

# الگوریتم شاخه و کران برای مسئله تخلیه- مکان یابی (ایستا و پویای استوار) در لجستیک اضطراری با رویکرد بیشینه جریان شبکه

مینا مزرعه فراهانی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

سید کمال چهارسوقی (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

عیسی نخعی کمال آبادی، استاد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

ابراهیم تیموری، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: skch@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۳۰ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۳

## چکیده

فرآیند تخلیه از کلیدی‌ترین فعالیت‌های همزمان با بحران هنگام رخداد فجایع است. در پژوهش‌های مدیریت بحران، فرض بر وجود مکان‌های اسکان اضطراری از پیش تعیین شده‌ای است که تخلیه افراد از نواحی بحران زده به سوی آن‌ها انجام می‌شود. ما در این مقاله در پی یافتن یک پایگاه اسکان از میان مجموعه پایگاه‌های پیش‌بینی شده هستیم که جریان تخلیه افراد از ناحیه بحران را بیشینه می‌کند و بنابراین امکان تصمیم‌گیری درباره مکان‌های امن را همزمان با وقوع بحران برای تصمیم‌گیرندگان فراهم می‌کند. این مسئله را به صورت دو مدل غیرخطی در حالت ایستا و پویا، و با رویکرد شبکه جریان مدل‌سازی می‌کنیم. علاوه بر این یک مدل استوار پویا برای مسئله تخلیه-مکان‌یابی توسعه داده‌ایم تا عدم قطعیت مربوط به ظرفیت مسیرها در هنگام رخداد بحران را نیز در نظر بگیریم. در این مقاله، برای نخستین بار متغیر تصمیم مکان‌یابی را در مدل بیشینه جریان وارد کرده‌ایم. سپس با استفاده از ساختار مدل‌ها دو کران بالا و دو الگوریتم بهینه برای حل آنها توسعه می‌دهیم. الگوریتم‌های بهینه را بر پایه ترکیب روش‌های موجود برای بیشینه‌سازی جریان شبکه با روش شاخه و کران توسعه داده‌ایم. عملکرد کران‌های بالا را با حل مسئله‌های تصادفی هم از نظر زمان حل و هم فاصله با حل بهینه می‌سنجیم. زمان اجرای الگوریتم‌های دقیق را نیز بر روی همین مسئله‌های تصادفی می‌آزماییم و نتیجه مقایسه را گزارش می‌نماییم. در پایان نیز، الگوریتم‌های پیشنهادی را برای داده‌های واقعی یک شبکه شهری به کار گرفته و نتایج آن را گزارش کرده‌ایم.

واژه‌های کلیدی: لجستیک بحران، مسئله تخلیه-مکان‌یابی، مسئله شبکه جریان، شبکه جریان ایستا، شبکه جریان پویا، مدل استوار پویا

## ۱. مقدمه

تصمیم‌ها بیشتر با رویکرد استراتژیک انجام می‌شود. مثلاً تصمیم‌گیری استراتژیک در مورد ساخت پایگاه‌های کمک-رسانی که برخی نقاط مفروض را پوشش دهند، می‌تواند با اندک تغییری، با بهره‌گیری از مدل‌های مکان‌یابی در زنجیره تامین انجام شود. چنین مثالی برای مسئله‌های مربوط به بازسازی و بازیابی مناطق آسیب‌دیده در بلندمدت نیز معنادار است.

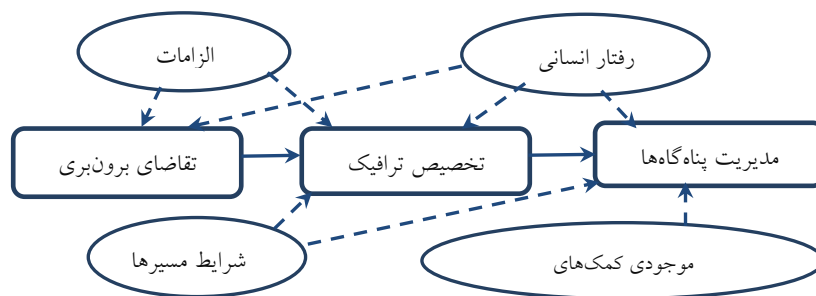
اما هنگام تصمیم‌گیری در برش زمانی "همزمان با بحران"، پیچیدگی‌ها و دشواری‌های ویژه‌ای در اثر عوامل خارج از کنترل رخ می‌نماید؛ عواملی همچون اهمیت هزینه‌ای (هزینه در چنین مسائلی به صورت جان و کیفیت زندگی آدمی تعریف می‌شود) فشردگی زمانی (در حد دو تا سه روز)، تاثیر رفتارهای انسانی (وحشت، آسیب‌دیدگی و ناتوانی) و آسیب یا نابودی زیرساخت‌های اصلی (راه‌ها، بیمارستان‌ها، زیرساخت‌های اطلاعاتی و ارتباطی). افزون بر این، با وجود پرشماری بحران-های طبیعی در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، سرمایه-گذاری استراتژیک برای مدیریت بحران، به ویژه در فاصله بلندمدت پیش از آن و در مقایسه با هزینه‌ها و خسارت‌های اقتصادی ناشی از بحران در این کشورها، ناچیز است. چنین شرایطی گویای اهمیت تصمیم‌گیری‌های همزمان با بحران در این کشورهاست. همچنین، توجه به لجستیک اضطراری همزمان با بحران، در کشورهای توسعه‌یافته نیز به این دلیل دارای اهمیت است که بهره‌مندی از زیرساخت‌های مدیریت بحران را با بیشینه کارایی ممکن می‌سازد.

فجایع و بحران‌ها در دسته رخداد‌های کم‌احتمال و پرخطر قرار می‌گیرند که از دهه ۱۹۶۰ تا امروز توجه ویژه پژوهشگران را جلب کرده‌اند. این بحران‌ها، ممکن است طبیعی (مانند سیل، زلزله، توفان، آتش‌سوزی‌های گسترده، سونامی) یا بشرساخته (حوادث صنعتی، حمله‌های تروریستی) باشند. فرآیند مدیریت بحران و همه اجزای آن از جمله ساخت پایگاه‌های کمک-رسانی، برون‌بری آسیب‌دیدگان از محل بحران، کنترل بحران (در فاجعه‌هایی همچون آتش‌سوزی‌های گسترده، نشت نفت و انفجار هسته‌ای)، کمک‌رسانی و ارسال منابع (تجهیزات پزشکی، خوراک، پوشاک، سرپناه و نیروی انسانی) ممکن است در اثر دخالت عوامل انسانی یا طبیعی دستخوش تغییر و دگرگونی شود.

از سوی دیگر در دو دهه پیشین و با توجه به تجربه‌های عملی حاصل از مدیریت بحران‌های گسترده در جهان (همچون حادثه یازدهم سپتامبر، سونامی‌های شرق آسیا، زمین‌لرزه هایتی و ...) پژوهشگران به اهمیت نقش خبرگان لجستیک و زنجیره تامین، در مدیریت بحران پی برده‌اند.

چنین توجهی موجب شکل‌گیری شاخه پژوهشی تازه‌ای به نام "لجستیک اضطراری" شده است که در پی بهره‌برداری از مفاهیم و چارچوب‌های مدیریت زنجیره تامین برای مدیریت فرآیندهای لجستیک اضطراری در سه برش زمانی "پیش از بحران"، "همزمان با بحران" و "پس از بحران (بلندمدت)" است [Abdelgawad and Abdulhai, 2009].

بهره‌مندی از مدل‌ها و مفاهیم زنجیره تامین در تصمیم‌گیری-های مربوط به دو برش زمانی پیش و پس از بحران با محدودیت و پیچیدگی چندانی روبرو نیست، چراکه این



شکل ۱. مولفه‌های موثر بر فرآیند تخلیه در شرایط بحران

الگوریتم شاخه و کران برای مسئله تخلیه- مکان‌یابی (ایستا و پویای استوار) ...

را گزارش کرده‌ایم. نتیجه‌گیری مقاله و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی نیز در بخش ۹ بیان شده است.

۲. پیشینه پژوهش

یکی از مرسوم‌ترین ابزار پرداختن به مسئله جریان کالاها، آسیب‌دیدگان و خدمات در شرایط اضطراری، نظریه شبکه‌های جریان، به ویژه شبکه‌های پویا است.

شبکه‌های پویا در سال ۱۹۵۸ توسط Ford and Fulkerson معرفی شدند. آنها برای نخستین بار به مسئله جریان بیشینه زمان-گسسته پرداختند و تکنیکی توسعه دادند که همچنان به کار می‌رود. از آن پس، مسئله‌های گوناگونی در این زمینه تحلیل و بررسی شده‌اند، برای نمونه، مسئله سریع‌ترین جابجایی، کمینه هزینه، و زودترین جریان ورود، همچنین مسائل زمان-پیوسته یا مدل‌هایی با پارامترهای وابسته به زمان (پویا).

جدول ۱ دسته‌بندی مراجع و پژوهشهای مسئله‌های شبکه‌ی پویا برحسب روش مدل‌سازی آنهاست. از سویی، میان شبکه‌هایی که با گذشت زمان تغییر نمی‌کنند (یعنی ظرفیت و زمان گذر کمان‌ها ثابت است) با آنها که ویژگیهای متغیر با زمان دارند تفاوت قائل می‌شویم و از سوی دیگر مدل‌ها را بر اساس زمان گذر گروه‌بندی می‌کنیم.

[Ahuja et al. 1993] نیز مسئله تخلیه ساختمان را با استفاده از نظریه جریان صورت‌بندی می‌کنند. در این رویکرد شبکه همان ساختمان یا منطقه‌ای است که باید تخلیه شود و در آن گره‌ها نمایانگر بخش‌های مربوطه (اتاق‌های ساختمان یا تقاطع‌های خیابان) هستند و کمان‌ها ارتباط میان این بخش‌ها را نشان می‌دهند (راهروها یا خیابان‌ها). یکی از چندین گره به عنوان گره سرچشمه برگزیده می‌شود (اتاقی که آسیب‌دیدگان در آن هستند یا مبدأ رخداد فاجعه) و برخی دیگر چاهک یا مقصد (ناحیه‌های امن) هستند. گروه مردم یا پناهجویان نیز به مثابه جریان گذرنده از شبکه در نظر گرفته می‌شود.

گرچه فرآیند تخلیه به شدت از ماهیت تهدید و فاجعه اثر می‌پذیرد، اما ساز و کارهای زیربنایی تخلیه برای همه فجاجع یکسان است که مهمترین مولفه‌های آن را در شکل ۱ مشاهده می‌کنید. هر مولفه این شکل از ماهیت فاجعه رخ داده اثر می‌پذیرد. برای مثال، شمار افرادی که باید از ناحیه فاجعه بیرون برده شوند ممکن است برای فاجعه‌های مختلف یکسان باشد، اما زمان دسترسی آنها به مسیرها و گذرها چنین نیست. مثلاً برای یک فاجعه پیش‌بینی نشده (مانند انفجار یک پایگاه هسته‌ای) ممکن است نیاز به تخلیه یک‌جای آسیب‌دیدگان باشد در حالی-که در مورد یک بلای طبیعی پیش‌بینی شده (مثل طوفان) می‌توان آسیب‌دیدگان را به تدریج و طی چندین روز از منطقه بیرون برد. به همین صورت گنجایش شبکه ترافیک در رخدادهایی مانند سیل، زلزله و طوفان دست‌خوش تغییر (کاهش) می‌شود در حالی‌که در مورد انفجار پایگاه هسته‌ای چنین محدودیتی برای شبکه ترافیکی وجود ندارد. گرچه این موارد دارای تاثیر مستقیم بر شرایط برون‌بری آسیب‌دیدگان هستند، اما اثرات بعدی، ناشی از همراهی دو به دوی این مواردند. برای مثال تاثیر همزمان کاهش گنجایش مسیرها و دگرگونی ناگهانی تقاضا که بر زمان خروج از شبکه موثر خواهند بود.

ساختار مقاله به این ترتیب است: در بخش ۲ به پیشینه پژوهش می‌پردازیم. سپس مسئله تخلیه-مکان‌یابی را در بخش ۳ معرفی می‌کنیم و در بخش ۴ مدل‌سازی ریاضی مسئله را برای دو حالت ایستا و پویا تشریح می‌نماییم، در قسمت دوم بخش ۴ نیز با رویکرد مدل‌سازی استوار برای حالتی که در اثر بحران ظرفیت کمان‌ها (مسیرها) دست‌خوش آسیب شود، یک مدل ریاضی استوار توسعه می‌دهیم. در بخش‌های ۵ و ۶ به ترتیب، متدولوژی‌های حل مسئله ایستا و پویا شامل کران‌های بالا و الگوریتم‌های دقیق را توسعه می‌دهیم. در بخش ۷ به حل نمونه‌های تصادفی و ارائه نتایج محاسباتی می‌پردازیم و در بخش ۸ نتایج مربوط به پیاده‌سازی الگوریتم‌ها برای یک مورد واقعی

جدول ۱. مدل‌های جریان شبکه به تفکیک فرضیات و پارامترها

زمان گذر صفر	زمان گذر غیر صفر	پارامترهای مدل
Fleischer[2001], Fleischer and Orlin[2000],	Fleischer and Skutella[2002], Fleischer and Skutella[2003], Ford and Fulkerson[1962]	ثابت
	Köhler and Skutella[2002], Philpott [1990]	متغیر

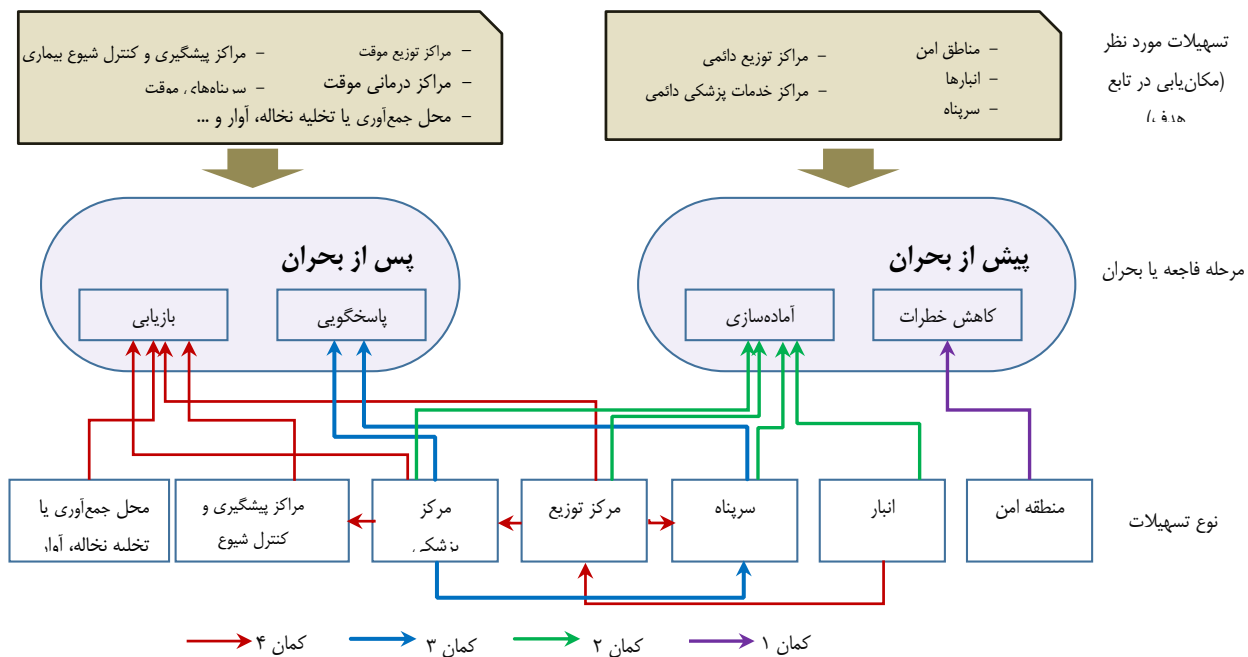
مینا مزرعه فراهانی، سید کمال چهارسوقی، عیسی نخعی کمال آبادی، ابراهیم تیموری

رابطه انواع تسهیلات مورد نیاز برای مدیریت بحران و مرحله بحران در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل مراحل بحران در دو دسته کلی پیش از بحران (پیشگیری و آماده‌سازی) و پس از بحران (پاسخ و بازسازی) در نظر گرفته شده‌اند. در مرحله پیشگیری، تحقیقات می‌تواند به پرسشهای مربوط به چگونگی ایجاد مناطق مسکونی در مناطق کم‌خطرتر یا دورتر از مناطق خطرپذیر بپردازد (کمان ۱). ایجاد مناطق امن یا اسکان در مرحله پیشگیری و آماده‌سازی یک برنامه‌ریزی بلندمدت است و برای این کار مدل‌های پویا و استوار قابل به‌کارگیری هستند. از دیگر مباحث مطرح در مکان‌یابی برای مدیریت بحران، برنامه‌ریزی برای ساخت و تأسیس انبارها، مراکز خدمات پزشکی و مراکز توزیع نیازهای اولیه (خوراک و پوشاک) است. برای مکان‌یابی مراکز توزیع در مرحله آماده‌سازی، مدل‌های تصادفی، پویا و استوار بکار رفته‌اند. از آنجا که مراکز توزیع خود نقطه دریافت و سپس توزیع کمک‌ها هستند، باید به اندازه کافی به مناطق آسیب‌دیده نزدیک باشند و در عین حال در ناحیه امن قرار داشته باشند.

مدل‌های جریان شبکه کاربرد گسترده‌ای نیز در یافتن کران پایین زمان تخلیه داشته‌اند که بنا بر اطلاع ما، نخستین آنها مطالعه [Chalmet et al. 1982] است. پس از این پژوهش، پژوهشگران بسیاری این مدل‌ها را برای این منظور به کار بردند. [Hoppe and Tardos, 1994] الگوریتمی چندجمله‌ای برای مسئله تخلیه چندمبدئی توسعه دادند. افزون بر این، الگوریتمی چندجمله‌ای برای مسئله تندترین جابجایی در حالت گسسته و با تعداد پایانه‌های (چشمه و چاهک) دلخواه توسعه دادند.

بیشتر مدل‌های بهینه‌سازی مکان‌یابی در لجستیک ناگهانی، فرآیند مکان‌یابی را با انبارش یا کمک‌رسانی ترکیب می‌کنند. مدل‌های مکان‌یابی ارائه شده توسط [Jia et al. 2007] و [آقایی و همکاران، ۱۳۹۶] از آن جمله‌اند. این نمونه‌ها با مدل‌های بیشینه پوشش با امکان پوشش چندمقداره و فرض نیازمندی‌های مقدار پوشش (برحسب تعداد پایگاه تخصیص یافته به هر نقطه تقاضا) صورت‌بندی شده‌اند.

همان‌طور که بونمی و همکاران [Boonmee et al. 2017] در مقاله مروری خود نشان داده‌اند، نوع تسهیلاتی که برای مدیریت بحران به کار می‌روند به مرحله بحران بستگی دارد.



شکل ۲. مدل رابطه میان مراحل بحران و انواع مکان‌یابی تسهیلات

## الگوریتم شاخه و کران برای مسئله تخلیه- مکان‌یابی (ایستا و پویای استوار) ...

نزدیک باشند (تا نجات و تخلیه هر چه سریعتر انجام شود) به شرایطی که بحران نیاز به انتخاب یا ایجاد مراکز جدید را ضروری سازد، توجه نشده است (برای مثال زمانی که مراکز اسکان از پیش تعیین شده یا مراکز خدمات پزشکی یا توزیع نیازمندیهای اولیه تخریب شوند یا در دسترس نباشند). روابط مکان‌ها و مراکزی که در این مرحله تشکیل یا انتخاب می‌شوند نیازمند پژوهش‌های بیشتری است (کمان ۴)، برای مثال انتقال نیازمندیهای اولیه (غذا دارو و پوشاک) از انبار به محل‌های اسکان و مراکز درمانی (دارو، تجهیزات پزشکی). همچنین در صورت پیشامد بیماری‌های همه‌گیر، مراکز پزشکی موقت و دائمی بیماران را به مراکز کنترل و پیشگیری از بیماری منتقل می‌کنند. بنا بر نتیجه‌گیری بونمی و همکاران [Boonmee et al. 2017] یک خلأ مهم در مسائل مکان‌یابی مرتبط با مدیریت بحران، نپرداختن به مسائلی است که به صورت یکپارچه به مراحل بحران می‌پردازند.

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، ما در این مقاله قصد داریم به انتخاب از میان چند پایگاه، یا سرپناهی بپردازیم که در مرحله آماده‌سازی توسعه یافته‌اند یا تأسیس شده‌اند (کمان ۲)، اما در زمان وقوع بحران به دلیل مسافت، ازدحام مسیرها یا حتی آسیب‌دیدگی پایگاه یا تجهیزاتی که از قبل پیش‌بینی شده است، دیگر در دسترس نیستند یا گشایش و ارسال تجهیزات اولیه به آنها پرهزینه و زمان‌بر است (کمان ۴). بنابراین مدل پیشنهادی ما ترکیبی از کمان‌های ۲ و ۴ در شکل ۲ را پوشش می‌دهد.

بیشتر مدل‌های مکان‌یابی با مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و متغیرهای دودویی برای مکان‌یابی تعریف شده‌اند. تمام مدل‌های موجود در ادبیات، مدل‌های تک‌دوره‌ای هستند، چرا که برای برنامه‌ریزی پیش از فاجعه کاربرد دارند. افزون بر این، مدل‌های انگشت‌شماری چندهدفه هستند.

[Cavdur et al. 2016] نیز به مسئله مکان‌یابی پیش از وقوع بحران می‌پردازند، اما آنها به جای پایگاه، مکان تجهیزات انتقال آسیب‌دیدگان را در نظر می‌گیرند، و برای آنکه اثر بحران بر مکان این تجهیزات را هم در نظر گرفته باشند، عامل تخریب تجهیزات هنگام بحران را نیز در مدل وارد می‌کنند. در چند مقاله نسبتاً جدیدتر دیگر از جمله مطالعه‌های [Akgün et al. 2015]; [Shen et al. 2011]; [Qi et al. 2010]; [Friesz et al. 2011]; [Peng et al. 2011] نیز به ریسک.

بنا بر این پژوهش‌های این حوزه می‌تواند معطوف به زمان‌بندی جابجایی مواد و کمک‌ها باشد. یه و همکاران [Ye et al. 2015] و قضاوتی و همکاران [Ghezavati et al. 2015] به ترتیب مدل‌های قطعی و استوار برای مکان‌یابی انبارها در لجستیک انسانی توسعه داده‌اند، اما پویایی یا تصادفی بودن را در نظر نگرفته‌اند (کمان ۲).

در مرحله پاسخ، تصمیم‌گیرندگان نقش بسیار مهمی دارند، چرا که بحران همچنان امکان پیشروی دارد. این مرحله را «پیشروی بحران» نیز می‌نامند. در این مرحله مهمترین ملاحظات مربوط به محل اسکان و مراکز پزشکی پاسخگوی آسیب‌دیدگان است. در صورتی که هر یک از این دو گروه تسهیلات، خود در مرحله خطر دیده یا خطرپذیر باشند، باید تصمیمات به‌هنگامی در مورد آنها گرفت. برای مثال ممکن است نیاز به تخلیه مراکز پزشکی یا یافتن محل امن جدید برای اسکان باشد. تصمیم‌گیری در مورد محل این تسهیلات در مرحله پاسخ از پیچیدگی دوچندان برخوردار است، چرا که علاوه بر پویایی شرایط بحران، باید در نظر داشت که از دیگر مراکز (مانند انبارها، مراکز ارسال کمک‌های اولیه، سازمان‌های کمک‌رسان مردمی و بین‌المللی) نیز جریان کالا و تجهیزات و ترافیک به سوی این مراکز شکل خواهد گرفت. کمان ۳ در شکل ۲ این ارتباطات را نمایش می‌دهد.

بنا بر بررسی بونمی و همکاران نشان می‌دهد، تا کنون به مکان‌یابی این تسهیلات (مراکز اسکان و مراکز امداد پزشکی) پرداخته نشده است. ما برای نخستین بار در این مقاله، مدلی را ارائه می‌کنیم که به مکان‌یابی مراکز اسکان همزمان با وقوع بحران می‌پردازد. و در این مدل جریان انسانی خروجی از مناطق آسیب‌دیده و ظرفیت و پویایی مسیر را در نظر می‌گیریم.

و سرانجام، در مرحله بازیابی همان‌طور که بونمی و همکاران [Boonmee et al. 2017] اشاره می‌کنند، یکی از موضوعهای مهم پژوهشی یافتن مکان بهینه مراکز توزیع موقت، مراکز خدمات درمانی و پزشکی موقت است. بنا بر این مطالعه، در این حوزه مدل‌های پویا پیشنهاد شده‌اند، اما مدل‌های استوار برای مدلسازی این وضعیت در ادبیات موضوع به چشم نمی‌خورند. همچنین در مرحله تصمیم‌گیری‌های همزمان با بحران، آن چنان که باید به مسئله مکان‌یابی موقت یا در لحظه پرداخته نشده است. در حالی که در مسئله پیچیده مکان‌یابی، به یافتن مکان‌هایی پرداخته شده که تا جای ممکن به محل بحران

مینا مزرعه فراهانی، سید کمال چهارسوقی، عیسی نخعی کمال آبادی، ابراهیم تیموری

جدول ۲. ساختار مدل‌های مکان‌یابی مرتبط با مدیریت بحران

تصادفی	قطعی		
Chen et al. [2016] Hoyos et al. [2015]	Horner and Downs [2010] Jia et al. [2007] Shi An et al. [2013]	تک‌سطحی	تک‌هدف
Rawls and Turnquist [2010]	Kongsomsaksaku et al. [2005]	دو سطحی	
Belardo et al. [1984] Salman and Yücel [2015]	Torabi and Khalil [2012]	تک‌سطحی	چند هدف
Mete and Zabinsky [2010] Ghatreh Samani and Hosseini-Motlagh [2017]	Schneeberger et al. [2016]	دو سطحی	

آن‌هاست، که با محدودیت‌های بودجه‌ای و زمان پاسخ همراه است.

بنا بر آنچه که در مطالعه تحلیلی-انتقادی [Abdelgawad and Abdulhai 2009] بیان شده است، فرآیند برنامه‌ریزی تخلیه بیش از همه، به صورت مسئله طراحی شبکه صورت‌بندی شده است. هدف مفهومی مسئله طراحی شبکه بهینه‌سازی یکی از سنج‌های عملکرد سیستم همچون کمینه‌سازی هزینه کلی سفر در شبکه یا بیشینه‌سازی مجموع شمار افراد پناه‌یافته با در نظر داشتن رفتار کاربران شبکه در انتخاب مسیر است. همان‌طور که این مطالعه نشان می‌دهد، هیچ تلاشی برای پرداختن به مقصدهای از پیش تعیین‌شده انجام نشده است.

[Huang et al. 2013] به کاهش هزینه سیستم برای مکان‌یابی پایگاه‌های خدمت‌رسانی (و نه اسکان) و مسیریابی خودروه‌های امداد رسان در شرایط بحران می‌پردازند. [Bell et al. 2014] نیز مسئله مکان‌یابی پیش از بحران را مورد بررسی قرار می‌دهند، اما قابلیت اطمینان شبکه حمل و نقل هنگام بحران را نیز مد نظر قرار می‌دهند. چن و همکاران نیز [Chen et al. 2015] برای مدلسازی مکان‌یابی تجهیزات کمک‌رسانی پس از بحران، تقاضای زمان-مکانی و زمان خدمت‌رسانی در شبکه را در نظر می‌گیرند.

در عملیات برون‌بری نیز، به صورت جدا از مکان‌یابی فرضیاتی درباره شرایط بحران زده در مدل‌ها وارد شده است.

از کار افتادن یا تخریب تسهیلات و پایگاه‌ها می‌پردازند، اما همچنان مدل‌سازی برای مکان‌یابی را در افق پیش از بحران و نه هنگام بحران انجام می‌دهند.

جدول (۲) مدل‌های مکان‌یابی را برحسب نوع داده، شمار سطوح و شمار اهداف دسته‌بندی می‌کند. تمامی مدل‌های مورد بررسی به تصمیمات مکان‌یابی پیش از رخداد فاجعه می‌پردازند.

[Özdamar and Ertem, 2015] نیز در مطالعه مروری خود بر روی مدل‌ها و فناوری‌های مدیریت بحران نتیجه می‌گیرند که برنامه‌های آمادگی برای بحران همگی به صورت منطقه‌ای و نه برمبنای مسیرهای دقیق (شامل خیابان‌ها) توسعه یافتند و این یکی از کاستی‌های مدل‌ها و فناوری‌های موجود است.

پایگاه‌های در نظر گرفته شده پناهگاه یا انبار هستند (که گاه مرکز توزیع خوانده می‌شوند). مدل‌های مکان‌یابی یا به انبارش یا "انبارش و کمک‌رسانی" می‌پردازند. برون‌بری برخلاف فعالیت‌های کمک‌رسانی یا انبارش به میزان انباشته مربوط نمی‌شود. مکان‌یابی انبارها نیز در چارچوب مدل‌های بیشینه پوشش و به صورت مکان‌یابی پایگاه‌ها با هدف بیشترین تقاضا و با توجه به مقدار انباشته مورد نیاز انجام شده است. این مدل‌ها به تخصیص انباشته برای برآوردن تقاضای معین می‌پردازند. تمرکز آنها، برنامه‌ریزی استراتژیک است و بنابراین مسیریابی توزیع انباشته در شبکه را در نظر نمی‌گیرند؛ پژوهش‌های [Ghatreh Samani and Hosseini-Motlagh 2017] نمونه‌ای از

## الگوریتم شاخه و کران برای مسئله تخلیه - مکان‌یابی (ایستا و پویای استوار) ...

چارچوبی برای مدیریت بحران و به ویژه مکان‌یابی مراکز خدمت‌رسانی موقت هنگام پاسخ به بحران فراهم می‌کند.

## ۳. معرفی مسئله تخلیه - مکان‌یابی

در فرآیند رایج برنامه‌ریزی تخلیه، پناه‌جویان اغلب بر مبنای معیار نزدیکی جغرافیایی به مقصدهای از پیش تعیین‌شده تخصیص می‌یابند. با این همه، تعیین مکان مقصدها و پناه‌گاه‌ها پیش از بحران ممکن است به دلیل عدم قطعیت‌های هنگام بحران همچون ازدحام، بسته بودن راه‌ها و هر خطر دیگر، به حل‌های زیربینه در هنگام بحران بیانجامد. با آزادسازی محدودیت تخصیص پناه‌جویان به مقصدهای از پیش تعیین‌شده و پرداختن به ایده انتخاب بهترین مقصد از میان چند پایگاه یا پناه‌گاه موجود، می‌توان کارایی فرآیند تخلیه را تا اندازه چشمگیری بهبود بخشید.

گرچه ماهیت گذرا و آشوبناک تخلیه در زمان رخداد بلایا، مدیریت جریان پناه‌جویان و افراد را چالش‌برانگیز می‌سازد، اما تخلیه همزمان با بحران (واکنش فوری) یک فرصت نهفته: آسیب‌دیدگان یا پناه‌جویان در انتخاب مقصد انعطاف‌پذیر اند بدین معنی که برای ایشان کافی ست از منطقه خطر خارج شوند و در هر منطقه امن ممکن پناه بگیرند. این انعطاف‌پذیری در انتخاب مقصد و اثرات آن در فرآیند تخلیه فوری تا کنون مورد توجه قرار نگرفته است. در حقیقت، این فرصت به بهای رویکردهای رایج مدل‌سازی بر پایه چند مقصد یا پناهگاه ثابت و تعیین‌شده از دست رفته است.

افزون بر این، بسیاری سازمان‌های کمک‌رسان در نبود زیرساخت‌های استراتژیک یا فعال نبودن پناهگاه‌ها در زمان رخداد فجایع طبیعی یا انسانی از مکان‌های همگانی وسیع همچون استادیوم‌ها، پارک‌ها یا دانشگاه‌ها برای اسکان یا پناه‌دادن آسیب‌دیدگان استفاده می‌کنند. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه این مکان‌ها از پیش تجهیز نشده‌اند و چنان چه نیاز باشد در واکنش‌های فوری مورد استفاده قرار بگیرند، نیازمند هماهنگی، تجهیزات و تدارکات گسترده و پیچیده‌ای همزمان با بحران هستند. بنا براین، تصمیم‌گیرندگان باید بتوانند بهترین پناه‌گاه از میان پناه‌گاه‌های بالقوه و در دسترس را بر اساس یکی از سنج‌های عملکردی حین بحران، همچون اسکان بیشترین شمار افراد، یا کمیته‌سازی زمان اسکان برگزینند.

برای مثال [Najafi et al. 2013] به اولویت قربانیان و حادثه‌دیدگان در عملیات برون‌بری می‌پردازد.

[Chen et al. 2016] نیز با در نظر گرفتن تقاضای القایی و محدودیت‌های ایجادشده در شبکه آسیب‌دیده، به مسئله مکان‌یابی پایگاه‌های خدمات اضطراری پزشکی می‌پردازند. تا آنجا که بررسی‌های ما نشان می‌دهد، هیچ مقاله‌ای به جز [Yuan and Han, 2009] به مسئله مکان‌یابی همزمان با بحران نپرداخته است. با این همه، مطالعه آنها نیز با رویکرد مکان‌یابی به بهینه‌سازی جریان تخلیه نمی‌پردازد.

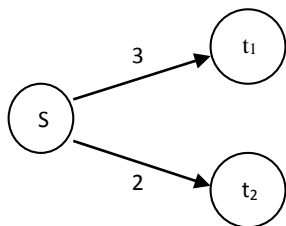
در ادبیات لجستیک بحران، مدل‌های استواری نیز برای پوشش عدم قطعیت‌های هنگام بحران توسعه یافته‌اند. برای نمونه رضایی‌ملک و همکاران [Rezaei-Malek et al. 2016] به شبکه لجستیک کالاهای فاسدشدنی هنگام بحران با می‌پردازند و مدلی با رویکرد تصادفی استوار پیشنهاد می‌کنند که با هدف تعیین سناریوی مکان‌یابی-تخصیص و توزیع طراحی شده است و همزمان بهترین سیاست سفارش‌دهی کالاهای فاسدشدنی را نیز در مرحله پیش از بحران شناسایی می‌کند.

احمدی و همکاران [Ahmadi et al. 2015] نیز در یک مطالعه دیگر یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای ارائه می‌کنند که نسخه‌ای از مسئله مکان‌یابی-مسیریابی است و می‌تواند در مرحله پاسخ به زمین‌لرزه بکار رود. در مقاله نسبتاً جدید دیگری، توفیقی و همکاران [Tofighi et al. 2016] یک مدل دو مرحله‌ای مبتنی بر سناریو توسعه داده‌اند که به مکان‌یابی انبارهای مرکزی و مراکز توزیع کالای محلی در مرحله پیش از بحران می‌پردازد. علاوه بر این، برنامه توزیع و سطح دسترسی به مسیرهای شبکه را نیز در نظر می‌گیرد.

بررسی پژوهش‌های فوق‌الذکر نشان می‌دهد که اگر چه مدل‌هایی برای مرحله پاسخ پس از بحران نیز توسعه یافته‌اند، اما بیشتر آنها همچنان فرضیات مدل‌های پیش از بحران را لحاظ کرده‌اند و به پیچیدگی‌های پیش‌بینی نشده لحظه تصمیم‌گیری نپرداخته‌اند. از مهمترین خلأها در فرضیات، نادیده گرفتن نیاز به مراکز درمانی، اسکان یا انبارش موقت پس از بحران و متغیر تصمیم مرتبط با آنها، یعنی نپرداختن به مکان‌یابی هنگام بحران است. [Nappi and Souza, 2016] در مطالعه مروری خود مدلی سلسله‌مراتبی توسعه می‌دهند که به صورت چندمعیاره

#### ۴-۱ مدل‌های پایه

به عنوان نخستین گام برای گزینش مکان پایگاه‌ها در هنگام رخداد بحران به مدل‌سازی مسئله تعیین مکان یک پایگاه برای برون‌بری آسیب‌دیدگان در یک شبکه‌ی جریان ایستا با ویژگی‌ها و مفروضاتی که در ادامه خواهد آمد می‌پردازیم. برای این منظور از ابزار مدل‌سازی شبکه جریان و مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات بهره خواهیم برد. گرچه مدل بدست آمده مدلی غیرخطی است، اما برای حل آن الگوریتمی بر پایه‌ی الگوریتم محاسبه‌ی جریان پیشینه در شبکه‌های ایستا ارائه خواهد شد.



شکل ۳. اثر تغییر مقصد بر جریان پیشینه شبکه

مکان‌یابی "بهرتر" پایگاه‌های اسکان (سرپناه زودگذر یا همیشگی) در هنگام پیشینه‌سازی جریان شبکه، به وضوح بر فرآیند برون‌بری چه از نظر شمار افراد نجات‌یافته (پیشینه‌سازی جریان) و چه از نظر زمان برون‌بری (تابع هدف کمینه‌سازی زمان) تاثیرگذار است. نمونه‌ای از این تفاوت در شکل ۳ نشان داده شده است که در آن اعداد روی کمان‌ها ظرفیت یال‌های شبکه هستند. چنانچه هر یک از گره‌های  $t_1$  یا  $t_2$  به عنوان پایگاه (چاهک شبکه) انتخاب شوند، پیشینه‌ی جریان شبکه متفاوت خواهد بود؛ اگر پایگاه به جای  $t_1$  در  $t_2$  قرار گیرد، پیشینه‌ی جریان شبکه از ۳ به ۲ کاهش می‌یابد. اعداد روی کمان‌ها نشان‌دهنده‌ی ظرفیت یال‌ها هستند.

در نخستین مدل فرض می‌کنیم ظرفیت یال‌ها در طول زمان ثابت و زمان گذر از یال‌ها صفر است (مانند مدل اولیه‌ی [Ford and Fulkerson, 1958]). هنگام رخداد بحران در شرایط واقعی زمان گذر از یال‌ها هم نمی‌تواند صفر باشد، حالت نخستین را ایستا و این وضعیت اخیر را پویا می‌نامیم.

همچنین در مدل نخستین هدف، پیشینه‌سازی شمار نجات‌یافتگان است. از سوی دیگر بر آنیم تا از میان چند گزینه موجود برای پناه دادن آسیب‌دیدگان، یک پایگاه را برگزینیم. بنابراین مسئله تخلیه-مکان‌یابی تک‌پایگاهی را در حالت ایستا مدل و آن را با برچسب S-ELP مشخص می‌کنیم.

شبکه ترافیکی به صورت پیشینی با به کارگیری مفاهیم شبکه و به شکل جریان‌هایی میان گره‌های آغازین و پایانی همراه با هزینه‌های مشخص (اغلب زمان سفر) مدل‌سازی می‌شود (که اساساً مبدأ و مقصد همه سفرها فرض می‌شوند). این شکل مدل-سازی ریاضی برای اطمینان از درستی فیزیکی و عملی، محدودیت‌هایی را نیز در بر می‌گیرد که از آن جمله می‌توان کران بالای ظرفیت یال‌ها و ثابت نگه‌داشتن تعداد کاربران در شبکه (محدودیت‌های حفظ جریان) را نام برد.

از چشم‌انداز زمانی، ممکن است شبکه ایستا یا پویا باشد. حالت ایستا مربوط به محاسبه جریان‌ها در یک دوره زمانی ثابت و یکپارچه است اما در حالت پویا جریان گذرنده از یال‌ها در دوره‌های زمانی معین (و تا جای ممکن کوتاه) بر اساس تغییرات تقاضا در گره‌های آغازین روزآمد می‌شود. در هر دو حالت مولفه‌های بنیادین شبکه عبارتند از:

۱. مکان‌شناسی (توپولوژی) شبکه
۲. تقاضا برای جابجایی در گره(های) آغازین که باید با گذر از میان شبکه به گره پایانی برسند.
۳. هزینه و گنجایش راه‌ها (یال‌ها)

این مقاله نخستین گام در توسعه مدلی برای برگزیدن بهترین مقصد از میان پایگاه‌های موجود با هدف پیشینه‌سازی شمار پناهجویان خارج شده از شبکه است. بر خلاف پژوهش‌های پیشین، فرض بر این است که تصمیمات مکان‌یابی همزمان با وقوع بحران انجام می‌شود. برای این کار دو مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط برای شبکه ایستا و پویا توسعه داده‌ایم که دو مسئله مدیریت بحران را ترکیب می‌کنند: مکان‌یابی و تخلیه. ما در این مقاله برای نخستین بار مدل‌های جریان شبکه را با ابزارهای مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی ترکیب می‌کنیم. با آن که هر دو مدل، غیرخطی هستند اما با تکیه بر ساختار آنها و با توجه به شمارش‌پذیری تعداد پناهگاه‌های در دسترس الگوریتم‌های دقیق چندجمله‌ای برای حل هر دو مدل ارائه می‌دهیم. مبنای الگوریتم‌های حل ارائه شده، الگوریتم‌های موجود برای حل مسئله‌های جریان شبکه هستند که آنها را بر روی مسئله‌های تصادفی اجرا و نتیجه اجرا را گزارش و بررسی می‌کنیم.

#### ۴. مدل‌سازی مسئله تخلیه - مکان‌یابی

##### تک‌مقصدی



الگوریتم شاخه و کران برای مسئله تخلیه- مکان‌یابی (ایستا و پویای استوار) ...

$a$  حرکت می‌کند در لحظه  $t + \tau_a$  به دم کمان  $a$  می‌رسد.  $\tau_a$  را زمان گذر یا پیمایش کمان  $a$  می‌نامیم. همچنین با توجه به ماهیت مسئله‌ی بحران در شرایط بحران، افق زمانی مسئله را  $\Theta = [0, 1, \dots, T]$ ، کران‌دار و گسسته در نظر می‌گیریم. تابع هدف این مدل نیز به صورت بیشینه‌سازی شمار نجات‌یافتگان تعریف می‌شود. از سوی دیگر بر آنیم تا از میان چند گزینه موجود برای پناه دادن آسیب‌دیدگان، یک پایگاه را برگزینیم. بنابراین مسئله تخلیه-مکان‌یابی تک‌پایگاهی جریان بیشینه را در حالت پویا مدل می‌کنیم و آن را با برچسب  $D-ELP$  مشخص می‌کنیم.

شبکه‌ی  $G=(V, A, u, \tau)$  را که در آن  $V$  مجموعه‌ی گره‌ها و  $A$  مجموعه‌ی کمان‌های شبکه است با تابع ظرفیت  $u: A \rightarrow \mathbb{N}$  و زمان گذر  $\tau: E \rightarrow \mathbb{N}$  در نظر بگیرید. همچنین فرض کنید  $L = \{1, \dots, q\} \subset V$  و  $|V|=n$  و  $|A|=m$  مجموعه پایگاه‌های موجود است. در بی یافتن مکانی از بین اعضای  $L$  هستیم که انتخاب آن به عنوان چاهک، جریان  $f$  را در شبکه بیشینه کند. همچنین فرض کنید  $s$  گره چشمه است و بدون کاستن از کلیت فرض می‌کنیم  $\delta^+(s) = \delta^-(t) = \emptyset$ .

یک جریان پویای  $s-t$  با کرانه زمانی  $T$ ، تابع  $x: E \times \{0, 1, \dots, T\} \rightarrow Z^+$  است که در محدودیت‌های نگهدارنده جریان و گنجایش کمان‌ها صدق می‌کند. بنا بر این تعاریف، مدل غیرخطی مسئله‌ای که در بالا شرح دادیم در ادامه صورت‌بندی شده است.

مدل ۲- مسئله تخلیه-مکان‌یابی پویا ( $D-ELP$ )

تابع هدف: بیشینه‌سازی جریان

متغیرهای مسئله:

$y_l$  مکان پایگاه (متغیر تصمیم، اگر پایگاه  $l$ ام انتخاب شود برابر یک خواهد بود و در غیر این صورت صفر)

$f$  جریان شبکه

$x(a, v)$  جریان گذرنده از کمان  $a=(i, j)$  در زمان  $v$

ثابت‌های مسئله:

$u_{ij}$  کران بالای ظرفیت کمان  $a=(i, j)$

$T$  کرانه زمانی مسئله پویا

تابع هدف در رابطه (۶) اندازه جریان در شبکه پویا را بیشینه می‌کند. محدودیت‌های نگهدارنده جریان با روابط (۷) تا (۹) ارضا می‌شوند. معادله (۱۰) تضمین می‌کند که تنها یک مقصد از میان

شبکه  $G=(V, A)$  را که در آن  $V$  مجموعه گره‌ها و  $A$  مجموعه کمان‌های شبکه است با تابع ظرفیت  $u: A \rightarrow \mathbb{N}$  در نظر بگیرید. همچنین فرض کنید  $|A|=m$  و  $|V|=n$  و  $L = \{1, \dots, q\} \subset V$  مجموعه پایگاه‌های موجود است. در بی یافتن مکانی از بین اعضای  $L$  هستیم که جریان  $f$  را در شبکه بیشینه کند. مدل عددصحیح غیرخطی این مسئله به شکل زیر خواهد بود:

مدل ۱- مسئله تخلیه-مکان‌یابی ایستا ( $S-ELP$ )

تابع هدف: بیشینه‌سازی جریان

متغیرهای مسئله:

$y_l$  مکان پایگاه (متغیر تصمیم، اگر پایگاه  $l$ ام یا همان  $l_i$

انتخاب شود برابر یک خواهد بود و در غیر این صورت صفر)

$f$  جریان شبکه

$x_{ij}$  جریان گذرنده از کمان  $(i, j)$

ثابت‌های مسئله:

$u_{ij}$  ظرفیت کمان  $(i, j)$

Max  $f$

s.t:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} - \sum_{k=1}^m x_{ki} = 0 \quad i \neq 1, l_1, \dots, l_q \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} - \sum_{k=1}^m x_{ki} = -f \quad i = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^q y_{l_i} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} - \sum_{k=1}^m x_{ki} = f \cdot y_{l_i} \quad i = 1, \dots, q \quad (4)$$

$$y_{l_i} \in \{0, 1\} \quad 0 \leq x_{ij} \leq u_{ij} \quad (5)$$

در این مسئله محدودیت‌های (۱)، (۲) و (۴) تضمین‌کننده‌ی شدنی بودن جریان هستند. محدودیت (۳) تضمین می‌کند که تنها یک پایگاه انتخاب شود و محدودیت (۵) الزامی برای مکان‌یابی از میان اعضای  $L$  ایجاد می‌کند.

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، در شرایط واقعی زمان واقعی گذر از یال‌ها نمی‌تواند صفر باشد، مدل پیشین مربوط به مسئله با زمان گذر صفر (ایستا) بود. در حالت دوم فرض می‌کنیم مسئله پویا باشد، بنابراین در اینجای پارامتر  $\tau_a$  به کمان  $a$  اختصاص می‌یابد که بیانگر زمان رسیدن یک واحد جریان از سر به دم کمان است. به بیان دیگر، یک واحد جریان که در لحظه‌ی  $t$  از سر کمان

برای پرداختن به مسئله عدم قطعیت ظرفیت راه‌ها پس از فاجعه بهره می‌بریم.

رویکرد بهینه‌سازی استوار اصالتاً برای مسئله‌های ایستا در برنامه‌ریزی خطی یا مسئله‌های درجه دوم مخروطی توسعه یافته است؛ با این فرض که عدم قطعیت در یک مجموعه تعریف شده قرار می‌گیرد و بهینه‌سازی استوار تضمین می‌کند که پاسخ مسئله در آن مجموعه عدم قطعیت شدنی بماند. بهینه‌سازی استوار در برخی مسئله‌های بزرگ و پیچیده طراحی مهندسی با موفقیت بکار رفته است [Ben-Tal and Nemirovski, 2002]. فرض مبنایی بهینه‌سازی استوار تصمیم‌های «اکنون و اینجا» هستند، به این معنا که همه متغیرها باید پیش از شناسایی هر داده غیرقطعی، شناسایی شده باشند.

در این بخش صورت‌بندی استوار مدل پویای مسئله تخلیه مکان‌یابی را نیز ارائه می‌کنیم.

گزینه‌های موجود برگزیده شود و محدودیت‌های (۱۱) نیز اندازه جریان گذرنده از هر کمان و نوع متغیرها را کنترل می‌کنند.

یادآوری این نکته ضروری است که برخلاف شبکه ایستا روابط (۷) امکان ماندن یا نگهداری جریان در گره‌ها را به صورت موقت و تا پیش از پایان پنجره زمانی فراهم می‌کند.

با این حال کلینز و وینگر [Klinz and Woeginger, 2004] کم‌هزینه‌ترین جریان را در شبکه پویا با یک چشمه و چاهک بدون محدودیت نگهداری یا ماندن موقت جریان در گره‌ها می‌یابند و نشان می‌دهند همواره جریانی با کم‌ترین هزینه وجود دارد که در صورت نامنفی بودن توقف در گره‌ها، نیازی به توقف در گره‌ها ندارد. فلیشر و اسکوتلا [Fleischer and Skutella, 2002] نیز نتیجه کلی‌تری را ثابت می‌کنند که نشان می‌دهد یافتن پاسخ بهینه مسئله محدب کم‌هزینه‌ترین جریان در شبکه پویا با چند چشمه و چاهک نیاز به توقف در گره‌ها ندارد.

$$Max f = Max [ \sum_{a \in \delta^+(l_i)} \sum_{z=\tau(a)}^T x(a, z - \tau(a)) ] \cdot y_{l_i} \quad (6)$$

$$\sum_{a \in \delta^+(i)} \sum_{z=\tau(a)}^T x(a, z - \tau(a)) - \sum_{a \in \delta^-(i)} \sum_{z=0}^T x(a, z) \geq 0 \quad \forall i \neq s, t \quad v \in \{0, \dots, T-1\} \quad (7)$$

$$\sum_{a \in \delta^-(s)} \sum_{z=\tau(a)}^T x(a, z) = \sum_{l_i \in L} \sum_{a \in \delta^+(l_i)} \sum_{z=\tau(a)}^T x(a, z - \tau(a)) \cdot y_{l_i} \quad (8)$$

$$\sum_{a \in \delta^+(i)} \sum_{z=\tau(a)}^T x(a, z - \tau(a)) - \sum_{a \in \delta^-(i)} \sum_{z=0}^T x(a, z) = 0 \quad \forall i \neq s, l_i \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^q y_{l_i} = 1 \quad (10)$$

$$y_{l_i} \in \{0, 1\} \quad 0 \leq x(a, v) \leq u(a) \quad \forall a \in A \quad v \in \{0, \dots, T\} \quad (11)$$

با استفاده از متدولوژی «نسخه استوار تنظیم‌پذیر همگری» برای پرداختن به تصمیم‌های وابسته به تأخیر زمانی، نسخه استوار این مدل خطی را توسعه می‌دهیم. در رویکرد بهینه‌سازی استوار، فرض بر این است که ظرفیت مسیرها برای تصمیم‌گیرندگان نامعلوم اما در یک محدوده عدم قطعیت، تعریف شده است. به ویژه فرض می‌شود ظرفیت مسیرها در مجموعه عدم قطعیت (بی اطمینانی) مربعی زیر قرار دارد:

$$u_{ij}^t \in U_a^b = [u_{ij}^t, \bar{u}_{ij}^t] = [\bar{u}_{ij}^t(1 - \theta), \bar{u}_{ij}^t(1 + \theta)] \quad (12)$$

که در آن  $\theta$  سطح عدم اطمینان و  $\bar{u}_{ij}^t$  ظرفیت اسمی کمان  $(i, j)$  در بازه زمانی  $t$  ام است. برای یافتن پاسخی کمتر سخت‌گیرانه،

#### ۴-۲ مدل پویای استوار تخلیه-مکان‌یابی

یکی از فرضیات ما در طرح این پژوهش تغییر ظرفیت مسیرها پس از رخداد فاجعه است؛ فرضی که برای مطابقت مدل با دنیای واقعی تعریف شده است. یکی از پیامدهای وقوع فاجعه‌ها، چه طبیعی و چه بشرساخت، تخریب یا آسیب زیرساخت‌هاست. مهمترین زیرساخت مورد نیاز برای برون‌بری انسان‌ها از منطقه فاجعه، راه است. تخریب همه یا بخشی از یک مسیر به صورت تغییر ظرفیت راه‌ها در مدل‌سازی بازتاب می‌یابد. در این بخش با وارد کردن این فرض در مدل ریاضی، از رویکرد بهینه‌سازی استوار

الگوریتم شاخه و کران برای مسئله تخلیه- مکان‌یابی (ایستا و پویای استوار) ...

قوانین خطی‌ای برای استخراج یک تقریب برای پاسخ مدل استوار به کار می‌روند که از نظر محاسباتی قابل پیگیری باشد. شایان ذکر است که پاسخ حاصل از متدلوژی AARC برای بدترین حالت مجموعه بی‌اطمینانی از پیش تعریف‌شده بهینه است. با این همه، تضمینی نیست که پاسخ استوار به دیگر پاسخ‌ها نزدیک باشد، چرا که رابطه میان پارامترهای نامطمئن و متغیرهای تصمیم ممکن است خطی نباشد. مشخصاً، متغیرهای کنترلی تنظیم‌پذیر یعنی  $x_{ij}^t$  را می‌توان به صورت یک تابع همگر (آفین) از مقدارهای مشاهده‌شده ظرفیت بیان کرد [Ben-Tal et al. 2004].

$$x_{ij}^t = \pi_{ijt}^{-1} + \sum_{ij \in A} \sum_{\tau \in I_t} \pi_{ijt}^{\tau} u_{ij}^{\tau} \quad (16)$$

که در رابطه ۱۶  $\pi_{ijt}^{-1}$  و  $\pi_{ijt}^{\tau}$  متغیرهای تنظیم‌نشده و  $I_t = \{0, \dots, t-1\}$  هستند. با جایگزینی متغیرهای حالت، صورت-بندی AARC برای مسئله مدل  $\mathcal{E}$  به‌دست می‌آید: این صورت‌بندی نیمه‌نامتناهی و رام‌نشده (پیگیری‌ناپذیر) است، پس باید با قوانین خطی مدلسازی استوار آن را به فرمی رام‌شدنی تبدیل کرد. مقدار بیشینه تابع هدف این مدل که آن را  $v_{AARC}^*$  می‌نامیم، کران پایین تضمین‌شده تمام مقادیر داده‌های غیرقطعی با فرض

محدودیت مشترکی را در نظر می‌گیریم، که در آن ظرفیت‌ها از پایین کران‌دار باشند. یعنی مجموع ظرفیت مسیرها از  $\Lambda$  بیشتر باشد که:

$$\alpha_{ij} \cdot c_{ij} \leq u_{ij}^t \leq c_{ij} \quad (13)$$

$$\sum_{t \in \Theta} \sum_{ij \in A} u_{ij}^t \geq T \cdot \sum_{ij \in A} \alpha_{ij} \cdot c_{ij} \quad (14)$$

$$u_{ij}^t \in U_d^b = \quad (15)$$

$$\left\{ u_{ij}^t : \underline{u}_{ij} \leq u_{ij}^t \leq \overline{u}_{ij}, \Lambda \leq \sum_{t \in \Theta} \sum_{ij \in A} u_{ij}^t \leq T \cdot \sum_{ij \in A} c_{ij} \right\}$$

که در روابط (۱۳) و (۱۴)  $c_{ij}$  ظرفیت یال‌ها در وضعیت پیش از بحران (شبکه عادی) و  $\alpha_{ij}$  احتمال (ضریب) آسیب‌پذیری یال (مسیر) هستند و  $\Lambda := T \cdot \sum_{ij \in A} \alpha_{ij} \cdot c_{ij}$  را ظرفیت تضمین‌شده شبکه می‌نامیم. مجموعه بی‌اطمینانی همراه با مجموعه ظرفیت تضمین‌شده یک مجموعه بی‌اطمینانی چندوجهی تشکیل می‌دهد که بنا بر نظر [Ben-Tal and Nemirovski, 2002] برای لجستیک بحران، فرضیه واقع‌گرایانه‌تری است. حال، مجموعه بی‌اطمینانی زیر را خواهیم داشت: در مرحله بعد با استفاده از قوانین تصمیم خطی این مدل را به همراه مجموعه بی‌اطمینانی بالا به مدل AARC تبدیل می‌کنیم.

مدل  $\mathcal{E}$ : RD-ELP

$$Max v \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^n (\pi_{ij}^{-1} + \sum_{ij \in A} \sum_{\tau \in I_t} \pi_{ijt}^{\tau} u_{ij}^{\tau}) - \sum_{h=1}^n (\pi_{hit}^{-1} + \sum_{ij \in A} \sum_{\tau \in I_t} \pi_{hit}^{\tau} u_{hi}^{\tau}) = 0 \quad \forall i, j, h \in V, i \neq 1, i \notin L, \forall t \in \Theta, \forall u_{ij}^{\tau} \in U_d^b \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^n (\pi_{1jt}^{-1} + \sum_{1j \in A} \sum_{\tau \in I_t} \pi_{1jt}^{\tau} u_{1j}^{\tau}) = v \quad (19)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^q (\pi_{ilt}^{-1} + \sum_{il \in A} \sum_{\tau \in I_t} \pi_{ilt}^{\tau} u_{il}^{\tau}) = v \quad (20)$$

$$\sum_{l=1}^q y_l = p \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^n (\pi_{ilt}^{-1} + \sum_{il \in A} \sum_{\tau \in I_t} \pi_{ilt}^{\tau} u_{il}^{\tau}) \leq \Delta_l \cdot y_l \quad l \in L, \quad \forall t \in \Theta \quad (22)$$

$$y_k \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in A: \pi_{ij0}^{-1} = 0, \quad , \quad \forall i,j \in V, \quad \forall t \in \Theta \quad (23)$$

$$\pi_{ijt}^{-1} + \sum_{ij \in A} \sum_{\tau \in I_t} \pi_{ijt}^{\tau} u_{ij}^{\tau} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A, \quad \forall u_{ij}^{\tau} \in U_d^b, \quad \forall t \in \Theta \quad (24)$$

$$v \geq 0 \quad (25)$$

دهد، قید انتخاب یک مقصد را آزاد می‌کنیم. با فرض امکان گشایش همه مقصدها ( $L$ )، می‌توان در زمان چند جمله ای به یک کران بالا برای تابع هدف دست یافت. در این صورت مسئله به مسئله بیشینه جریان با یک چشمه و چند چاهک تبدیل می‌شود. با افزودن یک ابرچاهک که با کمانهایی با ظرفیت بی نهایت به اعضای  $L$  متصل شده است، می‌توان مسئله را حل کرد. فرض کنید  $N_e$  شبکه گسترده حاصل از  $N$  پس از افزودن ابرچاهک  $t$  و اتصال آن به همه اعضای  $L$  باشد.  $F^*$  را مقدار جریان بیشینه در  $N_e$  حاصل از یکی از الگوریتم‌های بیشینه جریان، و  $f_k^*$  را جریان روی کمان  $(k, t)$  در نظر بگیرید. به طوری که  $value(F^*) = \sum_{k \in L} value(f_k^*)$ . جزییات الگوریتم محاسبه نخستین کران بالای  $ELP$  بر پایه الگوریتم ادموندز-کارپ در جدول ۳ شرح داده شده است.

وابستگی خطی است. علاوه بر این، می‌توان  $v_{AARC}^*$  را تخمین خوش‌بینانه جریان در بدترین حالت دانست که از هم‌تای استوارش بیشتر است، چرا که فضای شدنی این مسئله از فضای شدنی مسئله استوار، بزرگتر است [Ben-Tal et al. 2004]. متغیرهای تصمیم در اینجا، متغیرهای حالت  $x_{ij}^t$  نیستند، بلکه مجموعه‌ای از ضرایب تابع آفین متغیرهای حالت، یعنی  $\pi_{ijt}^1$  و  $\pi_{ijt}^T$  هستند.

## ۵. متدولوژی‌های حل مسئله تخلیه-مکان‌یابی ایستا

### ۱-۵ کران‌های بالا

#### UB1- کران بالا با آزادسازی محدودیت انتخاب یک

مقصد

در این بخش برای دستیابی به کران بالایی که ما را به مقدار بهینه تابع هدف نزدیک کند یا زمان رسیدن به بهینه را کاهش

جدول ۳. کران بالای UB1 مسئله تخلیه-مکان‌یابی ایستا

#### UB1- Upper bound\_1 for Static ELP

**Input:** directed graph  $N=(V, A, u, s)$ ,  $L \subset V, |L| = q$ .

**Output:** Upper\_Bound\_1

1:  $V' = V \cup \{t\}, A' = A \cup \{(l_k, t); k = 1, \dots, q\}, u = u \cup \{u(l_k, t) = \infty; k = 1, \dots, q\}, N_e = (V', A', u, t)$

2: Upper\_Bound\_1 = value(Maximum\_flow\_Edmonds - Karp( $EN, t$ ))

3: return Upper\_Bound\_1

جدول ۴. کران بالای UB2 برای مسئله تخلیه-مکان‌یابی ایستا

#### UB2- Upper bound\_2 for ELP

**Input:** Network  $N_r = (V \cup \{t\}, A', u')$ ,  $L \subset V, |L| = q$

**Output:** Upper bound\_2, max-flow value at every second last node of:  $f_i^{N_r}$

1: for all  $i, j \in V$  do

2: if  $j \neq t \wedge j \notin L$  then  $u'(i, j) = u(i, j)$

3: else if  $j = t$  then  $u'(i, j) = \infty$

4: else if  $j \in L$  then  $u'(i, j) = 0$

5: end if

6: end if

7: end if

8: end

9: Upper\_bound\_2 = max\_flow( $N_r = (V \cup \{t\}, A', u')$ )

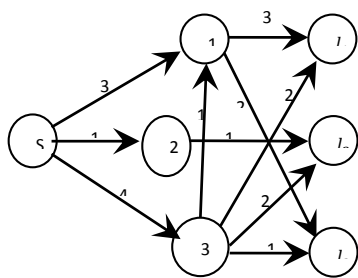
10: Return Upper\_bound\_2

الگوریتم شاخه و کران برای مسئله تخلیه- مکان یابی (ایستا و پویای استوار) ...

فرض کنید  $F_{max}^{Nr}$  جریان بیشینه  $N_r$  باشد. به سادگی می توان نشان داد  $F_{max}^{Nr}$  کران بالایی برای تابع هدف  $ELP$  یعنی  $Upper$  است. نحوه محاسبه این کران بالا که  $bound\_2$  نام دارد در جدول ۴ آمده است.

مثال ۲. شبکه اولیه نمایش داده شده در شکل ۳ را در نظر بگیرید. اعداد روی هر یال  $u_{ij}$  ظرفیت آن یال را نشان می دهند. شبکه آزاد شده  $N_r$  در شکل ۳ ب نشان داده شده است که در آن همه گره های مقصد با ابرچاهک  $t$  جایگزین شده اند. شکل ۳ پ جریان بیشینه در شبکه  $N_r$  را نشان می دهد که در آن

$$value(F_{max}^{Nr}) = 8, value(f_1^{Nr}) = 1, value(f_2^{Nr}) = 3, value(f_3^{Nr}) = 4 \text{ است.}$$



الف. شبکه اولیه  $N$  و  $L=\{l_1, l_2, l_3\}$

کران بالا (UB2) با آزادسازی محدودیت ظرفیت گره های چاهک

کران بالای دیگری برای تابع هدف از راه آزادسازی ظرفیت یال های منتهی به گره های مقصد حاصل می شود. برای دستیابی به این کران بالا، کافی ست گره های مقصد را از شبکه حذف نماییم و آنها را با یک ابرچاهک  $t$  جایگزین کنیم.

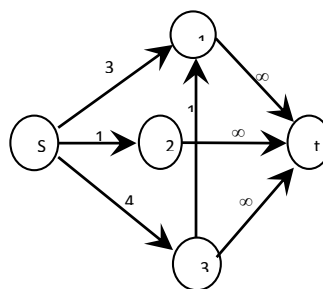
فرض کنید شبکه آزاد شده  $N_r$  ابرچاهک این شبکه باشد،

$$N_r = (V \cup \{t\}, A', u'),$$

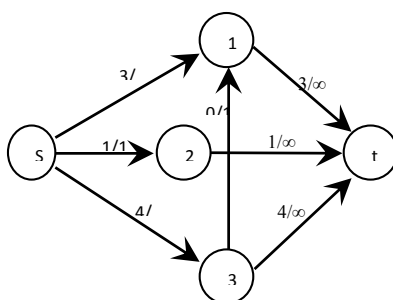
$$A' = A \cup \{(i, t) \mid (i, k) \in A \wedge i \in V \wedge k \in L\}$$

$$u'(i, j) = \begin{cases} u(i, j) & j \neq t \wedge j \notin L \\ \infty & j = t \\ 0 & j \in L \end{cases}$$

و نیز



ب. شبکه آزاد شده  $N_r$  با ابرچاهک  $t$



پ. بیشینه جریان در شبکه آزاد شده با  $value(F_{max}^{Nr}) = 8$

شکل ۳. کران بالای  $Upper\_Bound2$  برای شبکه مثال ۲

## ۲-۵ الگوریتم‌های دقیق

### • الگوریتم دقیق $E1$ برای حل مسئله تخلیه-

#### مکان‌یابی ایستا

در این بخش الگوریتم دقیقی بر پایه الگوریتم پیشینه جریان ادموندز-کارپ برای حل مسئله غیرخطی تخلیه-مکان‌یابی ایستا توسعه خواهیم داد. از آنجا که متغیر  $y$  متغیری صفر و یک است که محدودیت حفظ جریان را در گره‌های چاهک فعال می‌کند (رابطه ۴) و نیز چون تعداد پایگاه‌های ممکن متناهی است، می‌توان  $ELP$  را با تکرار  $C(q, 1) = q$  باره هر یک از الگوریتم‌های پیشینه جریان حل کرد.

از میان همه نتایج به دست آمده، مجموعه  $\mathcal{V}$  ای که به بیشترین جریان انجامیده را برمی‌گزینیم. زمان اجرای این گام از مرتبه  $(m+1)^2 \cdot (n+1)$  خواهد بود و بنابراین پیچیدگی اجرای  $E1$  از مرتبه  $q \cdot (n+1) \cdot (m+1)^2$  است. جزئیات پیاده‌سازی این الگوریتم در جدول ۵ آمده است.

#### جدول ۵. الگوریتم دقیق $E1$ برای مسأله $S-ELP$

#### $E1 - Exact Algorithm for S-ELP - O(q \cdot n \cdot m^2)$

ورودی: گراف جهت‌دار  $G=(V, A, u, s)$  و  $L$

خروجی: مقدار پیشینه جریان  $max\_flow$  مکان بهینه‌ی پایگاه

$loc(best)$

```

1:  $max\_flow := 0$ 
2: for all  $l \in |L|$  do
3:  $max\_flow\_temp =$ 
 $value(Push\_Relabel\_Maximum\_Flow(G))$ 
4: if  $max\_flow < max\_flow\_temp$  then
5:  $max\_flow = max\_flow\_temp$ 
6:  $loc(best) = l$ 
7: end if
8: end for
9: return  $max\_flow, loc(best)$ 

```

#### جدول ۶. الگوریتم دقیق $E2$ (شاخه و کران) برای مسأله تخلیه-مکان‌یابی ایستا

#### $E2 - Branch and Bound Algorithm for S-ELP$

**Input:** directed graph  $N = (V, A, u, s), L \subset V, |L| = q,$

**Output:**  $Opt\_flow, Opt\_Loc$

```

1:  $V' = V \cup \{t\}, A' = A \cup \{(l_k, t); k = 1, \dots, q\}, u' = u \cup \{u(l_k, t) = \infty; k = 1, \dots, q\}, N_e = (V', A', u', t)$ 
2:  $F^* = UB1(N_e = (V', A', u', s))$ 
3: Let  $F^* := (f_1^*, \dots, f_q^*)$  s.t.  $f_k^* = f^*(k, t); k \in L$ 
4:  $f^{ln} = Max\_flow(N_{ln} = N_{ln} = (V, A, u, f_1^*))$ 
5: for  $k=1:q$ 
6:   if  $\Delta_k = \{\sum_{i \in \delta^-(k)} u(i, k) | k \in L\} < f^{ln}$ 
7:      $L = L \setminus k$ 
8:   end if
9: end for
10: E1( $N=(V, A, u, s), L$ )
11: return  $Opt\_flow, Opt\_Loc$ 

```

### • الگوریتم شاخه و کران $E2$ برای حل

#### مسئله تخلیه-مکان‌یابی

در  $UB1$  محدودیت انتخاب  $p$  مقصد را برای دستیابی به یک کران بالا، آزاد نمودیم. در اینجا، با به کارگیری  $UB1$  به یک پاسخ بهینه خواهیم رسید. بنا بر این، الگوریتم  $E2$  دو سنگ بنا دارد، یکی کران بالای ۱ و دیگری رویه محدودسازی. رویه محدودسازی، همزمان با تضمین شدنی بودن پاسخ‌ها،  $UB1$  را به عنوان مبنایی برای کوچک کردن فضای جست و جو به کار می‌گیرد.

فرض کنید شبکه  $N_e$  گسترده‌ای باشد که در  $UB1$  تعریف شد. همچنین  $F^*$  را پیشینه جریان در  $N_e$  در نظر بگیرید در حالی که همه پایگاه‌ها گشایش یافته اند.  $f_l^*$  را جریان روی کمان  $(l, t)$  در نظر بگیرید، که برای آن داریم:  $value(F^*) = \sum_{l \in L} value(f_l^*)$ . فرض کنید  $f_1^*$  بیشترین مقدار در میان جریان روی این یال‌ها و مکان متناظر با آن نیز  $l_1^*$  است. در این صورت، با حل مسئله پیشینه جریان برای مقصد  $l_1^*$ ، به پیشینه جریان  $f^{ln}$  می‌رسیم که پاسخ اولیه‌ای برای دومین الگوریتم دقیق ما ( $E2$ ) به شمار می‌رود. در اینجا به معرفی معیار ظرفیت ورودی یا برای گره‌های مقصد می‌پردازیم. ظرفیت ورودی یا  $\Delta_l = \{\sum_{i \in \delta^-(l)} u(i, l) | l \in L\}$  معیاری برای توانایی یک گره در دریافت جریان است. در این گام از الگوریتم به حذف گره‌هایی می‌پردازیم که حداکثر قابلیت آن‌ها برای دریافت جریان  $(\Delta_l)$  از پاسخ اولیه  $(f_1^{ln})$  کمتر باشد. سپس الگوریتم  $E1$  را برای مقصدهای باقی‌مانده اجرا می‌کنیم. الگوریتم  $E2$  را در جدول ۶ مشاهده می‌کنید.

## ۶. متدولوژی‌های حل مسئله تخلیه مکان‌یابی پویا

[Ford and Fulkerson, 1958] مسئله جریان بیشینه را با بکارگیری مفهوم جریان‌های موقت تکرارشونده حل کرده‌اند. آنها نشان دادند که مسئله بیشینه جریان را می‌توان با (۱) قرار دادن هزینه کمان‌ها برابر با  $-\tau(a)$  و گنجایش آنها برابر با  $u(a)$  و (۲) افزودن کمان  $(t,s)$  با هزینه  $\tau(ts) = T$  و گنجایش نامتناهی حل کرد. پس از حل این مسئله کم‌هزینه‌ترین جریان، می‌توان جریان بهینه‌ی ایستا را به یک جریان تکرارشونده موقت تبدیل کرد که خود پاسخ بهینه جریان بیشینه‌ی شبکه پویاست

فرض کنید  $f: A \rightarrow N$  یک جریان شدنی ایستا در  $G$  باشد و  $f^1, \dots, f^k$  یک تجزیه زنجیری از جریان  $f$  باشد، یعنی  $P^i$  یک زنجیر است و  $f^i$  جریانی روی این زنجیر،  $\sum_{i=1}^k f^i = f$  فرض کنید  $\tau(P^i)$  نماینده مجموع زمان‌های گذر روی کمان‌های متعلق به  $P^i$  باشد. حال، برای هر  $i=1, \dots, k$  جریان  $|f^i|$  را در هر گام زمانی از  $0$  تا  $(T - \tau(P^i))$  در طول  $P^i$  گسیل می‌داریم. بدین‌گونه جریان پویای  $f^T$  به دست می‌آید که اندازه آن برابر است با:

$$|f^T| = \sum_{i=1}^k (T - \tau(P^i) + 1) |f^i| = (T + 1) |f| - \sum_{a \in A} \tau_a f_a \quad (26)$$

بنابراین اندازه  $f^T$  به تجزیه زنجیره انتخاب شده وابسته نیست. افزون بر این، یافتن جریان موقتاً تکراری هم‌ارز است با یافتن کم‌هزینه‌ترین گردش که هزینه کمان  $a$  در آن  $\tau(a)$  و هزینه کمان افزوده شده میان ابرچشمه و ابرچاهک،  $(-T+1)$  است. فورد و فالکرسون [Ford and Fulkerson, 1958] نشان دادند که میان جریان‌های تکراری موقت، همواره یک جریان بیشینه پویا وجود دارد. در نتیجه، مسئله جریان بیشینه در این مدل را می‌توان با حل مسئله کم‌هزینه‌ترین گردش در شبکه اولیه محاسبه کرد.

ما نیز در اینجا از ایده جریان تکرارشونده موقت برای حل  $D-ELP$  بهره می‌بریم. همانند الگوریتمی که برای شبکه

ایستا در نظر گرفتیم، رویه ارسال جریان به هر یک از مقصدهای ممکن تکرار می‌شود. بنابراین پیچیدگی الگوریتم  $|L|$  برابر می‌شود. و بنابراین روش، می‌توان همه کران‌ها و الگوریتم‌های توسعه یافته برای حالت ایستای مسئله را با به کارگیری مفهوم جریان‌های موقت تکرارشونده برای یافتن جریان بیشینه مسئله پویا و حل  $D-ELP$  نیز بکار گرفت.

## ۷. نتایج محاسباتی

عملکرد الگوریتم‌های  $UB1$ ,  $UB2$ ,  $E1$ ,  $E2$  هم از بعد زمان اجرا و هم از بعد فاصله با مقدار بهینه برای هر دو مسئله  $ELP$  ایستا و پویا در این بخش ارزیابی شده است. ما از الگوی همچر و همکاران [Hamacher et al. 2013] برای تولید مسئله‌های نمونه پیروی کردیم، بدین صورت که گرافهایی با ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ گره و با فشردگی یالی ۲۰٪ و با ظرفیت حداکثر ۱۰۰۰ واحد تولید نمودیم. تعداد گره‌های مقصد ممکن، از مجموعه  $q = \{10, 15, 20\}$  انتخاب شد.

نتایج عددی برای گروه‌های مختلف مسئله‌های نمونه و بر اساس پارامترهای نام‌برده ارائه شده‌اند. زمان اجرای هر کدام از الگوریتم‌ها از بهینه برای هر دو مسئله ایستا و پویا به ترتیب، در جدول‌های ۷ و ۸ گزارش شده است. میانگین و واریانس فاصله از بهینگی الگوریتم‌ها برای هر دو مسئله تک‌مقصدی ایستا و پویا نیز در جدول‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. مسئله‌های نمونه شبکه پویا نیز مانند مسئله ایستا و با حداکثر زمان گذر ۳ واحد و افق زمانی  $T=24$  تولید گردیدند. هر الگوریتم یا روش ابتکاری برای ۵ پیکربندی مختلف از مسائل پیاده شده است. این مسائل به صورت تصادفی در MATLAB تولید شده‌اند.

بنا بر جدول‌های ۷ و ۸ الگوریتم شاخه و کران ( $E2$ ) هم برای مسئله ایستا و هم برای مسئله پویا سریعتر از الگوریتم دقیق  $E1$  به بهینه می‌رسد، و این اختلاف زمانی در بیشتر موارد چشمگیر است. همچنین بر اساس نتایج ذکر شده در جدول‌های ۹ و ۱۰ کران‌های بالای توسعه یافته برای هر دو مسئله، فشرده نیست و اختلاف قابل توجهی با بهینه دارد، اما

مینا مزرعه فراهانی، سید کمال چهارسوقی، عیسی نخعی کمال آبادی، ابراهیم تیموری

شبکه‌های واقعی بیشتر است، چرا که این شبکه‌ها از نقشه‌ها و اطلاعات مکانی و جغرافیایی با هزاران گره و ده‌ها هزار کمان تشکیل شده‌اند. نکته دیگر آن که نسبت زمان اجرای E2 به E1 برای qهای بیشتر کمتر است، یعنی هر چه تعداد مقصدهایی بالقوه برای انتخاب بهترین مقصد بیشتر باشد، الگوریتم E2 نسبت به E1 کارا تر است.

جدول ۹. فاصله از بهیگی برای کران‌های بالای S-ELP

n	%GapUB1		%GapUB2	
	Av.	Var.	Av.	Var.
<b>q=۱۰</b>				
۱۰۰	۴۹۸/۸۹	۱۱/۰۲	۱۱۹۸/۲۹	۲۳/۲۱
۲۰۰	۶۲۸/۶۵	۷/۵۱	۱۰۸۷/۲	۱۲/۹۲
۳۰۰	۶۷۱/۱۸	۹/۱۱	۱۳۳۷/۴۵	۱۷/۵۱
۴۰۰	۷۱۹/۶۲	۷/۰۱	۱۶۴۰/۲۲	۱۳/۰۱
۵۰۰	۷۸۷/۲۳	۵/۶۹	۱۷۰۸/۲۷	۱۴/۹۰
<b>q=۱۵</b>				
۱۰۰	۶۹۸/۱۹	۶/۲۵	۷۸۲/۰۳	۳۱/۹۲
۲۰۰	۷۳۷/۵۲	۷/۹۷	۹۷۳/۱۷	۱۸/۰۰
۳۰۰	۷۸۱/۹۳	۱۱/۳۲	۱۰۰۴/۱	۱۱/۹۱
۴۰۰	۸۳۲/۸۳	۹/۱۱	۱۱۵۶/۰۳	۱۲/۹۴
۵۰۰	۸۷۷/۵۴	۸/۳۷	۱۱۸۷/۳۲	۱۱/۳۳
<b>q=۲۰</b>				
۱۰۰	۶۳۴/۲۵	۵/۸۵	۱۱۱۹/۰۱	۱۳/۷۶
۲۰۰	۷۰۵/۹۶	۹/۴۳	۱۲۷۱/۹	۱۵/۰۱
۳۰۰	۸۶۸/۲۴	۱۲/۰۱	۱۳۲۴/۶۶	۱۰/۰۹
۴۰۰	۹۱۹/۱۳	۱۴/۱۰	۱۲۸۷/۹۸	۱۱/۲۳
۵۰۰	۱۰۱۸/۱	۱۲/۷۷	۱۸۵۵/۱۱	۹/۰۸
<b>D-ELP</b>				
n	%GapUB1		%GapUB2	
	Av.	Var.	Av.	Var.
<b>q=۱۰</b>				
۱۰۰	۵۲۴/۸۹	۱۱/۰۲	۱۱۹۸/۲۹	۲۳/۲۱
۲۰۰	۶۲۸/۶۵	۷/۵۱	۱۰۸۷/۲	۱۲/۹۲
۳۰۰	۸۹۲/۰۵	۹/۱۱	۱۳۳۷/۴۵	۱۷/۵۱
۴۰۰	۸۲۴/۹۸	۷/۰۱	۱۶۴۰/۲۲	۱۳/۰۱
۵۰۰	۹۳۷/۲۳	۵/۶۹	۱۷۰۸/۲۷	۱۴/۹۰
<b>q=۱۵</b>				
۱۰۰	۶۹۸/۱۹	۶/۲۵	۷۸۲/۰۳	۳۱/۹۲
۲۰۰	۷۳۷/۵۲	۷/۹۷	۹۷۳/۱۷	۱۸/۰۰
۳۰۰	۷۸۱/۹۳	۱۱/۳۲	۱۰۰۴/۱	۱۱/۹۱
۴۰۰	۸۳۲/۸۳	۹/۱۱	۱۱۵۶/۰۳	۱۲/۹۴
۵۰۰	۸۷۷/۵۴	۸/۳۷	۱۱۸۷/۳۲	۱۱/۳۳
<b>q=۲۰</b>				
۱۰۰	۶۳۴/۲۵	۵/۸۵	۱۱۱۹/۰۱	۱۳/۷۶

مبنای مناسبی برای توسعه بهینه به روش شاخه و کران فراهم می‌کند.

جدول ۷. زمان اجرای الگوریتم‌ها برای S-ELP

n	UB1	UB2	E1	E2
<b>q=۱۰</b>				
۱۰۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۴	۰/۰۲
۲۰۰	۰/۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۲
۳۰۰	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۲
۴۰۰	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۳
۵۰۰	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۴
<b>q=۱۵</b>				
۱۰۰	۰/۰۸	۰/۰	۰/۳۷	۰/۱۱
۲۰۰	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۳۸	۰/۱۲
۳۰۰	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۴۸	۰/۱۲
۴۰۰	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۵۷	۰/۱۲
۵۰۰	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۷۱	۰/۱۰
<b>q=۲۰</b>				
۱۰۰	۰/۶۹	۰/۰۰	۱/۶۹	۰/۸۰
۲۰۰	۰/۶۶	۰/۰۷	۲/۱۸	۰/۷۸
۳۰۰	۱/۰۰	۰/۳۹	۴/۰۶	۱/۱۶
۴۰۰	۱/۰۷	۰/۵۰	۵/۵۰	۱/۳۷
۵۰۰	۱/۰۰	۰/۷۲	۸/۱۲	۱/۵۶

جدول ۸. زمان اجرای الگوریتم‌ها برای D-ELP

n	UB1	UB2	E1	E2
<b>q=۱۰</b>				
۱۰۰	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۵۶	۰/۴۷
۲۰۰	۰/۰۹	۰/۱۹	۱/۰۵	۰/۸۵
۳۰۰	۰/۲۵	۰/۴۱	۱/۸۳	۱/۵۷
۴۰۰	۰/۳۳	۱/۰۳	۳/۶۵	۲/۲۸
۵۰۰	۰/۸۵	۲/۱۰	۵/۴۸	۳/۱۴
<b>q=۱۵</b>				
۱۰۰	۰/۳۱	۰/۸۶	۱/۰۲	۰/۸۷
۲۰۰	۰/۸۰	۰/۹۹	۲/۱۹	۱/۵۳
۳۰۰	۱/۰۰	۱/۱۳	۳/۴۵	۱/۵۷
۴۰۰	۱/۵۴	۲/۰۴	۶/۶۲	۳/۰۴
۵۰۰	۱/۸۱	۳/۵۰	۹/۲۶	۳/۸۷
<b>q=۲۰</b>				
۱۰۰	۱/۱۲	۱/۸۹	۱/۲۵	۰/۸۷
۲۰۰	۲/۰۸	۳/۲۱	۳/۴۱	۱/۰۹
۳۰۰	۳/۲۷	۴/۸۰	۶/۵۳	۲/۷۸
۴۰۰	۳/۹۷	۶/۲۱	۱۲/۶۰	۵/۹۲
۵۰۰	۵/۷۱	۹/۷۵	۲۵/۴۳	۸/۵۶

افزون بر این، بر اساس مقایسه‌ای که در شکل ۴ انجام شده، با بزرگتر شدن اندازه شبکه نسبت زمان اجرای E2 به E1 برای هر سه گروه تعداد مقصدهای بالقوه، با روندی کاهشی روبرو است. اهمیت این نکته در پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها برای

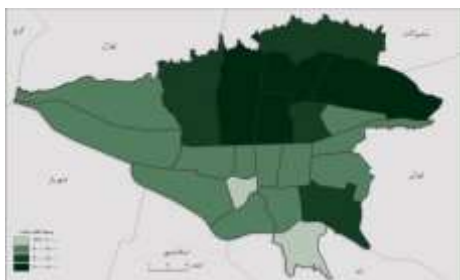


الگوریتم شاخه و کران برای مسئله تخلیه- مکان‌یابی (ایستا و پویای استوار) ...

همان طور که نتایج اجرای الگوریتم‌ها نشان می‌دهد از تکرار الگوریتم بیشینه جریان هم می‌توان به مکان بهینه رسید، اما این امر تنها برای شبکه‌های کوچک ایستا امکان‌پذیر است. در دنیای واقعی، اطلاعات GIS شبکه‌های شهری در برگیرنده هزاران گره و کمان است. افزون بر این، زمان گذر از یال‌ها نه تنها صفر نیست که متغیر است. این نکات ضرورت به کارگیری مدل پویا و حل آن با الگوریتم E2 را روشن‌تر می‌سازد.

اما از پیش‌نیازهای به کارگیری مدل پویا دسترسی به اطلاعات زمان گذر از مسیرها یا تخمینی از آن است. برای نمونه، درباره کلان‌شهری همچون تهران به کارگیری اطلاعات اطلس تهران (<http://atlas.tehran.ir/Default.aspx?tabid=122>)

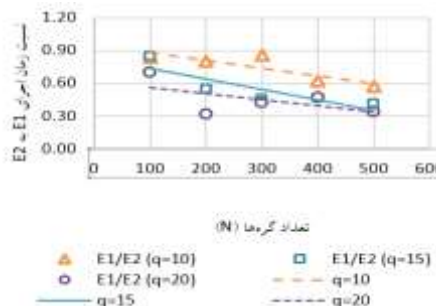
برای محاسبه زمان گذر از یال‌ها یا تقریبی بزرگتر از آن (یعنی میانگین زمان سفر در ناحیه‌های و مناطق مختلف تهران) ابزار مناسبی است. این اطلاعات برای وضعیت تردد آزاد و وضع موجود در دسترس است که نمونه‌ای از آن را در شکل ۶ مشاهده می‌کنید.



شکل ۶. میانگین کل مدت زمان سفر در حالت تردد آزاد (۱۳۸۳) به تفکیک منطقه (منبع اطلس تهران)

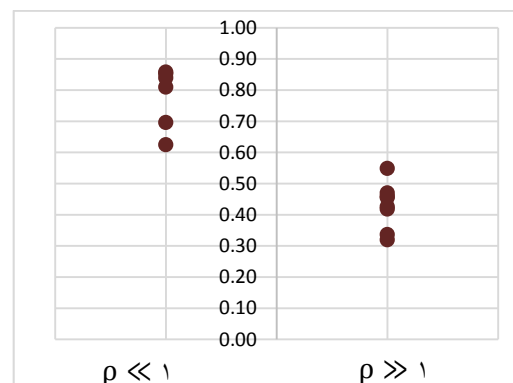
همچنین می‌توان با استفاده از اطلاعات میانگین سرعت در گذرگاه‌ها، و با توجه به مشخص بودن طول گذرها و خیابان‌ها بر اساس رابطه سرعت، فاصله و زمان، زمان گذر از مسیرها یا تقریب مناسبی از آن را محاسبه نمود (شکل ۷). این اطلاعات به عنوان پیش‌نیازهای مدلسازی به روش پویا، پاسخ را به شرایط واقعی نزدیک‌تر می‌سازد.

۲۰۰	۷۰۵/۹۶	۹/۴۳	۱۲۲۱/۹	۱۵/۰۱
۳۰۰	۸۶۸/۲۴	۱۲/۰۱	۱۳۲۴/۶۶	۱۰/۰۹
۴۰۰	۹۱۹/۱۳	۱۴/۱۰	۱۲۸۷/۹۸	۱۱/۲۳
۵۰۰	۱۰۱۸/۱۰	۱۲/۲۷	۱۸۵۵/۱۱	۹/۰۸

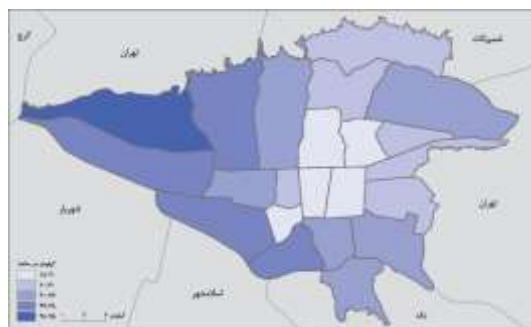


شکل ۴. رابطه نسبت زمان اجرای E1 به E2 و اندازه شبکه (تعداد گره‌ها)

به جز تعداد گره‌ها، نسبت زمان اجرای دو الگوریتم دقیق مقاله را بر اساس سنجه دیگری نیز ارزیابی کرده‌ایم. معیاری که در این مقایسه به کار رفته، نسبت «میانگین ظرفیت جریان ورودی گره‌های مقصد»  $(\frac{\sum L_i L_i \Delta L_i}{|L|})$  به «میانگین ظرفیت جریان ورودی دیگر گره‌های شبکه»  $(\frac{\sum_{i=1}^n L_i L_i \Delta L_i}{n})$  است. این سنجه را در شکل ۵ با  $\rho$  نشان داده‌ایم و گراف‌های تصادفی را برای مقادیر  $\rho \ll 1$  و  $\rho \gg 1$  بررسی نمودیم. بر اساس این ارزیابی (شکل ۵)، با افزایش ظرفیت جریان ورودی گره‌های مقصد (اعضای مجموعه L) نسبت زمان اجرای E1 به E2 کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که در شبکه‌هایی که در آن پناه‌گاهها و مقصدهای اسکان اضطراری با بزرگراه‌ها یا آزادراه‌ها (دارای ظرفیت بالاتر نسبت به دیگر مسیرهای داخل شهری) به شهرها متصل اند، الگوریتم E2 سریع‌تر از E1 اجرا می‌شود و این اختلاف زمانی چشمگیر است.



شکل ۵. رابطه ظرفیت گره‌های بالقوه مقصد و نسبت زمان اجرای الگوریتم E1 به E2



شکل ۷. میانگین سرعت متوسط حرکت در حالت تردد عادی  
(۱۳۸۳) به تفکیک منطقه (منبع اطلس تهران)

شکل ۸. نقشه شهر برلین

(منبع: <http://www.proseniores-berlin.de>)

با توجه به این نتایج، همه الگوریتم‌ها برای این شبکه واقعی بسیار سریع اجرا شده‌اند (بیشترین زمان اجرا مربوط به الگوریتم دقیق  $E1$  با زمان  $1/0.2$  ثانیه برای انتخاب یک مقصد از میان ۲۵ مقصد ممکن است). بنابراین حتی الگوریتم‌های دقیق  $E1$  و  $E2$  نیز در مورد چنین شبکه‌ای کارا هستند. با وجود آن که  $H1$  لزوماً بهینه را نمی‌یابد اما، در مورد این مسئله برای هر ۴ گروه مسئله به پاسخ بهینه رسیده است. همچنین بیشترین فاصله با بهینه مربوط به الگوریتم  $E1$  برای انتخاب یک مقصد از میان ۲۵ مقصد است، هر چند چگالی این شبکه (حدود ۰.۵٪) نسبت به بسیاری از شبکه‌های واقعی کمتر است

جدول ۱۱. زمان اجرای الگوریتم‌ها برای شبکه

Mitte-center برلین

q	UB1	UB2	E1	E2	H1
10	0.00	0.001	0.24	0.16	0.009
15	0.00	0.001	0.63	0.28	0.01
20	0.00	0.002	0.93	0.68	0.06
25	0.001	0.002	1.02	0.96	0.25
میانگین	0.000	0.002	0.70	0.52	0.08

جدول ۱۲. فاصله تا بهینگی برای شبکه

Mitte-center برلین

q	%GapUB1	%GapUB2	%GapH1
10	5.63	29.62	0
15	24.3	47.36	0
20	75	50.36	0
25	100.34	83.64	0
میانگین	51.31	52.74	0

## ۹. نتیجه‌گیری و پیشنهاد تحقیقات آتی

در این مقاله توانستیم با ترکیب تصمیم‌های تخلیه و مکان‌یابی در شرایط بحران، مسئله انتخاب یک پایگاه از میان چند پایگاه

## ۸. مطالعه موردی

### ۸-۱ حل مسئله تخلیه-مکان‌یابی برای

### داده‌های شهر برلین

در این بخش الگوریتم‌های پیشنهادی، برای حل مسئله S-ELP برای داده‌های شبکه مسیرهای شهری واقعی اجرا می‌شوند. مجموعه اطلاعاتی از شبکه‌های شهر برلین در (<http://www.bgu.ac.il/bargera/tntp/>) ارائه شده است. این اطلاعات برگرفته از پایگاه داده‌های مسائل حمل و نقل هستند [H. Bar-Gera, 2005]. ما از اطلاعات شبکه Mitte-center Berlin استفاده کرده‌ایم، چون بیش از دیگر داده‌ها با فرضیات مدل‌های ارائه شده در این مقاله همخوانی داشت. اطلاعات این شبکه شامل یک گراف ساده با ظرفیت کمان‌های عدد صحیح است. مساحت واقعی شبکه Mitte-center Berlin ۳۹ کیلومتر مربع است که نقشه آن را در شکل ۸ مشاهده می‌کنید.

این مجموعه داده شامل ۳۹۸ گره و ۸۷۱ کمان با ظرفیت‌های ثابت و صحیح است. روش‌های حل پیشنهادی در مقاله با انتخاب تصادفی گره‌های مقصد از مجموعه  $q = \{10, 15, 20, 25\}$  برای این اطلاعات اجرا شده‌اند. تعداد مکان‌هایی که باید انتخاب شود را  $p=5$  فرض کرده‌ایم. نتایج محاسباتی اجرای الگوریتم‌ها بر روی این داده‌ها در جدول‌های ۱۱ و ۱۲ خلاصه شده است.

2. Static Evacuation-Location Problem
3. Dynamic Evacuation-Location Problem
4. Affinely Adjustable Robust Counterpart (AARC)
5. Affine Function
6. Earliest Arrival Flow

### ۱۱. مراجع

- Abdelgawad H. and Abdulhai, B. (2009) "Emergency evacuation planning as a network design problem: A critical review", *Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research*, Vol. 1, No. 1, pp.41-58.
- Ahmadi, M., Seifi, A. and Tootooni, B. (2015) "A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: a case study on San Francisco district", *Transp Res Part E Vol. 75*, pp.145-163
- Ahuja, R. K., Magnanti, Th. K. and Orlin. J. B. (1993) "Network flows", Prentice Hall, New Jersey.
- Akgün, İ., Gümüşbuğa, F. and Tansel, B. (2015) "Risk based facility location by using fault tree analysis in disaster management", *Omega*, Vol. 52, pp.168-179.
- Bar-Gera, H. (2005) "Berlin mitte center network", <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks/tree/master/Berlin-Mitte-Center>.
- Bell, M. G. H., Fonzone, A. and Polyzoni, C. (2014) "Depot location in degradable transport networks", *Transp. Res. Part B Methodol.* Vol. 66, pp. 148-161. doi:10.1016/j.trb.2013.11.003.
- Ben-Tal, A. and Nemirovski, A. (2002) "Robust optimization-methodology and applications", *Mathematical Programming*, Vol. 92, No. 3, pp.453-480.
- Ben-Tal, A., Goryashko, A., Guslitzer, E. and Nemirovski, A. (2004) "Adjustable robust solutions of uncertain linear programs", *Mathematical Programming*, Vol. 99, No. 2, pp.351-376.
- Boonmee, C., Arimura, M. and Asada, T. (2017) "Facility location optimization

موجود برای شبکه‌های ایستا و پویا را که پارامترهای آنها در گذر زمان ثابت است با دو مدل عددصحيح مختلط غیرخطی مدل‌سازی کنیم. با وجود غیرخطی بودن مدل‌ها، به دلیل ساختار ویژه‌ای که دارند توانستیم بر پایه الگوریتم‌های موجود پیشینه‌سازی جریان در شبکه‌های ایستا و پویا، دو کران بالا برای تابع هدف آن‌ها توسعه دادیم. همچنین دو الگوریتم دقیق برای حل دو مدل غیرخطی پیشنهاد شده است. یک الگوریتم از تکرار الگوریتم‌های موجود برای یافتن پیشینه جریان حاصل می‌شود و الگوریتم دیگر با روش شاخه و کران از کران بالایی که پیش از آن توسعه داده‌ایم برای یافتن بهینه بهره می‌برد. این دو الگوریتم در کنار کران‌های بالای پیشنهادی برای مسئله‌های نمونه تصادفی اجرا و میانگین زمان حل آن‌ها گزارش شده است.

گرچه ما در نخستین گام انتخاب یک پایگاه از میان چندین سرپناه در نظر گرفته‌ایم، اما می‌توان مسئله ترکیبی تخلیه- مکان‌یابی را به حالت انتخاب چند پایگاه نیز گسترش داد. افزون بر این، از دیگر مسائل مهم در تخلیه اضطراری پرداختن به اهداف هزینه‌ای همچون کمینه‌سازی زمان تخلیه یا تعداد تلفات و آسیب‌های جانی است. بنا بر این می‌توان مدل‌های بهینه‌سازی دیگری از چشم‌اندازهای نامبرده را توسعه داد. از دیگر مسئله‌های مهم در پژوهش‌های مربوط به مدیریت بحران، توسعه مدل‌های استوار در شرایط وجود عدم قطعیت است. عدم قطعیت را می‌توان از چند منظر در مدل وارد کرد. نخست ممکن است ویژگی‌های شبکه در نتیجه آسیب دچار تغییر شوند که از جمله آن‌ها می‌توان به تخریب مسیرها، زیرساخت‌ها یا تجهیزات کمک‌رسانی اشاره کرد، این مفهوم را می‌توان با تصادفی در نظر گرفتن ظرفیت یال‌ها، گره‌های شبکه یا زمان گذر از یال‌ها در مدل وارد کرد. علاوه بر این، ممکن است بخشی از عدم قطعیت ناشی از در دسترس نبودن اطلاعات گره‌ها یا تقاضا در گره‌های مبدأ باشد. از دیگر زمینه‌های توسعه این پژوهش پرداختن به مدلی با تقاضای ثابت یا عدم قطعی در گره‌های مبدأ (محل رخداد بحران) است. همچنین می‌توان تصمیمات مربوط به مکان‌یابی را با مسئله زودترین جریان ورودی ترکیب کرد. جریانی که توان گذرنده از شبکه را برای هر بازه ممکن  $[0, t]$   $0 < t \leq T$  پیشینه می‌کند، زودترین جریان ورودی می‌گویند.

### ۱۰. پی نوشت‌ها

1. Emergency Logistics

- Ford L. R. and Fulkerson, D. R. (1958) "Constructing maximal dynamic flows from static flows", *Operations Research*, Vol. 6, pp.419-433.
- Ford, L. R. and Fulkerson, D. R. (1962) "Flows in networks", Princeton University Press", Princeton, NJ.
- Friesz, T. L., Lee, I. and Lin, C. C. (2011) "Competition and disruption in a dynamic urban supply chain", *Transportation Research Part B*, Vol. 45, No. 8, pp. 1212-1231.
- Ghatreh Samani, M. and Hosseini-Motlagh, S. M. (2017) "A hybrid algorithm for a two-echelon location-routing problem with simultaneous pickup and delivery under fuzzy demand", *International Journal of Transportation Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 59-85.
- Ghezavati, V., Soltanzadeh, F. and Hafezalkotob, A. (2015) "Optimization of reliability for a hierarchical facility location problem under disaster relief situations by a chance-constrained programming and robust optimization", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, Vol. 229, No. 6, pp. 542-555.
- Hamacher, H.W., Heller, S. and Rupp, B. (2013) "Flow location (FlowLoc) problems: dynamic network flows and location models for evacuation planning", *Annals of Operations Research*, Vol. 207, No. 1, pp. 161-180.
- Hoppe B. and Tardos. É. (1994) "Polynomial time algorithms for some evacuation problems", In *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, pp. 433-441.
- Horner M. W. and Downs, J. A. (2010) "Optimizing hurricane disaster relief goods distribution: model development and application with respect to planning strategies", *Disasters*, Vol. 34, No. 3, pp.821e44.
- Hoyos, M. C., Morales, R. S. and Akhavan-Tabatabaei, R. (2015) "OR models with stochastic components in model for emergency humanitarian logistics", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 24, pp. 485-498.
- Cavdur, F., Kose-Kucuk, M. and Sebatli, A. (2016) "Allocation of temporary disaster response facilities under demand uncertainty: An earthquake case study", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 19, pp.159-166.
- Chalmet L. G., Francic, R. L. and Saunders, P. B. (1982) "Evacuation network models for building evacuation", *Management Science*, (January), Vol. 18, No. 1, pp 90-113.
- Chen, A.Y., Yu, T.-Y., Lu, T.-Y., Chuang, W.-L., Lai, J.-S., Yeh, C.-H. and Sun, W.-Z. (2015) "Ambulance service area considering disaster-induced disturbance on the transportation infrastructure", *J. Test. Eval.* 43, 20140084. DOI:10.1520/JTE20140084.
- Chen, A. Y. and Yu, T. Y. (2016) "Network based temporary facility location for the Emergency Medical Services considering the disaster induced demand and the transportation infrastructure in disaster response", *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 91, pp.408-423.
- Fleischer, L. and Skutella, M. (2002) "The quickest multicommodity flow problem", In W. J. Cook and A. S. Schulz, "Integer Programming and Combinatorial Optimization", Vol. 2337 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 36-53.
- Fleischer, L. and Skutella, M. (2006) "The quickest multicommodity flow problem", In *Integer Programming and Combinatorial Optimization* (pp. 36-53). Springer Berlin Heidelberg.
- Fleischer, L. (2001) "Faster algorithms for the quickest transshipment problem", *SIAM J. on Optimization*, Vol. 12, No. 1, pp. 18-35.
- Fleischer, L. (2001) "Universally maximum flow with piecewise-constant capacities", *Networks*, Vol. 38, No. 3, pp.115-125.

Transportation Research Part B, Vol. 45 No. 8, pp. 1190–1211.

-Philpott, A. B. (1990) "Continuous-time flows in networks", Mathematics of Operations Research, Vol. 15 No. 4, pp. 640–661.

-Powell, W. B., Jaillet, P. and Odoni, A. (1995) "Stochastic and dynamic networks and routing", In M. O. et al. Ball, editor, Handbooks in Operations Research and Management Science – Network Routings, Volume 8, Chapter 3. Elsevier Science.

-Qi, L., Shen, Z. M. and Snyder, L. V. (2010) "The effect of supply disruptions on supply chain design decisions", Transportation Science, Vol. 44, No. 2, 274–289.

-Rezaei-Malek, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri B. and Bozorgi-Amiri, A. (2016) "An interactive approach for designing a robust disaster relief logistics network with perishable commodities", Comput Ind Eng Vol. 94, pp.201–215

-Salman, F. S. and Yücel, E. (2015) "Emergency facility location under random network damage: Insights from the Istanbul case", Computers & Operations Research, Vol. 62, pp.266–281.

-Sbayti, H. and Mahmassani, H. (2006) "Optimal scheduling of evacuation operations", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1964, pp. 238–246.

-Schneeberger, K., Doerner, K. F., Kurz, A. and Schilde, M. (2016) "Ambulance location and relocation models in a crisis", Central European Journal of Operations Research, Vol. 24, No. 1, pp. 1-27.

-Shen, Z. M., Zhan, R. and Zhang, J. (2011) "The reliable facility location problem: formulations, heuristics, and approximation algorithms", Inform Journal on Computing, Vol. 23, No. 3, pp. 470–482.

disaster operations management: A literature survey", Computers & Industrial Engineering, Vol. 82, pp.183-197.

-Huang, M., Smilowitz, K. R. and Balcik, B. (2013) "A continuous approximation approach for assessment routing in disaster relief", Transp. Res. Part B: Methodology. Vol. 50, pp. 20–41. DOI:10.1016/j.trb.2013.01.005.

-Jia H., Ordóñez F. and Dessouky, M. M. (2007) "Solution approaches for facility location of medical supplies for large-scale emergencies", Computers and Industrial Engineering; Vol. 52, No. 2, pp.257-276.

-Klinz, B. and Woeginger, G. J. (2004) "Minimum-cost dynamic flows: The series-parallel case", Networks, Vol. 43, pp. 153–162. DOI:10.1002/net.10112.

-Köhler, E. and Skutella. M. (2002) "Flows over time with load-dependent transit times", Proceedings of the 13th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA'02), pp. 174–183.

-Kotnyek, B. (2003) "An annotated overview of dynamic network flows", France: Institut National de Recherche Informatique ET en Automatique.

-Najafi, M., Eshghi, K. and Dullaert, W. (2013) "A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase", Transp. Res. Part E, Vol. 49, pp. 217–249.

-Nappi, M. M. L. and Souza, J. C. (2015) "Disaster management: Hierarchical structuring criteria for selection and location of temporary shelters", Natural Hazards, Vol. 75, No. 3, pp. 2421-2436.

-Özdamar, L. and Ertem, M. A. (2015) "Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics", European Journal of Operational Research, Vol. 244, No. 1, pp. 55-65.

-Peng, P., Snyder, L.V., Lim, A. and Liu, Z. L. (2011) "Reliable logistics networks design with facility disruptions",

مینا مزرعه فراهانی، سید کمال چهارسوقی، عیسی نخعی کمال آبادی، ابراهیم تیموری

آقایی، م.، علینقیان، م. و صباغ، م. س. (۱۳۹۶) "مکان یابی مراکز امداد موقت و مسیریابی پویای وسایل نقلیه امداد هوایی در شرایط بحران"، فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی حمل و نقل، دوره ۹، شماره ۴، ص. ۵۱۹-۵۴۸

ترابی، س.ع. و خلیلی، س. م. (۱۳۹۱) "ارائه یک مدل مکان‌یابی - تخصیص دو هدفه برای توزیع کالاهای امدادی در فاز مدیریت بعد از بحران"، دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران.

-Tofighi, S., Torabi, S. A. and Mansouri, S. A. (2016) "Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty", European Journal of Operations Research, Vol. 250, No. 1, pp.239-250

-Ye, F., Zhao, Q., Xi, M. and Dessouky, M. (2015) "Chinese national emergency warehouse location research based on VNS Algorithm", Electronic Notes in Discrete Mathematics, Vol. 47, pp.61-68.

-Yuan, Y. and Wang, D. (2009) "Path selection model and algorithm for emergency logistics management", Computers & Industrial Engineering, Vol. 56, No. 3, pp.1081-1094.

سید کمال‌الدین چهارسوقی، درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۶۴ از دانشگاه هال انگلستان کسب کرد و هم‌اکنون عضو هیات علمی با مرتبه استاد در دانشگاه تربیت مدرس است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان سیستم‌های تولیدی، مدیریت زنجیره تأمین، سیستم‌های اطلاعاتی، مدیریت استراتژیک و نظریه سیستم‌ها است.



مینا مزرعه فراهانی، درجه کارشناسی در رشته ریاضی را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه علم و صنعت اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی تخصصی ایشان مدیریت زنجیره تأمین، لجستیک، مدیریت بحران و نظریه سیستم‌ها است. وی هم‌اکنون دانشجوی دکتری مهندسی صنایع در دانشگاه تربیت مدرس است.



عیسی کمال‌آبادی نخعی، درجه کارشناسی در رشته علوم کامپیوتر را در سال ۱۳۵۹ از دانشگاه شهید بهشتی و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۶۷ را از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۷۴ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه تورنتو شد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان بهینه‌سازی، مدیریت زنجیره تأمین، زمان‌بندی و فناوری اطلاعات بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد در دانشگاه کردستان و استاد مدعو دانشگاه تربیت مدرس است.



ابراهیم تیموری، درجه کارشناسی را در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۶۹ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۷۲ از دانشگاه علم و صنعت اخذ نمود. در سال ۱۳۷۸ موفق به کسب درجه دکتری از دانشگاه علم و صنعت شد. زمینه‌های پژوهشی تخصصی ایشان بهینه‌سازی در زنجیره تأمین و لجستیک، نظریه صف و کاربردهای آن و مهندسی سیستم‌های اقتصادی - اجتماعی است. ایشان هم‌اکنون عضو هیئت علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه علم و صنعت ایران است.

