اولویت‌بندی نقش پل‌ها در شبکه‌ی معابر شهری از منظر مدیریت بحران در زمان تخلیه

مطالعه‌ی موردی: شبکه‌ی شهر اصفهان

محمد علی رهگذر*: استادیار دانشگاه اصفهان، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، rahgozar@eng.ui.ac.ir
حسین حق‌شناس: استادیار، دانشکده حمل و نقل، دانشگاه صنعتی اصفهان
شیرین رحیمی: کارشناس ارشد برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۲۵

چکیده

اختلال شبکه‌ی راه کیفیت زندگی استاندارد را در یک جامعه‌ی عادی به شدت کاهش می‌دهد و گاهی حتی جان انسان را در یک فاجعه تهدید می‌کند. شبکه‌ی حمل‌ونقل، همچنین نسبت به بلایای طبیعی و انسانی آسیب‌پذیر است. برای مثال، سقوط پل یا حملات تروریستی در بزرگراه‌های اصلی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه دسترسی و افزایش چشمگیر تأخیر در سفر شود. بنابراین درک آسیب‌پذیری بالقوه‌ی شبکه‌های حمل‌ونقل در اثر چنین حوادث عظیمی به‌منظور مدیریت خطر آن‌ها و درنتیجه کاهش اثر اختلالات در تمام جنبه‌های زندگی شهری و روستایی بسیار مهم است. هدف از این مطالعه، اولویت‌بندی نقش پل‌ها در شبکه‌ی معابر شهری از منظر مدیریت بحران در زمان تخلیه است. روش ارائه شده اهمیت پل‌ها را بر اساس تغییر زمان سفر کل شبکه مشخص می‌کند.

روش پیشنهادی بر روی ۷۸ پل شبکه‌ی حمل‌ونقل شهر اصفهان مورد بررسی قرار گرفته شده است. اطلاعات مورد نیاز نظیر شبکه‌ی حمل‌ونقل شامل موقعیت جغرافیایی شبکه‌ی معابر، نوع معبر و تابع عملکرد اصفهان، ماتریس تقاضای سفر در شرایط عادی و توابع هزینه - حجم با استفاده از مطالعات جامع حمل‌ونقل شهر اصفهان جمع‌آوری شده است. بر اساس نتایج به دست آمده با سناریوی مناسب، بیشترین حجم ترافیک مربوط به پل‌های اندیشه، شهیدان امینی و شهید خرازی است. در حالی که با استفاده از روش اولویت‌بندی براساس تغییر زمان سفر کل شبکه، پل‌های اندیشه، امام خمینی و پل وحید در رتبه‌های اول تا سوم قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: *شبکه‌ی حمل و نقل، آنالیز آسیب‌پذیری، پل، اصفهان، بحران*

Prioritization of bridges in urban transportation networks during an evacuation in crisis

Case study: the city of Isfahan transportation network

Mohammad Ali Rahgozar[1*], Hosein Haghshenas[2], Shirin Rahimi[3]

Abstract

The urban transportation network is an essential component of our daily life in modern communities. This network is vulnerable to natural and humanitarian disasters. Its degradation may lead to large negative impacts on the economic efficiency of such communities. A bridge collapse or a terrorist attack may severely reduce accessibility and increase travel time significantly in urban transportation networks. Therefore, evaluation of the impacts of different crises on a transportation network will help to reduce such degradations. On the other hand, the repair and maintenance of highway bridges, as the most critical component of the transportation networks, imposes a large portion of total annual maintenance costs, and usually due to lack of unlimited budget, this money has to be spent based on the importance and /or priority of the bridges in the network. The current study aims to prioritize the critical bridges during an evacuation in crisis conditions in urban transportation networks. The rank of each bridge is based on the difference in the total network travel time before and after that given bridge is eliminated from the network in such condition. The bridge that by its elimination causes higher travel time is considered more critical. This proposed method is applied to 78 bridges in the city of Isfahan traffic network. According to the results with proper scenarios, Andishe, Shahid Amini and Shahid Kharazi bridges rank as the top three with the highest traffic volumes, while Andishe, Imam Khomeini and Pol-e-Vahid bridges are the top three based on the proposed travel time method.

Keywords: *Transportation network, Vulnerability Analysis, Critical, Bridge, Isfahan, crisis*

1 Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Iran ;Email: rahgozar@eng.ui.ac.ir
2 Assistant Professor, Faculty of Transportation, Isfahan University of Technology, Iran
3 MS Graduate of Transportation planning, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Iran

مقدمه

در طول دهه‌ی گذشته، طوفان عظیم، آتش‌سوزی، سیل و بسیاری از خطرات دیگر باعث آسیب‌های گسترده‌ی مالی و جانی شده‌اند. از آن‌جا که بروز این حوادث در مناطق پر جمعیت است و تعداد رخداد آن‌ها نیز رو به افزایش است، انجام یک واکنش مناسب، ضروری است [۱، ۲]. رویکرد اولیه در برخورد با این حوادث، این است که هزینه‌های مستقیم تحمیل شده ناشی از اثرات این حوادث را با پدافند غیرعامل به حداقل رساند. اما بدون شک چنین اقداماتی برای مقابله با تهدید خطرات، به تنهایی مؤثر نیستند. همچنین باید پذیرفت که همواره نمی‌توان با اثرات ناشی از این گونه حوادث مقابله کرد. این در حالی است که با ایجاد یک سیستم هشداردهنده می‌توان اقدام به تخلیه‌ی به‌موقع جمعیت در معرض خطر کرد. در حقیقت می‌توان گفت تخلیه یکی از مهم‌ترین اقدامات مدیریتی برای کاهش آثار منفی بحران است. از ویژگی‌های تخلیه می‌توان به افزایش ناگهانی تقاضای سفر در دوره‌ی زمانی کوتاه، رفتار متفاوت و تغییرات در عرضه‌ی عادی شبکه اشاره نمود [۳]. آنالیزهای سود و هزینه، نشان می‌دهند که با پذیرش تخلیه به صورت یک واکنش اختیاری، می‌توان از مردم با کمترین هزینه، محافظت کرد. به‌منظور تصمیم‌گیری مناسب در زمینه‌ی مقابله و پیش‌بینی خطرات، اطلاعاتی در مورد فرایند تخلیه مورد نیاز است. تا به امروز فرایند تخلیه با عدم قطعیت و ناآگاهی همراه بوده است. شرایط ناشناخته و نامعلوم تخلیه و مسئولیت‌های مالی در ارتباط با آن، باعث شده که مسئولان تمایلی به تخلیه نداشته باشند.

هدف از تخلیه به حداقل رساندن آسیب‌های حوادث به وسیله‌ی انتقال مردم و اموال آن‌ها از منطقه‌ی در خطر قبل از رخداد فاجعه به یک منطقه‌ی امن است [۴]. اجرای تخلیه از آن جهت پیچیده است که شامل فعالیت‌های متعددی می‌شود و برای انجام تخلیه‌ی مؤثر و کارآمد، باید این فعالیت‌ها هماهنگ و سازمان‌یافته شوند. در حالی‌که فرایند تخلیه پیچیدگی‌های زیادی دارد، اما چون در ارتباط با زندگی مردم است، ضروری است که همواره با موفقیت انجام گیرد. به همین سبب ضروری است که برنامه‌های جامع و قابل درک تخلیه به‌منظور حفاظت تخلیه‌کنندگان از رخداد مشکلات پیش‌بینی نشده، فراهم نمود.

در هنگام بروز حوادثی از جمله سیل، طوفان، سونامی، عملیات تروریستی نقش شبکه‌ی معابر در تردد، جابه‌جایی و امدادرسانی بسیار پررنگ‌تر و حیاتی‌تر از شرایط عادی خواهد بود. از آن‌جا که در اثر وقوع این حوادث، زیرساخت‌های حمل‌ونقل از جمله پل‌ها دچار مشکل اساسی در ارائه‌ی خدمت یا شکست کلی می‌شوند، تحلیل آسیب‌پذیری آن‌ها اهمیت فراوانی دارد. آسیب‌پذیری شبکه‌ی حمل‌ونقل شامل حملات تروریستی و بلایای طبیعی است که سطح خدمات شبکه‌ی حمل‌ونقل را کاهش می‌دهد. تمام این حوادث، حوادث غیر معمول تلقی می‌شوند که در شبکه‌ی حمل‌ونقل با احتمالات مختلف اتفاق می‌افتند و عواقب ناشی از رخداد آن‌ها نیز متفاوت است. به همین علت لازم است که در چنین شرایط بحرانی، پل‌های مستقر در شبکه‌ی معابر اولویت‌بندی شوند تا حیاتی‌ترین پل‌ها به‌منظور تخلیه‌ی شهر مشخص شوند و همچنین هنگام تخصیص بودجه‌ی تعمیر و نگهداری، این نوع پل‌ها در اولویت بالاتر قرار گیرند.

در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰، مطالعات شبیه‌سازی برای آنالیز و ارزیابی برنامه‌های تخلیه‌ی اضطراری و فوری آغاز شد. مطالعات در اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ بیشتر در زمینه‌ی تخلیه در زمان حوادث ناشی از نیروگاه‌های اتمی بود که به علت حادثه‌ی راکتور در جزیره‌ی مایل[۱] در سال ۱۹۷۹ بوده است. پس از رخداد چندین طوفان گسترده در سواحل امریکا در دهه‌ی ۱۹۹۰، اکثر تحقیقات مدل‌سازی تخلیه در زمینه‌ی تخلیه در زمان طوفان انجام شد.

لوئیس[۲] در سال ۱۹۸۵ فرایند پیش‌بینی تقاضای سفر عمومی را برای تخلیه در زمان طوفان پیشنهاد داد، که به موازات روش پیش‌بینی تقاضای سفر شهری بود. او بیان کرد که سفرها با هدف تخلیه معمولاً از محل اقامت مردم تولید می‌شود، زیرا اکثر مردم در هنگام هشدار برای تخلیه، ابتدا به محل سکونت خود باز می‌گردند و سپس سفر خود را به‌منظور تخلیه از محل سکونت خود آغاز می‌کنند. مردم در زمان تخلیه به طور معمول چهار مقصد را به‌منزله‌ی مقصد سفر خود انتخاب می‌کنند که شامل پناهگاه‌های عمومی و صلیب سرخ، هتل یا متل، خانه‌ی آشنایان و دوستان و خارج از منطقه‌ی تحت خطر هستند. در هنگام بحران، منطقه‌ی نیازمند تخلیه، به ناحیه‌هایی تقسیم می‌شود که این ناحیه‌ها کوچک‌ترین سطح مورد بررسی محسوب می‌شوند. تولید سفر در منطقه‌ی تحت خطر با استفاده از جمعیت ساکن در هر یک از ناحیه‌ها تعیین می‌شود و جذب سفر با توجه به تعداد هتل‌ها و متل‌ها در منطقه و ظرفیت پناهگاه‌ها تعیین می‌شوند تا تعداد وسایلی که به مقاصد مختلف تخلیه سفر می‌کنند، تعیین شود. سپس با استفاده از مدل‌های توزیع سفر تعیین می‌شود که چه تعدادی از وسایل نقلیه در هر ناحیه به هر یک از مقاصد مورد نظر می‌روند و به این ترتیب ماتریس تقاضای مبدأ ـ مقصد ساخته می‌شود. پس از آن تقاضای سفر به‌دست آمده با استفاده از مدل‌های تخصیص ترافیک روی شبکه‌ی حمل‌ونقل بارگذاری می‌شوند که بدین صورت مدت زمان لازم برای تخلیه‌ی منطقه محاسبه می‌شود [۵].

سوهن[۳] در سال ۲۰۰۶، اهمیت کمان‌های شبکه‌ی آزادراهی ایالت مریلند امریکا را تحت تأثیر خرابی‌های ناشی از سیل با استفاده از شاخص دسترسی آنالیز کرد. در این مطالعه از دو شاخص دسترسی استفاده شده است که در شاخص دسترسی اول تنها طول کمان به‌منزله‌ی پارامتر در نظر گرفته شده است، درحالی‌که در شاخص دسترسی دوم ترکیب طول کمان و حجم ترافیک گذرنده از کمان به‌منزله‌ی پارامتر لحاظ گردیده است. با استفاده از این شاخص‌ها، دسترسی بین شهرستان‌های مختلف ایالت مریلند بررسی و تفاوت دسترسی هر شهرستان در اثر خرابی یک کمان به علت سیل بر اساس شاخص دسترسی اول و دوم محاسبه گردیده است. این مطالعه نشان می‌دهد که کمان‌های مهم انتخاب شده توسط شاخص دسترسی اول با کمان‌های مهم انتخاب شده

توسط شاخص دوم در حالتی که خرابی یک لینک مسیر جایگزینی نداشته باشد و یا شهرستان مربوطه دسترسی پایینی داشته باشد، مشابه هستند [۶].

پل[۴] در سال ۲۰۰۷، مدلی را برای تخلیه پیشنهاد داده است و معتقد است برای حالت‌های مختلف تخلیه می‌توان از آن استفاده کرد. او عواملی را که بر تصمیم‌گیری افراد مبنی بر تخلیه تأثیر می‌گذارد را توصیف می‌کند و نشان می‌دهد، این عوامل چگونه بر انتخاب افراد در ارتباط با اینکه تخلیه کنند یا نه، مقصدشان کجا باشد و چه مسیری را انتخاب کنند، اثر می‌گذارند. او برای پیش‌بینی میزان مشارکت افراد در تخلیه، زمان حرکت و انتخاب مقصد از مدل‌های تقاضای سفر دینامیک استفاده کرده است. مدل او تمام حالت‌های مختلف تخلیه شامل تخلیه‌ی توصیه شده تا اجباری را در بر می‌گیرد. در مدل او حادثه قبل از اینکه افراد تصمیم به تخلیه بگیرند یا در حین تخلیه اتفاق می‌افتد و این امر باعث در خطر انداختن تخلیه‌کنندگان می‌شود. او مدل خود را برای یک آتش‌سوزی در اتریش به کار برده است و برنامه‌های مدل پیشنهادی، در نرم افزار متلب[۵] نوشته شده است [۷].

اکبرزاده در سال ۲۰۱۲ یک مدل جدید برای انتخاب مسیر تخلیه در زمان طوفان ارائه داده است. او بیان کرده است که علاوه بر تراکم، عواملی چون آشنایی با مسیر، وجود سوخت و پناهگاه، سطح امکانات و طول مسیر نیز در انتخاب مسیر تخلیه‌کنندگان تأثیر دارد. او برای ساخت مدل خود از مدل لوجیت[۶] استفاده کرده است و نتیجه گرفته است که این عوامل بر انتخاب مسیر تخلیه‌کنندگان تأثیر دارند و تأثیر متغیرهایی چون دسترسی به مسیر، وجود سرویس‌هایی چون پناهگاه و طول مسیر در انتخاب مسیر تخلیه‌کنندگان وابسته به زمان تخلیه‌ی آن‌ها است، درحالی‌که سطح تسهیلات وابسته به زمان تخلیه نیست [۸].

در مواقع بحران شبکه‌ی حمل‌ونقل می‌تواند کمک زیادی در مدیریت بحران داشته باشد. از جمله عملکردهای شبکه‌ی حمل‌ونقل موارد زیر است [۹]:

- تخلیه‌ی اضطراری شهروندان از منطقه‌ی تحت تأثیر بحران؛
- انتقال افراد آسیب‌دیده به مراکز امدادی؛
- شناسایی مسیرهای ایمن و مطمئن برای اورژانس، آتش‌نشانی، پلیس و سایر نیروهای امدادی- خدماتی.

از طرف دیگر در شهرهایی که شبکه‌ی حمل‌و نقل آن‌ها وابستگی زیادی به پل‌ها دارند (مانند اصفهان)، نقش پل‌ها در فرایند تخلیه در زمان بحران اهمیت بیشتری خواهد داشت. در این پژوهش ابتدا شبکه‌ی حمل‌ونقل، توابع هزینه- حجم و ماتریس تقاضای زمان تخلیه آماده می‌شوند. سپس تخصیص ترافیک در شرایط عادی (وجود تمام پل‌ها در شبکه) انجام می‌گیرد و زمان سفر کل شبکه محاسبه می‌گردد؛ در مرحله‌ی بعد هر کدام از پل‌ها از شبکه حذف می‌شوند و فرایند تخصیص دوباره انجام می‌شود و زمان سفر کل شبکه نیز محاسبه می‌گردد تا با شرایط عادی مقایسه گردد. این فرایند تا زمانی که مقایسه برای تمام پل‌ها انجام شود ادامه خواهد داشت. در این مطالعه برای اولین‌بار این موضوع مورد بررسی قرار خواهد گرفت که آیا در شرایط تخلیه هنگام بحران، حجم عبوری از هر پل الزاماً معرف میزان اهمیت آن است یا تفاوت زمان سفر وسایل نقلیه‌ی ناشی از حذف پل در تعیین اهمیت یک پل نقش دارند؟

روش اولویت‌بندی پل‌ها در زمان تخلیه

به‌منظور آنالیز آسیب‌پذیری و اولویت‌بندی اهمیت پل‌های شبکه‌ی معابر شهر اصفهان در شرایط تخلیه، فرض می‌شود که در اثر یک فاجعه (طبیعی یا ساخت دست بشر) یک و یا چند پل از شبکه‌ی معابر تخریب می‌شوند. در نتیجه مسافرانی که در انتخاب مسیر خود از هر یک از این پل‌ها استفاده می‌کردند مجبور به تغییر مسیر و انتخاب مسیرهایی با مطلوبیت کمتر می‌شوند. بر اساس مطالعات صورت پذیرفته، از آنجا که زمان نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای در فرایند تخلیه‌ی شهر دارد این عامل به‌منزله‌ی شاخص تعیین‌کننده‌ی اهمیت یک پل در زمان تخلیه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مطابق با نمودار ترسیم شده در تصویر ۱، با داشتن شبکه‌ی حمل و نقل، ماتریس تقاضا، توابع عملکرد هزینه - حجم، حجم بارگذاری‌شده روی کمان‌های شبکه به‌دست می‌آید و سپس زمان سفر کل شبکه در حالتی که تمام پل‌های شبکه قابل بهره‌برداری است، محاسبه می‌شود. سپس در هر تکرار، یک پل از شبکه‌ی معابر حذف می‌شود (پل غیر قابل بهره‌برداری) و با استفاده از ورودی‌های مورد نیاز و اعمال تخصیص ترافیک، زمان سفر کل شبکه، در حالتی که یک پل از شبکه تخریب و یا به‌طور کامل بسته شده است، محاسبه می‌شود. این عملیات، برای همه‌ی پل‌های موجود در شبکه‌ی معابر انجام شده و به این ترتیب با مقایسه‌ی زمان سفر کل شبکه در حالت عادی (وقتی تمام پل‌ها قابل بهره‌برداری هستند) با حالتی که یک پل مورد نظر در اثر یک فاجعه (طبیعی یا ساخت دست بشر) به‌طور کامل بسته شده است، اهمیت پل مربوطه در شبکه‌ی معابر در هنگام تخلیه مشخص می‌شود. زمان سفر کل شبکه به صورت زیر قابل محاسبه است:

رابطه‌ی ۱:

$$\text{Totall VHT} = \sum_i \text{AB_Flow(i)} \times \text{AB_Time(i)} + \text{BA_Flow(i)} \times \text{BA_Time(i)}$$

Totall VHT = کل زمان سفر شبکه،

AB Flow(i) = جریان ترافیک لینک iام در جهت رفت،

BA Flow(i) = جریان ترافیک لینک iام در جهت برگشت،

AB Time(i) = زمان سفر لینک iام در جهت رفت،

BA Time(i) = زمان سفر لینک iام در جهت برگشت.

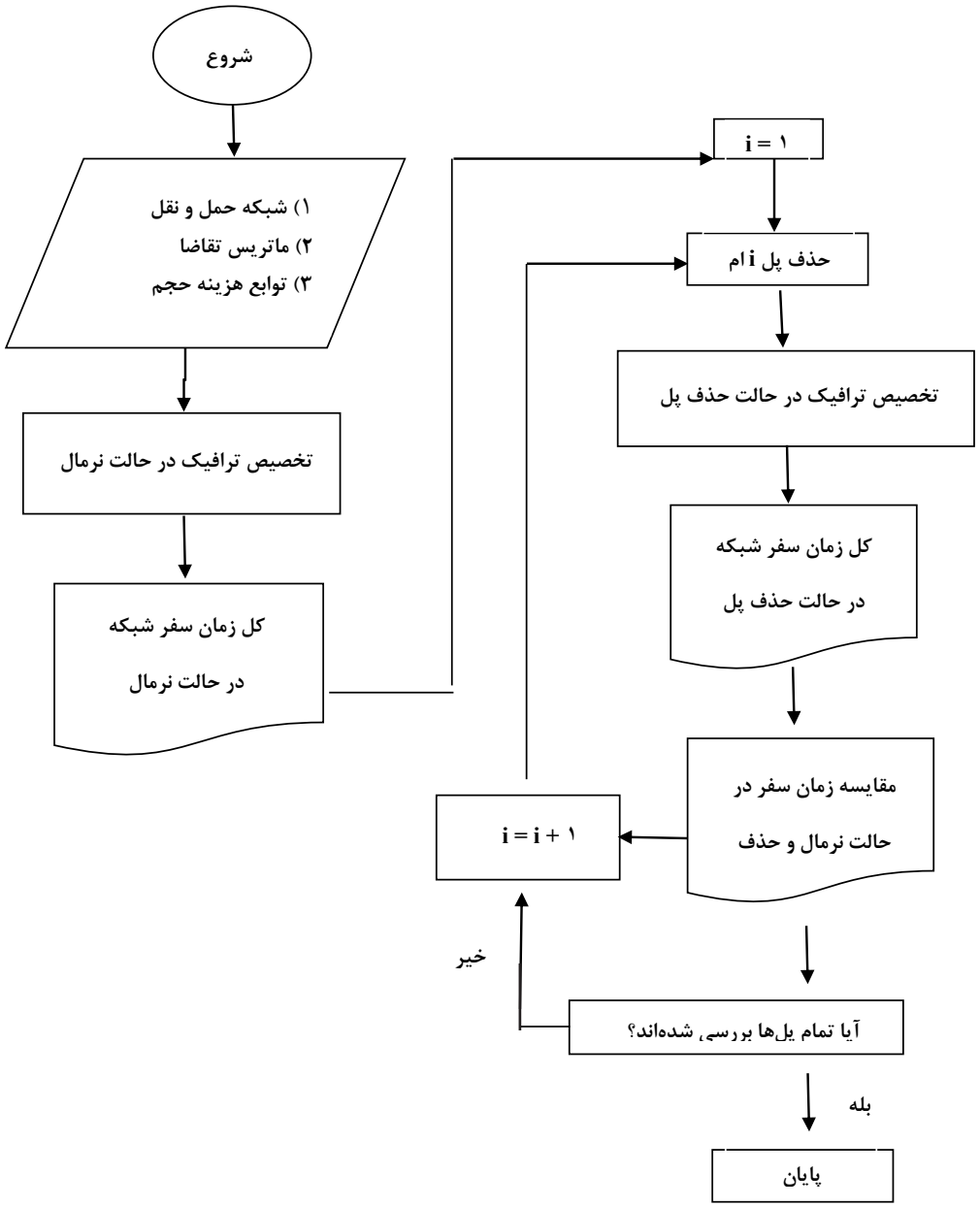
بدین ترتیب اهمیت پل‌ها در شبکه‌ی حمل‌ونقل به صورت زیر به‌دست می‌آید:

رابطه‌ی ۲:

$$\text{Important}_{\text{bridge}_i} = \text{Totall VHT}\big(G(N,A)\big) - \text{Totall VHT}\big(G(N,A-\text{bridge}_i)\big)$$

که در آن $\text{Important}_{\text{bridge}_i}$ اهمیت پل iام است.

G(N,A) = شبکه‌ای با N گره و A کمان،



تصویر۱: مراحل انجام کار

$G(N,A-bridgei)$= شبکه‌ی G پس از حذف لینک‌های تشکیل‌دهنده‌ی پل iام.

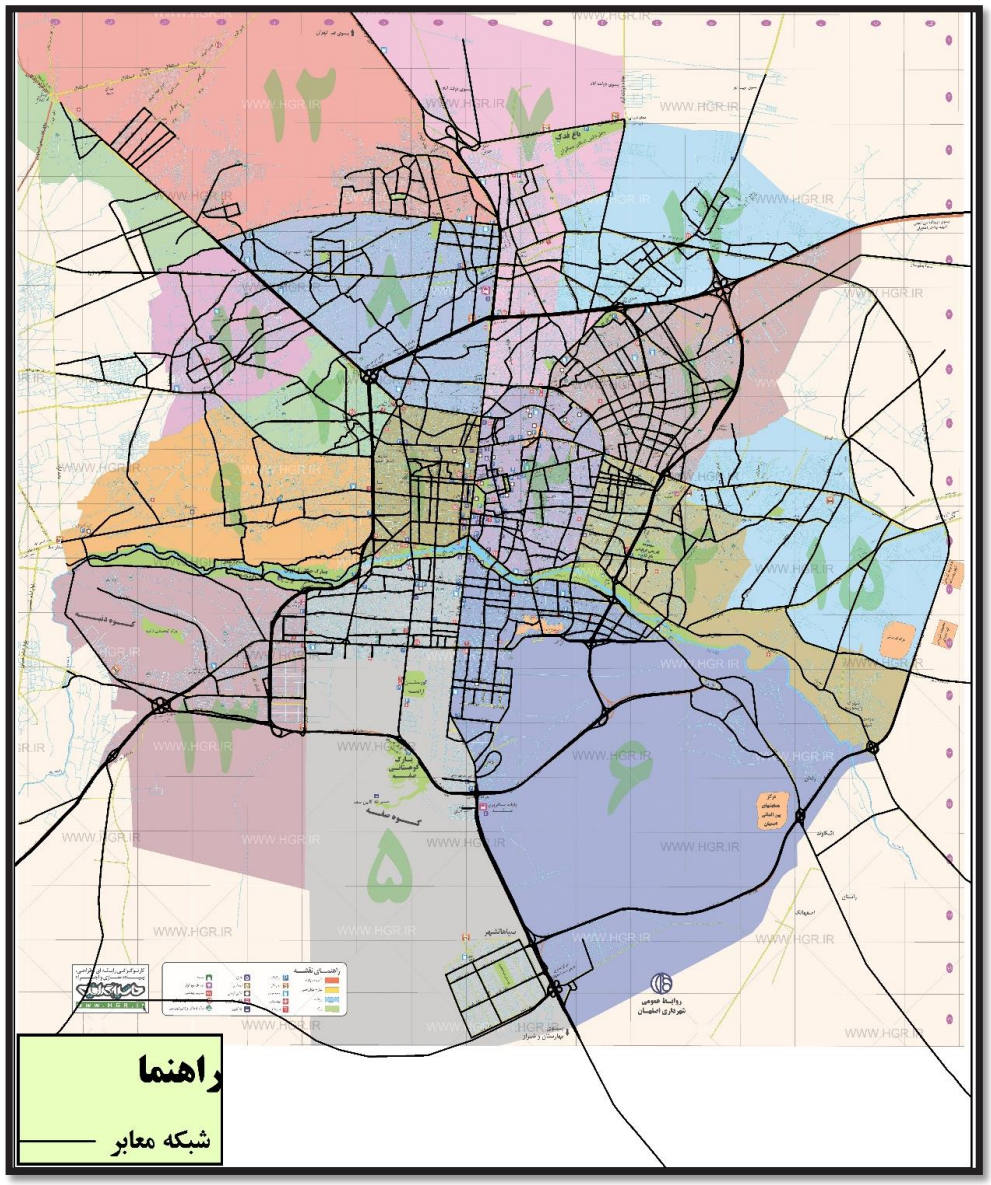
شبکه‌ی حمل‌ونقل اصفهان

شهر اصفهان با مساحت ۳۰۰ کیلومتر مربع، مرکز استان اصفهان و سومین شهر پرجمعیت ایران بعد از تهران و مشهد، یکی از قطب‌های مهم فرهنگی، تجاری و صنعتی ایران است. جمعیت این شهر در سرشماری سال ۱۳۹۰ حدود یک میلیون و ۷۵۰ هزار نفر بوده است. این شهر به جهت داشتن موقعیت جغرافیایی ویژه دارای اهمیت استراتژیک در ابعاد اقتصادی و سیاسی است. این مسئله موجب می‌شود این شهر در کانون تجاری و ارتباطی کشور قرار گیرد که بدین واسطه وجود یک شبکه‌ی معابر کارآمد و مطلوب ضروری خواهد بود. از سوی دیگر، به دلیل عبور رودخانه از داخل شهر اصفهان پل‌های شبکه‌ی معابر شهری نقش بسیار مهمی در ایجاد پیوستگی بین بخش شمالی و جنوبی شهر ایفا می‌کنند. همچنین توسعه‌ی شبکه‌ی معابر این شهر و احداث بزرگراه‌های رینگ سوم میزان تأثیرگذاری پل‌ها در این شبکه را افزایش داده است. در جدول ۱ بحران‌های محتمل در شهر اصفهان که مدیریت آن‌ها نیازمند بررسی شبکه‌ی حمل‌ونقل به خصوص پل‌ها است آورده شده است. در این جدول، بحران‌ها بر اساس نقشی که شبکه‌ی حمل‌ونقل در هنگام وقوع ایفا می‌کند معرفی شده‌اند [۱۰].

شبکه‌ی برداشت شده از خیابان‌های کلان شهر اصفهان و جاده‌های اطراف آن تشکیل شده است که در تصویر ۲ مشاهده می‌شود. همچنین این شبکه به ۱۸۶ ناحیه‌ی ترافیکی تقسیم شده است. در شبکه‌ی معابر شهر اصفهان مراکز نواحی توسط

جدول ۱: بحران‌های محتمل در شهر اصفهان و نقش شبکه‌ی حمل‌ونقل در آن‌ها

ردیف	عنوان بحران	نقش شبکه‌ی حمل‌ونقل
۱	سیل	امدادرسانی- تخلیه
۲	زلزله	امدادرسانی- تخلیه- دسترسی به مراکز درمانی
۳	رانش زمین	امدادرسانی و تخلیه
۴	نشست زمین	امدادرسانی و تخلیه
۵	سرما و یخ‌بندان	امدادرسانی- دسترسی به مراکز درمانی
۶	آلودگی منابع آب	امدادرسانی- دسترسی به مراکز درمانی
۷	بیماری‌های اپیدمی	امدادرسانی- دسترسی به مراکز درمانی
۸	حوادث شهری- آتش‌سوزی	امدادرسانی- تخلیه- دسترسی به مراکز درمانی
۹	حوادث شیمیایی و هسته‌ای	امدادرسانی- دسترسی به مراکز درمانی
۱۰	کولاک و بهمن	امدادرسانی- دسترسی به مراکز درمانی
۱۱	حوادث تروریستی	امدادرسانی- تخلیه- دسترسی به مراکز درمانی

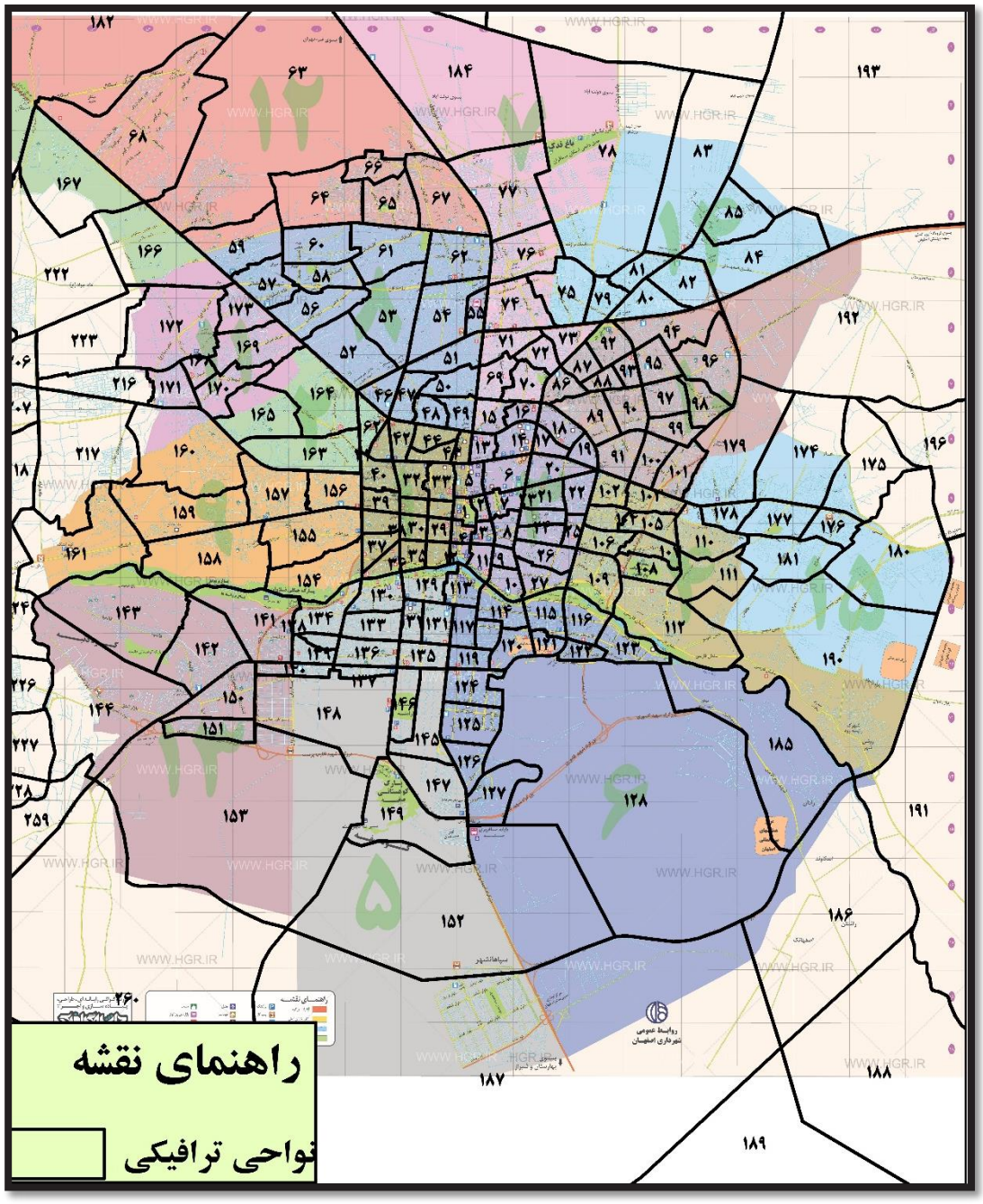


تصویر ۲: شبکه‌ی معابر شهر اصفهان

گره‌هایی در شبکه مشخص شده‌اند که در محدوده‌ی شهر اصفهان شامل گره‌های شماره‌ی ۱ تا ۱۸۵ و گره‌ی شماره‌ی ۱۹۰ است. در واقع این مراکز نواحی نقاط جذب و تولید سفر هستند و در ستون‌ها و سطرهای ماتریس تقاضا قرار می‌گیرند تا مشخص شود که از هر ناحیه به ناحیه‌ی دیگر چقدر تقاضا برای سفر وجود دارد، (تصویر ۳). در این شبکه ۷۸ پل وجود دارد که در تصویر ۴ جانمایی آن‌ها در سطح شبکه مشاهده می‌شود.

معرفی توابع زمان سفر- حجم مورد استفاده

برای پیدا کردن جریان تعادلی در یک سیستم حمل و نقل، علاوه بر اطلاعات مورد نیاز از تقاضا و عرضه، اطلاعاتی درباره‌ی چگونگی عملکرد هر جزء سیستم عرضه، زیر بار تقاضای عبوری از آن مورد نیاز است. از آنجا که در اکثر مطالعات حمل و نقل، زمان سفر به‌منزله‌ی مهم‌ترین میزان برای بررسی عملکرد یک سیستم حمل‌ونقل مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌جای استفاده از اصطلاح توابع عملکرد، از عنوان توابع زمان سفر استفاده می‌شود. در یک شبکه‌ی خیابانی، زمان سفر در هر مسیر بین یک مبدأ و یک مقصد، از حاصل جمع زمان‌های سفر در کمان‌های مسیر برای پیمودن طول آن‌ها و زمان‌های تأخیر در گره‌های آن برای عبور از تقاطع‌ها به‌دست می‌آید. از آنجا که این زمان‌ها به حجم ترافیک بستگی دارند، لازم است این زمان‌ها بر حسب تابعی از حجم ترافیک در نظر گرفته شوند. تابع زمان سفر برای یک کمان،



تصویر ۳: ناحیه‌بندی ترافیکی شهر اصفهان

معمولاً تابع زمان سفر-حجم، و برای یک تقاطع، معمولاً تابع زمان تأخیر، نامیده می‌شود.

شکل عمومی تابع عملکردی (زمان سفر-حجم) که در این مطالعه برای برآورد زمان سفروسیله‌ی نقلیه‌ی همسنگ سواری در کمان‌های شبکه مورد استفاده قرار گرفته مطابق رابطه‌ی ۳ است که در مطالعات جامع حمل‌ونقل شهر اصفهان، با رگرسیون برای معابر مختلف شهر اصفهان به دست آمده است [۱۱].

رابطه‌ی ۳:

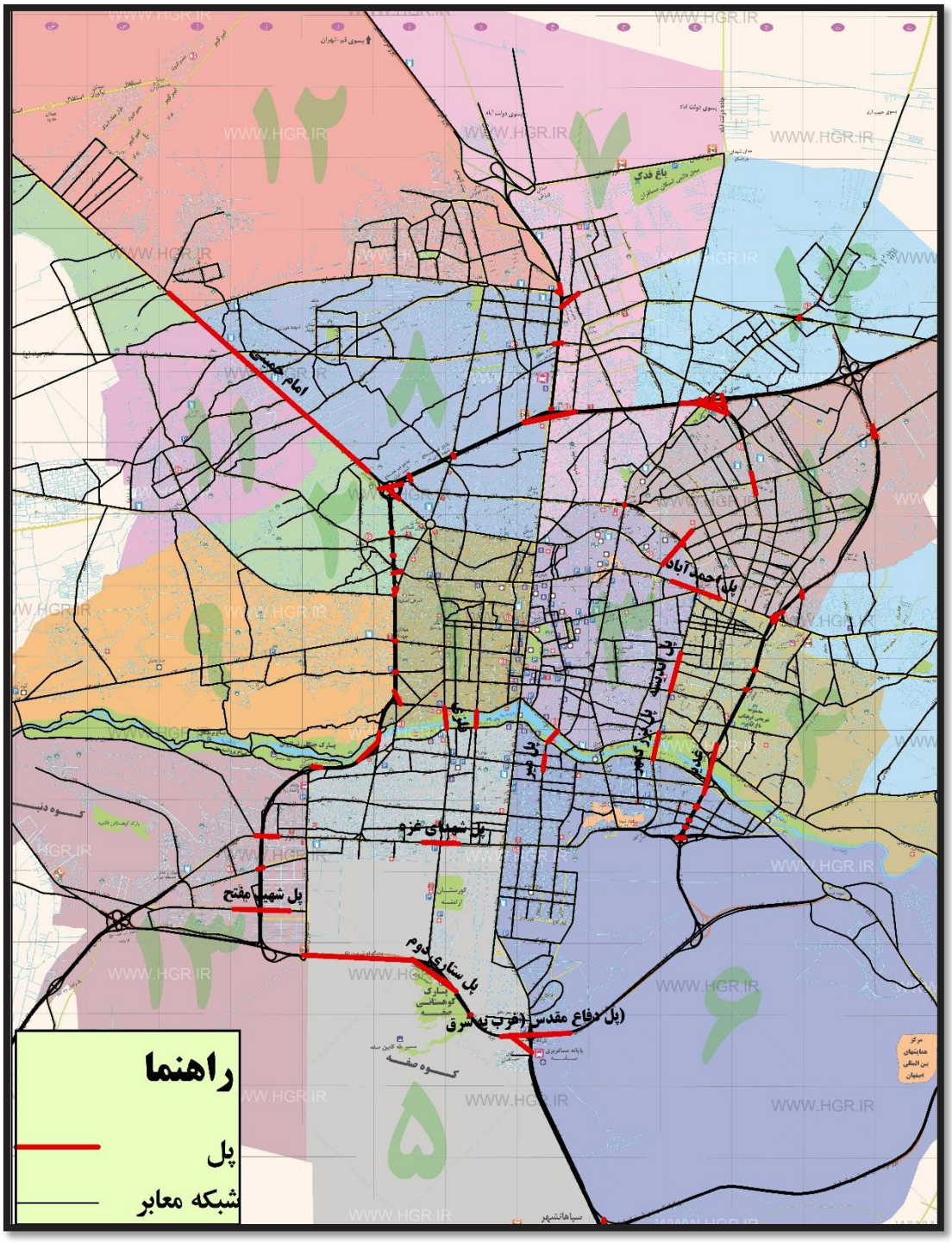
$$t(V) = t_0 \left[۱ + ۰.۱۵ (\frac{V}{Q})^{۴} \right]$$

که در آن،

t (V) = متوسط زمان سفر برای طی یک کیلومتر از طول راه (بر حسب دقیقه)؛

t_0 = متوسط زمان سفر آزاد برای طی یک کیلومتر از طول راه (بر حسب دقیقه)؛

V = حجم جریان ترافیک (بر حسب وسیله نقلیه همسنگ سواری در ساعت برای یک متر عرض عبور)؛



تصویر ۴: مکان فیزیکی پل‌ها در شبکه‌ی معابر اصفهان

Q = ظرفیت عملی (بر حسب وسیله‌ی نقلیه همسنگ سواری در ساعت برای یک متر عرض عبور).

ماتریس تقاضای مبدأ-مقصد در شرایط تخلیه

تاکنون مطالعات قابل توجهی در زمینه‌ی مدیریت بحران و تخلیه‌ی شهر اصفهان، انجام نشده است، به همین سبب آمار و اطلاعاتی راجع به تقاضای سفر در زمان تخلیه برای شهر اصفهان موجود نیست. به همین منظور فرض می‌شود که رخداد فاجعه‌ای، پیش‌بینی شده است و باید تمام شهر تخلیه شوند. بنابراین مبدأ سفرها، ۱۸۶ ناحیه‌ی ترافیکی که در شهر اصفهان است در نظر گرفته می‌شوند، که جمعیت مستقر در این نواحی باید از شهر تخلیه شوند. در هنگام تخلیه، مبدأ سفر تخلیه‌کنندگان محل سکونت آن‌ها است [۴]. ده محور خروجی شهر به‌منزله‌ی مقصد سفر در نظر گرفته می‌شود که عبارتند از خروجی آتشگاه به سمت نجف‌آباد، خروجی ذوب آهن به سمت فلاورجان و فولاد شهر، خروجی از سمت سپاهان شهر به سمت بهارستان، خروجی جاده‌ی نایین، خروجی خوراسگان، خروجی از سمت جاده‌ی فرودگاه، خروجی از خیابان زینبیه، خروجی از بلوار بعثت، خروجی به سمت آزادراه معلم و خروجی به سمت خمینی‌شهر. این خروجی‌ها در تصویر ۵ مشاهده می‌شود.

از دیدگاه مدیریت بحران، راه‌های اضطراری اولیه‌ی مسیر بین مراکز مدیریت بحران با مبادی ورودی شهرها نظیر خطوط حمل‌ونقل جاده‌ای یا فرودگاهی است [۱۲]. به همین جهت انتخاب مبادی ورودی شهر به‌منزله‌ی مقصد سفر باعث می‌شود مردم هر چه سریع‌تر بتوانند از امکانات امدادی استفاده نمایند.

برای پیش‌بینی ماتریس تقاضا در شرایط تخلیه از روش توزیع سفر جاذبه با یک محدودیت استفاده می‌شود [۱۴].

رابطه‌ی ۴:

$$T_{ij} = O_i \cdot \frac{f(d_{ij})}{\sum f(d_{ij})}$$

رابطه‌ی ۵:

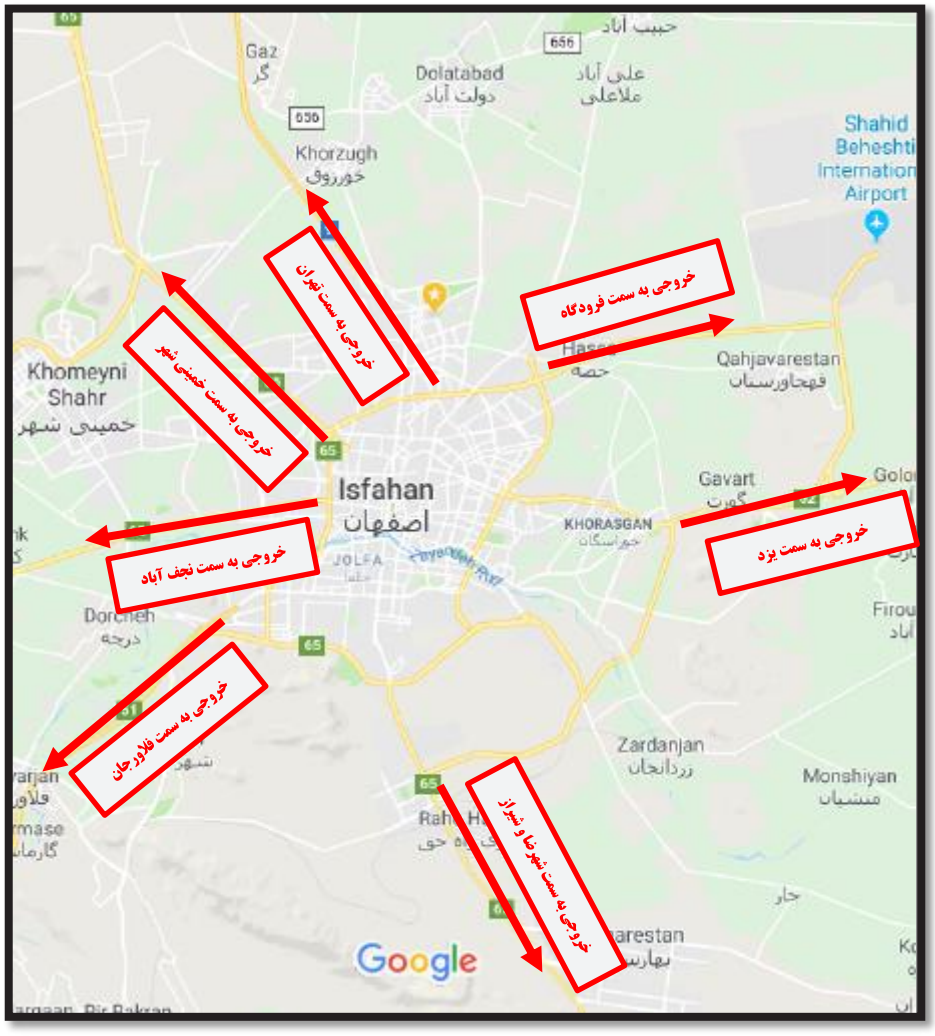
$$O_i = \frac{\beta_i . P_i}{\alpha_i}$$

رابطه‌ی ۶:

$$\sum_i T_{ij} = O_i$$

که در آن،

Tij = تعداد سفر تولید شده از ناحیه‌ی i به ناحیه‌ی j؛



تصویر ۵: محورهای خروجی شهر اصفهان

Oi = جمع تعداد سفر تولید شده در ناحیه‌ی i؛

f(dij) = تابعی از هزینه‌ی سفر: dij^{2}؛

αi = متوسط جمعیت خانوار به‌منزله‌ی متوسط سرنشین وسیله‌ی نقلیه هنگام تخلیه؛

βi = درصد جمعیت ناحیه‌ی i که قصد تخلیه از محل سکونت را دارند؛

Pi = جمعیت در ناحیه‌ی i.

رابطه‌ی ۴ بیان می‌کند که تعداد تقاضای سفر از ناحیه‌ی i به ناحیه‌ی j تابعی از میزان تولید سفر در ناحیه‌ی i و هزینه‌ی سفر از ناحیه‌ی i به j است. رابطه‌ی ۵ بیان می‌کند که تولید سفر در هر ناحیه در شرایط تخلیه، تابعی از جمعیت ناحیه، متوسط تعداد خانوار در ناحیه و ضریبی از جمعیت که در نقطه‌ی اوج قصد تخلیه از ناحیه‌ی مورد نظر را دارند، است. رابطه‌ی ۶ مربوط به محدودیت مدل توزیع سفر جاذبه است که بیان می‌کند، مجموع تعداد تقاضای سفر از هر ناحیه به نواحی دیگر برابر تولید سفر ناحیه است.

واضح است که تمام جمعیت شهر نمی‌توانند همزمان قصد سفر کنند و شهر را ترک کنند. زیرا در این صورت، بار ترافیکی شبکه بسیار زیاد می‌شود، ترافیک سنگینی ایجاد شده و شبکه قفل می‌شود. به همین منظور، ۶ سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، فرض می‌شود که ۵ درصد جمعیت هر ناحیه‌ی ترافیکی در مدت یک ساعت تصمیم به سفر می‌گیرند و سفر خود را با هدف تخلیه‌ی شهر آغاز می‌کنند و به ترتیب در سناریوهای بعدی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد جمعیت هر ناحیه‌ی ترافیکی، تولید سفر ناحیه را تشکیل می‌دهند. بنابراین در این پژوهش، مقادیر βi در رابطه‌ی ۵ به ترتیب ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ در نظر گرفته شده است و با توجه به اطلاعات آمارگیری نفوس و مسکن سال ۹۰ متوسط جمعیت خانوار در مناطق شهری حدوداً ۳/۵ نفر است. در نتیجه αi در رابطه‌ی ۵، برابر ۳/۵ است. جمعیت در هر ناحیه هم با استفاده از اطلاعات آمارگیری نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۰ به‌دست آمده است که در جدول ۲ نمونه‌ای از آن نشان داده شده است [۱۴]. به این ترتیب با مشخص بودن Pi ،βi و Pi، میزان تولید سفر هر ناحیه در سناریوهای مختلف، به دست آمده است.

جدول ۲: نمونه‌ای از آمار جمعیت [۱۵]

ناحیه‌های ترافیک	جمعیت	متوسط تعداد خانوار
۱	۱۷۸	۵۰/۸۶
۲	۵۸	۱۶/۵۷
۳	۱۰۵۸	۳۰۲/۲۹
۴	۶۷۸	۱۹۳/۷۱
۵	۲۸۵۱	۸۱۴/۵۷
۶	۱۵۶۷	۴۴۷/۷۱
۷	۲۰۴۸	۵۸۵/۱۴
۸	۳۷۵۹	۱۰۷۴
۹	۳۰۵۰	۸۷۱/۴۳
۱۰	۳۴۵۶	۹۸۷/۴۳

در این مطالعه، تابع زیر به‌منزله‌ی تابع هزینه در مدل جاذبه در نظر گرفته شده است.

رابطه‌ی ۷:

$$f(d_{ij}) = \frac{e^{-d_{ij}}}{\sum_j e^{-d_{ij}}}$$

که در آن،

d_{ij} = کوتاه‌ترین مسیر (از نظر مسافت) بین مبدأ i و مقصد j.

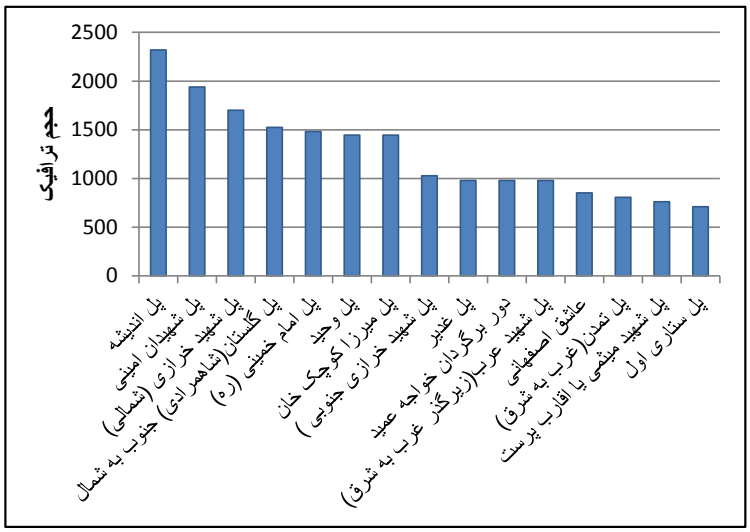
بنابراین در این مطالعه کوتاه‌ترین مسیر، کوتاه‌ترین فاصله (مسافت) هر مبدأ تا شروع خروجی شهر، در نظر گرفته شده است.

در جدول ۳ ماتریس کوتاه‌ترین مسیرها (مسافت) از هر مبدأ به مقصدها نشان داده شده است. این مقادیر با استفاده از نرم‌افزار TransCAD[۷] محاسبه شده است.

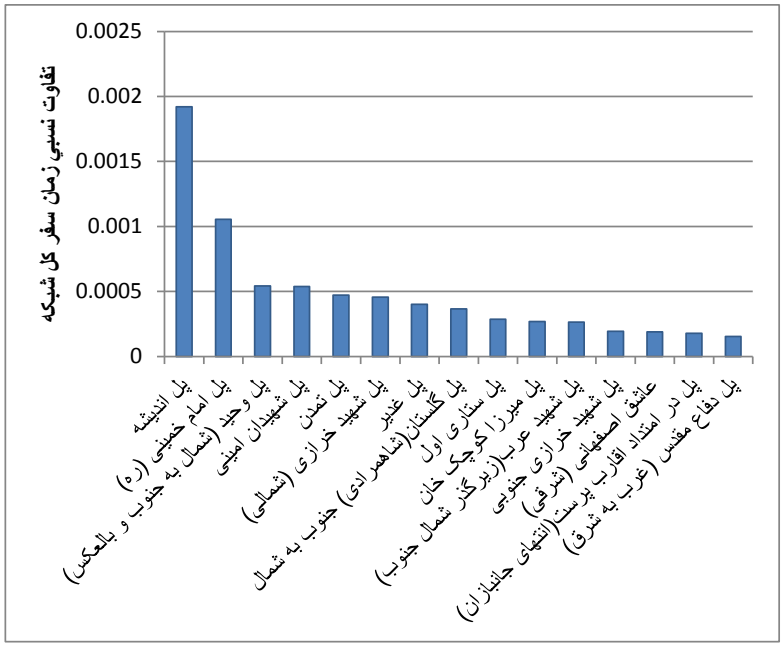
بنابراین ماتریس تقاضا با استفاده از مدل توزیع سفر جاذبه برای ۶ سناریوی تعریف شده در تخلیه، ساخته شده است.

جدول ۳: ماتریس کوتاه‌ترین مسیر

d_{ij}		مقصد (شماره‌ی ناحیه)							
		۱۸۲	۱۸۶	۱۸۹	۱۹۵	۱۹۶	۱۹۷	۲۲۱	۲۲۴	۲۴۵
مبدأ (شماره‌ی ناحیه)	۱	۱۴،۴۶	۷،۹۹	۹،۲۴	۱۱،۵۵	۱۲،۲۶	۶،۷۴	۱۳،۳۹	۱۲،۳۲	۱۳،۵۹
	۲	۱۴،۷	۷،۸۶	۹،۲۷	۱۱،۱۲	۱۱،۷۹	۶،۶۱	۱۳،۶۳	۱۲،۹۱	۱۳،۷۱
	۳	۱۵،۲۸	۷،۴	۸،۸۱	۱۱،۶۳	۱۲	۶،۱۵	۱۴،۲۱	۱۲،۹۴	۱۴،۲۹
	۴	۱۴،۷	۷،۷۲	۸،۸۳	۱۱،۹۹	۱۲،۶	۶،۷	۱۳،۶۳	۱۲،۱۵	۱۴،۰۴
	۵	۱۳،۹	۸،۶۲	۱۰،۰۳	۱۰،۴۱	۱۱،۷۵	۷،۳۷	۱۲،۸۳	۱۲،۷۶	۱۲،۹۱
	۶	۱۴،۲۶	۸،۵	۱۰،۲۲	۹،۷	۱۰،۹۹	۷،۱۲	۱۳،۴۹	۱۳،۷۵	۱۳،۲۶
	۷	۱۵،۱۷	۷،۹۸	۹،۳۹	۱۰،۴۲	۱۱،۰۹	۶،۷۳	۱۴،۱	۱۳،۴۱	۱۴
	۸	۱۵،۷۸	۶،۹۴	۸،۸۳	۱۰،۹۹	۱۱،۳۷	۵،۶۶	۱۴،۷۱	۱۳،۴۳	۱۴،۷
	۹	۱۶،۲۷	۶،۵۵	۸،۴۷	۱۱،۴۹	۱۱،۸۷	۵،۳۸	۱۵،۲	۱۳،۷۹	۱۵،۲
	۱۰	۱۶،۸۲	۶،۲۲	۸،۱	۱۲،۰۴	۱۱،۹	۵،۰۵	۱۵،۷۵	۱۴،۳۴	۱۵،۷۴



تصویر ۶: اولویت‌بندی پل‌ها براساس حجم ترافیک در شرایط تخلیه



تصویر ۷: اولویت‌بندی پل‌ها براساس تفاوت نسبی زمان سفر کل شبکه در شرایط تخلیه

تحلیل نتایج

ماتریس تقاضا با ۵ سناریوی تخلیه ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد جمعیت هر ناحیه، با استفاده از مدل توزیع سفر جاذبه با یک محدودیت ساخته شد. سپس اطلاعات برای انجام تخصیص در نرم‌افزار Trans CAD پیاده‌سازی شدند.

با توجه به اینکه در این پژوهش تخصیص استاتیک ماتریس تقاضای سفر در مدت زمان یک ساعت در شش سناریو صورت گرفت، در نتایج تخصیص مشاهده شد که پل‌ها در سناریوهای مختلف تقریباً شبیه هم عمل می‌کنند، به‌جز اینکه در سناریوی دوم تا ششم که به ترتیب ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد جمعیت هر ناحیه‌ی ترافیک، با هدف تخلیه سفر خود را آغاز می‌کنند، حجم گذرنده از بعضی از پل‌ها بسیار بیشتر از ظرفیت این پل‌ها می‌شود. این بدان معناست که این درصد از حجم اگر بخواهند سفر خود را آغاز کنند، در شبکه تراکم ایجاد می‌شود و زمان سفرها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و بنابراین این درصد از جمعیت نمی‌توانند در یک ساعت شهر را تخلیه کنند.

در تحلیل تخلیه درصد جمعیت‌های مختلف مشخص شد که بیشتر بودن نسبت حجم به ظرفیت از عدد یک، آنالیز آسیب‌پذیری را با نتایج غیر واقعی مواجه می‌کند، بدین جهت در این پژوهش، تخلیه‌ی ۵ درصد از جمعیت هر ناحیه‌ی ترافیک، مبنای آنالیز آسیب‌پذیری قرار گرفت تا پل‌ها در شبکه‌ی معابر در این سناریو اولویت‌بندی شوند. در تصویر ۶، پل‌ها بر اساس حجم ترافیک عبوری از آن‌ها در سناریوی اول، اولویت‌بندی شده‌اند. سپس پل‌ها به ترتیب حذف شدند و براساس اختلاف زمان سفر کل شبکه در حالت وجود هر پل در شبکه و حذف آن، اولویت‌بندی شدند. همچنین در تصویر ۷ پل‌ها بر اساس تفاوت نسبی زمان سفر کل شبکه در سناریوی اول مرتب شده‌اند. نتایج اولویت‌بندی پل‌ها براساس حجم ترافیک در زمان تخلیه، نشان داده شده است.

جدول ۴: مقایسه‌ی اولویت‌بندی پل‌ها بر اساس تغییر زمان سفر کل شبکه و حجم ترافیک

اولویت‌بندی براساس تغییرزمان سفر کل شبکه	اولویت‌بندی براساس حجم ترافیک
پل اندیشه	پل اندیشه
پل امام خمینی (ره)	پل شهیدان امینی
پل وحید (شمال به جنوب و بالعکس)	پل شهید خرازی (شمالی)
پل شهیدان امینی	پل گلستان (شاهمرادی) جنوب به شمال
پل تمدن	پل امام خمینی (ره)
پل شهید خرازی (شمالی)	پل وحید
پل غدیر	پل میرزا کوچک خان
پل گلستان(شاهمرادی) جنوب به شمال	پل شهید خرازی (جنوبی)
پل ستاری اول	پل غدیر
پل میرزا کوچک خان	دور برگردان خواجه عمید
پل شهید عرب (زیرگذر شمال جنوب)	پل شهید عرب (زیرگذر غرب به شرق)
پل شهید خرازی جنوبی	عاشق اصفهانی
عاشق اصفهانی (شرقی)	پل تمدن (غرب به شرق)
پل در امتداد اقارب پرست (انتهای جانبازان)	پل شهید میثمی یا اقارب پرست
پل دفاع مقدس (غرب به شرق)	پل ستاری اول

مقایسه‌ی نتایج حاصل از اولویت‌بندی پل‌ها بر اساس حجم و زمان سفر کل شبکه با یکدیگر در جدول ۴ به طور خلاصه آمده است. همچنین موقعیت پل‌ها دارای اولویت بالا در شبکه‌ی حمل‌ونقل شهر اصفهان در تصویر ۸ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مقایسه‌ی دو نوع اولویت‌بندی نشان می‌دهد، لزوماً پل‌های با حجم ترافیک بیشتر، از لحاظ تغییر زمان سفر شبکه نیز اولویت بیشتری ندارند. شاخص تغییر در زمان سفر شبکه که با تحلیل‌های نرم‌افزاری و بر اساس مدل‌های ۴ مرحله‌ای به دست می‌آید، نتایج متفاوتی نسبت به حجم ترافیک عبوری از پل دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، تنها معابری که حجم زیادی از آن‌ها عبور می‌کنند، حیاتی نیستند و عامل دیگری که اهمیت یک عضو از شبکه را مشخص می‌کنند تعداد مسیرهای جایگزین هر کمان پس از تخریب آن است. از اولویت‌بندی پل‌ها می‌توان در اولویت‌بندی پیش‌بینی تسهیلات مورد نیاز و مقاوم‌سازی پل‌ها با بودجه‌ی محدود استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتیجه‌ی این پژوهش معرفی شاخص تفاوت زمان سفر شبکه در زمان تخلیه در صورت فقدان یک پل به‌منزله‌ی مهم‌ترین معیار نشان‌دهنده‌ی اهمیت نقش پل در مدیریت بحران است. شاخص تغییر در زمان سفر شبکه با تحلیل‌های نرم‌افزاری و بر اساس مدل‌های ۴ مرحله‌ای به دست آمد. نتایج متفاوتی نسبت به حجم ترافیک عبوری از پل داشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، تنها معابری که حجم زیادی از آن‌ها عبور می‌کنند حیاتی نیستند و عامل دیگری که اهمیت یک عضو از شبکه را مشخص می‌کنند تعداد مسیرهای جایگزین هر کمان پس از تخریب آن است.

از اولویت‌بندی پل‌ها می‌توان در اولویت‌بندی پیش‌بینی تسهیلات مورد نیاز و مقاوم‌سازی پل‌ها با بودجه‌ی محدود استفاده نمود. برخی از زیرساخت‌ها در شبکه‌های حمل‌ونقل شهر از منظر مدیریت بحران (تخلیه) حیاتی تلقی می‌شوند. بنابراین در صورت تخریب آن‌ها کارایی شبکه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. از آنجا که بودجه‌ی محدودی به ساخت و تعمیر و نگهداری راه اختصاص می‌یابد و هزینه‌های ناشی از تعمیر و نگهداری به مراتب کمتر از ساخت راه است، بنابراین اولویت‌بندی زیرساخت‌های حیاتی (از جمله پل‌ها) به‌منظور تخصیص بودجه به نگهداری راه، استحکام سازه‌ای و پایش سلامت جاده‌ها و پل‌های احداث شده بر روی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در واقع با اولویت‌بندی زیرساخت‌های حیاتی همچون پل‌ها، می‌توان تخصیص بودجه‌ی تعمیر و نگهداری را به نسبت اهمیت آن‌ها انجام داد و کارایی شبکه را به طور قابل توجهی بالا برد.

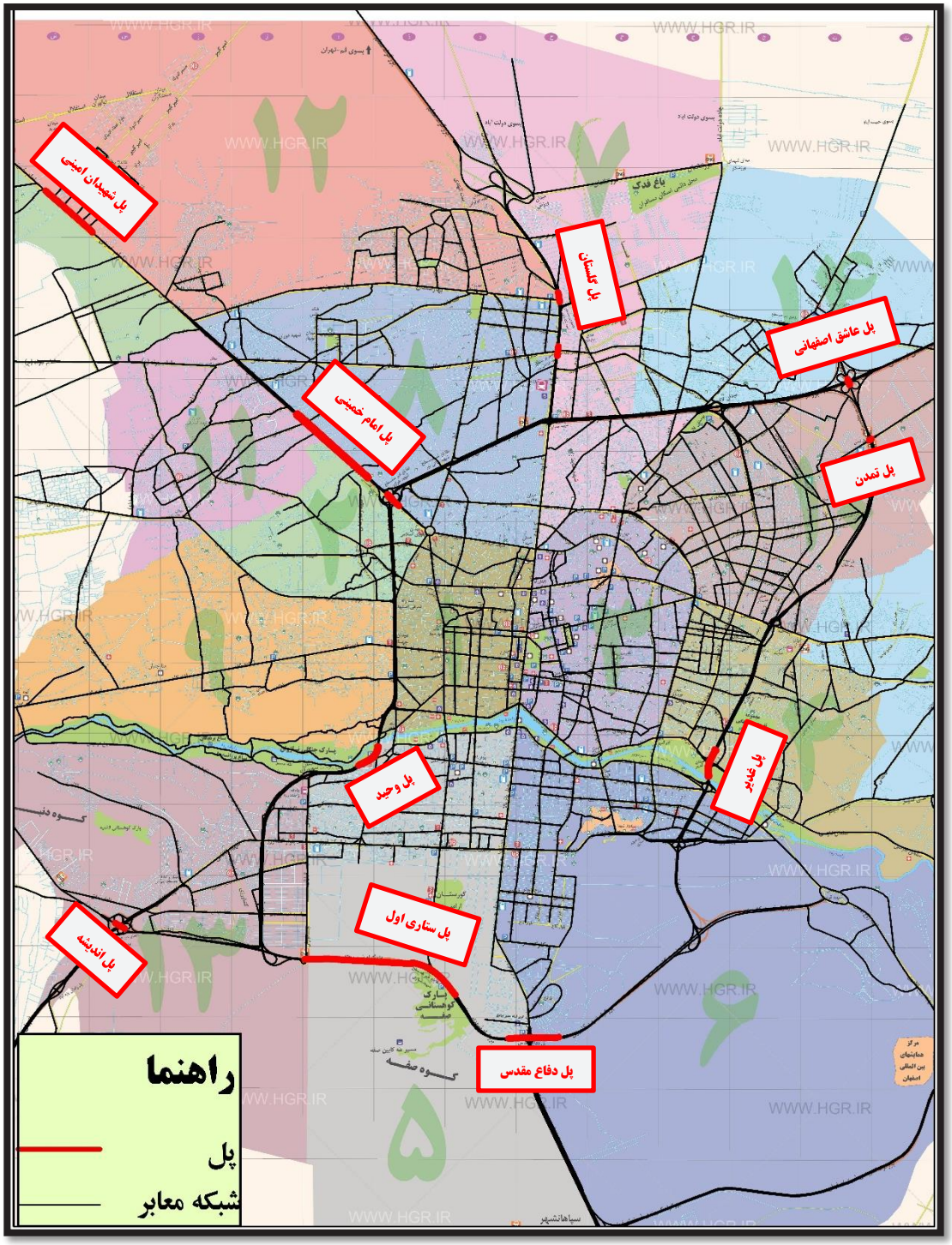
بر اساس نتایج به دست آمده در نمونه‌ی موردی شهر اصفهان پل‌های اندیشه، امام خمینی، وحید، شهیدان امینی و تمدن از لحاظ تغییر زمان سفر کل شبکه دارای اهمیت هستند. از روش به کار برده شده در این پژوهش می‌توان برای اولویت‌بندی شریان‌های حیاتی در انواع شبکه‌های حمل‌ونقل استفاده نمود.

قدردانی

با تشکر فراوان از شهرداری اصفهان که با حمایت مالی خود در قالب طرح پژوهشی «قرارداد شماره ۱۰۴۶۷۴ مورخ ۱۳۹۱/۹/۲۲» از این تحقیق حمایت نمود.

پی‌نوشت

1. Mile
2. Lewis
3. Sohn



تصویر ۸: جانمایی پل‌ها با اولویت بالا در شبکه‌ی حمل‌ونقل شهر اصفهان

4. Pel
5. Matlab
6. Logit Model

۷. نرم‌افزار Trnas CAD یک نرم‌افزار مکان‌مبنا است که فرایند مدل‌های چهار مرحله‌ای برنامه‌ریزی حمل‌ونقل را انجام می‌دهد. سفرها از نواحی شروع سفر داخل نرم‌افزار بارگذاری می‌گردند و نرم‌افزار حجم ترافیک و زمان سفر شبکه‌ی معابر بر اساس سفرها را محاسبه می‌کند.

منابع

1. Hooke, W.H. U.S. (2000). Participation in International Decade for Natural Disaster Reduction. *Natural Hazards Review*, pp. 2-9.

2. Newkirk, R.T.(2001). The Increasing Cost of Disasters in Developed Countries: A Challenge to Local Planning and Government, Country Report. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, Vol.

9(3), 159–170.

۳. میرپویا ناصری علوی. سید محمد سید حسینی. ارزیابی مدیریت بحران در تخلیه‌ی شبکه‌های حمل‌ونقل. یازدهمین کنفرانس بین‌المللی حمل‌ونقل و ترافیک.

4. Perry, R.W., M.K. Lindell, and M.R. Greene (1981). Evacuation Planning in Emergency Management, Lexington Books, US.

5. Lewis, Donald C., (August, 1985). Transportation Planning for Hurricane Evacuations. *ITE Journal*, Vol. 55, No. 6, 31-35.

6. Sohn, J., (2006). Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: an accessibility approach. Transportation Research Part A: Policy and Practice 40 (6), 491–506.

7. Pel, A. J., & Bliemer, M. C. (2007). Evacuation Plan Evaluation: Assessment of Vehicular Evacuation Schemes by means of an Analytical Dynamic Traffic Model. Institute of Transport and Logistics Studies.

8. Akbarzadeh, M. (2012). Dynamic Route Choice in Hurricane Evacuation (Doctoral dissertation, Louisiana State University).

9. Papanikolaou,(2011). Innovative emergency management strategies, WEATHER- Weather Extremes: Impacts on Transport Systems and Hazards for European.

۱۰ .محمد علی رهگذر، گزارش طرح پژوهشی شیوه‌های نوین و بهینه تعمیر و نگهداری پل‌های شهر اصفهان و پیشنهاد شبکه هوشمند نظارت به هنگام بر پل‌های شهر مبتنی بر روش‌های پایش سلامت و ملاحظات مدیریت بحران، قرارداد شماره ۱۰۴۶۷۴ مورخ ۱۳۹۱/۹/۲۲، کارفرما: شهرداری اصفهان.

۱۱. مرکز تحقیقات حمل‌ونقل دانشگاه صنعتی شریف (ممتحن)، مطالعات جامع حمل‌ونقل شهر اصفهان، گزارش تابع زمان سفر حجم، ۱۳۸۱.

۱۲. مازیار حسینی و همکاران (۱۳۸۷). *کتاب مدیریت بحران*. سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران، مؤسسه نشر شهر.

14. Ortúzar,J, Willumsen,L (2011). Modeling Transport. 4th Edition. ISBN 978-0-470-76039-0 . WILEY Publication.

۱۵. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، مرکز ملی آمار ایران. سرشماری نفوس و مسکن، ۱۳۹۰.