

ارائه‌ی یک الگوی بهینه‌سازی برای مسئله‌ی پاک‌سازی آوار در فاز پاسخ به بحران

شایان توکلی*؛ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس فنی دانشگاه تهران، ایران؛

Email: sh.tavakoli@ut.ac.ir

مسعود ربانی: استاد، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس فنی دانشگاه تهران، ایران.

علی بزرگی امیری: استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس فنی دانشگاه تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۳

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۵

چکیده

هدف از مرحله‌ی پاسخ بعد از بحران، کاهش تلفات انسانی از طریق دسترسی به مناطق بحران زده به منظور انتقال کمک‌های امدادی و عملیات جست‌وجو و نجات مصدومان در سریع‌ترین زمان ممکن است. آوار ناشی از فاجعه موجب مسدود شدن راه‌ها و مانع از دسترسی گروه‌های امداد و نجات به مناطق بحران زده می‌شود. برای کاهش اثرهای منفی فاجعه، تصمیم‌گیری مبنی بر اینکه کدام راه‌ها در راستای حمل‌ونقل کمک‌های امدادی پاک‌سازی شوند بسیار حیاتی است. در این مقاله مدلی (الگویی) برای مسئله‌ی پاک‌سازی آوار با هدف حداقل کردن زمان دسترسی به مناطق بحرانی نظیر بیمارستان‌ها ارائه شده است. برای کاهش زمان حل مسئله، الگوریتم دو مرحله‌ای مبتنی بر الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ارائه شده است. همچنین کارایی و کاربردپذیری الگو و روش حل پیشنهادی در منطقه‌ی ۲ تهران مورد بررسی و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج این تحقیق بیانگر اهمیت در نظر گرفتن یک برنامه‌ی جامع برای پاک‌سازی آوار و در نظر گرفتن چند قرارگاه برای پاک‌سازی آوار در فاز پاسخ به بحران است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت بحران، مسئله‌ی پاک‌سازی آوار، لجستیک بشردوستانه، مسئله‌ی مسیریابی حمل‌ونقل، شبیه‌سازی تبرید

Providing an Optimization Model for Debris Clearance Problem During Disaster Response Phase

Shayan Tavakoli^{*1}, Masoud Rabbani², Ali Bozorgi-Amiri³

Abstract

The purpose of response phase after a disaster is to reduce mortality by accessing affected areas in order to transport relief items and search and rescue activities as soon as possible. Debris caused by the disaster blocks the roads and prevents emergency aid teams to access the disaster affected regions. Deciding which road to clean in order to transport relief items is crucial to diminish the negative effect of a disaster on human health. In this paper, we developed a mixed integer mathematical model to the debris clearance problem considering multi-depot and multi-vehicle. The aim of our model is to minimize the maximum walk of the vehicles. For decreasing the computational time, we developed a two-phase heuristic based on simulated annealing. Validity and applicability of the proposed model and solution algorithm are tested and analysed in a region of Tehran, Iran. The results from this experiment highlight the importance of multi-depot and considering a comprehensive plan for the debris removal problem in the response phase.

Keywords: Disaster management, Debris clearance problem, Humanitarian logistics, Vehicle routing problem, Simulated annealing

1 M. Sc. Student of Industrial Engineering, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran; Email: sh.tavakoli@ut.ac.ir

2 Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3 Assistant Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

۵

شماره دهم

پاییز و زمستان
۱۳۹۵

دوفصلنامه
علمی و پژوهشی



مقدمه

فاجعه یا بلا، رویدادی است که موجب آسیب‌های فیزیکی، تخریب ساختمان‌ها، از دست دادن زندگی یا تغییر قابل توجهی در محیط زیست طبیعی می‌شود. فاجعه می‌تواند ریشه‌ای طبیعی داشته و یا ناشی از فعالیت‌های انسانی باشد. زلزله، سیل، طوفان، بهمین، آتش‌سوزی و انفجار برخی از بلایایی هستند که ضررهای غیر قابل جبرانی به همراه دارند. در سال‌های اخیر، بلایای طبیعی و بلایای ساخت بشر تأثیرات مخربی بر سلامت انسان‌ها گذاشته‌اند. به طور نمونه می‌توان به زلزله‌ی کاتماندو در نپال با بیش از ۸۰۰۰ کشته در سال ۲۰۱۵، طوفان هایان با بیش از پنج هزار کشته در فیلیپین در سال ۲۰۱۳، زمین‌لرزه‌ی ناشی از تسونامی در نیگاتای ژاپن و نشت هسته‌ای ناشی از آن در نیروگاه فوکوشیما در سال ۲۰۱۱، و همچنین زمین‌لرزه‌ی هائیتی در سال ۲۰۱۰ اشاره کرد. روند رو به رشد شهرنشینی و تراکم جمعیت، موجب افزایش آثار مخرب این بلایا بر سلامت انسان‌ها و اقتصاد جهانی شده است. نوع فاجعه، حوزه‌ی نفوذ و شدت آن عواملی هستند که میزان خسارت ناشی از بحران را تحت تأثیر قرار می‌دهند. برای به حداقل رساندن آثار منفی بلایا و از دست دادن زندگی، مدیریت بحران نقشی کلیدی ایفا می‌کند. مدیریت بحران دارای چهار رکن اصلی شامل کاهش خسارت‌ها، آمادگی، پاسخ و بازسازی است. کاهش خسارت‌ها، شامل اقدامات پیشگیرانه برای جلوگیری از فاجعه و یا کاهش تأثیر آن است. بنابراین این مرحله در قبل و بعد از وقوع بحران ایفای نقش می‌کند. هدف از فعالیت‌های آمادگی، کسب توانایی‌های لازم برای پاسخ و عملیات نجات به هنگام وقوع فاجعه است. پاسخ مرحله‌ای است که در آن منابع به منظور رسیدن به مناطق تحت بحران، نجات جان انسان‌ها و پیشگیری از خسارت‌های اقتصادی و محیط زیستی احتمالی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برنامه‌ریزی این مرحله به دلیل اینکه بلافاصله بعد از بحران نقش ایفا می‌کند و منابع باید هرچه سریع‌تر به کمک مردم بحران زده بپردازند پیچیده‌تر است. بازسازی، شامل مجموعه اقدامات پس از فاجعه‌ای است که به منظور برگشت به شرایط عادی و تأمین زندگی پایدار برای بحران‌زدگان صورت می‌پذیرد [۱]. با وجود انواع اقدامات پیشگیرانه، بلایا، به‌ویژه بلایای طبیعی، اجتناب‌ناپذیرند. بنابراین برنامه‌ریزی عملیات امداد رسانی قبل از وقوع بحران و پیاده‌سازی آن‌ها در فازهای اولیه بعد از وقوع بحران، در کاهش اثرهای فاجعه بسیار حائز اهمیت است. مطابق با نظر وستنهاو در سال ۲۰۰۶ [۲]، بخش عظیمی از عملیات امداد رسانی مرتبط با لجستیک است؛ از این رو برای برقراری مجدد شرایط عادی زندگی با حداقل تلفات جانی و مالی، نیازمند رهبری و انجام عملیات لجستیکی به صورت اثربخش هستیم. مطابق با نظر شو در سال ۲۰۰۷ [۳]، از چالش‌های اصلی لجستیک اضطراری، کمبود منابع لازم برای پیش (کنترل) وضعیت و امداد به بحران‌زدگان یا عدم دسترسی و دستیابی به آن‌ها در کوتاه‌ترین زمان است. در زمین‌لرزه‌ی هائیتی در سال ۲۰۱۰، فضای رمپ محدود فرودگاه و کمبود سوخت، مانع بسیاری از پروازهای بشردوستانه به این کشور شده بود [۴]. خرابی در شبکه‌ی ارتباطی و زیرساختی نظیر راه‌ها،

پیچیدگی و سختی در عملیات لجستیکی را افزایش می‌دهد. برای مثال در جریان زمین‌لرزه‌ی هائیتی، مسدود بودن بندرگاه، انتقال کمک‌های اولیه به این کشور از طریق کشتی‌های بزرگ را با معضل همراه کرد. زمانی که دولت‌ها و سازمان‌ها قادر به غلبه بر این مشکلات نیستند، تأثیر فاجعه برای مدت زمان طولانی باقی می‌ماند. در زمین‌لرزه‌ی هائیتی ۹۸٪ آوار بعد از گذشت ۶ ماه از وقوع فاجعه باقی مانده بود و رفت و آمد را در بیشتر مناطق پایتخت با معضل همراه ساخته بود [۵].

آوار را می‌توان به صورت هرگونه ضایعاتی که توسط فجاجع تولید می‌شوند تعریف کرد؛ آوار می‌تواند به صورت پوشش گیاهی (درختان، الوار)، ضایعات ساختمانی (بتن، مصالح پشت بام)، زباله‌های شهری، لوازم خانگی، وسایل نقلیه‌ی موتوری، حیوانات مرده یا مواد شیمیایی باشد [۶]. آوار با ضایعات معمولی از لحاظ حجم و محتوا تفاوت دارد. در جریان طوفان کاترینا ۵۰ برابر میزان سالیانه‌ی ضایعات روزانه‌ی امریکا در چند ساعت آوار تولید شد. نوع و محل حادثه، ویژگی‌های آوار تولید شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به طور مثال آوار تولید شده توسط یک زلزله در منطقه‌ی شهری بیشتر شامل باقی‌مانده‌ی ساختمان‌هاست، در حالی که آوار یک طوفان بیشتر شامل درخت‌ها و بخش‌هایی از ساختمان نظیر فنس‌ها و سقف ساختمان‌هاست. قبل از آنکه فاجعه رخ بدهد، مجموعه‌ای از سناریوهای بالقوه‌ی فاجعه به منظور پیش‌بینی حجم و نحوه‌ی پراکندگی آوار در نظر گرفته می‌شوند. برنامه‌های تدارک تجهیزات و تخصیص نیروی کار بر اساس همین انتظارات تهیه می‌شوند. مکان و ظرفیت تسهیلاتی نظیر مناطق بازیافت آوار و محل‌های دفن آوار نیز در این مرحله تعیین می‌شود. در نخستین روزهای پس از فاجعه (مرحله‌ی پاسخ)، منابع اغلب بسیار محدود و رساندن کمک‌های اولیه به نیازمندان دارای اهمیتی حیاتی است؛ از این رو هدف اصلی برنامه‌های پاک‌سازی در مرحله‌ی پاسخ، رفع انسداد معابر با انتقال آوار به کناره‌ی جاده‌هاست، به نحوی که عملیات کاوش و نجات و همچنین انتقال کمک‌های امدادی به نحو احسن صورت پذیرد. در مرحله‌ی بازسازی، فعالیت‌های جمع‌آوری آوار شامل حمل و نقل آوار از مناطق فاجعه‌زده به سایت‌های جمع‌آوری به منظور بازیافت یا دور ریخته شدن است. در نهایت بازیافت یا دفع آوار شامل عملیات پردازش (نظیر سوزاندن، خرد کردن، آسیاب کردن و ...) آوار در تسهیلات از پیش تعیین شده است [۶]. پاک‌سازی آوار بعد از فاجعه، یک اقدام ضروری برای عادی کردن زندگی قربانیان به شمار می‌رود. آوار تأثیر زیادی بر سلامت روحی و جسمی مردم دارد. در حالی که زباله‌های خطرناک، زندگی قربانیان را به طور مستقیم تهدید می‌کند؛ زندگی در نزدیکی این آوار نیز از لحاظ روانی بر روی مردم تأثیر می‌گذارد. این مسائل دغدغه‌های اصلی در پاک‌سازی یا بازیافت کامل آوار در فاز پس از بحران هستند. با توجه به ماهیت مرحله‌ی پاسخ، هدف و مشخصه‌های اقدامات مربوط به آوار متفاوت است. در این فاز، هدف اصلی، دسترسی به مناطق بحران‌زده به منظور رساندن کمک‌های امدادی است. منظور از کمک‌های امدادی همه‌ی وسایل ضروری اورژانسی (فوری) از جمله غذا و دارو است. از این رو

پیشینه‌ی پژوهش

در پیشینه‌ی موضوع لجستیک بشردوستانه، اگرچه مطالعات فراوانی بر فعالیت‌هایی که در مرحله‌ی پاسخ به بحران نقش بازی می‌کنند صورت پذیرفته ولی مطالعات بر حوزه‌ی مسئله‌ی پاک‌سازی آوار به ندرت مشاهده می‌شود. مطالعات صورت پذیرفته بر پاک‌سازی آوار بیشتر بر موضوع بازسازی چرخه‌ی مدیریت بحران تمرکز دارند. فتر و راکس [۷]، در سال ۲۰۱۲ تفاوت‌های مدیریت آوار ناشی از فاجعه را با ضایعات روزانه بیان کردند و اشاره کردند که دفع مواد زائد ناشی از بحران بخش عظیمی از هزینه‌های فاجعه را تشکیل می‌دهد. آن‌ها بیان کردند که عملیات پاک‌سازی آوار عمدتاً به دو فاز تقسیم می‌شوند. فاز اول به دنبال پاک‌سازی آوار به منظور تضمین دسترسی به مناطق بحران‌زده است و فاز دوم شامل تمام اقدامات مربوط به جمع‌آوری آوار، تفکیک و بازیافت آن‌هاست. آن‌ها اشاره کردند با یک تغییر در سیاست‌های دفع آوار توسط سازمان مدیریت شرایط اضطراری آمریکا (FEMA)، بازیافت آوار تشویق می‌شود و موازی با این سیاست، یک مدل مکان‌یابی را برای مشخص کردن تسهیلات موقت دفع و نگهداری آوار با هدف پیشینه کردن بازیافت با کمترین هزینه توسعه دادند. هو و شیو [۸]، در سال ۲۰۱۳ آثار روانی ناشی از آوار را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها اشاره کردند که مطالعات بر روی مدیریت ضایعات بیشتر بر روی سلامت جسمی تأکید دارند و اثرهای اجتماعی و اقتصادی و روانی به ندرت مورد توجه قرار گرفته‌اند. آن‌ها همچنین اشاره کردند که پژوهش‌های صورت گرفته بر مدیریت آوار پس از فاجعه، کمبودی را در مطالعات کمی حس می‌کند. آن‌ها یک مدل چندهدفه را که شامل سه هزینه‌ی تدارکات، هزینه‌های ریسک و هزینه‌های روانی بود، توسعه دادند. مدل پیشنهادی آن‌ها روی مطالعه‌ی موردی زلزله‌ی ونچوان پیاده شد. پرامودیتا و همکاران [۹]، در سال ۲۰۱۴ معضلات مهم اقدامات جمع‌آوری آوار را خلاصه کردند. آن‌ها به مواردی نظیر داشتن سایت‌های مناسب دفع آوار، تأمین تجهیزات لازم به‌ویژه وسایل نقلیه و هزینه‌های حمل و نقل اشاره کردند. برای جمع‌آوری آوار بعد از فاجعه آن‌ها یک مدل توسعه‌یافته‌ی ظرفیت‌دار مکان‌یابی - مسیریابی وسایل نقلیه را توسعه دادند. چن و همکاران [۱۰]، در سال ۲۰۱۱، یک مدل کلاسیک مسیریابی وسایل نقلیه برای توزیع کمک‌های امدادی، با هدف پیشینه کردن رساندن اقلام امدادی و کمینه‌سازی تقاضای برآورد نشده و با فرض راه‌های ترمیم شده، ارائه کردند. آن‌ها از الگوریتم ژنتیک برای حل این مسئله استفاده کردند. لیبراته و همکاران [۱۱]، در سال ۲۰۱۴، یک شبکه‌ی توزیع کمک‌های امدادی را با فرض اختلال در شبکه و در نظر گرفتن محدودیت بودجه برای تعمیر یال‌های تخریب شده توسعه دادند. بسیاری از اهداف نظیر زمان تحویل، تقاضای برآورده شده و قابلیت اطمینان یال‌ها در مطالعه‌ی آن‌ها مورد بررسی و بحث قرار گرفت. ازدمار و همکاران [۱۲]، در سال ۲۰۱۴ یک مدل ریاضی را با در نظر گرفتن ظرفیت هر بولدوزر، زمان جابه‌جایی بولدوزر بین هر دو وظیفه‌ی محول شده و تعداد بولدوزرهای فعال توسعه دادند. هدف آن‌ها حداکثر کردن شاخص دسترسی تجمعی شبکه بود. اکسو و ازدمار

عملیات پاک‌سازی آوار در این فاز تنها زمانی انجام می‌شود که نیازمند دسترسی به یک منطقه و رساندن کمک‌های امدادی در کوتاه‌ترین زمان ممکن باشیم. از آنجایی که هدف مرحله‌ی پاسخ، توزیع کمک‌های امدادی به قربانیان در کوتاه‌ترین زمان ممکن است؛ اقدامات پاک‌سازی آوار در این مرحله به دنبال پاک‌سازی همه‌ی راه‌ها نیست؛ به‌ویژه اینکه بعد از یک زلزله‌ی شدید در یک منطقه‌ی آسیب‌پذیر، پاک‌سازی همه‌ی راه‌ها ممکن است ماه‌ها به طول بینجامد. حال آنکه افراد مبتلا به فاجعه برای رفع نیازهای اولیه‌شان، نیاز به غذا، دارو، درمان، پناهگاه و غیره در کوتاه‌ترین زمان ممکن دارند. برای این منظور، پاک‌سازی کامل آوار باید به موعود دیرتری پس از وقوع بحران موکول شود. دسترسی به تمامی مناطق بحران‌زده در یک بازه‌ی زمانی محدود پس از وقوع زلزله ممکن نیست. بنابراین ما بر روی زیرمجموعه‌ای از آن‌ها تمرکز می‌کنیم. این زیرمجموعه، زیرمجموعه‌ی بحرانی نامیده می‌شود و شامل مناطقی با تمرکز جمعیتی بالا و در نتیجه نیاز اورژانسی (اضطراری) بالا نظیر بیمارستان‌ها است. برای فعال‌سازی حمل و نقل به این مناطق بحرانی، باید تصمیم گرفته شود که کدام راه‌های مسدود پاک‌سازی شود. از این‌رو برای دسترسی به یک گره‌ی بحرانی، ممکن است یک یال مسدود را انتخاب نماییم؛ ولی برای استفاده از این یال مسدود نیازمند پاک‌سازی آوار روی آن با صرف تلاش باشیم.

هدف این پژوهش، انجام یک مطالعه‌ی جامع در حوزه‌ی مدیریت آوار و ارائه‌ی یک الگوی ریاضی مسیریابی برای پاک‌سازی آوار در شرایط پاسخ به بحران به منظور دسترسی هرچه سریع‌تر به مناطق بحرانی با در نظر گرفتن چند وسیله‌ی نقلیه و چند قرارگاه است. مدل ارائه شده با استفاده از نرم‌افزار GAMS در ابعاد کوچک آزمایش شده و برای افزایش سرعت حل الگوریتم ابتکاری شبیه‌سازی تبرید برای رسیدن به جواب نزدیک به بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور کلی نوآوری‌های این مقاله را نسبت به پژوهش‌های پیشین می‌توان در موارد زیر دسته‌بندی کرد:

۱. در نظر گرفتن چند قرارگاه و چند وسیله‌ی نقلیه در مسئله‌ی پاک‌سازی آوار؛
 ۲. در نظر گرفتن تابع هدف کمینه‌سازی پیشینه‌ی مسیر؛
 ۳. مدل سازی جدید مسئله به صورت تخصیص و مسیریابی توأم؛
 ۴. ارائه‌ی یک الگوریتم ابتکاری بر پایه‌ی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای افزایش سرعت حل مسئله.
- سایر بخش‌های این مقاله به صورت زیر دسته‌بندی شده‌اند:
- در قسمت دوم ابتدا به مرور پیشینه‌ی مدیریت آوار و مسائل مربوط به پاک‌سازی آوار و مقایسه‌ی این مقاله با کارهای مشابه می‌پردازیم. در بخش سوم مسئله بیان می‌شود و مدل توسعه یافته ارائه می‌شود. سپس در بخش چهارم به معرفی و شرح الگوریتم ابتکاری بیان شده پرداخته می‌شود. در بخش پنجم عملکرد مدل را از طریق یک مثال عددی بررسی می‌کنیم. در بخش ششم به بررسی کاربردپذیری مدل با مطالعه‌ی موردی در منطقه‌ی ۲ تهران می‌پردازیم و در انتها به جمع‌بندی و بیان پیشنهاد‌های آتی پرداخته می‌شود.

[۱۳]، در سال ۲۰۱۴ یک مدل پویا را که در آن ترتیب پاک‌سازی یال‌های مسدود را طی سه شیف‌ت در روز و با محدودیت بودجه مشخص می‌کرد، توسعه دادند. هدف آن‌ها حداکثر کردن دسترسی جمعی شبکه با در نظر گرفتن بازگشایی هم‌همی مسیرهای هر نقطه از شبکه در کمترین زمان ممکن بود. دوک و همکاران [۱۴]، در سال ۲۰۱۶ به منظور جابه‌جایی اقلام امدادی به روستاها و شهرهای کوچک، مسئله‌ی زمان‌بندی و مسیریابی وسیله‌ی نقلیه در شبکه را تعریف کردند که مدل در مواقعی مجبور به پاک‌سازی یال‌های مسدود می‌شد. آن‌ها این مسئله را با استفاده از الگوریتم حل دقیق برنامه‌ریزی پویا و همچنین یک الگوریتم ابتکاری تکرارپذیر، حل کردند و جواب حاصل از دو الگوریتم را در سائز کوچک و متوسط مقایسه کردند.

اگرچه پاک‌سازی آوار به صورت مشترک در اقدامات فاز پاسخ یا بازسازی کوتاه‌مدت مطرح است، ولی مطالعات زیادی در این فاز صورت نپذیرفته است. به طور مثال هولگوبین و وراس و همکاران [۱۵]، به پاک‌سازی آوار، در میان اقداماتی که در بازسازی کوتاه‌مدت یا در مرحله‌ی انتقال بین فاز پاسخ و بازسازی بلندمدت مطرح است، اشاره کردند. ساهین [۱۶]، در سال ۲۰۱۳، مسئله‌ی جمع‌آوری آوار در فاز بحران را تعریف کرد. در مطالعه‌ی او سه مدل ریاضی تحت این مفروضات که زمان پاک‌سازی و یال‌های مسدود مشخص هستند؛ توسعه داده شد. همه‌ی مدل‌ها به دنبال دسترسی به گره‌های نیازمند و گره‌های بحرانی در سریع‌ترین زمان ممکن هستند. مدل اول زمان ملاقات گره‌های بحرانی را کمینه می‌کند. مدل دوم به دنبال کمینه‌سازی مجموع مسافت پیموده شده تحت یک بازه‌ی زمانی مشخص بود. این محدودیت زمانی با تنظیم یک حد بالا برای زمان‌های ملاقات متناظر با تابع هدف مدل اول است. برای کاهش زمان محاسبات، یک مدل ریاضی سوم با نام حداقل کردن میزان تلاش معرفی و کاربردپذیری مدل بر روی دو مجموعه داده امتحان شد. برای رسیدن سریع به جوابی نزدیک جواب بهینه، دو الگوریتم ابتکاری سازنده و بهبوددهنده نیز در مطالعه‌ی او بررسی شد [۱۶]. سلیک و همکاران [۶]، در سال ۲۰۱۵ پاک‌سازی آوار تصادفی را تعریف کردند که در هر مرحله اطلاعات محدودی از وضعیت راه‌های پیش رو در اختیار بود. تابع هدف آن‌ها به دنبال حداکثر کردن مزایای ناشی از پوشش تقاضا بود. آن‌ها همچنین یک الگوریتم ابتکاری را برای به دست آوردن جواب نزدیک به بهینه معرفی کردند. برکاتس و همکاران [۱۷]، در سال ۲۰۱۶، مسئله‌ی پاک‌سازی آوار را با هدف کمینه‌سازی زمان دسترسی به گره‌های بحرانی، با در نظر گرفتن وزن برای گره‌ها

و با یک ماشین مدل‌سازی کردند. همچنین آن‌ها یک الگوریتم ابتکاری را برای رسیدن به جواب بهینه در این حالت توسعه دادند. در پژوهش برکاتس و همکاران، مدلی ارائه شده است که به جای در نظر گرفتن تنها یک قرارگاه و یک وسیله، در حالت چند قرارگاه و چند وسیله توسعه داده شده است که در ابتدا تخصیص نقاط بحرانی به هرکدام از وسایل نقلیه صورت می‌پذیرد و پس از آن مسیریابی بهینه انجام می‌شود. از آنجایی که در مدل آن‌ها تنها یک وسیله و در نتیجه یک مسیر وجود داشت، تابع هدف مدل آن‌ها کمینه‌سازی مجموع تلاش برای رسیدن به همه‌ی نقاط بحرانی بود اما در مدل ارائه شده در این پژوهش، با توجه به تعدد وسایل نقلیه، هدف کمینه‌سازی بیشینه مسیر در راستای دستیابی به نقاط بحرانی است. همچنین در مقایسه با الگوریتم حل ارائه شده توسط برکاتس و همکاران، در پژوهش حاضر، یک الگوریتم حل ابتکاری جدید و منطبق با شرایط مسئله پیشنهاد شد. جدول ۱ به مرور و مقایسه‌ی مهم‌ترین کارهای صورت پذیرفته در فاز پاسخ به بحران و مقایسه‌ی آن با پژوهش حاضر می‌پردازد.

تشریح مسئله و مدل‌سازی ریاضی

مطالعه‌ی فجایع گذشته بیانگر این است که دسترسی سریع به مناطق بحران‌زده، امری حیاتی در کاهش تلفات انسانی است. به‌منزله‌ی راهکاری برای پاسخ به این مسئله، در این پژوهش یک مدل ریاضی با هدف کمینه‌سازی بیشینه‌ی زمان پیمایش وسایل ارائه می‌شود. شبکه‌ی حمل و نقل به صورت یک گراف کامل غیرجهت‌دار $G = (N, A)$ است که در آن N مجموعه گره‌ها که شامل NC مجموعه گره‌های غیر بحرانی و C مجموعه گره‌های بحرانی است. همچنین S نشان‌دهنده‌ی مجموعه قرارگاه‌ها است که در واقع $S \in C$ است. A بیانگر مجموعه کمان‌های شبکه است. زمان پیمایش برای کمان i, j مقدار t_{ij} و I_{ij} زمانی مقدار صفر را می‌گیرد که کمان $(i, j) \in A$ توسط آوار مسدود باشد. هزینه‌ی c_{ij} (در واحد زمان) هزینه‌ی متناظر با پیمایش هر یال مسدود است که در آن $c_{ij} = c_{ji}$. تعداد K وسیله در قرارگاه‌ها در زمان صفر استقرار یافته‌اند. پس از وقوع بحران، هرکدام از این وسیله‌ها با توجه به نقاط بحرانی تخصیص یافته به هرکدام شروع به پیمایش یال‌ها می‌کنند. زمان لازم برای پیمایش یال مسدود $(i, j) \in A$ برای اولین بار $t_{ij} + c_{ij}$ است. همچنین فرض می‌شود که یک یال مسدود در صورت پاک‌سازی، باز باقی می‌ماند و دوباره مسدود نمی‌شود. تصویر ۱ مدل مفهومی مسئله‌ی پاک‌سازی آوار را بیان می‌کند.

جدول ۱: مهم‌ترین کارهای صورت پذیرفته در فاز پاسخ به بحران

نویسنده	اهداف مدل	ویژگی‌های مدل	روش حل
ساهین و همکاران [۱۶]	کمینه‌سازی زمان ملاقات / مجموع مسافت طی شده / مجموع تلاش	متکی به گره / تک قرارگاه / تک وسیله	دقیق / ابتکاری
برکاتس و همکاران [۱۷]	کمینه‌سازی مجموع تلاش	متکی به گره / تک قرارگاه / تک وسیله / در نظر گرفتن وزن برای گره	دقیق / ابتکاری
سلیک و همکاران [۶]	بیشینه‌سازی رضایت از پوشش تقاضا	متکی به گره / پاک‌سازی آوار تصادفی	ابتکاری
مطالعه‌ی حاضر	کمینه‌سازی بیشینه مسیر	متکی به گره / چند وسیله / چند قرارگاه	دقیق / ابتکاری

S مجموعه شامل همه ی قرارگاه‌ها، با اندیس s
 V مجموعه شامل همه ی وسایل نقلیه، با اندیس v
 N' مجموعه شامل همه ی گره‌های اصلی و مصنوعی
 NC' مجموعه شامل همه ی گره‌های مصنوعی بحرانی و گره‌های اصلی غیربحرانی، با اندیس i', j', i, j
 t_{ij} زمان مورد نیاز برای پیمایش یال (i, j)
 c_{ij} هزینه ی متناظر با پیمایش هر یال مسدود (i, j)
 I_{ij} پارامتر باینری که در صورتی مقدار ۰ می‌گیرد که یال $(i, j) \in A$ با آوار مسدود باشد.

متغیرهای تصمیم

y_{kiv} متغیر باینری که در صورتی مقدار ۱ می‌گیرد که وسیله ی v گره ی بحرانی $i \in C$ را درست بعد از $k \in C$ ملاقات کند و در غیر این صورت صفر است.
 x_{ijv}^k متغیر باینری که در صورتی مقدار ۱ می‌گیرد که وسیله ی v یال (i, j) را در راستای دسترسی به گره k پیمایش کند و در غیر این صورت صفر است.

B_{ijv} متغیر باینری که در صورتی مقدار ۱ می‌گیرد که یال $(i, j) \in A'$ توسط وسیله ی v پاک شده باشد و در غیر این صورت صفر است.

cb_{ijv} متغیر باینری که در صورتی مقدار ۱ می‌گیرد که یال $(i, j) \in A$ توسط وسیله ی v پاک شده باشد و در غیر این صورت صفر است.

در این مدل گره‌های بحرانی و یال‌های همسایه‌شان برای سهولت در مدل‌سازی ریاضی، تکرار شده‌اند. این تکرار شونده‌گی، امکان بازدید از یک گره ی بحرانی را به‌منزله ی یک گره ی غیربحرانی در عبور مجدد از آن گره فراهم می‌کند (گره‌های بحرانی پس از یک بار ملاقات شدن به گره ی غیربحرانی تبدیل می‌شوند). هر گره ی بحرانی $f \in C$ یک ورژن تکرار شده f' را داراست و این گره‌های مصنوعی توسط مجموعه C' بیان می‌شوند. یال‌های همسایه نیز تکرار می‌شوند و در قالب مجموعه A' که به صورت $A' = A \cup \{(f', j), (j, f') : f' \in C', j \in N\} \cup \{(f', l') : f', l' \in C', k' \neq l'\}$

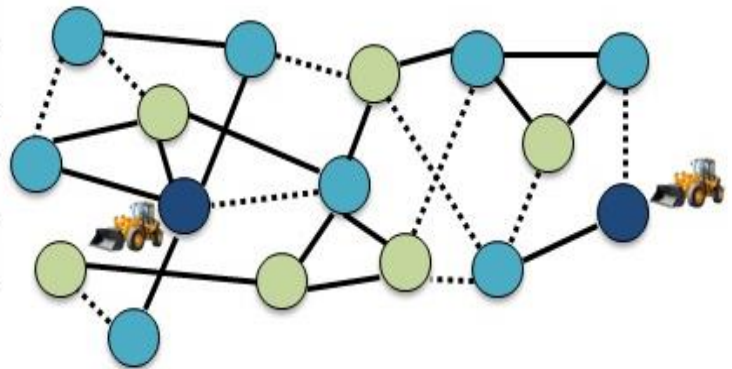
است تعریف می‌شود. تصویر ۲ مثالی از تکرار شونده‌گی گره‌ها و یال‌ها را در یک شبکه ی کوچک نشان می‌دهد. گره‌های f و j بحرانی هستند ولی گره ی i غیر بحرانی است. مجموعه NC' شامل گره‌های مصنوعی بحرانی و گره‌های اصلی غیربحرانی می‌شود $NC' = NC \cup C'$. همچنین مجموعه ی N' شامل همه ی گره‌های اصلی و مصنوعی می‌شود $N' = C \cup NC'$. می‌توانیم نتیجه بگیریم که شبکه ی جدید به صورت $G' = (N', A')$ است.

مجموعه‌ها و پارامترها

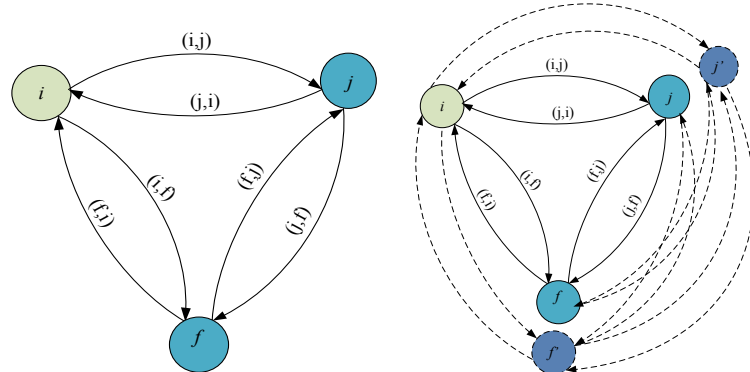
مجموعه‌ها و پارامترهای زیر در توسعه ی مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

N مجموعه شامل همه ی گره‌ها، با اندیس i, j
 C مجموعه شامل همه ی گره‌های بحرانی، با اندیس i, k
 NC مجموعه شامل همه گره‌های غیربحرانی، با اندیس i, j

نماد	توضیحات
	گره بحرانی
	گره غیر بحرانی
	گره مبدا
	یال باز
	یال مسدود



تصویر ۱: مدل مفهومی مسئله ی پاک‌سازی آوار



تصویر ۲: مثالی از تکرار شونده‌گی گره‌های بحرانی و یال‌های همسایه

R_{kv} مدت زمانی که توسط وسیله‌ی v برای رسیدن به گره‌ی بحرانی $k \in C \setminus S$ از گره‌ی بحرانی قبلی سپری شده است (بدون در نظر گرفتن زمان پاک‌سازی).

$TT(v)$ مجموع زمانی که وسیله‌ی v در راستای ملاقات همه‌ی گره‌های بحرانی اختصاص یافته به خودش سپری می‌کند.

P_{kv} زمانی که گره $k \in C$ توسط وسیله‌ی v ملاقات می‌شود (بدون در نظر گرفتن پاک‌سازی آوار).

توسعه‌ی مدل

در این بخش به توسعه‌ی مدل با هدف کمینه‌سازی بیشینه‌ی زمان پیمایش گره‌های بحرانی توسط وسایل نقلیه می‌پردازیم:

رابطه‌ی ۱: $Min z$

s.t

رابطه‌ی ۲: $TT(v) + \sum_{i,j \in N', i < j} cb_{ij} c_{ij} \leq z \quad \forall v \in V$

رابطه‌ی ۳: $\sum_{v \in V'} \sum_{l \in C: l \neq k} y_{lkv} = 1 \quad \forall k \in C \setminus \{S\}$

رابطه‌ی ۴: $\sum_{v \in V'} \sum_{l \in C} y_{lsv} = 0 \quad \forall s \in S$

رابطه‌ی ۵: $\sum_{v \in V'} \sum_{l \in C \setminus \{S\}} y_{slv} = 1 \quad \forall s \in S$

رابطه‌ی ۶:

رابطه‌ی ۷: $\sum_{l \in C} y_{lkv} = \sum_{l \in C} y_{klv} + y_{k0v} \quad \forall v \in V \quad \forall k \in C, k \neq l$

رابطه‌ی ۸: $\sum_{j \in NC' \cup \{l\}} x^l_{kjl} = y_{klv} \quad \forall k, l \in C, k \neq l, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۹: $\sum_{i \in N'} x^k_{ijv} - \sum_{h \in NC' \cup \{k\}} x^k_{jihv} = 0$

$\forall k \in C, \forall j \in NC', \forall v \in V$

رابطه‌ی ۱۰: $\sum_{j \in NC' \cup \{l\}} x^l_{ilv} = 1 \quad \forall l \in C \setminus \{S\}$

رابطه‌ی ۱۱: $P_{sv} = 0 \quad \forall s \in S, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۱۲: $P_{lv} \geq P_{kv} + R_{lv} - (1 - y_{klv})\mu$

$\forall k, l \in C, k \neq l, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۱۳: $TT(v) \geq P_{kv} \quad \forall k \in C, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۱۴: $R_{lv} = \sum_{i, j \in N'} x^l_{ijv} t_{ij} \quad \forall l \in C \setminus \{S\}, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۱۵: $\sum_{l \in C \setminus S} (x^l_{ijv} + x^l_{jiv}) \leq |C| (B_{ijv} + I_{ij})$

$\forall i, j \in N', i < j, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۱۶: $B_{ijv} \leq 1 - I_{ij} \quad \forall i, j \in N', i < j, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۱۷: $B_{ijv} + B_{ij'v} + B_{i'jv} + B_{ji'v} \leq 4cb_{ijv}$

$\forall i, j \in C, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۱۸: $B_{ijv} + B_{ij'v} \leq 2cb_{ijv}$

$\forall i \in NC, j \in C: i < j, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۱۹: $B_{jiv} + B_{ij'v} \leq 2cb_{ijv}$

$\forall i \in NC, j \in C: i > j, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۲۰: $B_{ijv} \leq cb_{ijv}$

$\forall i, j \in N: i < j, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۲۱:

رابطه‌ی ۲۲: $x^k_{ijv} \in (0, 1) \quad \forall i, j \in N', \forall k \in C, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۲۳: $y_{klv} \in (0, 1) \quad \forall k, l \in C, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۲۴: $B_{ijv} \in (0, 1) \quad \forall i, j \in N', \forall v \in V$

رابطه‌ی ۲۵: $cb_{ijv} \in (0, 1) \quad \forall i, j \in N, \forall v \in V$

رابطه‌ی ۲۶:

$TT(v) \geq 0, p_{kv}, C_{kv} \geq 0 \quad \forall k \in C, \forall v \in V$

تابع هدف ۱ و محدودیت ۲ به دنبال کمینه‌سازی بیشینه

زمان پیمایش مسیر توسط وسایل نقلیه هستند. محدودیت ۳، ۴

و ۵ یک مسیر پایه را برای هر یک از وسایل نقلیه می‌سازد که از

قرارگاه‌ها شروع به حرکت می‌کند و تضمین می‌کند که هر گره‌ی

بحرانی یک گره‌ی پیش‌نیاز بحرانی و یک گره‌ی پس‌نیاز بحرانی

دارد و هیچ‌گاه در طول مسیر به قرارگاه‌ها باز نمی‌گردد. محدودیت

۶ بالانس جریان را تضمین می‌کند، بدین معنی که اگر یک وسیله

یک گره‌ی بحرانی را ملاقات کرد؛ همان وسیله باید به یک

گره‌ی بحرانی دیگر برود (y_{k0v} یک متغیر مجازی است که پس

نیاز آخرین گره‌ی بحرانی هر مسیر است). محدودیت ۷ تضمین

می‌کند که اگر گره‌ی بحرانی l درست پس از گره‌ی بحرانی k

ملاقات شود، پس کمان (k, j) در راستای رفتن از k به l توسط

ماشین v پیمایش شده است که z می‌تواند یک گره‌ی غیربحرانی،

یک گره‌ی مصنوعی بحرانی و یا گره‌ی بحرانی l باشد. محدودیت

۸ بیان می‌کند که برای هر گره‌ی میانی z که در حین رفتن به

گره‌ی بحرانی k توسط هر وسیله ملاقات می‌شود؛ جریان ورودی و

خروجی از z باید برابر باشد. محدودیت ۹ تضمین می‌کند که دقیقاً

یک یال ورودی (i, l) به هر گره‌ی بحرانی l وجود دارد که i

می‌تواند هر نوع گره‌ای باشد. محدودیت ۱۰ زمان شروع هر کدام از

مسیرها را صفر در نظر می‌گیرد. محدودیت ۱۱ و ۱۲ زیرتوره‌های بین

گره‌های بحرانی را حذف می‌کند و زمان هر مسیر را به جز زمان لازم

برای پاک‌سازی آوار محاسبه می‌کند.

محدودیت ۱۳ تضمین می‌کند که اگر یک یال در راستای

دسترسی به گره‌ی بحرانی l پیموده شود تنها زمان حرکت آن به

مقدار C_l افزوده می‌شود. محدودیت ۱۴ تضمین می‌کند که یک

یال زمانی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که پاک باشد یا مورد

پاک‌سازی قرار گرفته باشد. محدودیت ۱۵ بیان‌کننده‌ی این است که تنها یال‌های مسدود شده با آوار می‌توانند پاک‌سازی شوند. محدودیت‌های ۱۶ تا ۱۹ بیان می‌کنند که آوار روی یال زمانی حذف می‌شوند که یال اصلی یا یکی از یال‌های وابسته‌ی مجازی آن پاک‌سازی شده باشد. محدودیت ۲۰ تا ۲۴ حالت هرکدام از متغیرهای تصمیم را بیان می‌کند.

الگوریتم حل ابتکاری

زمان حل مدل ریاضی ارائه شده تحت تأثیر تعداد نقاط بحرانی و غیربحرانی، محل آن‌ها و شدت فاجعه است. رسیدن به نقطه‌ی بهینه در ابعاد مسئله‌ی بزرگ در روش‌های دقیق ممکن است ساعت‌های زیادی طول بکشد. از آنجایی که هدف مسائل لجستیک امدادی در فاز پاسخ پیدا کردن جواب بهینه در سریع‌ترین زمان ممکن است؛ لذا نیازمند الگوریتمی برای پیدا کردن جواب بهینه یا نزدیک به بهینه در سریع‌ترین زمان ممکن هستیم. بدین منظور، یک روش ابتکاری با هدف کمینه‌سازی بیشینه‌ی زمان پیمایش گره‌های بحرانی توسط وسایل نقلیه ارائه شده است. این الگوریتم شامل دو فاز است: ۱. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید؛ ۲. الگوریتم بهبوددهنده. بدین‌گونه که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بهترین جواب حاصل را تنها با در نظر گرفتن گره‌های بحرانی به دست می‌آورد. برای کاهش اختلاف بهینگی، جواب به دست آمده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را توسط الگوریتم بهبوددهنده بهبود می‌دهیم. در دو بخش بعدی این دو الگوریتم با جزئیات بیشتر شرح داده می‌شوند.

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر جست و جوی منطقه‌ای است که اولین بار توسط متروپولیس و همکاران [۱۸] در سال ۱۹۵۳ معرفی شد و توسط کرکپاتریک و همکاران [۱۹] به شهرت رسید. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید قابلیت نیفتادن در دام نقاط بهینه‌ی محلی را از طریق پذیرش جواب‌های بد (با احتمال خیلی کم) در طول تکرارها داراست. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بر روی بسیاری از مسائل بهینه‌سازی پیچیده با موفقیت پیاده‌سازی شده است. از این رو در این تحقیق از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مدل پیشنهادی استفاده می‌شود. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ارائه شده از دو فاز تشکیل شده است: ۱. ساختن یک جواب اولیه؛ ۲. بهبود جواب اولیه توسط روش شبیه‌سازی تبرید و نیز مکانیزم‌های جستجوی همسایگی، که در ادامه به تفصیل در مورد آن‌ها صحبت می‌کنیم.

ساختن جواب اولیه

نمایش جواب از N_c نقطه‌ی بحرانی نشان داده شده با $\{1, 2, \dots, N_c\}$ مقدار صفر تشکیل شده است. تعداد

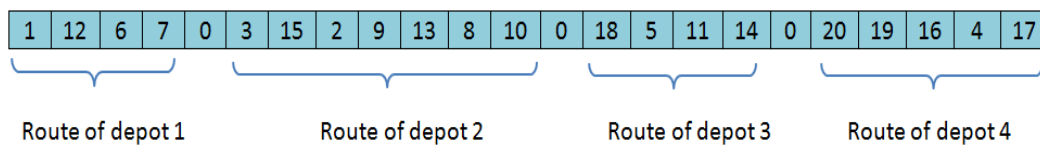
N_{dummy} در اینجا تعداد قرارگاه‌ها منهای یک است. جواب اولیه در واقع یک دنباله‌ی تصادفی متشکل از N_c نقطه‌ی بحرانی و N_{dummy} مقدار صفر است. هر قرارگاه به نقاط بحرانی بین خود و قرارگاه بعدی خدمت‌رسانی می‌کند. مقدار N_{dummy} برای خاتمه دادن به یک مسیر و شروع یک مسیر جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرض می‌شود که دنباله‌ی اعداد قبل از اولین صفر در جواب تصادفی ایجاد شده، مسیر آغاز شده از قرارگاه اول، دنباله‌ی اعداد بین اولین صفر و دومین صفر، مسیر آغاز شده از قرارگاه دوم و در نتیجه دنباله‌ی اعداد بین n امین صفر و $n+1$ امین صفر، مسیر آغاز شده از قرارگاه $n+1$ ام است. تصویر ۳ یک مثال ساده از این بیان جواب را نشان می‌دهد.

مکانیزم جستجوی همسایه

سه مکانیزم جستجوی همسایه در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید پیشنهادی ارائه شده است: ۱. تعویض (Swap)؛ ۲. افزودن (Insertion)؛ ۳. حرکت 2-opt. احتمال انتخاب هرکدام از این مکانیزم‌های همسایگی یکسان است و هرکدام از جواب‌های جدید مسئله تنها توسط یکی از این مکانیزم‌ها تولید می‌شود. عملگر Swap مکان‌های λ ام و μ ام جواب را به صورت تصادفی انتخاب و جای آن دو را با هم تعویض می‌کند. عملگر Insertion مکان‌های λ ام و μ ام جواب را به صورت تصادفی انتخاب و سپس عدد نوشته شده در موقعیت λ ام را در جلوی عدد نوشته شده در موقعیت μ ام قرار می‌دهد. عملگر 2-opt مکان‌های λ ام و μ ام جواب را به صورت تصادفی انتخاب و ترتیب اعداد بین این دو موقعیت را معکوس می‌کند.

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید پیشنهادی به شش پارامتر نیاز دارد: $T_0, T_n, N_{ni}, I_{ii}, K, \alpha$. در اینجا T_0 نشان‌دهنده‌ی دمای اولیه، T_n بیانگر دمای نهایی، N_{ni} بیانگر بیشینه تعداد کاهش دمای پیوسته بدون بهبود در جواب و I_{ii} بیانگر تعداد کل تکرارهایی است که مکانیزم جستجوی همسایگی در یک دمای مشخص تکرار می‌کند. K ثابت بولتزمن است که در محاسبه‌ی احتمال پذیرش یا رد جواب مورد استفاده قرار می‌گیرد و همچنین α ضریب فرایند سرد کردن است $0 < \alpha < 1$. در شروع فرایند الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، بهترین جواب X_b و جواب فعلی X همان جواب اولیه در نظر گرفته می‌شوند. همچنین دمای فعلی T نیز همان دمای اولیه T_0 در نظر گرفته می‌شود. بهترین مقدار جواب B_b را $ob(X)$ می‌نامیم. در هر تکرار در یک دمای مشخص، شبیه‌سازی تبرید یک جواب همسایه‌ی Y را با توجه به مکانیزم‌های جستجوی همسایگی تولید می‌کند. فرض کنیم که Δ اختلاف مقدار تابع هدف جواب فعلی و جواب جدید همسایه باشد $\Delta = ob(Y) - ob(X)$. در صورتی که $\Delta \geq 0$ ، جواب جدید



تصویر ۳: بیان ساده از جواب اولیه

جدول ۲: نتایج محاسباتی مربوط به تصویر ۶

تعداد یال‌های پاک شده	مسیرهای بهینه	زمان پردازش (ثانیه)		مقادیر بهینه (دقیقه)		ویژگی‌های مسئله
		SA	CPLEX	SA	CPLEX	
۳	$A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ $I \rightarrow H \rightarrow F \rightarrow G$	۳۰۰۶	۰۰۰۳	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰	$c_{ij} = t_{ij}$
۲	$A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ $I \rightarrow H \rightarrow F \rightarrow G$	۵۰۱۲	۰۰۰۷	۱۸۰۰۰	۱۸۰۰۰	$c_{ij} = 2 * t_{ij}$
۰	$I \rightarrow G \rightarrow F \rightarrow D \rightarrow E$ $A \rightarrow C$	۷۰۳۲	۰۰۰۴	۲۱۰۰۰	۲۱۰۰۰	$c_{ij} = 3 * t_{ij}$

مثال عددی

برای نشان دادن نحوه‌ی عملکرد مدل و روش حل پیشنهادی و اطمینان از صحت آن، در این بخش یک مثال عددی ارائه می‌گردد و سپس در بخش بعد کاربرد مدل در یک مسئله‌ی واقعی نشان داده خواهد شد. الگوریتم پیشنهادی حل بر روی نرم‌افزار Matlab 2014 بر روی یک کامپیوتر با مشخصات Intel Core i7 4GB RAM، 1.8 GHz و تحت ویندوز هشت پیاده‌سازی شده است. همچنین این مسئله با حل‌کننده‌ی CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل شده است.

شبکه‌ی حمل و نقل در تصویر ۶ را در نظر بگیرید که در آن گره‌های A و I قرارگاه‌های اولیه، گره‌های C، E، F و G گره‌های بحرانی و گره‌های B، D و H گره‌های غیر بحرانی باشند. زمان متناظر با پیمایش هر یال بدون در نظر گرفتن زمان پاک‌سازی، در کنار هر یال مشخص شده است. یال‌های مشخص شده با خط‌چین، مسدود با آوار هستند که زمان فرضی لازم برای پاک‌سازی آن‌ها در جدول ۲ بیان شده است.

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که جواب به دست آمده با حل‌کننده‌ی CPLEX با جواب به دست آمده توسط الگوریتم حل ابتکاری پیشنهادی، برابر است. با توجه به ساختار شبکه‌ی حمل و نقل مفروض، در هر مرحله با افزایش در زمان پاک‌سازی یال‌های مسدود، زمان بهینه‌ی مسئله، مسیرهای بهینه و تعداد یال‌های پاک‌سازی شده دستخوش تغییر می‌شوند. در این مسئله با افزایش زمان پاک‌سازی یال‌های مسدود، زمان بهینه‌ی مسئله افزایش و تعداد یال‌های پاک‌سازی شده کاهش یافت.

```
Improvement (paths, paths times, N, C)
for all paths
  calculate Max(paths times) and choose it's related path, path=old path;
  for all intermediate nodes 1:N {
    for i=1: numel(path) -1 {
      Insert the intermediate node between i and i+1;
      calculate the new path time;
      If (new path time < old path time) {
        old path=new path;
        old path time=new path time;
      }
    }
  }
end
```

تصویر ۵: شبه کد مربوط به الگوریتم بهبوددهنده

با احتمال $\exp(-\Delta / KT)$ پذیرفته می‌شود. در غیر این صورت در صورتی که $\Delta < 0$ باشد، جواب همسایه‌ی جدید پذیرفته می‌شود و جایگزین جواب فعلی می‌شود. پس از I_{ii} تکرار دمای جدید تا دمای αT کم می‌شود. شرایط خاتمه‌ی الگوریتم به شرح زیر هستند:

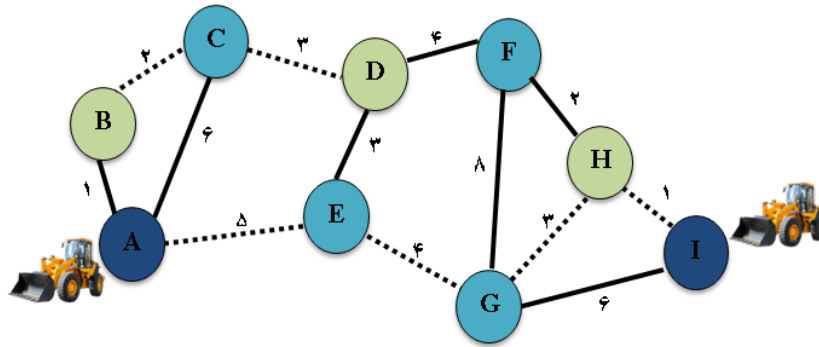
- بهترین جواب پس از N_{ni} کاهش دمای پیوسته بهبود نیابد.
- دما کمتر یا مساوی دمای نهایی T_n شود. تصویر ۴ شبه کد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید پیشنهادی را بیان می‌کند.

الگوریتم بهبوددهنده

برای افزایش کیفیت جواب به دست آمده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در این قسمت، یک الگوریتم بهبوددهنده را توسعه می‌دهیم. الگوریتم بهبوددهنده‌ی پیشنهادی یک مسیر شدنی با بیشترین مقدار هزینه را در نظر می‌گیرد، یک جفت از گره‌های بحرانی را انتخاب کرده و گره‌ی غیر بحرانی را در بین آن‌ها قرار می‌دهد. سپس هزینه‌ی مسیر جدید را محاسبه می‌کند و آن را با بهترین هزینه‌ی به دست آمده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مقایسه می‌کند. اگر هزینه‌ی مسیر جدید کمتر از هزینه‌ی قبلی بود سپس مسیر جدید را جایگزین مسیر قبلی می‌کند. این الگوریتم تا جایی که قادر به پیدا کردن مسیر بهتری نباشد ادامه می‌یابد. در مسئله‌ی ما، تمامی حالت‌های اضافه شدن گره‌های غیر بحرانی محاسبه شده‌اند. شبه کد الگوریتم بهبوددهنده در تصویر ۵ نشان داده شده است.

```
SA (T0, Tn, Nn, Iii, K, alpha)
Generate the initial solution X randomly;
let T=T0; Ni=0; Xi=X; Fi=ob(X);
while (T>Tn) {
  T:=0; Ni=Ni+1;
  while (T<Iii) {
    r1= random(0,1);
    switch(r1) {
      mode 1: 0<r1<=1/3 : Generate a new solution Y from X by swap function;
      mode 2: 1/3<r1<=2/3 : Generate a new solution Y from X by insertion function;
      mode 3: 2/3<r1<=1 : Generate a new solution Y from X by 2-opt function;
    }
    Delta=ob(Y)-ob(X);
    if (Delta<0) {X=Y;}
    else {
      r2= random(0,1);
      if (r2<exp(-Delta/KT)) {X=Y;}
    }
    if (ob(X)<Fi and X is feasible) {Xi=X; Fi=ob(X); Ni:=0;}
    T:=alpha*T;
  }
  if (Ni=Nn) {terminate the SA heuristic;}
  T:=alpha*T;
}
end
```

تصویر ۴: شبه کد مربوط به الگوریتم شبیه‌سازی تبرید



تصویر ۶: شبکه‌ی حمل و نقل مفروض

مطالعه‌ی موردی و نتایج محاسباتی

برای نشان دادن کاربردپذیری مدل و نیز مقایسه‌ی دو روش حل دقیق و ابتکاری ارائه شده، این مدل در منطقه‌ی ۲ شهر تهران مورد مطالعه قرار گرفته است. منطقه‌ی ۲ تهران در شمال غربی تهران واقع شده و یکی از مناطق مستعد زلزله است. شبکه‌ی مورد مطالعه شامل ۲۴ گره شامل ۴ قرارگاه و ۱۱ نقطه‌ی بحرانی است. در این مطالعه بیمارستان‌ها و مراکز درمانی این منطقه به منزله‌ی نقاط بحرانی تعریف می‌شوند. نام بیمارستان‌ها و مراکز درمانی عبارتند از: ۱. درمانگاه فرحزاد؛ ۲. درمانگاه مخابرات؛ ۳. درمانگاه ساج؛ ۴. بیمارستان مدرس؛ ۵. بیمارستان پارسیان؛ ۶. درمانگاه ماهان؛ ۷. بیمارستان عرفان؛ ۸. بیمارستان آتیه یک؛ ۹. بیمارستان بهمن؛ ۱۰. بیمارستان آتیه دو؛ ۱۱. بیمارستان لاله. همچنین گره‌های غیربحرانی در این شبکه، میدان‌ها و چهارراه‌های اصلی منطقه‌ی ۲ تعریف شده‌اند. همچنین فرض بر این است که به هر کدام از قرارگاه‌ها یک وسیله‌ی مخصوص پاک‌سازی آوار به صورت پیش فرض اختصاص یافته است. تصویر ۷ محل قرارگیری هرکدام از گره‌های قرارگاه، گره‌های بحرانی و گره‌های غیر بحرانی را نشان می‌دهد. زمان جابه‌جایی در این مطالعه با استفاده از فاصله‌ی مستقیم بین گره‌ها و فرض اینکه سرعت وسیله‌ی نقلیه $V = 20 \text{ km/h}$ است محاسبه شده است. فرض دیگر این است که شبکه کامل است و امکان جابه‌جایی بین هر دو گره وجود دارد. چهار درجه از شدت زمین‌لرزه (ES) در نظر گرفته شده که چهار شدیدترین آن است. متناظر با این درجه‌های شدت زلزله، نسبت مسدود بودن یال‌ها (BAR) تعیین می‌شوند که در جدول ۳ بیان شده‌اند.

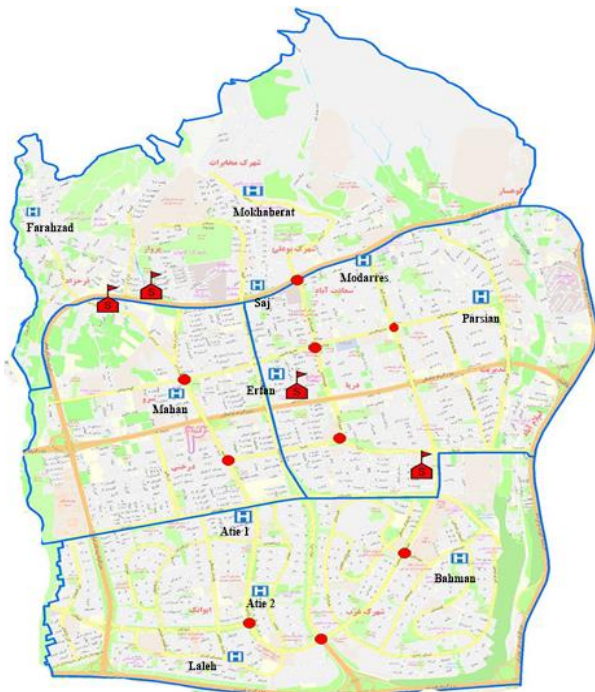
جدول ۳: ارتباط بین شدت زمین‌لرزه و نسبت مسدود بودن یال‌ها

شدت زلزله	نسبت مسدود بودن یال‌ها	نسبت مسدود بودن در منطقه‌ی ۲ تهران
۱	۰-۲۰٪	۰.۲
۲	۲۰-۵۰٪	۰.۴
۳	۵۰-۸۰٪	۰.۶
۴	۸۰-۱۰۰٪	۰.۸

مطابق با BAR، یال‌های مسدود به صورت تصادفی در ماتریس I مقدار صفر می‌گیرند. زمان لازم برای پاک‌سازی آوار در هر

یال بستگی به شدت زمین‌لرزه و زمان لازم برای پیمایش آن یال دارد. زمان پاک‌سازی c_{ij} مطابق با رابطه‌ی ۲۵ محاسبه می‌شوند: $c_{ij} = ES * t_{ij}$ رابطه‌ی ۲۵: برای هر درجه شدت زلزله (ES)، ۴ مثال متناسب با مقدار BAR مربوط تولید شده است. این مثال‌ها تعداد برابری یال مسدود را دارا هستند، ولی محل این یال‌ها متفاوت است. برای پارامترهای مربوط به الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مقادیر مختلفی تست شد و بهترین آن‌ها به صورت دمای اولیه $T_0 = 0$ ، دمای نهایی $T_f = 0.01$ ، $N_{mi} = 100$ ، $I_{irr} = 1000$ و $\alpha = 0.99$ تعیین شدند. در جدول ۴، ویژگی‌های مربوط به هر مثال، مقادیر بهینه و زمان پردازش برای هر مثال محاسبه می‌شود. همچنین شکاف بهینگی بین روش دقیق و ابتکاری محاسبه شدند.

از جدول ۴ نکات زیادی قابل استخراج است. اول اینکه با افزایش شدت زلزله (ES) و همچنین جواب بهینه به صورت آرام شروع به افزایش می‌کند. این امر به دلیل افزایش مقدار BAR و نیاز به تلاش بیشتر برای پاک‌سازی آوار و یا انتخاب یال‌های



تصویر ۷: محل قرارگیری نقاط بحرانی، غیربحرانی و قرارگاه‌ها در منطقه‌ی ۲ تهران

جدول ۴: نتایج محاسباتی و تجزیه و تحلیل مدل

ویژگی‌های مثال	مثال‌ها	مقادیر بهینه (دقیقه)		زمان پردازش (ثانیه)		Gap ^۱ (%)	تعداد یال‌های پاک شده
		Cplex	SA heuristic	Cplex	SA heuristic		
ES=1 BAR=0.2	Ins ₁	۱۵,۵۰۹	۱۱,۶۴۱	۱۲۶۰۰	۲۱۰,۱۶۱	-۲۴.۹۴	.
	Ins ₂	۱۷,۰۰۲	۱۱,۷۱۳	۱۲۶۰۰	۲۱۶,۷۳۸	-۳۱.۱۰	.
	Ins ₃	۱۴,۵۵۴	۱۱,۲۸۱	۱۲۶۰۰	۲۱۰,۲۷۲	-۲۲.۴۸	.
	Ins ₄	۱۷,۹۵۹	۱۲,۹۳۷	۱۲۶۰۰	۲۰۸,۲۵۰	-۲۷.۹۶	.
ES=2 BAR=۰.۴	Ins ₅	۱۴,۸۷۶	۱۴,۵۹۶	۱۲۶۰۰	۲۲۱,۵۸۵	-۰.۰۱	.
	Ins ₆	۱۵,۰۴۶	۱۱,۷۹۳	۱۲۶۰۰	۲۲۱,۸۸۸	-۲۱.۶۲	.
	Ins ₇	۱۷,۲۷۸	۱۲,۸۰۳	۱۲۶۰۰	۲۱۹,۹۴۸	-۲۵.۸۹	۱
	Ins ₈	۱۶,۶۴۳	۱۴,۴۶۰	۱۲۶۰۰	۲۲۰,۸۶۸	-۱۳.۱۱	.
ES=۳ BAR=۰.۶	Ins ₉	۱۸,۲۱۳	۱۴,۲۶۲	۱۲۶۰۰	۲۲۲,۳۷۳	-۲۱.۶۹	۱
	Ins ₁₀	۱۹,۳۲۷	۱۴,۵۹۹	۱۲۶۰۰	۲۱۹,۶۲۷	-۲۴.۴۶	.
	Ins ₁₁	۱۵,۹۶۷	۱۴,۶۸۱	۱۲۶۰۰	۲۲۰,۷۶۵	-۸.۰۵	۱
	Ins ₁₂	۱۶,۰۳۴	۱۳,۸۲۴	۱۲۶۰۰	۲۶۷,۷۸۵	-۱۳.۷۸	۲
ES=۴ BAR=۰.۸	Ins ₁₃	۲۲,۳۹۵	۱۸,۳۶۴	۱۲۶۰۰	۲۶۴,۵۸۲	-۱۷.۹۹	۳
	Ins ₁₄	۲۰,۴۵۱	۱۶,۸۷۷	۱۲۶۰۰	۲۶۷,۰۱۷	-۱۷.۴۷	۱
	Ins ₁₅	۲۴,۶۰۳	۲۱,۴۳۶	۱۲۶۰۰	۲۷۴,۱۰۳	-۱۲.۸۷	۴
	Ins ₁₆	۲۱,۴۳۲	۱۶,۷۵۳	۱۲۶۰۰	۲۶۲,۷۲۰	-۲۱.۸۳	۲

$$1\text{Gap}=(\text{SA-Cplex})/\text{Cplex}$$

صورت پذیرفته به بحث عملیات پاک‌سازی و جمع‌آوری آوار در فاز بازسازی در راستای جمع‌آوری و بازیافت آوار متمرکز بودند، در حالی که پاک‌سازی آوار نقش حیاتی را در نجات جان انسان‌ها و توزیع به موقع اقلام امدادی بلافاصله پس از بحران ایفا می‌کند. در این مقاله، یک مدل ریاضی برای مسئله‌ی پاک‌سازی آوار در فاز پاسخ به بحران با هدف کمینه‌سازی بیشینه‌ی زمان پیمایش نقاط بحرانی توسط وسایل نقلیه ارائه شد. در راستای دستیابی به عدالت توزیعی در این شرایط از تابع هدف کمینه‌ی بیشینه استفاده شده است. وجود چند قرارگاه و چند وسیله می‌تواند در کاهش زمان دسترسی به گره‌های بحرانی نقش اساسی ایفا کند. نقاط بحرانی نقاطی هستند که جمعیت در آن‌ها متمرکز است و یا نیاز زیادی به این کمک‌های امدادی در سریع‌ترین زمان ممکن دارند. حل مسئله‌ی پاک‌سازی آوار و به دست آوردن جواب بهینه با افزایش ابعاد مسئله سخت‌تر شده و به زمان حل بیشتری نیاز دارد. انتظار برای به دست آوردن جواب برای مدت طولانی، با هدف اصلی فاز پاسخ به بحران که دسترسی به مناطق بحران‌زده در سریع‌ترین زمان ممکن است، تناقض دارد. بدین منظور، در این مقاله یک الگوریتم ابتکاری متکی به شبیه‌سازی تبرید برای کاهش زمان حل محاسبات ارائه شد و با استفاده از یک الگوریتم بهبوددهنده جواب حاصل به جواب بهینه نزدیک‌تر شد. مدل و الگوریتم حل ارائه شده در منطقه‌ی ۲ تهران مورد ارزیابی قرار

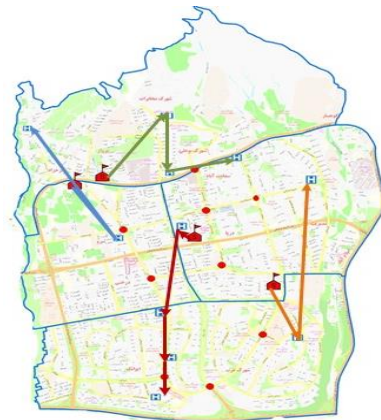
بازی که نیازمند زمان بیشتری برای پیمایش هستند؛ امری طبیعی است. همچنین با توجه به نتایج، در برخی موارد نیاز به پاک‌سازی معابر داریم. در اینجا فرض بر این بود که شبکه کامل است؛ لذا مدل در بسیاری از موارد ترجیح به انتخاب یال‌های باز می‌دهد. اما اگر شبکه به صورت درخت یا یک گراف ناقص بود؛ قطعاً تعداد بیشتری از یال‌ها به منظور پاک‌سازی انتخاب می‌شدند. از آنجایی که زمان پردازش روش دقیق حل بسیار زیاد است، در جدول ۴ تنها مقدار بهینه‌ی به دست آمده توسط مدل بعد از ۱۲,۶۰۰ ثانیه ارائه شده است. برخلاف روش دقیق، الگوریتم تقریبی ارائه شده در زمان بسیار کوتاهی در قیاس با روش دقیق جواب نزدیک به بهینه را به دست می‌آورد. شکاف بین روش CPLEX و روش تقریبی بیانگر کارایی و کاربردپذیری مدل ارائه شده و روش حل در تصمیم‌گیری‌های سریع به‌ویژه در فاز پاسخ بعد از بحران است. تصویر ۸ بیانگر مقایسه بین مسیرهای بهینه در مثال‌های اول تا چهارم است. همانطور که در تصویر ۸ مشخص است، مکان یال‌های مسدود شده مسیر بهینه‌ی هر وسیله را تا حدود زیادی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مدیریت آوار یکی از مهم‌ترین و زمان‌برترین فعالیت‌ها در مجموعه فعالیت‌های پس از بحران است. بسیاری از مطالعات



مسیرهای بهینه ی Ins_1



مسیرهای بهینه ی Ins_2



مسیرهای بهینه ی Ins_3



مسیرهای بهینه ی Ins_4

تصویر ۸: مقایسه ی مسیرهای بهینه ی مثال های اول تا چهارم

fairs

5. Des Roches, R. et al. (2011). Overview of the 2010 Haiti earthquake. *Earthquake Spectra*, 27 (S1), S1-S21.
6. Çelik, M., Ö. Ergun, and P. Keskinocak (2015). The Post-Disaster Debris Clearance Problem Under Incomplete Information. *Operations Research*, 63(1), 65-85.
7. Fetter, G. and T. Rakes (2012). Incorporating recycling into post-disaster debris disposal. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1): p. 14-22.
8. Hu, Z.-H. and J.-B. Sheu (2013). Post-disaster debris reverse logistics management under psychological cost minimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 55, 118-141.
9. Pramudita, A., E. Taniguchi, and A.G. Qureshi (2014). Location and Routing Problems of Debris Collection Operation after Disasters with Realistic Case Study. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 125, 445-458.
10. Chen, A.Y., F. Peña-Mora, and Y. Ouyang (2011). A

گرفت و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پژوهش های آتی در این حوزه می توانند پیشنهادهای زیر را در نظر بگیرند: ۱. کاهش زمان محاسبات با الگوریتم های حل کارای دیگر؛ ۲. در نظر گرفتن محدودیت هایی نظیر پنجره ی زمانی و ظرفیت حمل و نقل در زمان پاک سازی آوار؛ ۳. تحقیق و بررسی بر روی داده های واقعی سایر مناطق و مطالعات موردی جامع تر نیز می توانند مد نظر قرار بگیرند.

منابع

1. Altay, N. and W.G. Green (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European journal of operational research*, 175 (1), 475-493.
2. Van Wassenhove, L.N. (2006). Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear. *Journal of the Operational Research Society*, 57(5), 475-489.
3. Sheu, J.-B. (2007). Challenges of emergency logistics management. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 43 (6), 655-659.
4. Farmer, P., Haiti after the earthquake 2012: Public Af-

collaborative GIS framework to support equipment distribution for civil engineering disaster response operations. *Automation in Construction*, 20(5), 637-648.

11. Liberatore, F., et al. (2014). A hierarchical compromise model for the joint optimization of recovery operations and distribution of emergency goods in Humanitarian Logistics. *Computers & Operations Research*, 42(0), 3-13.
12. Özdamar, L., D. Tüzün Aksu, and B. Ergüneş (2014). Coordinating debris cleanup operations in post disaster road networks. *Socio-Economic Planning Sciences*, 48(4), 249-262.
13. Tuzun Aksu, D. and L. Ozdamar (2014). A mathematical model for post-disaster road restoration: Enabling accessibility and evacuation. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 61(0), 56-67.
14. Duque, P. A. M., Dolinskaya, I. S., and Sörensen, K. (2016). Network repair crew scheduling and routing for emergency relief distribution problem. *European Journal of Operational Research*, 248(1), 272-285.
15. Holguín-Veras, J., et al. (2013). On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models. *Journal of Operations Management*, 31(5), 262-280.
16. Şahin, H. (2013). Debris Removal During Disaster Response Phase: a Case for Turkey, bilkent university.
17. Berktaş, N., Kara, B. Y., and Karaşan (2016). O. E. Solution methodologies for debris removal in disaster response. *EURO Journal on Computational Optimization*, 1-43.
18. Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., & Teller, E. (1953). Equation of state Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087-1092.
19. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598), 671-680.