Advanced Modeling in Civil Engineering
Website : https://amcen.razi.ac.ir
Online ISSN : 3060-7620
Razi University

Solving the Multi-Depot Vehicle Routing Problem Using a Hybrid Genetic Algorithm

Hengameh Shamsipoor [1]✉

1. Corresponding Author, Department of Railway Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran. E-mail: hshamsipoor@kut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received
2024-09-15
Received in revised form
2024-11-07
Accepted
2024-12-14
Available online
2024-12-28

Keywords:
Multi-Depot Vehicle Routing,
Allocation Methods,
Genetic Algorithm,
Optimization

ABSTRACT

This study investigates the Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP) with travel distance constraint (no refueling allowed). This problem is a critical challenge in the transportation industry, particularly in locomotive routing within railway networks. The research provides a comprehensive review of solution techniques, models the problem, and applies two approaches to solve it.

The first approach consists of two stages: initially, a suitable allocation method assigns each customer to a depot. In the second stage, an innovative hybrid genetic algorithm determines the optimal route for each vehicle from the depot to the customers and back to the depot, ensuring that all problem constraints are satisfied. The second approach integrates allocation and routing processes simultaneously. At each step, routing results influence subsequent allocation decisions. Based on this perspective, a heuristic algorithm is proposed to solve the problem. Finally, the validity of the model is evaluated through a comparison of the results obtained from these two methods with those of previous studies

Cite this article: Shamsipoor, Hengameh. (2024) Solving the Multi-Depot Vehicle Routing Problem Using a Hybrid Genetic Algorithm. *Advanced Modeling in Civil Engineering,* 1(2),88-106. DOI: 10.22126/amcen.2024.11331.1027

© The Author(s).
DOI: 10.22126/amcen.2024.11331.1027
Publisher: Razi University

Introduction

Producing the best possible product or solution under specific conditions is a fundamental objective in engineering and technical fields. For instance, the production of suitable products in various engineering disciplines relies on precise and optimized design of their shape, dimensions, and components. Alongside the production of optimized products, the efficient utilization of available resources is also crucial and must be addressed across different challenges. One such challenge is the distribution of products from supply centers to customers.

In recent years, distribution companies have increasingly focused on designing efficient distribution strategies to enhance customer service levels and reduce transportation costs. Product distribution from depots to customers is a practical and competitive issue in transportation management, as making appropriate decisions regarding scheduling and routing can significantly improve customer satisfaction.

The distribution problem is generally formulated as the Vehicle Routing Problem (VRP). The VRP is a highly complex optimization problem that involves designing and optimizing a set of routes for a fleet of vehicles to serve a predefined set of customers. Each vehicle, with a limited capacity, is stationed at one or more depots and must serve a group of customers, each with specific and known demands. The objective is to design and optimize the set of routes for the vehicles to serve all customers while minimizing total travel distance or time. Additionally, each route must start and end at the depot where the vehicle is stationed.

The VRP encompasses various sub-problems, each with significant applications in different domains. One of the most important and practical variations is the Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP), which is the focus of this study. In the MDVRP, multiple depots are utilized to serve customers. The locations and numbers of depots are predetermined, and a fleet of vehicles with specific capacities is stationed at these depots. Each vehicle must return to the depot from which it started after completing its assigned routes.

The MDVRP is generally solved using two approaches. In the first approach, the problem is addressed in two stages: in the first stage, to save time and reduce travel distance, customer demands are assigned to supply centers using allocation methods; in the second stage, a separate routing problem is solved for each depot. In the second approach, allocation and routing are performed simultaneously, such that routing results in one step influence customer allocation in subsequent steps.

Method

The Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP), a well-known NP-hard problem, is an extension of the classical VRP and frequently involves decision-making for the distribution of goods or provision of specific services. The MDVRP entails a flow of vehicle

routes where vehicles begin their routes at depots, provide services to customers scattered around these depots, and then return to their respective depots.

In this study, the MDVRP is examined in a static environment, meaning that all decision-making components are defined at the start of the planning period and remain unchanged throughout its execution. Considering the critical importance of travel distance constraints, particularly in locomotive routing within railway networks, this study incorporates such a constraint into the classical MDVRP model. The model assumes that refueling during the journey is not possible, and vehicles must return to their depots before reaching the specified travel limit.

Since the Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP) falls into the category of NP-Hard problems, finding an exact solution for large-scale instances is challenging. Utilizing metaheuristic search algorithms such as the Genetic Algorithm (GA) can effectively aid in discovering near-optimal solutions. In this study, an innovative Genetic Algorithm is employed in combination with the Savings Algorithm. This hybrid approach leverages the strength of the Genetic Algorithm in exploring a vast solution space and the capability of the Savings Algorithm in reducing costs, thereby enhancing the efficiency and effectiveness of the problem-solving process.

Two solution approaches are considered for addressing the problem. In the first approach, the problem is divided into two parts and solved in two stages. In the first stage, one of the allocation methods is used to determine which depot should fulfill the demand of each customer, aiming to achieve greater savings in travel distance and time during the final routing phase. In the second stage, a separate routing problem is solved for each depot. In the second approach, the allocation of customers to depots and the routing of the allocated customers are performed simultaneously.

Results

Based on the results obtained, it is observed that the error rate of the first approach, compared to the best previous results, ranges between 2.5% and 7.6%. This level of error can be acceptable for operational planning, especially when lower computational time, simplicity, and less sensitivity of the subject are prioritized.

The second approach, on average, demonstrates a lower error rate (approximately 2.6% compared to the best results), making it more accurate and efficient. However, this method requires significantly more computational time than the first approach, which may pose a limitation for larger-scale problems.

Both methods are applicable for planning purposes depending on the error tolerance and specific conditions of use. The choice between the two approaches depends on the priorities and specific requirements of the problem at hand.

Finally, the sensitivity analysis of the travel distance constraint revealed that further restricting vehicles in terms of travel distance has a direct and significant impact on increasing operational costs. For example, by applying stricter limits on the distance that each vehicle can travel, the number of returns to the depot increases, leading to a longer total

distance traveled. This results in a higher utilization of vehicles and an increase in costs related to fuel consumption, travel time, and fixed fleet expenses.

Conclusions

The Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP) with the objective of minimizing cost dispatches vehicles from multiple depots to serve customers in surrounding areas. In this study, the customer allocation to the nearest depot and the Genetic Algorithm were used as the main technique. Additionally, the Savings Algorithm was employed to determine the initial solution, and a neighborhood technique was applied to improve the algorithm.

The two solution approaches were then implemented on 7 sample problems, and the results obtained from both methods were compared with the best results from previous studies. The results showed that the second approach yields better quality results compared to the first approach, although its solution time is higher. When dealing with larger problems, this approach is computationally inefficient, and the first approach is more suitable.

Furthermore, based on the sensitivity analysis, it was concluded that further limiting the vehicles in terms of travel distance increases the routing costs and the number of vehicles required. However, due to the avoidance of time wastage on refueling and the return of crews after a specified service time to their origin, this approach can result in greater satisfaction for the crew, customers, and the transportation company.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران
وبگاه نشریه : https://amcen.razi.ac.ir
شاپا الکترونیکی : ۳۰۶۰-۷۶۲۰
دانشگاه رازی

حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره با استفاده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی

هنگامه شمسی پور[۱]✉

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی راه آهن، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران. رایانامه: hshamsipoor@kut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۶/۲۵

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۳/۰۸/۱۷

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۹/۲۴

تاریخ انتشار:
۱۴۰۳/۱۰/۰۸

کلیدواژه‌ها:
مسیریابی وسائل نقلیه،
چند انباره،
روش‌های تخصیص،
الگوریتم ژنتیک

چکیده

در این پژوهش مسئله مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره (MDVRP) همراه با محدودیت مسافت سیر (عدم امکان سوخت گیری مجدد) مورد بررسی قرار گرفته است. این مسئله یکی از نیازهای عمده صنعت حمل و نقل، بویژه در مسیریابی لکوموتیوها در شبکه ریلی به شمار می‌آید . این پژوهش مرور جامعی بر تکنیک‌های حل مسئله داشته، مسئله را مدل کرده و دو روش برای حل آن بکار می‌برد. روش اول شامل دو مرحله می‌باشد، در قدم اول با استفاده از یک روش تخصیص مناسب، هر مشتری را به یک انبار تخصیص داده و سپس در مرحله دوم با استفاده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی ابتکاری مسیر بهینه سیر هر وسیله نقلیه را از انبار به مشتریان و بازگشت به انبار تعیین می‌کند بگونه ای که محدودیت‌های مسئله برآورده گردد. در روش دوم مراحل تخصیص و مسیریابی بطور همزمان پیش می‌روند، بگونه‌ای که در هر مرحله نتایج مسیریابی روی تخصیص بعدی تأثیرگذار خواهد بود. بر اساس این دیدگاه یک الگوریتم ابتکاری جهت حل مسئله تعریف شده، ارائه شده است. در نهایت برای تعیین اعتبار مدل، مقایسه‌ای بین جواب‌های حاصل از این دو روش و روش‌های پیشین صورت می‌گیرد.

استناد: شمسی پور، هنگامه. (۱۴۰۳). حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره با استفاده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی. *مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۱(۲)،۱۰۶-۸۸. DOI: 10.22126/amcen.2024.11331.1027

ناشر: دانشگاه رازی.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

به طور کلی انتخاب و طراحی بهینه در بسیاری از مسائل علمی و فنی باعث تولید بهترین محصول یا جواب ممکن در یک شرایط خاص می شود. برای مثال تولید محصولات مناسب در حوزه‌های مختلف فنی و مهندسی، وابسته به طراحی دقیق و بهینه‌ی شکل، اندازه و قطعات آن محصول است. به موازات تولید محصولات در شرایط بهینه، استفاده بهینه از امکانات موجود نیز حائز اهمیت است که می بایست در مسائل مختلف مورد توجه قرار گیرد. یکی از این مسائل، توزیع محصولات از مراکز پخش به مشتریان می‌باشد. در سالهای اخیر شرکتهای توزیع کالا و خدمات، اهمیت طراحی استراتژیهای پخش کارآمد را برای بهبود سطح سرویس‌دهی مشتریان و کاهش هزینه‌های حمل و نقل مورد توجه قرار داده‌اند. توزیع محصولات از انبارها به مشتریان مسئله‌ای کاربردی و رقابتی در مدیریت حمل و نقل است چرا که اتخاذ تصمیمات مناسب در زمانبندی و مسیریابی، سطح بالاتری از رضایتمندی مشتریان را نتیجه می‌دهد.

مسئله توزیع به طور کلی تحت عنوان مسئله مسیریابی وسایل نقلیه (VRP)[1] فرموله می‌شود که اولین بار توسط دنتزیگ و رامسر در سال ۱۹۵۹ ارائه گردید[۱]. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه، یکی از مسائل بهینه‌سازی بسیار پیچیده است که شامل طراحی و بهینه کردن مجموعه‌ای از مسیرها برای جریانی از وسایل نقلیه است که می بایست به مجموعه ای از مشتریان معین خدمت دهند. در این مسئله ، وسایل نقلیه که هر کدام دارای ظرفیت محدودی می‌باشند در یک یا چند انبار مستقر بوده و می‌بایست مجموعه‌ای از مشتریان را که هر کدام دارای تقاضای مشخص و معینی هستند سرویس‌دهی نمایند. بنابراین هدف مسئله ، طراحی و بهینه نمودن مجموعه‌ای از مسیرها برای وسایل نقلیه جهت سرویس‌دهی مشتریان می‌باشد بگونه‌ای که کل مسافت یا زمان سفر حداقل گردد. در ضمن هر کدام از این جریانات می‌بایست از انبار شروع شده و به آن نیز ختم گردد. این مسئله خود به مسائل متنوعی تقسیم می‌شود که هر کدام در زمینه‌های متفاوت کاربرد مهمی دارند. یکی از انواع بسیار مهم و پرکاربرد آن، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط وجود چند انبار (MDVRP)[2] می‌باشد که در پژوهش حاضر بدان پرداخته شده است. در این مسئله از چندین انبار برای سرویس‌دهی مشتریان استفاده می‌شود، تعداد و محل استقرار انبارها از قبل تعیین گردیده و تعدادی وسیله نقلیه با ظرفیت مشخص در انبارها برای سرویس-دهی به مشتریان مستقر می‌باشند که هر وسیله نقلیه بعد از سرویس‌دهی مشتریان به همان انباری باز می‌گردد که از آن شروع به حرکت نموده است.

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره بطور کلی به دو روش حل می‌شود، در روش اول مسئله در دو مرحله حل می‌شود، در مرحله اول به منظور صرفه جویی در زمان و مسافت سفر، توسط یکی از روش‌های تخصیص، تقاضای هر یک از مشتریان به یکی از مراکز تامین اختصاص داده می شود و در مرحله دوم برای هر انبار یک مسئله مسیریابی مجزا حل می گردد. در روش دوم مراحل تخصیص و مسیریابی بطور همزمان انجام می‌پذیرد، بگونه‌ای که در هر مرحله نتایج حاصل از مسیریابی در تخصیص بعدی تأثیرگذار خواهد بود.

از جمله پژوهش‌های مهم در این زمینه می‌توان به کار لاپورته و همکاران در سال ۱۹۸۴ اشاره کرد که موفق به اجرای الگوریتم شاخه و کران برای حل مسئله MDVRP شدند[۲]. الگوریتم دیگر نیز در سال ۱۹۸۸ باز هم توسط لاپورته ارائه گردید. این پژوهش به بررسی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با چند انبار و مسئله مکان‌یابی-مسیریابی، می پردازد. سپس با استفاده از روش شاخه و کران، راه‌حل‌های بهینه یافت می‌شوند [۳]. اغلب روش‌های موجود برای حل MDVRP ،به دلیل Np-hard بودن مسئله، ابتکاری می-باشند. یکی از اولین کارهای انجام شده مطالعه تیلمن در سال ۱۹۶۹ می باشد که از معیار صرفه جویی کلارک و رایت استفاده نموده است [۴].

توسط رینواد و همکارانش در سال ۱۹۹۶ پژوهشی دیگری بر اساس الگوریتم جستجوی ممنوع، ارائه شد. این روش فرا ابتکاری بهینه سازی، اولین بار توسط گلاور پیشنهاد شد و شامل جستجوی فضای جواب از طریق جابجایی از یک جواب به بهترین جواب همسایه‌اش می‌باشد، حتی اگر این جابجایی از بین رفتن مقداری را برای تابع هدف در بر داشته باشد. این روش، امکان خارج شدن از نقاط بهینه

[1] Vehicle Routing Problem

[2] Multi-Depot Vehicle Routing Problem

محلی را افزایش می‌دهد. حل مسئله MDVRP با استفاده از این روش شامل دو مرحله می‌باشد، در مرحله اول یک جواب اولیه ایجاد می‌شود و در مرحله دوم روش جستجوی ممنوع[3] برای بهبود جواب بکار برده می شود[۵]. کنستانتینو و بالداکسی در سال ۱۹۹۸ مسئله آماده‌سازی سرویس‌های تعمیرات برای مجموعه‌ای از مشتریان را به عنوان MDPVRP[4] فرموله نموده و به ۴ سطح تجزیه کردند. سپس یک روش ابتکاری را برای حل بکار بردند. سطح اول تخصیص مشتریان به انبارها، سطح دوم حل یک PVRP[5] برای هر انبار، سطح سوم حل یک VRP کلاسیک برای هر انبار در هر روز از دوره داده شده و سطح آخر نیز بررسی یک TSP[6] کلاسیک برای هر مسیر بوده است [۶]. بی و همکاران در سال ۲۰۰۲ مسئله MDLRP[7] را مورد مطالعه قرار دادند که تعمیمی از مسئله MDVRP می باشد.MDLRP به دو مسئله مکان-یابی و VRP تجزیه شده و سپس بصورت ترتیبی و تکراری با استفاده از شبیه‌سازی تبریدی[8] حل گردیده است. تفاوت اصلی میان MDLRP و MDVRP در مشخص بودن تعداد و محل انبارها می‌باشد [۷].

در ۲۰۰۴ پولاسک و همکاران مطالعه‌ای را انجام دادند که هدف اصلی آن ارائه الگوریتمی بر مبنای روش جستجوی متغیر همسایگی[9] برای حل مسئله MDVRPTW[10] می‌باشد. این مطالعه اولین کاربرد روش جستجوی متغیر همسایگی را برای این مسئله ارائه داده است و نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که این روش هم از نظر کیفیت نتایج و هم از نظر زمان محاسباتی قابل رقابت با الگوریتم جستجوی ممنوع موجود می‌باشد[۸]. از دیگر مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعه کروبر و همکاران در سال ۲۰۰۷ اشاره کرد، این مطالعه تعمیم مسئله MDVRP است به گونه‌ای که وسایل نقلیه ممکن است بطور مجدد در انبارهای میانی در طول مسیرشان بارگیری کنند. ترکیبی از روش‌های حافظه تطبیقی[11] و جستجوی ممنوع برای حل زیرمسئله‌ها و مدل برنامه‌ریزی صحیح موجود در این پژوهش ارائه شده است[۹]. همچنین کارلسن و همکاران در سال ۲۰۰۷ مسئله MDVRP را با تنوعی از فرضیات و محدودیتها بکار بردند و نظریه مینیمم کردن ماکزیمم طول یک تور را در این مسئله مورد بررسی قرار دادند و یک روش ابتکاری را بر مبنای تقسیم‌بندی منطقه‌ای، معرفی نمودند [۱۰]. ویلیام‌هو و همکاران در سال ۲۰۰۷ پژوهشی را منتشر کردند که برای حل این مسئله دو الگوریتم ژنتیک ترکیبی را بکار برده است، تفاوت اصلی میان آنها این است که مقداردهی اولیه در یکی بصورت تصادفی و در دیگری توسط الگوریتم صرفه‌جویی[12] و نزدیکترین همسایگی صورت می-گیرد و بر اساس نتایج بدست آمده ثابت شده که عملکرد دومی از نظر زمان بهتر است[۱۱]. چن و زو نیز در سال ۲۰۰۸ پژوهشی ارائه داده اند که ترکیبی از الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبریدی را برای حل بکار گرفته اند[۱۲]. کو و وانگ در ۲۰۱۲ نیز یک روش جستجوی همسایگی متغیر برای حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با چندین انبار و هزینه بارگیری ارائه کردند[۱۳].

لو و چن در ۲۰۱۴ نیز یک ساختار جدید الگوریتم جهش قورباغه اصلاح‌شده چند فازی[13] برای حل سریع‌تر مشکل مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره (MDVRP) ارائه دادند. الگوریتم پیشنهادی برای حل مسائل در مقیاس بزرگ مناسب است[۱۴]. سنگیتا نیز در سال ۲۰۱۵ یک الگوریتم ژنتیک چند هدفه را برای مشکل مسیریابی وسایل نقلیه چند انباری با تحویل همزمان و محدودیت‌های جدید ارائه دادند[۱۵]. قنادپور و ضرابی در ۲۰۱۷ در پژوهشی به بررسی مسئله مسیریابی لکوموتیو[14] با استفاده از تکنیک مسیر یابی وسایل نقلیه پرداخته اند. این مسئله شامل تخصیص یک ناوگان از لکوموتیوها به شبکه‌ای از قطارها برای تأمین نیروی کافی برای حرکت آن‌ها از مبدأ به مقصد است، به گونه‌ای که مجموعه‌ای از محدودیت‌های عملیاتی رعایت شود و هزینه کل عملیات به حداقل برسد. این مسئله برای تخصیص بهینه لکوموتیوها به قطارهای تشکیل شده از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره‌های زمانی

[3] Tabu Search (TS)
[4] Multi-Depot Period Vehicle Routing Problem
[5] Period Vehicle Routing Problem
[6] Travelling Salesman Problem
[7] Multi-Depot Location-Routing Problem
[8] Simulated Annealing (SA)
[9] Variable Neighborhood Search
[10] Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows
[11] Memory Adaptive
[12] Saving Algorithm
[13] Multi-Phase Modified Shuffled Frog Leaping Algorithm
[14] Locomotive routing problem (LRP)

(VRPTW)استفاده می کند[۱۷]. در ۲۰۱۹ محمود و هاکو مسئله مسیریابی وسایل نقلیه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک با دقت بالا ارائه دادند[۱]. در پژوهشی دیگر در ۲۰۲۰ یک تکنیک ابتکاری مبتنی بر یادگیری با صرفه اقتصادی برای به حداقل رساندن هزینه مسیریابی به همراه هزینه‌های احتمالی ناشی از ریسک خرابی وسیله نقلیه و شکست در تحویل بار برای مسئله MDVRP پیشنهاد شده است[۱۷]. رحیمی و همکاران در سال ۲۰۲۱ با استفاده از خوشه‌بندی و تقسیم مسئله اصلی به مسائل کوچکتر، زمان حل مسئله MDVRP را به طور چشمگیری کاهش داده‌اند[۱۸]. در ۲۰۲۲ ون و همکاران یک الگوریتم جستجوی همسایگی تطبیقی بهبود یافته (ALNS) را برای حل مؤثر نمونه‌های بزرگ از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با چند انبار و پنجره‌های زمانی (MDGVRPTW) توسعه دادند[۱۹].

در پژوهش ارائه شده توسط زو در ۲۰۲۳ نیز یک چارچوب دو مرحله‌ای برای حل مسئله MDVRPTW پیشنهاد شده است. مرحله اول، مرحله تقسیم است که در آن یک الگوریتم k-means به کار گرفته می‌شود تا مسئله چند انباره را به چندین مسئله تک‌انباره تبدیل کند. مرحله دوم که مرحله بهینه‌سازی است یک الگوریتم کلونی مورچه‌های تطبیقی[15] (ADACO) را برای تعیین معقول‌ترین مسیرهای توزیع برای هر مرکز توزیع پیشنهاد می دهد[۲۰]. در مطالعه ای دیگر در ۲۰۲۴ نیز مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با چند انبار همراه با پنجره‌های زمانی و در نظر گرفتن رضایت مشتری (MDGVRPTW-CS) طراحی شد. برای حل آن نیز یک الگوریتم ژنتیک با جستجوی همسایگی متغیر (LGAVNS) پیشنهاد گردید که الگوریتم ژنتیک به‌عنوان الگوریتم اصلی و الگوریتم همسایگی متغیر به‌عنوان الگوریتم جستجوی همسایگی عمل می‌کند[۲۱].

۲. مواد و روش‌ها

یکی از معیارهای سنجش اثربخشی مدیریت حمل و نقل، مسیریابی وسایل نقلیه می باشد. در مسئله کلاسیک مسیریابی وسایل نقلیه تنها یک انبار مرکزی جهت سرویس‌دهی مشتریان در نظر گرفته می‌شود. در وضعیتی که یک شرکت حمل و نقلی شامل چندین انبار برای سرویس‌دهی باشد این مسئله کارساز نبوده و در نتیجه مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با چندین انبار مطرح می گردد. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط وجود چند انبار (MDVRP) که یکی از مسائل Np-hard معروف می‌باشد از توسعه مسئله VRP بدست می‌آید و به طور مکرر با تصمیم‌گیری برای توزیع کالا و یا سرویس معین مواجه است. این مسئله شامل جریانی از مسیرهای وسایل نقلیه می‌باشد به طوری که وسایل نقلیه مسیرهای خود را از انبارها آغاز نموده و پس از ارائه سرویس به مشتریانی که در اطراف انبارها پراکنده‌اند، به انبار مربوطه باز می‌گردند. مسئله MDVRP مطرح شده در اینجا در فضای استاتیک مورد بررسی قرار می‌گیرد، به این معنی که تمامی اجزای تصمیم‌گیری در ابتدای دوره برنامه‌ریزی مشخص بوده و تا پایان اجرا نیز تغییر نمی‌کند. از آنجایی که محدودیت مسافت سیر بویژه در مسیریابی لکوموتیوها در شبکه ریلی بسیار حائز اهمیت می باشد، در این پژوهش محدودیت مذکور نیز به مدل کلاسیک مسئله MDVRP اضافه شده، با این فرض که امکان سوخت‌گیری مجدد برای وسایل نقلیه وجود نداشته باشد و وسایل نقلیه باید تا قبل از رسیدن به این مسافت به انبار مربوطه بازگشته باشند. تجاوز از ظرفیت وسیله نقلیه و حداکثر مسافت سیر تعیین شده برای آن، به هیچ وجه قابل قبول نبوده و به نوعی این دو موضوع شرایط توجیه‌پذیری مسئله مورد نظر فرض شده‌اند. اضافه کردن این محدودیت به مسئله باعث پیچیدگی بیشتر آن شده، چرا که نیاز به تخصیص صحیح مشتریان به انبارها و مسیرهای بهینه در یک فضای محدودتر دارد. هدف از این مسئله یافتن مسیرهایی برای وسایل نقلیه می‌باشد که در آن تمامی مشتریان با صرف حداقل هزینه (مسافت یا زمان) سرویس داده شوند بگونه‌ای که از حداقل تعداد وسیله نقلیه استفاده شده باشد. این موضوع می‌تواند تأثیر زیادی بر بهینه‌سازی هزینه‌ها و تخصیص منابع داشته باشد.

فرضیات و محدودیت‌هایی که در این مدل باید رعایت گردند به شرح زیر است:

- وسایل نقلیه همگن در نظر گرفته شده‌اند.
- از چندین انبار برای سرویس دهی به مشتریان استفاده می‌گردد.
- هر مشتری مقدار تقاضای متفاوتی را در شبکه دارا می‌باشد.

[15] Adaptive Deep Ant Colony Optimization

- از ظرفیت وسیله نقلیه نباید تجاوز شود.
- هر وسیله نقلیه بیش از مسافت سیر تعیین شده نمی‌تواند طی کند.
- هر مشتری می بایست دقیقا یکبار و توسط یک وسیله نقلیه سرویس داده شود.

۲-۱. مدلسازی مسئله MDVRP

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط وجود چند انبار شامل مجموعه‌ای از وسایل نقلیه V، چندین گره خاص به نام انبار، مجموعه‌ای از مشتریان که باید سرویس‌دهی شوند و یک شبکه جهت‌دار که انبارها و مشتریان تخصیص داده شده به آن‌ها را به هم متصل می‌نماید، می‌باشد.

فرض می‌کنیم که K_m تعداد وسیله نقلیه در انبار m باشد لذا مجموعه V را به صورت $V=\{V_1,V_2,...,V_m\}$ خواهیم داشت که در آن $V_m=\{1,2,...,K_m\}$ مجموعه وسایل نقلیه در انبار m می‌باشد. همچنین با داشتن N مشتری و M انبار مجموعه C به صورت $C=\{1,2,...,M,M+1,...,M+N\}$ نشان داده می‌شود که در آن اعداد یک تا M شماره انبارها و اعداد $M+1$ تا $M+N$ شماره مشتریان در نظر گرفته می‌شود.

یک مسیر با شروع از انبار تعریف شده و پس از عبور از تعدادی مشتری با برگشت به همان انبار خاتمه می‌یابد. تعداد مسیرهایی که در شبکه مربوط به هر انبار ایجاد می شود برابر با تعداد وسایل نقلیه مستقر در آن انبار یعنی K_m می‌باشد. بنابراین دقیقا K_m کمان جهت‌دار انبار m را ترک نموده و K_m کمان نیز به آن وارد می‌شود. هزینه C_{ij} نیز به هر یک از کمان‌ها در شبکه مربوط می‌شوند.

هر مشتری در شبکه می‌بایست تنها یکبار و توسط یک وسیله نقلیه سرویس داده شود. هر وسیله نقلیه دارای یک ظرفیت محدود می‌باشد که در این پژوهش برای همه وسایل نقلیه یکسان و برابر با Q در نظر گرفته شده است.

هر مشتری یک تقاضای متفاوت q_i دارد که Q می‌بایست از مجموع تقاضاهایی که در طول مسیر توسط وسیله نقلیه k ام سرویس داده می‌شود، بزرگتر یا مساوی باشد. وسایل نقلیه همچنین باید مسیرهای خود را پس از طی حداکثر مسافت سیر مجاز به اتمام برسانند.

پارامترها و متغیرهای بکار رفته در مدل ریاضی مسئله :

M: تعداد انبارها

Q : ظرفیت هر وسیله نقلیه

N: تعداد کل مشتریان

D: حداکثر مسافت سیر هر وسیله نقلیه

K_m: تعداد وسایل نقلیه در انبار m

q_i: تقاضای مشتری i

L_m: تعداد مشتریانی که توسط انبار m سرویس داده شده‌اند

H_{mk}: تعداد مشتریانی که وسیله نقلیه kدر انبار m می‌تواند سرویس دهد

C_{ij}: هزینه (مسافت یا زمان) سفر مستقیم بین مشتریان i و j

در این مدل دو متغیر تصمیم به شرح زیر وجود دارند:

متغیر x_{ijkm} به طوری که

$(i,j=1,2,...,M,M+1,...,M+N;$
$k=1,...,K_m;m=1,...,M;i\neq j)$

که این متغیر در صورتیکه وسیله نقلیه k در انبار m سفری را از گره i به گره j داشته باشد برابر یک و در غیر اینصورت برابر با صفر می‌باشد.

متغیر y_{ikm} که در آن $(i=M+1,...,M+N;k=1,...,K_m;m=1,...,M)$، این متغیر در صورتیکه وسیله نقلیه k مشتری i از انبار m را سرویس دهد برابر یک و در غیر اینصورت برابر با صفر می‌باشد.

مدل ریاضی مسئله:

$$Minimize \quad \sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{K_m}\sum_{i=1}^{M+N}\sum_{j=1,j\neq i}^{M+N} C_{ij}x_{ijkm} \qquad (۱)$$

$$\sum_{k=1}^{K_m}\sum_{j=M+1}^{M+N} x_{ijkm} \le K_m \qquad (۲)$$

$$for\ i=m\ ,\ i=\{1,...,M\}$$

$$\sum_{j=M+1}^{M+N} x_{ijkm} = \sum_{j=M+1}^{M+N} x_{jikm} \le 1 \qquad (۳)$$

$$for\ i=\{1,...,M\},\ K=\{1,...,K_m\}\ ,m=\{1,...,M\}$$

$$\sum_{i=M+1}^{M+N} q_i y_{ikm} \le Q \quad (۴)$$
$$for \;\; k = \{1,...,K_m\},\; m = \{1,...,M\}$$
$$\sum_{i=1}^{M+N} \sum_{j=1, j\neq i}^{M+N} C_{ij} x_{ijkm} \le D \quad (۵)$$
$$for \;\; m \in \{1,...,M\}, k \in \{1,...,K_m\}$$
$$0 \le H_{mk} \le L_m \quad (۶)$$
$$for \quad m \in \{1,...,M\},\; k \in \{1,...,K_m\}$$
$$\sum_{k=1}^{K_m} H_{mk} = L_m \quad (۷)$$
$$\sum_{m=1}^{M} L_m = N \quad (۸)$$
$$for \quad m \in \{1,...,M\},\; k \in \{1,...,K_m\}$$
$$\sum_{m=1}^{M} \sum_{k=1}^{K_m} y_{ikm} = 1 \quad (۹)$$
$$for \;\; i \in \{M+1,...,M+N\}$$
$$x_{ijkm} = 0 \;\; or \;\; 1$$
$$y_{ikm} = 0 \;\; or \;\; 1$$

در مدل فوق رابطه (۱)، تابع هدف جهت حداقل کردن کل هزینه مسیریابی وسایل نقلیه در شبکه است که شامل هزینه مسافت و زمان است. محدودیت (۲) تضمین می‌کند که حداکثر K_m وسیله نقلیه از هر انبار خارج شوند. محدودیت (3) تضمین می‌نماید که هر وسیله نقلیه پس از ارائه سرویس به همان انباریی باز گردد که از آن شروع به حرکت نموده است. رابطه (4) نشان می‌دهد که کل تقاضای هر مسیر نباید از ظرفیت وسیله نقلیه تجاوز نماید. محدودیت (5) موضوع حداکثر مسافت سیر برای هر وسیله نقلیه را اعمال می‌نماید. رابطه (۶) نشان می‌دهد که تعداد مشتریان در هر مسیر در یک انبار مشخص، نباید از تعداد مشتریانی که می‌تواند توسط آن انبار سرویس داده شود، تجاوز کند. رابطه (۷) تضمین می‌کند مجموع تعداد مشتریان سرویس داده شده توسط وسایل نقلیه موجود در یک انبار برابر با کل تعداد مشتریانی باشد که می‌بایست توسط آن انبار سرویس داده شوند. رابطه (8) سرویس‌دهی همه مشتریان در شبکه را تضمین می‌کند. محدودیت (۹) نیز تضمین می‌نماید هر مشتری تنها یکبار و توسط یک وسیله نقلیه سرویس داده شود.

از آنجایی که مسئله مسیریابی وسایل نقلیه چند انباره در دسته مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد و حل دقیق آن برای مقیاس‌های بزرگ مشکل است، استفاده از الگوریتم‌های جستجوگر فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک می‌تواند به‌طور مؤثری به یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه کمک کند.

در این پژوهش از یک الگوریتم ژنتیک ابتکاری به‌صورت ترکیبی با الگوریتم صرفه‌جویی استفاده خواهیم کرد. این ترکیب از قدرت الگوریتم ژنتیک در جستجوی فضای وسیع جواب‌ها و قابلیت الگوریتم صرفه‌جویی در کاهش هزینه‌ها بهره‌برداری می‌کند.

تعیین جمعیت اولیه

در این پژوهش با توجه به نوع مسئله از شیوه جایگشتی، جهت نمایش کروموزوم‌ها استفاده شده است. هر کروموزوم به‌صورت رشته‌ای از اعداد صحیح به‌طول N در نظر گرفته شده که N تعداد مشتریان در مسئله مفروض می‌باشد. هر ژن در کروموزوم فوق، یک عدد صحیح است که به هر یک از مشتریان تخصیص داده شده و توالی ژن‌ها در این رشته، ترتیب سرویس‌دهی به مشتریان را نشان می‌دهد. در الگوریتم ارائه شده، پس از استفاده از روش سعی و خطا و مشاهده نتایج، این نتیجه حاصل گردید که ۲۰ درصد جمعیت اولیه از الگوریتم صرفه‌جویی و ۸۰ درصد باقیمانده به‌صورت تصادفی ایجاد گردد. همچنین اندازه جمعیت بر همین اساس برابر با ۲۰ در نظر گرفته شده است.

در هر نسل از الگوریتم حاضر برای تبدیل کروموزوم به جواب به منظور محاسبه مقدار برازندگی، مقادیر ژن‌ها به ترتیب وارد مسیر جدید می‌گردند تا زمانی‌که یکی از شرایط توجیه‌پذیری (حداکثر ظرفیت و حداکثر مسافت سیر برای هر وسیله) نقض گردد. در این صورت مسیر فعلی خاتمه یافته و مسیر جدیدی در نظر گرفته می‌شود.

تابع برازندگی

همانطور که ذکر گردید هر کروموزم بیانگر ترتیب سرویس‌دهی مشتریان (وسایل نقلیه) می‌باشد. در مسئله مفروض به دلیل اینکه هدف حداقل کردن مسافت طی شده می‌باشد لذا تابع برازندگی بر این اساس تعریف می‌شود. بنابراین برازندگی کروموزم می‌تواند به

صورت معکوس مجموع مسافت‌های بین انبار مربوطه و مشتریان موجود در مسیر که مجموعاً یک دور را تشکیل می‌دهند محاسبه گردد. در انتها جوابی با بیشترین برازندگی، به عنوان جواب بهینه تعیین می‌گردد.

روش انتخاب

روش انتخاب والدین برای ورود به مرحله بازترکیبی و تولید فرزندان جدید روش انتخاب تورنمنتی است که در این روش در هر تکرار از فرآیند، دو کپی یکسان از جمعیت کنونی گرفته می‌شود. سپس هر کدام از این جمعیت‌ها به‌طور دلخواه رتبه‌بندی می‌شوند. در هر یک از جمعیت‌ها، هر جفت از کروموزوم‌های مجاور از لحاظ مقدار برازندگی مورد مقایسه قرار گرفته و آن کروموزومی که دارای مقدار برازندگی بهتری باشد، پتانسیل وارد شدن به مرحله تولید مثل را پیدا می‌کند و کروموزوم‌های والد برای تولید مثل انتخاب می‌شوند.

اپراتور بازترکیبی

نوع اپراتور باز ترکیبی که در الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد به نحوه نمایش کروموزوم‌ها وابسته است. با توجه به اینکه کروموزوم‌های بکار رفته در این تحقیق از نوع جایگشتی می‌باشند، لذا عملگرهای سنتی بازترکیبی نظیر بازترکیبی یک‌نقطه‌ای، n نقطه‌ای و ... مناسب نیستند، چرا که ممکن است موجب تکرار و یا حذف برخی از مشتریان شوند که موجه نمی‌باشد. لذا از عملگر بازترکیبی ابتکاری که باتوجه به نوع مسئله تعریف شده، استفاده گردیده است.

در این عملگر ابتدا یک نقطه تصادفی در هر دو کروموزوم انتخاب می‌شود، سپس از گره بعد از نقطه تصادفی انتخابی، کوتاهترین فاصله بین دو کناره خروجی از این گره انتخاب می‌شود و این عمل تا جایی که تمام ژن‌ها مورد بررسی قرار گیرند ادامه می‌یابد. به‌عنوان مثال والدین زیر را در نظر بگیرید:

$$parent\ 1 = [h\ k\ c\ e\ f\ \ d\ /b\ l\ a\ i\ g\ \ j]$$

$$parent\ 2 = [a\ b\ c\ d\ e\ f\ /g\ h\ i\ \ j\ k\ \ l]$$

روند عملکرد به‌این صورت است که فرض می‌شود ژن b به‌طور تصادف انتخاب شود، آنگاه در کروموزوم دوم می بایست ژن g به b تبدیل شود و به منظور جلوگیری از تکرار ژن b به g تغییر داده شود. حال بررسی می‌گردد که اگر $d_{bl} > d_{bh}$ برقرار است آنگاه h انتخاب و می‌بایست در کروموزوم اول ژن l با h جابجا شود. این فرآیند تا زمانی‌که فرزند جدید به‌طور کامل ایجاد شود ادامه می‌یابد [۲۲].

مرحله جهش

منطق استفاده از اپراتور جهش در الگوریتم ژنتیک، جلوگیری از به دام افتادن در نقاط موضعی می‌باشد و موجب می‌گردد مناطق بیشتری از فضای جواب مورد جستجو قرار گیرد. در این پژوهش دو اپراتور جدید ارائه شده و بعد از مقایسه و بر اساس نتایج یکی از این دو، مورد استفاده قرار گرفته است.

در اپراتور اول که از اپراتور جهش حاصل شده و با توجه به نوع مسئله تعریف گردیده، یک ژن به صورت دلخواه انتخاب می‌گردد. سپس جانشینی هر یک از ژن‌های دیگر پشت‌سر این ژن مورد بررسی قرار می‌گیرد و ژنی که موجب بیشترین بهبود در مقدار برازندگی گردد در مکان مذکور قرار گرفته و بقیه ژن‌ها شیفت داده می‌شوند. در اپراتور دیگر، زیررشته‌ای از کروموزوم به تصادف انتخاب شده و ژن‌های موجود در این زیررشته به‌گونه‌ای مرتب می‌گردند که بیشترین بهبود در مقدار برازندگی حاصل گردد. یعنی کمترین مسافت و هزینه ممکن را موجب گردد. این دو اپراتور در الگوریتم حاضر تست گردیده و اپراتور اول به‌عنوان اپراتور جهش مورد استفاده قرار گرفت.

همچنین لازم به ذکر است که معمولاً برای اعمال اپراتور جهش، یک مقدار احتمالی درنظر گرفته می‌شود که در این پژوهش نیز برای این منظور عدد ۰.۱ برای اعمال اپراتور جهش درنظر گرفته شده است.

پذیرش

بعد از اینکه کروموزم یا فرزند جدیدی تحت اپراتورهای بازترکیبی و جهش تولید می شود می‌بایست در این مرحله تصمیم‌گیری در خصوص پذیرش یا عدم پذیرش این کروموزم در جمعیت صورت گیرد. روش بکار رفته در این پژوهش که تحت عنوان برگزیده از آن یاد می‌شود بر این اصل استوار است که همواره بهترین فرد یا تعدادی از بهترین‌ها از جمعیت قبلی در جمعیت جدید باقی می‌مانند و مطمئن هستیم که بهترین جواب از بین

نمی‌رود. احتمال پذیرش در این الگوریتم برابر ۰.۵ در نظر گرفته شده است، بدین معنی که همواره ۵۰ درصد از بهترین اعضای جمعیت قبلی در جمعیت جدید باقی می‌مانند و از بین نمی‌روند.
همچنین معیار پایان الگوریتم تعداد نسل‌ها و برابر با ۵۰۰ نسل در نظر گرفته شده است.

مرحله بهبود

در این پژوهش از مفهوم λ- همسایگی به منظور بهبود کروموزوم‌های تولید شده استفاده شده است. در این فرآیند ۴۰ درصد اول جمعیت مورد نظر انتخاب شده و پس از نمایش به‌صورت یک جواب، الگوریتم یک-همسایگی با استراتژی بهترین بهبود روی آنها پیاده شده است. در نهایت روی بهترین جواب بدست آمده در آخرین نسل برای هر مسیر یک TSP با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت می‌گیرد.

روش جستجوی موضعی (λ- همسایگی):

فرض می‌شود $S=\{R_1,...,R_p,...,R_q,...,R_k\}$ یک جواب موجه برای مسئله مسیریابی باشد که در آن R_p مجموعه مشتریانی می‌باشند که توسط مسیر وسیله نقلیه p سرویس می‌گیرند. روش λ - همسایگی بین دو مسیر R_p و R_q، با جابجایی یک زیرمجموعه $S_1 \subseteq R_p$ که اندازه آن $|S_1| \le \lambda$ می‌باشد با زیرمجموعه دیگر $S_2 \subseteq R_q$ که در آن $|S_2| \le \lambda$، تعریف می‌شود. نتیجه این عمل حاصل شدن مسیرهای جدیدی به فرم $R_q^{'}=(R_q-S_2)\cup S_1$ و $R_p^{'}=(R_p-S_1)\cup S_2$ می‌باشد که باعث ایجاد همسایگی جدیدی به شکل $S^{'}=\{R_1,...,R_p^{'},...,R_q^{'},...,R_k\}$ می‌شود. بنابراین همسایگی $N_\lambda(S)$ برای جواب معین S برابر است با همه همسایگی‌های $\{S^{'}\}$ که به ازای یک λ مشخص، حاصل شده‌اند. برای پذیرش یک جواب در همسایگی تولید شده دو استراتژی انتخاب پیشنهاد شده است: استراتژی اولین بهبود، که اولین جواب در همسایگی ایجاد شده که موجب بهبود در هزینه مسئله می‌شود را می‌پذیرد و استراتژی بهترین بهبود، که این استراتژی کلیه جواب‌های موجود در همسایگی را مورد بررسی قرار داده و جوابی که موجب بهترین بهبود شده است انتخاب می‌نماید[۲۲].

۳. دیدگاه‌های حل مسئله MDVRP

۳-۱. دیدگاه اول

در این رویه، مسئله مذکور به دو بخش تقسیم شده و در دو مرحله حل می‌گردد. در مرحله اول ابتدا باید توسط یکی از روشهای تخصیص تعیین گردد که تقاضای هر یک از مشتریان توسط کدامیک از مراکز تامین گردد، بگونه‌ای که در مسیریابی نهایی صرفه‌جویی بیشتری در مسافت و زمان سفر حاصل گردد و سپس در مرحله دوم برای هر انبار یک مسئله مسیریابی مجزا حل گردد.
با توجه به مقایسه صورت گرفته روی روشهای تخصیص، در تحقیق حاضر از تخصیص مشتریان به نزدیکترین انبار بر اساس فاصله اقلیدسی بهره برده شده و پس از تعیین مشتریان اختصاص یافته به هر انبار، الگوریتم مسیریابی پیشنهاد شده روی مجموعه مشتریان مورد نظر در هر انبار اعمال شده تا ترتیب سرویس‌دهی این مشتریان تعیین گردد. سپس مجموع مسافت‌های طی شده توسط وسایل نقلیه در کل انبارها به عنوان هزینه نهایی این مسئله در نظر گرفته شده است.

۳_۲. دیدگاه دوم

در روش دوم مرحله تخصیص مشتریان به انبارها و مسیریابی روی مشتریان تخصیص یافته به‌صورت همزمان انجام می‌پذیرد که این امر تأثیر متقابل این دو مرحله را موجب می‌شود یعنی در هر مرحله نتیجه مسیریابی روی تخصیص بعدی مشتریان اثر گذاشته و به‌همین ترتیب تخصیص در هر مرحله روی مسیریابی بعدی تأثیرگذار خواهد بود. در این پژوهش از الگوریتم ابتکاری زیر به این منظور استفاده گردیده است.

الگوریتم ابتکاری :

۱. در مرحله اول مشتریان بر اساس حداقل فاصله اقلیدسی به انبارها تخصیص یافته و بعنوان تخصیص اولیه در نظر گرفته می‌شوند.
۲. تعدادی از مشتریان به‌عنوان مشتریان مرزی تعریف می‌شوند که جابجایی این مشتریان بین انبارها می‌تواند موجب کاهش هزینه مسیریابی گردد.

تعیین مشتریان مرزی:

ابتدا برای تمامی مشتریان فاصله اقلیدسی موجود تا اولین و دومین انبار نزدیک به آنها را یافته سپس برای هر یک از آن‌ها، اختلاف فاصله بین اولین و دومین انبار نزدیک محاسبه می‌گردد و مشتریان بر اساس این مقدار محاسبه شده به صورت صعودی مرتب

شده و از ابتدای لیست، ۲۰ درصد از مشتریان بعنوان مشتریان مرزی انتخاب می‌گردند. در واقع مشتریانی که اختلاف چندانی بین اولین و دومین انباری نزدیک به آنها وجود ندارد انتخاب و به شرط کاهش هزینه مسیریابی به دومین انباری نزدیک خود تخصیص می‌یابد.

۳. با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه شده، برای هر انبار با تخصیص اولیه آن مسیریابی صورت می‌گیرد و هزینه کل حاصل از مسیریابی در خانه اول جدول ذخیره می‌گردد.

۴. جابجایی هر یک از مشتریان مرزی از اولین انبار به دومین انباری نزدیک به آن به‌طور موقت صورت گرفته و هزینه مسیریابی توسط الگوریتم ژنتیک محاسبه شده و در خانه‌های جدول مذکور ذخیره می‌گردد.

۵. بعد از محاسبه هزینه حاصل برای همه مشتریان مرزی، مینیمم مقدار هزینه‌ها در نظر گرفته می‌شود.

۶. در صورتیکه حداقل هزینه بدست آمده از هزینه مسیریابی در مرحله قبل کمتر باشد، مشتری مرزی مربوطه (مشتری که حداقل هزینه از جابجایی آن حاصل گردیده) بطور مطلق از اولین انبار به دومین انبار نزدیک خود تخصیص داده می‌شود و جابجایی این مشتری، تخصیص جدید را ایجاد می‌نماید.

۷. تخصیص جدید به عنوان تخصیص اولیه در نظر گرفته شده و مراحل ۱ تا ۶ تکرار می‌گردد تا زمانی که هیچ‌یک از جابجایی‌ها موجب کاهش هزینه نگردد (حداقل هزینه بدست آمده، از هزینه مسیریابی در مرحله قبل کمتر نباشد) در این‌صورت الگوریتم خاتمه می‌یابد.

۸. آخرین تخصیص بدست آمده به عنوان تخصیص نهایی در نظر گرفته شده و هزینه مسیریابی حاصل از آن نیز هزینه مسئله مورد نظر می‌باشد. شکل ۱ اساس کار این الگوریتم را نشان می‌دهد.

دیدگاه‌های ذکر شده در قالب الگوریتم‌های مربوطه توسط نرم‌افزار *Matlab* برنامه‌نویسی شده و روی ۷ مسئله نمونه پیاده گردیده و نتایج حاصل از آن با بهترین نتایج بدست آمده تاکنون که در مطالعه ریناود و همکارانش [۵] بر اساس الگوریتم جستجوی ممنوع آورده شده مقایسه گردیده است.

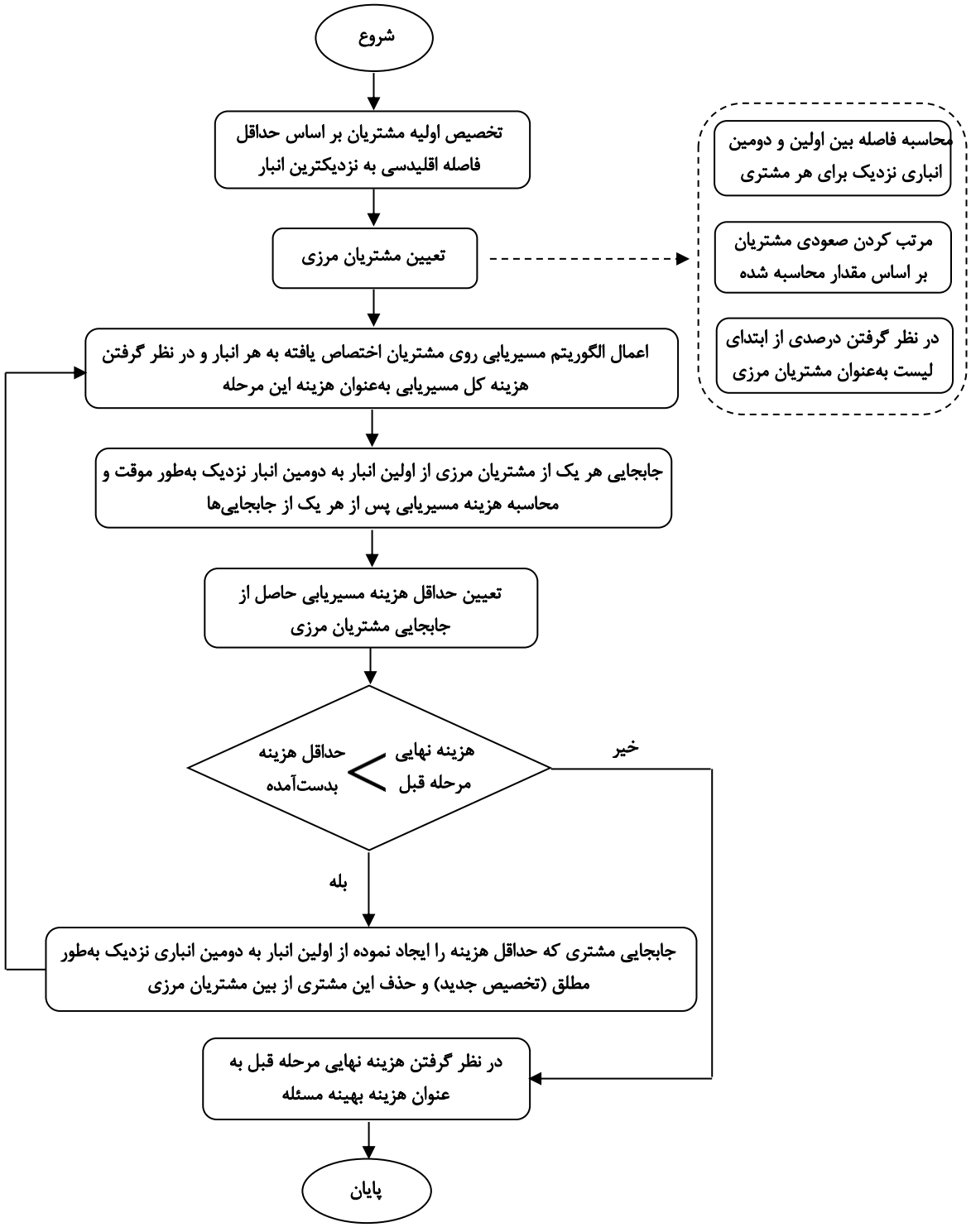
۴. نتایج حاصل از روش‌های حل مسئله

در این قسمت هر دو دیدگاه ارائه شده، روی ۷ مسئله نمونه پیاده گردیده است. در جدول ۱ مشخصات و اطلاعات نمونه‌ها آورده شده است. لازم به ذکر است به منظور فراهم کردن شرایط مقایسه این نتایج، در ابتدا الگوریتم بدون محدودیت مسافت سیر اجرا گردیده و سپس برای هر یک از مسائل تحلیل حساسیت روی این محدودیت صورت گرفته است.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به مسائل

شماره مسئله	تعداد مشتریان	تعداد انبارها	ظرفیت وسیله نقلیه
۱	۵۰	۴	۸۰
۲	۵۰	۴	۱۶۰
۳	۷۵	۵	۱۴۰
۴	۱۰۰	۲	۱۰۰
۵	۱۰۰	۲	۲۰۰
۶	۱۰۰	۳	۱۰۰
۷	۱۰۰	۴	۱۰۰
۸	۱۶۰	۴	۶۰
۹	۲۴۰	۶	۶۰
۱۰	۳۶۰	۹	۶۰

نتایج حاصل از تخصیص مشتریان به انبارها و اجرای الگوریتم پیشنهادی مسیریابی بر روی نمونه‌های ذکر شده توسط روش اول و مقایسه آن با بهترین نتایج ارائه شده پیشین که از الگوریتم (FIND) در مطالعه ریناود و همکارانش استخراج شده در جدول ۲ آورده شده است[۵].



شکل ۱. الگوریتم ابتکاری حل MDVRP

جدول ۲. نتایج حاصل از روش اول

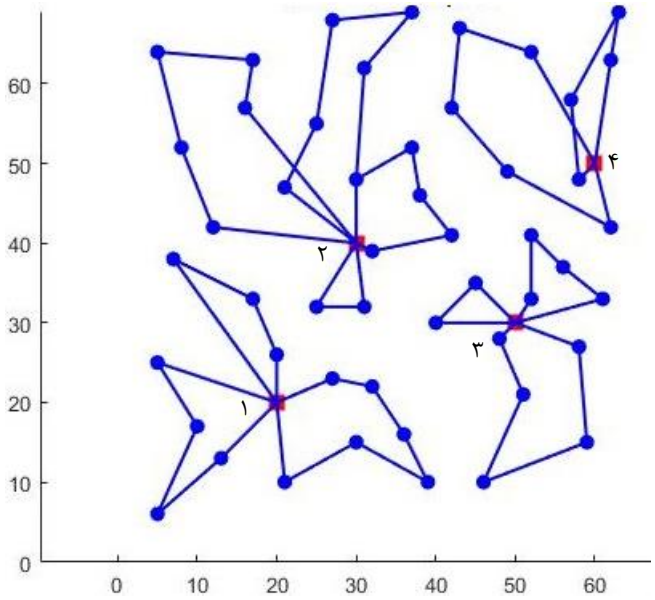
شماره مسئله	بهترین نتایج بدست آمده پیشین	نتایج بدست آمده از روش اول	درصد انحراف از بهترن جواب
۱	۵۷۶.۸۶	۶۱۰.۴	٪۵.۸۰
۲	۴۷۳.۵۳	۵۰۴	٪۵.۸۰
۳	۶۴۱.۱۸	۶۸۱.۴	٪۵.۶۰
۴	۱۰۰۳.۸۶	۱۰۷۷.۳۸	٪۷.۳۰
۵	۷۵۰.۲۶	۷۹۸	٪۶.۳۰
۶	۸۷۶.۵	۸۹۸.۵۶	٪۲.۵۰
۷	۸۹۲.۵۸	۹۲۰.۵۷	٪۲.۵۰
۸	۲۵۰۵.۴۲	۲۶۸۳.۳	٪۷.۱۰
۹	۳۷۰۲.۸۵	۳۹۵۸.۳۴	٪۶.۹۰
۱۰	۵۴۷۴.۸۴	۵۸۹۰.۹۲	٪۷.۶۰

جدول ۳. نتایج حاصل از روش دوم

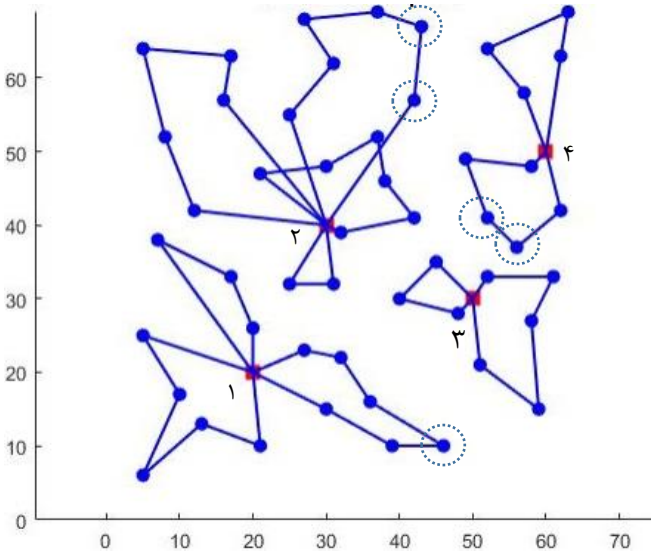
شماره مسئله	بهترین نتایج بدست آمده پیشین	نتایج بدست آمده از روش اول	درصد انحراف از بهترن جواب
۱	۵۷۶.۸۶	۵۷۶.۸۷	٪۰
۲	۴۷۳.۵۳	۴۸۶.۶۴	٪۲.۷۰
۳	۶۴۱.۱۸	۶۵۶.۰۶	٪۲.۳۰
۴	۱۰۰۳.۸۶	۱۰۴۳.۷	٪۳.۹۰
۵	۷۵۰.۲۶	۷۷۷.۸۲	٪۳.۶۰
۶	۸۷۶.۵	۹۰۴.۳۲	٪۳.۱۰
۷	۸۹۲.۵۸	۹۰۶.۳۲	٪۱.۵۰
۸	۲۵۰۵.۴۲	۲۵۸۰	٪۳
۹	۳۷۰۲.۸۵	۳۸۰۶.۵۲	٪۲.۸۰
۱۰	۵۴۷۴.۸۴	۵۶۸۲.۸۸	٪۳.۸۰

با توجه به نتایج بدست آمده در بالا مشاهده می‌گردد که خطای حاصل از این روش بالا بوده و این امر می‌تواند به دلیل مجزا بودن مراحل تخصیص و مسیریابی باشد. لذا در ادامه کار از روش دوم استفاده گردیده که در آن تخصیص مشتریان، تأثیرپذیر از هزینه مسیریابی می‌باشد. نتایج حاصل از این الگوریتم و مقایسه آن با بهترین نتایج ارائه شده پیشین در جدول ۳ قابل مشاهده است.

شکل ۲ و ۳ نتیجه حاصل از حل مسئله شماره ۱ با استفاده از دو روش حل را نشان می‌دهد. در شکل ۲ هزینه مسئله برابر با ۶۱۰.۴ می‌باشد که ۵.۸ درصد بالاتر از بهترین نتیجه بدست آمده تاکنون بوده است. پس از حل مسئله توسط روش دوم همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود تخصیص مشتریان تغییر نموده و دو مشتری از انبار ۴ به ۲، دو مشتری از انبار ۳ به ۴ و یک مشتری از انبار ۳ به ۱ جابجا شده‌اند. بر اساس این جابجایی هزینه مسئله از ۶۱۰.۴ به ۵۷۶.۸۶ کاهش یافته که دقیقاً برابر با بهترین نتیجه بدست آمده می‌باشد و خطای مسئله از ۵.۸ به صفر رسیده است.



شکل ۲. نتیجه حاصل از تخصیص و مسیریابی به طور مجزا



شکل ۳. نتیجه حاصل از تخصیص و مسیریابی به طور همزمان

جدول۴ نتایج حاصل از مسیریابی برای مسئله شماره ۱ را نشان می‌دهد که در آن ترتیب سرویس‌دهی مشتریان، طول هر مسیر و ظرفیت اشغال شده هر وسیله نقلیه برای هر یک از انبارها مشخص شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌گردد که میانگین خطا در این نمونه‌ها از ۵.۷ درصد در روش اول به ۲.۶ درصد در روش دوم

کاهش یافته است که این امر نشان‌دهنده کارایی بیشتر روش دوم می‌باشد. اما زمان حل روش دوم به مراتب بالاتر است و زمانی‌که با مسائل بزرگ روبرو هستیم، این روش از نظر حجم محاسباتی مناسب نمی‌باشد. در هر صورت انتخاب بین این دو، به اولویت‌ها و نیازهای خاص مسئله بستگی دارد.

در نتایج بدست آمده در جداول فوق همانگونه که ذکر گردید، به منظور فراهم آوردن شرایط اعتبارسنجی روش حل، از محدودیت مسافت سیر صرفنظر گردیده است. در ادامه این محدودیت به مسئله اضافه شده و بر روی نمونه‌های مذکور اعمال گردیده و تأثیر آن بر روی هزینه حاصل، مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۴. نتایج مسیریابی مسئله شماره یک

دپو	وسیله نقلیه	طول مسیر	ظرفیت بارگیری‌شده	ترتیب سرویس‌دهی مشتریان							
1	1	47	78	0	25	18	4	0	-	-	-
1	2	66.55	79	0	13	41	40	19	42	0	-
1	3	60.06	71	0	44	45	33	15	37	17	0
2	1	53.44	73	0	6	27	1	32	11	46	0
2	2	81.4	77	0	23	7	43	24	14	0	-
2	3	79.48	80	0	22	28	31	26	8	48	0
2	4	23.5	54	0	47	12	0	-	-	-	-
3	1	50.41	75	0	9	34	30	39	10	0	-
3	2	25.22	54	0	49	5	38	0	-	-	-
4	1	42.14	69	0	21	50	16	2	29	0	-
4	2	47.67	67	0	20	3	36	35	0	-	

۵. تحلیل حساسیت محدودیت مسافت سیر

در مسئله MDVRP دو محدودیت برای وسایل نقلیه در نظر گرفته شده است که این محدودیت‌ها در مرحله مسیریابی موجب اتمام یک مسیر و شروع مسیر جدید می‌گردند. وجود محدودیت ظرفیت برای وسایل نقلیه و فاصله‌ای که مشتریان از انبارها دارند دو مقدار مهم برای مسافت سیر را ایجاد نموده که تحت عنوان D_1 و D_2 در مسائل زیر از آن نام برده شده است. D_1 نشان‌دهنده حداکثر مقدار معناداری است که می‌توان به عنوان محدودیت مسافت سیر وسیله نقلیه در نظر گرفت و مقداری بیشتر از آن، تأثیری در جواب مسئله نخواهد داشت و D_2 نشان‌دهنده حداقل مقدار مجازی است که می‌شود در نظر گرفت و به ازای مقادیر کمتر از آن مسئله نشدنی خواهد شد. اگر فاصله تمام مشتریان را از نزدیکترین انبار به خود در نظر گرفته و ماکزیمم آنها را یافته و طول مسیری که توسط این مشتری و نزدیکترین انبار به آن حاصل می‌شود، محاسبه گردد، این مقدار همان D_1 را به دست می‌دهد که به ازای کمتر از این مقدار مسئله غیر موجه خواهد شد. همچنین اگر مسئله بدون محدودیت

مسافت حل شود، بیشترین طول مسیر ایجاد شده برای مسیرها همان D_2 خواهد بود. بر اساس این دو مقدار برای ۳ نمونه از مسائل فوق جدولی تنظیم گردیده و به ازای مقادیر متفاوتی از مسافت سیر، هزینه مسیریابی محاسبه شده است.

جدول ۵. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت برای مسئله اول

تعداد وسیله نقلیه	هزینه	مسافت
۱۱	۵۷۶.۹	۱۰۰
۱۱	۵۷۶.۹	۹۵
۱۱	۵۷۶.۹	۹۰
۱۱	۵۹۸.۸	۸۵
۱۱	۶۰۱.۴	۸۰
۱۳	۶۰۹.۵	۷۵
۱۴	۶۵۸.۳	۷۰

با توجه به جدول ۵، مقدار D_1 برابر ۸۵ و D_2 برابر ۷۰ بدست آمده است یعنی به ازای مقادیر بیشتر از ۸۵، هزینه مسئله تغییری ننموده و تنها منجر به افزایش ظرفیت‌های بلااستفاده وسایل نقلیه می‌شود. مقادیر کمتر از ۷۰ نیز مسئله را غیرموجه می‌نماید.

برای مسئله دوم بر اساس جدول ۶ مقدار D_1 برابر با ۹۷ و D_2 برابر با ۷۰ بدست آمده است و برای مسئله سوم همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، مقدار D_1 برابر با ۹۰ و D_2 برابر با ۶۵ به‌دست آمده است.

در نهایت تحلیل نتایج نشان می‌دهد که محدود کردن بیشتر وسایل نقلیه از نظر مسافت سیر تأثیر مستقیم و قابل توجهی بر افزایش هزینه‌های عملیاتی دارد. به عنوان مثال، با اعمال محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌تر بر مسافت قابل پیمایش توسط هر وسیله نقلیه، تعداد دفعات بازگشت وسایل نقلیه به انبار افزایش یافته و در نتیجه طول کل مسیرهای طی‌شده بیشتر می‌شود. این موضوع منجر به استفاده بیشتر از وسایل نقلیه و افزایش هزینه‌های مرتبط با مصرف سوخت، زمان سفر و هزینه‌های ثابت ناوگان می‌گردد.

از طرفی انتخاب مقدار مناسب برای محدودیت مسافت سیر، نیازمند بررسی دقیق توازن بین هزینه‌های عملیاتی و بهره‌وری سیستم است. هرچند محدود کردن بیشتر وسایل نقلیه می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌ها شود، اما ممکن است به دلایلی مانند کاهش زمان سفر یا افزایش کیفیت خدمات مشتریان قابل توجیه باشد. بنابراین، تعیین مقادیر بهینه برای محدودیت‌ها باید با توجه به اهداف و اولویت‌های سیستم انجام گیرد.

جدول ۶. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت برای مسئله دوم

تعداد وسیله نقلیه	هزینه	مسافت
۶	۴۸۶.۶	۱۰۰
۶	۴۸۹.۹	۹۷
۷	۵۰۱.۶	۹۵
۷	۵۰۳.۱	۹۰
۸	۵۱۸.۳	۸۵
۹	۵۳۲.۹	۸۰
۹	۵۶۴.۴	۷۵
۱۲	۶۳۵.۸	۷۰

جدول ۷. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت برای مسئله سوم

تعداد وسیله نقلیه	هزینه	مسافت
۱۲	۶۶۰.۶	۱۰۰
۱۲	۶۶۰.۲	۹۵
۱۳	۶۶۸.۹	۹۰
۱۳	۶۷۱.۹	۸۵
۱۲	۶۷۲.۶	۸۰
۱۳	۶۸۵.۲	۷۵
۱۴	۶۸۱	۷۰
۱۵	۷۲۱.۹	۶۵

۶. نتیجه گیری

مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط وجود چند انبار با هدف حداقل هزینه، وسایل نقلیه را از چندین مرکز جهت سرویس‌دهی مشتریان به نواحی اطراف اعزام می‌دارد. در این پژوهش از روش

تخصیص مشتریان به نزدیکترین انبار و الگوریتم ژنتیک به‌عنوان تکنیک اصلی استفاده شد. همچنین از الگوریتم صرفه‌جویی به‌منظور تعیین جواب اولیه و از تکنیک λ- همسایگی جهت بهبود الگوریتم استفاده گردید. در ادامه دو دیدگاه حل ارائه شده، روی ۷ نمونه مسئله اجرا شد و نتایج حاصل از هر دو روش با بهترین نتایج بدست‌آمده‌ی پیشین مقایسه گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که روش دوم نتایج بهتری از نظر کیفیت نسبت به روش اول به دست می‌آورد، در حالیکه زمان حل آن بالاتر می‌باشد و زمانیکه با مسائل بزرگ روبرو هستیم این روش از نظر حجم محاسباتی مناسب نبوده و روش اول مناسب‌تر می‌باشد. در ادامه بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده، این نتیجه حاصل گردیده که محدود کردن بیشتر وسایل نقلیه از نظر مسافت سیر موجب افزایش هزینه مسیریابی و افزایش نسبی وسایل نقلیه مورد نیاز می‌گردد ولی در عین حال به دلیل عدم اتلاف زمان در طی مسیر به منظور سوخت‌گیری و همچنین بازگشت خدمه پس از مدت زمان مشخص سرویس‌دهی به مبدا حرکت، می‌تواند موجب رضایتمندی بیشتر خدمه، مشتریان و شرکت حمل و نقلی گردد.

References

[1] Mahmud, N., & Haque, M. M. "Solving multiple depot vehicle routing problem (MDVRP) using genetic algorithm". In 2019 International conference on electrical, computer and communication engineering (ECCE) (pp. 1-6). IEEE, 2019, February.

[2] Laporte, G., Nobert, Y. and Arpin, D. "Optimal solutions to capacitated multi-depot vehicle routing problems", Congressus Numerantiwn 44, 283-292 1984.

[3] Laporte, G., Nobert, Y. and Taillefer, S. "Solving a family of multi-depot vehicle routing and location-routing problems", Transp. Sci. 22, 161-172, 1988.

[4] Tillman, F. A. "The multiple terminal delivery problem with probabilistic demands", Transp. Sci. 3, 192-204, 1969.

[5] Renaud, J., Laporte, G. and Boctor, F.F. "A Tabu Search Heuristic for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem", Computers Ops Res. Vol. 23, No. 3, pp. 229-235, 1996.

[6] Hadjiconstantinou, E., Baldacci, R., "A multi-depot period vehicle routing problem arising in the utilities sector", Journal of the Operational Research Society 49, 1239–1248, 1998.

[7] Wu, T.H., Low, C., Bai, J.W. "Heuristic solutions to multi-depot location-routing problem", Computers and Operations Research 29, 1393–1415, 2002.

[8] Polacek, M., Hartl, R.F. and Doerner, K., "A Variable Neighborhood Search for the Multi Depot Vehicle Routing Problem with TimeWindows", Journal of Heuristics, 10, 613–627, 2004.

[9] Crevier, B., Franc¸ J., Cordeau, O., Laporte, G. "The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes", European Journal of Operational Research 176.756–773, 2007.

[10] Carlsson, J. Ge, D., Subramaniam, A., Wu, A. and Ye, Y. " Solving Min-Max Multi-Depot Vehicle Routing Problem", Lectures of Global Optimization, 31-46.2007.

[11] Hadjiconstantinou, E., Baldacci, R., "A multi-depot period vehicle routing problem arising in the utilities sector", Journal of the Operational Research Society 49, 1239–1248.1998.

[12] Chen, P., Xu, X. "A Hybrid Algorithm for Multi-depot Vehicle Routing Problem", IEEE, 2008.

[13] Kuo, Y., & Wang, C. C. "A variable neighborhood search for the multi-depot vehicle routing problem with loading cost". Expert Systems with Applications, 39(8), 6949-6954.2012.

[14] Luo, J., & Chen, M. R. "Multi-phase modified shuffled frog leaping algorithm with extremal optimization for the MDVRP and the MDVRPTW". Computers & Industrial Engineering, 72, 84-97, 2014.

[15] Sangeeta, S. S. "Simultaneously pickup and delivery MDVRP with multi objective GA". International Journal of Advanced Research in Computer Science, 6(5), 2015.

[16] Ghannadpour, S. F., & Zarrabi, A. "The special application of vehicle routing problem with uncertainty travel times: Locomotive routing problem". International Journal of Transportation Engineering, 5(2), 119-136, 2017.

[17] Soeanu, A., Ray, S., Berger, J., Boukhtouta, A., & Debbabi, M. "Multi-depot vehicle routing problem with risk mitigation: Model and solution

algorithm". Expert systems with applications, 145, 113099, 2020.

[18] Baghbadorani, R. R., Zajkani, M. A., & Haeri, M. "A new approach to solve MDVRP in lower computation time". In 2021 29th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) (pp. 632-636). IEEE, 2021, May.

[19] Wen, M., Sun, W., Yu, Y., Tang, J., & Ikou, K. "An adaptive large neighborhood search for the larger-scale multi depot green vehicle routing problem with time

windows". Journal of Cleaner Production, 374, 133916, 2022.

[20] Xue, S. "An adaptive ant colony algorithm for crowdsourcing multi-depot vehicle routing problem with time windows". Sustainable Operations and Computers, 4, 62-75, 2023.

[21] Su, Y., Zhang, S., & Zhang, C. "A lightweight genetic algorithm with variable neighborhood search for multi-depot vehicle routing problem with time windows". Applied Soft Computing, 161, 111789, 2024.

[۲۲] قصیری، ک.، قنادپور، س.ف.، "مسیریابی لکوموتیوها در شبکه با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی"، پژوهشنامه حمل و نقل، ش ۳، ۱۳۸۷.