تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۲

DOI: 10.48303/bese.2024.2011107.1135

نوع مقاله: پژوهشی

ارائه مدل جامع ارزیابی و کاهش ریسک شبکه راه‌های شهری در برابر زلزله؛ مطالعه موردی: شهر قم

وحیده شیروانی هرندی
دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

کامبد امینی حسینی (نویسنده مسئول)
دانشیار، پژوهشکده مدیریت بحران و خطرپذیری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، kamini@iiees.ac.ir

بابک منصوری
دانشیار، پژوهشکده مدیریت بحران و خطرپذیری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

چکیده

شبکه‌های راه یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های عمرانی برای انجام عملیات واکنش اضطراری پس از زلزله را تشکیل می‌دهند. با توجه به ضرورت انجام عملیات امداد و نجات در ۷۲ ساعت اول پس از زلزله که به آن زمان طلایی گفته می‌شود، عدم وجود شبکه راه کارآمد منجر به افزایش قابل توجه تلفات و خسارات می‌گردد. بنابراین نیاز اساسی به تهیه ابزارهای مدیریتی جهت کمک به کاهش ریسک شبکه راه در صورت وقوع زلزله و اعمال اقدامات مداخله مناسب قبل وقوع زلزله وجود دارد. در این راستا، در این مقاله ابتدا مدلی جامع برای ارزیابی ریسک شبکه راه‌های درون‌شهری با تأکید بر مؤلفه‌های فیزیکی و اجتماعی ارائه شده است. در این مدل چهار شاخص خطر، آسیب‌پذیری، ظرفیت پاسخ و مؤلفه‌های عملکردی به‌عنوان شاخص‌های اصلی ریسک در نظر گرفته شد. در گام بعدی مدل پیشنهادی در منطقه چهار شهر قم پیاده‌سازی شد و زون‌های با ریسک بالا شناسایی شدند. سپس اقدامات مداخله مناسب ارائه و اولویت‌بندی شدند. نتایج نشان می‌دهد اقداماتی نظیر پایدارسازی شیب‌ها در نواحی با پتانسیل بالای زمین‌لغزش، تعریض معابر در زون‌های با درصد بالای راه‌های باریک و مقاوم‌سازی سازه‌های مجاور راه به ترتیب منجر به کاهش متوسط ریسک تا حدود ۱۲/۲، ۷/۴ و ۱۱/۸۵ درصد می‌شود. علاوه بر این، با توجه به عدم وجود شبکه راه اضطراری در شهر قم، ایجاد این شبکه منجر به بهبود ظرفیت پاسخ و کاهش ریسک در منطقه مطالعاتی تا حدود ۶/۶ درصد می‌گردد.

واژگان کلیدی: ریسک شبکه راه، زلزله، مدل جامع، مداخلات بهینه، راهکارهای کاهش ریسک، مؤلفه‌های فیزیکی و اجتماعی.

۱- مقدمه

کشور ایران به‌واسطه موقعیت جغرافیایی، شرایط اقلیمی و وضعیت زمین‌شناختی از جمله کشورهای در معرض سوانح طبیعی نظیر زلزله محسوب می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که اغلب زیرساخت‌های کشور از جمله شبکه راه در برابر زلزله آسیب‌پذیرند. تجربه زلزله‌های گذشته نشان داده است که خرابی‌های ناشی از زلزله می‌تواند به‌صورت جدی جریان ترافیک را مختل کند و به دنبال آن بر اقتصاد منطقه، اقدامات پاسخ اضطراری بعد زلزله، بازتوانی و عملیات بازسازی تأثیر گذاشته و منجر به پیامدهای اجتماعی و اقتصادی جبران‌ناپذیری شود.

برای مثال در زلزله رودبار منجیل در ۳۱ خرداد سال ۱۳۶۹ بسیاری از راه‌ها، پل‌ها و تونل‌ها خرابی‌های شدیدی را متحمل شدند. همچنین، زمین‌لغزش و روانگرایی منجر به خرابی بسیاری از معابر در شبکه راه شد (Amini Hosseini & Chavoshi, 2018). در زلزله بم فروریزش سازه‌های مجاور راه منجر به انسداد بسیاری از راه‌ها و از دسترس خارج شدن بخش قابل توجهی از شهر برای انجام اقدامات امداد و نجات پس از زلزله شد (Eshghi & Aharo, 2005).

تاکنون مطالعات زیادی برای ارزیابی ریسک و آسیب‌پذیری شبکه راه انجام شده است. این مطالعات به‌طورکلی با تکیه بر دو رویکرد مبتنی بر ارزیابی شاخص ریسک و رویکرد مبتنی بر

تحلیل اختلالات ترافیکی انجام شده است. در رویکرد اول ابتدا مؤلفه‌های مؤثر بر ریسک قطعات راه شناسایی شده، سپس این مؤلفه‌ها بر اساس تأثیرشان بر ریسک وزن‌دهی می‌گردند. در نهایت، روابطی برای تخمین این شاخص با توجه به مؤلفه‌های مؤثر ارائه شده است.

برای مثال، Adafer و Bensaibi در سال ۲۰۱۶ با استفاده از شاخص آسیب‌پذیری، قطعات راه در الجزایر را کلاس‌بندی کردند. در مطالعه آنها دو مؤلفه اصلی ویژگی ساختاری و خطر برای ارزیابی شاخص آسیب‌پذیری در نظر گرفته شد. مؤلفه ساختار شامل روسازه، خاک‌ریز، شرایط زمین (نوع زمین و پتانسیل زمین‌لغزش) و شرایط نگه‌داری (شرایط روسازه و اقدامات مراقبت از شیب) می‌شود. برای مؤلفه خطر نیز مؤلفه‌های شدت لرزه‌ای، پتانسیل روان‌گرایی و تقاطع با گسل در نظر گرفته شد (Adafer & Bensaibi, 2017). همچنین رستگار در سال ۲۰۱۷ با به‌کارگیری هفت شاخص میزان انسداد راه‌ها، دسترسی به مراکز درمانی، تراکم ساختمان‌ها، تراکم جمعیت، کاربری ساختمان‌های مجاور راه، بیشینه شتاب زمین و کیفیت سازه‌ها، درجه آسیب‌پذیری شبکه خیابانی منطقه ۶ تهران را در برابر زلزله بررسی کرد (Rastegar, 2017).

علاوه بر این، Francini و همکاران از چهار مؤلفه طول راه، عرض راه، درجه افزونگی راه و المان‌های بحرانی (پل‌ها، تقاطع‌ها، زیرگذرها، تونل‌ها و غیره) برای فرمول‌بندی شاخص آسیب‌پذیری راه‌های شهری استفاده کردند. سپس از ترکیب وزنی این المان‌ها شاخص آسیب‌پذیری هر قطعه‌راه را محاسبه نمودند (Francini et al. 2020).

در مطالعه‌ای دیگر Djemai و همکاران آسیب‌پذیری پل‌ها را به‌عنوان اعضای مهم شبکه راه با روش شاخص آسیب‌پذیری ارزیابی کردند. در مدل آنها مؤثرترین مؤلفه‌ها بر رفتار لرزه‌ای پل‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)[1] تعیین و وزن‌دهی شدند (Djemai et al. 2019). همچنین وزارت حمل‌ونقل ایالات‌متحده ابزار رتبه‌بندی آسیب‌پذیری (VAST)[2] را برای ارزیابی آسیب‌پذیری مؤلفه‌های حمل‌ونقل با استفاده از روش مبتنی بر شاخص که در آن معرضیت، حساسیت و ظرفیت تطبیقی سه مؤلفه اصلی آسیب‌پذیری بودند، توسعه داد. از VAST می‌توان برای ارزیابی و رتبه‌بندی آسیب‌پذیری پل‌ها، جاده‌ها، ریل‌ها، بندرها و آبراه‌ها، فرودگاه‌ها و شبکه‌های نفت و گاز استفاده کرد و به مدیران و مسئولان ذی‌ربط در اولویت‌بندی برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری کمک کرد (Gaitanidoua et al., 2016).

حاجی بابایی در مطالعه خود شاخص ریسک شبکه راه را به‌صورت تابعی از خرابی فیزیکی راه‌ها در اثر جابه‌جایی ماندگار زمین (PGD)[3] و نسبت طول و عرض متوسط هر دسته راه (اصلی، فرعی و باریک) به کل راه‌ها محاسبه کرد. در نهایت ریسک حمل‌ونقل با ترکیب وزنی میزان خرابی در راه‌های اصلی، فرعی و باریک محاسبه گردید (Hajibabaee et al., 2014).

رویکرد دوم، ارزیابی ریسک شبکه راه با توجه به توپولوژی شبکه و اختلالات ترافیکی ناشی از آسیب‌های ایجاد شده در شبکه راه است. در این روش به‌طور معمول از مؤلفه‌های عملکردی نظیر زمان سفر، مسافت، اتصال، دسترسی و غیره برای ارزیابی ریسک استفاده می‌شود (Balijepalli & Oppong, 2014, Zhang et al., 2020, Zamanifar et al., 2014, Kilanitis & Sextos, 2019).

با توجه به اهمیت شبکه راه پس از وقوع زلزله جهت دسترسی به مناطق آسیب‌دیده، می‌بایست اقدامات لازم برای ارتقای عملکرد این شبکه از قبل اندیشیده شده باشد. در این راستا ایجاد ابزارهای کمک به تصمیم‌گیری مدیریتی در جهت کنترل اوضاع ترافیک در شرایط بحران و پیشگیری از زیان‌های اقتصادی و اجتماعی مرتبط، امری الزامی به نظر می‌رسد. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد تاکنون مدلی جامع برای ارزیابی ریسک شبکه راه ارائه نشده است. در جدول (۱) پارامترهای در نظر گرفته شده، روش ارزیابی ریسک و چالش‌های موجود در برخی مطالعات برجسته در حوزه ریسک شبکه راه به‌اختصار بیان شده است. اغلب این مطالعات بر تعداد محدودی از مؤلفه‌های فیزیکی متمرکز بوده و تأثیر مؤلفه‌های اجتماعی و مؤلفه‌های مؤثر بر ظرفیت پاسخ و بهبود مدیریت بحران را نادیده گرفته‌اند.

جدول (۱): خلاصه پیشینه پژوهش‌های انجام شده در حوزه ریسک شبکه راه.

مراجع	مؤلفه‌های در نظر گرفته شده	روش بررسی ریسک	چالش‌ها
Hwang et al. (2000)	پل‌ها و راه‌ها	شناسایی کوتاه‌ترین مسیرهای پاسخ اضطراری با کمک GIS	پل ها و راه ها به عنوان تنها اجزای آسیب پذیر شبکه راه در نظر گرفته شده است/ فقط بر خسارات فیزیکی پل ها و راهها متمرکز شده است/ اثر پارامترهای اجتماعی در ریسک بررسی نشده است.
Werner et al. (2006) (REDARS 2)	پل‌ها، خاک‌ریزها، جاده‌ها و تونل‌ها، روسازه راه، ویژگی‌های توپولوژیکی شبکه راه	بررسی خطر لرزه‌ای/ بررسی فهرست شبکه/ ارزیابی خرابی پل‌ها و لینک‌ها/ مدل‌سازی شبکه و جریان ترافیک/ تخمین خسارات مستقیم و غیرمستقیم (رویکرد مبتنی بر تحلیل اختلالات ترافیکی)	بر اساس فرضیات ساده کننده‌ای است که منجر به خطا در نتایج تحلیل ریسک می‌شود/ اثر پارامترهای اجتماعی در ریسک بررسی نشده است/ بر اساس شرایط آمریکا است.
Zamanifar et al. (2014)	پل‌ها، روسازه، تونل‌ها و لایه‌های اساس	ارزیابی عملکرد شبکه راه با توجه به آسیب‌پذیری مؤلفه‌ها و ویژگی‌های توپولوژیکی شبکه (رویکرد مبتنی بر تحلیل اختلالات ترافیکی)	اثر پارامترهای اجتماعی و بسیاری از مؤلفه‌های فیزیکی و ظرفیت پاسخ در نظر گرفته نشده است.
Ertugay et al. (2016)	پل‌ها، روگذرها و ساختمان‌ها مجاور راه	بررسی دسترسی به مراکز اضطراری (شاخص دسترسی) با توجه به زمان سفر و با در نظر گرفتن احتمال انسداد راه‌ها در اثر زلزله با تکنیک‌های مبتنی بر GIS	آسیب پذیری برخی مولفه های فیزیکی شبکه راه نظیر تونل ها، دیوارهای حائل و غیره و پارامترهای اجتماعی در نظر گرفته نشده است.
Adafer & Bensaibi (2017)	آسیب‌پذیری ساختاری (روسازه، خاک‌ریز، شرایط زمین و شرایط نگه‌داری) و خطر (شدت لرزه‌ای، پتانسیل روان‌گرایی و تقاطع با گسل)	رویکرد مبتنی بر ارزیابی شاخص ریسک	آسیب‌پذیری پارامترهای های فیزیکی (پل، تونل و غیره) و تاثیر پارامترهای اجتماعی، مؤلفه های عملکردی وظرفیت پاسخ در نظر گرفته نشده است.
Gaitanidoua et al. (2016) (VAST)	پل‌ها، راه‌ها و ریل‌ها	رویکرد مبتنی بر ارزیابی شاخص ریسک با در نظر گرفتن سه مؤلفه معرضیت، حساسیت و ظرفیت تطبیقی	تأثیر پارامترهای اجتماعی، ظرفیت پاسخ و مولفه های عملکردی و اثر اندرکنش پارامترها بر یکدیگر در نظر گرفته نشده است.
Rastegar (2017)	دسترسی به مراکز درمانی، چگالی ساختمان‌ها و جمعیت، کاربری ساختمان‌های مجاور راه و کیفیت سازه‌ها	رویکرد مبتنی بر ارزیابی شاخص ریسک	بسیاری از پارامترهای فیزیکی (پل، تونل و غیره)، اجتماعی، عملکردی و ظرفیت پاسخ در نظر گرفته نشده است.
Francini et al. (2020)	مؤلفه‌های معرضیت (تخمین کاربرانی که در اثر زلزله به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم آسیب می‌بینند)، آسیب‌پذیری (طول راه، عرض راه، المان‌های بحرانی و افزونگی) و خطر (مخاطرات طبیعی)	محاسبه ریسک با ضرب شاخص آسیب‌پذیری در شاخص خطر در شاخص معرضیت انجام شد/ شاخص خطر با استفاده از تحلیل ساختاری و مدل‌سازی در GIS، شاخص آسیب‌پذیری با استفاده از تحلیل AHP و شاخص معرضیت با منطق فازی محاسبه شد	در این روش میزان خرابی المان‌های بحرانی (پل، تونل و...) بررسی نشده و فقط وجود و عدم وجود آن ها در محاسبه ریسک در نظر گرفته شده است/ شاخص معرضیت تأثیر ناچیزی در محاسبه شاخص ریسک داشته و در مطالعات آینده، شاخص ریسک بهتر است به‌صورت حاصل‌ضرب شاخص آسیب‌پذیری در شاخص خطر محاسبه شود.

ادامه جدول (۱).

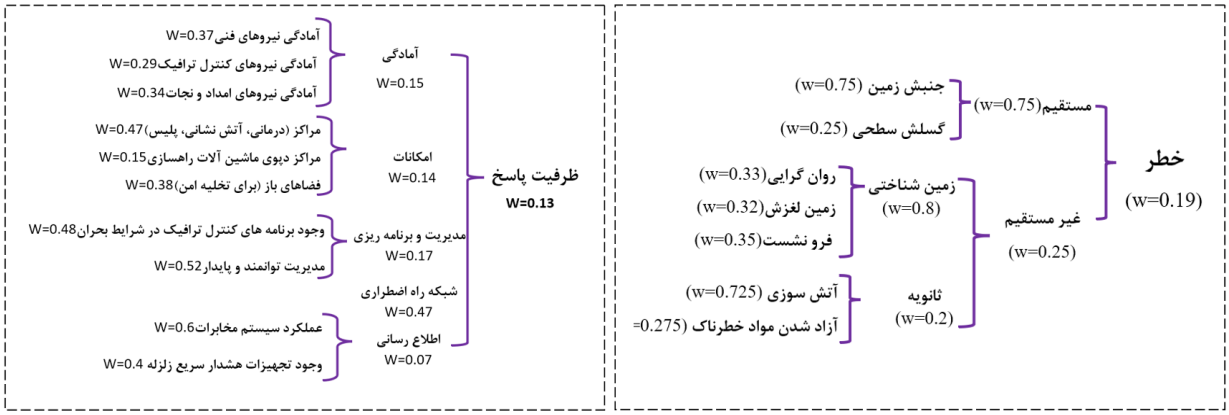
مراجع	مؤلفه‌های در نظر گرفته شده	روش بررسی ریسک	چالش‌ها
Feng et al. (2020)	مؤلفه‌های اجتماعی (استرس رانندگان و در دسترس نبودن اطلاعات ترافیکی)، فیزیکی (خرابی پل‌ها و اختلال ظرفیت ترافیک ناشی از خرابی پل و آوار سازه‌ها) و ترافیکی (تغییرات جریان ترافیک، نیاز و زمان سفر، تعداد خودروها در هر لینک)	توسعه مدل مبتنی بر عامل (راننده، لینک) برای مدل‌سازی الگوهای ترافیک متغیر با زمان در یک منطقه شهری بلافاصله پس از زلزله/ معیار عملکرد لرزه‌ای شبکه، توانایی سیستم ترافیک در شرایط تخریب شده برای انتقال مصدومان به بیمارستان‌ها در مدت زمان مناسب در نظر گرفته شد (رویکرد مبتنی بر تحلیل اختلالات ترافیکی)	برخی مؤلفه‌های فیزیکی نظیر روسازه و تونل و غیره در نظر گرفته نشده است/ محدودیت اصلی این مطالعه زمان‌بر بودن شبیه‌سازی است برای غلبه بر این مشکل به متدولوژی‌های جدید نیاز است.
Shang et al. (2022)	انسداد راه‌ها در اثر ریزش آوار، خرابی پل‌ها، تلفات و مصدومان ناشی از خرابی ساختمان‌ها	ارزیابی دسترسی به خدمات درمانی پس از زلزله با محاسبه زمان سفر تحت شرایط خرابی پل‌ها و مسدود شدن راه‌ها در اثر ریزش آوار سازه‌ها (رویکرد مبتنی بر تحلیل اختلالات ترافیکی)	عملکرد شبکه راه پس از زلزله تنها با بررسی تأثیر خرابی سازه‌های مجاور راه بر انسداد راه‌ها و خرابی پل‌ها ارزیابی شد و از بسیاری از پارامترهای مؤثر چشم‌پوشی گردید.

بر این اساس، در این پژوهش ابتدا مدلی جامع برای ارزیابی ریسک شبکه راه با تأکید بر مؤلفه‌های فیزیکی و اجتماعی ارائه شده است. سپس این مدل در منطقه چهار شهر قم پیاده‌سازی شده و با شناسایی مناطق با ریسک بالا و نقاط ضعف موجود، اقدامات مداخله بهینه برای کاهش ریسک شبکه راه ارائه شده و بر اساس تأثیرشان بر ریسک اولویت‌بندی شدند.

۲- ارائه مدل جامع ریسک شبکه راه

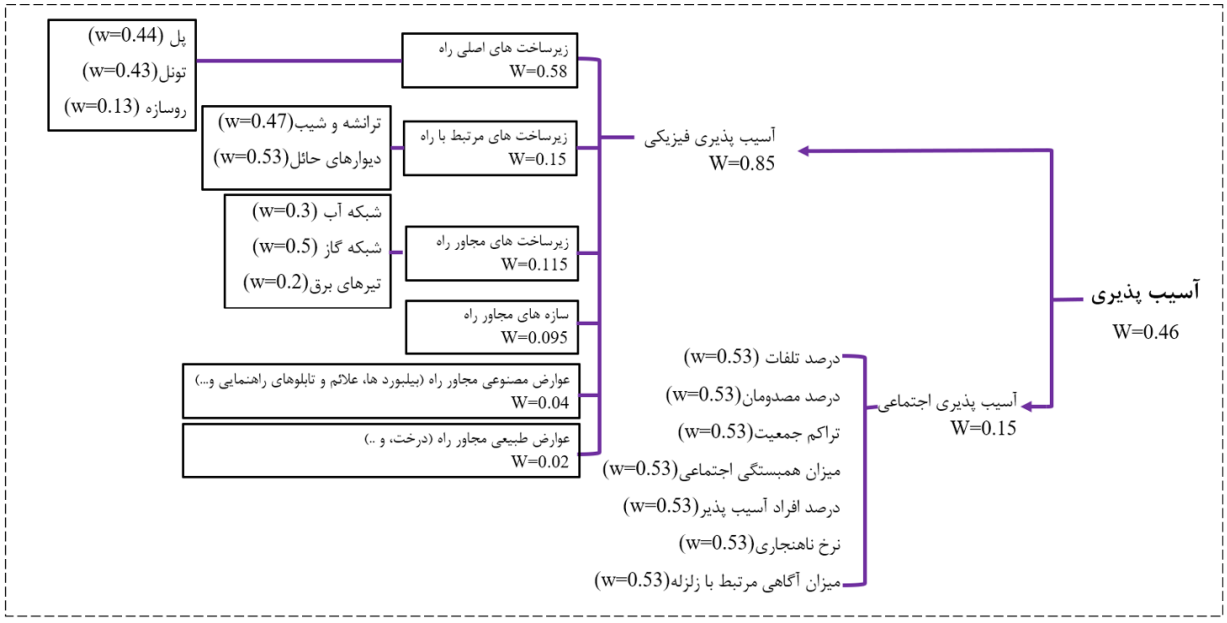
برای ارائه مدل ریسک پیشنهادی ابتدا مؤلفه‌های فیزیکی و اجتماعی مؤثر بر ریسک شبکه راه با مطالعه و بررسی جامع ادبیات فنی، گزارش‌های زلزله‌های پیشین و تجربیات حاصل از آنها و نظرسنجی از کارشناسان این حوزه استخراج و طبقه‌بندی شدند. بر این اساس شاخص‌های خطر، آسیب‌پذیری، ظرفیت پاسخ و مؤلفه‌های عملکردی چهار شاخص اصلی این مدل در نظر گرفته شدند.

هر یک از این شاخص‌ها از زیرشاخص‌هایی تشکیل شده است. شاخص خطر شامل خطرهای مستقیم (جنبش زمین و گسلش سطحی) و غیرمستقیم (زمین‌شناختی و ثانویه) شاخص آسیب‌پذیری شامل آسیب‌پذیری فیزیکی و اجتماعی و شاخص ظرفیت پاسخ شامل مؤلفه‌های آمادگی، امکانات، مدیریت و برنامه‌ریزی، شبکه راه‌های اضطراری و اطلاع‌رسانی می‌شود. شاخص مؤلفه‌های عملکردی مربوط به مؤلفه‌های مؤثر بر عملکرد شبکه راه بوده و شامل ویژگی‌های توپولوژیکی (کالبدی) شبکه راه، سیستم‌های مسیریابی و کنترل ترافیک هوشمند (ITS)[۴] و پارامترهای اجتماعی مؤثر بر عملکرد شبکه راه می‌گردد. در گام بعد این شاخص‌ها با نظرسنجی از ۳۰ کارشناس در حوزه مهندسی زلزله، حمل‌ونقل و مدیریت بحران با روش AHP وزن‌دهی شدند. این کارشناسان شامل اساتید دانشگاه، کارشناسان مراکز تحقیقاتی و مهندسین شاغل در رشته‌های مرتبط می‌شدند. روش AHP برای اولین بار توسط ساعتی در سال ۱۹۸۰ ارائه شد (Saaty, 2008). این روش تکنیکی قدرتمند برای حل مسائل چند معیاره است. در این مطالعه ضریب ناسازگاری در مقایسات تحلیل AHP کمتر از ۰/۱ بود که نشان‌دهنده سازگار بودن مقایسه‌ها است. در گراف‌های شکل (۱) نیز پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل ریسک و وزن هر یک با استفاده از روش AHP آورده شده است.



(الف) شاخص خطر

(ب) ظرفیت پاسخ



(پ) آسیب‌پذیری

(ت) پارامترهای عملکردی

شکل (۱): شاخص‌ها و زیر شاخص‌های مدل پیشنهادی و وزن‌های تخصیص یافته به هریک.

در گام بعد هریک از شاخص‌های اصلی با استفاده از معادله(۱) کمّی‌سازی شدند.

$$I_j = \sum_{m=1}^{m=n} W_{mj} \times Value(m_j) \quad 0 \le I_j \le 1 \qquad (۱)$$

در این معادله، I_j بیانگر هر یک از چهار شاخص اصلی مدل (خطر، آسیب‌پذیری، ظرفیت پاسخ و پارامترهای عملکردی) است. همچنین n تعداد زیرشاخص‌های هر شاخص و W_{mj} مربوط به وزن هریک از آنها است. $Value(m_j)$ فاکتوری نرمالیزه شده و بدون بعد است که بیانگر ارزش مقادیر هر شاخص در منطقه مطالعاتی است. همچنین مجموع وزن زیرشاخص‌های هر یک از شاخص‌ها برابر یک است.

پس از تخمین چهار پارامتر اصلی مدل ریسک پیشنهادی بر اساس رابطه فوق، شاخص ریسک را می‌توان با استفاده از معادله (۲) تخمین زد.

$$R = \frac{Vul \times Haz \times Func}{1 + RC} \qquad (۲)$$

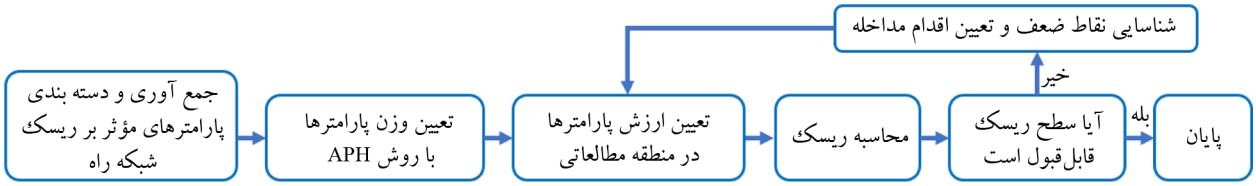
در این معادله، Vul، Haz، Func و RC به ترتیب بیانگر شاخص آسیب‌پذیری، شاخص خطر، مؤلفه‌های عملکردی و ظرفیت پاسخ هستند. در این معادله با توجه به رابطه مستقیم ریسک شبکه راه با پارامترهای خطر، آسیب‌پذیری و پارامترهای عملکردی، این شاخص‌ها در صورت کسر قرار گرفته‌اند و با توجه به رابطه معکوس ریسک با ظرفیت پاسخ، این شاخص در مخرج کسر قرار گرفته است. شکل (۲) فلوچارت روش ارزیابی ریسک شبکه راه را در این پژوهش نشان می‌دهد.

۳-پیاده‌سازی مدل در منطقه مطالعاتی

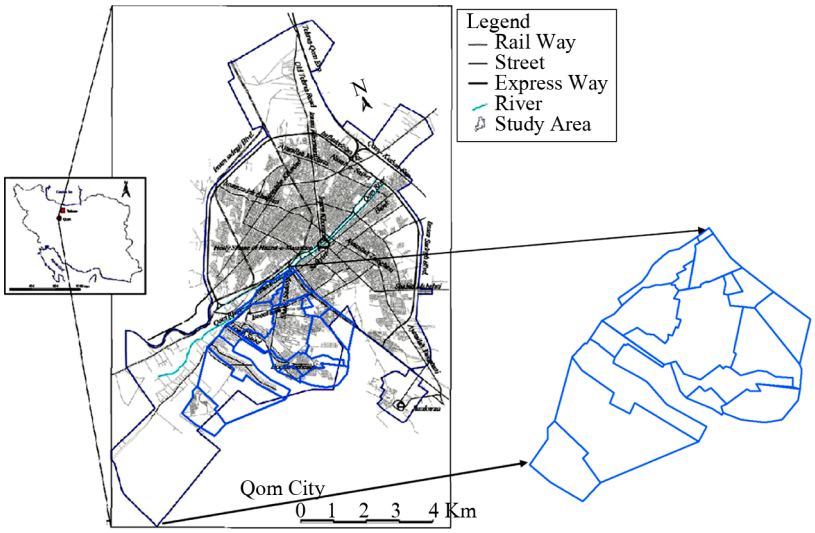
شهرستان قم با مساحت تقریبی ۱۸۰ کیلومتر مربع در ۱۲۰ کیلومتری تهران واقع شده است. این شهر طبق سرشماری ۱۳۹۵ دارای جمعیتی بالغ بر یک میلیون نفر بوده و هفتمین کلان‌شهر ایران محسوب می‌شود. قم در بخش مرکزی واحد لرزه‌زمین‌ساختی ایران قرار دارد. این شهر توسط گسل‌های فعال متعددی احاطه شده است (Kamalian et al., 2008). در این شهر علاوه بر خطر زلزله، مانند بسیاری از شهرهای ایران آسیب‌پذیری فیزیکی و اجتماعی نیز بالاست. وجود ساختمان‌های فرسوده، زیرساخت‌ها و شریان‌های حیاتی آسیب‌پذیر، معابر باریک، غیر مقاوم بودن بخش زیادی از شهر، عدم آمادگی و آگاهی شهروندان از زلزله و شرایط بحران، عدم وجود زیرساخت‌های لازم برای جستجو و نجات، واکنش اضطراری، تخلیه و اسکان اضطراری در شرایط بحران از جمله مشکلاتی است که ریسک شبکه راه در این شهر را افزایش می‌دهد.

در این مطالعه، شبکه راه منطقه ۴ شهر قم به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است. این منطقه با در بر داشتن حدود ۲۰ درصد از مساحت شهرستان قم و تعداد زیادی از ساختمان‌های اداری، تجاری و آموزشی، یکی از مناطق مهم استان قم محسوب می‌شود. یکی از ویژگی‌های این منطقه که آن را از سایر مناطق شهر قم متمایز می‌کند تنوع ساختار شهری است. به این معنا که این منطقه محلات مختلف با بافت شهری مدرن و فرسوده را شامل می‌شود. همچنین این منطقه بزرگ‌ترین منطقه این شهرستان است و بر اساس تقسیم‌بندی شهرداری شامل ۱۷ محله می‌شود.

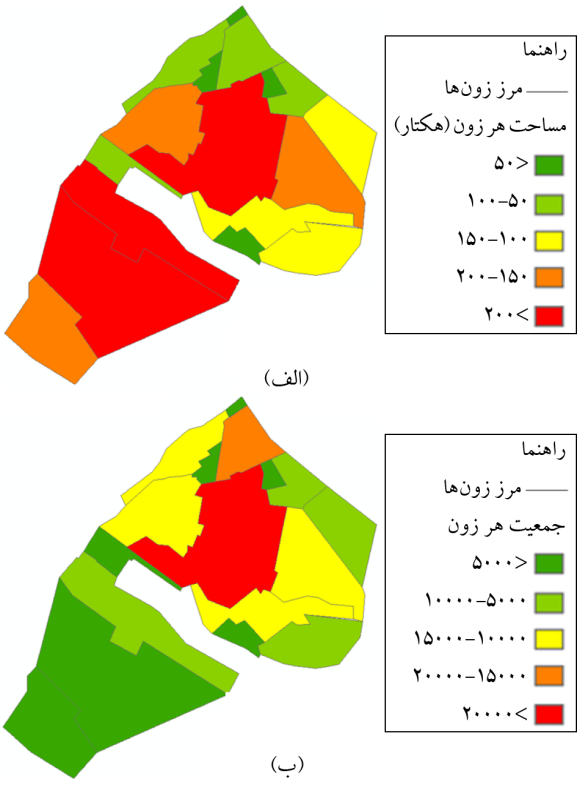
در این مطالعه هریک از این محلات به‌عنوان یک زون مطالعاتی در نظر گرفته شده است. شکل (۳) موقعیت شهر قم و منطقه مطالعاتی و شکل (۴) مساحت هر یک از زون‌ها و جمعیت ساکن در هر یک را نشان می‌دهد.



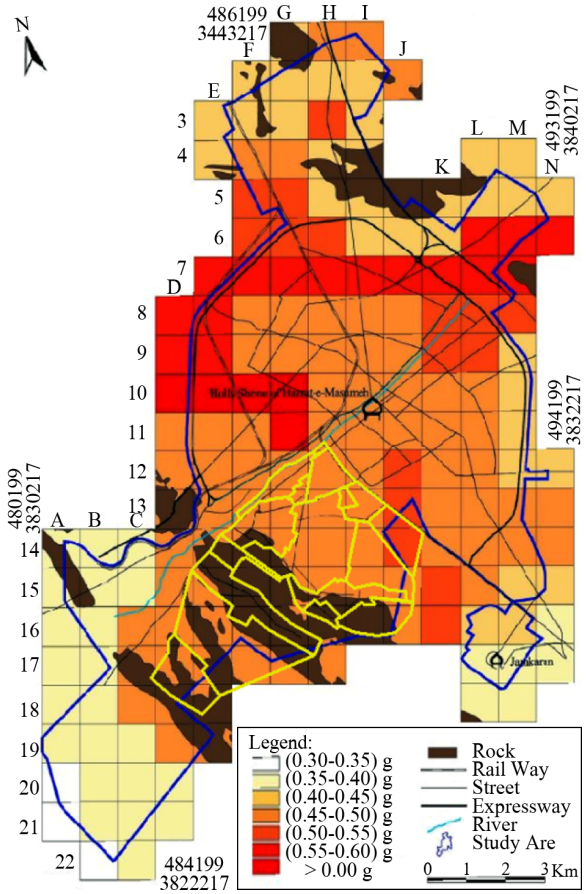
شکل (۲): فلوچارت روش پیشنهادی.



شکل (۳): موقعیت شهر قم و منطقه مطالعات.



شکل (۴): مقادیر (الف) مساحت هر زون (هکتار) و (ب) جمعیت زون‌های آماری منطقه ۴ شهر.

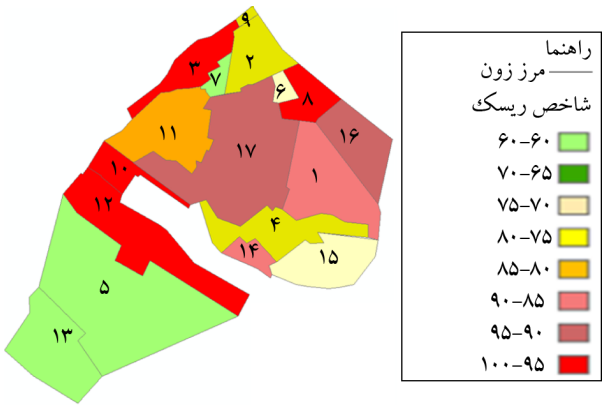


شکل (۵): نقشه میکروزونیشن ماکزیمم شتاب زمین در شهر قم (Kamalian et al., 2008).

برای ارزیابی پارامتر جنبش زمین از نقشه میکروزونیشن بیشینه شتاب زمین در شهر قم برای سناریو وقوع زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ سال در مطالعه کمالیان و همکاران استفاده شد (شکل ۵) (Kamalian et al., 2008). در این شکل مرز زون‌های منطقه مطالعاتی با رنگ زرد نشان داده شده است.

در این بخش مدل ریسک ارائه شده در بخش قبل برای سناریو وقوع زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ سال در ساعت اوج ترافیک عصر در منطقه مطالعاتی پیاده‌سازی شده است (شکل ۶).

محدوده مقادیر محاسبه شده برای ریسک شبکه راه در شکل (۶) بر حسب درصد نشان داده شده است. این مقادیر برای مقایسه بهتر نرمالیزه شده‌اند.



شکل (۶): ریسک شبکه راه در محلات مختلف منطقه چهار شهر قم.

۳- ارزیابی نقاط ضعف مناطق با ریسک بالا، ارائه و اولویت‌بندی اقدامات مداخله

همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، زون‌های ۳، ۱۰، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۱۷ دارای بیشترین مقدار ریسک در سناریو مفروض هستند. در جدول (۲) برخی از نقاط ضعف هر یک از این زون‌ها بررسی شده است. همچنین در این جدول با توجه به نقاط ضعف موجود در هر زون، اقدامات مداخله مناسب بر اساس فهرست ارائه شده در جدول (۳) تعیین گردیده و بر اساس تأثیرشان بر ریسک اولویت‌بندی شده‌اند.

همچنین در نمودارهای شکل (۷)، تأثیر هر یک از اقدامات مداخله بیان شده در جدول (۲)، در زون‌های مورد بررسی نشان داده شده است. علاوه بر این، در نمودار شکل (۸) تأثیر مجموعه اقدامات مداخله بیان شده در جدول (۲) در هر یک از زون‌ها نشان داده شده است. تأثیر مجموعه این اقدامات با تغییر ارزش پارامترهای مربوطه در منطقه مطالعاتی و محاسبه ریسک بر اساس معادلات (۱) و (۲) صورت گرفت. نمودار شکل (۸) نشان می‌دهد اعمال مجموعه اقدامات مداخله در اکثر زون‌های مورد بررسی به‌صورت تقریبی منجر به کاهش ریسک تا حدود ۵۰ درصد مقدار اولیه می‌شود.

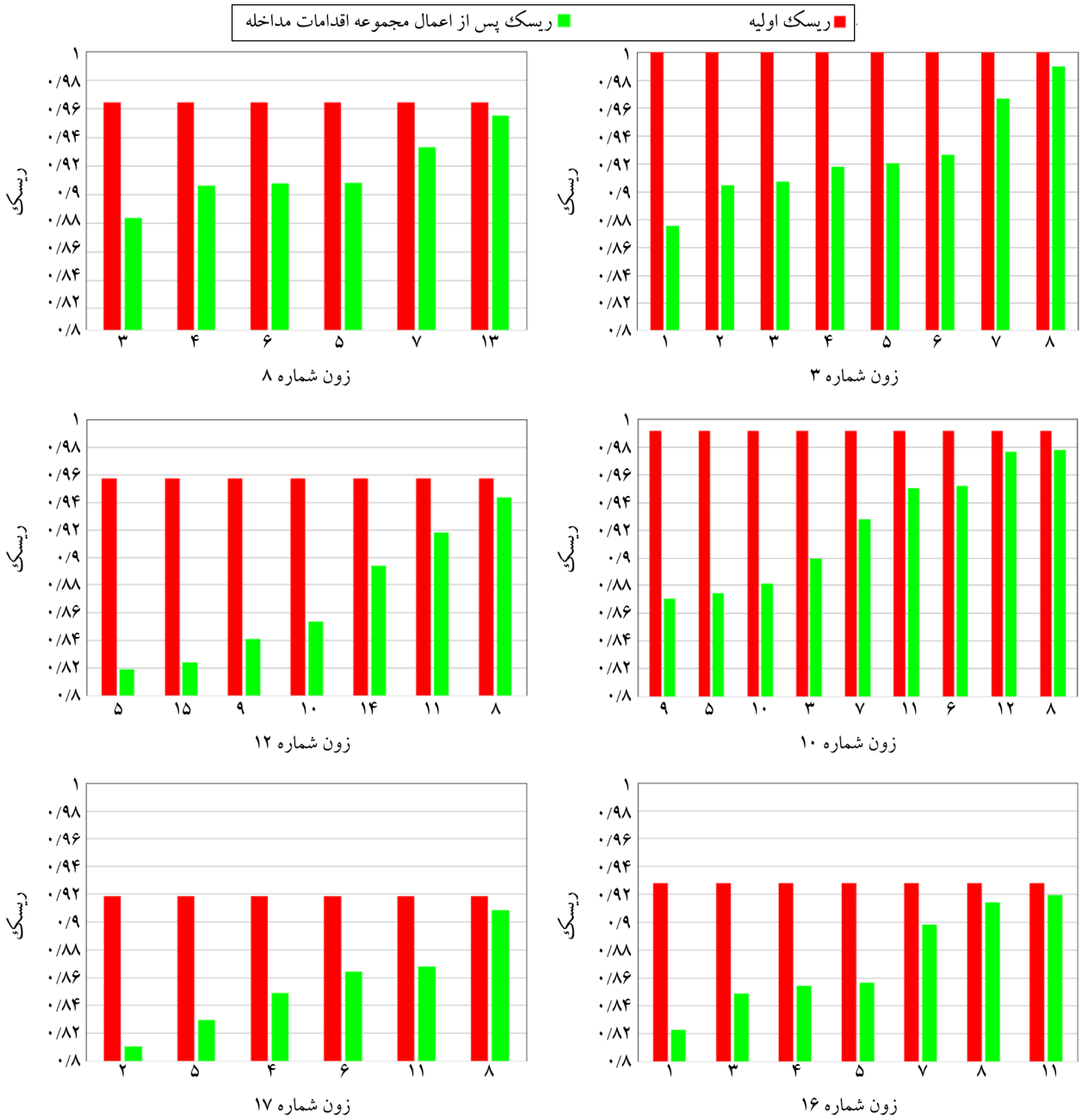
لازم به ذکر است که تأثیر اقدامات مداخله با فرض رفع نقطه‌ضعف موجود و دستیابی به مناسب‌ترین وضعیت مؤلفه مورد نظر، ارزیابی شده است. برای مثال در زون ۱۲ ارزش مؤلفه آسیب‌پذیری روسازه نسبت به سایر زون‌ها بیشترین مقدار است که منجر به افزایش مقدار ریسک بر اساس معادلات (۱) و (۲) در این زون می‌گردد؛ بنابراین فرض شده است که با اعمال اقدامات مداخله مناسب (بر اساس جدول ۳) ارزش این مؤلفه به کمترین میزان رسیده و مقدار ریسک در این زون کاهش می‌یابد. با محاسبه درصد کاهش ریسک پس از اعمال اقدامات مداخله در هر زون، میزان تأثیر اقدامات مداخله بر ریسک کمّی‌سازی شده است.

جدول (۲): ارزیابی نقاط ضعف و ارائه اقدامات مداخله اولویت‌بندی شده متناسب در هر زون منطقه مطالعاتی.

زون	نقاط ضعف	شماره اقدام مداخله پیشنهادی بر اساس فهرست جدول (۳)	درصد کاهش ریسک (درصد)
۳	پتانسیل بالای انسداد راه‌ها در اثر ریزش سازه‌های مجاور	۱	۱۲/۴
	پتانسیل بالای فرونشست	۲	۹/۵
	زیاد بودن درصد تلفات و مصدومان	۳	۹/۳
	عرض کم معابر	۴	۸/۲
	تراکم بالای معابر	۵	۸
	بالا بودن خطر آتش‌سوزی سازه‌های مجاور راه	۶	۷/۴
	کم بودن تعداد راه‌های جایگزین	۷	۳/۴
	دسترسی کم به مراکز درمانی و آتش‌نشانی	۸	۱

ادامه جدول (۲).

زون	نقاط ضعف	شماره اقدام مداخله پیشنهادی بر اساس فهرست جدول (۳)	درصد کاهش ریسک (درصد)
۱۰	بالا بودن پتانسیل زمین‌لغزش	۹	۱۲/۲
	تراکم بالای معابر	۵	۱۲
	آسیب‌پذیری روسازه راه	۱۰	۱۱
	زیاد بودن درصد تلفات و مصدومان	۳	۹/۲
	کم بودن تعداد راه‌های جایگزین	۷	۶/۴
	بالا بودن پتانسیل انسداد راه‌ها در اثر سقوط تیرهای برق به دلیل زیاد بودن طول معابر (زیاد بودن تعداد تیرهای برق مجاور هر معبر)	۱۱	۴/۲
	بالا بودن خطر آتش‌سوزی سازه‌های مجاور راه	۶	۴
	بالا بودن پتانسیل انفجار تأسیسات خطرناک و نشت مواد شیمیایی	۱۲	۱/۵
	دسترسی کم به مراکز درمانی، ایستگاه پلیس و آتش‌نشانی	۸	۱/۴
۸	زیاد بودن درصد تلفات و مصدومان	۳	۸/۴
	کم بودن عرض معابر	۴	۶
	بالا بودن خطر آتش‌سوزی سازه‌های مجاور راه	۶	۵/۹
	تراکم بالای معابر	۵	۵/۸
	کم بودن تعداد راه‌های جایگزین	۷	۳/۲
	عدم وجود فضای تخلیه کافی	۱۳	۱
۱۲	تراکم بالای معابر	۵	۱۴/۵
	پتانسیل بالای گسلش (به دلیل قرار داشتن روی گسل)	۱۵	۱۴
	پتانسیل بالای زمین‌لغزش به دلیل قرار داشتن در کوهپایه	۹	۱۲/۲
	آسیب‌پذیری بالای روسازه	۱۰	۱۰/۹
	زیاد بودن آسیب‌پذیری لوله‌های آب	۱۴	۶/۷
	بالا بودن پتانسیل انسداد راه‌ها در اثر سقوط تیرهای برق	۱۱	۴
	دسترسی محدود به مراکز درمانی، ایستگاه پلیس و آتش‌نشانی	۸	۱/۴
۱۶	بالا بودن پتانسیل انسداد راه در اثر ریزش سازه‌های مجاور	۱	۱۱/۳
	زیاد بودن درصد تلفات و مصدومان	۳	۸/۵
	کم بودن عرض معابر	۴	۷/۹
	تراکم بالای معابر	۵	۷/۷
	کم بودن تعداد راه‌های جایگزین	۷	۳/۲
	دسترسی محدود به مراکز درمانی، ایستگاه پلیس و آتش‌نشانی	۸	۱/۵
	عدم وجود فضای تخلیه امن کافی	۱۳	۱
۱۷	بالا بودن پتانسیل فرونشست	۲	۱۱/۸
	تراکم بالای معابر	۵	۹/۷
	کم بودن عرض معابر	۴	۷/۵
	بالا بودن خطر آتش‌سوزی سازه‌های مجاور راه	۶	۵/۹
	بالا بودن پتانسیل انسداد راه‌ها در اثر سقوط تیرهای برق	۱۱	۵/۵
	دسترسی محدود به مراکز درمانی، ایستگاه پلیس و آتش‌نشانی	۸	۱



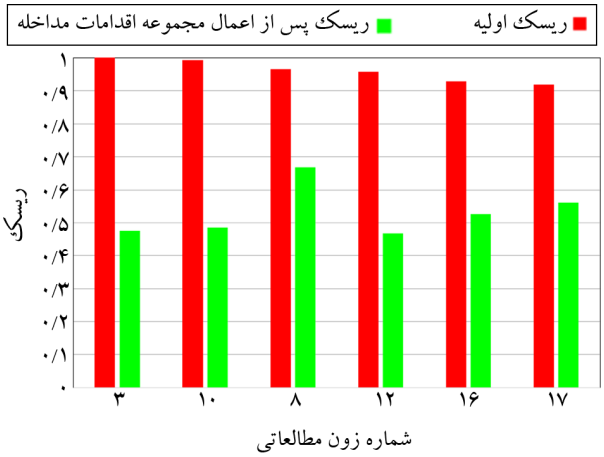
شکل (۷): تأثیر اقدامات مداخله بر اساس شماره آنها در جدول (۳) بر ریسک شبکه راه در زون‌های مورد بررسی.

جدول (۳): فهرست اقدامات مداخله کاهش ریسک و مدت زمان پیاده‌سازی آنها با توجه به نقاط ضعف موجود در منطقه مطالعاتی.

شماره	اقدامات مداخله پیشنهادی	مدت زمان
۱	مقاوم‌سازی سازه‌های مجاور راه	بلند مدت
۲	مقاوم‌سازی جداره کوره قنات	میان‌مدت
۳	مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و ارتقای آمادگی و توانمندسازی واکنش اضطراری	میان‌مدت تا بلند مدت
۴	عریض سازی معابر و اجرای قانون عقب‌نشینی ساختمان‌ها در طرح تفصیلی شهرداری	بلند مدت
۵	اتخاذ سیاست‌های کاهش ترافیک (در شرایط عادی) نظیر متغیر بودن ساعت‌های شروع کار ادارات و مدارس نسبت به هم	کوتاه‌مدت تا میان‌مدت
۶	اجرای طرح‌های اعلام و اطفای حریق/ نصب سیستم‌های اطفاء حریق مناسب در کنار مخازن گاز نظیر شیر هیدرانت	کوتاه‌مدت
۷	احداث معابر جدید	میان‌مدت تا بلند مدت

ادامه جدول (۳).

شماره	اقدامات مداخله پیشنهادی	مدت زمان
۸	احداث بیمارستان‌ها یا درمانگاه‌ها، ایستگاه‌های پلیس و ایستگاه آتش‌نشانی	میان‌مدت تا بلند مدت
۹	پایدارسازی شیب‌ها	میان‌مدت
۱۰	پایدارسازی شیب‌ها/ بازرسی و نگهداری منظم روسازه معابر و ترمیم ترک‌ها و خرابی‌های موجود/ استفاده از مصالح انعطاف‌پذیر در طراحی روسازه	میان‌مدت تا بلند مدت
۱۱	استفاده از کابل‌های برق زمینی (مدفون در زمین)	میان‌مدت
۱۲	انتقال تأسیسات خطرناک به خارج از منطقه شهری/ طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌های حاوی مواد شیمیایی خطرناک/ ارزیابی کامل ریسک تأسیسات شیمیایی (آسیب‌پذیری ساختمان‌ها، مخازن ذخیره‌سازی و خطوط لوله و پایداری مواد خطرناک)/ اجرای شیوه‌های مناسب برای ذخیره‌سازی مواد خطرناک	میان‌مدت تا بلند مدت
۱۳	ایجاد فضای باز کافی برای تخلیه امن در محلات	میان‌مدت
۱۴	استفاده از لوله‌های مقاوم نظیر لوله‌های پلی‌اتیلن چگال/ انجام بازرسی‌های دوره‌ای منظم برای بررسی و تعمیر نقاط ضعف موجود	میان‌مدت تا بلند مدت
۱۵	عدم احداث معابر در حریم گسل و ایجاد راه‌های جایگزین برای معابر موجود در حریم گسل	میان‌مدت تا بلند مدت



شکل (۸): تأثیر مجموعه اقدامات کاهش ریسک در زون‌های با ریسک بالا بر اساس جدول (۲).

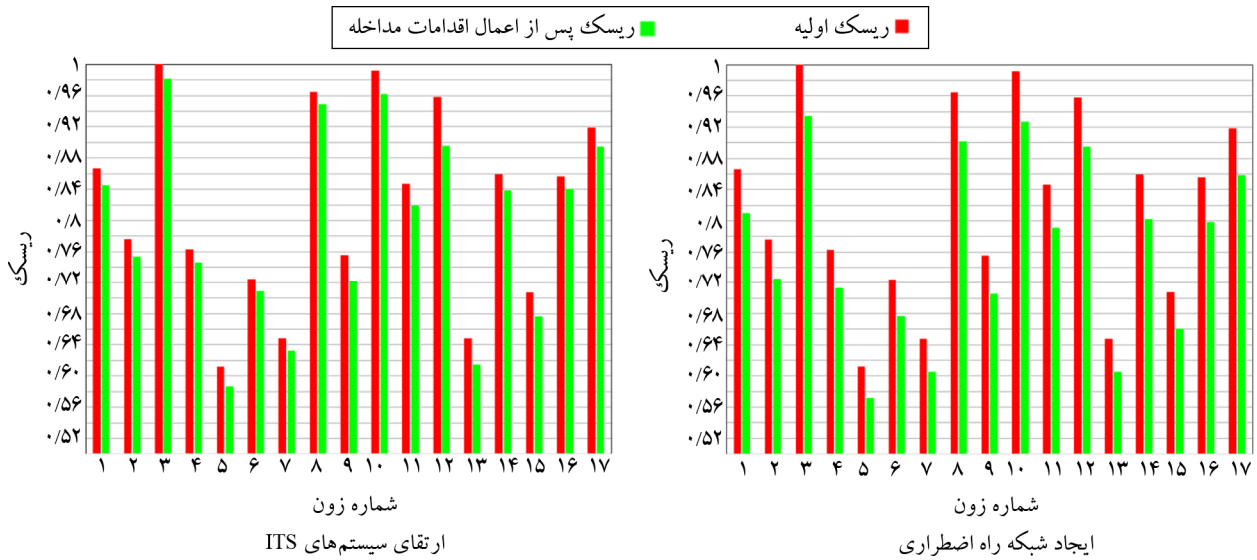
همان‌طور که در جدول (۲) و شکل (۷) بیان شده است، اقداماتی از جمله عدم احداث معابر در حریم گسل و ایجاد راه‌های جایگزین برای معابر موجود در این نواحی، پایدارسازی دیواره کوره قنات‌ها برای کاهش پتانسیل فرونشست، مقاوم‌سازی سازه‌ها و ارتقای آمادگی افراد جهت کاهش درصد تلفات و خسارات، تعریض معابر و اجرای قانون عقب‌نشینی ساختمان‌ها در طرح تفصیلی شهرداری، اجرای سیاست‌های کاهش ترافیک (در ساعات اوج) نظیر متغیر بودن ساعت‌های شروع و پایان کار ادارات و مدارس نسبت به هم و اجرای طرح‌های اعلام و اطفای حریق در ساختمان‌ها و نصب سیستم‌های اطفاء حریق مناسب در کنار مخازن گاز نظیر شیر هیدرانت تأثیر قابل توجهی بر ریسک شبکه راه در زون‌های با ریسک بالا در منطقه مطالعاتی دارند و در اولویت بالاتری نسبت به سایر اقدامات مداخله قرار می‌گیرند. از طرفی اقداماتی نظیر احداث بیمارستان، ایستگاه پلیس و آتش‌نشانی تأثیر چندانی بر ریسک شبکه راه در منطقه مطالعاتی ندارد (احداث هر یک از این مراکز کمتر از ۱ درصد ریسک را کاهش می‌دهد)؛ بنابراین راهکار مناسبی برای کاهش ریسک محسوب نمی‌شود.

۵- ارزیابی نقاط ضعف مشترک در کل منطقه مطالعاتی و ارائه راهکارهای مشترک کاهش ریسک

علاوه بر موارد بیان شده در جدول (۲)، برخی مسائل شامل عدم وجود شبکه راه اضطراری در شهر قم، عدم وجود سیستم‌های هشدار سریع زلزله، عدم وجود مخابرات اضطراری برای بسیاری از سازمان‌های مسئول، مجهز نبودن سیستم‌های هوشمند کنترل ترافیک به برق اضطراری، عدم وجود برخی سیستم‌های اطلاع‌رسانی از ترافیک نظیر تابلوهای متغیر خبری، سطح متوسط آگاهی افراد و آشنایی آنها با وضعیت راه‌ها و قوانین و اقدامات لازم برای تردد در شرایط بحران، سطح متوسط فرهنگ رانندگی و همچنین متوسط بودن سطح مدیریت و

جدول (۴): ارزیابی و اولویت‌بندی اقدامات کاهش ریسک در منطقه مطالعاتی.

	اقدامات مداخله	مدت اجرا	متوسط افزایش ریسک
۱	ایجاد شبکه راه اضطراری	بلند مدت	۶/۶ درصد
۲	ارتقای سیستم‌های ITS (تجهیز ادوات کنترل ترافیک به برق اضطراری، ارتقای سیستم‌های اطلاع‌رسانی از شرایط و ترافیک (استفاده از تابلوهای متغیر خبری و...)	کوتاه‌مدت	۳/۲ درصد
۳	افزایش آگاهی و آشنایی افراد با وضعیت راه‌ها و قوانین و اقدامات لازم برای تردد در شرایط بحران و ارتقای فرهنگ رانندگی	میان‌مدت	۲درصد
۴	ارتقای سیستم‌های اطلاع‌رسانی به مردم و مسئولین (تجهیز سازمان‌های مسئول به مخابرات اضطراری و استفاده از سیستم‌ها هشدار سریع زلزله)	میان‌مدت	۱/۶ درصد
۵	بهبود مدیریت و برنامه‌ریزی	کوتاه تا میان‌مدت	۱/۶ درصد



شکل (۹): تأثیر برخی اقدامات مداخله برای کاهش ریسک شبکه راه در منطقه ۴ شهر قم.

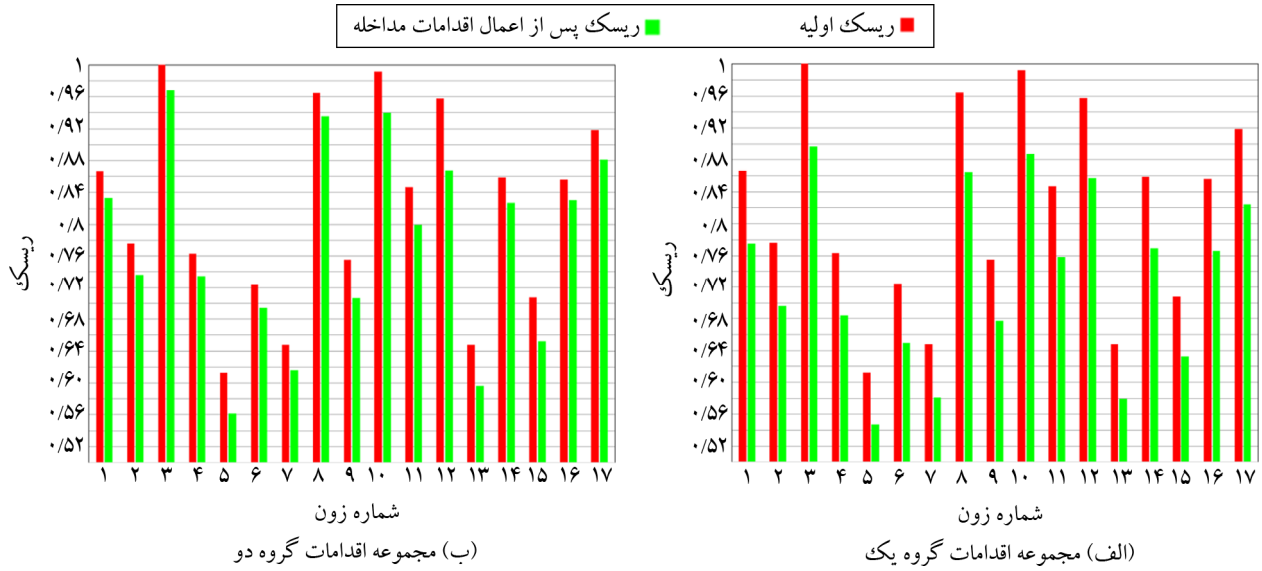
برنامه‌ریزی ترافیک و تردد در شرایط بحران از جمله چالش‌ها و نقاط ضعفی است که در کل منطقه مطالعاتی وجود دارد. در جدول (۴) تأثیر اقدامات مداخله جهت ارتقای موارد مذکور بر میانگین ریسک منطقه آورده شده است. همچنین نمودارهای شکل (۹) تأثیر اقدامات مداخله شماره ۱ و ۲ در جدول (۴) را بر ریسک زون‌های (محلات) منطقه چهار شهر قم نشان می‌دهد.

۶- ارزیابی تأثیر مجموعه ای از اقدامات مداخله بر ریسک شبکه راه در منطقه مطالعاتی

اعمال برخی اقدامات کاهش ریسک بیان شده در جدول (۳) نظیر مقاوم‌سازی سازه‌های مجاور راه و احداث معابر جدید با مشکلات و چالش‌هایی از جمله محدودیت منابع، کمبود بودجه، مشکلات اقتصادی و حقوقی همراه است. علاوه بر این، با توجه به اینکه در مدل پیشنهادی حدود ۶۰ مؤلفه مورد ارزیابی قرار گرفته است، در بعضی موارد تغییر یک یا دو مؤلفه به‌تنهایی تأثیر زیادی بر کاهش ریسک ندارد. بنابراین، در این بخش تأثیر مجموعه‌ای از مداخلات بررسی شده است (جدول ۵ و شکل ۱۰). بر اساس جدول (۵) مجموعه اقدامات گروه یک شامل ایجاد شبکه راه اضطراری، بهبود مدیریت و برنامه‌ریزی، اطلاع‌رسانی و آمادگی نیروهای مسئول منجر به ارتقای ظرفیت پاسخ شده و میانگین ریسک منطقه را حدود ۱۰/۵ کاهش می‌دهد.

جدول(۵): ارزیابی مجموعه اقدامات کاهش ریسک در منطقه مطالعاتی.

	مجموعه اقدامات مداخله	متوسط افزایش ریسک
۱	ایجاد شبکه راه اضطراری، بهبود مدیریت و برنامه‌ریزی، اطلاع‌رسانی و آمادگی نیروهای مسئول (ارتقای ظرفیت پاسخ)	۱۰/۵ درصد
۲	ارتقای سیستم‌های هوشمند اطلاع‌رسانی از شرایط و ترافیک، تجهیز برخی سیستم‌های کنترل ترافیک به برق اضطراری (چراغ‌های راهنما)، افزایش آگاهی افراد از وضعیت راه‌ها و قوانین و اقدامات لازم برای تردد در شرایط بحران و ارتقای فرهنگ رانندگی (ارتقای مؤلفه‌های عملکردی)	۵/۳ درصد



شکل (۱۰): تأثیر مجموعه اقدامات مداخله بر ریسک شبکه راه در منطقه ۴ شهر قم.

همچنین بهبود برخی مؤلفه‌های عملکردی مانند ارتقای سیستم‌های هوشمند اطلاع‌رسانی از شرایط و ترافیک، تجهیز برخی سیستم‌های کنترل ترافیک مانند چراغ‌های راهنمای هوشمند به برق اضطراری، افزایش آگاهی افراد از وضعیت راه‌ها و قوانین و اقدامات لازم برای تردد در شرایط بحران و ارتقای فرهنگ رانندگی منجر به کاهش میانگین ریسک منطقه حدود ۵/۵ می‌شود.

تأثیر اعمال مجموعه اقدامات مداخله گروه یک و دو در هر زون در نمودارهای شکل (۱۰) نشان داده شده است.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه ابتدا مدلی جامع برای ارزیابی ریسک شبکه راه‌های درون‌شهری ارائه شد. این مدل شامل چهار شاخص اصلی خطر، آسیب‌پذیری، ظرفیت پاسخ و مؤلفه‌های عملکردی می‌شود. در مدل پیشنهادی علاوه بر مؤلفه‌های فیزیکی اثر مؤلفه‌های اجتماعی مربوط به آسیب‌پذیری و عملکرد کاربران شبکه راه بر ریسک بررسی شد.

این مدل با ارزیابی حدود ۶۰ مؤلفه، ریسک شبکه راه در منطقه مطالعاتی را ارزیابی می‌کند. در گام بعد، مدل ریسک پیشنهادی در منطقه چهار شهر قم که بزرگ‌ترین منطقه و از مهم‌ترین مناطق این شهر است، پیاده‌سازی شد.

نتایج نشان داد زون‌های ۳، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۶ و ۱۷ دارای بیشترین مقدار ریسک شبکه راه در سناریوی مفروض هستند. همچنین، مشکلاتی نظیر بالا بودن پتانسیل گسلش، بالا بودن پتانسیل فرونشست و زمین‌لغزش، تراکم بالای معابر در سناریو وقوع زلزله در ساعت اوج ترافیک عصر، آسیب‌پذیری روسازه، زیاد بودن درصد تلفات و مصدومان، بالا بودن پتانسیل انسداد راه در اثر ریزش سازه‌های مجاور و بالا بودن درصد راه‌های

باریک تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش ریسک شبکه راه در زون‌های مذکور داشته و به‌طور متوسط منجر به افزایش ریسک به ترتیب تا ۱۴، ۱۰/۶۵، ۱۲/۲، ۹/۶۵، ۱۱، ۹، ۱۱/۸ و ۷/۴ درصد می‌شود.

برای رفع این کاستی‌ها به ترتیب اقدامات مداخله از قبیل مقاوم‌سازی جداره کوره قنات، پایدارسازی شیب‌ها، اتخاذ سیاست‌های کاهش ترافیک (در ساعات اوج) نظیر متغیر بودن ساعت‌های شروع کار ادارات و مدارس نسبت به هم، پایدارسازی شیب‌ها، بازرسی و نگهداری منظم روسازه معابر و ترمیم ترک‌ها و خرابی‌های موجود، استفاده از مصالح انعطاف‌پذیر در طراحی روسازه، مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و ارتقای آمادگی مردم، مقاوم‌سازی سازه‌های مجاور راه و تعریض معابر و اجرای قانون عقب‌نشینی ساختمان‌ها در طرح تفصیلی شهرداری پیشنهاد گردید. با اعمال این اقدامات می‌توان ریسک منطقه مطالعاتی را به میزان نزدیک به ۵۰ درصد کاهش داد.

علاوه بر این، در این مطالعه نقاط ضعف موجود در کل منطقه مطالعاتی مورد ارزیابی قرار گرفت و راهکارهای بهینه ارائه گردید. برای مثال با توجه به عدم وجود شبکه راه اضطراری در شهر قم ایجاد این شبکه منجر به بهبود ظرفیت پاسخ و کاهش متوسط ریسک منطقه ۴ تا حدود ۶/۶ درصد که مقدار قابل‌توجهی است می‌شود. در نهایت علاوه بر تأثیر تک‌تک اقدامات، تأثیر گروهی از اقدامات مداخله که منجر به بهبود ظرفیت پاسخ و عملکرد شبکه راه به ترتیب به میزان ۱۰/۵ و ۵/۳ درصد می‌گردند مورد ارزیابی قرار گرفت.

مراجع

Adafer, S., & Bensaibi, M. (2016). Seismic vulnerability classification of roads. *International Conference on Materials And Energy, 139*, 624-630.

Amini Hosseini, K., & Chavoshi, A. (2018). *Comprehensive Plan of Risk Reduction and Disaster Management of Karaj*. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (in Persian).

Balijepalli, C., & Oppong, O. (2014). Measuring vulnerability of road network considering the extent of serviceability of critical road links in urban areas. *Journal of Transport Geography, 39*, 145-155.

Djemai, M.C., Bensaibi, M., & Zellat, K. (2019). Seismic vulnerability assessment of bridges using analytical hierarchy process. *7th International Conference on Euro Asia Civil Engineering Forum*, Stuttgart, Germany, 2019.

Ertugay, K., Argyroudis, S., & Düzgün, H. (2016). Accessibility modeling in earthquake case considering road closure probabilities: A case study of health and shelter service accessibility in Thessaloniki, Greece. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 17*, 49-66.

Eshghi, S., & Aharo, M. (2005). Performance of Transportation Systems in the 2003 Bam, Iran, Earthquake. *Earthquake Spectra, 21*(1), 55-68.

Feng, K., Li, Q., Bruce R., et al. (2020). Post-earthquake modelling of transportation networks using an agent-based model. *Structure and Infrastructure Engineering Engineering, 16*(11), 1578-1592.

Francini, M., Gaudio, S., Palermo, A., & Viapiana, M.F. (2020). A performance-based approach for innovative emergency planning. *Sustainable Cities and Society, 53*.

Gaitanidoua, E., Tsami, M., & Bekiarisc, B.(2016). A review of resilience management application tools in the transport sector. *3rd Conference on Sustainable Urban Mobility*, Volos, Greece.

HajiBabaie, M., Amini-Hosseini, K., & Ghayamghamian, M.R. (2014). Earthquake risk assessment in urban fabrics based on physical, socioeconomic and response capacity parameters (A case study: Tehran city). *Natural Hazard, 74*, 2229-2250.

Hwang, H., Jernigan, J.B., & Lin, Y. (2000). Evaluation of seismic damage to memphis brides and highway systems. *Journal of Bridge Engineering, 5*(4), 322-330.

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.

Kilanitis, I., & Sextos, A. (2019). Impact of earthquake-induced bridge damage and time evolving traffic demand on the road network resilience. *Traffic and Transportation Engineering, 6*(1), 35-48.

Rastegar, A. (2017). Assessing Urban Streets Network Vulnerability against Earthquake Using GIS - Case Study: 6TH Zone of Tehran. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 455-462.

Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation* (1st Edition). Mcgraw-Hill, New York.

Shang, Q., Guo, X., Li, J., & Wang, T. (2022). Post-earthquake health care service accessibility assessment framework and its application in a medium-sized city. *Reliability Engineering & System Safety, 228*.

Werner, S.D.,Taylor, C.E., Cho, S., et al. (2006). *Redars 2 Methodology and Software for Seismic Risk Analysis of Highway Systems*. US Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington, DC.

Zamanifar, M., Pooryari, M., & Ahadi, M.R. (2014). Estimation of reconstruction cost and traffic functionality relating to roadway transportation lifelines after natural disasters. *International Journal of Transpotation Engineering, 2*(1), 67-80.

Zhang, Z., Zhu, M., Ban, J., & Zhang, Y. (2020). A verification method for identifying critical segments considering highly correlated characteristics of traffic flow. *International Journal of Modern Physics C, 31*(3), 1-13.

واژه‌نامه

۱- روش تحلیل سلسله‌مراتبی	Analytic Hierarchy Process (AHP)
۲- ابزار رتبه‌بندی آسیب‌پذیری	Vulnerability Assessment Scoring Tool (VAST)
۳- جابه‌جایی دائمی زمین	Permanent Ground Displacement (PGD)
۴- سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند	Intelligent Transportation Systems (ITS)

Presenting a Comprehensive Model for Assessing and Reducing the Risk of Urban Road Networks against Earthquakes; Case Study: Qom City

Vahideh Shirvani Harandi[1], Kambod Amini Hosseini[2*] and Babak Mansouri[3]

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

Road networks play an important role in emergency responses after an earthquake. The absence of an efficient road network can have significant consequences, resulting in a higher number of casualties and extensive damages, especially during the critical first 72 hours, generally known as the "golden time". Consequently, there is a fundamental need to develop management tools in order to minimize the risk to road networks in the event of an earthquake by implementing appropriate intervention measures prior to seismic events.

This study proposes a comprehensive model that assesses the risk associated with urban road networks, focusing on both physical and social parameters. The model incorporates four main risk indicators, namely hazard, vulnerability, response capacity, and performance parameters. By considering these indicators, a thorough evaluation of the risk levels can be obtained.

To demonstrate the practical application of the model, it was implemented in Qom City. The implementation led to the identification of high-risk zones within the city. Consequently, appropriate intervention measures were proposed and prioritized based on the assessment results. For areas prone to landslides, one of the suggested interventions was slope stabilization. Additionally, widening roads in zones with a high concentration of narrow paths and strengthening adjacent road structures were recommended. Implementation of these interventions resulted in an average risk reduction of approximately 12.2%, 7.4%, and 11.85%, respectively.

Importantly, the study also highlighted the absence of an emergency road network in Qom City. Recognizing this deficiency, the development of such infrastructure was identified as an effective intervention measure. The establishment of an emergency road network not only improves the response capacity but also reduces the overall risk in the study area by approximately 6.6%.

In conclusion, improving the management and risk assessment of road networks is crucial for effective emergency response following an earthquake. This research presents a comprehensive model that incorporates various risk indicators to assess urban road networks. The application of this model in Qom City allowed for the identification of high-risk zones and prioritization of intervention measures. The results emphasize the importance of interventions such as slope stabilization, road widening, strengthening of adjacent road structures, and the development of an emergency road network. Implementing these interventions can significantly reduce the overall risk and enhance the response capacity in the event of an earthquake.

Keywords: Risk of Roadway Network, Holistic Model, Optimal Interventions, Risk Reduction Solutions, Physical and Social Parameters.