



Research Paper

A Two-echelon Model of Location-routing Problem for Optimizing Relief Operations in Natural Disasters



Hossein Jamali¹ , *Mehdi Kabiri Naeini¹ , Zeynab Elahi²

1. Department of Industrial Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran.

2. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.



Citation Jamali, H., Kabiri Naeini, M., & Elahi, Z. (2025). [A Two-echelon Model of Location-routing Problem for Optimizing Relief Operations in Natural Disasters (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(2):202-229. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.2.909.1>

<https://doi.org/10.32598/DMKP.15.2.909.1>

ABSTRACT

Background and objective The location-routing problem (LRP) during disasters is a fundamental challenge in managing relief efforts to the affected areas. One of the most significant limitations in this context is the effective coverage of relief bases and the ability to provide timely aid to the affected area. In this study, a two-echelon model for LRP is developed, where each relief base can only provide services within a designed coverage radius. The goal is to determine the optimal locations for relief bases and routing relief teams to minimize relief time and cost at both levels.

Method We combined the covering tour problem (CTP) with the two-echelon LRP to propose a model named "two-echelon relief covering tour location routing problem" (2E-RCTLRP). To solve the LRP in a large scale, a metaheuristic genetic algorithm (GA) was developed and utilized. To validate the proposed model, five small-scale problems were solved, and the solutions obtained from the proposed GA were compared with the exact solutions obtained from GAMS software. Also, a sensitivity analysis of the CTP was conducted to determine the necessary conditions for using the CTP and two-echelon methods for relief problems.

Results The developed GA was efficient and converged to the optimal solution. The sensitivity analysis results showed that two-echelon methods provide significantly better results than single-echelon methods. Additionally, the comparison of the solution for the non-synchronization of tours at two levels and the proposed model demonstrated the necessity of using the proposed model.

Conclusion The proposed model is an effective method to improve relief operations and strengthen crisis management during natural disasters.

Keywords Two-echelon location-routing problem (2E-RCTLRP), Covering tour problem (CTP), Natural disaster relief, Crisis management, Genetic algorithm (GA)

Article Info:

Received: 16 Dec 2024

Accepted: 05 May 2025

Available Online: 01 Jul 2025

* Corresponding Author:

Mehdi Kabiri Naeini, Professor.

Address: Department of Industrial Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran.

Tel: +98 (912) 5141636

E-mail: kabiri@pnu.ac.ir



Copyright © 2025 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

Extended Abstract

Introduction

During natural disasters such as earthquakes, floods, and storms, or man-made disasters such as explosions and fires, rapid and efficient response from relief forces is necessary to save human lives and minimize the damage caused by the disaster. One of the most important limitations crisis managers face is the need to effectively cover relief bases and ensure timely and efficient aid to affected areas. To enhance the efficiency of search and rescue operations and optimize resource management, determining the appropriate location for relief bases and the correct and optimal routing of relief teams is particularly important. The location-routing problem (LRP) during disasters is thus a fundamental and highly significant challenge for relief management in the affected areas. Furthermore, risk analysis and the assessment of potential threats in different areas have been considered as an important part of the decision-making process for locating. Addressing this issue can play a crucial role in improving crisis management and increasing the efficiency of relief systems in emergencies.

To respond to the complexities of the LRP and the possibility of solving it on a large scale, the use of mathematical algorithms is not enough, and there is a need to utilize metaheuristic methods. In this study, an innovative two-echelon model for the LRP is developed, which specifically considers the spatial coverage constraint; i.e. each relief base is allowed to provide services within a designated service radius only. The main goal of this study is to determine the optimal locations for relief bases and simultaneously design suitable routes for relief teams so that it can significantly reduce the total time of relief operations and the related costs. The proposed model also considered the risk analysis and the assessment of potential threats in different areas. In this research, an advanced genetic algorithm (GA) is developed to provide appropriate and efficient solutions for the two-echelon LRP. Inspired by natural evolution and natural selection processes, this algorithm gradually finds optimal or near-optimal solutions by utilizing operations such as selection, crossover, and mutation.

Methods

We combined the covering tour problem (CTP) with the two-echelon LRP to propose a model named “two-echelon relief covering tour location routing problem” (2E-RCTLRP). To evaluate the accuracy and efficiency

of the proposed model and the developed algorithm, five small-scale sample problems were initially designed, and the optimal solutions to them were obtained using GAMS software, version 24.1.3 which has the capability to solve exact optimization problems. The results obtained from the GA were then compared with the exact GAMS results to evaluate the algorithm’s efficiency, accuracy, and convergence rate. The proposed algorithm is designed to allow control over various parameters such as population size, mutation rate, and crossover rate, thereby providing the necessary flexibility to adapt to the different characteristics of the problem. Sensitivity analysis was also performed on various model variables, which were examined in terms of the CTP. The risk analysis was also conducted to identify the locations with higher levels of threat.

Results

The results obtained from the implementation of the developed GA demonstrated the very high efficiency of this method in achieving near-optimal solutions, even similar to the exact solutions obtained from GAMS. These findings indicated the rapid convergence of this algorithm and its ability to manage large problem dimensions. The results of the sensitivity analysis showed that in many cases, the use of two-echelon models led to significantly better results compared to single-level models. In two-echelon models, it is possible to model the decision-making structure more accurately, consider real operational constraints, and better account for spatial and temporal complexities, which is of great importance in emergencies. Furthermore, comparing the solution for the non-synchronization of tours at two levels with the proposed model showed that the proposed approach not only improved the performance but also led to optimal resource management and cost reduction. Based on the risk analysis, the locations with higher threat levels were identified, based on which appropriate planning for resource allocation and base deployment was carried out. Thus, the proposed model comprehensively considers all critical aspects of relief operations in a crisis and provides effective operational solutions.

Conclusion

The proposed two-echelon model and the developed GA can efficiently optimize the locating and routing of relief teams during disasters. The proposed model can provide better decisions for the deployment of relief bases by considering the real constraints of search and rescue operations and incorporating risk and threat analyses, thereby accelerating and improving the relief process. Using metaheuristic methods in large problem dimensions



enables the solution of more realistic and operational problems, which can help strengthen crisis management infrastructure in the face of natural disasters. The results of this research can serve as a basis for the development of decision support systems in the field of crisis management. By improving the speed, accuracy, and efficiency of decision-making, the proposed model can significantly contribute to saving lives and property in critical situations. Paying attention to two-level approaches in modeling relief problems, especially in combination with intelligent optimization techniques, is a forward-looking and effective solution for managing crises. The application of these approaches can not only be effective in optimizing relief operations but also improve urban planning, enhance the resilience of areas to crises, and increase the preparedness of relief organizations. Combining meta-heuristic algorithms with machine learning methods can enhance the LRP model's capacity to respond to multidimensional crises and complex scenarios.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

All ethical principles were considered in this study. Since there was no experiment on human or animal samples, the need for an ethical code was waived.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authors' contributions

All authors contributed equally to the conception and design of the study, data collection and analysis, interpretation of the results, and drafting of the manuscript. Each author approved the final version of the manuscript for submission.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.



مقاله پژوهشی

مدل سازی و تحلیل دو سطحی مکان یابی - مسیریابی برای بهینه سازی امداد رسانی در
بلاایای طبیعیحسین جمالی^۱، مهدی کبیری نائینی^۱، زینب الهی^۲

۱. گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.



Citation Jamali, H., Kabiri Naeini, M., & Elahi, Z. (2025). [A Two-echelon Model of Location-routing Problem for Optimizing Relief Operations in Natural Disasters (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(2):202-229. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.2.909.1>

<https://doi.org/10.32598/DMKP.15.2.909.1>

چکیده

مقدمه و هدف: مسئله مکان یابی-مسیریابی در شرایط بحران، ازجمله چالش های اساسی در مدیریت امداد رسانی به مناطق حادثه دیده است. یکی از مهم ترین محدودیت ها در این زمینه، پوشش دهی مؤثر پایگاه های امدادی و توانایی امداد رسانی به موقع به مناطق آسیب دیده است. در این مقاله، یک مدل دو سطحی برای مسئله مکان یابی-مسیریابی توسعه داده شده است که در آن هر پایگاه امدادی تنها می تواند خدمات را در شعاع پوشش دهی مشخصی ارائه دهد. هدف، تعیین مکان های بهینه برای پایگاه های امدادی و مسیریابی تیم های امدادی برای به حداقل رساندن زمان و هزینه امداد در هر دو سطح به طور همزمان است.

روش: در این تحقیق مسئله تور پوششی با مسئله مکان یابی-مسیریابی دو سطحی ترکیب شد تا مدلی به نام «مسئله مکان یابی-مسیریابی تور پوشش دهنده امداد دو سطحی» پیشنهاد گردد. برای حل این مسئله مکان یابی-مسیریابی در مقیاس بزرگ، الگوریتم فراابتکاری ژنتیک توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفت. برای اعتبار سنجی مدل پیشنهادی، پنج مسئله در مقیاس کوچک به طور دقیق توسط نرم افزار GAMS حل شد و راه حل های به دست آمده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک پیشنهادی با راه حل های دقیق به دست آمده از نرم افزار GAMS مقایسه شد. همچنین، یک تحلیل حساسیت از مسئله تور پوششی برای تعیین شرایط لازم برای استفاده از تور پوششی و روش های دو سطحی برای مسائل امدادی انجام شد.

یافته ها: نتایج به دست آمده نشان می دهند الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی کارا و همگرا به جواب بهینه است. همچنین این مقاله به تحلیل حساسیت مسئله تور پوششی می پردازد که نتایج بررسی، شرایط الزام استفاده از مدل تور پوششی و روش های دو سطحی برای مسائل امداد رسانی را معین می کند و مشخص می شود که روش های دو سطحی به مراتب نتایج بهتری نسبت به روش های تک سطحی ارائه می دهند. همچنین، مقایسه حل غیرهمزمانی تورها در دو سطح با مدل پیشنهادی نشان دهنده ضرورت استفاده از مدل پیشنهادی است.

نتیجه گیری: این تحقیق می تواند به عنوان یک ابزار مؤثر برای بهبود فرآیندهای امداد رسانی و تقویت زیرساخت های مدیریت بحران در برابر بلاایای طبیعی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها: مسئله مسیریابی - مکان یابی ۲ سطحی، تور پوششی، امداد رسانی در بلاایای طبیعی، مدیریت بحران، الگوریتم ژنتیک

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۶ آذر ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۱۰ تیر ۱۴۰۴

* نویسنده مسئول:

دکتر مهدی کبیری نائینی

نشانی: تهران، دانشگاه پیام نور، گروه مهندسی صنایع.

تلفن: ۵۱۴۱۶۳۶ (۹۱۲) +۹۸

پست الکترونیکی: kabiri@pnu.ac.ir

Copyright © 2025 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode/en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.



مقدمه

در عصر حاضر، وقوع بلایای طبیعی نظیر زلزله، سیل و طوفان به عنوان یکی از بزرگ ترین چالش ها برای جوامع بشری محسوب می شود. با افزایش تعداد و شدت این بلایای طبیعی، بهبود و بهینه سازی فرایندهای امداد رسانی از اهمیت بیشتری برخوردار شده است (باتانی و همکاران، ۲۰۲۱)؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۰. از این رو مسئله امداد رسانی در شرایط بحران، یکی از چالش های مهم در حوزه مدیریت بحران است. با توجه به پیچیدگی های موجود در این نوع مسائل، طراحی و پیاده سازی سیستم های امداد رسانی کارآمد، نیازمند رویکردهای علمی و مدل سازی دقیق است. تحقیقات اخیر نشان می دهند وجود یک مدل مسیریابی مناسب در شرایط بحرانی می تواند منجر به کاهش زمان واکنش و افزایش کارایی در توزیع منابع شود (مالکوف و همکاران، ۲۰۲۲)؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲. به علاوه، استفاده از الگوریتم های پیشرفته، مانند الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری در ترکیب با مدل های ۲ سطحی، نویدبخش بهبودهای چشمگیری در حل مسائل پیچیده این حوزه است (پنگ و همکاران، ۲۰۲۳؛ لیاو و همکاران، ۲۰۲۰).

مسیریابی به عنوان یکی از مسائل کلیدی در مدیریت بحران، به دنبال یافتن بهترین مسیر برای رسیدن به مناطق آسیب دیده و توزیع منابع امدادی است. در سال های اخیر، پژوهشگران بسیاری به این موضوع پرداخته و مدل های مختلفی را برای حل مسئله مسیریابی در شرایط اضطراری ارائه داده اند. با این حال اکثر این مدل ها به صورت تک مرحله ای و با تمرکز بر یک سطح از تصمیم گیری طراحی شده اند. در حالی که در واقعیت، فرایند امداد رسانی شامل تصمیم گیری در سطوح مختلفی، از جمله تخصیص منابع، تعیین مسیرهای بهینه و برنامه ریزی عملیات است. یکی از رویکردهای مؤثر در این زمینه، استفاده از مدل های مسیریابی ۲ سطحی است که می توانند به بهینه سازی زمان و منابع در شرایط بحرانی کمک کنند (محمد و همکاران، ۲۰۲۳)؛ تاراهان و همکاران، ۲۰۲۳. مدل سازی مسیریابی دو سطحی معمولاً شامل دو سطح عمده است: سطح اولیه که به شناسایی و تخصیص منابع به نقاط بحرانی می پردازد و سطح ثانویه که به طراحی مسیرهای بهینه برای انتقال منابع به این نقاط مربوط می شود (کای و همکاران، ۲۰۲۳).

این رویکرد قابلیت های بالایی در تطبیق با تغییرات غیرمنتظره وضعیت بحران ها فراهم می کند و می تواند بهبود قابل توجهی در کارایی و سرعت امداد رسانی به همراه داشته باشد. بهبود تجربه های گذشته و استفاده از فناوری های نوین نظیر سیستم های اطلاعات جغرافیایی و داده های بزرگ می تواند به طراحی و اجرای مدل های بهینه تر برای مسیریابی در واکنش به بلایای طبیعی کمک کند (خانا و همکاران، ۲۰۲۱؛ چوئی و همکاران، ۲۰۲۲).

همچنین ایجاد همکاری های بین نهادی و تبادل اطلاعات در زمان وقوع بحران ها، یکی دیگر از گسترش دهنده های مؤثر در بهبود فرایندهای امداد رسانی است (دلال و همکاران، ۲۰۱۹)؛ جبور و همکاران، ۲۰۲۲.

در این پژوهش، مسئله مکان یابی - مسیریابی ۲ سطحی با محدودیت پوشش دهی بررسی می شود که در آن پایگاه های امداد تنها مجاز به ارائه خدمات در شعاع پوششی خود هستند. تصمیم گیری در دو سطح انجام می شود: در سطح اول، مکان یابی پایگاه های امداد در شهرها با در نظر گرفتن میزان آسیب دیدگی و امکانات موجود انجام می شود و در سطح دوم، تیم های امدادی مستقر در این پایگاه ها به صورت بهینه مسیرهایی را طی می کنند تا به روستاهای حادثه دیده در محدوده پوششی خود امداد رسانی کنند. مدل های پیشین معمولاً یا مکان یابی پایگاه های امداد را بدون در نظر گرفتن محدودیت پوششی بررسی کرده اند یا در مسیریابی تیم های امدادی، تأثیر سطح آسیب پذیری مناطق را نادیده گرفته اند. در این پژوهش، با ترکیب هم زمان این دو عامل و در نظر گرفتن یک مدل ۲ سطحی، سعی شده است تا کارایی امداد رسانی در شرایط بحران بهبود یابد و با حداقل سازی هزینه ها و زمان پاسخ گویی، یک راهکار کارآمدتر برای مدیریت بحران ارائه شود که در آن تحلیل ریسک، ارزیابی تهدیدات و استراتژی های پیشگیرانه نیز لحاظ شده است.

در نتیجه این مقاله به ارائه یک مدل سازی و تحلیل مسیریابی ۲ سطحی به صورت هم زمان می پردازد که با هدف بهینه سازی امداد رسانی در شرایط بحرانی و کاهش زمان واکنش به این بحران ها ارائه می شود. مقاله حاضر به صورت زیر سازماندهی شده است:

در بخش دوم مقاله، مطالعات پیشین بررسی شده و خلأ تحقیقاتی مرتبط استخراج شده است. در بخش سوم، مسئله مسیریابی - مکان یابی تور پوششی ۲ سطحی در شرایط امداد رسانی بیان شده و مدل ریاضی آن مطرح می شود. در بخش چهارم، روش حل مسئله توضیح داده شده است. بخش پنجم، شامل ساختار الگوریتم ژنتیک پیشنهادی جهت حل مسئله با پارامترهای تنظیم شده است. بخش ششم و هفتم مثال های عددی حل شده و تحلیل حساسیت انجام شده را دربر دارند. نهایتاً در بخش هشتم جمع بندی و نتیجه گیری ارائه شده است.

بررسی مطالعات پیشین

مدیریت بحران به ۴ مرحله پیشگیری، آمادگی، پاسخ و بازسازی تقسیم بندی می شود. از میان این ۴ مرحله، مرحله پاسخ، به دلیل امکان کاهش بیشتر تلفات و خسارات جانی و مالی از اهمیت ویژه ای برخوردار است (کنهای و همکاران، ۲۰۱۲). مکان یابی مراکز امداد رسانی و مسیریابی وسایل نقلیه امدادی جهت ارسال کالا و خدمات به آسیب دیدگان یکی از فعالیت های مرحله پاسخ



مرتبط (آرکین و هاسین، ۱۹۹۴؛ گلدن و همکاران، ۲۰۰۸؛ گلدن و همکاران، ۲۰۱۲) مراجعه کند.

ژندریو و همکاران (ژاندر و همکاران، ۱۹۹۷) برای اولین بار با ترکیب مسائل پوشش مجموعه^۲ و فروشنده دوره گرد^۳ مسئله تور پوششی را تعریف کردند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی ارائه دادند و سپس مسئله را با استفاده از یک روش دقیق و یک روش ابتکاری حل کردند. **هاچیچا و همکاران (۲۰۰۰)** نوعی چندوسيله‌ای از مسئله تور پوششی^۴ با کاربردهای گوناگون، شامل طراحی مسیرهایی برای تیم‌های ارائه‌دهنده خدمات مراقبت پزشکی سیار را گسترش دادند. در این مسئله هدف، طراحی چند تور همیلتونی بر روی یک زیرمجموعه از رئوس بود. نویسندگان یک فرموله‌سازی ریاضی و ۳ الگوریتم ابتکاری را برای این مسئله ارائه کردند.

کاربرد دیگری از پوشش برای مراقبت‌های بهداشتی در برخی مقالات (**هاجسون و همکاران، ۱۹۹۸؛ دورنر، فوکه و گوتجهر، ۲۰۰۷**) ارائه شد. **نولز و همکاران (۲۰۱۰)** یک مسئله تور پوششی چندهدفه را پیشنهاد دادند که در آن یک ایستگاه مرکزی و مجموعه‌ای از وسایل نقلیه یکسان فرض شده بود. در این تحقیق امدادرسانی از طریق توزیع کمک‌های حیاتی مانند غذا، دارو و غیره به افراد حادثه‌دیده در یک سطح و به‌صورت غیرمستقیم صورت می‌گیرد. برای حل مسائل این مقاله از هر دو روش دقیق و فراابتکاری استفاده شده است. روش دقیق استفاده‌شده روش اپسیلون-محدودیت^۵ است. همچنین از روش فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی و الگوریتم NSGA-II استفاده شده است. **ناجی عظیمی و همکاران (۲۰۱۲)** تعمیمی از مسئله تور پوششی را برای مکان‌یابی مراکز توزیع ارائه دادند. این مسئله به بررسی مکان‌یابی مراکز توزیع در جهت کمک به ارائه خدمات بشردوستانه برای همه افرادی که در یک ناحیه حادثه‌دیده قرار گرفته‌اند، می‌پردازد. در این مدل، نویسندگان وسایل حمل‌ونقل مختلف و با ظرفیت محدود را به کار گرفتند. برای حل این مسئله از روش ابتکاری الگوریتم شروع چندگانه (multi-start) استفاده شده است.

نتایج محاسباتی بر روی داده‌هایی که به‌طور تصادفی تولید شده‌اند نشان می‌دهند که تنها مثال‌های کوچک با استفاده از مدل ریاضی به‌صورت کارا حل می‌شوند و روش ابتکاری پیشنهادی، مثال‌های در اندازه واقعی را با کیفیت بالا و در یک زمان منطقی حل می‌کند. **الهیاری و همکاران (۲۰۱۴)** ترکیبی

است که از لحظات اولیه وقوع بحران شروع می‌شود و عملکرد مطلوب در مرحله پاسخ، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش تلفات و خسارات ایفا می‌کند. توجه هم‌زمان به ۲ مقوله مکان‌یابی مراکز امداد و مسیریابی می‌تواند تأثیر مناسبی بر عملکرد سیستم ایفا کند. عدم توجه به مسیریابی در هنگام مکان‌یابی مراکز امدادی می‌تواند باعث افزایش زمان رسیدن اقلام امدادی به مراکز امداد شود و این امر باعث کاهش اثربخشی امدادرسانی شود (**جانگ و همکاران، ۲۰۰۹**).

استفاده از تور پوششی، رویکردی است که برخی محققین در زمینه امدادرسانی در زمان بحران به کار گرفته‌اند. در کنار مسیریابی به روش تور پوششی، مکان‌یابی مراکز امدادرسانی و توزیع کالاهای موردنیاز انجام می‌شود. در برخی تحقیقات ایجاد این مراکز به‌صورت سرپایی مطرح است تا در کمترین زمان ممکن احداث و راه‌اندازی آن صورت گیرد. یی و ازامار در سال ۲۰۰۷ به ارائه مدل مکان‌یابی و توزیع به‌منظور تخلیه مناطق آسیب‌دیده و ارائه کالاهای اساسی در شرایط بحران پرداخته‌اند. آن‌ها بسته-بندی مناسب کالاهای ضروری (دارو و غذا و آب آشامیدنی و غیره) به‌منظور سرعت و سهولت در توزیع را مد نظر قرار دادند و برای بسته‌های کالایی وزن‌هایی مشخص شده است که در بین آن‌ها بسته‌های دارویی از اهمیت بیشتری برخوردار است. در مدل ارائه‌شده برای مکان‌یابی مراکز امداد آن‌ها به‌صورت موقت و سرپایی در نظر گرفته شده و هزینه برپایی آن ناچیز فرض شده است. این مدل، رویکرد پوششی دارد و هدف آن کمینه کردن درصد تقاضای برآورده‌نشده است.

برای ادبیات این تحقیق تعدادی از مطالعات مرتبط در این زمینه بررسی و نکات کلیدی آن‌ها ذکر می‌شود. مقالاتی که در آن‌ها به مسیریابی، مکان‌یابی، تور پوششی و امدادرسانی پرداخته شده است از آن جمله هستند. مفهوم پوشش کاربردهای فراوانی در دنیای واقعی دارد. به‌عنوان مثال می‌توان ترکیب مفاهیم پوشش و مسیریابی را در مسائل مرتبط با حالات اورژانسی نظیر سیل، زلزله، سونامی و غیره در مقالات (آلتای و گرین، ۲۰۰۶؛ دلاتوره و همکاران، ۲۰۱۲؛ کانهای و همکاران، ۲۰۱۲؛ جمالی و همکاران، ۲۰۱۵؛ جمالی و بشیری، ۲۰۲۰) پیدا کرد. کارنت و اسچیلینگ یکی از اولین مسائل مسیریابی به نام مسئله فروشنده پوششی^۱ را بیان کردند که در آن ویژگی همه متقاضیان بر روی تور در نظر گرفته نشده است. آن‌ها در این مقاله به مسیریابی تیم‌های خدمات بهداشتی در کشورهای در حال توسعه پرداختند و برای حل مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خود، از یک روش ابتکاری ۲ مرحله‌ای استفاده کردند.

روش‌های حل گوناگونی برای مسئله فروشنده پوششی و انواع آن ارائه شده است که خواننده علاقه‌مند می‌تواند به مقالات

2. Set Covering Problem (SCP)

3. Traveling Salesman Problem (TSP)

4. Covering Tour Problem (CTP)

5. ϵ -constraint

1. Covering Salesman Problem



جاکوبسن و مدسن ارائه شد. جاکوبسن و مدسن در این مقاله یک کاربرد واقعی این مسئله را در ارتباط با توزیع و پخش روزنامه در بخش غربی دانمارک به کار بردند. هدف این مسئله مکان‌یابی مراکز توزیع، یافتن مسیرهای بهینه برای سطوح اول و دوم با حداقل هزینه است. نویسندگان این مقاله ۳ الگوریتم ابتکاری مختلف را برای حل این مسئله ارائه کردند (جاکوبسن و مدسن، ۱۹۸۰). مدسن (۱۹۸۳) با انجام اصلاحاتی بر روی ۲ الگوریتم از ۳ الگوریتم ابتکاری بیان شده در قبل، کارایی آن‌ها را افزایش داد و برای همان مسئله از آن‌ها استفاده کرد. بوسیا و همکاران (۲۰۱۱) یک روش حل فراابتکاری جستجوی ممنوع (TS) را برای مسئله مسیریابی - مکان‌یابی ۲ سطحی با ظرفیت محدود ارائه کردند. این روش در اصل برای مسائل LRP طراحی شده بود و قبلاً توسط ناگی و صالحی (۱۹۹۶) و توزان و پورکه (۱۹۹۹) پیشنهاد شده بود. ایده اصلی این الگوریتم، اولاً تجزیه مسئله اصلی به ۲ مسئله LRP و ثانیاً تجزیه هر LRP به یک مسئله مکان‌یابی تسهیلات دارای ظرفیت^۹ و یک مسئله مسیریابی وسایل حمل‌ونقل چندایستگاهی بود. بنابراین الگوریتم TS ارائه شده شامل ۲ مرحله اصلی است: مرحله اول مکان‌یابی است که در آن تعداد و مکان تسهیلات مشخص می‌شوند و مرحله دوم مسیریابی است. یک رویکرد از پایین به بالا در این مقاله استفاده شده است، به این صورت که در ابتدا یک راه‌حل برای سطح دوم ساخته می‌شود و سپس باتوجه به آن راه‌حل، راه‌حل سطح اول ساخته می‌شود. در تحقیقی مشابه، کرانیک و همکاران (الف ۲۰۱۱) نیز از همین ایده برای حل مسئله خود استفاده کردند.

ذگردی و نیکبخش (۲۰۱۰) ۱ مدل ریاضی ۴ اندیشه، ۱ روش ابتکاری سریع و کارا و ۱ کران پایین را برای مسئله 2E-LRP با محدودیت‌های پنجره‌های زمانی نرم^{۱۰} ارائه دادند.

روش ابتکاری پیشنهاد شده تلاش می‌کند مسئله را با استفاده از ایجاد یک راه‌حل اولیه، سپس بهبود دادن آن از طریق جستجوی ۶ همسایه از راه‌حل اولیه و استفاده از روش ابتکاری Or-opt حل کند. در پایان، نتایج محاسباتی نشان از کارایی روش ابتکاری پیشنهاد شده و استفاده از کران پایین ارائه شده دارد.

کرانیک و همکاران (۲۰۱۱ ب) ۳ مدل‌سازی بر پایه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^{۱۱} برای مسئله مسیریابی - مکان‌یابی ۲ سطحی با ظرفیت محدود معرفی کردند. هدف این مقاله معرفی مسئله 2E-LRP و به دست آوردن این بینش است که این مسئله باتوجه به مدل‌های ارائه شده، برای مثال‌های گوناگون چگونه عمل می‌کند.

محاسباتی برای مثال‌های با اندازه متوسط و کوچک برای

از مسئله CSP و MDVRP^۶ را با نام MDCTVRP^۷ ارائه کردند. در این مقاله فرض ویزیت شدن تمامی متقاضیان وجود ندارد. تقاضای هر فرد می‌تواند به صورت مستقیم با ویزیت شدن در تور و یا به صورت غیرمستقیم با پوشش یافتن توسط تور برآورده شود. نویسندگان ۲ فرمول‌بندی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط^۸ (MIP) و ۱ الگوریتم فراابتکاری هیبریدی که ترکیبی از GRASP و SA و ۱ جستجوی محلی تکراری است را برای این مسئله گسترش دادند.

مطالعه جمالی و بشیری (۱۳۹۹) که به طراحی مدلی جدید در حوزه مدیریت بحران اختصاص یافته است، در آن مسئله پوشش‌دهی مناطق بحرانی در قالب یک تور بهینه مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل در شرایطی توسعه یافته که محدودیت منابع و امکانات مانع از حضور مستقیم تیم‌های امدادی در تمامی نقاط آسیب‌دیده است و به همین دلیل تمرکز بر ایجاد مسیری بین برخی شهرهاست که از طریق آن بتوان نیاز روستاهای مجاور را نیز پوشش داد. در این چارچوب، هدف، یافتن کوتاه‌ترین مسیر همپلتونی ممکن بین مجموعه‌ای از شهرها به گونه‌ای است که کلیه روستاهای آسیب‌دیده نیز به طور غیرمستقیم تحت پوشش قرار گیرند. برای حل مدل در مقیاس‌های بزرگ، یک الگوریتم ژنتیک طراحی و پیاده‌سازی شده است. به منظور ارزیابی عملکرد مدل و روش پیشنهادی، چند نمونه کوچک مقیاس با استفاده از این الگوریتم حل شده و نتایج با خروجی‌های دقیق نرم‌افزار GAMS مقایسه شده است. بررسی‌ها نشان داده‌اند الگوریتم مذکور از نظر کیفیت جواب و هم‌گرایی بهینه، عملکرد مطلوبی دارد. همچنین این پژوهش به تحلیل حساسیت مدل نیز پرداخته و نشان داده است استفاده از ساختار تور پوششی در مسائل امدادرسانی می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌های مؤثرتر در شرایط بحرانی شود. تمامی مقالات ارائه شده در زمینه تور پوششی، در یک سطح به مسائل می‌پردازند و این فرض وجود دارد که افراد باید خود را به تیم‌های مستقر در تور سطح اول برسانند. با این شرایط اگر افرادی دچار حادثه یا مصدوم شده باشند و نتوانند خود را به تیم‌های امداد برسانند، ممکن است جان آن‌ها در خطر باشد.

در ادامه تعدادی از مقالات بررسی می‌شود که در حوزه حمل‌ونقل دو سطحی هستند. تمامی این مقالات در دو سطح بدون در نظر گرفتن مفهوم پوشش به حل مثال‌ها می‌پردازند و این فرض که ممکن است به علت آسیب ناشی از فاجعه رخ داده در هر شهر نتوان پایگاه امدادی با ظرفیت دلخواه برپا کرد، در نظر گرفته نشده است. یکی از اولین و مهم‌ترین مقالات در زمینه مسئله مسیریابی - مکان‌یابی دو سطحی (2E-LRP) توسط

9. Capacitated Facility Location Problem (CFLP)

10. Soft Time Windows

11. Mixed Integer Linear Programming (MILP)

6. Multi Depot Vehicle Routing Problem

7. Multi Depot Covering Tour Vehicle Routing Problem

8. Mixed-Integer Programming (MIP)



مرکز توزیع و ۲۰۰ متقاضی بودند. نتایج محاسباتی نشان دادند الگوریتم GRASP ترکیبی مذکور کارا تر از دیگر روش‌های ابتکاری بیان شده در این مقاله هستند (نگوین و همکاران، ۲۰۱۲ ب). یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط جدید و یک الگوریتم جست‌وجوی محلی تکراری^{۱۷} چند شروعی را برای 2E-CLRPD پیشنهاد دادند که دارای چند ویژگی خاص است. این ویژگی‌ها شامل موارد زیر هستند:

اولین ویژگی یک معیار پذیرش برای راه‌حل‌ها است. به‌طوری‌که این راه‌حل‌ها تنها در صورتی می‌توانند پذیرفته شوند که اختلافشان از بهترین راه‌حل شناخته‌شده از یک مقدار معین تجاوز نکند. دومین ویژگی شامل ۲ روش بهبود یافته بر پایه جست‌وجوی ۲ همسایه با پیچیدگی متفاوت است و سومین ویژگی شامل یک لیست است که راه‌حل‌های بازدید شده اخیر توسط یک الگوریتم TS را ذخیره می‌کند. در ادامه نتایج الگوریتم ILS چندشروعی با روش path relinking تقویت شد. این الگوریتم همراه با تعدادی روش ابتکاری ساده‌تر و با کارایی کمتر بر روی تعدادی از مثال‌های پایه که در مقاله (نگوین و همکاران، ۲۰۱۲ الف) تولید شده بودند، مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین در این مقاله، نویسندگان تنها بهترین مقادیر به‌دست‌آمده از تعدادی اجرا را گزارش داده‌اند. در حالی که هیچ اطلاعاتی در مورد میانگین عملکرد اجراها داده نشده است. مقایسه دو مقاله (نگوین و همکاران، ۲۰۱۲ الف؛ نگوین و همکاران، ۲۰۱۲ ب) نشان می‌دهد که ILS چندشروعی ترکیب شده با path relinking در مقاله (نگوین و همکاران، ۲۰۱۲ ب) کمی بهتر از الگوریتم GRASP ترکیب شده با learning process و path relinking بیان شده در مقاله (نگوین و همکاران، ۲۰۱۲ الف) است. اسچونگر و همکاران (۲۰۱۲) روش ابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر را برای 2E-CLRPD گسترش دادند که این الگوریتم قبلاً توسط پیرکویسر و رایدل (۲۰۱۰) برای مسئله LRP طراحی شده بود.

محاسبات بر روی ۳ مجموعه از مثال‌های به‌کاررفته توسط کونتاردو و همکاران (۲۰۱۳) در مقاله انجام گرفت؛ کارایی الگوریتم VNS در مقایسه با کارایی الگوریتم آزمون‌شده در مقالات (کانتاردو و همکاران، ۲۰۱۳؛ نگوین و همکاران، ۲۰۱۲ الف؛ نگوین و همکاران، ۲۰۱۲ ب) مورد تأیید قرار گرفت. نتایج محاسباتی نشان دادند الگوریتم VNS پیشنهاد شده بهتر از روش‌های فراابتکاری پیشنهاد شده در (نگوین و همکاران، ۲۰۱۲ الف؛ نگوین و همکاران، ۲۰۱۲ ب) هستند، اما به‌طور متوسط الگوریتم ALNS ارائه شده در (کانتاردو و همکاران، ۲۰۱۳) عملکرد بهتری داشته است. گویندان و همکاران یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه را برای یک شبکه زنجیره تأمین مواد غذایی فاسدشدنی پیشنهاد دادند. این مدل یک مسئله مسیریابی-مکان‌یابی ۲ سطحی با پنجره‌های زمانی برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین و بهینه‌سازی اهداف

مدل‌های ۲ شاخصه و ۳ شاخصه انجام گرفت. این مثال‌ها با استفاده از حل‌کننده XPress حل شدند و سپس از نظر زمان محاسباتی، کران‌ها و کیفیت راه‌حل‌ها با هم مقایسه شدند. نتایج محاسباتی نشان دادند مدل ۳ شاخصه کران‌های پایین بهتری به دست می‌دهد و کارا تر از مدل ۲ شاخصه برای حل مثال‌های با اندازه متوسط است.

کونتاردو و همکاران (۲۰۱۲) الگوریتم شاخه و برش^{۱۲} را که یک روش دقیق است برای حل مسئله 2E-LRP پیشنهاد دادند. در این مقاله نویسندگان یک مدل‌سازی جریان مبنا را پیشنهاد دادند که براساس الگوریتم شاخه و برش طراحی شده و قادر است مثال‌های در اندازه کوچک و متوسط را به‌صورت بهینه در یک زمان محاسباتی منطقی حل کند. این فرموله‌بندی ریاضی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط است که توسط چندین نام‌سای معتبر که از مقالات بلنگور و همکاران (۲۰۱۱) و کونتاردو و همکاران (۲۰۱۳) گرفته شده، تقویت شده است. همچنین نویسندگان یک الگوریتم ALNS^{۱۳} را برای حل این مسئله پیشنهاد دادند. هر دو الگوریتم دقیق و فراابتکاری ارائه‌شده براساس تجزیه مسئله 2E-CLRP به ۲ مسئله LRP در هر سطح طراحی شده‌اند. این کار نویسندگان را قادر می‌کند الگوریتم‌های پیشنهاد شده را برای مسئله CLRP در هر سطح به کار گیرند و سپس راه‌حل‌های جزئی به‌دست‌آمده را برای به دست آوردن یک راه‌حل کلی ترکیب کنند. نتایج محاسباتی که بر روی یک مجموعه بزرگ از مثال‌ها انجام گرفت حاکی از آن است که الگوریتم ALNS کارا تر از روش‌های ابتکاری موجود است. علاوه بر این روش شاخه و برش ارائه شده، کران‌های پایین دقیقی را فراهم می‌آورد.

نگوین و همکاران (۲۰۱۲ الف) نوعی از مسئله مسیریابی - مکان‌یابی ۲ سطحی با ظرفیت محدود و دارای یک ایستگاه^{۱۴} که در آن تنها یک ایستگاه با مکان مشخص وجود دارد را بررسی کردند. آن‌ها این مسئله را با یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و با استفاده از متغیرهای تصمیم ۲ شاخصه مدل‌سازی کردند. همچنین آن‌ها ۴ روش ابتکاری سازنده، یک روش فراابتکاری ترکیبی^{۱۵} GRASP که با استفاده از learning process و path relinking تقویت شده است را برای حل این مسئله ارائه کردند. الگوریتم GRASP از ۳ روش ابتکاری تصادفی حریصانه برای تولید راه‌حل‌های آزمایشی و ۲ روش VND^{۱۶} برای بهبود آن‌ها استفاده می‌کند. نویسندگان این مقاله ۲ مجموعه مثال را برای این مسئله تعریف کردند که شامل حداکثر ۱۰

12. Branch-and-Cut (B&C)

13. Adaptive Large Neighborhood Search

14. Two-Echelon Capacitated Location Routing Problem with a Single Depot (2E-CLRPD)

15. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure

16. Variable Neighborhood Descent

17. Iterated Local Search (ILS)



مسیریابی - مکان‌یابی ۱ سطحی هم‌گرا می‌شود و نهایتاً با برپایی پایگاه‌های امداد با ظرفیت بیشتر و استفاده از وسایل حمل‌ونقل متناظر با آن‌ها، امداد رسانی با هزینه کمتر و سرعت بیشتری انجام خواهد گرفت.

اولیواری و همکاران (۲۰۲۵) مسئله تور پوشش چند وسیله نقلیه را تعریف می‌کنند. هدف تعیین مجموعه‌ای از مسیرها با حداقل هزینه است که محدودیت‌های زیر را برطرف می‌کند:

هر مسیر در انبار شروع و به پایان می‌رسد. هر تسهیلات اجباری دقیقاً ۱ بار در یک مسیر واحد بازدید می‌شود. هر مسیر از امکانات P بیشتر بازدید نمی‌کند و حداکثر هزینه آن q است. برای هر مشتری، حداقل یک تسهیلات اختیاری از مجموعه پوشش آن باید توسط یکی از مسیرها بازدید شود. در این مقاله، یک الگوریتم دقیق شاخه - برش و قیمت. خانواده جدیدی از برش‌های ظرفیت مانند و مجموعه جدیدی از نمونه‌های معیار وجود دارد. نتایج نشان داد الگوریتم پیشنهادی از بهترین روش دقیق از ادبیات عملکرد بهتری دارد و برش‌های پیشنهادی عملکرد آن را با یک مرتبه قدر بهبود می‌بخشد.

در ادامه چند مقاله در زمینه امداد رسانی بحران که مرتبط با این تحقیق هستند بررسی و ویژگی‌های آن‌ها به‌طور خلاصه ذکر می‌شوند.

راس و گوتجر (۲۰۱۴) یک مدل بهینه سازی ۳ هدفه را برای یک مسئله مسیریابی - مکان‌یابی انبار جهت امداد رسانی بعد از وقوع حادثه پیشنهاد دادند. در این مسئله چند ایستگاه وجود دارد که باید در ابتدا مکان‌یابی شوند. سپس باید متقاضیان به این ایستگاه‌ها تخصیص یابند و در ادامه مسیریابی به این متقاضیان توسط یک ناوگان از وسایل حمل‌ونقل با ظرفیت یکسان انجام گیرد. تعداد، اندازه و مکان انبارها، تخصیص متقاضیان به انبارها و مسیریابی حمل کالاها باید به‌گونه‌ای انجام گیرد که حداقل هزینه را دربر داشته باشد. نویسندگان برای حل این مسئله از روش دقیق ^{۲۲} VNS استفاده کرده‌اند. وانگ و همکاران یک مدل مسیریابی - مکان‌یابی عدد صحیح غیرخطی را برای مسئله توزیع امداد ۱ سطحی با در نظر گرفتن مدت‌زمان پیموده‌شده، کل هزینه و قابلیت اطمینان تعریف کردند. به‌طوری‌که در این مدل شکست تقاضا مجاز است. به این معنی که وسایل حمل‌ونقل می‌توانند در آخرین نقطه توقفشان تا فرارسیدن مأموریت بعدی منتظر بمانند بدون اینکه به ایستگاه برگردند. توزیع امداد شامل مکان‌یابی مراکز توزیع، مسیریابی وسایل نقلیه و زمان‌بندی پس از وقوع زلزله است. در این مسئله از یک ناوگان وسایل حمل‌ونقل ناهمگون که دارای ظرفیت و سرعت‌های متفاوت هستند استفاده شده است. هدف این مسئله مشخص کردن یک زیرمجموعه از مراکز توزیع جهت

محیطی و اقتصادی در یک شبکه زنجیره تأمین مواد غذایی فاسدشدنی را تعریف می‌کند. هدف این مدل، شناسایی تعداد و مکان تسهیلات، بهینه‌سازی مقدار مواد حمل‌شده به سطوح پایین و مسیریابی در هر سطح است. همچنین هدف دیگر این مقاله کاهش هزینه‌های مرتبط با کربن ناشی از تماس لاستیک‌های وسایل نقلیه با سطح جاده و انتشار گازهای گلخانه‌ای در کل شبکه است. روش پیشنهادشده شامل یک رویکرد هیبریدی چندهدفه جدید به نام فراابتکاری هیبریدی مبتنی بر جمعیت برای چندهدفه (MHPV)، ترکیبی از ۲ الگوریتم چندهدفه شناخته‌شده به نام الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات چندهدفه^{۱۸} و الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر چندهدفه تعدیل‌شده^{۱۹} است. نتایج نشان می‌دهند این رویکرد هیبریدی راه‌حل‌های بهتری در مقایسه با روش‌های دیگر ارائه می‌دهد.

جمالی و همکاران (۱۳۹۴) در مقاله‌ای به بررسی و حل مسئله امداد رسانی ۲ سطحی نقاط آسیب‌دیده از بحران پرداختند. این مقاله به بررسی مسئله مسیریابی - مکان‌یابی ۲ سطحی ظرفیت‌دار با پنجره‌های زمانی سخت^{۲۰} در شرایط امداد رسانی^{۲۱} برای افرادی که در یک ناحیه بحران زده قرار گرفته‌اند، می‌پردازد. در این شرایط افراد باید در اسرع وقت توسط تیم‌های امداد رسان مورد حمایت قرار گیرند و لازمه این امر، یافتن مسیرهای بهینه جهت حمل‌ونقل سریع این تیم‌ها و ارائه کالاهای ضروری مورد نیاز به افراد حادثه‌دیده است. هدف این مقاله تعیین مجموعه‌ای بهینه از پایگاه‌های امداد جهت استقرار تیم‌های امداد رسان، مسیریابی بهینه این تیم‌ها از پایگاه اصلی به پایگاه‌های امداد برپاشده و سپس از این پایگاه‌ها به نقاط حادثه‌دیده است. به‌طوری‌که کل تقاضا برآورده شود و هزینه کل که شامل مجموع هزینه برپا شدن پایگاه‌های امداد و هزینه‌های حمل‌ونقل هستند، حداقل شود. نتایج حاصل از حل مسئله نشان می‌دهند الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، الگوریتمی کارا و کاربردی است. این مسئله با مسائل مسیریابی - مکان‌یابی ۱ سطحی و تور پوششی در شرایط امداد رسانی طی چندین مثال و در شرایط یکسان مقایسه و نتیجه‌گیری شد این مسئله به مراتب دارای هزینه کمتری بوده و بنابراین کارتر است. در ادامه به تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت وسایل حمل‌ونقل، ظرفیت پایگاه‌های امداد و تعداد این پایگاه‌ها پرداخته و نتیجه‌گیری شد با کاهش ظرفیت وسایل حمل‌ونقل سطح دوم، مسئله امداد رسانی ۲ سطحی به مسئله تور پوششی هم‌گرا می‌شود، همچنین با افزایش ظرفیت پایگاه‌های امداد و استفاده از وسایل حمل‌ونقل بزرگ‌تر، این مسئله به مسئله

18. Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

19. Adapted Multi-Objective Variable Neighborhood Search (AMOVNS)

20. Two-Echelon Capacitated Location Routing Problem with Hard Time Windows (2E-CLRPHTW)

21. Relief

22. Variable Neighborhood Search (VNS)

[illegible]



قرار نگرفته‌اند.

بیان مسئله و مدل‌سازی ریاضی آن

فرض کنید مجموعه معینی از رؤوس وجود دارند که باید در تور قرار گیرند. همچنین رؤوسی موجودند که می‌توانند جهت بازدید در تور قرار گیرند. مجموعه سومی از رؤوس نیز موجودند که باید حداقل به وسیله یک شهر ویزیت شده، پوشش یابند. منظور از پوشش این است که این رؤوس باید در یک فاصله از پیش تعیین شده نسبت به شهر ویزیت شده‌ای در تور قرار گیرند. حال اگر در یک منطقه جغرافیایی، حادثه‌ای طبیعی نظیر سیل، زلزله و غیره رخ داده باشد و هدف امداد رسانی به افراد حادثه‌دیده با استفاده از مسئله تور پوششی کلاسیک باشد، افراد حادثه‌دیده باید خود را به نقاط ویزیت شده جهت دریافت خدمات برسانند. در این شرایط ممکن است به هر علتی، مثلاً محدودیت زمانی، دوری راه، آسیب دیدگی افراد حادثه‌دیده و غیره، تعدادی از افراد حادثه‌دیده نتوانند خود را به پایگاه‌های امداد برپا شده در تور اصلی برسانند و خدمت موردنظرشان را دریافت کنند و قطعاً در این حالت جان انسان‌های زیادی ممکن است در خطر باشد.

زمانی که ظرفیت پایگاه‌ها حداکثر برابر با مقدار تقاضای کل افراد حادثه‌دیده باشد، افزایش ظرفیت پایگاه‌ها مجاز است و میتوان در آن پایگاه‌ها از وسایل حمل و نقل متناظر با ظرفیت آن پایگاه‌ها بهره برد و در این صورت امداد رسانی با هزینه کمتر و سرعت بیشتری انجام خواهد گرفت، ولی اگر با یک برنامه‌ریزی نادرست، پایگاه‌های امداد با ظرفیت بیشتر از حد نیاز برپا شوند، با آنکه این کار هزینه امداد رسانی بیشتری دربر دارد، در سرعت امداد رسانی تأثیر چندانی نمی‌گذارد؛ بنابراین پایگاه‌های امداد باید با ظرفیت بهینه و متناسب با میزان تقاضای افراد حادثه‌دیده برپا گردند (جمالی و همکاران، ۲۰۱۵ الف).

از آنجایی که یکی از اهداف اصلی امداد رسانی، کاهش مرگ و میر افراد حادثه‌دیده است، نمی‌توان در چنین شرایطی انتظار داشت مردم بحران زده، خود را به تیم‌های امداد که در پایگاه‌های شهری مستقر شده‌اند، جهت دریافت خدمت برسانند. بنابراین استفاده از تور سطح دوم برای امداد رسانی مستقیم به افراد حادثه‌دیده لازم به نظر می‌رسد. برای درک بهتر مسئله فرض کنید در یک منطقه جغرافیایی، تعدادی شهر و روستا وجود دارد که در شرایط بحرانی بعد از وقوع حادثه قرار دارند. شهرها به ۲ دسته تقسیم می‌شوند: دسته اول شامل شهرهایی هستند که حادثه دیده‌اند و باید حتماً در تور سطح اول قرار گیرند و در ضمن باید در آن‌ها پایگاه‌های امداد جهت خدمت رسانی به روستاهای حادثه‌دیده برپا شود.

دسته دوم شامل شهرهایی هستند که حادثه ندیده‌اند و می‌توانند در تور سطح اول به عنوان پایگاه امداد رسانی جهت امداد رسانی به نقاط حادثه‌دیده قرار گیرند. همه پایگاه‌های امداد دارای ظرفیت محدود و هزینه بازگشایی هستند.

بازگشایی، تخصیص نواحی بحران زده و وسایل حمل و نقل به مراکز توزیع و برنامه‌ریزی مسیرها مراکز توزیع به نواحی حادثه‌دیده با توجه به ظرفیت وسایل حمل و نقل و مجاز بودن شکست تقاضا است. نویسندگان این مقاله از ۲ روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نسخه ۲ (NSGA-II و NSDA) برای حل مدلشان استفاده کردند. این ۲ روش در عملگرهای تقاطع و جهش با هم تفاوت دارند. برای ارزیابی کارایی ۲ روش پیشنهاد شده، ۵ مجموعه از مثال‌ها در اندازه‌های مختلف به صورت تصادفی تولید و توسط مدل‌های پیشنهادی حل شد. مقایسه جواب‌ها نشان داد روش NSGA-II در اکثر موارد نسبت به روش NSDA عملکرد بهتری داشته است.

وانگ و ژانگ (۲۰۰۵) برای بهینه‌سازی مکان مراکز امداد مدلی را براساس احتمال وقوع فاجعه، توابع هدف پراکندگی فاجعه و امداد رسانی ارائه کردند. آن‌ها یک الگوریتم ژنتیک (GA) را با استفاده از کدهای پایتری و در نظر گرفتن یک روش ابتکاری حریصانه برای محاسبه تابع هدف گسترش دادند. نتایج محاسباتی که بر روی مثال‌ها انجام گرفت نشان داد الگوریتم مذکور دارای عملکرد رضایت‌بخشی است. **هان و ژانگ (۲۰۰۹)** یک مسئله مکان‌یابی تسهیلات اورژانسی را گسترش دادند که به عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی خطی مدل‌سازی شد. آن‌ها یک الگوریتم ژنتیک (GA) که در آن هر کروموزوم از شماره سریال تسهیلات اورژانسی موردنظر تشکیل شده بود و تنوع جمعیت به واسطه استفاده از یک عملگر احتمالی جهش پشتیبانی می‌شد را ارائه کردند. نتایج آزمایشات نشان دادند کارایی الگوریتم ژنتیک ارائه‌شده بسیار بیشتر از کارایی الگوریتم‌های دیگر است. **جدول شماره ۱** به طور خلاصه، ویژگی‌های مطالعات انجام‌شده در حوزه مسائل تور پوششی، مسیریابی - مکان‌یابی دو سطحی و امداد رسانی را به همراه خلاصه‌ای تحقیقاتی نشان می‌دهد.

هدف پاشاپور و همکاران (۲۰۲۴) کمک به سازمان‌های بشردوستانه در بهینه‌سازی مقرون به صرفه لجستیک امکانات سیار با ظرفیت مورد استفاده برای ارائه کمک‌های امدادی به پناهندگان در حال عبور در یک محیط چند دوره بود. ۱ مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط فرموله شد و ۲ روش راه حل برای حل این مشکل پیچیده پیشنهاد شد: یک رویکرد تجزیه سریع بندرز به عنوان یک روش حل دقیق و یک الگوریتم ریاضی که بر یک دستور کار اصلاح و بهینه‌سازی پیشرفته تأکید دارد.

با مشاهده **جدول شماره ۱**، واضح است مدل‌سازی مسئله تور پوششی ۲ سطحی در شرایط امداد رسانی، امداد رسانی در دو سطح و به صورت هم‌زمان به نقاط حادثه‌دیده، در نظر گرفتن شعاع پوششی متفاوت با توجه به امکانات موجود در پایگاه‌ها، طراحی الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای حل این مسئله در اندازه‌های واقعی و در نظر گرفتن چند وسیله نقلیه در سطح اول و دوم در صورت لزوم از نکاتی هستند که تاکنون مورد مطالعه

اول در پایگاه اصلی موجودند. هر وسیله نقلیه سطح اولی یک زیرمجموعه از پایگاه‌های امداد را می‌پیماید و سپس به پایگاه مرکزی برمی‌گردد. به محض رسیدن وسیله نقلیه سطح اول به پایگاه‌های امداد و تأمین شدن مقدار تقاضای تخصیص یافته به آن پایگاه، وسیله نقلیه سطح دوم از آن پایگاه حرکت خود را آغاز می‌کند. مسیری را که برای ارائه خدمت و توزیع مواد امدادی به افراد حادثه‌دیده در نظر گرفته شده است را می‌پیماید و سپس به همان پایگاه بر می‌گردد. در این مسئله وسایل نقلیه سطح اول ظرفیت بیشتری نسبت به وسایل نقلیه سطح دوم دارند. هر پایگاه امداد برپاشده باید دقیقاً توسط یک وسیله نقلیه سطح اول بازدید شود. به‌طور مشابه هر نقطه متقاضی دریافت خدمات امداد باید دقیقاً توسط یک وسیله نقلیه سطح دوم خدمت‌رسانی شود. بنابراین باید مقدار تقاضای امدادی هر نقطه حادثه‌دیده، کوچک‌تر از ظرفیت هریک از وسایل نقلیه سطح دوم باشد.

باتوجه به توضیحات بیان‌شده می‌توان نتیجه گرفت مسئله موردبررسی در این تحقیق، تعمیمی از مسائل تور پوششی^{۲۳} و مسئله مسیریابی مکان‌یابی^{۲۴} در شرایط امدادرسانی است به همین علت این مسئله با عنوان مسئله مسیریابی - مکان‌یابی تور پوششی^{۲۵} در شرایط امدادرسانی نام‌گذاری می‌شود که به‌اختصار در این مقاله مسئله تور پوششی دو سطحی نامیده می‌شود. نوآوری‌های تحقیق حاضر را می‌توان در موارد زیر دانست: مدل‌سازی مسئله تور پوششی دو سطحی در شرایط

امدادرسانی در سطح دوم باتوجه به امکانات آن سطح، صرفاً به نقاط آسیب‌دیده‌ای امکان‌پذیر است که در فاصله کمتری از یک شعاع معین نسبت به پایگاه امداد متناظر قرار داشته باشند. در این مقاله امدادرسانی از پایگاه مرکزی به شهرها و سپس از شهرها به روستاهای حادثه‌دیده در دو سطح و به‌صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد. به این صورت که در سطح اول پایگاه‌های امداد شهری برپا و تجهیز می‌شوند، به محض تجهیز شدن این پایگاه‌ها، امدادرسانی از آن‌ها به روستاهای حادثه‌دیده‌ای که تحت پوشش آن‌ها هستند و به آن‌ها تخصیص یافته‌اند توسط وسایل نقلیه امدادی مستقر در آن‌ها صورت می‌گیرد. این کار باعث می‌شود که تورها به‌طور هم‌زمان در دو سطح تشکیل شوند و امدادرسانی با سرعت بیشتری انجام گیرد.

پایگاه مرکزی موجود در این مسئله دارای امکاناتی نظیر وسایل حمل‌ونقل جهت امدادرسانی و مواد موردنیاز افراد حادثه‌دیده است. فاصله پوششی شهرها با یکدیگر متفاوت است و هر شهر فقط می‌تواند به روستاهایی که در فاصله پوششی آن شهر قرار دارند، امدادرسانی کند. هدف این مقاله تعیین مجموعه‌ای بهینه از پایگاه‌های امداد جهت استقرار تیم‌های امداد رسان و تجهیز آن‌ها توسط پایگاه امداد مرکزی، مسیریابی بهینه این تیم‌ها از پایگاه مرکزی به پایگاه‌های امداد برپاشده و سپس از این پایگاه‌ها به روستاهای حادثه‌دیده است. به‌طوری‌که نیاز امداد تمامی نقاط حادثه‌دیده برآورده شود و هزینه کل که شامل مجموع هزینه برپا شدن پایگاه‌های امداد و هزینه‌های حمل‌ونقل هستند، حداقل شود.

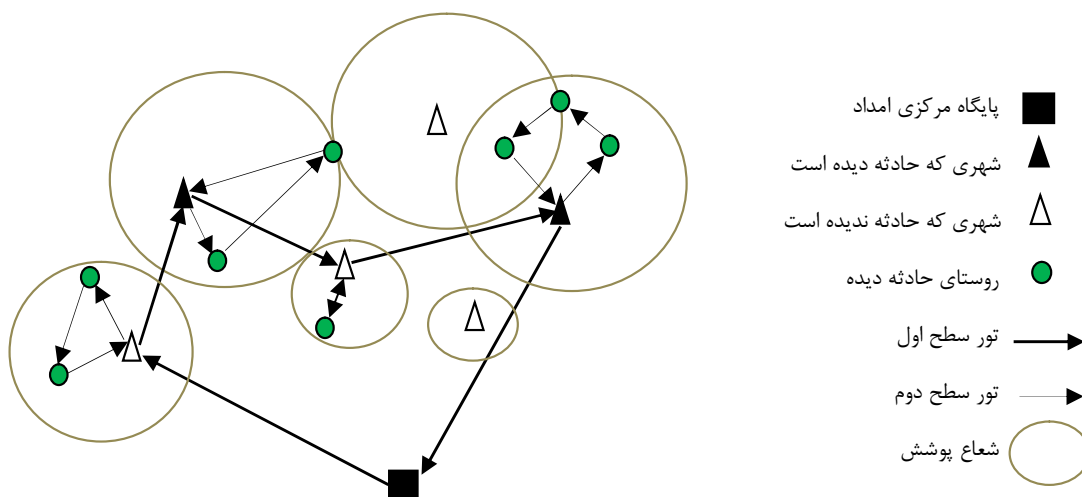
این مسئله دارای دو سطح است: سطح اول شامل پایگاه اصلی و پایگاه‌های امداد برپاشده و سطح دوم شامل این پایگاه‌ها و نقاط حادثه‌دیده است. در هر سطح، یک ناوگان از وسایل نقلیه مشابه با ظرفیت‌های یکسان و معین وجود دارد. وسایل حمل‌ونقل سطح

23. Covering Tour Problem (CTP)

24. Two-Echelon Location Routing Problem (2E-LRP)

25. Two-Echelon Relief Covering Tour Location Routing Problem (2E-RCTLRP)

23. Roulette Wheel



تصویر ۱. یک راه‌حل شدنی برای مسئله با مشخصات $|crs|=1$, $|RS|=6$, $|T|=3$, $|D|=8$



1.

$$(A_1 = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in RS \cup \{crs\}, i < j\})$$

امدادرسانی در سطح دوم باتوجه به امکانات آن سطح، صرفاً به نقاط آسیب‌دیده‌ای امکان‌پذیر است که در فاصله کمتری از یک شعاع معین نسبت به پایگاه امداد متناظر قرار داشته باشند (فرمول شماره ۲).

2.

$$(A_2 = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in RS \cup D, i < j\})$$

هدف از این مسئله، کمینه کردن هزینه‌های مربوطه، تعیین مکان‌های مناسب احداث پایگاه‌های امداد، تعیین و برنامه‌ریزی تورهای وسایل نقلیه در هر سطح است. به‌طوری که همه تقاضاها برآورده شوند. در این مقاله فرض شده است که پایگاه مرکزی امداد و پایگاه‌های امداد برپاشده می‌توانند کل مقدار تقاضا را برآورده کنند. یک راه‌حل شدنی شامل زیرمجموعه‌ای از پایگاه‌های امداد برپاشده و یک زیرمجموعه از مسیرهای سطح اول و دوم است. در ضمن محدودیت‌های زیر باید اعمال شوند:

هر نقطه حادثه‌دیده باید توسط تنها یک وسیله نقلیه سطح دوم خدمت‌رسانی شود و هر مرکز پایگاه امداد برپاشده باید تنها توسط یک وسیله نقلیه سطح اول تأمین شود. کل مقدار کالای تحویل‌شده توسط یک وسیله نقلیه نمی‌تواند از ظرفیت آن وسیله تجاوز کند. هر مسیر سطح دوم باید از یک پایگاه امداد برپاشده شروع شده و در همان پایگاه پایان یابد. کل مقدار کالای دریافت‌شده توسط یک پایگاه امداد باید به‌طور کامل به متقاضیان تحویل داده شود (ذخیره‌سازی مجاز نیست). تابع هدف که کل هزینه سیستم است و شامل هزینه استقرار پایگاه‌های امداد، هزینه‌های ثابت وسایل نقلیه استفاده‌شده و هزینه‌های مسیرهای سطح اول و سطح دوم، باید حداقل شود. برای بیان مدل‌سازی ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مسئله موردتحقیق، ابتدا نمادها و پارامترهای به‌کاررفته در مدل ریاضی تشریح می‌شوند. سپس با افزودن ملاحظات مربوط به محدودیت‌های پوشش به مسئله مسیریابی - مکان‌یابی ۲ سطحی ارائه‌شده توسط **نگوین و همکاران (۲۰۱۲ ب)** مسئله موردتحقیق مدل‌سازی می‌شود.

مجموعه‌های مسئله

V مجموعه کل رئوس برابر با $RS \cup D \cup \{crs\}$

RS مجموعه کل شهرها

D مجموعه روستاهای حادثه‌دیده

T مجموعه شهرهای حادثه‌دیده

A_1 مجموعه مسیرهای سطح اول

A_2 مجموعه مسیرهای سطح دوم

امدادرسانی، امدادرسانی در دو سطح و به‌صورت هم‌زمان به نقاط حادثه‌دیده، در نظر گرفتن شعاع پوششی متفاوت باتوجه به امکانات موجود در پایگاه‌ها، طراحی الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای حل این مسئله در اندازه‌های واقعی و تحلیل حساسیت آن.

تصویر شماره ۱ راه‌حلی شدنی را برای یک مثال (مثال ۴ جدول شماره ۷) از مسئله موردبررسی در این تحقیق نشان می‌دهد. این مثال شامل ۱۵ رأس است که از این ۱۵ رأس، یک پایگاه امداد مرکزی (crs)، ۶ شهر (RS) که از این شهرها، ۲ شهر باید در تور قرار گیرند و ۴ شهر دیگر می‌توانند در تور واقع شوند. همچنین ۸ نقطه حادثه‌دیده وجود دارد (D). همه نقاط حادثه‌دیده از طریق پایگاه‌های امداد برپاشده در شهرهای قرارگرفته در تور امدادرسانی شده‌اند. همچنین در این شکل نحوه امدادرسانی از پایگاه اصلی به پایگاه‌های برپاشده در تور سطح اول و سپس امدادرسانی از این پایگاه‌ها به نقاط حادثه‌دیده در سطح دوم به ترتیب و به‌طور هم‌زمان نمایش داده شده‌اند.

مسئله تور پوششی دو سطحی در شرایط امدادرسانی بر روی گراف کامل $G=(V,E)$ که در آن V برابر با $RS \cup D \cup \{crs\}$ مجموعه رئوس و E مجموعه یال‌هاست، تعریف می‌شود. RS مجموعه پایگاه‌های امدادرسان شهری است که به ۲ دسته تقسیم می‌شود: دسته اول شامل آن دسته از پایگاه‌ها است که لزوماً باید برپا شوند و دسته دوم شامل پایگاه‌هایی است که می‌توانند جهت امدادرسانی به نقاط حادثه‌دیده، برپا شوند. رأس crs که بیانگر پایگاه مرکزی امدادرسانی است، باید در تور قرار گیرد و بنابراین به مجموعه T تعلق دارد ($crs \in T$). مجموعه T شامل برخی از رئوس مجموعه RS و پایگاه مرکزی است. بنابراین داریم $T \subseteq RS \cup \{crs\}$. مجموعه D شامل نقاط حادثه‌دیده‌ای است که باید توسط پایگاه‌های امداد برپاشده امدادرسانی شوند.

توجه شود که هر نقطه حادثه‌دیده فقط می‌تواند توسط پایگاه‌هایی امدادرسانی شود که در فاصله پوششی آن قرار داشته باشند. این فاصله پوششی برای رئوس مجموعه RS باتوجه به میزان امکانات موجود در آن‌ها متفاوت است. در این مسئله مجموعه‌ای از متقاضیان دریافت امداد (نقاط حادثه‌دیده)، مجموعه‌ای از نقاط (شهرهای حادثه‌دیده) که باید در آن‌ها پایگاه امداد برپا شود و مجموعه‌ای از نقاط (شهرهای آسیب‌دیده) که می‌توان در آن‌ها پایگاه‌های امدادرسانی برپا کرد، وجود دارد. مقدار تقاضای نقاط آسیب‌دیده و ظرفیت پایگاه‌ها از ابتدا مشخص هستند. وسایل حمل‌ونقل کالا در هر سطح، مشابه و دارای ظرفیتی یکسان هستند. همچنین این مسئله شامل ۲ مجموعه از مسیرهای وسایل حمل‌ونقل نیز هست. مسیرهای سطح اول بر روی مجموعه RS تعریف می‌شوند به این صورت که در شهرهای مجموعه T حتماً باید پایگاه‌های امداد برپا شوند و در بقیه شهرها می‌توان پایگاه‌های امداد جهت خدمت‌رسانی به نقاط حادثه‌دیده برپا کرد (فرمول شماره ۱).



4.

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum_{s \in RS} O_s Z_s + \sum_{k \in K} \sum_{s \in RS} F x_{crs,s}^k + \\ & \sum_{k \in K} \sum_{s \in RS} F x_{s,crs}^k + \sum_{k \in K} \sum_{s \in RS} \sum_{j \in RS} F \\ & \sum_{i \in L} \sum_{s \in RS} \sum_{d \in D} G y_{sd}^i + \sum_{i \in L} \sum_{d \in D} \sum_{j \in D} G y_{ij}^i + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_1} c_{ij} x_{ij}^k + \sum_{i \in L} \sum_{(i,j) \in A_2} c_{ij} y_{ij}^i \end{aligned}$$

Subject to:

5.

$$\sum_{i \in RS \cup D} \sum_{i \in L} y_{di}^i = 1, \quad \forall d \in D$$

6.

$$\sum_{j \in RS \cup D} y_{ji}^i = \sum_{j \in RS \cup D} y_{ij}^i, \quad \forall i \in RS \cup D, i \in L$$

7.

$$\sum_{s \in RS} \sum_{d \in D} y_{sd}^i \leq 1, \quad \forall i \in L$$

8.

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in RS \cup D} d_i y_{ij}^i \leq R, \quad \forall i \in L$$

9.

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in D} y_{ij}^i \leq |\hat{D}| - 1, \quad \forall i \in L, \hat{D} \subseteq D, |\hat{D}| \geq 2$$

10.

$$\sum_{i \in D} y_{si}^i + \sum_{i \in RS \cup D} y_{ij}^i \leq 1 + u_{sj}, \quad \forall s \in RS, j \in D, i \in L$$

11.

$$\sum_{s \in RS} u_{sj} = 1, \quad \forall j \in D$$

12.

$$\sum_{i \in D} d_i u_{si} \leq A_s Z_s, \quad \forall s \in RS$$

13.

$$\sum_{i \in RS \cup \{crs\}} \sum_{k \in K} x_{si}^k = Z_s, \quad \forall s \in RS$$

14.

$$\sum_{j \in RS \cup \{crs\}} x_{ji}^k = \sum_{j \in RS \cup \{crs\}} x_{ij}^k, \quad \forall k \in K, i \in RS \cup \{crs\}$$

15.

$$\sum_{i \in RS} \sum_{j \in RS} x_{ij}^k \leq |\hat{RS}| - 1, \quad \forall k \in K, \hat{RS} \subseteq RS, |\hat{RS}| \geq 2$$

 K مجموعه وسایل نقلیه سطح اول L مجموعه وسایل نقلیه سطح دوم

3.

$$S_i = \{s \in RS | dis_{si} \leq r_s\}$$

فرمول شماره ۳ حاوی رئوسی از مجموعه RS است که می‌توانند برای پوشش رأس $i \in D$ در فاصله پوششی r_s استفاده شوند.

پارامترهای مسئله

 O_s هزینه برپا شدن پایگاه امداد s A_s ظرفیت پایگاه امداد s d_j مقدار تقاضای امدادی روستای j Q ظرفیت وسایل نقلیه سطح اول R ظرفیت وسایل نقلیه سطح دوم F هزینه ثابت استفاده از وسایل نقلیه سطح اول G هزینه ثابت استفاده از وسایل نقلیه سطح دوم r_s شعاع پوششی پایگاه امداد s dis_{sd} فاصله نقطه $s \in RS$ و $d \in D$ c_{ij} هزینه طی مسافت از گره i به گره j

متغیرهای مسئله

x_{ij}^k اگر وسیله نقلیه سطح اول k کمان (i, j) را پیموده باشد
۱ و در غیر این صورت صفر است.

y_{ij}^i اگر وسیله نقلیه سطح دوم i کمان (i, j) را پیموده باشد
۱ و در غیر این صورت صفر است.

Z_s اگر پایگاه امداد $s \in RS$ برپا شده باشد ۱ و در غیر این صورت صفر است.

u_{sd} اگر پایگاه امداد $s \in RS$ به نقطه حادثه‌دیده $d \in D$ خدمت‌رسانی کرده باشد ۱ و در غیر این صورت صفر است.

متغیر نامنفی b_s^k مقدار کالای تحویل داده‌شده به پایگاه امداد $s \in RS$ توسط وسیله نقلیه $k \in K$ را نشان می‌دهد.

باتوجه به موارد ذکر شده، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مسئله تور پوششی دو سطحی در شرایط امدادرسانی به صورت فرمول‌های شماره ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷ ارائه می‌شود:



وجود داشته باشد که پایگاه امداد S را ترک کرده و به نقطه حادثه‌دیده j رسیده باشد. همچنین u_{sj} می‌تواند مساوی ۱ باشد حتی اگر هیچ وسیله نقلیه‌ای از S به j نرفته باشد. محدودیت ۸ دبرای تخصیص هر نقطه حادثه‌دیده به ۱ پایگاه امداد به کار می‌رود. محدودیت ۹ بیان می‌دارد اگر پایگاه امداد S برپا نشده باشد آن‌گاه هیچ نقطه حادثه‌دیده، به آن تخصیص نمی‌یابد و در غیر این صورت اگر پایگاه امداد SS برپا شده باشد، آن‌گاه کل تقاضای تخصیص یافته به آن نمی‌تواند از ظرفیتش تجاوز کند.

محدودیت‌های ۱۰ تا ۱۷ مربوط به سطح اول هستند. محدودیت ۱۰ بیان می‌دارد که هر پایگاه امداد برپاشده باید توسط ۱ وسیله نقلیه سطح اول بازدید شود. محدودیت ۱۱ یک سفر پیوسته را برای هر وسیله نقلیه به کار گرفته‌شده در سطح اول تضمین می‌کند. محدودیت ۱۲ مربوط به حذف زیرتورها است. محدودیت ۱۳ مقدار جریان را در هر پایگاه امداد S نشان می‌دهد به این صورت که کل مقدار کالای آورده‌شده به پایگاه امداد S توسط وسایل نقلیه سطح اول باید با کل تقاضای تخصیص یافته به این پایگاه امداد برابر باشد (ذخیره‌سازی مجاز نیست). محدودیت ۱۴ مربوط به ظرفیت وسایل نقلیه سطح اول است. محدودیت ۱۵ بیان می‌دارد اگر وسیله نقلیه k پایگاه امداد S را بازدید نکرده باشد، مقدار کالای ارائه‌شده توسط وسیله نقلیه k به پایگاه امداد S باید صفر باشد. محدودیت ۱۶ تضمین می‌کند هر نقطه حادثه‌دیده فقط به ۱ پایگاه‌های امدادی که در فاصله پوششی آن قرار دارد تخصیص یابد. محدودیت ۱۷ تضمین می‌کند در نقاط مجموعه T حتماً باید پایگاه امداد برپا شود. محدودیت‌های ۱۸ تا ۲۳ متغیرهای تصمیم مسئله را تعریف می‌کنند.

روش حل مسئله

برای حل این مسئله از روش‌های دقیق و فراابتکاری در این مقاله استفاده شده است. این مسئله یک مسئله Np-hard می‌باشد، زیرا تعمیمی از مسائل شناخته‌شده Np-hard مانند مسئله مسیریابی - مکان‌یابی ۲ سطحی (2E-LRP) تعریف شده در مقاله (نگوین، پرینس و پرودون، ۲۰۱۲) و مسئله تور پوششی بیان شده در مقاله (ژاندر و همکاران، ۱۹۹۷) است. در ابتدا مسئله در ابعاد کوچک توسط نرم‌افزار بهینه‌سازی Gams به صورت دقیق حل می‌شود. از آنجایی که این مسئله در حوزه مسائل Np-hard قرار دارد و با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله، روش‌های دقیق قادر به حل آن‌ها در یک زمان منطقی و قابل قبول نیستند، برای ابعاد بزرگ‌تر مسئله از روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. به این صورت مسئله مذکور در نرم‌افزار متلب^{۲۶} کدنویسی شده و سپس حل شده است. با مقایسه جواب‌ها بعد از حل مسئله در ابعاد کوچک، با استفاده از هر دو روش دقیق و فراابتکاری مشاهده می‌شود جواب‌ها کاملاً یکسان هستند. بنابراین عملکرد الگوریتم

$$16. \quad \sum_{k \in K} b_s^k = \sum_{i \in D} d_i u_{si}, \quad \forall s \in RS$$

$$17. \quad \sum_{s \in RS} b_s^k \leq Q, \quad \forall k \in K$$

$$18. \quad b_s^k \leq Q \times \sum_{i \in RS \cup \{crs\}} x_{si}^k, \quad \forall s \in RS, k \in K$$

$$19. \quad \sum_{s \in S_i} u_{si} = 1, \quad \forall i \in D, S_i = \{s \in RS | d_{si} \leq r_s\}$$

$$20. \quad z_s = 1, \quad \forall s \in T$$

$$21. \quad x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in A_1, k \in K$$

$$22. \quad y_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in A_2, l \in L$$

$$23. \quad z_s \in \{0, 1\}, \quad \forall s \in RS$$

$$24. \quad z_s = 1, \quad \forall s \in T$$

$$25. \quad u_{si} \in \{0, 1\}, \quad \forall s \in RS, i \in D$$

$$26. \quad b_s^k \geq 0, \quad \forall s \in RS, k \in K$$

تابع هدف ۱ شامل هزینه‌های برپایی پایگاه‌های امداد، هزینه‌های ثابت استفاده از وسایل نقلیه سطح اول و دوم و هزینه‌های مسیریابی هر دو سطح است. محدودیت‌های ۲ تا ۹ مربوط به سطح دوم است. محدودیت ۲ تضمین می‌کند که تمام نقاط حادثه‌دیده بازدید شوند. محدودیت ۳ تضمین می‌کند یک وسیله نقلیه سطح دوم به پایگاه امداد اولیه‌اش برگردد. در محدودیت ۴، هر وسیله نقلیه سطح دومی حداکثر از یک پایگاه امداد حرکت می‌کند. محدودیت ۵ مربوط به ظرفیت وسایل نقلیه سطح دوم است. محدودیت ۶ مربوط به حذف زیرتورها است. محدودیت ۷ تضمین می‌کند پایگاه امداد S به نقطه حادثه‌دیده j خدمت‌رسانی می‌کند ($u_{sj} = 1$). اگر یک وسیله نقلیه $l \in L$



جدول ۲. یک راه‌حل ابتدایی و نشدنی برای مسئله

شهر	گره ۱	گره ۲	گره ۳	گره ۴	گره ۵
۱	۲	۸	۹	۱۰	۲
۲	۳	۱۱	۳		
۳	۴	۱۳	۱۴	۴	
۴	۵	۵			
۵	۶	۱۲	۱۵	۶	
۶	۷	۹	۱۰	۱۵	۷

جدول ۳. نحوه تشکیل یک راه‌حل شدنی برای مسئله

شهر	گره ۱	گره ۲	گره ۳	گره ۴	گره ۵
۱	۲	۸	۹	۱۰	۲
۲	۳	۱۱	۳		
۳	۴	۱۳	۱۴	۴	
۴	۵	۵			
۵	۶	۱۲	۱۵	۶	
۶	۷	۹	۱۰	۱۵	۷

شهر	گره ۱	گره ۲	گره ۳	گره ۴
۱	۲	۸	۲	
۲	۳	۱۱	۳	
۳	۴	۱۳	۱۴	۴
۴	۵	۵		
۵	۶	۱۲	۱۵	۶
۶	۷	۹	۱۰	۷

شهر	گره ۱	گره ۲	گره ۳	گره ۴
۱	۲	۸	۲	
۲	۳	۱۱	۳	
۳	۴	۱۳	۱۴	۴
۴	۶	۱۲	۱۵	۶
۵	۷	۹	۱۰	۷



جدول ۴. والد اول

شهر	گره ۱	گره ۲	گره ۳	گره ۴
۱	۶	۱۲	۶	
۲	۴	۱۳	۱۴	۴
۳	۲	۸	۹	۲
۴	۷	۱۰	۱۵	۷
۵	۳	۱۱	۳	

جدول ۵. والد دوم

شهر	گره ۱	گره ۲	گره ۳	گره ۴
۱	۲	۸	۲	
۲	۳	۱۱	۳	
۳	۴	۱۳	۱۴	۴
۴	۶	۱۲	۱۵	۶
۵	۷	۹	۱۰	۷

سطرهای این ماتریس برابر با تعداد شهرها و تعداد ستون‌های این ماتریس برابر با حداکثر تعداد روستاهای تخصیص داده شده به یک شهر است. بنابراین ماتریس Subtours به این صورت ساخته می‌شود: در ابتدا عنصر اول هر سطر از ماتریس برابر با شماره ۱ شهر قرار می‌گیرد و سپس روستاها باتوجه به شعاع پوشش شهرها به آن‌ها تخصیص می‌یابند:

27.

$$\forall i \in N_{RS}, j \in N_D; \text{If } dis(RS_i, D_j) \leq r_i \Rightarrow$$

$$Subtours(i, t) = D_j ; \quad t = 2, 3, \dots$$

سپس در انتهای هر سطر از ماتریس Subtours شهری که در ابتدای آن سطر قرار گرفته بود، قرار داده می‌شود. به عنوان مثال، ماتریس Subtours می‌تواند به صورت **جدول شماره ۲** باشد.

درواقع ماتریس Subtours شامل زیرتورهای مسئله است که از هر پایگاه امداد شروع شده و در همان پایگاه خاتمه می‌یابند. ماتریس Subtours باید دارای ۲ ویژگی باشد: اولاً تمامی روستاها در این ماتریس وجود داشته باشند و ثانیاً هر روستا فقط ۱ بار ظاهر شده باشد. شرط اول بیان می‌کند که تمامی روستاها توسط شهرها پوشش یافته‌اند و شرط دوم بیانگر آن است که هر روستا فقط به یک شهر تخصیص یافته باشد. در ماتریس مذکور شرط اول برقرار است، اما درمورد شرط دوم باید گفت روستاهای ۹ و

ژنتیک مورد تأیید و قابل استفاده برای مثال‌های در ابعاد بزرگ است.

الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای حل مسئله

نمایش جواب و تولید جواب شدنی

برای مسئله مورد بررسی در این تحقیق یک جواب شدنی، شامل مکان‌یابی پایگاه‌های امداد رسانی و مسیریابی وسایل حمل و نقل در دو سطح است. در سطح اول مسئله، پایگاه‌های امداد برپاشده در شهرها توسط پایگاه مرکزی امداد و به وسیله وسایل نقلیه مستقر در این پایگاه تأمین می‌شوند. در سطح دوم، روستاهای بحران زده تخصیص یافته به هر پایگاه امداد، توسط وسایل نقلیه مستقر در آن پایگاه‌ها امداد رسانی می‌شوند. برای توضیح بیشتر، روند الگوریتم ژنتیک برای مثال **جدول شماره ۷** تشریح می‌شود. این مثال شامل ۱۵ رأس است که از این ۱۵ رأس، ۱ رأس مربوط به پایگاه امداد مرکزی، ۶ رأس نشان دهنده شهرها ($|RS| = 6$) و ۸ رأس مربوط به نقاط حادثه دیده (روستاها) هستند ($|D| = 8$). از مجموع ۶ شهر، شهرهای ۲ و ۶ باید در تور قرار گیرند و ۴ شهر دیگر می‌توانند جهت امداد رسانی به روستاها در تور قرار گیرند. بنابراین باتوجه به اینکه پایگاه مرکزی امداد نیز در تور سطح اول قرار می‌گیرد، ۳ رأس باید در تور قرار گیرد ($|T| = 3$). ماتریس Subtours را در نظر بگیرید؛ تعداد



Newtour1=1-6-12-6-4-13-4-2-8-2-7-9-10-15-7-3-11-3-1

Newtour2=1-2-8-9-2-3-11-3-4-13-4-4-6-12-15-6-7-10-7-1

حال تورهای فرزند به وجود آمده قطعاً شذنی نیز هستند. برای تسریع در رسیدن به بهترین تور، می توان از عملگر ۲ نقطه ای یا چند نقطه ای نیز استفاده کرد. به این صورت که به جای انتخاب ۱ شهر، ۲ یا چند شهر به طور تصادفی انتخاب شوند و جای زیرتورهای مرتبط با آن ها در تورهای والد عوض شود.

عملگر جهش

بعد از اجرای عملگر تقاطع بر روی تورهای قدیم و به وجود آوردن تورهای جدید، استفاده از عملگر جهش بر روی تورهای جدید و به دست آوردن تورهای جهش یافته جهت رسیدن به بهترین تورها، لازم به نظر می آید. برای این کار، یک یا چند پایگاه امداد مستقر در تور جدید به تصادف انتخاب می شود و سپس ترتیب قرار گرفتن روستاها در آن زیرتور به طور تصادفی تغییر می یابد. به عنوان مثال فرض کنید برای Newtour1 عدددهای تصادفی تولید شده ۲ و ۴ باشند، تور جهش یافته (Mutatedtour) می تواند به صورت زیر باشد:

Newtour 1=1-2-8-9-2-3-11-3-4-13-14-4-6-12-15-6-7-10-7-1

Mutatedtour= 1-2-9-8-2-3-11-3-4-14-13-4-6-12-15-6-7-10-7-1

عملگر انتخاب

برای تولید نسل جدید از عملگر انتخاب استفاده می شود. نسل جدید در این مسئله شامل تعدادی از تورهای برتر نسل قبل، تورهای جدید تولید شده و تورهای جهش یافته است. این عمل با استفاده از عملگر چرخ رولت^{۲۷} صورت می پذیرد. درصد مربوط به هر قسمت باتوجه به طراحی آزمایش ها برای هر مثال به دست آمده است. مثلاً برای مثال ۴، ۶۰ درصد جمعیت نسل جدید از عملگر تقاطع، ۲۰ درصد از عملگر جهش و ۲۰ درصد بقیه نیز از جمعیت برتر نسل قبل به وجود آمده اند.

شبه کد الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این مقاله به صورت زیر است:

-پارامترهای اولیه الگوریتم را تعیین کنید.

-جمعیت اولیه از تورها را به صورت تصادفی تولید کنید.

-مقدار تابع هدف برای هر یک از تورها را محاسبه کنید.

۱۰ و ۱۵ به ۲ شهر تخصیص یافته اند، بنابراین برای شذنی بودن مسئله، به طور تصادفی در ماتریس مذکور روستاهای تکراری حذف می شوند تا زمانی که شرط دوم برقرار شود و هر روستا فقط به ۱ شهر تخصیص داده شده باشد. بنابراین ماتریس Subtours می تواند به صورت جدول شماره ۳ باشد.

در ادامه شهرهایی که جزو مجموعه T نیستند و روستایی نیز به آن ها تخصیص نیافته است حذف می شوند. به این ترتیب شهر ۵ نیز در تور قرار نمی گیرد و از ماتریس Subtours حذف می شود. در ادامه تور موردنظر با قرار دادن سطرهاى ماتریس Subtours پشت سر هم و افزودن پایگاه امداد مرکزی (عدد شماره ۱) در ابتدا و انتهای آن ساخته می شود. بنابراین یک راه حل شذنی اولیه برای این مثال به صورت زیر است:

Tour=1-2-8-2-3-11-3-4-13-14-4-6-12-15-6-7-9-10-7-1

عملگر تقاطع

از این عملگر برای جست و جوی محلی در فضای پاسخ استفاده می شود و دارای انواع مختلفی، مانند ۱ نقطه ای، ۲ نقطه ای، چند نقطه ای و غیره است. در این مقاله به منظور تولید ۲ مسیر جدید از ۲ مسیر اولیه از عملگر ۱ نقطه ای استفاده شده است. فرض کنید ۲ والد به صورت جدول شماره ۴ و ۵ داشته باشیم.

والد اول با Oldtour 1 و والد دوم با Oldtour 2 نام گذاری می شوند، بنابراین داریم:

Oldtour1= 1-6-12-6-4-13-14-4-2-8-9-2-7-10-15-7-3-11-3-1

Oldtour2=1-2-8-2-3-11-3-4-13-14-4-6-12-15-6-7-9-10-7-1

حال عددی از بین پایگاه های امداد مستقر در شهرها که در هر دو تور وجود داشته باشد به تصادف انتخاب می شود. این عدد همان نقطه تقاطع Crosspoint است. فرض کنید Crosspoint=2 انتخاب شده باشد. برای به وجود آوردن تورهای جدید (فرزندها) با استفاده از تورهای قدیم (والدها)، جای زیرتورهایی که با شهر شماره ۲ شروع می شود، در تورهای قدیم با هم عوض می شوند و تورهای جدید باتوجه به فاصله پوششی شهرها و اینکه همه روستاها باید در تور وجود داشته باشند و هر روستا نیز فقط ۱ بار در تور وجود داشته باشد، به وجود می آیند. بنابراین باتوجه به جابه جایی زیرتورها در تورهای جدید، در تور جدید اول، به علت تکراری بودن روستای ۹، این روستا حذف شده و در تور جدید دوم، باتوجه به فاصله پوششی شهر ۷ و اینکه روستای ۹ می تواند به این شهر تخصیص یابد، این روستا اضافه شده است. فرزند اول با Newtour1 و فرزند دوم با Newtour 2 نام گذاری می شوند:

جدول ۶. نتایج طرح آزمایش تاگوچی برای پارامترهای الگوریتم ژنتیک مثال ۱۰ از جدول ۷ در مسئله تور پوششی ۲ سطحی

میانگین	تکرار ۵	تکرار ۴	تکرار ۳	تکرار ۲	تکرار ۱	طرح آزمایش	شماره طرح
۳۹۲/۵۹۲۸	۳۹۳/۹۲۲۲	۳۹۵/۳۲۳۵	۳۸۲/۳۹۱۱	۳۹۴/۴۷۲۵	۳۹۶/۸۵۴۶	۱-۱-۱-۱	۱
۳۹۲/۹۰۸۱	۳۹۵/۳۱۳۲	۳۹۱/۴۰۵۶	۳۸۹/۰۶۲۱	۳۸۹/۸۷۶۵	۳۹۸/۸۸۳۳	۱-۲-۲-۲	۲
۳۸۶/۱۲۱۵	۳۹۳/۶۹۱۳	۳۷۵/۲۲۳۳	۳۸۳/۲۷۹۰	۳۹۱/۷۷۳۷	۳۸۶/۵۳۱۱	۱-۳-۳-۳	۳
۳۸۹/۵۸۷۲	۳۹۲/۰۴۷۶	۳۸۹/۲۵۲۸	۳۹۶/۲۶۸۹	۳۸۲/۱۳۶۸	۳۸۸/۲۲۹۹	۲-۱-۲-۳	۴
۳۹۰/۰۰۳۷	۳۸۸/۵۱۶۹	۳۹۴/۸۶۸۵	۳۸۹/۸۱۰۶	۳۹۷/۲۰۱۳	۳۷۹/۶۱۶۲	۲-۲-۳-۱	۵
۳۹۴/۸۶۴۳	۳۹۰/۷۱۳۲	۳۹۲/۰۸۶۲	۳۹۱/۵۹۷۳	۴۰۰/۰۱۷۸	۳۹۹/۹۰۶۹	۲-۳-۱-۲	۶
۳۸۹/۷۹۰۰	۴۰۱/۰۳۳۲	۳۸۲/۷۴۱۰	۳۹۵/۷۹۳۸	۳۷۹/۵۲۰۴	۳۸۹/۸۵۱۵	۳-۱-۳-۲	۷
۳۹۰/۱۹۲۴	۳۹۴/۱۷۲۶	۳۹۰/۹۲۴۸	۳۹۵/۱۵۸۶	۳۷۶/۶۴۷۹	۳۹۴/۰۵۸۲	۳-۲-۱-۳	۸
۳۹۶/۵۶۷۶	۴۰۳/۰۷۵۹	۳۸۷/۶۵۶۵	۳۹۹/۴۸۹۸	۳۹۰/۱۹۷۲	۴۰۲/۴۱۸۷	۳-۳-۲-۱	۹

پارامترها روی کیفیت جواب‌ها از طرح آزمایشی تاگوچی استفاده شده است. برای هریک از عوامل ۳ سطح در نظر گرفته شده است. نرخ تقاطع ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، نرخ جهش ۰/۱، ۰/۲، ۰/۱۵، جمعیت ۴۰، ۵۰، ۶۰ و برای حداکثر تکرارها ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ در نظر گرفته شده است. برای حل هریک از مسائل، تنظیم پارامترها انجام گرفته و در نهایت مسئله با الگوریتم تنظیم‌شده حل شده است. به‌عنوان نمونه در **جدول شماره ۶** برای مثال ۱۰ از **جدول شماره ۷**، طرح آزمایش تاگوچی دارای ۹ آزمایش بوده که توسط نرم‌افزار مینی‌تب به دست آمده است. در ستون آخر، جواب الگوریتم ژنتیک به‌صورت میانگین بعد از ۵ بار تکرار آورده شده است.

با در نظر گرفتن ستون میانگین در نرم‌افزار مینی تب و باتوجه به **تصویر شماره ۲**، طرح ۳-۳-۱ به‌عنوان بهترین طرح

برای $i=1$ تا تعداد نسل‌ها تکرار کنید.

- برنامه تورها (بعنوان والدین) را انتخاب کنید.

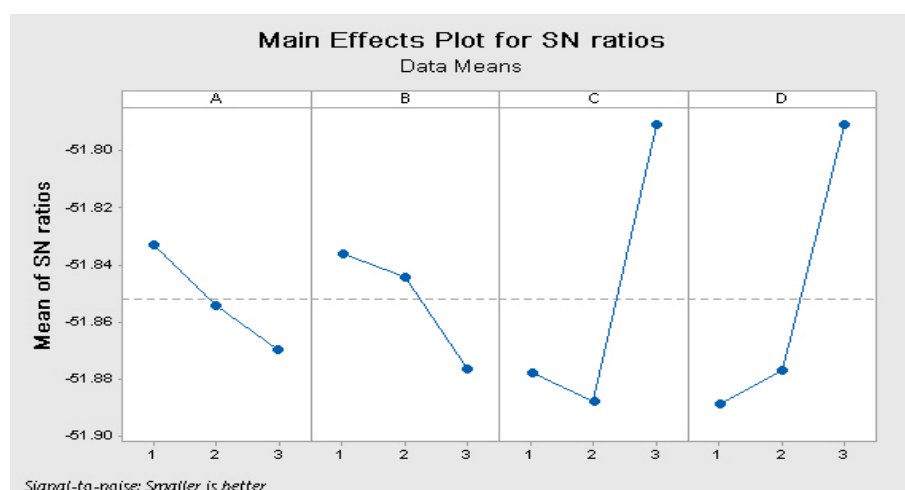
-تورهای جدید را براساس عملگرهای ادغام و جهش تولید کنید

-مقدار تابع هدف برای تورهای جدید را محاسبه کنید.

-اعضای نسل جدید را از داخل اعضای نسل قبل و تورهای جدید ایجادشده انتخاب کنید.

استفاده از طراحی آزمایش‌ها برای تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامترهای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای مسئله تور پوششی ۲ سطحی تعریف‌شده در این مقاله نرخ جهش، نرخ تقاطع، جمعیت و تعداد تکرارها هستند. برای تعیین اثر تغییر این



تصویر ۲. آنالیز مثال ۱۰ توسط نرم‌افزار مینی تب جهت انتخاب مناسب‌ترین پارامترها



جدول ۷. حل مثال‌های 2E-RCTLRP با استفاده از نرم‌افزار Gams و الگوریتم ژنتیک

مثال‌ها	مشخصات مسئله 2E-CTLRP	Gams			الگوریتم ژنتیک	
		تابع هدف	زمان (ثانیه)	بهترین مقدار	زمان (ثانیه)	
۱	$n=10, RS =3, T =1, D =6$	۱۲۳/۰۹۸	۱۳	۱۲۳/۰۹۸	۰/۰۴	
۲	$n=12, RS =4, T =1, D =7$	۱۲۸/۱۷۶	۱۰۷	۱۲۸/۱۷۶	۰/۱۱	
۳	$n=13, RS =5, T =2, D =7$	۱۲۹/۵۲۰	۲۵	۱۲۹/۵۲۰	۰/۳	
۴	$n=15, RS =6, T =3, D =8$	۱۵۳/۴۳۶	۱۵	۱۵۳/۴۳۶	۰/۴	
۵	$n=16, RS =7, T =4, D =8$	۱۵۶/۱۵۶	۱۱۳	۱۵۶/۱۵۶	۰/۴	
۶	$n=20, RS =7, T =4, D =12$	—	>۱۰۰۰	۱۸۹/۱۷۶	۰/۶۵	
۷	$n=25, RS =8, T =4, D =16$	—	>۱۰۰۰	۲۱۳/۴۳۰	۲/۹	
۸	$n=35, RS =8, T =4, D =26$	—	>۱۰۰۰	۲۷۵/۲۲۸	۴/۷	
۹	$n=45, RS =9, T =4, D =35$	—	>۱۰۰۰	۳۴۱/۳۵۸	۶/۵	
۱۰	$n=55, RS =10, T =5, D =44$	—	>۱۰۰۰	۳۸۳/۹۲۰	۱۱/۲۵	
۱۱	$n=60, RS =11, T =5, D =48$	—	>۱۰۰۰	۴۲۱/۱۶۸	۱۶/۹۵	
۱۲	$n=70, RS =14, T =5, D =55$	—	>۱۰۰۰	۴۸۶/۶۵۹	۲۹/۴۴	
۱۳	$n=80, RS =17, T =5, D =62$	—	>۱۰۰۰	۵۶۲/۲۰۲	۳۹/۴۴	
۱۴	$n=90, RS =19, T =5, D =70$	—	>۱۰۰۰	۶۱۱/۸۰۶	۷۸/۵۵	
۱۵	$n=100, RS =22, T =5, D =77$	—	>۱۰۰۰	۶۶۱/۰۴۵	۱۱۴/۸۹	

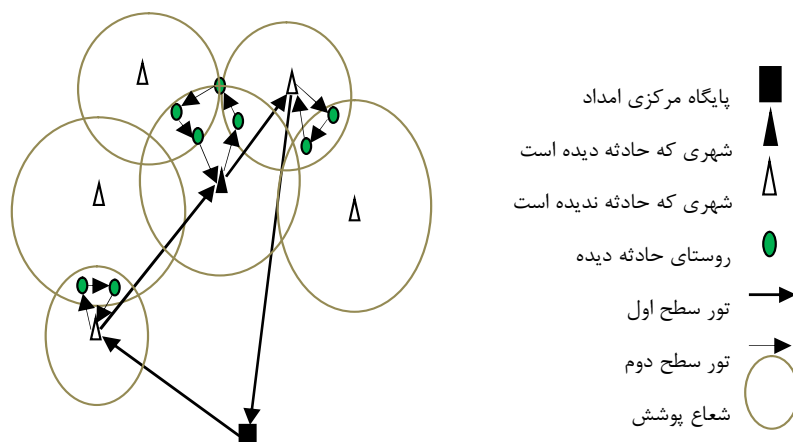
گرفته، مثال‌ها حل شده و جوابها به همراه زمان حل آن‌ها آورده شده‌اند. با مقایسه جواب‌های به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود نتایج حل مسائل با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار Gams کاملاً یکسان است و کد نوشته‌شده برای مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک کارایی لازم را برای حل مثال‌های با ابعاد بزرگ‌تر دارد. از آنجایی که با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل آن‌ها در نرم‌افزار Gams به‌شدت افزایش می‌یابد در ادامه برای حل این مسائل از الگوریتم ژنتیک و کدنویسی در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. انجام تمامی محاسبات در کامپیوتری با مشخصات CPU: Intel RAM: 4GB و Core i5-4200U, 1.6GHz انجام گرفته است. نتایج در **جدول شماره ۷** قابل مشاهده هستند.

در اینجا برای درک بهتر مثال‌ها به تشریح مثال ۴ از **جدول شماره ۷** پرداخته می‌شود. این مثال شامل ۱۵ رأس است که از این ۱۵ رأس، یک رأس مربوط به پایگاه امداد مرکزی، ۶ رأس نشان‌دهنده شهرها ($|RS|=6$) با شعاع‌های پوشش متفاوت و ۸ رأس مربوط به نقاط حادثه‌دیده (روستاهای) هستند. از مجموع ۶ شهر، ۲ شهر باید در تور قرار گیرند و ۴ شهر دیگر می‌توانند جهت امداد رسانی به روستاهای در تور قرار گیرند. بنابراین باتوجه به اینکه پایگاه مرکزی امداد نیز در تور سطح اول قرار می‌گیرد

معرفی می‌شود. یعنی برای مثال ۱۰ نرخ تقاطع ۰/۸، نرخ جهش ۰/۲، تعداد جمعیت ۵۰ و حداکثر تعداد تکرارها برابر ۴۰۰ در نظر گرفته شده است. با وارد کردن اعداد بالا در الگوریتم ژنتیک مذکور و بعد از ۱۰ بار اجرا توسط نرم‌افزار متلب، جواب به‌صورت میانگین برابر ۳۸۳/۹۲۰ شده است. برای تمامی مثال‌ها آزمایش تاگوچی انجام گرفته و مثال‌ها با پارامترهای تنظیم‌شده حل شده‌اند.

مثال‌های عددی

در این بخش ۱۵ مثال در اندازه‌های مختلف برای مسئله تور پوششی ۲ سطحی در شرایط امداد رسانی بررسی و حل شده است. در این مثال‌ها تعداد رؤس از ۱۰ تا ۱۰۰ رأس در نظر گرفته شده است. مجموعه S بیانگر مجموعه شهرها، مجموعه T شامل پایگاه مرکزی به علاوه شهرهایی که باید در تور قرار گیرند و مجموعه W شامل روستاهای حادثه‌دیده است که باید امداد رسانی شوند. در ابتدا برای ۵ مثال اول کدنویسی در نرم‌افزار Gams انجام گرفته و جواب‌ها به‌صورت دقیق به همراه زمان حل آن‌ها آورده شده‌اند. در ادامه با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای ۵ مثال ابتدایی، کدنویسی در نرم‌افزار متلب انجام



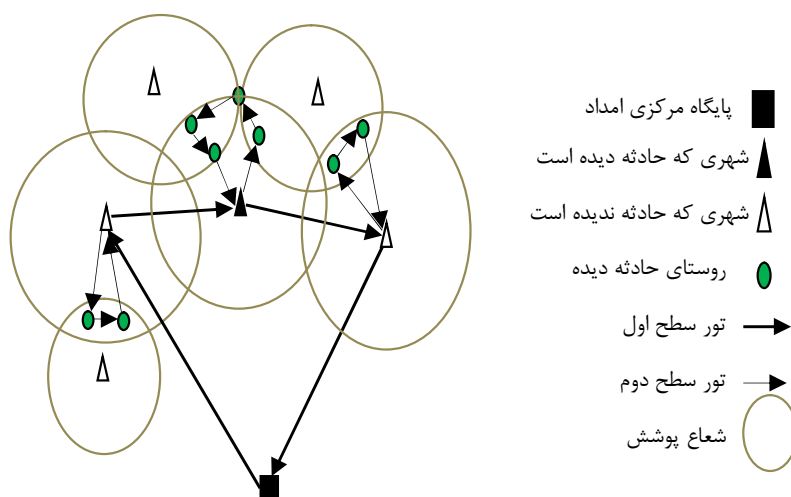
تصویر ۳. زمانی که تورهای سطح اول و دوم همزمان تشکیل می‌شوند

ساده هستند تشکیل داد. در این قسمت با ارائه مثالی نشان داده می‌شود این دیدگاه صحیح نیست و با حل همزمان و غیرهمزمان، جواب‌های مختلفی به دست می‌آید. این مثال از ۱۵ رأس تشکیل شده است که ۶ رأس آن شهرها و ۸ رأس دیگر نقاط حادثه‌دیده و یک رأس مربوط به پایگاه مرکزی امداد هستند. کل مسافت پیموده‌شده در حالت همزمانی تورها برابر با ۷۱/۴۵۸۲ واحد و در حالت غیرهمزمان برابر با ۷۳/۶۷۰۴ واحد است. جواب مثال در هر دو حالت در قالب تصاویر شماره ۳ و ۴ آورده شده است.

تحلیل حساسیت مسئله

در این قسمت تحلیل حساسیت مسئله از چند جنبه بررسی می‌شود. هدف از انجام تحلیل حساسیت در این پژوهش، بررسی میزان تأثیر تغییر در پارامترهای کلیدی مدل بر نتایج نهایی و

بنابراین ۳ رأس باید در تور قرار گیرند ($|T| = 3$). بعد از حل مثال مشخص شد برای امدادسانی به همه روستاهای حادثه‌دیده لازم است ۴ شهر در تور سطح اول قرار گیرند و در آن شهرها پایگاه‌های امدادسانی برپا شود. سپس امدادسانی از ۴ پایگاه امداد برپاشده به روستاهای حادثه‌دیده توسط تورهای سطح دوم انجام گیرد. مقدار هزینه امدادسانی در این مثال در حالت بهینه برابر با ۱۵۳/۴۳۶ واحد شده است. توجه شود که مثال‌های ارائه‌شده برای این مسئله با در نظر گرفتن این اصل که دو سطح به‌صورت همزمان تشکیل می‌شوند، حل شده‌اند. شاید این‌گونه به نظر برسد که در ابتدا می‌توان مسئله را به‌صورت یک مسئله تور پوششی ساده حل کرد و سپس بعد از به دست آوردن تور سطح اول و تخصیص نقاط حادثه‌دیده به پایگاه‌های امداد مستقر در تور سطح اول، تورهای سطح دوم را که هر کدام یک مسئله TSP



تصویر ۴. زمانی که تورهای سطح اول و دوم همزمان تشکیل نمی‌شوند



جدول ۸. تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت وسایل حمل و نقل سطح اول

مرحله	مشخصات مسئله	تعداد پایگاه‌های امداد برپاشده	تعداد وسایل نقلیه		هزینه کل امداد رسانی
			سطح اول	سطح دوم	
۱	$n=16, F=20, G=10, Q=15, R=5$	۶	۳	۸	۵۰۵/۶۲۸
۲	$n=16, F=21, G=10, Q=20, R=5$	۴	۲	۸	۴۱۷/۲۰۹
۳	$n=16, F=22, G=10, Q=25, R=5$	۴	۲	۸	۴۱۲/۰۸۸
۴	$n=16, F=23, G=10, Q=30, R=5$	۴	۲	۸	۴۱۸/۰۸۸
۵	$n=16, F=24, G=10, Q=35, R=5$	۴	۲	۸	۴۲۴/۰۸۸
۶	$n=16, F=25, G=10, Q=40, R=5$	۴	۱	۸	۳۸۲/۲۳۷
۷	$n=16, F=26, G=10, Q=45, R=5$	۴	۱	۸	۳۸۷/۲۳۷
۸	$n=16, F=27, G=10, Q=50, R=5$	۴	۱	۸	۳۹۲/۲۳۷
۹	$n=16, F=28, G=10, Q=55, R=5$	۴	۱	۸	۳۹۷/۲۳۷
۱۰	$n=16, F=29, G=10, Q=60, R=5$	۴	۱	۸	۴۰۲/۲۳۷

در این قسمت تحلیل حساسیت بر روی مثال ۵ جدول شماره ۷ انجام می‌شود. در هر مرحله از وسایل نقلیه بزرگ‌تر و با ظرفیت بیشتر و بالطبع دارای هزینه به کارگیری بیشتر استفاده می‌شود. از آنجایی که شکست تقاضا در هر دو سطح مجاز نیست باید وسایل نقلیه سطح اول به گونه‌ای انتخاب شوند که ظرفیت آن‌ها بزرگ‌تر یا مساوی با حداکثر مقدار تقاضای امدادی تخصیص یافته به پایگاه‌های امداد و کوچک‌تر یا مساوی با حداقل ظرفیت پایگاه‌های امداد باشند. همچنین ظرفیت هر وسیله نقلیه سطح دوم باید بزرگ‌تر یا مساوی با حداکثر مقدار تقاضای امدادی نقاط حادثه‌دیده باشد. برای این مثال حداکثر تقاضای نقاط حادثه‌دیده برابر ۵ واحد و حداکثر تقاضای تخصیص یافته به پایگاه‌های امداد برابر ۱۵ واحد است. بنابراین برای سطح اول باید از وسایل

ساختار تصمیم‌گیری است. در شرایط بحرانی، تصمیم‌گیرندگان ممکن است با عدم قطعیت در برخی پارامترها، مانند ظرفیت وسایل حمل و نقل یا شعاع پوشش پایگاه‌ها مواجه باشند. در این پژوهش، ۲ پارامتر حیاتی تحت تحلیل حساسیت قرار گرفتند: تحلیل حساسیت نسبت به ظرفیت وسایل حمل و نقل و تحلیل حساسیت نسبت به شعاع پوششی پایگاه‌های امداد. برای بررسی تأثیر ظرفیت حمل تیم‌های امداد، سناریوهایی با افزایش و کاهش درصدی ظرفیت وسایل نقلیه در مدل اجرا شد. با تغییر شعاع پوششی پایگاه‌ها، تغییرات در پوشش دهی، تعداد پایگاه‌های موردنیاز و الگوی مسیریابی بررسی شد.

تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت وسایل حمل و نقل

جدول ۹. تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت وسایل حمل و نقل سطح دوم

مرحله	مشخصات مسئله	تعداد پایگاه‌های امداد برپاشده	تعداد وسایل نقلیه		هزینه کل امداد رسانی
			سطح اول	سطح دوم	
۱	$n=16, F=25, G=10, Q=40, R=5$	۴	۱	۸	۳۸۲/۲۳۷
۲	$n=16, F=25, G=11, Q=40, R=10$	۴	۱	۵	۳۶۴/۱۵۶
۳	$n=16, F=25, G=12, Q=40, R=15$	۴	۱	۴	۳۶۳/۱۵۶
۴	$n=16, F=25, G=13, Q=40, R=20$	۴	۱	۴	۳۷۵/۱۵۶
۵	$n=16, F=25, G=14, Q=40, R=25$	۴	۱	۴	۳۸۷/۱۵۶
۶	$n=16, F=25, G=15, Q=40, R=30$	۴	۱	۴	۳۹۹/۱۵۶
۷	$n=16, F=25, G=16, Q=40, R=35$	۴	۱	۴	۴۱۱/۱۵۶

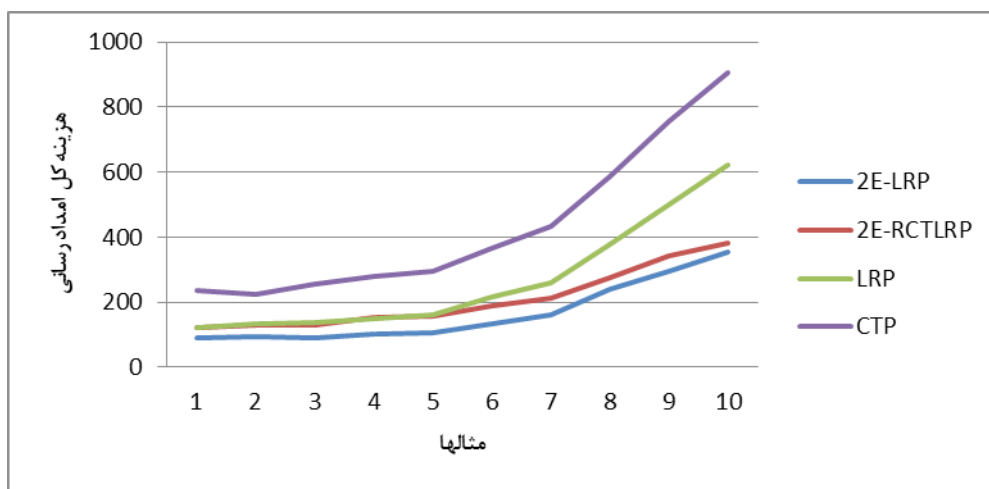


جدول ۱۰. تحلیل حساسیت مسئله از نظر شعاع پوششی پایگاه‌های امداد و مقایسه آن با مسئله 2E-LRP متناظر

2E-LRP	مشخصات مسئله 2E-RCTLRP							مرحله
جواب	جواب	شعاع پوششی پایگاه‌ها						
		ششم	پنجم	چهارم	سوم	دوم	اول	
۱۰۳/۷۹۸	۲۲۷/۳۷۸	۳	۴	۱	۳/۵	۲	۳/۵	۱
۱۰۳/۷۹۸	۱۹۹/۴۳۶	۴	۴	۳	۳/۵	۳	۴	۲
۱۰۳/۷۹۸	۱۹۵/۲۵۸	۴	۴	۳	۲/۵	۴	۴	۳
۱۰۳/۷۹۸	۱۷۵/۷۸۷	۴	۴	۳	۶/۵	۴	۴	۴
۱۰۳/۷۹۸	۱۶۷/۳۳۷	۴	۴	۳	۶/۵	۶	۴	۵
۱۰۳/۷۹۸	۱۵۹/۸۴۹	۴	۱۰	۳	۶/۵	۶	۴	۶
۱۰۳/۷۹۸	۱۵۲/۳۰۳	۴	۱۰	۳	۶/۵	۶	۸	۷
۱۰۳/۷۹۸	۱۳۷/۲۸۵	۴	۱۰	۱۱	۶/۵	۶	۸	۸
۱۰۳/۷۹۸	۱۲۸/۵۶۰	۴	Max	۱۱	۶/۵	۶	۸	۹
۱۰۳/۷۹۸	۱۲۸/۵۶۰	۴	Max	۱۱	۶/۵	۶	Max	۱۰
۱۰۳/۷۹۸	۱۰۹/۰۶۷	۴	Max	۱۱	Max	۶	Max	۱۱
۱۰۳/۷۹۸	۱۰۹/۰۶۷	Max	Max	۱۱	Max	۶	Max	۱۲
۱۰۳/۷۹۸	۱۰۷/۶۸۶	Max	Max	۱۱	Max	Max	Max	۱۳
۱۰۳/۷۹۸	۱۰۳/۷۹۸	Max	Max	Max	Max	Max	Max	۱۴

جدول ۱۱. نتایج حل مسائل LRP، 2E-LRP، 2E-RCTLRP و CTP در حالت امداد رسانی

مثال	مشخصات مسئله	2E-LRP	2E-RCTLRP	LRP	CTP
۱	$n=10, RS =3, T =1, D =6$	۹۱/۰۳۱	۱۲۳/۰۹۸	۱۲۲/۹۰۷	۲۳۷/۷۸۵۸
۲	$n=12, RS =4, T =1, D =7$	۹۳/۶۸۸	۱۲۸/۱۷۶	۱۳۴/۵۶۴	۲۲۳/۲۳۴۱
۳	$n=13, RS =5, T =2, D =7$	۹۲/۲۳۲	۱۲۹/۵۲۰	۱۳۸/۰۲۹	۲۵۷/۷۹۶۴
۴	$n=15, RS =6, T =3, D =8$	۱۰۳/۷۹۸	۱۵۴/۴۳۶	۱۴۹/۲۸۴	۲۸۰/۳۱۶۸
۵	$n=16, RS =7, T =4, D =8$	۱۰۵/۴۹۵۴	۱۵۶/۱۵۶	۱۶۲/۹۱۰	۲۹۵/۲۳۶۹
۶	$n=20, RS =7, T =4, D =12$	۱۳۳/۹۱۲۴	۱۸۹/۱۷۶	۲۱۶/۲۷۸	۳۶۵/۸۹۷۶
۷	$n=25, RS =8, T =4, D =16$	۱۵۹/۹۰۸۹	۲۱۳/۴۳۰	۲۶۰/۲۴۷	۴۳۳/۱۶۶۴
۸	$n=35, RS =8, T =4, D =26$	۲۳۸/۷۶۵۳	۲۷۵/۲۲۸	۳۷۷/۲۴۵	۵۸۸/۳۲۱۹
۹	$n=45, RS =9, T =4, D =35$	۲۹۷/۰۱۷۲	۳۴۱/۳۵۸	۳۹۹/۸۱۸	۷۵۶/۰۱۸۳
۱۰	$n=55, RS =10, T =5, D =44$	۳۵۵/۳۴۶۰	۳۸۳/۹۲۰	۶۲۰/۴۳۹	۹۰۵/۴۷۷۹



تصویر ۵. هزینه مربوط به مثال‌های حل‌شده برای مسائل LRP، 2E-LRP، 2E-RCTLRP و CTP

حساسیت در جدول شماره ۱۰ آمده است. با مشاهده این جدول می‌توان نتیجه گرفت با افزایش شعاع پوشش پایگاه‌های امداد، مسئله 2E-RCTLRP با مسئله 2E-LRP همگرا می‌شود.

مقایسه حل مسئله 2E-RCTLRP با LRP، 2E-LRP و CTP متناظر

در این قسمت جواب مثال‌های از نوع 2E-RCTLRP با مثال‌های متناظر از نوع LRP، 2E-LRP و CTP مقایسه شده است. در همه مثال‌ها ظرفیت وسایل نقلیه، هزینه ثابت استفاده از وسایل نقلیه و هزینه برپایی پایگاه‌های امداد یکسان در نظر گرفته شده است. در مسئله LRP یک سطحی تعریف شده و امداد رسانی از پایگاه مرکزی امداد به نقاط حادثه‌دیده با استفاده از وسایل نقلیه موجود در پایگاه مرکزی امداد صورت گرفته است. در مسئله CTP، ۱ سطحی تعریف‌شده، پایگاه‌های امداد توسط پایگاه مرکزی امداد تجهیز می‌شوند و سپس افراد حادثه‌دیده جهت دریافت خدمات امداد به پایگاه‌های برپاشده مراجعه می‌کنند. بنابراین چون افراد مستقیماً امداد رسانی نمی‌شوند هزینه‌ای به مدل اضافه شده است. از آنجایی که برای مسئله 2E-RCTLRP محدودیت پوشش برای پایگاه‌های امداد در نظر گرفته شده است، هزینه این مثال‌ها از مثال‌های مربوط به 2E-LRP بیشتر شده است که این اختلاف به معنای برتری 2E-LRP نسبت به 2E-RCTLRP نیست. نتایج حل مثال‌ها در جدول شماره ۱۱ و تصویر شماره ۵ زیر آورده شده است. همان‌گونه که پیداست روش‌های ۲ سطحی به مراتب نتایج بهتری نسبت به روش‌های تک‌سطحی ارائه می‌دهند.

نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته به نظر می‌رسد، پژوهش حاضر نوآوری‌های قابل توجهی را در دو بُعد اصلی ارائه می‌دهد:

نقلیه‌ای با حداقل ظرفیت ۱۵ و برای سطح دوم از وسایل نقلیه‌ای با حداقل ظرفیت ۵ استفاده کرد. Q ظرفیت وسایل نقلیه سطح اول، R ظرفیت وسایل نقلیه سطح دوم، F هزینه ثابت استفاده از وسایل نقلیه سطح اول و G هزینه ثابت استفاده از وسایل نقلیه سطح دوم است. در ابتدا تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت وسایل حمل‌ونقل سطح اول و سپس برای سطح دوم انجام گرفته است. همان‌گونه که در جدول شماره ۸ و ۹ مشاهده می‌شود استفاده از وسایل نقلیه با ظرفیت بیشتر باعث کاهش تعداد وسایل استفاده‌شده و در نهایت کاهش هزینه امداد رسانی به نقاط آسیب‌دیده شده است. اما باید دقت شود که لزوماً استفاده از وسایل نقلیه با ظرفیت زیاد همواره باعث کاهش هزینه‌ها نمی‌شود. به‌عنوان مثال بزرگ‌ترین وسیله نقلیه‌ای که می‌تواند برای سطح اول به کار گرفته شود وسیله نقلیه‌ای با حداکثر ظرفیت برابر با کل مقدار تقاضای امدادی نقاط حادثه‌دیده است. برای این مثال بهترین وسایل حمل‌ونقل سطح اول در مرحله ۶ جدول شماره ۸ و برای سطح دوم در مرحله ۳ جدول شماره ۹ به دست آمده است. نتایج در جدول شماره ۸ آورده شده‌اند.

تحلیل حساسیت مسئله از نظر شعاع پوششی پایگاه‌های امداد

تحلیل حساسیت مسئله 2E-RCTLRP از نظر شعاع پوششی پایگاه‌های امداد برای مثال ۴ جدول شماره ۷ انجام می‌شود. بدین منظور شعاع پوشش پایگاه‌ها در هر مرحله به صورت تصادفی افزایش داده می‌شود تا اینکه در نهایت شعاع پوشش حداکثر شود. شعاع پوشش حداکثر برای یک پایگاه امداد برابر با بیشترین فاصله نقاط حادثه‌دیده از آن پایگاه است. شعاع پوششی مرحله اول برابر با حداقل شعاعی است که همه نقاط حادثه‌دیده توسط پایگاه‌های امداد پوشش یابند. تمامی مشخصات پایگاه‌های امداد و وسایل نقلیه استفاده‌شده در تمامی مراحل تحلیل حساسیت و مسئله 2E-LRP یکسان در نظر گرفته شده‌اند. نتایج این تحلیل



افزون بر این، انعطاف‌پذیری بالای الگوریتم ژنتیک در انطباق با انواع مختلف توابع هدف و قیود، آن را به ابزاری قدرتمند در شرایط متغیر و پویای مسئله، به‌ویژه در حوزه امدادسانی، تبدیل کرده است. با این حال استفاده از الگوریتم ژنتیک با برخی محدودیت‌ها نیز همراه است. از جمله، این الگوریتم تضمینی برای دستیابی به جواب بهینه مطلق ندارد و معمولاً تنها راه‌حل‌های تقریباً بهینه را ارائه می‌دهد که در برخی کاربردها ممکن است ناکافی باشد. همچنین عملکرد الگوریتم به شدت وابسته به تنظیم مناسب پارامترهایی، مانند اندازه جمعیت، نرخ تقاطع و نرخ جهش است و انتخاب نادرست این پارامترها می‌تواند منجر به هم‌گرایی زود هنگام یا کاهش کیفیت پاسخ شود. از سوی دیگر، به‌ویژه در مسائل بزرگ، الگوریتم ژنتیک ممکن است برای دستیابی به پاسخ‌های قابل قبول، به زمان محاسباتی قابل توجهی نیاز داشته باشد که این امر در مقایسه با برخی روش‌های فراابتکاری دیگر، می‌تواند به‌عنوان یک نقطه ضعف تلقی شود.

در نظر گرفتن شعاع پوشش متغیر برای هر پایگاه امداد، استفاده از وسایل حمل‌ونقل متفاوت در هر سطح و همچنین بررسی مسئله در حالت پوشش حداکثر به‌منظور کاهش زمان امدادسانی می‌تواند به‌عنوان موضوع مطالعات آتی در این حوزه پیشنهاد شوند. همچنین استفاده از داده‌های واقعی در مدل‌سازی یا مقایسه الگوریتم ژنتیک با سایر روش‌های بهینه‌سازی می‌تواند به‌عنوان زمینه‌ای برای تحقیقات آتی مطرح شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در این مطالعه تمام اصول اخلاقی رعایت شد. از آنجایی که هیچ آزمایشی بر روی نمونه‌های انسانی یا حیوانی انجام نشد، نیازی به رعایت اصول اخلاقی نبود.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک مالی از سازمانی‌های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت‌نویسندگان

همه نویسندگان به‌طور یکسان در مفهوم و طراحی مطالعه، جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها، تفسیر نتایج و تهیه پیش‌نویس مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

نخست، «در این تحقیق، برای نخستین بار مدلی دوسطحی از مسئله مکان‌یابی-مسیریابی ارائه شده است که هم‌زمانی تشکیل تورها در هر دو سطح را در قالب تورهای پوششی با شعاع متغیر پوشش پایگاه‌های امداد در نظر می‌گیرد. این مدل، برخلاف بسیاری از پژوهش‌های پیشین که با فرض شعاع ثابت پوشش، ساختار تک‌سطحی و بی‌توجهی به هم‌زمانی تورها همراه بوده‌اند، به واقعیت‌های پیچیده شرایط بحران و امدادسانی نزدیک‌تر است.» دوم، مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن تفاوت در ظرفیت و میزان آسیب‌دیدگی شهرها، امکان تصمیم‌گیری هوشمندانه‌تر در مکان‌یابی پایگاه‌ها را فراهم می‌آورد. در حالی که در اغلب مطالعات گذشته این متغیرها یا لحاظ نشده‌اند یا به شکل ساده‌شده مدل‌سازی شده‌اند. حال آنکه طراحی یک شبکه امدادسانی دو سطحی می‌تواند سرعت و کیفیت امدادسانی در شرایط بحران را افزایش دهد. در این تحقیق در ابتدا مسئله امدادسانی تور پوششی دو سطحی تعریف، مدل‌سازی و سپس حل شد. نتایج حاصل از حل مسئله نشان می‌دهد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، الگوریتمی کارا و کاربردی است. در حل تمام مثال‌ها، تورهای هر دو سطح به‌طور هم‌زمان تشکیل شده‌اند. با ارائه مثالی نشان داده شده است که نتایج حل حاصل از تشکیل تورهای دو سطح به‌صورت هم‌زمان و غیرهم‌زمان متفاوت است و حل مسئله با در نظر گرفتن تشکیل هم‌زمانی تورها در هر دو سطح دارای نتایج بهتری است. در ادامه به تحلیل حساسیت مسئله از نظر ظرفیت وسایل حمل‌ونقل پرداخته و نتیجه‌گیری شد افزایش ظرفیت وسایل حمل‌ونقل معمولاً باعث کاهش هزینه امدادسانی می‌شود، اما باید دقت شود لزوماً استفاده از وسایل نقلیه با ظرفیت بیشتر همواره باعث کاهش هزینه‌ها نمی‌شود و باید وسیله حمل‌ونقل با ظرفیت بهینه استفاده شود. همچنین با افزایش شعاع پوششی پایگاه‌های امداد، مسئله موردتحقیق با مسئله 2E-LRP همگرا می‌شود و نهایتاً مقایسه‌ای بین مسائل ۱ سطحی و ۲ سطحی در شرایط امداد انجام گرفت و نتیجه‌گیری شد روش‌های دو سطحی به مراتب نتایج بهتری نسبت به روش‌های تک‌سطحی ارائه می‌دهند.

الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک روش فراابتکاری، در حل مسائل پیچیده و با ابعاد بزرگ، مانند مسئله تور پوششی ۲ سطحی در شرایط امدادسانی، دارای مزایای قابل توجهی است. یکی از مهم‌ترین نقاط قوت این الگوریتم، توانایی آن در جست‌وجوی گسترده و متنوع در فضای پاسخ است، به‌گونه‌ای که با بهره‌گیری از یک جمعیت از راه‌حل‌ها، امکان اکتشاف هم‌زمان در نواحی مختلف فضای جست‌وجو فراهم می‌شود. این ویژگی باعث افزایش احتمال یافتن پاسخ‌های بهتر و کاهش خطر گیر افتادن در بهینه‌های محلی می‌شود. همچنین الگوریتم ژنتیک به دلیل ساختار جمعیتی و مبتنی بر تکامل خود، برای مسائل بزرگ‌مقیاس که در آن‌ها روش‌های دقیق از نظر زمانی یا محاسباتی ناکارآمد هستند، گزینه‌ای مناسب محسوب می‌شود.

References

- Allahyari, S., Salari, M., & Vigo, D. (2015). A hybrid metaheuristic algorithm for the multi-depot covering tour vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 242(3), 756-768. [DOI:10.1016/j.ejor.2014.10.048]
- Altay, N., & Green III, W. G. (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175(1), 475-493. [DOI:10.1016/j.ejor.2005.05.016]
- Arkin, E. M., & Hassin, R. (1994). Approximation algorithms for the geometric covering salesman problem. *Discrete Applied Mathematics*, 55(3), 197-218. [DOI:10.1016/0166-218X(94)90008-6]
- Belenguer, J., Benavent, E., Prins, C., Prodhon, C., & Woler Calvo, R. (2011). A branch-and-cut method for the capacitated location-routing problem. *Computers and Operations Research*, 38(6), 931-941. [DOI:10.1016/j.cor.2010.09.019]
- Boccia, M., Crainic, T. G., Sforza, A., & Sterle, C. (2010). A metaheuristic for a two echelon location-routing problem. In P. Festa (Ed.), *Experimental Algorithms. SEA 2010. Lecture Notes in Computer Science*, vol 6049. Berlin: Springer. [DOI:10.1007/978-3-642-13193-6_25]
- Bottani, E., Casella, G., & Murino, T. (2021). A hybrid metaheuristic routing algorithm for low-level picker-to-part systems. *Computers & Industrial Engineering*, 160, 107540. [DOI:10.1016/j.cie.2021.107540]
- Cai, Z., Mo, D., Geng, M., Tang, W., & Chen, X. M. (2023). Integrating ride-sourcing with electric vehicle charging under mixed fleets and differentiated services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 169, 102965. [DOI:10.1016/j.tre.2022.102965]
- Caunhye, A. M., Nie, X., & Pokharel, S. (2012). Optimization models in emergency logistics: A literature review. *SocioEconomic Planning Sciences*, 46(1), 4-13. [DOI:10.1016/j.seps.2011.04.004]
- Choi, J., Lee, S., & Choi, H. (2022). The influence of knowledge, trust, and perceived risk on firefighters' preparedness and willingness to respond to nuclear emergencies: The case of South Korea. *International Journal of Disaster Risk Science*, 13, 536-548. [Link]
- Contardo, C., Cordeau, J. F., & Gendron, B. (2013). A computational comparison of flow formulations for the capacitated location-routing problem. *Discrete Optimization*, 10(4), 263-295. [DOI:10.1016/j.disopt.2013.07.005]
- Contardo, C., Hemmelmayr, V., & Crainic, T. G. (2012). Lower and upper bounds for the two-echelon capacitated location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 39(12), 3185-3199. [DOI:10.1016/j.cor.2012.04.003] [PMID]
- Crainic, T. G., Sforza, A., & Sterle, C. (2011a). *Tabu search heuristic for a two-echelon location-routing problem*. Quebec: Cirrelet. [Link]
- Crainic, T. G., Sforza, A., & Sterle, C. (2011b). *Location-routing models for two-echelon freight distribution system design*. Quebec: Cirrelet. [Link]
- Current, J. R., & Schilling, D. A. (1989). The covering salesman problem. *Transportation Science*, 23(3), 208-213. [DOI:10.1287/trsc.23.3.208]
- De La Torre, L. E., Dolinskaya, I. S., & Smilowitz, K. R. (2012). Disaster relief routing: Integrating research and practice. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1), 88-97. [DOI:10.1016/j.seps.2011.06.001]
- Doerner, K., Focke, A., & Gutjahr, W. J. (2007). Multicriteria tour planning for mobile healthcare facilities in a developing country. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1078-1096. [DOI:10.1016/j.ejor.2005.10.067]
- Dalal, J., & Üster, H. (2019). Combining worst-case and average-case considerations in an integrated emergency response network design problem. *Transportation Science*, 52(1), 52-67. [DOI:10.1287/trsc.2016.0725]
- Gendreau, M., Laporte, G., & Semet, F. (1997). The covering tour problem. *Operations Research*, 45(4), 568-576. [DOI:10.1287/opre.45.4.568]
- Golden, B., Naji-Azimi, Z., Raghavan, S., Salari, M., & Toth, P. (2012). The generalized covering salesman problem. *INFORMS Journal on Computing*, 24(4), 534-553. [DOI:10.1287/ijoc.1110.0480]
- Golden, B. L., Raghavan, S., & Wasil, E. A. (2008). *The vehicle routing problem: Latest advances and new challenges*. Berlin: Springer. [Link]
- Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., & Devika, K. (2013). Two-Echelon Multiple-Vehicle Location-Routing Problem with Time Windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, 152, 9-28. [DOI:10.1016/j.ijpe.2013.12.028]
- Hachicha, M., Hodgson, M. J., Laporte, G., & Semet, F. (2000). Heuristics for the multi-vehicle covering tour problem. *Computers & Operations Research*, 27(1), 29-42. [DOI:10.1016/S0305-0548(99)00006-4]
- Han, C. F., & Zhang, C. (2009). Genetic algorithm for solving problems in emergency management. Paper presented at: 2009 Fifth International Conference on Natural Computation, Tianjian, China, 14-16 August 2009. [DOI:10.1109/ICNC.2009.333]
- Hodgson, M. J., Laporte, G., & Semet, F. (1998). A covering tour model for planning mobile health care facilities in Suhum District, Ghana. *Journal of Regional Science*, 38(4), 621-638. [Link]
- Jacobsen, S. K., & Madsen, O. B. G. (1980). A comparative study of heuristics for a two-level routing-location problem. *European Journal of Operational Research*, 5(6), 378-387. [DOI:10.1016/0377-2217(80)90124-1]
- Jang, H. C., Lien, Y. N., & Tsai, T. C. (2009, June). Rescue information system for earthquake disasters based on MANET emergency communication platform. *Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly*, 623-627. [DOI:10.1145/1582379.1582514]
- Jamali, H., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2016). [Modeling and a genetic algorithm for the two-echelon relief logistics problem (Persian)]. *Emergency Management*, 4(2), 5-22. [Link]
- Jamali, H., Bashiri, M., & Tavakoli Moghadam, R. (2015). [Management of relief operations in emergency situations using the concept of cover tour and the possibility of sending (Persian)]. *Modir-e-Farda*, 42(14), 1-10. [Link]
- Jamali, H., & Bashiri, M. (2020). [Modeling for the Covering Tour Problem in Relief Condition for Disaster Management (Persian)]. *Emergency Management*, 9(1), 69-82. [Link]
- Jebbor, S., Raddouane, C., & El Afia, A. (2022). A preliminary study for selecting the appropriate AI-based forecasting model for hospital assets demand under disasters. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 12 (1), pp. 1-29. [DOI:10.1108/JHLSCM-12-2020-0123]



- Jiao, L., Peng, Z., Xi, L., Guo, M., Ding, S., & Wei, Y. (2023). A multi-stage heuristic algorithm based on task grouping for vehicle routing problem with energy constraint in disasters. *Expert Systems with Applications*, 212, 118740. [DOI:10.1016/j.eswa.2022.118740]
- Khanna, R., Konyukhov, Y. V., Burmistrov, I., Cayumil, R., Belov, V. A., & Rogachev, S. O., et al. (2021). An innovative route for valorising iron and aluminium oxide rich industrial wastes: Recovery of multiple metals. *Journal of Environmental Management*, 295, 113035. [DOI:10.1016/j.jenvman.2021.113035]
- Liu, W., Li, J., & Xu, J. (2020). Effects of disaster-related resettlement on the livelihood resilience of rural households in China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 49, 101649. [DOI:10.1016/j.ijdrr.2020.101649]
- Malikov, E., Zhang, J., Zhao, S., & Kumbhakar, S. C. (2022). Accounting for cross-location technological heterogeneity in the measurement of operations efficiency and productivity. *Journal of Operations Management*, 68(2), 153-184. [Link]
- Madsen, O. B. G. (1983). Methods for solving combined two-level location-routing problems of realistic dimensions. *European Journal of Operational Research*, 12(3), 295-301. [DOI:10.1016/0377-2217(83)90199-6]
- Mohamad, F. A., Rezapour, S., Baghaian, A., & Amini, M. H. (2023). An integrative framework for coordination of damage assessment, road restoration, and relief distribution in disasters. *Omega*, 115, 102748. [DOI:10.1016/j.omega.2022.102748]
- Nagy, G., & Salhi, S. (1996). Nested heuristics methods for the location-routing problem. *Journal of Operational Research Society*, 47(9), 1166-1174. [DOI:10.1057/jors.1996.144]
- Naji-Azimi, Z., Renaud, J., Ruiz, A., & Salari, M. (2012). A covering tour approach to the location of satellite distribution centers to supply humanitarian aid. *European Journal of Operational Research*, 222(3), 596-605. [DOI:10.1016/j.ejor.2012.05.001]
- Nguyen, V.P., Prins, C., & Prodhon, C. (2012a). Solving the two-echelon location routing problem by a GRASP reinforced by a learning process and path relinking. *European Journal of Operational Research*, 216(1), 113-126. [DOI:10.1016/j.ejor.2011.07.030]
- Nguyen, V. P., Prins, C., & Prodhon, C. (2012b). A multi-start iterated local search with tabu list and path relinking for the two-echelon location-routing problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(1), 56-71. [DOI:10.1016/j.engappai.2011.09.012]
- Nolz, P. C., Doerner, K.F., Gutjahr, W. J., & Hartl, R. F. (2010). A bi-objective metaheuristic for disaster relief operation planning. In C. A. Coello Coello, C. Dhaenens & L. Jourdan, (Eds), *Advances in Multi-Objective Nature Inspired Computing. Studies in Computational Intelligence*, vol 272. Berlin: Springer. [DOI:10.1007/978-3-642-11218-8_8]
- Oliveira, B., Pessoa, A. & Roboredo, M. (2025). New cuts and a branch-cut-and-price model for the multi-vehicle covering tour problem. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*. [DOI:10.1007/s10288-025-00584-0]
- Pashapour, A., Günneç, D., Salman, F. S., & Yücel, E. (2024). Capacitated mobile facility location problem with mobile demand: Efficient relief aid provision to en route refugees. *Omega*, 129, 103138. [DOI:10.1016/j.omega.2024.103138]
- Pirkwieser, S., & Raidl, G. R. (2010). Variable neighborhood search coupled with ILP-based very large neighborhood searches for the (periodic) location-routing problem. In M. J. Blesa, C. Blum, G. Raidl, A. Roli & M. Sampels(Eds.), *Hybrid Metaheuristics. HM 2010. Lecture Notes in Computer Science*, vol 6373. Berlin: Springer. [DOI:10.1007/978-3-642-16054-7_13]
- Rath, S., & Gutjahr, W.J. (2014). A math-heuristic for the warehouse location-routing problem in disaster relief. *Computers and Operations Research*, 42, 25-39. [DOI:10.1016/j.cor.2011.07.016]
- Schwengerer, M., Pirkwieser, S., & Raidl, G. R. (2012). A variable neighborhood search approach for the two-echelon location-routing problem. In J. K. Hao & M. Middendorf (Eds.), *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. EvoCOP 2012. Lecture Notes in Computer Science*, vol 7245 (pp.13-24). Berlin: Springer. [DOI:10.1007/978-3-642-29124-1_2]
- Tarhan, İ., Zografos, K. G., Sutanto, J., & Kheiri, A. (2023). A quadrant shrinking heuristic for solving the dynamic multi-objective disaster response personnel routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 314(2), 776-791. [DOI:10.1016/j.ejor.2023.09.002]
- Tuzun, D., & Burke, L. I. (1999). A two-phase tabu search approach for the location routing problem. *European Journal of Operational Research*, 116, 87-99. [DOI:10.1016/S0377-2217(98)00107-6]
- Wang, H., Du, L., & Ma, Sh. (2014). Multi-objective open location-routing model with split delivery for optimized relief distribution in post-earthquake. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 69, 160-179. [DOI:10.1016/j.tre.2014.06.006]
- Wang, D. W., & Zhang, G. X. (2005). Model and algorithm to optimize location of catastrophic rescue center. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 26(10), 953-956. [Link]
- Yi, W., & Özdamar, L. (2007). "A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1177-1193. [DOI:10.1016/j.ejor.2005.03.077]
- Zegordi, S. H., & Nikbakhsh, E. (2010). A heuristic algorithm and a lower bound for the two-echelon location-routing problem with soft time window constraints. *Scientia Iranica*, 17(1), 36-47. [Link]
- Zhang, N., Ou, M., Liu, B., & Liu, J. (2023). A GERT network model for input-output optimization of general aviation industry chain based on value flow. *Computers & Industrial Engineering*, 176, 108945. [DOI:10.1016/j.cie.2022.108945]
- Zhu, Q., Chen, J. M., Tseng, M. L., & Luan, H. M. (2020). Modeling green multimodal transport route performance with Witness simulation software. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119245. [DOI:10.1016/j.jclepro.2019.119245]

This Page Intentionally Left Blank