

چکیده

در این مقاله از روش سناریوی لرزه‌ای احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی^۱ برای تعیین تعداد حداقلی از سناریوهای مناسب که می‌تواند در تخمین خسارت منطقه‌ای شریان‌های حیاتی گستره شهر قم به کار گرفته شود، استفاده شده است. در روش سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی، به جای میلیون‌ها یا صدها هزار سناریو، مجموعه کوچکی از سناریوهای لرزه‌ای احتمالاتی جهت نشان دادن خطر لرزه‌ای و تحلیل زیرساخت‌های با توزیع مکانی نظیر شریان‌های حیاتی، تولید می‌شود. پس از تولید مجموعه کوچک سناریوهای لرزه‌ای از پایگاه داده‌های چنین رخدادهایی، احتمالات وقوع سالانه سازگار با خطر تخمین زده می‌شود. این احتمالات به گونه‌ای است که اثرات ترکیبی آنها روی منطقه مورد نظر همه رخداد‌های ممکن بر مبنای روابط باز رخداد مبتنی بر داده‌های زلزله‌شناسی و زمین‌شناسی را حفظ می‌کند. این روش تکرارپذیر و از نظر محاسباتی قابل مدیریت بوده و به سناریوهای زلزله قابل فهم منجر می‌شود. در نتیجه می‌توان سناریوهای مختلف خسارت را جهت تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری در خصوص شریان‌های حیاتی در نظر گرفت. معیارهای ارزیابی و نیز تطابق منحنی خطر اصلی و منحنی خطر سناریوهای کاهش‌یافته نشان می‌دهد که خطاهای سناریوهای تولید شده برای گستره شهر قم در محدوده مناسبی بوده و انحراف ناخواسته‌ای در نتایج وجود ندارد.

واژگان کلیدی: سناریوهای لرزه‌ای، بهینه‌سازی^۱، تحلیل خطر، شریان‌های حیاتی^۲.

ارائه سناریوهای لرزه‌ای احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی جهت تحلیل خسارت لرزه‌ای شریان‌های حیاتی شهر قم

سید محمدمهدی غفوری

دانشجوی دکتری مهندسی عمران سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم

حمید زعفرانی

دانشیار پژوهشکده زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

محمدرضا عدل‌پرور (نویسنده مسئول)

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، adlparvar@qom.ac.ir

۱- مقدمه

خسارت به یک شریان حیاتی برای همه سناریوهای زلزله ممکن محاسبه می‌شود [۳]؛ ۲- زمانی که می‌بایست تخمین خسارت چندین بار تکرار شود مانند زمانی که مزایای نسبی چندین گزینه کاهش‌دهنده‌ی خسارت ارزیابی می‌شود [۴].

در گذشته چندین محقق برای تحلیل خسارت منطقه‌ای از روش شبیه‌سازی مونت کارلوی متعارف مبتنی بر سناریو^۴ استفاده کرده‌اند (نظیر بازورو و لوکو [۵]، آبل و کافکا [۶]، ورنر و همکاران [۷])؛ این روش از نظر مفهومی ساده است و به دلیل آنکه مسیر خط زمانی را در طولانی‌مدت به صورت صریح حفظ می‌کند، اجازه می‌دهد تا تغییرات زمانی در دیگر پارامترهای مدل خسارت، نظیر قسمت‌های مختلف شریان حیاتی در معرض خطر، تلفیق شوند. به منظور شناسایی نیازهای محاسباتی، چانگ و

روش سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی، برای شرایطی که می‌بایست هم‌زمان هم همبستگی مکانی سناریوهای زلزله منحصر به فرد در نظر گرفته شود و هم نگرانی از نیازهای محاسباتی وجود دارد، ارائه می‌شود. حفظ سناریوهای زلزله منحصر به فرد می‌تواند از این نظر اهمیت داشته باشد که اولاً برای فهم کاربران آسان است و ثانیاً همبستگی مکانی حرکت زمین را در یک منطقه ثبت می‌کنند [۱-۲]. زمانی که خسارت برای یک سیستم زیرساخت با توزیع مکانی نظیر شریان‌های حیاتی تخمین زده می‌شود و یا زمانی که خسارت‌های منطقه‌ای محاسبه می‌شود، ثبت همبستگی مکانی مهم خواهد بود. در دو مورد نسبت به حجم محاسبات نگرانی وجود دارد: ۱- زمانی که تحلیل‌های فشرده محاسباتی پس از تحلیل خطر انجام می‌شود، برای مثال زمانی که

خطر طوفان استفاده می‌شود (لگ و همکاران [۱۳] و اپیواتاناکول و همکاران [۱۴]) اما برای اولین بار این روش توسط وزیری و همکاران [۱۱] برای خطر زلزله سازگار شده است.

این روش شامل انتخاب یک زیرمجموعه نسبتاً کوچک از همه سناریوهای زلزله ممکن و تعیین احتمالات وقوع سالانه آنها خواهد بود به طوری که هر کدام از مجموعه‌های کاهش یافته رخدادها، همه رخدادهایی که یک توزیع جغرافیایی و شدت حرکت زمین مشابه ایجاد می‌کنند را نشان می‌دهند؛ همچنین همراه با مجموعه کاهش یافته رخدادها، کل خطر لرزه‌ای منطقه‌ای نشان داده می‌شود.

وزیری و همکاران [۱۱] برای اولین بار از یک فرمولاسیون بهینه‌سازی محدود شده در تخمین احتمالات وقوع سازگار با خطر برای مجموعه کاهش یافته رخدادها، استفاده کردند. برخلاف ویرایش‌های دیگر روش سناریوهای احتمالاتی سازگار با خطر، فرمولاسیونی که وزیری و همکاران [۱۱] ارائه کرده‌اند، حداقل خطای ممکن خطر منطقه‌ای را میان حالتی که با استفاده از مجموعه کاهش یافته تخمین زده شود و حالتی که با استفاده از یک تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی^۸ کامل تخمین زده شود، تضمین می‌کند؛ به گونه‌ای که خطر منطقه‌ای تعیین شده در مجموعه کاهش یافته منطبق با خطر منطقه‌ای واقعی باشد (شکل ۱- الف). آنها همچنین فرمولاسیون مدل بهینه‌سازی را جهت به حداقل رساندن مجموع خطاها ارائه کردند. این روش امکان بهینه‌سازی در تخمین رخدادها را فراهم می‌کند به جای آنکه کاربر مجبور به شناسایی مجموعه کاهش یافته رخدادها گذشته بدون فهم کاملی از دلایل انتخاب از نظر دقت و محاسبه، باشد. این روش می‌تواند به طور صریح، مشخصه‌های معینی از احتمالات باز رخداد را مبتنی بر اطلاعات زلزله‌شناسی و زمین‌شناسی حفظ کند (شکل ۱- ب). این روش بزرگ و توزیع خطاها را طبقه‌بندی می‌کند به طوری که کاربر می‌تواند از تصمیمات پیرامون قضاوت میان صرفه‌جویی محاسباتی و ارائه خطا آگاهی یابد.

همکاران [۸]، کمپل و سلیگسون [۹]، لی و همکاران [۱۰] و وزیری و همکاران [۱۱]، روش‌هایی را برای توسعه سناریوهای احتمالاتی زلزله ارائه کرده‌اند. همچنین جایارام و بیکر [۱۲] و وزیری و همکاران [۱۱]، مفهومی را به منظور معرفی روش‌هایی برای توسعه نقشه‌های احتمالاتی حرکت زمین ارائه کرده‌اند. به منظور ارائه نتایج شفاف، از جمله سناریوی احتمالاتی (به صورتی که چانگ و همکاران [۸] ارائه کردند)، یعنی مجموعه‌ای از سناریوهای زلزله (ترکیب بزرگ-منبع)، همراه با احتمال وقوع سالانه سازگار با خطر مرتبط با آن، استفاده شده است. در هر مورد، احتمالات سازگار با خطر در هر نقشه خطر از ترکیب احتمالاتی مجموعه‌ای از سناریوهای زلزله (و یا نقشه‌های حرکت زمین^۹) که به طور کامل نقشه‌های خطر را نشان می‌دهد، به دست می‌آید.

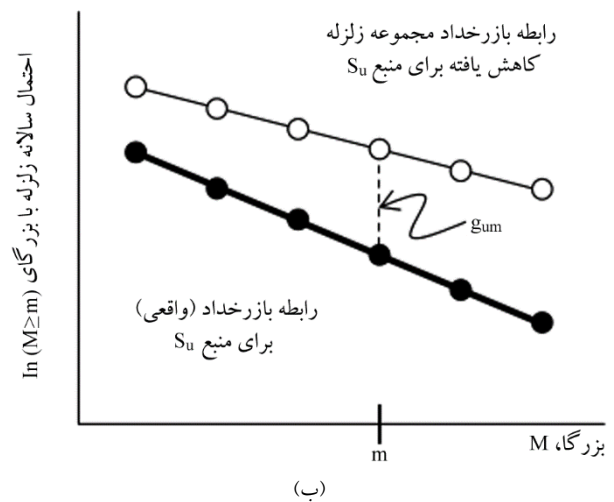
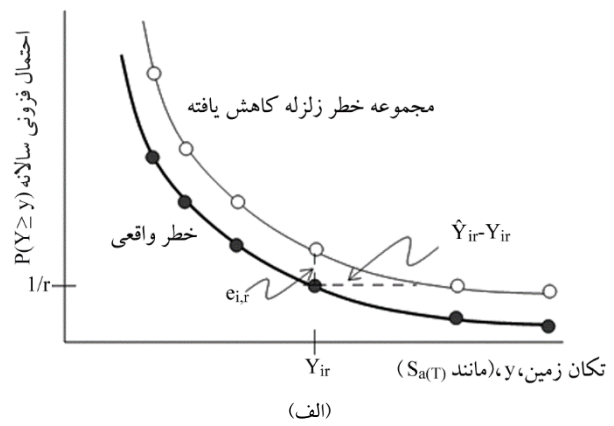
وزیری و همکاران [۱۱] در مطالعه خود سه روش موجود برای ارزیابی خطر زلزله جهت تخمین خسارت منطقه‌ای شامل: تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی^۶، شبیه‌سازی مونت کارلو و سناریوهای احتمالاتی سازگار با خطر^۷ را به همراه جزئیات و روش‌هایی انجام هر کدام از آنها تشریح کرده‌اند. آنها با مقایسه این روش‌ها نتیجه گرفته‌اند که: اولاً روش سناریوی احتمالاتی سازگار با خطر شامل مشارکت زلزله‌ها از همه منابع ناحیه‌ای می‌شود، ثانیاً این روش انسجام سناریوهای خاص را حفظ می‌کند ثالثاً نیازهای محاسباتی را به مقدار قابل توجهی در مقایسه با یک مجموعه کامل زلزله‌های تاریخی یا مصنوعی، کاهش می‌دهد. همچنین روش سناریوهای احتمالاتی سازگار با خطر قادر به ثبت همبستگی مکانی است که این توانایی باعث می‌شود روش سناریوی احتمالاتی سازگار با خطر بر روش مبتنی بر تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی که به اشتباه همبستگی کامل را فرض می‌کند و شبیه‌سازی مونت کارلو که برای ثبت همبستگی مکانی همه زلزله‌های ممکن را در نظر می‌گیرد، برتری داشته باشد.

روش سناریوهای احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی فرمولاسیون جدیدی برای روش سناریوی احتمالاتی سازگار با خطر می‌باشد. روش سناریوهای احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی در اصل برای

استفاده کنند. در ابتدا مجموعه‌ای از گسیختگی‌های زلزله (سناریوها) شبیه‌سازی می‌شود و هر کدام به وسیله منبع خود (گسل یا ناحیه)، بزرگا، نوع گسیختگی محتمل و دیگر ویژگی‌ها تعریف می‌شود. سپس برای هر کدام از سناریوهای زلزله، مجموعه‌ای از نقشه‌های حرکت زمین به دست می‌آید که در آن تحقق احتمالی حرکت زمین در سرتاسر منطقه شرح داده می‌شود. برای هر نقشه حرکت زمین، مجموعه‌ای از نقشه‌های خسارت^{۱۱} محاسبه شده که هر کدام تحقق احتمالی خسارت به همه بخش‌هایی از شریان حیاتی که در معرض آن هستند را فراهم می‌کند. در نهایت برای هر کدام از نقشه‌های خسارت، عملکرد سیستم شریان حیاتی به صورت تابعی از خسارت سیستم (وضعیت خسارت کل که به صورت مجموع خسارت برای هر کدام از سازه‌ها محاسبه می‌شود) تخمین زده می‌شود. پس از آن پایگاه داده‌های سطوح عملکردی^{۱۱} (وضعیت خسارت) و احتمال وقوع مرتبط با آنکه ریسک (وضعیت) شریان حیاتی را شرح می‌دهد، استخراج می‌شود.

تحلیل مبتنی بر سناریوی کامل (شبیه‌سازی مونت کارلو) که در هر گام به کل منطقه اعمال می‌شود، اجازه تلفیق همبستگی در هر گام مشروط بر دیگری را فراهم کرده و ترکیب خسارات تکان زمین با خطر، خسارات ثانویه را به وجود می‌آورد (بومر و همکاران [۱۶]). در هر گام تغییراتی مشروط بر مرحله قبل وجود دارد، بنابراین در هر شبیه‌سازی، هر گام می‌بایست چندین بار تکرار شود و در نتیجه نیاز محاسباتی در فرایند زیاد می‌شود. برای مثال، شبیه‌سازی تنها ۱۰ سناریوی زلزله، ۱۰ نقشه حرکت زمین برای هر سناریوی زلزله، ۱۰ نقشه خسارت برای هر نقشه حرکت زمین و ۱۰ تحلیل انتقال برای هر نقشه خسارت که منجر به ۱۰۰۰۰ تحلیل انتقال منطقه‌ای و محاسبات پیچیده می‌شود. محاسبات را می‌توان در هر گام با توسعه مجموعه‌ای از سناریوهای احتمالاتی نسبتاً کوچک برای هر گام نظیر مجموعه احتمالاتی ترکیبی که مجموعه‌ای کامل و تقریباً معادل با شبیه‌سازی‌های به‌دست آمده از یک شبیه‌سازی مونت کارلوی متعارف است، کاهش داد.

منظور و همکاران [۱۷]، روش سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی هان و داویدسون [۱۵] را با یک اصلاح قابل توجه تعمیم

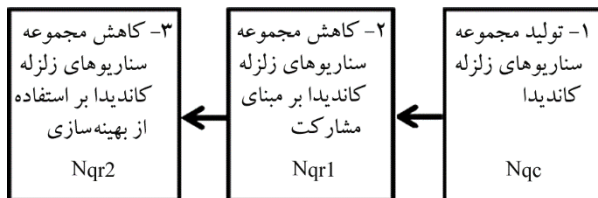


شکل (۱): شمایی از تعریف خطا میان (الف) منحنی‌های خطر مجموعه کاهش یافته و «واقعی» برای نقطه کنترلی \bar{a} و (ب) روابط بازرخداد مجموعه کاهش یافته و «واقعی» برای منبع S_{ii} (برگرفته از وزیر و همکاران [۱۱]).

هان و داویدسون [۱۵]، روش خود را برای تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی زیرساخت‌های با توزیع مکانی و توسعه مجموعه‌ای از نقشه‌های حرکت زمین همراه با احتمالات وقوع سالانه سازگار با خطر مرتبط ارائه کرد. روش هان و داویدسون [۱۵] دارای چهارچوبی مشخص، شامل یک روش گام به گام جهت تولید سناریوهای زلزله و نقشه‌های حرکت زمین بوده که هر گام دارای فرمولاسیون مشخصی می‌باشد. آنها همچنین معیارهای ارزیابی را جهت مقایسه خطاهای منحنی خطر^۹ (HCE) و خطاهای همبستگی مکانی، همراه با فرمولاسیون مربوط به هر کدام معرفی کردند.

اکثر تحلیل‌های خطر لرزه‌ای منطقه‌ای تلاش می‌کنند که از یک سناریوی مبتنی بر روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS)

احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی است، لذا تنها از سه گام اول روش پیشنهادی منظور و همکاران [۱۷] استفاده شده و از دو گام مربوط به ارائه نقشه‌های حرکت زمین صرف نظر می‌شود. این سه گام عبارت‌اند از: ۱- شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) با نمونه‌گیری اهمیت^۳ از بزرگ‌گامهای زلزله جهت تولید یک مجموعه سناریوهای احتمالاتی زلزله (که با منبع و بزرگ‌گام تعریف می‌شود)، ۲- کاهش اولیه در سناریوهای زلزله بر مبنای مشارکت آنها در منحنی خطر و ۳- روش سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی جهت کاهش اندازه مجموعه. سه گام اصلی این روش در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): گام‌های اصلی در روش بهبود یافته (سناریوهای احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی تعمیم یافته، برگرفته از منظور و همکاران [۱۷]).

کاربر در این روش به دنبال مجموعه‌ای از سناریوهاست که خطر نهایی به دست آمده تا حد امکان با منحنی خطر «واقعی» (یعنی مبتنی بر یک تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی یا شبیه‌سازی مونت کارلوی متعارف) و همبستگی مکانی «واقعی» (یعنی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلوی متعارف) سازگار باشد. این سازگاری در مجموعه‌ای از سایت‌های مشخص $i \in (1, \dots, I)$ و مجموعه‌ای از نقاط مشخص روی منحنی خطر با دوره‌های بازگشت متناظر $t \in (1, \dots, R)$ تعریف می‌شود. این روش همچنین خطاها را در منحنی خطر و نقاط تطابق همبستگی مکانی ارائه می‌دهد و از همان ورودی مورد نیاز برای تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی نظیر اطلاعات منبع همراه با مدل‌های باز رخداده، معادلات پیش‌بینی حرکت زمین و داده‌های خاک ساختگاه، استفاده می‌کند. علاوه بر این، این روش به منحنی خطر «واقعی» برای هر سایت i نیاز دارد.

در گام اول از روش نمونه‌گیری اهمیت بزرگ‌گام جهت تولید یک مجموعه کاندیدای سناریوهای زلزله، N_{qc} استفاده می‌شود که

دادند. آنها همان گام‌های ارائه شده در مطالعه هان و داویدسون [۱۵] را به کار گرفتند اما پیش از کاهش سناریوهای زلزله با بهینه‌سازی، یک کاهش اولیه در مجموعه سناریوهای زلزله بر مبنای مشارکت آنها در منحنی خطر «واقعی» ایجاد کردند. منظور و همکاران [۱۷] یک ابزار کاربردی با مقیاس کامل را برای تحلیل خطر در کرایست‌چرچ نیوزلند ارائه کردند؛ همچنین آنها یک تحلیل حساسیت برای پارامترهای کلیدی تعیین شده توسط کاربر انجام دادند و نتایج تخمین خسارت منطقه‌ای مبتنی بر تحلیل خطر انجام شده را با نتایج مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلوی متعارف مقایسه کردند. منظور و همکاران [۱۷] نشان دادند که می‌توان این روش بسیار خوب را برای یک شهر با لرزه‌خیزی فعال بالا به کار گرفت و اثر آن روی تخمین خسارت منطقه‌ای به دست آمده و روی پیامدهای ناشی از تصمیمات سیاسی در مقیاس منطقه‌ای بررسی نمود؛ این روش به سبب آنکه کامل‌ترین روش موجود برای ارائه سناریوهای لرزه‌ای می‌باشد، برای مطالعه شهر قم به کار گرفته شده است.

در این مقاله ابتدا روش گام به گام سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی تعمیم یافته^{۱۲} معرفی شده است. سپس ورودی‌های لازم برای اجرای روش شامل محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، نقاط کنترلی و انتخابی، چشمه‌های ناحیه‌ای که منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، مشخصات لرزه‌خیزی هر کدام از آنها و منحنی‌های خطر واقعی نقاط کنترلی و انتخابی معرفی می‌گردد؛ سپس سناریوهای احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی تعمیم یافته برای شهر قم ارائه شده است. در نهایت بر اساس معیار ارزیابی ارائه شده توسط هان و داویدسون [۱۵]، خطاهای منحنی خطر مورد بررسی قرار می‌گیرد تا این اطمینان حاصل شود که اولاً بزرگی خطاهای مناسب است و ثانیاً هیچ انحراف ناخواسته‌ای در نتایج وجود ندارد.

۲- روش سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی تعمیم یافته

روش سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی اولین بار توسط هان و داویدسون [۱۵] پیشنهاد شد و سپس توسط منظور و همکاران [۱۷] تعمیم یافت. روش پیشنهادی منظور و همکاران [۱۷] دارای پنج گام اصلی می‌باشد اما از آنجایی که هدف این مطالعه تنها ارائه سناریوهای

در مجموعه کاهش یافته محاسبه می‌کند به طوری که خطر منطقه‌ای محاسبه شده با سناریوهای زلزله در مجموعه کاهش یافته بر خطر منطقه‌ای «واقعی» تا حد امکان منطبق شود.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R w_{ir} (e_{ir}^+ + e_{ir}^-) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J \{P_j * P(y_{ij} \geq Y_{ir})\} - e_{ir}^+ + e_{ir}^- = \frac{1}{r} \quad \forall i, r \quad (3)$$

$$P_j \leq z_j \quad \forall j \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J z_j \leq J^{\text{red}} \quad (5)$$

$$z_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \quad (6)$$

$$e_{ir}^+, e_{ir}^- \geq 0 \quad \forall i, r \quad (7)$$

$$0 \leq P_j \leq 1 \quad \forall j \quad (8)$$

هدف معادله (۲) آن است که مجموع وزنی خطاها در همه سایت‌های i و دوره‌های بازگشت r ، میان نقاط روی منحنی خطر «واقعی» و نقاط متناظر روی منحنی‌های خطر توسعه داده شده با مجموعه کاهش یافته زلزله‌ها و احتمالات وقوع سالانه سازگار با خطر به حداقل برسد که در آن e_{ir}^+ و e_{ir}^- به ترتیب خطاهای به‌دست آمده از تخمین دست بالا و تخمین دست پایین منحنی خطر «واقعی» در دوره بازگشت r در سایت i بوده و $w_{ir} \geq 0$ وزن‌های تعیین شده توسط کاربر هستند. در مطالعه منظور و همکاران [۱۷] همه وزن‌ها برابر $w_{ir} = r$ بوده که تعیین وزن مساوی برای هر خطا به صورت در صدی از احتمال فزونی واقعی سازگار با آن $(1/r)$ می‌باشد یعنی $\frac{e_{ir}^+}{(1/r)} = r e_{ir}^+$ و در مطالعه شهر قم نیز از همین روش پیروی می‌شود. معادله (۳) عبارت خطا را برای هر ترکیب سایت- دوره بازگشت تعریف می‌کند که به صورت اختلاف میان احتمال فزونی سالانه «واقعی»، $1/r$ و احتمال فزونی سالانه تعیین شده با استفاده از مجموعه زلزله‌های کاهش یافته می‌باشد که در آن P_j احتمال وقوع سالانه سازگار با خطر برای هر سناریوی زلزله، J ، بوده و با بهینه‌سازی به دست می‌آید. همچنین z_j ، به صورت یک متغیر باینری تعریف

هر کدام با احتمال وقوع سالانه مرتبط همراه است (شکل ۲). همان‌طور که جایارام و بیکر [۱۲] بیان کردند، برای هر منبع زلزله، محدوده بزرگ‌تر تابع چگالی، $dF(M)$ به A دسته تقسیم می‌شود و یک سناریوی زلزله از هر دسته تولید شده و وزن نمونه‌گیری اهمیت برای بزرگ‌ای انتخابی M ، از بخش M_a تا M_{a+1} برابر با احتمال وقوع سالانه سازگار با خطر برای سناریو می‌باشد:

$$\int_{M_a}^{M_{a+1}} dF(M) / \left(\frac{1}{A}\right)$$

در گام دوم، کاهش اولیه در مجموعه کاندیدای سناریوهای زلزله با محاسبه متوسط مشارکت هر سناریوی زلزله در تطابق با منحنی‌های خطر «واقعی» انجام می‌شود (معادله ۱) و تنها N_{qr1} با بالاترین مشارکت (یعنی آنهایی که ۹۹ درصد مشارکت دارند) انتخاب می‌شوند (شکل ۲). مشارکت C_j سناریوی زلزله j به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_j = \frac{1}{I * R} \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \left[\frac{P_j * P(y_{ij} \geq Y_{ir})}{\sum_{j=1}^J P_j * P(y_{ij} \geq Y_{ir})} \right] \quad (1)$$

استفاده از گام دوم زمانی که حل کننده استفاده شده برای حل بهینه‌سازی در گام سوم قادر به خاتمه با فاصله بهینه نسبتاً کوچک و با استفاده از N_{qc} سناریوهای زلزله کاندیدا از گام اول نیست، ضروری است. از آنجایی که درصد کوچکی از سناریوهای زلزله، معمولاً بیشترین مشارکت در منحنی‌های خطر را دارند، حذف سناریوها با کمترین مشارکت در منحنی خطر از مجموعه کاندیدا در این گام، هیچ اثر منفی ندارد. از این گذشته اجرای این گام سریع بوده و احتمالات مورد نیاز $P_j * P(y_{ij} \geq Y_{ir})$ ، در هر حال می‌بایست برای گام سوم محاسبه شود.

در گام سوم، مجموعه سناریوهای احتمالاتی زلزله بار دیگر با استفاده از روش سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی^{۱۴} (OPS) کاهش می‌یابد. در مدل بهینه‌سازی خطی عدد مختلط - عدد صحیح (معادلات ۲ تا ۸) الف- مجموعه کاهش یافته N_{qr2} سناریوهای زلزله را از مجموعه کاندیدای کاهش یافته که پیش از این در گام ۲ توسعه داده شده، انتخاب می‌کند، ب- احتمالات وقوع سالانه سازگار با خطر جدید، P_j را برای هر سناریوی زلزله

$$HCE = (Y_{i,r} - \bar{Y}_{i,r})/Y_{i,r} \quad (9)$$

$$MHCE = \frac{1}{IR} \sum_r^R \sum_i^I |HCE| \quad (10)$$

۴- ارائه سناریوهای احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی تعمیم یافته برای شهر قم

در این بخش سناریوهای احتمالاتی حداقلی جهت تحلیل خسارت شریان‌های حیاتی شهر قم ارائه می‌گردد. روش به کار گرفته شده در این بخش همان روش سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی تعمیم یافته [۱۷] است که در بخش قبلی جزئیات آن ارائه گردید. به منظور اجرای این روش از نرم افزار متلب ویرایش ۲۰۱۷، زبان برنامه نویسی پایتون ویرایش ۶، ۷، ۲ و حل کننده PULP_CBC_CMD استفاده شده است. از زبان برنامه نویسی پایتون برای ساخت و فراخوانی مدل بهینه سازی در گام دوم استفاده می‌شود.

۴-۱- ورودی‌ها

منطقه مورد مطالعه مربعی شکل و با ابعاد ۲۵ کیلومتر می‌باشد که جنوب غربی آن به ورزشگاه یادگار امام، جنوب شرقی آن به شهر کهک، شمال غربی آن به روستای علی آباد و شمال شرقی آن به روستای قمرود محدود می‌شود. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در محدوده طول‌های ۵۰/۷۴۹ تا ۵۱/۰۲۲ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۴/۵۱۷ تا ۳۴/۷۴۳ شمالی واقع شده است. شهر قم حدوداً در میانه این منطقه واقع شده است. علت انتخاب این محدوده به دلیل آن است که اولاً تحلیل خطر برای کل شهر قم به اضافه شهرک‌های حاشیه‌ای اطراف آن انجام شود و ثانیاً شهر قم در مرز محدوده واقع نشده و خطاهای مرزی احتمالی، محاسبات را تحت تأثیر قرار ندهد.

برای تولید سناریوهای احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی ۹ نقطه کنترلی انتخاب شده است. این نقاط بر روی مرز و دقیقاً میانه محدوده و با فواصل برابر ۱۲/۵ کیلومتر از هم قرار گرفته‌اند. به منظور بررسی دقت محاسبات، علاوه بر نقاط کنترلی، ۱۶ نقطه

می‌شود که نشان می‌دهد آیا سناریوی زلزله زدر مجموعه کاهش یافته رخدادها وجود دارد یا خیر و نیز معادلات (۴) تا (۸)، تعداد زلزله‌های مجاز در مجموعه کاهش یافته زلزله‌ها را به تعداد تعیین شده توسط کاربر، J^{red} (مشابه $N_{\text{qr}2}$) محدود می‌کند. اگر $P_j > 0$ باشد، زلزله زدر مجموعه کاهش یافته سناریوهای زلزله وجود دارد و مقدار P_j که خروجی بهینه‌سازی می‌باشد، احتمال سالانه جدید آن سناریو بوده و جایگزین احتمال تعریف شده در گام اول می‌شود. این مدل همچنین خطاهای منحنی خطر، $e_{i,r}^+$ و $e_{i,r}^-$ را برای هر سایت i و دوره بازگشت r ارائه می‌دهد.

۳- معیار ارزیابی در روش سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی تعمیم یافته

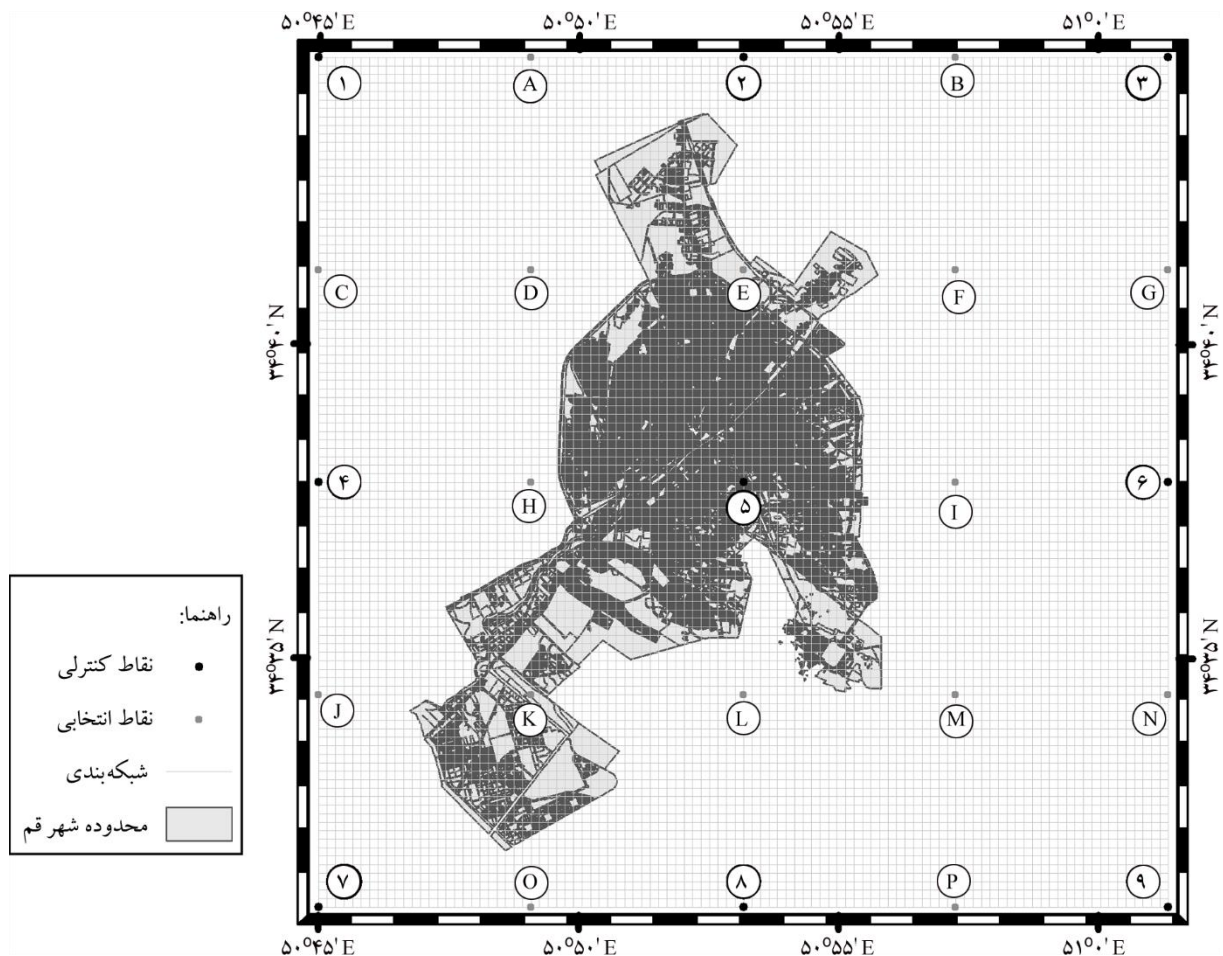
در روش سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی تعمیم یافته به منظور مقایسه، روی خطاهای منحنی خطر (HCE) تمرکز شده و روش‌های آن معرفی می‌شوند. در این روش از مجموعه سناریوهای زلزله کاهش یافته جهت توسعه یک منحنی خطر جدید برای سایت i با محاسبه احتمال فزونی سالانه هر مقدار حرکت زمین، y ، در محدوده مورد نظر $\sum_{j \in \text{reduced set}} P_j P(y_{ij} \geq y)$ استفاده می‌شود؛ سپس با استفاده از درون‌یابی منحنی خطر، مقدار شدت حرکت زمین مجموعه کاهش یافته برای دوره بازگشت r ، $\bar{Y}_{i,r}$ تعیین شده و با حرکت زمین «واقعی»، $Y_{i,r}$ ، برای سایت i و دوره بازگشت r مقایسه می‌شود. برای سناریوها مقدار $P(y_{ij} \geq y)$ ، با انتگرال‌گیری روی معادلات پیش‌بینی حرکت زمین محاسبه می‌شود؛ خطاهای منحنی خطر به صورت درصد خطا در منحنی خطر، برحسب PGA که درصدی از مقدار «واقعی» است (معادله ۱۰) تعریف می‌شود. این مقدار فاصله افقی منحنی خطر مجموعه کاهش یافته تا منحنی خطر «واقعی» برای سایت i و دوره بازگشت r می‌باشد (شکل ۱-الف) و به وسیله حرکت زمین در سایت i با دوره بازگشت r تقسیم می‌شود. یک معیار نتیجه‌گیری تطابق با منحنی خطر کلی است که بدین منظور برای همه سایت‌ها و دوره‌های بازگشت از مقادیر مطلق خطای منحنی خطر متوسط‌گیری می‌شود (معادله ۱۱).

سال ۱۴۹۵ میلادی با بزرگای ۵/۹ می باشد. تعداد کمی از رخدادهای دستگاهی کوچک در اطراف قم مشاهده می‌شود. لرزه‌خیزی دستگاهی، حداقل ۱۴ زلزله را در شعاع ۱۰۰ کیلومتری قم و با بزرگای کمتر از ۶ نشان می‌دهد [۱۸].

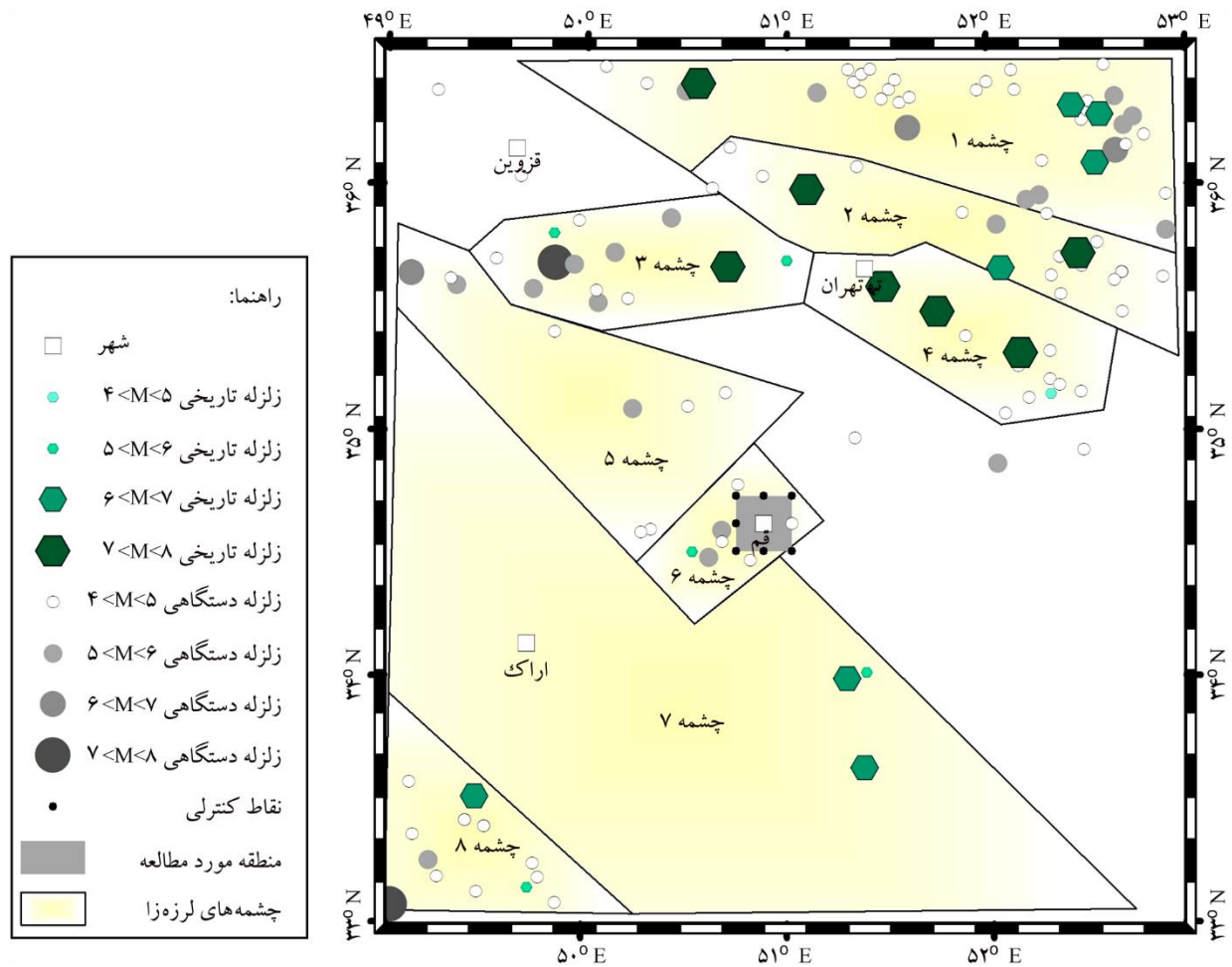
وجود گسل‌های پنهان در منطقه که شناخته شده نیستند و فعالیت‌های لرزه‌ای به آنها نسبت داده نشده، قابل انکار نیست. به خصوص برای ناحیه ایران مرکزی، لرزه‌خیزی جهت انجام تحلیل خطر پواسونی به صورت چشمه‌های ناحیه‌ای در نظر گرفته می‌شود [۱۸]. کمالیان و همکاران [۱۸] در مطالعه‌ای چشمه‌های ناحیه‌ای که شهر قم و نواحی اطراف را تحت تأثیر قرار می‌دهد را به همراه لرزه‌خیزی هر کدام از آنها مشخص کردند. چشمه‌های ناحیه‌ای بر مبنای مطالعات لرزه‌شناسی و زمین‌شناسی مشخص شده‌اند که در شکل (۴) نشان داده شده است. چشمه‌های ناحیه‌ای

دیگر نیز انتخاب شده‌اند به صورتی که مجموعه ۲۵ نقطه (۱۶ نقطه انتخابی به اضافه ۹ نقطه کنترلی) فاصله برابر ۶/۲۵ کیلومتر دارند. با انجام تحلیل لرزه‌ای احتمالاتی، منحنی‌های خطر برای نقاط کنترلی و انتخابی استخراج شده که از آنها در تعیین سناریوهای لرزه‌ای احتمالاتی استفاده می‌شود. در شکل (۳) منطقه مورد مطالعه و شبکه‌بندی انجام شده، محدوده شهر قم و نقاط کنترلی و انتخابی نشان داده شده است.

شهر قم در موقعیت تکتونیک لرزه‌ای ایران مرکزی قرار گرفته است. ایران مرکزی منطقه‌ای با لرزه‌خیزی خطی نیست بلکه فعالیت لرزه‌ای در این منطقه با زلزله‌های بزرگ، دوره بازگشت طولانی و شکاف‌های لرزه‌ای در چندین گسل کواترنری مشخص می‌شود. شوک‌های تکتونیک در ایران مرکزی به طور کلی کم عمق و معمولاً سطحی هستند. تنها زلزله تاریخی در نزدیکی قم، زلزله



شکل (۳): منطقه مورد مطالعه و محدوده شهر قم در این منطقه، نقاط کنترلی ۱ تا ۹ و نقاط انتخابی A تا P.



شکل (۴): لرزه‌خیزی شهر قم (برگرفته از مطالعه کامالیان و همکاران [۱۸]).

جدول (۱): مشخصات لرزه‌خیزی منابع زمینه در نظر گرفته شده برای منطقه مورد مطالعه بر اساس مطالعه کامالیان و همکاران [۱۸].

| چشمه | M_{min} | M_{max} | λ_{min} | a | B |
|------|-----------|-----------|-----------------|------|------|
| ۱ | ۴/۵ | ۷/۹ | ۰/۵۴ | ۲/۹۴ | ۰/۷۱ |
| ۲ | ۴/۵ | ۷/۸ | ۰/۵۲ | ۲/۸۴ | ۰/۶۹ |
| ۳ | ۴/۵ | ۷/۷ | ۰/۰۵۸ | ۱/۵۰ | ۰/۶۱ |
| ۴ | ۴/۵ | ۷/۴ | ۰/۰۵۹ | ۱/۱۶ | ۰/۵۳ |
| ۵ | ۴/۵ | ۶/۸ | ۰/۰۷ | ۱/۹۳ | ۰/۶۹ |
| ۶ | ۴/۵ | ۶/۵ | ۰/۰۶ | ۲/۰۶ | ۰/۷۳ |
| ۷ | ۴/۵ | ۷/۱ | ۰/۱۲ | ۱/۹۷ | ۰/۶۴ |
| ۸ | ۴/۵ | ۷/۶ | ۰/۵۹ | ۴/۱۳ | ۰/۹۷ |

استفاده شده در این مطالعه دقیقاً همان چشمه‌های استفاده شده در مطالعه کامالیان و همکاران [۱۸] می‌باشد.

برای هر چشمه ناحیه‌ای، پارامترهای لرزه‌خیزی بعد از حذف پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها از کاتالوگ محاسبه شده‌اند. کامالیان و همکاران [۱۸] یک حداکثر یا مرز بالایی زلزله برای هر چشمه ناحیه‌ای انتخاب کردند که نشان‌دهنده‌ی حداکثر رخداد در نظر گرفته‌شده می‌باشد. آنها مقدار حداقل بزرگای $M_{min}=4.5$ را برای همه منابع ناحیه‌ای در نظر گرفتند. مقادیر a و b، بزرگای حداکثر و میانگین سالانه رویداد به‌ازای بزرگای حداقل در جدول (۱) ارائه شده است. عمق زلزله‌ها ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده که بر مبنای عمق زلزله‌های قوی تا بزرگ در ایران می‌باشد.

جدول (۲): مقادیر حداکثر شتاب زمین محاسبه شده با استفاده از مدل پواسونی به‌ازای دوره بازگشت ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰ سال برای نقاط کنترلی ۱ تا ۹ و نقاط انتخابی A تا P.

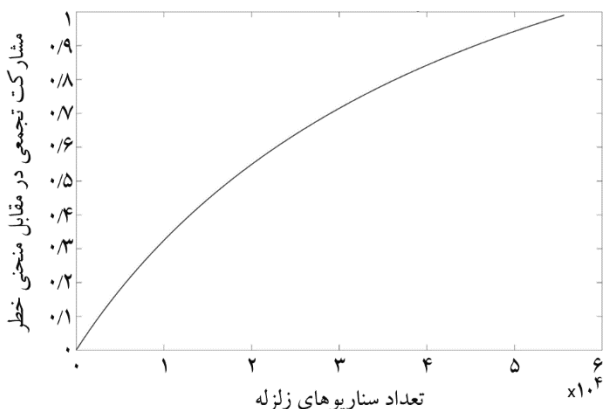
| PGA(g) | | | | نقاط |
|-------------------|------|------|------|------|
| دوره بازگشت (سال) | | | | |
| ۲۵۰۰ | ۱۰۰۰ | ۵۰۰ | ۲۵۰ | |
| ۰/۴۳ | ۰/۳۰ | ۰/۲۲ | ۰/۱۵ | ۱ |
| ۰/۴۴ | ۰/۳۱ | ۰/۲۳ | ۰/۱۶ | A |
| ۰/۴۴ | ۰/۳۱ | ۰/۲۳ | ۰/۱۶ | ۲ |
| ۰/۴۱ | ۰/۲۸ | ۰/۲۱ | ۰/۱۴ | B |
| ۰/۳۳ | ۰/۲۳ | ۰/۱۷ | ۰/۱۱ | ۳ |
| ۰/۴۶ | ۰/۳۲ | ۰/۲۴ | ۰/۱۶ | C |
| ۰/۴۸ | ۰/۳۴ | ۰/۲۵ | ۰/۱۷ | D |
| ۰/۴۶ | ۰/۳۲ | ۰/۲۴ | ۰/۱۶ | E |
| ۰/۴۲ | ۰/۳۰ | ۰/۲۲ | ۰/۱۵ | F |
| ۰/۳۶ | ۰/۲۵ | ۰/۱۸ | ۰/۱۲ | G |
| ۰/۴۶ | ۰/۳۳ | ۰/۲۴ | ۰/۱۷ | ۴ |
| ۰/۴۷ | ۰/۳۳ | ۰/۲۴ | ۰/۱۷ | H |
| ۰/۴۶ | ۰/۳۲ | ۰/۲۴ | ۰/۱۶ | ۵ |
| ۰/۴۱ | ۰/۲۹ | ۰/۲۱ | ۰/۱۴ | I |
| ۰/۳۴ | ۰/۲۴ | ۰/۱۷ | ۰/۱۲ | ۶ |
| ۰/۴۸ | ۰/۳۴ | ۰/۲۵ | ۰/۱۸ | J |
| ۰/۴۴ | ۰/۳۱ | ۰/۲۳ | ۰/۱۶ | K |
| ۰/۴۲ | ۰/۲۹ | ۰/۲۱ | ۰/۱۵ | L |
| ۰/۳۷ | ۰/۲۶ | ۰/۱۹ | ۰/۱۳ | M |
| ۰/۲۸ | ۰/۲۰ | ۰/۱۴ | ۰/۱۰ | N |
| ۰/۴۶ | ۰/۳۳ | ۰/۲۴ | ۰/۱۷ | ۷ |
| ۰/۴۲ | ۰/۳۰ | ۰/۲۲ | ۰/۱۵ | O |
| ۰/۳۶ | ۰/۲۵ | ۰/۱۸ | ۰/۱۳ | ۸ |
| ۰/۳۰ | ۰/۲۱ | ۰/۱۵ | ۰/۱۱ | P |
| ۰/۲۳ | ۰/۱۶ | ۰/۱۲ | ۰/۰۹ | ۹ |

به دلیل آنکه رابطه کاهندگی اکار و بومر [۱۹] برای داده‌هایی از همه دنیا استخراج شده است، لذا، از این رابطه برای منطقه مورد مطالعه جهت محاسبات تحلیل خطر استفاده شد. این روابط به‌صورت جدول‌های ورودی در نرم‌افزار کرایسیس ۱۵۲۰۱۵ درآمده است. داده‌های لرزه‌خیزی معرفی شده در جدول (۱) برای هر چشمه لرزه‌زا به نرم‌افزار کرایسیس معرفی می‌شود. تحلیل خطر مربوط به نقاط کنترلی و انتخابی با نرم‌افزار کرایسیس انجام شد و منحنی خطر احتمال فزونی در ۵۰ سال برای هر کدام از نقاط استخراج شده است. در جدول (۲)، مقادیر حداکثر شتاب به‌ازای دوره‌های بازگشت ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰ سال که دوره‌های بازگشت مناسب برای تولید سناریوهای لرزه‌ای احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی می‌باشد، برای ۲۵ نقطه کنترلی و انتخابی ارائه شده است. نتایج حداکثر شتاب زمین واقعی برای ۲۵ نقطه کنترلی و انتخابی در جدول (۲) نشان می‌دهد که به دلیل نزدیک بودن نقاط نتایج حداکثر شتاب زمین در همه دوره‌های تناوب میان نقاط کنترلی و انتخابی بسیار به هم نزدیک است. از طرف دیگر از آنجایی که هدف بهینه‌سازی به حداقل رساندن مجموع خطاهای میان خطر واقعی و مجموعه کاهش یافته در همه نقاط کنترلی و دوره‌های بازگشت می‌باشد، لذا افزایش تعداد نقاط کنترلی منجر به محاسبات پیچیده و بزرگ شده که با اهداف روش سناریوهای احتمالاتی سازگار با خطر در تضاد است؛ از این رو انتخاب ۹ نقطه کنترلی به‌عنوان نماینده ۲۵ نقطه برای ارائه سناریوهای احتمالاتی شهر قم، مناسب می‌باشد.

۴-۲- نتایج

در گام اول شبیه‌سازی مجموعه سناریوهای زلزله برای یک میلیون سال و با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلوی متعارف انجام می‌شود. خروجی این گام ماتریس بزرگای (M) است که از ۱۶۰۹۰۸۷ سناریوی شبیه‌سازی شده تشکیل شده است. نمودار مشارکت تجمعی در منحنی خطر در مقابل تعداد زلزله‌های تولید شده با شبیه‌سازی مونت کارلو متعارف در شکل (۵) نشان داده شده است.

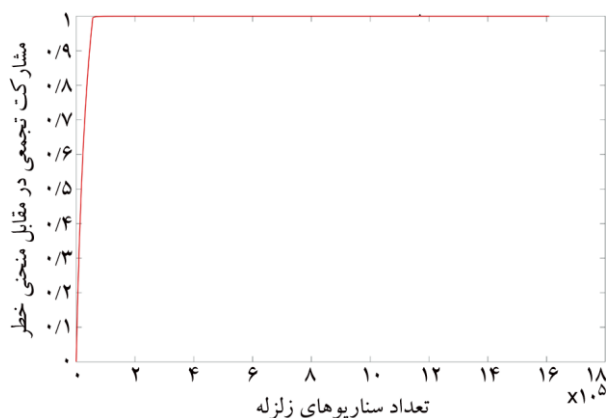
می باشد که ساختاری مشابه ماتریس P داشته و احتمالات فزونی متناظر با ۵۵۶۴۵ سناریوی مجموعه کاهش یافته RedM1 را ارائه می دهد.



شکل (۶): مشارکت تجمعی در مقابل تعداد زلزله برای سناریوهای زلزله کاهش یافته بر مبنای مشارکت آنها در منحنی خطر.

در گام سوم، ماتریس RedM1 و RedP1 وارد محیط برنامه نویسی پایتون شده و با استفاده از حل کننده PULP_CBC_CMD، ماتریس کاهش یافته RedM2 که سناریوهای احتمالاتی زلزله مبتنی بر بهینه سازی بوده و ماتریس کاهش یافته RedP2 که احتمال های فزونی متناظر با هر کدام از سناریوهای زلزله مبتنی بر بهینه سازی است، استخراج می گردد. در جدول (۳) سناریوهای لرزه ای احتمالاتی مبتنی بر بهینه سازی برای شهر قم ارائه شده است.

همان طور که در ابتدا هم عنوان شد، مجموعه سناریوهای زلزله اولیه (M) برای ۱ میلیون سال و با استفاده از شبیه سازی مونت کارلوی متعارف به دست آمد. در جدول (۳) اولین ستون سال وقوع زلزله را در مجموعه سناریوهای شبیه سازی شده اولیه (M) نشان می دهد. ستون دوم شماره منبع تولید کننده آن سناریو بوده که در اینجا همه از منبع شماره ۶ (منبعی که دقیقاً زیر منطقه



شکل (۵): مشارکت تجمعی در مقابل تعداد زلزله برای سناریوهای زلزله تولید شده با شبیه سازی مونت کارلوی متعارف.

در گام دوم ابتدا در ماتریس Event، میانگین و باقیمانده های حرکت زمین برای هر سناریوی زلزله محاسبه می شود. سپس در ماتریس P، احتمال فزونی برای هر سناریوی زلزله ز، محاسبه می گردد. احتمالات مقداری بین صفر و یک داشته و از تابع توزیع تجمعی (CDF) ^{۱۶} متلب برای انتگرال گیری عددی روی تابع توزیع شدت حرکت زمین در سایت i و زلزله z و با فرض توزیع نرمال، استفاده می شود. در نهایت در گام دوم ماتریس های M و P بر مبنای مشارکت آنها در منحنی خطر «واقعی» کاهش می یابد. ماتریس RedM1، مجموعه کاهش یافته سناریوهای زلزله می باشد که ساختاری مشابه ماتریس M داشته و ۱۶۰۹۰۸۷ سناریو را به ۵۵۶۴۵ سناریو بر مبنای مشارکت آنها در منحنی خطر «واقعی» کاهش می دهد. نمودار مشارکت تجمعی در منحنی خطر در مقابل تعداد زلزله های کاهش یافته بر مبنای مشارکت آنها در منحنی خطر، در شکل (۶) نشان داده شده است. همچنین ماتریس RedP1 مجموعه کاهش یافته احتمالات فزونی

جدول (۳): سناریوهای لرزه ای احتمالاتی مبتنی بر بهینه سازی برای شهر قم.

| سال | شماره منبع | بزرگا | نوع چشمه | احتمال وقوع سالانه | درصد مشارکت در منحنی خطر | درصد مشارکت تجمعی در منحنی خطر |
|--------|------------|-------|----------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| ۱۴۴۸۰۷ | ۶ | ۶/۰ | ۰ | $1/521 \times 10^{-3}$ | $3/561 \times 10^{-5}$ | ۰/۰۹۶ |
| ۵۳۵۸۴۳ | ۶ | ۵/۵ | ۰ | $1/127 \times 10^{-1}$ | $2/804 \times 10^{-5}$ | ۰/۲۸۰ |
| ۷۱۹۳۴۶ | ۶ | ۴/۷ | ۰ | $3/871 \times 10^{-4}$ | $1/055 \times 10^{-5}$ | ۰/۸۷۱ |

در سناریوهای ارائه شده، ۸۱ درصد خطاهای منحنی خطر در محدوده $\pm 10\%$ درصد و ۹۱ درصد در محدوده $\pm 30\%$ درصد است؛ همچنین متوسط خطاهای منحنی خطر (MHCE) برابر $7/34$ درصد است که حدود ۸۰ درصد (۷۸ درصد یا هفت‌نهم) سایت‌ها متوسط خطایی (HCEir) کمتر از مقدار متوسط خطاهای منحنی خطر (MHCE) دارند.

راه دیگری برای به دست آوردن درک مستقیم از اندازه خطاهای منحنی خطر ارائه شده، مقایسه منحنی خطر مجموعه کاهش یافته و «واقعی» در سایت‌های مورد نظر است. شکل (۸) مقایسه‌ای از منحنی خطر (حداکثر شتاب زمین) مجموعه کاهش یافته و «واقعی» در همه ۹ نقطه کنترلی در نظر گرفته شده در این مطالعه را نشان می‌دهد که منحنی‌های خطر برای احتمال فزونی در ۵۰ به دست آمده‌اند. نقاط توپر در شکل (۸)، متناظر با چهار دوره بازگشت استفاده شده در اجرای بهینه سازی بوده که نقاط تطابق نامیده می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۸-هـ) مشاهده می‌شود، مقدار حداکثر شتاب زمین در نقطه کنترلی شماره ۵ برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال) برابر $PGA = 0/24 g$ می‌باشد در حالی که مقدار حداکثر شتاب زمین برای این نقطه در مطالعه کمالیان و همکاران [۱۸] برابر $PGA = 0/31 g$ است. علت این اختلاف در تفاوت میان روش‌های استفاده شده برای محاسبه خطر (سناریوی احتمالاتی سازگار با خطر و تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی)، نوع رابطه کاهندگی استفاده شده و قضاوت میان سهم هر کدام از منابع لرزه خیز در خطر نهایی می‌باشد.

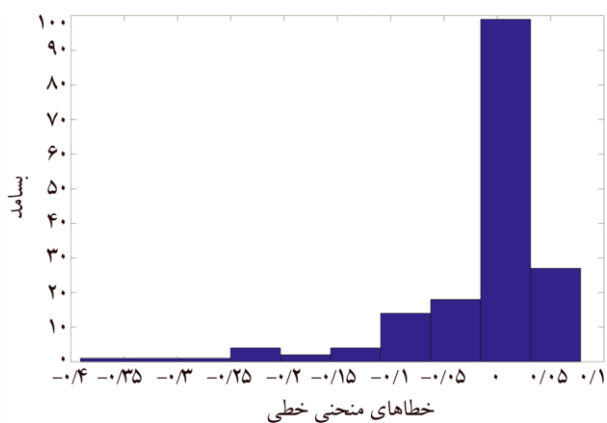
همان‌طور که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود بدترین مقدار خطای منحنی خطر برای نقطه کنترلی شماره ۹ است؛ در این نقطه کنترلی مقدار متوسط خطا برای همه ۱۹ دوره بازگشت برابر $34/4$ درصد برآورد می‌شود. میانگین مقدار خطا برای بقیه سایت‌ها برابر $3/97$ درصد است.

مورد مطالعه قرار گرفته) تولید شده‌اند. ستون سوم بزرگای سناریو و ستون چهارم نوع چشمه‌ای که این سناریو را تولید کرده (در اینجا همه از منابع زمینه تولید شده‌اند) می‌باشد. ستون پنجم احتمال وقوع سالانه هر سناریو، ستون ششم درصد مشارکت سناریو در منحنی خطر و ستون هفتم درصد مشارکت تجمعی آن سناریو در منحنی خطر است.

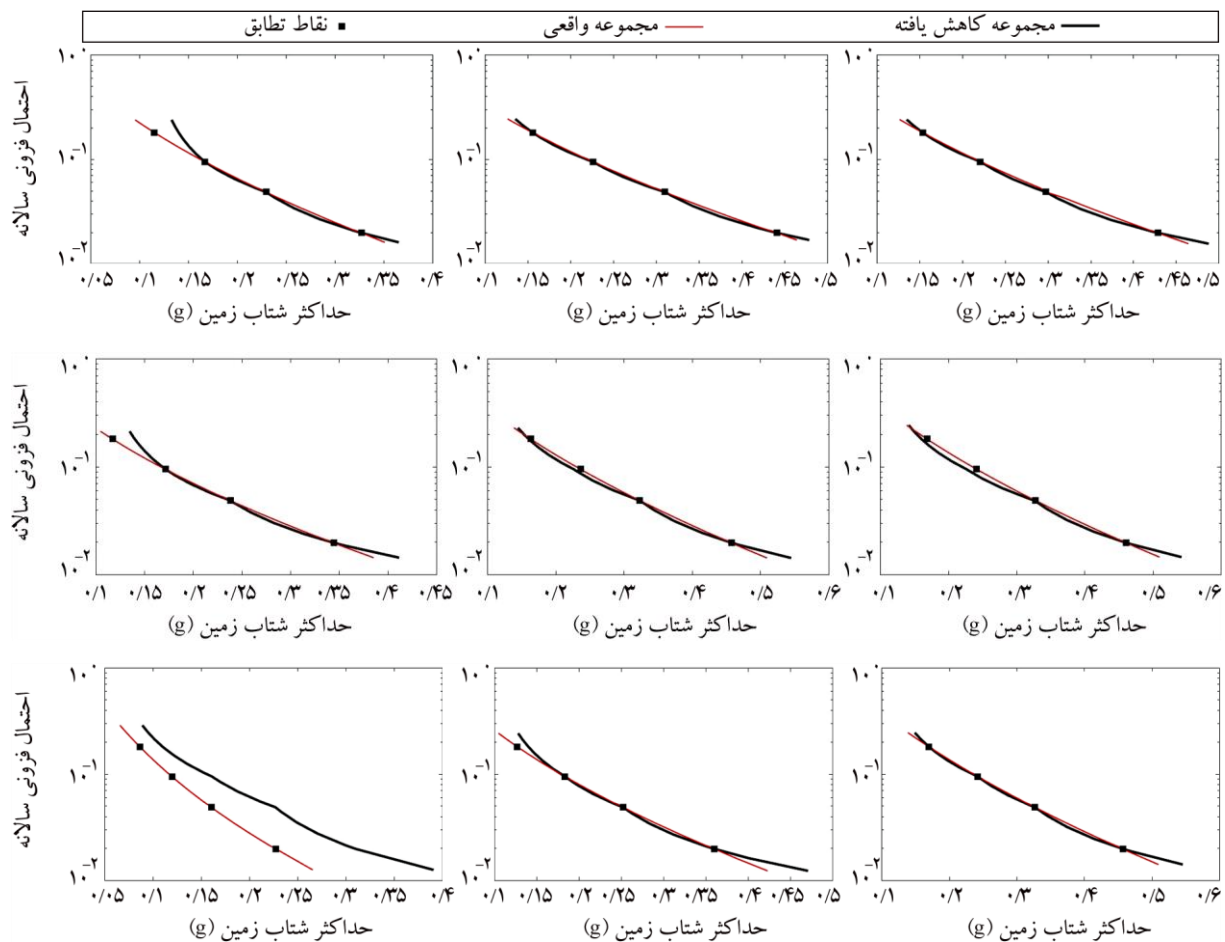
۳-۴- معیار ارزیابی

انجام آزمایش کاملی از بزرگی و مشخصه خطاهای به دست آمده برای مجموعه سناریوهای احتمالاتی کاهش یافته به جای مجموعه کامل «واقعی»، اهمیت دارد؛ می‌بایست اطمینان حاصل شود که اولاً بزرگی خطاهای کاربرد جایگزین مناسب است و ثانیاً هیچ انحراف ناخواسته‌ای در نتایج وجود ندارد. بدین منظور از معیار ارزیابی و متوسط خطاهای منحنی خطر^{۱۷} (MHCE) که در بخش ۳ معرفی گردید، جهت ارزیابی سناریوهای ارائه شده روی خطاهای منحنی خطر (HCE) استفاده می‌شود. منحنی‌های خطر برای ۱۵ دوره بازگشت دیگر علاوه بر چهار دوره بازگشت قبلی (مجموعاً ۱۹ دوره بازگشت) به دست آمده‌اند.

شکل (۷) هیستوگرام خطاهای منحنی خطر (HCE) را برای سناریوهای احتمالاتی ارائه شده، نشان می‌دهد. این هیستوگرام‌ها برای هر دوره بازگشت و سایت (۱۹ دوره بازگشت و ۹ نقطه کنترلی و جمعاً ۱۷۱ ترکیب دوره بازگشت-نقطه کنترلی)، برحسب PGA که درصدی از مقدار «واقعی» می‌باشد، ترسیم شده است.



شکل (۷): هیستوگرام خطاهای منحنی خطر (HCE).



شکل (۸): مقایسه منحنی خطر مجموعه کاهش یافته با مجموعه «واقعی» برای نقاط کنترلی ۱ تا ۹: (الف-ط).

۵- نتیجه گیری

ویژگی‌های کلیدی سناریوهای احتمالاتی مبتنی بر

۱. بهینه‌سازی که برای شهر قم ارائه گردید به شرح زیر می‌باشد: برای شهر قم این اطمینان حاصل شد که خطا میان خطر «واقعی» و خطر مجموعه کاهش یافته حداقل است.
 ۲. در مدل پیشنهادی این اجازه داده شد تا زلزله‌ها در مجموعه کاهش یافته انتخاب شده و نیازی نیست که کاربر هیچ‌گونه فهمی از پیامدهای انتخاب آنها خطای نهایی داشته باشند.
 ۳. در این روش به‌طور صریح مشخصه‌های معینی از احتمالات باز رخداد بر مبنای اطلاعات زمین‌شناسی حفظ گردید.
 ۴. برای سناریوهای احتمالاتی مقدار و توزیع خطاها تعیین شد به‌طوری که کاربر می‌تواند از تصمیم‌گیری برای انتخاب میان صرفه‌جویی محاسباتی و مقدار خطاها مطلع شود.
- این فرصت برای گسترش سناریوهای احتمالاتی شهر قم

در این مطالعه کاربردی با مقیاس کامل برای روش سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی تعمیم یافته جهت تحلیل خسارت لرزه‌ای شریان‌های حیاتی شهر قم ارائه شد. این روش به‌طور قابل ملاحظه‌ای، محاسبات را در بخش تحلیل خطر لرزه‌ای زیرساخت‌های با توزیع مکانی کاهش می‌دهد. این روش همچنین استفاده از روش‌های پیچیده‌تر برای تخمین خسارت، آسیب متعاقب یا تحلیل عملکرد شریان‌های حیاتی را در مقایسه با شبیه‌سازی با ده‌ها هزار زلزله مصنوعی امکان‌پذیر می‌سازد. این روش برای انجام تحلیل‌های بیشتر به‌طوری که برای تصمیمات اجرایی در سطح منطقه می‌تواند گزینه‌های مقاوم‌سازی بیشتری را در اختیار مسئولین قرار داده و بنابراین شانس بیشتری جهت یافتن بهترین گزینه وجود دارد.

- systems. *Earthquake Spectra*, **16**(3), 557-572.
9. Campbell, K., Seligson, H. (2003) 'Quantitative method for developing hazard-consistent earthquake scenarios'. *Proc. of the Technical Council of Lifeline Earthquake Engineering*. Beach, L. (Ed.), ASCE.
 10. Lee, J., Graf, W., Somerville, P., O'Rourke, T., and Shinozuka, M. (2005) 'Developing a Hazard Consistent Table of Earthquake Scenarios for Risk Analysis of the LADWP Water Systems'. In: *Final Report to the Los Angeles Department of Water and Power*.
 11. Vaziri, P., Apivatanagul, P., Nozick, L. (2012) Identification of Optimization-Based Probabilistic Earthquake Scenarios for Regional Loss Estimation. *Journal of Earthquake Engineering*, **16**(2), 296-315.
 12. Jayaram, N., Baker, J.W. (2010a) Efficient sampling and data reduction techniques for probabilistic seismic lifeline risk assessment. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **39**(10).
 13. Legg, M., Nozick, L. and Davidson, R. (2010) Optimizing the selection of hazard-consistent probabilistic scenarios for long-term regional hurricane loss estimation. *Structural Safety*, **32**(1), 90-100.
 14. Apivatanagul, P., Davidson, R., Blanton, B., and Nozick, L. (2011) Long-term regional hurricane hazard analysis for wind and storm surge. *Coastal Engineering*, **58**(6), 499-509.
 15. Han, Y., Davidson, R. (2012) Probabilistic seismic hazard analysis for spatially distributed infrastructure. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **41**(15), 2141-2158.
 16. Bommer, J., Spence, R., Erdik, M., Tabuchi, S., Aydinoglu, N., Booth, E., Del. R.D., Peterken, O. (2002) Development of an earthquake loss model for Turkish catastrophe insurance. *Journal of Seismology*, **6**, 431-446.
 17. Manzour, H., Davidson, R., Horspool, N., Nozick, L.K. (2015) Seismic Hazard and Loss Analysis for Spatially Distributed Infrastructure in Christchurch, New Zealand. *Earthquake Spectra*, **32**(2), 697-712.
 18. Kamalian, M., Jafari, M.K., Ghayamghamian, M.R.,

وجود دارد که می‌تواند بر تعدادی از محدودیت‌های سایر روش‌های سناریوی احتمالاتی سازگار با خطر، غلبه کند. در حال حاضر، خطر «واقعی» تنها به وسیله PGA اندازه‌گیری می‌شود. اما می‌توان شرایط دیگری را به تابع نهایی اضافه کرد که خطاها را با پارامترهای حرکت زمین یا خطرات جانبی دیگر نظیر SA، PGV و ... نمایش دهد.

مراجع

1. Anderson, J.G. (1997) Benefits of scenario ground motion maps. *Engineering Geology*, **48**, 43-57.
2. Adachi, T., Ellingwood, B.R. (2008) Serviceability of earthquake-damaged water systems: effects of electrical power availability and power backup systems on system vulnerability. *Reliability Engineering and System Safety*, **93**, 78-88.
3. Çagnan, Z., Davidson, R., and Guikema, S. (2006) Post-earthquake restoration planning for Los Angeles electric power. *Earthquake Spectra*, **22**(3), 1-20.
4. Dodo, A., Xu, N., Davidson, R., and Nozick, L. (2005) Optimizing regional earthquake mitigation investment strategies. *Earthquake Spectra*, **21**(2), 305-327.
5. Bazzurro, P., Luco, N. (2005) Accounting for uncertainty and correlation in earthquake loss estimation. In *Proceeding of the 9th International Conference on Structural Safety and Reliability*, Rome, Italy.
6. Ebel, J., Kafka, A. (1999) A Monte Carlo approach to seismic hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**(4), 854-866.
7. Werner, S., Taylor, C., Cho, S., Lavoi, J.P., Huyck, C., Eitzel, C., Chung, H., Eguchi, R. (2006) *REDARS2: Methodology and Software for Seismic Risk Analysis of Highway Systems*. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
8. Chang, S., Shinozuka, M., and Moore, J. (2000) Probabilistic earthquake scenarios: Extending risk analysis methodologies to spatially distributed

Shafiee, A., Hamzehloo, H., Haghshenas, E., Sohrabi-bidar, A. (2008) Site effect microzonation of Qom, Iran. *Engineering Geology*, **97**, 63-79.

19. Akkar, S., Bommer, J. (2010) Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. *Seismological Research Letters*, **81**(2), 195-206.

واژه‌نامه

| | |
|--|---|
| Optimization-Based Probabilistic Seismic Scenario | ۱- سناریوی لرزه‌ای احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی |
| Optimization | ۲- بهینه‌سازی |
| Lifelines | ۳- شریان‌های حیاتی |
| Scenario-Based Conventional Monte Carlo simulation | ۴- شبیه‌سازی مونت کارلوی متعارف مبتنی بر سناریو |
| Ground Motion Maps | ۵- نقشه‌های حرکت زمین |
| Probabilistic Seismic Hazard Analysis | ۶- تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی |
| Hazard-Consistent Probabilistic Scenarios | ۷- سناریوهای احتمالاتی سازگار با خطر |
| Probabilistic Seismic Hazard Analysis | ۸- تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی |
| Hazard Curve Errors (HCE) | ۹- خطاهای منحنی خطر |
| Damage Maps | ۱۰- نقشه‌های خسارت |
| Database of Performance Levels | ۱۱- پایگاه داده‌های سطوح عملکردی |
| Extended Optimization-based Probabilistic Scenario | ۱۲- سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی تعمیم‌یافته |
| Importance Sampling | ۱۳- نمونه‌گیری اهمیت |
| Optimization-Based Probabilistic Scenario (OPS) | ۱۴- سناریوی احتمالاتی مبتنی بر بهینه‌سازی |
| Crisis 2015 | ۱۵- کرایسیس ۲۰۱۵ |
| Cumulative Distribution Function (CDF) | ۱۶- تابع توزیع تجمعی |
| Mean Hazard Curved Errors (MHCE) | ۱۷- متوسط خطاهای منحنی خطر |

Identification of Optimization-Based Probabilistic Scenarios for Seismic Loss Analysis of Qom Lifelines

Seyed Mohammad Mehdi Ghafoori¹, Hamid Zafarani², and Mohammad Reza Adlparvar^{3*}

1. Ph.D. Candidate, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran
2. Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES)
3. Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran,
*Corresponding Author, email: adlparvar@qom.ac.ir

A fully Monte Carlo Simulation (MCS) that applies to the across region in each step, allows incorporation spatial correlations in each step conditional on the previous step and each simulation must repeat each several times; therefore, the size of computation is concern. The size of computation can be reduced at each step by developing scenarios. The relatively small set of probabilistic scenarios represents the full set obtained from a MCS.

In order to consider spatial correlation of individual earthquake scenarios as well as when computational demands are of concern, the optimization-based probabilistic scenario (OPS) method are presented. This method is very appropriate approach that could be applied to a region with high seismicity and effect on the regional loss estimation and regional policy decisions. The OPS method can be important: 1- It is easy for users to understand, 2-The spatial correlation of the ground motion is recorded across the region, 3- It also eliminates concerns about the computation size. This method has a simple concept to record the temporal changes of vulnerability model. We use source–magnitude combination to obtain hazard-consistent annual occurrence probabilities.

The OPS method produces a small set of probabilistic seismic scenarios instead of the millions number of scenarios to estimate the seismic hazard and loss estimation of lifelines. This method has a clear framework, includes a step-by-step method for producing earthquake scenarios and ground motion maps. After producing a relatively small set of seismic scenarios, the hazard-consistent annual occurrence probabilities of scenarios are estimated; so that their effect on the across the region approximates that described by given return period maps. For each ground motion map, a set of damage maps are then calculated. Finally, for each damage map, the lifeline system performance is estimated as a function of the system damage. The resulting database of performance levels and associated occurrence probabilities then describe the lifeline risk. Evaluation metrics for computation of the hazard curve errors and spatial correlations errors, introduced by Han and Davidson (2012).

We apply the optimization-based probabilistic scenario method to identify the minimum number of scenarios. These scenarios can be used to loss estimation of Qom lifelines. The city of Qom is situated approximately in central Iran. Hazard curves for nine control points have been provided by PSHA, to generate probabilistic scenarios. These nine control points have been located on the study area boundary and equal distance of 12.5 km from each other.

Using OPS method, open source solvers and time-independent hazard analysis, has been presented a set of probabilistic seismic scenarios for Qom. First, the output of the conventional Monte Carlo simulation for 1 million years includes 1609087 simulated scenarios. Then scenarios have reduced to 55645 scenarios based on the ‘true’ hazard curve. Finally, the reduced set of earthquake scenarios based on optimization includes three scenarios. The scenarios obtained by the PULP_CBC_CMD and Gurobi 8.0 solvers are the same.

Based on the evaluation metrics, the errors are in the appropriate range and there is no unintended bias in the results. The errors are small, 81% of errors in range of $\pm 10\%$, 91% in range of $\pm 30\%$ and mean hazard curve error is 7.34%. By comparison of the ‘true’ and the reduced set hazard curves in all sites, site 9 has highest average HCE_{ir} . For the city of Qom, have been ensured that the difference between the ‘true’ hazard and the reduced set is minimum.

It is now possible to extend the probabilistic scenarios for Qom, thus overcoming limitations of the other hazard-consistent probabilistic scenario approaches. In this paper, the hazard is only measured by the PGA, but other terms (such as PGV, SA...) can be considered for the city of Qom.

Keywords: Seismic Scenario, Optimization, Hazard Analysis, Lifelines.