اولویت‌بندی توسعه معابر شهری بر اساس اهمیت در تخلیه اضطراری (موردپژوهی شهر بوشهر)

مقاله علمی – پژوهشی

آرش آروین، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی حمل و نقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
میثم اکبرزاده*، دانشیار، دانشکده مهندسی حمل و نقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
پوریا حاجیان، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی حمل و نقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: makbarzadeh@iut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵
صفحه ۴۴۴-۴۳۱

چکیده

توسعه شبکه معابر شهری معمولا بر اساس تقاضای سفر در شرایط عادی (با توجه ویژه به ساعات اوج) انجام می‌شود. در شرایط بروز بحران در مقیاس‌های وسیع در محدوده شهرها، الگوی تقاضا نسبت به حالت عادی تغییر زیادی می‌کند و امکان حذف بخشی از شبکه وجود دارد. برای همین معابر پرتردد و بحرانی لزوما همان معابر پرتردد روزهای عادی نیستند. میزان اهمیت معابر در شرایط خاص (مانند تخلیه اضطراری) باید در اولویت‌بندی توسعه معابر شهری مورد توجه قرار گیرد. این موضوع در ادبیات متداول برنامه‌ریزی حمل‌ونقل کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا در مقاله حاضر، روشی برای تشخیص معابر پراهمیت در شرایط تخلیه اضطراری و میزان انطباق درجه اهمیت معابر در شرایط عادی و بحرانی ارائه شده است. ادبیات موضوع تخلیه‌ی اضطراری عموما از روش‌های متعارف برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و تحلیل تقاضا استفاده کرده‌اند و بهره‌گیری از ویژگی‌های ساختاری شبکه‌ی شهری در کارآمد کردن فرآیند تخلیه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بهمین دلیل، در این مقاله، اهمیت معابر بر حسب جریان و ازدحام ترافیکی و نیز شاخص‌های مرکزیت (برگرفته از نظریه گراف) مورد توجه قرار گرفت. راهکارهای تعریض معابر بحرانی، احداث معابر جدید، یک‌طرفه‌سازی در زمان تخلیه، گام‌بندی زمانی تقاضا و همچنین تلفیق راهکارها برای یک تخلیه اضطراری شهری تحلیل شده است. مقاصد تخلیه با فرض تمایل شهروندان برای انتخاب مقصد بر اساس دوری از راستای انتشار تهدید تعیین شدند. مسیریابی با استفاده از روش بهینگی استفاده‌کنندگان انجام شد.. موردپژوهی برای شهر بوشهر در حالت وقوع دو تهدید نشت مواد رادیواکتیو از نیروگاه هسته‌ای (منبع نقطه‌ای با انتشار شعاعی) و سونامی (منبع خطی با انتشار جبهه‌ای) انجام شد. نتایج نشان می‌دهد معابر بحرانی شبکه براساس حجم تردد و مرکزیت میانگی قابل تشخیص هستند. در نتیجه اهمیت تحلیل ساختار شبکه معابر در مورد مطالعه‌ی این مقاله تائید می‌شود. همچنین، نتایج نشان داد اتخاذ رویکردهای محدودکننده‌ی انتخاب تخلیه‌کنندگان می‌تواند در مواردی باعث افزایش کارآمدی تخلیه شوند. این موضوع درباره‌ی سیاست گام‌بندی زمانی تخلیه در مقاله نشان داده شده است. کاستی قابل توجه شبکه بوشهر، خروجی‌های ناکافی شهر است. یک کریدور موجه برای کمک به فرآیند تخلیه اضطراری شهر پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: تخلیه‌ی اضطراری، نشت هسته‌ای، سونامی، مرکزیت میانگی، مرکزیت نزدیک

۱- مقدمه

سامانه‌های اقتصادی-اجتماعی-فنی در معرض دو دسته تهدید هستند. دسته اول رخدادهای پرتکرار اما با پیامد محدود هستند. رخدادهایی مانند تصادف در معابر و شلوغی معابر در ساعات اوج ترافیکی از جمله این دسته هستند. پیامد این رخدادها مقداری تاخیر در سفر روزمره شهروندان است که گرچه نامطلوب است، اصل حیات انسانی را به خطر نمی‌اندازد. دسته دوم تهدیدها رخدادهایی هستند که احتمال وقوع کم اما پیامدهای سنگین دارند. رخدادهایی مانند خرابی

زیرساخت‌های غیرهمسطح و وقوع بلایای طبیعی از جمله این دسته هستند. رخدادهای دسته اول در چارچوب «قابلیت اعتماد» و رخدادهای دسته دوم در چارچوب «تاب‌آوری» سامانه تحلیل می‌شوند (Mattson and Jenelious, 2015). یکی از آفات برنامه‌ریزی حمل‌ونقل شهری، اولویت‌بندی طرح‌های توسعه زیرساخت صرفا بر اساس رخدادهای پرتکرار است. مواردی مانند راه‌بندان‌های ساعات شلوغی، نقاط حادثه‌خیز ترافیکی، خطوط پراستفاده حمل‌ونقل همگانی اولویت بالایی در پروژه‌های شهری پیدا می‌کنند. در نتیجه، بدلیل محدودیت بودجه و توان مدیریتی و اجراء، اقدامات در راستای تاب‌آوری (مدیریت رخدادهای کم‌تکرار با پیامدهای بسیار) ناخواسته از اولویت برنامه‌ریزی خارج می‌شوند.

تخلیه اضطراری از راهکارهای پسینی مدیریت بحران است اما برنامه‌ریزی‌های آن باید قبل از وقوع بحران انجام شود. در غیر این صورت تخلیه ناکارا خواهد بود. علاوه بر این، خود عملیات تخلیه می‌تواند بعنوان عامل ثانویه تهدید عمل کند و با ایجاد ازدحام و یا تاخیر بیش از حد، افراد را در فضای آسیب‌پذیر (محدوده‌ای که حتی از مبدا سفر ناایمن‌تر است) نگاه دارد و در معرض تهدید قرار دهد.

برنامه‌ریزی تخلیه اضطراری چه در مقیاس شهر و چه در مقیاس ساختمان شامل چهار رکن است (Muuray-Tuite and Wolshon, 2013). این چهار رکن عبارتند از فراهم آوردن مسیرهای مناسب تخلیه، مکان‌یابی مقاصد تخلیه (محل‌های امن)، زمان‌بندی مناسب تخلیه، و آموزش عمومی است. مقاله حاضر به رکن نخست در مقیاس شهری می‌پردازد. اقدامات مربوط به مسیریابی تخلیه شامل تسهیل تردد در شرایط اضطراری از طریق احداث معابر جدید (Wang, Ip and Zhang, 2010)، تعریض معابر بحرانی (Cova and Johnson,2003)، استفاده از شانه راه (Ballard, 2007)، یک طرفه‌سازی بعضی معابر در زمان تخلیه (Wolshon, 2001)، زمان‌بندی چراغ‌های راهنمائی متناسب با تقاضای زمان تخلیه (Parr et al., 2020)، گام‌بندی زمانی تخلیه از نواحی شهری (Hosseini, Maghrebi, Maghrebi, 2021)، استفاده از ناوگان حمل‌ونقل همگانی برای تخلیه انبوه (Sayyady and Eksioglu, 2010)، و حذف تداخل جریان در تقاطعات شهری (Jahangiri et al., 2014) است.

بحران‌ها از منظر نحوه‌ی انتشار به دو دسته‌ی شعاعی و جبهه‌ای قابل تقسیم هستند. انتشار شعاعی از یک کانون نقطه‌ای آغاز می‌شود و در راستای شعاع‌های دایره‌ای گسترش می‌یابد. نمونه این شیوه انتشار در تشعشعات هسته‌ای (Ohba et al.,2021) و انفجار (Ohtsu et al., 2021) مشاهده می‌شود. انتشار جبهه‌ای در طول یک سطح اتفاق می‌افتد. نمونه انتشار جبهه‌ای در طغیان رودخانه (Bae and Kobayashi, 2021)، سونامی (Wang and Jia, 2021)، آتش‌سوزی جنگل (Kuligowski, 2021) مشاهده می‌شود.

روش‌های تحلیل انتخاب مسیر به دو دسته شبیه‌سازی و تحلیلی تقسیم می‌شوند. در مقیاس شهری، دسته اول شامل شبیه‌سازی عامل‌مبنا (Yin, Wang and Ouyang, 2020) و خودکاره‌ی سلولی (He et al., 2021) است. دسته دوم خود شامل چهار گروه رویکرد است. گروه اول بهینه‌سازی در مقیاس شبکه (Alam and Habib, 2021)(Zhang et al.,2021)، گروه دوم شامل مسیریابی‌های تعادلی با هدف بهینگی استفاده‌کننده (Feng and Lin, 2021) یا مسیریابی با هدف بهینگی سیستم (Lämmel and Flötteröd, 2009) است. گروه سوم، شامل مسیریابی‌های غیرتعادلی مانند استفاده از مدل‌های انتخاب گسسته (Akbarzadeh and Wilmot, 2015) است و گروه چهارم شامل روش‌های ابتکاری (Afshar and Haghani, 2008) است.

در مقاله حاضر، تخلیه اضطراری شهر بوشهر در حالت وقوع نشست هسته‌ای و سونامی با استفاده از روش بهینگی استفاده‌کننده تحلیل شده است. راهکارهای بررسی‌شده در این مقاله عبارتند از تعریض معابر بحرانی، احداث معابر جدید، یک‌طرفه‌سازی در زمان تخلیه، گام‌بندی زمانی تقاضا و همچنین تلفیق راهکارها. نهایتا پیشنهادهای مشخصی برای کاهش پیامدهای وقوع فجایع مورد بررسی ارائه شده است. روش تحلیل و تفصیل نتایج در ادامه مقاله بیان شده است.

۲- روش تحقیق و ابزارها

گام‌های پژوهش حاضر عبارتند از گردآوری اطلاعات عرضه و تقاضای بوشهر، ساخت مدل تهدید و تخمین اثر آن بر ماتریس تقاضا، اجرای مدل چهارمرحله‌ای تحلیل تقاضا در زمان تخلیه اضطراری (شامل تولید سفر، توزیع سفر، انتخاب وسیله، انتخاب مسیر)، یافتن معابر بحرانی و اجرای اقدامات

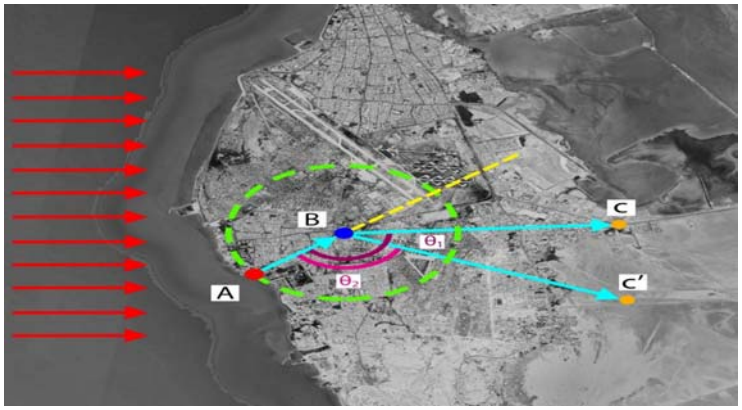
بهبوددهنده و تکرار تحلیل تقاضا، و نهایتا دسته‌بندی اقدامات برتر.

۲-۱-اطلاعات عرضه و تقاضا

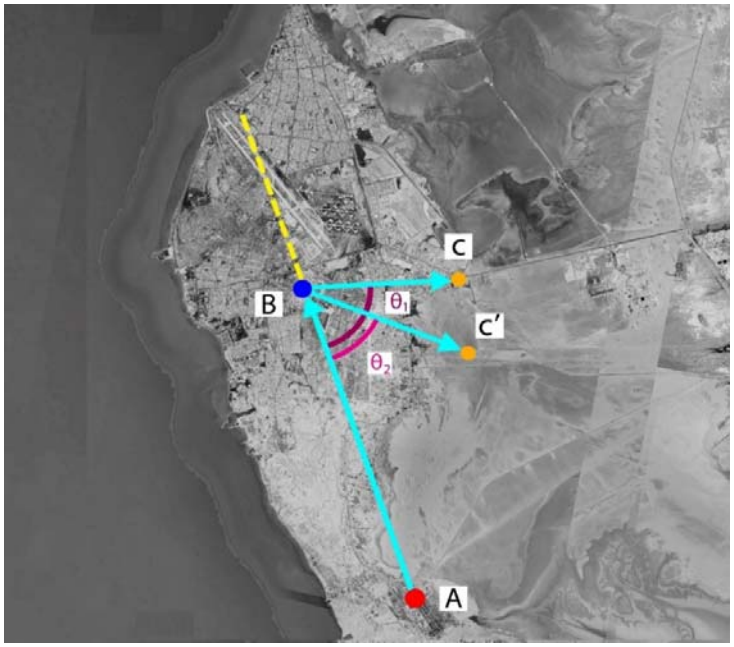
اطلاعات مورد نیاز شامل اطلاعات جانب عرضه و جانب تقاضاست. جانب عرضه شامل شبکه‌ی معابر شهری و اطلاعات هر معبر (سرعت، طول، عرض، موقعیت جغرافیایی ابتدا و انتها، سلسله مراتب عملکردی معابر، تابع حجم-تاخیر معابر) است. بخشی از این اطلاعات از سامانه‌های برخط قابل اطمینان موجود مانند openstreetmap دریافت شد. بخش‌هائی مانند تابع حجم-تاخیر معابر که در دسترس نبود، بر اساس موارد مشابه سایر شهرها فرض شد. جانب تقاضا شامل، جمعیت شهر، پراکندگی فضائی آن در نواحی، سرانه مالکیت خودرو است. این اطلاعات از مدیریت شهری بوشهر دریافت شد. جمعیت شهر بوشهر براساس مطالعات طرح تجدید نظر در طرح جامع شهر بوشهر۱۳۹۰ برای سال ۱۴۰۰ محاسبه شده که بر اساس این اطلاعات شبیه سازی شرایط بحرانی برای شهر بوشهر انجام شده است. جمعیت هر ناحیه به صورت یکسان بین تقاطع‌های آن ناحیه (گره‌های شبکه) توزیع شد.

۲-۲-تخمین اثر تهدید بر ماتریس تقاضا

ماتریس تقاضا مبنای تحلیل تقاضای سفر در شهرهاست. این ماتریس مربعی است و بعد آن برابر تعداد نواحی شهر است. مولفه‌های این ماتریس بیان‌کننده تعداد سفر از ناحیه متناظر سطر به ناحیه متناظر ستون ماتریس هستند. در مطالعات حمل‌ونقل، مقادیر این ماتریس با نمونه‌برداری، پرسش از ساکنان شهر و سپس تعمیم به جامعه مشخص می‌شود. این مقادیر مربوط به شرایط عادی هستند. در شرایط بحرانی، باید بر اساس «فرض رفتاری» ساکنان در تخلیه اضطراری، ماتریس تقاضا را مشخص کرد. در صورت وجود تجربه تخلیه قبلی، تنظیم مقادیر ماتریس امکان‌پذیر است. در مورد بوشهر خوشبختانه قبلا فاجعه‌ای که منجر به تخلیه شود رخ نداده است و لذا داده واقعی در این زمینه وجود ندارد. شکل ۱ و ۲ موقعیت مبدا و مقصد فرضی را در شبکه بوشهر نشان می‌دهد. فرض رفتاری این مقاله برای تخلیه اضطراری این است که افراد در معرض خطر تلاش می‌کنند که در راستای خط واصل بین کانون تهدید و مبدا سفر خود در راستای دورشونده از کانون تهدید حرکت کنند. در صورتی که مقصد تخلیه (C) دقیقا با زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به کانون تهدید (A) موجود نباشد، احتمال انتخاب مقاصد و در نتیجه سهم آنها از تقاضای تخلیه ایجاد شده در هر نقطه (مانند B) بر حسب زاویه‌ی انحراف از مسیر مطلوب (θ) تعیین می‌شود. این فرض رفتاری در برخی مطالعات پیشین نیز انجام شده است (Chen et al, 2012). در حالت انتشار شعاعی (مانند نشت هسته‌ای) کانون تهدید با خط مستقیم به مبدا تخلیه وصل می‌شود (شعاع AB) و زوایای آن با مقاصد تخلیه (C و C') محاسبه می‌شود (بترتیب θ_1 و θ_2). در حالت انتشار جبهه‌ای (مانند سونامی) نزدیک‌ترین نقطه ساحل به مبدا تخلیه ملاک محاسبه زاویه می‌باشد. توزیع تقاضای تخلیه تولیدشده در هر نقطه بر حسب زوایای آن با مقاصد تخلیه بین مقاصد انجام شد و ماتریس تقاضا بر این اساس ساخته شد.



شکل ۱. انتخاب مقصد تخلیه در شرایط سونامی



شکل ۲. انتخاب مقصد تخلیه در شرایط نشت هسته‌ای

۲-۳- اجرای مدل چهارمرحله‌ای تحلیل تقاضا

فرض شد که در شرایط بروز سونامی یا نشت هسته‌ای، همه ساکنان شهر ملزم به تخلیه شهر هستند. در نتیجه تعداد تخلیه‌کنندگان در هر ناحیه شهر برابر جمعیت آن ناحیه بود. توزیع سفر از هر نقطه به مقاصد بر اساس بند قبل انجام شد. همچنین فرض شد همه شهروندان با استفاده از خودروی شخصی تخلیه کنند. برای مدل‌سازی انتخاب مسیر، از چارچوب مفهومی تعادل استفاده‌کننده استفاده شد. در این چارچوب، فرض می‌شود ترددکنندگان اطلاع کاملی از وضعیت شبکه و مسیرهای آن دارند. تعادل استفاده‌کننده شرایطی است که در آن هیچ راننده‌ای با تغییر مسیر خود زمان سفر کوتاه‌تری را تجربه نمی‌کند (Sheffi, 1984). انتخاب مسیر در مقیاس شبکه بعنوان مساله تخصیص ترافیک شناخته می‌شود. روابط ۱ تا ٤ مدل استاندارد تخصیص ترافیک با هدف رسیدن به تعادل استفاده‌کننده را نمایش می‌دهد.

$$min\, z\,(x) = \sum_{a} \int_{0}^{x_a} t_a(w)dw \qquad (۱)$$

به نحوی که برای تمام مبادی، مقاصد ومعابر:

$$\sum_{k} f_k^{rs} = q_{rs} \qquad (۲)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \qquad (۳)$$

$$x_a = \sum_{r}\sum_{s}\sum_{k} f_k^{rs}\delta_{a,k}^{rs} \qquad (٤)$$

در این روابط، r مجموعه مبادی سفر، s مجموعه مقاصد سفر، k مسیرهای متصل‌کننده مبدا-مقصد، a مجموعه معابر شبکه هستند. همچنین، q_{rs} تقاضای سفر از مبدا r به مقصد s و f_k^{rs} تعداد سفری است که از مبدا r به مقصد s از مسیر k انجام می‌شود. x_a جریان ترافیک عبورکننده از معبر a است (حاصل جریان عبوری به ازای همه مبادی و مقاصد). $\delta_{a,k}^{rs}$ متغیری دومقداره است که در صورتی که معبر a در مسیر k واصل r به s واقع باشد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.

توابع حجم-تاخیر (تابع عملکرد معبر) نشان‌دهنده اثر جریان ترافیک بر تاخیر خودروها هستند. در این تحلیل مطابق رابطه (۵) از تابع معروف BPR استفاده شد.

در این رابطه x_a حجم تردد از کمان، t_a^0 زمان سیر آزاد کمان a و c_a' ظرفیت عملی معبر a است. معمولا مقادیر پارامترهای α و β بترتیب برابر ۰/۱۵ و ٤ قرار داده می‌شود.

$$t_a = t_a^0\left[1+\alpha\left(\frac{x_a}{c_a'}\right)^{\beta}\right] \quad (۵)$$

۲-٤- یافتن معابر بحرانی

اقداماتی مانند تعریض و یک‌طرفه‌سازی در معابر بحرانی انجام می‌شود. احداث معابر جدید نیز برای تقویت کریدورهایی انجام می‌شود که در راستای معابر بحرانی هستند. برای یافتن معابر بحرانی از دو رویکرد کارکردی و توپولوژیک استفاده شد. در رویکرد کارکردی، جریان و ازدحام معابر شهر بوشهر در دو سناریوی تخلیه بررسی شد. ازدحام بصورت نسبت حجم تردد به ظرفیت معبر محاسبه شد. در رویکرد ساختارمبنا، مرکزیت میانگی و مرکزیت نزدیکی معابر تحلیلی شد. این دو شاخص از پرکاربردترین شاخص‌ها در تحلیل ساختار شبکه‌ها هستند و معنای شهودی روشنی در شبکه‌های معابر شهری دارند.

مطابق رابطه ٦، مرکزیت میانگی یک معبر ($BC(a)$) نسبت کوتاه‌ترین مسیرهای واصل همه زوج مبدا-مقصدهای شبکه است که از آن معبر عبور می‌کنند ($\sigma(r,s\,|\,a)$) تقسیم بر تعداد همه کوتاه‌ترین مسیرهای موجود بین همه زوج مبدا-مقصدهای شبکه ($\sigma(r,s)$) (Newman, 2108).

$$BC(a) = \sum_{r,s\in v}\frac{\sigma(r,s|a)}{\sigma(r,s)} \quad (٦)$$

هرچه مرکزیت میانگی یک معبر بیشتر باشد، آن معبر نقش مهم‌تری در اتصال نقاط شهر به یکدیگر دارد و اختلال در آن بر ترددهای بیشتری تاثیرگذار است. مطابق رابطه ۷، مرکزیت نزدیکی یک معبر ($CC(a)$) عبارت است از معکوس حاصل‌جمع فاصله آن معبر تا کلیه معابر دیگر شبکه ($d(v,a)$). هرچه مرکزیت نزدیکی یک معبر بالاتر باشد، فاصله آن تا بقیه معابر شهر کمتر است. بیان دیگر، آن معبر بیشتر در دسترس است.

$$CC(a) = \frac{n-1}{\sum_{v=1}^{n-1} d(v,a)} \quad (۷)$$

۳- محاسبات

بوشهر بر کرانه خلیج فارس و بر گسل‌های برازجان و کازرون قرار دارد. همچنین نیروگاه هسته‌ای در نزدیکی این شهر قرار دارد. بهمین دلایل، دو تهدید سونامی و نشت هسته‌ای در این مقاله مورد توجه قرار گرفت. شدت نفوذ امواج

به ساحل و نیز میزان نشت از نیروگاه هسته‌ای تعیین‌کننده شعاع تخلیه هستند. با این حال در این پژوهش بمنظور در نظر گرفتن بدترین سناریو، فرض شد که کل وسعت شهر در معرض تهدید باشد و تقاضای تخلیه بر حسب نوع تهدید و فاصله تا خروجی به یکی از دو خروجی بوشهر (ابتدای جاده‌ی برازجان و ابتدای جاده‌ی عالی‌شهر) منتهی شود. نتایج بدست آمده از تخصیص ماتریس مبدا–مقصد حالت بحران به شبکه‌ی موجود در حالت وقوع سونامی و نشت هسته‌ای در شکل ۳ نمایش داده شده است. شبیه‌سازی در نرم‌افزار TransCAD با ماتریس تنظیم‌شده بر اساس فرض دوری از کانون خطر، فرض عدم رعایت زمان‌بندی چراغ‌های راهنمائی از سوی رانندگان، عدم وجود اتوبوس و موتور و پیاده در معابر انجام شد. نتایج نشان داده است که در شرایط بحرانی معابری که قسمت‌های جدا شده‌ی شهر را به هم متصل می‌کند، بیشتر دچار ازدحام خواهند شد. همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، ازدحام دو جهت تعدادی از معابر دوطرفه یکسان نیست. بعضی از معابر در یک جهت دارای ازدحام بالا و در جهت مخالف دارای ازدحام پائین هستند. این معابر می‌توانند نامزدهای مناسبی برای یک‌طرفه شدن در حالت بحران باشند. معابر دوطرفه‌ای که دارای ازدحام در هر دو جهت هستند، می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای تعریض باشند. در ادامه، معابر مهم از منظر شاخص‌های کارکردی و توپولوژیک مشخص شدند. ببیان دیگر معابری که میانگی، نزدیکی، یا در حالت بحران حجم تردد یا ازدحام بالایی دارند با استفاده از شبیه‌سازی تعادل استفاده‌کننده مشخص شدند. نتایج در شکل ٤ نمایش داده شده است.

سونامی نشت هسته ای

شکل ۳. ازدحام در معابر شبکه‌ی موجود ناشی از دو تهدید

الف. بر اساس مرکزیت نزدیکی

ب. بر اساس مرکزیت میانگی

ج. بر اساس جریان و مرکزیت میانگی

د. بر اساس جریان

ه. بر اساس جریان و ازدحام

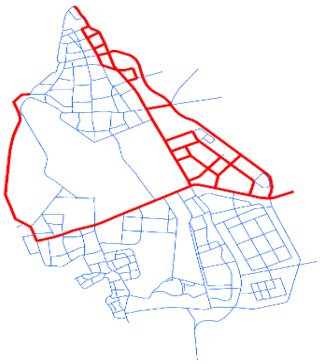
و. بر اساس جریان و مرکزیت نزدیکی

ز. بر اساس ازدحام

ح. بر اساس ازدحام و مرکزیت میانگی

و. بر اساس ازدحام و مرکزیت نزدیکی

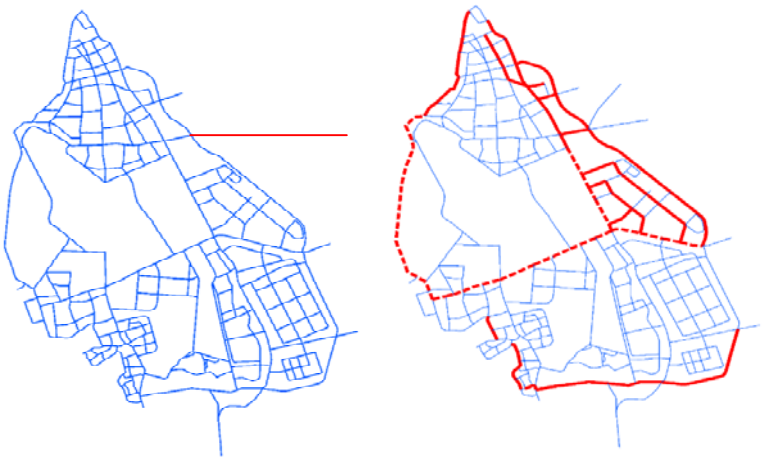
شکل ٤. معابر حیاتی بر اساس معیارهای مختلف



شکل ۵. معابر برای تعریض (قضاوت کارشناسی)

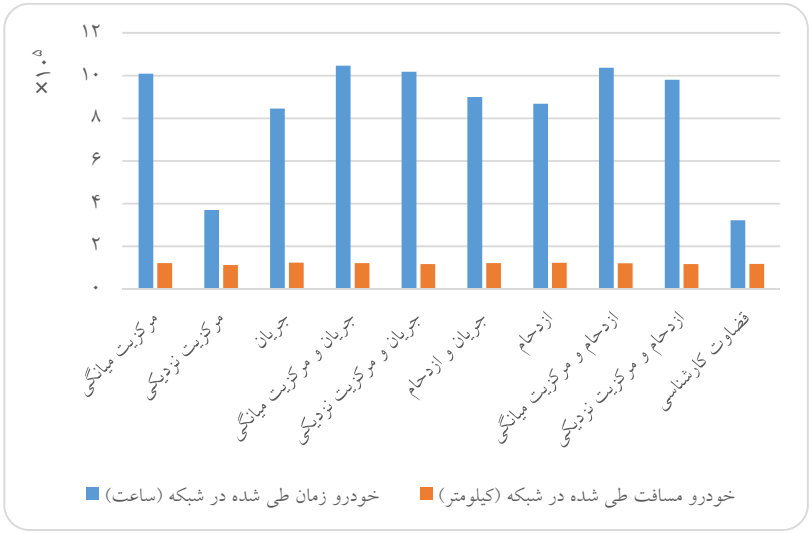
در کنار معابری که بصورت روشمند بعنوان معابر مهم مشخص شده بودند، معابری هم با قضاوت کارشناسی بعنوان موثرترین معابر تعیین شدند. این معابر در شکل ۵ مشخص شده‌اند و ترکیبی از معابر مشخص شده در شکل ٤ هستند. معابر نامزد برای یک‌طرفه‌سازی در هنگام بحران برحسب توزیع جریان در دو جهت مشخص شدند. از بین این مجموعه، معابری که از مناطق با تراکم ساخت کم یا مناطق ساخته‌نشده شهر عبور می‌کردند، علاوه بر یک‌طرفه‌سازی برای تعریض نیز مناسب تشخیص داده شدند. مطابق با شکل ٦ الف، خطوط قرمز رنگ ممتد بیانگر معابری هستند که تنها عملیات یک طرفه سازی برای آنها اتخاذ شده و همچنین خطوط قرمز رنگ منقطع بیانگر معابری هستند که هم عملیات یک‌طرفه‌سازی و هم تعریض برای آنها اتخاذ شده است.

بخشی از ازدحام معابر بوشهر بخاطر کم بودن تعداد خروجی‌های آن است. از طرفی، وجود تنها دو خروجی، شهری با ابعاد بوشهر را در مقابل حوادث مختلف بسیار آسیب‌پذیر می‌کند. بر این اساس، گزینه احداث معبری به طول ۸/۵ کیلومتر بمنظور ایجاد خروجی سوم شهر تحلیل شد. موقعیت این معبر در شکل ٦ ب نشان داده شده است. پس از شناسایی و بررسی گام‌های مدلسازی، نوبت به انجام و اجرای گام‌های گفته شده می‌رسد که در ادامه، نتایج و خروجی‌ها به نمایش گذاشته می‌شود و در کنار آن تحلیل نتایج نیز انجام می‌گیرد.

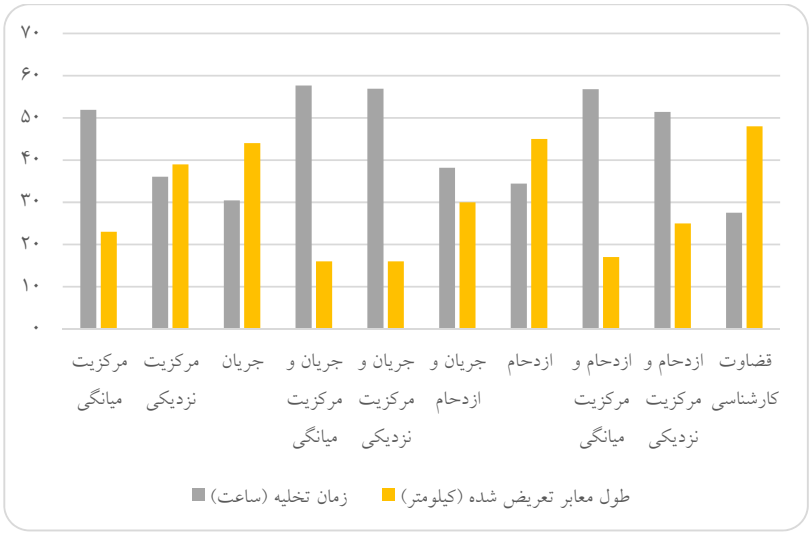


الف. یک‌طرفه‌سازی و تعریض ب. احداث (خروجی جدید)

شکل ٦. پیشنهاد معابر برای یک‌طرفه‌سازی، تعریض، احداث

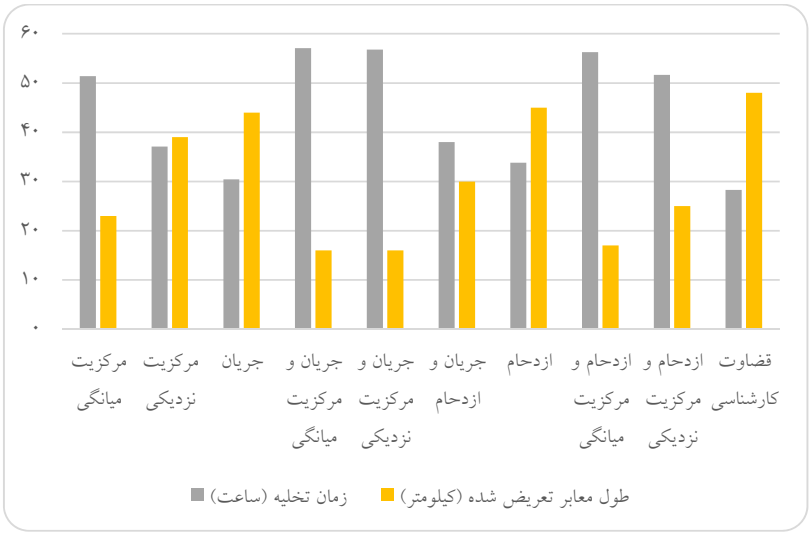


شکل ۷. مقادیر تردد در حالت نشت هسته‌ای



شکل ۸. مقدار تعریض و تخلیه در حالت نشت هسته‌ای

شکل ۹. مقادیر تردد در حالت سونامی



شکل ۱۰. مقدار تعریض و زمان تخلیه در حالت سونامی

جدول ۱ بیانگر نتایج حاصل از اعمال سیاست یک‌طرفه سازی همراه با تعریض معابر است. مقادیر شاخص‌های زمان تخلیه، خودرو زمان طی‌شده، خودرو مسافت طی‌شده تحت شرایط وقوع نشت هسته‌ای و سونامی در این جدول گزارش شده است. قابل توجه است که میزان کاهش زمان تخلیه برای فجایع نشت هسته‌ای و سونامی نسبت به شبکه‌ی موجود برابر با ۱۶۵ ساعت است. آخرین سیاستی که مورد بررسی قرار گرفته است، سیاست گام‌بندی زمانی است که نتایج بدست آمده از این نوع سیاست بیشترین کاهش در زمان تخلیه را در پی داشته است. از آنجا که اعمال هم زمان دو سیاست تعریض معابر و یک طرفه‌سازی آنها، زمان تخلیه‌ی کمتری در مقایسه با سیاست‌های قبلی داشته است، شبکه‌ی حاصل از اعمال این دو سیاست به عنوان شبکه‌ی نامزد برای اعمال سیاست گام‌بندی زمانی انتخاب شد. نتایج بدست آمده از این مرحله برای سونامی و نشت هسته‌ای به ترتیب در جداول ۲ و ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۱. نتایج یک طرفه‌سازی همراه با تعریض

تهدید	زمان تخلیه شبکه (ساعت)	خودرو زمان طی‌شده (هزار خودرو-ساعت)	خودرو مسافت طی‌شده (هزار خودرو-کیلومتر)
سونامی	۸	۱۸۴۴	۱۱۶۴
نشت هسته‌ای	۷	۸۰۰	۱۰۹۸

جدول ۲. نتایج گام‌بندی زمانی برای شبکه‌ی یک طرفه‌سازی شده همراه با تعریض برای حالت سونامی

تعداد خودروی تخصیص داده شده در هر گام زمانی	خودرو مسافت طی‌شده (هزارخودرو-کیلومتر)	خودرو زمان طی‌شده (هزارخودرو-ساعت)	زمان تخلیه شبکه (ساعت)	درصد گام‌های زمانی
۴۵۶۳۱	۴۹۹	۲۵	۰/۷	٪۵۰
۴۵۶۳۱	۴۹۹	۲۵	۰/۷	٪۵۰

جدول ۳. نتایج گام‌بندی زمانی برای شبکه‌ی یک طرفه‌سازی شده همراه با تعریض برای حالت نشت هسته‌ای

تعداد خودروی تخصیص داده شده در هر گام زمانی	خودرو مسافت طی‌شده (هزار خودرو-کیلومتر)	خودرو زمان سپری شده (هزار خودرو-ساعت)	زمان تخلیه شبکه (ساعت)	درصد گام‌های زمانی
٤٥٣٦١	٤٧٥	٢٤	٠/٧	٪٥٠
٤٥٣٦١	٤٧٥	٢٤	٠/٧	٪٥٠

از دیگر سو سیاست احداث معبر، برای وقوع نشت هسته‌ای لحاظ شد و مقادیر شاخص‌های حاصل شده بدین شرح است: ۱۱/٦ میلیون ساعت برای خودرو-زمان طی‌شده، ۰/۹۹ میلیون کیلومتر خودرو-مسافت طی‌شده در شبکه و ١٦٥ ساعت برای زمان تخلیه. همین روند برای سناریوی وقوع فاجعه‌ی سونامی انجام شده و نتایج حاصله بدین شرح است: خودرو زمان سپری شده در شبکه برابر با تقریباً ۵/٦ میلیون ساعت، مسافت طی‌شده در شبکه تقریبا ۱/۰٤ میلیون کیلومتر و زمان تخلیه برابر با ۷٤ ساعت.

٤- نتیجه‌گیری

در تعیین اولویت‌های توسعه شبکه معابر شهری، در نظر گرفتن شرایط خاصی که احتمال وقوع کم اما پیامدهای زیادی دارند ضروری است. در مطالعه‌ی حاضر یکی از روش‌های کاربردی برای این موضوع بیان و اجرا شد. ماتریس تقاضا به نحوی شکل گرفته است که شهروندان مقصد خود را بر اساس دوری جستن از منشأ فاجعه انتخاب می‌کنند. برای شهر بوشهر دو مقصد اولیه برازجان و عالی‌شهر وجود دارد که تقاضا بین آنها بر اساس همین رویکرد تقسیم شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که مقصد برازجان تقاضای بیشتری نسبت به مقصد عالی‌شهر به خود جذب کرده است. دو عامل در این نتیجه دخیل بوده‌اند؛ اول آنکه راستای گره‌های بخش شمالی با مقصد برازجان نسبت به عالی‌شهر اختلاف زاویه‌ای کمتری با راستای مطلوب می‌سازد. دوم آنکه بخش شمالی شهر بوشهر جمعیت بیشتری نسبت به بخش جنوبی آن دارد. سیاست تعریض معابر مطابق با شاخص‌های مرکزیت، جریان، ازدحام و ترکیب آنها لحاظ شده است. سیاست دیگری که به منظور بهبود عملکرد شبکه مورد استفاده قرار گرفت، یک‌طرفه‌سازی معابر بود. عملیات یک طرفه‌سازی برای معابری که تمرکز جریان تنها در یک جهت معبر بوده است، اعمال شده است. در گام بعد برای کاهش بیشتر زمان تخلیه امکان اعمال هم زمان سیاست یک طرفه‌سازی و تعریض معابر بررسی شد. به این صورت که آن دسته از معابری که هزینه‌ی آزادسازی بالایی دارند، یک طرفه‌سازی شده و برای معابری که در حاشیه‌ی پادگان‌های نظامی قرار دارند (هزینه‌ی آزادسازی آنها پایین است) دو سیاست تعریض و یک طرفه‌سازی به صورت همزمان لحاظ شده است. سیاست احداث معبر جدید نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. معبری که در این قسمت برای احداث در نظر گرفته شده است، موجب خواهد شد که به مجموعه مقاصد نامزد یک مقصد دیگر نیز اضافه گردد. از آنجایی که این مقصد زاویه‌ی کمتری با راستای مطلوب شهروندان دارد، تقاضای سفر بالاتری را نیز به خود اختصاص خواهد داد. این سیاست تفاوت قابل معنی‌داری در زمان تخلیه ایجاد نکرد ولی بر شاخص‌های خودرو زمان طی‌شده و خودرو مسافت طی‌شده – در مقایسه با سایر سیاست‌ها – تاثیر قابل ملاحظه‌ای گذاشته است. از میان سناریوهای اتخاذ شده‌ی قبلی، سیاست گام‌بندی زمانی بیشترین کاهش را در زمان تخلیه‌ی اضطراری داشته است. میزان کاهش زمان تخلیه‌ی کل شهر بوشهر پس از اعمال سیاست گام‌بندی زمانی نسبت به شرایط موجود برای بحران‌های نشت مواد هسته‌ای و سونامی به ترتیب ۱۷۱ و ۱۷۰ ساعت بوده است. همانگونه که از نتایج اعمال سناریوها برآورد می‌شود، مجموعه معابری که براساس شاخص‌های جریان و مرکزیت میانگی برای اعمال سناریوها انتخاب شده‌اند، تاثیر بیشتری در کاهش زمان تخلیه داشتند. بخشی از ازدحام معابر بوشهر در تخلیه اضطراری بخاطر کم بودن تعداد خروجی‌های آن است. وجود تنها دو خروجی، شهری با ابعاد بوشهر را در مقابل حوادث مختلف بسیار آسیب‌پذیر می‌کند. بر این اساس، گزینه احداث معبری به طول ۸/۵ کیلومتر بمنظور ایجاد خروجی سوم شهر پیشنهاد شد.

پژوهش فعلی با محدودیت‌هایی در داده مانند آخرین اطلاعات جمعیتی شهر، میزان مالکیت خودرو، موقعیت چراغ‌های راهنمایی مواجه بوده است. با در دست داشتن این اطلاعات می‌توان سیاست زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی با

هدف کمینه‌سازی زمان تخلیه را به سیاست‌های لحاظ شده اضافه کرد. همچنین جمعیت تخصیص یافته به هر یک از مقاصد با در نظر گرفتن دو ملاک دوری از فاجعه و کوتاه‌ترین مسیر به طور هم‌زمان می‌تواند مدل ساخته شده را به واقعیت نزدیک‌تر کند.

۵- مراجع

-A. J. Ballard, (2007). Traffic operations for hurricane evacuation.

-A. Jahangiri, P. Murray-Tuite, S. G. Machiani, B. B. Park, and B. Wolshon (2014). Modeling and assessment of crossing elimination for no-notice evacuations. *Transp. Res. Rec*., Vol. 2459, 91–100,

-A. M. Afshar and A. Haghani, (2008). Heuristic framework for optimizing hurricane evacuation operations. *Transp. Res. Rec*., No. 9–17.

-B. Wolshon, (2001). One-Way-Out', Contraflow Freeway Operation for Hurricane Evacuation. *Nat. Hazards Rev.,* Vol. 2, No. 3, 105–112.

-C. Y. Bae and K. Kobayashi (2021). Analysis of evacuation time for vulnerable individuals during inundation of lowland areas. *J. Disaster Res.,* Vol. 16, No. 5, 866–873.

-D. Yin, S. Wang, and Y. Ouyang, (2020). ViCTS: A novel network partition algorithm for scalable agent-based modeling of mass evacuation. *Comput. Environ*. Urban Syst., Vol. 80.

-E. Kuligowski (2021). Evacuation decision-making and behavior in wildfires: Past research, current challenges and a future research agenda. *Fire Saf. J.,* Vol. 120.

-F. Sayyady and S. D. Eksioglu (2010). Optimizing the use of public transit system during no-notice evacuation of urban areas. *Comput. Ind. Eng*., Vol. 59, No. 4, 488–495.

-G. Lämmel and G. Flötteröd (2009). Towards system optimum: Finding optimal routing strategies in time-dependent networks for large-scale evacuation problems. *Lect. Notes Comput. Sci*. (Including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics), Vol. 5803 LNAI, 532–539.

-J. W. Wang, W. H. Ip, and W. J. Zhang (2010). An integrated road construction and resource planning approach to the evacuation of victims from single source to multiple destinations. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.,* Vol. 11, No. 2, 277–289.

-J. Zhang, Y. Liu, Y. Zhao, and T. Deng (2020). Emergency evacuation problem for a multi-source and multi-destination transportation network: mathematical model and case study. Ann. Oper. Res., Vol. 291, No. 1–2, 1153–1181.

-K. Feng and N. Lin (2021).Reconstructing and analyzing the traffic flow during evacuation in Hurricane Irma (2017). Transp. Res. Part D Transp. Environ., Vol. 94.

-L.G. Mattsson, and E. Jenelius (2015).Vulnerability and resilience of transport systems–A discussion of recent research. *Transportation research part A: policy and practice 81*, 16-34.

-M. Akbarzadeh and C. G. Wilmot (2015). Time-dependent route choice in hurricane evacuation," Nat. Hazards Rev., Vol. 16, No. 2.

-M. He, Chen, C., Zheng, F., Chen, Q., Zhang, J., Yan, H., & Lin, Y. (2021). An efficient dynamic route optimization for urban flooding evacuation based on Cellular Automata. *Computers, Environment and Urban Systems,* 87, 101622.

-M. J. Alam and M. A. Habib (2021). A dynamic programming optimization for traffic microsimulation modelling of a mass evacuation. Transp. Res. Part D Transp. Environ., Vol. 97.

-M. Newman, Networks, Oxford university press, (2018).

-N. Ohtsu, A. Hokugo, A. M. Cruz, Y. Sato, Y. Araki, and H. Park (2021).Evacuation of vulnerable people during a Natech: a case study of a flood and factory explosion in Japan. *Int. J. Disaster Resil.* Built Environ.

-O. Hosseini, M. Maghrebi, and M. F. Maghrebi (2021). Determining optimum staged-evacuation schedule considering total evacuation time, congestion severity and fire threats. Saf. Sci., Vol. 139.

-O. T, T. K, and L. L, (2021). Evacuation after a nuclear accident: Critical reviews of past nuclear accidents and proposal for future planning. *Environ. Int.,* Vol. 148, 106379.

-P. Murray-Tuite, and B. Wolshon. (2013). Evacuation transportation modeling: An overview of research, development, and practice. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies 27*, 25-45.

-S. A. Parr, N. Herrera, B. Wolshon, and T. Smith (2020). Effect of manual traffic control on evacuation time estimates. *Transp. Res. Rec.,* Vol. 2674, No. 9, 809–819.

-T. J. Cova and J. P. Johnson (2003). A network flow model for lane-based evacuation routing.
Transp. Res. Part A Policy Pract., Vol. 37, No. 7, 579–604.

-X. Chen, M. Kwan, Q. Li, J. C. Computers, E. and Urban, and undefined (2012).A model for evacuation risk assessment with consideration of pre-and post-disaster factors, *Elsevier.*

-Y. Sheffi, (1985). Urban transportation networks. Vol. 6. *Prentice-Hall,* Englewood Cliffs, NJ.

-Z. Wang and G. Jia, (2021).Tsunami evacuation risk assessment and probabilistic sensitivity analysis using augmented sample-based approach. *Int. J. Disaster Risk Reduct*., Vol. 63.

Prioritization of Urban Roads Based on their Importance in Evacuation, Case of Bushehr

Arash Arvin, M.Sc., Grad., Department of Transportation Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
Meisam Akbarzadeh, Associate Professor, Department of Transportation Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
Pooria Hajian, M.Sc., Grad., Department of Transportation Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

E-mail: makbarzadeh@iut.ac.ir

Received: February 2024- Accepted: June 2024

ABSTRACT
Emergency evacuation is widely recognized as a critical strategy widely adopted as a last resort to reduce disaster losses and widely studied and implemented across the world. Iran is known as one of the countries with several cities that are exposed to various potential disasters. This paper analyzes the strategies for widening critical streets, constructing new roads, contraflow at the time of evacuation, demand staging, as well as combined solutions for an urban emergency evacuation. The evacuation destinations were determined based on the citizens' willingness to choose a destination based on their distance from the line of threat. Routing was performed using the user optimization method. The importance of roads in terms of traffic flow / congestion as well as centrality indices (graph theory) were considered. A case study was conducted for the city of Bushehr in the event of two threats of leakage of radioactive materials from the nuclear power plant (point source with radial propagation) and tsunami (linear source with frontal propagation). The results show that the critical passages of the network can be identified based on the volume of traffic and the centrality of the intermediary. The results show that the critical passages of the network can be identified based on the volume of traffic and the centrality of the intermediary. The results also showed that the timing policy has a significant effect on reducing the emergency evacuation time**.**

Keywords: Evacuation, Radioactive Radiation, Tsunami, Betweenness Centrality, Closeness Centrality, Traffic Assignment