

استخراج رابطه کاهندگی برای پیش بینی پارامتر ترکیب بهینه تغییر مکان های طیفی در ساختمان های کوتاه مرتبه بر اساس حرکات شدید زمین در ایران

فاطمه سلیمانی^۱ و علی اکبر یحیی آبادی^{۲*}

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|--|
| <p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۱</p> | <p>برآورد پارامترهای مهم حرکات شدید زمین در یک ساختمانگاه از حیث پتانسیل آسیب بر سازه ها، به کمک شاخص شدت انجام می شود. یکی از شاخص هایی که به صورت گسترده در بیان کمی شدت لرزش های زمین در مهندسی زلزله استفاده می شود، پارامتر شتاب طیفی در پریود مود اول سازه، $S_a(T_1)$ است. مطالعات اخیر نشان داده است که استفاده از این پارامتر به عنوان شاخص شدت، ممکن است منجر به پراکندگی زیاد در پیش بینی پاسخ غیرخطی ساختمان ها شود. بدین منظور، استفاده از شاخص هایی که از کفایت و کارآمدی بالاتری برخوردار هستند، مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این شاخص ها که در پژوهش های اخیر مطرح شده است، ترکیب بهینه تغییر مکان های طیفی می باشد. به صورت تقریبی می توان از بسط مرتبه اول تیلور برای استخراج رابطه کاهندگی برای این شاخص بر اساس روابط کاهندگی موجود برای شتاب های طیفی استفاده کرد. با این حال، استخراج رابطه کاهندگی مستقل برای این شاخص به منظور کاهش خطای محاسبات اجتناب ناپذیر است. بدین منظور، یک مدل پیش بینی حرکت زمین برای این شاخص پیشنهاد گردید. در استخراج رابطه کاهندگی، بیش از پانصد و پنجاه زوج شتاب نگاشت که در ۲۸۴ زلزله با بزرگی ۴ تا ۷/۶ و در فواصل کمتر از ۱۰۰ کیلومتر در مناطق مختلف ایران ثبت شده اند، مورد استفاده قرار گرفت. مزیت مدل پیشنهادی از طریق بررسی مقادیر باقیمانده در برابر بزرگی و فاصله و همچنین کاربرد آن در مقایسه با سایر مدل های کاهندگی ارزیابی شده است.</p> |
| <p>واژگان کلیدی: تحلیل خطر زلزله، شاخص شدت، رابطه کاهندگی، حرکات شدید زمین، ترکیب بهینه تغییر مکان های طیفی.</p> | |

۱- مقدمه

زمین لرزه، لرزش و جنبش زمین می باشد که به دلیل آزاد شدن انرژی ناشی از گسیختگی در گسل های پوسته زمین در مدت زمان کوتاه رخ می دهد. زلزله پدیده ای است که نمی توان از وقوع آن جلوگیری کرد، به همین علت برای کاهش تلفات و خسارات، برآورد خطر زلزله در مناطق مختلف به خصوص در نواحی زلزله خیز ضروری است. برآورد خطر زلزله مستلزم استفاده همزمان از روابط پیش بینی پارامترهای مهم حرکت زمین و روابط تخمین نرخ رویداد

زلزله در سایت می باشد [۱]. تخمین پارامترهای مهم حرکت زمین در سایت به کمک روابط ریاضی موسوم به روابط کاهندگی صورت می گیرد. فرم کلی این روابط به شکل رابطه (۱) می باشد:

$$\ln IM = C_0 + f(m) + f(r) + f(\text{soil}) + \varepsilon \quad (1)$$

در رابطه (۱)، IM پارامتر شاخص شدت بوده و شدت حرکت زمین از حیث میزان آسیب بر سازه ها را نمایندگی می کند. $f(m)$ تابعی از بزرگی، $f(r)$ تابعی بر حسب فاصله محل ثبت رکورد تا منبع و $f(\text{soil})$ تابعی از شرایط خاک

* پست الکترونیک نویسنده مسؤول: A.yahyaabadi@ub.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد

۲. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد

استخراج کردند. بدین منظور از یک پایگاه اطلاعاتی جهانی شامل ۱۵۶۱ رکورد در ۶۴ زلزله مختلف استفاده شده است. از پارامتر سرعت موج برشی در رابطه کاهندگی به صورت مستقیم استفاده شده است تا بر اساس مقدار این پارامتر، تأثیر خاک ساختگاه بر پارامترهای مهم حرکت زمین لحاظ شود. کمترین بزرگی بر حسب بزرگی گشتاور، $4/2$ و بزرگترین آن $7/9$ است. علاوه بر بزرگی، فاصله و سرعت موج برشی، اثر مکانیزم گسل نیز در استخراج این رابطه کاهندگی لحاظ شده است [۱۰].

قاسمی و زارع در سال ۲۰۰۹ طی انجام پژوهشی یک معادله جدید پیش‌بینی حرکت زمین برای شتاب افقی طیفی با میرایی ۵ درصد در ایران ارائه نمودند. مزایای استفاده از این مدل نسبت به مدل‌هایی که قبلاً برای ایران پیشنهاد شده، با استفاده از توزیع مقادیر باقیمانده در برابر متغیرهای بزرگی و فاصله مورد بحث قرار گرفته است. علاوه بر این، کاربرد مدل پیشنهادی در مقایسه با چندین مدل دیگر که برای محیط‌های کم‌عمق سطحی توسعه یافته‌اند، با استفاده از ابزارهای آماری مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱].

آکار و بومر در سال ۲۰۱۰ در پژوهشی با استفاده از مجموعه ۵۳۱ رکورد شتاب زمین، معادلات تجربی برای پیش‌بینی PGA، PGV و شتاب‌های طیفی برای اروپا، مدیترانه و خاورمیانه ارائه نمودند. ۵۳۱ شتاب نگاشت مورد استفاده، مربوط به ۱۳۱ زمین لرزه با بزرگی گشتاور ۵ تا $7/6$ می‌باشد که همگی در فاصله‌ای کمتر از ۱۰۰ کیلومتر نسبت به چشمه لرزه را ثبت شده‌اند [۱۲].

سقراط و ضیایی‌فر در سال ۲۰۱۶ دو رابطه کاهندگی را برای ایالات لرزه‌ای آذربایجان- البرز و کپه داغ ارائه کردند. برای گروه‌بندی نوع زمین، مشابه تعریف استاندارد ۲۸۰۰ ایران از چهار نوع زمین استفاده شده است [۱۳].

در سال ۱۳۹۶ قدرتی و همکاران در پژوهشی یک رابطه کاهندگی برای ایران پیشنهاد نمودند. در این مطالعه، پارامترهای بزرگی و فاصله به صورت مستقیم در مدل کاهندگی در نظر گرفته شده است. همچنین تأثیر نوع زمین، ساز و کار گسل‌ها و شرایط تکنیکی با تقسیم‌بندی داده‌ها در گروه‌های مختلف و استخراج مدل برای هر گروه لحاظ گردیده است [۱۴].

زعفرانی و همکاران، دقت ۱۰ رابطه کاهندگی مختلف را که بر اساس داده‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی از زلزله‌های

ساختگاه است. C_0 یک مقدار ثابت است و ϵ یک متغیر تصادفی است که برای هر مشاهده یک مقدار ویژه به خود می‌گیرد [۲].

باتوجه به اینکه ایران در بخش میانی کمربند بزرگ لرزه‌خیز جهان، موسوم به آلپ-همیالیا، قرار گرفته است و احتمال وقوع زلزله‌های مخرب در نقاط مختلف کشور وجود دارد، شناخت سرشت لرزه‌ای ایران با اهمیت می‌باشد. مطالعات تحلیل خطر در ایران، بعضاً بر پایه روابطی که برای مناطق گسترده‌تر نظیر اروپا و خاورمیانه ارائه شده است، انجام می‌شود [۳]. آنچه مسلم است، استفاده از روابط کاهندگی بدست آمده براساس شرایط زمین ساختی ناحیه مورد نظر، منجر به نتایج مطمئن‌تری خواهد شد [۴, ۵]. بر این اساس، تولید روابط کاهندگی جدید بر مبنای کاتالوگ لرزه‌ای معتبر و مربوط به ناحیه ایران، امری ضروری به نظر می‌رسد.

اولین رابطه کاهندگی با استفاده از رکوردهای ثبت شده در ایران توسط رمزی و شنک در سال ۱۹۹۴ ارائه شده است [۶]. پایگاه اطلاعاتی مورد استفاده توسط این گروه شامل ۸۳ رکورد می‌باشد. در این مطالعه، برای معیار فاصله، از فاصله کانونی و برای تقسیم‌بندی زمین نیز از دو گروه سنگ و خاک استفاده شده است.

در مطالعه دیگر، خادمی در سال ۲۰۰۲ یک مدل برای پیش‌بینی شتاب‌های طیفی براساس ۱۶۰ رکورد در ایران پیشنهاد داد. رکوردهایی که در ساخت این مدل مورد استفاده قرار گرفته است، دارای حداقل شتاب ۵۰ گال می‌باشند. از پارامترهای فاصله، مکانیزم گسل و بزرگی M_w به عنوان پارامترهای ورودی در این مدل استفاده شده است [۷]. در استخراج رابطه کاهندگی در این مطالعه، از یک فرم غیرخطی مشابه رابطه کاهندگی کمپبل استفاده شده است [۸].

در سال ۲۰۰۵ نوروزی طی انجام پژوهشی اقدام به ارائه رابطه کاهندگی برای فلات ایران کرد. بانک داده شامل ۲۷۹ رکورد با بزرگی گشتاور در محدوده ۳ الی $7/4$ و عمق کانونی کمتر از ۱۰۰ کیلومتر می‌باشد [۹].

کمپل و بزرگ نیا در سال ۲۰۰۸ یک رابطه کاهندگی برای میانگین هندسی دو مؤلفه افقی برای پارامترهای حداکثر شتاب زمین (PGA)، حداکثر سرعت زمین (PGV) و حداکثر جابجایی زمین (PGD) و همچنین مقادیر شتاب‌های طیفی در پیوندهای ۰/۱ تا ۱۰ ثانیه

شدت از پراکندگی اندک برخوردار باشد. یک شاخص شدت مناسب علاوه بر کارایی، باید از کفایت لازم نیز برخوردار باشد، به نحوی که پاسخ‌های دینامیکی به ازای مقدار مشخص شاخص شدت، به سایر پارامترهای زلزله نظیر بزرگی و فاصله از گسل وابسته نباشد [۱۸].

یکی از شاخص‌های شدتی که از کارایی و کفایت لازم برای تحلیل ساختمانهای کوتاه مرتبه برخوردار است، شاخص شدت تغییر مکان طیفی غیرخطی، S_{di} است [۲۴]. S_{di} حداکثر تغییر مکان غیرخطی یک سیستم یک درجه آزادی است که از تحلیل دینامیکی غیرخطی بدست می‌آید. توتانگ و کرنل در سال ۲۰۰۶ یک رابطه کاهندگی برای پیش‌بینی تغییر مکان طیفی غیرخطی، k_d بر حسب بزرگی گشتاور، نزدیک‌ترین فاصله تا گسیختگی و پارامترهای نوسانگر دو خطی شامل پرپود و تغییر مکان تسلیم ارائه نمودند [۲۴]. در یک مطالعه دیگر، هرسی و همکاران یک مدل پیش‌بینی حرکت زمین برای تخمین تغییر مکان طیفی غیرخطی بر اساس ۱۶۶۲ شتاب نگاشت که در ۶۳ رویداد زلزله ثبت شده است، پیشنهاد دادند [۲۵].

علاوه بر شاخص شدت تغییر مکان طیفی غیرخطی، شاخص‌های دیگری نظیر ترکیب تغییر مکان طیفی غیرخطی در مود اول و تغییر مکان طیفی خطی در مود دوم [۲۶]، جذر مجموع مربعات شتابهای طیفی در یک محدوده پرپودی [۱۹] و میانگین هندسی شتابهای طیفی در یک محدوده پرپودی [۲۲] توسط محققان مختلف پیشنهاد شده است.

ترکیب بهینه تغییر مکان‌های طیفی یکی از شاخص‌هایی است که کارایی و کفایت آن در پیش‌بینی پاسخ ساختمان‌ها تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک و دور در مطالعات مختلف محرز شده است [۲۰، ۲۱، ۲۷]. استفاده از این شاخص در مهندسی زلزله مستلزم استخراج رابطه کاهندگی مناسب برای آن می‌باشد. با توجه به اینکه تاکنون رابطه کاهندگی برای این شاخص شدت در مطالعات قبلی پیشنهاد نشده است، در این مطالعه تلاش می‌شود که یک رابطه کاهندگی برای این شاخص بر اساس مجموعه حرکات شدید زمین که در ایران ثبت شده اند، پیشنهاد شود. بدین منظور فرمهای مختلف ریاضی مورد بررسی قرار گرفته و بهترین فرم برای استخراج رابطه کاهندگی استفاده می‌شود. توانمندی مدل پیشنهادی از طریق بررسی مقادیر باقیمانده در برابر بزرگی و فاصله مورد بررسی قرار می‌گیرد

پوسته‌ای کم‌عمق توسعه یافته‌اند، در پیش‌بینی حرکات شدید زمین در ایران مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که مدل‌های محلی و منطقه‌ای عملکرد بهتری در برآورد حداکثر شتاب زمین و همچنین شتابهای طیفی در پرپودهای مختلف دارند. در این مطالعه، همچنین نشان داده شده است که می‌توان با اعمال ضرایب اصلاحی به مدل‌های جهانی پیش‌بینی حرکت زمین، عملکرد این مدل‌ها را در پیش‌بینی حرکات شدید زمین در ایران به طور قابل توجهی بهبود بخشید [۱۵].

با توجه به اثرات حرکات پالس مانند در حوزه نزدیک بر پاسخ سازه‌ها، خان سفید روابط کاهندگی برای پیش‌بینی شتاب‌های طیفی با میرایی ۵ درصد برای مؤلفه‌های افقی و قائم این نوع حرکات در فلات ایران پیشنهاد داده است. این روابط برای بزرگی‌های ۴ تا ۶/۵، فاصله ۲ تا ۱۰۰ کیلومتر و عمق کانونی ۲ تا ۴۰ کیلومتر و سرعت موج برشی ۲۰۰ تا ۹۰۰ متر بر ثانیه قابل کاربرد است [۱۶].

توجه به تفاوت الگوی لرزه‌ای در مناطق مختلف در استخراج رابطه کاهندگی حائز اهمیت است. بر این اساس، با توجه به الگوی لرزه‌ای متفاوت در مناطق مرکزی و شرقی در آمریکای شمالی نسبت به غرب آمریکا، گولت و همکاران در پژوهشی مجموعه‌ای از ۱۷ مدل پیش‌بینی حرکت زمین، مختص این مناطق پیشنهاد داده‌اند. این مدل‌ها برای مؤلفه‌های افقی حرکت شدید زمین بر روی سنگ بسیار سخت با بزرگی گشتاور ۴ تا ۸/۲ و فاصله تا ۱۵۰۰ کیلومتر قابل کاربرد است. روابط کاهندگی در این مطالعه برای پیش‌بینی شاخص‌های PGA، PGV و شتاب‌های طیفی با میرایی ۵ درصد در زمان‌های تناوب بین ۰/۰۱ ثانیه تا ۱۰ ثانیه پیشنهاد شده‌اند. در این روابط، از فاکتورهای اصلاحی برای در نظر گرفتن عمق منبع، اثرات فرادیواره و همچنین محاسبات خطر در سواحل خلیج استفاده شده است [۱۷]. چنانچه ذکر شد، اکثر روابط کاهندگی برای شاخص‌های شدت متعارف نظیر PGA، PGV، PGD و شتاب‌های طیفی در پرپودهای مختلف پیشنهاد شده است. این شاخص‌ها در پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها از کارایی و کفایت لازم برخوردار نیستند. از این رو، در بسیاری از مطالعات تلاش شده است شاخص‌های شدتی پیشنهاد شود که از دو ویژگی مهم برخوردار باشند [۱۸-۲۳]. منظور از کارایی این است که پاسخ‌های دینامیکی سازه تحت مجموعه رکوردهای حرکت زمین در یک سطح مشخص

می‌باشد [۲۷, ۲۱].

با توجه به رابطه (۲)، کاهش عدم قطعیت در برآورد احتمالاتی تقاضای لرزه ای، $H_{EDP}(edp)$ ، مستلزم کاهش عدم قطعیت در تحلیل تقاضای لرزه ای، $P(EDP > edp | IM = im)$ و تحلیل احتمالاتی خطر زلزله، $H_{IM}(im)$ ، به صورت همزمان است.

کاهش عدم قطعیت در برآورد احتمالاتی خطر زلزله بر حسب شاخص ترکیب بهینه تغییر مکان‌های طیفی بدون استفاده از رابطه کاهندگی مناسب برای این شاخص مقدور نمی‌باشد. با توجه به اینکه تاکنون رابطه کاهندگی برای این شاخص شدت در مطالعات قبلی پیشنهاد نشده است، لذا در پژوهش حاضر، با هدف تکمیل زنجیره تحلیل احتمالاتی تقاضای لرزه ای، یک رابطه کاهندگی مناسب بر اساس رکوردهای ثبت شده در زلزله‌های ایران برای این شاخص پیشنهاد خواهد شد.

شایان ذکر است، تعریف شاخص ترکیب بهینه تغییر مکان‌های طیفی برای هر یک از ساختمان‌های دارای پرپود کوتاه (پرپود کوچکتر یا مساوی ۰/۶ ثانیه)، ساختمان‌های دارای پرپود متوسط (پرپود بزرگتر از ۰/۶ تا ۰/۹ ثانیه) و ساختمان‌های دارای پرپودهای نسبتاً بلند (بزرگتر از ۰/۹ ثانیه تا ۱/۵ ثانیه)، متفاوت می‌باشد. با توجه به ساخت و ساز رایج در کشور که عمدتاً ساختمان‌های پرپود کوتاه را شامل می‌شود، پژوهش حاضر بر روی استخراج رابطه کاهندگی برای شاخص شدت بهینه در این نوع از ساختمان‌ها متمرکز شده است. در این محدوده پرپودی، اثرات افزایش پرپود به دلیل رفتار غیرخطی تحت رکوردهای شدید حرکت زمین بر رفتار سازه حاکم می‌شود [۲۰]. این اثرات در تعریف شاخص شدت بهینه برای این محدوده پرپودی به صورت رابطه (۳) منعکس شده است [۲۰]:

$$IM_{oc} = \sqrt{0.8S_d^2(T_1) + 0.2S_d^2(1.2T_1)} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $S_d(T_i)$ تغییر مکان طیفی الاستیک با میرایی ۵ درصد در پرپود T_i و T_1 پرپود مود اول سازه است.

۳- پایگاه اطلاعاتی حرکات شدید زمین

پایگاه اطلاعاتی در این پژوهش، شامل ۵۳۵ زوج شتاب نگاشت از ۲۸۲ رویداد زلزله می‌باشد که در بین سال‌های

و همچنین کاربرد آن در مقایسه با سایر مدل‌های کاهندگی نمایش داده خواهد شد.

۲- تعریف شاخص شدت ترکیب بهینه تغییر مکان‌های طیفی

شاخص شدت (IM)، که بیانگر قدرت رکوردهای زلزله از حیث پتانسیل آسیب در سازه‌ها می‌باشد، پارامتر واسطی است که بر اساس آن می‌توان نتایج تحلیل احتمالاتی خطر زلزله و تحلیل تقاضای لرزه ای را مطابق رابطه (۲) با یکدیگر ترکیب نمود [۲۱]:

$$H_{EDP}(edp) = \int P(EDP > edp | IM = im) \cdot dH_{IM}(im) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، EDP پارامتر تقاضای لرزه ای مهندسی یا پاسخ مورد نظر سازه (مثلاً: دریافت میان طبقه‌ای) می‌باشد. $P(EDP > edp | IM = im)$ احتمال فراگذشت EDP از مقدار مشخص edp در سطح مشخص شدت im می‌باشد که از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی رکوردهای مقیاس شده زلزله محاسبه می‌شود. $H_{EDP}(edp)$ نرخ متوسط فراگذشت EDP از مقدار مشخص edp است.

بنابراین، شاخص شدت یک پارامتر واسط است که هم در تحلیل احتمالاتی خطر زلزله و هم در تحلیل تقاضای لرزه ای کاربرد دارد. از منظر برآورد تقاضای لرزه ای، این پارامتر باید نماینده مناسبی برای آن دسته از پارامترهای حرکت زمین باشد که بر پاسخ سازه تأثیرگذارند. این ویژگی را می‌توان در قالب دو مفهوم کارایی و کفایت تعریف کرد [۱۸, ۲۸]. شتاب طیفی در پرپود مود اول سازه به صورت گسترده به عنوان شاخص شدت در مهندسی زلزله کاربرد دارد. هر چند، این شاخص در پیش‌بینی رفتار غیرخطی سازه و اثرات مودهای بالاتر به ویژه تحت رکوردهای حوزه نزدیک از کفایت و کارایی مناسب برخوردار نیست [۲۳].

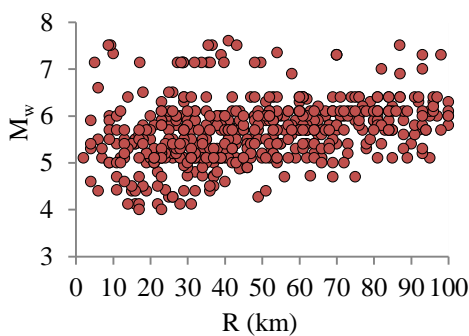
ترکیب بهینه تغییر مکان‌های طیفی برای رفع نقاط ضعف شاخص شدت شتاب طیفی در پرپود مود اول سازه، برای رکوردهای حوزه نزدیک پیشنهاد شده است [۲۰]. در مطالعات دیگر نیز نشان داده شده که این شاخص تحت مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک و دور از کارایی و کفایت لازم در برآورد تقاضای لرزه ای، جمله $P(EDP > edp | IM = im)$ در رابطه (۲)، برخوردار

می باشد.

۳-۲- فاصله:

معیارهای گوناگونی برای تعیین فاصله منبع لرزه‌زا تا ساختگاه وجود دارد. در بسیاری از روابط کاهندگی استخراج شده برای ایران، به علت کمبود اطلاعات در خصوص هندسه گسل مسبب و فرآیند گسیختگی، از فاصله کانونی یا فاصله تا رومرکز به عنوان شاخص فاصله تا چشمه لرزه‌زا استفاده شده است [۹، ۱۱، ۳۵-۳۷]. در این مطالعه نیز برای اندازه‌گیری فاصله، دو پارامتر فاصله تا رومرکز و فاصله کانونی مورد بررسی قرار گرفت و بهترین معیار در رابطه نهایی استفاده شد.

۵۵۵ شتاب نگاشت مورد استفاده در این پژوهش همگی در فاصله کمتر از ۱۰۰ کیلومتر از رومرکز ثبت شده‌اند. رکوردهای با فواصل زیاد ممکن است سبب آشفستگی توزیع داده‌ها شوند، چرا که ابزارهای اندازه‌گیری در فواصل دور از زلزله، تنها حرکات زمین با دامنه بزرگ را ثبت می‌کنند [۲۸]. علاوه بر این، رکوردهای دارای فاصله زیاد از چشمه لرزه‌زا از نظر مهندسی زلزله کم اهمیت هستند [۳۹]. در شکل (۲) توزیع بزرگی و فاصله رکوردهای مورد استفاده قابل مشاهده است. شایان ذکر است، ۵۷ درصد شتاب نگاشت‌ها در فاصله کمتر از ۵۰ کیلومتر و مابقی در فاصله بیش از ۵۰ کیلومتر از رومرکز ثبت شده‌اند.

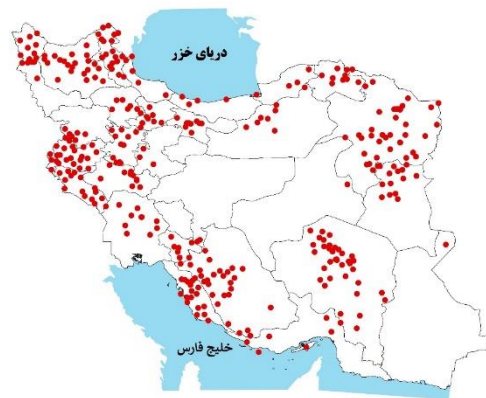


شکل ۲- توزیع بزرگی و فاصله رکوردهای مورد استفاده

۳-۳- نوع زمین:

نوع زمین از پارامترهای تأثیرگذار بر شاخص شدت زلزله در ساختگاه می باشد. طبقه‌بندی نوع زمین در ساختگاه معمولاً بر اساس پارامتر سرعت موج برشی متوسط در فاصله ۳۰ متری عمق زمین، V_{s30} ، انجام می‌شود. با توجه به مقادیر سرعت موج برشی متوسط و با عنایت به طبقه‌بندی نوع زمین در استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۴۰]، ۷۹ رکورد بر

۱۹۷۸ الی ۲۰۱۹ در ایران و توسط شبکه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ثبت شده‌اند [۲۹]. توزیع مکانی رکوردهای مورد استفاده را می‌توان در شکل (۱) مشاهده نمود. شایان ذکر است، به منظور تکمیل اطلاعات مربوط به زلزله‌های بزرگ، بیست زوج شتاب نگاشت که در زلزله‌های ۱۷ آگوست و ۱۲ نوامبر سال ۱۹۹۹ در کوکائیلی و دوزجی ترکیه و در فواصل کمتر از ۴۰ کیلومتر ثبت شده‌اند، نیز به ۵۳۵ زوج شتاب نگاشت فوق اضافه شد [۳۰].



شکل ۱- توزیع مکانی محل ثبت شتاب نگاشت‌های پایگاه اطلاعاتی مورد استفاده در این پژوهش

۳-۱- بزرگی:

بزرگی زلزله یک مقیاس عددی صریح است که می‌توان از آن هم در مناطق مسکونی و هم خالی از سکنه استفاده کرد. مقیاس‌های بزرگی نظیر بزرگی محلی، بزرگی امواج سطح و بزرگی امواج حجمی بر مبنای دامنه امواج اندازه‌گیری شده زلزله تعریف می‌شوند [۳۱-۳۳]. بزرگی گشتاور بر خلاف مقیاس‌های مزبور، به جای دامنه امواج زلزله بر حسب پارامترهای گسیختگی گسل در زلزله یعنی مدول برشی سنگ، طول لغزش و سطح گسیختگی تعریف می‌شود [۳۴]. لذا، این بزرگی ارتباط مستقیم با میزان انرژی آزاد شده در زمین داشته و برخلاف سایر مقیاس‌های اندازه‌گیری بزرگی، در معرض اشباع شدن در مقادیر بالای بزرگی قرار ندارد. از این رو، در این مطالعه از مقیاس بزرگی گشتاور، M_w ، برای بیان بزرگی زلزله استفاده شد. بزرگترین زلزله‌ی موجود در کاتالوگ دارای بزرگی ۷/۶ و کوچک‌ترین آن دارای بزرگی ۴ می‌باشد. ۶۹ رکورد دارای بزرگی ۴ تا ۵، ۳۵۱ رکورد دارای بزرگی ۵ تا ۶، ۱۰۴ رکورد دارای بزرگی ۶ تا ۷ و ۳۱ رکورد دارای بزرگی بیش از ۷

$$\log_{10} IM_{oc}(T) = a_1 + a_2 M + a_3 \log_{10}(R + a_4 10^{(a_5 M)}) + a_6 S_{II} + a_7 S_{III} + a_8 S_{IV} \quad (5)$$

$$\log_{10} IM_{oc}(T) = b_1 + b_2 M + b_3 M^2 + (b_4 + b_5 M) \log_{10} \sqrt{R^2 + b_6^2} + b_7 S_{II} + b_8 S_{III} + b_9 S_{IV} \quad (6)$$

در روابط (۵) و (۶)، $IM_{oc}(T)$ شاخص شدت ترکیب بهینه تغییر مکان‌های طیفی، M بزرگی و R پارامتر فاصله از منبع لرزه‌زا است. S_{II} ، S_{III} و S_{IV} پارامترهایی هستند که برای در نظر گرفتن نوع زمین در ساختگاه تعریف شده‌اند و به ترتیب برای زمین‌های نوع II، III و IV برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می‌باشند. ضرایب a_1 تا a_8 و ضرایب b_1 تا b_9 ضرایب ثابتی هستند که با توجه به پیوند و بر اساس نتایج تحلیل رگرسیون محاسبه می‌شوند.

شایان ذکر است روابط ۵ و ۶ به ترتیب بر اساس مدل‌هایی که توسط قاسمی و زارع [۱۱] و آکار و بومر [۱۲] برای پیش‌بینی شتاب‌های طیفی پیشنهاد شده‌اند، انتخاب شدند. در رابطه قاسمی و زارع [۱۱]، تنها امکان تعریف دو نوع زمین به صورت خاک یا سنگ وجود دارد، لذا به منظور اینکه امکان تعریف چهار نوع زمین در رابطه کاهندگی وجود داشته باشد، جمله $a_6 S_{II} + a_7 S_{III} + a_8 S_{IV}$ مطابق توضیحات ذیل روابط ۵ و ۶، جایگزین جملات مربوط به تعریف نوع زمین در رابطه قاسمی و زارع [۱۱] گردید. به همین منظور و به طور مشابه، جمله $b_7 S_{II} + b_8 S_{III} + b_9 S_{IV}$ جایگزین جملات مربوطه به تعریف نوع زمین در رابطه آکار و بومر [۱۲] گردید. علاوه بر این، در رابطه آکار و بومر برای در نظر گرفتن مکانیزم گسل، جمله‌ای به صورت $b_{10} F_R + b_9 F_N$ استفاده شده است که F_R و F_N به ترتیب برای گسل‌های نرمال و معکوس مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر خواهند داشت. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر، در نظر گرفتن مکانیزم گسل در رابطه کاهندگی به دلیل کمبود اطلاعات مدنظر نبوده است، این دو جمله در رابطه (۶) لحاظ نگردید.

۵- مطالعات آماری فرم‌های مختلف روابط کاهندگی

مقادیر پیش‌بینی شده شاخص شدت با استفاده از هر یک از ۲ مدل مذکور در بخش ۴ برای تک تک پیوندها محاسبه

روی زمین نوع I، ۲۸۱ رکورد بر روی زمین نوع II، ۱۳۶ بر روی زمین نوع III و ۵۹ بر روی زمین نوع IV ثبت شده‌اند. شایان ذکر است، در تمامی ایستگاه‌های شتاب‌نگاری اطلاعات مربوط به سرعت موج برشی متوسط، V_{s30} ، در دسترس نیست. لذا، در ایستگاه‌های فاقد سرعت موج برشی متوسط، فرکانس غالب ساختگاه به روش ناکامورا تخمین زده شد [۴۱]. در این روش برای تخمین فرکانس پاسخ زمین، از تقسیم طیف مؤلفه افقی بر طیف مؤلفه قائم (یعنی نسبت طیف افقی به طیف قائم، H/V) استفاده می‌شود. سپس سرعت موج برشی متوسط در ایستگاه شتاب‌نگاری بر حسب فرکانس پاسخ زمین محاسبه شد [۴۲]:

$$\log(f_0) = 1.89 \log(V_{s30}) - 4.429 \quad (4)$$

۴- انتخاب فرم رابطه کاهندگی

مدل‌های رگرسیون مختلفی برای معادلات پیش‌بینی حرکت زمین پیشنهاد شده است [۴۳]. مطلوب‌ترین حالت این است که مدل پیش‌بینی حرکت زمین تمام عوامل تأثیرگذار بر شاخص شدت را در بر گیرد. برخی از عوامل تأثیرگذار بر پارامترهای مهم حرکت زمین در ساختگاه عبارتند از: بزرگی، فاصله تا چشمه لرزه‌زا، شرایط محلی سایت، مکانیزم گسل، هندسه گسل، قرارگیری سایت بر فرادیواره یا فرودیواره گسل.

مسلماً، در نظر گرفتن تمام عوامل تأثیرگذار بر پارامترهای مهم حرکت زمین در رابطه کاهندگی، سبب کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی حرکت زمین خواهد شد. با این حال، رسیدن به این حالت ایده‌آل، مستلزم استفاده از فرم‌های پیچیده برای رابطه کاهندگی خواهد بود و مهمتر آنکه در بسیاری از موارد، دسترسی به اطلاعات کامل در خصوص همه عوامل تأثیرگذار مقدور نمی‌باشد. همانطور که در بخش ۳ مقاله توضیح داده شده، اطلاعات موجود در پایگاه اطلاعاتی در این پژوهش عبارتند از بزرگی گشتاور، فاصله تا چشمه لرزه‌زا و نوع زمین ساختگاه.

با توجه به اطلاعات موجود و بررسی مدل‌های پیش‌بینی حرکت زمین که در نشریه ۶۲۶ برای انجام تحلیل خطر زلزله در ایران پیشنهاد شده است [۴۴]، دو مدل (۵) و (۶) به عنوان مدل‌های مبنا برای توسعه رابطه کاهندگی انتخاب شد [۱۱، ۱۲]:

خاک طبقه‌بندی شد [۱۱]. در این حالت به جای سه پارامتر S_{II} ، S_{III} و S_{IV} ، از دو پارامتر S_1 و S_2 در روابط ۵ و ۶ استفاده شد. پارامترهای S_1 و S_2 به ترتیب برای ساختگاه‌های سنگ و خاک برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر در نظر گرفته شدند.

(د) نوع زمین ساختگاه در دو طبقه دسته‌بندی شد. سنگ و خاک خیلی متراکم به عنوان نوع اول و خاک متراکم و خاک نرم به عنوان نوع دوم تعریف شد. ساختگاه با $V_{s30} > 375 \text{ m/s}$ در گروه سنگ و خاک خیلی متراکم و ساختگاه با $V_{s30} \leq 375 \text{ m/s}$ در گروه خاک نرم و خاک متراکم طبقه‌بندی شد. در این حالت به جای سه پارامتر S_{II} ، S_{III} و S_{IV} ، از دو پارامتر S_1 و S_2 در روابط ۵ و ۶ استفاده شد. پارامتر S_1 برای ساختگاه‌های سنگ و خاک خیلی متراکم برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر در نظر گرفته شد.

به همین ترتیب پارامتر S_2 برای ساختگاه‌های دارای خاک نرم و خاک متراکم برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر در نظر گرفته شد.

- علاوه بر بررسی روش‌های مختلف طبقه‌بندی نوع خاک، برای معیار فاصله تا چشمه لرزه‌زا، دو پارامتر فاصله کانونی، R_{hypo} ، و فاصله تا رومرکز، R_{epi} ، نیز مورد بررسی قرار گرفت. به این ترتیب که در معادلات ۵ و ۶، به جای پارامتر فاصله، یک بار از فاصله کانونی و یک بار از فاصله تا رومرکز استفاده شد.

مقادیر انحراف معیار برای هر یک از روابط کاهندگی ذکر شده در روابط ۵ و ۶ برای هر یک از هشت حالت فوق (چهار حالت طبقه‌بندی نوع خاک و دو حالت معیار فاصله) در پیوندهای مختلف محاسبه شد. به منظور تعیین بهترین مدل برای رابطه کاهندگی، مقادیر متوسط انحراف معیار در پیوندهای مختلف برای هر یک از ۱۶ حالت بررسی شده، محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، متوسط انحراف معیار در پیوندهای مختلف، برای ۱۶ حالت بررسی شده، بین ۰/۳۸۵ تا ۰/۴۰۰ تغییر می‌کند.

نتایج جدول ۱ بر این دلالت دارند که استفاده از فرم رابطه کاهندگی ۶ در مقایسه با فرم رابطه ۵ در تمام حالات به جز حالت چهار نوع خاک سبب کاهش مقدار انحراف معیار شده است. با توجه به اینکه در اکثر موارد رابطه ۶ منجر به

شد. سپس با توجه به مقادیر مشاهده شده در ۵۵۵ زوج شتاب‌نگاشت پایگاه اطلاعاتی، ضرایب ثابت معادلات ۵ و ۶ به ازای هر پیوند به نحوی تعیین شدند که کمترین مقدار برای انحراف معیار حاصل شود:

$$\sigma_{LogIM_{oc}}^2 = \sum_{i=1}^n (\log IM_{oc,i} - \log \widehat{IM}_{oc,i})^2 / (n - 1) \quad (7)$$

در رابطه ۷، $IM_{oc,i}$ مقدار مشاهده شده در رکورد i ام، $\widehat{IM}_{oc,i}$ مقدار پیش‌بینی شده بر اساس رابطه کاهندگی به ازای مقادیر بزرگی، فاصله و نوع زمین در رکورد i ام، n تعداد کل رکوردها (۵۵۵ رکورد) و $\sigma_{LogIM_{oc}}^2$ واریانس مدل می‌باشد. در بررسی معادلات کاهندگی ۵ و ۶، ضمن اینکه انحراف معیار دو مدل با هم مقایسه شد، حالات مختلف زیر نیز برای یافتن بهترین حالتی که منجر به کمترین انحراف معیار می‌شود برای هر یک از این دو مدل، بررسی شد:

- روش‌های مختلف طبقه‌بندی خاک ساختگاه بر اساس سرعت موج برشی متوسط مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، چهار حالت زیر برای هر یک از دو مدل فوق بررسی شد:

(الف) طبقه‌بندی خاک ساختگاه مطابق تعریف استاندارد ۲۸۰۰ ایران انجام شد و با توجه به سرعت موج برشی متوسط یکی از انواع I، II، III و IV به خاک ساختگاه اطلاق گردید. در این حالت پارامترهای S_{II} ، S_{III} و S_{IV} به ترتیب برای زمین‌های نوع II، III و IV برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر در نظر گرفته شدند.

(ب) نوع زمین ساختگاه در یکی از سه نوع سنگ، خاک سخت و خاک نرم طبقه‌بندی شد. ساختگاه با $V_{s30} \geq 750 \text{ m/s}$ در گروه سنگ، ساختگاه با $360 \text{ m/s} < V_{s30} < 750 \text{ m/s}$ در گروه خاک سخت و ساختگاه با $V_{s30} < 360 \text{ m/s}$ در گروه خاک نرم طبقه‌بندی شد [۱۲]. در این حالت به جای سه پارامتر S_{II} ، S_{III} و S_{IV} ، از دو پارامتر S_A و S_S در روابط ۵ و ۶ استفاده شد. پارامترهای S_A و S_S به ترتیب برای ساختگاه‌های خاک سخت و خاک نرم برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر در نظر گرفته شدند.

(ج) نوع زمین ساختگاه یکی از دو نوع سنگ یا خاک در نظر گرفته شد. ساختگاه با $V_{s30} \geq 760 \text{ m/s}$ در گروه سنگ و ساختگاه با $V_{s30} < 760 \text{ m/s}$ در گروه

نوع زمین در دو نوع برای استخراج رابطه کاهندگی استفاده شد. در ضمن نتایج حاکی از آن است که طبقه‌بندی نوع زمین در دو نوع، نوع اول: خاک خیلی متراکم و سنگ و نوع دوم: خاک نرم و متراکم در مقایسه با طبقه‌بندی نوع زمین در دو نوع سنگ و خاک، منجر به انحراف معیار کمتر در پیش‌بینی شاخص شدت می‌شود. لذا، طبقه‌بندی نوع زمین در دو نوع خاک خیلی متراکم تا سنگ و خاک نرم تا متراکم در استخراج رابطه کاهندگی مورد استفاده قرار گرفت.

۶- بررسی رابطه کاهندگی پیشنهادی

رابطه کاهندگی برای شاخص ترکیب بهینه تغییر مکان‌های طیفی بر اساس مطالعات انجام شده در این پژوهش به صورت رابطه (۸) معرفی می‌شود:

$$\log_{10} IM_{OC}(T) = b_1 + b_2 M_w + b_3 M_w^2 + (b_4 + b_5 M_w) \log_{10} \sqrt{R_{hypo}^2 + b_6^2} + b_7 S_1 + b_8 S_2 \quad (8)$$

در رابطه (۸)، b_1 تا b_8 ضرایب ثابت هستند که طبق جدول (۲) و با توجه به زمان تناوب طبیعی T ، تعیین می‌شود. M_w بزرگی گشتاور و R_{hypo} فاصله محل سایت تا کانون زلزله می‌باشد. پارامتر S_1 برای ساختگاه‌های سنگ و خاک خیلی متراکم برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می‌باشد. به همین ترتیب پارامتر S_2 برای ساختگاه‌های دارای خاک نرم و خاک متراکم برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می‌باشد. رابطه کاهندگی و انحراف معیار مدل همانطور که در شکل (۳) نمایش داده شده است، وابسته به پریود هستند. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود، انحراف معیار مدل در پریودهای مختلف بین ۰/۳۶ تا ۰/۴۱ تغییر می‌کند. اثرات فاصله بر طیف پاسخ را می‌توان با مقایسه طیف‌های پاسخ برای شرایط مشابه اما در فواصل مختلف بررسی کرد. در شکل (۴) طیف پاسخ ترکیب بهینه تغییر مکان‌های بهینه برای بزرگی ۶/۵، خاک نرم و متراکم (نوع دو) و فواصل کانونی ۲۵، ۳۰ و ۳۵ کیلومتر با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که انتظار می‌رود، با کاهش فاصله کانونی، مقادیر پاسخ‌های طیفی افزایش پیدا کرده است. به عنوان مثال در پریود یک ثانیه، مقدار شاخص شدت به ازای فاصله ۳۵ کیلومتر برابر ۱/۵۸ سانتی‌متر است که با کاهش فاصله به مقادیر ۳۰ و ۲۵ کیلومتر به ترتیب به مقادیر ۱/۷۴ و ۱/۹۵ افزایش می‌یابد.

انحراف معیار کمتر شده است، این فرم ریاضی برای استخراج رابطه کاهندگی استفاده شد.

در جدول ۱ می‌توان مشاهده کرد که تفاوت چندانی بین انحراف معیار برای حالت‌های مختلف طبقه‌بندی نوع خاک وجود ندارد. مطابق این جدول، استفاده از چهار نوع به جای سه نوع زمین، تأثیر چندانی در کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی شاخص شدت طبق رابطه ۶ ندارد. دلیل این موضوع را باید در استفاده از روش فرکانس غالب ساختگاه برای تخمین سرعت موج برشی متوسط در ایستگاه‌های فاقد اطلاعات جستجو کرد. به عبارت دیگر، هر چند این روش تقریبی برای دسته‌بندی کلی زمین مناسب است، اما برای طبقه‌بندی‌های کامل‌تر، ضرورت دارد از روش‌های دقیق تخمین سرعت موج برشی نظیر آزمایش درون چاهی استفاده کرد.

جدول ۱- متوسط انحراف معیار رابطه کاهندگی

| معیار فاصله | طبقه بندی نوع خاک | رابطه (۵) | رابطه (۶) |
|--------------|---------------------|-----------|-----------|
| فاصله کانونی | دو نوع ^۱ | ۰/۳۹۸ | ۰/۳۹۱ |
| | دو نوع ^۲ | ۰/۳۹۴ | ۰/۳۸۹ |
| | سه نوع | ۰/۳۹۳ | ۰/۳۸۹ |
| | چهار نوع | ۰/۳۸۵ | ۰/۳۸۸ |
| فاصله رومرکز | دو نوع ^۱ | ۰/۴۰۰ | ۰/۳۹۱ |
| | دو نوع ^۲ | ۰/۳۹۸ | ۰/۳۹۰ |
| | سه نوع | ۰/۳۹۴ | ۰/۳۹۰ |
| | چهار نوع | ۰/۳۸۹ | ۰/۳۸۹ |

^۱ دو نوع زمین شامل نوع یک: سنگ، نوع دو: خاک

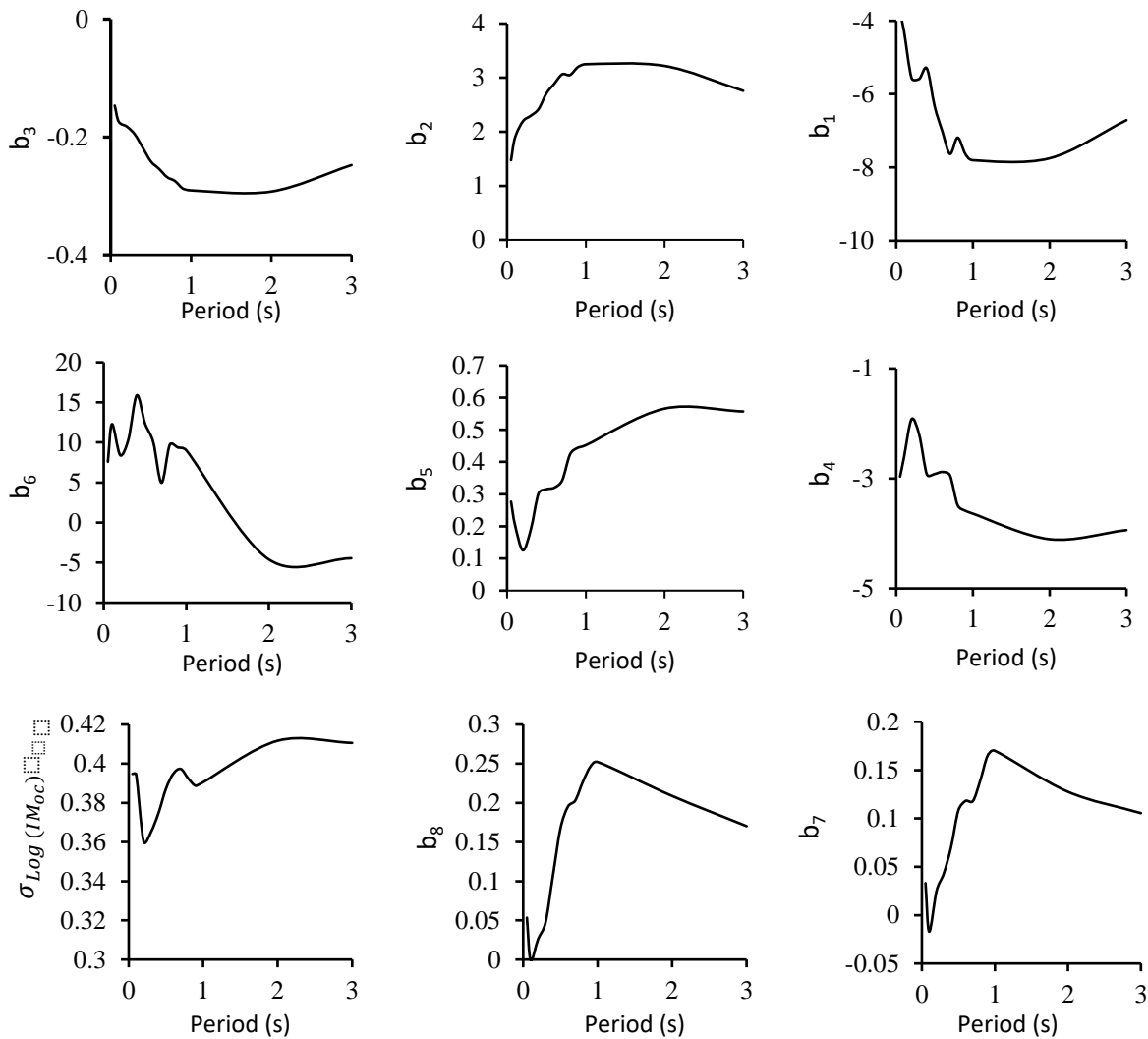
^۲ دو نوع زمین شامل نوع یک: سنگ و خاک خیلی متراکم، نوع دو: خاک نرم و خاک متراکم

نتایج جدول ۱ همچنین نشان می‌دهد، استفاده از فاصله کانونی به جای فاصله تا رومرکز در تمام حالت‌ها سبب کاهش انحراف معیار شده است. مقدار انحراف معیار در بهترین حالت در صورت استفاده از فاصله تا رومرکز برابر ۰/۳۸۹ است که در صورت استفاده از فاصله کانونی به ۰/۳۸۵ کاهش می‌یابد.

با توجه به مطالب فوق الذکر می‌توان بیان کرد که استفاده از فرم رابطه ۶ و فاصله کانونی در مجموع منجر به کمترین انحراف معیار می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به تفاوت بسیار ناچیز انحراف معیار در حالت طبقه‌بندی نوع زمین در دو نوع با طبقه‌بندی نوع زمین در سه و چهار نوع، طبقه‌بندی

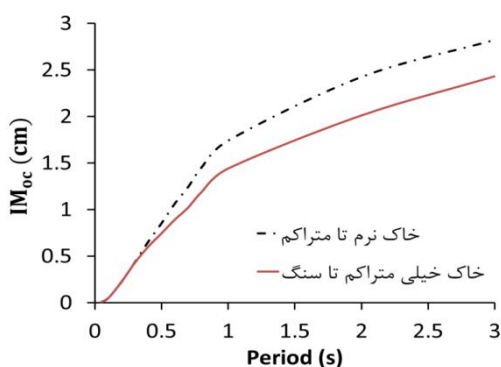
جدول ۲- ضرایب رابطه کاهندگی برای شاخص ترکیب بهینه تغییر مکان‌های طیفی

| σ | b_8 | b_7 | b_6 | b_5 | b_4 | b_3 | b_2 | b_1 | پریود (ثانیه) |
|----------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------------|
| ۰/۳۹۴۷۶ | ۰/۰۵۳۴ | ۰/۰۳۳۱ | ۷/۵۸۸۱ | ۰/۲۷۶۸ | -۲/۹۶۵۴ | -۰/۱۴۶۷ | ۱/۴۷۲۱ | -۳/۷۸۶۰ | ۰/۰۵ |
| ۰/۳۹۴۵۴ | -۰/۰۰۰۶ | -۰/۰۱۷۱ | ۱۲/۲۹۳۹ | ۰/۲۰۴۷ | -۲/۶۲۶۱ | -۰/۱۷۴۰ | ۱/۸۸۷۷ | -۴/۲۶۲۸ | ۰/۱ |
| ۰/۳۶۰۲۴ | ۰/۰۲۶۰ | ۰/۰۲۴۸ | ۸/۴۰۱۷ | ۰/۱۲۵۳ | -۱/۹۲۰۱ | -۰/۱۸۲۲ | ۱/۱۹۰۳ | -۵/۵۶۳۵ | ۰/۲ |
| ۰/۳۶۵۱۷ | ۰/۰۴۷۱ | ۰/۰۴۳۰ | ۱۰/۴۱۵۳ | ۰/۱۸۸۴ | -۲/۰۷۲۶ | -۰/۱۹۵۵ | ۱/۲۹۴۲ | -۵/۵۸۵۸ | ۰/۳ |
| ۰/۳۷۴۸۰ | ۰/۰۰۷۳ | ۰/۰۰۷۳ | ۱۵/۸۸۲۱ | ۰/۳۰۲۲ | -۲/۹۲۷۸ | -۰/۲۱۸۵ | ۲/۴۱۷۷ | -۵/۳۰۱۷ | ۰/۴ |
| ۰/۳۸۷۱۹ | ۰/۱۶۷۰ | ۰/۱۰۸۴ | ۱۲/۳۷۶۱ | ۰/۳۱۵۲ | -۲/۹۱۸۰ | -۰/۲۱۴۵ | ۲/۷۰۹۵ | -۶/۳۳۰۰ | ۰/۵ |
| ۰/۳۹۴۹۳ | ۰/۱۹۵۰ | ۰/۱۱۸۲ | ۱۰/۰۴۱۳ | ۰/۳۲۰۱ | -۲/۸۸۱۲ | -۰/۲۵۳۸ | ۲/۸۸۷۷ | -۷/۰۱۲۰ | ۰/۶ |
| ۰/۳۹۷۲۶ | ۰/۲۰۳۰ | ۰/۱۱۸۰ | ۴/۹۶۴۸ | ۰/۳۴۲۷ | -۲/۹۴۲۰ | -۰/۲۶۷۹ | ۳/۰۶۱۹ | -۷/۶۳۲۱ | ۰/۷ |
| ۰/۳۹۲۴۱ | ۰/۲۲۶۵ | ۰/۱۳۹۳ | ۹/۷۰۳۹ | ۰/۴۲۳۷ | -۳/۴۸۴۸ | -۰/۲۷۴۷ | ۳/۰۴۹۷ | -۷/۱۸۶۸ | ۰/۸ |
| ۰/۳۸۸۶۸ | ۰/۲۴۵۸ | ۰/۱۶۴۸ | ۹/۳۵۱۹ | ۰/۴۴۴۳ | -۳/۵۸۷۳ | -۰/۲۸۷۶ | ۳/۱۹۶۹ | -۷/۶۳۰۶ | ۰/۹ |
| ۰/۳۹۰۵۳ | ۰/۲۵۲۱ | ۰/۱۷۰۰ | ۹/۰۲۵۳ | ۰/۴۵۲۱ | -۳/۶۴۰۵ | -۰/۲۹۰۶ | ۳/۲۴۸۷ | -۷/۸۰۳۸ | ۱ |
| ۰/۴۱۱۷۰ | ۰/۲۰۸۸ | ۰/۱۲۷۶ | -۴/۶۰۲۴ | ۰/۵۶۶۰ | -۴/۱۰۴۱ | -۰/۲۹۲۵ | ۳/۲۱۷۸ | -۷/۷۵۱۵ | ۲ |
| ۰/۴۱۰۵۹ | ۰/۱۷۰۳ | ۰/۱۰۵۵ | -۴/۴۵۸۰ | ۰/۵۵۷۱ | -۳/۹۳۸۱ | -۰/۲۴۷۷ | ۲/۷۵۷۴ | -۶/۷۰۹۸ | ۳ |



شکل ۳- تغییرات ضرایب b_1 تا b_8 و انحراف معیار رابطه کاهندگی بر حسب زمان تناوب طبیعی

به ازای دو نوع زمین: خاک خیلی متراکم و سنگ ($V_{s30} >$ 375 m/s) و خاک نرم و خاک متراکم ($V_{s30} \leq$ 375 m/s)، در شکل (۶) نمایش داده شده است. نمودار شاخص شدت در پریودهای بزرگتر از ۰/۴ ثانیه، برای خاک نرم و خاک متراکم بزرگتر از نمودار مربوط به خاک خیلی متراکم و سنگ است. به عنوان مثال در پریود یک ثانیه، مقدار شاخص شدت روی خاک خیلی متراکم و سنگ برابر ۱/۴۴ سانتی‌متر است که روی خاک نرم و متراکم به مقدار ۱/۷۴ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. مقادیر شاخص شدت در پریودهای بزرگتر از ۰/۴ ثانیه بر روی خاک نرم و خاک متراکم به طور متوسط حدود ۱۷ درصد بزرگتر از مقادیر متناظر بر روی خاک سخت و خیلی متراکم می‌باشد. یادآوری می‌شود که خاک متراکم و نرم در برگیرنده زمین نوع III و IV و سنگ و خاک خیلی متراکم متناظر با زمین نوه I و II در استاندارد ۲۸۰۰ ایران می‌باشند.

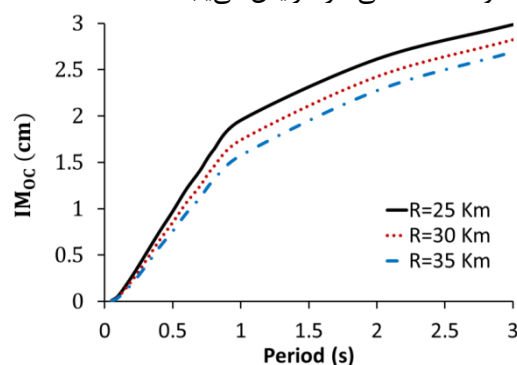


شکل ۶- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده IM_{OC} برای بزرگی ۶/۵، فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر و دو نوع

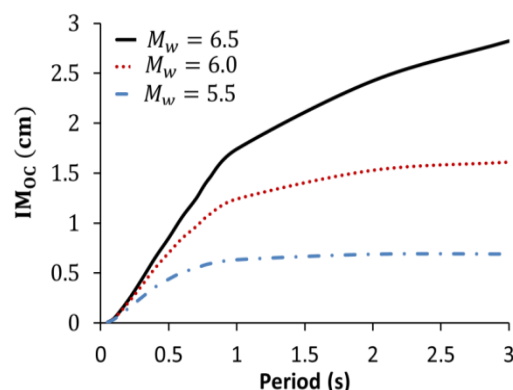
مقادیر باقیمانده بر حسب بزرگی و فاصله برای پریودهای ۰/۲ و ۱/۰ ثانیه در شکل (۷) نمایش داده شده است. از تحلیل رگرسیون به منظور پیش‌بینی مقادیر باقیمانده بر حسب بزرگی و فاصله استفاده شد. شیب خط برازش شده (β) و مقدار متناظر p -value در هر حالت در شکل (۷) نمایش داده شده است.

p -value مبین اهمیت آماری ضریب رگرسیون β است و احتمال آن را نشان می‌دهد که بتوان مقداری برای β یافت که بزرگتر یا مساوی ضریب مشاهده شده β (مقدار قدر مطلق) باشد، به شرط آن که مقدار واقعی β برابر صفر در نظر گرفته شود. بنابراین، مقادیر کوچک p -value (کمتر از ۵ درصد) نشان می‌دهد که تخمین رگرسیون ضریب β برای بزرگی و فاصله از لحاظ آماری اهمیت دارد و در نتیجه مقادیر باقیمانده وابسته به بزرگی یا فاصله می‌باشند. با توجه

در شکل (۴)، همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش پریود، مقدار شاخص شدت افزایش می‌یابد. در پریودهای کوتاه تا حدود یک ثانیه، مقادیر شاخص شدت تقریباً با شیب ثابت افزایش می‌یابند. با این حال، برای زمان‌های تناوب بزرگتر از یک ثانیه، شیب منحنی به تدریج کاهش می‌یابد. اثر بزرگی بر مقادیر شاخص شدت، در شکل (۵) نمایش داده شده است. در این شکل، مقادیر ترکیب بهینه تغییر مکان‌های طیفی بر روی خاک نرم و خاک متراکم (نوع دو) و در فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر برای مقادیر بزرگی ۶/۵، ۶/۰ و ۵/۵ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش بزرگی مقادیر شاخص شدت به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابند. به عنوان مثال مقدار شاخص شدت در پریود یک ثانیه در زلزله‌ای با بزرگی ۵/۵ برابر ۰/۶۳ سانتی-متر است که با افزایش بزرگی زلزله به ۶/۰ و ۶/۵ به مقادیر ۱/۲۴ و ۱/۷۴ سانتی‌متر افزایش می‌یابد.



شکل ۴- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده IM_{OC} برای فواصل مختلف کانونی، بزرگی ۶/۵ و زمین مشابه (خاک نرم تا متراکم)

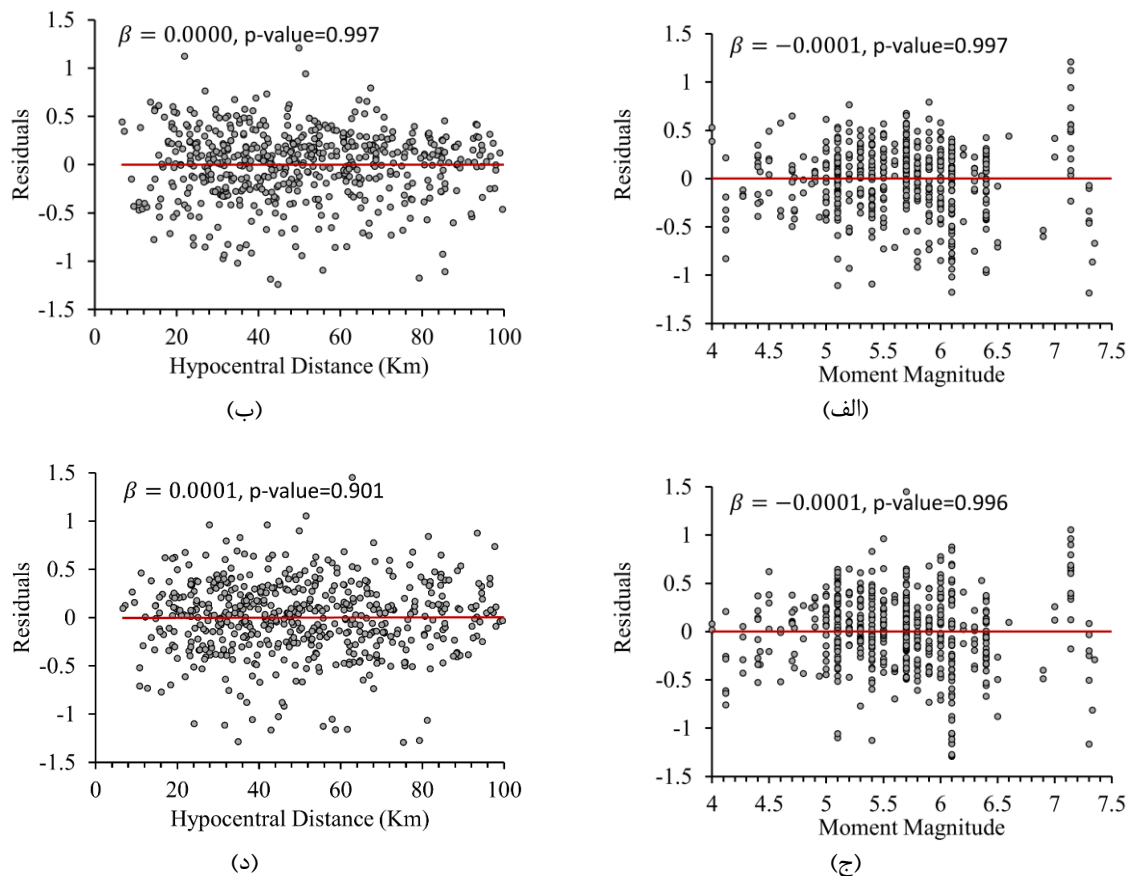


شکل ۵- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده IM_{OC} برای مقادیر مختلف بزرگی، فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر و زمین مشابه (خاک نرم تا متراکم)

به منظور بررسی اثرات خاک بر پاسخ‌های طیفی، نمودار شاخص شدت برای بزرگی ۶/۵ و فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر

روابط قاسمی و زارع [۱۱] و آکار و بومر [۱۲] پرداخته می‌شود. شایان ذکر است تاکنون رابطه کاهندگی مستقل برای شاخص شدت IM_{OC} استخراج نشده است، لذا با توجه به اینکه این شاخص شدت تابعی از مقادیر $S_d(T_1)$ و $S_d(1.2T_1)$ است، از تقریب مرتبه اول تیلاور برای برآورد IM_{OC} بر اساس مقادیر $S_d(T_1)$ و $S_d(1.2T_1)$ استفاده شد.

به مقادیر β و p-value مربوطه در شکل (۷) می‌توان نتیجه گرفت مقادیر باقیمانده مستقل از بزرگی و فاصله هستند. به عبارت دیگر، وابستگی شاخص شدت به این دو پارامتر به درستی در رابطه کاهندگی منعکس شده است. شایان ذکر است این نتیجه در سایر پیوندها نیز صادق است. در ادامه، به مقایسه طیف پاسخ IM_{OC} حاصل از رابطه کاهندگی پیشنهادی در این پژوهش با طیف‌های حاصل از



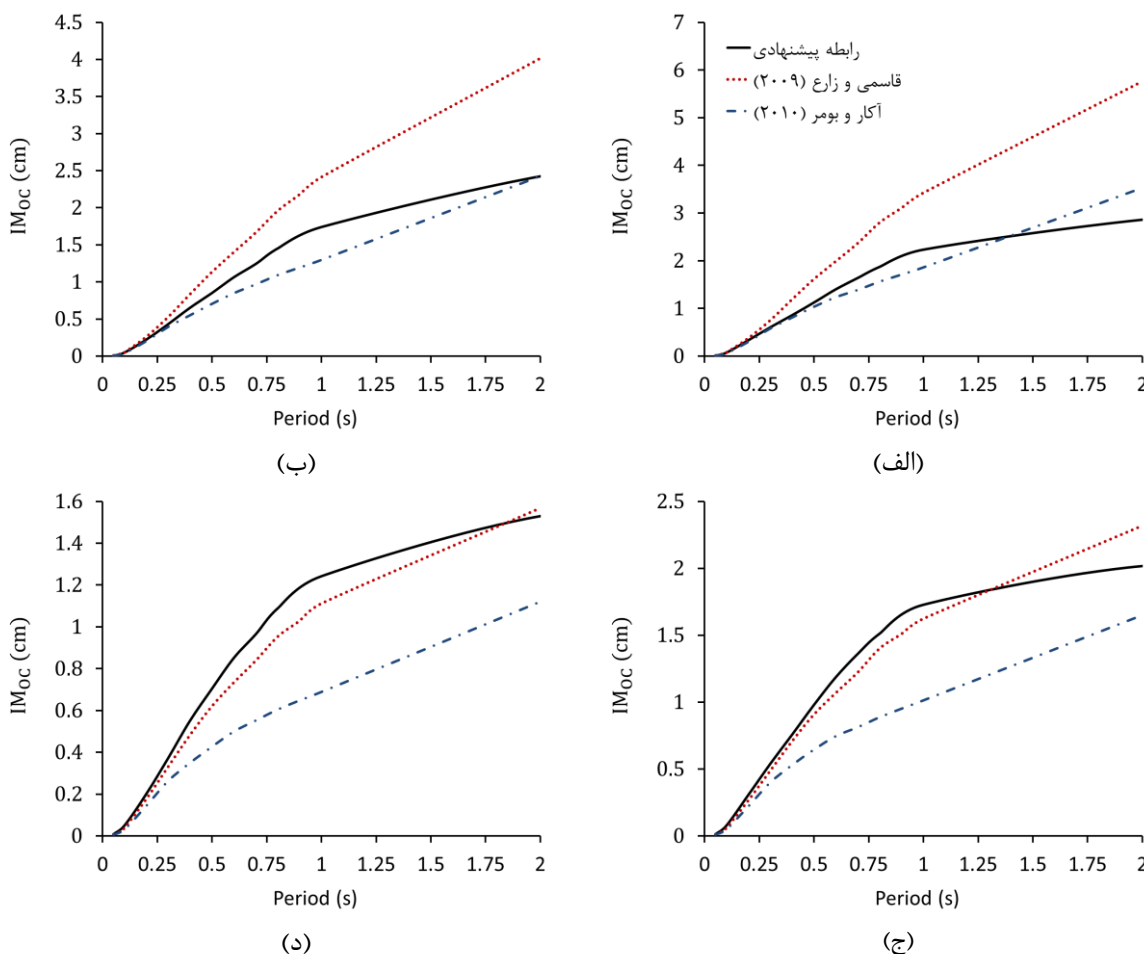
شکل ۷- مقادیر باقیمانده بر حسب بزرگی و فاصله کانونی (الف) و (ب) برای پیوند ۰/۲ ثانیه، (ج) و (د) برای پیوند ۱/۰ ثانیه

پژوهش برای بزرگی ۶/۰ نزدیک به مقادیر طیف پاسخ قاسمی و زارع و برای بزرگی ۶/۵ نزدیک به طیف آکار و بومر است.

خاطر نشان می‌شود روابط کاهندگی زارع و قاسمی [۱۱] و آکار و بومر [۱۲] برای شتاب‌های طیفی پیشنهاد شده‌اند، لذا طیف‌های حاصل از این روابط برای شاخص شدت IM_{OC} تقریب مرتبه اول از طیف میانگین است. در حالیکه با استفاده از رابطه کاهندگی پیشنهادی در این پژوهش طیف میانگین شاخص شدت IM_{OC} مستقیماً برآورد شده است.

در شکل (۸)، طیف‌های پاسخ برای بزرگی های ۶/۵ و ۶/۰ و فواصل کانونی ۳۰ و ۲۰ کیلومتر با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) مربوط به بزرگی ۶/۵ و شکل‌های (۸-ج) و (۸-د) مربوط به بزرگی ۶/۰ است. چنانچه در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در تمام حالت‌ها مقادیر طیف پاسخ حاصل از رابطه کاهندگی آکار و بومر کوچکتر از طیف حاصل از رابطه کاهندگی قاسمی و زارع می‌باشد. طیف پاسخ حاصل از رابطه پیشنهادی در این



شکل ۸- مقایسه طیف پاسخ IM_{oc} حاصل از رابطه کاهندگی پیشنهادی در این پژوهش با طیف پاسخ حاصل از روابط کاهندگی زارع و قاسمی [۱۱] و آکار و بومر [۱۲]، الف) بزرگی ۶/۵ و فاصله کانونی ۲۰ کیلومتر، ب) بزرگی ۶/۵ و فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر، ج) بزرگی ۶/۰ و فاصله ۲۰ کیلومتر و د) بزرگی ۶/۰ و فاصله ۳۰ کیلومتر

۷- نتیجه گیری

این پژوهش با هدف استخراج رابطه کاهندگی برای شاخص ترکیب بهینه ترکیب بهینه تغییر مکان های طیفی انجام شده است. بدین منظور و با هدف انعکاس خصوصیات لرزه خیزی ایران در رابطه کاهندگی، از ۵۳۵ زوج شتاب نگاشت زلزله با بزرگی ۴ تا ۷/۶ در ایران و ۲۰ زوج شتاب نگاشت زلزله با بزرگی بیشتر از ۷ در ترکیه استفاده شد. رکوردهای استفاده شده مربوط به ۲۸۴ زلزله می باشند که در فواصل کمتر از ۱۰۰ کیلومتر ثبت شده اند. در صورت استفاده از تعریف استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۴۰] برای طبقه بندی نوع زمین، ۷۹ رکورد بر روی زمین نوع I، ۲۸۱ رکورد بر روی زمین نوع II، ۱۳۶ بر روی زمین نوع III و ۵۹ بر روی زمین نوع IV ثبت شده است.

عنوان فرم های مبنا برای توسعه رابطه کاهندگی انتخاب شد. در بررسی این دو فرم، ضمن اینکه مقایسه انحراف معیار دو فرم با یکدیگر مدنظر قرار گرفت، روش های مختلف برای تعریف طبقه بندی نوع زمین و تعریف فاصله از منبع لرزه زای نیز بررسی شد.

- برای طبقه بندی نوع زمین با توجه به سرعت متوسط موج برشی متوسط در ۳۰ متر بالایی زمین، چهار حالت مختلف بررسی شد. نتایج نشان می دهد، استفاده از دو نوع زمین در صورتی که نوع یک شامل سنگ و خاک خیلی متراکم ($V_{s30} > 375$ m/s) و نوع دو شامل خاک نرم و خاک متراکم ($V_{s30} \leq 375$ m/s) باشد، منجر به بهترین نتایج می شود.
- نتایج نشان می دهد به ازای یک مقدار مشخص بزرگی و فاصله کانونی، مقادیر طیفی ترکیب بهینه تغییر مکان های طیفی با افزایش پریود افزایش می یابد.

- از بین مدل های پیش بینی حرکت زمین، براساس اطلاعات موجود در پایگاه اطلاعاتی، دو فرم ریاضی به

- مقادیر باقیمانده حاصل از تحلیل رگرسیون پایگاه اطلاعاتی حرکات شدید زمین در این مطالعه در مقابل بزرگی و فاصله ترسیم گردید. مشاهده شد که شیب خط در معادله پیش‌بینی مقادیر باقیمانده بر حسب بزرگی یا فاصله از لحاظ آماری فاقد اهمیت می‌باشد. به عبارت دیگر، رابطه کاهندگی پیشنهاد شده از کفایت مناسب در انعکاس اثرات بزرگی و فاصله در پیش‌بینی شاخص شدت برخوردار است.
- طیف‌های پاسخ حاصل از رابطه کاهندگی پیشنهادی، با تقریب مرتبه اول طیف‌های پاسخ طبق رابطه قاسمی و زارع و رابطه آکار و بومر، برای بزرگی‌های ۶/۵ و ۶/۰ و فواصل کانونی ۳۰ و ۲۰ کیلومتر مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد که در تمام حالت‌ها طیف آکار و بومر کوچکتر از طیف قاسمی و زارع می‌باشد. همچنین، طیف حاصل از رابطه پیشنهادی در این پژوهش برای بزرگی ۶/۰ نزدیک به مقادیر طیف پاسخ قاسمی و زارع و برای بزرگی ۶/۵ نزدیک به طیف آکار و بومر است.
- در پریودهای کوتاه تا حدود یک ثانیه مقادیر طیف تقریباً با شیب ثابت افزایش می‌یابد. با این حال، برای زمان‌های تناوب بزرگتر از یک ثانیه، با افزایش پریود شیب منحنی به تدریج کاهش می‌یابد.
- اثر فاصله و بزرگی بر طیف‌های پاسخ در پریودهای مختلف بر اساس رابطه کاهندگی پیشنهادی بررسی شد. همانطور که انتظار می‌رود، با کاهش فاصله کانونی و افزایش بزرگی، مقادیر پاسخ‌های طیفی افزایش پیدا می‌کند.
- نتایج نشان می‌دهد اثر نوع زمین برای پریودهای کوچک تر از ۰/۴ ثانیه تأثیری بر مقادیر شاخص شدت ندارد. اما مقادیر شاخص شدت در پریودهای بزرگتر از ۰/۴ ثانیه بر روی خاک نوع دو (خاک نرم و متراکم) به طور متوسط حدود ۱۷ درصد بزرگتر از مقادیر متناظر بر روی خاک نوع یک (خیلی خیلی متراکم و سنگ) می‌باشد.

مراجع

- [۱] علی اکبر یحیی آبادی و سید قاسم رستمی، "مدلسازی فرکانسی وقوع زلزله‌ها با استفاده از تابع تبدیل فوریه"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۹، شماره ۶۴، بهار ۱۴۰۰، صفحه ۱-۱۴.
- [2] F. Sinaiean, "Study on Iran strong motion records", 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran, 2006.
- [۳] حسین بخشی، مه‌اله رخشانی مهر و مسعود نوروزی، "تحلیل خطر لرزه ای و تهیه نقشه های هم شتاب شهرستان نیشابور"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۴، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۲۱۱-۲۲۳.
- [4] M. Mousavi, A. Ansari, H. Zafarani, and A. Azarbakht, "Selection of ground motion prediction models for seismic hazard analysis in the Zagros region, Iran", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 16, NO. 8, 2012, pp. 1184-1207.
- [5] J. Shoja-Taheri, S. Naserieh, and G. Hadi, "A test of the applicability of NGA models to the strong ground-motion data in the Iranian plateau", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 14, NO. 2, 2010, pp. 278-292.
- [6] H. Ramazi, and V. Schenk, "Preliminary results obtained from strong ground motion analyses of Iranian earthquakes", XXIV General Assembly of the ESC, Athens, Greece, 1994.
- [7] M. Khademi, "Attenuation of peak and spectral accelerations in the Persian plateau", 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, UK, 2002.
- [8] K.W. Campbell, "Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. Bulletin of the Seismological Society of America", Vol. 71, NO. 6, 1981, pp. 2039-2070.
- [9] A. Norouzi, "Attenuation relations for peak horizontal and vertical accelerations of earthquake ground motion in Iran: a preliminary analysis", Journal of Seismology and Earthquake Engineering, Vol. 7, NO. 2, 2005, pp. 109-128.
- [10] K.W. Campbell, and Y. Bozorgnia, "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, Vol. 24, NO. 1, 2008, pp. 139-171.

- [11] H. Ghasemi, and M. Zare, "An empirical spectral ground-motion model for Iran", *Journal of Seismology*, Vol. 13, NO. 4, 2009, pp. 499-515.
- [12] S. Akkar, and J.J. Bommer, "Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East", *Seismological Research Letters*, Vol. 81, NO. 2, 2010, pp. 195-206.
- [13] M. Soghrat, and M. Ziyaeifar, "Ground motion prediction equations for horizontal and vertical components of acceleration in northern Iran", *Journal of Seismology*, Vol. 21, NO. 1, 2017, pp. 99-125.
- [۱۴] غلامرضا قدرتی امیری، سید علی رضویان امرئی و سید امین رضویان امرئی، "نهیة رابطه کاهندگی شتاب برای فلات ایران. مدلسازی در مهندسی". نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۱۶۷-۱۷۵.
- [15] H. Zafarani, M. R. Soghrata, R. Jabbarkhanib, and Z. Nasrollahifarb, "Selection and Modification of Ground Motion Prediction Equations in Different Tectonic Regions of Iran considering declustered and Non-declustered Earthquake Catalogs", *Journal of Earthquake Engineering*, 2022, DOI: 10.1080/13632469.2022.2033361.
- [16] A. Khansefid, "Pulse-like ground motions: Statistical characteristics, and GMPE development for the Iranian Plateau", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 134, 2020, pp. 106-164.
- [17] C.A. Goulet, Y. Bozorgnia, N. Kuehn, L.A. Atik, R.R. Youngs, and R.W. Graves, "NGA-East ground-motion characterization model Part I: Summary of products and model development", *Earthquake Spectra*, Vol. 37, NO. 1_suppl, 2021, p. 1231-1282.
- [18] P. Tothong, and N. Luco, "Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 36, NO. 13, 2007, pp. 1837-1860.
- [19] A. Yahyaabadi, and M. Tehranizadeh, "Development of an improved intensity measure in order to reduce the variability in seismic demands under near-fault ground motions" *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol. 02, NO. 06, 2012, pp. 1250012.
- [20] A. Yahyaabadi, and M. Tehranizadeh, "New scalar intensity measure for near-fault ground motions based on the optimal combination of spectral responses", *Scientia Iranica*, Vol. 81, NO. 6, 2011, pp.1149-1158.
- [21] M. Onvani, and A. Yahyaabadi, "Probabilistic seismic demand analysis of steel moment frames by utilising Bayesian statistics", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 24, NO. 4, 2021, pp. 618-634.
- [22] L. Lin, N. Naumoski, M. Saatcioglu, and S. Foo, "Improved intensity measures for probabilistic seismic demand analysis. Part 1: development of improved intensity measures", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 38, NO. 1, 2011, pp. 79-88.
- [23] J.W. Baker, and C. Allin Cornell, "A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 34, NO. 10, 2005, pp. 1193-1217.
- [24] P. Tothong, and C. Allin Cornell, "An empirical ground-motion attenuation relation for inelastic spectral displacement", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, NO. 6, 2006, pp. 2146-2164.
- [25] P. Heresi, H. Dávalos, and E. Miranda, "Ground motion prediction model for the peak inelastic displacement of single-degree-of-freedom bilinear systems", *Earthquake Spectra*, Vol. 34, NO. 3, 2018, 1177-1199.
- [26] N. Luco, P.M. Mai, C.A. Cornell, and G.C. Beroza, "Probabilistic seismic demand analysis at a near-fault site using ground motion simulations based on a stochastic-kinematic earthquake source model", 7th US National Conference on Earthquake Engineering, Boston, Massachusetts, 2002.
- [27] K. Kostinakis, and A. Athanatopoulou, "Incremental dynamic analysis applied to assessment of structure-specific earthquake IMs in 3D R/C buildings", *Engineering Structures*, Vol. 125, 2016, pp. 300-312.
- [28] N. Luco, and P. Bazzurro, "Effects of earthquake record scaling on nonlinear structural response", Rep. on PEER-LL Program Task 1G00, Addendum (Sub-Task 1 of 3), 2004.
- [29] Iran Strong Motion Network Data Bank, 2020.
- [30] PEER Ground Motion Database, 2021.

- [31] B. Gutenberg, and C.F. Richter, "Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration", Bulletin of the Seismological society of America, Vol. 32, NO. 3, 1942, pp. 163-191.
- [32] B. Gutenberg, "Magnitude determination for deep-focus earthquakes", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 3, NO. 35, 1945, pp. 117-130.
- [33] C.F. Richter, "An instrumental earthquake magnitude scale", Bulletin of the seismological society of America, Vol. 25, NO. 1, 1935, pp. 1-32.
- [34] T.C. Hanks, and H. Kanamori, "A moment magnitude scale", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 84, NO. B5, 1979, pp. 2348-2350.
- [35] N. Mirzaei, M. Rezapour, and M.A. Siahkali, "Attenuation relationships of seismic intensity in IRAN", Journal of the Earth and Space Physics, Vol. 30, NO. 1, 2004, pp. 1-9.
- [36] M. Zare, "Contribution à l'étude des mouvements forts en Iran: du catalogue aux lois d'atténuation", Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 1999.
- [37] G. Ghodrati Amiri, M. Khorasani, R. Mirza, and S. A. Razavian Amrei, "Ground-motion prediction equations of spectral ordinates and arias intensity for Iran", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 14, NO. 1, 2009, pp. 1-29.
- [38] Y. Fukushima, and T. Tanaka, "A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan", Bulletin of the seismological Society of America, Vol. 80, NO. 4, 1990, pp. 757-783.
- [39] N. Ambraseys, J. Douglas, S. K. Sarma, and P. M. Smit, "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, Vol. 3, NO. 1, 2005, pp.1-53.
- [40] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard No. 2800-04), Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran, 2014.
- [41] Y. Nakamura, "What is the Nakamura method?", Seismological Research Letters, Vol. 90, NO. 4, 2019, pp.1437-1443.
- [42] H. Ghofrani, G.M. Atkinson, and K. Goda, "Implications of the 2011 M9.0 Tohoku Japan earthquake for the treatment of site effects in large earthquakes", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 11, NO. 1, 2013, pp. 171-203.
- [43] J. Douglas, "Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates", Earth-Science Reviews, Vol. 61, NO. 1-2, 2003, pp. 43-104.
- [44] Guidelines for seismic hazard analysis (No. 626), Office of Deputy for Strategic Supervision, Department of Technical Affairs.Tehran, Iran, 2014.