

DOI: 10.48303/bese.2024.2031962.1168

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

بسیاری از شهرهای ایران در معرض زلزله‌های بزرگ قرار دارند. با این حال وجود عواملی نظیر بافت فرسوده شهری، ساختمان‌های غیر مقاوم و معابر ناکارآمد در این شهرها منجر به افزایش نرخ خسارات و تلفات و ایجاد اختلال در عملیات امداد و نجات پس از زلزله می‌گردد. در این راستا ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق مختلف شهری، تحلیل و بررسی عوامل مؤثر بر آن جهت برنامه‌ریزی برای بهبود شرایط امری ضروری است. ارزیابی آسیب‌پذیری شهری نیازمند بررسی المان‌های فیزیکی شهری نظیر سازه‌ها، شریان‌های حیاتی، شبکه راه و اعضای تشکیل‌دهنده آن نظیر روسازه راه، پل‌ها، تونل‌ها و غیره است. تاکنون در مطالعات مختلف مدل‌های شکنندگی گوناگونی برای ارزیابی آسیب‌پذیری این اجزا توسعه یافته است. در این مطالعه هدف ارزیابی آسیب‌پذیری فیزیکی و اجتماعی در منطقه چهار شهرستان قم است. در این راستا آسیب‌پذیری برخی المان‌های فیزیکی نظیر سازه‌ها، المان‌های اصلی شبکه راه شامل پل‌ها، روسازه و تونل‌ها، درصد انسداد راه‌ها در اثر ریزش آوار و خطوط آب و فاضلاب، در منطقه مطالعاتی در صورت وقوع سناریو زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ سال مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این مطالعه پارامترهای مؤثر بر آسیب‌پذیری اجتماعی شامل درصد تلفات و مصدومان، تراکم جمعیت خانواده‌ها نیز ارزیابی شد. نتایج نشان داد زون‌های واقع در شمال این منطقه به دلیل قدمت بیشتر، تراکم ساختمان‌های فرسوده و وجود معابر باریک آسیب‌پذیری بیشتری در برابر زلزله دارند. همچنین وجود دانشگاه قم و خوابگاه‌های آن در زون ۵، منجر به افزایش درصد تلفات و مصدومان در این زون شده است. همچنین آسیب‌پذیری پل‌ها در زون ۸ و آسیب‌پذیری روسازه راه در زون‌های ۱۵، ۱۲، ۱۰ و ۱۴ و آسیب‌پذیری خطوط آب و فاضلاب در زون‌های ۱۲ و ۳ بیشترین میزان است.

واژگان کلیدی: زلزله، آسیب‌پذیری فیزیکی و اجتماعی، تلفات، خسارات، مصدومان، انسداد راه، اجزای اصلی شبکه راه، خطوط آب و فاضلاب.

بررسی میزان آسیب‌پذیری فیزیکی و اجتماعی در منطقه چهار شهر قم در اثر وقوع زلزله محتمل

وحیده شیروانی هرنندی (نویسنده مسئول)

دکتری مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی

زلزله، تهران، ایران، vahideh.shirvani@stu.iiees.ac.ir

کامبد امینی حسینی

دانشیار، پژوهشکده مدیریت بحران و خطرپذیری، پژوهشگاه بین‌المللی

زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

بابک منصوری

دانشیار، پژوهشکده مدیریت بحران و خطرپذیری، پژوهشگاه بین‌المللی

زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۱- مقدمه

تبدیل شد. زلزله سر پل ذهاب در سال ۲۰۱۷ نیز پیامدهای اجتماعی و اقتصادی جبران‌ناپذیری به همراه داشت. همچنین به علت وجود شبکه‌های راه ناکارآمد در بسیاری از این مناطق امکان انجام عملیات امداد و نجات در ساعات اولیه پس از زلزله که زمان طلایی برای انجام این اقدامات است، فراهم نشد. به‌طور

کشور ایران از جمله مناطق لرزه‌خیز جهان است که هر ساله در آن زلزله‌های متعددی رخ می‌دهد. در طول یک‌صد سال اخیر ده‌ها زلزله با بزرگی بیش از ۷ در ایران رخ داده است. شهر طبس در سال ۱۹۷۸ در اثر زلزله تخریب شد، منجیل و رودبار در سال ۱۹۹۰ تخریب شدند و شهر بم در سال ۲۰۰۳ به آوار

آسیب‌پذیری اجتماعی نظیر درصد تلفات، مصدومان و تراکم جمعیت در منطقه مطالعاتی برآورد شد. در گام آخر زون‌های با آسیب‌پذیری بالا شناسایی شده و عوامل مؤثر بر آن جهت برنامه‌ریزی و کاهش پیامدهای ناشی از زلزله مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت.

۲- پیشینه پژوهش

تا کنون مطالعات مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری فیزیکی المان‌های شهری و آسیب‌پذیری اجتماعی ناشی از زلزله انجام شده است. به‌عنوان مثال می‌توان به مطالعات گسترده انجام شده در پروژه HAZUS-MH اشاره کرد. در این پروژه با به‌کارگیری روشی تحلیلی و با استفاده از مدل‌های توزیع جمعیت، بانک داده‌های مربوط به سازه‌های موجود، شدت جنبش زمین، منحنی‌های شکنندگی مناسب و با در نظرگیری برنامه‌های تخلیه و پناه‌گیری امن و یکپارچه‌سازی این پارامترها به ارزیابی خسارات، تلفات و مصدومان ناشی از زلزله پرداخته شده است (HAZUS-MH, 2003).

علاوه بر این، در مطالعه‌ای دیگر طبسیان و همکاران (۲۰۱۹) جهت ارزیابی تعداد تلفات و مصدومان، مدلی تجربی متناسب با شرایط کشور و بر اساس داده‌های موجود از زلزله‌های پیشین ارائه دادند. با استفاده از مدل توسعه یافته توسط آن‌ها امکان تخمین تعداد تلفات و مصدومان احتمالی و توزیع مکانی آن‌ها در سناریوهای مختلف زلزله بر اساس پیشینه شتاب زمین (PGA) فراهم می‌گردد.

فیروزی و همکاران (۲۰۲۲) مدلی تجربی برای ارزیابی تلفات زلزله با استفاده از داده‌های زلزله‌های مخرب و غیر مخرب رخ داده در ایران از سال ۱۹۶۲ ارائه دادند. در مطالعه آن‌ها عدم قطعیت‌های موجود در تعداد تلفات در زلزله‌های پیشین و پارامتر جنبش زمین برآورد شده توسط شیک مپ (Shake map) با رگرسیون فازی و با شبیه‌سازی مونت کارلو در نظر گرفته شد. همچنین کوبرن و همکاران (۱۹۹۲) مدلی نیمه‌تجربی برای برآورد تلفات پس از زلزله توسعه دادند. در مقاله پیش رو از این

کل بسیاری از شهرهای ایران به دلیل وجود سازه‌ها و زیرساخت‌های ناکارآمد، توزیع نامناسب ساختمان‌های با کاربری متفاوت و افزایش ساخت‌وساز در مناطق مستعد خطرات طبیعی در معرض ریسک ناشی از سوانح طبیعی به‌خصوص زلزله قرار دارند.

همچنین علی‌رغم تلاش‌های انجام شده در جهت تدوین آیین‌نامه‌های ملی ساخت‌وساز به‌منظور بهبود کیفیت سازه‌ها، همچنان بخش‌های وسیعی از شهرها دارای بافت فرسوده بوده و به‌شدت در برابر زلزله آسیب‌پذیرند.

علاوه بر این، وجود درصد بالای معابر باریک و ساختمان‌های فرسوده منجر به افزایش پتانسیل انسداد راه‌ها در اثر زلزله در بسیاری از نواحی شهری می‌گردد. این امر امکان انجام عملیات امداد و نجات را به‌خصوص در ساعات طلایی پس از زلزله با اختلالات جدی روبه‌رو می‌کند و منجر به خسارات اقتصادی و تلفات جانی زیادی در اثر زلزله می‌گردد (Shirvani Harandi et al., 2024a). برای مثال می‌توان به تجربه زلزله بم در سال ۲۰۰۸ اشاره نمود (Eshghi & Aharo, 2005).

بنابراین انجام اقدامات لازم در جهت کاهش ریسک بلایای طبیعی به‌ویژه زلزله ضروری است. کاهش ریسک ناشی از زلزله نیازمند شناخت پارامترهای مؤثر بر آسیب‌پذیری فیزیکی و اجتماعی در منطقه مطالعاتی، تحلیل و بررسی موارد مؤثر بر آن و برنامه‌ریزی برای ارتقای شرایط موجود قبل از وقوع زلزله محتمل است. در این راستا تاکنون مطالعات زیادی انجام شده است. در این مطالعه ابتدا به بررسی پیشینه این پژوهش‌ها و مدل‌های ارائه شده برای ارزیابی پارامترهای مؤثر بر آسیب‌پذیری فیزیکی و اجتماعی پرداخته شد. سپس آسیب‌پذیری سازه‌ها، المان‌های اصلی شبکه راه شامل پل‌ها، روسازه و تونل‌ها، درصد انسداد راه‌ها در اثر آوار سازه‌های مجاور و آسیب‌پذیری خطوط آب و فاضلاب با در نظر گرفتن سناریو وقوع زلزله ۴۷۵ ساله در ساعت دو بامداد در منطقه چهار شهرستان قم ارزیابی گردید. علاوه بر این، پارامترهای مؤثر بر

تخریب شده مجاور هر معبر را تعیین کرده و سپس با استناد به روش بحرینی و همکاران (۱۹۹۳)، نسبت ارتفاع سازه‌های مجاور راه به پهنای مفید معبر را محاسبه کرده و احتمال انسداد راه را تخمین زدند.

در مطالعه‌ای دیگر منصوری و همکاران (۲۰۱۵) با ارائه مدلی مبتنی بر GIS شاخص انسداد راه‌ها پس از زلزله را تخمین زدند. در مدل آن‌ها عرض آوار با استفاده از سه شاخص درجه خرابی، ارتفاع ساختمان و متریکال تخمین زده شد. در مقاله پیش رو از این روش برای ارزیابی درصد انسداد راه‌ها در منطقه مطالعاتی استفاده شده و در بخش ۷ به صورت مبسوط تشریح گردیده است.

۳- روش پژوهش و چارچوب نظری

در این مطالعه ابتدا به ارزیابی خسارات سازه‌ها در اثر سناریو زلزله مفروض پرداخته شد. سپس آسیب‌پذیری اجزای اصلی شبکه راه شامل پل‌ها، تونل‌ها و روسازه راه ارزیابی گردید. در گام بعد نیز به ارزیابی درصد انسداد راه‌ها در اثر ریزش سازه‌های مجاور راه پرداخته شد. سپس آسیب‌پذیری خطوط آب و فاضلاب در برابر سناریو زلزله مفروض بررسی شد. در نهایت نیز به ارزیابی پارامترهای مؤثر بر آسیب‌پذیری اجتماعی نظیر درصد تلفات، مصدومان و تراکم جمعیت در هر زون در منطقه مطالعاتی پرداخته شد.

به این منظور داده‌های مورد نیاز شامل نوع و متریکال سازه‌ها، تعداد طبقات، سال ساخت، تعداد و انواع پل‌ها و تونل‌ها، عرض معابر مجاور راه‌ها و داده‌های مربوط به جمعیت و سطح اشغال ساختمان‌های با کاربری مختلف و غیره از شهرداری منطقه و مرکز آمار ایران تهیه شد. در گام بعد به محاسبه پارامترهای مذکور در منطقه مطالعاتی با استفاده از مدل‌های توسعه یافته در مطالعات پیشین و به کارگیری نرم‌افزارهای ArcGIS و Matlab پرداخته شد.

نمودارهای شکل (۱) پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

مدل برای برآورد تلفات در منطقه مطالعاتی استفاده شده و در بخش ۹ تشریح شده است.

یکی از عوامل مؤثر بر کاهش تعداد تلفات و مصدومان ناشی از زلزله، امکان انجام عملیات امداد و نجات در ۷۲ ساعت اول پس از زلزله است که به آن ساعات طلایی گفته می‌شود. در این راستا حفظ عملکرد شبکه راه و امکان بهره‌برداری از آن پس از زلزله امری ضروری است. تجربه زلزله بم نشان داد یکی از عوامل مهم و مؤثر بر عدم کارایی شبکه راه و از دسترس خارج شدن بسیاری از مناطق آسیب‌دیده، انسداد راه‌ها در اثر ریزش سازه‌های مجاور و آوار ناشی از آن بود (Eshghi & Aharo, 2005).

تاکنون مطالعات زیادی برای برآورد درصد انسداد راه‌ها در اثر ریزش سازه‌های مجاور پس از زلزله انجام شده است. برای مثال می‌توان به روش ارائه شده در پروژه RISK-UE برای ارزیابی ریسک زلزله در مناطق شهری اروپا اشاره کرد (Vacareanu et al., 2004). در روش ارائه شده در این پروژه آوار ساختمانی در دو نوع آوار سازه‌ای و غیر سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در این پروژه از روش تحلیلی برای ارزیابی آوار ساختمان‌های بتن آرمه و از روش تجربی برای ارزیابی ساختمان‌های بنایی استفاده شد. بر اساس نتایج پروژه RISK-UE آوار ناشی از خرابی ساختمان‌های بنایی وسیع‌تر از ساختمان‌های بتنی است. با توجه به اینکه در شهرهای ایران اکثر سازه‌ها از نوع بنایی است، انسداد راه ناشی از خرابی این سازه‌ها حائز اهمیت زیادی است.

بحرینی و همکاران (۱۹۹۳) برای نخستین بار در ایران با کمک داده‌های میدانی به دست آمده از زلزله منجیل، شاخص انسداد راه را به صورت تابعی از نسبت عرض میانگین راه به ارتفاع سازه ارائه داد. منصوری و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از منحنی‌های شکنندگی اصلاح شده جایکا و انطباق آن‌ها با ساختمان‌های منطقه مطالعاتی، ساختمان‌های تخریب شده را شناسایی کردند.

در مرحله بعدی با استفاده از آنالیز همسایگی، ساختمان‌های

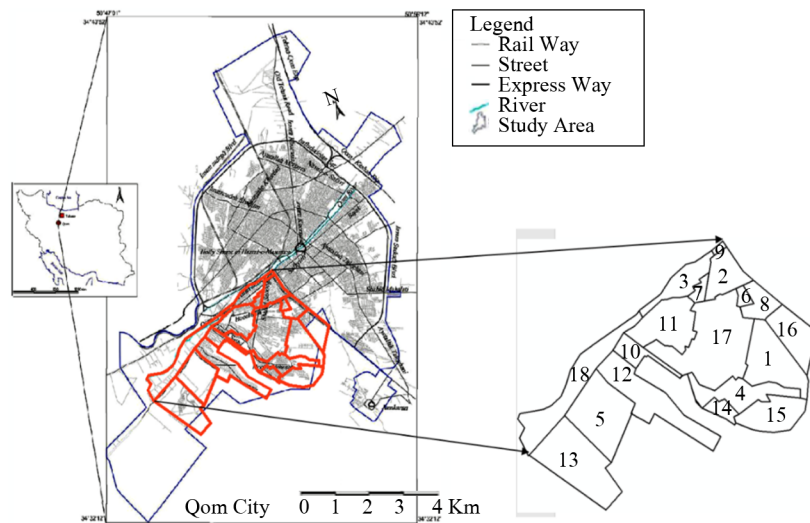


شکل (۱). پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل‌های پیشین برای ارزیابی درصد تلفات و مصدومان (JICA, 2004)، خسارات سازه‌ها (فلاح تفتی و همکاران ۲۰۲۰)، درصد انسداد راه‌ها (منصوری و همکاران ۲۰۱۴)، تراکم جمعیت، آسیب‌پذیری پل‌ها (Shirvani Shirvani et al., 2024b)، تونل‌ها (Kaynia et al., 2013)، روسازه راه (HAZUS-MH, 2003)، خطوط آب و فاضلاب (Japan Water Works Association, 1998)

۴- بررسی منطقه مطالعاتی

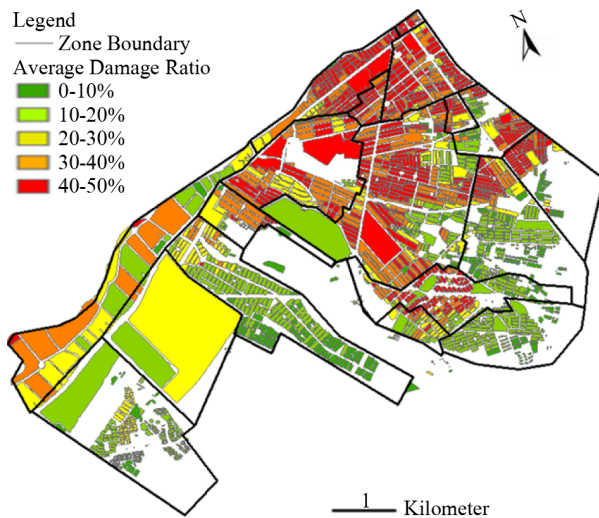
شهر قم به‌عنوان منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شده است. این منطقه حدود ۲۰ درصد از شهر قم را شامل شده و دارای تعداد زیادی ساختمان مسکونی، آموزشی، اداری و تجاری است؛ بنابراین به‌عنوان یکی از مناطق مهم قم به حساب می‌آید. این منطقه بر اساس تقسیم‌بندی شهرداری قم شامل هجده زون می‌شود. شکل (۲) موقعیت شهر قم، منطقه چهار و زون‌های آن را نشان می‌دهد. در ادامه به بررسی نرخ خسارات تلفات، مصدومان و انسداد راه‌ها تحت زلزله محتمل و عوامل مؤثر بر آن پرداخته شده است.

شهرستان قم مساحتی در حدود ۱۸۰ کیلومتر مربع داشته و در فاصله ۱۲۰ کیلومتری از استان تهران قرار دارد. بر اساس سرشماری انجام شده در سال ۱۳۹۵ این شهر دارای جمعیتی بیش از یک میلیون نفر است. بر اساس مطالعه کمالیان و همکاران (۲۰۰۸) این شهر در بخش مرکزی واحد لرزه‌زمین‌ساختی ایران قرار داشته و گسل‌های متعددی اطراف آن واقع شده‌اند که برخی از این گسل‌ها مانند گسل خضر و شادقلی از داخل شهر عبور می‌کنند. در این پژوهش منطقه چهار



شکل (۲): موقعیت شهر قم و منطقه چهار کامالیان و همکاران، (۲۰۰۸).

درصد سازه‌هایی که در هر بلوک در منطقه مطالعاتی در سطح خرابی شدید و فروریزش قرار می‌گیرند بر اساس شکل (۳) برآورد گردید.



شکل (۳): درصد سازه‌هایی که در اثر وقوع سناریو زلزله مفروض در سطح خرابی زیاد و فروریزش قرار می‌گیرند (منبع: نگارندگان).

۶- ارزیابی خسارات وارد بر اجزای اصلی شبکه راه

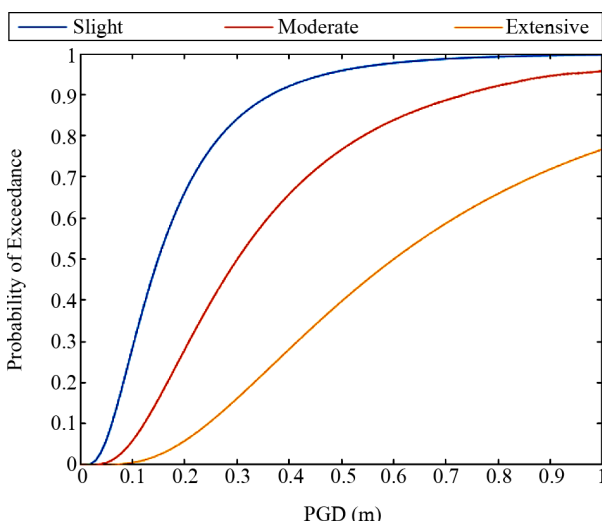
در این پژوهش آسیب‌پذیری اجزای اصلی شبکه راه شامل پل‌ها، تونل‌ها و روسازه راه نیز مورد بررسی قرار گرفت (Shirvani Harandi et al., 2024c). به این منظور از منحنی‌های شکنندگی متناسب با این المان‌ها استفاده گردید. برای ارزیابی آسیب‌پذیری پل‌ها ابتدا این سازه‌های بر اساس نوع اتصال عرشه

۵- ارزیابی خسارات وارد بر سازه‌ها در منطقه مطالعاتی

تاکنون مدل‌های متعددی برای ارزیابی خرابی ساختمان‌ها ارائه شده است (Bastami et al., 2022, Sadeghi et al., 2015, Mansuri et al., 2014). منحنی‌های شکنندگی یکی از رایج‌ترین ابزارها برای برآورد سطح خرابی سازه‌ها در اثر زلزله می‌باشند. این منحنی‌ها به صورت عمده با سه روش تحلیلی، تجربی و قضاوتی توسعه می‌یابند. در این مطالعه از منحنی‌های شکنندگی توسعه یافته توسط فلاح تفتی و همکاران (۲۰۲۰) برای ارزیابی سطح خرابی ساختمان‌ها در منطقه مطالعاتی استفاده شده است. در مطالعه آن‌ها ساختمان‌های ایران به ۱۹ گروه بر اساس نوع ساختمان (بتنی، فولادی و بنایی)، تعداد طبقات (کوتاه‌مرتبه، میان‌مرتبه و بلندمرتبه) و کیفیت ساخت (کیفیت پایین (قبل از سال ۱۳۶۵)، کیفیت متوسط (بین ۱۳۶۵ تا ۱۳۸۵) و کیفیت خوب (بعد از ۱۳۸۵)) تقسیم شدند. سپس برای هر گروه منحنی‌های شکنندگی متناسب با ساختمان‌های ایران توسعه یافت. در مطالعه پیش رو برای ارزیابی خرابی ساختمان‌ها در اثر زلزله ابتدا بانک داده‌های ساختمان‌ها از شهرداری استان قم تهیه شد. در گام بعدی به گروه‌بندی این ساختمان‌ها بر اساس مطالعه فلاح تفتی و همکاران (۲۰۲۰) پرداخته شد. سپس بر اساس ماکزیمم شتاب زمین (PGA) در سناریوی وقوع زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ سال بر اساس مطالعه کامالیان و همکاران (۲۰۰۸)،

بر این اساس می‌توان فرض کرد در منطقه مطالعاتی تحت سناریو زلزله مفروض هیچ‌یک از این تونل‌ها در سطح خرابی فروریزش و خرابی زیاد قرار نمی‌گیرند و نهایتاً احتمال قرارگیری در سطح خرابی کم وجود دارد.

جنش‌های زمین و جابه‌جایی‌های ناشی از آن (PGD) منجر به ایجاد آسیب و خرابی روسازه راه می‌شود. خرابی روسازه غالباً ناشی از عواملی مانند گسلش، زمین‌لغزش، روان‌گرایی، نشست‌های زمین و تغییر شکل‌های مرتبط است. منحنی‌های شکنندگی یکی از ابزارهای مفید برای بررسی آسیب‌پذیری روسازه‌ها هستند. در این مطالعه از منحنی‌های شکنندگی توسعه‌یافته در HAZUS برای ارزیابی آسیب‌پذیری روسازه‌های راه استفاده شده است (HAZUS-MH, 2003). این منحنی‌ها احتمال فراگذشت از سه سطح خرابی کم، متوسط و شدید را بر اساس پارامتر جنش زمین PGD نشان می‌دهند (شکل ۵) برای ارزیابی آسیب‌پذیری روسازه در این مطالعه، درصد راه‌هایی که در هر زون در سطح خرابی زیاد قرار می‌گیرند، ارزیابی شدند. به این منظور از منحنی‌های شکنندگی مذکور و نقشه ریز پهنه‌بندی PGD استفاده شد (Farahani et al., 2020). شکل (۶) درصد راه‌هایی که در هر زون منطقه مطالعاتی در سطح خرابی زیاد قرار می‌گیرند را نشان می‌دهد.

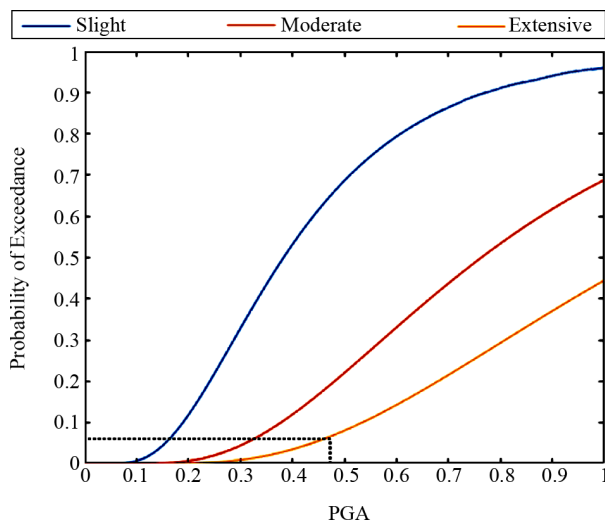


شکل (۵): منحنی‌های شکنندگی روسازه معابر شهری بر اساس HAZUS (HAZUS-MH, 2003).

به زیر سازه (یکپارچه یا غیر یکپارچه)، نوع روسازه و متریکال به کار رفته در آن، نوع زیر سازه و متریکال به کار رفته در آن و دوره طراحی گروه‌بندی شدند. سپس با توجه به نوع پل‌های موجود در منطقه مطالعاتی با استفاده از منحنی‌های شکنندگی توسعه یافته توسط شیروانی و همکاران (۲۰۲۴) و هدایتی گودرزی و همکاران (۱۳۹۴) به ارزیابی آسیب‌پذیری این المان‌ها در اثر سناریوی زلزله مفروض پرداخته شد (هدایتی گودرزی ۱۳۹۴، Shirvani Harandi et al., 2024b).

نتایج نشان داد احتمال قرارگیری یک پل در سطح خرابی شدید در زون ۸ وجود دارد.

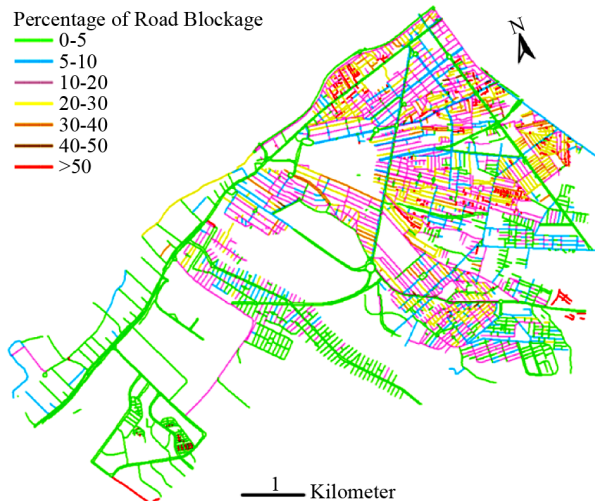
منحنی‌های شکنندگی ابزار قدرتمندی برای ارزیابی سطح خرابی تونل‌ها نیز محسوب می‌شوند. تاکنون منحنی‌های شکنندگی گوناگونی برای انواع تونل‌ها در مطالعات مختلف نظیر پروژه‌های تحقیقاتی ALA (۲۰۰۱) و SYNER-G ارائه شده است (Kaynia et al., 2013; American Lifelines Alliance, 2001). در این مطالعه دو زیرگذر تونلی با مقطع مستطیلی (زیرگذر مدافعان حرم و زیرگذر نماز) در منطقه مطالعاتی وجود دارد که با توجه به منحنی‌های شکنندگی ارائه شده در پروژه تحقیقاتی SYNER-G و نقشه توزیع PGA در سناریو زلزله مفروض ($PGA = 0.475g$) احتمال فراگذشت هر یک از این تونل‌ها از سطح خرابی زیاد کمتر از ۱۰ درصد است (شکل ۴).



شکل (۴): منحنی‌های شکنندگی تونل‌های شهری مستطیلی در خاک نوع ۳ (با توجه به منطقه مطالعاتی).

$$W_D = D_F \times W_S \times W_H \quad (1)$$

در گام آخر درصد انسداد راه‌ها نیز با تقسیم ماکزیمم عرض آوار (در هر معبر) به عرض معبر محاسبه گردید. شکل (۷) درصد انسداد راه‌ها در منطقه چهار شهر قم را بر اساس مدل ارائه شده توسط منصوری و همکاران (۲۰۱۵) نشان می‌دهد.



شکل (۷): درصد انسداد معابر منطقه چهار شهر قم در اثر خرابی سازه‌های مجاور راه تحت سناریو زلزله مفروض (منبع: نگارندگان).

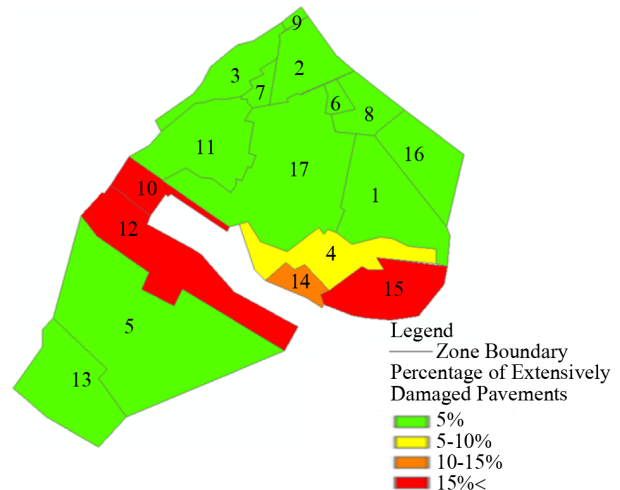
۸- ارزیابی آسیب‌پذیری خطوط آب و فاضلاب

بر اساس مطالعات انجام شده نوع و موقعیت خرابی لوله‌ها به عواملی نظیر شرایط خاک، شرایط جانمایی، جنس لوله‌ها، بزرگی و نوع زلزله وابسته است (O'Rourke & Xuejie, 1999; O'Rourke & Castro, 1980). علی‌رغم وابستگی خرابی لوله‌ها به جنبش‌های ناشی از زلزله و بزرگی آن دلیل عمده خرابی این خطوط بیشینه سرعت زمین (PGV) است (Coşar et al., 2013).

در رابطه ارائه شده توسط انجمن صنایع آب ژاپن (JWWA) میزان خرابی لوله‌های آب و فاضلاب به صورت تابعی از ماکزیمم سرعت زمین، جنس لوله‌ها، شرایط خاک، قطر لوله‌ها و روانگرایی به صورت رابطه (۲) برآورد شده است:

$$R_m(PGV) = R(PGV) \times C_p \times C_d \times C_g \times C_I \quad (2)$$

در این رابطه $R_m(PGV)$ بیانگر تعداد نقاط شکست در هر کیلومتر است. همچنین پارامتر $R(PGV)$ از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.



شکل (۶): درصد راه‌هایی که در هر زون منطقه چهار شهر قم در سطح خرابی زیاد قرار می‌گیرند.

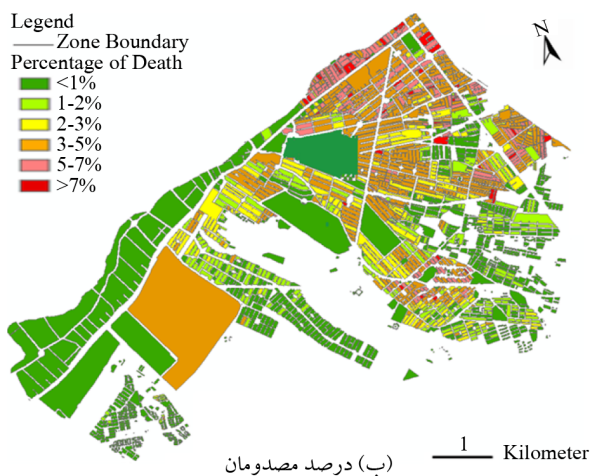
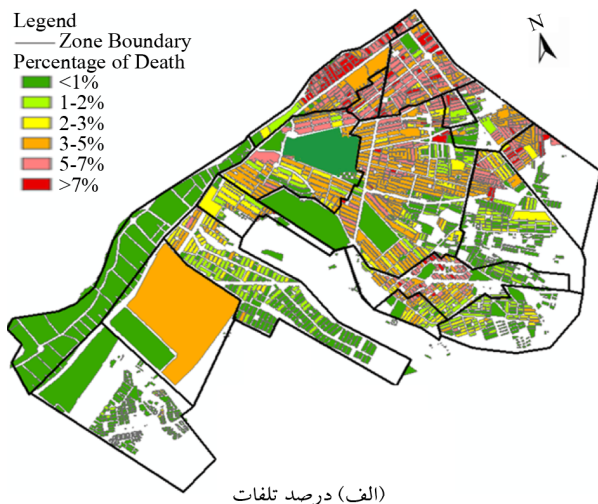
۲- ارزیابی درصد انسداد راه‌ها در اثر فروریزش سازه‌های مجاور راه در منطقه مطالعاتی

برای محاسبه درصد انسداد راه‌ها در منطقه مطالعاتی در اثر وقوع سناریو زلزله ۴۷۵ ساله از مدل ارائه شده توسط منصوری و همکاران (۲۰۱۵) استفاده شد. در مطالعه آن‌ها عرض آوار با استفاده از سه شاخص درجه خرابی، ارتفاع ساختمان و متریکل محاسبه شد. بر اساس این مدل ابتدا با انجام آنالیز همسایگی، ساختمان‌های مجاور راه شناسایی شدند. سپس با استفاده از منحنی‌های آسیب‌پذیری ارائه شده در مطالعه منصوری و همکاران (۲۰۱۴) درجه خرابی سازه‌های مجاور راه (D_F) در اثر سناریوی زلزله مفروض محاسبه شدند. همچنین از ضریب W_S برای اعمال تأثیر متریکل سازه در نحوه فروریزش آن در محاسبه عرض آوار استفاده شد. تجربه زلزله‌های گذشته نشان داده است معمولاً سازه‌های بنایی به صورت عمودی فرومی‌ریزند. از طرفی آوار ناشی از خرابی سازه‌های بتنی و فولادی به صورت مورب و با فاصله بیشتری از محل ساختمان در مقایسه با سازه‌های بنایی فرومی‌ریزد. بنابراین در مطالعه آن‌ها W_S برای محاسبه عرض آوار سازه‌های فولادی و بتنی $1/3$ و برای سازه‌های بنایی برابر ۱ در نظر گرفته شد. در نهایت عرض آوار به صورت تابعی از شاخص‌های درصد خرابی ساختمان‌ها (D_F)، متریکل (W_S) و ارتفاع سازه (W_H) به صورت رابطه (۱) محاسبه شد.

در این روش تعداد تلفات با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

$$K_s = D_5 \times M_1 \times M_2 \times M_3 \times (M_{4d} + (1 - M_{4d}) \times M_5) \quad (4)$$

در این فرمول K_s بیانگر تعداد تلفات انسانی، D_5 بیانگر تعداد ساختمان‌های فرو ریخته، M_1 بیانگر تعداد افراد در هر ساختمان، M_2 بیانگر درصد افراد ساکن در ساختمان هنگام وقوع زلزله، M_3 بیانگر درصد ساکنان محبوس در ساختمان‌های فرو ریخته، M_{4d} بیانگر نسبت تلفات بلافاصله پس از فرو ریختن ساختمان‌ها و M_5 بیانگر نسبت تلفات پس از فرو ریختن ساختمان (با گذر زمان) است. تعداد تلفات در منطقه مطالعاتی پس از تهیه داده‌های مورد نیاز از مرکز آمار ایران با استفاده از رابطه فوق برآورد گردید. نتایج در شکل (۹-الف) آورده شده است.

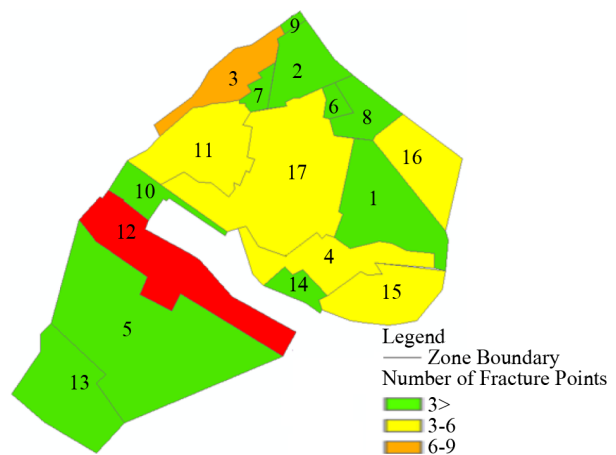


شکل (۹): برآورد درصد تلفات و مصدومان در منطقه چهار شهر قم در اثر وقوع سناریو زلزله مفروض (منبع: نگارندگان).

$$R(PGV) = 3.11 \times 10^{-3} * (PGV - 15)^{1.3} \quad (3)$$

PGV نیز ماکزیمم شتاب زمین بر حسب سانتی متر بر ثانیه است. شاخص‌های Cg ، Cd ، Cp و CI به ترتیب مربوط به متریک لوله، قطر لوله، شرایط خاک و روانگرایی می‌باشند (Japan Water Works Association, 1998).

در این مطالعه برای محاسبه تعداد نقاط شکست لوله‌های آب و فاضلاب در هر زون از منطقه مطالعاتی از رابطه (۴) استفاده شد. نتایج در شکل (۸) آورده شده است.



شکل (۸): تعداد نقاط شکست لوله‌های آب و فاضلاب در هر زون منطقه چهار قم.

۹- ارزیابی درصد تلفات و مصدومان در منطقه مطالعاتی

همان‌طور که در مقدمه گفته شد تا کنون مدل‌های گوناگونی برای برآورد تلفات و مصدومان در مطالعات مختلف ارائه شده است. در این مطالعه از مدل ارائه شده توسط کوپرن و همکاران (۱۹۹۲) برای برآورد درصد تلفات ناشی از سناریوی وقوع زلزله ۴۷۵ ساله در ساعت ۲ بامداد در منطقه مطالعاتی استفاده شده است. از این روش در مطالعه جایکا برای ارزیابی تعداد تلفات در استان تهران استفاده گردید. در این مطالعه میزان خسارات وارد بر سازه‌ها و نرخ تلفات در مناطق مختلف تهران و عوامل مؤثر بر آن ارزیابی شد. نتایج به دست آمده از این پروژه جهت برنامه‌ریزی و ارائه استراتژی‌های مناسب برای کاهش آسیب‌پذیری استان تهران توسط مدیران و مسئولان شهری و سازمان مدیریت بحران استفاده گردید (JICA, 2004).

۱۱- تفسیر نتایج

نتایج ارزیابی خسارات وارد بر ساختمان‌های منطقه چهار شهر قم تحت سناریوی زلزله ۴۷۵ ساله نشان می‌دهد نواحی شمال منطقه چهار شامل زون‌های ۳، ۲، ۹، ۶، ۷، ۸، ۱۶ و ۱۷ و بخش‌هایی از زون‌های ۴ و ۱ خرابی بیشتری متحمل می‌شوند. این امر ناشی از تراکم بالای ساختمان‌های بنایی با کیفیت پایین و متوسط در این نواحی است. همچنین با توجه به قدمت کمتر و تراکم ساختمانی کمتر در نواحی جنوب منطقه چهار شامل زون‌های ۱۵، ۱۴، ۱۰، ۱۲ و ۱۳ کیفیت ساختمان‌ها نسبت به نواحی شمال منطقه بهتر بوده و درصد سازه‌هایی که در این مناطق در سطح خرابی شدید و فروریزش قرار می‌گیرند کمتر است. بالا بودن نرخ خرابی سازه‌ها در نواحی شمالی منطقه چهار و زون‌های نام برده و تراکم بیشتر ساختمان‌ها و جمعیت در این مناطق منجر به افزایش درصد تلفات و مصدومان بر اساس شکل (۹) می‌گردد. لازم به ذکر است که زون ۱۸ غیرمسکونی بوده و بیشتر متشکل از زمین‌های بایر و ساختمان‌های صنعتی یک طبقه به صورت پراکنده می‌باشد؛ بنابراین با توجه به اینکه سناریوی مفروض در این مطالعه وقوع زلزله ۴۷۵ ساله در ساعت ۲ بامداد است و در این زمان افراد در منازل خود (ساختمان‌های مسکونی) قرار دارند، درصد تلفات و مصدومان در این زون ناچیز است.

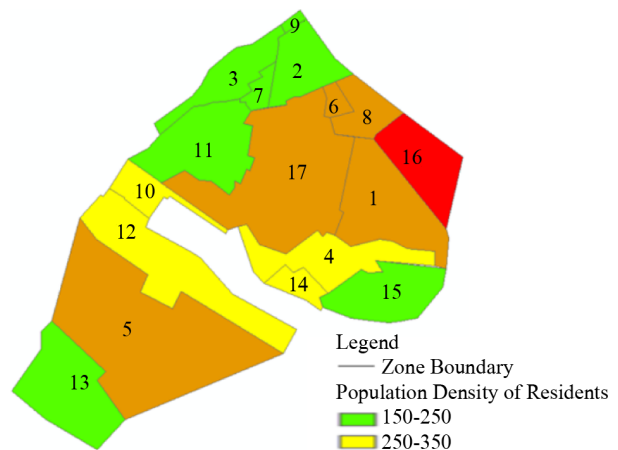
از طرفی با توجه به قرار داشتن دانشگاه قم و خوابگاه‌های آن در زون ۵ و همچنین با توجه به تراکم جمعیت بالای این خوابگاه‌ها، درصد تلفات و مصدومان تخمین زده شده در این زون به نسبت بالا است. بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده، دانشگاه قم واقع در زون ۵ شامل شش ساختمان خوابگاه بوده که هر ساختمان شامل چهار طبقه و هر طبقه شامل ۱۵۰ دانشجوی می‌شود. این ساختمان‌ها از نوع اسکلت فلزی و بتنی با ۱۰ تا ۲۵ سال سن هستند. با توجه به تراکم جمعیت بالای این خوابگاه‌ها در این زون درصد تلفات و مصدومان به ترتیب ۳/۹ و ۳/۲ درصد که مقادیر نسبتاً بالایی است تخمین زده شد. علاوه بر این، با توجه به اینکه سناریوی مفروض، وقوع زلزله در

در این مطالعه به منظور برآورد تعداد مصدومان از مدل نسبت تلفات به مصدومان در مطالعه طبسیان و امینی حسینی (۲۰۱۹) استفاده شد. همان‌طور که در مقدمه گفته شد مدل ارائه شده توسط آن‌ها مدلی تجربی بوده که با استفاده از داده‌های زلزله‌های پیشین و بر اساس شرایط کشور توسعه یافته است. نتایج برآورد تلفات تحت سناریوی زلزله مفروض در شکل (۹-ب) آورده شده است.

۱۰- تراکم جمعیت

تجربه زلزله‌های گذشته نشان داده است بالا بودن تراکم جمعیت خانواده‌ها منجر به افزایش آسیب‌پذیری انسانی و اجتماعی می‌گردد. به منظور برآورد این پارامتر در منطقه مطالعاتی ابتدا داده‌های آماری مربوط به جمعیت و سازه‌های موجود از سازمان‌های مربوطه گردآوری شد. سپس با تقسیم جمعیت ساکن بر مساحت زیربنای مسکونی در هر زون، تعداد افراد ساکن در هر هکتار زیربنای مسکونی تخمین زده شد. شکل (۱۰) تراکم جمعیت ساکنین در هر زون منطقه چهار شهر قم را نشان می‌دهد.

بر اساس این شکل تراکم جمعیت ساکنین در زون ۱۶ نسبت به سایر زون‌ها بیشترین مقدار است. همچنین قرار داشتن دانشگاه قم و خوابگاه‌های آن در زون ۵ منجر به افزایش تراکم جمعیت آن گردیده است.



شکل (۱۰): تراکم جمعیت ساکنین در هر زون منطقه چهار شهر قم.

مدل‌های مناسب به ارزیابی و برآورد آسیب‌پذیری سازه‌ها، اجزای اصلی شبکه راه، درصد انسداد راه‌ها، آسیب‌پذیری خطوط آب و فاضلاب، درصد تلفات، مصدومان و تراکم جمعیت ساکنین در هر زون در منطقه چهار شهر قم پرداخته شد. نتایج نشان داد زون‌های واقع در نیمه شمالی منطقه چهار به دلیل تراکم ساختمان‌ها، وجود درصد بالای ساختمان‌های بنایی با کیفیت متوسط و پایین، تراکم بالای جمعیت و درصد بالای معابر باریک آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به زون‌های واقع در نیمه جنوبی این منطقه دارند؛ بنابراین، بازسازی و مقاوم‌سازی ساختمان‌های فرسوده و رعایت قانون عقب‌نشینی ساختمان‌ها در ساخت‌وسازهای جدید به منظور عریض‌سازی معابر مجاور ساختمان‌ها در این مناطق امری ضروری محسوب می‌شود. علاوه بر این، بررسی نتایج نشان می‌دهد نرخ تلفات، مصدومان، خسارات و انسداد راه‌ها در بیشتر نواحی واقع در نیمه جنوبی منطقه چهار و در زون‌های ۱۸، ۱۰، ۱۲، ۱۵ و ۱۳ نسبت به سایر زون‌ها کمتر است. این امر به دلیل قدمت کمتر ساختمان‌ها در این نواحی، تراکم کمتر ساختمان‌ها، عرض بیشتر معابر و درصد کمتر ساختمان‌های فرسوده و قدیمی نسبت به زون‌های واقع در نیمه شمالی منطقه چهار شهر قم است. همچنین آسیب‌پذیری پل‌ها در زون ۸ و آسیب‌پذیری روسازه راه در زون‌های ۱۵، ۱۲، ۱۰ و ۱۴ و آسیب‌پذیری خطوط آب و فاضلاب در زون‌های ۱۲ و ۳ بیشترین میزان است.

References

American Lifelines Alliance (2001). *Seismic Fragility Formulations for Water Systems: Part 1 – Guideline*. ASCE-FEMA.

Bahreini, S.H., et al. (1993), *The Role of form, Pattern and Dwelling Dimensions in Seismic Mitigation*. Tehran, Iran: Iranian Center for Disaster Response.

Bastami, M., Abbasnejadfad, M., Motamed, H., Ansari, A., & Garakaninezhad, A. (2022), Development of hybrid earthquake vulnerability functions for typical residential buildings in Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 77.

نیمه‌شب را بررسی می‌کند از محاسبه تلفات و مصدومان در ساختمان‌های آموزشی صرف نظر شد. برآورد تراکم جمعیت ساکنین در منطقه مطالعاتی نشان داد زون ۱۶ نسبت به سایر زون‌ها دارای بیشترین تراکم جمعیت است.

ارزیابی آسیب‌پذیری اجزای اصلی شبکه راه شامل پل‌ها، تونل‌ها و روسازه راه نشان داد احتمال قرارگیری یک پل در سطح خرابی شدید در زون ۸ وجود دارد. همچنین احتمال قرارگیری تونل‌ها در سطح خرابی شدید و فروریزش ناچیز است. علاوه بر این، ارزیابی آسیب‌پذیری روسازه راه‌ها نشان داد بر اساس شکل (۶) زون‌های ۱۵، ۱۲، ۱۰ و ۱۴ بیشترین میزان خرابی روسازه در اثر سناریو زلزله مفروض متحمل خواهند شد. این امر به دلیل بالا بودن پتانسیل زمین‌لغزش و گسلش (در زون‌های ۱۰ و ۱۲) است (Shirvani Harandi, 2024c). ارزیابی درصد انسداد راه‌ها در اثر فروریزش سازه‌های مجاور در شکل (۵) نشان می‌دهد درصد انسداد راه‌ها نیز در شمال منطقه چهار و در زون‌های ۳، ۱۶، ۸، ۱، ۶ و ۱۷ نسبت به سایر نواحی بیشتر است. این امر به دلیل نرخ بیشتر فروریزش سازه‌ها و درصد بیشتر معابر باریک در این مناطق است. همچنین با توجه به وجود تعداد محدود و پراکنده ساختمان‌های صنعتی کوتاه‌مرتبه (اکثرأ یک طبقه) در زون ۱۸، درصد انسداد راه‌ها در این زون حداقل است.

بررسی آسیب‌پذیری خطوط آب و فاضلاب در منطقه مطالعاتی نشان داد به دلیل وجود لوله‌های بتنی با طول زیاد در زون ۱۲ و لوله‌های چدنی و بتنی با طول زیاد در زون ۳، تعداد نقاط شکست محاسبه شده برای این المان‌ها در اثر سناریوی زلزله مفروض در این زون‌ها نسبت به سایر زون‌ها بیشتر است.

۱۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا مطالعات پیشین در حوزه برآورد خسارات، تلفات و مصدومیت‌های ناشی از زلزله مرور گردید. سپس به بررسی مدل‌های ارائه شده برای تخمین درصد انسداد راه در اثر ریزش سازه‌های مجاور پرداخته شد. در گام بعد با به‌کارگیری

- (2013). *SYNER-G Guidelines for Deriving Seismic Fragility Functions of Elements at Risk: Buildings, Lifelines, Transportation Networks and Critical Facilities*. Publications Office of the European Union.
- Mansouri, B., Kiani, A., & Amini Hosseini, K. (2014). A platform for earthquake risk assessment in Iran case studies: Tehran Scenarios and Ahar-Varzeghan Earthquake. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 16(1), 51-69.
- Mansouri, B., Kiani, A., & Govahi, N. (2015). Developing a GIS-based model for road blockage assessment. *7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran.
- Mansouri, B., Nourjou, R., & Hosseini, K.A. (2008). Comprehensive GIS-based solution for road blockage due to seismic building collapse in Tehran. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- O'Rourke, M.J., & Castro, G. (1980). Effects of seismic wave propagation upon buried pipelines. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 8, 455-467.
- O'Rourke, M.J., & Xuejie, L. (1999). *Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects*. New York: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Sadeghi, M., Ghafory-Ashtiany, M., & Pakdel-Lahiji, N. (2015). Developing seismic vulnerability curves for typical Iranian buildings. *Journal of Risk and Reliability*, 229(6).
- Shirvani Harandi, V., Amini Hosseini, K., & Mansouri, B. (2024a). Evaluation of rate of damages, fatalities, injured and road blockage due occurrence of probable earthquake in district 4 of Qom city. *Ninth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*. Tehran, Iran (in Persian).
- Shirvani Harandi, V., Amini Hosseini, K., & Mansouri, B. (2024c). Assessing the effect of physical and social parameters on seismic risk of urban transportation networks. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- Shirvani Harandi, V., Mansouri, B., & Amini Hosseini, K. (2024b). New fragility curves for evaluation of the vulnerability of bridges to earthquakes in Iran. *Structural Engineering International*.
- Coburn, A.W., Spence, R. J.S., & Pomonis, A. (1992). Factors determining human casualty levels in earthquakes: Mortality prediction in building collapse. *Earthquake Engineering Tenth World Conference*. Madrid, Spain.
- Coşar, A., Koçak, A., Şükrü Özçoban, M., & Akgüner, C. (2013). Effect of seismicity on infrastructure pipeline. *2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering (BCCCE)*, Epoka University, Tirana, Albania.
- Eshghi, S., & Aharo, M. (2005). Performance of transportation systems in the 2003 Bam, Iran, Earthquake. *Earthquake Spectra*, 21(S1), S455-S468.
- Fallah Tafti, M., Amini Hosseini, K., & Mansouri, B. (2020). Generation of new fragility curves for common types of buildings in Iran. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 3079-3099.
- Farahani, S., Behnam, B., & Tahershamsi, A. (2020). Macrozonation of seismic transient ground displacement and permanent ground deformation of Iran. *Natural Hazards and Earth system Science*.
- Firuzi, E., Amini Hosseini, K., Ansari, A., & Tabasian, Sh. (2022). Developing a new fatality model for Iran's earthquakes using fuzzy regression analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 80.
- HAZUS-MH. (2003). *Multi-Hazard Loss Estimation Methodology-Technical Manual*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- Hedayati Goudarzi, M. (2013). *Assessment of the Vulnerability of Urban Isolated Box Girder Bridges Using Fragility Curves*. Master Thesis, University of Science and Technology, Tehran, Iran (in Persian).
- Japan Water Works Association (1998). *Seismic Damage Estimation Procedure for Water*.
- JICA. (2004). *The Comprehensive Master Plan Study on Urban Seismic Disaster Prevention and Management for the Greater Tehran Area*. Tehran, Iran: Tehran Disaster Mitigation and Management Center.
- Kamalian, M., Jafari, M.K., Ghayamghamian, M.R., Shafiee, A., Hamzehloob, H., Haghshenas, E., & Sohrabi-bidarab, A. (2008). Site effect microzonation of Qom, Iran. *Engineering Geology*, 97(1-2), 63-79.
- Kaynia, A., Iervolino, I., Taucer, F., & Hancilar, U.

Tabasian, S., & Amini Hoseini, K., (2019). Developing a new model for estimating the number of the injured after potential earthquakes for Iran. In *8th Int. Conf. of Seismology and Earthquake Eng. (SEE8)*, Tehran, Iran.

Vacareanu, R., Lungu, D., Aldea, A., & Arion, C. (2004). *RISK-UE Project: An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Application to Different European Towns*. Springer.

Assessment of Key Parameters Affecting Vulnerability in District 4 of Qom City Due to a Potential Earthquake

Vahideh Shirvani Harandi^{1*}, Kambod Amini Hosseini² and Babak Mansouri²

1. Ph.D. Candidate, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: vahideh.shirvani@stu.iiees.ac.ir
2. Associate Professor, Faculty of Risk Management, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

Many cities in Iran are constantly at risk of destructive earthquakes due to their location within seismically active zones. In these cities, outdated infrastructure, non-resistant buildings, and inefficient road networks amplify the potential for damage, casualties, and disruptions in post-earthquake rescue operations. To mitigate these risks, it is crucial to evaluate the factors contributing to urban vulnerability, which will help in developing effective mitigation and response strategies. This research assesses both the physical and social vulnerability of urban infrastructure in District 4 of Qom County, a densely populated and strategically important region in central Iran. The study's findings are intended to guide future planning efforts aimed at reducing earthquake risk and enhancing urban resilience. Urban vulnerability is a multifaceted concept that encompasses a variety of physical and social components. In this study, key physical elements such as buildings, critical infrastructure, and road networks were evaluated. This evaluation also included specific components like bridges, road pavement, tunnels, and water and sewage pipelines. The vulnerability of these elements was analyzed under an earthquake scenario with a 475-year return period, a standard for seismic risk assessment.

Additionally, social vulnerability factors such as the anticipated percentage of casualties and injuries, along with population density, were incorporated into the analysis. The evaluation of building vulnerability indicates that several zones within District 4 are particularly susceptible to significant structural damage. Zones 3, 2, 9, 6, 7, 8, 16 and 17, along with parts of Zones 4 and 1, are expected to experience the most substantial destruction. This heightened risk is attributed to the high concentration of low- and medium-quality masonry buildings, many of which are older and lack proper seismic resistance. In contrast, the southern areas of District 4, including Zones 15, 14, 10, 12 and 13, feature newer construction with lower population densities. Buildings in these zones are generally of higher quality, which reduces the likelihood of severe damage or collapse during a seismic event. Zones with a higher concentration of vulnerable buildings also tend to have denser populations, leading to an increased risk of casualties and injuries. In northern District 4, where structural damage is expected to be more severe, the potential for human loss is correspondingly higher. In addition to buildings, the study also assessed the vulnerability of critical road network components, including bridges, tunnels, and road pavement. The findings suggest that one bridge in Zone 8 is at a high risk of experiencing severe damage. However, tunnels in the district are less vulnerable to collapse. The road pavement in Zones 15, 12, 10 and 14 is particularly prone to damage due to landslide risks and surface faulting, especially in Zones 10 and 12. Such vulnerabilities could lead to major disruptions in transportation, further complicating post-earthquake recovery efforts. The assessment of road blockages caused by debris from collapsed buildings revealed that the northern areas of District 4 would experience the most severe blockages, particularly in Zones 3, 16, 8, 1, 6 and 17.

This is primarily due to the high rate of structural collapse and the prevalence of narrow streets in these zones. By contrast, Zone 18, which mainly consists of low-rise industrial buildings, is expected to experience minimal road blockages. Lastly, the study examined the vulnerability of water and sewage pipelines in District 4. It was found that Zones 3 and 12 are at higher risk of pipeline ruptures due to the widespread use of long concrete pipes in these areas.

These materials are more susceptible to damage under seismic stress, making these zones particularly vulnerable to disruptions in water and sewage services during an earthquake.

Keywords: Earthquake, Physical and Social Vulnerability, Fatalities, Injured, Loss, Main Road Components, Water and Wastewater Pipelines