سنجش از دور
و
GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران سال پانزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۲
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.15, No. 1, Spring 2023

۱۰۹-۱۲۷
مقاله پژوهشی

مدل تخصیص منابع مقاوم‌سازی برای پل‌های واقع در شبکهٔ راه‌های اضطراری شهر تهران پس از وقوع زلزله: ازطریق مدل بهینه‌سازی و استفاده از سیستم اطلاعات مکانی

علیرضا شورشی[۱] و حسن ذوقی[۲]*

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گروه عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

۲. دانشیار دانشکدهٔ فنی و مهندسی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۰۱

چکیده

در میان شبکهٔ معابر شهری، شبکهٔ راه‌های اضطراری در امدادرسانی حین زلزله، به‌ویژه در مرحلهٔ پاسخ به بحران، نقش مهمی ایفا می‌کنند. حفظ عملکرد این شبکه از معابر، در ساعات اولیهٔ پس از زلزله، اهمیت بسزایی دارد. محافظت و مقاوم‌سازی اجزای آسیب‌پذیر شبکه، به‌خصوص پل‌ها، پیش از وقوع بحران، تأثیر شایان توجهی در کاهش خسارات و آسیب‌ها دارد. در اغلب اوقات مقاوم‌سازی تمامی اجزای آسیب‌پذیر، به‌دلیل محدودیت بودجه، عملاً ناممکن است. این محدودیت ایجاب می‌کند که با شناسایی دقیق اجزای آسیب‌پذیر، گزینه‌های مقاوم‌سازی در ابتدا اولویت‌بندی و در نهایت، مناسب‌ترین آنها انتخاب شود. طی پژوهش حاضر، ابتدا پل‌های نیازمند مقاوم‌سازی واقع در شبکهٔ راه‌های اضطراری، با استفاده از یک روش‌شناسی پنج‌مرحله‌ای شناسایی می‌شود و با توجه به محدودیت‌های مالی و گزینه‌های تخصیص بودجه، گزینه‌های مقاوم‌سازی منتخب برمبنای شبکهٔ لایه‌های ایجادشده در محیط GIS (با عنوان ورودی) اولویت‌بندی می‌شود. بررسی همهٔ حالات ممکن برای پایداری پل‌ها پس از وقوع زلزله‌ای مشخص، طراحی شبکهٔ معابر اضطراری برای همهٔ این حالات، بررسی گزینه‌های متفاوت مقاوم‌سازی پل‌ها، ارزیابی اثر این مقاوم‌سازی در طول شبکهٔ اضطراری و در نهایت، اولویت‌بندی گزینه‌های مقاوم‌سازی، با توجه به تأثیر آنها در طول شبکهٔ اضطراری، مراحل اصلی روش پیشنهادی این مطالعه را تشکیل می‌دهد. کارآیی روش یادشده پس از به‌کارگیری آن روی بخشی از شبکهٔ معابر اضطراری شهر تهران به‌منزلهٔ شبکه‌ای واقعی با ابعاد بزرگ، ارزیابی شد.

کلیدواژه‌ها: شبکهٔ معابر اضطراری، سیستم اطلاعات مکانی، آسیب‌پذیری، پل‌های شهری، اولویت‌بندی مقاوم‌سازی.

* نویسندهٔ مکاتبه‌کننده: کرج، گوهردشت، بلوار شهید مؤذن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، دانشکدهٔ فنی و مهندسی. تلفن و دورنگار: ۰۲۶۳۴۴۱۸۱۵۶، ۰۹۱۲۳۶۰۸۱۹۴
Email: h_zoghi@kiau.ac.ir

۱- مقدمه

وقوع زلزله‌های با شدت بالا در شهرهای بزرگ و پرجمعیت و حتی زلزله‌هایی با شدت کمتر در شهرهای دارای تراکم جمعیتی زیاد تا کنون بحران‌های وسیع انسانی و فجایع بزرگ، با آسیب‌های گسترده‌ای را باعث شده است. زلزله و سونامی رخداده در سال ۲۰۰۴ در اقیانوس هند یکی از بارزترین مصادیق تأسف‌بار حوادث طبیعی کرهٔ زمین بوده است. طی این رخداد، حدود ۲۴۳هزار نفر بر اثر زمین‌لرزه و سونامی اقیانوس هند جان خود را از دست دادند. افزایش روزافزون تعداد بلایای طبیعی و قرارداشتن ایران در ردیف پنج کشور اول جهان، در مواجهه با این‌گونه بلایا (به‌ویژه رخدادهای متعدد زلزله)، اهمیت موضوع لرزه‌خیزی و ضرورت حفظ زیرساخت‌های آسیب‌پذیر ناشی از وقوع زلزله را بسیار مهم جلوه می‌دهد. زلزله‌های پیش‌آمده در فاصلهٔ سال‌های ۱۳۵۷ تا ۱۴۰۰ در شهرهای طبس، رودبار، منجیل، بم، ازگله، قصرشیرین، سرپل ذهاب و لاف و رویارویی با چندین بحران بسیار مرگبار ناشی از زلزله در طول یک قرن گذشته، از تجارب بسیار تلخ کشور ایران به‌شمار می‌آید. به‌رغم همهٔ این مصائب، می‌توان خسارات و آسیب‌های ناشی از بلایای طبیعی را تا حد بسیاری کنترل کرد و اقدامات پیشگیرانهٔ مناسب، از سوی سازمان‌های متولی، نقش بسیار مؤثری در کاهش آنها خواهد داشت. تأمین دسترسی‌های مناسب به مراکز امدادی و اضطراری شهر، مراقبت و حفظ شبکهٔ معابر اضطراری در مقابل هرگونه آسیب در شرایط عادی، اطمینان به کاربردی‌بودن معابر مورد اشاره هنگام بروز بحران، اعمال مدیریت صحیح در امدادرسانی و حفظ پل‌های واقع در مسیر شبکهٔ معابر اضطراری (به‌منزلهٔ آسیب‌پذیرترین اجزای شبکهٔ حمل‌ونقل) نمونه‌هایی از این اقدامات به‌شمار می‌آید. بنا به ضرورت‌های بیان‌شده، لازم است پیش از وقوع بحران‌هایی همچون زلزله، نقایص سازه‌ای پل‌های واقع در شبکهٔ معابر اضطراری برطرف و این موارد مقاوم‌سازی شوند تا کارآیی و قابلیت بهره‌برداری از آنها کاملاً حفظ شود. از سوی دیگر، مقاوم‌سازی و حفظ درجهٔ خدمت‌رسانی این پل‌ها معمولاً با هزینه‌های بسیار هنگفت روبه‌روست و به همین دلیل، اولویت‌بندی مقاوم‌سازی در پل‌های شبکهٔ معابر اضطراری (به‌منظور تأمین دسترسی مورد نیاز) ضرورت می‌یابد. این مقاله، با شناسایی و تعیین معیارهای لازم برای اولویت‌بندی مقاوم‌سازی پل‌های واقع در شبکهٔ راه‌های اضطراری در برابر زلزله، مدلی کاربردی برای تخصیص منابع مقاوم‌سازی ارائه می‌کند و کارآیی آن را براساس سناریوهای محتمل زلزله، روی شبکهٔ معابر اضطراری شهر تهران نشان می‌دهد.

۲- مروری بر منابع و پیشینهٔ موضوع

در میان اجزای آسیب‌پذیر شبکهٔ راه‌های اضطراری، پل‌ها اهمیت ویژه‌ای دارند و از همین رو، نقش اولویت‌بندی آنها در شبکهٔ معابر اضطراری نیز درخور توجه است. همچنین با توجه به نقش مهم دسترسی به معابر یادشده، در شرایط بحرانی پس از زلزله و نقش انکارناپذیر پل‌ها (در جایگاه اصلی‌ترین اجزای آسیب‌پذیر شبکه) در برقراری جریان حرکت وسایل نقلیهٔ امدادی عبوری، حفظ پایداری و اطمینان از بقای این سازه‌ها در شرایط مورد اشاره ضروری به‌نظر می‌رسد. محدودیت منابع مالی و تخصیص بودجه برای مقاوم‌سازی تمامی پل‌های واقع در معابر نیز موضوع دیگری است که بر اهمیت بهره‌گیری از مدل‌های تخصیص منابع مقاوم‌سازی، برای این گروه از اجزای آسیب‌پذیر شبکه، افزوده است. ازاین‌رو با مرور برخی پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه، در نهایت، یک مدل تخصیص منابع مقاوم‌سازی برای پل‌های شبکهٔ معابر اضطراری حاصل می‌شود. این مقالات اغلب به موضوعاتی همچون رتبه‌بندی کمان‌ها و پل‌ها، مسائل تخصیص منابع بودجه و طراحی شبکه‌های اضطراری حمل‌ونقل اشاره کرده‌اند. دو و پیتا[1] (۲۰۱۴) به‌منظور

1. Du & Peeta

تعیین کمان‌های مسیری که به مقاوم‌سازی نیاز دارند، یک مدل بهینه‌سازی احتمالی دوسطحی[1] را پیشنهاد دادند. در این مدل، دو نوع عدم قطعیت (در ویژگی‌های بحران و در شبکهٔ بقای مربوط به هر نوع بحران)، به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته شده است. به‌دلیل پیچیده‌بودن مدل، مسئله به دو مدل برنامه‌ریزی خطی و کوتاه‌ترین مسیر تجزیه شده و الگوریتم دومرحله‌ای ابتکاری[2] برای حل آن به‌کار رفته و بررسی مدل نیز با بیان مثالی عددی انجام شده است. شریعت مهیمنی[3] و همکاران (۲۰۱۲) مدل تخصیص منابع به‌منظور بهبود قابلیت اطمینان اتصال و زمان سفر، در شرایط عرضهٔ غیرقطعی حاصل از وقوع بحران‌های طبیعی همچون زلزله را ارائه کردند. در این مدل، پس از مشخص‌نمودن کمان‌هایی از مسیر که در زمان بحران باید حفظ شوند، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شد تا شاخص‌های قابلیت اطمینان به‌دست آید. به‌منظور حل مثال عددی نیز، از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. شریعت مهیمنی و بابایی[4] (۲۰۱۳)، به‌منظور تخصیص منابع در شبکه‌های حمل‌ونقل آسیب‌پذیر، شاخص‌های کارآیی قابلیت اطمینان برای ظرفیت کمان و دسترسی به نقاط را در مدل خود، مد نظر قرار دادند. در این مدل، کمینه‌سازی منابع بودجه از دید تصمیم‌گیران و بیشینه‌سازی ظرفیت و دسترسی، از دیدگاه بهره‌برداران، مطرح شده است. ادریسی[5] و همکاران (۲۰۱۳) به کمینه‌سازی صدمات پس از وقوع زلزله‌های بزرگ پرداخته‌اند. بازسازی ساختمان‌های آسیب‌دیده، تقویت زیرساخت‌های حمل‌ونقل و مکان‌یابی و تخصیص سطوح گوناگون کمک‌های اولیه سه بخش اصلی منظورشده در این مدل است. بیان شرایط بهبودیافته به‌صورت کمّی (در نتیجهٔ هماهنگی بین مسائل گوناگون در مراحل بحران) از مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق به‌شمار می‌رود. شریعت مهیمنی و همکاران (۲۰۱۴) روش‌های سرمایه‌گذاری روی شبکهٔ حمل‌ونقلی، براساس قابلیت اطمینان را بررسی و در نهایت، مدلی به‌منظور تکمیل تلاش‌های انجام‌گرفتهٔ پیشین ارائه نمودند. گلرو[6] و همکاران (۲۰۰۹) سه شاخص عملکردی را برای هر کمان مشخص کردند؛ همچنین دو حالت سرمایه‌گذاری و انجام‌نشدن سرمایه‌گذاری را تعریف و میزان بودجهٔ در اختیار را تعیین کردند و بدین‌ترتیب مدلی برای اختصاص بهینهٔ بودجهٔ مذکور به کمان‌ها ارائه نمودند. پس از تعریف شاخص اهمیت برای هر کمان، به‌منظور حل مدل نیز از روش برنامه‌ریزی پویا استفاده شده است. قابلیت اطمینان زمان سفر با این فرض به‌دست آمد که آنچه، در هر حالت شبکه، ارزیابی می‌شود زمان سفر کل شبکه است. در مقالهٔ شریعت مهیمنی و همکاران (۲۰۰۳)، رویکردی برمبنای کوتاه‌ترین مسیر به‌منظور دستیابی به مسیرهای اضطراری، برای استفاده از تیم‌های امداد و نجات، مطرح شده است. نیکو[7] و همکاران (۲۰۱۸) از طول و زمان سفر و تعداد مسیرها، به‌منزلهٔ شاخص‌های کارآیی آسیب‌پذیری شبکه و شناسایی مسیرهای بهینه برای تردد وسایل نقلیهٔ اضطراری، بهره گرفتند. آنها بدین‌ترتیب روش ترکیبی چندهدفه‌ای، به‌منظور تبدیل مسئلهٔ چندهدفه به تک‌هدفه، معرفی کردند. شکیبا[8] و همکاران (۲۰۱۳)، با اشاره به نقش شایان توجه پراکنش کاربری‌ها در مقدار تلفات انسانی، میزان آسیب به یک منطقهٔ موردی را در پنج سطح، برای سه سناریوی زلزله با شدت‌های متفاوت، برآورد کردند. بابایی و همکاران (۲۰۱۹)، در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه، مجموع زمان سفرهای اضطراری و طول کل شبکه و تأمین پوشش به نقاط تقاضای اضطراری/ عرضه (به‌منزلهٔ سه معیار مهم برای شبکهٔ راه‌های اضطراری)

1. Bi-Level Stochastic Optimization Model
2. Two Stage Heuristic Algorithm
3. Mohaymany
4. Babaei
5. Edrissi
6. Golroo
7. Nikoo
8. Shakiba

را مطـرح کردنـد. شـریعت مهیمنـی و نیکـو (۲۰۲۰) طراحـی شـبکهٔ معـابر اضـطراری در ابعـاد بـزرگ، بـا درنظرگرفتن سناریوهای زلزله را مطرح و در قالب مدل بهینه‌سازی یکپارچـهٔ چندهدفـه‌ای بـه‌منظـور طراحـی شبکهٔ مسیرهای پاسخ اضطراری و انجـام‌دادن عملیـات لجستیک اضطراری و مؤثر پس از وقوع زلزله، روشـی را پیشنهاد کردند. شریعت مهیمنی و بابایی (۲۰۱۰) یـک مسئلهٔ بهینـه‌سـازی غیرخطـی را بـه‌منظـور تخصـیص منابع، عرضـه کردنـد. چـویی[1] و همکـاران (۲۰۲۲)، بـا اشاره به کثرت و فراوانـی بلایـا و افـزایش تقاضـا بـرای اقدامات امدادی و ایمن‌سازی طی چند سـاعت طلایـی پس از بحران، مسئلهٔ تعیین شبکهٔ راه اضطراری را برای شهر سئول مطرح کردند. در این مطالعه، با دسته‌بنـدی و وزن‌دهی به اطلاعات دربارهٔ شانزده نوع تقاضـای پـس از بحران زلزله، جاده‌ها و پل‌هایی که مهـم‌تـرین نقـش انتخاب (در قالب شبکه‌هـای کمـان محـور) را داشـتند، تجزیـه و تحلیـل شـدند. در نهایـت، شـبکهٔ راه‌هـای اضطراری براساس نتـایج کمّـی و کیفـی مراحـل مـورد اشاره، طراحی شد. دانشگاه علم و صنعت ایـران[2] (۲۰۱۶)، با اشاره به نقش شـبکهٔ معـابر اضـطراری در تـاب‌آوری شهر در برابر زلزله، طی پژوهشی شبکهٔ معابر اضـطراری را برای شهر تهران طراحی کرد.

در بررسی تمامی کارهای انجـام‌شـده، مشـخص شد که درمورد اولویت‌بندی پـل‌هـا در برابـر بحـران یـا طراحی شبکه‌های معابر اضطراری، کارهـای تحقیقـاتی متعددی صورت گرفته اما تا کنون به طراحی هـم‌زمـان شبکهٔ معابر اضطراری و اولویت‌بندی پل‌ها در شـبکه‌ای واقعی پرداخته نشده است.

۳- روش‌شناسی و ارائهٔ مدل حل مسئله

روش پیشـنهادی در ایـن مطالعـه شـامل پـنج مرحلـه می‌شود: ۱) تعیین حالات ممکـن شـبکهٔ معـابر پـس از وقوع زلزله؛ ۲) طراحـی شـبکهٔ معـابر اضـطراری بـرای تمـامی حـالات، ازطریـق بهینـه‌سـازی و سیسـتم‌هـای اطلاعات مکانی؛ ۳) تعیین گزینه‌هـای تخصـیص منـابع بودجهٔ مقاوم‌سـازی پـل‌هـا؛ ۴) محاسـبهٔ امیـد ریاضـی شاخص طول شبکه، بـا درنظرگـرفتن احتمـال رخـداد برای هر حالت شبکه؛ ۵) رتبه‌بندی گزینه‌های تخصیص منابع بودجهٔ مقاوم‌سازی پل‌ها (اولویـت‌بنـدی پـل‌هـا). کارآیی این شـیوه نیـز، در نهایـت، روی بخشـی از شـبکهٔ معابر واقعی و در مقیاس بزرگ شهر تهـران نشـان داده شده است.

۳-۱- طراحی شبکهٔ امدادرسانی برای تمامی حـالات، ازطریق بهینه‌سازی و سیستم‌های اطلاعات مکانی

شبکهٔ معابر متشکل از کمان‌ها (پل‌ها) و گره‌های متعدد است. در پی وقوع بحران زلزله، پل‌ها مهم‌تـرین اجـزای شبکهٔ معابر شمرده می‌شوند کـه وضـعیت خرابـی‌هـای متفاوتی ازجمله بدون آسیب، با آسیب جزئی، با آسـیب متوسط و خرابـی کامـل درمـورد آنهـا پـیش مـی‌آیـد. وضعیت‌های خرابی با استفاده از منحنی‌هـای خرابـی و احتمال شکست پل بر اثر شدت‌های متفاوت زلزله بیان می‌شـود. بـا اسـتفاده از نتـایج مـذکور، در ایـن مقالـه، وضعیت هر پل پس از وقوع زلزله به دو شـکل غیرقابـل استفاده[3] و قابل استفاده[4] تعریف و بـه‌ترتیـب، بـا ۰ و ۱ نشان داده شده است. برای نمونه، ترتیب پـنج رقـم ۰ و ۱ به‌صورت «۱۰۱۱۰» در شبکه‌ای جاده‌ای شامل پـنج پل، بیانگر قابل‌استفاده‌بودن سه پل اول، سوم و چهـارم و غیرقابـل اسـتفاده بـودن دو پـل بـاقی مانـده اسـت. بدین‌ترتیب با توجه به تعداد و وضعیت خرابی هـر پـل، ترکیب‌های متفاوتی از حالت‌های خرابی (s) و به‌تبع آن نیز، حالات احتمالی شـبکه‌ای جـاده‌ای تعریـف خواهـد شد. ضمناً براساس محدودیت‌های مـدل، حالـت پـل در زمانی که یک خط مسدود است اما بهره‌برداری از دیگـر بخش‌های آن امکان‌پذیر باشد، همچنان قابـل اسـتفاده تلقی می‌شود و این فرض در حل مسئله به‌کـار مـی‌رود.

1. Choi
2. Iran University of Science and Technology
3. Un-functional
4. Functional

البته باید توجه داشت چه بسا، با وجود زیادبودن آسیب‌های وارد بر جسم پل، خط یا خطوط پل همچنان باز و قابل استفاده باشند. در مقابل نیز ممکن است، با وجود اندک‌بودن آسیب‌های واردشده بر بدنهٔ پل، خط یا خطوط آن مسدود باشند و عملاً بهره‌برداری از پل امکان‌پذیر نباشد.

طراحی شبکهٔ معابر اضطراری ازطریق بهینه‌سازی، با درنظرگرفتن 2^n حالت قابل رخداد (n: تعداد پل‌ها) انجام می‌شود. شبکهٔ لایه‌های ایجادشده در محیط GIS نیز مبنای ورودی مدل بهینه‌سازی‌اند. در نمایش شبکه، نقاط دسترسی ازطریق گره‌ها و لایه‌های مسیر مشخص می‌شوند. در مقالهٔ حاضر، شاخص‌های کارآیی شبکهٔ راه‌های اضطراری[1] برای تعیین تابع هدف (کمینه‌کردن طول کل شبکه- T_{NLs}) و محدودیت‌های مدل پیشنهادی (زمان کل سفر، پوشش نقاط و برقراربودن اتصال بین مبادی و مقاصد) به‌کار رفته است. در بخش‌های بعدی، مسئلهٔ شبکهٔ امدادرسانی اضطراری با استفاده از تابع هدف و محدودیت‌ها مطرح شده است. پیش از شرح و بسط روش‌شناسی به‌کاررفته و به‌منظور تسهیل و درک بهتر مدل، نمادهای مورد استفاده با عنوان مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. نمادهای به‌کاررفته در روابط ریاضی مدل

مجموعه‌ها	
مجموعهٔ تمامی ترکیبات ممکن برای حالت‌های خرابی پل ($s \in S$)	S
مجموعهٔ تمامی کمان‌های واقع در شبکهٔ حمل‌ونقل ($a \in A$)	A
مجموعهٔ تمامی نقاط ($k \in K$)	K
مجموعهٔ تمامی پل‌ها و کمان‌ها ($b \in B$)	B
مجموعهٔ تمامی مسیرها ($r \in R$)	R
مجموعهٔ تمامی زوج تقاضاها- مبدأها و مقصدها ($(o.d) \in OD$)	OD
پارامترها	
طول کل شبکه	T_{NLs}
یک عدد مثبت به‌اندازهٔ کافی بزرگ	M_{big}
زمان سفر در مسیر r	T_r
کل زمان سفر مورد نظر برای شبکه‌ای مشخص	TT
کل زمان سفر برای شبکه‌ای مشخص	T_{TT}
طول کمان a	l_a
شاخص اهمیت مسیر r -	I_r
ظرفیت پس از بحران کمان a -	K_a
تعداد مسیرهای مورد نیاز بین مبدأ o و مقصد d	N^{od}
نقاط دارای امکان پوشش	N_o
مقدار تقاضا بین o و d که از مسیر r عبور می‌کنند	q_r^{od}
حداقل سطح پوشش	$\propto_o$
مقدار بودجهٔ تخصیص‌یافته (مجاز) به‌منظور مقاوم‌سازی	rC
هزینهٔ مقاوم‌سازی b	c_b
عدد احتمال پیش‌بینی‌شده برای بقای پل b، پیش از مقاوم‌سازی	P_b
احتمال رخداد برای هر حالت s	P_s
احتمال بقای پل b پس از مقاوم‌سازی	q_b
بیشترین مقدار طول کل شبکه	$E(T_{NLs})^{Max}$
کمترین مقدار طول کل شبکه	$E(T_{NLs})^{Min}$
عدد حدی مفروض برای احتمال کل خرابی پل	TF

1. DRRs Performance Indexes

ادامهٔ جدول ۱

احتمال کل خرابی پل‌ها	P_{TF}
امید ریاضی طول شبکه	$E(T_{NLs})$
مقدار شاخص نرمال برای هر حالت شبکه	$E(\widehat{T_{NLs}})$
احتمال بقای پل	$f_s(b)$

متغیرها

متغیر تصمیم انتخاب کمان a (عدد ۱، در صورت انتخاب کمان a و عدد ۰، در حالت دیگر)	y_a
متغیر تصمیم انتخاب مسیر r (عدد ۱، در صورت انتخاب مسیر r بین مبدأ o و مقصد d و عدد ۰، در حالت دیگر)	x_r^{od}
متغیر تصمیم پوشش نقاط بااهمیت k از نوع مبدأ o (عدد ۱، در صورت پوشش نقطهٔ k با نوع o و عدد ۰، در حالت دیگر)	z_k^o
متغیر تصمیم وجود کمان a در مسیر (عدد ۱، درصورتی‌که کمان a بخشی از مسیر r باشد و عدد ۰، در حالت دیگر)	δ_r^a
متغیر تصمیم پوشش نقاط مهم k (عدد ۱، درصورتی‌که نقطهٔ k با کمان a پوشش داده شود و عدد ۰، در حالت دیگر)	δ_a^k
متغیر تصمیم وضعیت خرابی پل b در حالت s (عدد ۱، درصورتی‌که پل b در حالت s غیرقابل استفاده باشد و عدد ۰، در حالت دیگر)	$\sim H_s^b\ y_b$

۳-۲- بهینه‌سازی

محدودبودن منابع لازم برای تأمین هزینه‌های آماده‌سازی، نگهداری و مقام‌سازی پیش از وقوع بحران، از یک‌سو و فقدان نیروهای انتظامی کافی برای کنترل شبکهٔ معابر در شرایط بحرانی، از دیگرسو، از مهم‌ترین مواردی است که در طراحی شبکهٔ معابر اضطراری (به‌ویژه در کلان‌شهرها و شهرهای بزرگ با ابعاد وسیع و شبکهٔ معابر طولانی) باید به آنها توجه داشت. تخصیص نیروهای امدادی در وضعیت بحران و آماده‌به‌کاربودن شبکهٔ امدادرسانی (صرف‌نظر از محدودیت منابع) اهمیت بسیاری دارد. همچنین شبکهٔ امدادرسانی اضطراری باید، با توجه به نقاط کنترل (مانند نقاط تقاطع) و محدودیت تعداد نیروهای نظامی، انتظامی و امدادرسانی، طول مناسبی داشته باشد. بدین‌ترتیب درنظرگرفتن شاخص طول شبکه، با توجه به اهمیت مدیریت و حفظ و بازگشایی این مسیرها، دارای اولویت مهمی است و از همین رو، کمینه‌کردن مجموع طول کمان‌های منتخب، یا همان طول کل شبکه (T_{NLs}) به‌منزلهٔ تابع هدف در نظر گرفته شده است. در رابطه (۱)، l_a و y_a به‌ترتیب بیانگر طول کمان a و متغیر تصمیم انتخاب این کمان هستند. اگر کمان a جزء کمان‌های شبکهٔ امدادرسانی اضطراری انتخاب شده باشد، متغیر تصمیم y_a برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر با ۰ محسوب می‌شود. ترکیب‌های متفاوت حالت‌های شکست پل‌ها به‌منزلهٔ s در نظر گرفته می‌شوند. برای هر حالت $s \in S$ باید رابطه (۱) مطابق مرحلهٔ پیشین، حل و اجرا شود. محدودیت‌های مدل در بخش بعدی آمده است.

$$\text{Min: } T_{NLs} = \sum_a l_a y_a. \qquad \forall s \in S. \qquad \text{رابطه (۱)}$$

محدودیت‌های مدل پیشنهادی در قالب روابط (۲) تا (۱۰) پیش‌بینی شده است. در این محدودیت‌ها، امکان تعریف چندین زوج نقاط تقاضای دسترسی امدادی که هریک دارای مبدأ و مقصد خاص خود است، وجود دارد. مسیریابی بین زوج نقاط تقاضای دسترسی امدادی در روابط (۲) و (۳) در نظر گرفته شده است. در این روابط، مجموعهٔ تمامی زوج تقاضاها (مبدأها و مقصدها) در مسیر امدادرسانی اضطراری با OD و تعداد مسیرهای مورد نیاز مابین مبدأ o و مقصد d با N^{od} نشان داده شده است. ایجاد مسیرهای دسترسی (یا اتصال)، در شرایط بحران، مسئله‌ای ضروری و حیاتی است. بین هر زوج تقاضا (o و d)، مسیرهای متفاوتی وجود دارد که مدل فقط مجاز به انتخاب تعداد محدودی از آنهاست. رابطه (۲) انتخاب مسیر، برای تأمین دسترسی از نقطهٔ تقاضای o به نقطهٔ خدمت‌دهندهٔ d را کنترل می‌کند. متغیر x_r^{od} متغیری دوتایی (۰ و ۱) برای انتخاب مسیر است و ازطریق محدودیت‌های مدل به متغیر تصمیم انتخاب کمان (y_a) مرتبط می‌شود. با درنظرگرفتن مسیرهای اضافی برای تقاضاهای دارای اهمیت بیشتر، احتمال اتصال زوج

تقاضاها افزایش می‌یابد. اگر N^{od} بزرگ‌تر از یک در نظر گرفته شود، تعداد تقاضای عبوری از مسیر دسترسی امدادی را می‌توان بین چند مسیر توزیع کرد. q_r^{od} میزان تقاضاهای مابین مبدأ o و مقصد d است که از مسیر r عبور می‌کنند. اگر کمان a در شبکهٔ منتخب قرار نداشته باشد، y_a برابر ۰ و در غیراین‌صورت برابر با ۱ است. این روابط تضمین می‌کنند که هر تقاضا از مبدأ خود خارج می‌شود و متعاقب عبور از گره‌های میانی، به گره انتهایی می‌رسد. رابطه (۳) عامل اتصال مسیر به کمان است. در صورت انتخاب مسیر r ازطریق پارامتر δ_r^a (نشان‌دهندهٔ اینکه کمان a جزئی از مسیر r است)، متغیر y_a مرتبط نیز انتخاب و مقدار آن ۱ منظور می‌شود. درمورد هر کمان، می‌توان حداکثر تعداد مسیرهای عبوری را جداگانه در نظر گرفت. رابطه (۳) تضمین می‌کند که مجموع تعداد مسیرهای دسترسی امدادی روی هر کمان a (q_r^{od}) نباید از ظرفیت پس از بحران آن کمان (K_a) بیشتر شود. پوشش نقاط دارای اهمیت در شبکهٔ مسیرهای دسترسی امدادی و برقراری حداقل سطح پوشش در مدل ($\propto_o$) حاصل روابط (۴) تا (۶) است. روابط (۴) و (۵) از این پارامترها برای تعیین نقاط تحت پوشش و کمان‌های به‌کاررفته بهره می‌برند.

y_aکمان‌های استفاده‌شده و δ_a^k نقاط تحت پوشش این کمان‌ها را انتخاب می‌کند. با انتخاب کمان‌های y_a ازطریق روابط اخیر، نقاط پوشش‌داده‌شدهٔ مجموعهٔ K مشخص می‌شود. متغیر تصمیم Z_k^O عددی دوتایی (باینری) است. چنانچه نقطهٔ k از نوع o (مبدأ) پوشش‌داده‌شده باشد، Z_k^O برابر با ۱ و در غیر این صورت، ۰ خواهد بود. M_{big} عددی به‌اندازهٔ کافی بزرگ را نشان می‌دهد. در واقع، با مشخص‌نمودن ماتریس همسایگی با استفاده از هر کمان ازطریق پارامتر δ_a^k (نشان‌دهندهٔ پوشش نقطهٔ k برطبق کمان a)، نقاط پوشش‌یافته در محدودیت‌های مدل نیز مشخص می‌شوند. هنگامی که کمان a نقطهٔ k را پوشش می‌دهد، پارامتر δ_a^k مرتبط روی ۱ تنظیم می‌شود.

ازآن‌جاکه پوشش مناطق اضطراری به‌منزلهٔ نکته‌ای حیاتی و بحرانی در مدل مطرح می‌شود، رابطه (۶) عهده‌دار این موضوع شده است. حداقل سطح پوشش در این رابطه ($\propto_o$) نسبت تعداد نقاط پوشش‌یافته (Z_k^O) به کل نقاط دارای قابلیت پوشش (N_o) تعریف شده است. در ضمن، باید به پوشش برخی مکان‌های شبکهٔ امدادرسانی (به‌صورت غیرمبدأ ـ مقصد) نیز توجه داشت. در صورت نیاز به پوشش حتمی، پارامتر پوشش برای آن مجموعه نقاط برابر با ۱ منظور می‌شود. همچنین با توجه به متفاوت‌بودن سطح اهمیت سفرهای اضطراری براساس اهداف متفاوت، زمان‌های سفر وزن‌داده‌شده برای *OD*های گوناگون، با استفاده از پارامتر I_r در محدودیت اعمال شده‌اند. برای نمونه، سفرهای با هدف انتقال قربانیان بیشتر از سایر سفرهای اضطراری اهمیت دارد که در مطالعهٔ موردی، از عدد ۱ برای مقدار مورد نظر استفاده شده است. در رابطه (۷)، زوج تقاضاها (*OD*) باید ازطریق مسیرهای rبین o و d، با کمترین زمان ممکن، اتصال یابند (*TT*). بین هر مبدأ و مقصد (براساس اهمیت تقاضای تحت پوشش)، شاخص اهمیت مسیر (I_r) با ضرب آن در زمان سفر (T_r) منظور شده است. مجموع این حاصل‌ضرب در مسیرهای منتخب (T_{TT}) همواره باید از پارامتر زمان سفر کل مورد نظر (*TT*) کمتر باشد که در رابطه (۸) نشان داده شده است. این پارامتر، به‌منزلهٔ ورودی مدل، براساس تحلیل زمان سفر تقاضاها ارزیابی می‌شود. رابطه (۸) تضمین می‌کند که زمان سفر کل شبکه (T_{TT}) از زمان سفر کل مورد نظر (*TT*) بیشتر نمی‌شود. شایان ذکر است که T_r به کوتاه‌ترین زمان سفر برای یک زوج *OD* منفرد اشاره دارد؛ حال آنکه T_{TT} نشان‌دهندهٔ زمان سفر کل درمورد شبکه‌ای مشخص و متشکل از T_r مربوط به زوج *OD*های موجود در شبکه است. بنابراین هم T_{TT} و هم *TT* درمورد کل شبکه محاسبه می‌شوند. وضعیت از پیش تعیین‌شدهٔ پل‌ها نیز در رابطه (۹) منظور می‌شود. در این رابطه، پارامتر H_s^b نشان‌دهندهٔ وضعیت خرابی پل‌هاست

(غیرقابل استفاده و قابل استفاده) که در حالت خرابی، مقدار آن ۱ در نظر گرفته می‌شود. در محدودیت اخیر مجموعهٔ پل‌ها برای یک کمان به‌خصوص در مدل، با B مشخص شوند ($b \in B$)؛ نتیجه آن است که پل‌های خرابِ نیازمند به مقاوم‌سازی با استفاده از متغیر y_b در رابطه (۱۰) انتخاب می‌شوند. این معادله مقدار مشخص y_b را برای هر پل ($b \in B$)، برمبنای حالت خرابی s تعیین می‌کند. این مقدار برای پل‌های انتخابی، در حالت خراب، عدد ۱ و در غیر این صورت عدد ۰ است. برای درنظرگرفتن پل‌های منتخب به‌منظور مقاوم‌سازی، در رابطه (۱۱) نیز از پارامتر y_b استفاده می شود. در این وضعیت و براساس حالات ممکن s، مدل کلی اجرا و پل‌های باقی‌مانده نیز، ازطریق این مجموعه محدودیت‌ها، وارد مدل می‌شوند. در نهایت هم رابطه (۱۲) حالت‌های دوتایی متغیرهای تصمیم در مدل را مشخص می‌کند. با بهره‌گیری از الگوریتم قطعی و دقیق شاخه و برش (به‌منزلهٔ روشی معمول برای حل و اثبات بهینه‌بودن برنامه‌های خطی اعداد صحیح بزرگ)، مدل بهینه‌سازی در فضایی محدب حل می‌شود. کدنویسی لازم، به‌منظور حل مسئله، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جاوا و نرم‌افزار CPLEX انجام شده و مثال‌های عددی مورد نظر به اجرا درآمده است.

$$\sum x_r^{od} \geq N^{od}. \qquad \forall (o.d) \in OD.$$

رابطه (۲)

$$K_a \cdot y_a \geq \sum_r \delta_r^a x_r^{od} \cdot q_r^{od}. \qquad \forall a \in A.r \in R.(o.d) \in OD.$$

رابطه (۳)

$$M_{big} \cdot z_k^o \geq \sum_a \delta_a^k \cdot y_a. \qquad \forall k \in K.a \in A.$$

رابطه (۴)

$$z_k^o \leq \sum_a \delta_a^k \cdot y_a. \qquad \forall k \in K.a \in A.$$

رابطه (۵)

$$\frac{\sum_k z_k^o}{N_o} \geq \propto_o . \qquad \forall o \in O.k \in K.$$

رابطه (۶)

$$T_{TT} = \sum_r l_r \cdot T_r x_r^{od}. \qquad \forall (o.d) \in OD.r \in R.$$

رابطه (۷)

$$T_{TT} \leq TT.$$

رابطه (۸)

$$y_b = H_s^b. \qquad \forall b \in B.s \in S.$$

رابطه (۹)

$$y^b.x_r^{od}.y_a.z_k^o \in \{0.1\}. \qquad \forall r \in R.\forall a \in A.\forall k \in K.(o.d) \in OD.o \in O.$$

رابطه (۱۰)

۳-۳- تعیین و رتبه‌بندی گزینه‌های تخصیص منابع بودجهٔ مقاوم‌سازی پل‌ها

در روابط (۱۱) و (۱۲)، گزینه‌های مقاوم‌سازی ممکن، براساس بودجهٔ در دسترس (rC) ارزیابی و تعیین می‌شوند. در معادلات مورد اشاره، C بودجهٔ در اختیار، r درصد بودجهٔ قابل تخصیص و c_b هزینهٔ مقاوم‌سازی پل‌هاست. پاسخ‌های به‌دست‌آمده مجموعهٔ گزینه‌های تخصیص بودجه را تشکیل می‌دهند. به‌صورت‌کلی، ازطریق مقاوم‌سازی، احتمال وقوع رخداد کاهش شایان توجهی می‌یابد.

$$rC \geq \sum_b c_b y_b. \qquad \forall b \in B.$$

رابطه (۱۱)

$$y_b \in 0.1$$

رابطه (۱۲)

با درنظرگرفتن احتمال رخداد برای هر حالت پل و انجام‌دادن محاسبات امید ریاضی تابع هدف در هر گزینهٔ مقاوم‌سازی، احتمال خرابی پل جدید به‌روزرسانی می‌شود. در رابطه (۱۳)، q_b بیانگر احتمال بقای پل bپس از مقاوم‌سازی و ($1-q_b$) احتمال بقا درمورد دیگر پل‌هایی است که برای مقاوم‌سازی انتخاب نشده بودند. با توجه به اجزای متمایز هر سناریو، مقادیر حاصل از محاسبات احتمال بقای پل پس از مقاوم‌سازی، متفاوت است. عناصر متفاوت سناریوی فاجعه‌آمیز نیز در این مقادیر اثرگذار خواهد بود. در سناریوهای مقالهٔ حاضر،

مقدار q_b براساس کیفیت ساختاری فرضی پل‌ها، بودجهٔ فرضیِ در دست و بزرگی فرضی زلزلهٔ در حال وقوع، برابر با ۰/۹ در نظر گرفته شده است (مقدار q_b -۱ نیز معادل ۰/۱ خواهد شد که عددی کوچک است). البته می‌توان مقادیر دیگری را نیز در نظر گرفت که به‌طبع، به سناریوهای گوناگون زلزله می‌انجامند. متغیرهای ورودی برای احتمال بقا و شکست پل با دقت اعشاری تعریف می‌شوند. در نتیجه، مقدار ۰/۹ که در این مطالعه، برای احتمال بقا پس از مقاوم‌سازی در نظر گرفته شده است، مقداری مناسب خواهد بود. روابط (۱۳) و (۱۴) به‌ترتیب احتمال بقای پل ($f_s(b)$) و احتمال وقوع رخداد (P_s) برای هر حالت s را مشخص می‌نمایند. پارامتر H_s^b وضعیت مقاوم‌سازی پل (۰ یا ۱) را نشان می‌دهد. امید ریاضی طول شبکه ($E(T_{NLs})$) با استفاده از رابطه (۱۵) و درنظرگرفتن حالات s تعیین می‌شود. T_{NLs} نیز نشان‌دهندهٔ مقدار تابع هدف در حالت s است (هر حالت s بیانگر یک ترکیب از پل‌های پایدار یا تخریب‌شده خواهد بود). در صورت استفاده از روش نمونه‌گیری، مجموعهٔ حالات M انتخاب می‌شود ($M \subset S$).

$$f_s(b) = \begin{cases} q_b & \text{, if } H_s^b = 1. \quad \forall b \in B. s \in S. \\ 1 - q_b & \text{. if } H_s^b = 0. \quad \forall b \in B. s \in S. \end{cases}$$

رابطه (۱۳)

$$P_s = \prod_b f_s(b). \qquad \forall b \in B. s \in S.$$

رابطه (۱۴)

$$E\left(T_{NLs}\right) = \frac{\sum_{s \in M} T_{NLs} \times P_s}{\sum_{s \in M} P_s}$$

رابطه (۱۵)

در رتبه‌بندی پل‌ها، گزینه‌های تخصیص بودجه با مقادیر امید ریاضی کمتر، مطلوب‌تر است. تصمیم‌های نهایی نیز با توجه به بودجهٔ در دسترس گرفته می‌شود. به‌منظور مقایسهٔ بهتر گزینه‌های مقاوم‌سازی، شاخص‌های نرمال $E(\widehat{T_{NLs}})$ برای هر حالت شبکه، با استفاده از رابطه (۱۶) به‌دست می‌آید و بیشترین و کمترین مقدار امید ریاضی طول کل شبکه به‌صورت $E(T_{NLs})^{Max}$ و $E(T_{NLs})^{Min}$ در نظر گرفته می‌شود. در هر گزینهٔ مقاوم‌سازی پیشنهادی، احتمال کل خرابی پل‌ها به‌معنی احتمال خرابی هم‌زمان تمامی پل‌هاست. گزینه‌های تخصیص بودجه باید احتمال کل خرابی مورد قبولی داشته باشند تا، پس از وقوع بحران، آسیب‌پذیری شبکه کمتر باشد. بدین‌منظور محدودیت احتمال کل خرابی پل‌ها با P_{TF} نمایش داده می‌شود و در رتبه‌بندی گزینه‌ها به‌کار می‌رود (رابطه (۱۷)). در این معادله، q_b -۱ مقدار به‌روزشدهٔ احتمال خرابی پل است. به‌صورت‌کلی هدف اصلی، در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، یافتن یک گزینهٔ تخصیص منابع بودجه با کمترین مقادیر شاخص نرمال است.

$$E(\widehat{T_{NLs}}) = \frac{E(T_{NLs}) - E(T_{NLs})^{Min}}{E(T_{NLs})^{Max} - E(T_{NLs})^{Min}}$$

رابطه (۱۶)

$$P_{TF} = \prod_b (1 - q_b) \leq TF. \quad \forall b \in B.$$

رابطه (۱۷)

۴- به‌کارگیری روش با استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی برای شبکه‌ای در ابعاد واقعی (تهران)

کلان‌شهر پرجمعیت و آسیب‌پذیر تهران، به‌دلیل قرارگرفتن روی گسل‌های فعال در دامنهٔ جنوبی رشته‌کوه‌های البرز، ازجمله مناطق حساس و در معرض وقوع زلزله‌های بسیار شدید است. وجود گسل‌های متعدد در اطراف شهر (مشا، شمال تهران، ری و کهریزک) دلیل اصلی این زلزله‌خیزی به‌شمار می‌رود و سوابق تاریخی نیز مؤید این تهدید و خطر جدی است. در مطالعهٔ موردی حاضر، سناریوهای زلزله براساس گسل حاکم طراحی و تولید شده‌اند. پارامترها دیگر طبق داده‌های موجود برآورد شده و زوج‌های OD نیز برگرفته از تحقیقات پیشین

دانشگاه علم و صنعت ایران (۲۰۱۶) هستند. در مرحلهٔ پاسخ به زلزله، معابر ورودی شهر[1]، ایستگاه راه‌آهن، فرودگاه‌ها، مراکز آتش‌نشانی[2]، مراکز امدادی و هلال احمر[3]، بیمارستان‌ها و مراکز اسکان موقت اهمیت و نقش پررنگی دارند و از آنها به‌منزلهٔ اصلی‌ترین و مهم‌ترین زوج مبدأها و زوج مقصدها بهره گرفته می‌شود. این نقاط به‌صورت لایه‌های محیط GIS، مبنای ورودی و شبکهٔ مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل مطرح‌شده، از شبکهٔ معابر اصلی شهر تهران به‌منزلهٔ شبکه‌ای در ابعاد واقعی با مقیاس بزرگ به‌طول کل ۱۴۵۲ کیلومتر، شامل ۴۹۱ کیلومتر شبکهٔ معابر بزرگراهی و ۹۶۱ کیلومتر شبکهٔ معابر غیربزرگراهی، استفاده شده است (شکل ۱). در فرایند طراحی شبکهٔ اضطراری با فرض بقای تمامی پل‌ها، شبکه‌ای به‌طول ۷۲۳ کیلومتر مشتمل‌بر ۴۳۲ کیلومتر شبکهٔ معابر بزرگراهی و ۲۹۱ کیلومتر شبکهٔ معابر غیربزرگراهی به‌دست می‌آید که جزئیات آن در شکل ۲ نشان داده شده است. این شبکه از پل‌های متعددی در سطح شهر تهران می‌گذرد که هریک از این پل‌ها دارای یک احتمال خرابی در برابر سناریوی زلزلهٔ مورد نظر است. شکل ۳ موقعیت و احتمال خرابی پل‌های واقع در شبکهٔ اضطراری تهران را نشان می‌دهد که حداکثر احتمال خرابی آنها، در برابر زلزله، به‌طور متوسط حدود ۲۰٪ است. برای به‌کارگیری این روش، چهار پل با بدترین وضعیت پایداری انتخاب شدند. موقعیت این پل‌ها (به رنگ قرمز و با احتمال خراب‌نشدن ۷۴ تا ۸۵٪) در شکل ۳ مشخص شده است. به‌منظور ساده‌سازی محاسبات و آزمایش مدل در یک سناریوی زلزله، احتمال بقا و خرابی تمامی چهار پل پیش از مقاوم‌سازی، به‌ترتیب ۰/۸ و ۰/۲ و هزینهٔ مقاوم‌سازی هریک از آنها نیز ۱۰ واحد فرض شده است (جدول ۲).

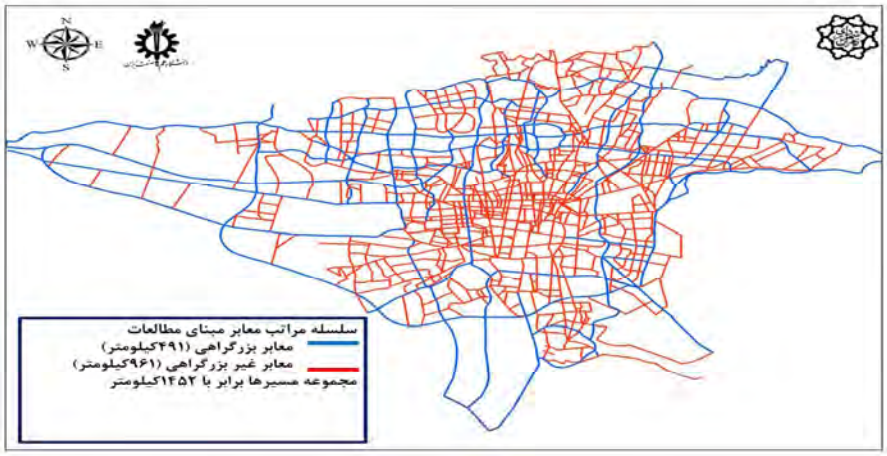
۱-۴- نتایج به‌کارگیری روش مورد نظر در شبکهٔ تهران

مراحل مورد اشاره براساس روش‌شناسی مطرح‌شده روی بخشی از شبکهٔ معابر واقعی و در مقیاس بزرگ شهر تهران به اجرا درآمد که نتایج آن به شرح ذیل است (به‌ترتیب مراحل پنجگانه).

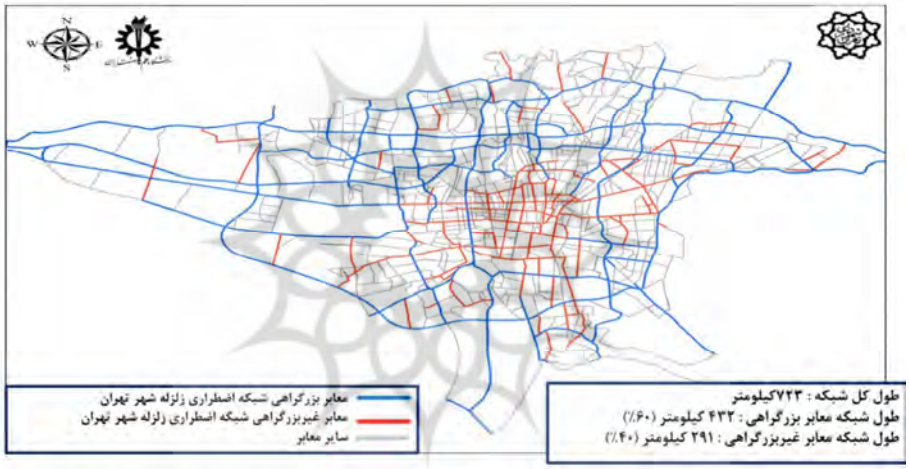
۱-۱-۴- تعیین حالات ممکن شبکه

حالات ممکن شبکه، با توجه به تعداد چهار دستگاه پل انتخابی، معادل با شانزده حالت (دو به‌توان چهار) خواهد بود. به‌رغم وضعیت‌های خرابی متعدد و پیوسته در برابر پل‌ها، فرض بر این است که هر پل فقط با دو وضعیت خرابی (قابل استفاده و غیرقابل استفاده) روبه‌روست. مطابق با احتمال بقا و خرابی هر پل (بدون مقاوم‌سازی) و همچنین براساس وضعیت خرابی هر پل منتخب در هر حالت (یعنی دو وضعیت قابل استفاده و غیرقابل استفاده، به‌ترتیب با شماره‌های ۱ و ۰)، احتمال رخدادهای متفاوت درمورد حالت‌های ممکن پل‌ها محاسبه و در ستون آخر جدول ۳ ثبت می‌شود. این احتمال از ضرب متوالی عدد متناظر با احتمال رخداد خرابی یا بقای تمامی پل‌های جدول ۲ در یکدیگر به‌دست می‌آید. برای نمونه، یک عدد ۰ و سه عدد ۱ در مقابل حالت ۱۲ و ذیل ستون‌های A تا D جدول ۳ به این معنی است که پل A غیرقابل استفاده (در وضعیت خرابی) و پل‌های B تا D قابل استفاده (در وضعیت بقا) هستند. بنابراین برای به‌دست‌آوردن احتمال رخداد مربوط به این ردیف، احتمال خرابی پل A (۰/۲) در احتمال بقای سایر پل‌ها، یعنی ۰/۸ و ۰/۸ و ۰/۸، ضرب و در ستون آخر جدول ۳ قرار می‌گیرد. در ضمن، به‌موجب ردیف انتهایی جدول، مجموع احتمال رخداد تمامی حالات برابر با ۱ است. براساس این جدول، بیشترین احتمال رخداد بدون مقاوم‌سازی پل‌های A تا D مربوط به حالت ۱۶ با مقدار ۰/۴۰۹۶ است.

1. Entrance Gates
2. Fire-Fighting Station
3. Red Crescent Stations



شکل ۱. مجموعهٔ شبکهٔ معابر مبنای مطالعات در محیط GIS



شکل ۲. مجموعهٔ معابر انتخاب‌شده در شبکهٔ معابر اضطراری شهر تهران برای بحران زلزله، در محیط GIS

شکل ۳. پل‌های سواره‌رو واقع در شبکهٔ معابر اضطراری شهر تهران، با احتمال بقای آنها در محیط GIS

جدول ۲. احتمال بقا و خرابی پل‌ها پیش از مقاوم‌سازی و هزینهٔ مقاوم‌سازی

نام پل	A	B	C	D
احتمال بقا	0.8	0.8	0.8	0.8
احتمال خرابی	0.2	0.2	0.2	0.2
هزینهٔ مقاوم‌سازی	10	10	10	10

جدول ۳. حالت‌های ممکن شبکه و وضعیت خرابی پل‌ها پس از وقوع زلزله

احتمال رخداد بدون مقاوم‌سازی	وضعیت خرابی پل 1: قابل استفاده، ۰: غیرقابل استفاده				شمارهٔ حالت
	D	C	B	A	
0.0016	0	0	0	0	1
0.0064	1	0	0	0	2
0.0064	0	1	0	0	3
0.0064	0	0	1	0	4
0.0064	0	0	0	1	5
0.0256	1	1	0	0	6
0.0256	1	0	1	0	7
0.0256	1	0	0	1	8
0.0256	0	1	1	0	9
0.0256	0	1	0	1	10
0.0256	0	0	1	1	11
0.1024	1	1	1	0	12
0.1024	1	1	0	1	13
0.1024	1	0	1	1	14
0.1024	0	1	1	1	15
0.4096	1	1	1	1	16
1	مجموع				

۴-۱-۲- طراحی شبکه‌های اضطراری و تعیین شاخص‌های کارآیی شبکه

در مرحلهٔ قبل، حالت‌های ممکن شبکه و وضعیت خرابی چهار پل موجود در شبکه پس از وقوع زلزله، شامل شانزده حالت و در دو وضعیت ۰ و ۱، مطابق جدول ۳ تعریف شد. در مرحلهٔ حاضر نیز، مسئلهٔ طراحی شبکهٔ معابر اضطراری براساس رابطه (۱) و محدودیت‌های معادلات (۲) تا (۱۰) حل و نتایج مقدار تابع هدف (طول کل شبکه)، پس از اجرا روی شانزده حالت یادشده، در جدول ۴ نشان داده شده است. ضمناً در محدودیت مدل، نسبت تعداد نقاط پوشش‌یافته به کل نقاط دارای قابلیت پوشش ($\propto_o$) معادل ۰/۵، به‌منزلهٔ حداقل سطح پوشش در نظر گرفته شده است (در صورت نیاز به پوشش حتمی، پارامتر پوشش درمورد مجموعه نقاط را می‌توان معادل ۱ در نظر گرفت). با توجه به شرایط تقاضاهای امداد پس از وقوع بحران و تفاوت اهمیت سفرهای اضطراری برای اهداف گوناگون، لازم است زمان‌های سفر وزن داده‌شده برای *OD*های متفاوت با استفاده از پارامتر I_r در محدودیت اعمال شوند؛ به‌دلیل مشخص‌نبودن اطلاعات و اهمیت دقیق سفرها در این مطالعه، مقدار ۱ برای I_r انتخاب شده است. براساس جدول ۴، کمترین مقدار طول کل شبکه برابر با ۶۲۷/۸۷ کیلومتر و متعلق به حالت ۴ است.

۴-۱-۳- تعیین گزینه‌های تخصیص بودجه

محدودیت بودجه همواره به‌صورت مهم‌ترین مانع در برابر مقاوم‌سازی پل‌های واقع در شبکهٔ معابر، ازجمله شبکهٔ معابر اضطراری، مطرح بوده است. به همین دلیل، معمولاً نمی‌توان همهٔ پل‌های واقع در شبکهٔ معابر، مثلاً چهار پل A تا D در مثال حاضر، با مجموع چهل واحد هزینه را مقاوم‌سازی کرد و وضعیت سازه‌ای آنها را ارتقا داد. البته این نکته را نیز باید در نظر داشت که حتی در صورت وجود منابع مالی لازم برای بهبود کامل وضعیت سازه‌ای پل‌ها، تصمیم به مقاوم‌سازی تمامی آنها اقدام درستی نخواهد بود. در واقع، نقطهٔ قوت روش‌شناسی

بیان‌شده در این است که نشان می‌دهد، چه بسا با صرف هزینهٔ کمتر برای بازسازی صرفاً تعدادی از پل‌های واقع در شبکهٔ معابر اضطراری، دستیابی به نتایج مطلوب به‌راحتی امکان داشته باشد. بدین‌ترتیب مجموعهٔ گزینه‌ها یا استراتژی تخصیص بودجه مشخص می‌شود. هر حالت $s \in S$ نیز به وضعیت سازه‌ای پل‌ها، پس از وقوع زلزله، اشاره دارد (S دربرگیرندهٔ همهٔ ترکیبات متفاوت حالات خرابی پل‌هاست). در مطالعهٔ حاضر، مقدار بودجهٔ در دسترس (rC) برای مقاوم‌سازی تمامی پل‌های منتخب شبکه، جمعاً بیست واحد در نظر گرفته شده است. گزینه‌های شانزده‌گانهٔ مقاوم‌سازی همراه با هزینهٔ مقاوم‌سازی C_b برای هر پل (که این‌جا ده واحد فرض می‌شود) در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۴. نتایج مقدار تابع هدف (طول کل شبکه- T_{NLs}) درمورد تمامی حالت‌های ممکن شبکه

شمارهٔ حالت (s)	تابع هدف / محدودیت‌ها	طول کل شبکه (T_{NLs}-کیلومتر)
	تابع هدف	
	$\text{Min: } T_{NLs} = \sum_a l_a y_a. \quad \forall s \in S.$	
1		646.62
2	**محدودیت‌ها**	646.62
3		693.47
4	$\sum x_r^{od} \geq N^{od}. \quad \forall (o.d) \in OD.$	627.87
5		693.47
6		674.73
7	$K_a \cdot y_a \geq \sum_r \delta_r^a x_r^{od} \cdot q_r^{od}. \quad \forall a \in A. r \in R. (o.d) \in OD.$	655.99
8		712.22
9		712.22
10	$M_{big} \cdot z_k^o \geq \sum_a \delta_a^k \cdot y_a. \quad \forall k \in K. a \in A.$	674.73
11		665.36
12	$z_k^o \leq \sum_a \delta_a^k \cdot y_a. \quad \forall k \in K. a \in A.$	712.22
13		684.10
14		721.59
15	$\frac{\sum_k z_k^o}{N_o} \geq \propto_o . \quad \forall o \in O. k \in K.$	693.47
	$T_{TT} \leq TT \quad = \sum_r I_r \cdot T_r x_r^{od}. \quad \forall (o.d) \in OD. r \in R.$	
16	$T_{TT} \leq TT$	702.84
	$y_b = H_s^b. \quad \forall b \in B. s \in S.$	
	$y^b. x_r^{od}. y_a. z_k^o \in \{0.1\}. \quad \forall r \in R. \forall a \in A. \forall k \in K. (o.d) \in OD. o \in O.$	

جدول ۵. گزینه‌های مقاوم‌سازی

گزینهٔ تخصیص بودجه	میزان بودجهٔ در دسترس $rC \geq \sum_b c_b y_b. \ \forall b \in B.$ $y_b \in 0.1$	پل‌های مورد نظر برای مقاوم‌سازی				تعداد پل‌های مورد نظر برای مقاوم‌سازی
A1	40	A	B	C	D	4
A2	30	A	B	C	D	3
A3	30	A	B	C	D	3
A4	30	A	B	C	D	3
A5	30	A	B	C	D	3
A6	20	A	B	C	D	2
A7	20	A	B	C	D	2
A8	20	A	B	C	D	2
A9	20	A	B	C	D	2
A10	20	A	B	C	D	2
A11	20	A	B	C	D	2
A12	10	A	B	C	D	1
A13	10	A	B	C	D	1
A14	10	A	B	C	D	1
A15	10	A	B	C	D	1
A16	0	A	B	C	D	0

۴-۱-۴- طراحی شبکه و محاسبهٔ امید ریاضی طول کل شبکه

احتمال رخداد (P_s)، درمورد شانزده حالت خرابی براساس احتمال بقای پل‌ها ($f_s(b)$)، در این مرحله محاسبه می‌شود. همچنین با دراختیارداشتن طول کل شبکه (T_{NLs})، امید ریاضی تابع هدف ($E(T_{NLs})$) برای حالت‌های متفاوت s (به‌منزلهٔ ترکیبی از پل‌های پایدار یا تخریب‌شده، از مجموعهٔ حالات M) تعیین و احتمال خرابی جدید درمورد پل‌های مقاوم‌سازی‌شدهٔ متعلق به هر گزینهٔ اشاره‌شده در مرحلهٔ پیش، به‌روزرسانی می‌شود. براساس کیفیت ساختاری پل‌ها، بودجهٔ در دسترس و بزرگی زلزلهٔ در حال وقوع، می‌توان احتمال بقای هر پل را پس از مقاوم‌سازی (q_b) تعیین کرد که با توجه به شرایط مطالعهٔ حاضر، عدد نسبتاً مناسب ۰/۹ برای آن در نظر گرفته شده است. بدین‌ترتیب احتمال بقا، درمورد سایر پل‌هایی که برای مقاوم‌سازی انتخاب نشده باشند، عدد کوچک ۰/۱ خواهد بود (q_b -۱). روشن است که مطابق با اجزای متمایز هر سناریو، مقادیر حاصل از محاسبات احتمال بقای پل پس از مقاوم‌سازی متفاوت است؛ ضمن آنکه عناصر متفاوت یک سناریوی بحرانی نیز در این مقادیر اثرگذار خواهد بود. پارامتر H_s^b بیانگر وضعیت مقاوم‌سازی پل، در دو حالت ۰ یا ۱ است؛ تخصیص q_b، (q_b -۱) و $f_s(b)$ برمبنای انتخاب این پارامتر صورت می‌گیرد. در جدول ۶، محاسبهٔ امید ریاضی برای گزینهٔ A1 و شانزده حالت بقا و خرابی چهار پل نشان داده شده است. با تشکیل همین جدول برای سایر گزینه‌های A2 تا A16 و محاسبهٔ امید ریاضی درمورد هریک از آنها، جدول ۷ به‌دست می‌آید.

جدول ۶. محاسبهٔ امید ریاضی درمورد گزینهٔ A1 (نخستین گزینه از بین شانزده گزینهٔ مقاوم‌سازی)

گزینهٔ A1		$H_s^b = 1.0.$ $\forall b \in B.s \in S.$				$f_s(b) = \begin{cases} q_b & \text{, if } H_s^b = 1. \\ 1-q_b & \text{. if } H_s^b = 0. \end{cases}$ $\forall b \in B.s \in S.$				$P_s = \prod_b f_s(b).$ $\forall b \in B.s \in S$	طول کل شبکه (T_{NLs})	$\sum_{s\in M} T_{NLs} \times P_s$
	احتمال بقای پل	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9			
گزینه‌های مقاوم‌سازی	احتمال خرابی پل	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1			
	سناریوی زلزله	A	B	C	D	A	B	C	D			
A1	1	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0001	646.62	0.064662
A2	2	0	0	0	1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.0009	646.62	0.581958
A3	3	0	0	1	0	0.1	0.1	0.9	0.1	0.0009	693.47	0.624123
A4	4	0	1	0	0	0.1	0.9	0.1	0.1	0.0009	627.87	0.565083
A5	5	1	0	0	0	0.9	0.1	0.1	0.1	0.0009	693.47	0.624123
A6	6	0	0	1	1	0.1	0.1	0.9	0.9	0.0081	674.73	5.465313
A7	7	0	1	0	1	0.1	0.9	0.1	0.9	0.0081	655.99	5.313519
A8	8	1	0	0	1	0.9	0.1	0.1	0.9	0.0081	712.22	5.768982
A9	9	0	1	1	0	0.1	0.9	0.9	0.1	0.0081	712.22	5.768982
A10	10	1	0	1	0	0.9	0.1	0.9	0.1	0.0081	674.73	5.465313
A11	11	1	1	0	0	0.9	0.9	0.1	0.1	0.0081	665.36	5.389416
A12	12	0	1	1	1	0.1	0.9	0.9	0.9	0.0729	712.22	51.92084
A13	13	1	0	1	1	0.9	0.1	0.9	0.9	0.0729	684.1	49.87089
A14	14	1	1	0	1	0.9	0.9	0.1	0.9	0.0729	721.59	52.60391
A15	15	1	1	1	0	0.9	0.9	0.9	0.1	0.0729	693.47	50.55396
A16	16	1	1	1	1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6561	702.84	461.1333
										$\sum_{s\in M} P_s = 1$	Min T_{NLs} = 627.87	$E(T_{NLs}) = \frac{\sum_{s\in M} T_{NLs} \times P_s}{\sum_{s\in M} P_s}$ =701.7144

جدول ۷. محاسبهٔ امید ریاضی طول شبکه

امید ریاضی طول شبکه $E(T_{NLs})$	طول کل شبکه T_{NLs}	گزینهٔ تخصیص بودجه	میزان بودجهٔ در دسترس	پل‌های مورد نظر برای مقاوم‌سازی				تعداد پل‌های مورد نظر برای مقاوم‌سازی
701.7144	646.62	A1	40	A	B	C	D	4
700.4747	646.62	A2	30	A	B	C	D	3
702.5369	693.47	A3	30	A	B	C	D	3
699.8188	627.87	A4	30	A	B	C	D	3
701.8622	693.47	A5	30	A	B	C	D	3
700.8819	674.73	A6	20	A	B	C	D	2
698.6324	655.99	A7	20	A	B	C	D	2
700.7508	712.22	A8	20	A	B	C	D	2
700.7883	712.22	A9	20	A	B	C	D	2
701.9696	674.73	A10	20	A	B	C	D	2
699.8138	665.36	A11	20	A	B	C	D	2
699.2215	712.22	A12	10	A	B	C	D	1
700.4589	684.10	A13	10	A	B	C	D	1
698.7717	721.59	A14	10	A	B	C	D	1
700.0842	693.47	A15	10	A	B	C	D	1
698.6747	702.84	A16	0	A	B	C	D	0

۵-۱-۴- رتبه‌بندی گزینه‌های تخصیص بودجه

تا مرحلهٔ پیشین، انتخاب گزینه‌های مقاوم‌سازی با توجه به مقدار بودجهٔ در دسترس rC امکان یافت و مشاهده شد که با بیست واحد بودجهٔ در دسترس، شش گزینهٔ A6 تا A11 از جدول ۷، پیشِ رو قرار می‌گیرد. با مرتب‌کردن شش گزینهٔ مذکور مطابق جدول ۸، گزینهٔ دارای کمترین مقدار امید ریاضی طول کل شبکه، یعنی گزینهٔ A7، در جایگاه گزینهٔ نهایی انتخاب خواهد شد. از نظر طول کل شبکه (T_{NLs})، نتایج منتهی به گزینهٔ A7 به‌وضوح نشان می‌دهد مقاوم‌سازی پل‌های A و C اولویت و اهمیتی بیشتر از پل‌های B و D دارند. به‌منظور یافتن گزینهٔ تخصیص منابع بودجه با کمترین مقادیر شاخص نرمال (با هدف تسهیل مقایسه و انتخاب بهترین گزینهٔ مقاوم‌سازی)، جدول ۹ ایجاد و حالت‌های متفاوت مقاوم‌سازی، به‌ازای مقادیر متفاوت بودجهٔ تخصیص‌یافته از صفر تا چهل واحد در آن نشان داده می‌شود. با فرض عدد ۰/۰۶ برای TF (عدد کوچکی بزرگ‌تر از ۰، برای احتمال خرابی کل)، فقط مقادیر شاخص نرمال در محدودهٔ احتمال خرابی کل کمتر از ۰/۰۶ یا در حدود نزدیک به آن، در نظر گرفته می‌شود. طبق شرایط پل‌های انتخابی در مطالعهٔ حاضر، فقط چهار مورد از میان شانزده گزینهٔ مقاوم‌سازی دارای این شرط‌اند. پس از مرتب‌کردن مقادیر نرمال طول کل شبکه $E(\widehat{T_{NLs}})$، گزینهٔ A2-30 (با سی واحد بودجه) به‌دلیل داشتن پایین‌ترین مقدار امید ریاضی (و ۲۵٪ کاهش هزینه)، بهترین گزینهٔ مقاوم‌سازی است. این گزینه نشان می‌دهد که با صرف سی واحد هزینه، شبکه‌ای مناسب‌تر و نتیجه‌ای به‌مراتب بهتر از گزینهٔ A1-40 (که به مقاوم‌سازی تمامی پل‌ها مربوط است) حاصل خواهد شد. این نتیجه بیانگر کارآمدی روش پیشنهادی است.

جدول ۸. رتبه‌بندی گزینه‌های تخصیص بودجه (انتخاب گزینهٔ مطلوب)

رتبه‌بندی	امید ریاضی طول شبکه $E(T_{NLs})$	طول کل شبکه T_{NLs}	گزینهٔ تخصیص بودجه	بودجهٔ تخصیص‌یافته	تعداد پل‌های مورد نظر برای مقاوم‌سازی
1	698.6324	674.73	A7	20	2
2	699.8138	655.99	A11	20	2
3	700.7508	712.22	A8	20	2
4	700.7883	712.22	A9	20	2
5	700.8819	674.73	A6	20	2
6	701.9696	665.36	A10	20	2

جدول ۹. مقادیر اهداف نرمال برای گزینه‌های مقاوم‌سازی

$$P_{TF} = \prod_b (1 - q_b) \le TF. \forall b \in B.$$

$$E(\widehat{T_{NLs}}) = \frac{E(T_{NLs}) - E(T_{NLs})^{Min}}{E(T_{NLs})^{Max} - E(T_{NLs})^{Min}}$$

گزینهٔ مقاوم‌سازی	بودجهٔ تخصیص یافته	پل‌های مورد نظر برای مقاوم‌سازی				$(f_s(b))$				$E(T_{NLs}))$	Ps	P_{TF}	$E(\widehat{T_{NLs}})$
A1	40	A	B	C	D	0.1	0.1	0.1	0.1	646.62	0.0001	$P_{TF} \le 0.1$	0.200
A2	30	A	B	C	D	0.1	0.1	0.1	0.2	646.62	0.0002	0.067	0.200
A3	30	A	B	C	D	0.1	0.1	0.2	0.1	693.47	0.0002	0.067	0.700
A4	30	A	B	C	D	0.1	0.2	0.1	0.1	627.87	0.0002	0.067	0.000
A5	30	A	B	C	D	0.2	0.1	0.1	0.1	693.47	0.0002	0.067	0.700
A6	20	A	B	C	D	0.1	0.1	0.2	0.2	674.73	0.0004	0.200	0.500
A7	20	A	B	C	D	0.1	0.2	0.1	0.2	655.99	0.0004	0.200	0.300
A8	20	A	B	C	D	0.2	0.1	0.1	0.2	712.22	0.0004	0.200	0.900
A9	20	A	B	C	D	0.1	0.2	0.2	0.1	712.22	0.0004	0.200	0.900
A10	20	A	B	C	D	0.2	0.1	0.2	0.1	674.73	0.0004	0.200	0.500
A11	20	A	B	C	D	0.2	0.2	0.1	0.1	665.36	0.0004	0.200	0.400
A12	10	A	B	C	D	0.1	0.2	0.2	0.2	712.22	0.0008	0.467	0.900
A13	10	A	B	C	D	0.2	0.1	0.2	0.2	684.1	0.0008	0.467	0.600
A14	10	A	B	C	D	0.2	0.2	0.1	0.2	721.59	0.0008	0.467	1.000
A15	10	A	B	C	D	0.2	0.2	0.2	0.1	693.47	0.0008	0.467	0.700
A16	0	A	B	C	D	0.2	0.2	0.2	0.2	702.84	0.0016	1.000	0.800

۴-۲- تحلیل نتایج

این پژوهش رویکردی جامع را در حل مسائل شبکهٔ راه‌های اضطراری، مطرح کرده است. در روش‌شناسی بیان‌شده، تأثیر عوامل متعددی ازجمله اتصال نقاط مهم بحران، احتمال خرابی، طول شبکه و زمان سفر کل به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شده است. پیش از این تحلیل، بررسی دقیقی درمورد اولویت‌بندی پل‌ها در شبکهٔ راه‌های اضطراری انجام نشده بود. با توجه به اهمیت بسیار این مسیرها در شرایط بحرانی پس از زلزله و آسیب‌پذیری پل‌ها در شبکه‌های جاده‌ای، این مطالعه اولین بار استراتژی اولویت‌بندی پل‌ها را مطرح می‌کند. این روش تحلیلی براساس یک مدل بهینه‌سازی و با درنظرگرفتن مسیرهای امدادی و شبکهٔ معابر اضطراری مطرح شده است. حل این مسائل معمولاً موضوعی تک‌وجهی نیست و به بررسی ابعاد گوناگونی نیاز دارد. نتایج این مطالعه و مدل مطرح‌شده نشان می‌دهد که می‌توان یک شبکهٔ معابر اضطراری را حتی با تخصیص بودجه‌های اندک و بدون افزایش احتمال کل خرابی و طول کل شبکه، تا حد مورد قبولی مقاوم‌سازی کرد و نتایج کارآمدتری به‌دست آورد. این واقعیت که مدل مطرح‌شده قادر است مطلوبیت‌های مورد نظر را در شرایط حداقل تخصیص بودجه تأمین کند، جنبهٔ دیگری از ارزشمندی پژوهش کنونی به‌شمار می‌رود.

در بیان سودمندی و اهمیت استراتژی بیان‌شده در مقالهٔ حاضر، باید توجه داشت که صرف منابع مالی افزون‌تر و اقدام به مقاوم‌سازی پل‌های بیشتر الزاماً بهترین گزینه نیست. مزیت دیگر مدل حاضر این است که اولویت‌بندی پل‌ها و معماری شبکهٔ راه‌های اضطراری را به‌طور هم‌زمان و در یک مدل مد نظر قرار داده و شرایط ادغام آنها را فراهم کرده است. این اولویت‌بندی از طراحی شبکه متمایز نیست و ازآن‌جاکه طیف وسیعی از گزینه‌ها را در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد، انتخاب را برای آنها آسان می‌سازد. با گنجاندن شاخص اهمیت در این مدل و گسترش آن در پژوهش‌های آتی، سناریوهای پیچیده‌تر دیگر در نتیجهٔ وقوع سایر بلایا و بحران‌های هم‌زمان را می‌توان ارزیابی و مطالعه کرد.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله با بهره‌گیری از مدل بهینه‌سازی، سیستم اطلاعات مکانی و روش تحلیلی به‌منظور تعیین گزینهٔ مقاوم‌سازی پل‌ها در شبکهٔ راه‌های اضطراری، روشی پیشنهاد شد. به‌منظور مقایسهٔ گزینه‌های مقاوم‌سازی و بهبود امدادرسانی پس از وقوع بحران، طول کل شبکه مورد توجه قرار گرفت (T_{NLs}). در روش‌شناسی مطرح‌شده، امکان ارزیابی گزینه‌های تخصیص بودجه فراهم و برای هر وضعیت خرابی ممکن و با توجه به کل بودجهٔ در اختیار، شبکهٔ راه‌های اضطراری طراحی شد.

پس از ساخت و بررسی تمامی حالات شبکه براساس پل‌های موجود در شبکهٔ نمونه و کل بودجهٔ در دسترس، نتایج نشان داد که مقاوم‌سازی یک پل به کاهش معتنابهِ میانگین طول شبکهٔ امدادی منجر می‌شود و با صرف حداقل هزینه، احتمال شکست شبکهٔ پیشنهادی کمتر خواهد شد. مسئلهٔ نمونه نشان داد که فقط با صرف حداکثر سی واحد هزینه در گزینهٔ پیشنهادی (A2-30) به‌جای چهل واحد به‌منظور مقاوم‌سازی تمامی پل‌ها و حتی با کاهش ۲۵درصدی بودجهٔ مقاوم‌سازی، شبکهٔ امداد اضطراری پایدارتری در پی وقوع زلزله خواهیم داشت. علاوه‌براین اشاره شد که چگونه می‌توان، با حل مسائل طراحی شبکهٔ معابر اضطراری، ضعف سازه‌ای پل‌ها را هم‌زمان مد نظر قرار داد. در نهایت نیز، بیان شد که نه‌تنها می‌توان مخاطرات شبکه را در فرایند بهره‌برداری کاهش داد بلکه، با استفاده از طول شبکه و بودجهٔ کمتر، مسیرهای امدادی با پوشش کافی و قابلیت اطمینان مطلوب‌تری مقاوم‌سازی خواهد شد. این مطالعه با ارائهٔ روشی کاربردی و به‌کارگیری آن درمورد بخشی از شبکه‌ای واقعی، توانسته است کار جدیدی در این زمینه عرضه کند.

۶- تقدیر و تشکر

در پایان، از مساعدت‌های ارزندۀ جناب آقای دکتر شریعت، رئیس محترم آزمایشگاه تحقیقاتی ترافیک دانشگاه علم و صنعت ایران و سایر همکاران ارجمند آن مجموعه در انجام‌شدن تحقیق حاضر، تقدیر و تشکر می‌کنیم.

۷- منابع

Babaei, M., Shariat-Mohaymany, A., Nikoo, N. & Ghaffari, A.R., 2019, **A Multi-Objective Emergency Network Design Problem to Carry Out Disaster Relief Operations in Developing Countries: A Case Study of Tehran, Iran**, Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 9(2), PP. 250-269.

Chandrashekaran, S. & Banerjee, S., 2014, O**ptimal Retrofit Strategy for Disaster Resilience of Highway Bridges**, In 10th US National Conference on Earthquake Engineering (PP. 21-25).

Choi, S., Chae, J. & Do, M., 2022, **Emergency Road Network Determination for Seoul Metropolitan Area**, Sustainability, 14(9), P. 5422.

Du, L. & Peeta, S., 2014, **A Stochastic Optimization Model to Reduce Expected Post-Disaster Response Time through Pre-Disaster Investment Decisions**, Networks and Spatial Economics, 14, PP. 271-295.

Edrissi, A., Poorzahedy, H., Nassiri, H. & Nourinejad, M., 2013, **A Multi-Agent Optimization Formulation of Earthquake Disaster Prevention and Management**, European Journal of Operational Research, 229(1), PP. 261-275.

Edrissi, A., Nourinejad, M. & Roorda, M.J., 2015, **Transportation Network Reliability in Emergency Response**, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 80, PP. 56-73.

Golroo, A. & Mohaymany, A.S., 2008, **Upgrading of Degradable Transportation Network by Investment**, Journal of Applied Sciences, 8(13), PP. 2404-2411.

Golroo, A., Mohaymany, A.S. & Mesbah, M., 2009, **Developing an Optimised Resource Allocation Framework in a Transport Network Based on Reliability**, Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice, 18(3), PP. 26-35.

Iran University of Science and Technology, 2016, **Design Project of the Emergency Road Network of Tehran City**, Tehran Municipality Transport and Traffic Deputy.

Nikoo, N., Babaei, M. & Mohaymany, A.S., 2018, **Emergency Transportation Network Design Problem: Identification and Evaluation of Disaster Response Routes**, International Journal of Disaster Risk Reduction, 27, PP. 7-20.

Shakiba, A., Mirjafari, S.B. & Alavi Betul Kamel, S.A., 2013, **Evaluation of Human Casualties and Building Damages in different Earthquake Scenarios under Conditions of Uncertainty (Case Study: District 8 of Tabriz City)**, Remote Sensing and GIS of Iran, 5(3), PP. 49-63.

Shariat-Mohaymany, A. & Babaei, M., 2010, **An Approximate Reliability Evaluation Method for Improving Transportation Network Performance**, Transport, 25(2), PP. 193-202.

Shariat Mohaymany, A. & Babaei, M., 2013, **Optimal Resource Allocation in Urban Transportation Networks Considering Capacity Reliability and Connectivity Reliability: A Multi-Objective Approach**, International Journal of Civil Engineering, 11(1), PP. 33-42.

Shariat Mohaymany, A. & Nikoo, N., 2020, **Designing Large-Scale Disaster Response Routes Network in Mitigating Earthquake Risk Using a Multi-Objective Stochastic Approach**, KSCE Journal of Civil Engineering, 24(10), PP. 3050-3063.

Shariat-Mohaymany, A., Hosseini, M. & Habibi, H.M., 2003, **Obtaining the Emergency Transportation Network for Rescue and Relief Activities in Large Cities Based on the Life Loss Mitigation Criteria**, In Advancing Mitigation Technologies and Disaster Response for Lifeline Systems (PP. 231-240).

Shariat-Mohaymany, A., Ehteshamrad, S. & Babaei, M., 2012, **A Reliability-Based Resource Allocation Model for Transportation Networks Affected by Natural Disasters**, Promet-Traffic& Transportation, 24(6), PP. 505-513.

Shariat-Mohaymany, A., Ehteshamrad, S. & Babaei, M., 2014, **Allocation of Investment in Transportation Network Based on Reliability**, Journal of Civil and Environmental Engineering of Tabriz University, 44(76), PP. 89-97.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

سنجش از دور
و
GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران سال پانزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۲
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.15, No. 1, Spring 2023
109-127

Retrofitting Resources Allocation Model for Bridges in the Emergency Roads Network of Tehran after an Earthquake: Optimization Model Using GIS

Shooreshi A.R.[1] and Zoghi H.[2]*

1. Ph.D. Student of Civil Engineering, Department of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Associate Prof. of Civil Engineering, Department of Engineering, karaj Branch, Islamic Azad University, karaj, Iran

Abstract

Among the network of urban roads, the network of emergency roads plays an important role in providing relief during an earthquake, especially in the crisis response phase. It is very important to maintain the function of the urban roads network in the first few hours after earthquake. Protecting and strengthening vulnerable parts of the network before the crisis (especially bridges) plays a significant effect in reducing damages and injuries. However, retrofitting all vulnerable components is practically impossible due to budget constraints. The existence of this limitation requires identifying the vulnerable components accurately. Therefore, retrofitting options are prioritized first, and the most suitable ones are finally selected. In this research, after identifying the bridges that need to be retrofitted on the emergency roads network through a five-step methodology, we also considered the financial limitations and budget allocation options, and prioritized retrofitting options based on the network of layers created in the Geographic Information systems environment (GIS) under the title of input. Examining all possible situations for the stability of bridges after a specific earthquake, designing the emergency road network for all these situations, examining different options for retrofitting bridges, evaluating the effect of this retrofitting on the length of the emergency network, and finally, the prioritization of retrofitting options according to their impact during the emergency network, are the main steps of the proposed method in this study. The efficiency of the above method was evaluated after applying it on a part of the emergency roads network of Tehran as a real network with large scale.

Key words: Emergency roads network, Geographic information systems, Vulnerability, Urban bridges, Retrofitting, Prioritization.

* Correspondence Address: Alborz Province, Karaj, Gohardasht, Moazzen Blvd, Islamic Azad University, Department of Engineering, Tel & Fax:(+9826)34418156, Mobile: (+98)9123608194
Email: h_zoghi@kiau.ac.ir