

ارائه روشی برای شناسایی کمان‌های نامطمئن شبکه در هنگام وقوع بحران زلزله

(مطالعه موردی: شبکه شهر تهران)

بابک میربها (نویسنده مسئول)، دانشیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

E-mail: bmirbaha@gmail.com

محمود صفارزاده، استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمد پورتیموری، دانشجوی دکتری پژوهشگاه حمل و نقل طراحان پارسه، تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۳

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۵

چکیده

در این مطالعه به منظور شناسایی کمان‌های آسیب‌پذیر، عملکرد شبکه در نتیجه انسداد هر کمان با در نظر داشتن اثرات توامان عرضه و تقاضا و با فرض اطلاع رانندگان از وضعیت انسداد آن در حین سفر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بر این اساس با در نظر گرفتن یک الگوی مسیریابی مشخص از سوی کاربران، نسبت به ارزیابی عملکرد شبکه در حالت انسداد آن کمان اقدام شده و کمان‌هایی که حذف آنها، شبکه را با تغییرات غیر قابل قبول نسبت به شرایط عدم انسداد و محدودیت در دسترسی‌ها روبرو نماید، کمان‌های مطمئن در نظر گرفته می‌شود. در ادامه به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، نسبت به پیاده‌سازی آن در شبکه شهر تهران بر مبنای مقدار ۰.۳۵ درصد به عنوان حد قابل قبول تغییرات عملکرد شبکه اقدام گردید. این مقدار برابر با حداقل مقدار قابل قبول این تغییرات در حالت امکان‌پذیری ساخت یک شبکه درختی از کلیه نقاط شبکه به مقاصد تخلیه با استفاده از کمان‌های مطمئن حاصل می‌باشد. بر اساس ارزیابی عملکرد شبکه در نتیجه انسداد کمان‌ها در نرم افزار EMME2 و مقایسه آن با حد قابل قبول، ۱۷.۳ درصد از کمان‌های شبکه شهر تهران در نتیجه وقوع زلزله احتمالی، به عنوان کمان‌های غیر مطمئن در نظر گرفته می‌شود که بیشتر این کمان‌ها در معابر با رده عملکردی شریانی به ویژه در مناطق مرکزی شهر تهران مشاهده می‌گردد. از این رو حذف کمان‌های آسیب‌پذیر با رده عملکردی شریانی اگرچه قابلیت اطمینان شبکه تخلیه ساخته شده بر بستر کمان‌های باقی مانده را از حیث حفظ پیوستگی و زمان سفر افزایش می‌دهد اما با توجه به نقش و اهمیت این رده از معابر در عملکرد یکپارچه و کارایی شبکه و در نتیجه تامین ظرفیت مناسب، قابلیت تخلیه شبکه ساخته شده را دچار اختلال جدی خواهد نمود. این مساله توسعه بخش‌هایی از شبکه در قالب تعریض یا اضافه نمودن معابری به شبکه که در وضعیت موجود، نیاز چندانی به حضور آنها احساس نمی‌گردد، را به منظور تامین ظرفیت مورد نیاز شبکه تخلیه اجتناب ناپذیر می‌نماید بدیهی است در صورت عدم امکان تحقق چنین امری و یا پر هزینه بودن آن به ویژه در مناطق با بافت متراکم، می‌توان راهکارهایی نظیر مقاوم سازی هرچه بیشتر ساختمان‌ها و ... را به منظور کاهش تقاضای تخلیه در دستور کار قرار داد.

کلمات کلیدی: شبکه معابر، تخلیه، اطمینان پذیری، دسترسی، زلزله

۱. مقدمه

دسترسی شبکه در نتیجه انسداد هر یک از کمان‌ها و شناسایی کمان‌های غیر مطمئن بر مبنای آن می‌باشد [Mishra, Tang, Ghader, Mahapatra and Zhang, 2018].

در این مطالعه که به ارایه روشی برای شناسایی کمان‌های نامطمئن شبکه در هنگام وقوع بحران زلزله پرداخته خواهد شد، هدف، شناسایی کمان‌های آسیب‌پذیر جهت توزیع بهینه منابع و انجام مداخلات لازم جهت حفظ نیرومندی شبکه می‌باشد که مبنا و اساس آن، ارزیابی اثرات ناشی از عدم انجام مداخلات مورد نیاز جهت جلوگیری از انسداد هر یک از کمان‌های مورد بررسی می‌باشد. در این مطالعه به تخریب هر یک از اجزا به صورت منفرد و تاثیرات آن بر عملکرد شبکه پرداخته خواهد شد. بدیهی است اجزای آسیب‌پذیر دارای اثرات بیشتری بر اطمینان پذیری شبکه بوده و شناسایی و تقویت آنها بر اساس مطالعات شناسایی اجزای آسیب‌پذیر شبکه بر قابلیت اطمینان شبکه به هنگام وقوع بحران خواهد افزود.

بر این اساس، در ابتدا فرایند و چارچوبی به منظور پیش‌بینی عملکرد شبکه در نتیجه انسداد کمان‌های شبکه ارایه شده و کمان‌های با پتانسیل بالای آسیب‌رسانی عملکردی و دسترسی به شبکه به هنگام وقوع بحران مورد شناسایی قرار می‌گیرند. در ادامه روش پیشنهادی به منظور بررسی کارایی آن در شبکه معابر شهر تهران بکارگیری و نتایج حاصل از آن مورد تحلیل و ارزیابی قرار خواهد گرفت. بدیهی است نتایج حاصل از این روش را می‌توان به منظور حذف کمان‌های با آسیب‌پذیری بالا در طراحی شبکه تخلیه اضطراری با توجه به احتمال وقوع انسدادهای ناشی از رفتارهای کاربران در هر یک از کمان‌های شبکه مورد توجه قرار داد. ضمن آنکه نتایج حاصل از این روش می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مربوط به آمادگی پیش از وقوع بحران نظیر توسعه فیزیکی شبکه و یا مدیریت استقرار نیرو به منظور عملیات بازگشایی کمان‌ها با توجه به میزان اهمیت آنها مورد استفاده قرار گیرد.

یکی از مهمترین بحران‌های پیش روی بشر، زلزله می‌باشد که می‌تواند در مدت زمانی کوتاه، خسارات و تلفات بسیار گسترده‌ای بر جای بگذارد. امروزه با استفاده از برنامه‌های جامع مدیریت بحران می‌توان به میزان زیادی از شدت و گستردگی خسارات و تلفات زلزله کم نمود. از مهمترین اقداماتی که همواره مورد توجه سازمان‌های مسئول در مدیریت بحران قرار دارد، برنامه‌ریزی به منظور تخلیه جمعیت آسیب‌دیده به مراکز امن و یا به نواحی خارج از شهر می‌باشد. وقوع رخداد‌های پیش‌بینی نشده می‌تواند عملکرد شبکه و در نتیجه فرایند تخلیه را با اختلال جدی روبرو نماید. اگرچه در نگاه اول، آسیب‌پذیری شبکه معابر در نتیجه وقوع زلزله را می‌توان ناشی از آسیب وارد بر زیرساخت‌ها و تجمع آوار در بخش‌هایی از شبکه برشمرد اما در بسیاری از موارد، رفتارهای کاربران نیز می‌تواند انسداد و یا اختلال در عملکرد بخش‌های مختلف شبکه را به همراه داشته باشد. از آن جمله می‌توان به بروز تصادفات احتمالی در نتیجه شوک ایجاد شده و خودروهای رها شده در سطح خیابان‌ها در نتیجه آسیب‌های وارده بر آنها و نیز ناامیدی رانندگان از باز شدن مسیرها اشاره نمود [Koshiba and Suzuki, 2018]. بدیهی است میزان تاثیر انسداد هر کمان بر عملکرد شبکه متفاوت بوده و برخی از آنها بنا بر دلایلی ممکن است دارای اهمیت بیشتری باشند. به گونه‌ای که انسداد برخی از آنها ممکن است کاهش شدید عملکرد و ظرفیت شبکه را به همراه داشته باشد. در برخی دیگر نیز ممکن است موجب اختلال در دسترسی نقاط آسیب‌دیده و یا در معرض آسیب به مقاصد تخلیه گشته و شبکه‌ای که نتواند دسترسی لازم را در این شرایط فراهم کند، خسارت‌های جبران ناپذیری را به بار خواهد آورد [Taylor, Sekhar and D'Este, 2006]. بدین ترتیب با توضیحات ذکر شده، پیشنهاد برنامه‌ریزی به منظور یک تخلیه موثر، ایمن و قابل اطمینان، پیش‌بینی عملکرد و سطح

۲. مروری بر مطالعات پیشین

مطالعات مربوط به برنامه‌ریزی شبکه حمل‌ونقل در شرایط بعد از وقوع بحران زلزله از سال ۱۹۷۱ و پس از زلزله سان فرناندو مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مطالعات، اهداف متفاوتی مورد توجه می‌باشد که از آن جمله می‌توان به برنامه‌ریزی برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش استحکام شبکه، افزایش قابلیت اطمینان، افزایش قابلیت بازگشت پذیری، طراحی شبکه تخلیه و ... شبکه اشاره نمود. مبنای کلیه مسایل ذکر شده در این خصوص، ارزیابی عملکرد شبکه به هنگام وقوع زلزله می‌باشد. بررسی کلی مطالعات صورت گرفته در خصوص ارزیابی عملکرد شبکه در نتیجه وقوع بحران و شناسایی کمان‌های آسیب‌پذیر، بیانگر محدودیت روش‌های ارزیابی عملکرد شبکه به هنگام وقوع بحران زلزله می‌باشد که از پیچیدگی‌های محاسباتی و مدل‌سازی موجود در تحلیل آنها نشأت می‌پذیرد. این پیچیدگی را می‌توان ناشی از عدم قطعیت‌های موجود در نتیجه تنوع رفتاری کاربران در برخورد با موضوع تخلیه برشمرد که در نظر گرفتن فرضیاتی را به منظور ساده‌سازی فرایندهای تحلیلی اجتناب ناپذیر نموده و چنین ساده‌سازی‌هایی بعضاً به نتایج دور از واقعیت می‌انجامند.

از جمله مطالعات انجام شده در این خصوص می‌توان به مطالعه ایست، سخار و تیلور در سال ۲۰۰۶ اشاره نمود. در این مطالعه، آسیب‌پذیری بزرگراه‌های استرالیا در نتیجه تأثیرات اقتصادی-اجتماعی تخریب شبکه، مورد ارزیابی قرار گرفته و در آن روشی به منظور شناسایی مکان‌هایی از شبکه که وقوع انسدادهای آنها، تأثیرات جدی در تامین دسترسی‌ها و عملکرد کلی شبکه‌ها بر مبنای هزینه و مسافت خواهند داشت، ارائه 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 ارائه 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].

در مطالعه بونو و گوتیرز در سال ۲۰۱۱ با عنوان "تجزیه و تحلیل آسیب ساختاری شبکه بر دسترسی‌ها پس از وقوع بحران" با ارائه یک روش، وضعیت احتمالی دسترسی‌ها پس از آسیب زلزله مورد بررسی قرار گرفته و با ترکیب مفاهیم تئوری گراف و تجزیه و تحلیل فضایی مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی، کاهش دسترسی مناطق مختلف شهری با توجه به ساختمان‌های فروریخته و تجمع آوار به عنوان نتیجه اختلالات اصلی شبکه معابر برآورد گردیده است [Bono and Gutiérrez, 2011].

لیوتپ و همکارانش در مطالعه خود در سال ۲۰۱۱، روشی به منظور شناسایی کمان‌های بحرانی ارائه دادند که قابل استفاده در شبکه راه‌های بزرگ مقیاس می‌باشد. در این مطالعه، کمان‌های بحرانی مطابق با تفاوت در شاخص دسترسی هسنس بر مبنای زمان در دو حالت شبکه نرمال و تخریب شده، رتبه‌بندی گردیدند. در این مطالعه به منظور برآورد زمان سفر، از تخصیص تعادل استفاده کننده براساس مدل تصادفی پروبیت استفاده شده و روش پیشنهادی در ابتدا بر روی شبکه سایوکس فالز و سپس بر روی شبکه بانکوک اعمال گردید. تکنیک پیشنهاد شده در این مطالعه بر مبنای تحلیل حساسیت، کاهش بار محاسباتی را به همراه داشته و لذا نیاز به حافظه ذخیره‌سازی کمتری خواهد داشت [Luathep, Paramet, Sumalee, Agachai, Ho, Kurauchi and Fumitaka, 2011].

دالین و لویینگ در مطالعه خود در سال ۲۰۱۲ به بررسی آسیب‌پذیری شبکه از طریق تغییرات زمان سفر کاربران جاده‌ای در

هرگونه اقدام مورد نیاز جهت حفظ نیرومندی شبکه استفاده نمود [Xiangdong, 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 حمل‌ونقل پرداخته و نسبت به پیاده‌سازی آن در 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].

یو، چن و همکارانش معیار جدیدی برای ارزیابی عملکرد شبکه با عنوان قابلیت اطمینان ظرفیت شبکه ارائه کردند. این معیار برابر احتمال پاسخگو بودن ظرفیت شبکه برای تقاضای معین در سطح سرویس دلخواه است. در این مطالعه فرض شده است که ظرفیت کمان‌ها به دلایلی مانند حوادث ترافیکی متغیر بوده و به صورت یک متغیر تصادفی هستند. البته از آنجا که زمان سفر خود تابعی از ظرفیت و حجم عبوری از هر کمان است، ارزیابی عملکرد ظرفیتی شبکه خود به گونه‌ای با معیار قابلیت اطمینان زمان سفر مرتبط است. در این مطالعه سعی شده است با استفاده از مفهوم ظرفیت ذخیره، قابلیت اطمینان ظرفیت شبکه مورد بررسی قرار گیرد. [Yu G., Xiao F., Zhiyuan L., and Chen A, 2020].

زدنگ و همکاران نیز با استفاده از شبیه‌سازی، احتمال خرابی اجزای شبکه را در صورت وقوع زلزله برآورد کرده و با ارزیابی تغییرات جریان ترافیک، عملکرد شبکه را مورد بررسی قرار داده‌اند [Zdeng, 2020].

در جدول ۱، خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده و محدودیت موجود در آنها ارائه شده است.

نتیجه انسداد بخش‌های مختلف با در نظر داشتن ساختار شبکه، جریان ترافیک و مراکز استقرار گروه‌های بازگشایی مسیر پرداخته‌اند. آنها در مطالعه خود برخی پیشنهادات مانند اضافه کردن یا بازسازی جاده‌ها و مکانیابی دوباره مراکز استقرار گروه‌های بازگشایی مسیر را ارائه نمودند [Dalin and Luping, 2012].

ناگایی و همکاران در مطالعه خود سال ۲۰۱۲ روشی برای جلوگیری از آسیب‌پذیری شبکه حمل‌ونقل شهری ارائه نمودند. در این مطالعه از محاسبات مبتنی بر منطق فازی به منظور ارزیابی روش‌های تقویت ضد لرزه‌ای شبکه حمل‌ونقل استفاده شده و نتایج حاصل نشان دهنده آن است که استفاده از منطق فازی در مطالعات مربوط به تعیین آسیب‌پذیری شبکه حمل‌ونقل، از قابلیت و کارایی لازم در افزایش دقت و اعتبار نتایج برخوردار می‌باشد [Nagae, Fujihara and Asakura, 2012].

چانگ و لی در مطالعات خود در سال ۲۰۱۴ اقدام به تحلیل عملکرد شبکه بر مبنای معیارهایی نظیر قابلیت اطمینان زمان سفر، قابلیت اطمینان اتصال شبکه و قابلیت اطمینان ظرفیت نموده و بر اساس آن روشی جهت شناسایی کمان‌های بحرانی با ارزیابی نقش و تاثیر آنها در مختل نمودن مسیرهای موجود در شبکه ارائه نمودند [Chang and Li, 2014].

کرمانشاه و دریبیل در مطالعه خود در سال ۲۰۱۶ با شناسایی اجزای بحرانی شبکه، به ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های حمل‌ونقل در دو شهر لوس آنجلس و سانفرانسیسکو با استفاده از تحلیل کیفی چند معیاره پرداختند [Kermanshah and Derrible, 2016].

ژیانگ دونگ، چن و یانگ در مطالعه خود در سال ۲۰۱۸ یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی به منظور تعیین کمینه و بیشینه آسیب‌پذیری یک شبکه حمل‌ونقل با استفاده از معیارهای ارزیابی عملکرد شبکه ارائه نمودند که از نتایج آن می‌توان به منظور شناسایی و اولویت بندی کمان‌های بحرانی جهت انجام

جدول ۱. مطالعات انجام شده و محدودیتهای موجود در آنها

ردیف	محققین	سال	محدودیت مطالعه
۱	ایست، سخار و تیلور	۲۰۰۶	ارزیابی عملکرد شبکه بدون توجه به تقاضا و بر اساس توپولوژی و ساختار شبکه انجام شده است
۲	تیلور و ایست	۲۰۰۸	ارزیابی عملکرد شبکه با در نظر داشتن مسایل کلاسیک تخصیص تقاضا مورد توجه قرار گرفته است
۳	بونو و گوتیرز	۲۰۱۱	مبتنی بر فرض‌هایی به منظور ساده‌سازی به ویژه در خصوص رفتار احتمالی کاربران می‌باشد
۴	لیوتپ و همکارانش	۲۰۱۱	از فرض‌هایی به منظور کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی شبکه‌های بزرگ و نیز رفتار احتمالی کاربران استفاده شده است
۵	دالین و لوپینگ	۲۰۱۲	مبتنی بر فرض‌هایی به منظور ساده‌سازی پیچیدگی‌های محاسباتی و نیز رفتار احتمالی کاربران می‌باشد
۶	ناگایی و همکاران	۲۰۱۲	ارزیابی عملکرد شبکه بدون توجه به وضعیت تقاضا و تنها بر اساس توپولوژی و ساختار شبکه انجام شده است. همچنین مبتنی بر فرض‌هایی به منظور ساده‌سازی پیچیدگی‌های محاسباتی می‌باشد
۷	چانگ و لی	۲۰۱۴	مبتنی بر فرض‌هایی به منظور ساده‌سازی پیچیدگی‌های محاسباتی می‌باشد.
۸	کرمانشاه و دریل	۲۰۱۶	ارزیابی عملکرد شبکه بدون توجه به تقاضا و تنها بر اساس توپولوژی و ساختار شبکه و با در نظر داشتن فرض‌هایی به منظور ساده‌سازی محاسبات انجام شده است
۹	ژیانگ دونگ و همکاران	۲۰۱۸	ارزیابی عملکرد شبکه بدون توجه به تقاضا و بر اساس ساختار شبکه انجام شده است. همچنین دارای فرض‌هایی به منظور کاهش پیچیدگی محاسباتی می‌باشد
۱۰	کاشین و آساکورا	۲۰۲۰	به مقایسه برخی از روش‌های ارایه شده در خصوص شناسایی آسیب‌پذیری شبکه پرداخته و فاقد روش پیشنهادی مستقلی می‌باشد
۱۱	یو، چن و همکاران	۲۰۲۰	با توجه به در نظر گرفتن ظرفیت کمان‌ها به صورت یک متغیر تصادفی، روش پیشنهادی از پیچیدگی بالایی برخوردار می‌باشد

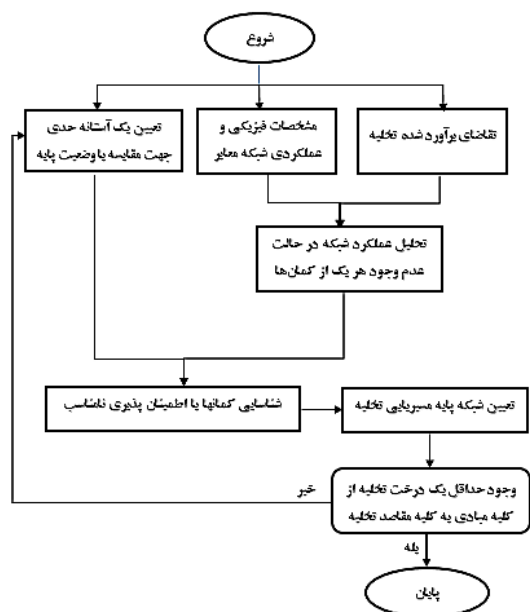
در نتیجه وقوع یک بحران با احتمال تخریب زیرساخت‌های ارتباطی، چندان منطبق بر واقعیت نخواهد بود. از این‌رو نیاز به بکارگیری روشی به منظور ارزیابی عملکرد شبکه بر مبنای رفتار واقعی کاربران به هنگام انسدادهای احتمالی کمان‌های شبکه و شناسایی کمان‌های بحرانی بر مبنای کاهش قابل توجه وضعیت عملکردی شبکه بیش از پیش احساس می‌گردد. بر این اساس در این مطالعه در ابتدا به ارایه روشی به منظور ارزیابی عملکرد شبکه با فرض آگاهی کاربران از انسداد کمان‌ها در طول مسیر و رفتار احتمالی آنها در مسیریابی از محل انسداد به سمت مقصد اقدام شده و با ارزیابی عملکرد شبکه در نتیجه انسداد هریک از کمان‌ها و مقایسه آن با وضعیت پیش از انسداد و نیز مقایسه این تغییرات با یک حد قابل قبول تعریف شده، کمان‌های غیر مطمئن مورد شناسایی قرار خواهند گرفت.

۳. روش پیشنهادی

همان‌طور که از نمونه مطالعات مورد بررسی برمی‌آید، در بسیاری از این مطالعات، ارزیابی عملکرد شبکه و در نتیجه شناسایی اجزای آسیب‌پذیر در شبکه‌های بزرگ، مبتنی بر فرض‌هایی به منظور ساده‌سازی می‌باشد [Li, Jia, Wang and Li, 2015]. در برخی از این مطالعات نیز به ارزیابی عملکرد شبکه بدون توجه به وضعیت تقاضا و تنها بر اساس وضعیت آزاد شبکه پرداخته شده است.

در برخی دیگر نیز مساله تقاضا در ارزیابی عملکرد شبکه به دلیل پیچیدگی مدل‌سازی رفتار کاربران به ویژه در مواجهه با انسداد، تنها با در نظر داشتن مسایل کلاسیک تخصیص تقاضا مورد توجه قرار گرفته است. پیشنهاد مسایل کلاسیک تخصیص، اطلاع از وضعیت شبکه و مسیرهای امکان‌پذیر بر اساس مشاهدات و تجربیات موجود پیش از اقدام به سفر می‌باشد. بدیهی است نتایج مبتنی بر چنین فرضی در شرایط انسداد احتمالی کمان‌ها

کاربران از وضعیت تردد در شبکه پیش از وقوع بحران و با توجه به الگوی مسیریابی روزمره آن می‌باشد. به عبارت دیگر فرض می‌گردد کاربران به هنگام وقوع بحران و به منظور سفر میان یک زوج مبدا-مقصد مشخص، همچنان از الگوی مسیره‌های 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 مسیره‌های مذکور تقسیم می‌شود.



شکل ۱. فرایند شناسایی کمان‌های نامطمئن بر اساس روش

پیشنهادی مطالعه

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-مقصد عبوری در دو حالت موجود و بحران بر اساس ماتریس‌های تقاضای متناظر، حجم کمان در حالت تخلیه، برآورد و مبنای ارزیابی عملکرد شبکه قرار می‌گیرد.

بر این اساس تعیین حجم کمان‌های شبکه در حالت بحران در این مطالعه دارای سه گام کلی زیر مطابق با شکل ۲ می‌باشد که در ادامه نسبت به فرمول‌بندی آن اقدام شده است.

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 اختلالات در کمان‌های شبکه را به راحتی و با افزایش اندک در زمان سفر کل سیستم جبران نماید. از دیگر معیارهای ارزیابی شبکه حمل‌ونقل به هنگام وقوع بحران، وضعیت تامین دسترسی‌ها به منظور فراهم آوردن امکان خروج و نیز امدادسانی به بخش‌های بیشتری از مناطق آسیب‌دیده می‌باشد. با توضیحات ذکر شده و با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در شبکه و تاثیر آن در ناپایدار نمودن وضعیت عملکردی آن، در طراحی یک شبکه تخلیه، کمان‌هایی در اولویت خواهند بود که با حذف آنها از شبکه، شبکه دارای کارکردی بسیار نامناسب نسبت به شرایط معمول بحران نبوده و در عین حال حذف آنها، دسترسی در شبکه را با محدودیت روبرو ننماید. به عبارت دیگر ضروریست از در نظر گرفتن کمان‌هایی که حذف آنها، شبکه را با اختلال در وضعیت عملکردی (کمان‌های نامطمئن عملکردی) و نیز محدودیت دسترسی (کمان‌های نامطمئن دسترسی) روبرو می‌نماید، در برنامه‌ریزی به منظور تخلیه، اجتناب شود. بدین ترتیب با حذف کمان‌های آسیب‌پذیر از شبکه معابر موجود، شبکه‌ای حاصل می‌گردد که کمان‌های آن دارای سطح اطمینان قابل قبول بوده و مسیرهای تخلیه قابل اطمینانی را می‌توان بر بستر آن ایجاد نمود. در شکل ۱، فرایند شناسایی کمان‌های آسیب‌پذیر بر اساس روش پیشنهادی این مطالعه ارائه شده است.

در این مطالعه مبنای برآورد عملکرد شبکه در نتیجه انسداد هر کمان، اطلاع رانندگان از وضعیت انسداد آن در حین سفر می‌باشد. به عبارت دیگر فرض بر آن می‌باشد که کاربران در ابتدای هر کمان از وضعیت انسداد آن آگاهی پیدا نموده و از این محل نسبت به انتخاب یک مسیر مناسب به سمت مقصد اقدام خواهند نمود. انتخاب مسیر در این مرحله بر اساس پیش زمینه ذهنی

$$\sum_{p \in P^{od}} f_p^{od} = Q^{od} \quad \forall od_{d \in D}^{o \in O} \quad (3)$$

$$f_p^{od} \geq 0 \quad \forall od_{d \in D}^{o \in O} \quad \forall p \in P^{od} \quad (4)$$

$$\delta_{ip}^{od} = 0 \text{ or } 1 \quad \forall od_{d \in D}^{o \in O} \quad \forall p \in P^{od} \quad (5)$$

که در آن:

t_i : زمان سفر در کمان جهت‌دار i

V_i : حجم ترافیک وضعیت موجود پیش از بحران در کمان

جهت‌دار i

δ_{ip}^{od} : در صورتی که یک مسیر p از مجموعه مسیرهای

امکانپذیر زوج مبدأ-مقصد od از کمان جهت‌دار i بگذرد برابر

۱ و در غیر اینصورت ۰ در نظر گرفته می‌شود

f_p^{od} : حجم ترافیک در مسیر امکانپذیر p بین زوج مبدأ-مقصد

od در وضعیت موجود پیش از بحران

Q^{od} : تقاضای سفر بین زوج مبدأ-مقصد od در وضعیت

موجود پیش از بحران

P^{od} : مجموعه مسیرهای ممکن میان زوج مبدأ-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

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 و با

فرض عدم رخداد هرگونه انسداد را می‌توان از رابطه زیر بدست

آورد:

$$v_k = \sum_{OD} \sum_{p \in P^{OD}} \frac{\delta_{kp}^{OD} f_p^{OD} \cdot Q^{OD}}{Q^{OD}} \quad (6)$$

که در آن:

v_k : حجم کمان در نتیجه تخصیص تقاضای تخلیه مطابق با

الگوی شرح داده شده می‌باشد.

گام نخست: شناسایی مسیرهای ممکن در وضعیت موجود بر

اساس تقاضای روزمره که در این مطالعه بر اساس مساله

تخصیص تعادل کاربر بدست می‌آید اگرچه بدون آنکه از کلیت

روش پیشنهادی کاسته شود، می‌توان هر روش دیگری را نیز

مورد توجه قرار داد.

گام دوم: حفظ الگوی توزیع تقاضای وضع موجود یک زوج

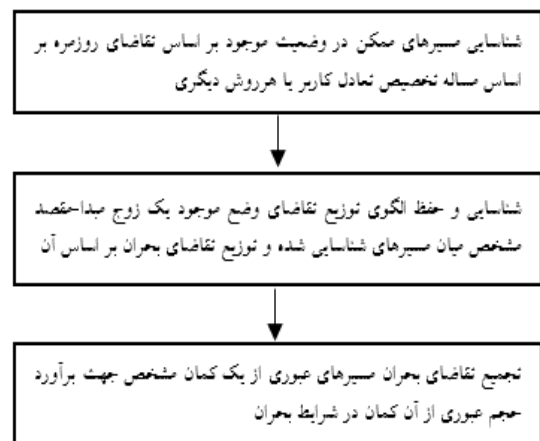
مبدأ-مقصد مشخص میان مسیرهای شناسایی شده و توزیع

تقاضای بحران زوج مبدأ-مقصد مورد بررسی متناسب با تقاضای

وضع موجود

گام سوم: تجمیع تقاضای بحران مسیرهای عبوری از هر کمان

جهت برآورد حجم عبوری از آن کمان در شرایط بحران



شکل ۲. مراحل تعیین حجم کمان‌های شبکه در حالت بحران

همانطور که ذکر گردید در این مطالعه الگوی مسیریابی تقاضای

سفرهای ساعتی روزمره در شرایط پیش از بحران بر اساس مساله

کلاسیک تخصیص تعادل کاربر و بر اساس فرمول بندی بکمن

مطابق با روابط زیر بدست می‌آید [Beckmann, McGuire,

and Winste, 1956]:

$$Z = \text{Min} \sum_{od_{d \in D}^{o \in O}} \sum_{i \in N} \int_0^{V_i} t_i(w) \cdot dw \quad (1)$$

$$V_i = \sum_{od_{d \in D}^{o \in O}} \sum_{p \in P^{od}} \delta_{ip}^{od} f_p^{od} \quad \forall i \in N \quad (2)$$

از سوی دیگر به منظور تعیین کمان‌های نامطمئن عملکردی، ارزیابی عملکرد شبکه در نتیجه غیاب هر کمان لازم و ضروری می‌باشد.

مبنا و اساس ارزیابی عملکرد شبکه در وضعیت جدید، برآورد اثرات انعکاسی انسداد یک کمان در سایر کمان‌های شبکه می‌باشد که می‌توان آن را تغییرات احجام ناشی از تغییر در مسیر آن بخش از تقاضای تخلیه در نظر گرفت که بدون هرگونه اطلاع قبلی به محل کمان مورد بررسی رسیده و با کمان مسدود شده ای روبرو می‌باشند که امکان ادامه مسیر در آنها میسر نمی‌باشد. لذا به ناچار می‌بایست از این محل نسبت به انتخاب مسیری به سمت مقصد مورد نظر اقدام نمایند.

بر این اساس برای هر کمان مورد بررسی، تقاضای مسیره‌های عبوری از آن کمان به تفکیک زوج مبدا-مقصد‌های عبوری بدست آمده و تقاضای مذکور بجای انجام به صورت مستقیم به دو پاره سفر تقسیم می‌گردد. بخش اول از مبادی شناسایی شده به ابتدای کمان مورد بررسی و بخش دوم از ابتدای آن کمان به مقصد نهایی می‌باشد که مسیره‌های پاره سفر دوم بر اساس مسیره‌های وضع موجود پیش از بحران از مراکز ایجاد سفر ابتدای کمان مسدود شده به مقاصد تخلیه، خواهد بود. قابل ذکر است با توجه به تفاوت مسیر پاره سفر دوم به مقاصد تخلیه در حالت انسداد یک کمان با ادامه مسیر پیش از انسداد، حذف احجام متناظر با آن از سایر کمان‌های ادامه مسیر در وضعیت عملکردی شبکه ناشی از تقاضای تخلیه قبل از انسداد و اضافه نمودن احجام ناشی از مسیره‌های جدید به منظور تعیین وضعیت عملکردی جدید شبکه لازم و ضروری می‌باشد.

به منظور حذف احجام متناظر با تغییر مسیر پاره سفر دوم در حالت انسداد یک کمان از احجام سایر کمان‌های ادامه مسیر، از تحلیل کمان‌های بحرانی در نتیجه تخصیص ماتریس ساعتی روزانه پیش از بحران به منظور شناسایی الگوی انجام سفرها استفاده شده و نسبت به ساخت ماتریس مبادی و مقاصد و احجام متناظر مسیره‌هایی که ابتدا از کمان مسدود شده و سپس

هر یک از کمان‌های مورد بررسی می‌گذرد، اقدام می‌گردد. در ادامه با ضرب درایه‌های ماتریس مسیره‌های عبوری در نسبت تقاضاهای تخلیه به تقاضای ساعتی روزانه متناظر با آن درایه، ماتریس احجام مسیره‌های عبوری تخلیه از کمان مسدودی و هر یک از کمان‌های ادامه مسیر بدست آمده و مجموع این احجام از کل حجم کمان مورد بررسی در وضعیت عملکردی شبکه ناشی از تقاضای تخلیه قبل از انسداد کسر می‌گردد.

$$v_{ik} = \sum_{OD} \sum_{p \in P^{OD}} \frac{\delta_{kp}^{OD} \cdot \delta_{ip}^{OD} \cdot f_p^{OD} \cdot q^{OD}}{Q^{OD}} \quad (7)$$

که در آن:

v_{ik} : حجم کاهش یافته در کمان k در نتیجه انسداد در کمان i می‌باشد.

به منظور اعمال احجام جدید اضافه شده به سایر کمان‌ها در نتیجه پاره سفر دوم، به روش مشابه فوق اقدام می‌گردد. مبنای عمل ماتریس مبادی-مقاصد مسیره‌های عبوری از کمان مورد بررسی و حجم متناظر با آن در نتیجه تخصیص ماتریس ساعتی روزانه پیش از بحران و بر اساس نتایج حاصل از تحلیل کمان بحرانی خواهد بود. در ادامه با ضرب درایه‌های ماتریس مسیره‌های عبوری در نسبت تقاضاهای تخلیه به تقاضای ساعتی روزانه متناظر با آن درایه، ماتریس مسیره‌های عبوری تخلیه برای آن کمان بدست می‌آید که درایه‌های این ماتریس، احجام مسیره‌های عبوری از آن کمان از مبدا سطر متناظر با آن درایه به مقصد ستون متناظر با آن می‌باشد. بدیهی است مجموع درایه‌های این ماتریس به عنوان احجام رسیده به ابتدای کمان در شرایط بحران خواهد بود. در ادامه به منظور انتساب احجام ابتدای کمان، به نزدیکترین مراکز ایجاد سفر مجاور آن، نسبت به اصلاح ماتریس حاصل از کمان بحرانی به این صورت اقدام می‌گردد که کلیه مبادی این ماتریس بدون تغییر در مقصد به ناحیه ترافیکی منتسب به این مراکز ایجاد سفر، تغییر می‌یابد. سپس با ضرب درایه‌های ماتریس مسیره‌های عبوری هر کمان در نسبت درایه‌های این ماتریس به تقاضای ساعتی روزانه متناظر با آن

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال سیزدهم / شماره سوم (۵۲) / بهار ۱۴۰۱

می‌گردد که وجود درصد تغییرات قابل توجه، بیانگر نامطمئنی کمان مذکور در شرایط عدم قطعیت موجود در شبکه و معیار شناسایی کمان‌های نامطمئن عملکردی می‌باشد.

$$(TT_j - TT)/TT \geq A \quad (10)$$

که در آن:

TT_j : مجموع زمان سفر در شبکه در نتیجه حذف کمان j

TT : مجموع زمان سفر در شبکه در وضعیت موجود شبکه

A : آستانه قابل قبول تغییرات عملکردی

می‌باشد.

قابل ذکر است مقدار A که حداکثر تغییرات عملکردی قابل قبول شبکه به ازای حذف یک کمان مورد بررسی می‌باشد، به عنوان یکی پارامترهای مدیریتی در تعیین نیرومندی شبکه مطرح می‌باشد. به گونه‌ای که مقادیر کمتر این پارامتر، به معنای حساسیت بالاتر در این زمینه و عدم پذیرش تعداد قابل توجهی از کمان‌ها بوده و لذا ایجاد یک شبکه نیرومند، نیازمند صرف هزینه‌های قابل توجه در زمینه ارتقا و توسعه زیر ساخت‌ها خواهد بود. بدین ترتیب منابع در اختیار در این خصوص، تعیین کننده شاخص مذکور خواهد بود. در این مطالعه حداقل مقدار ممکن برای این شاخص با در نظر داشتن حفظ پیوستگی در شبکه مورد توجه قرار می‌گیرد.

این مقدار بر اساس یک فرایند مبتنی بر تکرار تعیین می‌گردد. به گونه‌ای که در تکرار نخست و با فرض یک درصد مشخص برای تغییرات قابل پذیرش (A)، نسبت به شناسایی کمان‌های آسیب‌پذیر اقدام شده و نسبت به حذف کمان‌های مذکور از شبکه اقدام می‌گردد. از آنجایی که حذف برخی از کمان‌های مذکور ممکن است دسترسی برخی از نقاط آسیب‌دیده به مقاصد تخلیه را با محدودیت روبرو نماید، لذا بررسی امکان‌سنجی تامین دسترسی کلیه نقاط آسیب‌دیده به مقاصد تخلیه لازم و ضروری می‌باشد. مبنای اساس این مسأله، امکان ساخت یک شبکه درختی از نقاط آسیب‌دیده به مقاصد تخلیه می‌باشد که با توجه به ویژگی‌های آن در این مطالعه مورد توجه قرار گرفت.

درایه، سفرهای اضافه عبوری از هر کمان ادامه مسیر به مقاصد تخلیه مختلف در نتیجه پاره سفر دوم ناشی از انسداد یک کمان مشخص بدست می‌آید که مجموع آن به عنوان اضافه حجم کمان ها در وضعیت جدید در نظر گرفته می‌شود.

$$v_{ik}^+ = \sum_{OD} \sum_{p \in P^{OD}} \sum_{\dot{p} \in P^{C_i D}} \frac{\delta_{ip}^{OD} \cdot f_p^{OD} \cdot \delta_{kp}^{C_i D} \cdot f_{\dot{p}}^{C_i D} \cdot q^{OD}}{(Q^{OD})^2} \quad (8)$$

که در آن:

v_{ik}^+ : حجم اضافه شده در کمان k در نتیجه انسداد در کمان i

C_i : نزدیکترین مراکز ایجاد سفر به ابتدای کمان i

بدین ترتیب با اضافه نمودن احجام جدید و کسر سفرهای حذف شده از احجام ناشی از تخلیه پیش از انسداد، وضعیت احجام در کلیه کمان‌های شبکه در نتیجه انسداد بدست آمده و با استفاده از آن عملکرد شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

$$v_{ik} = \sum_{OD} \sum_{p \in P^{OD}} \frac{\delta_{kp}^{OD} \cdot f_p^{OD} \cdot q^{OD}}{Q^{OD}} + \sum_{OD} \sum_{p \in P^{OD}} \sum_{\dot{p} \in P^{C_i D}} \frac{\delta_{ip}^{OD} \cdot f_p^{OD} \cdot \delta_{kp}^{C_i D} \cdot f_{\dot{p}}^{C_i D} \cdot q^{OD}}{(Q^{OD})^2} - \sum_{OD} \sum_{p \in P^{OD}} \frac{\delta_{kp}^{OD} \cdot \delta_{ip}^{OD} \cdot f_p^{OD} \cdot q^{OD}}{Q^{OD}} \quad (9)$$

که در آن:

v_{ik} : تغییرات حجم در کمان k در نتیجه انسداد در کمان i

می‌باشد.

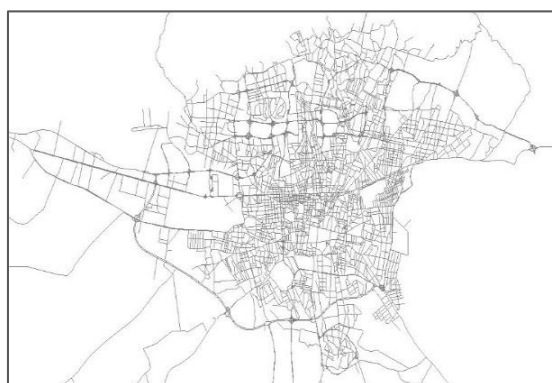
قابل ذکر است روابط فوق‌الذکر به منظور تعیین تغییرات احجام در کمان‌های شبکه در نتیجه انسداد یک کمان مشخص، نیازمند تعیین ماتریس خواهد بود که یک ماتریس مربوط به وضعیت مسیرهای عبوری از کمان مورد بررسی بوده و $n-1$ ماتریس دیگر وضعیت مسیرهای عبور کننده به صورت توأمان از کمان مورد بررسی و هر یک از $n-1$ کمان دیگر شبکه را نشان می‌دهد. n نیز برابر با تعداد کمان‌های جهت‌دار شبکه می‌باشد.

بدین ترتیب با بکارگیری فرایند شرح داده شده، امکان مقایسه شبکه در دو حالت با حضور و بدون حضور کمان مذکور فراهم

کمان مورد بررسی می‌باشد که تعیین وضعیت عملکردی شبکه در کلیه حالات مورد بررسی بر اساس احجام عبوری از کمان‌ها در نتیجه تخصیص تقاضای بحران بر شبکه بر اساس الگوی مسیریابی در وضعیت پیش از بحران خواهد بود. در این بخش به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، نسبت به پیاده‌سازی آن در شبکه شهر تهران بر مبنای تقاضای تخلیه برآورد شده ناشی از زلزله گسل‌های اصلی تهران اقدام خواهد شد.

در این مطالعه ماتریس تقاضای تخلیه، ماتریسی می‌باشد که درایه های آن از میانگین درایه‌های ماتریس تقاضای تخلیه برآورد شده ناشی از زلزله سه گسل اصلی تهران (گسل مشا، شمال تهران و ری) بدست می‌آید. مبنای محاسبه تقاضای تخلیه ناشی از زلزله هر گسل نیز مطالعات جایکا بوده است [JICA, 2006] که تقاضای نخلیه نواحی ایجاد شده در آن با استفاده از قابلیت نرم افزارهای GIS به برآوردهایی در سطح نواحی ترافیکی جهت انجام تحلیل‌های عملکردی شبکه تبدیل گردیده است.

در شکل ۳، شبکه معابر شهر تهران به طول ۳۶۷۹ کیلومتر ارایه شده است. این شبکه 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.



شکل ۳. شکل کلی شبکه معابر شهر تهران

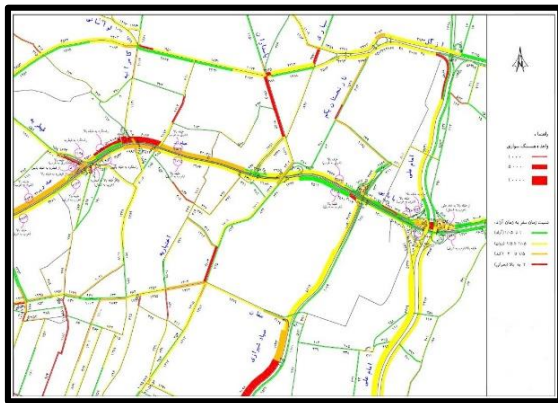
در این مطالعه به منظور تعیین الگوی مسیریابی میان زوج مبادی-مقاصد مختلف در وضعیت پیش از بحران، از مدل حمل‌ونقل شهر تهران که در نرم‌افزار EMME2 پیاده‌سازی فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال سیزدهم / شماره سوم (۵۲) / بهار ۱۴۰۱

از جمله مهمترین خصوصیات یک شبکه درختی، وجود یک مسیر یکتا بین کلیه گره‌های عبوری می‌باشد که امکان ساخت آن بر روی مجموعه نقاط آسیب‌دیده و پناهگاه‌ها، ضمن تضمین وجود دسترسی کلیه نقاط آسیب‌دیده به پناهگاه‌ها، متضمن عدم وجود مسیرهای موازی میان مبادی و مقاصد می‌باشد که در فرایند مدیریت شبکه‌های تخلیه بسیار حایز اهمیت می‌باشد. بدین ترتیب در صورت امکانپذیری ساخت درخت، نسبت به کاهش مقدار (A) و در صورت عدم امکان ساخت درخت، نسبت به افزایش مقدار و انجام فرایند مذکور در قالب تکرار بعدی اقدام شده و فرایند تا تعیین کمترین مقدار که امکان تشکیل چنین درختی بر روی کمان‌های باقیمانده وجود داشته باشد، ادامه خواهد یافت.

در این مطالعه با توجه به سادگی ساخت درخت در نرم‌افزار TransCAD، از نرم افزار مذکور بدین منظور استفاده می‌گردد. این نرم‌افزار عملیات ذخیره‌سازی، نمایش، مدیریت و تحلیل داده‌های حمل‌ونقل را در هر شیوه حمل‌ونقلی و با هر مقیاس و سطح جزئیات بر روی یک شبکه و مبتنی بر GIS انجام داده و با در اختیار داشتن مدل‌های مختلف برآورد تقاضا، حمل‌ونقل همگانی، لجستیک و ...، محیطی مناسب به منظور ایجاد یک بانک اطلاعاتی پویای حمل‌ونقل را فراهم می‌نماید. در این نرم‌افزار همچنین امکان تعریف مقادیر کلیه پارامترهای ترافیکی از قبیل دسترسی‌ها، تاخیرها، گردش‌ها و ... و نیز امکان محاسبه شاخص‌های عملکردی سیستم‌های حمل‌ونقل شخصی و همگانی، تحلیل مکانی و ... وجود دارد.

۴. نتایج

در بخش گذشته روشی به منظور شناسایی کمان‌های نامطمئن با در نظر داشتن دو معیار تغییرات وضعیت عملکردی و دسترسی ارایه گردید. همان‌طور که ذکر گردید مینا و اساس انتخاب یک کمان به عنوان یک کمان غیر مطمئن، تغییر وضعیت غیر قابل قبول عملکرد شبکه به هنگام وقوع بحران در حالت انسداد یک



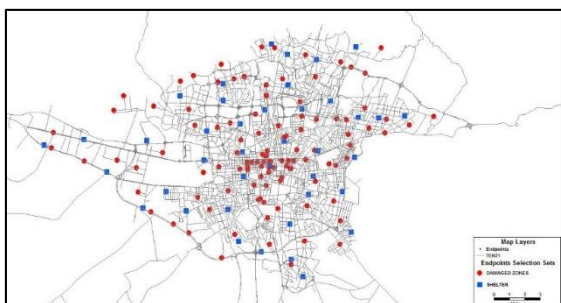
شکل ۴. وضعیت عملکردی بخش‌هایی از شبکه بر اساس نتایج حاصل از تخصیص تقاضای ساعتی پیش از بحران

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 شده و خروجی آن برای کمان/کمان‌های مورد بررسی، به صورت یک ماتریس خواهد بود که هر درایه آن بیانگر مجموع حجم تردد کلیه مسیرهای امکان‌پذیر میان زوج مبادی-مقصد متناظر با آن درایه می‌باشد که از کمان/کمان‌های مورد بررسی عبور می‌نمایند.

در این مطالعه با توجه به زمانبر بودن انجام تحلیل کمان بحرانی به صورت دستی به تفکیک هر یک از کمان‌های شبکه، نسبت به تهیه یک ماکرو در نرم‌افزار EMME2 به منظور اجرای غیر دستی فرایند برای کلیه کمان‌های مورد بررسی اقدام گردید. در هر اجرای مربوط به انسداد یک کمان مشخص، ماتریس مسیرهای عبوری از آن کمان و نیز ماتریس‌های مربوط به وضعیت مسیرهای عبور کننده از کمان مورد بررسی و هر یک از دیگر کمان‌های شبکه، بر اساس وضعیت موجود پیش از بحران، تعیین شده و در ادامه با انجام تغییرات مورد نیاز در احجام کمان‌ها ناشی از الگوی تغییر مسیر شرح داده شده در نتیجه انسداد، حجم نهایی در کلیه کمان‌های شبکه بدست می‌آید. که مبنای ارزیابی عملکرد شبکه در نتیجه انسداد کمان مورد بررسی می‌باشد. بدین ترتیب امکان مقایسه شبکه در دو حالت

شده است، استفاده می‌گردد. مهمترین ویژگی و قابلیت این نرم‌افزار، انجام مدل تخصیص ترافیک تعادلی می‌باشد. 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. بانک اطلاعاتی موجود در نرم‌افزار، محلی برای نگهداری اطلاعات مربوط به اجزای شبکه خیابانی، اجزا شبکه حمل‌ونقل عمومی، ویژگی‌های اقتصادی- اجتماعی جمعیت، تقاضای کالا و مسافر و توابع عملکردی سیستم در سه قالب کلی شبکه، ماتریس و توابع می‌باشد که می‌توان آنها را به صورت فایل‌های متنی به محیط نرم‌افزار وارد نمود. در مدل حمل‌ونقل و ترافیک تهران در محیط EMME2، سیستمی ویژه برای ایجاد گزینه طراحی شده است. منظور از یک گزینه، وضعیت مشخصی از یک سیستم حمل‌ونقل کالا و مسافر شامل یک شبکه خیابانی، یک شبکه حمل‌ونقل عمومی و یک تقاضای مشخص می‌باشد. ورودی‌های سیستم شامل بانک‌های اطلاعاتی شبکه خیابانی و شبکه عمومی در منطقه مورد مطالعه بوده و خروجی‌های سیستم گزینه‌های ایجاد شده و جدول‌های گزارش شامل حجم ترافیک در شبکه معابر، متوسط سرعت وسایل نقلیه، تعداد مسافر سوار و پیاده شده سیستم حمل‌ونقل عمومی، وسیله‌نقلیه-کیلومتر، زمان تاخیر در مسیر و تقاطع، زمان سفر، سطح سرویس، مصرف سوخت و میزان نشر آلاینده‌های هوا در هر کمان شبکه خیابانی و نمایش آنها به صورت شماتیک و نیز در قالب نقشه‌هایی مشخص را در بر می‌گیرد. در شکل ۴، وضعیت عملکردی یا سطح سرویس کمان‌های بخش‌هایی از شبکه معابر شهر تهران در نتیجه تخصیص ماتریس ساعتی روزانه پیش از بحران به عنوان یکی از الگوهای خروجی نرم‌افزار EMME2 ارائه شده است.

و با در نظر داشتن تامین دسترسی کلیه نقاط آسیب‌دیده به مقاصد تخلیه بدست می‌آید.



شکل ۵. وضعیت نقاط آسیب‌دیده و پناهگاه‌ها در شبکه معابر شهر

تهران



شکل ۶. موقعیت مکانی نمونه کمان‌های مورد بررسی از نظر

قابلیت اطمینان عملکردی

با حضور و بدون حضور کمان مورد بررسی فراهم می‌گردد که تغییراتی بیش از مقدار قابل پذیرش در عملکرد شبکه، بیانگر نامطمئنی آن کمان در شرایط عدم قطعیت موجود در شبکه خواهد بود.

با توجه به اینکه هدف از مطالعه حاضر، شناسایی کمان‌های نامطمئن عملکردی به هنگام وقوع بحران می‌باشد، در این بخش مقایسه وضعیت عملکردی شبکه در نتیجه تخصیص ماتریس تقاضای تخلیه از نواحی آسیب‌دیده به پناهگاه‌های تعبیه شده در سطح شبکه مطابق با شکل ۵ مبنای عمل قرار گرفت.

در جدول ۲، نتایج حاصل از عملکرد شبکه در وضعیت بحران در حالت انسداد چند کمان نمونه و مقایسه آن با وضعیت عملکردی در حالت عدم وقوع هر گونه انسدادی ارائه شده است. موقعیت مکانی کمان‌های نمونه نیز در شکل ۶ نشان داده شده است.

بر اساس نتایج جدول مذکور، کمان‌هایی از نظر عملکردی، مطمئن خواهند بود که تغییرات برآورد شده در نتیجه انسداد آنها از حد قابل پذیرش مورد نظر در این مطالعه کمتر باشد. حد قابل پذیرش مورد نظر در این مطالعه، بر اساس یک فرایند تکراری

جدول ۲. عملکرد شبکه در حالت انسداد چند کمان نمونه

کمان	عملکرد شبکه در حالت انسداد کمان (ساعت)	کمان	عملکرد شبکه در حالت انسداد کمان (ساعت)	عملکرد شبکه در وضعیت موجود شبکه (ساعت)
۷۲۲۰	۱۴۷۷۸۶	۸۹۵۶	۱۴۷۵۸۰	
۱۲۰۳۱	۱۴۷۷۲۷	۱۱۵۴۲	۱۴۷۶۳۸	
۱۱۶۳۱	۱۴۷۵۰۵	۱۰۱۴۰	۱۴۷۶۸۳	
۸۹۸۳	۱۴۷۴۱۸	۹۴۵۷	۱۴۷۵۵۱	۱۴۷۳۲۹
۱۰۰۴۲	۱۴۷۶۸۳	۱۱۹۶۱	۱۴۷۴۶۲	
۹۰۹۹	۱۴۷۵۹۴	۹۷۸۲	۱۴۷۷۵۶	
۱۱۵۰۱	۱۴۷۸۰۱	۱۰۴۸۳	۱۴۷۷۱۲	
۱۱۸۷۸	۱۴۷۷۷۱	۱۱۸۹۹	۱۴۷۴۳۲	

با تعیین این مقدار و پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر مبنای آن، کمان‌های غیر مطمئن به صورت شکل ۸ بدست می‌آید. در جدول ۴، درصد طول کمان‌های غیر مطمئن در شبکه به تفکیک رده‌های عملکردی معابر ارایه شده است.



شکل ۸. موقعیت مکانی کمان‌های غیر مطمئن در شبکه معابر شهر تهران به هنگام وقوع بحران احتمالی زلزله

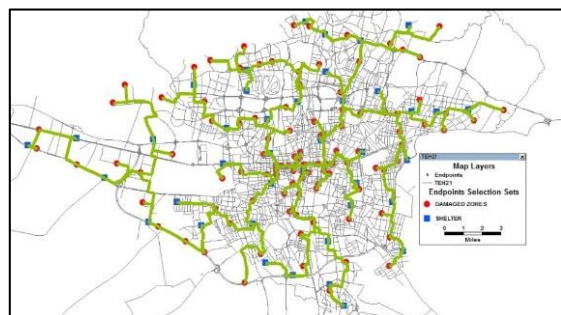
بر اساس نتایج حاصل، در حدود ۳۴۱ کیلومتر از کمان‌های نامطمئن دارای رده عملکردی شریانی درجه ۲ و ۱۶۰ کیلومتر دارای رده عملکردی شریانی درجه ۱ می‌باشد. از سوی دیگر بررسی وضعیت عملکردی کمان‌های غیرمطمئن شبکه بیانگر آنست که در حدود ۵۹ درصد از معابر بارده عملکردی شریانی درجه دو و در حدود ۵۱ درصد از معابر بارده عملکردی شریانی درجه یک دارای عملکرد غیر مطمئن در نتیجه وقوع رخداد‌های غیرقابل پیش بینی می‌باشند که این مساله را می‌توان ناشی از نقش کلیدی این گروه از معابر در ساختار شبکه و وابستگی عملکرد شبکه به آنها بر شمرد.

قابل ذکر است در این بخش از مطالعه به منظور امکان‌سنجی تامین دسترسی‌ها، وجود حداقل یک درخت از نقاط آسیب‌دیده به مقاصد تخلیه مورد توجه قرار می‌گیرد که با توجه به روش پیشنهادی تحقیق، نسبت به انتقال شبکه به نرم‌افزار TransCAD و ساخت درخت بر بستر کمان‌های مطمئن عملکردی در هر تکرار اقدام گردید.

همانطور که ذکر گردید کمترین مقدار این شاخص در تکرارهای مختلف که امکان تشکیل چنین درختی وجود داشته باشد، به عنوان حد قابل پذیرش مورد نظر در این مطالعه در نظر گرفته شده و معیار شناسایی کمان‌های غیر مطمئن نهایی قرار می‌گیرد. در جدول ۳ امکان‌پذیری ساخت درخت دسترسی از نقاط آسیب‌دیده به مقاصد تخلیه به ازای مقادیر مختلف حد تغییرات قابل پذیرش عملکرد شبکه ارایه شده است.

همانطور که از نتایج جدول فوق برمی‌آید، کمترین مقدار شاخص حدی که امکان ساخت درخت دسترسی از کلیه نقاط آسیب‌دیده به کلیه مقاصد تخلیه بر بستر کمان‌های باقیمانده بر اساس آن وجود خواهد داشت، برابر با ۰,۳۵ درصد می‌باشد که بر اساس توضیحات ذکر شده به عنوان مقدار مطلوب حد بالای تغییرات قابل پذیرش عملکرد شبکه در نتیجه انسداد کمان‌ها در نظر گرفته می‌شود.

یک نمونه درخت دسترسی به ازای مقدار ۰,۳۵ درصد در شکل ۷ ارایه شده است.



شکل ۷. یک نمونه درخت دسترسی بر اساس کمان‌های مطمئن حاصل از مقدار نهایی حد بالای تغییرات قابل پذیرش

جدول ۳. امکانپذیری ساخت درخت دسترسی به ازای مقادیر مختلف حد تغییرات قابل پذیرش عملکرد شبکه

مقدار شاخص حدی(درصد)	درصد کمان‌های غیر مطمئن	امکانپذیری ساخت درخت دسترسی	مقدار شاخص حدی(درصد)	درصد کمان‌های غیر مطمئن	امکانپذیری ساخت درخت دسترسی
۰,۰۵	۵۱,۳	-	۰,۳۰	۱۵,۶	-
۰,۱	۴۵,۶	-	۰,۳۵	۱۰,۴	√
۰,۱۵	۳۸,۲	-	۰,۴۰	۸,۱	√
۰,۲۰	۳۰,۷	-	۰,۴۵	۶,۷	√
۰,۲۵	۲۱,۱	-	۰,۵	۴,۳	√

جدول ۴. درصد کمان‌های غیر مطمئن در شبکه به تفکیک رده‌های عملکردی

رده عملکردی	بزرگراه و آزادراه	شریانی درجه ۱	شریانی درجه ۲	جمع و پخش کننده	ریمپ و لوپ	مجموع
طول کمان(کیلومتر)	۴۸۳	۳۱۵	۴۹۳	۱۹۹۴	۳۹۴	۳۶۷۹
طول کمان‌های نامطمئن	۲۲	۱۶۰	۳۴۱	۱۱۱	۰	۶۳۴
درصد کمان‌های نامطمئن	۳,۷	۲۶,۸	۵۷,۱	۱۲,۴	۰	۱۰۰

این مساله به ویژه با توجه به تمرکز معابر مذکور در بافت قدیمی و متراکم تر شهر و در نتیجه عدم امکان ایجاد مسیرهای موازی در خصوص این گروه از معابر دور از ذهن نمی‌باشد. ضمن آنکه با توجه به احتمال انسدادهای پیش‌بینی نشده به ویژه ناشی از سقوط متعلقات منصوبه به ساختمان‌ها در معابر با رده عملکردی پایین‌تر در نتیجه نقش اجتماعی پررنگتر آنها قابل توجه نموده و توجه و تاکید بیشتر در رعایت استانداردها و اصول مربوط به پدافند غیرعامل در این گروه از معابر اجتناب ناپذیر می‌باشد. از سوی دیگر با توجه به آنکه طراحی یک شبکه تخلیه و برنامه ریزی به منظور هدایت جمعیت آسیب دیده به این مسیرها با توجه به ضرورت ظرفیت عبور بالاتر، محدودیت دسترسی‌های متعدد و آشنایی شهروندان با آنها، معمولاً بر بستر معابر با رده عملکردی بزرگراهی و شریانی‌های درجه یک مورد توجه قرار می‌گیرد، اطمینان پذیری قابل توجه معابر با رده عملکردی بالاتر در شبکه معابر شهر تهران بیانگر امکان طراحی یک شبکه تخلیه کارآمد و با قابلیت اطمینان بالا می‌باشد.

۵. جمع‌بندی

در بسیاری از مطالعات صورت گرفته در خصوص شناسایی کمان‌های نامطمئن در شبکه، شناسایی این کمان‌ها با ارزیابی عملکرد شبکه بدون توجه به وضعیت تقاضا مورد بررسی قرار گرفته و در صورت در نظر گرفتن تقاضا، فرض بر اطلاع کاربران از وضعیت انسدادها پیش از شروع سفر می‌باشد. این در حالی است که در این مطالعه به منظور برآورد عملکرد شبکه در نتیجه انسداد یک کمان مشخص، اثرات توأمان عرضه و تقاضا مورد توجه قرار گرفته و مبنای برآورد، اطلاع رانندگان از وضعیت انسداد کمان‌ها در محل کمان مورد نظر می‌باشد. از سوی دیگر با توجه به آنکه قابلیت اطمینان عملکردی و دسترسی از مهمترین ویژگی‌های شبکه به منظور فراهم آوردن امکان تخلیه می‌باشد، کمان‌هایی که حذف آنها در نتیجه انسدادهای غیر قابل پیش‌بینی، کاهش شدید وضعیت عملکردی شبکه را به همراه داشته و دسترسی‌های برخی از نقاط آسیب‌دیده را با محدودیت روبرو می‌نماید، به عنوان کمان‌های نامطمئن در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، نسبت به پیاده‌سازی آن در شبکه شهر تهران بر مبنای مقدار ۰,۳۵ درصد

پذیرفته و ظرفیت عبور کل شبکه مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. از این‌رو حذف کمان‌های آسیب‌پذیر با رده عملکردی شریانی اگرچه می‌تواند قابلیت اطمینان شبکه تخلیه ساخته شده بر بستر کمان‌های باقی مانده را از حیث حفظ پیوستگی و زمان سفر افزایش دهد اما با توجه به نقش و اهمیت این رده از معابر در عملکرد یکپارچه و کارای شبکه و در نتیجه تامین ظرفیت مناسب، قابلیت تخلیه شبکه ساخته شده را دچار اختلال جدی خواهد نمود. این موضوع به ویژه در برنامه‌ریزی‌های پیش از بحران دارای اهمیت قابل توجهی می‌باشد. به گونه‌ای که به منظور تامین ظرفیت مورد نیاز شبکه تخلیه در نتیجه آسیب‌پذیری این گروه از معابر، می‌توان با توسعه بخش‌هایی از شبکه در قالب تعریض یا اضافه نمودن معابری به شبکه اقدام نمود که در وضعیت موجود شبکه نیاز چندانی به حضور آنها احساس نمی‌گردد. بدیهی است در صورت عدم امکان تحقق چنین امری و یا پر هزینه بودن آن به ویژه در مناطق با بافت متراکم، می‌توان راهکارهایی نظیر مقاوم سازی هرچه بیشتر ساختمان‌ها و ... را به منظور کاهش تقاضای تخلیه در دستور کار قرار داد.

۶. پی‌نوشت‌ها

1- Robustness

2- Centroid

۷. منابع

- Beckmann M., McGuire C. and Winsten C. B., (1956), "Studies in the Economics of Transportation", 23 Yale University Press, Connecticut.

- Bono F. and 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.

به عنوان حد تغییرات قابل قبول عملکرد شبکه در نتیجه انسداد یک کمان اقدام گردید. این مقدار برابر با حداقل مقدار تغییرات عملکردی قابل قبول شبکه شهر تهران در نتیجه انسداد کمان‌ها می‌باشد که امکان ساخت یک شبکه درختی از کلیه نقاط شبکه به مقاصد تخلیه با استفاده از این کمان‌های مطمئن فراهم می‌باشد. بر اساس ارزیابی عملکرد شبکه در نتیجه انسداد هر کمان و مقایسه آن با حد قابل قبول، ۱۷,۳ درصد از کمان‌های شبکه شهر تهران در نتیجه انسداد احتمالی، عملکرد شبکه را دچار اختلال نموده و لذا به عنوان کمان‌های غیر مطمئن در نظر گرفته می‌شوند. بر اساس بررسی‌ها، ۵۷,۱ درصد کمان‌های غیر مطمئن دارای رده عملکردی شریانی درجه دو و ۲۶,۸ درصد دارای رده عملکردی شریانی درجه یک می‌باشند که این مساله را می‌توان ناشی از نقش کلیدی این گروه از معابر در ساختار شبکه و وابستگی عملکرد شبکه به آنها بر شمرد. این مساله به ویژه با توجه به تمرکز معابر مذکور در بافت قدیمی و متراکم تر شهر و در نتیجه عدم امکان ایجاد مسیرهای موازی در خصوص این گروه از معابر دور از ذهن نمی‌باشد. در خصوص معابر محلی و جمع و پخش کننده در شبکه شهر تهران نیز به دلیل موقعیت آنها در ساختار شبکه و در نتیجه پوشش ترافیک محلی بیشتر و ترافیک عبوری کمتر، معمولاً انسداد آنها دارای تأثیرات منفی قابل توجهی در کارکرد شبکه نبوده و توجه به کمان‌های مذکور از حیث حفظ تامین دسترسی نقاط آسیب‌دیده به مقاصد تخلیه لازم و ضروری می‌باشد.

بدین ترتیب با توضیحات ذکر شده در فوق، بیشترین کمان‌های غیر مطمئن در معابر با رده عملکردی شریانی و در مناطق با بافت متراکم مشاهده می‌گردد که علی‌رغم برخورداری از بیشترین تقاضای تخلیه، دارای بیشترین محدودیت در ظرفیت عبور و نیز بیشترین احتمال آسیب‌پذیری می‌باشند.

این مساله به ویژه از آنجایی قابل اهمیت می‌باشد که در روش‌های مرسوم ساخت شبکه تخلیه، ساخت شبکه بر اساس معیارهای مشخصی نظیر دسترسی و پایداری زمان سفر صورت

- road network vulnerability analysis: A sensitivity analysis based approach", *Transportation*, Vol 38, pp 799-817.
- 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.
- 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.
- Taylor M. A. P. , Sekhar S. V. C. and 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. and 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.
- Xiangdong X., Chen A. and Yang C.,(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.
- Yu G., Xiao F., Zhiyuan L., Xiangdong X. and Chen A, (2020), "Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 133
- 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.
- 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.
- 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.
- Kashin S. and Asakura Y., (2020),"Citation network analysis of vulnerability studies in the fields of transportation and complex networks",*Transportation Research Procedia*, Volume 47, Pages 369-376.
- Kermanshah A. and Derrible S.,(2016),"A geographical and multi-criteria vulnerability assessment of transportation networks against extreme earthquakes", *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 153,Pages 39-49.
- 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.
- 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.
- Luathep, Paramet, Sumalee, Agachai , Ho, Kurauchi and Fumitaka,(2011)," Large-scale

ارائه روشی برای شناسایی کمان‌های نامطمئن شبکه در هنگام وقوع بحران زلزله (مطالعه موردی: شبکه شهر تهران)

- Zdeng M., "Technical Resilience of an Urban Road Network after an Earthquake", in Proceedings of the Construction Research Congress 2020, American Society of Civil Engineers.

بابک میربها، درجه کارشناسی در رشته عمران را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران مرکز و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران - راه و ترابری از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدل سازی رفتاری در ایمنی راه، سیستم های حمل و نقل هوشمند و ترافیک بوده و در حال حاضر دانشیار دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) است.



محمود صفارزاده درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۶۶ از دانشگاه شهید باهنر کرمان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری در سال ۱۳۷۰ را از دانشگاه کارلتون، اتاوا، کانادا اخذ نمود. در سال ۱۳۷۴ موفق به کسب درجه دکتری در رشته برنامه ریزی و مهندسی حمل و نقل از دانشگاه کارلتون، اتاوا، کانادا گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، سیستم های هوشمند حمل و نقل، ایمنی حمل و نقل، حمل و نقل هوایی و فرودگاه و مهندسی ترافیک و پایانه های حمل و نقل بوده و در حال حاضر عضو هیئت علمی با مرتبه استادی در دانشگاه تربیت مدرس است.



محمد پور تیموری، درجه کارشناسی در رشته عمران را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران - برنامه ریزی حمل و نقل را در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه علم و صنعت اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدل سازی عرضه و تقاضای حمل و نقل، بهینه سازی سیستم ها و مدیریت بحران می باشد.

