

تحلیل آسیب پذیری تقاطعات در شبکه‌های بزرگ به هنگام وقوع بحران

(مطالعه موردی: شهر تهران)

زینب عبادی، دانشجوی دکترا، گروه برنامه ریزی حمل و نقل، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، ایران

شهریار افندی‌زاده (مسئول مکاتبات)، استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: zargari@iust.ac.ir

علی نادران، استادیار، دانشکده عمران، معماری و هنر، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۷

چکیده

از جمله نقاط آسیب پذیر شبکه به هنگام وقوع بحران، تقاطعات موجود در شبکه می‌باشد. در این مطالعه، به نقش و اهمیت تقاطعات در آسیب وارد بر شبکه به هنگام وقوع بحران از حیث عملکرد و دسترسی پرداخته شده است که با استفاده از نتایج آن، امکان اولویت بندی تقاطعات در توزیع بهینه منابع به منظور تامین پایداری عملکرد شبکه فراهم می‌آید. بر این اساس، روشی به منظور شناسایی تقاطعات آسیب‌پذیر ارائه شد که مبنای آن مقایسه وضعیت تاخیر عبور از تقاطع در شرایط وقوع بحران (در دو وضعیت بدون چراغ و بدون وجود هر نوع کنترل معادل) بوده و با حداکثر آشفتنی در تقاطع چراغدار با زمان بندی بهینه (به عنوان وضعیت معادل با کنترل تقاطع از سوی پلیس) می‌باشد. در روش پیشنهادی، تاخیر تقاطع در دو وضعیت مورد بررسی از میانگین تاخیر کمان‌های منتهی به آن بر اساس توابع تاخیر پرداخت شده، به دست آمده و مبنای زمان بندی بهینه چراغ و پارامترهای آن به منظور اعمال در تابع تاخیر در حالت تقاطع چراغدار نیز روش وبستر می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از اجرای طرح در نمونه مطالعاتی تحقیق، ۱۲/۷ درصد از تقاطعات شبکه به عنوان تقاطعات آسیب‌پذیر شناخته می‌شوند. همچنین معابر با رده عملکردی شریانی، دارای بیشترین تقاطعات آسیب‌پذیر در واحد طول معابر می‌باشد که بیانگر قابلیت اطمینان پایین زمان سفر در آنها و در کل شبکه در نمونه مطالعاتی تحقیق بوده و می‌توان آن را ناشی از ساختار نامناسب شبکه معابر در تفکیک وظایف معابر به ویژه تامین دسترسی‌ها برشمرد.

واژه‌های کلیدی: آسیب پذیری، بحران، تقاطع، تاخیر، دسترسی

۱. مقدمه

موثر، ایمن و قابل اطمینان، امکان تخلیه جمعیت آسیب دیده به نقاط امن را تامین نماید. اما می بایست به این نکته توجه نمود که اصولاً وجود یک شبکه مناسب و کارا در پاسخگویی به تقاضای موجود پیش از وقوع بحران، به تنهایی متضمن یک فرایند تخلیه کارا و موثر نمی باشد که از مهمترین دلایل آن می توان به افزایش ناگهانی تقاضای عبوری از شبکه و وقوع رخداد‌های پیش بینی نشده نظیر خرابی زیرساختها اشاره نمود که این مساله می تواند انسداد و ایجاد گره‌های ترافیکی متعدد در بخش‌های مختلف شبکه در مدت زمانی کوتاه پس از وقوع بحران را به همراه داشته باشد.

بر این اساس آسیب شناسی شبکه معابر شهری به هنگام وقوع زلزله، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار بوده و هرگونه برنامه ریزی در خصوص تخلیه مناطق بحران زده، بدون توجه به زیرساخت‌های حمل و نقلی به ویژه شبکه معابر و تاثیرات احتمالی بحران به وقوع پیوسته بر آن، امکان پذیر نخواهد بود. اگرچه در نگاه اول، آسیب پذیری شبکه معابر در نتیجه وقوع زلزله را می توان به صورت شکست سطح روسازی، آسیب دیدگی پل ها و تونل ها و تجمع آوار در بخشهایی از شبکه برشمرد اما می توان به عوامل دیگری نیز اشاره نمود که پیش بینی اثرات مخرب آنها بر شبکه با توجه به ماهیت احتمالی و عدم قطعیت های موجود، از پیچیدگی زیادی برخوردار می باشد. از آن جمله می توان به عدم کفایت ظرفیت، تداخلات احتمالی جریان های ترافیک در تقاطعات در نتیجه آسیب های وارده به تجهیزات کنترل ترافیک، بروز تصادفات و رها نمودن خودروها در سطح معابر اشاره نمود. بدیهی است میزان تاثیر هر یک از این عوامل متفاوت بوده و برخی از آنها بنا بر دلایلی ممکن است دارای اهمیت بیشتری باشند. به گونه ای که وقوع آنها ممکن است کاهش شدید عملکرد شبکه را به همراه داشته و ظرفیت کل شبکه را به شدت کاهش دهد. در برخی دیگر نیز ممکن است موجب اختلال در دسترسی نقاط آسیب دیده و یا در معرض آسیب به مقاصد تخلیه گشته و شبکه ای که نتواند دسترسی لازم

زلزله یکی از مهمترین بحران های پیش روی بشر می باشد که می تواند در مدت زمان کوتاهی خسارات و تلفات بسیار گسترده ای بر جای بگذارد. یکی از کشورهای درگیر در بحث زلزله ایران می باشد. به طوری که در خلال قرن گذشته از ۱۵۳ زلزله مخربی که در دنیا اتفاق افتاده است، ۲۷ مورد آن مربوط به ایران بوده است. همچنین به طور میانگین هر سال یک زلزله ۶ ریشتری و هر ده سال یک زلزله به بزرگی ۷ ریشتر در کشور رخ داده و بر اساس آمارهای موجود، از رتبه نخست تعدد زلزله های ۵ ریشتری در جهان برخوردار می باشد [منتظرالقائم، شریفی، الیاسی، عبدالجلال و ایرانپور، ۱۳۹۶].

اگرچه جلوگیری از پدیده زلزله امری غیر ممکن است اما با اندیشیدن تدابیری می توان آسیب های ناشی از آن را به حداقل ممکن رسانید. کاهش آسیب پذیری جوامع شهری در برابر زلزله تنها زمانی به وقوع خواهد پیوست که ایمنی در برابر زلزله در تمام سطوح برنامه ریزی مدنظر قرار گیرد. به گونه ای که بر اساس مطالعات تیلور تلفات ناشی از زلزله در کشورهای در حال توسعه که از آمادگی کمتری در مقابله با سوانح و تلفات ناشی از زلزله برخوردارند، بیش از ۲۰ برابر کشورهای توسعه یافته است [Taylor, Sekhar and D'Este, 2006].

از جمله اقدامات لازم به منظور مدیریت بحران و کاهش خسارات ناشی از وقوع زلزله، مدیریت و کنترل شبکه معابر می باشد که می تواند در عملیات تخلیه آسیب دیدگان مورد توجه قرار گیرد. تخلیه اضطراری یکی از اجزای اصلی مدیریت بحران می باشد که با هدف انتقال هر چه سریعتر افراد از مکان های آسیب دیده و یا در معرض خطر به مناطق امن صورت می پذیرد. در طی این فرایند، آسیب دیدگان یا افراد در معرض آسیب، محل سکونت خود را ترک کرده و تا زمان رفع خطر در مراکز امن نظیر پناهگاه ها مستقر شده و یا به نواحی خارج از شهر هدایت می گردند. ملاحظات مربوط به مدیریت بحران های احتمالی در یک شهر ایجاب می کند که شبکه حمل و نقلی بتواند به نحوی

تحلیل آسیب پذیری تقاطعات در شبکه‌های بزرگ به هنگام وقوع بحران (مطالعه موردی: شهر تهران)

منظور آسیب‌پذیری شبکه معابر و بهبود ساختار شبکه‌های ارتباطی و طراحی شبکه پیشنهاد کرده‌اند. در این مطالعه با مدلسازی شبکه و بررسی تأثیرات حذف یک کمان مشخص در عملکرد شبکه و شاخصهای ارزیابی آن، نسبت به شناسایی و اولویت بندی اجزای آسیب پذیر اقدام شده و روشهایی به منظور کاهش آسیب پذیری کل شبکه و حفظ پیوستگی آن ارایه گردید [Tsukaguchi and Li, 1999].

از دیگر مطالعات انجام شده در این خصوص می‌توان به مطالعه تیلور و همکاران در سال ۲۰۰۶ اشاره نمود. در این مطالعه، آسیب پذیری اجزای شبکه بزرگراهی استرالیا در نتیجه تأثیرات اقتصادی-اجتماعی تخریب شبکه، مورد ارزیابی قرار گرفته و در آن روشی به منظور شناسایی مکان‌هایی از شبکه که وقوع انسداد در آنها، تأثیرات جدی در تأمین دسترسی‌ها و عملکرد کلی شبکه خواهند داشت، ارایه شده است [Taylor, Sekhar and D'Este, 2006].

در مطالعات تیلور و ایست در سال ۲۰۰۸ روشی به منظور شناسایی و ارزیابی مکان‌های بحرانی در شبکه راه‌ها ارایه گردید. روش پیشنهادی در این مطالعه در بردارنده تقاضای سفر، توپولوژی شبکه، ظرفیت و هندسه اجزای شبکه بوده و نتایج آن، شناسایی و ارزیابی عملکرد شبکه در نتیجه تأثیر حوادث ترافیکی بر اساس وضعیت دسترسی‌ها می‌باشد. در این مطالعه، بررسی وضعیت دسترسی‌ها در دو حالت مستقل از حجم و وابسته به آن در نظر گرفته شده و مکان‌های بحرانی از طریق تفاوت در وضعیت دسترسی‌ها در قبل و بعد از انسداد کمان‌ها، معرفی و رتبه‌بندی می‌گردند

[Taylor and D'Este, 2008].

لیوتپ و همکارانش در مطالعه خود در سال ۲۰۱۱، روشی به منظور شناسایی اجزای بحرانی ارایه دادند که قابل استفاده در شبکه راه‌های بزرگ مقیاس می‌باشد. در این مطالعه، اجزای بحرانی بر اساس میزان تغییر در شاخص دسترسی هنسن بر مبنای زمان در دو حالت شبکه نرمال و تخریب شده، رتبه‌بندی شدند.

را در این شرایط فراهم کند، خسارت‌های جبران ناپذیری را به بار خواهد آورد. بر این اساس عدم بررسی آسیب‌پذیری شبکه از منظر هر یک از این عوامل می‌تواند تأثیرات بسیار مخربی بر فرایند برنامه‌ریزی تخلیه به همراه داشته باشد.

در این مطالعه، به نقش و اهمیت تقاطعات شبکه در آسیب‌رسانی عملکردی و دسترسی به شبکه به هنگام وقوع بحران پرداخته خواهد شد که با استفاده از نتایج آن، امکان اولویت‌بندی تقاطعات شبکه به منظور مداخله و انجام اقدامات مورد نیاز جهت تأمین پایداری عملکرد شبکه فراهم می‌آید.

در مطالعه حاضر در ابتدا پیشینه پژوهش به صورت خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه روش‌شناسی پژوهش ارایه می‌گردد. تشریح نمونه مطالعاتی تحقیق و پیاده‌سازی روش پیشنهادی در آن، بخش دیگر مطالعات را تشکیل می‌دهد. در پایان نیز جمع‌بندی مطالعه، نتیجه‌گیری و ارایه پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی بیان می‌شود.

۲. ادبیات پژوهش

تاکنون مطالعات مختلفی در خصوص تحلیل و ارزیابی آسیب پذیری شبکه‌های حمل‌ونقل به هنگام وقوع زلزله و پس از آن صورت پذیرفته است که در آن به پیش‌بینی پیامدهای عدم عملکرد مناسب اجزای مختلف شبکه راه‌ها با اهدافی نظیر کاهش آسیب‌پذیری و افزایش استحکام شبکه، افزایش قابلیت اطمینان، افزایش قابلیت بازگشت پذیری، طراحی شبکه تخلیه و ... پرداخته می‌شود. در بسیاری از این مطالعات، به دلیل ابعاد مساله از نظر تعداد متغیرها، محدودیت‌ها و ... امکان حل مساله با روش‌های حل مرسوم امکان‌پذیر نمی‌باشد. بر این اساس، اکثر مطالعات صورت گرفته در این خصوص، بر ساده‌سازی‌های زیاد در تعریف شبکه تخلیه تکیه داشته است که چنین ساده‌سازی‌هایی اغلب به نتایج دور از واقعیت می‌انجامند [Webster and Cobbe, 1958].

از جمله مطالعات انجام شده در این خصوص می‌توان به مطالعه تسوکاگوچی و لی اشاره نمود که در سال ۱۹۹۹، مدلی را به

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال شانزدهم / شماره سوم (۶۴) / بهار ۱۴۰۴

یک شبکه نمونه اقدام نمودند. بر اساس نتایج حاصل، خروجی حاصل از اجرای روش‌های مختلف مورد بررسی در این مطالعه دارای تفاوت‌های قابل توجهی بوده و کاملاً وابسته به ساختار و توپولوژی شبکه می‌باشند [Kashin and Asakura, 2020]. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در مطالعات مرتبط با موضوع این تحقیق که در بالا بدان پرداخته شد، در برخی از این مطالعات به ارزیابی عملکرد شبکه، بدون توجه به وضعیت تقاضا و تنها بر اساس توپولوژی و ساختار شبکه پرداخته شده است. در برخی دیگر نیز مساله تقاضا در ارزیابی عملکرد شبکه با در نظر داشتن مسایل کلاسیک تخصیص تقاضا مورد توجه قرار گرفته است. بدیهی است با توجه به فرض اساسی مسایل کلاسیک تخصیص مبنی بر آشنایی کامل کاربران با وضعیت عملکردی شبکه و انتخاب مسیر بر مبنای آن پیش از انجام سفر، ارزیابی عملکرد شبکه بر مبنای چنین فرضی در شرایط وقوع زلزله با تقاضای سفر و در نتیجه وضعیت عملکردی کاملاً متفاوت با وضعیت موجود، چندان منطبق بر واقعیت نخواهد بود. همچنین در بسیاری از این مطالعات، ارزیابی عملکرد کلی شبکه و اجزای آن در شبکه‌های بزرگ و در نتیجه شناسایی اجزای آسیب‌پذیر، مبتنی بر فرض‌هایی به منظور ساده‌سازی می‌باشد.

از این‌رو در این مطالعه به ارایه روشی به منظور ارزیابی عملکرد شبکه با در نظر داشتن تقاضای بحران و منطبق بر رفتار واقعی کاربران به منظور برآورد تغییرات شاخص‌های عملکردی ناشی از اختلال در اجزای مختلف آن پرداخته خواهد شد که مبنای اساس شناسایی بخش‌های آسیب‌پذیر و اولویت بندی آنها جهت اقدامات واکنشی مورد نیاز خواهد بود.

۳. روش پژوهش

یکی از مهمترین معیارهای ارزیابی شبکه حمل‌ونقل به هنگام وقوع بحران، توانایی شبکه در حفظ عملکرد خود در شرایط وقوع رخداد‌های غیر معمول می‌باشد که اصطلاحاً به نیرومندی شبکه تعبیر می‌گردد. یک شبکه نیرومند از آمادگی لازم به منظور مواجهه با اختلالات احتمالی در شبکه برخوردار بوده و می‌تواند فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال شانزدهم / شماره سوم (۶۴) / بهار ۱۴۰۴

در این مطالعه به منظور برآورد زمان سفر، از تخصیص تعادل استفاده‌کننده براساس مدل تصادفی پروبیت استفاده شده و روش پیشنهادی در ابتدا بر روی شبکه سایوکس فالز و سپس بر روی شبکه بانکوک اعمال گردید [Luathep, Paramet, Sumalee, Agachai, Kurauchi and Fumitaka, 2011].

دالین و لوپینگ در مطالعه خود در سال ۲۰۱۲ به بررسی آسیب پذیری شبکه از طریق تغییرات زمان سفر کاربران جاده‌ای در نتیجه انسداد بخش‌های مختلف با در نظر داشتن ساختار شبکه و جریان ترافیک پرداخته‌اند. آنها در مطالعه خود برخی پیشنهادات مانند اضافه کردن یا بازسازی جاده‌ها و مدیریت نقاط بحرانی را ارایه نمودند [Dalin and Luping, 2012].

خادمی و همکاران در مطالعه خود در سال ۲۰۱۵، به بررسی چالش‌های تلاش برای توسعه تحلیل آسیب پذیری حمل و نقل در یک کشور در حال توسعه و به طور مشخص شهر تهران پرداخته و روشی برای ارزیابی مسیرهای تخلیه و نیز امداد رسانی پس از زلزله پیشنهاد نمودند [Khademi, Balaei, Shahri, Mirzaei, Sarrafi, Zahabiun, and Mohaymany, 2015].

کرمانشاه و دریبیل در مطالعه خود در سال ۲۰۱۶ به ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های حمل و نقل دو شهر لس‌آنجلس و سانفرانسیسکو با استفاده از تحلیل کیفی چندمعیاره پرداختند [Kermanshah and Derrible, 2016].

ژیانگ دونگ، چن و یانگ در مطالعه خود در سال ۲۰۱۸ با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی نسبت به تعیین کمینه و بیشینه آسیب پذیری یک شبکه حمل و نقل با استفاده از معیارهای ارزیابی عملکرد شبکه پرداختند [Xu, Chen and Yang, 2018].

کاشین و آساکورا در مطالعه خود در سال ۲۰۲۰ به بررسی و مقایسه چند روش پیشنهاد شده در مطالعات مختلف در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری اجزای مختلف شبکه‌های پیچیده از جمله شبکه‌های حمل و نقل پرداخته و نسبت به پیاده سازی آن در

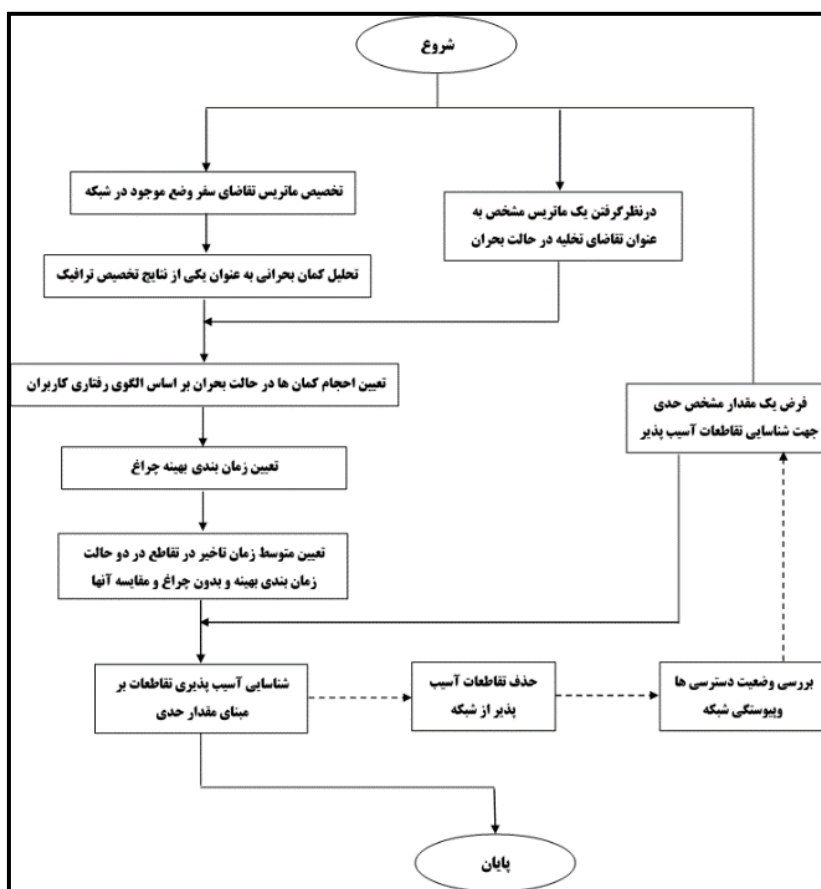
تحلیل آسیب پذیری تقاطعات در شبکه های بزرگ به هنگام وقوع بحران (مطالعه موردی: شهر تهران)

و عدم توانایی احتمالی در مدیریت شرایط، از مهمترین تهدیدات پیش روی شبکه هایی می باشد که ساختار و عملکرد آنها به شدت وابسته به وضعیت عملکردی تقاطعات می باشد. بر این اساس شبکه هایی که اختلال در عملکرد تقاطعات آن، کاهش قابل توجه عملکرد کلی شبکه را به همراه داشته باشد، به عنوان یک شبکه آسیب پذیر به هنگام وقوع بحران و تقاطعات با اختلال عملکردی بالا به عنوان نقاط آسیب آن در نظر گرفته می شود.

در این بخش از مطالعه، روشی به منظور شناسایی تقاطعات آسیب پذیر ارائه خواهد گردید که مبنا و اساس آن، مقایسه وضعیت تاخیر عبور از تقاطع در دو وضعیت (۱) بدون چراغ و هر نوع کنترل معادل با حداکثر آشفته گی در تقاطع در شرایط وقوع بحران (۲) چراغدار با زمان بندی بهینه به عنوان وضعیت معادل با کنترل تقاطع از سوی پلیس می باشد. در شکل (۱)، فرایند اجرایی روش پیشنهادی این مطالعه ارائه شده است.

اختلالات در اجزای شبکه را به راحتی و با افزایش اندک در زمان سفر کل سیستم جبران نماید.

از جمله نقاط با اهمیت در مدیریت کارآمد یک فرایند تخلیه اضطراری مناسب که نیازمند توجه ویژه ای است، تقاطعات موجود در شبکه می باشد. با توجه به آنکه به هنگام وقوع بحران زلزله، احتمال خرابی چراغ های راهنمایی و سایر تجهیزات کنترل ترافیک وجود خواهد داشت، این موضوع می تواند تداخلات شدید ترافیکی در محل تقاطعات را به همراه داشته باشد. بر این مساله، عدم توجه به چراغ از سوی کاربران حتی در صورت کارکرد مناسب آن را نیز می بایست اضافه نمود که از رفتارهای پرخطرانه و منفعت طلبانه احتمالی رانندگان به هنگام وقوع بحران نشأت می گیرد. از این رو استقرار نیروهای پلیس در تقاطعات با تداخل بالا به منظور مدیریت جریان ترافیک اجتناب ناپذیر می باشد. محدودیت های موجود در تعداد نیروها، عدم امکان دسترسی سریع نیروها به محل های از پیش تعیین شده



شکل ۱. فرایند شناسایی تقاطعات آسیب پذیر بر مبنای روش پیشنهادی تحقیق

d : متوسط زمان تاخیر برای عبور از تقاطع برای هر خیابان ورودی

V : حجم جریان ترافیک در خیابان ورودی برحسب وسیله نقلیه همسنگ سواری در ساعت

a : ضریب تاخیر در تقاطعات بدون چراغ

m : تعداد حرکت‌های مجاز در تقاطع (بجز دور زدن) در تقاطعات بدون چراغ

Q : ظرفیت عملی خیابان ورودی برحسب وسیله نقلیه همسنگ سواری در ساعت

c : چرخه چراغ

g : زمان سبز

β, α و n : پارامترهای مدل

می‌باشد.

در رابطه‌های فوق، c و g ، بر اساس زمانبندی طراحی شده چراغ در تقاطع و Q در هر تقاطع، وابسته به مشخصات فیزیکی بازوهای ورودی به آن باشد.

در این مطالعه با توجه به آنکه مبنای شناسایی تقاطعات بحرانی، مقایسه متوسط تاخیر وارد بر وسایل نقلیه عبوری در محل تقاطعات در دو حالت بدون چراغ و چراغدار بهینه می‌باشد، مقادیر c و g به منظور برآورد زمان تاخیر در تقاطعات، مقادیر بهینه آن بر اساس روش وبستر و با توجه به احجام ورودی در بازوهای مختلف آن و نیز مشخصات گردش‌ها در نظر گرفته می‌شود.

وبستر محقق مشهور انگلیسی، با استفاده از نتایج تجربی، رابطه‌ای برای تعیین زمان بهینه چرخه در تقاطع بر مبنای کمیته سازی تاخیرها به شرح رابطه (۴) ارائه نمود [Webster and Cobbe, 1958]:

$$C_{opt} = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_i Y_i} \quad (4)$$

که در آن

C_{opt} : زمان چرخه بهینه بر حسب ثانیه

در این مطالعه مقدار متوسط زمان تاخیر وسایل نقلیه در عبور از یک تقاطع مشخص از میانگین وزنی زمان تاخیر وسایل نقلیه در انتهای کمان‌ها و بر اساس احجام تردد آنها در محل ورود به تقاطع بدست می‌آید.

$$D = \frac{\sum_i d_i V_i}{\sum_i V_i} \quad (1)$$

که در آن:

D : متوسط زمان تاخیر وسایل نقلیه در عبور از یک تقاطع مشخص

d_i : تاخیر در انتهای کمان i ورودی به تقاطع (ثانیه)

V_i : حجم در انتهای کمان i ورودی به تقاطع (وسيله بر ساعت)
 زمان تاخیر یک تقاطع به عوامل متعددی از جمله چگونگی رفتار رانندگان و شرایط خاص منطقه‌ای، مشخصات فیزیکی تقاطع و خیابان‌های ورودی به آن، زمانبندی چراغ، حجم و ترکیب ترافیک در خیابان‌های ورودی به تقاطع و حجم گردش‌های تقاطع بستگی دارد. در خصوص عامل حجم ترافیک، در این مطالعه، فرض بر آن می‌باشد که تاخیر وارد بر وسیله نقلیه در محل ورودی به تقاطع در هر کمان، تنها به حجم ترافیک آن کمان وابسته بوده و رابطه‌ای که به منظور برآورد زمان تاخیر در انتهای هر کمان در محل ورود به تقاطع بر اساس مشخصات فیزیکی، زمانبندی و حجم ترافیک کمان مورد استفاده قرار می‌گیرد، تابع تاخیر نامیده می‌شود که شکل کلی آن در دو حالت چراغدار و بدون چراغ به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

• تابع تاخیر انتهای کمان در محل ورود به تقاطع بدون چراغ:

$$d = a \times m \times \left[\alpha + \beta \left(\frac{V}{Q} \right)^n \right] \quad (2)$$

• تابع تاخیر انتهای کمان در محل ورود به تقاطع چراغدار:

$$d = \frac{(c-g)^2}{2c(1-\frac{V}{Q})} + \beta \left(\frac{V}{(g/c)Q} \right)^n \quad (3)$$

که در آن:

تحلیل آسیب‌پذیری تقاطعات در شبکه‌های بزرگ به هنگام وقوع بحران (مطالعه موردی: شهر تهران)

مقصد عبوری در دو حالت موجود و بحران بر اساس ماتریس های تقاضای متناظر، حجم کمان در حالت تخلیه، برآورد و مبنای ارزیابی عملکرد شبکه قرار خواهد گرفت.

در این مطالعه الگوی مسیریابی تقاضای ساعتی روزمره پیش از بحران بر اساس مساله کلاسیک تخصیص تعادل کاربر و بر اساس رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Z = \text{Min} \sum_{od \in O} \sum_{d \in D} \int_0^{V_i} t_i(w). dw \quad (6)$$

$$V_i = \sum_{od \in O} \sum_{p \in Pod} \delta_{ip}^{od} f_p^{od} \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$\sum_{p \in Pod} f_p^{od} = Q^{od} \quad \forall od \in O \quad (8)$$

$$f_p^{od} \geq 0 \quad \forall od \in O \quad \forall p \in Pod \quad (9)$$

$$\delta_{ip}^{od} = 0 \text{ or } 1 \quad \forall od \in O \quad \forall p \in Pod \quad (10)$$

که در آن:

t_i : زمان سفر در کمان i

V_i : حجم ترافیک وضعیت موجود پیش از بحران در کمان i

δ_{ip}^{od} : در صورتی که یک مسیر p از مجموعه مسیرهای امکانپذیر زوج مبدا-مقصد od از کمان i بگذرد برابر ۱ و در غیر اینصورت، در نظر گرفته می‌شود

f_p^{od} : حجم ترافیک در مسیر امکانپذیر p بین زوج مبدا-مقصد od در وضعیت موجود پیش از بحران

Q^{od} : متوسط تقاضای ساعتی سفر بین زوج مبدا-مقصد od در وضعیت موجود پیش از بحران

Pod : مجموعه مسیرهای ممکن میان زوج مبدا-مقصد od در وضعیت موجود پیش از بحران

N : مجموعه کمان‌های جهت‌دار شبکه پیش از وقوع بحران و هرگونه انسداد

O : مجموعه مبادی سفر پیش از بحران

Y_i : جریان بحرانی فاز i

L : مجموع زمان تلف شده تقاطع می‌باشد.

پس از انتخاب طول سیکل، برای بدست آوردن زمان سبز موثر فاز i باید مجموع زمان سبز موثر هر سیکل که از کسر نمودن مجموع زمان‌های تلف شده از طول دوره چرخه بدست می‌آید، را در نسبت $\frac{Y_i}{\sum_j Y_j}$ ضرب نموده و با افزودن زمان تلف شده، طول زمان سبز هر فاز را بدست آورد. Y_i برابر با جریان بحرانی فاز i می‌باشد که برابر با مقدار بیشینه شاخص زیر در هر فاز می‌باشد.

$$Y_i = \max\left\{\frac{v_{ji}}{S_{ji}}\right\} \quad (5)$$

که در آن:

V_{ji} : حجم در حرکت j فاز i

Q_{ji} : جریان اشباع در حرکت j فاز i

می‌باشد [Chang and Li, 2014].

همان‌طور که از فرایند ذکر شده برمی‌آید مهمترین متغیر در ارزیابی عملکرد تقاطعات بر اساس روش پیشنهادی این تحقیق، احجام ترافیک ورودی به تقاطع در هر کمان می‌باشد.

در این مطالعه به منظور تعیین احجام رسیده به تقاطعات به هنگام وقوع بحران، مبنای عمل بر این فرض استوار خواهد بود که افراد به هنگام تخلیه، مسیرهای خود را بر اساس پیش زمینه ذهنی خود از وضعیت تردد در شبکه پیش از وقوع بحران و با توجه به الگوی مسیریابی روزمره آن تعیین می‌نمایند. به عبارت دیگر فرض می‌گردد افراد به هنگام وقوع بحران و به منظور سفر میان یک زوج مبدا-مقصد مشخص، همچنان از الگوی مسیرهای مورد استفاده میان آن زوج مبدا-مقصد در وضع موجود استفاده نموده و تقاضای ساعتی تخلیه به نسبت سهم هر مسیر در وضع موجود، میان مسیرهای مذکور تقسیم می‌شود. بدین ترتیب با شناسایی زوج مبادی-مقاصد عبوری از یک کمان مشخص و سهم هر یک از آنها از احجام عبوری از آن کمان در وضعیت موجود و با در اختیار داشتن تقاضای سفر میان زوج مبادی-

D : مجموعه مقاصد سفر پیش از وقوع بحران

می‌باشد.

با توضیحات ذکر شده احجام تردد در کمان‌های شبکه در نتیجه تخصیص تقاضای تخلیه بر مبنای الگوی شرح داده شده را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$v_k = \sum_{OD} \sum_{p \in P^{OD}} \frac{\delta_{kp}^{OD} f_p^{OD} \cdot q^{OD}}{Q^{OD}} \quad (11)$$

که در آن:

v_k : حجم کمان در نتیجه تخصیص تقاضای تخلیه مطابق با الگوی شرح داده شده

q^{od} : متوسط تقاضای تخلیه بین زوج مبدأ-مقصد od در وضعیت موجود پیش از بحران می‌باشد.

بدین ترتیب با فرایند ذکر شده در فوق، می‌توان متوسط زمان تاخیر در تقاطعات شبکه را در دو حالت بدون چراغ و چراغدار با زمانبندی بهینه بدست آورد که در صورتی که تفاوت متوسط تاخیر در دو حالت از یک مقدار مشخص بیشتر باشد، تقاطع مذکور به عنوان یک تقاطع بحرانی نیازمند اقدامات ویژه خواهد بود.

$$\frac{D_{Without-light} - D_{With-light}}{D_{With-light}} \geq D_L \quad (12)$$

که در آن:

$D_{Without-light}$: متوسط زمان تاخیر وسایل نقلیه در عبور از یک تقاطع مشخص در حالت بدون چراغ

$D_{With-light}$: متوسط زمان تاخیر وسایل نقلیه در عبور از یک تقاطع مشخص در حالت چراغدار با زمانبندی بهینه

D_L : مقدار حد آستانه شناسایی تقاطع آسیب‌پذیر

قابل ذکر است در این رابطه، D_L ، بیانگر میزان حساسیت در شناسایی تقاطعات آسیب‌پذیر به هنگام وقوع بحران بوده و بر

اساس منابع مالی در اختیار به منظور رفع آسیب‌پذیری تعیین می‌گردد. به گونه‌ای که مقادیر کمتر این پارامتر، به معنای حساسیت بالاتر در این زمینه و عدم پذیرش تعداد قابل توجهی از تقاطعات بوده و انجام اقدامات لازم به منظور رفع این آسیب‌ها، نیازمند صرف هزینه‌های قابل توجه خواهد بود. در این مطالعه، حداقل مقدار ممکن برای این شاخص با در نظر داشتن حفظ دسترسی به کلیه نقاط آسیب دیده در نتیجه حذف کلیه تقاطعات آسیب پذیر و کمان‌های منتهی به آنها از شبکه مورد توجه قرار می‌گیرد. این مقدار بر اساس یک فرایند مبتنی بر تکرار تعیین می‌گردد که

در هر تکرار، با فرض یک مقدار مشخص D_L ، نسبت به شناسایی تقاطعات آسیب‌پذیر اقدام شده و با توجه به احتمال عدم مدیریت جریان در آنها و تداخلات شدید منجر به انسداد، نسبت به حذف آنها از شبکه اقدام خواهد شد. از آنجایی که حذف این تقاطعات و کمان‌های منتهی به آنها ممکن است دسترسی برخی از نقاط آسیب‌دیده به مقاصد تخلیه را با محدودیت روبه‌رو نماید، لذا با بررسی وضعیت دسترسی نقاط آسیب‌دیده به مقاصد تخلیه، در صورت وجود حداقل یک مسیر دسترسی بین هر زوج مبدأ-مقصد در شبکه باقیمانده، نسبت به کاهش مقدار آن اقدام و در غیر اینصورت مقدار آن در تکرار بعد افزایش خواهد یافت.

۴. شناسایی تقاطعات آسیب‌پذیر در شبکه

معابر شهر تهران

در بخش قبل روشی به منظور شناسایی تقاطعات آسیب‌پذیر بر مبنای مقایسه متوسط تاخیر عبور وسایل نقلیه در محل تقاطعات بر اساس احجام موجود در دو حالت بدون چراغ و چراغدار بهینه ارایه گردید که گام‌های اجرایی آن را می‌توان به شرح زیر برشمرد:

گام ۱: تعیین الگوی مسیریابی وضع موجود بر اساس تخصیص متوسط تقاضای ساعتی روزانه

تحلیل آسیب‌پذیری تقاطعات در شبکه‌های بزرگ به هنگام وقوع بحران (مطالعه موردی: شهر تهران)

گام ۶: شناسایی کمان‌های آسیب‌پذیر بر مبنای مقدار مناسب آستانه حدی حاصل از مرحله قبل
در این بخش به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، نسبت به پیاده‌سازی آن در شبکه شهر تهران اقدام خواهد شد.
شبکه معابر شهر تهران، به طول ۳۶۷۹ کیلومتر مشتمل بر ۴۸۳ کیلومتر آزادراه و بزرگراه، ۳۱۵ کیلومتر راه شریانی درجه ۱، ۴۹۳ کیلومتر راه شریانی درجه ۲، ۱۹۹۴ کیلومتر راه جمع و پخش کننده و محلی و ۳۹۴ کیلومتر رمپ و لوپ می‌باشد. همچنین این شبکه دارای نزدیک به ۱۴۰۱ تقاطع می‌باشد که ۸۰۲ تقاطع آن به صورت زمان‌دار کنترل می‌شود. از ۸۰۲ تقاطع، تعداد ۳۷۸ تقاطع به صورت هوشمند و ۳۱۰ تقاطع نیز به صورت نیمه هوشمند و بقیه به صوت غیر هوشمند کنترل می‌شود [Chang and Li, 2014].

در شکل (۲)، نمایی کلی از شبکه معابر شهر تهران نشان داده شده است.

گام ۲: برآورد احجام در کمان‌های منتهی به تقاطعات بر اساس تقاضای تخلیه به هنگام وقوع بحران و الگوی مسیریابی وضع موجود

گام ۳: تعیین زمانبندی بهینه برای هر یک از تقاطعات بر مبنای احجام ورودی

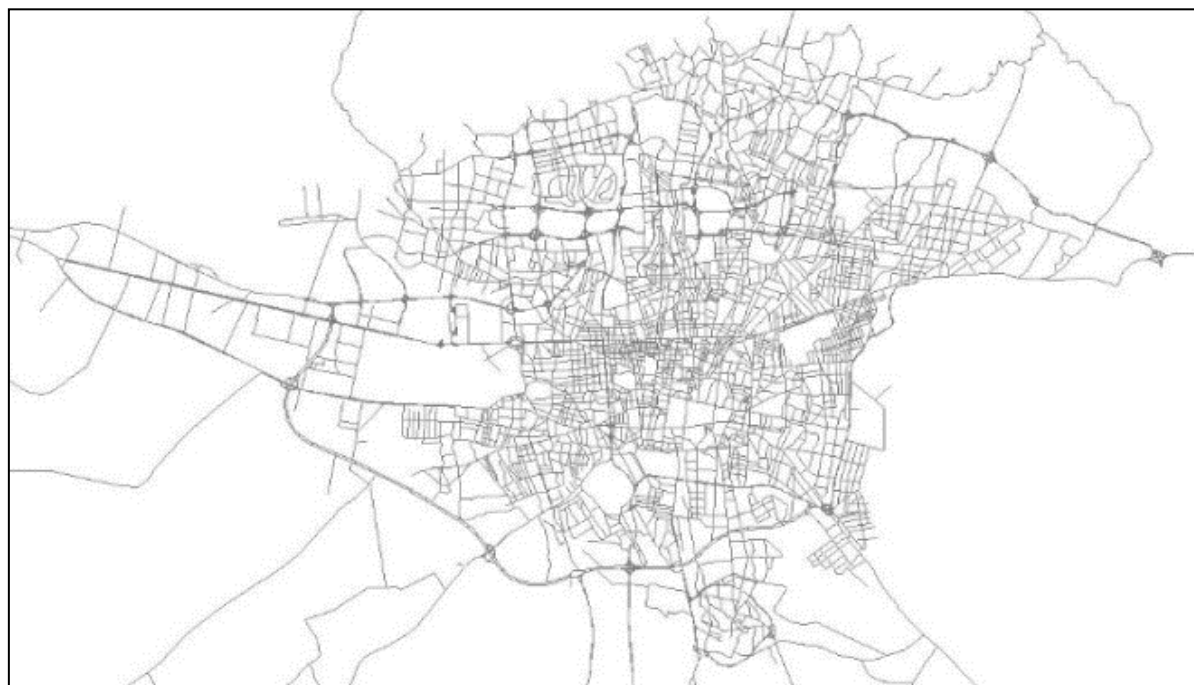
گام ۴: برآورد متوسط وزنی زمان تاخیر در تقاطع بر اساس احجام در بازوها در دو حالت بدون چراغ و چراغدار بهینه

گام ۵: تعیین یک مقدار مناسب برای آستانه حدی آسیب‌پذیری تقاطع

گام ۵-۱: تعیین یک مقدار مشخص برای آستانه حدی و حذف تقاطعات آسیب‌پذیر بر مبنای آن

گام ۵-۲: بررسی وجود حداقل یک مسیر دسترسی از هر مبدا به هر مقصد تخلیه در شبکه معابر باقیمانده به منظور پذیرش مقدار آستانه حدی

گام ۵-۳: اصلاح مقادیر تا دستیابی به کمترین مقدار آستانه های حدی قابل پذیرش



شکل ۲. شکل کلی شبکه معابر شهر تهران

می‌باشند. به گونه‌ای که در وضعیت موجود، سهم تاخیر در تقاطعات از کل زمان سفر کاربران این شبکه قابل توجه و برابر

بررسی وضعیت عملکردی شبکه معابر شهر تهران بیانگر آن است که تقاطعات آن از پتانسیل بالای آسیب‌پذیری برخوردار

EMME2 پیاده‌سازی شده است، استفاده خواهد گشت. این نرم‌افزار، ابزار مناسبی برای مدل‌سازی عرضه سیستم و تخصیص ترافیک در اختیار کاربران قرار داده و امکان دستیابی به اطلاعات شبکه، تقاضا و نتایج تخصیص ترافیک را به صورت انواع گزارش و تصویر فراهم می‌سازد که نمونه‌ای از خروجی‌های نرم افزار مذکور در خصوص وضعیت عملکردی بخش‌هایی از شبکه معابر شهر تهران در نتیجه تخصیص ماتریس ساعتی روزانه پیش از بحران در شکل (۳) ارایه شده است.

با ۷/۳ درصد می‌باشد که این موضوع با توجه به اختلالات احتمالی در مدیریت جریان ترافیک در آنها به هنگام وقوع بحران زلزله و نیز افزایش قابل توجه تقاضا می‌تواند به شکل قابل توجهی افزایش یابد. بر اساس روش پیشنهادی، تعیین الگوی مسیریابی وضع موجود بر اساس تخصیص متوسط تقاضای ساعتی روزانه، گام نخست مطالعات حاضر را تشکیل می‌دهد. در این مطالعه به منظور تعیین الگوی مسیریابی میان زوج مبادی-مقاصد مختلف در وضعیت پیش از بحران، از مدل حمل‌ونقل شهر تهران که در نرم‌افزار



شکل ۳. وضعیت عملکردی بخش‌هایی از شبکه بر اساس نتایج حاصل از تخصیص تقاضای ساعتی پیش از بحران

تقاضای تخلیه به تقاضای ساعتی روزانه متناظر با آن درایه، ماتریس مسیرهای عبوری تقاضای تخلیه برای آن کمان بدست می‌آید. بدیهی است مجموع درایه‌های این ماتریس به عنوان احجام عبوری از کمان در شرایط تخلیه ناشی از وقوع بحران خواهد بود.

قابل ذکر است در این مطالعه مبنای تشکیل ماتریس تقاضای تخلیه، میانگین تقاضای تخلیه برآورد شده ناشی از زلزله

یکی از مهمترین قابلیت‌های نرم‌افزار مذکور، امکان شناسایی سهم زوج مبادی- مقاصد مختلف از حجم عبوری از کمان‌های مختلف می‌باشد که تحت عنوان تحلیل کمان‌های بحرانی شناخته می‌شود. خروجی این تحلیل برای کمان مورد بررسی، به صورت یک ماتریس خواهد بود که هر درایه آن بیانگر مجموع حجم تردد کلیه مسیرهای گذرنده از آن کمان میان زوج مبادی-مقصد متناظر با آن درایه می‌باشد. در ادامه با ضرب درایه‌های ماتریس حاصل از تحلیل کمان بحرانی مربوط به هر کمان در نسبت

تحلیل آسیب‌پذیری تقاطعات در شبکه‌های بزرگ به هنگام وقوع بحران (مطالعه موردی: شهر تهران)

اساس آن نسبت به اصلاح توابع تاخیر در تقاطعات چراغدار اقدام خواهد شد.

نکته مهم دیگر در اجرای روش پیشنهادی این تحقیق، استفاده از توابع کالیبره شده زمان تاخیر عبور از تقاطع در شبکه معابر تهران می‌باشد که مطابق با روابط ذیل می‌باشد [Chang and Li, 2014].

$$d = a \times m \times \left[2/5 + 2 \left(\frac{V}{Q} \right)^2 \right] \quad (13)$$

$$d = \frac{(c-g)^2}{2c(1-\frac{v}{s})} + 32 \left(\frac{V}{(g/c)s} \right)^2 \quad (14)$$

بدین ترتیب با فرایند ذکر شده، امکان برآورد و مقایسه وضعیت تاخیر در تقاطعات در دو حالت بدون چراغ و چراغدار با زمانبندی بهینه فراهم خواهد گشت.

در جدول (۱)، سهم تاخیر در تقاطعات از کل زمان سفر در شبکه بر اساس تخصیص تقاضای بحران بر اساس روش ذکر شده، ارائه شده است.

جدول ۱. سهم تاخیر در تقاطعات از کل زمان سفر در شبکه بر

اساس تخصیص تقاضای بحران بر مبنای مطالعات جایکا

وضعیت تقاطعات	تقاطع‌ها در وضع موجود از نظر کنترل	کلیه تقاطعات بدون چراغ	کلیه تقاطعات چراغدار با زمانبندی بهینه
سهم تاخیرات	۱۰/۱	۱۳/۸	۸/۸

همان‌طور که از نتایج جدول فوق برمی‌آید، مدیریت جریان در تقاطعات به صورت بهینه، کاهش قابل توجه سهم تاخیرات تقاطعات در زمان سفر کل شبکه را در مقایسه با وضعیت موجود تقاطعات به همراه خواهد داشت. این در حالی است که عدم مداخله و اعمال هرگونه مدیریت در این خصوص، با توجه به احتمال آسیب و خرابی تجهیزات کنترل ترافیک و نیز رفتارهای احتمالی شهروندان در عدم توجه به دستورات چراغ، به کاهش روانی جریان و توقف‌های طولانی مدت در محل تقاطعات منجر خواهد گشت. با این حال با توجه محدودیت منابع، امکان

گسل‌های اصلی تهران بر مبنای مطالعات جایکا خواهد بود [Chang and Li, 2014].

با توجه به آنکه مبنا و اساس روش پیشنهادی، تعیین احجام در کمان‌های منتهی به تقاطعات می‌باشد، لذا انجام تحلیل کمان‌های بحرانی و انجام عملیات ماتریسی مربوطه برای کلیه کمان‌های منتهی به تقاطعات لازم و ضروری می‌باشد که با توجه به زمانبر بودن انجام این فرایند به صورت دستی برای هر یک از کمان‌های منتهی به تقاطعات، نسبت به تهیه یک ماکرو در نرم‌افزار EMME2 و اجرای غیر دستی فرایند اقدام خواهد گشت.

بدین ترتیب با تعیین احجام تردد در کمان‌های ورودی به هر تقاطع و با استفاده رابطه زمان تاخیر در انتهای هر کمان در دو حالت تقاطع بدون چراغ و چراغدار و نیز میانگین‌گیری وزنی آن بر اساس احجام، می‌توان متوسط زمان تاخیر در هر تقاطع را با استفاده از قابلیت عملیات ریاضی در نرم‌افزار EMME2 بدست آورد. اما از آنجایی که بر اساس روش پیشنهادی این تحقیق، برآورد متوسط زمان تاخیر در یک تقاطع در حالت چراغدار می‌بایست بر اساس زمانبندی بهینه آن صورت پذیرد، لذا تعیین زمانبندی بهینه بر اساس احجام ورودی به هر تقاطع و استفاده از پارامترهای زمانبندی شامل طول سیکل (C) و زمان سبز فازهای متناظر با هر کمان (g)، گام بعدی مطالعات حاضر را تشکیل می‌دهد.

بر این اساس اطلاعات فیزیکی خیابان‌های منتهی به تقاطعات از پایگاه اطلاعاتی شبکه خیابانی بدست آمده و با توجه به احجام برآورد شده در بازوهای مختلف هر تقاطع، نسبت تعیین زمانبندی بهینه بر اساس، روش وبستر اقدام خواهد گردید. قابل ذکر است که به منظور تسریع در اجرای فرایند تعیین پارامترهای چراغ در طرح بهینه زمانبندی، از نرم‌افزار Synchro در این خصوص استفاده خواهد شد.

نتایج این روش به صورت یک بردار پیکربندی جدید مشتمل بر طول سیکل و زمان‌های سبز در بازوهای مختلف می‌باشد که به صورت یک فایل متنی در نرم‌افزار EMME2 وارد شده و بر

مدیریت جریان در کلیه تقاطعات شبکه فراهم نبوده و لذا ضروبیست نسبت به شناسایی تقاطعات آسیب‌پذیر و مدیریت جریان در آنها اقدام شود.

از سوی دیگر همان‌طور که ذکر گردید تغییراتی بیش از حد قابل پذیرش، بیانگر آسیب‌پذیری تقاطع در شرایط وقوع بحران خواهد بود. در این مطالعه، مقدار مطلوب این حد آستانه‌ای، حداقل مقدار ممکن برای آن در نظر گرفته می‌شود به گونه‌ای که با حذف کلیه تقاطعات آسیب‌پذیر بر مبنای این مقدار حدی، امکان دسترسی کلیه نقاط آسیب‌پذیر به مقاصد تخلیه به عنوان یک شرط لازم جهت کارآمدی تخلیه و امدادسانی، همچنان وجود داشته باشد. بر اساس روش پیشنهادی این تحقیق، تعیین این مقدار حداقلی بر اساس یک فرایند تکراری صورت می‌پذیرد که در هر تکرار مبتنی بر یک مقدار مشخص حد آستانه‌ای، بررسی وجود دسترسی میان هر نقطه آسیب‌دیده به هر مقصد تخلیه لازم و ضروری می‌باشد. از این‌رو در هر تکرار، نسبت به

حذف تقاطعات آسیب‌پذیر و اصلاح شبکه در نرم‌افزار EMME2 اقدام شده و با استفاده از قابلیت‌های این نرم‌افزار در ایجاد ماتریس کوتاهترین زمان سفر آزاد از مبدا نقاط آسیب‌دیده به مقاصد تخلیه، وضعیت دسترسی‌ها در حالت جدید شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. امکان تشکیل این ماتریس، به معنای وجود حداقل یک مسیر میان هر زوج مبدا-مقصد بوده و عدم امکان آن بیانگر آن است که حداقل یک زوج مبدا-مقصدی در شبکه وجود دارد که تشکیل مسیر پیوسته میان آنها امکانپذیر نخواهد بود.

در جدول (۲) امکان‌پذیری ساخت ماتریس کوتاهترین زمان سفر آزاد از نقاط آسیب‌دیده به مقاصد تخلیه به عنوان یک شاخص دسترسی به ازای مقادیر مختلف حد قابل پذیرش تغییرات تاخیر در تقاطعات در دو حالت بدون چراغ و چراغدار با زمانبندی بهینه ارایه شده است.

جدول ۲. امکان‌پذیری ساخت ماتریس کوتاهترین زمان سفر آزاد به ازای مقادیر مختلف حد تغییرات قابل پذیرش تاخیر در تقاطعات

مقدار شاخص حدی	درصد تقاطعات آسیب‌پذیر	امکان‌پذیری ساخت ماتریس دسترسی	مقدار شاخص حدی	درصد تقاطعات آسیب‌پذیر	امکان‌پذیری ساخت ماتریس دسترسی
۰/۰۵	۷۲/۴	-	۰/۳	۳۴/۵	-
۰/۱	۶۴/۵	-	۰/۳۵	۲۸/۳	-
۰/۱۵	۵۸/۱	-	۰/۴	۲۱/۱	-
۰/۲	۵۰/۶	-	۰/۴۵	۱۴/۶	-
۰/۲۵	۴۲/۳	-	۰/۴۶	۱۲/۷	√

همان‌طور که از نتایج جدول فوق برمی‌آید، کمترین مقدار در نظر گرفته شده به عنوان حد تغییرات قابل پذیرش تاخیر در تقاطعات که امکان ساخت ماتریس دسترسی از کلیه نقاط آسیب‌دیده به کلیه مقاصد تخلیه بر بستر شبکه تغییر یافته بر اساس آن وجود خواهد داشت، برابر با ۰/۴۶ می‌باشد که بر اساس توضیحات ذکر شده به عنوان مقدار مطلوب حد آستانه‌ای قابل پذیرش در نظر گرفته می‌شود.

با تعیین این مقدار و پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر مبنای آن، تعداد تقاطعات آسیب‌پذیر شبکه برابر با ۳۰۴ تقاطع به صورت

شکل ۶ بدست می‌آید که معادل با ۱۲/۷ درصد تقاطعات شبکه بوده و نیازمند اقداماتی پر ریسک از نظر اثربخشی نظیر کنترل جریان توسط نیروهای انتظامی می‌باشد. در صورتی که عملکرد تقاطعات در کنترل و مدیریت جریان توسط نیروهای انتظامی معادل با عملکرد یک چراغ با زمانبندی بهینه در نظر گرفته شود، سهم تاخیر در تقاطعات از کل زمان سفر در شبکه در حالت مدیریت جریان تنها در تقاطعات آسیب‌پذیر، برابر با ۴/۲ درصد و در حالت مدیریت جریان در کل تقاطعات برابر با ۸/۸ درصد خواهد بود.

تحلیل آسیب‌پذیری تقاطعات در شبکه‌های بزرگ به هنگام وقوع بحران (مطالعه موردی: شهر تهران)

در جدول (۳)، درصد تقاطعات آسیب‌پذیر در شبکه به تفکیک بالاترین رده عملکردی معابر منتهی به تقاطعات ارایه شده است. توزیع مکانی تقاطعات آسیب‌پذیر به تفکیک رده عملکردی معابر در برگیرنده تقاطع نیز در جدول (۴) ارایه شده است.

اما آنچه که می‌بایست در هر مطالعه آسیب‌شناسی مورد توجه قرار گیرد، شناخت دلایل شکل‌گیری این آسیب‌ها به منظور انجام اقدامات اثر بخش با قابلیت اطمینان بالا می‌باشد. بدین منظور توجه به توزیع مکانی و رده عملکردی معابر منتهی به آن می‌تواند بسیار موثر و کمک‌کننده باشد.

جدول ۳. وضعیت تقاطعات در شبکه مورد مطالعه به تفکیک بالاترین رده عملکردی معابر منتهی به تقاطعات

رده عملکردی	بزرگراه	شریانی درجه ۱	شریانی درجه ۲	جمع و پخش کننده	مجموع
طول معبر	۴۸۳	۳۱۵	۴۹۳	۱۹۹۴	۳۶۷۹
تعداد تقاطعات	۵۷	۵۰۷	۸۵۳	۹۸۴	۲۴۰۱
تعداد تقاطعات آسیب‌پذیر	۳۸	۸۶	۱۰۱	۷۹	۳۰۴
درصد تقاطعات آسیب‌پذیر	۱۲/۵	۲۸/۳	۳۳/۲	۲۶/۰	۱۰۰

جدول ۴. توزیع مکانی تقاطعات آسیب‌پذیر به تفکیک رده عملکردی معابر در برگیرنده تقاطع

رده عملکردی	بزرگراه	شریانی درجه ۱	شریانی درجه ۲	جمع و پخش کننده
تعداد تقاطعات آسیب‌پذیر	۳۸	۱۱۸	۱۷۵	۱۸۵
طول معابر	۴۸۳	۳۱۵	۴۹۳	۱۹۹۴
تراکم در هر ۵ کیلومتر	۰/۴	۱/۹	۱/۸	۰/۵

گونه‌ای که به طور متوسط در هر ۳ کیلومتر از طول این معابر می‌توان یک تقاطع آسیب‌پذیر مشاهده نمود. با توجه به امکان انباشت حداکثر ۷۵۰ وسیله در یک معبر با دو خط عبور و به طول سه کیلومتر و مقایسه آن با حجم عبور از معابر به هنگام وقوع بحران، تاثیر متقابل این تقاطعات بر یکدیگر و تشدید اختلالات شبکه در صورت عدم هرگونه مداخله، اجتناب ناپذیر می‌باشد. این مساله که بیانگر قابلیت اطمینان پایین زمان سفر در این نوع از معابر و در کل شبکه می‌باشد را می‌توان ناشی از ساختار نامناسب شبکه معابر در تفکیک وظایف معابر به ویژه تامین دسترسی‌ها برشمرد که در آن نقش دسترسی در معابر با رده عملکردی شریانی بسیار پررنگ و قابل مقایسه با نقش جابجایی در آنها می‌باشد. از این رو انجام اصلاحاتی در خصوص ساختار شبکه و نیز مدیریت جریان ترافیک در وضعیت موجود به منظور تغییر الگوی ذهنی مسیریابی شهروندان با هدف تاثیرگذاری بر الگوی تردد به هنگام وقوع بحران لازم و ضروری می‌باشد. این مساله به ویژه با توجه به تمرکز تقاطعات مذکور در

بر اساس نتایج حاصل، بالاترین رده عملکردی ۳۳/۲ درصد از تقاطعات آسیب‌پذیر، شریانی درجه ۲ و ۲۸/۳ درصد شریانی درجه ۱ می‌باشد که این موضوع به خوبی بیانگر آنست که بخش عمده‌ای از معابر با رده عملکردی بالاتر که می‌بایست تامین کننده نقش جابجایی و در نتیجه روانی حرکت باشند، درگیر تقاطعات آسیب‌پذیر بوده و لذا روانی تردد در آنها با اختلالات جدی روبرو می‌باشد. از سوی دیگر بررسی توزیع مکانی تقاطعات آسیب‌پذیر به تفکیک رده‌های عملکردی معابر منتهی به آنها بیانگر آنست که تقاطعات آسیب‌پذیر به ترتیب در معابر بارده عملکردی با جمع و پخش کننده، شریانی درجه ۲، شریانی درجه ۱ و بزرگراه واقع می‌باشند که با توجه به افزایش نقش دسترسی معبر با کاهش رده عملکردی آن و در نتیجه تعداد تقاطعات موجود در آنها چندان دور از ذهن نخواهد بود. اما آنچه در این میان دارای اهمیت می‌باشد، تراکم تقاطعات آسیب‌پذیر می‌باشد. بر اساس بررسی‌ها، معابر با رده عملکردی شریانی، دارای بیشترین تقاطعات آسیب‌پذیر در واحد طول معابر می‌باشد به

عملکردی شریانی، دارای بیشترین تقاطعات آسیب‌پذیر در واحد طول معابر می‌باشد که این موضوع بیانگر قابلیت اطمینان پایین زمان سفر در آنها و در کل شبکه می‌باشد. این مساله را می‌توان ناشی از ساختار نامناسب شبکه معابر در تفکیک وظایف معابر به ویژه تامین دسترسی‌ها پرشمرد که در آن نقش دسترسی در معابر با رده عملکردی شریانی بسیار پررنگ و قابل مقایسه با نقش جابجایی در آنها می‌باشد. این مساله به ویژه با توجه به تمرکز تقاطعات مذکور در محدوده مرکزی شهر و شکل شطرنجی شبکه در آنها بسیار قابل توجه نموده و دارای اثرات منفی بیشتری بر وضعیت عملکردی شبکه و روانی حرکت در آنها خواهد بود. از این رو انجام اصلاحاتی در خصوص ساختار شبکه و نیز مدیریت جریان ترافیک در وضعیت موجود به منظور تغییر الگوی ذهنی مسیریابی شهروندان با هدف تاثیرگذاری بر الگوی تردد به هنگام وقوع بحران لازم و ضروری می‌باشد.

در این مطالعه الگوی مسیریابی شهروندان به هنگام تخلیه مطابق با الگوی رفتار مسیریابی در شبکه در وضعیت پیش از بحران در نظر گرفته شده است که مطالعه الگوهای احتمالی مسیریابی در شرایط وقوع بحران به منظور ارتقای مطالعه حاضر پیشنهاد می‌شود.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. Kolmogorov-Smirnov test
2. Friedman test
3. Factor analysis
4. Exploratory factor analysis
5. Kaiser-Mayer-Olkin
6. Bartlett's test of sphericity
7. Multiple linear regression
8. Forward selection
9. Backward elimination
10. Goodness of fit
11. Pearson

۷. منابع

- منتظرالقائم. س، شریفی. خ، الیاسی. ح، عبدالجلال. س و ایرانپور. ن، (۱۳۹۶)، "شبکه راه‌ها و برنامه‌ریزی حمل و نقل فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال شانزدهم / شماره سوم (۶۴) / بهار ۱۴۰۴

محدوده مرکزی شهر و شکل شطرنجی شبکه در آنها بسیار قابل توجه نموده و دارای اثرات منفی بیشتری بر وضعیت عملکردی شبکه و روانی حرکت در آنها خواهد بود. به گونه ای که در نتیجه عدم مدیریت مناسب جریان در تقاطعات آسیب‌پذیر این محدوده به هنگام وقوع بحران، سهم تاخیر در تقاطعات این محدوده از کل زمان سفر در آن در حدود ۱۴/۹ درصد خواهد بود که به شکل قابل توجهی بیشتر از مقدار نظیر آن در محدود خارج از آن یعنی ۱۳/۱ درصد و نیز میانگین کل شبکه یعنی ۱۳/۸ خواهد بود.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به احتمال انسداد جریان ترافیک در محل تقاطعات در نتیجه خرابی تجهیزات کنترلی و تداخل جریان در آنها و نیز وقوع تصادفات در نتیجه بروز رفتارهای پرخطر رانندگان و عدم رعایت حق تقدم، تقاطعات از جمله آسیب‌پذیرترین اجزای شبکه به هنگام وقوع بحران می‌باشند. در این مطالعه روشی به منظور شناسایی تقاطعات آسیب‌پذیر ارایه گردید که مبنا و اساس آن مقایسه وضعیت تاخیر عبور از تقاطع در دو وضعیت بدون چراغ معادل با عدم وجود هر نوع کنترل و چراغدار با زمانبندی بهینه به عنوان وضعیت معادل با کنترل تقاطع توسط نیروهای انتظامی می‌باشد. در ادامه به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، نسبت به پیاده‌سازی آن در شبکه شهر تهران بر مبنای مقدار ۴۶ درصد به عنوان حد تغییرات قابل پذیرش تاخیر در تقاطعات اقدام گردید. این مقدار، حداقل مقدار ممکن برای این حد آستانه‌ای با شرط امکان ساخت ماتریس کوتاه‌ترین زمان سفر آزاد از مبدا کلیه نقاط آسیب‌دیده به کلیه مقاصد تخلیه در شبکه تغییر یافته ناشی از حذف کلیه تقاطعات آسیب‌پذیر می‌باشد.

بر اساس برآورد تاخیر در تقاطعات در دو وضعیت بدون چراغ و چراغدار با زمانبندی بهینه و مقایسه آن با حد قابل قبول در نمونه مطالعاتی تحقیق، ۱۲/۷ درصد از تقاطعات شبکه به عنوان تقاطعات آسیب‌پذیر شناخته می‌شوند. از سوی دیگر بررسی توزیع مکانی تقاطعات آسیب‌پذیر بیانگر آن است که معابر با رده

- Koshiba, Y. and Suzuki, Y. (2018) "Factors affecting post-evacuation behaviors following an earthquake: A questionnaire-based survey", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 31, pp. 548-554.
- Mishra, S, Tang, L, Ghader, S, Mahapatra, S. and Zhang, L. (2018), "Estimation and valuation of travel time reliability for transportation planning applications", *Case Studies on Transport Policy*, vol. 6, no. 1, pp. 51–62.
- Chang S. C. and Li, L. X., (2014), "Reliability analysis of highway and transportation network with paths failure," in *Proceedings of the IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications*, Ottawa, Canada.
- Taylor M. A. P, Sekhar S. V. C, D'Este G. M. (2006), "Application of accessibility-based methods for vulnerability analysis of strategic road networks", *Networks and Spatial Economics*, Vol 6, pp. 267–291.
- Taylor M. A. P, D'Este G. M., (2008), "Transport network vulnerability: a method for diagnosis of critical locations in transport infrastructure systems", Murray A.T., Grubestic T.H. (eds.) *Critical Infrastructure: Advance in Spatial Science*. Springer, Heidelberg, pp. 9–30.
- Bono.F, Gutiérrez, E., (2011), "A network-based analysis of the impact of structural damage on urban accessibility following a disaster: the case of the seismically damaged Port AuPrince and Carrefour urban road networks", *Journal of Transport Geography*, Vol.19, No.3, PP.1443-1455.
- Luathep, Paramet, Sumalee, Agachai, Ho, Kurauchi and Fumitaka, (2011), "Large-scale Road network vulnerability analysis: A
- اضطراری شهر تهران"، تهران، سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران، معاونت آموزش و مشارکت‌های مردمی.
- The study of delay time function at intersections, comprehensive studies of transportation and traffic in Tehran, report no.118, Transportation and Traffic Comprehensive Studies Company of Tehran, 1375 (in Persian).
- The study of delay time function at intersections, comprehensive studies of transportation and traffic in Tehran, report no.118, Transportation and Traffic Comprehensive Studies Company of Tehran, 1375 (in Persian).
- Updating the database of transportation supply in Tehran, comprehensive studies of transportation and traffic in Tehran, report no.315, Transportation and Traffic Comprehensive Studies Company of Tehran, 1389 (in Persian).
- The final structure of Tehran city transportation model in EMME/2 software environment, comprehensive studies of transportation and traffic in Tehran, report no.217, Transportation and Traffic Comprehensive Studies Company of Tehran, 1375 (in Persian).
- Japan International Cooperation Agency (JICA), (2006), "The Comprehensive Master Plan Study on Urban Seismic Disaster Prevention and Management for the Greater Tehran Area in IRAN", Final Report.
- Fmbro, D.B & Roupail, N.M. (1997) "Generalized Delay Model for Signalized Intersections and Arrival Streets." *Transportation Research Record* 1572, 112-121.

extreme earthquakes”, Reliability Engineering & System Safety, Volume 153, Pages 39-49.

– Xiangdong Xu, Anthony Chen, Chao Yang, (2018),” An optimization approach for deriving upper and lower bounds of transportation network vulnerability under simultaneous disruptions of multiple links”, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 94, Pages 338-353.

– Kashin Sugishita, Yasuo Asakura, (2020),” Citation network analysis of vulnerability studies in the fields of transportation and complex networks”, Transportation Research Procedia, Volume 47, Pages 369-376.

– Tsukaguchi, H. & Li, Y. (1999), District and local distributor network to ensure disaster-resilient urban planning, Shanghai International Symposium on Urban Transportation Proceedings.

sensitivity analysis-based approach”, Transportation, Vol 38, pp 799-817.

– Dalin Q and Luping Y., (2012), "Vulnerability Analysis of Road Networks", Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, Vol. 12, No. 1, pp.23-41.

– Nagae Y., Fujihara T. and Asakura Y, (2012), "Antiseismic reinforcement strategy for an urban road network", Transportation Research Part A, Vol. 46, No.2, PP.813- 827.

– Li, L., Jia, L., Wang, Y. and Li, J. (2015) “Reliability evaluation for complex system based on connectivity reliability of network model,” in Proceedings of the International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (S), Barcelona, Spain.

– Webster, F. V. and Cobbe, B. M. (1958). “Traffic signals.” Road Research Technical Paper No. 39, Her Majesty’s Stationery Office, London.

– Yu Gu, Xiao Fu, Zhiyuan Liu, Xiangdong Xu, Anthony Chen, (2020) “Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience”, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 133.

– Navid Khademi, Behrooz Balaei, Matin Shahri, Mojgan Mirzaei, Behrang Sarrafi, Moeid Zahabiun, Afshin S. Mohaymany, (2015),” Transportation network vulnerability analysis for the case of a catastrophic earthquake”, International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 12, Pages 234-254.

– Kermanshah, S. Derrible, (2016),” A geographical and multi-criteria vulnerability assessment of transportation networks against

تحلیل آسیب‌پذیری تقاطعات در شبکه‌های بزرگ به هنگام وقوع بحران (مطالعه موردی: شهر تهران)

زینب عبادی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه زنجان اخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۸۴ موفق به کسب درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- برنامه ریزی حمل و نقل از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، ایمنی جاده ای، مدیریت بحران، مدیریت تقاضای سفر و تصادفات است.



شهریار افندی‌زاده، دارای درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران، و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران و دارای مدرک دکترای تخصصی از دانشگاه کارلتون (کانادا) در رشته مهندسی عمران در گرایش حمل و نقل می‌شود. در حال حاضر ایشان استاد تمام دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشد. زمینه‌های پژوهشی ایشان در برنامه ریزی حمل و نقل، مدلسازی، تحلیل و ارزیابی سیستم‌های حمل و نقل و مهندسی ترافیک می‌باشد.



علی نادران، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری را در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۲ از دانشگاه تهران و دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۸۹ موفق به کسب درجه دکتری مهندسی راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان برنامه‌ریزی و مدل‌سازی تقاضای حمل و نقل، محیط زیست و حمل و نقل، مطالعات تصادفات تصادفات و ایمنی ترافیک است. ایشان در حال حاضر عضو هیأت علمی واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی است.

