Iranian Journal of Supply Chain Management
Vol. 27, No. 4, Winter 2026, Serial No. 89
ISSN: 2008-9198 , E-ISSN: 2717-1647

An Integrated Location–Routing Model for Electric Vehicle Fleets Considering Energy Management and Battery Swapping/Charging Stations

Shayan Darvish[1], Reza Kamranrad[2*], Mostafa Zaree[3]

[1]Master's Degree, Department of Industrial Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran. Email Address: shayandarvish7700@gmail.com

[2] Correspondence: Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. Email Address: r.kamranrad@semnan.ac.ir

[3]Assistant Professor, Logistics and Supply Chain Research Group, Faculty of Humanities, Imam Hussein University of Officer and Guard Training, Tehran, Iran. Email Address: mozare66@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 5 May 2025

Received in revised form: 26 July 2025

Accepted: 20 September 2025

Available online: 19 February 2026

Keywords:

Electric Vehicle Routing Problem (EVRP)

Location–Routing

Energy Management

Battery Swapping Station

Variable Neighborhood Search (VNS)

ABSTRACT

Air pollution caused by transportation vehicles, particularly trucks, has intensified the need for rapid adoption of electric vehicles (EVs) as a clean and sustainable alternative. Nevertheless, the implementation of EVs in distribution and delivery systems is confronted with several critical challenges, including optimal routing in complex transportation networks, battery capacity constraints, energy management considerations, and the strategic placement of charging or battery-swapping stations. This study develops an integrated location–routing model for electric vehicle fleets that simultaneously addresses routing decisions, energy management, and the optimal siting of charging and battery-swapping facilities. The research pursues three primary objectives: (1) to propose a novel Electric Vehicle Routing Problem (EVRP) optimization model aimed at minimizing electrical energy consumption—equivalent to distance minimization—through refinement of the energy consumption function and incorporation of regenerative braking; (2) to design an efficient routing algorithm; and (3) to evaluate the proposed model in terms of operational efficiency and energy performance improvements. The solution methodology is based on the Variable Neighborhood Search (VNS) metaheuristic to determine optimal vehicle routes and charging station locations in an integrated framework. Computational results indicate that the proposed model achieves a 2.3% reduction in energy consumption compared with conventional Vehicle Routing Problem (VRP) models. Furthermore, optimized load allocation leads to an additional 8.84% energy saving, while balancing operational schedules reduces charging operation time by 48.3%. Overall, by integrating route optimization, battery energy management, and charging/battery-swapping station location decisions within a unified framework, the proposed model provides an effective and sustainable solution for enhancing the performance and environmental benefits of electric transportation systems.

Cite this article: Sh. Darvish, R. Kamranrad, and M. Zaree, "An Integrated Location–Routing Model for Electric Vehicle Fleets Considering Energy Management and Battery Swapping/Charging Stations," Journal of Supply Chain Management, vol. 27, no. 4, pp. 47-70, 2026. DOI: https://doi.org/10.47176/scmj.2026.1650

OPEN ACCESS

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University

Introduction

Logistics and transportation costs constitute a significant proportion of total product costs and directly influence competitiveness in supply chains. In recent decades, growing environmental concerns, climate change, and urban air pollution have intensified the need for sustainable transportation systems. The transition from conventional fossil-fuel-based fleets to electric vehicles (EVs) has emerged as a promising solution for reducing greenhouse gas emissions and carbon footprints in distribution networks.

Despite their environmental advantages, electric vehicles face operational challenges that complicate their integration into logistics systems. Key limitations include restricted battery capacity, limited driving range, long charging times, and insufficient charging infrastructure. These constraints significantly affect routing decisions, service reliability, and operational efficiency. Therefore, developing advanced optimization models that simultaneously address routing, energy consumption, and infrastructure planning is critical for the successful deployment of EV fleets.

Traditional studies on the Electric Vehicle Routing Problem (EVRP) often treat routing and charging station location decisions separately. In such two-stage approaches, charging station locations are determined first, and routing is optimized afterward. Although computationally simpler, these approaches neglect the strong interaction between infrastructure placement and routing patterns. As a result, they may yield locally optimal yet globally inefficient solutions.

The present study proposes an integrated location–routing model for electric vehicle fleets that simultaneously determines:

1. Optimal routes for electric vehicles,
2. Optimal locations of battery charging or swapping stations,
3. Optimal load allocation to vehicles, and
4. Battery energy management along routes.

A major innovation of this research is the refined modeling of energy consumption. Unlike conventional models that assume energy usage is proportional only to distance, this study incorporates:

- Vehicle load effects on energy consumption,
- Regenerative braking energy recovery, and
- Operational charging scheduling considerations.

Energy consumption for each trip is modeled as a function of distance traveled, effective vehicle load, and motion characteristics. Regenerative braking is incorporated as a negative energy component, enabling routes with higher recovery potential (e.g., urban stop-and-go patterns or downhill segments) to be favored when energy-efficient.

The integrated model is formulated as a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) problem. It minimizes total system cost, including transportation costs and charging station establishment

costs, while satisfying capacity, energy, and operational constraints. The proposed approach aims to achieve dual objectives:

- Enhancing operational efficiency and reducing logistics costs,
- Promoting environmental sustainability through reduced energy consumption.

The problem is NP-hard due to the combinatorial complexity of routing and location decisions. Therefore, a tailored Variable Neighborhood Search (VNS) metaheuristic algorithm is developed to efficiently solve medium- and large-scale instances.

Results and Discussion

Overview of the Mathematical Model

The objective function of the problem is formulated to minimize the total transportation costs, inventory holding costs, and the establishment costs of battery charging stations.

The model constraints include the following:

- Each customer can be visited at most once in each period.
- Flow conservation must be maintained at every node (the number of vehicles entering a node must equal the number leaving it).
- Vehicle load capacity constraints must be satisfied.
- Battery capacity constraints must be respected.
- Subtour formation must be prevented.
- A charging station must be established (activated) in order to be used.

The dynamics of battery energy level are modeled such that a vehicle is allowed to travel between two nodes only if its remaining battery charge is sufficient to complete the trip.

Algorithmic Framework

Because exact optimization becomes computationally expensive for large instances, a Variable Neighborhood Search (VNS) algorithm was designed with the following components:

1. **Initial Solution Generation:**
   Random feasible solution based on matrix representation.
2. **Shaking Phase:**
   Six neighborhood structures divided into:
   - Four customer-visit modification structures,
   - Two charging-station location modification structures.
3. **Local Search (Swap-based):**
   Applied to improve visit schedules and station decisions.
4. **Stopping Criterion:**
   Termination after no improvement in consecutive iterations.

The algorithm structure enables effective exploration of the solution space while maintaining computational efficiency.

Numerical Results

The computational experiments demonstrate substantial improvements compared to conventional vehicle routing models:

- **2.3% reduction in total energy consumption** compared to traditional routing models.
- **8.84% energy savings** achieved through optimal load allocation integration.
- **48.3% reduction in charging operation time** through improved scheduling and balanced charging decisions.

These improvements result from three synergistic mechanisms:

1. **Reduced route deviations** via optimal charging station placement.
2. **Lower per-distance energy usage** through load optimization.
3. **Operational efficiency gains** via improved charging time management and energy recovery modeling.

The integration of location and routing decisions significantly reduces unnecessary detours and waiting times at charging stations. Furthermore, simultaneous decision-making avoids suboptimal infrastructure placement that would otherwise increase energy consumption and route lengths.

Comparative validation using GAMS for small-sized instances confirms the solution quality of the VNS algorithm. For larger instances, the proposed method produces high-quality solutions within reasonable computational time.

Managerial Insights

The findings provide important managerial implications:

- Integrated planning reduces system-wide inefficiencies compared to sequential approaches.
- Energy-aware routing improves both sustainability and cost-effectiveness.
- Investment in strategically located charging/swapping stations reduces long-term operational costs.
- Load-sensitive routing policies significantly impact EV performance.

For logistics companies transitioning to electric fleets, coordinated infrastructure and routing decisions are essential for achieving economic viability.

Conclusion

This study presented a comprehensive integrated location–routing model for electric vehicle fleets considering energy management and charging/swapping infrastructure decisions. Unlike traditional sequential models, the proposed approach simultaneously optimizes routing, station placement, load allocation, and battery management.

Key contributions include:

- A refined energy consumption model incorporating load and regenerative braking effects,
- Integrated MILP formulation for simultaneous decision-making,

- Development of a tailored Variable Neighborhood Search algorithm,
- Demonstration of measurable energy and operational time savings.

Numerical results confirm that the integrated approach leads to:

- 2.3% reduction in total energy consumption,
- 8.84% savings via optimal load allocation,
- 48.3% reduction in charging operation time.

These outcomes highlight the practical superiority of integrated planning for sustainable logistics networks.

Future Research Directions

Future studies may extend this research by:

- Considering stochastic demand and traffic conditions,
- Incorporating multiple depots and heterogeneous fleets,
- Modeling nonlinear charging functions in greater detail,
- Integrating carbon pricing and policy mechanisms,
- Applying hybrid metaheuristics or machine learning-assisted optimization.

In conclusion, the proposed integrated framework provides a robust decision-support tool for designing sustainable, energy-efficient electric vehicle distribution systems. It bridges theoretical modeling with real-world operational considerations and offers actionable insights for logistics managers seeking to adopt electric transportation solutions.

نشریه «مدیریت زنجیره تامین»
سال بیست و هفتم، شماره ۸۹، زمستان ۱۴۰۴؛ ص ۷۰-۴۷
شاپای چاپی: ۲۰۰۸-۹۱۹۸| شاپای الکترونیکی: ۲۷۱۷-۱۶۴۷

ارائه یک مدل یکپارچه مکانیابی- مسیریابی برای ناوگان وسایل نقلیه الکتریکی با درنظرگرفتن مدیریت انرژی و ایستگاه‌های تعویض یا شارژ باطری

شایان درویش[۱]، رضا کامران راد[۲*]، مصطفی زارعی[۳]

[۱] کارشناس ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران. رایانامه: shayandarvish7700@gmail.com

[۲] استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. (نویسنده مسئول). رایانامه: r.kamranrad@semnan.ac.ir

[۳] استادیار گروه علمی آماد و زنجیره تامین، دانشکده و پژوهشکده علوم انسانی، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)، تهران، ایران. رایانامه: mozare66@yahoo.com

چکیده

امروزه آلودگی هوای ناشی از خودروهای حمل‌ونقل مانند کامیون‌ها، توسعه سریع خودروهای برقی را به‌عنوان جایگزینی پاک ضروری ساخته است. بااین‌حال، به‌کارگیری خودروهای برقی در خدمات تحویل با چالش‌های کلیدی از جمله نیاز به مسیریابی بهینه در شبکه‌های پیچیده، محدودیت مسافت باتری‌ها و انتخاب مکان‌های بهینه ایستگاه‌های شارژ مواجه است. این پژوهش سه هدف اصلی را دنبال می‌کند: (۱) ارائه یک مدل بهینه‌سازی مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی جدید برای کاهش مصرف انرژی الکتریکی (معادل کمینه‌سازی مسافت) از طریق پالایش مدل مصرف انرژی و یکپارچه‌سازی بازیابی ترمز؛ (۲) طراحی یک الگوریتم مسیریابی نوین؛ و (۳) ارزیابی مدل در بهبود بازده عملیاتی و مصرف انرژی. روش تحقیق مبتنی بر به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی همسایگی متغیر برای تعیین مسیرهای بهینه و مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ بوده است. نتایج نشان‌دهنده کاهش ۲,۳٪ مصرف انرژی در مدل مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی نسبت به مدل‌های مرسوم مسیریابی وسیله نقلیه، صرفه‌جویی ۸,۸۴٪ انرژی از طریق بهینه‌سازی تخصیص بار و کاهش ۳.۴۸٪ زمان عملیات شارژ با تعادل زمان عملیات بود. در مجموع، مدل پیشنهادی با تلفیق بهینه سازی مسیر، مدیریت باتری و مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ، راه‌حلی کارآمد برای توسعه پایدار حمل‌ونقل الکتریکی ارائه می‌دهد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰

کلیدواژه‌ها:
مسیریابی وسیله نقلیه
خودروی برقی
پنجره زمانی متغیر
الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی همسایگی متغیر

استناد: درویش، شایان، کامران راد، رضا، زارعی، مصطفی، " ارائه یک مدل یکپارچه مکانیابی–مسیریابی برای ناوگان وسایل نقلیه الکتریکی با درنظرگرفتن مدیریت انرژی و ایستگاه‌های تعویض یا شارژ باطری"، نشریه مدیریت زنجیره تامین، دوره ۲۷، شماره۴، صفحات ۷۰-۴۷، ۱۴۰۴. DOI: https://doi.org/10.47176/scmj.2026.1650

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

OPEN ACCESS

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).

۱- مقدمه

هزینه‌های لجستیک و حمل‌ونقل، سهمی حیاتی و گاه تعیین‌کننده در هزینه تمام‌شده محصولات نهایی دارند [۱] [۲]. با توجه به تاثیر هزینه‌ها بر بخشی از ارزش فروش، بهینه‌سازی برنامه‌ریزی لجستیک و مسیریابی را به موضوعی اساسی برای کاهش هزینه‌ها تبدیل کرده‌است. نمونه‌های عینی، مانند صرفه‌جویی‌های در شرکت‌های توزیع از طریق برنامه‌ریزی حمل‌ونقل گواهی بر اهمیت این بهینه‌سازی‌هاست[۳]. بااین‌حال، تمرکز صرف بر کاهش هزینه‌های مالی کافی نیست. صنعت حمل‌ونقل، به‌ویژه با تکیه بر ناوگان سنتی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، سهم قابل‌توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و تشدید بحران‌های زیست‌محیطی مانند تغییرات اقلیمی و آلودگی هوا دارد [۴]. این چالش، ضرورت گذار به سمت حمل‌ونقل پایدار را به‌طور فزاینده‌ای آشکار ساخته‌است. در این راستا، وسایل نقلیه الکتریکی به‌عنوان راهکاری امیدبخش مطرح شده‌اند که پتانسیل کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و انتشار کربن را دارا هستند [۵][۶]. علیرغم مزایای غیرقابل‌انکار زیست‌محیطی و انرژی، گسترش وسایل نقلیه الکتریکی با موانع عملیاتی مهمی مواجه است .محدودیت‌های کلیدی شامل ظرفیت باتری، برد حرکتی محدود، زمان طولانی شارژ، و کمبود زیرساخت‌های مناسب برای سوخت‌گیری مجدد (شارژ یا تعویض باتری) می‌باشد[۷].

این محدودیت‌ها، کارایی عملیاتی ناوگان الکتریکی، به‌ویژه در مسیرهای طولانی یا فشرده، را تحت‌تأثیر قرار داده و می‌تواند جذابیت اقتصادی و عملیاتی آن‌ها را در مقایسه با ناوگان سنتی کاهش دهد. برای غلبه بر این چالش‌ها و تحقق پتانسیل کامل وسایل نقلیه الکتریکی در لجستیک پایدار، رویکردهای مدیریتی نوآورانه ضروری است. یک راه‌حل کلیدی، تلفیق هوشمندانه برنامه‌ریزی مسیریابی ناوگان الکتریکی با استقرار بهینه زیرساخت سوخت‌گیری مجدد است. تعیین مکان‌های راهبردی ایستگاه‌های شارژ یا تعویض باتری و طراحی مسیرهایی که به طور هم‌زمان محدودیت‌های برد و زمان عملیات را رعایت کرده و امکان دسترسی به این ایستگاه‌ها را فراهم کند، می‌تواند کارایی ناوگان الکتریکی را به‌طور چشمگیری افزایش داده و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد. این امر به نوبه خود می‌تواند مشوقی قوی برای جایگزینی ناوگان سنتی باشد[۸] [۹].

این امر به نوبه خود می‌تواند مشوقی قوی برای جایگزینی ناوگان سنتی باشد. یکی از نقاط عطف مدل حاضر، شفاف‌سازی کانال‌های عملیاتی است که منجر به صرفه‌جویی انرژی در شبکه توزیع با ناوگان الکتریکی می‌شوند. راهکار پیشنهادی ما از سه مسیر مکمل باعث صرفه‌جویی انرژی می‌گردد: (۱)کاهش مسافت کلی با قرار دادن ایستگاه‌های شارژ/تعویض باتری در مکان‌های بهینه که نیاز به انحراف مسیرها برای سوخت‌گیری مجدد را کاهش می‌دهد؛ (۲)کاهش مصرف به‌ازای واحد مسافت از طریق بهینه‌سازی تخصیص بار به خودروها (کاهش وزن حمل‌شده در مسیرهای نامناسب)، و (۳) بهینه‌سازی پروفایل شارژ و بازده عملیاتی (شامل زمان‌بندی شارژ/تعویض و استفاده از بازیابی انرژی ترمز) که هم اتلاف انرژی در عملیات و هم زمان انتظار در ایستگاه‌ها را کاهش می‌دهد.

در مدل ریاضی ارائه‌شده، مصرف انرژی هر سفر به‌صورت تابعی از مسافت، بار مؤثر و مشخصه‌های حرکتی مدل‌سازی شده است. علاوه بر آن، اثر بازیابی انرژی ترمز در نقاط توقف/کاهش سرعت به‌صورت یک مؤلفهٔ منفی (کاهش مصرف خالص) وارد تابع انرژی شده است؛ بدین صورت مسیرهایی که امکان بازیابی انرژی بیشتری دارند (مثلاً مسیرهای شهری با توقف - حرکت مکرر یا مسیرهایی با نزول ارتفاع) از منظر انرژی ارجح می‌شوند. این پالایش مدل مصرف انرژی به‌طور مستقیم به انتخاب مسیرها و نقاط شارژ تأثیر می‌گذارد و دلیل آن کاهش معنادار مصرف انرژی در مقایسه با مدل‌های مرسوم مسیریابی وسیله نقلیه[1] در نتایج عددی پژوهش است. از سوی دیگر، تفکیک دومرحله‌ای (ابتدا مکان‌یابی سپس مسیریابی) ممکن است موجب تصمیم‌گیری‌های محلی بهینه ولی کلی بهینه نشده شود، زیرا مکان‌های انتخاب‌شده بدون آگاهی از الگوهای دقیق تقاضا و محدودیت‌های عملیاتی تعیین می‌گردند. در مقابل، مدل حاضر متغیرهای تصمیم‌گیری مربوط به مکان‌یابی ایستگاه‌ها و مسیریابی روزانه را به‌صورت هم‌زمان در یک چارچوب برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط[2] یکپارچه وارد می‌کند؛ این هم‌زمانی اجازه می‌دهد که مکان‌یابی ایستگاه‌ها تحت‌تأثیر الگوهای بار، پنجره‌های زمانی و محدودیت‌های باتری قرار گیرد و در عوض توالی بازدیدها و نقاط شارژ بهینه نسبت به موقعیت ایستگاه‌ها شکل گیرند. نتیجه این تلفیق کاهش دورزدن‌ها و توقف‌های غیرضروری برای شارژ، کاهش زمان صف و افزایش احتمال استفاده از شارژ جزئی در طول مسیر است که همه اینها به کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری منجر می‌شوند.

[1] VRP
[2] MILP

در ادبیات کلاسیک مسائل مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی، تصمیمات مربوط به مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ یا تعویض باتری و مسیریابی ناوگان غالباً به‌صورت تفکیک‌شده و در قالب رویکردهای دومرحله‌ای اتخاذ می‌شوند. در این رویکردها، ابتدا مکان ایستگاه‌ها بر اساس معیارهای کلی (مانند پوشش جغرافیایی یا حداقل‌سازی هزینه استقرار) تعیین شده و سپس، با فرض ثابت بودن این مکان‌ها، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه حل می‌گردد. اگرچه این روش‌ها از نظر محاسباتی ساده‌تر هستند، اما به دلیل نادیده گرفتن تعامل متقابل میان تصمیمات مکانیابی و مسیریابی، اغلب منجر به راه‌حل‌هایی می‌شوند که در سطح کل سیستم لجستیکی بهینه نیستند. زیرا تصمیمات مکانیابی بدون درنظرگرفتن الگوهای واقعی تقاضا، محدودیت‌های باتری، توالی بازدیدها و زمان‌بندی عملیات اتخاذ می‌شوند. در عمل، مکان ایستگاه‌های شارژ به‌طور مستقیم بر الگوهای مسیریابی، طول مسیرها، تعداد توقف‌ها، میزان انحراف از مسیر اصلی و زمان عملیات تأثیر می‌گذارد .به‌طور متقابل، مسیرهای انتخاب‌شده، حجم بار حمل‌شده و توالی بازدید مشتریان نیز تعیین می‌کنند که کدام ایستگاه‌ها واقعاً مورد استفاده قرار می‌گیرند و در چه نقاطی نیاز به شارژ یا تعویض باتری بحرانی می‌شود. در نتیجه، اتخاذ این تصمیمات به‌صورت جداگانه می‌تواند باعث ایجاد تصمیمات محلی بهینه اما کلیتاً ناکارا شود. در پژوهش حاضر، این محدودیت اساسی با ارائه یک مدل یکپارچه مکانیابی–مسیریابی برطرف شده است؛ به‌گونه‌ای که تصمیمات مربوط به انتخاب مکان ایستگاه‌های شارژ/تعویض باتری، طراحی مسیرهای روزانه وسایل نقلیه، تخصیص بار به هر وسیله نقلیه و مدیریت سطح شارژ باتری در طول مسیر به‌صورت هم‌زمان و یکپارچه و در قالب یک چارچوب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط اتخاذ می‌شوند. این یکپارچگی موجب می‌شود مکان‌یابی موقعیت ایستگاه‌ها به‌طور مستقیم متناسب با الگوهای واقعی تقاضا، الگوهای مسیریابی، میزان بار حمل‌شده، محدودیت برد باتری، نیازهای واقعی عملیات و محدودیت‌های عملیاتی تعیین شود و مسیرها نیز به‌گونه‌ای شکل گیرند که کمترین نیاز به توقف‌های اضافی و انحراف‌های پرهزینه داشته باشند. نتیجه این هم‌افزایی، کاهش مصرف انرژی، کاهش انحراف مسیرها برای شارژ، کاهش توقف‌های غیرضروری، بهبود زمان‌بندی عملیات و کاهش مصرف انرژی کل سامانه، کاهش زمان عملیات شارژ، بهبود بهره‌وری ناوگان و افزایش قابلیت اجرای راه‌حل‌ها در شرایط واقعی است که در نتایج عددی پژوهش به‌صورت کاهش معنادار مصرف انرژی و زمان عملیات مشاهده می‌شود ؛ و می توان بیان نمود که مزایایی که در رویکردهای تفکیکی به‌طور کامل قابل دستیابی نیستند.

شواهد عددی پژوهش نیز نشان می‌دهد که تلفیق مدل مصرف انرژی اصلاح‌شده، تخصیص بار بهینه و مکان‌یابی/مسیریابی هم‌زمان به کاهش قابل‌توجه مصرف انرژی و زمان عملیات منجر می‌شود؛ به‌طور مشخص، نتایج نشان می‌دهد کاهش ۲.۳٪ در مصرف انرژی نسبت به مسیریابی وسیله نقلیه مرسوم، صرفه‌جویی ۸۴.۸٪ از طریق بهینه‌سازی تخصیص بار و کاهش ۴۸.۳٪ در زمان عملیات شارژ با تعادل زمان‌بندی حاصل شده است. این ارقام نشان می‌دهند که راهکار پیشنهادی نه‌تنها از منظر نظری مؤثر است، بلکه مزیت عملی قابل‌توجهی برای تصمیم‌گیران شبکه‌های توزیع با ناوگان الکتریکی فراهم می‌آورد.

در پاسخ به این نیاز، پژوهش حاضر به بررسی و مدل‌سازی یک مسئله ترکیبی حیاتی مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی[1] همراه با مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های تعویض باتری می‌پردازد. هدف اصلی این مطالعه، ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی است که بتواند به‌طور هم‌زمان مسیرهای بهینه برای ناوگان الکتریکی را با درنظرگرفتن محدودیت ظرفیت باتری، برد حرکتی، و نیاز به تعویض باتری طراحی کند و همچنین مکان‌های بهینه برای استقرار ایستگاه‌های تعویض باتری را تعیین نماید. اهداف فرعی این پژوهش عبارت‌اند از (۱) شناسایی و تحلیل روش‌های موجود در حوزه مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با تأکید بر ایستگاه‌های تعویض باتری؛ (۲) ارائه یک الگوریتم فراابتکاری کارآمد برای حل مسئله ترکیبی پیشرو و (۳)تجزیه‌وتحلیل نتایج و ارائه راهکارهای بهینه برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها. این پژوهش با ارائه راه‌حلی یکپارچه برای چالش‌های لجستیک ناوگان الکتریکی، در پی دستیابی به اهدافی دوگانه است :کاهش معنادار هزینه‌های عملیاتی شرکت‌های حمل‌ونقل از یک سو، و کمک به تحقق اهداف پایداری زیست‌محیطی و کاهش ردپای کربن صنعت لجستیک از سوی دیگر. نتایج آن می‌تواند مبنایی برای طراحی شبکه‌های حمل‌ونقل پایدارتر و کارآمدتر مبتنی بر انرژی الکتریکی فراهم آورد.

۲- پیشینه تحقیق

باتوجه‌به تمرکز این تحقیق بر استفاده از وسایل نقلیه الکتریکی در حوزه لجستیک، به بررسی ادبیات مرتبط با لجستیک سبز و

[1] E-VRP

مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی پرداخته و مطالعات گوناگون انجام‌شده در این زمینه را مرور خواهیم کرد.

بروگریلی و همکاران [۱۰] یک روش فراابتکاری سه‌مرحله‌ای را برای مسیریابی ناوگان وسایل نقلیه الکتریکی ارائه کردند که ترکیبی از یک روش دقیق و یک جستجوی محلی مبتنی بر همسایگی متغیر[1] است. در این رویکرد، وسایل نقلیه الکتریکی اجازه دارند برای شارژ (بخشی) در ایستگاه‌های شارژ مجدد توقف کنند. این مسئله به‌صورت سلسله‌مراتبی طراحی شده است تا دو هدف را به حداقل برساند: نخست تعداد وسایل نقلیه الکتریکی مورد استفاده و دوم، کل زمان صرف شده توسط این وسایل نقلیه شامل زمان سفر، زمان شارژ و زمان انتظار (با در نظر گرفتن محدودیت‌های پنجره زمانی هر مشتری). نتایج نشان‌دهنده دستیابی روش پیشنهادی به جواب‌های باکیفیت در زمان معقول می‌باشد. شائو و همکاران [۱۱] مسئله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی را با در نظر گرفتن زمان شارژ و زمان سفر متغیر با استفاده از الگوریتم ژنتیک بررسی کردند؛ همچنین یک الگوریتم دیکسترا دینامیک برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین هر دو گره مجاور در طول مسیرها به کار گرفته شد. این مدل همچنین نوسانات زمان سفر را به‌منظور شبیه‌سازی محیط‌های ترافیکی پویا در نظر گرفته است. برای ارزیابی عملکرد مدل و روش حل، یک مطالعه موردی گسترده و واقع‌بینانه بر اساس شبکه جاده‌ای در یک منطقه شهری پکن انجام شد. نتایج این مطالعه کارایی مدل پیشنهادی و توانایی آن در تحلیل شرایط دنیای واقعی را نشان داد. هف و همکاران [۱۲] روشی مبتنی بر جستجوی همسایگی متغیر تطبیقی برای حل مسئله مکان‌یابی ایستگاه‌های تعویض باتری و مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی ارائه کردند. نتایج به‌دست‌آمده کارایی این روش را تأیید می‌کند. شیفر و والتر [۱۳] رویکردی برای مکان‌یابی و مسیریابی ارائه کردند که به طور هم‌زمان مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی و استقرار ایستگاه‌های شارژ را در نظر می‌گیرد. مدل پیشنهادی آن‌ها علاوه بر کاهش مسافت طی‌شده، تعداد وسایل نقلیه و ایستگاه‌های شارژ را نیز به حداقل می‌رساند.

مونتویا و همکاران [۱۴]مدل‌های موجود برای مسئله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی را با در نظر گرفتن تابع شارژ غیرخطی گسترش دادند و یک روش حل ترکیبی برای مواجهه با این مسئله ارائه کردند. نتایج نشان داد که نادیده گرفتن زمان شارژ غیرخطی ممکن است منجر به تولید جواب‌های غیرممکن یا افزایش قابل‌توجه هزینه‌های مسیریابی شود. این پژوهش بر اهمیت مدل‌سازی دقیق زمان شارژ باتری تأکید دارد تا نتایج بهینه و قابل اجرا به دست آید.

ماکرینا و همکاران [۱۵] مسئله مسیریابی وسایل نقلیه سبز را در یک ناوگان حمل‌ونقل مختلط شامل دو نوع وسیله نقلیه، یعنی وسایل نقلیه الکتریکی و وسایل نقلیه با سوخت متعارف، و با در نظر گرفتن محدودیت پنجره زمانی بررسی کردند. در این مدل، امکان شارژ جزئی باتری وسایل نقلیه الکتریکی نیز لحاظ شده است. برای حل این مسئله، آن‌ها یک روش جستجوی ابتکاری ارائه دادند که به طور مؤثر به پیدا کردن مسیرهای بهینه کمک می‌کند. ورما [۱۶] به بررسی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با در نظر گرفتن محدودیت پنجره زمانی و امکان شارژ یا تعویض باتری در ایستگاه‌ها پرداخت. او یک مدل ریاضی برای این مسئله ارائه کرد و یک روش حل برای دستیابی به مسیرهای بهینه پیشنهاد نمود. این رویکرد بر اهمیت ترکیب انعطاف‌پذیری در مدیریت انرژی وسایل نقلیه و رعایت محدودیت‌های زمانی تأکید دارد. ژانگ و همکاران [۱۷] مسئله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی را با تمرکز بر کاهش مصرف انرژی به‌عنوان تابع هدف بررسی کردند. آن‌ها برای حل این مدل، یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر کلونی مورچگان طراحی و ارائه نمودند. این الگوریتم به طور خاص برای بهبود کارایی انرژی در مسیرهای انتخاب شده و کاهش هزینه‌های مرتبط با مصرف انرژی وسایل نقلیه الکتریکی طراحی شده است. فنگ و همکاران [۱۸] به بررسی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی پرداختند که در آن زمان شارژ باتری به میزان شارژ باقی‌مانده و مسافت باقی‌مانده برای حمل‌ونقل وابسته است. علاوه بر این، آنها هزینه استهلاک باتری را نیز در مدل خود لحاظ کردند. برای حل این مسئله، یک روش ابتکاری چهار مرحله‌ای ارائه شد.

پز و همکاران [۱۹] مسئله مسیریابی-مکان‌یابی وسایل نقلیه الکتریکی با چند دپو را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دو نوع فناوری تأمین انرژی را شامل شارژ مجدد و تعویض باتری در نظر گرفتند. هی و همکاران [۲۰] مسئله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی و مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ باتری را بررسی کردند و یک مدل دو سطحی برای آن ارائه دادند. در این مدل، مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ باتری در سطح اول و تعیین مسیر بهینه در سطح دوم قرار دارد. آن‌ها با تبدیل مدل به یک مدل تک‌سطحی و خطی‌سازی آن، یک روش حل ابتکاری برای مسئله پیشنهاد کردند.

[1] VNSB

لی و همکاران [۲۱] به بررسی مسئله مسیریابی خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن محدودیت‌های عمر باتری و ایستگاه‌های تعویض باتری پرداختند. آنها ابتدا مدلی جامع برای اندازه‌گیری مصرف انرژی و انتشار کربن خودروهای الکتریکی، با در نظر گرفتن عواملی مانند سرعت، بار و مسافت، ارائه کردند. سپس، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با هدف به حداقل رساندن کل هزینه‌های مصرف انرژی و زمان سفر خودروهای الکتریکی پیشنهاد کردند. برای حل کارآمد این مدل، الگوریتم ژنتیک تطبیقی بر پایه بهینه‌سازی تپه‌نوردی و جستجوی همسایگی توسعه یافت. در این الگوریتم، احتمالات متقاطع و جهش به‌گونه‌ای طراحی شدند که با تغییر تناسب جمعیت سازگار شوند. همچنین، جستجوی تپه‌نوردی برای تقویت قابلیت جستجوی محلی الگوریتم مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، به‌منظور رعایت محدودیت‌های مربوط به عمر باتری و ایستگاه‌های تعویض باتری، از راهبرد جستجوی همسایگی برای یافتن راه‌حل بهینه نهایی استفاده شد.

رئیسی و زوگرافوس [۲۲] مسئله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با پنجره‌های زمانی و تعویض هم‌زمان باتری موبایل را بررسی کردند. این روش با هدف تسهیل فرایند تعویض باتری‌های تخلیه‌شده وسایل نقلیه الکتریکی و انجام شارژ کامل آن‌ها در زمان و مکان مشخص طراحی شده و قابلیت پشتیبانی از طیف گسترده‌ای از وسایل نقلیه را داراست. با توجه به شباهت مفهومی این رویکرد به ایستگاه‌های شارژ متحرک، این مطالعه از اهمیت زیادی در تعریف مفروضات برخوردار است. در این مسئله، مسیریابی برای دو نوع وسیله نقلیه صورت می‌گیرد: وسیله نقلیه تعویض‌کننده باتری باید به نحوی برنامه‌ریزی شود که باتری موردنیاز وسایل نقلیه الکتریکی در بهترین زمان و مکان ممکن تحویل داده شود. از آنجا که زیرساخت‌های دو استراتژی شارژ مجدد و تعویض باتری متفاوت است، نسخه متحرک این خدمات نیازمند مطالعه‌ای جامع با در نظر گرفتن مفروضات خاص خود است. با وجود هزینه‌های بالای استراتژی تعویض باتری، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهند که ایجاد ایستگاه‌های شارژ ثابت می‌تواند تا ۳,۹ برابر پرهزینه‌تر از اجرای راهکار متحرک باشد.

هانگ و کوکلمن [۲۳] از الگوریتم ژنتیک برای تعیین مکان‌یابی ایستگاه‌ها و جزئیات طراحی با هدف دستیابی به حداکثر سود استفاده کرده‌اند. در این روش، هزینه‌های مربوط به نصب، بهره‌برداری، نگهداری تجهیزات و همچنین تملک زمین موردتوجه قرار گرفته است. سلطان‌زاده و همکاران [۲۴] مسئله مکان‌یابی و مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی و معمولی را با در نظر گرفتن انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد بررسی قرار دادند. این مسئله، بخشی از مسائل مکان‌یابی و مسیریابی و همچنین مسئله مسیریابی سبز محسوب می‌شود که ترکیبی از خودروهای برقی و معمولی را در نظر می‌گیرد. آنها در مدل پیشنهادی خود، امکان شارژ مجدد و تعویض باتری را نیز لحاظ کردند. برای حل مسئله، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه استفاده شد. علاوه بر این، تأثیر افزایش مالیات بر انتشار گازهای گلخانه‌ای بر استفاده از خودروهای الکتریکی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های سیستم مورد بررسی قرار گرفت. صادقی و همکاران [۲۵] یک مدل ریاضی برای مساله موجودی- مکان‌یابی و مسیریابی وسائل نقلیه الکتریکی ارائه کردند. در مساله آنها کمبود مجاز نبوده و تقاضای مشتریان قطعی می‌باشد. برای حل مدل یک الگوریتم جستجوی متغیر محلی ارائه گردید. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم جستجوی متغیر محلی پیشنهادی، نتایج عددی با روش دقیق و روش تبرید شبیه‌سازی شده مقایسه شده‌اند. نتایج محاسباتی عملکرد مناسب الگوریتم جستجوی متغیر محلی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کسکین و همکاران [۲۶] مسئله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی را با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی و زمان انتظار تصادفی در ایستگاه‌های شارژ مجدد معرفی و توسعه داده‌اند. از آنجا که خدمت‌رسانی به مشتریان و بازگشت به انبار اصلی تحت محدودیت پنجره زمانی انجام می‌شود، انتظار طولانی در ایستگاه‌های شارژ می‌تواند باعث اختلال در عملیات لجستیکی و برنامه‌ریزی زمان‌بندی شود. برای حل این مسئله، یک روش ابتکاری مبتنی بر شبیه‌سازی دو مرحله‌ای با استفاده از جستجوی همسایگی بزرگ انطباقی ارائه شده است. در مرحله اول، مسیرها با توجه به زمان‌های انتظار پیش‌بینی‌شده در ایستگاه‌های شارژ تعیین می‌شوند. هنگامی که وسایل نقلیه به ایستگاه‌ها می‌رسند، زمان صف واقعی مشخص می‌شود. در صورتی که زمان واقعی انتظار از مقدار پیش‌بینی‌شده بیشتر باشد، ممکن است پنجره زمانی مشتریان بعدی در مسیر نقض شود. در مرحله دوم، این نقض‌ها با در نظر گرفتن جریمه برای تجاوز از پنجره زمانی و بازگشت دیرهنگام به انبار اصلاح می‌شوند تا راه‌حل‌های قابل قبول به دست آید. قبادی و همکاران [۲۷] یک مسئله مسیریابی خودروهای الکتریکی چند انباری[1] را با در نظر گرفتن ایستگاه‌های شارژ و جریمه‌های مورد انتظار ناشی از پنجره‌های زمانی فازی در تحویل ارائه کردند. با توجه به

[1] MD-EVRP

اینکه مسئله مسیریابی خودروهای الکتریکی چند انباری با محدودیت‌های پنجره زمانی فازی [1] یک مسئله NP-hard محسوب می‌شود، سه الگوریتم فرابتکاری شامل بازپخت شبیه‌سازی‌شده، جستجوی همسایگی متغیر، و ترکیبی از بازپخت شبیه‌سازی‌شده و جستجوی همسایگی متغیر برای حل این مسئله توسعه داده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که الگوریتم هیبریدی بازپخت شبیه‌سازی‌شده - جستجوی همسایگی متغیر نسبت به سایر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری داشته و کارآمدتر است.

راجش و جین [۲۸] مسئله مسیریابی وسیله نقلیه الکتریکی شخصی را حل کردند و مسیری بهینه برای یک وسیله نقلیه در یک سفر طولانی ارائه دادند. آنها یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه کردند که شامل کمینه‌سازی زمان کل سفر و هزینه تجمعی شارژ می‌شود. علاوه بر این، عناصری واقعی و خارجی مانند ترافیک در ایستگاه‌های شارژ، فاصله‌های انحرافی برای رسیدن به ایستگاه شارژ، و هزینه‌های متغیر برق در ایستگاه‌های مختلف شارژ را در مدل‌سازی مسئله لحاظ کردند. همچنین از تکنیک‌های متاهیوریستیک مانند الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده کردند تا مسیر بهینه و در نتیجه مقادیر هدف را به دست آورند. کتی و همکاران[۲۹] مسئله مسیریابی خودروهای الکتریکی با پنجره زمانی و ایستگاه‌های شارژ موبایل را بررسی کردند. در این مسئله، خودروهای الکتریکی موظف به ارائه خدمات به مشتریان در بازه‌های زمانی مشخص هستند، درحالی‌که کامیون‌ها یا ون‌های برقی به‌عنوان ایستگاه‌های شارژ سیار، برای شارژ مجدد یا تعویض باتری به مکان‌های انتخابی مشتریان در طول بازدید مراجعه می‌کنند. هدف این مطالعه، به حداقل رساندن کل هزینه‌های عملیاتی و اندازه ناوگان موردنیاز است. آنها ابتدا مدل ریاضی مسئله مسیریابی خودروهای الکتریکی با پنجره زمانی و ایستگاه‌های شارژ موبایل را ارائه کردند و سپس یک رویکرد ترکیبی را پیشنهاد دادند که جستجوی همسایگی متغیر را با یک روش دقیق برای حل این مسئله ادغام می‌کند. لیو و همکاران [۳۰] مسئله مسیریابی خودروهای الکتریکی چند محفظه‌ای ناهمگن برای حمل محصولات فاسدشدنی [2] را پیشنهاد کردند. آنها در این مدل، نیازها و محدودیت‌های عملی متعددی از جمله مناطق دمایی مختلف، پنجره‌های زمانی سخت، امکان شارژ چندباره در حین تحویل و مصرف انرژی متفاوت برای واحدهای تبرید را در نظر گرفتند. این مسئله به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط باهدف بهینه‌سازی هزینه کل شامل هزینه ثابت خودروها، هزینه برق، و هزینه خنک‌کننده فرموله شد. برای حل این مسئله پیچیده، یک الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌های ترکیبی طراحی و توسعه داده شد. این الگوریتم باهدف ارائه راه‌حل‌های کارآمد برای چالش‌های عملی این مسئله ارائه شده است.

امین طهماسبی و زره پوش [۳۱] در پژوهشی به ارائه مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مسئله مسیریابی وسیله نقلیه چندمحصولی با پنجره زمانی و تقاضای فازی(موردمطالعه: شرکت قفلیران) پرداختند. مدل ارائه‌شده در این پژوهش، توسط نرم‌افزار گمز حل‌شده و نتایج نسبت به عملکرد جاری شرکت، بهبود بسیار مناسبی را نشان داد. للله آهی‌زاده و عمل‌نیک [۳۲] مدلی برای طراحی و بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین تحت شرایط اختلال با در نظر گرفتن مسئله مکانیابی–مسیریابی ارائه کردند. شبکه شامل چهار سطح تأمین، تولید، توزیع و مشتری است که اختلالات ناشی از تغییر در تقاضا یا ظرفیت توسط مشتریان یا تأمین‌کنندگان در آن بررسی شد. مدل با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی در نرم‌افزار گمز حل و تحلیل حساسیت با سناریوهای مختلف تقاضا انجام گرفت. نتایج نشان داد مدل پیشنهادی از کارایی مطلوبی برخوردار است. فاطمی قمی و عسگریان [۳۳] مدلی برای مکانیابی مراکز توزیع و مسیریابی وسایل نقلیه ارائه کردند که هدف آن کاهش هزینه‌های توزیع، مصرف سوخت و انتشار CO_2 است. برای حل مدل در مقیاس بزرگ از یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شد. نتایج نشان داد این الگوریتم توانایی تولید راه‌حل‌های پارتو باکیفیت و پراکنش یکنواخت در فضای جواب را دارد. ارشادی و همکاران [۳۴] با در نظر گرفتن عواملی مانند بار و سرعت وسیله نقلیه، آلایندگی، شرایط مسیر و محیط به بهینه‌سازی هزینه‌های سوخت و دستمزد راننده پرداختند. آن‌ها مدلی احتمالی عددصحیح آمیخته خطی برای سامانه توزیع با جمع‌آوری و تحویل کالا ارائه کردند که هدف آن کمینه‌سازی هزینه‌ها است. حل مدل در ابعاد بزرگ با ترکیب دو الگوریتم فرابتکاری یادگیری ماشین حداکثری و برنامه‌ریزی ژنتیک انجام شد. نتایج نشان داد الگوریتم ترکیبی توسعه‌یافته دارای دقت بالا و سرعت بیشتر نسبت به روش‌های مشابه است. بایگان و همکاران [۳۵] مدلی برای مکانیابی، مسیریابی و توزیع کالاهای امدادی در شرایط زلزله ارائه کردند. اهداف پژوهش شامل افزایش احتمال عبور موفق از مسیرها، کاهش هزینه‌های امدادی و کاهش مازاد یا کمبود

[1] MD-EVRP-FTW-PD
[2] MCEVRP-PP

پرسنل امدادی است. مدل ریاضی با رویکرد محدودیت اپسیلون طراحی و با نرم‌افزار گمز در منطقه ۱۱ تهران به‌صورت مطالعه موردی حل شد. کرد و بهنامیان [۳۶] در پژوهشی با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای به مسأله مسیریابی سامانه توزیع مشارکتی مترو – کامیون پرداخته‌اند. هدف آن‌ها افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های کل شامل هزینه‌های کامیون، جریمه پنجره زمانی، انباشته کالا، عملیات مترو و نیروی کار است. نتایج نشان می‌دهد در نظر گرفتن درخواست‌های متغیر مشتریان موجب کاهش هزینه‌های توزیع می‌شود.

۳- جنبه جدید بودن و نوآوری تحقیق

با توجه به بررسی مقاله‌ها و پژوهش‌های مرتبط در حوزه مسیریابی خودروهای الکتریکی و مسئله مسیریابی با محدودیت بارگذاری، نشان می‌دهد که ترکیب دو مسئله تعیین هم‌زمان مکان ایستگاه‌های شارژ یا تعویض باتری و مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی همراه با تعیین اندازه ناوگان حمل‌ونقل و ارائه مدلی که این دو مبحث را دربرگیرد، تاکنون چندان مورد توجه قرار نگرفته است. ازآنجاکه وسایل نقلیه الکتریکی نسبت به وسایل نقلیه معمولی ظرفیت باری و ابعادی کمتری دارند، باید این دو محدودیت را به‌طور هم‌زمان به‌منظور ارائه یک راه‌حل بهینه و موجه در نظر گرفت. در این پژوهش مدلی برای مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با محدودیت حجم باری خودرو ارائه می‌شود که خودروها در صورت نیاز به شارژ باتری به نقاط شارژ مجدد رفته و باتری خود را شارژ کنند که تعداد و مکان ایستگاه‌های شارژ نیز جز متغیرهای تصمیم در مسئله حاضر هستند.

بنابراین با توجه به بررسی جامع ادبیات موضوع در حوزه مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی و مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ یا تعویض باتری، نوآوری‌های اصلی پژوهش حاضر را می‌توان در چند محور مکمل و به‌هم‌پیوسته دسته‌بندی کرد:

(۱) یکپارچه‌سازی هم‌زمان مکانیابی و مسیریابی در ناوگان الکتریکی: برخلاف بخش عمده‌ای از مطالعات پیشین که مکانیابی ایستگاه‌های شارژ/تعویض باتری و مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی را به‌صورت متوالی یا دومرحله‌ای بررسی کرده‌اند، در این پژوهش این دو تصمیم کلیدی به‌صورت هم‌زمان و در یک چارچوب یکپارچه تصمیم‌گیری می‌شوند. این یکپارچگی باعث افزایش کارایی عملیاتی و کاهش تصمیمات محلی غیر بهینه در سطح شبکه می‌شود ؛ بنابراین مدل یکپارچه پیشنهادی امکان درنظرگرفتن تعاملات واقعی بین این تصمیمات را فراهم کرده و منجر به بهبود عملکرد کلی شبکه توزیع می‌شود.

(۲) مدل‌سازی پیشرفته مصرف انرژی با درنظرگرفتن بار و بازیابی انرژی ترمز: در این پژوهش و در مدل پیشنهادی، مصرف انرژی وسایل نقلیه الکتریکی تنها تابعی از مسافت طی‌شده در نظر گرفته نشده است، بلکه اثر بار حمل‌شده و بازیابی انرژی ترمز نیز در مدل لحاظ شده است. این پالایش مدل مصرف انرژی موجب می‌شود مسیرهایی که از نظر انرژی کاراتر هستند—اگر از نظر مسافت کوتاه‌ترین نباشند—در فرآیند بهینه‌سازی ترجیح داده شوند، به عبارتی تصمیمات مسیریابی نه‌تنها بر اساس کوتاه‌ترین مسیر، بلکه بر اساس مسیرهای کم‌مصرف‌تر از نظر انرژی اتخاذ شوند که با واقعیت‌های عملکرد ناوگان الکتریکی سازگارتر است.

(۳) تلفیق تخصیص بار با تصمیمات مکانیابی و مسیریابی: یکی دیگر از نوآوری‌های پژوهش، لحاظ کردن هم‌زمان تصمیمات مربوط به میزان بار تحویلی به هر مشتری در کنار مسیریابی و مکان‌یابی است. این تلفیق امکان کاهش مصرف انرژی به‌ازای واحد مسافت را فراهم کرده و نقش مهمی در بهبود کارایی عملیاتی سیستم ایفا می‌کند.

(۴) تخصیص بهینه بار در کنار تصمیمات مسیریابی و مکانیابی: مدل حاضر با تلفیق تصمیمات مربوط به میزان بار تحویلی به هر مشتری با مسیریابی و مکان‌یابی، امکان کاهش مصرف انرژی به‌ازای واحد مسافت را فراهم می‌کند؛ موضوعی که در بسیاری از مدل‌های مسیریابی وسائل نقلیه الکتریکی نادیده گرفته شده است.

(۵) توسعه الگوریتم فراابتکاری VNS متناسب با ساختار مسئله یکپارچه: با توجه به پیچیدگی محاسباتی مسئله یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر با ساختارهای همسایگی مجزا و هماهنگ برای تصمیمات مکان‌یابی ایستگاه و برنامه‌ریزی بازدید مشتریان توسعه داده شده است که این طراحی باعث شده الگوریتم بتواند فضای جواب بزرگ مسئله را به‌صورت مؤثر جستجو کند و توانایی حل مسائل بزرگ‌مقیاس را با زمان محاسباتی معقول فراهم می‌کند.

(۷) ارائه شواهد عددی از منافع عملی یکپارچه‌سازی: نتایج محاسباتی نشان می‌دهد، مدل پیشنهادی منجر به کاهش ۲/۳٪ مصرف انرژی نسبت به مدل‌های مسیریابی وسائل نقلیه مرسوم، صرفه‌جویی ۸/۸۴٪ از طریق تخصیص بهینه بار و کاهش ۴۸/۳٪ زمان عملیات شارژ و بهبود بهره‌وری ناوگان در مقایسه با مدل‌های

مرسوم مدل‌های مسیریابی وسائل نقلیه و مدل‌های مسیریابی وسائل نقلیه الکتریکی شده است می‌شود. این امر بیانگر کارایی عملی و کاربردپذیری بالای رویکرد پیشنهادی است و برتری عملی رویکرد یکپارچه نسبت به رویکردهای تفکیکی است

مدل ریاضی ارائه‌شده در این پژوهش به‌گونه‌ای طراحی شده است که به‌صورت مستقیم منعکس‌کننده اهداف و ملاحظات مفهومی مطرح‌شده در بخش مقدمه باشد. به‌طور خاص، دغدغه‌های مربوط به اهداف پایداری زیست‌محیطی، کاهش مصرف انرژی، افزایش بهره‌وری و و بهبود کارایی عملیاتی ناوگان الکتریکی و بهبود کارایی عملیاتی شبکه توزیع، به‌طور صریح در تابع هدف و محدودیت‌های مدل لحاظ شده‌اند. تصمیمات مکانیابی ایستگاه‌های شارژ/تعویض باتری، مسیریابی وسایل نقلیه، تخصیص بار و مدیریت سطح شارژ باتری به‌صورت یکپارچه مدل‌سازی شده‌اند تا ارتباط متقابل میان این تصمیمات در سطح شبکه توزیع به‌درستی منعکس شود. بدین ترتیب، مدل ریاضی صرفاً یک فرمول‌بندی انتزاعی نبوده، بلکه ابزاری برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های واقعی در مدیریت ناوگان الکتریکی محسوب می‌شود.

برای مدل‌سازی مسئلهٔ، شامل مفروضات زیر می‌باشد: (۱) یک نوع محصول بین مشتریان توزیع می‌شود؛ (۲)یک نقطه دپو وجود دارد؛ (۳)افق برنامه‌ریزی متناهی است؛ (۴)تقاضای مشتریان در همه‌ی دوره‌های زمانی در ابتدای افق برنامه‌ریزی مشخص است؛ (۵)حداکثر تعداد وسائل نقلیه در دسترس محدود است؛ (۶)مبدا و مقصد همه وسائل نقلیه (گره صفر) یکسان است یعنی یک انبار مرکزی وجود دارد؛ (۷)هر مشتری در هر دوره حداکثر توسط یک وسیله نقلیه سرویس می‌گیرد؛ (۸) حداکثر مسافت قابل پیمایش وسائل نقلیه بدون تعویض باتری محدود است.

مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مورداستفاده در مدل پیشنهادی به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

مجموعه‌ها:

$i \in V, V=\{0,1,2,\ldots,n\}$	مجموع گره‌ها، گره صفر انبار (عرضه‌کننده) و مشتریان $v' = v/\{0\}$
$Q=\{n+1,n+2,\ldots,m\}$	مجموع گره‌های کاندیدا یا بالقوه برای استقرار ایستگاه‌های شارژ باتری
$t \in T, T=\{1,2,\ldots,p\}$	تعداد دوره‌های زمانی
$k \in K, K=\{1,2,\ldots,k\}$	تعداد وسیله نقلیه

پارامترها:

Q_k	ظرفیت وسیله نقلیه k ام
d_i^t	تقاضای مشتریi ام در دوره t ام
c_{ij}	هزینه جابه‌جایی از گره i به گره j
I_0^0	موجودی اولیه انبار مرکزی در ابتدای افق برنامه‌ریزی
B	عددی بزرگ
f_i	هزینه استقرار ایستگاه شارژ باتری در گره i ام

متغیرهای تصمیم:

x_{ij}^{kt}	اگر وسیله نقلیه k ام در دورهt از مشتری i ام/ انبار به مشتری j ام برود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر
q_i^{kt}	مقدار بار تحویل داده شده به مشتری i ام توسط وسیله نقلیه k ام در دوره t ام
y_i^{kt}	اگر گره i در دوره t توسط وسائل نقلیه k ملاقات شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر
u_i^{kt}	متغیری برای جلوگیری از ایجاد زیر تور
y_i	اگر ایستگاه شارژ باتری در گره i استقرار یابد برابر یک و در غیراین صورت برابر صفر
F_i^{kt}	میزان شارژ باتری باقیمانده کامیون k در گره i در دوره t

۴- مدل ریاضی پیشنهادی

$$\text{Min} \sum_{i\in v\cup Q}\sum_{j\in v\cup Q}\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} c_{ij}x_{ij}^{kt} + \sum_{i\in Q} f_i y_i \quad (۱)$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{i\in v\cup Q} x_{ij}^{kt} \le 1 \qquad \forall j \in v', j \ne i, t \in T \quad (۲)$$

$$\sum_{i\in v\cup Q}\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} x_{ii}^{kt} = 0 \quad (۳)$$

$$\sum_{i\in v\cup Q} x_{ij}^{kt} = \sum_{i\in v\cup Q} x_{ji}^{kt} \qquad \forall j \in v\cup Q, k \in K, t \in T \quad (۴)$$

$$\sum_{j\in v'\cup Q} x_{0j}^{kt} \le 1 \qquad \forall k \in K, t \in T \quad (۵)$$

$$q_j^{kt} \le BM * \sum_{i\in v\cup Q} x_{ij}^{kt} \qquad \forall j \in v', k \in K, t \in T \quad (۶)$$

$$\sum_{i\in v'} q_i^{kt} \le Q_k \qquad \forall k \in K, t \in T \quad (۷)$$

$$\sum_{t\in T} u_0^t = 0 \quad (۸)$$

$$u_i^t + 1 \le u_j^t + BM * (1 - \sum_{k \in K} x_{ij}^{kt}) \quad \forall i \in v, j \in v', t \in T \quad (۹)$$

$$F_i^{kt} \le md \quad \forall i \in v \cup Q, k \in K, t \in T \quad (۱۰)$$

$$F_j^{kt} \le F_i^{kt} - c_{ij} + BM(1 - x_{ij}^{kt}) \quad \forall i \in v \cup Q, j \in v, k \in K, t \in T \quad (۱۱)$$

$$F_i^{kt} \ge c_{ij} - BM(1 - x_{ij}^{kt}) \quad \forall i, j \in v \cup Q, k \in K, t \in T \quad (۱۲)$$

$$\sum_{i \in v} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} x_{ij}^{kt} \le BM y_j \quad \forall j \in Q \quad (۱۳)$$

$$q_i^{kt} \ge 0 \quad \forall k \in K, t \in T, i \in v' \quad (۱۴)$$

$$x_{ij}^{kt} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in v \cup Q, k \in K, t \in T \quad (۱۵)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in Q \quad (۱۶)$$

$$F_i^{kt} \ge 0 \quad \forall k \in K, t \in T, i \in v \quad (۱۷)$$

$$u_i^{kt} \ge 0 \quad \forall k \in K, t \in T, i \in v \quad (۱۸)$$

معادله (۱) تابع هدف مسئله می‌باشد که مجموع هزینه‌های حمل و نقل و هزینه نگهداری موجودی و هزینه استقرار ایستگاه‌های شارژ باتری را کمینه می‌نماید. محدودیت (۲) تضمین می‌کند که هر یک از مشتریان در یک دوره زمانی بیش از یک بار نمی‌توانند ملاقات شوند. محدودیت (۳) بیان می‌کند که یک وسیله نقلیه نمی‌تواند از یک مشتری به همان مشتری برود. عبارت (۴) تضمین می‌کند اگر در یک دوره زمانی مشخص وسیله نقلیه‌ای به گره وارد شده باشد باید در همان دوره از آن گره خارج شود. محدودیت (۵) بیان می‌کند که وسیله‌های نقلیه در هر روز حداکثر یک بار استفاده می‌شوند. محدودیت (۳) بیان می‌کند در صورتی میزان کالای حمل شده توسط یک وسیله نقلیه در یک روز برای یک مشتری مقدار می‌گیرد که آن وسیله نقلیه در آن روز مشتری مورد نظر را بازدید کرده باشد. محدودیت (۷) بیان میکند که میزان بار تحویل داده شده توسط هر وسیله نقیله در هر دوره باید از ظرفیت وسیله نقلیه کمتر باشد. محدودیت (۸) و (۹) برای جلوگیری از ایجاد زیر تور است. عبارت (۱۰) بیان می‌کند که حداکثر میزان شارژ باتری یک وسیله نقلیه محدود است. محدودیت (۱۱) بیان می‌کند که مقدار شارژ باقیمانده در یک وسیله نقلیه برابر با میزان شارژ باتری در مشتری قبلی منهای میزان مصرف باتری در مسیر بین دو مشتری می‌باشد. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که یک وسیله نقلیه تنها درصورتی بتواند از یک مشتری به مشتری بعدی برود که حداقل به اندازه مسافت بین دو نقطه شارژ داشته باشد. محدودیت (۱۳) بیان می‌کند که یک وسیله نقلیه تنها درصورتی به یک ایستگاه شارژ باتری می‌رود که آن ایستگاه استقرار یافته باشد. محدودیت‌های (۱۴) و (۱۵) و (۱۶) و (۱۷) و (۱۸) نوع متغیرها را بیان می‌کند.

۵- روش‌شناسی پژوهش

مسئله مورد تحقیق در رابطه با لجستیک و حمل‌ونقل می‌باشد که به دنبال شناسایی روش‌های مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی و در نظر گرفتن ایستگاه تعویض باتری، ارائه یک الگوریتم فرا ابتکاری برای حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی و در نظر گرفتن ایستگاه تعویض باتری و درنهایت تجزیه‌وتحلیل و ارائه راهکارهای بهینه است؛ بنابراین تحقیق حاضر یک تحقیق توسعه‌ای - کاربردی می‌باشد. روش انجام این پژوهش باتوجه‌به ادبیات موضوع و پژوهش‌های مشابه قبلی توسعه داده شده است. مسئله مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ با در نظر گرفتن سوخت‌گیری مجدد در ایستگاه‌های تعویض یا شارژ باطری به دلیل پیچیدگی‌های محاسباتی در زمره خانواده مسائل NP-hard می‌باشد [۱۷ ,۱۴, ۲۶] و حل آن‌ها در ابعاد بزرگ، از طریق نرم‌افزارهای موجود امکان‌پذیر نبوده و یا به مدت زمان بالایی نیاز دارند. به همین دلیل برای حل این‌گونه مسائل، از روش‌های فرابتکاری استفاده می‌شود. با بررسی الگوریتم‌های فرابتکاری، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر برای این مسئله انتخاب شد .یک دلیل این انتخاب، ساختار ساده‌تر و پارامترهای کمتر آن نسبت به سایر روش‌های فرابتکاری است که منجر به افزایش سرعت اجرا می‌شود [۳۷].

لازم به ذکر است انتخاب الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در این پژوهش صرفاً بر مبنای سادگی ساختار و تعداد کم پارامترهای کنترلی آن صورت نگرفته است. مرور ادبیات نشان می‌دهد که الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر و نسخه‌های توسعه‌یافته آن در طیف وسیعی از مسائل مکان‌یابی–مسیریابی و مسیریابی وسایل نقلیه برقی، به‌ویژه در شرایط وجود محدودیت‌های انرژی و ظرفیت، عملکردی رقابتی و پایدار داشته‌اند. برای مثال سوزا و همکاران [۳۸] و آفی و همکاران [۳۹] کارایی الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر را در حل یکپارچه مکان‌یابی ایستگاه‌های تعویض باتری و مسیریابی ناوگان گزارش کرده‌اند؛ همچنین ییلماز و کالایجی [۴۰] نیز نشان داده‌اند که الگوریتم جستجوی همسایگی

متغیر در مسئله مسیریابی وسایل نقلیه برقی با برداشت و تحویل همزمان [1] جواب‌های با کیفیت و زمان محاسبه مطلوبی ارائه می‌کند. علاوه‌بر این، مطالعات هوف و همکاران [۱۲] و یانگ و سان [۴۱] نیز نشان می‌دهند که الگوریتم‌های مبتنی بر جستجوی همسایگی برای این‌گونه مسائل ساختارمند بسیار مناسب هستند. بنابراین، انتخاب الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در این مطالعه بر مبنای هر دو معیار «مزیت‌های ساختاری» و «شواهد تجربی» صورت گرفته و با توجه به ماهیت ترکیبی مسئله حاضر (مکان‌یابی ایستگاه‌ها و مسیریابی همزمان) رویکردی مناسب محسوب می‌شود.

برای اعتبارسنجی مسئله، جواب الگوریتم پیشنهادی را با جواب نرم‌افزار GAMS مقایسه کردیم. در این قسمت ، روش حل مورد استفاده بررسی خواهد شد.

۵-۱- نمایش جواب

در مسئله مطرح شده پنج تصمیم بایستی گرفته شود که عبارت‌اند از:

(۱) در هر دوره از افق برنامه ریزی چه مشتریانی بازدید شوند.

(۲) چه مقدار محصول برای هر مشتری بازدید شده در یک دوره ارسال شود

(۳) ایستگاه‌های تعویض باتری در چه مکان‌هایی استقرار یابند

(۴) در هر دوره، مسیریابی چگونه باشد

(۵) در هر مسیر تعویض باتری در چه زمانی و در کدام ایستگاه باتری رخ دهد.

به‌منظور اتخاذ تصمیمات پنج‌گانه از یک ساختار ماتریسی برای نمایش جواب استفاده شده است. نمایش جواب دوبخشی می‌باشد. بخش اول شامل یک ماتریس باینری با ابعاد ۵*۴ است. در نمایش جواب به ازای هر مشتری در هر دوره یک سلول در نظر گرفته شده است. مقدار یک در سلول نشان‌دهنده بازدید مشتری مربوطه در دوره مشخص است. با توجه به ماتریس نمایش جواب، برنامه بازدید از مشتریان در افق زمانی برنامه‌ریزی مشخص می‌شود. سپس میزان ارسال کالا در هر بار بازدید برای هر مشتری مشخص می‌گردد. در هر بازدید از یک مشتری بایستی کل تقاضای مشتری از دوره فعلی تا دوره بازدید بعدی برای مشتری ارسال شود. بخش دوم جواب یک بردار با تعداد m سلول می‌باشد. یعنی به ازای هر مکان کاندید برای استقرار ایستگاه تعویض باتری یک سلول درنظر گرفته شده است. عدد صفر در سلول، عدم استقرار و عدد یک، استقرار ایستگاه تعویض باتری در مکان کاندید مورد نظر را نشان می‌دهد. شکل (۱) یک مثال از نمایش جواب با چهار مشتری و چهار دوره می‌باشد.

افق برنامه‌ریزی

بخش اول

مشتریان	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۰	۱	۱	۰	۱
۲	۱	۰	۱	۰	۰
۳	۱	۱	۰	۰	۰
۴	۱	۰	۰	۱	۰

مکان‌های کاندید

بخش دوم

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱

شکل (۱): نمایش جواب برای مثالی با چهار مشتری، پنج روز و هشت مکان کاندید

در بخش اول شکل بالا، مشتری دوم در دوره‌های اول و سوم بازدید می‌شود؛ لذا در بازدید دوره اول، محصولات مورد تقاضای مشتری برای دوره اول و دوم و در بازدید دوره سوم، محصولات مورد تقاضای مشتری برای دوره های سوم، چهارم و پنجم برای مشتری ارسال می‌شود. همچنین بر اساس بخش دوم جواب، در مکان‌های کاندید ۲،۳،۴ و ۸ ایستگاه تعویض باتری استقرار می‌یابد. سپس بر اساس برنامه بازدید و با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری، طرح مسیرهای روزانه و بازدید از ایستگاه‌های تعویض باتری شکل میگیرند.

۵-۲- الگوریتم مسیریابی روزانه

(۱) با توجه به بخش اول رشته جواب مشتریانی که در هر روز بایستی بازدید شوند را مشخص نمایید.

(۲) در هر روز بدون توجه به محدودیت ظرفیت باتری‌ها گام‌های زیر را اجرا کنید.

(۳) مشتریان را به ترتیب فاصله از دپو مرتب نمایید و از ابتدای لیست، مشتریان را انتخاب کنید.

(۴) مشتری انتخاب شده را به یک وسیله نقلیه تخصیص دهید و تور وسیله نقلیه را از دپو به مشتری و از مشتری به دپو شکل دهید.

(۵) بقیه مشتریان را به ترتیب انتخاب کنید. هر مشتری را بین تمامی یال‌های تورهای شکل گرفته قرار دهید همچنین در صورت وجود تور خالی مشتری را در تور خالی نیز جا داده و هزینه تخصیص

[1] EVRP-SPD

مشتری را محاسبه نمایید. در نهایت مشتری را به بهترین نقطه با کمترین هزینه تخصیص دهید.

(۶) برای همه مسیرها کمبود شارژ باتری را بررسی کنید. در هر مسیر از ابتدای مسیر شروع کنید و گره قبل از گرهای که با کمبود شارژ باتری مواجه می‌شود را انتخاب کرده از آنجا به نزدیکترین مرکز تعویض باتری رفته و دوباره به مسیر از قبل تعیین شده باز گردید. این کار را تا بررسی همه گره‌های داخل مسیر ادامه دهید.

۶- ساختار الگوریتم پیشنهادی جستجوی همسایگی متغیر برای مسئله

الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر چهار گام اصلی شامل: تولید جواب اولیه، فاز تکان‌دهنده، فاز جستجوی محلی و نهایتاً توقف دارد که در ادامه هر یک از گام‌ها برای مسئله مطرح توضیح داده می‌شود.

۶-۱- تولید جواب اولیه

جواب اولیه به طور تصادفی و با تولید ماتریس توصیف شده در زیر بخش ۵-۱ ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که تولید جواب اولیه تا یافتن یک جواب موجه ادامه می‌یابد.

۶-۲- مرحله تکان دهنده

هدف از این فاز ایجاد یک تغییر ناگهانی در جواب موجود می‌باشد. در این فاز از ۶ ساختار ایجاد همسایگی استفاده می‌شود که در دو دسته ساختارهای همسایگی مربوط به بازدید از مشتریان و دسته ساختارهای مربوط به مکان‌یابی مراکز تعویض باتری دسته‌بندی شده‌اند. تعداد ۴ ساختار همسایگی مربوط به تغییر بازدید مشتریان در روزهای افق برنامه هستند. همچنین ۲ ساختار همسایگی برای تغییر مکان مراکز تعویض باتری در نظر گرفته شده‌اند که در ادامه توضیح داده می‌شوند. ترتیب ساختارهای همسایگی بر اساس حجم تغییرات اعمالی آنها بر جواب از ساختار همسایگی ساده به ساختار همسایگی پیچیده مرتب شده است و ترتیب استفاده از آنها به ترتیب مشخص شده است. این موضوع بدین معنی است که ابتدا ساده‌ترین ساختار همسایگی اعمال می‌شود و در نهایت پیچیده‌ترین ساختار همسایگی اعمال می‌شود. در صورتی ساختار همسایگی تغییر می‌کند که در ۳۰ تکرار متوالی بهبودی در جواب حاصل نشود که این عدد توسط آنالیز تاگوچی تعیین شده است.

۶-۳- ساختارهای همسایگی مربوط به بازدید مشتریان در روزهای افق برنامه

(۱) کاهش تعداد بازدیدهای یک مشتری: یک مشتری به تصادف انتخاب می‌شود و یکی از سلول‌های مربوط به مشتری با مقدار یک، صفر می‌شود.

(۲) افزایش تعداد بازدیدهای مشتری: یک مشتری به تصادف انتخاب می‌شود و یکی از سلول‌های مربوط به مشتری با مقدار صفر به یک تبدیل می‌شود.

(۳) کاهش تعداد مشتریان بازدید شده در یک روز: به تصادف یک روز را انتخاب کنید سپس ، به تصادف مقادیر ۲ سلول از سلول‌های با مقدار یک در روز انتخاب شده را به صفر تغییر دهید.

(۴) افزایش تعداد مشتریان یک روز: به تصادف یک روز را انتخاب کنید سپس، به تصادف مقادیر ۲ سلول از سلول‌های با مقدار صفر در روز انتخاب شده را به یک تغییر دهید.

۶-۴- ساختارهای همسایگی مکان‌یابی

(۱) کاهش یک مکان : یک نقطه با مقدار یک به تصادف انتخاب می‌شود و مقدار آن صفر می‌شود.

(۲) افزایش یک مکان: یک نقطه با مقدار صفر به تصادف انتخاب می‌شود و مقدار آن یک می‌شود.

۶-۵- مرحله جستجوی محلی

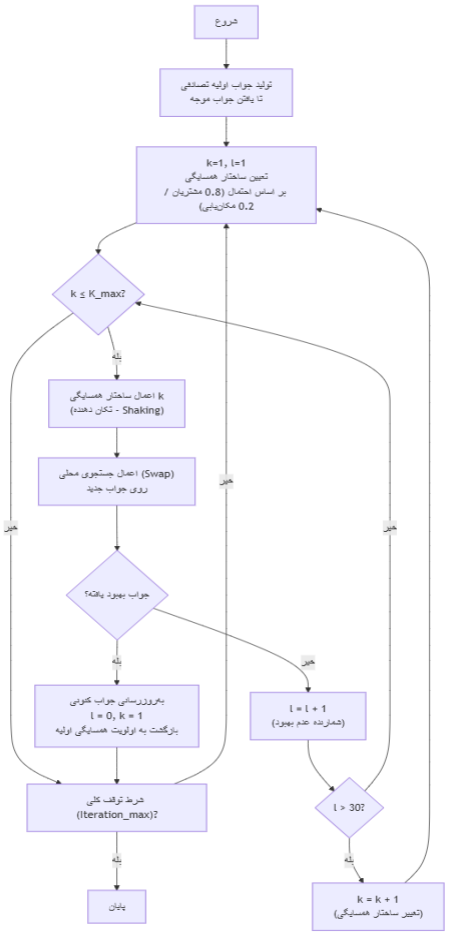
هدف از این مرحله پیدا کردن جواب‌های بهینه محلی است. پس از ایجاد همسایگی در این مرحله بر روی جواب تغییر پیدا کرده روش‌های جستجوی محلی اعمال می‌شوند. در این مقاله از جستجوی محلی Swap استفاده شده است.

(۱) مشتریانی که در تکانه مربوطه ترکیب بازدید آنها تغییر کرده است را به ترتیب انتخاب کنید. سپس جستجوی محلی Swap را بر روی سول‌های مربوط به مشتری انتخاب شده اعمال کنید برای این کار هر بار یک سلول با مقدار یک و یک سلول با مقدار صفر به تصادف از سلول‌های مربوط به مشتری مربوطه انتخاب می‌شود و مقادیر آنها جا به جا می‌شوند. این کار تا عدم بهبود جواب در ۱۰ تکرار متوالی ادامه می‌یابد.

(۲) در صورتی که تکانه مربوط به بخش دوم رشته جواب باشد آنگاه دو نقطه در بخش دوم رشته جواب به تصادف انتخاب شده و مقادیر آنها جا به جا می‌شوند این کار تا عدم بهبود جواب در ۱۰ تکرار متوالی ادامه می‌یابد.

۶-۶- شرط توقف الگوریتم

در الگوریتم پیشنهادی، اگر در یک ساختار همسایگی پس از اجرای عمل تکان‌دهنده [1] به تعداد مشخصی تکرار [2] هیچ بهبودی در جواب حاصل نشود، الگوریتم به ساختار همسایگی بعدی منتقل می‌شود. پس از آن‌که همه ساختارهای همسایگی طی شدند، در صورت عدم بهبود، فرآیند جستجو از اولین ساختار همسایگی مجدداً آغاز می‌گردد. این چرخه تا رسیدن به حداکثر تعداد تکرار مجاز [3] ادامه پیدا می‌کند. بدین ترتیب، شرط توقف الگوریتم رسیدن به تعداد تکرار مجاز است. همچنین در ابتدای هر تکرار، با احتمال ۰/۸ یک ساختار همسایگی مربوط به بازدید مشتریان و با احتمال ۰/۲ یک ساختار همسایگی مربوط به مکان‌یابی ایستگاه‌ها انتخاب می‌شود. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل (۲): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

[1] Shaking
[2] Shakeiter
[3] Iterationmax

۷-تشریح مسئلهٔ مورد مطالعه

در مقاله راجش و جین [۲۸] یک مدل ریاضی برای یک وسیله نقلیه الکتریکی تکی بدون در نظر گرفتن افق برنامه‌ریزی و با ایستگاه‌های شارژ ثابت و مشخص، ارائه گردید. مسئله مورد بررسی در این پژوهش براساس مسئله مورد نظر آنها با افزودن فرضیاتی (شامل تعیین مکان ایستگاه‌های شارژ باتری، برنامه‌ریزی در یک افق زمانی مشخص، استفاده از ناوگان حمل‌ونقل) توسعه داده شده است.

در این پژوهش یک مسئله مسیریابی وسائل نقلیه الکتریکی و مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ باتری در یک ناوگان همگن بررسی می‌شود که در آن وسائل نقلیه‌ها به‌صورت روزانه و در طول افق برنامه‌ریزی تقاضای مشتریان را تحویل می‌دهند. باتوجه‌به محدودیت ظرفیت باتری‌ها در طول مسیر یک وسیله نقلیه ممکن است با کمبود شارژ مواجه شده و برای ادامه مسیر نیاز به تعویض باتری داشته باشد، لذا مکان‌یابی مراکز تعویض باتری از بین مکان‌های بالقوه اهمیت زیادی در کاهش هزینه‌های توزیع خواهد داشت. در مواردی که مکان کاندیدا در موقعیت مشتری قرار دارد از یک گره مجازی برای نشان‌دادن آن در مجموعه مکان‌های کاندیدا استفاده می‌شود. استقرار ایستگاه تعویض در هر مکان کاندیدا یک هزینه ثابت دارد. اهداف مدل پیشنهادی شامل کمینه‌سازی هزینه‌های مسیریابی و مکان‌یابی مراکز تعویض باتری می‌باشد. در این مسئله تصمیمات زیر گرفته می‌شود.

(۱) در چه بازه‌های زمانی از افق زمانی برنامه‌ریزی از یک مشتری بازدید به عمل آید.

(۲) در کدام مکان‌های کاندید ایستگاه‌های تعویض باتری استقرار یابد.

(۳) هر مشتری در هر روز به چه وسیله نقلیه‌ای تخصیص یابد.

(۴) توالی بازدید از مشتریان در هر مسیر چگونه است.

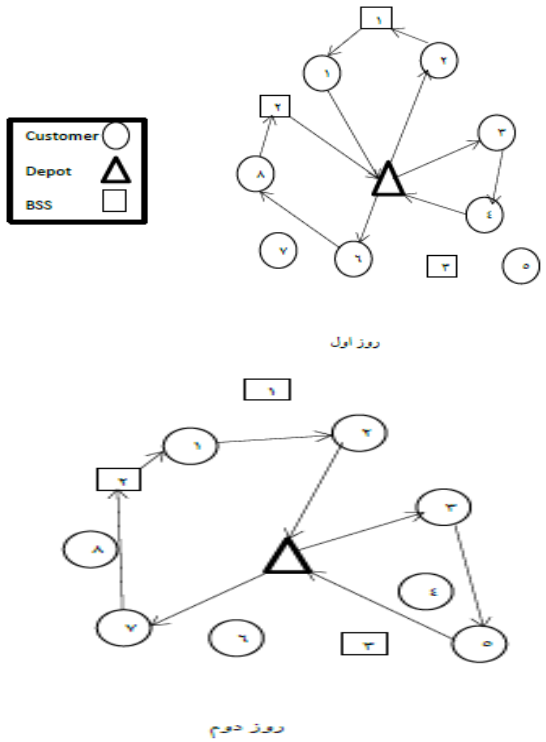
(۵) در هر مسیر از کدام یک از مراکز تعویض باتری بازدید به عمل آید و توالی بازدید از آنها در یک مسیر چگونه باشد.

۸-تجزیه و تحلیل داده‌ها و یافته‌ها

۸-۱- مثال عددی تبیینی از مسئله

به‌منظور بیان بهتر مسئله یک مثال عددی با تعداد ۸ مشتری، ۳ وسیله حمل‌ونقل، ۳ مکان کاندیدا برای استقرار ایستگاه تعویض باتری و ۲ روز در نظر گرفته شده است. باتوجه‌به شکل زیر، از ۳

مکان کاندید برای استقرار ایستگاه تعویض باتری تنها در مکـان ۱ و ۲ ایستگاه تعویض تأسیس می‌گـردد. در روز اول از هـر ۳ وسـیله نقلیـه استفاده می‌شـود. در مسـیر اول وسـیله نقلیـه ۱ ابتـدا مشـتری ۲ را بازدید می‌کند و به دلیل کمبود شارژ باتری بـرای تعـویض بـاتری بـه ایستگاه تعـویض بـاتری ۱ مـی‌رود و بعـد از آن مشـتری ۱ را بازدیـد می‌کند و به محل دپو باز می‌گردد. در مسیر دوم وسیله نقلیه ۲ ابتـدا مشتری ۳ و سپس مشتری ۴ را بازدیـد نمـوده و بـه محـل دپـو بـاز می‌گردد. در مسیر سـوم وسـیله نقلیـه ۳ ابتـدا مشـتری ۶ و سـپس مشتری ۸ را بازدید می‌کنـد و بـه دلیـل کمبـود شـارژ بـاتری بـرای تعویض باتری به ایستگاه تعویض باتری ۲ می‌رود و از آنجـا بـه محـل دپو باز می‌گردد. مشتری ۵ و ۷ به دلیل عدم نیاز بـه محصـول در روز اول بازدید نمـی‌شـوند. در روز دوم تنهـا از ۲ وسـیله نقلیـه اسـتفاده می‌شود. در مسیر اول وسیله نقلیه ۱ ابتدا مشتری ۷ را بازدید می‌کند و به دلیل کمبود شارژ باتری برای تعویض باتری به ایسـتگاه تعـویض باتری ۲ می‌رود و بعد از آن مشتری ۱ و سپس مشـتری ۲ را بازدیـد می‌کند و به محل دپو باز می‌گردد. در مسیر دوم وسیله نقلیه ۲ ابتـدا مشتری ۳ و سپس مشتری ۵ را بازدیـد نمـوده و بـه محـل دپـو بـاز می‌گردد. مشتری ۴، ۶ و ۸ به دلیل عدم نیاز به محصـول در روز دوم بازدید نمی‌شوند که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): یک مسئله نمونه با ۸ مشتری، ۳ کامیون، افق برنامه‌ریزی ۲ روزه و ۳ مکان کاندید برای ایستگاه تعویض باتری

۸-۲- مطالعه عددی

فرض کنید یک شرکت توزیع کالا باید تقاضای مشتریان را که در نقاط مختلفی قرار دارند، تحویل دهد. هر مشتری تنها یک نوع کالا را سفارش مـی‌دهـد. کالاهای سفارش داده شده مشتریان دارای وزن و ابعاد متفاوتی است؛ از طرفی ناوگان شرکت از نوع الکتریکی است که دارای یک باتری با ظرفیت مشخص و نرخ مصرف وابسته به مسافت است که با پیمودن مسافت از شارژ خودرو کاسته مـی‌شـود؛ همچنین خودروهای الکتریکی دارای ظرفیت وزنی و حجمی یکسـانی هستند. هدف شرکت، تعیین ترتیب بازدید مشتریان و مکـان ایسـتگاه‌هـای شارژ باهـدف کاهش مسافت طی شده است که باید محـدودیت‌هـای مرتبط با سطح شارژ باتری، محدودیت وزنی و ابعاد خودرو در نظر گرفته شود. برای مثال، فرض کنید یک شرکت باید تقاضای ۶ مشتری را از انبار اصلی ارسال کند. در شبکه حمـل‌ونقـل ۲ ایستگاه شارژ مجدد نیز وجود دارد. اطلاعات مربوط به مشتریان و وسایل نقلیه مطابق جدول‌های (۱) و (۲) است.

جدول (۱): نمونه مسئله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی حل شده

گره	انبار	مشتری ۱	مشتری ۲	مشتری ۳	مشتری ۴	مشتری ۵	مشتری ۶	ایستگاه ۱ شارژ	ایستگاه ۲ شارژ
مختصات X	۵۰	۴۰	۵۰	۶۰	۶۰	۵۰	۴۰	۵۰	۵۰
مختصات Y	۵۰	۶۰	۷۰	۶۰	۴۰	۳۰	۴۰	۴۰	۶۰
تقاضا	۰	۲۰	۶۰	۴۰	۴۰	۸۰	۷۰	۰	۰
وزن	۰	۸/۱	۵/۲	۳/۳	۹/۲	۱/۳	۴/۱	۰	۰
ابعاد	۰	۲/۱	۱	۱/۱	۳/۱	۰۵/۱	۹/۰	۰	۰

حال مجموعه مسائل معیار برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی برای مـدل مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی از دو گروه مسائل تشکیل شده است:

گروه ۱: شامل ۷ نمونه کوچک مسئله (حداکثر ۱۰۰ مشـتری) اسـت که در آنها مقادیر حد بالایی بهینه آنها در [۱] ارائه شده است.

گروه ۲: شامل ۱۰ نمونـه مسـائل بزرگتـر (حـداکثر ۱۰۰۰ مشـتری) است که در آنها مقادیر کران بالایی آنها ارائه نشده است.

اولین گروه از مسائل معیار برای مدل مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با گسترش نمونه‌های شناخته‌شده مسائل مسیریابی خودروهای متداول از کریستوفیدس و ایلون [۱۷] ایجاد شده است.

جدول (۲): اطلاعات مربوط به مسائل نمونه

ردیف	مسئله معیار	تعداد مشتری	تعداد ایستگاه کاندید
۱	E-n22-k4	۲۲	۴
۲	E-n23-k3	۲۳	۳
۳	E-n30-k3	۳۰	۳
۴	E-n33-k4	۳۳	۴
۵	E-n51-k5	۵۱	۵
۶	E-n76-k7	۷۶	۷
۷	E-n101-k8	۱۰۱	۸

در این پژوهش ما با استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر برای حل مدل مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی استفاده کردیم. الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر تلاش می‌کند تا راه‌حل‌های باکیفیت بالا را به طور کارآمد پیدا کند. یک‌فاز راه‌حل‌های اولیه را می‌سازد که سپس توسط الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر از طریق عملیات و عملگرهای مختلف، بهبود می‌یابد.

حال برای ارزیابی عملکرد الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر برای مدل مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی، الگوریتم پیشنهادی را بر روی ویندوز ۱۰ با رم ۸،۰ گیگابایت، CPU 2.2 گیگاهرتز، با اندازه جمعیت ۲۰۰ نفر پیاده سازی کردیم. حداکثر تعداد ارزیابی‌ها n۲۵۰۰۰ است که $n = |C|+1+|S|$ اندازه نمونه مسئله است. در این تحقیق سعی شده است پارامتری را برای محدوده های مختلف تنظیم کنیم تا بهترین نتایج را بدست آوریم. پارامتر POP SIZE ثابت برابر با ۲۰۰ نفر است، اما برای کار در نمونه های بزرگ ایده آل نیست زیرا جمعیت به اندازه کافی متنوع نیست تا یک راه حل بهینه محلی خوب به دست آید. بااین‌حال، برای اندازه مسئله متوسط و کوچک خوب است. همچنین اثربخشی الگوریتم پیشنهادی بر اساس چندین معیار شامل هم‌گرایی سرعت جمعیت، بهترین نتیجه، بدترین نتیجه، میانگین نتیجه، زمان اجرا و تثبیت ارزیابی می‌شود:

در این تحقیق تعداد دفعات تکرار الگوریتم برای دستیابی به پاسخ بهینه ۲۰ عدد تعیین شده است. با توجه به نمودار زمان اجرا، همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، زمان اجرا به تعداد مشتریان، ایستگاه های شارژ و تعداد مسیرها بستگی دارد. در نمونه X-n1001-k43، زمان اجرای الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر کمتر از نمونه X-n916-k207 است. بنابراین، تعداد مسیرها در هر نمونه با زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی متناسب است. به طور کلی، زمان اجرای الگوریتم برای نمونه های بزرگ. نسبتا سریع (۵۰۰ ثانیه حدودا) است. علاوه بر این، ما همچنین اثربخشی الگوریتم پیشنهادی را با مقدار کران بالا ارزیابی می‌کنیم. همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است، نتایج آزمایش نشان می دهد که بهترین میانگین نتایج به دست آمده توسط الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در اکثر موارد حدود ۱/۵۶٪ کمتر از مقدار کران بالایی است. در طول آزمایش، بهترین مقادیر هدف زمانی به دست آمد که اندازه جمعیت بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ بود. با چنین تعدادی از افراد، جمعیت ها می توانند به سرعت سازگار شوند. بااین‌حال، زمانی که اندازه مسئله بسیار زیاد باشد، تعداد مشتریان زیاد باشد، تنوع جمعیت کاهش می‌یابد. با بررسی نتایج جدول (۴)، زمانی که الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر پیاده سازی می شود، مدل زمان اجرای بسیار بهتری دارد.

جدول (۳): مقدار بهینه تابع هدف بدست آمده از مسائل گروه اول و الگوریتم پیشنهادی

ردیف	مسئله معیار	حد بالا	الگوریتم VNS
۱	E-n22-k4	۳۸۴/۶۷	۳۸۴/۶
۲	E-n23-k3	۵۷۳/۱۳	۵۷۱/۶۹۴
۳	E-n30-k3	۲۵/۵۱۱	۴۷/۵۰۹
۴	E-n33-k4	۸۹/۸۶۹	۶۲/۸۴۵
۵	E-n51-k5	۱۷/۵۷۰	۰۸/۵۴۲
۶	E-n76-k7	۳۶/۷۲۳	۳۰/۷۱۷
۷	E-n101-k8	۸۸/۸۹۹	۶۹/۸۷۲

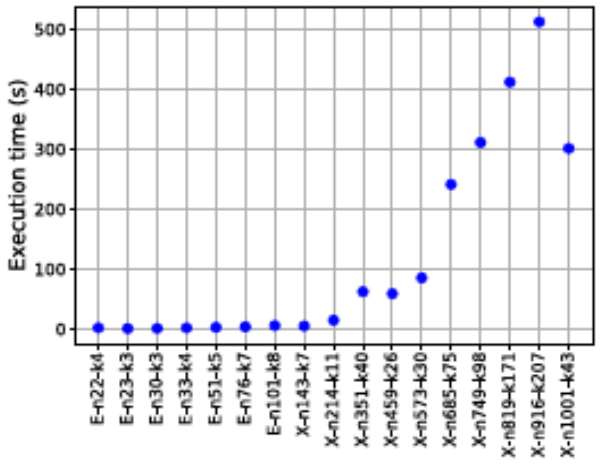
برای اعتبارسنجی عملکرد الگوریتم و مدل پیشنهادی، یک الگوریتم پایه (شبیه سازی تبرید) در کنار الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی جستجوی همسایگی متغیر در نظر گرفته شده است و مقدار بهینه تابع هدف بدست آمده از مسائل گروه اول و الگوریتم پیشنهادی جستجوی همسایگی متغیر با شبیه سازی تبرید مقایسه شده است.

در جدول (۴) مقدار بهینه تابع هدف بدست آمده از مسائل گروه اول و الگوریتم شبیه سازی تبرید نشان داده شده است.

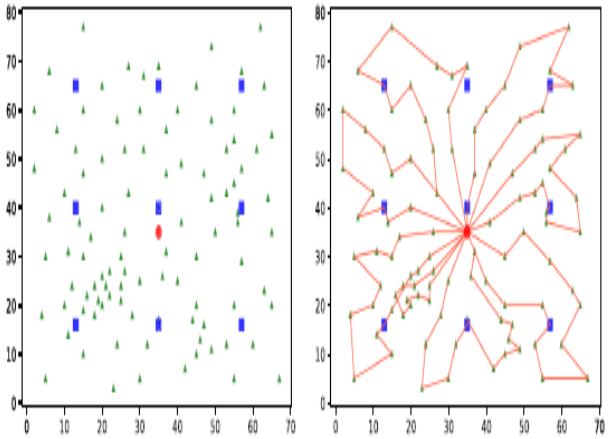
جدول (۴): مقدار بهینه تابع هدف بدست آمده از مسائل گروه اول و الگوریتم شبیه سازی تبرید(SA)

ردیف	مسئله معیار	حد بالا	الگوریتم SA
۱	E-n22-k4	۳۸۴/۶۷	۴۹۰/۲۱
۲	E-n23-k3	۵۷۳/۱۳	۷۶۰/۰۳
۳	E-n30-k3	۲۵/۵۱۱	۲۸/۶۲۶
۴	E-n33-k4	۸۹/۸۶۹	۱۶/۹۷۶
۵	E-n51-k5	۱۷/۵۷۰	۰۱/۶۶۱
۶	E-n76-k7	۳۶/۷۲۳	۹۶/۸۶۸
۷	E-n101-k8	۸۸/۸۹۹	۴۳/۱۰۶۵

با توجه به جدول (۳) و (۴) نشان می دهد که الگوریتم شبیه سازی تبرید در صورت اجرا می‌تواند سرعت عملکرد را به طور متوسط ۱۰ تا ۲۵ درصد در مقایسه با نتایج بهبود بخشد؛ اما این در حالی است که الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر بهترین عملکرد را برای تمام نمونه‌های داده با کوتاه‌ترین مسیر و میانگین زمان اجرا دارد. الگوریتم الگوریتم شبیه سازی تبرید نسبت به الگوریتم‌های مطالعات قبلی تقریباً ۵٪ بهتر در مجموعه‌داده‌های کوچک و ۲۳/۵٪ در مجموعه داده‌های بزرگ است. اما الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر استراتژی پیشنهادی را ترکیب می‌کند و نسبت به الگوریتم شبیه سازی تبرید و حتی جدیدترین نوع الگوریتم شبیه سازی تبرید نیز در تمام نمونه‌های مجموعه داده‌ها در مقدار هدف متوسط بهتر عمل می‌کند. به طور خاص، در مقایسه با الگوریتم شبیه سازی تبرید، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در مجموعه داده‌های کوچک ۵/۷٪ و در مجموعه داده‌های بزرگ ۴٪ بهتر از الگوریتم شبیه سازی تبرید است. این به این دلیل است که استراتژی پیشنهادی، همراه با یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ، می‌تواند هزینه یافتن راه‌حل‌های بهینه را در مقیاس داده‌ها به میزان قابل توجهی کاهش دهد. یافته‌های جداول نشان می‌دهد که پتانسیل الگوریتم جستجوی حریصانه همسایگی متغیر را در بهبود عملکرد هر الگوریتم برای یافتن مسیرهای شارژ بهینه با الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر نشان می‌دهد که بهترین الگوریتم عملکردی است.



شکل (۴): نمودار زمان اجرای حل بهینه مسائل معیار بر اساس الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر پیشنهادی



شکل (۵): نمودار مسئله E-n101-k8 و پاسخ بهینه آن با استفاده از الگوریتم پیشنهادی

۹ -تحلیل حساسیت

به منظور سنجش قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی و درک اثر تغییرات پارامترهای کلیدی بر روی راه‌حل بهینه، تحلیل حساسیت روی چهار پارامتر اصلی انجام گرفت. این پارامترها عبارتند از: (۱) ظرفیت باتری خودروها (ماکزیمم مسافت قابل طی، (۲) هزینه ثابت استقرار ایستگاه‌های شارژ، (۳) تقاضای مشتریان و (۴) هزینه حمل‌ونقل. برای این تحلیل، مسئله نمونه E-n22-k4به عنوان پایه در نظر گرفته شد و مجدداً مورد ارزیابی قرار گرفت. تغییرات پارامترهای کلیدی به صورت مجزا در سطوح مختلف (±۱۰٪، ±۲۰٪، ±۳۰٪) اعمال و تاثیر آن بر مقدار نهایی تابع هدف با استفاده از ساختار مدل، محاسبه و تحلیل گردید مدل برای هر سناریو مجدداً حل شد.

۹-۱- اثر تغییرات ظرفیت باتری

نتایج تغییرات ظرفیت باتری بر هزینه کل عملیات در جدول(۵) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل به کاهش ظرفیت باتری حساسیت بسیار بیشتری نسبت به افزایش آن نشان می‌دهد. کاهش ۳۰٪ در ظرفیت باتری منجر به افزایش ۱۲/۵٪ در هزینه کل می‌شود. این افزایش هزینه عمدتاً ناشی از نیاز به توقف‌های بیشتر برای تعویض/شارژ باتری و در نتیجه افزایش مسافت کل طی شده و زمان عملیات است. از سوی دیگر، افزایش ظرفیت باتری اثر محدود و غیرخطی بر هزینه دارد، که نشان‌دهنده وجود یک نقطه بهینه برای این پارامتر در طراحی ناوگان است.

جدول (۵): نتایج تحلیل حساسیت برای پارامتر ظرفیت باتری

درصد تغییر هزینه نسبت به حالت پایه	مقدار تابع هدف (هزینه کل)	تغییر در ظرفیت باتری
٪ ۱۲/۵+	۴۳۲/۷	٪ ۳۰-
٪ ۶/۲+	۴۰۸/۵	٪ ۲۰-
٪ ۰/۹+	۳۸۸/۰	٪ ۱۰-
٪ ۰	۳۸۴/۶	حالت پایه
٪ ۰/۴۴-	۳۸۲/۹	٪ ۱۰+
٪ ۰/۹۱-	۳۸۱/۱	٪ ۲۰+
٪ ۱/۳۵-	۳۷۹/۴	٪ ۳۰+

۹-۲- اثر تغییرات هزینه استقرار ایستگاه‌های شارژ

جدول (۶) تأثیر تغییر در هزینه ثابت استقرار ایستگاه‌های شارژ را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، رابطه بین این پارامتر و هزینه کل تقریباً خطی است. افزایش ۳۰٪ در هزینه استقرار، منجر به افزایش ۴/۲٪ در هزینه کل می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که اگرچه این هزینه سهم قابل‌توجهی در هزینه کل دارد، اما مدل برای جبران آن، استراتژی مسیریابی را به گونه‌ای می‌کند که تا حد امکان از ایستگاه‌های موجود بهره‌برداری بهینه شود و نیاز به کردن ایستگاه‌های جدید کاهش یابد.

جدول (۶): نتایج تحلیل حساسیت برای پارامتر هزینه استقرار ایستگاه

درصد تغییر هزینه نسبت به حالت پایه	مقدار تابع هدف (هزینه کل)	تغییر در هزینه استقرار
٪۴/۱-	۳۶۹/۰	٪۳۰-
٪۲/۸-	۳۷۳/۸	٪۲۰-
٪۱/۴-	۳۷۹/۲	٪۱۰-
٪۰	۳۸۴/۶	حالت پایه
٪۱/۴+	۳۹۰/۰	٪۱۰+
٪۲/۸+	۳۹۵/۴	٪۲۰+
٪۴/۲+	۴۰۰/۸	٪۳۰+

۹-۳- اثر تغییرات تقاضای مشتریان

تحلیل حساسیت بر روی پارامتر تقاضا نشان داد که مدل پیشنهادی در برابر افزایش تقاضا بسیار مقاوم است . جدول (۷) افزایش ۳۰٪ در تقاضا تنها منجر به افزایش ۸/۱٪ در هزینه کل شده است. این امر نشان‌دهنده کارایی الگوریتم و مدل در تخصیص بهینه بار و مدیریت مسیرها است. مدل با توزیع هوشمندانه بار بین خودروها و برنامه‌ریزی دقیق بازدیدها، از افزایش غیرخطی هزینه جلوگیری می‌کند. با توجه به داده های جدول (۷) نشان می‌دهد که مدل در مدیریت افزایش تقاضا کارایی بالایی دارد و از افزایش نامتناسب هزینه جلوگیری می‌کند.

جدول (۷): نتایج تحلیل حساسیت برای پارامتر تقاضای مشتریان

درصد تغییر هزینه نسبت به حالت پایه	مقدار تابع هدف (هزینه کل)	تغییر در تقاضا
٪ ۸/۱-	۳۵۳/۴	٪ ۳۰-
٪ ۵/۴-	۳۶۳/۷	٪ ۲۰-
٪ ۲/۷-	۳۷۴/۲	٪ ۱۰-
٪ ۰	۳۸۴/۶	حالت پایه
٪ ۲/۷+	۳۹۵/۰	٪ ۱۰+
٪ ۵/۸+	۴۰۷/۰	٪ ۲۰+
٪ ۸/۱+	۴۱۵/۸	٪ ۳۰+

۹-۴- اثر تغییرات هزینه حمل‌ونقل

برای کامل بودن تحلیل، اثر تغییرات هزینه حمل‌ونقل نیز بررسی شد. همان‌طور که از جدول(۸) برمی‌آید، این رابطه کاملاً خطی است.

جدول (۸): نتایج تحلیل حساسیت برای پارامتر هزینه حمل‌ونقل

تغییر در هزینه حمل‌ونقل	مقدار تابع هدف (هزینه کل)	درصد تغییر هزینه نسبت به حالت پایه
٪ ۳۰-	۲۶۹/۲	٪ ۳۰-
٪ ۲۰ -	۳۰۷/۷	٪ ۲۰-
٪ ۱۰-	۳۴۶/۱	٪ ۱۰-
حالت پایه	۳۸۴/۶	٪۰
٪ ۱۰+	۴۲۳/۱	٪ ۱۰+
٪ ۲۰+	۴۶۱/۵	٪ ۲۰+
٪ ۳۰+	۵۰۰/۰	٪ ۳۰+

۹-۵- جمع‌بندی تحلیل حساسیت

به طور خلاصه، نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که:

مدل پیشنهادی بیشترین حساسیت را به کاهش ظرفیت باتری خودروها دارد به عبارتی کاهش ظرفیت باتری مهم‌ترین فاکتور تأثیرگذار بر افزایش هزینه کل است. این یافته بر اهمیت توسعه باتری‌های با ظرفیت بالا و همچنین برنامه‌ریزی دقیق برای مدیریت انرژی در ناوگان الکتریکی تأکید می‌کند.

مدل نسبت به تغییرات هزینه استقرار ایستگاه‌ها و تقاضا رفتار نسبتاً خطی، باثبات و قابل پیش‌بینی دارد که نشان‌دهنده پایداری مدل در شرایط مختلف است.

توانایی مدل در مدیریت افزایش تقاضا با افزایش نسبتاً کم هزینه(به‌دلیل بهینه‌سازی مسیرها و تخصیص بار)، گواهی بر کارایی آن برای استفاده در مقیاس‌های واقعی و بزرگ است.

این تحلیل به طور جامع نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده نه تنها از پایداری بالایی برخوردار است، بلکه می‌تواند به عنوان ابزاری قابل اعتماد برای تصمیم‌گیران در زمینه برنامه‌ریزی ناوگان و زیرساخت‌های حمل‌ونقل الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مسئله مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ و تعویض باتری برای خودروهای الکتریکی با رویکردی چند منظوره و با تمرکز بر بهینه‌سازی شاخص‌های کلیدی مصرف انرژی، هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری و همچنین زمان عملیاتی در مسیرها موردبررسی و مدل‌سازی قرار گرفت. مدل طراحی‌شده در این پژوهش از الگوریتم جستجوی محله متغیر برای حل استفاده کرد. برای اعتبارسنجی عملکرد الگوریتم و مدل پیشنهادی، یک الگوریتم پایه (تبرید شبیه‌سازی‌شده) در کنار الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی جستجوی همسایگی متغیر در نظر گرفته شده است. به‌طورکلی، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده در صورت اجرا می‌تواند سرعت عملکرد را به طور متوسط ۱۰ تا ۲۵ درصد در مقایسه با نتایج بهبود بخشد؛ اما این در حالی است که الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر بهترین عملکرد را برای تمام نمونه‌های داده با کوتاه‌ترین مسیر و میانگین زمان اجرا دارد. الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده نسبت به الگوریتم‌های مطالعات قبلی تقریباً ۵٪ بهتر در مجموعه‌داده‌های کوچک و ۲۳/۵٪ در مجموعه داده‌های بزرگ است. اما الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر راهبرد پیشنهادی را ترکیب می‌کند و نسبت به الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده و حتی جدیدترین نوع الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده نیز در تمام نمونه‌های مجموعه داده‌ها در مقدار هدف متوسط بهتر عمل می‌کند. به طور خاص، در مقایسه با الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده ، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در مجموعه داده‌های کوچک ۵/۷٪ و در مجموعه داده‌های بزرگ ۴٪ بهتر از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده است. این به این دلیل است که استراتژی پیشنهادی، همراه با یک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ، می‌تواند هزینه یافتن راه‌حل‌های بهینه را در مقیاس داده‌ها به میزان قابل توجهی کاهش دهد. یافته‌های جداول نشان می‌دهد که پتانسیل الگوریتم جستجوی حریصانه جستجوی همسایگی متغیر را در بهبود عملکرد هر الگوریتم برای یافتن مسیرهای شارژ بهینه با الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر نشان می‌دهد که بهترین الگوریتم عملکردی است.

از دیگر یافته‌های قابل‌توجه این تحقیق، پایداری راه‌حل‌های تولیدشده توسط الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر است. آزمایش‌های مکرر روی مجموعه‌های مختلف از داده‌ها نشان داد که این الگوریتم نه تنها در دستیابی به نتایج بهینه تواناست، بلکه این نتایج از ثبات آماری بالایی نیز برخوردار هستند. انحراف معیار پایین در نتایج مختلف، بیانگر اطمینان‌پذیری این روش در محیط‌های

متفاوت مسئله است که یکی از ویژگی‌های حیاتی برای هر ابزار تصمیم‌سازی در محیط‌های عملیاتی محسوب می‌شود.

از نظر کاربردی نیز مدل ارائه‌شده در این پژوهش دارای قابلیت‌های فراوانی است. به‌ویژه در برنامه‌ریزی شهری، شرکت‌های توسعه‌دهنده زیرساخت، نهادهای سیاست‌گذار در حوزه حمل‌ونقل پاک، و حتی بخش خصوصی فعال در صنعت خودروهای برقی، می‌توانند از این مدل برای طراحی و اجرای شبکه‌های شارژ و تعویض باتری بهره‌برداری کنند. یکی از ویژگی‌های برجسته مدل پیشنهادی، انعطاف‌پذیری در پذیرش داده‌های ورودی گوناگون و قابلیت سفارشی‌سازی برای شرایط مختلف جغرافیایی، اقتصادی و عملیاتی است. این امر باعث می‌شود تا مدل قابلیت انطباق با مناطق شهری، حومه‌ای و حتی مسیرهای بین‌شهری را داشته باشد. از جنبه نظری نیز، این پژوهش توانسته گامی مهم در تلفیق روش‌های هوش محاسباتی با مدل‌سازی ریاضی کاربردی بردارد. ترکیب الگوریتم‌های جستجو با ساختارهای ریاضی بهینه‌سازی تک‌هدفه، راه‌حلی نوآورانه در مواجهه با مسائل پیچیده حوزه لجستیک و حمل‌ونقل فراهم آورده است. این رویکرد می‌تواند در سایر حوزه‌ها مانند مکان‌یابی تسهیلات عمومی، طراحی شبکه‌های حمل‌ونقل کالا، و حتی مسائل مدیریت بحران مورد استفاده قرار گیرد.

۱۱- پیشنهادات برای تحقیقات آتی

با توجه به یافته‌های این پژوهش، مسیرهای زیر می‌تواند به‌عنوان زمینه‌های مطالعاتی آتی مورد توجه قرار گیرد:

(۱) استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی یا هوشمندتر: توسعه و ترکیب الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر با سایر فرابتکاری‌ها مانند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک یا الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه برای بهبود سرعت همگرایی و افزایش کیفیت جواب‌ها.

(۲) مدل‌سازی شرایط عدم قطعیت: در این پژوهش تقاضا و پارامترها قطعی در نظر گرفته شدند. در تحقیقات آتی می‌توان تقاضای فازی یا تصادفی، تغییرات ترافیکی یا زمان شارژ نامطمئن را وارد مدل نمود.

(۳) ملاحظات زیست‌محیطی و چندهدفه: افزودن اهدافی مانند کاهش انتشار کربن یا کاهش استهلاک باتری و حل مدل در قالب بهینه‌سازی چندهدفه.

(۴) کاربرد در شبکه‌های بزرگ‌تر و واقعی‌تر: اعتبارسنجی مدل و الگوریتم در شبکه‌های واقعی توزیع شهری با تعداد زیاد مشتریان و ایستگاه‌ها و مقایسه آن با داده‌های میدانی.

(۵) در نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی و سیاست‌گذاری: افزودن هزینه‌های مرتبط با زیرساخت‌های شارژ، یارانه‌های دولتی یا سیاست‌های مالیاتی به مدل برای تحلیل سیاست‌های کلان در توسعه حمل‌ونقل برقی.

(۶) یکپارچه‌سازی با فناوری‌های نوین: بررسی تأثیر فناوری‌هایی مانند ایستگاه‌های شارژ سریع، شارژ بی‌سیم یا ایستگاه‌های شارژ سیار بر نتایج مدل و الگوریتم.

۱۲- مراجع

[1] A. K. Damodaram, L. Tulasi, and L. V. Reddy,"Optimization of Transportation and logistics costs to maximize revenue and efficiency of supply chain," International Journal for Research in Engineering Application & Management, vol. 5(10). pp. 7-13, 2022. DOI:10.35291/2454-9150.2020.0002

[2] S. Santoso, R. Nurhidayat, G. Mahmud, and A. M. Arijuddin, "Measuring the Total Logistics Costs at the Macro Level: A Study of Indonesia," Logistics, vol. 5(4), pp. 68-76, 2021. DOI:10.3390/logistics5040068

[3] Y. Li. T. Fengming, R. Zhu, "Vehicle-routing problem for low-carbon cold chain logistics based on the idea of cost–benefit," Complex & Intelligent Systems, vol. 11(157), pp. 2-17, 2025. DOI:10.1007/s40747-024-01756-x

[4] X. Pan, D. Lu, and Li, N, "Route Planning of Supermarket Delivery through Third-Party Logistics Considering Carbon Emission Cost," Mathematics, vol. 12(7), 1002. 2024. DOI:10.3390/math12071002

[5] R. R. Timilsina, J. Zhang, D.B. Rahut, K. Patradool, T. Sonobe, "Global drive toward net-zero emissions and sustainability via electric vehicles: an integrative critical review," Energy, Ecology and Environment , vol. 10, pp. 125-144, 2025. DOI:10.1007/s40974-024-00351-7

[6] J. Squalli, "Greening the roads: Assessing the role of electric and hybrid vehicles in curbing CO2 emissions," Journal of Cleaner Production , vol.434, 2024. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.139908

[7] A. Darbari, "Shaping the future: Improvements in the EV charging Infrastructure: A comparative analysis of Germany and India," World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences, vol.12(1), pp. 463-476, 2024. DOI:10.30574/wjaets.2024.12.1.0259

[8] B.S. Aljabri, E. S. Fararah, "Electric vehicle routing problem with time windows, battery swapping van, and energy consumption (EVRPTW-BSV-EC) ," World Journal of Advanced Research and Reviews, vol. 22(02), pp. 1914–1926, 2024. DOI:10.30574/wjarr.2024.22.2.1635

[9] Z. Liu, X. Ma, X. Liu, G. H. d. A. Correia, R. Shi, & W. Shang, "Optimizing Electric Taxi Battery Swapping Stations Featuring Modular Battery Swapping: A Data-Driven Approach," Applied Sciences, vol.13(3), pp. , 2023. DOI:10.3390/app13031984

[10] M. Bruglieria, S. Mancinib, F. Pezzellac, O. Pisacaned, S. Suracic, "A three-phase matheuristic for the time-effective electric vehicle routing problem with partial recharges," Electronic Notes in Discrete Mathematics, vol. 58, pp. 95–102, 2017. DOI:10.1016/j.endm.2017.03.013

[11] S. Shao, W. Guan, B. Ran, Z. He, J. Bi, "Electric Vehicle Routing Problem with Charging Time and Variable Travel Time," Mathematical Problems in Engineering, vol. 13. Pp, 2017. DOI:10.1155/2017/5098183
[12] J. Hof, M. Schneider, M. Goeke, "Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an AVNS algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops," Transportation Research Part B: Methodological, vol. 97, pp. 102–112, 2017. DOI:10.1016/j.trb.2016.11.009
[13] M. Schiffer, G. Walther, "The electric location routing problem with time windows and partial recharging," European Journal of Operational Research, vol.260, pp. 995–1013, 2017. DOI:10.1016/j.ejor.2017.01.011
[14] A. Montoya, C. Guéret, J.E. Mendoza, J.G. Villegas, "The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function," Transportation Research Part B: Methodological, vol.103, pp. 87-110, 2017. DOI:10.1016/j.eswa.2020.113714
[15] G. Macrina, L.D.P. Pugliese, F. Guerriero, G. Laporte, "The green mixed fleet vehicle routing problem with partial battery recharging and time windows," Computers and Operations Research, pp. 1-17, 2018. DOI:10.1016/j.cor.2018.07.012
[16] A. Verma, "Electric vehicle routing problem with time windows. recharging stations and battery swapping stations," EURO Journal on Transportation and Logistics, vol.7 (4) , pp. 415-451, 2018. DOI:10.1007/s13676-018-0136-9
[17] S. Zhanga, Y. Gajpalb, S.S. Appadoob, M.M.S. Abdulkaderb, "Electric vehicle routing problem with recharging stations for minimizing energy consumption," International Journal of Production Economics, vol.203, pp. 404–413, 2018. DOI:10.1016/j.ijpe.2018.07.016
[18]G. Fang, Y. Jun, Y. Chao, "Study on the Electric Vehicle Routing Problem in the Present of Charging Strategy and Battery Consumption," CMS, vol. 26 (9), pp.106-118, 2018.
[19] J. Paz, M. Granada-Echeverri, j.W. Escobar, "The multi-depot electric vehicle location routing problem with time windows," International Journal of Industrial Engineering Computations, vol. 9(1) , pp. 123-136, 2018. DOI:10.5267/j.ijiec.2017.4.001
[20] J. He, H. Yangb, T. Tangc, H. Huanga, "An optimal charging station location model with the consideration of electric vehicle's driving range," Transportation Research Part C, vol. 86, pp. 641–654, 2018. DOI:10.1016/j.trc.2017.11.026
[21] J. Li, F. Wang, and Y. He, "Electric Vehicle Routing Problem with Battery Swapping Considering Energy Consumption and Carbon Emissions," Sustainability, vol.12(24), pp. 105-137, 2020. DOI:10.3390/su122410537
[22] R. Raeesi, G. Konstantinos, "The electric vehicle routing problem with time windows and synchronised mobile battery swapping," Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 140 . pp.101-129, 2020. DOI:10.1016/j.trb.2020.06.012
[23] Y. Huang, K. M. Kockelman, "Electric vehicle charging station locations: Elastic demand, station congestion, and network equilibrium," Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 78, pp. 102-179, 2020. DOI:10.1016/j.trd.2019.11.008
[24] S. Soltanzadeh, E. Mardan, & R. Kamran Rad, "An Electric Vehicle Routing Problem with Battery Swap and Battery Recharge Approach," Journal of Quality Engineering and Production Optimization, Vol.5(2), pp. 1-20, 2020. DOI: 10.22070/jqepo.2021.5270.1140
[25] K. Sadeghi-Velni, R. Tavakkoli-Moghaddam, and F. Jolai, "New mathematical modelling for an electric vehicle inventory-routing problem," Quarterly Journal of Transportation Engineering, Vol. 13(1), pp. 1071-1090, 2021. DOI: 10.22119/jte.2021.63216
[26] M. Keskin, B. Çatay, and G. Laporte, " A simulation-based heuristic for the electric vehicle routing problem with time windows and stochastic waiting times at recharging stations," Computers & Operations Research, vol. 125. Pp. , 2021. DOI:10.1016/j.cor.2020.105060
[27] A. Ghobadi, R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Fallah, & H. Kazemipoor, "Multi-depot electric vehicle routing problem with fuzzy time windows and pickup/delivery constraints," Journal of applied research on industrial engineering, vol. 8(1), pp. 1-18, 2021. DOI:10.3233/JIFS-191968
[28] K. Rajesh, E. Jain, P. Kotecha, "A Multi-Objective approach to the Electric Vehicle Routing Problem," arXiv 2022, arXiv:2208.12440. DOI:10.48550/arXiv.2208.12440
[29] B.Çatay, İ. Sadati, "An improved matheuristic for solving the electric vehicle routing problem with time windows and synchronized mobile charging/battery swapping," Computers & Operations Research, vol. 159, pp. 1-53, 2023. DOI:10.1016/j.cor.2023.106310
[30] Z. Liu, Y. Li, J. Xu, "Multi-Compartment Electric Vehicle Routing Problem for Perishable Products," International Journal of Crowd Science, vol 8(1). pp. 38-48, 2024. DOI:10.26599/IJCS.2023.9100017
[31] Tahmasebi, H., & Zarehpoosh, A. (2020). A mathematical programming model for the multi-product vehicle routing problem with time windows and fuzzy demand (Case study: Qofliran Company). Supply Chain Management, vol 22(66), 52–62. (In Persian). DOR:20.1001.1.20089198.1399.22.66.4.1
[32] Ahizadeh, B., & Amelnic, M. S. (2020). Optimization of the four-level supply chain location-routing problem under disruption conditions. Supply Chain Management, vol 22(66), 4–19. (In Persian). DOI:10.1109/ACCESS.2021.3088426
[33] Fatemi Ghomi, S. M. T., & Asgarian, B. (2022). Solving a transportation location-routing problem considering green routes using a metaheuristic algorithm. Supply Chain Management, vol 24(75), 1–12. (In Persian). DOR: 20.1001.1.20089198.1401.24.75.1.0
[34] Ershadi, M. M., Momeni Sharifabad, M., Ershadi, M. J., Azizi, A., & Behzadipour, S. (2023). Multi-objective modeling of green vehicle routing using a hybrid algorithm of extreme learning machine and genetic programming. Supply Chain Management, vol 25(81), 17–41. (In Persian). DOR: 20.1001.1.20089198.1402.25.81.2.0
[35] Bayegan, B., Mehrabian, A., Yousefinejad Atari, M., & Doosti Deylami, M. J. (2024). Modeling the humanitarian logistics location-routing problem considering different groups of people under uncertainty conditions. Supply Chain Management, vol 26(82), 55–66. (In Persian). DOR:20.1001.1.20089198.1403.26.82.4.1
[36] Kord, H., & Behnamian, J. (2025). Route planning in metro–truck collaborative distribution considering variable demands. Supply Chain Management, vol 27(86), 31–45. (In Persian). DOR: 20.1001.1.20089198.1404.27.86.2.4
[37] P. Perez-Gonzalez, & J.M. Framinan, "A review and classification on distributed permutation flowshop scheduling problems," European Journal of Operational Research, vol.312(1), pp. 1-21, 2024. DOI:10.1016/j.ejor.2023.02.001
[38] A.L.S. Souza, M. Papini , P.H.V. Penna , M. J.F. Souza , "A flexible variable neighbourhood search algorithm for different variants of the Electric Vehicle Routing Problem, " Computers & Operations Research, vol 168, 106713, 2024. DOI: 10.1016/j.cor.2024.106713
[39] M. Affi, H. Derbel, B. Jarboui, P. Siarry, "A Skewed General Variable Neighborhood Search Approach for Solving the Battery Swap Station Location-Routing Problem with Capacitated Electric Vehicles," Green Transportation and New Advances in Vehicle Routing Problems, Springer International Publishing, vol. 10, pp.75-89, 2020. DOI:10.1007/978-3-030-45312-1_3
[40] Y. Yilmaz, C. B. Kalayci, "Variable Neighborhood Search Algorithms to Solve the Electric Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery," Mathematics, vol 10(17), 3108. (2022). DOI: 10.3390/math10173108
[41] J. Yang, H. Sun, "Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles," Computers & Operations Ransarch, vol. 55, pp. 217-232, ,2015. DOI:10.1016/j.cor.2014.07.003