ی عمران، دوره هفتم، شماره سوم، ۱۴۰۲، صفحه: ۳۶-۵۲

مدل‌سازی هدایت بهینه و تخلیه‌ی شبکه‌ی حمل‌ونقل شهری در شرایط اضطراری

علیرضا ناصری [*۱]، علیرضا احمدی مهمانی [۲]

[*۱] استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی و مدیریت ساخت، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

(alinaseri@iaut.ac.ir)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴)

چکیده

حوادث و پدیده‌های طبیعی، معمولاً خسارت‌های وسیع و فاجعه‌آمیز به بار می‌آورند. ارزیابی مناطق مختلف پس از بحران، معمولاً نشان می‌دهد که عملکرد نامناسب حین برنامه‌ریزی و مسیریابی در فرآیند مدیریت بحران و تخلیه اضطراری، منجر به بروز ناهماهنگی و اتلاف زمان و ظرفیت شبکه می‌گردد. بر این اساس، هدف این پژوهش ارائه‌ی روشی برای شناسایی مسیرهای تخلیه‌ی شبکه در زمان کوتاه و به‌صورت یکپارچه می‌باشد؛ که منجر به پیشنهاد یک الگوریتم بر مبنای تحلیل شبکه و تعریف کمان‌ها و گره‌های امن و متاثر از بحران می‌گردد. مدل پیشنهادی بهینه‌سازی جریان در این پژوهش، با استفاده از روش MCNFP، در پیِ یافتن کوتاه‌ترین مسیر تخلیه از هر گره به منطقه امن و ارسال بیشینه‌ی جریان ممکن از طریق این مسیر است. برای کنترل کارایی مدل، ۱۲ شبکه‌ی کوچک با ترکیب مختلفی از تعداد گره‌ها و وسایل نقلیه و ۱۰ شبکه‌ی متوسط با تعداد گره‌های مختلف و تقاضای مشابه مورد بررسی قرار گرفته و زمان اجرای هر یک از الگوریتم‌های MCNFP و مدل پیشنهادی مقایسه شده است. نتایجِ اجرای هر یک از روش‌ها نشان داد که زمان تخلیه با افزایش تعداد گره‌ها و گستردگی و پیچیدگی مسیریابی افزایش می‌یابد. همچنین در شبکه‌های محلی و محدود، افزایش تعداد وسایل نقلیه منجر به افزایش زمان تخلیه می‌شود که حائز اهمیت است. در حالت کلی، نتایج تمام تحلیل‌ها حاکی از سرعت مطلوب و بالای الگوریتم پیشنهادی در تخلیه‌ی شبکه می‌باشد.

کلمات کلیدی

تخلیه اضطراری، مدیریت بحران، شبکه حمل و نقل، بهینه‌سازی.

ی عمران، دوره هفتم، شماره سوم، ۱۴۰۲، صفحه: ۳۶-۵۲

Modeling the Optimal Emergency Routing and Evacuation of the Urban Transport Network

Alireza Naseri [1*]***, Alireza Ahmadi Mehmani*** [2]

[*1] *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran*

[2] *M.Sc. of engineering and construction management, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran*

(alinaseri@iaut.ac.ir)

(Date of received: 21/09/2023, Date of accepted: 05/11/2023)

ABSTRACT

Natural disasters often bring about wide-ranging catastrophic consequences. The post-crisis assessment of different regions generally indicates poor crisis management, evacuation routing, and planning performance, leading to incoordination and wasting time and network capacity. Therefore, this study presented an integrated solution to determine evacuation routes in a short time using an algorithm based on network analysis and the definition of safe nodes and arcs based on crisis conditions. The proposed flow optimization model employs the MCNFP method to find the shortest evacuation routes from each node to the safe zone and guide the maximum possible flow through this route. The model's efficiency was controlled using 12 small networks with different combinations of nodes and vehicles and 10 medium networks with different numbers of nodes and similar demands. Then, the running times of each MCNFP algorithm and the proposed model (P-M) were compared. The results showed that the evacuation time increased by increasing the number of nodes and the routing expanse and complexity. In addition, increasing the number of vehicles in limited and local networks increased the evacuation time. Generally, the research results confirmed the optimal speed of the proposed algorithm in network evacuation.

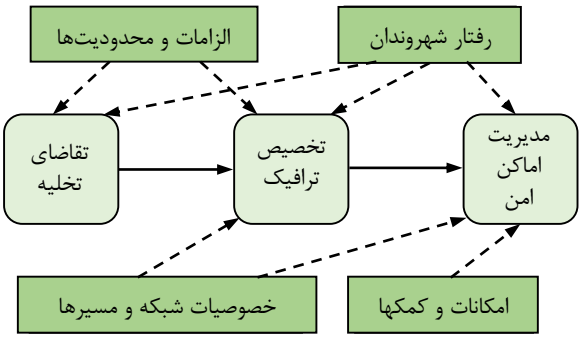
Keywords:

Evacuation, Crisis management, Transportation network, Optimization.

۱- مقدمه

تهدیدات طبیعی عمدتاً در منطقه‌ای نسبتا وسیع به وقوع می‌پیوندد. این وسعت باعث می‌گردد تا دامنه‌ی بحران‌های طبیعی در تمام حوزه‌های کالبدی، ارتباطی و فعالیتی گسترده شود و کیفیت خدمات امداد و نجات و پشتیبانی به‌شدّت افول نماید. باید در نظر داشت که وقوع بلایای طبیعی، بحران‌های مختلف اقتصادی و اجتماعی را به‌دنبال خواهد داشت. تبعات و پیامدهای هر بحران در زمینه‌های صدمات انسانی، زیست محیطی، تجهیزاتی و عملکردی، قابل بررسی است. بر این اساس خسارات و پیامدهای ناشی از حوادث و سوانح، یکی از عوامل بازدارنده‌ی اصلی در توسعه‌ی مناطق حادثه‌خیز به‌شمار می‌رود [۱].

زلزله از شناخته شده ترین حوادث طبیعی است که در اغلب موارد به‌دلیل برجا گذاشتن خسارات فاجعه‌آمیز در مقیاس انسانی و اقتصادی، به یکی از زیان‌بارترین حوادث طبیعی تبدیل شده است. در سال‌های اخیر، میزان وقوع زلزله در مناطق مختلف کشور افزایش یافته و احتمال وقوع این رخدادِ ویران‌گر، مناطق جغرافیایی وسیع و اقشار زیادی از جامعه را تحت تأثیر تهدیدها و مخاطرات این پدیده‌ی طبیعی قرار خواهد داد [۲]. بررسی و ارزیابی شرایط پس از وقوع بحران، معمولا دو نقطه ضعف اصلی در روش برنامه‌ریزی تخلیه مناطق را نمایان می‌کند. نخستین مشکل، ضعف در اطلاع رسانی و ایجاد هماهنگیِ کافی برای اجرای سناریوهای تخلیه است. عدم وجود آگاهیِ کافی در شهروندان و رانندگان وسایل نقلیه برای اتخاذ تصمیم مناسب، برنامه‌ریزی و مسیریابی صحیح (بر مبنای اطلاعات برخط و لحظه‌ای در شرایط اضطراری) در فرآیند تخلیه، منجر به بروز ناهماهنگی، بی‌نظمیِ کلان و اتلاف دو عاملِ تعیین کننده (زمان و ظرفیت شبکه) می‌گردد. در واقع شهروندان و ساکنان یک منطقه دقیقاً نمی‌دانند انتخابِ کدام مسیر منجر به تخلیه‌ی سریع و ایمن می‌گردد. دوّمین عامل اثرگذار و مهم در کند شدن فرآیند تخلیه‌ی اضطراری را می‌توان عدم تخصیص صحیح منابع و ناکافی بودن تسهیلات و خدمات مورد نیاز وسایل نقلیه حین ازدحام و افزایش آنی و پیش بینی نشده‌ی تقاضا برشمرد. معمولاً در شرایط اضطراری نیازهای مهمی از قبیل تامین سوخت وسایل نقلیه و دسترسی‌های فوری به خدمات درمانی و امدادی و امکانات اولیه‌ی موردنیاز در صدر اولویت‌های ضروری قرار گرفته و عدم پیش‌بینی این قبیل تمهیدات، موجب سرگردانی و تشکیل صف‌های طولانی در جایگاه‌های عرضه‌ی سوخت و مراکز خدماتی و تشدید ازدحام در شبکه می‌گردد. لذا اهمیت این مقوله منجر به استفاده از مفاهیم و چارچوبهای مدیریت زنجیره تامین برای مدیریت شرایط اضطراری در مقاطع زمانیِ پیش از بحران، حین وقوع بحران و پس از بحران می‌گردد [۳]. پارامترهای اصلی موثر بر فرآیند تخلیه‌ی اضطراری در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل۱: متغیّرهای شاخص و تاثیرگذار بر فرآیند تخلیه‌ی اضطراری.

بهره‌مندی از مدل‌های زنجیره‌ی تامین در تصمیم‌گیری‌های مربوط پیش و پس از بحران با محدودیت و پیچیدگی چندانی روبرو نیست؛ چراکه این تصمیم‌ها بیشتر با رویکرد استراتژیک انجام می‌شود. اما عملکرد مدیریتی همزمان با بحران، پیچیدگی‌ها و دشواری‌های ویژه‌ای (به‌علت وجود عوامل خارج از کنترل) دارد؛ عواملی همچون اهمیت هزینه‌ای، فشردگی زمانی، تاثیر رفتارهای انسانی (مانند وحشت، آسیب‌دیدگی و ناتوانی) و آسیب یا نابودی زیرساختهای اصلی و زیرساخت‌های اطلاعاتی و ارتباطی در کنار محدودیت‌های سرمایه‌گذاری استراتژیک برای مدیریت بحران (در مقایسه با هزینه‌ها و خسارت‌های اقتصادی ناشی از بحران) گویای اهمیت تصمیم‌گیری‌های همزمان با بحران است. لازم به توضیح است گرچه فرآیند تخلیه به‌شدت از ماهیت تهدید و فاجعه اثر می‌پذیرد، اما ساز و کارهای زیربنایی تخلیه برای همه فجایع مشابه است [۲]. پارامترهای موجود در شکل (۱) از ماهیت و نوع بحران اثر می‌پذیرد. بطور مثال، شمار افرادی که باید از ناحیه فاجعه بیرون برده شوند ممکن است برای حوادث مختلف مشابه باشد؛ اما زمان دسترسی به مسیرها چنین نیست. به همین صورت گنجایش شبکه‌ی ترافیک در رخدادهایی مانند سیل، زلزله و طوفان دستخوش تغییر می‌شود. گرچه این موارد دارای تاثیر مستقیم بر شرایط برون‌بری آسیب دیدگان هستند، اما اثرات بعدی، ناشی از همراهی ترکیبی این موارند. برای مثال تاثیر همزمان کاهش گنجایش مسیرها و دگرگونی ناگهانی تقاضا که بر زمان خروج از شبکه موثر خواهند بود [۲].

۲- پیشینه پژوهش

هدف اصلی در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در شرایط بحرانی، تعیین مسیرهای تخلیه و برنامه‌ریزی برای تردد بهینه‌ی وسایل نقلیه می‌باشد؛ به‌طوری‌که بتوان برنامه‌ای برای تخلیه ایمن و به موقع (در کوتاهترین زمان) را به صورت یکپارچه در شبکه اجرا نمود [۴]. ظرفیت واکنش حمل‌ونقل به هنگام وضعیت اضطراری تحت تأثیر ویژگی‌های اجتماعی، اقتصادی و سیاسی هر منطقه قرار دارد و بر وسعت و ترکیب کلی جابه‌جایی تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، وسعت و تراکم جمعیت بر ظرفیت واکنش حمل ونقل هنگام وضعیت اضطراری و نیز سرعت این واکنش اثر می‌گذارد. معمولا مناطق شهری بزرگ و پر جمعیت دارای شبکه و سامانه‌های بزرگ حمل‌ونقلِ منطقه‌ای با پوششی مناسب هستند که به‌طور منظم به ویژه در ساعات اوج ترافیک مسافران زیادی در این شبکه‌ها جابه‌جا می‌شوند. با این وجود، در مناطق شهری بزرگ، حجم بالقوه‌ی جابه‌جایی مسافران در وضعیت اضطراری می‌تواند از حجم زمان اوج ترافیک فراتر رود که در نتیجه باعث انسداد شبکه و فرسایش ظرفیت سامانه‌های حمل‌ونقل می‌گردد. از آنجایی که شبکه‌ی حمل‌ونقل وظیفه‌ی تخلیه‌ی افراد زیادی را به‌عهده دارد؛ این تراکم جمعیت بالا باعث پیچیده شدن مسئله می‌گردد [۵]. مدل‌های ریاضی برای حل مسائل تخلیه در قالب مدل‌های استاتیک، مدل‌های دینامیک، مدل‌های تخصیص ترافیک و مدل‌های شبیه‌سازی جریان در شبکه طبقه‌بندی می‌شوند. مدل‌های شبکه‌ی پویا از جمله شاخص‌ترین مدل‌های برنامه‌ریزی تخلیه می‌باشند [۶]. فورد و فالکرسون با توسعه‌ی رویکرد تکرار موقتی امکان حل برخی نمونه‌های مساله‌ی بیشینه جریان پویا را در قالب مساله‌ی کمینه سازی هزینه میسّر نمودند [۷]. ناصری و موسوی (۲۰۱۲) مدلی برای مدیریت بهینه‌ی تخصیص ترافیک ر مناطق مرکزی شهرها ارائه دادند. [۸]. کوتنی‌یک نیز مروری مشروح بر مسئله بیشینه جریان ارائه کرد [۹]. هوپ و تاردوس برخی از الگوریتم‌های زمانی چند جمله‌ای در مساله‌ی تخلیه را مرور نمودند [۱۰].

مساله‌ی بیشینه‌ی جریان شبکه به‌طور گسترده در برنامه‌ریزی منطقه‌ای تخلیه وسایل نقلیه مورد استفاده قرار گرفته است. آهوجا و همکاران، کاربردهای مختلف مساله‌ی جریان شبکه را مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. با استناد به این بررسی‌ها می‌توان یکی از کاربردهای اصلی و کلاسیک بهینه‌سازی شبکه را، مساله‌ی مسیریابی و برنامه‌ریزی تخلیه‌ی شبکه دانست [۱۲]. روش دیگری که برای برنامه‌ریزی در مسئله تخلیه کاربرد دارد؛ برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح است. جانسون مدلی را در راستای مسئله کمینه هزینه‌ی جریان پیشنهاد کرد. این مدل با دو هدف ارائه شد. نخست، تعیین مسیر خودروها به نزدیک ترین محل امن، و دوم به حداقل رساندن امکان برخورد جریان‌های عبوری در تقاطع‌ها [۱۳]. هوانگ و همکاران نیز، روشی برای مسیریابی با ظرفیت محدود را برای برنامه‌ریزی تخلیه ارائه کردند. در این مطالعه، ظرفیت به عنوان یک سری زمانی مدلسازی شده و روش مسیریابی با ظرفیت

محدود برای حل مساله‌ی تخلیه مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴]. همچر و همکاران، پژوهشی را برای تحلیل و مقایسه‌ی نسبی انواع مختلف سفرهای تولید شده در فرآیند تخلیه‌ی ترافیک انجام دادند [۱۵]. همچنین لی و همکاران یک مدل تخلیه در حجم انبوه بدون اطلاع و هشدار قبلی را با استفاده از بهینه سازی جریان دینامیک ترافیک ایجاد کردند [۱۶]. لازم به توضیح است که منظور از تخلیه انبوه بدون هشدار قبلی، تخلیه‌ی شهروندان و وسایل نقلیه بلافاصله پس از وقوع حادثه (در بحرانی‌ترین و حساس‌ترین شرایط) می‌باشد [۱۷]. یکی از بخش‌های اصلیِ این پژوهش، تحلیل روند جریان متغیر تخلیه نسبت به زمان برای مسیرهای تخلیه می‌باشد. بدیهیست با در نظر گرفتن این ویژگی، ارائه‌ی مدل و راه حل دارای پیچیدگی بیشتری خواهد بود. در نگاه کلی، مدلسازی بوسیله‌ی جریان تخلیه‌ی ثابت و پایدار بسیار آسان‌تر است. به عنوان مثال، واضح است که اکثر وسایل نقلیه حین تخلیه‌ی یک منطقه از معابر و مسیرهای شریانی و بزرگراهی استفاده می‌کنند. با فرض نرخ ثابت جریان، می‌توان به راحتی تعداد وسایل نقلیه‌ی ورودی به بزرگراه‌ها و مسیرهای اصلی را کنترل و برآورد نمود که این فرآیند، امری ساده بنظر می‌رسد. بنابراین، بر مبنای این فرض، می‌توان یک چارچوب ریاضی را برای تخلیه انبوه وسایل نقلیه بدون هشدار قبلی و با استفاده از نرخ ثابت جریان مورد مطالعه قرار داد. از این‌رو سعی بر این است تا با ایجاد مدلی بهینه بتوان روش مناسبی را در کوتاهترین زمان برای مدیریت مساله‌ی تخلیه جریان در شبکه فراهم نمود. اگر فرض گردد که اطلاعات مناسبی درباره‌ی ظرفیت و خصوصیات شبکه و مسیرهای تخلیه و تعداد وسایل نقلیه و حجم ترافیکِ قابل پیش‌بینی حین وقوع بحران در هر منطقه (بویژه مناطقی که به سبب وجود کاربری‌های پرتقاضا، جذب سفر بالا و تراکم تردد در معابر دارند و مناطقی که در برابر زلزله آسیب پذیریِ بیشتری دارند) وجود دارد، آنگاه می‌توان براساس آن، فرآیند تخلیه را با برنامه‌ریزی زمان‌ها و مسیرهای شبکه با استفاده از بهینه‌سازی تسهیل نمود [۱۸].

۳- تعاریف و اصطلاحات

در این بخش، عناصر و اجزای مهم و شاخص در چارچوب این مطالعه و همچنین پارامترهای مورد استفاده در مدل معرفی و تبیین می‌گردند. بدیهی است که شناخت موضوعات و پارامترهای موثر در موضوعِ مورد بحث، به چیدمان بهینه و دقیق مدل پیشنهادی در این پژوهش کمک می‌کند.

۳-۱- وضعیت اضطراری

بیانگر شرایطی است که امکان دارد به‌دلیل وقوع برخی پدیده‌ها مانند بلایای طبیعی، منجر به تغییر برخی عملکردهای عادی در یک دورهٔ زمانی گردد. ماهیت وضعیت اضطراری بر واکنش حمل‌ونقل تأثیر می‌گذارد. عامل مهم این است که آیا پیش از وقوع حادثه، پیش اخطاری وجود دارد یا خیر. آن دسته از حوادث اضطراری که به ندرت و بدون هشدار رخ می‌دهند، معمولا برای انتقال تجهیزات و امدادگران، نیاز به انعطاف‌پذیری و تصمیم‌گیری آنی دارند. این حوادث همچنین به توانایی ارتباطی بی‌درنگ و سامانه-های فراوان نیاز دارند. در وضعیتهای اضطراری با اخطار قبلی متصدیان حمل‌ونقل وقت بیشتری برای بسیج نیرو دارند و در زمینه تأمین خدمات مورد نیاز از تجربه و تسلط کافی برخوردار هستند. با این وجود حتی در این نوع شرایط نیز ابهاماتی وجود دارد. معمولا تصمیم در مورد تخلیه باید قبل از وقوع حادثه مشخص گردد. ممکن است تعداد تخلیه شوندگان توجه به وسعت و شدت حادثه، بسیار متفاوت باشد [۱۹]. نوع وضعیت اضطراری خاص نیز بر واکنش سامانهٔ حمل ونقل تأثیر می‌گذارد. در برخی حوادث، ممکن است کارکنان بخش حمل‌ونقل تمایل کمتری به همکاری نشان دهند. بعن.ان مثال در تهدیدات بیولوژیکی و یا هسته‌ای، اگر برای کمک به تخلیهٔ منطقه بحران زده نیاز به اتوبوس باشد آنگاه شناسایی و رسیدگی به افرادی که در معرض بارش مواد هسته ای یا بیولوژیکی یا شیمیایی قرار گرفته‌اند مستلزم همکاری ویژه با کارشناسان مواد خطرناک و نیز نیازمند آموزش و تخصص است که احتمالا تعداد اندکی از کارکنان حمل ونقل واجد آن هستند. هنگام وقوع توفان یا سیل، این نگرانی ها وجود ندارد ولی ممکن است تجهیزات مورد نیاز به یک مشکل تبدیل گردد، به عنوان مثال، سیل می‌تواند کارایی وسایل نقلیه را مختل و عبور از

مسیرها را غیرممکن سازد [۲۰]. شدت، زمان و استمرار یک حادثه نیز از عوامل مهم تأثیرگذار بر واکنش حمل ونقل می‌باشد. در وضعیت‌های اضطراری محلی برای ادامه خدمات حمل‌ونقل، به جابه‌جایی کمتر افراد و تجهیزات نیاز می‌باشد و در مقام مقایسه، حادثه‌ای که بر منطقه وسیع‌تری تأثیر می‌گذارد و به خدمات متنوع‌تری نیاز دارد و شاید به هماهنگی بین چندین متصدی حمل-ونقل در تأمین خدمات مکفی و کمک به هر نوع تخلیه نیاز داشته باشد. زمان و استمرار حادثه نیز حائز اهمیت است. زیرا تمهیدات جابه‌جایی و محدودیت‌های کاری ممکنست بر دسترسی به ارائه‌دهندگان خدمات و کیفیت ارائه آن تأثیر بگذارد و یا در حادثه‌ای که نیاز به تخلیه طولانی دارد، سوخت‌گیری و نگهداری خودروهای سامانه حمل‌ونقل نیز می‌تواند به مشکلی دیگر تبدیل شود [۱۹].

۳-۲- مدیریت بحران

فرآیند برنامه‌ریزی، عملکرد و اقدامات اجرائی است که توسط دستگاه‌های دولتی، غیردولتی و عمومی پیرامون شناخت و کاهش سطح مخاطرات (مدیریت خطرپذیری) و مدیریت عملیات مقابله و بازسازی و بازتوانی منطقه آسیب‌دیده صورت می‌پذیرد. در این فرآیند با مشاهده پیش نشانگرها و تجزیه و تحلیل آنها و منابع اطلاعاتی در دسترس تلاش می‌شود به صورت یکپارچه، جامع و هماهنگ با استفاده از ابزارهای موجود از بحرانها پیشگیری نموده یا در صورت بروز آنها با آمادگی لازم در جهت کاهش خسارات جانی و مالی به مقابله سریع پرداخته تا شرایط به وضعیت عادی بازگردد [۲].

۳-۳- ویژگی های رفتاری

منظور از ویژگی‌های رفتاری، الگوها و نحوهٔ مواجههٔ مردم با اتفاقات و تغییرات محتمل در سیستم می‌باشد. آمادگی مردم و نیز تجربه قبلی آنها در حوادث گذشته می‌تواند بر تمایل آنها به تخلیه و استفاده از سامانه حمل‌ونقل تأثیر بگذارد [۱۹]. ساکنان مناطق مستعد وزش تندباد، و مناطق آسیب پذیر در برابر سیل و یا سرزمین‌های لرزه‌خیز، تجربهٔ کافی در زمینهٔ تخلیه و در برخی موارد در زمینه حمل‌ونقل داشته‌اند که این امر باعث می‌گردد مدیریت بر حوادث آتی آسان‌تر گردد. با این وجود بیشترین نگرانی در این حوزه، ناشی از عدم همدلی بین ساکنان آسیب پذیر و احتمال تقاضای زیاد برای جابه‌جایی از طریق سامانه حمل‌ونقل در تخلیه اضطراری است.

۳-۴- منابع

منابع شامل حوزه‌های فناوری، سازمانی و بودجه‌ای می‌شود. وسعت منابع موجود هم قبل و هم حین تخلیه اضطراری می‌تواند بر استفاده موفقیت آمیز از حمل‌ونقل اثر بگذارد. به عنوان مثال، فناوری می‌تواند در مدیریت تخلیه اضطراری، مفید واقع گردد. بسیاری از مناطق شهری دارای مراکز مدیریت حمل‌ونقل می‌باشند که جریان ترافیک و تصادفات جاده ها را پایش می‌نماید. هنگام عملیات تخلیه، این مراکز را می‌توان با مراکز عملیات اضطراری جهت کمک به تامین اطلاعات بی‌درنگ در مورد حرکت وسایل مسافربری و اتوبوس‌ها و شناسایی نقاط گره ترافیکی متصل نمود. با این وجود، دسترسی به بسیاری از این سامانه‌ها محدود می‌باشد و تا حومه یا مناطق و یا مناطق خارج از حومه شهر که ممکن است شامل عملیات تخلیه منطقه‌ای گردند، امتداد نمی‌یابند [۵]. از دیگر مسائل مهم در توسعه طرح‌ها و توافق‌های کاری در تخلیه اضطراری، منابع طرح‌ریزی اضطراری به ویژه انسجام گروه‌هایی است که معمولا با یکدیگر کار نمی‌کنند مانند آنچه در بسیاری از سازمان های حمل‌ونقل و طراحان مقابله با وضعیت اضطراری دیده می‌شود. تأمین بودجه و شرکت در تمرینات توسط سازمان‌های حمل ونقل و سایر سازمان‌های مربوطه نیز باید به شناسایی کمبودهای طرح‌ریزی کمک نماید.

۳-۵- سامانهٔ حمل و نقل عمومی

مصداق از شبکهٔ حمل‌ونقل عمومی، خدماتی در این حوزه می‌باشد که در دسترس عموم شهروندان قرار می‌گیرد. ویژگی‌های سامانهٔ حمل‌ونقل بر ظرفیت واکنش به وضعیت اضطراری و شرکت در عملیات تخلیه تاثیر می‌گذارد. در مناطق شهری که دارای سامانه و خدمات بزرگ حمل‌و نقل هستند، احتمالاً حمل‌ونقل نقش مهمی را در عملیات تخلیه ایفا می‌کند. با این وجود، واکنش مناسب به وضعیت اضطراری و تأمین نیازهای فراوان، مستلزم اقداماتی فراتر از ظرفیت می‌باشد. ترکیب انواع و انعطاف‌پذیری سامانه حمل-ونقل بر چگونگی واکنش سریع و مؤثر در تخلیه اضطراری نیز تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، وجود شبکهٔ گستردهٔ ریلی با ارتباط سامانه‌ای مناسب در برخی مناطق شهری، هنگام تخلیه اضطراری دارایی مهمی به‌شمار می‌آید؛ زیرا به این وسیله می‌توان بسیاری از مسافران را به سرعت از محل حادثه دور نمود. اتوبوس نیز دارای نقش مهمی در جابه جایی مستقیم مسافران ریلی از ایستگاه-های حمل ونقل به پناهگاه‌های ویژه وضعیت اضطراری یا سایر محل‌های مورد نظر می‌باشد. در ضمن، اتوبوس‌ها می‌توانند روش انعطاف پذیرتر دسترسی به مسافرانی را که نزدیک ایستگاه راه آهن زندگی می‌کنند یا ممکن است به هنگام تخلیه نیاز به کمک داشته باشند، فراهم آورد. وضعیت و ظرفیت سامانه‌های حمل‌ونقل نیز از عوامل مهم محسوب می‌شوند. اگر تجهیزات حمل ونقل دچار آسیب گردند و یا خراب باشند، ممکنست کار خدمات رسانی به دفعات دچار اختلال گردد، آنگاه این فرض که حمل‌ونقل بتواند واکنش سریع و قابل اعتماد را حین تخلیه اضطراری نشان دهد (به ویژه در حوادث بدون اطلاع قبلی) زیر سؤال می‌رود. اقدامات و زیرساخت‌های اضافی جهت تکمیل ظرفیت حمل‌ونقل با سایر انواع وسایل حمل‌ونقل عمومی و خصوصی نیز می‌توانند به تأمین‌کنندگان حمل‌ونقل در پاسخ به نیازهای شدید خودرویی کمک نمایند. یادآوری می‌گردد که ظرفیت حمل ونقل در کمک به تخلیه اضطراری به یکپارچگی خود سامانه در حین حادثه و نیز ایمنی کارکنان و تجهیزات بستگی دارد. بروز مشکل در هر یک از این زمینه ها ممکن است به کاهش سطح خدمات نیاز داشته باشد [۳].

۳-۶- شبکه معابر

مجموعه‌ای است که برای عبور و مرور وسایل نقلیهٔ موتوری، دوچرخه و پیاده، طراحی و ساخته می‌شود. از نظر نحوهٔ تعیین مشخصات هندسی و تعریف نقش‌های مختلفِ عملکردی، معابر در گروه‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. شبکهٔ حمل‌ونقل متشکل از مجموعهٔ کمان‌ها (معابر) و گره‌هایی (تقاطع‌ها) است که فرآیند جابجایی وسایل نقلیه را میسر می‌سازد [۲۱]. مجموعهٔ معابر شهری به‌عنوان زیرساخت و بستر حمل‌ونقل، از اهمیت استراتژیک و ویژه‌ای برخوردار است. این نقش برجسته و مهم در تخلیهٔ اضطراری و دسترسی به مناطق مختلف در شرایط خاص نیز به‌وضوح قابل تشخیص است [۳]. شناسایی و پیاده سازی شبکه به‌صورت کمان‌ها و گره‌های ارتباطی و تفکیک مناطق مختلف به نواحی امن و نواحی متاثر از بحران و تعریف الگوهای رفتاری رانندگان در شرایط اضطراری برای خروج از مناطق آسیب دیده به‌سوی مراکز امن و در نهایت تخصیص ترافیک و تحلیل بار ترافیکی شبکه (کمان‌ها و گره‌ها) در قالب پروسهٔ مسیریابی تخلیهٔ اضطراری طرح و تدوین می‌گردد. در این پژوهش نیز روند تعریف و تدوین الگوریتم پیشنهادی، بر مبنای مطالعه و تحلیل شبکه و تعریف کمان‌ها و گره‌های امن و متاثر از بحران شکل می‌گیرد. بر این اساس اولین گام در جهت تدوین روش پیشنهادی، با معرفی پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم صورت می‌گیرد. در این مطالعه، N_d و N_s به ترتیب نماد مجموعه‌ای از همه گره‌های اثر و گره‌های ایمن می‌باشند. مجموعهٔ همه گره‌ها را نیز با $N = (N_d \ U \ N_s)$ نشان داده می‌شود. A مجموعه‌ای از همه کمان‌ها در شبکه است و t_i و s_i به‌ترتیب زمان اثر در گره i و تعداد اولیهٔ تخلیه کنندگان واقع در گره i است. UN_i حداکثر تعداد تخلیه کنندگانی است که می‌توانند در هر دوره زمانی در گره i حضور یابند. tr_{ij} زمان رفت و آمد در مسیر ارتباطی بین گره i و گره j است و $tr_{ii} = 1$. همچنین UA_{ij} حداکثر تعداد تخلیه کنندگانی است که می‌توانند در هر دوره زمانی وارد قوس (i, j) شوند. $i \in N$ گره، نشانگر منطقه‌ای است که شامل گره اثر و گره ایمن می-باشد و $(i, j) \in A$ کمان، نشان دهندهٔ مسیر ارتباطی بین گره i و گره j است.

۴- روش شناسی پژوهش

پس از تبیین ضرورت و کلیّتِ تحقیق، قبل از تعریف مدل پیشنهادی در این بخش ، پارامترهای مورد استفاده در مدل معرفی و فرضیه های مورد استفاده در این مطالعه ارائه می‌گردد. در ابتدا بهتر است برای پرهیز از پیچیدگیِ مسئله، بررسیِ تخلیهٔ اضطراری شبکهٔ حمل و نقل در قالب یک شبکهٔ ایستا در نظر گرفته شود [۲۲]. شبکه‌ی $G=(N,A)$ که در آن N مجموعه‌ی گره‌ها و A مجموعه‌ی کمان‌های شبکه است. بخاطر ماهیت مسئله تخلیه، مجموعه‌ای از گروه‌های N در دو زیرمجموعه تقسیم می‌شود: N_d (گره های اثر) و N_s (گره های امن). گروه اوّل شامل همه گره‌هایی است که به علّت آسیب‌پذیر بودن بافت منطقه و نوع کاربری‌ها (عمدتاً پر جمعیّت) و فاصله و موقعیتِ استقرار کاربری‌ها نسبت به کانون بحران و همچنین میزان تخریب و آسیب ناشی از وقوع زمین‌لرزه، به عنوان مناطق تخلیه درنظر گرفته شده‌اند. گروه دوّم نیز شامل تمام گره‌های امنی است در کانون آسیب و بحران و تجمع (در لحظات اولیه‌ی وقوع بحران) قرار ندارند اما مردم در هنگام تخلیّه سعی دارند به سمت آنها حرکت و از آنها استفاده کنند. لازم به توضیح است که منظور از گره‌ها، تقاطع‌ها و یا مراکز ثقل می‌باشد؛ مراکز ثقل گره‌هایی با منابع مثبت هستند در حالی‌که تقاطع‌ها، منابع در اختیار ندارند [۲۳]. علاوه بر این، پارامتر t، بعنوان زمان اثر گره i اُم به گره‌های شبکه اضافه می‌گردد. این پارامتر به عنوان زمانی تعریف می‌شود که برای افراد گره i اُم در دسترس می‌باشد تا بتوانند در زمان تأثیر پیش بینی شده‌ی بحران در منطقه، تخلیه گردند. با این فرض، زمان اثر برای یک گره امن را می‌توان برابر با بی‌نهایت درنظر گرفت؛ زیرا بنا به تعریفِ این گره‌ها، به نظر نمی‌آید که گره‌های بی‌خطر تحت تأثیر مستقیم و مخرّب بحران قرار گیرند.

شبکه‌های تخلیه معمولاً بزرگ هستند و محدوده‌ی وسیعی را در بر می‌گیرند [۱۸]. با اضافه نمودن زمان به مسئله‌ی بهینه‌سازی، مدلِ مربوط به این مسئله دچار پیچیدگی و وسعت بسیاری می‌شود که الگوریتم‌های چندجمله‌ایِ شناخته شده برای حل آن کفایت نمی‌کنند. علاوه بر آن، در صورتی‌که مدل، عوامل دیگری بعنوان پارامترهای تاثرگذار بر عملکرد تخلیه در برگیرد؛ مسائل به مراتب پیچیده‌تر می‌شوند. چنین عواملی ممکن است شامل رفتارهای نامشخص و متغیّرِ افراد برای تخلیه حین و پس از وقوع بحران، در دسترس بودن منابع به منظور تخلیه، زمان‌های نامعلوم سفر (بویژه تابع شرایط اضطراری)، رفتار نامشخص مسیر از لحاظ سطح سرویس، تحت اثر تراکم و شدت وقوع زمین‌لرزه، به عنوان بخشی از ویژگیهای شبکه باشند [۲۴]. بنابراین برای تعریف چارچوب ساختاریِ مدل، فرضیه‌های ذیل تبیین حدود عملکرد مسالهٔ مورد نظر در این مقاله شکل می‌گیرند.

الف- رفتار افراد (رانندگان وسایل نقلیه) حین تخلیه و محدودیت‌های تخلیه‌کنندگان برای تخلیهٔ اضطراری، در نظر گرفته نشده است؛ در واقعیّت نیز چنین است، یعنی در عمل نمی‌توان رفتار افراد را در موقع تخلیه و در شرایط اضطراری پیش‌بینی نمود. برخی از افراد ممکن است بلافاصله تصمیم به خروج از منطقه بگیرند، برخی دیگر از وسایل نقلیّه ممکن است بعللی، منطبق با الگوهای رفتاری عمل ننمایند و یا از دستورالعمل‌های تخلیهٔ ارائه شده توسط سامانه‌های مدیریت منطقه‌ای پیروی نکنند. در واقع تعریف الگوی واحد و گنجاندن جنبهٔ رفتاری و روانی تخلیه در مدل دشوار می‌باشد. بنابراین، در از آن صرفنظر می‌گردد.

ب- قدرت زلزله و تاثیر و تخریب متوسّط آن؛ ماهیت دینامیکی انتشار زمین‌لرزه و خصوصیات فنّی آن مانند عمق و مدّت زمان اثر در نظر گرفته نشده است. بنابراین، فرض بر این خواهد بود که زمین‌لرزه، با شدّت‌های شناخته شده و میزان وسعت و تاثیرِ مخرّبِ قابل پیش‌بینی، (مانند شرایطی از بحران که در موارد مشابه و مناطق و شبکه‌های دیگر بدست آمده است) بوقوع می‌پیوندد.

ج- زمان تردّد: زمان جابجایی در هر کمان از شبکه ثابت فرض می‌گردد. به بیان دیگر، تغییرات زمان تردّد و تاخیر ناشی از تراکم و ازدحام در شبکهٔ حمل‌ونقل در این روند در نظر گرفته نمی‌شود.

د- تعریف محدودهٔ تخلیهٔ اضطراری: گره‌های اثرپذیر در شبکه، براساس فاصله از کانون اصلی بحران و میزان ازدحام وسایل نقلیّه، در مناطق مختلف طبقه‌بندی می‌شوند؛ به‌طوری که افرادی که نزدیک به منطقهٔ تخریب حضور دارند، دارای اولویّت بالایی برای تخلیه خواهند بود. تعداد مناطق تخلیه، به اندازهٔ شبکه و تعداد گره‌ها در شبکه بستگی دارد.

۵- ایجاد شبکه پویا

از آنجا که ماهیت مسایل مربوط به تخلیه‌ی شبکه، پویا و دینامیک می‌باشد؛ ایجاد شبکه‌ای پویا[1] بر اساس توسعه‌ی شبکه‌ای ایستا[2] در طول افق برنامه‌ریزی برای هر بازه‌ی زمانی مدّنظر خواهد بود [۲۵]. این شبکه‌ها، در دهه‌ی پنجاه توسط فورد و فالکرسون[3] معرفی شدند. محققین الگوریتمی محاسباتی را برای به بیشینه سازی جریان از گره مبدا[4] به گره مقصد[5] در یک شبکه و در دوره‌ی زمانی معیّنِ T معرفی نمودند. بر مبنای این روش، تا جایی که راهی از مبدا به مقصد با کمان وزن‌دار وجود دارد، می‌توان جریان را از یکی از این مسیرها عبور داد. سپس مسیر دیگری پیدا می‌شود و همین طور الگوریتم ادامه پیدا می‌کند [۲۶]. در ادامه به‌اختصار به توضیح این الگوریتم می‌پردازیم. در یک گراف $G=(N, A)$ برای یک کمان از i به j ظرفیت $U(i, j)$ و جریان $\delta(i, j)$ در نظر گرفته می‌شود. هدف، یافتن جریان بیشینه از مبدا به مقصد است. برای تحقق این هدف سه شرط مطرح می‌گردد:

$$\begin{aligned}
&\forall (i,j)\in E \quad \delta(i,j)\le U(i,j)\\
&\forall (i,j)\in E \quad \delta(i,j)=-f(i,j)\\
&\forall i\in N: i\neq source \quad and \quad i\neq sink \rightarrow \sum \delta(i,j)=0 \leftrightarrow \delta_{in}(i)=\delta_{out}(i)
\end{aligned} \qquad (۱)$$

این بدین معنی است که جریان از i به j از ظرفیت کمان بیشتر نمی‌شود و شبکه، جریان بین i و j را کنترل می‌کند و همچنین به ازای گره‌هایی به‌جز مبدا و مقصد، مقدار جریان ورودی گره برابر جریان خروجی گره است. در صورت برقراری این سه شرط، شبکه دارای جریان مجاز بعد از هر مرحله خواهد بود. شبکه پسماند نیز بر اساس محاسبه‌ی ظرفیت، این‌گونه تعریف می‌گردد:

$$c_{\delta}(i,j)=c(i,j)-\delta(i,j) \qquad (۲)$$

الگوریتم جریان بیشینه به‌صورت زیر است:

جدول۱. الگوریتم Ford–Fulkerson برای مسئله جریان بیشینه.

Ford and Fulkerson Algorithm
Input: *Graph G with flow capacity U, a source node and sink node.* **Output:** *A flow f from source to sink, which is a maximum.* 1: $\delta(i,j)\rightarrow 0$ *for all edges(i,j)* 2: **While** *there is a path A from source to sink in* G_{δ} *such that* $U_{\delta}(i,j)>0$ *for all edges* $(i,j)\in A$*:* 3: **Find** $U_{\delta}(A)=min\{U_{\delta}(i,j): (i,j)\in A\}$ 4: **for** *each edge* $(i,j)\in A$ 5: $\delta(i,j)\rightarrow \delta(i,j)+U_{\delta}(A)$*(Send flow along the path)* 6: $\delta(i,j)\rightarrow \delta(i,j)-U_{\delta}(A)$*(The flow might be returned later)* 7: **end**

[1] Dynamic Network
[2] Static Network
[3] Ford & Fulkerson
[4] Source
[5] Sink

زمان اجرای این الگوریتم به انتخاب مسیر A بستگی دارد. با انتخاب نامناسب مسیر، ممکن است الگوریتم خاتمه نیابد زیرا مقدار جریان با تکمیل پیاپی افزایش یافته و بیشینه خواهد شد. در این مطالعه نیز برای شبکه‌ی گسترش یافته زمانی، همین روش انتخاب شده، یعنی همه‌ی گره‌ها و کمان‌های شبکه‌ی ایستا در هر دوره‌ی زمانی تکرار شدند. کمان‌های موجود، کمان‌های حرکتی نامیده می‌شوند که بعنوان کمان‌هایی که جریان را بین گره‌ها در یک دوره‌ی زمانی برقرار می‌کنند تعریف می‌گردند. همچنین کمان‌های نگهدارنده‌ای برای هر گره تعریف می‌گردد که جریان را برای یک دوره‌ی زمانی در آن گره نگه می‌دارد. کمان‌های نگهدارنده معمولا نشان‌دهنده‌ی دوره‌ی انتظار در گره‌ها هستند.

حال بر اساس روند مطالعات ، می‌توان پارامترهای تعریف شده و کاربردی را با هدف ایجاد شبکه با زمان صرف شده [6] تغییر داده و اصلاح نمود. بر این مبنا، $G^T= (N^T, A^T)$ یک شبکه با زمان صرف شده از شبکه‌ی ایستای $G =(N.A)$ را در افق زمانیِ برنامه‌ریزی تخلیه، T، نشان می‌دهد که $N^T =\{i_t|i \in N;\ t =1, \dots , T\}$ مجموعه‌ای از گره‌ها در شبکه با زمان صرف شده می‌باشد؛ $A_M =\{(i_t,j_{t+trij})|\ (i,j) \in A;\ t + tr_{ij} \le T;\ t=1, \dots , T\}$ مجموعه‌ای از همه‌ی کمانهای حرکتی است و همچنین $A_H =\{(i_t, i_{t+1})|i \in N;\ t =1, \dots , T -1\}$ مجموعه‌ای از یال‌های نگهدارنده می‌باشد. بنابراین، مجموعه‌ی یال‌ها در شبکه با زمان صرف شده، اتحاد دو مجموعه یال می‌باشد؛ یعنی $A^T = \{A_M \cup A_H\}$. علاوه براین، $U_{a,b}$ بعنوان ظرفیت یال (a, b)، در شبکه با زمان صرف شده به صورت زیر بیان می‌شود.

بخشی از ظرفیّت که بعنوان گنجایشِ کمان (i,j)، بصورت UA_{ij} ، با فرضِ $(a,b)\in A_M$ و $a=i_t$ و $b=j_{t+trij}$ به ازای $t\in\{1, \dots , T\}$ درنظر گرفته می‌شود. (حداکثر تعداد تخلیه کننده‌هایی که می‌توانند در هر دوره‌ی زمانی وارد کمان (i,j) شوند.) بخش دیگرِ ظرفیت نیز مربوط به گنجایش هر گره در پذیرش و تخلیه بصورت UN_i، با فرضِ $(a,b)\in A_H$ و $a=i_t$ و $b=j_{t+1}$ به ازای $t\in\{1, \dots , T-1\}$ است. (حداکثر تعداد تخلیه کننده‌هایی که می‌توانند در هر دوره‌ی زمانی در گره i واقع شوند.)

این نکته قابل توجّه است که جریان در کمان (i,j) (با فرض این کمان بعنوان یال حرکتی در گره i و در زمان t) دارای محدودیت ظرفیتی (UA_{ij}) خواهد بود. در صورتی‌که یال، کمانی نگهدارنده باشد، بعنوان یک کمان فرضی تعریف می‌شود که نشان‌دهنده‌ی میزان عرضه در گره از زمان t تا $t+1$ می‌باشد. بنابراین، جریان در چنین یالی (i_t , i_{t+1}) که با محدودیّت ظرفیتی در زمان t، UN_i مواجه خواهد بود. علاوه بر این، باید در نظر داشت که دو گره فرضیِ J^* (گره بسیار ایمن)، و J' (گره ناایمن) به G^T افزوده می شوند. پس با این فرض، هر گره ایمن i_t، به ازای $\forall\ i \in N_s$، برای هر $t=1,\dots,T$، در G^T از طریق کمان (i_t,J^*) ، $\forall i\in N_s$ با ظرفیت $U_{it,j}{}^*=UN_{it}$ به گره J^* مرتبط می‌شود و همچنین گره i_1 ، به ازای $\forall i\in N_d$، در G^T از طریق کمان (i_1,J')، $\forall i\in N_d$ با ظرفیت $U_{i1,J'}=b_{i1}$ به گره J' مرتبط می‌شود. گره بسیار ایمن، مقصد نهایی است که برای خروج همه‌ی تخلیه کنندگان فرض می‌گردد؛ در حالی‌که گره ناایمن به‌عنوان محل موقّت و پناهگاهی برای کسانی که نمی‌توانند تخلیه گردند در نظر گرفته می‌شود.

بعلّت وسعت زیاد شبکه با زمان صرف شده بویژه برای مسائلِ با مقیاس بزرگ، معمولا سعی بر این است که اندازه‌ی شبکه در صورت امکان کاهش یابد. از آنجا که زمان تخلیه‌ی وسایل نقلیه برابر با t_i در نظر گرفته می‌شود؛ گره مفروض i و یال‌های متّصل به آن نباید پس از زمان t_i در شبکه حاوی جریان باشند. بنابراین باید کمان‌های $(i_t, j_{t+trij}), \forall t$ در صورت برقراری رابطه‌ی $t + tr_{ij}\ge t_j$ از G^T و همچنین همه‌ی کمان‌های $(i_t, j_{t+trij}), \forall t$ حذف گردند؛ به طوری که $t\ge t_i$. چون گره i در زمان t_i به‌روز خواهد شد؛ همه‌ی گره‌های i_t $(\forall I \in N_d\ ,\ t \ge t_i)$ از G^T حذف می‌شود. علاوه براین، از آنجا که تقاطع ها هیچ جمعیّت و وسیله‌ی نقلیه‌ای را در خود نگه نمی‌دارند، همه یال‌های نگهدارنده‌ی مرتبط با یک گره تقاطع نیزحذف می‌گردند.

[6] Time-Expanded Network

۶- مدلسازی مساله

مدل پیشنهادی بهینه‌سازی جریان در این پژوهش، با استفاده از MCNFP[۷]، انتقال جریانِ مشخّصی بین مبدأ و مقصد را شکل می‌دهد؛ بصورتی‌که در آن، ظرفیّت کمان با سایر جریان‌های موجود در شبکه به اشتراک گذاشته می‌شود. مدل جریان شبکه‌ی چندگانه، برای تعیین مسیر مطلوب تخلیه و برنامه‌ریزی برای هر جریان در شبکه طراحی شده است. در موردِ مسئله‌ی مورد مطالعه در این تحقیق، هر محصول به عنوان یک مسیر تخلیه‌ی گره تعریف می‌شود. لازم به ذکر است که هر گره می‌تواند چند مسیر داشته باشد. در این روند، یک مسئله جریان شبکه چند محصولی با حداکثر جریان را ارائه می‌گردد که محدودیت‌های تعادلی و ظرفیتی را در نظر می‌گیرد. فرض می‌گردد که شبکه شامل R منطقه است که هر منطقه شامل زیرمجموعه‌ای از گره‌های اثر می‌باشد. هر گره اثر در منطقه $r\in\{1,...,R\}$ دارای یک یا چند محصول می‌باشد که از آن خارج می‌شود [۲۷].

با توجه تعریف محصول، متغیّرهای تصمیم‌گیری برای مدل بهینه سازی بصورت x_{itjk} و b_{ik} و y_{ijk} ارائه می‌شوند که منظور از x_{itjk}، تعداد وسایل نقلیّه‌ی تخلیه کننده‌ای است که گره i را در زمان t با محصول k به سمت گره j ترک می‌کنند و b_{ik} وسایل نقلیّه‌ای است که با انتخاب مسیر محصول k، گره i را ترک می‌کنند. همچنین y_{ijk} مقداری برابر با یک خواهد داشت در صورتی‌که کمان (i,j) متعلق به مسیر محصول k باشد؛ در غیر اینصورت مقدارِ y_{ijk} برابر با صفر خواهد بود.

در این روند، هدف بیشینه‌سازی جریان (تعداد وسایل نقلیّه تخلیه کننده) از مناطق R به مقاصد امن می‌باشد. بسته به ضرورت و اولویّت تخلیّه، وزن‌های متفاوتی برای هر منطقه اختصاص داده می‌شود. یعنی در این روند، منطقه‌ی r بعلّت اولویّتِ تخلیه در شرایط اضطراری، وزن بیشتری نسبت به سایر مناطق دارد و بیشترین وزن به منطقه‌ای که ابتدا باید تخلیه گردد اختصاص می‌یابد و بالعکس. با در نظر گرفتن $\delta(i)$ به‌عنوان مجموعه جریان ناشی از گره i، مدلِ ذیل برای بهینه سازی MCNFP ارائه می‌گردد:

$$
\begin{aligned}
&Maximize \quad z_{mcnfp} = \sum_{i\in N_s}\sum_{k}\sum_{t} x_{itj^*k}\times \hat{w}_k^r \\
&\sum_{k\in\delta(i)} b_{ik} = s_i \quad \forall i\in N \\
&\sum_{j\,|\,j=J' \text{ or } (i_t,j_{t+tr_{ij}})\in A_T} x_{itjk} = b_{ik}\ , \qquad \forall i\in N_d\ ,\ t=1\ ,\ \forall k \\
&\sum_{j\,|\,(i_t,j_{t+tr_{ij}})\in A_T} x_{itjk} = b_{ik}\ , \qquad \forall i\in N_s\ ,\ t=1\ ,\ \forall k \\
&\sum_{j\,|\,j=J^* or\ (i_t,j_{t+tr_{ij}})\in A_T} x_{itjk} - \sum_{j\,|\,(j_{t-tr_{ji}},i_t)\in A_T} x_{j(t-tr_{ji})ik} = 0 \qquad \forall i\in N\ ,\ t=2,...,T-1\ ,\ \forall k \qquad (۳)\\
&\sum_{k} x_{itjk} \le UA_{ij} \qquad \forall (i,j)\in A,\ t=1,...,T \\
&\sum_{k} x_{itik} \le UN_{ij} \qquad \forall i\in N,\ t=1,...,T \\
&\sum_{j\,|\,(i,j)\in A} y_{ijk} - \sum_{j\,|\,(j,i)\in A} y_{jik} = 1, \qquad \forall i\in N_d,\ \forall k,\ \ if\ \ i=source(k) \\
&\sum_{j\,|\,(i,j)\in A} y_{ijk} - \sum_{j\,|\,(j,i)\in A} y_{jik} = 0, \qquad \forall i\in N,\ \forall k,\ \ if\ \ i\neq source(k)\ or\ \ sink(k) \\
&\sum_{j\,|\,(i,j)\in A} y_{ijk} - \sum_{j\,|\,(j,i)\in A} y_{jik} = -1, \qquad \forall i\in N_s,\ \forall k,\ \ if\ \ i=sink(k)
\end{aligned}
$$

[7] Multi Commodity Network Flow Problem

$$x_{itjk} \le UA_{ij} \times y_{ijk}, \quad \forall (i,j) \in A, \quad t = 1,...,T, \quad \forall k$$
$$x_{itik} = 0, \quad if \ i \ne source(k), \quad t = 1,...,T, \quad \forall k$$
$$x_{itjk} \ge 0, \ y_{ijk} \in (0,1), \forall (i,j) \in A, \ t = 1,...,T, \quad \forall k$$
$$x_{itik} \ge 0, \ \forall i \in N, \ t = 1,...,T, \quad \forall k$$
$$x_{i1J^*k} \ge 0, \ \forall i \in N_d, \ \forall k$$
$$x_{itJ^*k} \ge 0, \ \forall i \in N_s, \ t = 1,...,T, \quad \forall k$$

برای کاستن از پیچیدگی محاسباتی حلّ مدلِ MCNFP ، الگوریتمی پیشنهاد می‌گردد که یک مسیر تخلیه برای هر گره ارائه می‌کند که جریان تخلیه را با نرخ ثابت در یک افق مشخّصِ برنامه ریزی و روندی بدون وقفه فراهم می‌کند. هدف از ارائه‌ی این الگوریتم، یافتن کوتاهترین مسیر تخلیه از هر گره اثر به منطقه امن و ارسال بیشینه‌ی جریان ممکن از طریق این مسیر می‌باشد. یک گره فرضیِ امن (d) با ظرفیت نامحدود، زمان بحرانیِ نامحدود و عرضه‌ی صفر به شبکه ایستا افزوده می‌شود. سپس همه‌ی گره‌های امن از طریق یال‌هایی با ظرفیت نامحدود و زمان تردد صفر به این گره فرضی امن متصل می‌شوند. این گره‌ها و یال‌های فرضی با استفاده از الگوریتم دیکسترا برای یافتن کوتاه‌ترین فاصله از گره اثر به نزدیک‌ترین گره امن مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۸]. با در نظر گرفتن کوتاه‌ترین مسیر، الگوریتم فورد - فالکرسون در شبکه با زمان صرف شده ، از این مسیر به منظور بدست آوردن حداکثر تعداد ممکن تخلیه کننده‌هایی که می‌توانند از طریق این کوتاه‌ترین مسیر را پیدا کنند استفاده می‌کند. اگر این مسیر ظرفیت کافی برای تخلیه‌ی همه وسایل نقلیه‌ی خروجی را نداشته باشد، دوّمین مسیر کوتاه ایجاد خواهد شد و این روند تا تخصیص ظرفیتِ مورد نیاز ادامه می‌یابد. [۲۹]. این روش، یک مسیر تخلیه را برای هر گره اثر و یک نرخ ثابت جریان را برای هر مسیر در نظر می‌گیرد. همچنین، جریان هر مسیر در فواصل زمانی ثابت می‌ماند و برنامه تخلیه طوری طراحی شده که تخلیه در یک زمان مشخص از یک گره آغاز شود و تا زمانی که همه‌ی تخلیه کننده‌ها به مناطق امن انتقال داده شوند ادامه می‌یابد.

۷- نتایج و بحث

مدل پیشنهادی بصورت مطالعه‌ی موردی بررسی و آزمایش گردید تا عملکرد آن قابلیّت تحلیل و ارزیابی داشته باشد. بدین منظور مسیرهایی متفاوت و تصادفی با پیکربندی‌ها و تنظیماتی مختلف تعریف شد تا مدل پیشنهادی مورد کنکاش قرار گیرد. برای آزمایش کارایی مدل، عملکرد آن در دو حوزه‌ی کوچک و متوسط (بر اساس تعداد گره‌ها و وسایل نقلیّه‌ی موجود در شبکه) تعریف و مورد ارزیابی قرار گرفت. ۱۲ شبکه‌ی کوچک با ترکیب مختلفی از تعداد گره‌ها و خودروها و همچنین ۱۰ شبکه‌ی متوسط با تعداد گره‌های مختلف و البته با تقاضای مشابه در نظر گرفته شد و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عددی مطالعه‌ی شبکه برای گروه‌های مختلف و پارامترهای مورد نظر استخراج شده است. زمان اجرای هر کدام از الگوریتم‌ها به ترتیب، بر اساس MCNFP و مدل پیشنهادی (P-M) در جدول‌های شماره (۲) و (۳) ارائه شده است. نتایج تخصیص در شبکه‌های کوچک در هر یک از روش‌ها بر اساس زمان اجرای هر مدل قابل ارزیابی است. همانطور که مشاهده می‌گردد در هردو مدل جریان و پیشنهادی، فرآیند تخلیه بصورت کامل صورت می‌گیرد. مطابق نتایج جدول‌های (۲) و (۳)، الگوریتم پیشنهادی سریع‌تر از روش دیگر اجرا می‌شود و این اختلاف زمانی در بیشتر موارد بویژه در شبکه متوسط و با افزایش گره‌ها و وسایل نقلیه بسیار چشمگیر است.

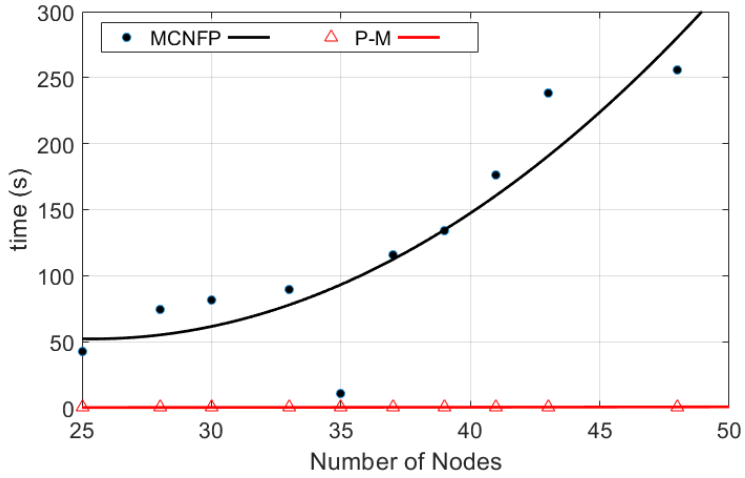
جدول۲. نتایج محاسباتی تخصیص بر اساس MCNFP.

ردیف	شبکه‌ی کوچک					شبکه‌ی متوسط				
	مسیر	تعداد گره‌ها	تعداد وسایل نقلیه	میزان تخلیه (درصد)	زمان (ثانیه)	مسیر	تعداد گره‌ها	تعداد وسایل نقلیه	میزان تخلیه (درصد)	زمان (ثانیه)
۱	A_1	۳	۱۳۲	۱۰۰	۰/۲۱	A_1	۲۵	۵۵۰	۱۰۰	۴۲/۵۱
۲	A_2	۵	۱۳۷	۱۰۰	۰/۲۱	A_2	۳۳	۵۵۰	۱۰۰	۸۹/۲۴
۳	A_3	۷	۱۴۳	۱۰۰	۰/۲۲	A_3	۳۵	۵۵۰	۱۰۰	۱۰۵/۴۲
۴	A_4	۸	۱۴۶	۱۰۰	۰/۲۲	A_4	۴۱	۵۵۰	۱۰۰	۱۷۶/۲۱
۵	A_5	۹	۱۵۰	۱۰۰	۰/۲۳	A_5	۳۰	۵۵۰	۱۰۰	۸۱/۳۷
۶	A_6	۹	۱۷۵	۱۰۰	۰/۲۴	A_6	۲۸	۵۵۰	۱۰۰	۷۴/۵۳
۷	A_7	۱۱	۲۰۳	۱۰۰	۰/۲۸	A_7	۳۷	۵۵۰	۱۰۰	۱۱۶/۱۲
۸	A_8	۱۱	۲۱۴	۱۰۰	۰/۳۱	A_8	۴۳	۵۵۰	۱۰۰	۲۳۸/۳۳
۹	A_9	۱۲	۲۱۹	۱۰۰	۰/۳۵	A_9	۳۹	۵۵۰	۱۰۰	۱۳۴/۱۷
۱۰	A_{10}	۱۲	۲۴۲	۱۰۰	۰/۳۶	A_{10}	۴۸	۵۵۰	-	-
۱۱	A_{11}	۱۴	۲۶۸	۱۰۰	۰/۳۹	-	-	-	-	-
۱۲	A_{12}	۱۴	۲۹۵	۱۰۰	۰/۴۱	-	-	-	-	-

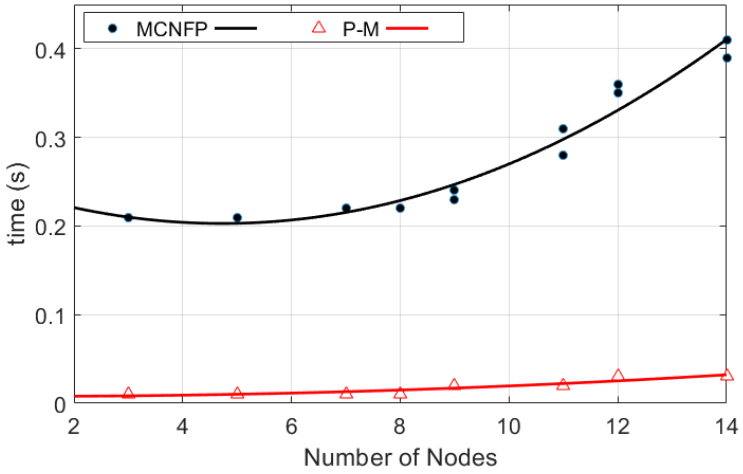
جدول۳. نتایج محاسباتی تخصیص بر اساس روش پیشنهادی (P-M).

ردیف	شبکه‌ی کوچک					شبکه‌ی متوسط				
	مسیر	تعداد گره‌ها	تعداد وسایل نقلیه	میزان تخلیه (درصد)	زمان (ثانیه)	مسیر	تعداد گره‌ها	تعداد وسایل نقلیه	میزان تخلیه (درصد)	زمان (ثانیه)
۱	A_1	۳	۱۳۲	۱۰۰	۰/۰۱	A_1	۲۵	۵۵۰	۱۰۰	۰/۱۵
۲	A_2	۵	۱۳۷	۱۰۰	۰/۰۱	A_2	۳۳	۵۵۰	۱۰۰	۰/۲۶
۳	A_3	۷	۱۴۳	۱۰۰	۰/۰۱	A_3	۳۵	۵۵۰	۱۰۰	۰/۲۸
۴	A_4	۸	۱۴۶	۱۰۰	۰/۰۱	A_4	۴۱	۵۵۰	۱۰۰	۰/۳۹
۵	A_5	۹	۱۵۰	۱۰۰	۰/۰۲	A_5	۳۰	۵۵۰	۱۰۰	۰/۲۴
۶	A_6	۹	۱۷۵	۱۰۰	۰/۰۲	A_6	۲۸	۵۵۰	۱۰۰	۰/۲۱
۷	A_7	۱۱	۲۰۳	۱۰۰	۰/۰۲	A_7	۳۷	۵۵۰	۱۰۰	۰/۳۱
۸	A_8	۱۱	۲۱۴	۱۰۰	۰/۰۲	A_8	۴۳	۵۵۰	۱۰۰	۰/۴۶
۹	A_9	۱۲	۲۱۹	۱۰۰	۰/۰۳	A_9	۳۹	۵۵۰	۱۰۰	۰/۳۶
۱۰	A_{10}	۱۲	۲۴۲	۱۰۰	۰/۰۳	A_{10}	۴۸	۵۵۰	۱۰۰	۰/۵۸
۱۱	A_{11}	۱۴	۲۶۸	۱۰۰	۰/۰۳	-	-	-	-	-
۱۲	A_{12}	۱۴	۲۹۵	۱۰۰	۰/۰۳	-	-	-	-	-

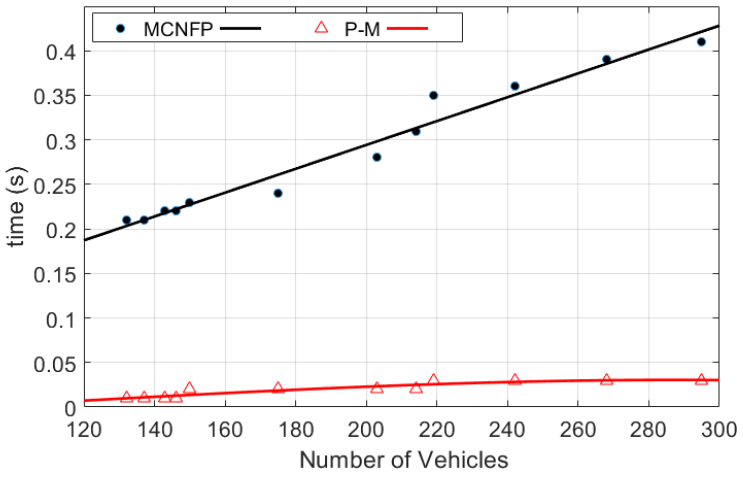
مطابق نتایج اجرای مدل که در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است؛ هم در آزمایش‌هایی که در مقیاس شبکه‌های کوچک طبقه‌بندی شد و هم آزمایش‌های مربوط به شبکه‌های متوسط، تخلیه‌ی شبکه به‌صورت کامل و صد در صد محقق شد. همانطور که در جدول‌ها مشاهده می‌گردد، زمان اجرای مدل با افزایش تعداد گره‌ها و به دنبال آن، پیچیدگی مسیریابی، افزایش می‌یابد. این امر در شبکه‌های کوچک و متوسط قابل مشاهده است. بررسی روند تغییرات زمان اجرای هر یک از الگوریتم‌ها نسبت به افزایش گره‌ها و وسایل نقلیه در شبکه‌های کوچک و متوسط در شکل‌های (۲) تا (۴) نیز قابل مشاهده می‌باشد.



شکل۲: روند تغییر زمان اجرای الگوریتم‌ها بر اساس اندازهٔ شبکه (تعداد گره‌ها) در شبکه‌ی متوسط.



شکل۳: روند تغییر زمان اجرای الگوریتم‌ها بر اساس اندازهٔ شبکه (تعداد گره‌ها) در شبکه‌ی کوچک.



شکل۴: روند تغییر زمان اجرای الگوریتم‌ها بر اساس تعداد وسایل نقلیه در شبکه‌ی کوچک

همانطور که در شکل‌های (۲) تا (۴) مشاهده می‌گردد؛ افزایش تعداد گره‌ها و وسایل نقلیه باعث رشد زمان اجرای مدل می‌گردد. روند افزایش زمان، در روش MCNFP بسیار محسوس‌تر است. این بدین معنیست که روش پیشنهادی در تحلیل و مسیریابی، با افزایش پارامترهای مرتبط با شبکه، عملکرد بسیار بهینه‌تری دارد. نکته‌ی دیگری که می‌توان به آن اشاره نمود؛ این است که در شبکه‌های کوچک علاوه بر گره‌ها، تعداد وسایل نقلیه‌ی موجود نیز بر زمان اجرا اثرگذار است. این اثر بخاطر محدودیت مشخصات و ظرفیت شبکه حائز اهمیت است؛ بدین معنی که در شبکه‌هایی که با گره‌های یکسان فرض گردیده‌اند، رشد تعداد وسایل نقلیه باعث افزایش زمان می‌گردد که مطابق نتایج، این اثر در روش MCNFP قابل مشاهده است. در کل، مشاهده می‌گردد که الگوریتم ابتکاری به طور قابل توجهی سریع‌تر از روش MCNFP تمام آزمایش‌ها را اجرا می‌کند. حتی در برخی موارد، افزایش سرعت اجرای روش ابتکاری (P-M) به ۹۹٪ می‌رسد و این الگوریتم در کمتر از یک ثانیه راه‌حل همه‌ی موارد را ارائه می‌نماید.

۸- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش روند تعریف و تدوینِ یک الگوریتم ابتکاری، بر مبنای مطالعه و تحلیل شبکه و تعریف کمان‌ها و گره‌های امن و متاثر از بحران شکل گرفت. مدل پیشنهادی بهینه‌سازی جریان در این پژوهش، با استفاده از MCNFP، یک مسیر تخلیه برای هر گره ارائه کرد که به‌وسیله‌ی یافتن کوتاهترین مسیر تخلیه از هر گره اثر به منطقه امن و ارسال بیشینه‌ی جریانِ ممکن، تخلیه را با نرخ ثابت در یک بازه و روند مشخّص و بدون وقفه فراهم می‌کند. مدل پیشنهادی، آزمایش و ارزیابی گردید و مسیرهایی متفاوت و تصادفی با پیکربندی‌ها و تنظیماتی مختلف بررسی شد. نتایج تخصیص در شبکه‌های کوچک و متوسط در هر یک از روش‌ها بر اساس زمان اجرای هر مدل قابل ارزیابی است:

۱- تخلیه در زمان مشخصی از یک گره آغاز شده و تا زمان انتقال تخلیه کننده‌ها به مناطق امن، ادامه می‌یابد.

۲- در مدل جریانِ پیشنهادی، فرآیند تخلیه به‌صورت کامل صورت می‌گیرد.

۳- در مقایسه‌ی روش پیشنهادی و MCNFP، الگوریتم پیشنهادی سریع‌تر از روش دیگر اجرا می‌شود.

۴- اختلاف زمانیِ دو روش در بیشتر موارد بویژه در شبکه متوسط، با افزایش گره‌ها و وسایل نقلیه چشمگیر است.

۵- زمان اجرای مدل با افزایش تعداد گره‌ها و به دنبال آن، پیچیدگی مسیریابی، افزایش می‌یابد.

۶- در شبکه‌های کوچک علاوه بر گره‌ها، تعداد وسایل نقلیه‌ی موجود نیز بر زمان اجرا اثرگذار است.

۷- زمان اجرای الگوریتم ابتکاری در تمام شبکه‌های کوچک و متوسط، حتی با افزایش تعداد گره‌ها و وسایل نقلیه، به‌طور قابل توجهی کمتر از روش MCNFP است.

۹- مراجع

۱- علمداری، ش.، ۱۳۹۸، **روش‌های ارزیابی آسیب پذیری زیرساخت‌ها و مدیریت بحران**، انتشارات بوستان حمید.

۲- علمداری، ش.، ۱۳۹۷، **مدیریت بحران، دیدگاه‌ها سامانه ملی تاب‌آوری تخلیه اضطراری**، انتشارات بوستان حمید.

۳- اسفندیاری، م.، **نقش حمل و نقل در تخلیه اضطراری**، انتشارات دانشگاه جامع امام حسین (ع).

4- Naseri, A., and Naseri, M., 2014, **Strategies of Crisis Management in Urban Transportation**, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 7(13).

۵- جهانتیغ پاک، م.، ۱۳۹۵، **ملاحظات پدافند غیرعامل در شریان‌های حیاتی شهری**، انتشارات بوستان حمید.

6- Ma, X., Guo, H., Tang, X., Gao, X., and Wang, X., 2023, **Emergency traffic distribution and related traffic organization method under natural disasters**, Sustainable Operations and Computers, 4, 1-9, doi: 10.1016/j.susoc.2022.09.001

7- Ford, L. R., and Fulkerson, D. R., 1956, **Maximum Flow Through a network**, Canadian Journal of Mathematics 8 , 399–404.
8- Naseri, A., and Mousavi, M. R., 2012, **The Model of Arranging Trip Demand to the Central Areas of the Cities by Creating Traffic Restricted Zone**, International Journal of Modeling and Optimization, 2(2): 153-157.
9- Kotnyek, B., 2003, **An Annotated Overview of Dynamic Network Flow**, France: Institut National de Rechereche Informatique ET en Automatique.
10- Hoppe B. and Tardos. É., 1994, **Polynomial Time Algorithms for some Evacuation Problems**, In Proceedings of the 5th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms.
11- Ahuja, R. K., Magnanti, Th. K., and Orlin. J. B., 1993, **Network flows**, Prentice Hall.
12- Naseri, A., and Naseri, M., 2014, **A Model for Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem**, Int. Journal of Transport, Highways & Railway Engineering, 1(2): 9-13.
13- Johnson. E.L., 1966, **Networks and basic solutions, Operations Research**, 14:619–623, doi:10.1287/opre.14.4.619
14- Huang, M., Smilowitz, K. R. and Balcik, B., 2013, **A Continuous Approximation Approach for Assessment Routing in Disaster Relief**, Transportation Research Part B: Methodology. 50: 20–4, doi:10.1016/j.trb.2013.01.005
15- Hamacher, H.W., Heller, S. and Rupp, B., 2013, **Flow Location Problems: Dynamic Network Flows and Location Models for Evacuation Planning**, Annals of Operations Research, 207(1): 161-180.
16- Li, X., Cui. X., Jiang R. and Jia B., 2022, **Bus evacuation during no-notice disasters in downtown areas: A case study of the Zhongguancun area, Beijing**, Journal of Safety Science and Resilience, 3(3): 235-242, doi: 10.1016/j.jnlssr.2022.03.007
17- Deghdak, K., T'kindt, V., and Bouquard, J. L., 2016, **Scheduling Evacuation Operations**, Journal of Scheduling, 19:467-478.
18- Naseri, A., Vafaeipour, R., and Safashour, H., 2015, **A Model to Reduce the Effects of Traffic Congestion Using Allocation Constraint in Emergencies**, Journal of Traffic and Logistics Engineering, 3(1): 52-56.
۱۹-علی‌محمدی.، ک، ۱۳۹۶، **پدافند غیرعامل در شبکه‌های مواصلاتی جاده‌ای و آزادراه‌ها**، انتشارات قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء (ص)، قرب کربلا.
20- P. Gehl, P., Auclair, S., Fayjaloun, R., and Meresse, P., 2022, **Decision support for emergency road traffic management in post-earthquake conditions**, International Journal of Disaster Risk Reduction, 77, 103098, doi: 10.1016/j.ijdrr.2022.103098
21- Reihani, S. H., Naseri, A., Vafaeipour, R., and Zehforoush, K., 2013, **Modelling the impact of on-street parking on main parameters on vehicular traffic**, Life Science Journal, 10(6): 829-834.
۲۲-قصیری، ک.، ۱۳۸۶، **مسأله مسیریابی وسایل نقلیه همراه با پنجره زمانی**، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی قزوین.
23- Naseri, A., and Mokhtari, A., 2014, **Optimal Route Selection Model Based on Multiple Criteria Approach**, Journal of Traffic and Logistics Engineering, 2(1): 76-79, doi: 10.12720/jtle.2.1.76-79
24- Wang, D., Yang, K., and Yang, L., 2021, **Risk-averse two-stage distributionally robust optimization for logistics planning in disaster relief management**, International Journal of Production Research, 1-24, doi: 10.1080/00207543.2021.2013559

25- Zhang, Z., Liu, Y., Tong, Q., Guo, S., and Li, D., 2021, **Evacuation based on spatio-temporal resilience with variable traffic demand**, Journal of Management Science and Engineering, 6(1), 86-98, doi: 10.1016/j.jmse.2021.02.009
26- Ford, L. R. and Fulkerson, D. R., 1956, **Maximum Flow through a Network**, Canadian Journal of Mathematics, (8):399–404.
27- Dulebenets, M. A., Pasha, J., Abioye, O. F., Kavoosi, M., Ozguven, E. E., Moses, R., ... and Sando, T., 2019, **Exact and heuristic solution algorithms for efficient emergency evacuation in areas with vulnerable populations**, International journal of disaster risk reduction, 39, 101114, doi: 10.1016/j.ijdrr.2019.101114
28- Pyakurel, U., and Dhamala, T. N., 2016, **Continuous time dynamic contraflow models and algorithms**, Advances in Operations Research, doi: 10.1155/2016/7902460
29- Borowska-Stefańska, M., Kowalski, M., Wiśniewski, S., and Dulebenets, M. A., 2023, **The Impact of Self-evacuation from Flood Hazard Areas on the Equilibrium of the Road Transport**, Safety Science, 157, 105934, doi: 10.1016/j.ssci.2022.105934