

## برنامه‌ریزی و ارائه مدل بهینه‌ی تخلیه‌ی اضطراری شبکه پس از زمین‌لرزه

علیرضا ناصری (مسئول مکاتبات)، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

**E-mail: alinaseri@iaut.ac.ir**

رامین وفایی‌پورسرخابی، گروه مهندسی عمران، واحد آذرشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آذرشهر، ایران

علیرضا معتمدنیا، مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری‌های نرم، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

### چکیده

زلزله از شناخته‌شده‌ترین حوادث طبیعی است که اغلب، خساراتی وسیع و فاجعه‌آمیز به بار می‌آورد. ارزیابی شرایط پس از بحران، معمولاً نشان می‌دهد که عملکرد نامناسب حین برنامه‌ریزی و مسیریابی در فرآیند تخلیه، منجر به بروز ناهماهنگی و اتلاف زمان و ظرفیت شبکه می‌گردد. بر این اساس هدف این پژوهش، ارائه‌ی روشی ابتکاری برای تعیین مسیرهای تخلیه‌ی شبکه در کوتاه‌ترین زمان و به‌صورت یکپارچه است؛ که منجر به پیشنهاد یک الگوریتم بر مبنای تحلیل شبکه و تعریف کمان‌ها و گره‌های امن و متأثر از بحران می‌گردد. مدل پیشنهادی بهینه‌سازی جریان در این پژوهش، با استفاده از MCNFP در پی یافتن کوتاه‌ترین مسیر تخلیه از هر گره به منطقه امن و ارسال پیشینه‌ی جریان ممکن از طریق این مسیر است. برای آزمایش کارایی مدل، ۱۲ شبکه‌ی کوچک با ترکیب مختلفی از تعداد گره‌ها و خودروها و ۱۰ شبکه‌ی متوسط با تعداد گره‌های مختلف و تقاضای مشابه موردبررسی قرار گرفته و زمان اجرای هر یک از الگوریتم‌های MCNFP و مدل پیشنهادی این تحقیق، مقایسه شده است. نتایج عملکرد هر یک از روش‌ها نشان داد که زمان تخلیه با افزایش تعداد گره‌ها و پیچیدگی مسیریابی افزایش می‌یابد. همچنین در شبکه‌های کوچک، رشد تعداد وسایل نقلیه باعث افزایش زمان تخلیه می‌گردد که حائز اهمیت است. درنهایت، نتایج تمام تحلیل‌ها حاکی از سرعت بسیار بالای الگوریتم ابتکاری نسبت به MCNFP در تخلیه‌ی شبکه است.

واژه‌های کلیدی: شبکه حمل و نقل، تخلیه اضطراری، مدیریت بحران، زمین‌لرزه، بهینه‌سازی

## ۱. مقدمه و ادبیات پژوهش

تهدیدات طبیعی عمدتاً در منطقه‌ای نسبتاً 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 به شدت افول نماید. باید در نظر داشت که وقوع بلایای طبیعی، بحران‌های مختلف اقتصادی و اجتماعی را به دنبال خواهد داشت. تبعات و پیامدهای هر بحران در زمینه‌های صدمات انسانی، زیست‌محیطی، 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 به شمار می‌رود.

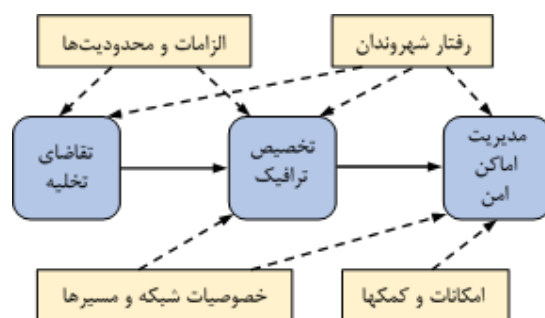
زلزله از شناخته‌شده‌ترین حوادث طبیعی است که در اغلب موارد به دلیل برجا گذاشتن خسارات فاجعه‌آمیز در مقیاس انسانی و اقتصادی به یکی از زیان‌بارترین حوادث طبیعی تبدیل شده است. در سال‌های اخیر، میزان وقوع زلزله در مناطق مختلف کشور افزایش یافته است. با این روند، احتمال وقوع این رخداد ویرانگر، مناطق جغرافیایی وسیع و اقشار زیادی از جامعه را تحت تأثیر تهدیدها و مخاطرات این پدیده‌ی طبیعی قرار خواهد داد. بررسی و ارزیابی شرایط پس از وقوع بحران، معمولاً دو نقطه ضعف اصلی در روش برنامه‌ریزی تخلیه مناطق را نمایان می‌کند. نخستین مشکل، ضعف در اطلاع‌رسانی و ایجاد هماهنگی کافی برای اجرای سناریوهای تخلیه است. عدم وجود آگاهی 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، بی‌نظمی کلان و اتلاف دو عامل تعیین‌کننده (زمان و ظرفیت شبکه) می‌گردد. در واقع شهروندان و ساکنان یک منطقه دقیقاً نمی‌دانند انتخاب کدام مسیر منجر به تخلیه‌ی سریع و ایمن می‌گردد. دومین عامل اثرگذار و مهم در کند شدن فرآیند تخلیه‌ی اضطراری را می

توان عدم تخصیص صحیح منابع و ناکافی بودن تسهیلات و خدمات موردنیاز وسایل نقلیه حین ازدحام و افزایش آنی و پیش‌بینی‌نشده‌ی تقاضا برشمرد. معمولاً در شرایط اضطراری نیازهای مهمی از قبیل تأمین 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 تأمین برای مدیریت شرایط اضطراری در مقاطع زمانی پیش از بحران، حین وقوع بحران و پس از بحران می‌گردد. بهره‌مندی از مدل‌های زنجیره‌ی تأمین 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 (به علت وجود عوامل خارج از کنترل) دارد؛ عواملی همچون اهمیت هزینه‌ای، فشردگی زمانی، تأثیر 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 به شدت از ماهیت تهدید و فاجعه اثر می‌پذیرد، اما سازوکارهای زیربنایی تخلیه برای همه فجایع مشابه است. پارامترهای اصلی مؤثر بر فرآیند تخلیه‌ی اضطراری در شکل (۱) نشان داده شده است.

## برنامه‌ریزی و ارائه مدل بهینه‌ی تخلیه‌ی اضطراری شبکه پس از زمین‌لرزه

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 به عهده دارد؛ این تراکم جمعیت بالا باعث پیچیده شدن مسئله می‌گردد. 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. فورد و فالکرسون با توسعه‌ی رویکرد تکرار موقتی امکان حل برخی نمونه‌های مسئله‌ی بیشینه جریان پویا را در قالب مسئله‌ی کمینه‌سازی هزینه میسر نمودند. کوتنی‌یک نیز مروری مشروح بر مسئله بیشینه جریان ارائه کرد. هوپ و تاردوس برخی از الگوریتم‌های زمانی چندجمله‌ای در مسئله‌ی تخلیه را مرور نمودند.

مسئله‌ی بیشینه‌ی جریان شبکه به‌طور گسترده در برنامه‌ریزی منطقه‌ای تخلیه وسایل نقلیه مورد استفاده قرار گرفته است. آهوجا و همکاران، کاربردهای مختلف مسئله‌ی جریان شبکه را مورد بررسی قرار دادند. با استناد به این بررسی‌ها می‌توان یکی از کاربردهای اصلی و کلاسیک بهینه‌سازی شبکه را، مسئله‌ی مسیریابی و برنامه‌ریزی تخلیه‌ی شبکه دانست. 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 نزدیک‌ترین محل امن و دوم به حداقل رساندن امکان برخورد جریان‌های عبوری در تقاطع‌ها. هوانگ و همکاران نیز، روشی برای مسیریابی با ظرفیت محدود را برای برنامه‌ریزی تخلیه ارائه کردند. در این مطالعه، ظرفیت به‌عنوان یک سری زمانی مدل‌سازی شده و روش مسیریابی با ظرفیت محدود برای حل مسئله‌ی تخلیه مورد استفاده قرار گرفته است. همچر و همکاران، پژوهشی را



شکل ۱. پارامترهای شاخص تأثیرگذار بر فرآیند تخلیه اضطراری

پارامترهای موجود در شکل (۱) از ماهیت و نوع بحران اثر می‌پذیرد. به‌طور 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 تأثیر مستقیم بر شرایط برون‌بری آسیب دیدگان هستند، اما اثرات بعدی، ناشی از همراهی ترکیبی این مواردند. برای مثال تأثیر هم‌زمان کاهش گنجایش مسیرها و دگرگونی ناگهانی تقاضا که بر زمان خروج از شبکه مؤثر خواهند بود.

هدف اصلی در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در شرایط بحرانی، تعیین مسیرهای تخلیه و برنامه‌ریزی برای تردد بهینه‌ی وسایل نقلیه است؛ به‌طوری‌که بتوان برنامه‌ای برای تخلیه ایمن و به‌موقع (در کوتاه‌ترین زمان) را به‌صورت یکپارچه در شبکه اجرا نمود. 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. به‌عنوان مثال، وسعت و تراکم جمعیت بر ظرفیت واکنش حمل‌ونقل هنگام وضعیت اضطراری و نیز سرعت این واکنش اثر می‌گذارد. معمولاً مناطق شهری بزرگ و پرجمعیت دارای شبکه و سامانه‌های بزرگ حمل‌ونقل منطقه‌ای با پوششی مناسب هستند که به‌طور منظم به‌ویژه در ساعات اوج ترافیک مسافران زیادی در این شبکه‌ها جابه‌جا می‌شوند. با این وجود، در مناطق شهری بزرگ، حجم بالقوه‌ی جابه‌جایی مسافران در

## ۲. روش پژوهش

پیش از تعریف مدل پیشنهادی، پارامترهای مورد استفاده در مدل معرفی و فرضیه‌های مورد استفاده در این مطالعه ارائه می‌گردد. در ابتدا، به تبیین شبکه‌ی معابر مورد استفاده در مدل می‌پردازیم. شبکه‌ی معابر، مجموعه‌ای است که برای عبور و مرور وسایل نقلیه‌ی موتوری، دوچرخه و پیاده، طراحی و ساخته می‌شود. از نظر نحوه‌ی تعیین مشخصات هندسی و تعریف نقش‌های مختلف عملکردی، معابر در گروه‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. شبکه‌ی حمل و نقل متشکل از مجموعه‌ی کمان‌ها (معابر) و گره‌هایی (تقاطع‌ها) است که فرآیند جابجایی وسایل نقلیه را میسر می‌سازد. مجموعه‌ی معابر شهری به‌عنوان زیرساخت و بستر حمل و نقل، از اهمیت استراتژیک و ویژه‌ای برخوردار است. این نقش برجسته و مهم در تخلیه‌ی اضطراری و دسترسی به مناطق مختلف در شرایط خاص نیز به‌وضوح قابل تشخیص است. شناسایی و پیاده‌سازی شبکه به‌صورت کمان‌ها و گره‌های ارتباطی و تفکیک مناطق مختلف به نواحی امن و نواحی متأثر از بحران و تعریف الگوهای رفتاری رانندگان در شرایط اضطراری برای خروج از مناطق آسیب‌دیده به‌سوی مراکز امن و در نهایت تخصیص ترافیک و تحلیل بار ترافیکی شبکه (کمان‌ها و گره‌ها) در قالب پروسه‌ی مسیریابی تخلیه‌ی 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 متأثر 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. مجموعه‌ی همه گره‌ها را نیز با  $N=(N_d \cup N_s)$  نشان داده می‌شود.  $A$ ، مجموعه‌ای از همه کمان‌ها در شبکه است و  $t_i$  و  $d_i$  به ترتیب زمان اثر در گره  $i$  و تعداد اولیه‌ی تخلیه‌کنندگان واقع در گره  $i$  است.  $UN_i$  حداکثر تعداد تخلیه‌کنندگانی است که

برای تحلیل و مقایسه‌ی نسبی انواع مختلف سفرهای تولیدشده در فرآیند تخلیه‌ی ترافیک انجام دادند. همچنین لی و همکاران یک مدل تخلیه در حجم انبوه بدون اطلاع و هشدار قبلی را با استفاده از بهینه‌سازی جریان دینامیک ترافیک ایجاد کردند. 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) است. یکی از بخش‌های اصلی این پژوهش، تحلیل روند جریان متغیر تخلیه نسبت به زمان برای مسیرهای تخلیه است. بدیهی است با در نظر گرفتن این ویژگی، ارائه‌ی مدل و راه‌حل دارای پیچیدگی بیشتری خواهد بود. در نگاه کلی، مدل‌سازی به‌وسیله‌ی جریان تخلیه‌ی ثابت و پایدار بسیار آسان‌تر است. به‌عنوان 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 به نظر 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 این رو سعی بر این است تا با ایجاد مدلی بهینه بتوان روش مناسبی را در کوتاه‌ترین زمان برای مدیریت مسئله‌ی 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 ترافیک قابل پیش‌بینی حین وقوع بحران در هر منطقه (به‌ویژه مناطقی که به سبب وجود کاربری‌های پر تقاضا، جذب سفر بالا و تراکم تردد در معابر دارند و همچنین مناطقی که در برابر زلزله آسیب‌پذیری بیشتری دارند) وجود دارد، آنگاه می‌توان بر اساس آن، فرآیند تخلیه را با برنامه‌ریزی زمان‌ها و مسیرهای شبکه با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تسهیل نمود.

شبکه‌های تخلیه معمولاً بزرگ هستند و محدوده‌ی وسیعی را در بر می‌گیرند. با اضافه نمودن زمان به مسئله‌ی بهینه‌سازی، مدل مربوط به این مسئله دچار پیچیدگی و وسعت بسیاری می‌شود که الگوریتم‌های چندجمله‌ای شناخته‌شده برای حل آن کفایت نمی‌کنند. علاوه بر آن، در صورتی که مدل، عوامل دیگری به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد تخلیه در برگیرد؛ مسائل به‌مراتب پیچیده‌تر می‌شوند. چنین عواملی ممکن است شامل رفتارهای نامشخص و متغیر افراد برای تخلیه حین و پس از وقوع بحران، در دسترس بودن منابع به‌منظور تخلیه، زمان‌های نامعلوم سفر (به‌ویژه تابع شرایط اضطراری)، رفتار نامشخص مسیر ازلحاظ سطح سرویس، تحت اثر تراکم و شدت وقوع زمین‌لرزه، به‌عنوان بخشی از ویژگی‌های شبکه باشند.

## ۲-۱ ایجاد شبکه‌ی پویا

از آنجاکه ماهیت مسائل مربوط به تخلیه‌ی شبکه، پویا و دینامیک است؛ ایجاد شبکه‌ای پویا<sup>۱</sup> بر اساس توسعه‌ی شبکه‌ای ایستا<sup>۲</sup> در طول افق برنامه‌ریزی برای هر بازه‌ی زمانی مدنظر خواهد بود. این شبکه‌ها، در دهه‌ی پنجاه توسط فورد و فالکرسون<sup>۳</sup> معرفی شدند. محققین الگوریتمی محاسباتی را برای به‌بیشینه‌سازی جریان از گره مبدأ<sup>۴</sup> به گره مقصد<sup>۵</sup> در یک شبکه و در دوره‌ی زمانی معین<sup>۶</sup>  $T$  معرفی نمودند. بر مبنای این روش تا جایی که راهی از مبدأ به مقصد با کمان وزن‌دار وجود دارد، می‌توان جریان را از یکی از این مسیرها عبور داد. سپس مسیر دیگری پیدا می‌شود و همین‌طور الگوریتم ادامه پیدا می‌کند. 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 مبدأ به مقصد است. برای تحقق این هدف سه شرط مطرح می‌گردد:

می‌تواند در هر دوره زمانی در گره  $i$  حضور یابد.  $tr_{ij}$  زمان رفت‌وآمد در مسیر ارتباطی بین گره  $i$  و گره  $j$  است و  $tr_{ii}=1$ . همچنین  $UA_{ij}$  حداکثر تعداد تخلیه کنندگانی است که می‌تواند در هر دوره زمانی وارد یال  $(i, j)$  شوند.  $i \in N$  گره، نشانگر منطقه‌ای است که شامل گره اثر و گره ایمن است و  $(i, j) \in A$  کمان، نشان‌دهنده‌ی مسیر ارتباطی بین گره  $i$  و گره  $j$  است.

در ابتدای بررسی موضوع، بهتر است برای پرهیز از پیچیدگی مسئله، بررسی تخلیه‌ی اضطراری شبکه‌ی حمل‌ونقل در قالب یک شبکه‌ی ایستا در نظر گرفته شود. شبکه‌ی  $G = (N, A)$  که در آن  $N$  مجموعه‌ی گره‌ها و  $A$  مجموعه‌ی کمان‌های شبکه است. به‌خاطر ماهیت مسئله تخلیه، مجموعه‌ای از گروه‌های  $N$  در دو زیرمجموعه تقسیم می‌شود:  $N_d$  (گره‌های اثر) و  $N_s$  (گره‌های امن). گروه اول شامل همه گره‌هایی است که به علت آسیب‌پذیر بودن بافت منطقه و نوع کاربری‌ها (عمدتاً پرجمعیت) و فاصله و موقعیت استقرار کاربری‌ها نسبت به کانون بحران و همچنین میزان تخریب و آسیب ناشی از وقوع زمین‌لرزه، به‌عنوان مناطق تخلیه در نظر گرفته شده‌اند. گروه دوم نیز شامل تمام گره‌های امنی است در کانون آسیب و بحران و تجمع (در لحظات اولیه‌ی وقوع بحران) قرار ندارند اما مردم در هنگام تخلیه سعی دارند به سمت آن‌ها حرکت و از آن‌ها استفاده کنند. لازم به توضیح است که منظور از گره‌ها، تقاطع‌ها و یا مراکز ثقل است؛ مراکز ثقل گره‌هایی با منابع مثبت هستند درحالی‌که تقاطع‌ها، منابع در اختیار ندارند. علاوه بر این، پارامتر  $t_i$  به‌عنوان زمان اثر گره  $i$  ام به گره‌های شبکه اضافه می‌گردد. این پارامتر به‌عنوان زمانی تعریف می‌شود که برای افراد گره  $i$  ام در دسترس است تا بتوانند در زمان تأثیر پیش‌بینی‌شده‌ی بحران در منطقه، تخلیه گردند. با این فرض، زمان اثر برای یک گره امن را می‌توان برابر با بی‌نهایت در نظر گرفت؛ زیرا بنا به تعریف این گره‌ها، به نظر نمی‌آید که گره‌های بی‌خطر تحت تأثیر مستقیم و مخرب بحران قرار گیرند.

برقراری این سه شرط، شبکه دارای جریان مجاز بعد از هر مرحله خواهد بود. شبکه پسماند نیز بر اساس محاسبه‌ی ظرفیت، این‌گونه تعریف می‌گردد:

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

الگوریتم جریان بیشینه به‌صورت زیر است:

$\forall (i, j) \in E \quad \delta(i, j) \leq U(i, j)$   
 $\forall (i, j) \in E \quad \delta(i, j) = -f(i, j)$   
 $\forall i \in N : i \neq source \text{ and } i \neq sink \rightarrow \sum \delta(i, j) = 0 \leftrightarrow \delta_{in}(i) = \delta_{out}(i)$   
 این بدین معنی است که جریان از  $i$  به  $j$  از ظرفیت کمان بیشتر نخواهد شد و شبکه، جریان بین  $i$  و  $j$  را کنترل می‌کند و همچنین به ازای گره‌هایی به‌جز مبدأ و مقصد، مقدار جریان ورودی گره برابر جریان خروجی گره است. در صورت

### جدول ۱. الگوریتم Ford-Fulkerson برای مسئله جریان بیشینه

Ford and Fulkerson Algorithm
<b>Input:</b> Graph $G$ with flow capacity $U$ , a source node and sink node.
<b>Output:</b> A flow $f$ from source to sink, which is a maximum.
1: $\delta(i, j) \rightarrow 0$ for all edges $(i, j)$
2: <b>While</b> there is a path $A$ from source to sink in $G_{\delta}$ such that $U_{\delta}(i, j) > 0$ for all edges $(i, j) \in A$ :
3: <b>Find</b> $U_{\delta}(A) = \min\{U_{\delta}(i, j) : (i, j) \in A\}$
4: <b>for each</b> 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: <b>end</b>

مجموعه‌ای از گره‌ها در شبکه با زمان صرف شده است؛  $A_M$   
 $= \{(i_t, j_{t+tr_{ij}}) \mid (i, j) \in A; t + tr_{ij} \leq T; t = 1, \dots, T\}$   
 مجموعه‌ای از همه‌ی کمان‌های حرکتی است و همچنین  $A_H$   
 $= \{(i_t, i_{t+1}) \mid i \in N; t = 1, \dots, T-1\}$   
 های نگهدارنده است؛ بنابراین، مجموعه‌ی یال‌ها در شبکه با  
 زمان صرف شده، اتحاد دو مجموعه یال است؛ یعنی  $A^T =$   
 $\{A_M \cup A_H\}$ . علاوه بر این،  $U_{a,b}$  به‌عنوان ظرفیت یال  $(a, b)$   
 در شبکه با زمان صرف شده به‌صورت زیر بیان می‌شود.

بخشی از ظرفیت که به‌عنوان گنجایش کمان  $(i, j)$ ، به‌صورت  
 $U_{ij}$ ، با فرض  $(a, b) \in A_M$  و  $a = i_t$  و  $b = j_{t+tr_{ij}}$  به ازای  
 $t \in \{1, \dots, T\}$  در نظر گرفته می‌شود. (حداکثر تعداد تخلیه  
 کننده‌هایی که می‌توانند در هر دوره‌ی زمانی وارد کمان  $(i, j)$   
 شوند.) بخش دیگر ظرفیت نیز مربوط به گنجایش هر گره در  
 پذیرش و تخلیه به‌صورت  $UN_i$ ، با فرض  $(a, b) \in A_H$  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.)

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 به‌عنوان 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 معمولاً نشان‌دهنده‌ی  
 دوره‌ی انتظار در گره‌ها هستند.

حال بر اساس روند مطالعات و شکل دادن به مدل موردنظر،  
 می‌توان پارامترهای تعریف شده و کاربردی را با هدف ایجاد  
 شبکه با زمان صرف شده تغییر داده و اصلاح نمود. بر این  
 مبنای،  $G^T = (N^T, A^T)$  یک شبکه با زمان صرف شده از  
 شبکه‌ی ایستای  $G = (N, A)$  را در افق زمانی برنامه‌ریزی  
 تخلیه،  $T$ ، نشان می‌دهد که  $N^T = \{i_t \mid i \in N; t = 1, \dots, T\}$

### ۳. تحلیل داده‌ها

مدل پیشنهادی بهینه‌سازی جریان در این پژوهش، با استفاده از MCNFP<sup>۱</sup>، انتقال جریان مشخصی بین مبدأ و مقصد را شکل می‌دهد؛ به صورتی که در آن، ظرفیت 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 مورد مسئله‌ی مورد مطالعه در این تحقیق، هر محصول به‌عنوان 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 است. هر گره اثر در منطقه  $r \in \{1, \dots, R\}$  دارای یک یا چند محصول است که از آن خارج می‌شود.

با توجه تعریف محصول، متغیرهای تصمیم‌گیری برای مدل بهینه‌سازی به صورت  $x_{itjk}$  و  $b_{ik}$  و  $y_{ijk}$  ارائه می‌شوند که منظور از  $x_{itjk}$  تعداد وسایل نقلیه‌ی تخلیه‌کننده‌ای است که گره  $i$  را در زمان  $t$  با محصول  $k$  به سمت گره  $j$  ترک می‌کنند و  $b_{ik}$  وسایل نقلیه‌ای است که با انتخاب مسیر محصول  $k$ ، گره  $i$  را ترک می‌کنند. همچنین  $y_{ijk}$  مقداری برابر با یک خواهد داشت در صورتی که کمان  $(i, j)$  متعلق به مسیر محصول  $k$  باشد؛ در غیر این صورت مقدار  $y_{ijk}$  برابر با صفر خواهد بود.

در این روند، هدف بهینه‌سازی جریان (تعداد وسایل نقلیه تخلیه‌کننده) از مناطق  $R$  به مقاصد امن است. بسته به ضرورت و اولویت تخلیه، وزن‌های متفاوتی برای هر منطقه اختصاص داده می‌شود؛ یعنی در این روند، منطقه‌ی  $r$  به علت اولویت 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

این نکته قابل توجه است که جریان در کمان  $(i, j)$  (با فرض این کمان به‌عنوان یال حرکتی در گره  $i$  و در زمان  $t$ ) دارای محدودیت ظرفیتی  $(UA_{ij})$  خواهد بود. در صورتی که یال، کمانی نگهدارنده باشد، به‌عنوان یک کمان فرضی تعریف می‌شود که نشان‌دهنده‌ی میزان عرضه در گره از زمان  $t$  تا  $t+1$  است؛ بنابراین، جریان در چنین یالی  $(i_t, i_{t+1})$  که با محدودیت ظرفیتی در زمان  $t$  مواجه خواهد بود. علاوه بر این، باید در نظر داشت که دو گره فرضی  $J^*$  (گره بسیار ایمن) و  $J'$  (گره نایمن) به  $G^T$  افزوده می‌شوند. 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  $(i_t, J^*)$  با ظرفیت  $U_{it, J^*} = UN_{it}$  به گره  $J^*$  مرتبط می‌شود و همچنین گره  $i_t$  به ازای  $\forall i \in N_d$ ، در  $G^T$  از طریق کمان  $(i_t, J')$  با ظرفیت  $U_{i_t, J'} = b_{i_t}$  به گره  $J'$  مرتبط می‌شود. منظور از گره بسیار ایمن، مقصد نهایی است که برای خروج همه‌ی تخلیه‌کنندگان فرض می‌گردد؛ درحالی‌که گره نایمن به‌عنوان محل موقت و پناهگاهی برای کسانی که نمی‌توانند تخلیه گردند در نظر گرفته می‌شود.

به علت وسعت زیاد شبکه با زمان صرف شده به‌ویژه برای مسائل با مقیاس بزرگ، معمولاً سعی بر این است که اندازه‌ی شبکه در صورت امکان کاهش یابد. از آنجاکه زمان تخلیه‌ی وسایل نقلیه برابر با  $t_i$  در نظر گرفته می‌شود؛ گره مفروض  $i$  و یال‌های متصل به آن نباید پس از زمان  $t_i$  در شبکه حاوی جریان باشند؛ بنابراین باید کمان‌های  $(i_t, j_{t+tr_{ij}})$  در صورت برقراری رابطه‌ی  $t + tr_{ij} \geq t_j$  از  $G^T$  و همچنین همه‌ی کمان‌های  $(i_t, j_{t+tr_{ij}})$  حذف گردند؛ به طوری که  $t \geq t_i$ . چون گره  $i$  در زمان  $t_i$  به‌روز خواهد شد؛ همه‌ی گره‌های  $(\forall i \in N, t \geq t_i)$  از  $G^T$  حذف می‌شود. علاوه بر این، از آنجاکه تقاطع‌ها هیچ جمعیت و وسیله‌ی نقلیه‌ای را در خود نگه نمی‌دارند، همه یال‌های نگهدارنده‌ی مرتبط با یک گره تقاطع نیز حذف می‌گردند.

مجموعه جریان ناشی از گره  $i$  مدل ذیل برای بهینه‌سازی MCNFP ارائه می‌گردد:

$$\begin{aligned}
 \text{Maximize } z_{mcnfp} &= \sum_{i \in N_s} \sum_k \sum_t x_{ij^*k} \times \hat{W}_k^r \\
 \sum_{k \in \delta(i)} b_{ik} &= s_i \quad \forall i \in N \\
 \sum_{j|j=J' \text{ or } (i_t, j_{t+r_{ij}}) \in A_T} x_{ijk} &= b_{ik}, \quad \forall i \in N_d, t=1, \forall k \\
 \sum_{j|(i_t, j_{t+r_{ij}}) \in A_T} x_{ijk} &= b_{ik}, \quad \forall i \in N_s, t=1, \forall k \\
 \sum_{j|j=J^* \text{ or } (i_t, j_{t+r_{ij}}) \in A_T} x_{ijk} - \sum_{j|(j_{t-r_{ji}}, i_t) \in A_T} x_{j(i-t-r_{ji})ik} &= 0 \quad \forall i \in N, t=2, \dots, T-1, \forall k \\
 \sum_k x_{ijk} &\leq UA_{ij} \quad \forall (i, j) \in A, t=1, \dots, T \\
 \sum_k x_{iik} &\leq UN_{ij} \quad \forall i \in N, t=1, \dots, T \\
 \sum_{j|(i,j) \in A} y_{ijk} - \sum_{j|(j,i) \in A} y_{jik} &= 1, \quad \forall i \in N_d, \forall k, \text{ if } i = \text{source}(k) \\
 \sum_{j|(i,j) \in A} y_{ijk} - \sum_{j|(j,i) \in A} y_{jik} &= 0, \quad \forall i \in N, \forall k, \text{ if } i \neq \text{source}(k) \text{ or } \text{sink}(k) \\
 \sum_{j|(i,j) \in A} y_{ijk} - \sum_{j|(j,i) \in A} y_{jik} &= -1, \quad \forall i \in N_s, \forall k, \text{ if } i = \text{sink}(k) \\
 x_{ijk} &\leq UA_{ij} \times y_{ijk}, \quad \forall (i, j) \in A, t=1, \dots, T, \forall k \\
 x_{iik} &= 0, \quad \text{if } i \neq \text{source}(k), t=1, \dots, T, \forall k \\
 x_{iik} &\geq 0, \forall i \in N, t=1, \dots, T, \forall k \quad x_{ijk} \geq 0, y_{ijk} \in (0,1), \forall (i, j) \in A, t=1, \dots, T, \forall k \\
 x_{i1J^*k} &\geq 0, \forall i \in N_d, \forall k \\
 x_{itJ^*k} &\geq 0, \forall i \in N_s, t=1, \dots, T, \forall k
 \end{aligned}$$

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. با در نظر گرفتن کوتاه‌ترین مسیر، الگوریتم فورد - فالکرسون در شبکه با زمان صرف شده، از این مسیر به منظور به دست آوردن حداکثر تعداد ممکن تخلیه کننده‌هایی که می‌توانند از طریق این کوتاه‌ترین مسیر جریان پیدا کنند استفاده می‌کند. اگر این مسیر ظرفیت کافی برای تخلیه‌ی همه وسایل نقلیه‌ی خروجی از گره اثر را نداشته باشد، فصلنامه مهندسی ترافیک/ سال بیست و سوم/ شماره ۹۵ / زمستان ۱۴۰۲

برای کاستن از پیچیدگی محاسباتی حل مدل MCNFP. الگوریتمی پیشنهاد می‌گردد که یک مسیر تخلیه برای هر گره ارائه می‌کند که جریان تخلیه را با نرخ ثابت در یک افق مشخص برنامه‌ریزی 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 است. یک گره فرضی امن ( $d$ ) با ظرفیت نامحدود، زمان بحرانی نامحدود و عرضه‌ی صفر به شبکه ایستا افزوده می‌شود. سپس همه‌ی گره‌های امن از طریق یال‌هایی با ظرفیت نامحدود

## برنامه‌ریزی و ارائه مدل بهینه‌ی تخلیه‌ی اضطراری شبکه پس از زمین‌لرزه

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 هر دو مدل جریان و پیشنهادی، فرآیند تخلیه به صورت کامل صورت می‌گیرد. مطابق نتایج جدول‌های (۲) و (۳)، الگوریتم پیشنهادی سریع‌تر از روش دیگر اجرا می‌شود و این اختلاف زمانی در بیشتر موارد به‌ویژه در شبکه متوسط و با افزایش گره‌ها و وسایل نقلیه بسیار چشمگیر است.

دومین مسیر کوتاه ایجاد خواهد شد و این روند تا تخصیص ظرفیت مورد نیاز ادامه خواهد یافت. 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 همه فواصل زمانی ثابت می‌ماند و برنامه تخلیه‌ی اضطراری طوری طراحی شده که تخلیه در یک زمان مشخص از یک گره آغاز شود و تا زمانی که همه‌ی تخلیه‌کننده‌ها به مناطق امن انتقال داده شوند ادامه می‌یابد.

مدل پیشنهادی به صورت مطالعه‌ی موردی بررسی و آزمایش گردید تا عملکرد آن قابلیت 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 نقلیه موجود در شبکه) تعریف و مورد ارزیابی قرار گرفت. ۱۲

جدول ۲. نتایج محاسباتی تخصیص بر اساس MCNFP

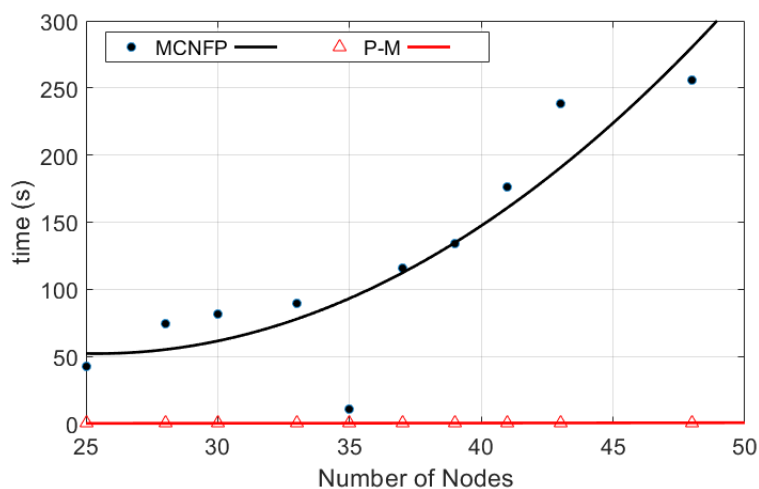
ردیف	شبکه‌ی کوچک			شبکه‌ی متوسط		
	مسیر	تعداد گره‌ها	تعداد وسایل نقلیه	تعداد گره‌ها	تعداد وسایل نقلیه	میزان تخلیه (درصد)
۱	A <sub>1</sub>	3	132	25	550	100
۲	A <sub>2</sub>	5	137	33	550	100
۳	A <sub>3</sub>	7	143	35	550	100
۴	A <sub>4</sub>	8	146	41	550	100
۵	A <sub>5</sub>	9	150	30	550	100
۶	A <sub>6</sub>	9	175	28	550	100
۷	A <sub>7</sub>	11	203	37	550	100
۸	A <sub>8</sub>	11	214	43	550	100
۹	A <sub>9</sub>	12	219	39	550	100
۱۰	A <sub>10</sub>	12	242	48	550	-
۱۱	A <sub>11</sub>	14	268	-	-	-
۱۲	A <sub>12</sub>	14	295	-	-	-

جدول ۳. 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 <sub>1</sub>	3	132	100	0/01	A <sub>1</sub>	25	550	100	0/15
۲	A <sub>2</sub>	5	137	100	0/01	A <sub>2</sub>	33	550	100	0/26
۳	A <sub>3</sub>	7	143	100	0/01	A <sub>3</sub>	35	550	100	0/28
۴	A <sub>4</sub>	8	146	100	0/01	A <sub>4</sub>	41	550	100	0/39
۵	A <sub>5</sub>	9	150	100	0/02	A <sub>5</sub>	30	550	100	0/24
۶	A <sub>6</sub>	9	175	100	0/02	A <sub>6</sub>	28	550	100	0/21
۷	A <sub>7</sub>	11	203	100	0/02	A <sub>7</sub>	37	550	100	0/31
۸	A <sub>8</sub>	11	214	100	0/02	A <sub>8</sub>	43	550	100	0/46
۹	A <sub>9</sub>	12	219	100	0/03	A <sub>9</sub>	39	550	100	0/36
۱۰	A <sub>10</sub>	12	242	100	0/03	A <sub>10</sub>	48	550	100	0/58
۱۱	A <sub>11</sub>	14	268	100	0/03	-	-	-	-	-
۱۲	A <sub>12</sub>	14	295	100	0/03	-	-	-	-	-

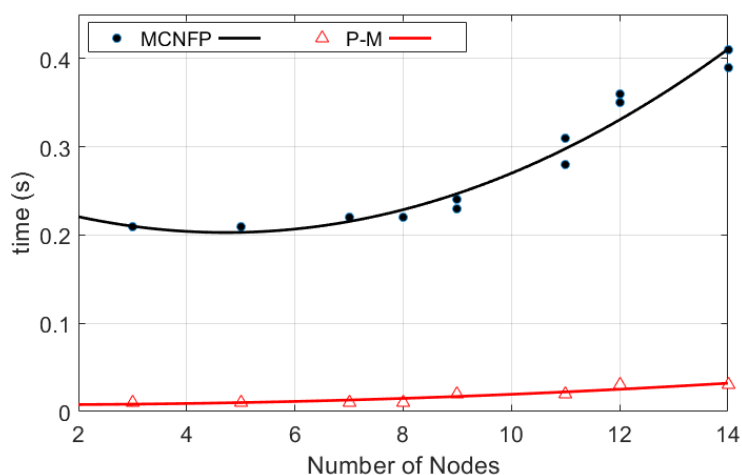
افزایش تعداد گره‌ها و به دنبال آن، پیچیدگی مسیریابی، افزایش می‌یابد. این امر در شبکه‌های کوچک و متوسط قابل مشاهده است. بررسی روند تغییرات زمان اجرای هر یک از الگوریتم‌ها نسبت به افزایش گره‌ها و وسایل نقلیه در شبکه‌های کوچک و متوسط در شکل‌های (۲) تا (۴) نیز قابل مشاهده است.

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 به صورت کامل و صد در صد محقق شد. همان‌طور که در جدول‌ها مشاهده می‌گردد، زمان اجرای مدل با

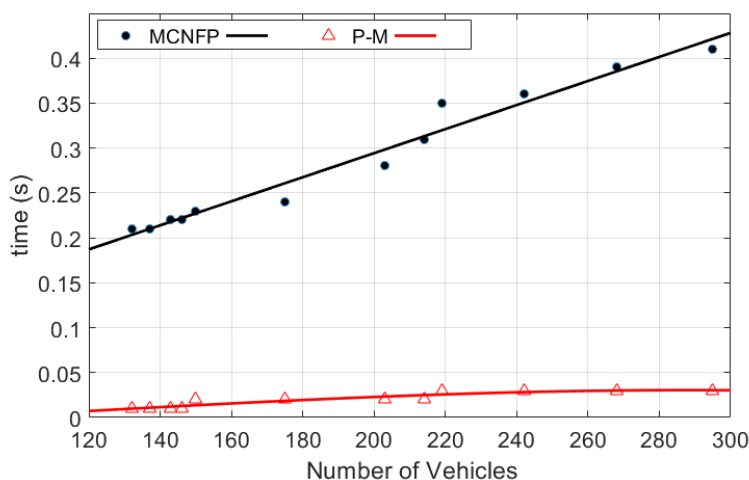


شکل ۲. روند تغییر زمان اجرای الگوریتم‌ها بر اساس اندازه شبکه (تعداد گره‌ها) در شبکه‌ی متوسط

برنامه‌ریزی و ارائه مدل بهینه‌ی تخلیه‌ی اضطراری شبکه پس از زمین‌لرزه



شکل ۳. روند تغییر زمان اجرای الگوریتم‌ها بر اساس اندازه شبکه (تعداد گره‌ها) در شبکه‌ی کوچک



شکل ۴. روند تغییر زمان اجرای الگوریتم‌ها بر اساس تعداد وسایل نقلیه در شبکه‌ی کوچک

که مطابق نتایج، این اثر در روش MCNFP قابل مشاهده است.

در کل، مشاهده می‌گردد که الگوریتم ابتکاری به‌طور قابل‌توجهی 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.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش روند تعریف و تدوین یک الگوریتم ابتکاری، بر مبنای مطالعه و تحلیل شبکه و تعریف کمان‌ها و گره‌های امن و متأثر از بحران شکل گرفت. مدل پیشنهادی بهینه‌سازی

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 معنی است 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 به خاطر 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

## 7. Multi Commodity Network Flow Problem

### ۶. مراجع

- روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها و مدیریت بحران، ۱۳۹۸، علمداری، ش، انتشارات بوستان حمید.
- مباحث مدیریت بحران، دیدگاه‌ها سامانه ملی تاب‌آوری تخلیه اضطراری، ۱۳۹۷، علمداری، ش، انتشارات بوستان حمید.
- نقش حمل‌ونقل در تخلیه اضطراری، ۱۳۹۱، اسفندیاری، م، انتشارات دانشگاه جامع امام حسین (ع).
- ملاحظات پدافند غیرعامل در شریان‌های حیاتی شهری، ۱۳۹۵، جهانتیغ پاک، م، انتشارات بوستان حمید.
- ملاحظات پدافند غیرعامل در شریان‌های حیاتی شهری، ۱۳۹۵، جهانتیغ پاک، م، انتشارات بوستان حمید.
- پدافند غیرعامل در شبکه‌های مواصلاتی جاده‌ای و آزادراه‌ها، ۱۳۹۶، علی محمدی، ک، انتشارات قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء (ص)، قرب کربلا.
- مسئله مسیریابی وسایل نقلیه همراه با پنجره زمانی، ۱۳۸۶، قصبیری، ک، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی قزوین.

- 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
- Ford, L. R., and Fulkerson, D. R. (1956), Maximum Flow Through a network, *Canadian Journal of Mathematics* 8, 399-404.
- Kotnyek, B. (2003), An Annotated Overview of Dynamic Network Flow," France: Institut National de Recherche Informatique ET en Automatique.
- 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, pp. 433-441.

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 جریان ممکن، تخلیه را با نرخ ثابت در یک بازه و روند مشخص 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:

- برنامه تخلیه در یک زمان مشخص از یک گره آغاز شده و تا زمانی که همه‌ی تخلیه‌کننده‌ها به مناطق امن انتقال داده شوند ادامه می‌یابد.
- در مدل جریان پیشنهادی، فرآیند تخلیه به‌صورت کامل صورت می‌گیرد.
- در مقایسه‌ی روش پیشنهادی و MCNFP، الگوریتم پیشنهادی سریع‌تر از روش دیگر اجرا می‌شود.
- اختلاف‌زمانی دو روش در بیشتر موارد به‌ویژه در شبکه متوسط و با افزایش گره‌ها و وسایل نقلیه بسیار چشمگیر است.
- زمان اجرای مدل با افزایش تعداد گره‌ها و به دنبال آن پیچیدگی مسیریابی، افزایش می‌یابد.
- در شبکه‌های کوچک علاوه بر گره‌ها، تعداد وسایل نقلیه‌ی موجود نیز بر زمان اجرا اثرگذار است.
- زمان اجرای الگوریتم ابتکاری در تمام شبکه‌های کوچک و متوسط، حتی با افزایش تعداد گره‌ها و وسایل نقلیه، به‌طور قابل‌توجهی کمتر از روش MCNFP است.

### ۵. پی‌نوشت‌ها

1. Dynamic Network
2. Static Network
3. Ford & Fulkerson
4. Source
5. Sink
6. Time-Expanded Network

- temporal resilience with variable traffic demand, *Journal of Management Science and Engineering*, 6(1), 86-98. doi: 10.1016/j.jmse.2021.02.009
- Ford, L. R. and Fulkerson, D. R. (1956), Maximum Flow through a Network, *Canadian Journal of Mathematics*, (8):399–404.
- Dulebenets, M. A., Pasha, J., Abioye, O. F., Kavooosi, 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.ijdr.2019.101114
- Pyakurel, U., and Dhamala, T. N. (2016), Continuous time dynamic contraflow models and algorithms, *Advances in Operations Research*. doi: 10.1155/2016/7902460
- 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
- Ahuja, R. K., Magnanti, Th. K., and Orlin. J. B. (1993), *Network flows*, Prentice Hall, New Jersey.
- Johnson. E.L. (1966), Networks and basic solutions, *Operations Research*, 14:619–623, DOI:10.1287/opre.14.4.619
- 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: 20–41. DOI:10.1016/j.trb.2013.01.005
- 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.
- 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
- Deghdak, K., T'kindt, V., and Bouquard, J. L. (2016), Scheduling Evacuation Operations, *Journal of Scheduling*, 19:467-478.
- 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.ijdr.2022.103098
- 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
- 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
- Zhang, Z., Liu, Y., Tong, Q., Guo, S., & Li, D. (2021). Evacuation based on spatio-

## Planning and Presenting the Optimal Model for the Network Emergency Evacuation after an Earthquake

Alireza Naseri\*, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Ramin Vafaei Poursorkhabi, Department of Civil Engineering, Azarshahr Branch, Islamic Azad University, Azarshahr, Iran

Alireza Motamednia, Robotics and Soft Technologies Research Centre, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

**E-mail: alinaseri@iaut.ac.ir**

### Abstract

Earthquake is a common natural disaster that often brings about wide-ranging catastrophic consequences. The post-crisis assessment of conditions generally indicates poor performance in evacuation routing and planning, leading to incoordination and waste of time and network capacity. Therefore, this study presented a heuristic, integrated solution to determine evacuation routes in the shortest time possible 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 MCNFP 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 tested 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 complexity. In addition, increasing the number of vehicles in small networks increased the evacuation time. Finally, the research results confirmed the higher speed of the heuristic algorithm than MCNFP in network evacuation.

**Keywords:** Transportation network, Emergency evacuation, Crisis management, Earthquake, Optimization