

تحلیل خطر لرزه‌ای و تهیه طیف خطر شهر مشهد جهت طراحی و اجرای زیرساخت‌های شهری و برون شهری

مقاله علمی - پژوهشی

امید توسلی^{*}، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

عادل عساکره، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

نوید توسلی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^{*}پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Omid.Tavasoli@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

صفحه ۱۶۶-۱۵۵

چکیده

تجربه زلزله‌های اخیر و خسارت‌های ناشی از آن در انواع سازه‌ها از جمله شریان‌های حیاتی و زیرساخت‌های حمل و نقل، محققین را بر آن می‌دارد که نسبت به بررسی و بازنگری مجدد پارامترهای لرزه‌خیزی موثر در مناطق مختلف در مقایسه با شتاب طرح ارایه شده در آیین نامه‌های مربوطه، اقدام نمایند. در این پژوهش، به بررسی و تحلیل خطر لرزه‌ای و تهیه طیف خطر یکسان شهر مشهد با استفاده از روش احتمالاتی و تعیینی پرداخته شده است. بدین صورت که منحنی خطر لرزه‌ای و طرح طیف شهر مشهد در منطقه‌ای به مساحت ۱۰۰ کیلومترمربع در شبکه‌های ۱×۱ کیلومترمربعی و در نظر گرفتن پارامترهای موثر بر آن از جمله تعیین گسل‌های فعال منطقه، طول موثر گسل‌ها، حداکثر رخداد زلزله و فاصله موثر از گسل‌ها، با فرض خطی بودن چشمه‌های لرزه‌ای و استفاده از روابط کاهندگی متفاوت، محاسبه و مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهند که حداکثر شتاب افقی سنگ بستر در منطقه مورد مطالعه با روش تعیینی ۱/۴۹گرم و همچنین با استفاده از روش احتمالاتی، مقادیر آن برای دوره بازگشت‌های مختلف در طول عمر مفید ۵۰ سال با احتمال ۲ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد به ترتیب ۰/۶۱گرم، ۰/۴۳گرم و ۰/۳۴گرم به دست آمده و طیف خطر یکنواخت شهر مشهد به کمک روش‌های مختلف و رابطه کاهندگی طیفی قدرتی و همکاران ارایه شده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خطر لرزه‌ای، شهر مشهد، طیف خطر، روش احتمالاتی، روش تعیینی

۱- مقدمه

است. برای نیل به این هدف، محاسبه حداکثر شتاب سنگ بستر و ترسیم نقشه خطرپذیری و پهنه بندی لرزه‌ای مناطق مختلف ضروری می‌باشد. نقشه‌های خطر باید در برگیرنده اطلاعات مربوط به ماهیت خطر شامل فرکانس و شدت زلزله، داده‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، فهرست و آمار وضعیت در معرض خطر نظیر تعداد جمعیت، ساختمان‌ها و بزرگراه‌ها و همچنین شرایط آسیب‌پذیری نظیر جمعیت انبوه، ساختمان‌های ضعیف طراحی شده، شهرک‌های با درجه پایین، ظرفیت پاسخ اضطراری ناکافی و غیره باشند. در سال‌های اخیر، محققین بسیاری به مطالعه و ارزیابی خطر

با توجه به شرایط لرزه‌خیزی کشور ایران و نقش حیاتی زیرساخت‌های شهری و برون شهری از جمله صنعت ساختمان و حمل و نقل مانند پل، راه، راه‌آهن، فرودگاه و بندر، طراحی، احداث و نگهداری، مقاوم‌سازی و ایمنی آنها از نقطه نظر دینامیکی و لرزه‌ای دارای جایگاه ویژه و حائز اهمیت می‌باشد. در طول چند دهه گذشته تلاش‌های متعددی برای برآورد پارامترهای لرزه‌ای و بهبود ارزیابی خطر لرزه‌ای در کشور صورت گرفته و در مجموع، این مطالعات به بهبود دستورالعمل‌های ایران برای طراحی مقاوم در برابر لرزه ساختمان‌ها و زیرساخت‌های حمل و نقلی کمک کرده

اراضی، مدیریت بحران زلزله و طرح‌های مقاوم‌سازی سازه‌های مختلف را فراهم آورده است.

به منظور انجام این پژوهش، اطلاعات ژئوتکنیکی بیش از ۷۲۰ گمانه اکتشافی با استفاده از حفاری و تحقیقات محلی از منابع مختلف و ارگان‌های شهر مشهد گردآوری شده و آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی و سایر آزمایش‌های مورد نیاز انجام گرفته است. همچنین مطالعات سائزموکتونیک و تحلیل خطر لرزه‌ای به منظور برآورد پارامترهای حرکتی زمین در سنگ کف لرزه‌ای صورت پذیرفته و نقشه سائزموکتونیک گستره‌ای به شعاع حدود ۱۰۰ کیلومتر پیرامون شهر مشهد تهیه گردید و پیشینه لرزه‌خیزی گستره طرح و توزیع پراکندگی زمین‌لرزه، ویژگی‌های لرزه زمین‌ساختی گستره طرح و ساز و کار زمین لرزه‌های مهم، مدل زمین ساخت و دوره بازگشت زمین لرزه‌ها بدست آمده است، تخمین صحیح خطر لرزه‌ای یک منطقه به لحاظ ایمنی، فنی و اقتصادی اهمیت بسزایی دارد. رویکرد متعارف تعینی در تحلیل خطر لرزه‌ای، اگرچه از نظر حجم داده‌ها و زمان محاسبات، سادگی بیشتری نسبت به رویکرد احتمالاتی دارد. اما براساس مطالعات بیکر، بعلت وجود عدم قطعیت‌های فراوان در پارامترهای لرزه‌ای، استفاده از روش احتمالاتی دارای ارجحیت و با توجه به این امر، تحلیل خطر احتمالاتی می‌تواند نتایج قابل استنادتری را ارائه کند و لازم است برای شهرهای لرزه‌خیز ایران مورد توجه قرار گیرد. بنابراین در پژوهش حاضر، علاوه بر تحلیل خطر تعینی، تحلیل خطر احتمالاتی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

با توجه به اینکه شهر مشهد از نقطه نظر فرهنگی، سیاسی، اقتصادی و تجاری، دارای جایگاه بسیار اساسی در کشور ایران بوده و از سویی وقوع زلزله و پیامدهای مخرب ناشی از آن می‌تواند خسارات قابل توجه و جبران ناپذیری در پی داشته باشد، در این مطالعه تحلیل خطر این منطقه مورد توجه قرار گرفته است. علیرغم قرار گرفتن این منطقه در پهنه با خطر نسبی زیاد مطابق آیین نامه ۲۸۰۰، مطالعه و ارزیابی خطرات ناشی از زلزله به ویژه محاسبه دقیق‌تر حداکثر شتاب زمین می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. برای این منظور در ابتدا، منحنی خطر لرزه‌ای با تحلیل خطر شهر مشهد با در نظر گرفتن گسل‌های فعال منطقه بصورت چشمه خطی لرزه‌ای و با استفاده از روابط کاهندگی متفاوت به کمک دو روش تعینی و احتمالاتی بدست آمده و با یکدیگر مقایسه شده و در نهایت، به تحلیل طیف خطر یکنواخت شهر مشهد با استفاده از روش‌های حاکم بر آن اشاره گردیده است.

لرزه‌ای مناطق مختلف دنیا پرداخته و حداکثر شتاب زمین و طیف خطر را برای این محدوده‌ها ارائه نمودند، که از جمله می‌توان به پژوهش Gullu and Ercelebi, Phuong, Ansal et al., Selcuk et al., Desai, Sil et al., Khan et al., Mezcuca et al., Ashdi et al., Weimer et al., and Choudhury اشاره نمود. همچنین تحلیل خطر لرزه‌ای و تهیه طیف خطر یکسان برای مناطق مختلف کشور نیز انجام شده و با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های لرزه‌خیزی تاریخی و موجود در بانک اطلاعات زمین لرزه‌های داخل کشور، پیشینه شتاب روی سنگ بستر و شتاب طیفی با استفاده از روابط کاهندگی مختلف، محاسبه و تعیین گردیده است. Yazdani et al. و Saffari and Pouladvand نقشه خطر لرزه‌ای شهر تهران و پهنه‌بندی آن را با استفاده از روش احتمالاتی طراحی و ارائه نمودند. Baghbani et al طی انجام یک فرآیند تحلیل سلسله مراتبی با شش پارامتر خطر زلزله، خطرات ناشی از زلزله در منطقه سد سیاوه واقع در استان خراسان جنوبی را بررسی کرده و نشان دادند که در حدود ۲۰ درصد از منطقه تحت دسته بندی بسیار خطرناک و یا خطر بالا قرار داشته و سایر مناطق دارای خطر کم و بسیار کم هستند. Khoshnevis et al به تحلیل خطر لرزه‌ای شمال ایران پرداخته و با در نظر گرفتن عدم قطعیت در معادله پیش بینی حرکت زمین، پارامترهای لرزه‌ای و مدل‌های حاصل را با استفاده از یک درخت منطقی ارزیابی نموده و با توجه به نتایج بدست آمده نشان دادند که از نظر پیشینه سرعت زمین و منحنی خطر در مکان‌های بررسی شده، بالاترین سطوح خطر در غرب تبریز شمالی و در شرق گسل شمال البرز با توجه به احتمال وقوع‌های مختلف در ۵۰ سال وجود دارد. Keshavarz and Mansoori Moghaddam وضعیت لرزه‌خیزی استان بوشهر را با تحلیل خطر لرزه‌ای مناطق مختلف این استان با استفاده از روش احتمالاتی و تعینی ارزیابی کرده و طیف خطر یکنواخت و نقشه پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای برای دوره بازگشت‌های مختلف را برای شهرهای مهم این استان ارائه دادند. تحلیل خطر لرزه‌ای و تهیه طیف خطر یکسان برای مناطق مختلف شهر کرمان و شهرکرد نیز به ترتیب توسط Ghodrati Amiri et al. و Razavian Amrei et al. بررسی و ارائه شده است. ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر مشهد در دهه ۱۳۸۰ برای تخمین خطرات ناشی از زلزله و پدیده‌های مرتبط با آن از جمله پدیده تشدید در آبرفت، گسلش سطحی، اثر توپوگرافی، لغزش، روانگرایی و غیره انجام گردیده و داده‌های مورد نیاز برای تهیه طرح‌های بهینه کاربری

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، شهر مشهد از جمله کلان‌شهرهای کشور واقع در شمال‌شرق ایران با طول جغرافیایی ۵۹/۶۱۶۸ و عرض جغرافیایی ۳۶/۲۶۰۵ بوده، که به منظور افزایش دقت و در نظر گرفتن تاثیر بیشتر گسل‌های موجود در پیرامون این حوزه، گسل‌های فعال منطقه در شعاع ۲۰۰ کیلومتری مطابق نقشه گسل‌های فعال ایران مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱) و با توجه به اطلاعات گردآوری شده، زلزله‌هایی با بزرگای در حدود ۷/۶ ریشتر نیز در داده‌های تاریخی آنها یافت می‌شوند. همچنین محدوده مورد مطالعه در گستره‌ای به ابعاد ۱۰×۱۰ کیلومتر در نظر گرفته و به شبکه‌هایی به ابعاد ۱×۱ کیلومتر تقسیم شده است. بنابراین به منظور افزایش دقت در تحلیل خطر لرزه‌ای شهر مشهد، تعداد ۱۳ چشمه خطی به طول‌های موثر مختلف و فواصل شعاعی متفاوت از مرکز هر شبکه در نظر گرفته شده، که مشخصات هر یک از چشمه‌های مورد نظر در جدول ۱ آورده شده و برای تعیین مشخصات و پارامترهای موثر از اطلاعات موجود در سایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استفاده گردیده است. همچنین با توجه به ضرورت یکسان بودن مقادیر بزرگای کلیه زلزله‌ها، لازم است مقادیر آنها با استفاده از روابط مناسب بین بزرگاهای مختلف همسان شوند، که برای تبدیل بزرگاهای M_s ، M_b و M_w از روابط زیر استفاده شده است.

$$M_s = 1.205M_b - 1.29 \quad (1)$$

$$M_w = 0.56M_s + 2.66 \quad (2)$$

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد، کلیه گسل‌های فعال منطقه پتانسیل ایجاد زلزله‌های با بزرگای بیشتر از ۷ ریشتر را دارا بوده و با توجه به اینکه در داده‌های تاریخی زلزله‌های در حدود ۷/۶ ریشتر نیز در مناطق گوناگون گزارش گردیده است، بنابراین برای تمامی چشمه‌های خطی و گسل‌های اشاره شده، حداکثر بزرگای زلزله مورد انتظار معادل ۷/۶ ریشتر لحاظ گردیده و در محاسبات اعمال شده است. لازم به توضیح است که با توجه به شناسایی گسل‌های توس (شمال مشهد) و جنوب مشهد (چناران) در دهه‌های اخیر و عدم وجود داده‌های لرزه‌ای دقیق در بانک‌های اطلاعاتی و تاریخی موجود برای این دو گسل و همچنین وجود گسل‌های فعالی نظیر کشف رود، بینالود، تربت جام و غیره در محدوده شمال و جنوب شهر مشهد با قابلیت لرزه‌خیزی بسیار زیاد، بنابراین محاسبات مورد نظر برای این دو گسل انجام نگردیده است.

۳- تحلیل خطر لرزه‌ای شهر مشهد با روش‌های تعیینی

و احتمالاتی

۳-۱- تحلیل خطر لرزه‌ای با روش تعیینی

در این قسمت، به تحلیل خطر لرزه‌ای شهر مشهد با استفاده از روش تعیینی پرداخته شده است. در اولین گام، بایستی تمامی منابع لرزه‌ای که پتانسیل ایجاد زمین لرزه در منطقه مورد نظر را دارند، شناسایی گردند. این شناسایی بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی معتبر، بازدیدهای محلی و همچنین بر پایه تفاسیر زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و زلزله‌شناسی منطقه انجام می‌گیرد. زلزله‌های با بزرگای کوچکتر از ۴ به دلیل عدم امکان ایجاد خرابی و خسارت مهم، دارای اهمیت کمی بوده و برای مقاصد طراحی در مهندسی عمران در نظر گرفته نمی‌شوند. از دیدگاه مهندسی، بزرگای آستانه که نشان دهنده کمینه حد بزرگای زمین‌لرزه است، دارای اهمیت فراوان بوده و در مطالعات لرزه‌خیزی با توجه به کیفیت داده‌های لرزه‌ای و همچنین اهمیت طراحی سازه، به کمک قضاوت مهندسی تعیین می‌شوند. در این پژوهش، بزرگای آستانه (M_{min}) معادل ۴/۵ انتخاب شده است. همان‌طور که در قبل اشاره گردید، ۱۳ چشمه خطی لرزه‌ای از میان ۱۵ گسل در نظر گرفته شده، که مشخصات آنها در جدول ۱ ارایه شده است. سپس با توجه به مخاطرات لرزه‌ای منطقه، زمین لرزه کنترلی که نشان دهنده حداکثر مقدار زمین‌لرزه ناشی از فعالیت هر گسل در محدوده مورد نظر می‌باشد، تعیین و مشخص می‌گردد. بزرگترین زمین لرزه تاریخی در یک ناحیه و یا یک منبع لرزه‌ای، به عنوان حداقل مقدار برای M_{max} محتمل برای آن ناحیه یا منبع لرزه‌ای می‌باشد.

بنابراین، زمین‌لرزه کنترلی برای تمامی گسل‌ها بر اساس جدول ۱ قابل تعیین می‌باشد، بطوری که بزرگترین زمین‌لرزه در ناحیه مورد مطالعه برابر با ۷/۶ و مربوط به گسل‌های کشف‌رود و کپه‌داغ است.



شکل ۱. نقشه گسل‌های فعال در شعاع ۲۰۰ کیلومتری شهر مشهد

جدول ۱. مشخصات چشمه‌های لرزه‌ای فعال در منطقه مورد مطالعه

شماره گسل	نام گسل	ساز و کار گسل	طول گسل (کیلومتر)	حداقل فاصله شعاعی (کیلومتر)	بیشینه توان لرزه‌ای (M_w)
LS 1	کپه داغ	امتداد لغز	۴۷۵	۱۳۹	۷/۶
LS 2	باغان	امتداد لغز	۵۰	۱۷۴	۷/۱
LS 3	اسفراین	امتداد لغز	۶۵	۱۷۵	۷/۲
LS 4	ریوند	معکوس	۶۷	۱۱۴	۷/۲
LS 5	نیشابور	معکوس	۷۴	۲۶	۷/۴
LS 6	بینالود	معکوس	۹۲	۲۱	۷/۵
LS 7	کشف رود	امتداد لغز	۱۶۴	۳۲	۷/۶
LS 8	ترتت جام	معکوس	۹۰	۳۷	۷/۵
LS 9	بالهر	معکوس	۸۰	۶۶	۷/۳
LS 10	بیجورد	امتداد لغز	۷۰	۱۱۸	۷/۲
LS 11	کاشمر	معکوس	۶۰	۸۴	۷/۲
LS 12	مهدی آباد	معکوس	۶۰	۱۲۴	۷/۳
LS 13	دوغ آباد	معکوس	۶۰	۱۱۶	۷/۲
LS 14	توس	معکوس	۴۵	۱۷	۶/۶
LS 15	جنوب مشهد	امتداد لغز	۱۱۶	۱۳	-

نزدیک نسبت به منطقه مورد مطالعه می‌باشند، حداکثر شتاب میانگین بدست آمد. لازم به توضیح است که تعیین عمق کانونی زلزله عدم قطعیت بالاتری نسبت به رو مرکز به ویژه برای شبکه لرزه‌نگاری غیرمترامک و زلزله‌های کم عمق که در آن‌ها فازهای عمقی به خوبی قابل تفکیک نیستند، دارد. بنابراین، بر اساس نشریه ۶۲۶ لازم است با استناد به مراجع معتبر عمق رخداد در محدوده مورد مطالعه را تخمین زد، که بدین منظور می‌توان از داده‌هایی که توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری ارائه شده است، استفاده نمود. نکته حائز اهمیت در صحت تحلیل خطر لرزه‌ای، استفاده از رابطه کاهندگی مناسب بوده و به علت وجود عدم قطعیت‌ها در هر رابطه کاهندگی و بر خلاف اغلب پژوهش‌های رایج که از یک رابطه کاهندگی برای تحلیل خطر لرزه‌ای استفاده می‌شود، در این تحقیق از سه رابطه کاهندگی بهره گرفته شده و نتیجه نهایی بر اساس این سه رابطه ارائه گردیده است. برای تعیین نتیجه نهایی راهکارهای متفاوتی وجو دارد از جمله ضرایب وزنی یا وزندهی به نتایج حاصل از روابط کاهندگی مختلف به نحوی که مجموع ضرایب برابر با یک باشد. نهایتاً مقدار حداکثر، به عنوان پاسخ نهایی در نظر گرفته می‌شود. همچنین در برخی از مراجع مقادیر ضریب وزنی هر رابطه کاهندگی می‌تواند بر اساس آزمون LLH متفاوت و یا یکسان فرض گردد.

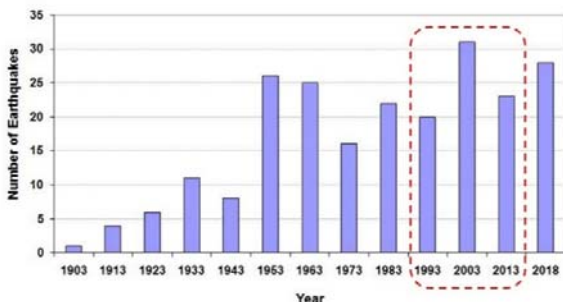
با توجه به توضیحات اشاره شده، در صورتیکه از ضرایب وزنی بر اساس فاصله گسل استفاده شود، مقدار حداکثر شتاب میانگین برابر $0.74g$ و در صورتیکه از ضرایب وزنی 0.333 برای روابط مختلف استفاده شود، مقدار نهایی آن برابر با $1/49g$ تعیین می‌گردد، که g شتاب ثقل زمین معادل $9/81$ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد.

۳-۲- تحلیل خطر لرزه‌ای با روش احتمالاتی

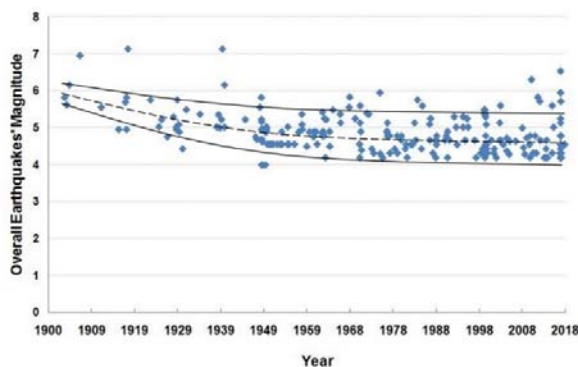
از جمله ضعف‌های روش تعیینی، عدم امکان برآورد سطح خطرهای مختلف برای منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در مقابل، در تحلیل خطر لرزه‌ای به روش احتمالاتی تمامی زمین لرزه‌های با بزرگای معین، روی همه منابع لرزه‌ای و در تمام فواصل ممکن از منطقه در نظر گرفته شده و با همدیگر ترکیب می‌شوند و در نتیجه، با استفاده از تحلیل خطر لرزه‌ای به روش احتمالاتی، می‌توان با توجه به درجه اهمیت منطقه مورد مطالعه، پارامترهای طراحی جنبش نیرومند زمین را با در نظر گرفتن سطوح خطر مختلف و سطوح طراحی متناسب با آن بدست آورد. به منظور تحلیل خطر شهر مشهد با استفاده از روش احتمالاتی، ابتدا منابع لرزه‌ای شناسایی

برای محاسبه و برآورد خطر زمین‌لرزه در یک منطقه، رابطه‌ای نیاز می‌باشد که بتواند میزان کاسته شدن پارامترهای جنبش نیرومند زمین را به پارامترهایی همچون فاصله منطقه مورد نظر از منبع زمین‌لرزه، اندازه زمین‌لرزه و شرایط تکتونیکی و زمین‌شناسی و غیره پیوند دهد، که به عنوان رابطه کاهندگی نامیده می‌شود. روابط کاهندگی به طور عمده برای برآورد پارامتر حداکثر شتاب زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه گسل‌های فعال در شعاع 200 کیلومتری از شهر مشهد دارای فاصله میانگین حداقلی 45 کیلومتر نسبت به آن می‌باشند، بنابراین برای انجام محاسبات و تعیین حداکثر شتاب زمین، از روابط کاهندگی زارع و همکاران، کمپل و بزرگ‌نیا و صفاری و همکاران استفاده شده است. در این حالت، شتاب بیشینه سنگ بستر با انجام تحلیل به روش تعیینی و با استفاده از روابط کاهندگی مورد نظر برای هر کدام از گسل‌ها محاسبه شده است. بعلاوه استفاده از روابط کاهندگی متعدد در روند محاسبات، می‌توان از روش‌هایی از جمله درخت منطقی یا میانگین وزنی برای تعیین نتیجه نهایی استفاده نمود. بنابراین با کاربرد دو روش میانگین‌گیری معمولی و میانگین وزنی بر اساس طول و فاصله هر گسل و همچنین میانگین فاصله گسل‌هایی که دارای فواصل بسیار

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اغلب زلزله‌های روی داده دارای بزرگای ۴ تا ۵ ریشتر بوده و بیشترین تعداد زلزله نیز حداقل سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۳ اتفاق افتاده است.



شکل ۲. توزیع زمانی زلزله‌ها بر اساس بزرگای آنها از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۸ میلادی



شکل ۳. فراوانی وقوع زلزله‌ها در زمان‌های مختلف از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۸ میلادی

با توجه به شعاع ۲۰۰ کیلومتری جستجو برای فراوانی زلزله‌ها، توزیع فراوانی و موقعیت رخدادها در منطقه مورد مطالعه در شکل ۴ نمایش داده شده است. این توزیع نشان می‌دهد که بیشتر زلزله‌های روی داده در شهر مشهد، ناشی از فعالیت گسل‌های موجود در نیمه غربی منطقه مورد مطالعه می‌باشند.

پس از جستجو و استخراج داده‌های زلزله‌های رخ داده و همچنین شناسایی گسل‌های فعال در محدوده مورد نظر، پیش لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های اتفاق افتاده با استفاده از مدل گاردنر و نوپوف از داده‌های اصلی جدا گردیده است. روش نوپوف و گاردنر بر پایه رسم لگاریتم زمانی پس‌لرزه‌ها بر حسب بزرگی زمین‌لرزه‌ها بوده و در این روش، برای هر زمین‌لرزه یک پنجره زمانی- مکانی وابسته به بزرگی در نظر گرفته شده و سپس رویدادهای وابسته در دو حوزه زمان و فاصله نسبت به بزرگی تعیین می‌گردد. بر اساس الگوریتم نوپوف، رویدادهای زیر منحنی زمان- بزرگی و سپس همان رویدادها

شده و لرزه‌خیزی منطقه بررسی گردیده و سپس برای ارزیابی لرزه‌خیزی در محدوده مطالعاتی انتخاب شده، تمام زلزله‌های وقوع پیوسته از بانک داده‌های لرزه‌ای استخراج شده است. مشخصات و ویژگی‌های زمین لرزه‌های تاریخی با استفاده از کاتالوگ زمین لرزه‌های به دست آمده و اطلاعات کلی در مورد منطقه مورد مطالعه نیز در جدول ۳ ارائه گردیده است.

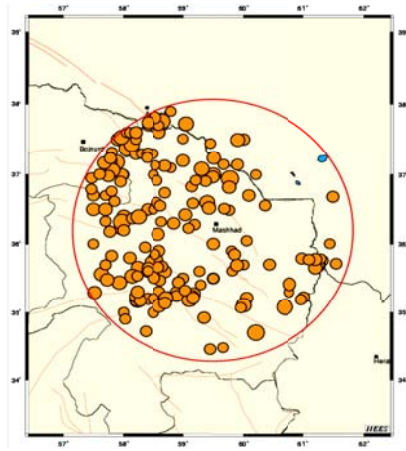
جدول ۲. مقایسه بیشینه شتاب زمین با روش تعیینی برای گسل‌های مختلف

شماره گسل	فاصله شعاعی (کیلومتر)	حداکثر شتاب زمین		
		زارع و همکاران [39]	کمپل و بزرگ نیا [38]	صفاری و همکاران [39]
LS 1	۱۳۹	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۳۰
LS 2	۱۷۴	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۵
LS 3	۱۷۵	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۵
LS 4	۱۱۴	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۲۵
LS 5	۲۶	۱/۲۰	۱/۱۱	۱/۳۱
LS 6	۲۱	۱/۴۹	۱/۳۷	۱/۶۲
LS 7	۳۲	۰/۹۶	۰/۸۹	۱/۰۴
LS 8	۳۷	۰/۸۲	۰/۷۶	۰/۹۰
LS 9	۶۶	۰/۴۴	۰/۴۱	۰/۴۸
LS 10	۱۱۸	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۲۴
LS 11	۸۴	۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۳۶
LS 12	۱۲۴	۰/۲۱	۰/۲۰	۰/۲۳
LS 13	۷۰	۰/۴۱	۰/۳۸	۰/۴۵
حداکثر شتاب زمین بدست آمده		۱/۴۹		

جدول ۳. اطلاعات کلی در مورد منطقه مورد مطالعه

اطلاعات	مقادیر
تاریخ شروع جستجوی آمار	۱۹۰۰ میلادی
تاریخ اتمامی جستجوی آمار	۲۰۱۸ میلادی
نوع جستجو	دایره ای از مرکز محل مورد نظر
مشخصات جغرافیایی	شهر مشهد (۳۶/۲۶۰۵، ۵۹/۶۱۶۸)
شعاع	۲۰۰ کیلومتر
حداقل بزرگای	۴
حداکثر بزرگای	۹
تعداد داده‌های اولیه	۳۱۸

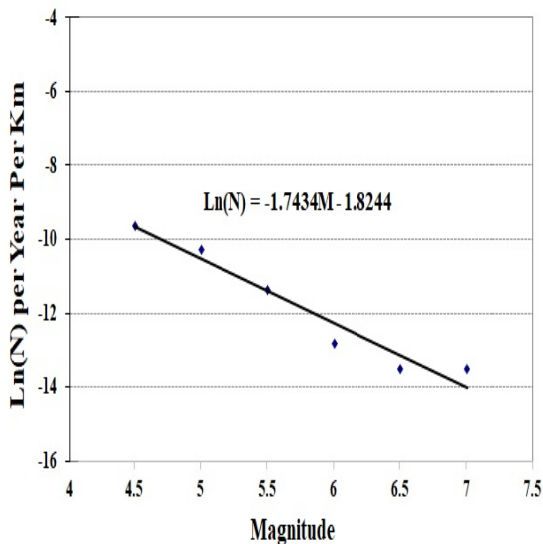
رابطه‌ای بین فراوانی زلزله‌ها و بزرگای آنها، توزیع بزرگی و محاسبه متوسط میزان رخداد زمین لرزه‌ها استخراج شده و همچنین چگالی و توزیع احتمال آن نیز محاسبه گردیده است. توزیع بزرگای زلزله‌ها بر اساس زمان وقوع آنها و همچنین فراوانی وقوع زلزله‌ها در زمان‌های مختلف، در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه نشان داده شده است.



شکل ۴. توزیع فراوانی و موقعیت رخ دادهای زلزله در شعاع ۲۰۰ کیلومتری منطقه مورد مطالعه

جدول ۴. تعداد زلزله‌های رخ داده بزرگتر از بزرگای مورد نظر

ردیف	زلزله با بزرگای بزرگتر از	تعداد رخداد زلزله
۱	۴/۵	۱۴۶
۲	۵/۰	۷۵
۳	۵/۵	۲۵
۴	۶/۰	۶
۵	۶/۵	۶
۶	۷/۰	۳
۷	۷/۰	۳



شکل ۵. رابطه گوتنبرگ-ریشتر برای منطقه مورد مطالعه

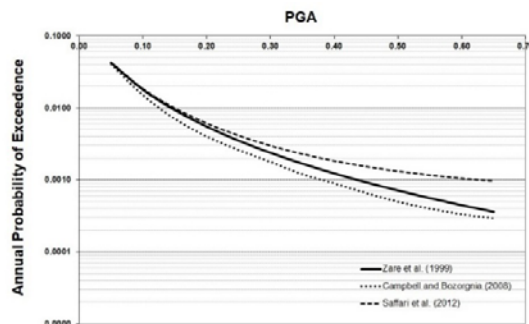
بر مبنای نمودار فاصله-بزرگای که در زیر منحنی واقع می‌شوند، رویدادهای وابسته تلقی شده و برای محاسبات ضرایب لرزه‌خیزی از کاتالوگ حذف می‌گردند. پس از انجام برازش‌های آماری لازم، مدل‌سازی لرزه‌خیزی منطقه مطابق شکل‌های ۲ و ۳، با استفاده از فرآیند ساده شمارش انجام گردید، که تعداد زلزله‌های رخ داده بزرگتر از بزرگای ($M_w > 4$) در جدول ۴ ارایه و بر اساس آن پارامترهای لرزه‌خیزی محاسبه شده است. برای کمی‌سازی لرزه‌خیزی یک پهنه مشخص، روابط مختلفی با استفاده از نحوه توزیع زلزله‌ها و بزرگای آنها ارایه گردیده، که یکی از معتبرترین آنها، رابطه گوتنبرگ-ریشتر کلاسیک است. در فرآیند تخمین پارامترهای a و b مطابق نشریه شماره ۶۲۶- راهنمای کاربردی انجام تحلیل خطر زلزله، نتایج تحلیل برازش رابطه گوتنبرگ-ریشتر الزاماً باید به صورت چشمی به تصویر درآمده و مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین مطابق جدول ۴، براساس فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها (N) و بزرگای مربوطه (M) می‌توان از شکل نمودار گوتنبرگ-ریشتر برای زلزله‌های روی داده در شعاع ۲۰۰ کیلومتری شهر مشهد، برای برازش رابطه و تعیین ضرایب گوتنبرگ-ریشتر استفاده نمود، که ضرایب الف و ب به ترتیب معادل $-1/7434$ و $-1/8244$ برای کل منطقه مورد مطالعه بدست آمده است.

با توجه به کمبود فراوانی داده‌ها برای هر گسل در بانک مورد جستجو، رابطه گوتنبرگ-ریشتر و همچنین تابع چگالی احتمال برای کل منطقه مورد مطالعه به ازای مجموع طول چشمه‌های خطی انتخابی و عرض مناسب برای پوشش دادن کل داده‌ها و توزیع مناسب در سطح مورد جستجو، محاسبه و بدست آورده شده است. سپس، با توجه به مشخصات چشمه‌های لرزه‌ای از قبیل فاصله شعاعی از منطقه مورد مطالعه، طول موثر گسل، بزرگای زلزله محتمل و همچنین رابطه کاهندگی در نظر گرفته شده، مطابق رابطه زارع و همکاران و در مقایسه با روابط کامپل و بزرگ نیا و صفاری و همکاران، منحنی خطر برای هر چشمه محاسبه شده و سپس با ترکیب نمودن آنها، منحنی خطر و حداکثر شتاب افقی محتمل با توجه به سطح خطر مورد نظر تعیین می‌گردد. پس از آن، منحنی‌های خطر چشمه‌های لرزه‌ای حاصل از ترکیب ۱۳ چشمه لرزه‌ای خطی محاسبه شده و منحنی خطر لرزه‌ای کل منطقه مورد نظر، مطابق شکل ۶، استخراج و ترسیم شده است. بنابراین با توجه به توضیحات اشاره شده، حداکثر شتاب افقی سنگ بستر (PRA) محتمل برای طول عمر مفید ۵۰ سال برای رخدادهای ۲، ۵ و ۱۰ درصد در دوره بازگشت‌های مختلف، با توجه به شکل ۶ محاسبه شده و نتایج بدست آمده در جدول ۵ آورده شده است.

۰/۶۱g، ۰/۴۳g و ۰/۳۴g تعیین گردیده در محاسبات تعیین طیف طرح از مقادیر بدست آمده استفاده شده است.

برای محاسبه و برآورد طیف طرح، رابطه کاهندگی مناسبی که بتواند میزان کاهش مشخصات طیف طرح منطقه مورد مطالعه را به پارامترهایی همچون فاصله منطقه مورد نظر از منبع زمین‌لرزه، اندازه زمین‌لرزه و غیره پیوند دهد، انتخاب گردیده، که در این پژوهش برای انجام محاسبات و تعیین شتاب طیفی و سرعت سنگ بستر شهر مشهد، از رابطه کاهندگی قدرتی امیری و همکاران. استفاده شده است. استفاده از روابط کاهندگی طیفی مختلف و فراهم نمودن امکان مقایسه نتایج آنها بسیار ارزشمند بوده، لکن در پژوهش قدرتی امیری و همکاران. نیز از رابطه کاهندگی یکسان برای یافتن حداکثر شتاب سنگ بستر و تهیه نقشه شتاب طیفی استفاده شده است. در این تحقیق سعی گردیده تا با استفاده از روابط کاهندگی مختلف، امکان مطالعه متنوع و گسترده‌تر فراهم شود و با توجه به این حقیقت که رابطه کاهندگی قدرتی امیری و همکاران. برای ایران ارایه شده و استفاده از آن برای تعیین شتاب طیفی در مطالعات تحلیل خطر ایران متعارف می‌باشد، در این بخش از تحقیق نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

در نتیجه، تحلیل طیفی با استفاده از رابطه کاهندگی اشاره شده بالا برای هر یک از چشمه‌های لرزه‌ای خطی محاسبه گردیده و برای تعیین طیف طرح منطقه، از نتایج طیف طرح چشمه‌های لرزه‌ای میانگین‌گیری شده است. شکل ۷ شتاب طیفی طرح را برای تمامی ۱۳ چشمه لرزه‌ای در نظر گرفته شده و همچنین شتاب طیفی میانگین را در مقایسه با طیف استاندارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نمودار میانگین بدست آمده در دوره تناوب‌های متوسط و بالا اختلاف نسبتاً کمی با مقادیر متناظر آیین‌نامه‌ای داشته و مؤید تطابق مناسب با طیف استاندارد است، در حالی‌که در دوره تناوب‌های پایین به طور قابل توجهی بیشتر از مقادیر آیین‌نامه ۲۸۰۰ می‌باشد. بنابراین، بر اساس نتایج بدست آمده برای منطقه مورد مطالعه، پیشنهاد می‌گردد طیف استاندارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ در دوره تناوب‌های پایین با احتیاط بیشتری مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نمودار شتاب طیفی همواره در پریودهای پایین از حداکثر شتاب (PRA) منطقه آغاز شده و در پریودهای بالا به صفر متمایل می‌گردد. اگر به نمودار میانگین دقت شود، نقطه شروع نمودار از ۰/۵۴g می‌باشد، که در حقیقت بیانگر این نکته است که شتاب بدست آمده برای منطقه مورد مطالعه با روش‌های تحلیل خطر، منطقی و درست محاسبه گردیده است.



شکل ۶. منحنی خطر ترکیب شده برای کل منطقه مورد مطالعه

جدول ۵. حداکثر شتاب سنگ بستر با احتمال رخداد‌های مختلف برای طول عمر مفید ۵۰ سال

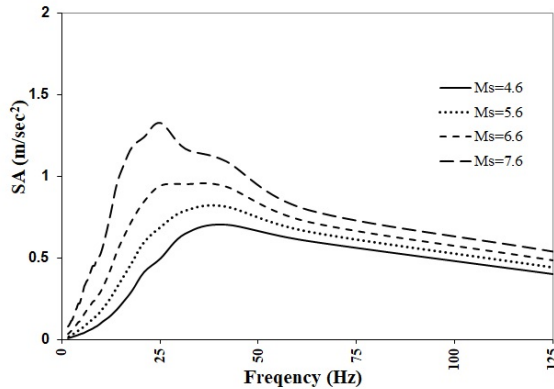
دوره بازگشت (سال)	احتمال رخداد حداکثر شتاب افقی (%)	شتاب
۲۴۷۵	۲	۰/۶۱g
۱۴۷۵	۵	۰/۴۳g
۴۷۵	۱۰	۰/۳۴g

همانطور که اشاره گردید، در این تحقیق علاوه بر مطالعه احتمال رخداد ۲ و ۵ درصد، روند متعارف تحلیل خطر ایران بر اساس دوره بازگشت ۴۷۵ ساله نیز در نظر گرفته شده است. همچنین شایان ذکر است مقادیر حداکثر شتاب محاسبه شده در این پژوهش برای سنگ بستر بوده و تعیین حداکثر شتاب در سطح زمین نیازمند انجام تحلیل‌های اضافی بررسی اثر ساختگاه و بزرگنمایی لرزه‌ای ناشی از لایه‌های آبرفتی می‌باشد، که می‌تواند مبنای تحقیقات آتی قرار گیرد.

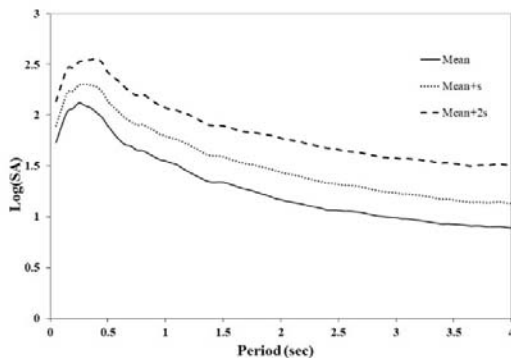
۴- طیف طرح یکنواخت شهر مشهد با استفاده از روابط کاهندگی

در بخش‌های قبل حداکثر شتاب سنگ بستر زمین محتمل برای منطقه مورد مطالعه، با دو روش تعیینی و احتمالاتی برای دوره بازگشت ۵۰ سال به ازای احتمال وقوع مختلف تعیین گردید. در این قسمت، به بررسی و ارزیابی طیف طرح شهر مشهد پرداخته می‌شود. محاسبه طیف طرح با روش‌های مختلف شامل مراحل محاسبه طیف پاسخ‌های مختلف، انجام تحلیل آماری و تعیین طیف طرح امکان‌پذیر بوده، که با استفاده از روش تعیینی استخراج شده است. در بخش قبل، حداکثر شتاب سنگ بستر زمین در منطقه مورد مطالعه با روش تعیینی ۱/۴۹g و همچنین با استفاده از روش احتمالاتی، مقادیر آن برای دوره بازگشت‌های مختلف در طول عمر مفید ۵۰ ساله و با احتمال ۲ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد به ترتیب

فرکانس‌های پایین، شتاب طیفی بستر از صفر شروع گردیده و در فرکانس‌های بالا به PRA می‌رسد. با توجه به اینکه برخی سازه‌های خاص را بایستی با استفاده از طیف میانگین + انحراف معیار طراحی نمود، بنابراین تغییرات شتاب طیفی را به ازای انحراف معیارهای مختلف، در شکل ۱۰ ترسیم و نشان داده شده است و می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تاثیر انحراف معیار در میانگین، شتاب طیفی طرح سنگ بستر منطقه نیز افزایش می‌یابد.

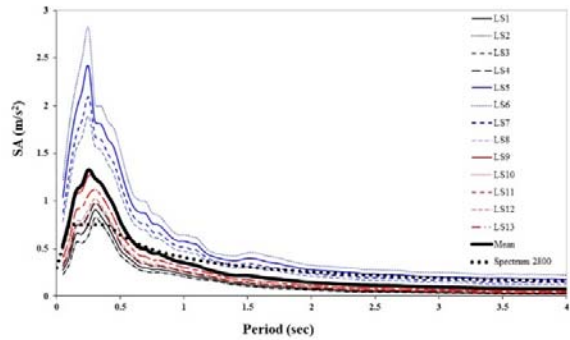


شکل ۹. شتاب طیفی طرح سنگ بستر منطقه به ازای تغییرات بزرگای محتمل متفاوت در حوزه فرکانس



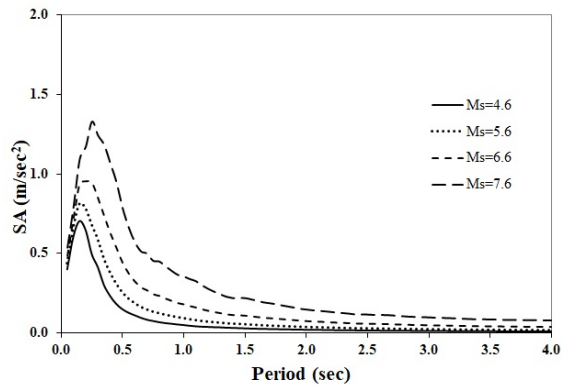
شکل ۱۰. شتاب طیفی طرح سنگ بستر منطقه به ازای تغییرات اثر انحراف معیار در میانگین

سرعت طیفی طرح نیز برای تمامی چشمه لرزه‌ای و میانگین آنها محاسبه و در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. همچنین تغییرات سرعت طیفی با تغییرات بزرگای زلزله محتمل منطقه در حوزه زمان و فرکانس مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، نشان می‌دهند که با افزایش بزرگای زلزله محتمل منطقه، مقادیر سرعت بیشتر شده و سرعت طیفی طرح نیز افزایش می‌یابد. در اینجا نیز می‌توان استنباط کرد که در سرعت طیفی در حوزه فرکانس، وقتی فرکانس صفر می‌باشد، مقدار آن برابر PGV بوده و در فرکانس‌های بالا به صفر می‌رسد.



شکل ۷. شتاب طیفی سنگ بستر برای چشمه های لرزه ای مختلف و میانگین آن در مقایسه با طیف استاندارد آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای منطقه مورد مطالعه

شتاب طیفی سنگ بستر منطقه به ازای تغییرات بزرگای محتمل متفاوت در حوزه زمان، مطابق شکل ۸، نشان می‌دهد که با افزایش بزرگای زلزله محتمل منطقه، حداکثر شتاب سنگ بستر نیز افزایش یافته و طیف طرح نیز افزایش می‌یابد. نتایج حداکثر شتاب افقی برای منطقه شهر مشهد به ازای بزرگای مختلف زلزله که از نتایج تحلیل شتاب طیفی استخراج گردیده، در جدول ۶ آورده شده است.



شکل ۸. شتاب طیفی منطقه به ازای تغییرات بزرگای محتمل متفاوت در حوزه زمان

جدول ۶. حداکثر شتاب افقی سنگ بستر برای منطقه مورد مطالعه به

ازای بزرگای مختلف زلزله با روش تحلیل طیفی	
بزرگای زلزله محتمل (M_s)	حداکثر شتاب زمین (PRA)
۴/۶	۰/۴۰g
۵/۶	۰/۴۴g
۶/۶	۰/۴۸g
۷/۶	۰/۵۴g

شکل ۹، تغییرات شتاب طیفی را در حوزه فرکانس به ازای بزرگاهای مختلف نشان می‌دهد و مطابق آن، نتیجه می‌گردد که در

۵- نتیجه گیری

در طول چند دهه گذشته با توجه به شرایط لرزه‌خیزی کشور ایران، تلاش‌های متعددی برای برآورد پارامترهای لرزه‌ای و بهبود ارزیابی خطر زلزله به ویژه در شمال‌شرق کشور صورت گرفته و در مجموع، این مطالعات به بهبود دستورالعمل‌های ایران برای طراحی مقاوم در برابر لرزه ساختمان‌ها، شریان‌های حیاتی و زیرساخت‌های حمل و نقل، با محاسبه حداکثر شتاب سنگ بستر و ترسیم نقشه خطرپذیری کمک کرده است. در این مقاله، به بررسی و تحلیل خطر لرزه‌ای و تهیه طیف خطر یکسان شهر مشهد با استفاده از روش احتمالاتی و تعیینی پرداخته شده است. بدین صورت که منحنی خطر لرزه‌ای شهر مشهد با در نظر گرفتن گسل‌های فعال منطقه بصورت چشمه خطی لرزه‌ای در شعاع ۲۰۰ کیلومتری و با استفاده از روابط کاهندگی متفاوت به کمک دو روش تعیینی و احتمالاتی بدست آمده و با یکدیگر مقایسه شده است. با ترکیب منابع لرزه‌زا و تاثیر آنها در لرزه‌خیزی منطقه، نتایج به شرح ذیل حاصل می‌گردد.

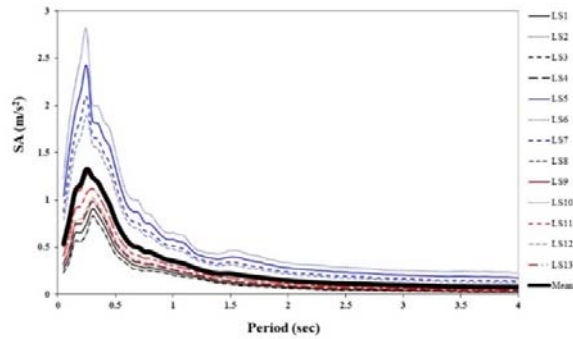
حداکثر شتاب افقی سنگ بستر در منطقه مورد مطالعه با روش تعیینی $1/49g$ محاسبه گردیده و همچنین با استفاده از روش احتمالاتی، مقادیر آن برای دوره بازگشت‌های مختلف در طول عمر مفید ۵۰ ساله با احتمال ۲ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد به ترتیب $0/61g$ ، $0/43g$ و $0/34g$ تعیین شده است. نتایج بدست آمده در این پژوهش در مقایسه با شتاب مبنای طرح مندرج در آیین‌نامه ۲۸۰۰، شتاب مبنای بزرگتری را برای شهر مشهد تخمین می‌زند. این مساله اهمیت و ضرورت تحلیل خطر لرزه‌ای برای مطالعه دقیق رفتار دینامیکی سازه‌های مختلف در سطح شهر مشهد را بیش از پیش مشخص می‌نماید.

نمودار شتاب طیفی طرح همواره در پریودهای پایین از حداکثر شتاب سنگ بستر (PRA) منطقه آغاز شده و در پریودهای بالا به صفر متمایل می‌گردد، در حقیقت، این موضوع بیانگر این نکته است که شتاب بدست آمده برای منطقه مورد مطالعه با روش‌های تحلیل خطر، منطقی و درست محاسبه گردیده است.

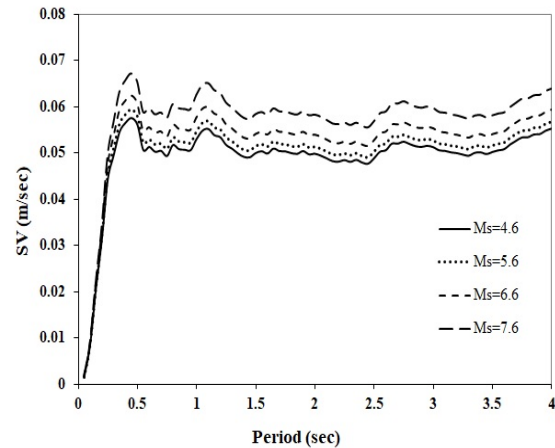
شتاب طیفی طرح منطقه به ازای تغییرات بزرگای محتمل متفاوت در حوزه زمان، نشان می‌دهد که با افزایش بزرگای زلزله محتمل منطقه، حداکثر شتاب زمین نیز افزایش یافته است و در فرکانس‌های پایین، شتاب طیفی از صفر شروع گردیده و در فرکانس‌های بالا به PRA می‌رسد. همچنین با توجه به اینکه برخی سازه‌های خاص را بایستی با استفاده از طیف میانگین + انحراف معیار طراحی نمود، بنابراین با بررسی تغییرات شتاب طیفی به ازای انحراف معیارهای مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تاثیر انحراف معیار در میانگین، شتاب طیفی طرح منطقه نیز افزایش می‌یابد.

با مقایسه تغییرات طیف طرح سرعت به ازای زلزله‌های محتمل با بزرگای مختلف در حوزه زمان و فرکانس، می‌توان بیان نمود که با افزایش بزرگای زلزله، مقادیر سرعت بیشتر شده و طیف طرح سرعت نیز افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی سرعت طیفی در حوزه فرکانس، استنباط می‌گردد که وقتی فرکانس صفر می‌باشد، سرعت طیفی برابر PGV بوده و در فرکانس‌های بالا به صفر می‌رسد، در حالی که سرعت طیفی در حوزه زمان، در پریودهای پایین از صفر شروع شده و در پریودهای بالا به PGV متمایل می‌گردد.

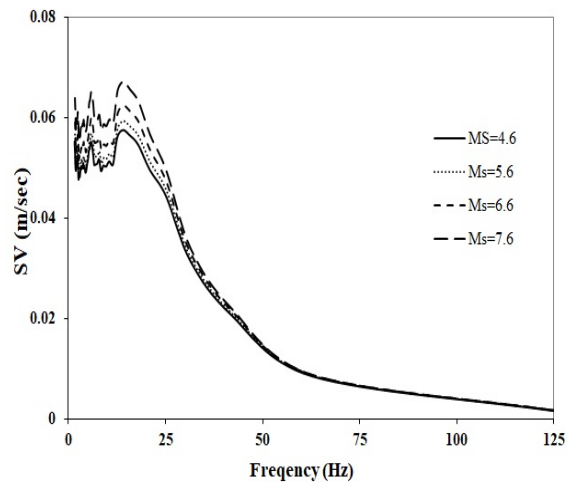
اما سرعت طیفی در حوزه زمان، در پریودهای پایین از صفر شروع شده و در پریودهای بالا به PGV می‌رسد.



شکل ۱۱. سرعت طیفی طرح برای چشمه‌های لرزه‌ای مختلف و میانگین آن برای منطقه مورد مطالعه



شکل ۱۲. سرعت طیفی طرح منطقه به ازای تغییرات بزرگای محتمل متفاوت در حوزه زمان



شکل ۱۳. سرعت طیفی طرح منطقه به ازای تغییرات بزرگای محتمل متفاوت در حوزه فرکانس

- Baker, J.W. (2008). An introduction to probabilistic seismic hazard analysis (PSHA). White Paper, Version 1.3.
- BHRC. (2014). Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (Standard No. 2800). *Ministry of Housing and Urban Development*, Tehran, Iran.
- Boore, D.M., and Atkinson, G.M. (2008). Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24(1):99-138.
- Iranian National Committee on Large Dams. (1994). The relationship between the magnitude of surface waves and body waves. *IRCOLD*, Iran.
- Keshavarz, A., and Mansoori Moghaddam, B. (2018). Probabilistic seismic hazard analysis and determination of uniform hazard spectrum of Bushehr province assuming linear source model. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol 5(1), Page 127-142. (In Persian)
- Khodaverdian, A., Zafarani, H., Rahimian, M., and Dehnamaki, V. (2016). Seismicity parameters and spatially smoothed seismicity model for Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(3).
- Khoshnevis, N., Taborda, R., Azizzadeh-Roodpish, S. and Cramer, C.H., (2017). Seismic hazard estimation of northern Iran using smoothed seismicity. *Journal of Seismology*, 21(4), pp.941-964.
- Kijko, A. (2004). Estimation of the maximum earthquake magnitude, m_{max} . *Pure and Applied Geophysics*, 161(8):1655-1681.
- Mirzai, N., Gheitani, M.R. Naserieh, S., Reisi, M., Zarifi, Z., and Tabaie, Gh. (2000). Basic parameters of Iranian earthquakes. *Geological Center of Tehran University*, Tehran, Iran.
- Moinfar, A.A., Naderzadeh, A., and Nabavi, M.H. (2012). New Iranian seismic hazard zoning map for new edition of seismic code and its comparison with neighbor countries. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, 24-28.
- Mousavi Befroie, H., Mirzaie, N., Shaabani, A., and Eskandari Ghadi, M. (2014). Earthquake risk microzonation in Iran and estimation of maximum acceleration values for provincial centers. *Journal of the Earth and Space Physics*, Vol. 40(4), 15-38. (In Persian)
- Papazachos, V., Papazachos, B., Papazachou, C. and Papazachou, K. (1997). The earthquakes of Greece. *Editions Ziti*, Greece.
- Razavian Amrei, S. A., Ghodrati Amiri, Gh., and Zeinali Rastabi, S. (2015). Seismic Risk Assessment of Shahrekord. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol 1(1), 19-26. (In Persian)
- Akkar, S. and Bommer, J.J. (2010). Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East. *Seismological Research Letter*, 81(2):195-206.
- Ansal, A.M., Iyisan, R., and Gullu, H. (2001). Microtremor measurements for the microzonation of dinar. *Pure and Applied Geophysics*, 158(12): 2525-2541.
- Campbell, K.W., and Bozorgnia, Y. (2008). 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), 139-171.
- Gardner, J. and Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363-1367.
- Gharshi, M., and Mahdavian, A. (2006). The report of seismic microzonation of Mashhad city, Vol. 1: Risk analysis. *Housing and Urban Development Organization*, Khorasan Razavi, Iran. (In Persian)
- Ghodrati Amiri, G., Motamed, R., and Es-Haghi, H.R. (2003). Seismic hazard assessment of metropolitan
- Ghodrati Amiri, Gh., Hessabi, R., and Khorasani, M. (2008). Attenuation Relationships of Spectral Ordinates and Arias Intensity for Iran. *Journal of Earthquake Engineering*, Manuscript ID: UEQE-2008-0832.
- Ghodrati Amiri, Gh., Razavian Amrei, S.A., and Tahmasbi Broujeni, M.A. (2015). Seismic Hazard Analysis and Uniform Hazard Spectra for Different Regions of Kerman. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol 2(2), 43-51. (In Persian)
- Green A. R. and Hall J.W., (1994). An Overview of Selected Seismic Hazard Analysis Methodologies. *Vol. 592 of Structural Research Series*, University of Illinois.
- Hafezi Moghadas, N. (2007). Introducing the North Mashhad fault, *Proceeding of the 25th Symposium of earth sciences*, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran. (In Persian)
- Hafezi Moghadas, N., Ghaemmaghamian M.R., and Ghazi, A. (2009). Evaluation of the effect of alluvial and ground classification in Mashhad City, according to spectra ratio of microtremor waves method, *Sedimentary Facies*, Vol. 1(1), 19-30. (In Persian)
- Hessami, K., Jamali, F., and Tabassi, H. (2003). Active Fault Maps of Iran. *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, Tehran, Iran.

- Ambraseys, N.N., and Melville, C.P. (1982). A history of Persian earthquakes. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom.
- Baker, J.W. (2008). An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), version 1.3.
- Berberian, M. (1995). Natural hazards and the first earthquake catalog of Iran: Volume 1: Historical hazards in Iran prior to 1900. *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, Tehran, Iran.
- Ghodrati Amiri, Gh., Khoshnevis, N., Razavian Amrei, S. (2013). Probabilistic assessment of earthquake damage and loss for the city of Tehran, Iran. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 1(2):10-23.
- Joudaki, M., Basereh, M., Farzipour, A., and Safaie, H. (2013). Investigation of seismic tectonic and earthquake risk analysis in the area of Doroud city. *Proceeding of 8th conference of the Iranian Association of Engineering Geology and the Environment*, Mashhad, Iran. (In Persian)
- Mardi, Z., and Ansari, A. (2012). Ranking of different attenuation relations using the earthquake of August 21, 2011 Ahar-Varzghan, *Research Bulletin of Seismology and Earthquake Engineering*, Vol 16(3), 11-20. (In Persian)
- Siyaho in South Khorasan province (Eastern Iran). *Journal of Tethys*, Vol, 4(3), pp.180-199. Tehran, Iran. *Journal of Earthquake Engineering*, 7(3), 347-372.
- Saffari, H., Kuwata, Y., Takada, S., and Mahdavian, A. (2012). Updated PGA, PGV, and spectral acceleration attenuation relations for Iran. *Earthquake spectra*, 28(1), 257-276.
- Shahvar, M.P., Zare, M., and Castellaro, S. (2013). A unified seismic catalog for the Iranian plateau (1900-2011). *Seismological Research Letter*, 84(2):233-249.
- Zare, M. (2012). Development of seismic hazard zoning map for Iran, based on new seismic source determination. *Proceeding of 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal September 24-28.
- Zare, M., Amini, H., Yazdi, P., Sesetyan, K., Demircioglu, M.B., Kalafat, D., Erdik, M., Giardini, D., Khan, M.A., and Tsereteli, N. (2014). Recent developments of the Middle East catalog. *Journal of Seismology*, 18(4).
- Zare, M., Ghafory-Ashtiany, M. and Bard, P.Y. (1999). Attenuation law for the Strong Motions in Iran. *Proceedings of the 3rd International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran, 345-354.
- [25] Hafezi Moghadas, N. (2009). The report of seismic microzonation of Mashhad city, Vol. 2: Engineering geology. *Housing and Urban Development Organization*, Khorasan Razavi, Iran. (In Persian)
- Ambraseys, N.N. (2009). Earthquakes in the Mediterranean and Middle East, a multidisciplinary study of seismicity up to 1900. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom.

Seismic Hazard Analysis and Preparation of Risk Spectrum in Mashhad for Design, Construction Urban and Suburban Infrastructures

Omid Tavasoli, Associate Professor, Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Adel Asakereh, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Semnan, Iran.

Navid Tavasoli, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: Omid.Tavasoli@iau.ac.ir

Received: June 2023- Accepted: November 2023

ABSTRACT

The experience of recent earthquakes and the damage caused by it in various types of structures including vital arteries and transportation infrastructure suggests that researchers are more concerned with investigating and revising the effective seismic parameters in different regions compared with the proposed acceleration of codes. In this research, the study of seismic risk analysis and design hazard spectrum in Mashhad city located in Khorasan Razavi province have been conducted using probabilistic and deterministic methods. Thus, the seismic hazard curve and the spectrum design have been calculated and compared in an area of 100 km² in 1 × 1 km² networks and considering the effective parameters on it, including determining the active faults as a linear seismic source and their effective length and distance, the maximum earthquake occurrence with applying of different attenuation relations. The obtained results indicate that the maximum ground acceleration in Mashhad city was determined 1.49g by the deterministic method and also its values for the return period of 50 years, including the probability of 2, 5, and 10 percent were respectively calculated and estimated 0.34g, 0.43g, and 0.61g by probabilistic method and the uniform risk spectrum was prepared using various methods by considering Ghodrati Amiri et al. attenuation relation.

Keywords: Seismic Hazard Analysis, Mashahad, Uniform Hazard Spectrum, Probabilistic Method, Deterministic Method