷]

شجاع طاهری و همکارانش در پژوهش خود نشان داده‌اند که دو رابطه‌ی

ارائه‌شده [۲-۱۹] برای منطقه‌ی ایران مناسب هستند. [۲-۱] در شکل ۱۰ مقایسه بین رابطه‌ی پیشنهادی در این نوشتار برای کل ایران و روابط پیشنهادی توسط مراجع دیگر، [۲-۱۹، ۷، ۳] ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، نتایج هم‌خوانی خوبی دارند.

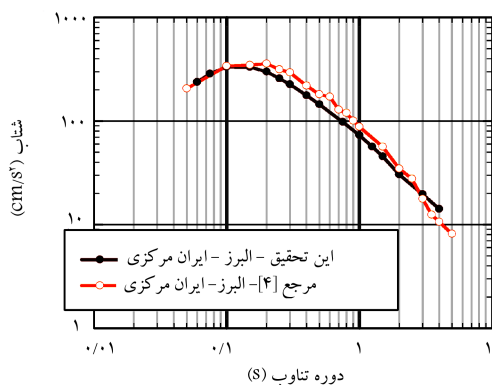
به دلیل یکسان نبودن محدوده‌ی تقسیم‌بندی ساخت‌گاه‌های بین پژوهش‌های پیشین و این مطالعه، شرایط ساخت‌گاهی یکسان مبنای محاسبه و مقایسه قرار گرفته است.

در شکل ۱۱، مقایسه‌ی بین رابطه‌ی پیشنهادی در این مطالعه برای ناحیه‌ی البرز- ایران مرکزی و روابط پیشنهادی [۲-۲] نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور می‌توان مشاهده کرد که رابطه‌ی پیشنهادی [۲-۱] در ساخت‌گاه‌های نوع ۱ و



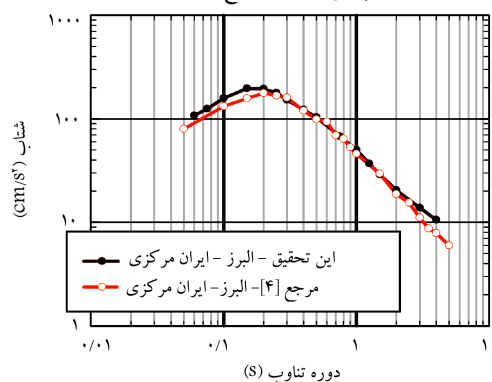
دوره تناوب (S)

ب) برای ساختگاه نوع ۱ا



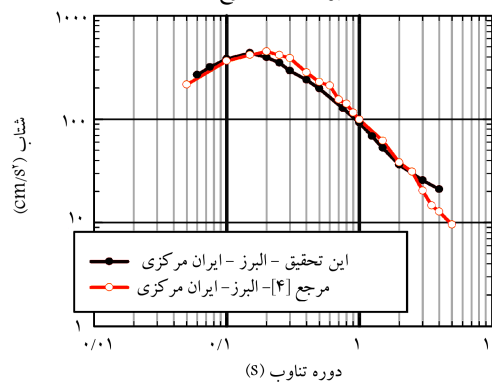
دوره تناوب (S)

الف) برای ساختگاه نوع ۱ا



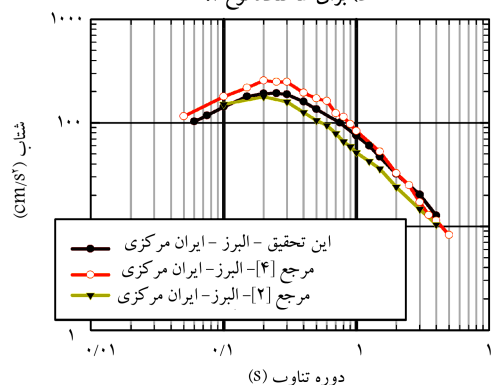
دوره تناوب (S)

د) برای ساختگاه نوع ۱ب



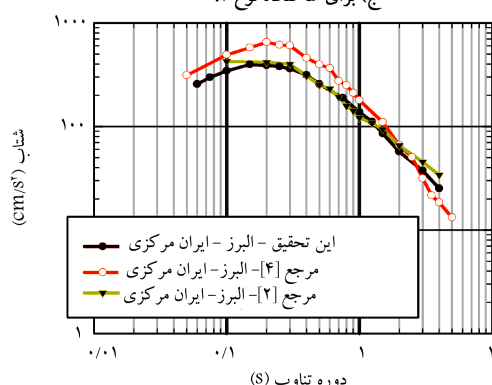
دوره تناوب (S)

ج) برای ساختگاه نوع ۱ب



دوره تناوب (S)

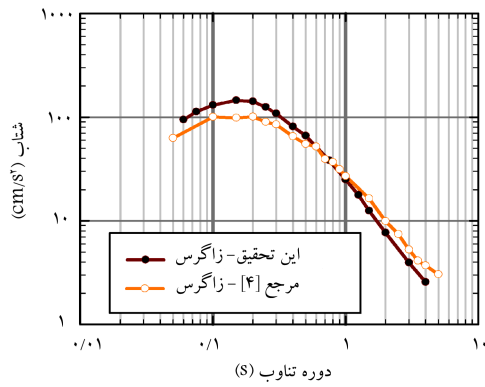
و) برای ساختگاه نوع ۳



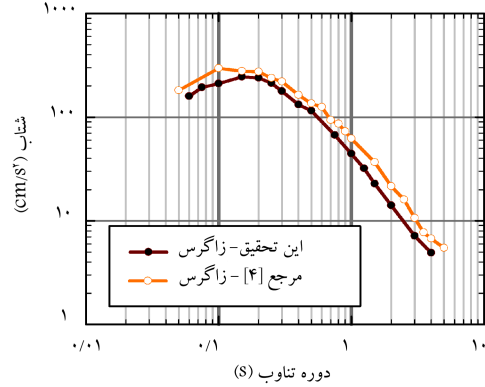
دوره تناوب (S)

ه) برای ساختگاه نوع ۳

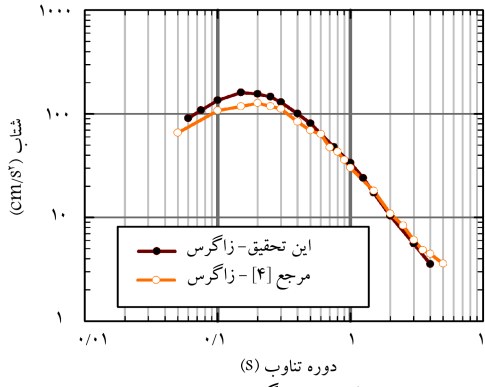
شکل ۱۱. مقایسه‌ی رابطه‌ی ارائه‌شده در این نوشتار برای ناحیه‌ی البرز- ایران مرکزی و روابط پیشنهادی توسط پژوهشگران دیگر. ستون سمت راست برای بزرگای ۶٫۵ و فاصله‌ی رومرکز ۲۰ کیلومتر و عمق کانونی ۱۰ کیلومتر، ستون چپ برای بزرگای ۶٫۵ و فاصله‌ی ۵۰ کیلومتر و عمق کانونی ۱۰ کیلومتر (جهت مقایسه با رابطه‌ی مرجع [۲] نوع گسل امتداد لغز در نظر گرفته شده است).



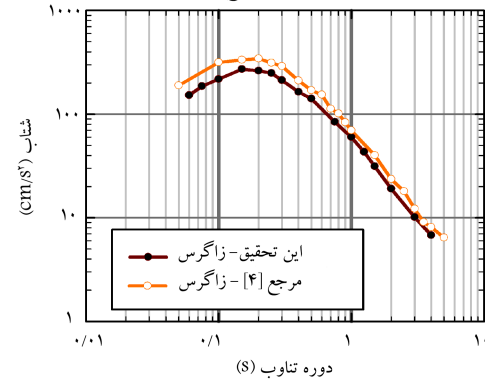
دوره تناوب (S)
ب) برای ساختگاه نوع ۱؛



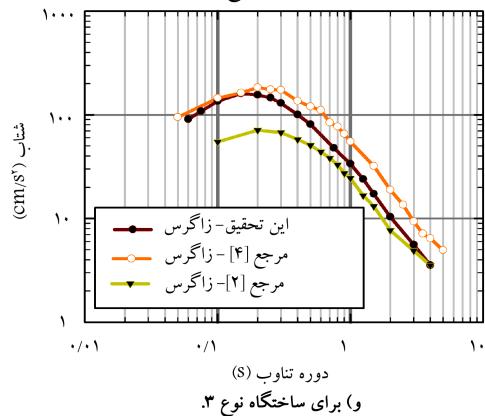
دوره تناوب (S)
الف) برای ساختگاه نوع ۱؛



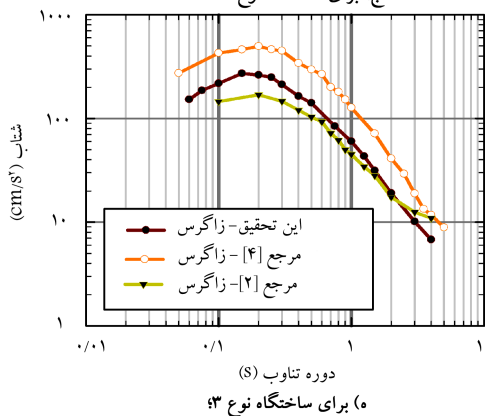
دوره تناوب (S)
د) برای ساختگاه نوع ۲؛



دوره تناوب (S)
ج) برای ساختگاه نوع ۲؛



دوره تناوب (S)
و) برای ساختگاه نوع ۳.



دوره تناوب (S)
ه) برای ساختگاه نوع ۳؛

شکل ۱۲. مقایسه‌ی رابطه ارائه شده در این نوشتار برای ناحیه‌ی زاگرس و روابط پیشنهادی توسط پژوهشگران دیگر. ستون سمت راست برای بزرگای ۶ و فاصله‌ی رومرکز ۲۰ کیلومتر و عمق کانونی ۱۰ کیلومتر، ستون سمت چپ برای بزرگای ۶ و فاصله‌ی ۵۰ کیلومتر و عمق کانونی ۱۰ کیلومتر (جهت مقایسه با رابطه‌ی مرجع [۴] نوع گسل امتداد لغز در نظر گرفته شده است).

نوع ۳ قابل ملاحظه و با کاهش فاصله افزایش می‌یابد. اما در ساخت‌گاه نوع ۳ مقادیر به‌دست‌آمده در دوره‌تناوب‌های کم توسط رابطه‌ی مرجع [۴] کمتر از مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه‌ی پیشنهادی این مطالعه است. البته با توجه به یکسان نبودن محدوده‌ی تقسیم‌بندی ساخت‌گاه‌ها این اختلاف موجود در ساخت‌گاه‌های نوع ۲ و به‌خصوص ساخت‌گاه‌های نوع ۳ قابل پیش‌بینی است.

اختلاف بین روابط به عوامل گوناگونی بستگی دارد. تعداد داده‌های مورد استفاده، فرم معادله، کیفیت داده‌ها، نحوه‌ی اصلاح شتاب‌نگاشت‌ها و... از جمله‌ی این عوامل است. با توجه به مقایسه‌های متعدد می‌توان نتیجه گرفت اختلاف چندانی بین رابطه‌های این مطالعه و روابط پیشنهادی توسط پژوهشگران دیگر وجود ندارد. البته

۲ و در دوره‌تناوب‌های کم، مقادیر کمتری را برآورد می‌کند. اما در ساخت‌گاه نوع ۳، در دوره‌تناوب‌های کم، مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه‌ی مرجع [۴] بیشتر از مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه‌ی این نوشتار است. همچنین می‌توان مشاهده کرد با افزایش فاصله، مقادیر به‌دست‌آمده توسط رابطه‌ی مرجع [۴] نسبت به مقادیر به‌دست‌آمده از این پژوهش کمتر است.

در شکل ۱۲، مقایسه‌ی بین رابطه‌ی پیشنهادی در این نوشتار برای ناحیه‌ی زاگرس و رابطه‌ی پیشنهادی توسط مراجع [۴] و [۲] برای همین منطقه ارائه شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه‌ی مرجع [۴] بیش از مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه‌ی پیشنهادی این مطالعه است. این اختلاف در ساخت‌گاه

۷٫۳ هستند و فاصله‌ی رومرکز بخش زیادی از داده‌ها کمتر از ۲۰۰ کیلومتر است. تعداد داده‌های حوزه‌ی نزدیک برای زلزله‌های شدید کم است. با توجه به شرایط لرزه‌ی زمین‌ساختی ایران، ۳ رابطه برای طیف شتاب ارائه شده است؛ که عبارت‌اند از: رابطه‌ی کاهندگی برای کل ایران، رابطه‌ی کاهندگی برای ناحیه‌ی زاگرس و رابطه‌ی کاهندگی برای ناحیه‌ی البرز - ایران مرکزی. رابطه‌های به‌دست‌آمده برای بزرگ‌های ۴ تا ۷٫۳ برای کل ایران و ناحیه‌ی البرز - ایران مرکزی و بزرگ‌های ۴ تا ۶٫۸ برای ناحیه‌ی زاگرس و فاصله‌ی رومرکز ۱۰ تا ۲۰۰ کیلومتر مناسب است. روابط پیشنهادی با توجه به مقایسه‌های انجام‌شده، با پژوهش‌های مشابه قبلی هم‌خوانی خوبی دارد. البته در مقایسه با رابطه‌ی مرجع^[۴] در ناحیه‌ی زاگرس در ساخت‌گاه نوع ۳ اختلافاتی وجود دارد.

در مقایسه با رابطه‌ی مرجع^[۴] در ناحیه‌ی زاگرس در ساخت‌گاه نوع ۳ اختلاف‌هایی وجود دارد. این اختلاف می‌تواند ناشی از تعداد کم رکوردهای ساخت‌گاه نوع ۳ در ناحیه‌ی زاگرس باشد، که در مرجع^[۴] مورد استفاده قرار گرفته است.

۷. نتیجه‌گیری

در این نوشتار رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین برای شتاب طیفی در ناحیه‌ی ایران ارائه شده است. رابطه‌ی پیشنهادی براساس داده‌های زلزله‌های ثبت‌شده در ایران به‌دست آمده است. رکوردهای انتخابی دارای بزرگای ممان بیش از ۴ و کمتر از

پانویس‌ها

1. mixed effects regression
2. maximum likelihood method

منابع (References)

1. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Third Edition, Pearson Prentice Hall (2007).
2. Ghodrati Amiri, G., Khorasani, M., Hessabi, R.M. and Amrei, S.A.R. "Ground-motion prediction equations of spectral ordinates and arias intensity for Iran", *Journal of Earthquake Engineering*, **14**(1), pp. 1-29 (2010).
3. Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y. and Koketsu, K. "An empirical spectral ground-motion model for Iran", *Journal of Seismology*, **13**(4), pp. 499-551 (2009).
4. Saffari, H., Kuwata, Y., Takada, S. and Mahdavian, A. "Updated PGA, PGV and spectral acceleration attenuation relations for Iran", *Earthquake Spectra*, **28**(1), pp. 257-276 (2012).
5. Ambraseys, N.N. and Free, M.W. "Surface-wave magnitude calibration for European region earthquakes", *Journal of Earthquake Engineering*, **1**(1), pp. 1-22 (1997).
6. Shoja-Taheri, J., Naserieh, S., Meghdadi, A. and Ghofrani, H. "ML and MW scales in the Iranian plateau based on strong motion records", Report R-472, BHRC (2007) (In Persian).
7. Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K. and Smit, P.M. "Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **3**(1), pp. 1-53 (2005).
8. Zare, M. "Fundamental of seismic hazard analysis", International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (2009) (In Persian).
9. Ghodrati Amiri, G., Mahdavian, A. and Dana, F.M. "Attenuation relationships for Iran", *Journal of Earthquake Engineering*, **11**(4), pp. 469-492 (2007).
10. *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, Standard No. 2800, Third Revision, Building & Housing Research Center, Iran (2005) (In Persian).
11. Sinaeian, F., Farzanegan, E. and Mirzaei Alavijeh, H. "Site geology investigations in accelerometric stations using seismic refraction method", Report 532-537, BHRC (2010) (In Persian).
12. Ghasemi, H., MehdiZare, F.Y. and Sinaeian, F. "Applying empirical methods in site classification, using response spectral ratio (H/V): A case study on Iranian strong motion network (ISMN)", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(1), pp. 121-132 (2009).
13. Zare, M., Bard, P.Y. and Ghafory-Ashtiany, M. "Site characterizations for the Iranian strong motion network", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **18**(2), pp. 101-123 (1999).
14. Boore, D.M. and Bommer, J.J. "Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**(2), pp. 93-115 (2005).
15. Ghodrati Amiri, G., Zahedi, M., Mahdavian, A. and Gholami, S. "Appropriate frequency band for correcting Iranian accelerograms in different site condition", *Journal of Faculty of Engineering, University of Tehran*, **38**(2), pp. 231-249 (2004) (In Persian).
16. Akkar, S., Kale, Ö., Boore, D.M., Çektimur, E.V. and Bas, S. "USDP : Utility software for data processing", METU-Earthquake Engineering Research Center (2011).
17. Abrahamson, N.A. and Youngs, R.R. "A Stable algorithm for regression analyses using the random effects model", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **82**(1), pp. 505-510 (1992).
18. R Development Core Team "R: A language and environment for statistical computing", Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing (2010).

19. Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. "NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 139-172 (2008).
20. Boore, D.M. and Atkinson, G.M. "Ground motion prediction equations for the average horizontal 99 component of PGA, PGV, and 5% damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 99-138 (2008).
21. Shoja-Taheri, J., Naserieh, S. and Hadi, G. "A test of the applicability of NGA models to the strong ground motion data in the Iranian plateau", *Journal of Earthquake Engineering*, **14**, pp. 278-292 (2010).