Urban Development Policy Making

Home Page: https://judpm.ir

Online ISSN: 3092-6564

A Comparative Study on the Feasibility of Implementing Electric Buses in Tehran's Public Transportation Fleet, Iran: A Global Experience Perspective

Payam Moeini[1] | Hamid Mirzahossein[2*] | Ali Zahab Saniei[3] | Amin Faridiaghdam[4]

1. Traffic and Transportation Department, Tehran Urban Research and Planning Center, Tehran, Iran. Email: paiammoeini@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Civil–Transportation Planning, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran. Email: mirzahossein@eng.ikiu.ac.ir
3. Traffic and Transportation Department, Tehran Urban Research and Planning Center, Tehran, Iran. Email: a.zahabs@gmail.com
4. Ph.D. Candidate, Department of Civil–Transportation Planning, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran. Email: faridiaghdam@edu.ikiu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 17 March 2025
Revised 15 April 2025
Accepted 17 May 2025
Published Online 01 June 2025

Keywords:
Electric Buses,
Sustainable Transport,
Comparative Approach,
Tehran,
Cost-Benefit Analysis.

ABSTRACT

Tehran, as one of the most polluted and densely populated metropolises in the world, faces escalating challenges in its public transportation sector. An aging fleet of diesel buses, high levels of pollutant emissions, heavy operational costs, and dependence on fossil fuels are among the critical issues necessitating a comprehensive review of the public transport system. In this context, electric buses, as an innovative, clean, and technologically advanced solution, offer significant potential for reducing pollution, achieving economic savings, and enhancing service quality. This paper aims to assess the feasibility of deploying electric buses in Tehran's public transportation fleet by adopting a comparative and policy-oriented approach, analyzing the technical, economic, infrastructural, and institutional dimensions of this transition. The main innovation of the study lies in presenting a three-phase, localized model for electrifying the fleet, based on global experiences and the specific characteristics of Tehran. Case studies of cities such as Shenzhen, Paris, and Shanghai have been reviewed, and their findings adapted to Tehran's context. Additionally, frameworks such as thematic analysis, cost-benefit analysis (TCO, NPV) and power grid capacity assessments have been employed to evaluate the economic sustainability and operational feasibility of implementing this policy in Tehran. The results suggest that with the establishment of appropriate infrastructure and institutional support, phased implementation could play a significant role in achieving sustainable transportation goals and improving urban environmental quality.

Cite this article: Moeini, P.; Mirzahossein, H.; Zahab Saniei, A. & Faridiaghdam E., A. (2025). A Comparative Study on the Feasibility of Implementing Electric Buses in Tehran's Public Transportation Fleet, Iran: A Global Experience Perspective. *Urban Development Policy Making*, 2 (3), 297-318. DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.516440.1031

© Payam Moeini, Hamid Mirzahossein, Ali Zahab Saniei, Amin Faridiaghdam
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.516440.1031

Introduction

Tehran, one of the most populous and polluted metropolises globally, faces significant challenges in its public transportation system. The aging fleet of diesel buses, high pollutant emissions, and the heavy reliance on fossil fuels exacerbate the city's environmental and economic issues. Consequently, a comprehensive reevaluation of the public transportation system is crucial. Electric buses emerge as a

promising solution due to their environmental benefits, economic potential, and service quality improvements. This study focuses on evaluating the feasibility of integrating electric buses into Tehran's public transport network, taking a comparative and policy-oriented approach that examines the technical, economic, infrastructural, and institutional dimensions of this transition.

Materials and Methods

To assess the feasibility of deploying electric buses in Tehran, the study employs a comparative analysis of global case studies from cities such as Shenzhen, Paris, and Shanghai. These cities have successfully implemented electric bus systems, providing valuable insights into the operational, economic, and environmental benefits. The study uses frameworks such as thematic analysis, cost-benefit analysis (Total Cost of Ownership (TCO), Net Present Value (NPV)), and power grid capacity assessments to evaluate the economic sustainability and operational feasibility of electric buses in Tehran. Moreover, a three-phase, localized model is proposed for electrifying Tehran's bus fleet, adapted to the city's unique characteristics.

Results

The study's findings indicate that with appropriate infrastructure and institutional support, the phased implementation of electric buses can significantly contribute to Tehran's sustainable transportation goals. The analysis of global case studies reveals that electric buses can substantially reduce pollution, lower operational costs, and improve air quality. For instance, cities like Shenzhen have achieved remarkable results in reducing greenhouse gas emissions by switching to electric buses, with a 35% decrease in emissions compared to their diesel counterparts. Additionally, the results of cost-benefit analyses (NPV and TCO) suggest that electric buses offer long-term financial savings, even though initial investments may seem high due to the need for charging infrastructure. Furthermore, the capacity of Tehran's power grid to support electric buses is evaluated, and the results suggest that with proper planning, the city can effectively integrate electric buses into its existing infrastructure without overburdening the grid.

Discussion

The transition to electric buses in Tehran holds substantial promise for mitigating the city's air pollution, reducing reliance on fossil fuels, and enhancing the efficiency of its public transportation system. However, several challenges remain, such as the high initial costs of procurement, the need for extensive charging infrastructure, and the potential strain on the city's power grid. The study emphasizes the importance of government support, including financial incentives, to facilitate the procurement of electric buses and the development of necessary infrastructure. Moreover, phased implementation, starting with high-traffic routes and strategically placed charging stations, is recommended to ensure the successful integration of electric buses. The experiences of cities like Paris and Shanghai show that, with proper planning, electric buses can be successfully integrated into urban transit systems.

Conclusion

In conclusion, while the transition to electric buses in Tehran presents economic and infrastructural challenges, the long-term environmental and operational benefits outweigh the initial costs. By adopting a localized model tailored to Tehran's specific needs, this study provides a roadmap for the successful electrification of Tehran's public bus fleet, contributing to a greener, more sustainable urban transportation system.

پیشرفت شهری
سیاستگذاری
سایت نشریه: https://judpmi.ir
شاپا الکترونیکی: ۶۵۶۴-۳۰۹۲

بررسی تطبیقی امکان پیاده‌سازی اتوبوس‌های برقی در ناوگان حمل‌ونقل همگانی کلان‌شهر تهران، ایران؛ با نگاهی به تجارب جهانی

پیام معینی[۱] | حمید میرزاحسین[۲*] | علی ذهب‌صنیعی[۳] | امین فریدی اقدم[۴]

۱. مدیر گروه مطالعات حمل‌ونقل و ترافیک، مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران. رایانامه: paiammoeini@gmail.com
۲. نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی عمران ـ برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکدهٔ فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین. رایانامه: mirzahossein@eng.ikiu.ac.ir
۳. کارشناس گروه مطالعات حمل‌ونقل و ترافیک، مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران. رایانامه: a.zahabs@gmail.com
۴. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران ـ برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکدهٔ فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین. رایانامه: faridiaghdam@edu.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

کلیدواژه:
اتوبوس‌های برقی،
حمل‌ونقل پایدار،
رویکرد تطبیقی،
تهران،
تحلیل هزینه ـ فایده.

چکیده

کلان‌شهر تهران، به عنوان یکی از شهرهای آلوده و پرتراکم جهان، با چالش‌های فزاینده‌ای در حوزهٔ حمل‌ونقل همگانی مواجه است. ناوگان فرسودهٔ اتوبوس‌های دیزلی، انتشار بالای آلاینده‌ها، هزینه‌های عملیاتی سنگین و وابستگی به سوخت‌های فسیلی، از جمله مسائلی هستند که نیاز به بازنگری در سیستم حمل‌ونقل همگانی را ضروری می‌سازند. در این‌میان، اتوبوس‌های برقی به عنوان راهکاری نوین، پاک و فناورانه، پتانسیل بالایی برای کاهش آلودگی، صرفه‌جویی اقتصادی و ارتقای کیفیت خدمات دارند. مقالهٔ حاضر با هدف امکان‌سنجی اجرای اتوبوس‌های برقی در ناوگان حمل‌ونقل همگانی تهران، با بهره‌گیری از رویکردی تطبیقی و سیاست‌محور، به تحلیل ابعاد فنی، اقتصادی، زیرساختی و نهادی این انتقال می‌پردازد. نوآوری اصلی مقاله، ارائهٔ یک مدل سه‌مرحله‌ای بومی‌سازی‌شده برای برقی‌سازی ناوگان بر اساس تجارب جهانی و ویژگی‌های خاص شهر تهران است. در این زمینه، مطالعات موردی شهرهایی همچون شنژن، پاریس و شانگهای مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با شرایط تهران تطبیق داده شده است. از سوی دیگر، با بهره‌گیری از چارچوب‌هایی نظیر تحلیل محتوایی، تحلیل هزینه ـ فایده (TCO، NPV) و تحلیل توان شبکهٔ برق شهری، امکان‌پذیری اجرای این سیاست در تهران از منظر پایداری اقتصادی و ظرفیت اجرایی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد در صورت تأمین زیرساخت‌های مناسب و پشتیبانی نهادی، اجرای فازبندی‌شده این سیاست می‌تواند سهم مهمی در تحقق اهداف حمل‌ونقل پایدار و بهبود کیفیت زیست شهری ایفا کند.

استناد: معینی، پیام؛ میرزاحسین، حمید؛ ذهب‌صنیعی، علی و فریدی اقدم، امین (۱۴۰۴). بررسی تطبیقی امکان پیاده‌سازی اتوبوس‌های برقی در ناوگان حمل‌ونقل همگانی کلان‌شهر تهران، ایران؛ با نگاهی به تجارب جهانی. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۲ (۳) ۲۹۷-۳۱۸.
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.516440.1031

© پیام معینی، حمید میرزاحسین، علی ذهب‌صنیعی، امین فریدی اقدم
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.516440.1031

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، مسئلهٔ آلودگی هوا، ترافیک شدید، و فرسودگی ناوگان حمل‌ونقل همگانی، کلان‌شهرهای بزرگ را با چالش‌هایی جدی مواجه کرده است. تهران، به عنوان یکی از شهرهای آلوده و پرترافیک جهان، بیش از ۸۰ درصد آلودگی هوای خود را مدیون آلاینده‌های ناشی از وسایل نقلیه است. در این‌میان، ناوگان فرسودهٔ اتوبوس‌های دیزلی، که بیشتر قدیمی و ناکارآمد هستند، سهم بالایی در انتشار ذرات معلق و اکسیدهای نیتروژن دارند و کیفیت زندگی شهروندان را به طور جدی تحت تأثیر قرار داده‌اند. در چنین بستری، اتوبوس‌های برقی به عنوان یکی از ابزارهای مهم گذار به حمل‌ونقل پایدار مطرح شده‌اند.

اتوبوس‌های برقی با استفاده از فناوری‌هایی نظیر باتری‌های لیتیوم ـ یونی[1]، سیستم‌های هیدروژنی یا خطوط برق شهری، انرژی مورد نیاز خود را تأمین می‌کنند و در مقایسه با اتوبوس‌های دیزلی، هزینه‌های سوخت و نگهداری پایین‌تری دارند. تجربهٔ موفق شهرهایی مانند شنژن، که بیش از ۹۹ درصد از ناوگان حمل‌ونقل همگانی خود را به اتوبوس‌های برقی اختصاص داده است، نشان‌دهندهٔ تأثیر مثبت این فناوری در کاهش آلودگی و هزینه‌های عملیاتی است [۱]. همچنین، مطالعات نشان داده‌اند مصرف انرژی اتوبوس‌های برقی به شرایط مسیر بستگی دارد و در محدودهٔ ۰/۹۸ تا ۱/۳۹ کیلووات ساعت بر کیلومتر متغیر است. علاوه بر این، استفاده از سیستم‌های ترمز احیاکننده می‌تواند مصرف انرژی را تا ۲۱ درصد کاهش دهد [۲].

با توجه به اینکه تهران با معضلاتی همچون افزایش ترافیک، آلودگی شدید هوا و هزینه‌های بالای حمل‌ونقل همگانی مواجه است، توسعهٔ ناوگان اتوبوس‌های برقی می‌تواند نقش مهمی در بهبود شرایط محیط زیستی و اقتصادی این شهر ایفا کند. در کنار مزایای محیط زیستی، مطالعات نشان می‌دهند هزینهٔ کل مالکیت این وسایل در مقایسه با مدل‌های دیزلی کمتر بوده و دورهٔ بازگشت سرمایه برای جایگزینی ناوگان اتوبوس‌های دیزلی با مدل‌های برقی در تهران حدود ۷ سال برآورد شده است [۳]. با این‌حال، چالش‌هایی نظیر هزینه‌های اولیهٔ بالا، محدودیت‌های زیرساختی و نیاز به تأمین پایدار برق همچنان وجود دارند که نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و سیاست‌های حمایتی مناسب هستند.

سؤال محوری مقاله آن است که آیا اجرای تدریجی اتوبوس‌های برقی در تهران با توجه به زیرساخت‌های موجود، ملاحظات اقتصادی و محدودیت‌های فنی، امکان‌پذیر و به‌صرفه است؟ مقالهٔ حاضر با هدف پاسخ به این سؤال، به روش مروری و تطبیقی تجارب جهانی و تحلیل فنی - اقتصادی شرایط تهران می‌پردازد و تلاش می‌کند چارچوبی بومی برای برقی‌سازی ناوگان ارائه دهد.

۲. مرور ادبیات

افزایش شتابان شهرنشینی، رشد جمعیت، و گسترش استفاده از خودروهای شخصی موجب شده است که بسیاری از کلان‌شهرها در دهه‌های اخیر با بحران‌هایی نظیر آلودگی هوا، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، و کاهش بهره‌وری سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی مواجه شوند. در این‌میان، حمل‌ونقل پایدار به عنوان یکی از محورهای اساسی توسعهٔ شهری هوشمند، نقش مهمی در سیاست‌گذاری شهری ایفا کرده است. بر این‌اساس، اتوبوس‌های برقی به دلیل مزایای محیط زیستی، اقتصادی و عملکردی، به یکی از گزینه‌های مهم جایگزین برای ناوگان دیزلی سنتی تبدیل شده‌اند. مرور ادبیات پیش رو با هدف بررسی ابعاد مختلف این فناوری، چالش‌ها و فرصت‌های پیاده‌سازی آن در کلان‌شهرهایی مانند تهران انجام شده است تا زمینه‌ای علمی برای تصمیم‌گیری‌های آتی فراهم شود.

۲-۱. روند جهانی گذار به ناوگان برقی

در سطح بین‌المللی، کشورهایی نظیر چین، فرانسه، هلند و ایالات متحده، با سیاست‌های حمایتی، توسعهٔ فناوری، و تأمین زیرساخت‌های نوین، توانسته‌اند گذار مؤثری به ناوگان برقی ایجاد کنند. شهر شنژن چین، با بیش از ۱۶ هزار دستگاه اتوبوس برقی، یکی از نمونه‌های پیشروی جهان است که با اجرای سیاست‌های مالیاتی، یارانه‌های مستقیم، و ایجاد ساختارهای PPP، توانست در کمتر از ۷ سال ناوگان خود را برقی کند و سالانه بیش از ۱/۳۵ میلیون تن کاهش گازهای گلخانه‌ای ثبت کند [۲۰ و ۲۱].

1. Lithium-ion Battery

در اروپا نیز پاریس و آمستردام، با بهره‌گیری از مدل‌های تلفیقی انرژی تجدیدپذیر (مثل شارژ با پنل خورشیدی) و توسعهٔ ایستگاه‌های شارژ شبانه، گام‌های مؤثری در زمینهٔ جایگزینی اتوبوس‌های دیزلی برداشته‌اند [۲۹]. پروژه‌های آزمایشی در شیکاگو، جاکارتا، و کیپ‌تاون نیز نشان داده‌اند حتی در کشورهای درحال‌توسعه، با برنامه‌ریزی فازبندی‌شده و استفاده از مدل‌هایی نظیر NPV و تحلیل چرخهٔ عمر، می‌توان به موفقیت‌های عملی دست یافت [۱۷، ۲۳ و ۲۸].

۲-۲. بررسی حمل‌ونقل شهری تهران

تهران به دلیل وابستگی شدید به وسایل نقلیهٔ سوخت فسیلی، با سطح بالایی از آلودگی هوا مواجه است که ارتباط مستقیمی با بیماری‌های تنفسی، قلبی ـ عروقی و افزایش مرگ‌ومیر دارد. توسعهٔ ناوگان اتوبوس‌های برقی در این شهر می‌تواند به کاهش آلودگی هوا و بهبود کیفیت زندگی شهروندان کمک کند. مطالعات نشان داده‌اند جایگزینی اتوبوس‌های دیزلی با مدل‌های برقی نه‌تنها از نظر محیط زیستی، بلکه از نظر اقتصادی و اجتماعی نیز سودمند است. هزینه‌های سوخت و نگهداری اتوبوس‌های برقی کمتر از مدل‌های دیزلی است و می‌تواند صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجهی برای سیستم حمل‌ونقل همگانی ایجاد کند. علاوه بر این، کاهش آلودگی صوتی و افزایش کیفیت خدمات حمل‌ونقل از دیگر مزایای این گذار است.

با این‌حال، چالش‌هایی نیز در مسیر راه‌اندازی این سیستم در تهران وجود دارد. مهم‌ترین موانع شامل نبود زیرساخت‌های کافی برای شارژ باتری، هزینه‌های اولیهٔ بالا، محدودیت‌های شبکهٔ برق، شرایط آب‌وهوایی سخت، کمبود نیروی متخصص، موانع قانونی و چالش‌های تأمین پایدار برق است. مطالعات تأکید دارند که موفقیت این گذار نیازمند سیاست‌های حمایتی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های شارژ، و ارائهٔ مشوق‌های مالی برای خرید اتوبوس‌های برقی است. در این‌زمینه، استفاده از شارژ شبانه به عنوان راه‌حلی عملی پیشنهاد شده است که نه‌تنها کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی را در پی دارد، بلکه می‌تواند به کاهش هزینه‌های عملیاتی و زمان تأخیر سفرها کمک کند [۳]. دورهٔ بازگشت سرمایه برای جایگزینی ناوگان اتوبوس‌های دیزلی با مدل‌های برقی در تهران حدود ۷ سال برآورد شده [۳] که نشان‌دهندهٔ توجیه‌پذیری اقتصادی این تغییر در بلندمدت است.

ایجاد یک سیستم حمل‌ونقل همگانی کارآمد در شهرهای بزرگ از جمله تهران اهمیت بالایی دارد. این سیستم نه‌تنها به کاهش هزینه‌های سفر برای اقشار کم‌درآمد کمک می‌کند، بلکه موجب کاهش ترافیک، آلودگی هوا و افزایش دسترسی به فرصت‌های شغلی و آموزشی می‌شود. با این‌حال، حمل‌ونقل شهری تهران با مشکلات متعددی مواجه است که نیاز به راهکارهای پایدار و جامع را ضروری می‌سازد.

۲-۳. مشکلات حمل‌ونقل شهری در تهران

یکی از پیامدهای جدی ناکارآمدی سیستم حمل‌ونقل شهری در تهران، آلودگی شدید هوا است که سالانه جان هزاران نفر را تهدید می‌کند و سلامت عمومی شهروندان را به خطر می‌اندازد. این بحران، بیش از هر چیز ناشی از فرسودگی ناوگان تاکسی و اتوبوس، سهم بالای وسایل نقلیهٔ دیزلی، و رشد بی‌رویه مالکیت خودروهای شخصی است که ظرفیت شهری را پشت سر گذاشته‌اند [۴ و ۵]. استفادهٔ گسترده از سوخت‌های فسیلی و تردد زیاد در معابر شهری موجب انتشار حجم بالایی از آلاینده‌ها شده است.

تهران با بیش از ۸ میلیون نفر جمعیت روزانه و تراکم بالای ترافیک، از نظر حمل‌ونقل همگانی با چالش‌های متعددی روبه‌روست. سهم ناوگان فرسوده، آلودگی بالای هوا، کمبود ایستگاه‌های شارژ و نبود ناوگان منظم، موجب کاهش جذابیت حمل‌ونقل همگانی برای شهروندان شده است. طبق گزارش شهرداری تهران، بیش از ۸۰ درصد آلودگی هوا ناشی از منابع متحرک است و اتوبوس‌های دیزلی یکی از عوامل اصلی انتشار ذرات معلق و اکسید نیتروژن هستند [۳ و ۵].

از سوی دیگر، سیستم حمل‌ونقل همگانی با مشکلات متعددی همچون شلوغی بیش از حد مترو، پوشش ناکافی خطوط اتوبوس و مترو، و ضعف در انسجام شبکه روبه‌روست [۶]. زیرساخت‌های ترافیکی نیز به دلیل حفاری‌های مداوم و طراحی غیراستاندارد، قادر به پاسخ‌گویی به حجم بالای تردد نیستند. در این‌میان، سیاست‌های ترافیکی نظیر طرح‌های محدودیت تردد، نتوانسته‌اند تأثیر معناداری در کاهش ازدحام و آلودگی هوا داشته باشند [۶].

۲–۴. موانع ساختاری و فرصت‌های بالقوه در تهران

مطالعات داخلی و خارجی نشان می‌دهند با وجود مزایای فنی و اقتصادی اتوبوس‌های برقی، موانع جدی در سطح بومی تهران وجود دارد که گذار به ناوگان برقی را با چالش روبه‌رو می‌سازد:

- شبکهٔ برق و ظرفیت زیرساخت: طبق گزارش شرکت توانیر، بخشی از پست‌های برق شهری تهران در ساعت‌های اوج دچار افت ولتاژ می‌شوند و تأمین پایدار برق برای ناوگان بزرگ نیاز به ارتقای زیرساخت دارد [۳۲].
- هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه: قیمت هر اتوبوس برقی بین ۲ تا ۳ میلیارد تومان بیش از مدل دیزلی برآورد می‌شود و تأمین منابع مالی پایدار هنوز چالش‌برانگیز است.
- نبود داده‌های میدانی تهران: به خلاف مطالعات جهانی، داده‌های دقیق عملکرد اتوبوس‌های برقی در شرایط اقلیمی تهران (گرما، شیب زیاد، آلاینده‌های معلق بالا) هنوز موجود نیست و تحلیل‌های عددی به‌ناچار به داده‌های غیرمحلی متکی‌اند.
- ملاحظات حقوقی و سیاست‌گذاری: تعرفه‌های گمرکی، نبود استانداردهای ملی در حوزهٔ باتری و زیرساخت، و نبود مشوق‌های مشخص برای شرکت‌های بهره‌بردار، از موانع اجرایی مهم به شمار می‌روند.

۲–۵. نیاز به حمل‌ونقل پایدار

شهر تهران برای مقابله با مشکلات ناشی از رشد سریع شهرنشینی، نیازمند راهکارهای پایدار است. آلودگی هوا، انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف زیاد انرژی از چالش‌های عمده هستند که با افزایش خودروهای شخصی تشدید شده‌اند. هرچند توسعهٔ مترو و سیستم اتوبوس‌های تندرو اقداماتی در راستای بهبود حمل‌ونقل همگانی بوده‌اند، اما کافی نیستند. برای دستیابی به یک سیستم حمل‌ونقل پایدار، باید توسعهٔ زیرساخت‌های عمومی، ترویج دوچرخه‌سواری و پیاده‌روی، و کاهش استفاده از وسایل نقلیهٔ شخصی در اولویت قرار گیرند [۷].

۲–۶. اتوبوس‌های برقی به عنوان راهکار پیشنهادی

اتوبوس‌های برقی می‌توانند راهکاری مناسب برای بهبود حمل‌ونقل شهری در تهران باشند. این وسایل نقلیه به دلیل عدم تولید آلاینده‌های محیط زیستی، راه‌حلی مؤثر در کاهش آلودگی هوای تهران محسوب می‌شوند [۸]. توسعهٔ زیرساخت‌های شارژ، مانند نخستین ایستگاه شارژ اتوبوس‌های برقی در کرج، نشان‌دهندهٔ گام‌های اولیه در این مسیر است [۸]. علاوه بر این، هزینه‌های عملیاتی پایین‌تر، عملکرد آرام‌تر و حمایت دولت از گسترش ناوگان خودروهای برقی، بر اهمیت این راهکار می‌افزاید.

با توجه به مزایای محیط زیستی و فنی اتوبوس‌های برقی، توسعهٔ تدریجی این ناوگان می‌تواند به عنوان یکی از گزینه‌های مؤثر در کاهش آلودگی هوا و بهبود کیفیت زندگی شهروندان تهران مطرح شود.

۲–۷. فناوری‌های اتوبوس‌های برقی و مطالعات موردی

تاریخچهٔ این فناوری به اواخر قرن نوزدهم بازمی‌گردد. نخستین اتوبوس برقی در سال ۱۸۹۰ در لندن معرفی شد و تا سال ۱۸۹۷، ناوگان ۱۲ دستگاهی در نیویورک به بهره‌برداری رسید. در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، بحران انرژی و نگرانی‌های محیط زیستی موجب شد توجه به این فناوری دوباره افزایش یابد. با پیشرفت فناوری باتری و توسعهٔ موتورهای الکتریکی در دهه‌های اخیر، تولید و استفاده از اتوبوس‌های برقی در شهرهای مختلف جهان گسترش یافته است. امروزه، شرکت‌هایی نظیر بی‌وای‌دی، پروترا و ولوو، مدل‌های پیشرفته‌ای از این وسایل را برای حمل‌ونقل شهری ارائه کرده‌اند [۹].

توسعه و پذیرش این فناوری در سطح جهانی تحت تأثیر عوامل متعددی بوده است. شهرهایی مانند شنژن[1]، تایپه[2] و تائویوان[3] با اجرای سیاست‌های حمایتی و توسعهٔ زیرساخت‌های شارژ، موفق به ایجاد ناوگان گسترده‌ای از اتوبوس‌های برقی

1. Shenzhen
2. Taipei
3. Taoyuan

شده‌اند. به عنوان نمونه، شنژن تا سال ۲۰۲۲ بیش از ۱۶ هزار دستگاه اتوبوس برقی را در ناوگان حمل‌ونقل همگانی خود به کار گرفته است که بیش از ۹۹ درصد از کل اتوبوس‌های این شهر را شامل می‌شود [۱].

۲-۸. بررسی فناوری‌های اتوبوس‌های برقی

اتوبوس‌های برقی به عنوان یک راه‌حل پایدار در حمل‌ونقل شهری، در سال‌های اخیر توجه زیادی را جلب کرده‌اند. این اتوبوس‌ها با استفاده از انرژی پاک و فناوری‌های پیشرفته، عملکرد بهتری نسبت به اتوبوس‌های دیزلی دارند و اثرات محیط زیستی کمتری ایجاد می‌کنند. به طور خاص، اتوبوس‌های برقی از سیستم‌های باتری ـ الکتریکی بهره می‌برند و از موتورهای الکتریکی که با باتری‌های قابل شارژ تغذیه می‌شوند، استفاده می‌کنند. راندمان شارژ این باتری‌ها بین ۶۰ تا ۸۴ درصد است [۱۰]. ظرفیت باتری‌ها برای اتوبوس‌های ۱۲ متری و ۱۸ متری حدود ۳۰۰ تا ۳۵۰ کیلووات ساعت متغیر است [۸]. زمان شارژ باتری‌ها بسته به نوع زیرساخت و ظرفیت باتری می‌تواند ۲ تا ۳ ساعت طول بکشد. مسافت طی‌شده توسط اتوبوس‌های برقی به عوامل مختلفی همچون شرایط محیطی و رفتار رانندگی بستگی دارد [۸].

مزایای اتوبوس‌های برقی شامل کاهش قابل توجه آلودگی هوا و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است. این اتوبوس‌ها علاوه بر اینکه به بهبود کیفیت هوای شهرها کمک می‌کنند، هزینه‌های عملیاتی کمتری دارند، زیرا هزینهٔ سوخت و نگهداری آن‌ها بسیار کمتر از اتوبوس‌های دیزلی است. همچنین، به دلیل عملکرد بی‌صداتر، تجربهٔ سفر راحت‌تری برای مسافران ایجاد می‌کنند. با توجه به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی، اتوبوس‌های برقی می‌توانند حمل‌ونقل همگانی را پایدارتر کنند.

با این‌حال، محدودیت‌هایی نیز برای استفاده از اتوبوس‌های برقی وجود دارد. هزینه‌های اولیهٔ بالا برای خرید اتوبوس‌ها و تأسیس زیرساخت‌های شارژ باتری، برد محدود و زمان شارژ طولانی از جمله چالش‌های عمده به شمار می‌آیند. علاوه بر این، شرایط آب‌وهوایی می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد باتری‌ها بگذارد. تخریب باتری‌ها طی زمان نیز هزینه‌های نگهداری بلندمدت را افزایش می‌دهد.

خدمات پس از فروش نقش مهمی در موفقیت اتوبوس‌های برقی ایفا می‌کند. نگهداری منظم، پشتیبانی فنی، و ارائهٔ خدمات دیجیتال همچون سیستم‌های تشخیص از راه دور و نظارت بر عملکرد، از جمله ابعاد مهم خدمات پس از فروش هستند. همچنین، تأمین قطعات یدکی و فراهم کردن آموزش‌های لازم برای رانندگان و کارکنان، به بهره‌برداری بهتر از اتوبوس‌های برقی کمک می‌کند.

در نهایت، اتوبوس‌های برقی با وجود مزایای محیط زیستی و عملکردی، همچنان نیاز به توجه به مسائل مربوط به هزینه‌های اولیه، زیرساخت‌های شارژ و مدیریت باتری دارند تا به گزینه‌ای پایدار و اقتصادی برای حمل‌ونقل شهری تبدیل شوند.

اتوبوس‌های برقی به عنوان راه‌حلی امیدبخش برای حمل‌ونقل پایدار شهری مطرح شده‌اند و مطالعات مختلفی به بررسی امکان‌سنجی فنی و مالی آن‌ها پرداخته‌اند. نتایج پژوهش‌ها نشان داده است مصرف انرژی این وسایل به شرایط مسیر بستگی دارد و بین ۰/۹۸ تا ۱/۳۹ کیلووات ساعت بر کیلومتر متغیر است، در حالی که استفاده از ترمز احیاکننده می‌تواند مصرف انرژی را تا ۲۱ درصد کاهش دهد [۲]. همچنین، هزینهٔ کل مالکیت آن‌ها حدود ۱/۷۶ دلار در هر کیلومتر برآورد شده است [۲]. بهینه‌سازی زمان‌بندی حرکت و مدیریت شارژ باتری از طریق الگوریتم‌های پیشرفته مانند الگوریتم ژنتیک نیز نشان داده است که می‌توان تعداد اتوبوس‌های مورد نیاز را کاهش داده و بهره‌وری انرژی را افزایش داد، به طوری که میانگین اوج مصرف انرژی در سفرها به ۲۶/۵ درصد برسد [۱۱]. افزون بر این، ترکیب انواع مختلف اتوبوس‌های برقی و استفاده از روش‌های متنوع شارژ باتری می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد [۱۲].

۲-۹. مطالعات موردی

اتوبوس‌های برقی به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش آلودگی هوا و بهبود حمل‌ونقل شهری در بسیاری از کلان‌شهرهای جهان به کار گرفته شده‌اند. تجربه‌های موفق در شهرهایی همچون لندن[1]، پاریس[2]، و شانگهای[3] نشان‌دهندهٔ

1. London
2. Paris
3. Shanghai

مزایای این فناوری در بهبود کارایی حمل‌ونقل همگانی و کاهش اثرات محیط زیستی است. این نمونه‌ها می‌توانند الگوی مناسبی برای پیاده‌سازی اتوبوس‌های برقی در تهران و دیگر شهرهای مشابه باشند.

پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهند چالش‌های متعددی برای استفاده از اتوبوس‌های برقی در سیستم حمل‌ونقل شهری وجود دارد. برای مثال، پارامترهای عملیاتی مانند مصرف برق و دمای محیط در شهرهایی همچون مینسک[۱]، تیومن[۲]، و مسکو[۳] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این پژوهش‌ها اهمیت برنامه‌ریزی استراتژیک در استقرار اتوبوس‌های برقی را برجسته می‌کنند، به‌ویژه توجه به زیرساخت‌های شارژ باتری و بهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکهٔ حمل‌ونقل شهری [۱۳]. همچنین، نیاز به ارزیابی عملکرد اتوبوس‌های برقی در شرایط توپوگرافی و آب‌وهوای مختلف و ایجاد مسیرهای آزمایشی برای بررسی این موارد تأکید شده است [۱۴].

یکی از جنبه‌های کلیدی در بهره‌برداری از اتوبوس‌های برقی، مدیریت مناسب باتری و بهینه‌سازی راندمان حرارتی است. استفاده از پمپ‌های حرارتی و بهره‌برداری از گرمای اتلافی موتور می‌تواند عمر باتری‌ها را افزایش دهد و مصرف انرژی را کاهش دهد [۱۵]. همچنین، بهینه‌سازی مسیرهای اتوبوس‌های برقی و برنامه‌ریزی دقیق زمان‌بندی سفرها برای کاهش هزینه‌ها و مصرف انرژی بسیار مهم است [۱۶].

در مورد تحلیل هزینه و مزایای اتوبوس‌های برقی، مطالعات نشان می‌دهند این اتوبوس‌ها با وجود هزینهٔ اولیهٔ بالا، طی زمان می‌توانند هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهند و به کاهش آلاینده‌های هوا و اثرات منفی بر سلامت عمومی کمک کنند [۱۷]. این تحلیل‌ها همچنین اهمیت استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای ارزیابی این مبادلات را نشان می‌دهند.

ادغام اتوبوس‌های برقی با دیگر گزینه‌های حمل‌ونقل الکتریکی، مانند ریکشاهای الکترونیکی در بنگلادش، می‌تواند یکپارچگی و کارایی سیستم حمل‌ونقل شهری را افزایش دهد [۱۸]. این نوع از یکپارچگی حمل‌ونقل می‌تواند به ایجاد سیستمی پایدارتر و کارآمدتر کمک کند.

در نهایت، تجربه‌های موفق در شهرهایی مانند شیکاگو[۴]، دنور[۵]، نیویورک[۶]، آمستردام[۷] و چین نشان‌دهندهٔ مزایای متعدد اتوبوس‌های برقی در کاهش آلاینده‌ها، کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود کارایی سیستم‌های حمل‌ونقل همگانی است. به‌ویژه در شهرهایی مانند چین و آمستردام، اتوبوس‌های برقی نقش مهمی در کاهش آلودگی هوا و تحقق اهداف محیط زیستی ایفا کرده‌اند.

مطالعهٔ موردی در زمینهٔ استفاده از اتوبوس‌های برقی نشان‌دهندهٔ پیشرفت‌های قابل توجه در حوزهٔ حمل‌ونقل شهری با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بهبود کیفیت هوای شهری، و افزایش پایداری است. در این مطالعات به چندین جنبهٔ مختلف از جمله هزینه‌ها، عملکرد فنی، و چالش‌های زیرساختی پرداخته شده است. در ادامه به برخی از مطالعات مهم و یافته‌های کلیدی آن‌ها اشاره شده است:

۱. استقرار اتوبوس برقی باتری در ایالات متحده (۲۰۱۹)

یک مطالعه توسط وزارت حمل‌ونقل ایالات متحده در سال ۲۰۱۹ به بررسی هزینه‌ها و چالش‌های استفاده از اتوبوس‌های برقی در چندین شهر ایالات متحده پرداخت. یافته‌های این پژوهش نشان داد اتوبوس‌های برقی هزینه‌های عملیاتی بسیار کمتری نسبت به اتوبوس‌های دیزلی دارند و هزینه‌های بالاتر اولیهٔ این اتوبوس‌ها با گذر زمان جبران می‌شود. همچنین، تأکید شد که زیرساخت‌های شارژ و استراتژی‌های مختلف شارژ باتری (مثل شارژ در مسیر یا در دپو) بر هزینه‌ها و کارایی تأثیرگذار هستند [۱۹].

1. Minsk
2. Tyumen
3. Moscow
4. Chicago
5. Denver
6. New York
7. Amsterdam

۲. ناوگان اتوبوس برقی شنژن

شنژن در چین با بیش از ۱۶ هزار اتوبوس برقی، یکی از استقرارهای بزرگ اتوبوس‌های برقی در جهان را تجربه کرده است. این مطالعه نشان داد انتقال به اتوبوس‌های برقی باعث کاهش ۱/۳۵ میلیون تن گازهای گلخانه‌ای در سال و کاهش هزینه‌های عملیاتی تا ۵۳ درصد نسبت به اتوبوس‌های دیزلی می‌شود. این انتقال همچنین به کاهش آلودگی صوتی و بهبود کیفیت هوای شهری کمک کرده است [۲۰ و ۲۱].

۳. مطالعات در اروپا و سایر نقاط جهان

در اروپا، بسیاری از شهرها مانند لندن، آمستردام، و کپنهاگ[1] برنامه‌هایی برای تبدیل ناوگان اتوبوس‌های خود به برقی دارند تا به اهداف محیط زیستی خود دست یابند. به طور مشابه، در چین و ایالات متحده، پروژه‌های بزرگی در حال اجرا هستند که به کاهش گازهای گلخانه‌ای و بهبود کیفیت زندگی در شهرها کمک می‌کنند [۲۲ـ ۲۴].

۲-۹-۱. چالش‌ها و معایب

با وجود مزایای قابل توجه، چالش‌هایی نیز وجود دارند. هزینه‌های بالای اولیهٔ اتوبوس‌های برقی نسبت به مدل‌های دیزلی، نیاز به زیرساخت‌های شارژ، محدودیت‌های برد باتری، و چالش‌های عملیاتی همچنان از موانع عمده برای پذیرش گسترده این تکنولوژی در برخی از مناطق هستند [۲۵].

اتوبوس‌های برقی مزایای فراوانی دارند، از جمله [۲۵ و ۲۶]:

- انتشار صفر گازهای گلخانه‌ای و کاهش آلودگی هوا
- کاهش هزینه‌های عملیاتی (تا ۵۰ درصد کمتر در هزینهٔ سوخت و ۲۵ درصد کمتر در هزینه‌های تعمیر و نگهداری)
- عملکرد آرام و کاهش آلودگی صوتی
- استفاده از سیستم ترمز احیاکننده برای بازگرداندن انرژی به باتری‌ها

۲-۹-۲. رویکرد شهرهای پیشرو در گذار به حمل‌ونقل برقی

مطالعات مختلف همچنین به ارزیابی هزینه‌های عملیاتی و فنی پرداخته‌اند. از جمله، یک مطالعه در جاکارتا نشان داد اتوبوس‌های برقی می‌توانند با هزینه‌های عملیاتی رقابتی در مقایسه با اتوبوس‌های دیزلی در مسیرهای شهری عمل کنند [۲۷]. همچنین در برخی مطالعات، از شبیه‌سازی‌های پیچیده برای تحلیل ریسک‌های مالی و ارزیابی ارزش فعلی خالص[2] استفاده شده است [۲۳]. اتوبوس‌های برقی در کشورهای مختلف مانند آفریقای جنوبی، فرانسه و چین با موفقیت پیاده‌سازی شده‌اند [۲۸]. به عنوان مثال، پروژه‌های آزمایشی در پاریس نشان داد ۹۲ درصد از کاربران اعتقاد دارند که اتوبوس‌های برقی کیفیت هوا را بهبود می‌دهند و ۹۳ درصد از نظر اجتماعی تجربهٔ بهتری در حمل‌ونقل همگانی دارند [۲۹].

توجه به اتوبوس‌های برقی در حال افزایش است و بسیاری از شهرهای بزرگ مانند لس‌آنجلس و تورنتو به سمت استفاده از ناوگان برقی در حال حرکت هستند. در چین، پیش‌بینی می‌شود که اتوبوس‌های برقی تا سال ۲۰۲۵ سهم بزرگی از ناوگان حمل‌ونقل همگانی را به خود اختصاص دهند [۲۰].

مطالعات و نمونه‌های متعدد نشان می‌دهند اتوبوس‌های برقی می‌توانند جایگزین مناسبی برای اتوبوس‌های دیزلی و بنزینی باشند، اما برای تحقق این هدف، نیاز به سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها، برنامه‌ریزی دقیق و غلبه بر چالش‌های مالی و فنی وجود دارد. در مجموع، اتوبوس‌های برقی با توجه به مزایای محیط زیستی، کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود کیفیت زندگی شهری، یکی از گزینه‌های پایدار برای آیندهٔ حمل‌ونقل شهری به شمار می‌روند.

مطالعات موجود در ایران عمدتاً به بررسی‌های نظری و محیط زیستی پرداخته‌اند و کمتر پژوهشی به طراحی مدل مرحله‌ای اجرا، یا تحلیل اقتصادی تطبیقی با شهرهای مشابه پرداخته است. مقالهٔ حاضر با تمرکز بر تحلیل مقایسه‌ای، چارچوب اجرایی

1. Copenhagen
2. Net Present Value (NPV)

فازبندی‌شده، و تلفیق یافته‌های جهانی با واقعیت بومی تهران، می‌کوشد شکاف‌های موجود در ادبیات را پر کند و الگویی عملی برای سیاست‌گذاران شهری ارائه دهد.

۳. روش‌شناسی تحقیق

این مقاله با بهره‌گیری از رویکرد مروری - تطبیقی انجام شده است. این روش به‌ویژه در مطالعات سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی کاربرد دارد، زمانی که هدف، تحلیل روندها، بررسی تجارب موفق و ارزیابی امکان بومی‌سازی راهکارها در یک بستر خاص باشد. با توجه به اینکه موضوع مقاله مربوط به سیاست‌گذاری و راهبردهای توسعهٔ ناوگان اتوبوس‌های برقی در کلان‌شهر تهران است، استفاده از روش مروری - تطبیقی می‌تواند تصویری چندلایه، واقع‌گرایانه و تحلیلی از مسئله ارائه دهد.

۳–۱. طراحی چارچوب مفهومی اولیه و سؤالات راهبردی

در مرحلهٔ نخست، چارچوب مفهومی اولیه‌ای طراحی شد که عوامل کلیدی تأثیرگذار در سیاست‌گذاری‌های مربوط به برقی‌سازی حمل‌ونقل همگانی را در بر می‌گیرد. این چارچوب با مرور ادبیات تخصصی حوزه‌های انرژی، برنامه‌ریزی شهری، حمل‌ونقل و محیط زیست استخراج شده و شامل مؤلفه‌هایی نظیر الزامات فنی، زیرساختی، سیاست‌های مالی، ظرفیت نهادی و جنبه‌های اجتماعی پذیرش فناوری است. چارچوب مفهومی یادشده مبنای تحلیل محتوای منابع و همچنین، مقایسهٔ تطبیقی تجارب قرار گرفت.

با مرور پیشینهٔ نظری، یک چارچوب تحلیلی چندبعدی طراحی شد که شاخص‌های کلیدی در پنج محور را در بر می‌گیرد: فنی ـ عملیاتی، اقتصادی ـ مالی، نهادی ـ مدیریتی، زیرساختی ـ انرژتیکی، و حقوقی ـ سیاستی.

پرسش‌های محوری تحقیق بر اساس این چارچوب به شرح زیر است:

- قوت‌ها و ضعف‌های اجرای اتوبوس برقی در تهران چیست و این مدل چه فرصت‌ها و تهدیدهایی دارد؟
- تجربهٔ شهرهای موفق در حوزهٔ برقی‌سازی ناوگان چه درس‌هایی برای تهران دارد؟
- آیا این گذار از منظر تحلیل اقتصادی (TCO/NPV) توجیه‌پذیر است؟
- چگونه می‌توان یک مدل فازبندی‌شده اجرایی برای تهران طراحی کرد؟

۳–۲. مرور نظام‌مند منابع

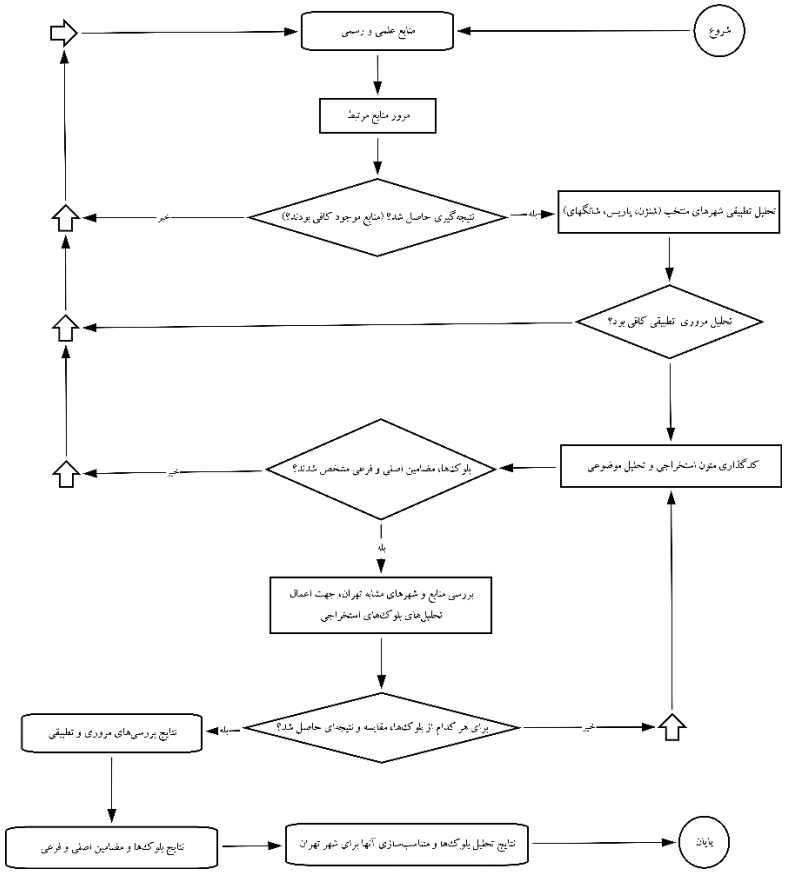
در ادامه، فرایند مرور نظام‌مند منابع صورت پذیرفت که هم منابع داخلی همچون گزارش‌های رسمی شهرداری تهران، شرکت واحد اتوبوسرانی، طرح جامع حمل‌ونقل، اسناد محیط زیستی و مصوبات شورای شهر را شامل می‌شد و هم منابع بین‌المللی نظیر مقالات علمی معتبر، گزارش‌های نهادهای جهانی از جمله IEA، UITP و UN-Habitat و همچنین، تجارب کشورهای موفق در حوزهٔ حمل‌ونقل برقی مانند چین، هلند، نروژ و شیلی. انتخاب این منابع با در نظر گرفتن اعتبار علمی، روزآمد بودن اطلاعات و قابلیت مقایسه با شرایط بومی تهران انجام شده است. در نهایت، تحلیل محتوای موضوعی، مدل TCO، تحلیل NPV، تحلیل تطبیقی، و ترسیم سناریوهای مرحله‌ای انجام شد.

۳–۳. تحلیل موردی

به منظور تعمیق تحلیل تطبیقی، از میان نمونه‌های بین‌المللی، شهر شنژن چین به عنوان مطالعهٔ موردی انتخاب شد. این شهر از سال ۲۰۱۷ موفق به برقی‌سازی کامل ناوگان اتوبوس‌رانی خود شده و تجربه‌ای جامع در حوزهٔ برنامه‌ریزی، تأمین زیرساخت، جلب مشارکت بخش خصوصی و ایجاد هماهنگی بین دستگاهی ارائه داده است. تحلیل این مطالعهٔ موردی در ابعاد مختلف سیاست‌گذاری، تکنولوژی، مشارکت عمومی، هزینه‌ها و نتایج محیط زیستی انجام شد و سپس، عناصر کلیدی آن با وضعیت تهران تطبیق داده شد تا امکان‌سنجی انتقال یا بومی‌سازی راهکارها مشخص شود.

۳–۴. مراحل انجام پژوهش

فرایند پژوهش، گام‌های کلیدی و نقاط تصمیم‌گیری در شکل ۱ نشان داده شده است:



شکل ۱. فرایند انجام و نقاط تصمیم‌گیری پژوهش

۳-۵. رویکرد تطبیقی و تحلیل مقایسه‌ای

فرایند تطبیقی بر اساس شاخص‌هایی همچون ساختار نهادی مدیریت شهری، ظرفیت زیرساخت برق و شبکهٔ شارژ، شدت آلودگی هوا، میزان حمایت‌های مالی و توان اقتصادی دولت و شهرداری تهران صورت پذیرفت. در این مرحله، با بهره‌گیری از تحلیل ابعاد قوت و ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای پیاده‌سازی چنین سیاستی در تهران بررسی شد و چند سناریوی اجرایی محتمل نیز تدوین شد. شهرهای نمونه برای تحلیل تطبیقی با رویکرد «یادگیری تطبیقی از تجارب جهانی قابل تعمیم» انتخاب شده‌اند. ملاک‌های انتخاب عبارت بودند از:

- گستردگی پیاده‌سازی ناوگان برقی و دستاوردهای ثبت‌شده
- تنوع در ساختار اقتصادی و سیاسی (شهرهای درحال‌توسعه و توسعه‌یافته)
- قابلیت بومی‌سازی در زمینه‌های اقلیمی، جمعیتی و زیرساختی
- دسترسی به داده‌های معتبر، کمی و کیفی

بر همین‌اساس، شنژن به عنوان الگوی جامع PPP، پاریس به عنوان نمونه مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر، و شانگهای به عنوان نمونه در اقلیم مشابه با تابستان‌های گرم و آلایندگی بالا انتخاب شدند.

۳-۶. تحلیل کیفی داده‌ها و استنتاج راهبردی

تحلیل داده‌ها در این مقاله عمدتاً کیفی و تفسیری و از طریق روش تحلیل محتوای موضوعی[1] صورت گرفت. داده‌ها در پنج محور کدگذاری شده و سپس در قالب الگوی سه‌مرحله‌ای پیشنهادی بازآرایی شده‌اند. در بُعد اقتصادی، از مدل تحلیل هزینهٔ کل مالکیت (TCO) برای مقایسهٔ نمونه‌های برقی و دیزلی استفاده شده و بازه‌های حساسیت برای نرخ بازگشت سرمایه (IRR) و ارزش فعلی

1. Thematic Analysis

خالص (NPV) در سناریوهای مختلف بررسی شده‌اند، بوده است. مفاهیم کلیدی از دل متون و گزارش‌های گردآوری‌شده استخراج و کدگذاری شده و سپس با استفاده از روش تحلیل محتوای موضوعی در ساختاری منسجم بازتولید شده‌اند. این ساختار به پژوهشگر امکان داده است تا به استنتاج راهبردی دست یابد و پیشنهادهایی عملی در سه سطح کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت ارائه کند. پیشنهادهای یادشده با توجه به ظرفیت‌های فنی و مالی موجود در شهر تهران و با اتکا به تجارب موفق بین‌المللی تنظیم شده‌اند. برای شرایط تهران، داده‌های مصرف انرژی، هزینهٔ اولیهٔ خرید، هزینهٔ شارژ، و نرخ برق تجدیدپذیر از منابع معتبر داخلی (توانیر و TURPC) استخراج شده و مدل مالی با مفروضات محافظه‌کارانه تدوین شده است. در بخش زیرساختی نیز ظرفیت شبکهٔ برق شهری و محدودیت‌های پست‌های برق در مناطق پرتردد به طور خاص بررسی و تحلیل شده است.

۴. تحلیل‌ها و یافته‌ها

بررسی امکان‌سنجی به‌کارگیری اتوبوس‌های برقی در کلان‌شهر تهران نیازمند درک دقیق از وضعیت موجود، ظرفیت‌های بالقوه و چالش‌های پیش رو است. در این بخش، مروری از یافته‌های حاصل از تحلیل شرایط بومی تهران، مزایا و محدودیت‌های اقتصادی، اثرات محیط زیستی، و الزامات فنی و اجرایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این تحلیل‌ها با هدف ارائهٔ تصویری جامع از فرصت‌ها و موانع پیش روی برقی‌سازی ناوگان حمل‌ونقل همگانی انجام شده‌اند و می‌توانند مبنای تصمیم‌گیری‌های واقع‌گرایانه و سیاست‌گذاری‌های بلندمدت قرار گیرند. تحلیل امکان‌سنجی اجرای ناوگان اتوبوس برقی در تهران بر پایهٔ برخی محورهای اصلی انجام گرفته است: تطبیق با شرایط محلی، ارزیابی اقتصادی، تحلیل فنی و زیرساختی، و ملاحظات نهادی و سیاستی.

۴–۱. تطبیق با شرایط تهران

تهران به عنوان یکی از کلان‌شهرهای بزرگ ایران با چالش‌های متعددی در زمینهٔ حمل‌ونقل، آلودگی هوا و تراکم ترافیک روبه‌رو است. این شهر به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، در دامنهٔ رشته‌کوه البرز واقع شده و تحت تأثیر آلودگی هوا قرار دارد. به علاوه، رشد سریع جمعیت و گسترش شهری بدون برنامه‌ریزی مناسب، موجب ایجاد تفاوت‌های اجتماعی ـ اقتصادی در مناطق مختلف شده است. مشکلات محیط زیستی مانند کم‌آبی و آلودگی صوتی نیز از دیگر چالش‌های تهران است [۳۰].

در حوزهٔ حمل‌ونقل، تهران با مسائلی همچون تراکم شدید ترافیکی و وابستگی به خودروهای شخصی مواجه است. از سوی دیگر، حمل‌ونقل همگانی در تهران شامل سیستم‌های اتوبوس، مترو و اتوبوس‌های تندرو است که هنوز در مقایسه با خودروهای شخصی از سهم کمتری برخوردارند [۵]. سیستم‌های اتوبوس تندرو به عنوان راه‌حل‌هایی برای کاهش ترافیک و آلودگی مطرح شده‌اند، اما وضعیت نامناسب زیرساخت‌ها و ایمنی معابر همچنان مشکلاتی را به وجود آورده است.

با توجه به چالش‌های موجود، اتوبوس‌های برقی می‌توانند گزینه‌ای مناسب برای بهبود وضعیت حمل‌ونقل در تهران باشند. این اتوبوس‌ها با قابلیت کاهش آلودگی هوا و صدای ترافیک، می‌توانند به بهبود کیفیت زندگی شهری کمک کنند. برای پیاده‌سازی موفق اتوبوس‌های برقی در تهران، نیاز به زیرساخت‌های شارژ مناسب، شامل ایستگاه‌های شارژ باتری در نقاط مختلف شهر و استفاده از سیستم‌های شارژ سریع، ضروری است [۳۱]. همچنین، به دلیل شرایط آب‌وهوایی متنوع تهران، باید به عملکرد اتوبوس‌های برقی در دماهای مختلف توجه ویژه‌ای شود، زیرا دماهای بسیار بالا یا پایین می‌تواند بر کارایی باتری‌ها تأثیر بگذارد [۳۲].

از دیگر چالش‌ها، محدودیت‌های فضایی برای نصب ایستگاه‌های شارژ و نیاز به فضای کافی برای تردد اتوبوس‌های برقی است. برای حل این مشکل، استفاده از اتوبوس‌های برقی کوچک‌تر به جای اتوبوس‌های بزرگ می‌تواند راه‌حل مناسبی باشد [۳۳]. همچنین، مشکلاتی نظیر قطعی‌های مکرر برق و مدیریت مناسب تأمین برق نیز باید در نظر گرفته شوند. توسعهٔ زیرساخت‌های ذخیره‌سازی انرژی و استفاده از نیروگاه‌های محلی می‌تواند در حل این مشکل مؤثر باشد.

در نهایت، توسعهٔ اتوبوس‌های برقی در تهران می‌تواند مزایای محیط زیستی و اقتصادی فراوانی به همراه داشته باشد. کاهش گازهای گلخانه‌ای، صرفه‌جویی در هزینه‌های سوخت و کاهش آلودگی صوتی از جملهٔ این مزایا هستند [۳۴]. با این‌حال،

پیاده‌سازی این سیستم نیازمند برنامه‌ریزی دقیق، ارزیابی‌های علمی و شبیه‌سازی‌های عملیاتی است تا بتوان از این تکنولوژی به نحو احسن در تهران بهره‌برداری کرد.

در حوزهٔ خدمات پس از فروش، تهران با چالش‌هایی مانند کمبود مراکز تعمیرات تخصصی، مشکلات تأمین قطعات یدکی و مشکلات زیرساخت‌های برق مواجه است. برای موفقیت ناوگان اتوبوس‌های برقی، باید برنامه‌ریزی دقیقی برای نگهداری، تأمین قطعات یدکی و خدمات پس از فروش انجام شود [۳۵]. همچنین، همکاری مؤثر بین شهرداری، تولیدکنندگان و بخش خصوصی برای ارائهٔ خدمات پایدار اهمیت بسیاری دارد.

تهران با اقلیم نیمه‌خشک، دمای متغیر بین ۱۰- تا ۴۵+ درجه، و توپوگرافی متنوع (سربالایی‌های متعدد در مناطق شمالی شهر) نیازمند ناوگانی با ویژگی‌های خاص است. تحلیل مصرف انرژی در چنین شرایطی نشان می‌دهد مصرف واقعی می‌تواند بین ۱/۲ تا ۱/۵ کیلووات‌ساعت بر کیلومتر متغیر باشد، به‌ویژه در دماهای بسیار بالا یا پایین که بازدهی باتری‌ها کاهش می‌یابد [۲۲].

با توجه به مسیرهای طولانی برخی خطوط و تراکم ترافیک، برد عملیاتی اتوبوس‌های برقی باید حداقل ۲۵۰ کیلومتر باشد. این میزان برای تهران قابل‌تحقق است به شرط آنکه از باتری‌های ۳۰۰ تا ۳۵۰ کیلووات‌ساعت بهره گرفته شود و ایستگاه‌های شارژ سریع در پایانه‌ها یا نقاط استراتژیک مستقر شوند.

۴-۲. تحلیل اقتصادی

در تحلیل اقتصادی استفاده از اتوبوس‌های برقی در تهران، مزایا و معایب اقتصادی این فناوری بررسی شده است. اتوبوس‌های برقی به دلیل کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری و همچنین صرفه‌جویی در مصرف سوخت، گزینه‌ای به‌صرفه برای حمل‌ونقل همگانی تهران به شمار می‌روند. هزینه‌های اولیهٔ بالاتر اتوبوس‌های برقی، که بیشتر به دلیل قیمت بالای باتری‌ها و تجهیزات شارژ است، در مقایسه با هزینه‌های نگهداری کمتر و بازده سوخت بالاتر طی عمر اتوبوس‌ها، به‌تدریج جبران می‌شود. طبق پیش‌بینی‌ها، دورهٔ بازپرداخت سرمایه‌گذاری برای اتوبوس‌های برقی حدود هفت سال است [۳].

در مقایسه با اتوبوس‌های دیزلی، اتوبوس‌های برقی از نظر بهره‌وری عملیاتی بهتر عمل می‌کنند و زمان توقف آن‌ها کاهش می‌یابد، که این بهبود راندمان می‌تواند موجب صرفه‌جویی در هزینه‌ها و ارائهٔ خدمات بهتر به مسافران شود. علاوه بر این، استفاده از اتوبوس‌های برقی به کاهش آلاینده‌ها و بهبود کیفیت هوا کمک می‌کند که به نوبهٔ خود مزایای اقتصادی غیرمستقیم زیادی دارد، از جمله کاهش هزینه‌های بهداشت عمومی و محیط زیستی [۳۶].

با توجه به مطالعات مختلف، اتوبوس‌های برقی هزینه‌های نگهداری کمتری دارند. برای مثال، در یک مطالعه در سیاتل، هزینه‌های تعمیر و نگهداری اتوبوس‌های برقی به میزان ۴۴ درصد کمتر از اتوبوس‌های دیزلی بود [۳۷]. علاوه بر این، هزینه‌های عملیاتی اتوبوس‌های برقی از ۸ هزار تا ۲۲ هزار دلار در سال به ازای هر وسیلهٔ نقلیه کمتر از اتوبوس‌های دیزلی است، که به دلیل کاهش مصرف سوخت و نیاز کمتر به تعمیرات است [۳۸]. در مقایسه با اتوبوس‌های هیبریدی، اتوبوس‌های برقی همچنین هزینه‌های تعمیر کمتری دارند و این ویژگی به طور قابل توجهی به صرفه‌جویی در هزینه‌ها کمک می‌کند [۳۹].

اتوبوس‌های برقی همچنین از نظر هزینه‌های باتری مزایای خاصی دارند. بسیاری از تولیدکنندگان مانند BYD ضمانت‌های طولانی‌مدت برای باتری‌های خود ارائه می‌دهند، که به معنای کاهش هزینه‌های تعویض باتری برای شرکت‌های حمل‌ونقل است [۳۹].

در مجموع، با اینکه هزینه‌های خرید اولیهٔ اتوبوس‌های برقی بالاتر از اتوبوس‌های دیزلی است، اما صرفه‌جویی‌های طولانی‌مدت در هزینه‌های سوخت، تعمیر و نگهداری، و تأثیرات محیط زیستی، آن‌ها را به گزینه‌ای به‌صرفه‌تر تبدیل می‌کند؛ به این معنا که بازگشت سرمایه حدود ۵ سال است [۴۰]. علاوه بر مزایای اقتصادی، اتوبوس‌های برقی تولید گازهای گلخانه‌ای صفر دارند و این ویژگی به کاهش آلاینده‌ها و بهبود کیفیت هوا کمک می‌کند، که در نهایت به مزایای بهداشتی و اجتماعی برای شهروندان منجر می‌شود [۴۱].

در نهایت، انتقال به سیستم حمل‌ونقل برقی نیازمند تأمین منابع مالی است. دولت می‌تواند با ارائهٔ کمک‌های مالی و مشوق‌ها، مانند حمایت از خرید اتوبوس‌های برقی و ایجاد زیرساخت‌های شارژ، به تسهیل این انتقال کمک کند. همچنین،

مشارکت با بخش خصوصی و استفاده از منابع مالی محلی می‌تواند به توزیع بار مالی و کاهش وابستگی به بودجه‌های دولتی کمک کند [۴۲].

با فرض نرخ تنزیل ۱۰ درصد و قیمت برق صنعتی ثابت، دورهٔ بازگشت سرمایه برای ناوگان برقی بین ۶ تا ۷ سال برآورد می‌شود. در سناریوهای بهینه با شارژ شبانه و تعرفه‌های حمایتی، این عدد می‌تواند به ۵ سال کاهش یابد. جدول ۱، مقایسهٔ اقتصادی اتوبوس دیزلی و اتوبوس برقی (بر مبنای داده‌های تطبیقی با منابع جهانی) را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۲، شبیه‌سازی اقتصادی اولیه را برای ناوگان تهران نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقایسهٔ اقتصادی اتوبوس دیزلی و اتوبوس برقی (بر مبنای داده‌های تطبیقی با منابع جهانی)

شاخص اقتصادی	اتوبوس دیزلی	اتوبوس برقی	منبع
هزینهٔ خرید اولیه	۳۵۰٬۰۰۰ دلار	۵۵۰٬۰۰۰ دلار	(۲۴)
هزینهٔ سوخت سالانه	۲۵٬۰۰۰ دلار	۸٬۰۰۰ دلار	(۲۹)
هزینهٔ نگهداری سالانه	۲۰٬۰۰۰ دلار	۱۱٬۰۰۰ دلار	(۲۳)
هزینهٔ کل مالکیت در ۱۰ سال(TCO)	۶۰۰٬۰۰۰ دلار	۶۰۰٬۰۰۰ دلار	محاسبهٔ تطبیقی
دورهٔ بازگشت سرمایه	ندارد	حدود ۷ سال	(۲)

مطابق جدول ۱، هرچند هزینهٔ اولیهٔ اتوبوس‌های برقی تقریباً ۵۷ درصد بیشتر از دیزلی است، اما با توجه به صرفه‌جویی در سوخت و نگهداری، هزینهٔ کل مالکیت آن‌ها در بازهٔ ده‌ساله تقریباً برابر یا حتی کمتر از دیزلی می‌شود. این نتایج نشان‌دهندهٔ قابلیت اقتصادی این فناوری در بلندمدت است، به‌ویژه زمانی که یارانه‌های دولتی یا مشوق‌های مالی نیز لحاظ شوند.

جدول ۲. شبیه‌سازی اقتصادی اولیه: تحلیل NPV و TCO برای ناوگان تهران

پارامتر	مقدار تخمینی	توضیحات
نرخ تنزیل	٪۱۰	براساس نرخ میانگین در پروژه‌های شهری ایران
سرمایه‌گذاری اولیهٔ هر اتوبوس	۵۵۰٬۰۰۰ دلار	قیمت پایه خرید اتوبوس برقی
صرفه‌جویی سالانه (سوخت + نگهداری)	۲۶٬۰۰۰ دلار	در مقایسه با اتوبوس دیزلی
دورهٔ بازگشت سرمایه	۷ سال	بر اساس صرفه‌جویی سالانه
ارزش خالص فعلی (NPV) در ۱۰ سال	۴۰٬۰۰۰+ تا ۵۰٬۰۰۰ دلار	بسته به سناریوی تعرفه برق
هزینهٔ کل مالکیت (TCO)	تقریباً برابر با دیزلی یا کمتر	محاسبهٔ تطبیقی

شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد حتی با در نظر گرفتن نرخ تنزیل ۱۰ درصد، ارزش خالص فعلی پروژه (NPV) مثبت خواهد بود؛ به این معنا که برقی‌سازی ناوگان نه تنها در بازهٔ زمانی ۱۰ ساله اقتصادی است، بلکه در سال‌های بعدی نیز به صرفه‌جویی بیشتر منجر می‌شود. همچنین، با توجه به مشکلات موجود در تعرفه‌گذاری برق در ایران، سناریوهای مختلف نشان می‌دهند اگر حداقل ۳۰ درصد برق از منابع تجدیدپذیر تأمین شود، پروژه به‌شدت به‌صرفه‌تر خواهد بود.

۴-۳. تحلیل زیرساختی: شبکهٔ برق و الزامات فنی

طبق داده‌های شرکت برق منطقه‌ای تهران، بخش عمده‌ای از ایستگاه‌های شارژ پیشنهادی باید در مناطق دارای محدودیت پیک مصرف برق مستقر شوند. هر ایستگاه شارژ سریع با ظرفیت ۱۵۰ کیلووات برای هر اتوبوس، نیاز به انشعاب صنعتی و پست تقویتی مستقل دارد. تخمین‌ها نشان می‌دهد برای فاز اول پروژه (۲۰۰ دستگاه)، حداقل نیاز به ۳ مگاوات بار اضافه در پیک روزانه وجود دارد.

پیشنهاد می‌شود مکان‌یابی ایستگاه‌ها براساس سه شاخص زیر انجام شود:

- نزدیکی به مسیرهای پرتردد (مانند BRT ولیعصر، آزادی، تجریش)
- دسترسی به پست برق فشار قوی موجود
- امکان توسعهٔ آینده و ارتقا به فناوری شارژ بی‌سیم

۴-۴. ملاحظات نهادی، حقوقی و مدیریتی

بررسی‌ها نشان می‌دهد در حال حاضر، استاندارد ملی برای طراحی ایستگاه‌های شارژ اتوبوس‌های برقی در ایران وجود ندارد و بسیاری از تجهیزات مورد نیاز وارداتی هستند. همچنین، تعرفهٔ گمرکی بالا برای واردات باتری و قطعات کلیدی (مانند ماژول‌های شارژ سریع) یکی از موانع اجرایی طرح محسوب می‌شود.

از منظر نهادی، خلأ هماهنگی میان شهرداری، شرکت برق، و نهادهای قانون‌گذار (مانند سازمان ملی استاندارد) باعث کندی فرایند برنامه‌ریزی شده است. به نظر می‌رسد شکل‌گیری یک کارگروه فرابخشی می‌تواند روند سیاست‌گذاری و اجرای پروژه را تسهیل کند.

۴-۵. تأثیرات محیط زیستی

استفاده از اتوبوس‌های برقی در حمل‌ونقل همگانی، تأثیرات محیط زیستی قابل توجهی دارد. این فناوری با کاهش آلاینده‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، می‌تواند به بهبود کیفیت هوا و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی در شهرهایی همچون تهران کمک کند. اتوبوس‌های برقی هیچ‌گونه انتشار مستقیم اگزوز ندارند و با تبدیل انرژی باتری به نیروی محرکه، موجب کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند این اتوبوس‌ها می‌توانند انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۹۰ درصد نسبت به اتوبوس‌های دیزلی کاهش دهند، به‌ویژه زمانی که از انرژی‌های تجدیدپذیر برای شارژ باتری‌ها استفاده شود [۴۳ و ۴۴].

این اتوبوس‌ها علاوه بر کاهش آلاینده‌های هوا، از فناوری ترمز احیاکننده بهره می‌برند که انرژی ترمز را به الکتریسیته تبدیل می‌کند و بهره‌وری انرژی را افزایش می‌دهد [۴۳]. همچنین، به دلیل سطح صدای پایین‌تر، اتوبوس‌های برقی می‌توانند آلودگی صوتی را کاهش دهند و تجربهٔ بهتری برای مسافران و ساکنان ایجاد کنند [۴۵]. این ویژگی‌ها در کنار کاهش مصرف سوخت فسیلی، به بهبود کیفیت هوای شهری و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی کمک می‌کند [۴۶ و ۴۷].

با این‌حال، بررسی چرخهٔ کامل عمر اتوبوس‌های برقی اهمیت دارد، به‌ویژه در زمینهٔ تولید و بازیافت باتری‌ها و منابع انرژی مصرفی برای شارژ این اتوبوس‌ها. اگر انرژی برای شارژ از سوخت‌های فسیلی تأمین شود، مزایای محیط زیستی این فناوری کاهش می‌یابد [۴۸]. فرایند تولید باتری‌های لیتیوم یونی که در این اتوبوس‌ها استفاده می‌شود، اثرات محیط زیستی دارد، و بازیافت مناسب این باتری‌ها برای کاهش این اثرات ضروری است [۴۳].

در مجموع، اتوبوس‌های برقی به عنوان گزینه‌ای پایدار در حمل‌ونقل همگانی، می‌توانند مزایای محیط زیستی قابل توجهی از جمله کاهش آلودگی هوا، کاهش گازهای گلخانه‌ای، کاهش آلودگی صوتی و بهبود کیفیت زندگی شهری فراهم کنند. اما برای بهره‌مندی کامل از این مزایا، مدیریت بهینهٔ منابع انرژی و بازیافت باتری‌ها ضروری است [۴۳ و ۴۹]. جدول ۳، مقایسهٔ محیط زیستی اتوبوس دیزلی و برقی را نشان می‌دهد.

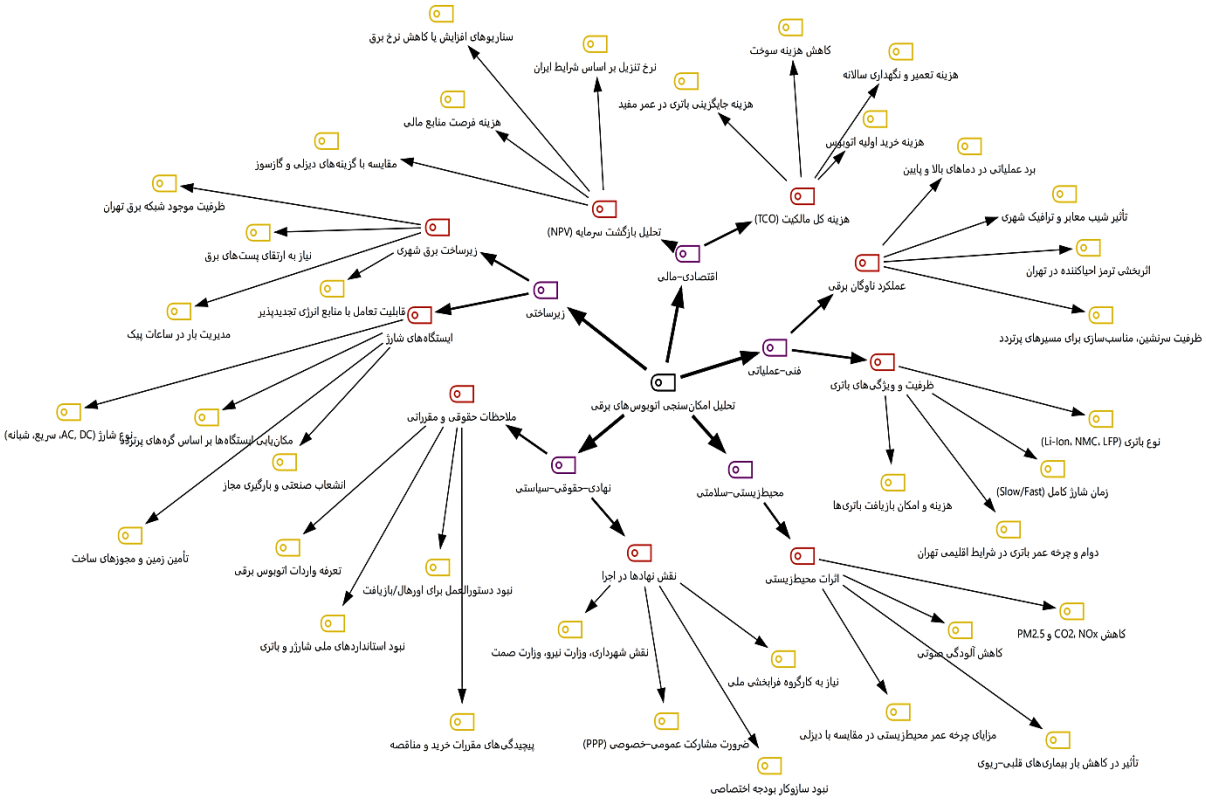
جدول ۳. مقایسهٔ محیط زیستی اتوبوس دیزلی و برقی

شاخص محیط زیستی	اتوبوس دیزلی	اتوبوس برقی (با برق تجدیدپذیر)	منبع
انتشار CO_2 سالانه	~۱۰۰ تن	۰–۱۰ تن	(۲۰)
انتشار NOx	بالا	تقریباً صفر	(۲۹)
ذرات معلق PM2.5	بالا	صفر	(۲۴)
آلودگی صوتی	زیاد	بسیار کم (۳۰–۴۰٪ کمتر)	

اتوبوس‌های برقی انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای ندارند و در صورت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، می‌توانند نزدیک به انتشار صفر عمل کنند. کاهش آلاینده‌ها مستقیم بر کیفیت هوای شهری و سلامت عمومی تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، استفاده از ناوگان برقی می‌تواند سالانه تا چند هزار دلار صرفه‌جویی غیرمستقیم در حوزهٔ سلامت عمومی به همراه داشته باشد.

۴–۶. مدل مفهومی – تحلیل محتوای موضوعی

در این مقاله، به منظور استخراج الگوهای تکرارشونده و مفاهیم کلیدی از منابع گردآوری‌شده، از روش تحلیل محتوای موضوعی استفاده شده است. این روش به پژوهشگر کمک می‌کند تا از دل داده‌های کیفی، به ساختاری منسجم برای تصمیم‌گیری و پیشنهاد راهبردی برسد. بر اساس تحلیل انجام‌شده، پنج بلوک مفهومی اصلی، نه مضمون اصلی و ۳۶ مضمون فرعی از متون استخراج شد که در شکل ۲ قابل ملاحظه است:



شکل ۲. بلوک‌ها و مضامین اصلی و فرعی مستخرج از متون

۴–۶–۱. بلوک مفهومی اقتصادی - مالی: تحلیل نمونهٔ پیاده‌سازی اتوبوس‌های برقی در تهران

با وجود هزینهٔ اولیهٔ بالاتر برای اتوبوس‌های برقی، در بلندمدت هزینه‌های عملیاتی (سوخت و نگهداری) به طور قابل توجهی پایین‌تر است. محاسبات نشان می‌دهد در یک چرخهٔ عمر متوسط، مجموع هزینه‌های اتوبوس برقی حدود ۶ تا ۸ درصد کمتر از اتوبوس دیزلی خواهد بود.

این کاهش هزینه، به‌خصوص در شهرهایی با تعرفه‌های سوخت بالا و هزینه‌های زیاد نگهداری، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

بر مبنای نرخ تنزیل ۱۰ درصد سالانه، دورهٔ بازگشت سرمایه برای جایگزینی اتوبوس‌های دیزلی با برقی حدود ۶/۸ سال تخمین زده می‌شود. پس از این مدت، پروژه وارد مرحلهٔ صرفه‌جویی خالص می‌شود و سودآور خواهد بود. در صورتی که یارانه‌های دولتی برای خرید یا تعرفه‌های تشویقی برق اعمال شود، فرصت سودآوری می‌تواند حتی به کمتر از ۵ سال کاهش یابد.

هزینه‌های عملیاتی اتوبوس‌های برقی به طور متوسط دو سوم کمتر از اتوبوس‌های دیزلی است. کاهش چشمگیر هزینه‌های سوخت به دلیل راندمان بالاتر موتورهای برقی و هزینهٔ برق کمتر نسبت به سوخت دیزل است. همچنین، هزینه‌های نگهداری پایین‌تر نتیجهٔ حذف اجزای متحرک زیاد (مانند موتور احتراقی، سیستم اگزوز، جعبه‌دنده) است که به کاهش نیاز به تعمیرات پرهزینه منجر می‌شود. این کاهش هزینه‌های سالانه می‌تواند یکی از دلایل مهم در توجیه اقتصادی پروژه باشد.

۴-۶-۲. بلوک مفهومی محیط زیستی: تحلیل اثرات اتوبوس‌های برقی در تهران

بر مبنای بررسی و شبیه‌سازی داده‌ای، اتوبوس‌های دیزلی سنتی در هر ۱۰۰ کیلومتر حدود ۸۹ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن منتشر می‌کنند. در حالی که اتوبوس‌های برقی، حتی با در نظر گرفتن شرایط فعلی شبکهٔ برق ایران (که هنوز بخش عمده‌ای از آن بر پایهٔ سوخت‌های فسیلی است)، تنها حدود ۱۰ کیلوگرم CO_2 منتشر می‌کنند. این به معنای کاهش تقریبی ۸۹ درصدی انتشار CO_2 است. همچنین، اتوبوس‌های برقی تقریباً هیچ ذرهٔ معلق یا اکسید نیتروژنی منتشر نمی‌کنند که مستقیم به بهبود کیفیت هوای تهران کمک می‌کند؛ شهری که یکی از شهرهای آلودهٔ جهان است.

مقایسه نشان می‌دهد یک اتوبوس دیزلی برای هر ۱۰۰ کیلومتر تقریباً ۳۵ لیتر سوخت مصرف می‌کند، در حالی که یک اتوبوس برقی در مصرف معادل انرژی، تنها ۵ لیتر نیاز دارد؛ این یعنی کاهش مصرف انرژی تا ۸۵ درصد در مقایسه با اتوبوس دیزلی.

کاهش مصرف انرژی، نه تنها به کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک می‌کند، بلکه تأثیر مستقیم بر کاهش انتشار آلاینده‌ها و کاهش وابستگی به منابع فسیلی دارد.

اتوبوس‌های برقی هنگام حرکت حدود ۱۵ دسی‌بل صدای کمتری نسبت به اتوبوس‌های دیزلی تولید می‌کنند. با توجه به مقیاس لگاریتمی دسی‌بل، این کاهش معادل یک کاهش چشمگیر در ادراک انسانی از شدت صدا است. کاهش آلودگی صوتی موجب بهبود کیفیت زندگی شهروندان، مخصوصاً در نواحی پرتردد شهری مانند مرکز تهران خواهد شد.

۴-۶-۳. بلوک مفهومی فنی - عملیاتی: تحلیل عملکرد ناوگان برقی در تهران

جدول‌های ۴ و ۵، به‌ترتیب عملکرد ناوگان در شرایط مختلف و ویژگی‌های باتری را نشان می‌دهند.

جدول ٤. عملکرد ناوگان در شرایط مختلف

شاخص	مقدار در شرایط نرمال	مقدار در شرایط دمای بالا (تابستان تهران)	مقدار در شرایط دمای پایین (زمستان تهران)
برد عملیاتی اتوبوس برقی (کیلومتر)	۳۰۰–۲۵۰ کیلومتر	۲۲۰–۱۸۰ کیلومتر	۲۰۰–۱۶۰ کیلومتر

در دماهای بالا (بالای ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد) و پایین (زیر ۵ درجهٔ سانتی‌گراد)، کارایی باتری‌های لیتیوم ـ یونی افت می‌کند.

مطابق مطالعات جهانی و آزمایش‌های محدود داخلی، اتوبوس‌های برقی در تابستان‌های داغ یا زمستان‌های سرد تهران ممکن است ۲۰ تا ۳۵ درصد افت برد داشته باشند. این موضوع ایجاب می‌کند که در برنامه‌ریزی عملیاتی، ضریب اطمینان برای برد در نظر گرفته شود و ایستگاه‌های شارژ سریع در مسیرهای کلیدی تعبیه شود.

جدول ۵. ویژگی‌های باتری

شاخص	نوع باتری	ظرفیت معمولی	زمان شارژ کامل	چرخهٔ عمر
مشخصات	لیتیوم–یون	۳۵۰–۳۰۰ کیلووات‌ساعت	۳–۲ ساعت (شارژ AC)، ۴۵–۳۰ دقیقه (شارژ DC سریع)	۸–۶ سال یا ۳۰۰۰ چرخهٔ کامل

باتری‌های مورد استفاده در اتوبوس‌های برقی عمدتاً از نوع لیتیوم ـ یون هستند که ظرفیت بالایی دارند. عمر این باتری‌ها بسته به نحوهٔ شارژ و دشارژ می‌تواند به طور متوسط ۶ تا ۸ سال برسد. توسعهٔ ایستگاه‌های شارژ سریع و سیاست‌های بهینهٔ مدیریت شارژ می‌تواند عمر باتری را افزایش داده و هزینه‌های جایگزینی را کاهش دهد.

۴-۶-۴. بلوک مفهومی زیرساختی: تحلیل نیازمندی‌های شبکهٔ برق و شارژ

با در نظر گرفتن مصرف متوسط ۵۰ کیلووات برای هر اتوبوس در ساعت‌های شارژ، افزودن ۱۰۰۰ دستگاه اتوبوس برقی، بار شبکه را حدود ۲/۵ درصد افزایش می‌دهد. اگرچه این مقدار نسبتاً کم است، اما در ساعت‌های اوج مصرف برق (مثلاً عصرهای تابستان) می‌تواند به قطعی برق دامن بزند. بنابراین برنامه‌ریزی شارژ در ساعات غیرپیک (مثلاً نیمه‌شب) و توسعهٔ نیروگاه‌های

خورشیدی - بادی مکمل الزامی است. برای پاسخ‌گویی به ناوگان ۱۰۰۰ دستگاهی در تهران، ترکیبی از شارژ کند در پایانه‌ها و شارژ سریع در مسیرهای شلوغ بهترین گزینه است. با مکان‌یابی دقیق ایستگاه‌های شارژ می‌توان زمان غیرعملیاتی اتوبوس‌ها را به حداقل رساند و بهره‌وری ناوگان را افزایش داد.

۵. بحث و پیشنهادها

برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی شهری به عنوان یک راهکار مهم در راستای توسعهٔ حمل‌ونقل پایدار، مورد توجه کلان‌شهرهایی نظیر تهران قرار گرفته است. اتوبوس‌های برقی با عدم تولید مستقیم آلاینده‌هایی همچون دی‌اکسید کربن، نیتروژن اکسید و ذرات معلق، می‌توانند نقش مؤثری در بهبود کیفیت هوای شهری ایفا کنند و در کنار آن با کاهش آلودگی صوتی، سطح آسایش و سلامت شهروندان را ارتقا دهند [۵۰].

از منظر اقتصادی، نتایج تحلیل هزینهٔ کل مالکیت (TCO) و تحلیل ارزش خالص فعلی (NPV) نشان می‌دهد با وجود هزینه‌های اولیهٔ بیشتر، صرفه‌جویی‌های حاصل از کاهش هزینه‌های سوخت و نگهداری، در افق زمانی حدود ۷ سال می‌تواند هزینه‌های سرمایه‌گذاری را جبران کند [۵۰]. مطالعات دیگر نیز پیش‌بینی کرده‌اند که هزینه‌های عملیاتی اتوبوس‌های برقی به طور متوسط ۳۰ تا ۴۰ درصد کمتر از اتوبوس‌های دیزلی است [۵۱].

علاوه بر این، تحقیقات جدید در زمینهٔ پیاده‌سازی اتوبوس‌های برقی شارژ شبانه در سامانه‌های BRT تهران نشان داده است که این رویکرد علاوه بر مزایای محیط زیستی، موجب بهبود عملکرد ترافیکی از جمله کاهش میانگین زمان سفر تا ۴ درصد، کاهش تأخیر تا ۱۰/۶۷ درصد و کاهش زمان توقف تا ۵/۱۵ درصد می‌شود [۵۰]. این یافته‌ها اهمیت انتخاب الگوهای مناسب شارژ و زمان‌بندی ناوگان را برای افزایش بهره‌وری تأکید می‌کند [۵۲].

از دیدگاه زیرساختی، توسعهٔ ناوگان برقی نیازمند نصب گستردهٔ ایستگاه‌های شارژ، به‌ویژه در پایانه‌های اتوبوس‌رانی، و ارتقای شبکهٔ برق شهری است. تخمین‌ها نشان می‌دهد برای جایگزینی تدریجی ناوگان، حداقل ایجاد ۱۰۰۰ پایانهٔ شارژ شبانه و ۲۰۰ ایستگاه شارژ سریع ضروری است. در این زمینه، مطالعات نشان داده‌اند یکپارچگی میان نهادهای شهری، شرکت‌های برق و اپراتورهای ناوگان برای مدیریت بار شبکه و تأمین زمین مورد نیاز حیاتی خواهد بود [۵۳].

از منظر نهادی و حقوقی، بر اساس قانون «هوای پاک» مصوب مجلس شورای اسلامی، دولت و شهرداری‌ها مکلف به حمایت از توسعهٔ وسایل نقلیهٔ پاک شده‌اند. در این زمینه، ایجاد کارگروه‌های مشترک بین شهرداری تهران، وزارت نیرو، وزارت صمت و سایر نهادهای مرتبط به منظور هماهنگی سیاست‌ها و تأمین منابع مالی ضروری است.

چالش‌های موجود در مسیر برقی‌سازی شامل مواردی نظیر وابستگی به برق تولیدشده از سوخت‌های فسیلی، نیاز به بهبود زیرساخت شبکهٔ برق، و موانع واردات تجهیزات کلیدی است. در خصوص وابستگی به منابع فسیلی، توجه به توسعهٔ هم‌زمان انرژی‌های تجدیدپذیر اهمیت ویژه‌ای دارد تا مزایای محیط زیستی برقی‌سازی ناوگان به طور کامل تحقق یابد.

در شهر شنژن، برقی‌سازی ناوگان طی ۷ سال و با مدل مرحله‌ای اجرا شد، که شامل آزمایش ۱۰۰ دستگاه اتوبوس برقی و توسعهٔ تدریجی زیرساخت‌ها بود. مدل مشابهی برای تهران پیشنهاد می‌شود. مطالعات اخیر روی سامانهٔ BRT تهران نشان داده‌اند با زمان‌بندی مناسب و تکنیک‌های بهینه‌سازی ناوگان، می‌توان تعداد ناوگان مورد نیاز را کاهش داد و بهره‌وری انرژی را افزایش داد. مطالعات جهانی بر اهمیت بهینه‌سازی زمان‌بندی سفر و بهره‌برداری از فناوری‌های نوین مدیریت ناوگان، مانند سامانه‌های IoT و شارژ هوشمند، تأکید دارند.

۶. نتیجه‌گیری

تحلیل‌های انجام‌شده در این مطالعه نشان می‌دهد برقی‌سازی ناوگان اتوبوس‌رانی تهران می‌تواند نقش مهمی در بهبود کیفیت هوا، کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا کند. طبق برآوردهای تطبیقی، جایگزینی ناوگان دیزلی با ناوگان تمام‌برقی می‌تواند سالانه تا ۵۵ درصد از هزینه‌های عملیاتی (شامل سوخت، تعمیرات و نگهداری) بکاهد و میانگین انتشار

دی‌اکسید کربن را تا ۸۵ تا ۹۰ درصد کاهش دهد. در سناریوهای مدل‌سازی‌شده، دورهٔ بازگشت سرمایه بین ۶/۵ تا ۷ سال تخمین زده شده که با توجه به عمر مفید بالای ۱۲ سال برای اتوبوس‌های برقی، از منظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیر است.

برآوردها نشان می‌دهد برای ناوگان ابتدایی ۲۰۰ دستگاه اتوبوس برقی، نیاز به حداقل ۱۰ ایستگاه شارژ سریع و ۲۰۰ پایانهٔ شارژ شبانه وجود خواهد داشت که با مدیریت مناسب بار شبکه در ساعت‌های غیر اوج، قابل تحقق است. تحلیل نیازمندی‌های برق نیز نشان داده است افزایش بار شبکه در صورت زمان‌بندی مناسب شارژ، کمتر از ۲/۵ درصد ظرفیت فعلی خواهد بود و چالش جدی ایجاد نخواهد کرد. با وجود این نتایج مثبت، باید توجه داشت که این مطالعه با محدودیت‌هایی روبه‌رو بوده است. به دلیل عدم دسترسی به داده‌های به‌روز و میدانی از مصرف انرژی، هزینه‌های عملیاتی و عملکرد ناوگان اتوبوسرانی تهران، ناچار به اتکا بر تجارب تطبیقی از شهرهای مشابه مانند شنژن، پاریس و شانگهای شدیم. در نتیجه، برای دقیق‌تر کردن نتایج آتی، انجام مطالعات میدانی و تحلیل‌های عددی بومی برای تهران ضروری است.

نکتهٔ مهم آن است که موفقیت برقی‌سازی ناوگان نباید فقط به انتقال آلودگی از سطح شهر به محل نیروگاه‌ها منجر شود. با توجه به اینکه سهم عمدهٔ برق کشور هنوز از منابع فسیلی تأمین می‌شود، ضروری است که هم‌زمان با توسعهٔ ناوگان برقی، برنامه‌های بهینه‌سازی مصرف برق، توسعهٔ نیروگاه‌های تجدیدپذیر و ارتقای بازده نیروگاه‌های موجود نیز دنبال شود. این رویکرد همسو با سیاست‌های کلان ملی برای بهبود کیفیت هوا و دستیابی به توسعهٔ پایدار است که در اسناد قانونی از جمله قانون هوای پاک نیز مورد تأکید قرار گرفته است. با در نظر گرفتن شرایط فعلی، برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران، نه یک راه‌حل کامل و بی‌چالش، بلکه یک فرصت مهم برای اصلاح سیستم حمل‌ونقل شهری، افزایش بهره‌وری انرژی و ارتقای کیفیت زندگی شهروندان است. اجرای تدریجی و فازبندی‌شده، بهره‌گیری از تجربیات موفق جهانی، ایجاد بسته‌های حمایتی مالی و فنی و مدیریت هوشمندانه، کلید موفقیت این پروژه خواهند بود.

با این‌وجود، برای تکمیل مطالعات در این حوزه، لازم است تحقیقات آتی به چند محور کلیدی معطوف شوند. نخست، انجام مطالعات میدانی دقیق بر عملکرد اتوبوس‌های برقی در شرایط واقعی تهران، شامل بررسی برد عملیاتی، مصرف انرژی و تحلیل هزینه‌های واقعی عملیاتی، اهمیت ویژه‌ای دارد. دوم، توسعهٔ مدل‌های شبیه‌سازی اقتصادی از جمله تحلیل خالص ارزش فعلی (NPV) و هزینهٔ کل مالکیت (TCO) بر مبنای داده‌های بومی تهران می‌تواند در تصمیم‌سازی کمک شایانی کند. سوم، بررسی بارگذاری اتوبوس‌های برقی بر شبکهٔ برق شهری و تحلیل نیاز به توسعهٔ زیرساخت‌های برقی با همکاری شرکت‌های برق منطقه‌ای ضرورت دارد. همچنین، تحلیل سناریوهای مختلف سیاستی و مالی برای تعیین بهترین بسته‌های مشوق و حمایت از توسعهٔ ناوگان برقی در کنار بررسی اثرات محیط زیستی چرخهٔ عمر باتری‌ها و ارائهٔ راهکارهای بهینه برای بازیافت، از دیگر زمینه‌های پیشنهادی برای پژوهش‌های آینده است. در نهایت، مطالعهٔ تطبیقی سیاست‌های موفق حمل‌ونقل برقی در شهرهای مشابه تهران و استخراج مدل‌های بومی‌سازی‌شده می‌تواند مسیر تصمیم‌گیری را علمی‌تر و اثربخش‌تر کند.

منابع

1. Falcon-Mendoza B, Herrera-Perez V, López-Ibarra JA, Gaztañaga H, Camblong-Ruiz H. Fuzzy Based Predictive Control for Optimal Energy Management in Hybrid Urban Buses. 2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 2020:1-5.
2. Ahmed A, Berrada A, Mrabet R. Techno-economic study for the implementation of electric buses for sustainable urban and interurban transportation. Environmental Progress & Sustainable Energy. 2023;43.
3. Abbasi M, Hosseinlou M. [Preprint] Assessing Feasibility of overnight-charging electric bus in a real-world BRT system in the context of a developing country. Scientia Iranica. 2022.
4. Hosseini ST, Ariyana M, Abroodi SM. Transport and urban traffic management in Tehran with economic view. Journal of Urban Economics and Management. 2016;4(15):95-109.
5. Alizadeh H, Sharifi A. Analyzing Urban Travel Behavior Components in Tehran, Iran. Future Transportation. 2023;3(1):236-53.
6. Izadi M. Public Transport Problems and Tehran's All-Pervasive Smog 2019 [updated 2023. Available from: https://financialtribune.com/node/101288
7. Manzolli JA, Trovao JP, Antunes CH. A review of electric bus vehicles research topics–Methods and trends. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022;159:112211.
8. ITDP. Methodology for Evaluating the Pilot Electric Bus Performance. Institute for Transportation and Development Policy; 2020, 2024.
9. Stussi R, Esteves J, editors. Sustainable Public Transport and Mobility: Demonstration of Electric Mini Buses in 15 Portuguese Cities2003.
10. Zhou B, Wu Y, Zhou B, Wang R, Ke W, Zhang S, Hao J. Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. Energy. 2016;96:603-13.
11. Peña Morales D, Dorronsoro B, Tchernykh A, Ruiz P. Public transport timetable and charge optimization using multiple electric buses types2022. 751-4 p.
12. Tang C, Li X, Ceder AA, Wang X. Public Transport Fleet Replacement Optimization Using Multi-Type Battery-Powered Electric Buses. Transportation Research Record. 2021;2675:1422 - 31.
13. Földes D, Csonka B, Szilassy PÁ. Urban Bus Network Electrification. 2023.
14. Papa G, Santo Zarnik M, Vukašinović V. Electric-bus routes in hilly urban areas: Overview and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022;165:112555.
15. Zhang X, Qu Y, editors. Optimal time-dependent electric shuttle bus route design for tourist cities. Other Conferences; 2022.
16. Ruan LF, Hao X, Qi W, editors. Optimization of Pure Electric Bus Scheduling Based on Immune Optimization Algorithm2021.
17. Vijay U, Woo S, Moura SJ, Jain A, Rodriguez DE, Gambacorta S, et al. Valuation of Urban Public Bus Electrification with Open Data and Physics-Informed Machine Learning. Journal of Advanced Transportation. 2023.
18. Pramanik M, Rahman M, Fahim A, Rahman MM. Prospects and Challenges of E-Rickshaws in Urban Transportation Systems of Bangladesh: A Case Study of Rangpur City Corporation. American Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2024.
19. Tajudin AHM, Fahmy-Abdullah M, Sufahani SF, Ahmad WNAW, editors. The Effectiveness Level on the Electric Buses Operation: Case Study for Affordability and Accessibility. Proceedings of the Fourth International Conference on Trends in Computational and Cognitive Engineering: TCCE 2022; 2023: Springer.
20 Bank W. Electrification of Public Transport: A Case Study of the Shenzhen Bus Group: World Bank; 2021.
21. Zhou Y, Ong GP, Meng Q. The road to electrification: Bus fleet replacement strategies. Applied Energy. 2023 May 1;337:120903.
22 Nguyen MH, Pojani D .Can electric buses entice more public transport use? Empirical evidence from Vietnam. Case Studies on Transport Policy. 2023;13:101040.
23. Borghei BB, Magnusson T. Niche aggregation through cumulative learning: A study of multiple electric bus projects .Environmental Innovation and Societal Transitions. 2018;28:108-21.

24. Teoh LE, Khoo HL, Goh SY, Chong LM. Scenario-based electric bus operation: A case study of Putrajaya, Malaysia. International Journal of Transportation Science and Technology. 2018;710 (1)-25. Shlasky G. The advantages and challenges of electric buses 2017 [Available from: https://www.linkedin.com/pulse/advantages-challenges-electric-buses-gady-shlask
26. Corporate. What is an electric bus? 2023 [Available from: https://corporate.enelx.com/en/question-and-answers/what-is-electric-bus
27. Rolan Siregar HDSBDASMANGHERBDA. Power Requirement and Cost Analysis of Electric Bus using Simulation Method with RCAVe-EV1 Software and GPS Data; A Case Study of Greater Jakarta. International Journal of Technology. 2022;13(4):291-319.
28. greencape. Case Study: Electrification of public transportation 2023 [Available from: https://greencape.co.za/wp-content/uploads/2023/08/CCT23_GABS-case-study_Electrification-of-public-transportation.pdf
29. UITP. THE IMPACT OF ELECTRIC BUSES ON URBAN LIFE 2019 [Available from: https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/UITP-policybrief-June2019-V6-WEB-OK.pdf
30. Madanipour A. Tehrān. Encyclopedia Britannica 2024 [Available from: https://www.britannica.com/place/Tehra .
31. Naik MV. A review on charging infrastructure for electric transit buses. Majlesi Journal of Electrical Engineering. 2022;16(1):19-31.
32. Zare P, Davoudkhani IF, Zare R, Ghadimi H, Sabery B, Abad ABB, editors. Investigating the Impacts of Electric Vehicles on Iran's Distribution Network. 2023 8th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM); 2023: IEEE.
33. Voytkiv S. Оцінка доцільності проектування, виробництва та експлуатації міських електробусів середнього класу. Vehicle and electronics Innovative technologies. 2023(23):15-26.
34. Wenz K-P, Serrano-Guerrero X, Barragán-Escandón A, González L, Clairand J-M. Route prioritization of urban public transportation from conventional to electric buses: A new methodology and a study of case in an intermediate city of Ecuador. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021;148:111215.
35. Khanehshenas F, Mazloumi A, Dabiri R, Adinevand SN. Fatigue in transportation operations: A contextual factors survey among Iranian suburban drivers. Work. 2023;75(4):1439-54.
36. Abbasi M, Hosseinlou M, Jafarzadehfadaki M. An Investigation of Bus Rapid Transit System (BRT) Based on Economic and Air Pollution Analysis (Tehran, Iran). Case Studies on Transport Policy. 2019; 8.
37. Eudy L, Jeffers M. Zero-emission bus evaluation results: King County Metro battery electric buses. United States. Federal Transit Administration. Office of Research, 2018.
38. Fragassa C, editor Electric City Buses with Modular Platform: A Design Proposition for Sustainable Mobility2017.
39. Guo J. Literature review on transit bus maintenance cost. California Air Resources Board Advanced Clean Transit Program. 2016:2020-06.
40. Venair. Electric buses will become more cost-effective than Internal Combustion Engine buses 2023 [Available from: https://venair.com/en/blog/articles/electric-buses-vs-combustionengine-buses
41. climateworks. Electric buses can reduce costs, improve air quality and support local industries 2020 [Available from: https://www.climateworkscentre.org/news/electric-buses-can-reduce-costs-improve-air-quality-and-support-local-industries
42. CFF. Financing Models And Sources For Zero Emission Mobility Projects In Mexico 2024 [Available from: https://cff-prod.s3.amazonaws.com/storage/files/pCqNqBvs8luzgsSSsGaVippyB4j1QKtqAp5FROh3.pdf
43. ecity. Are electric buses environmentally friendly? 2023. Available from: https://ecity.solarisbus.com/en/e-mobility/are-electric-buses-environmentally-friendly
44. Chikishev EM, D. V. Kapsky, Semchenkov SS. Assessment of the influence of transport and natural-climatic factors on the level of electricity consumption of electric buses in an urban environment. Science and Technology. 2023;22(1):48-59.
45. Kairmukhambetov O. PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF ELECTRIC BUSES. Вестник КазАТК. 2021.

46. Li X, Wang T, Li J, Tian Y, Tian J. Energy Consumption Estimation for Electric Buses Based on a Physical and Data-Driven Fusion Model. Energies. 2022.
47. Velandia Vargas JE, Falco DG, da Silva Walter AC, Cavaliero CKN, Seabra JEA. Life cycle assessment of electric vehicles and buses in Brazil: effects of local manufacturing, mass reduction, and energy consumption evolution. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2019:1-20.
48. Paul A, Subramanian K, Nachinarkiniyan S. PV-based off-board electric vehicle battery charger using BIDC. TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING & COMPUTER SCIENCES. 2019;27:2850-65.
49. Topal O. A novel on the retrofit from CNG buses to electric buses for rubber-tyred wheeled public transportation systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2022; 237:1738 - 50.
50. Abbasi, Mohammadhossein and Mansour Hadji Hosseinlou. “Assessing Feasibility of overnight-charging electric bus in a real-world BRT system in the context of a developing country.” Scientia Iranica, 2022: n. pag.
51. Xing, Yan, Quanbo Fu, Yachao Li, Hanshuo Chu and Enyi Niu. “Optimal Model of Electric Bus Scheduling Based on Energy Consumption and Battery Loss.” Sustainability, 2023: n. pag.
52. Ataeian, Shervin, Maghsud Solimanpur, Mahdi Amiripour and Ravi Shankar. “Synchronized Timetables for Bus Rapid Transit Networks in Small and Large Cities.” Scientia Iranica, 2019: n. pag.
53. Barbosa, Fábio Coelho. “Battery Electric Transit Bus Fleet Implementation Challenges - Infrastructure and Operational Topics Review.” SAE Technical Paper Series, 2024: n. pag.