



Policy Framework for the Transition to Electric Bus Transit in Tehran: Integrating Transportation, Energy, and Urban Governance

Payam Moeini¹ | Amin Faridiaghdam² | Ali Zahab Saniei³ | Hamid Mirzahassein^{4*}

1. Traffic and Transportation Department, Tehran Urban Research and Planning Center, Tehran, Iran. E-mail: paammoeini@gmail.com

2. Ph.D. Candidate, Department of Civil-Transportation Planning, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran. E-mail: faridiaghdam@edu.ikiu.ac.ir

3. Traffic and Transportation Department, Tehran Urban Research and Planning Center, Tehran, Iran. E-mail: a.zahabs@gmail.com

4. Corresponding Author, Professor, Department of Civil-Transportation Planning, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran. E-mail: mirzahassein@eng.ikiu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received 25 May 2026

Revised 23 June 2026

Accepted 24 August 2026

Published Online 01 January 2027

Keywords:

Fleet electrification,
Electric bus,
Public transport,
Power distribution network,
Charging infrastructure,
Urban management,
Tehran.

ABSTRACT

The electrification of urban public transport fleets, particularly bus fleets, is one of the key pathways for reducing emissions, modernizing fleets, and improving the quality of urban transport services in metropolitan areas. However, the success of this transition does not depend solely on the procurement of electric buses; rather, it requires simultaneous coordination among the transport system, the power distribution network, charging infrastructure, fleet operations, battery economics, and urban governance. Using an applied approach and focusing on Tehran as a case study, this paper analyzes the requirements and challenges of electrifying the city's bus fleet. The data were derived from a qualitative content analysis of the analytical report of a specialized expert meeting on urban transport fleet electrification, reflecting the perspectives of experts in transport, electricity, industry, and urban management. The findings indicate that bus fleet electrification in Tehran should not be pursued through a uniform, fleet-oriented approach. Instead, it should be prioritized based on the characteristics of each route, the capacity of the power distribution network, route gradients, demand patterns, charging station siting potential, battery life-cycle costs, and operational capacity. The results also show that the gap between nominal and real-world bus range, the impacts of unmanaged charging on the distribution network, hidden costs associated with battery replacement, weak institutional coordination, and the absence of an integrated roadmap are among the main risks of a rapid and uncoordinated expansion of electric buses in Tehran. The paper concludes that successful electrification of Tehran's bus fleet requires a shift from an equipment procurement approach toward a phased, data-driven, and integrated approach within an energy-transport governance framework.

Cite this article: Moeini, P.; Faridiaghdam, A.; Zahab Saniei, A. & Mirzahassein, H. (2027). Policy Framework for the Transition to Electric Bus Transit in Tehran: Integrating Transportation, Energy, and Urban Governance. *Urban Development Policy Making*, 3 (4), 779-799. DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.592142.1141>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.592142.1141>

Introduction and Background

The electrification of urban bus fleets is increasingly viewed as a key strategy for reducing emissions, modernizing public transport, and improving service quality in metropolitan areas. However, successful electrification is not merely a matter of replacing diesel buses with electric ones. It requires coordinated planning across transport operations, power distribution networks, charging infrastructure,

battery economics, and urban governance. In Tehran, this transition is particularly complex due to air pollution, fleet aging, route diversity, urban gradients, power network constraints, and fragmented institutional responsibilities.

Methodology

This paper adopts an applied qualitative approach based on the case study of Tehran. The main data source is a specialized expert meeting on urban transport fleet electrification, held with the participation of 21 experts, academics, managers, and researchers from transport, electricity, industry, and urban management sectors. The data were analyzed using qualitative content analysis with a combined deductive and inductive coding strategy. Deductive codes were derived from the literature, while inductive codes emerged from expert discussions on Tehran's operational and institutional conditions.

Results

The findings show that bus fleet electrification in Tehran should not be pursued through a uniform, fleet-oriented approach. Instead, it should be based on route prioritization, power distribution capacity, charging feasibility, real-world operating conditions, life-cycle costs, battery management, and institutional coordination. Key risks include the gap between nominal and real-world bus range, unmanaged charging impacts on the distribution network, hidden battery replacement costs, weak coordination among responsible institutions, and the absence of an integrated roadmap.

Discussion

The study argues that Tehran should adopt a phased and data-driven electrification strategy. This requires identifying suitable pilot routes, assessing grid hosting capacity, designing smart charging systems, revising operational schedules, estimating full life-cycle costs, and creating financial mechanisms for battery replacement and recycling. A permanent coordinating structure is also needed to align the municipality, bus operators, power utilities, regulators, financiers, and manufacturers.

Conclusion

The paper concludes that electrifying Tehran's bus fleet is strategically defensible only if it is implemented as an integrated energy–transport governance transition rather than a simple vehicle procurement program. With route-based prioritization, grid-aware planning, operational redesign, and institutional coordination, electric buses can support cleaner air, fleet modernization, and better public transport services in Tehran.



سیاستگذاری گذار به اتوبوسرانی برقی در تهران: چارچوبی یکپارچه برای حمل و نقل، انرژی و حکمرانی شهری

پیام معینی^۱ | امین فریدی اقدم^۲ | علی ذهب صنیعی^۳ | حمید میرزاحسین^۴*

۱. مدیر گروه مطالعات حمل و نقل و ترافیک، مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران، تهران، ایران. رایانامه: paiammoeini@gmail.com
۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران - برنامه ریزی حمل و نقل، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی^(۶)، قزوین، ایران. رایانامه: faridiaghdam@edu.ikiu.ac.ir
۳. کارشناس گروه مطالعات حمل و نقل و ترافیک، مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران، تهران، ایران. رایانامه: a.zahabs@gmail.com
۴. نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی عمران - برنامه ریزی حمل و نقل، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی^(۶)، قزوین، ایران. رایانامه: mirzahosseini@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

برقی سازی ناوگان حمل و نقل همگانی، به ویژه ناوگان اتوبوسرانی، یکی از مسیرهای مهم کاهش آلاینده‌گی، نوسازی ناوگان و ارتقای کیفیت خدمات شهری در کلان شهرهاست. با این حال، موفقیت این گذار فقط به خرید اتوبوس برقی وابسته نیست و نیازمند هماهنگی همزمان میان نظام حمل و نقل، شبکه توزیع برق، زیرساخت شارژ، بهره برداری ناوگان، اقتصاد باتری و حکمرانی شهری است. این مقاله با رویکردی کاربردی و مبتنی بر مطالعه موردی تهران، الزامات و چالش های برقی سازی ناوگان اتوبوسرانی را تحلیل می کند. داده های مقاله از تحلیل محتوای کیفی گزارش تحلیلی یک نشست تخصصی درباره برقی سازی ناوگان حمل و نقل شهری، منعکس کننده دیدگاه های خبرگان حوزه های حمل و نقل، برق، صنعت و مدیریت شهری، استخراج شده است. یافته ها نشان می دهد برقی سازی در تهران نباید به صورت یکسان و ناوگان محور دنبال شود، بلکه لازم است بر اساس ویژگی های هر خط، ظرفیت شبکه توزیع برق، شیب مسیر، الگوی تقاضا، امکان جانمایی شارژر، هزینه چرخه عمر باتری و توان بهره برداری اولویت بندی شود. همچنین، تفاوت برد اسمی و واقعی اتوبوس ها، آثار شارژ کنترل نشده بر شبکه توزیع، هزینه های پنهان جایگزینی باتری، ضعف هماهنگی نهادی و نبود نقشه راه یکپارچه، از مهم ترین ریسک های توسعه شتاب زده ناوگان برقی در تهران به شمار می روند. نتیجه مقاله نشان می دهد برقی سازی موفق ناوگان اتوبوسرانی تهران مستلزم گذار از رویکرد خرید تجهیزات به رویکردی مرحله ای، داده محور و یکپارچه در سطح حکمرانی انرژی - حمل و نقل است.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۱۱

کلیدواژه:

برقی سازی ناوگان،
اتوبوس برقی،
حمل و نقل همگانی،
شبکه توزیع برق،
زیرساخت شارژ،
مدیریت شهری،
تهران.

استناد: معینی، پیام؛ فریدی اقدم، امین؛ ذهب صنیعی، علی و میرزاحسین، حمید (۱۴۰۵). سیاستگذاری گذار به اتوبوسرانی برقی در تهران: چارچوبی یکپارچه برای حمل و نقل، انرژی و حکمرانی شهری. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۳ (۴) ۷۷۹-۷۹۹.

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.592142.1141>

© نویسندگان

DOI: <http://doi.org/10.22034/judpm.2026.592142.1141>



۱. مقدمه

رشد شهرنشینی، افزایش تقاضای سفرهای روزانه، فرسودگی ناوگان حمل‌ونقل همگانی و تشدید آلودگی هوا، ضرورت بازنگری در الگوی توسعه حمل‌ونقل شهری را بیش از گذشته آشکار کرده است. در این میان، برقی‌سازی ناوگان حمل‌ونقل همگانی، به‌ویژه ناوگان اتوبوسرانی، به عنوان یکی از گزینه‌های مهم برای کاهش آلودگی محلی، نوسازی ناوگان و حرکت به سوی حمل‌ونقل پاک مورد توجه بسیاری از شهرهای جهان قرار گرفته است [۱ و ۲]. با وجود این، تجربه‌های اجرایی نشان می‌دهد برقی‌سازی ناوگان فقط جایگزینی اتوبوس دیزلی با اتوبوس برقی نیست، بلکه تغییری ساختاری در شیوه تأمین انرژی، برنامه‌ریزی مسیر، بهره‌برداری، نگهداری، تأمین مالی و مدیریت زیرساخت‌های شهری محسوب می‌شود [۲ - ۴].

در شهر تهران، اهمیت این موضوع دوچندان است. تهران از یک‌سو با چالش‌هایی نظیر آلودگی هوا، فرسودگی بخشی از ناوگان حمل‌ونقل همگانی، تراکم سفرهای شهری و نیاز به ارتقای کیفیت خدمات اتوبوسرانی مواجه است و از سوی دیگر، ویژگی‌های کالبدی، اقلیمی و زیرساختی آن، برقی‌سازی ناوگان را به مسئله‌ای پیچیده و چندبعدی تبدیل می‌کند. عواملی مانند شیب معابر، طول مسیرها، الگوی توقف و حرکت، دمای محیط، حجم مسافر، ظرفیت توقفگاه‌ها، امکان جانمایی ایستگاه‌های شارژ و توان شبکه توزیع برق، همگی بر عملکرد واقعی اتوبوس‌های برقی اثرگذارند [۲ و ۵]. بنابراین، تصمیم‌گیری درباره توسعه ناوگان برقی در تهران نمی‌تواند تنها بر اساس مشخصات اسمی کارخانه، ظرفیت باتری یا تعداد اتوبوس خریداری شده انجام شود. یکی از چالش‌های اصلی در سیاستگذاری برقی‌سازی ناوگان، غلبه نگاه ناوگانی و تجهیزاتی بر نگاه سیستمی است. در بسیاری از برنامه‌ها، برقی‌سازی به معنای خرید اتوبوس برقی و نصب شارژر تلقی می‌شود؛ در حالی که موفقیت این فرایند به هماهنگی میان چند حوزه وابسته است [۳، ۴ و ۶]: حمل‌ونقل شهری، شبکه توزیع برق، زیرساخت شارژ، مدیریت انرژی، اقتصاد شهری، نگهداری و تعمیرات، بازیافت باتری و حکمرانی نهادی. اگر این اجزا به صورت هم‌زمان و یکپارچه دیده نشوند، توسعه ناوگان برقی می‌تواند به افزایش هزینه‌های پنهان، کاهش بهره‌وری ناوگان، فشار بر شبکه توزیع برق، ضعف در خدمات‌رسانی و شکل‌گیری ریسک‌های مالی آینده منجر شود.

از منظر اجرایی نیز برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران نیازمند رویکردی خط‌محور و منطقه‌محور است. همه خطوط اتوبوسرانی ظرفیت و اولویت یکسانی برای برقی‌سازی ندارند [۵ و ۷]. برخی خطوط به دلیل تقاضای بالا، آلودگی بیشتر، امکان مناسب جانمایی شارژر، طول مسیر قابل کنترل و دسترسی بهتر به زیرساخت برق، گزینه‌های مناسب‌تری برای شروع هستند؛ در مقابل، برخی مسیرها به دلیل شیب زیاد، طول مسیر بالا، محدودیت توقفگاه، ضعف شبکه توزیع برق یا شرایط بهره‌برداری خاص، ممکن است در مراحل اولیه برقی‌سازی با ریسک بیشتری همراه باشند. از این‌رو، پرسش اصلی این نیست که «آیا اتوبوس برقی خوب است یا نه»، بلکه این است که «کدام خطوط، در چه مناطقی، با چه نوع فناوری، چه مدل شارژ و چه سازوکار مدیریتی باید برقی شوند».

مسئله دیگری که ضرورت نگاه کاربردی به موضوع را تقویت می‌کند، هزینه چرخه عمر ناوگان برقی است. هرچند اتوبوس‌های برقی می‌توانند در کاهش آلودگی و برخی هزینه‌های بهره‌برداری مزیت داشته باشند، اما هزینه اولیه خرید، ایجاد زیرساخت شارژ، تقویت شبکه توزیع برق، آموزش نیروی انسانی، نگهداری تخصصی، تعویض باتری و مدیریت باتری‌های فرسوده باید از ابتدا در تصمیم‌گیری لحاظ شود [۲ و ۶]. نادیده گرفتن این هزینه‌ها ممکن است باعث شود بخشی از بار مالی پروژه به سال‌های آینده منتقل شده و در قالب بدهی پنهان برای مدیریت شهری ظاهر شود. بنابراین، برقی‌سازی موفق، نیازمند برنامه‌ریزی مالی و عملیاتی در کل چرخه عمر ناوگان است، نه فقط تأمین اعتبار برای خرید اولیه.

بر این اساس، مقاله حاضر با رویکردی کاربردی و با تمرکز بر مطالعه موردی تهران، به تحلیل الزامات فنی، اقتصادی، زیرساختی و مدیریتی برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی می‌پردازد. هدف مقاله آن است که با اتکا به تحلیل محتوای نشست تخصصی برقی‌سازی ناوگان حمل‌ونقل شهری و دیدگاه‌های خبرگان حوزه حمل‌ونقل، برق، صنعت و مدیریت شهری، نشان دهد برقی‌سازی ناوگان در تهران باید از سطح تصمیم‌های تجهیزاتی فراتر رود و در قالب یک چارچوب یکپارچه انرژی - حمل‌ونقل -

حکمرانی دنبال شود. در این چارچوب، اولویت بندی خطوط، ظرفیت میزبانی شبکه توزیع برق، مدیریت هوشمند شارژ، هزینه چرخه عمر باتری، بهره برداری واقعی ناوگان و هماهنگی نهادی، اجزای اصلی تصمیم گیری محسوب می شوند.

نوآوری مقاله حاضر در سه سطح قابل بیان است. نخست، از منظر مفهومی، برقی سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران به صورت یک مسئله یکپارچه در مرز میان حمل و نقل، شبکه توزیع برق، زیرساخت شارژ، بهره برداری، اقتصاد چرخه عمر و حکمرانی شهری تحلیل شده است؛ در حالی که بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین [۳، ۵ و ۷ - ۹] این ابعاد را به صورت جداگانه بررسی کرده اند. دوم، از منظر روش شناختی، مقاله با استفاده از کدگذاری ترکیبی قیاسی - استقرایی، شواهد حاصل از یک نشست تخصصی چندرشته ای را با ادبیات علمی پیوند داده و از این طریق مضامین سیاستی متناسب با شرایط تهران را استخراج کرده است. سوم، از منظر کاربردی، خروجی پژوهش فقط به شناسایی چالش ها محدود نمی شود، بلکه این چالش ها در قالب مجموعه ای از الزامات اجرایی و یک چارچوب سیاستگذاری برای اولویت بندی خطوط، مدیریت ظرفیت شبکه برق، طراحی بهره برداری، مدیریت چرخه عمر باتری و هماهنگی نهادی بازآرایی شده اند.

ساختار مقاله به این ترتیب تنظیم شده است. پس از مقدمه، در بخش دوم ادبیات مرتبط با برقی سازی ناوگان اتوبوسرانی با تمرکز بر ابعاد حمل و نقل و بهره برداری، شبکه توزیع برق و زیرساخت شارژ، اقتصاد چرخه عمر و حکمرانی شهری مرور شده و چارچوب مفهومی مقاله ارائه می شود. بخش سوم به روش شناسی مطالعه، منبع داده، ترکیب مشارکت کنندگان نشست تخصصی و واحد تحلیل اختصاص دارد. در بخش چهارم، یافته های حاصل از تحلیل محتوای نشست در محورهای اصلی سیاستگذاری و اجرای برقی سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران ارائه می شود. در بخش پنجم، یافته ها در ارتباط با مطالعات پیشین تفسیر شده و پیشنهادها ی سیاستی و اجرایی ارائه می شود. در نهایت، بخش ششم به جمع بندی نتایج، پیامدهای کاربردی و مسیرهای پیشنهادی برای توسعه مرحله ای ناوگان برقی در تهران اختصاص دارد.

۲. مرور ادبیات و چارچوب مفهومی

برقی سازی ناوگان حمل و نقل همگانی در سال های اخیر به یکی از محورهای اصلی سیاستگذاری حمل و نقل پایدار در کلان شهرها تبدیل شده است. افزایش آلودگی هوا، فرسودگی ناوگان دیزلی، ضرورت کاهش انتشار آلاینده ها و حرکت به سوی سامانه های حمل و نقل کم کربن موجب شده است که اتوبوس های برقی به عنوان یکی از گزینه های اصلی نوسازی حمل و نقل عمومی مورد توجه قرار گیرند. با این حال، شواهد موجود نشان می دهد گذار به ناوگان برقی فقط یک تغییر فناورانه در نوع وسیله نقلیه نیست، بلکه فرایندی چندبعدی است که به طور همزمان با برنامه ریزی خطوط، بهره برداری ناوگان، زیرساخت شارژ، شبکه توزیع برق، اقتصاد چرخه عمر، سیاست های حمایتی و ظرفیت نهادی مدیریت شهری ارتباط دارد [۱، ۲، ۳ و ۶]. در نتیجه، ادبیات جدید این حوزه به تدریج از مطالعات صرفاً فنی یا مقایسه ای به سمت رویکردهای یکپارچه تر در مرز میان حمل و نقل، انرژی و حکمرانی حرکت کرده است.

در سطح جهانی، روند توسعه ناوگان برقی در چارچوب گذار گسترده تر به تحرک الکتریکی تحلیل می شود. گزارش های بین المللی نشان می دهند رشد پایدار ناوگان برقی بدون توسعه همزمان زیرساخت شارژ، ظرفیت و مدیریت شبکه برق، استانداردهای فنی، سازوکارهای مالی و ترتیبات اجرایی امکان پذیر نیست [۱ - ۳]. تجربه شهرهایی مانند شژن نیز نشان داده است که برقی سازی گسترده ناوگان نه فقط با خرید اتوبوس، بلکه از طریق توسعه زیرساخت شارژ، بازتنظیم برنامه بهره برداری، حمایت مالی و هماهنگی نهادی امکان پذیر شده است [۱۰]. بنابراین، تجربه های جهانی را باید بیش از آنکه الگوی آماده برای انتقال مستقیم به سایر شهرها دانست، منبعی برای طراحی راهکارهای متناسب با شرایط محلی تلقی کرد.

۲-۱. سیاستگذاری حمل و نقل و بهره برداری ناوگان برقی

یکی از جهت گیری های مهم ادبیات جدید، گذار از نگاه «ناوگان محور» به برنامه ریزی «خط محور و سامانه محور» است. همه خطوط اتوبوسرانی از نظر تقاضا، طول مسیر، شیب، تعداد توقف ها، الگوی حرکت، زمان توقف در پایانه، مصرف انرژی و امکان استقرار زیرساخت شارژ شرایط یکسانی ندارند. از این رو، اولویت بندی خطوط و انتخاب فناوری مناسب برای هر مسیر به یکی از

مسائل اساسی برنامه‌ریزی برقی‌سازی تبدیل شده است. Wenz و همکاران نیز در چارچوب اولویت‌بندی خطوط برای گذار از اتوبوس متعارف به اتوبوس برقی، بر لزوم ارزیابی چندمعیاره خطوط پیش از توسعه ناوگان تأکید کرده‌اند [۷].

مطالعات جدیدتر این دیدگاه را توسعه داده‌اند. Frieß و Pferschy با بررسی یک سامانه اتوبوسرانی بدون آلاینده‌گی نشان دادند انتخاب فناوری بهینه باید متناسب با شرایط هر خط و با در نظر گرفتن همزمان برنامه وسیله نقلیه، برنامه شارژ، ظرفیت باتری و طراحی زیرساخت انجام شود. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد یک فناوری واحد الزاماً برای همه خطوط بهینه نیست و ترکیب فناوری‌ها می‌تواند از نظر هزینه چرخه عمر مزیت داشته باشد [۱۱].

در همین راستا، Nath و همکاران مسئله مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ، تخصیص اتوبوس‌ها به سفرها و زمان‌بندی شارژ را به صورت یکپارچه بررسی کردند. تحلیل آن‌ها در ۱۴ شبکه واقعی اتوبوسرانی نشان داد تصمیم‌گیری همزمان درباره عملیات و زیرساخت نسبت به رویکردهای ترتیبی می‌تواند هزینه‌های عملیاتی و کل سامانه را کاهش دهد [۱۲]. این یافته اهمیت هماهنگی میان طراحی شبکه، برنامه حرکت و برنامه شارژ را در توسعه ناوگان برقی نشان می‌دهد.

از منظر گذار زمانی ناوگان نیز جایگزینی کامل ناوگان دیزلی با اتوبوس برقی معمولاً فرایندی تدریجی است. Zhou و همکاران با توسعه مدل جایگزینی ناوگان نشان دادند زمان‌بندی ورود اتوبوس‌های برقی، خروج ناوگان دیزلی، هزینه‌های داخلی و خارجی و سیاست‌های حمایتی باید در یک افق برنامه‌ریزی بلندمدت به صورت همزمان دیده شوند [۱۳]. این مطالعه همچنین نشان می‌دهد مشوق‌های سیاستی می‌توانند سرعت گذار ناوگان را به طور معناداری تغییر دهند.

اهمیت شرایط واقعی بهره‌برداری نیز در مطالعات تجربی اخیر مورد تأکید قرار گرفته است. Kapatsila و همکاران با استفاده از داده‌های عملیاتی اتوبوس‌های برقی، هیبریدی و دیزلی در پورتلند نشان دادند عملکرد اتوبوس برقی به ویژگی مسیر، تعداد توقف‌ها، شرایط بهره‌برداری و نیازهای نگهداری وابسته است و توصیه کردند استقرار اتوبوس‌های برقی با توجه به مشخصات واقعی خطوط انجام شود [۱۴].

مجموع این مطالعات نشان می‌دهد سیاست برقی‌سازی نمی‌تواند فقط بر تعداد اتوبوس خریداری‌شده یا مشخصات اسمی وسیله نقلیه مبتنی باشد. ویژگی‌های خط، الگوی تقاضا، زمان‌بندی عملیات، محل و نوع شارژ و ظرفیت واقعی بهره‌برداری باید به صورت یک مجموعه به هم پیوسته تحلیل شوند.

۲-۲. شبکه توزیع برق و زیرساخت شارژ

بعد دوم ادبیات بر رابطه میان برقی‌سازی ناوگان و سامانه انرژی تمرکز دارد. اتوبوس‌های برقی، به‌ویژه در مقیاس گسترده، بار جدید و نسبتاً متمرکزی به شبکه توزیع تحمیل می‌کنند. در صورت نبود مدیریت مناسب، شارژ همزمان ناوگان می‌تواند باعث افزایش پیک بار، افت ولتاژ، عدم تعادل شبکه و کاهش کیفیت توان شود [۴ و ۸]. بنابراین، مسئله اصلی تنها مقدار کل انرژی مورد نیاز ناوگان نیست، بلکه زمان و مکان مصرف انرژی نیز اهمیت تعیین‌کننده دارد.

مطالعات مربوط به جانمایی زیرساخت شارژ نیز نشان داده‌اند توسعه ایستگاه‌های شارژ باید با محدودیت‌های مکانی و ظرفیت شبکه هماهنگ شود. Zhao و همکاران بر رویکردهای Grid-Aware برای استقرار ایستگاه‌های شارژ سریع تأکید کرده‌اند و نشان می‌دهند جانمایی زیرساخت بدون لحاظ محدودیت‌های شبکه می‌تواند به نتایج غیربهینه منجر شود [۹]. در همین راستا، ادبیات جدید بر مفهوم ظرفیت میزبانی شبکه، مدیریت هوشمند شارژ و هماهنگی زمانی میان تقاضای حمل‌ونقل و ظرفیت شبکه برق تأکید دارد.

Najafi و همکاران در یک مطالعه جدیدتر، زیرساخت شارژ، زمان‌بندی اتوبوس‌ها و سیستم انرژی را به صورت همزمان بهینه‌سازی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد تقاضای بالای شارژ اتوبوس‌ها در برخی دوره‌ها می‌تواند محدودیت‌های فنی شبکه توزیع را نقض کند؛ در مقابل، ترکیب منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند به مدیریت تقاضای مکانی - زمانی شارژ و افزایش پایداری شبکه کمک کند [۱۵].

بر این اساس، برنامه ریزی ناوگان برقی باید از ابتدا با برنامه ریزی انرژی هماهنگ باشد. انتخاب محل دپو و شارژر، توان شارژ، زمان بندی شارژ، ظرفیت فیدرها و پست ها، زیرساخت ارتباطی و امکان کنترل هوشمند بار باید همزمان بررسی شوند. چنین نگاهی، برقی سازی ناوگان را از یک برنامه حمل و نقلی به یک مسئله مشترک میان بخش حمل و نقل و انرژی تبدیل می کند.

۲-۳. اقتصاد چرخه عمر و مدیریت باتری

بعد اقتصادی برقی سازی ناوگان نیز در سال های اخیر از مقایسه ساده قیمت خرید اتوبوس برقی و دیزلی فاصله گرفته و بیشتر به سمت تحلیل هزینه چرخه عمر حرکت کرده است. هزینه واقعی ناوگان برقی علاوه بر قیمت خرید شامل زیرساخت شارژ، تقویت شبکه، مصرف انرژی، نگهداری تخصصی، خواب ناوگان، آموزش، تعویض باتری و مدیریت پایان عمر آن است. از این رو، شاخص هایی مانند هزینه کل مالکیت، هزینه چرخه عمر، ارزش فعلی خالص و هزینه های خارجی برای مقایسه گزینه های مختلف اهمیت دارند [۲ و ۶].

Pei و همکاران در یک تحلیل چرخه عمر، سه سامانه مختلف اتوبوس برقی شامل شارژ ثابت، تعویض باتری و شارژ بی سیم پویا را مقایسه کردند. در این مطالعه، زیرساخت، اندازه ناوگان، ظرفیت باتری و تخریب باتری به صورت همزمان در مدل وارد شد و نتایج نشان داد انتخاب گزینه اقتصادی تر به شرایط بهره برداری هر شهر وابسته است و نمی توان یک فناوری را به صورت عمومی برای همه شهرها برتر دانست [۱۶].

موضوع باتری نیز از منظر اقتصادی اهمیت ویژه ای دارد، زیرا عمر باتری الزاماً با عمر مفید خود اتوبوس یکسان نیست و هزینه جایگزینی آن می تواند بخش مهمی از هزینه های آتی پروژه را تشکیل دهد. مدل جایگزینی ناوگان Zhou و همکاران نیز هزینه باتری و بازیافت آن را در کنار سایر هزینه های داخلی و خارجی در تصمیم گیری وارد می کند [۱۳]. بنابراین، تصمیم درباره برقی سازی باید از مرحله خرید فراتر رود و کل چرخه استفاده، تعویض و مدیریت پایان عمر باتری را دربرگیرد.

این مسئله در شرایط ایران اهمیت مضاعف دارد؛ زیرا قیمت نسبی برق و سوخت، ساختار یارانه ای انرژی، نرخ ارز، هزینه واردات تجهیزات و محدودیت های تأمین قطعه می توانند نتایج محاسبات اقتصادی را تغییر دهند. از این رو، نتایج مطالعات بین المللی در حوزه هزینه چرخه عمر باید با شرایط نهادی و اقتصادی ایران بومی سازی شوند.

۲-۴. حکمرانی و هماهنگی نهادی در گذار به ناوگان برقی

بخش مهمی از ادبیات جدید نشان می دهد چالش های گذار به تحرک برقی تنها فنی و اقتصادی نیستند و ساختار حکمرانی نیز نقش تعیین کننده ای در موفقیت یا شکست این گذار دارد. توسعه ناوگان برقی معمولاً مستلزم مشارکت همزمان نهادهای حمل و نقل شهری، اپراتور ناوگان، شرکت های برق، تنظیم گران، نهادهای مالی، تولیدکنندگان، تأمین کنندگان زیرساخت و بخش خصوصی است. در نبود سازوکار روشن برای تقسیم مسئولیت ها و هماهنگی تصمیمات، امکان بروز تأخیر، سرمایه گذاری موازی یا ناسازگاری میان توسعه ناوگان و زیرساخت وجود دارد [۴].

Toering و همکاران با بررسی زیرساخت های مشترک در مرز میان انرژی و تحرک نشان دادند یکپارچه سازی این دو بخش علاوه بر فرصت های فنی، چالش های مهمی در فرایند تصمیم گیری، تقسیم نقش ها و هماهنگی میان سازمان ها ایجاد می کند. این پژوهش تأکید می کند که توسعه زیرساخت پایدار در مرز انرژی و حمل و نقل نیازمند توجه همزمان به طراحی فنی و ترتیبات حکمرانی است [۱۷].

از منظر وسیع تر سیاست گذاری نیز، Tilly و همکاران با تحلیل بیش از ۱۰۰ سیاست و راهبرد مرتبط با خودروهای برقی در چند کشور نشان دادند انسجام افقی و عمودی سیاست ها برای توسعه زیرساخت شارژ اهمیت اساسی دارد. منظور از هماهنگی افقی، هماهنگی میان بخش ها و سازمان های همسطح و منظور از هماهنگی عمودی، هم راستایی سیاست ها میان سطوح مختلف حکمرانی است [۱۸].

این یافته ها با تجربه شهرهای موفق نیز سازگار است؛ به گونه ای که توسعه ناوگان برقی در شهرهایی مانند شتوئن تنها مبتنی بر تأمین وسیله نقلیه نبوده، بلکه به سیاست حمایتی، زیرساخت شارژ، مدل مالی و هماهنگی نهادی وابسته بوده است [۱۰].

همچنین، گزارش‌های سیاستی جدید بر این نکته تأکید دارند که گذار به ناوگان برقی باید در قالب یک برنامه مرحله‌ای و بین‌بخشی دنبال شود [۳، ۴ و ۶].

بنابراین، در ادبیات جدید، حکمرانی دیگر یک عامل جانبی برقی‌سازی محسوب نمی‌شود، بلکه بخشی از خود سامانه گذار است. تصمیم‌گیری درباره خرید ناوگان، توسعه شارژر، ظرفیت شبکه برق، استانداردها، تأمین مالی و مدیریت باتری باید در چارچوبی انجام شود که مسئولیت نهادها و سازوکار هماهنگی میان آن‌ها روشن باشد.

۲-۵. مطالعات مرتبط با تهران و شکاف مطالعه

در ادبیات داخلی، مطالعه معینی، میرزاحسین، ذهب‌صنعی و فریدی‌ا قدم درباره امکان پیاده‌سازی اتوبوس‌های برقی در ناوگان حمل‌ونقل همگانی تهران یکی از مطالعات نزدیک به موضوع پژوهش حاضر است [۵]. این پژوهش با رویکردی تطبیقی و سیاست‌محور، تجربه شهرهایی مانند شنژن، پاریس و شانگهای را بررسی و ابعاد فنی، اقتصادی، زیرساختی و نهادی توسعه اتوبوس برقی در تهران را تحلیل کرده است. همچنین، یک مدل سه‌مرحله‌ای بومی‌شده برای توسعه ناوگان برقی تهران ارائه شده و بر اجرای فازبندی‌شده، آغاز از مسیرهای مناسب‌تر، توجه به زیرساخت شارژ و هماهنگی نهادی تأکید شده است.

با این حال، مرور مطالعات نشان می‌دهد ادبیات موجود را می‌توان در سه جریان اصلی طبقه‌بندی کرد. گروه نخست بر مسائل حمل‌ونقل و بهره‌برداری مانند اولویت‌بندی خطوط، انتخاب فناوری، زمان‌بندی ناوگان و شارژ تمرکز دارد [۷، ۱۱، ۱۲ و ۱۴]. گروه دوم، تعامل ناوگان برقی با شبکه انرژی، مکان‌یابی شارژر و مدیریت تقاضای برق را بررسی می‌کند [۸، ۹ و ۱۵]. گروه سوم نیز بر ابعاد اقتصادی، سیاستگذاری و حکمرانی گذار تمرکز دارد [۴، ۱۳، ۱۶ - ۱۸].

اگرچه مطالعات جدید به سمت یکپارچه‌سازی این ابعاد حرکت کرده‌اند، هنوز بخش عمده پژوهش‌ها یکی یا دو جزء از سامانه را به طور عمیق بررسی می‌کنند. در شرایط تهران، این تفکیک مسئله‌ساز است؛ زیرا تصمیم درباره ناوگان، خطوط، شارژ، شبکه برق، بهره‌برداری، باتری و ترتیبات نهادی به یکدیگر وابسته‌اند. علاوه بر این، ویژگی‌هایی مانند ساختار یارانه‌ای انرژی، محدودیت‌های مالی، ناترازی شبکه برق، تفاوت زیاد خطوط از نظر شیب و تقاضا و تعدد نهادهای تصمیم‌گیر، انتقال مستقیم نتایج مطالعات سایر کشورها را محدود می‌کند.

گزارش نشست تخصصی مورد استفاده در مطالعه حاضر نیز همین ماهیت چندبخشی را نشان می‌دهد. در این نشست، موضوعاتی از اولویت‌بندی خطوط و مدل‌سازی مصرف انرژی تا ظرفیت شبکه، مدیریت هوشمند شارژ، تفاوت برد اسمی و واقعی، هزینه جایگزینی باتری، توسعه سرمایه انسانی و هماهنگی چندنهادی مطرح شده است.

بر این اساس، شکاف اصلی مقاله حاضر نه فقدان مطالعه درباره اتوبوس برقی به طور کلی، بلکه نبود یک چارچوب کاربردی و بومی برای پیوند هم‌زمان تصمیمات حمل‌ونقلی، الزامات شبکه توزیع برق، شرایط بهره‌برداری، اقتصاد چرخه عمر و حکمرانی شهری در تهران است. مقاله حاضر تلاش می‌کند این فاصله را با تحلیل دیدگاه‌های خبرگان و تبدیل آن‌ها به یک چارچوب تصمیم‌گیری اجرایی کاهش دهد.

بر مبنای مرور فوق، چارچوب مفهومی مطالعه بر این فرض استوار است که موفقیت برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران حاصل تعامل شش حوزه اصلی است: اولویت‌بندی خطوط و مناطق، ظرفیت شبکه توزیع برق، زیرساخت و مدیریت شارژ، شرایط واقعی بهره‌برداری، اقتصاد چرخه عمر و باتری و حکمرانی و هماهنگی نهادی. این چارچوب (شکل ۱)، مبنای تحلیل داده‌های نشست تخصصی و استخراج مضامین مقاله حاضر قرار گرفته است. این شش حوزه، چارچوب اولیه و قیاسی تحلیل را تشکیل دادند؛ با این حال، در فرایند کدگذاری استقرایی داده‌های نشست، «بومی‌سازی فناوری» به عنوان یک مضمون مستقل ظاهر شد و در نتیجه، چارچوب نهایی یافته‌ها در قالب هفت مضمون سازمان‌دهی شد.



شکل ۱. چارچوب مفهومی برقی سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران

۳. روش‌شناسی

مقاله حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر راهبرد پژوهش، مبتنی بر مطالعه موردی شهر تهران است. رویکرد پژوهش کیفی - تحلیلی است و از تحلیل محتوای کیفی برای شناسایی الزامات، محدودیت‌ها، ریسک‌ها و پیش‌شرط‌های اجرایی برقی سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران استفاده شده است. انتخاب این رویکرد با ماهیت مسئله پژوهش ارتباط دارد؛ زیرا هدف مطالعه، آزمون روابط علی یا تعمیم آماری به یک جامعه مشخص نیست، بلکه استخراج نظام‌مند ابعاد تصمیم‌گیری و تدوین چارچوبی کاربردی برای سیاستگذاری برقی سازی ناوگان در شرایط تهران است.

مطالعه حاضر مبتنی بر پیمایش یا پرسشنامه ساختاریافته نیست. از این‌رو، ابزارهایی مانند پرسشنامه، گویه‌های سنجش و آزمون‌های آماری مربوط به پایایی و روایی ابزارهای کمی در طراحی این مطالعه کاربرد نداشته‌اند. داده پژوهش از محتوای یک نشست تخصصی خبرگانی و گزارش تحلیلی حاصل از آن استخراج شده و اعتبار یافته‌ها بر اساس منطق پژوهش کیفی و مقایسه تحلیلی با شواهد موجود در ادبیات بررسی شده است.

۳-۱. منبع داده و زمینه نشست تخصصی

منبع اصلی داده، گزارش تحلیلی نشست تخصصی «برقی سازی ناوگان حمل‌ونقل شهری: بررسی چالش‌های فنی، اقتصادی و مدیریتی در حوزه توسعه اتوبوس‌های این ناوگان» است. نشست در ۱۰ خرداد ۱۴۰۵ با هدف بررسی واقع‌بینانه ظرفیت‌ها، محدودیت‌ها و الزامات توسعه اتوبوس‌های برقی در ایران، با تمرکز بر شهر تهران، برگزار شد.

نشست با حضور ۲۱ نفر از مدیران، کارشناسان، پژوهشگران و اعضای هیئت علمی مرتبط با حوزه‌های حمل‌ونقل، برق، صنعت، فناوری و مدیریت شهری تشکیل شد. در میان حاضران، نمایندگانی از سازمان حمل‌ونقل و ترافیک، شرکت واحد اتوبوسرانی، شرکت کنترل ترافیک، صنعت برق، شرکت‌های صنعتی و دانشگاه‌های مختلف حضور داشتند. این ترکیب چندرشته‌ای امکان بررسی برقی سازی ناوگان را نه فقط از منظر وسیله نقلیه، بلکه از ابعاد شبکه برق، زیرساخت شارژ، بهره‌برداری، اقتصاد، فناوری و حکمرانی فراهم کرد.

انتخاب این نشست به عنوان منبع اصلی داده از آن رو انجام شد که برقی سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران ماهیتی میان‌بخشی دارد و تصمیم‌گیری درباره آن نیازمند توجه هم‌زمان به الزامات حمل‌ونقلی، انرژی، زیرساختی، اقتصادی و نهادی است. گزارش

نشست نیز به طور مشخص موضوعاتی مانند انتخاب فناوری، اولویت‌بندی خطوط، ظرفیت شبکه توزیع برق، مدیریت شارژ، برد واقعی ناوگان، هزینه چرخه عمر، مدیریت باتری و هماهنگی نهادی را پوشش می‌دهد.

در کنار این گزارش، از یافته‌های مطالعه معینی و همکاران [۵] درباره امکان پیاده‌سازی اتوبوس‌های برقی در ناوگان حمل‌ونقل همگانی تهران نیز به عنوان پشتوانه مطالعاتی استفاده شد. پژوهش یادشده با رویکردی تطبیقی، تجربه شهرهای منتخب و ابعاد فنی، اقتصادی، زیرساختی و نهادی برقی‌سازی ناوگان تهران را بررسی کرده است. مقاله حاضر در امتداد آن مطالعه قرار می‌گیرد، اما تمرکز خود را از امکان‌سنجی عمومی و مقایسه تجربه‌های جهانی به شناسایی چالش‌های اجرایی، اولویت‌های تصمیم‌گیری و ترتیبات حکمرانی در شرایط تهران منتقل می‌کند.

۳-۲. ساختار داده و واحد تحلیل

پیکره داده مورد تحلیل در این پژوهش از چهار مجموعه محتوایی اصلی تشکیل شد. مجموعه نخست شامل مباحث فنی و سیاستی مرتبط با انتخاب فناوری، بومی‌سازی، اولویت‌بندی خطوط و معیارهای تصمیم‌گیری بود. مجموعه دوم به شبکه توزیع برق، ظرفیت میزبانی، مکان و زمان شارژ، مدیریت هوشمند بار و زیرساخت ارتباطی اختصاص داشت. مجموعه سوم، واقعیت‌های اجرایی تهران شامل برد واقعی، شیب مسیر، شرایط اقلیمی، طراحی عملیات، هزینه چرخه عمر، باتری و آموزش نیروی انسانی را در بر می‌گرفت. مجموعه چهارم نیز شامل مباحث تکمیلی پلن درباره بیش‌طراحی ناوگان، ناترازی برق، انتخاب فناوری، هماهنگی نهادی و ضرورت ایجاد ساختار راهبر بود. این چهار مجموعه، بدنه اصلی داده‌های کیفی مورد استفاده در تحلیل را تشکیل دادند.

واحد تحلیل، «گزاره سیاستی و اجرایی» در نظر گرفته شد. منظور از گزاره سیاستی و اجرایی، هر عبارت یا محور تحلیلی در گزارش است که به یک تصمیم، محدودیت، ریسک، پیش‌نیاز یا اقدام پیشنهادی در مسیر برقی‌سازی ناوگان اشاره داشته باشد. برای نمونه، ضرورت اولویت‌بندی خطوط، مدیریت هوشمند شارژ، توجه به شیب مسیر و دمای محیط، برنامه‌ریزی برای جایگزینی باتری و ایجاد سازوکار هماهنگ‌کننده میان حوزه حمل‌ونقل و برق، به عنوان واحدهای معنادار تحلیل در نظر گرفته شدند.

۳-۳. فرایند کدگذاری و استخراج مضامین

تحلیل داده‌ها با استفاده از رویکرد کدگذاری ترکیبی قیاسی - استقرایی انجام شد. در بخش قیاسی، کدهای اولیه با اتکا به ادبیات پژوهش و ابعاد شناخته‌شده برقی‌سازی ناوگان، از جمله برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و بهره‌برداری، شبکه توزیع برق، زیرساخت شارژ، اقتصاد چرخه عمر، مدیریت باتری و حکمرانی تعریف شدند. در بخش استقرایی، مفاهیمی که به طور مشخص از محتوای گزارش نشست و شرایط تهران حاصل شده بودند، بدون الزام به قرار گرفتن در طبقات ازپیش‌تعیین‌شده استخراج شدند؛ از جمله تفاوت برد اسمی و واقعی، خطر بیش‌طراحی ناوگان، ضرورت رویکرد خط‌محور، بدهی پنهان ناشی از جایگزینی باتری و نیاز به ساختار راهبر میان بخش حمل‌ونقل و انرژی.

فرایند کدگذاری در سه مرحله انجام شد. در مرحله نخست، متن گزارش به طور کامل مطالعه و گزاره‌های مرتبط با برقی‌سازی ناوگان شناسایی و استخراج شدند. در مرحله دوم، گزاره‌های مشابه در قالب کدهای اولیه سازمان‌دهی شدند. این کدها موضوعاتی مانند انتخاب فناوری، ظرفیت شبکه توزیع برق، مدل شارژ، شرایط واقعی بهره‌برداری، اقتصاد پروژه، مدیریت باتری، آموزش نیروی انسانی و هماهنگی نهادی را پوشش می‌دادند. در مرحله سوم، کدهای مرتبط و هم‌پوشان در سطح بالاتری از انتزاع تجمیع شدند و هفت مضمون محوری شکل گرفت: اولویت‌بندی خطوط، بومی‌سازی فناوری، ظرفیت شبکه توزیع برق، بازطراحی بهره‌برداری، اقتصاد چرخه عمر، مدیریت باتری و حکمرانی یکپارچه.

در مرحله پایانی، مضامین محوری از سطح توصیف موضوعات نشست فراتر رفتند و در قالب الزامات تصمیم‌گیری، پیامدهای اجرایی و پیشنهادی سیاستی بازآرایی شدند. به این ترتیب، مسیر تحلیل از «گزاره خام» به «کد اولیه»، سپس «مضمون محوری» و در نهایت «پیامد سیاستی و اجرایی» طی شد. شکل ۲ فرایند روش‌شناختی مطالعه را نشان می‌دهد.

۳-۴. اعتبار بخشی تحلیلی

برای تقویت اعتبار یافته‌ها، از مقایسه تحلیلی میان مضامین استخراج شده و شواهد موجود در ادبیات موجود در ادبیات استفاده شد. در این مرحله، مضامین حاصل از نشست با سه گروه از شواهد مقایسه شدند: نخست، مطالعات علمی مرتبط با برنامه‌ریزی و بهره‌برداری ناوگان برقی؛ دوم، مطالعات مربوط به شبکه توزیع برق، زیرساخت شارژ، اقتصاد چرخه عمر و مدیریت باتری؛ و سوم، مطالعه پیشین درباره امکان پیاده‌سازی اتوبوس‌های برقی در تهران [۵].

هدف از این مقایسه، آزمون آماری مضامین نبود، بلکه بررسی میزان هم‌راستایی، تفاوت و ویژگی بومی یافته‌های تهران در مقایسه با شواهد موجود در ادبیات بود. بر این اساس، موضوعاتی مانند هزینه چرخه عمر، مدیریت شارژ و ظرفیت شبکه توزیع برق که هم در نشست و هم در ادبیات علمی مورد تأکید قرار گرفته بودند، به عنوان مضامین دارای پشتوانه گسترده‌تر تفسیر شدند. در مقابل، مواردی مانند تأثیر ساختار یارانه‌ای انرژی بر توجیه‌پذیری اقتصادی، ریسک بیش‌طراحی ناوگان، تفاوت شدید خطوط تهران از نظر شیب و بهره‌برداری و ضرورت هماهنگی چندنهادی، به عنوان ابعاد دارای اهمیت ویژه در بستر تهران مورد توجه قرار گرفتند.

همچنین، از اطلاعات توصیفی مربوط به ساختار داده برای افزایش شفافیت روش استفاده شد. منبع اصلی تحلیل، گزارش یک نشست تخصصی با حضور ۲۱ مشارکت‌کننده از حوزه‌های مختلف تخصصی بود و خروجی تحلیل در قالب هفت مضمون محوری سازمان‌دهی شد. از آنجا که داده اصلی پژوهش گزارش تحلیلی نشست و نه مجموعه‌ای از پاسخ‌های استاندارد شده فردی بود، از محاسبه فراوانی پاسخ افراد یا آزمون‌های استنباطی خودداری شد.

۳-۵. محدودیت‌های روش

محدودیت اصلی مطالعه آن است که داده‌های مورد استفاده عمدتاً بر پایه گزارش تحلیلی یک نشست تخصصی و شواهد اسنادی است و شامل داده‌های میدانی گسترده از عملکرد واقعی اتوبوس‌های برقی در خطوط مختلف تهران نمی‌شود. همچنین، از آنجا که منبع مورد تحلیل یک گزارش تحلیلی تدوین شده از نشست است، امکان انتساب همه گزاره‌ها به تک‌تک مشارکت‌کنندگان یا محاسبه فراوانی نظرات افراد وجود ندارد. از این رو، نتایج مطالعه باید به عنوان یک چارچوب سیاستی و اجرایی مبتنی بر تحلیل خبرگانی تفسیر شوند، نه به عنوان برآورد آماری از دیدگاه جامعه‌ای مشخص.

با وجود این محدودیت، استفاده از یک منبع خبرگانی چندرشته‌ای، پیوند آن با ادبیات علمی و مطالعه پیشین تهران و سازمان‌دهی نظام‌مند گزاره‌ها در قالب کدها و مضامین، امکان ارائه تصویری منسجم از چالش‌ها و الزامات برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران را فراهم می‌کند. نتایج این مقاله می‌تواند مبنایی برای مطالعات بعدی، از جمله پایلوت‌های خط‌محور، جمع‌آوری داده‌های عملیاتی، تحلیل دقیق هزینه چرخه عمر و ارزیابی ظرفیت شبکه توزیع برق در مناطق مختلف شهر باشد. جدول ۱، چارچوب تحلیل محتوای کیفی نشست خبرگانی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. فرایند روش شناختی استخراج و تدوین چارچوب سیاستگذاری برقی سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران

جدول ۱. چارچوب تحلیل محتوای کیفی نشست خبرگانی

گام تحلیل	اقدام انجام شده	خروجی تحلیلی
تعیین منبع داده	انتخاب گزارش نشست تخصصی با حضور ۲۱ نفر از خبرگان، استادان، مدیران و پژوهشگران مرتبط	تعریف گزارش نشست به عنوان منبع خبرگانی چندرشته‌ای
مطالعه متن نشست	مرور کامل گزارش نشست و استخراج گزاره‌های مرتبط با برقی‌سازی ناوگان	شناسایی گزاره‌های سیاستی و اجرایی
کدگذاری اولیه	دسته‌بندی گزاره‌ها بر اساس موضوعات فنی، اقتصادی، شبکه‌ای، بهره‌برداری و نهادی	شکل‌گیری کدهای اولیه تحلیل
کدگذاری ترکیبی	استفاده هم‌زمان از کدهای قیاسی برگرفته از ادبیات و کدهای استقرایی استخراج شده از نشست	تفکیک مسائل عمومی برقی‌سازی از مسائل بومی تهران
طبقه‌بندی مضامین	تجمع کدهای مشابه در محورهای کلان	استخراج هفت مضمون محوری شامل اولویت‌بندی خطوط، بومی‌سازی فناوری، ظرفیت شبکه توزیع برق، بازطراحی بهره‌برداری، اقتصاد چرخه عمر، مدیریت باتری و حکمرانی یکپارچه
اعتباربخشی تحلیلی	مقایسه مضامین استخراج شده با ادبیات موجود و مطالعه پیشین درباره تهران	تقویت اعتبار یافته‌ها و شناسایی تمایز مقاله حاضر
تدوین چارچوب کاربردی	بازآرایی مضامین در قالب الزامات تصمیم‌گیری و پیشنهادهای سیاستی	ارائه چارچوب کاربردی برای برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران

۴. یافته‌ها و تحلیل

تحلیل محتوای نشست تخصصی برقی‌سازی ناوگان حمل و نقل شهری نشان می‌دهد مسئله برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران را نمی‌توان به سطح خرید اتوبوس برقی یا نصب تعدادی ایستگاه شارژ تقلیل داد. یافته‌های پژوهش بیانگر آن است که برقی‌سازی در تهران، یک مسئله چندبعدی و میان‌بخشی است که در نقطه تلاقی حمل و نقل همگانی، شبکه توزیع برق، زیرساخت شارژ، اقتصاد شهری، بهره‌برداری ناوگان، مدیریت باتری و حکمرانی نهادی قرار می‌گیرد. بر همین اساس، یافته‌ها در هفت محور اصلی قابل تبیین است: ضرورت اولویت‌بندی خطوط، بومی‌سازی فناوری، ظرفیت شبکه توزیع برق، بازطراحی بهره‌برداری، اقتصاد چرخه عمر، مدیریت باتری و حکمرانی یکپارچه.

۴-۱. برقی‌سازی به عنوان مسئله اولویت‌بندی، نه فقط خرید ناوگان

در گزارش نشست، هشت عامل برای اولویت‌بندی خطوط شامل تعداد مسافر، طول مسیر، آلودگی هوا و صوتی، ویژگی‌های جغرافیایی و جمعیتی، ملاحظات امنیتی، ظرفیت شبکه برق و زیرساخت فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) مطرح شده است. نخستین یافته مقاله آن است که تصمیم‌گیری درباره برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران باید از منطق «خرید ناوگان» به منطق «اولویت‌بندی خطوط و مناطق» تغییر کند. در رویکرد تجهیزاتی، مسئله اصلی تعداد اتوبوس‌های قابل خرید، ظرفیت باتری یا مشخصات فنی وسیله نقلیه است؛ اما در رویکرد کاربردی، پرسش اصلی این است که کدام خط، در کدام منطقه، با چه الگوی شارژ و با چه سطحی از آمادگی زیرساختی باید برقی شود.

بر اساس تحلیل انجام شده، همه خطوط اتوبوسرانی تهران ظرفیت و اولویت یکسانی برای برقی‌سازی ندارند. شاخص‌هایی مانند تعداد مسافر، طول مسیر، شیب معبر، شدت آلودگی، ویژگی‌های جمعیتی، امکان جانمایی شارژر، ظرفیت شبکه توزیع برق، امنیت زیرساخت و دسترسی به زیرساخت ارتباطی باید هم‌زمان در تصمیم‌گیری لحاظ شوند. از این منظر، برقی‌سازی ناوگان در تهران ماهیتی چندمعیاره دارد و اجرای آن بدون مدل اولویت‌بندی می‌تواند به تخصیص غیربهینه منابع، خرید ناوگان نامتناسب و افزایش هزینه‌های پنهان منجر شود.

این یافته با نتایج مطالعات پیشین درباره تهران نیز هم‌راستا است. در مقاله معینی و همکاران، اجرای فازبندی شده و آغاز پروژه از مسیرهای پرتردد و دارای قابلیت مناسب‌تر زیرساختی پیشنهاد شده بود. مقاله حاضر این نتیجه را تعمیق می‌کند و نشان

می‌دهد فازبندی نباید فقط بر اساس تعداد اتوبوس انجام شود، بلکه باید بر پایه اولویت‌بندی خط، ظرفیت شبکه، امکان شارژ و شرایط واقعی بهره‌برداری تعریف شود.

۴-۲. ضرورت بومی‌سازی فناوری و پرهیز از انتقال مستقیم تجربه‌های جهانی

دومین یافته مقاله، ضرورت پرهیز از انتقال مستقیم الگوهای جهانی به تهران است. تجربه شهرهایی مانند سنژن، پاریس و شانگهای نشان می‌دهد برقی‌سازی گسترده ناوگان در صورت وجود حمایت سیاستی، زیرساخت شارژ، هماهنگی نهادی و تأمین مالی پایدار امکان‌پذیر است؛ اما این تجربه‌ها را نمی‌توان بدون تعدیل و بومی‌سازی به تهران منتقل کرد. شرایط تهران از نظر شیب معابر، تراکم سفر، محدودیت زمین برای شارژر، ناترازی برق، ساختار یارانه‌ای انرژی، وضعیت ناوگان موجود و ظرفیت مالی مدیریت شهری با بسیاری از نمونه‌های جهانی تفاوت دارد.

در نتیجه، انتخاب نوع اتوبوس، ظرفیت باتری، الگوی شارژ، نوع قرارداد خرید، محل استقرار شارژرها و حتی اندازه ناوگان باید متناسب با شرایط خطوط تهران انجام شود. به‌ویژه، تصمیم‌گیری بر اساس مشخصات اسمی تولیدکنندگان، بدون آزمون عملکرد در شرایط واقعی تهران، می‌تواند موجب بیش‌طراحی یا کم‌طراحی ناوگان شود. بیش‌طراحی به معنای خرید تجهیزاتی با ظرفیت بیش از نیاز واقعی است که سرمایه‌گذاری اولیه را افزایش می‌دهد؛ در مقابل، کم‌طراحی می‌تواند به کاهش برد عملیاتی، افزایش خواب ناوگان و ناپایداری خدمات منجر شود.

از این منظر، یافته مقاله نشان می‌دهد تهران پیش از توسعه گسترده ناوگان برقی، نیازمند اجرای پیلوت‌های خط‌محور و داده‌محور است. این پیلوت‌ها باید در خطوطی با ویژگی‌های متفاوت از نظر شیب، تقاضا، طول مسیر، ترافیک و ظرفیت شبکه اجرا شوند تا داده‌های واقعی درباره مصرف انرژی، برد عملیاتی، زمان شارژ، خرابی، هزینه نگهداری و رضایت بهره‌بردار به دست آید.

۴-۳. شبکه توزیع برق به عنوان عامل تعیین‌کننده در امکان‌پذیری برقی‌سازی

سومین یافته مقاله آن است که ظرفیت شبکه توزیع برق از تعیین‌کننده‌ترین عوامل موفقیت یا شکست برقی‌سازی ناوگان است. در نگاه عمومی، ممکن است مسئله برقی‌سازی به مقدار کل انرژی مورد نیاز محدود شود؛ اما تحلیل نشست نشان می‌دهد مسئله اصلی، توزیع مکانی و زمانی بار است. حتی اگر در مقیاس کلان امکان تأمین انرژی وجود داشته باشد، شبکه محلی در برخی مناطق ممکن است به دلیل تمرکز بار شارژ، افت ولتاژ، عدم تعادل بار یا کاهش کیفیت توان با محدودیت جدی مواجه شود.

بر این اساس، جانمایی ایستگاه‌های شارژ باید بر پایه «ظرفیت میزبانی شبکه» انجام شود. به بیان دیگر، مکان شارژرها نباید فقط بر اساس نزدیکی به پایانه یا مسیر اتوبوس تعیین شود، بلکه باید با ظرفیت پست‌های برق، وضعیت فیدرها، امکان تقویت شبکه، دسترسی به زیرساخت مخابراتی و قابلیت مدیریت بار هماهنگ باشد. این موضوع به‌ویژه در تهران اهمیت دارد؛ زیرا تمرکز شارژرها در برخی پایانه‌ها یا مناطق پرتردد می‌تواند پیک‌های محلی جدید ایجاد کند.

یافته دیگر در این محور، اهمیت مدیریت هوشمند شارژ است. مدیریت شارژ می‌تواند به دو شکل مستقیم و غیرمستقیم انجام شود. در روش مستقیم، اپراتور شبکه یا نهاد مسئول می‌تواند بار شارژ را به صورت لحظه‌ای کنترل کند. در روش غیرمستقیم، ابزارهایی مانند تعرفه‌گذاری زمانمند، کاربران و بهره‌برداران را به انتقال شارژ به ساعات‌های غیرپیک تشویق می‌کند. با این حال، یافته‌های مقاله نشان می‌دهد هوشمندسازی به‌تنهایی کافی نیست؛ زیرا اگر مدیریت شارژ به‌درستی طراحی نشود، ممکن است خود به ایجاد پیک جدید منجر شود. بنابراین، برقی‌سازی ناوگان در تهران باید هم‌زمان با نقشه میزبانی شبکه، سامانه پایش بار، تعرفه‌گذاری مناسب، ارتباط مخابراتی پایدار و داشبورد مدیریتی دنبال شود.

همچنین، در نشست تأکید شد که ظرفیت میزبانی شبکه در مناطق مختلف یکسان نیست و برخی شبکه‌ها از حدود ۴۰ درصد نفوذ به بعد با محدودیت مواجه می‌شوند، در حالی که برخی دیگر حتی در نفوذهای بالاتر نیز قابل بهره‌برداری‌اند.

۴-۴. تفاوت برد اسمی و برد واقعی در بهره‌برداری تهران

چهارمین یافته مقاله، تفاوت معنادار میان برد اسمی اتوبوس‌های برقی و برد واقعی آن‌ها در شرایط بهره‌برداری تهران است. برد

اعلام شده توسط تولیدکنندگان معمولاً در شرایط آزمایشگاهی یا شرایط استاندارد محاسبه می شود، در حالی که عملکرد واقعی اتوبوس برقی تحت تأثیر عواملی مانند شیب مسیر، تعداد مسافر، توقف و حرکت مکرر، تراکم ترافیک، دمای محیط، استفاده از سیستم سرمایش و گرمایش، رفتار راننده و وضعیت باتری قرار دارد.

در تهران، این موضوع اهمیت ویژه ای دارد؛ زیرا بخشی از خطوط در مناطق دارای شیب قرار دارند و شرایط دمایی تابستان و زمستان نیز می تواند مصرف انرژی را افزایش دهد. افزون بر این، ترافیک سنگین و توقف های مکرر موجب می شود مصرف انرژی واقعی با مقادیر اسمی متفاوت باشد. در گزارش نشست همچنین اشاره شد که شیب معابر می تواند در برخی شرایط مصرف انرژی را تا حدود ۱/۶۶ برابر افزایش دهد؛ موضوعی که ضرورت استفاده از داده های واقعی مسیر در برآورد برد عملیاتی را برجسته می کند. بنابراین، تصمیم گیری بر اساس کاتالوگ کارخانه می تواند به خطای جدی در طراحی ناوگان، تعداد اتوبوس مورد نیاز، جانمایی شارژر و برنامه زمان بندی منجر شود.

بر اساس یافته های مقاله، برقی سازی موفق در تهران مستلزم بازطراحی عملیات اتوبوسرانی است. زمان شارژ، محل شارژ، مدت توقف در پایانه، تعداد اتوبوس ذخیره، برنامه تعمیر و نگهداری، آموزش رانندگان و زمان بندی حرکت باید متناسب با محدودیت های فناوری برقی بازتعریف شود. بنابراین، برقی سازی فقط تغییر منبع انرژی وسیله نقلیه نیست، بلکه تغییر در منطق بهره برداری ناوگان است.

۴-۵. اقتصاد برقی سازی؛ از هزینه خرید تا هزینه چرخه عمر

پنجمین یافته مقاله آن است که تحلیل اقتصادی برقی سازی باید از هزینه خرید اولیه فراتر رود و کل چرخه عمر ناوگان را دربرگیرد. اتوبوس های برقی معمولاً هزینه خرید اولیه بالاتری نسبت به اتوبوس های دیزلی دارند و توسعه زیرساخت شارژ نیز نیازمند سرمایه گذاری قابل توجه است. با این حال، در بلندمدت ممکن است کاهش هزینه انرژی، کاهش هزینه تعمیرات، کاهش آلودگی و بهبود کیفیت خدمات بخشی از این هزینه ها را جبران کند.

با وجود این، در شرایط ایران، تحلیل اقتصادی برقی سازی پیچیده تر از مقایسه ساده اتوبوس برقی و دیزلی است. ساختار یارانه ای سوخت، نوسانات ارزی، تحریم ها، هزینه واردات قطعات، تعرفه برق، امکان استفاده از منافع قانونی مانند ماده ۱۲ (قانون رفع موانع تولید رقابت پذیر و ارتقای نظام مالی کشور) و هزینه های پنهان باتری، همگی بر نتیجه اقتصادی پروژه اثر می گذارند. بنابراین، اقتصادی بودن برقی سازی در تهران فقط تابع فناوری نیست، بلکه به شدت تابع سیاستگذاری انرژی، نظام یارانه ای و مدل تأمین مالی پروژه است.

یافته مهم در این بخش آن است که بخشی از هزینه واقعی برقی سازی به آینده منتقل می شود. اگر هزینه تعویض باتری، بازافت، نگهداری تخصصی و ارتقای زیرساخت از ابتدا در مدل مالی دیده نشود، ممکن است پروژه در سال های نخست قابل دفاع به نظر برسد، اما در سال های بعد با موج هزینه های هم زمان مواجه شود. از این منظر، نادیده گرفتن هزینه چرخه عمر باتری می تواند به شکل گیری بدهی پنهان برای مدیریت شهری منجر شود.

۴-۶. باتری به عنوان مسئله مالی، محیط زیستی و نهادی

ششمین یافته مقاله آن است که باتری نباید فقط به عنوان جزء فنی اتوبوس برقی تحلیل شود. باتری از یک سو گران ترین و حساس ترین جزء ناوگان برقی است و از سوی دیگر، عمر محدود، هزینه جایگزینی، وابستگی فناورانه و پیامدهای محیط زیستی دارد. بنابراین، برنامه ریزی برای باتری باید از مرحله خرید آغاز شود و تا مرحله تعویض، بازافت و دفع ایمن ادامه یابد.

در صورتی که مدل مالی مشخصی برای جایگزینی باتری تعریف نشود، مدیریت شهری در چند سال آینده ممکن است با هزینه سنگین و هم زمان تعویض باتری ها مواجه شود. این مسئله به ویژه زمانی جدی تر می شود که خرید ناوگان در بازه زمانی کوتاه و به صورت متمرکز انجام شود؛ زیرا در چنین شرایطی، موعد تعویض باتری بخش بزرگی از ناوگان نیز هم زمان فرا می رسد. بنابراین، ایجاد صندوق یا سازوکار مالی اختصاصی برای مدیریت هزینه باتری، یکی از الزامات سیاستی برقی سازی ناوگان است.

از منظر محیط زیستی نیز برقی سازی بدون توجه به بازیافت باتری ممکن است فقط شکل آلودگی را تغییر دهد. اگرچه اتوبوس برقی در سطح شهر آلاینده‌گی مستقیم تولید نمی‌کند، اما تولید، مصرف و دفع باتری می‌تواند پیامدهای محیط زیستی مهمی داشته باشد. بنابراین، توسعه صنعت بازیافت باتری، تعیین استانداردهای ایمنی، ایجاد زنجیره تأمین قطعات و آموزش نیروی انسانی متخصص، بخشی از الزامات مکمل برقی سازی ناوگان محسوب می‌شود.

۴-۷. حکمرانی یکپارچه؛ شرط اصلی گذار از پایلوت به مقیاس شهری

هفتمین یافته مقاله نشان می‌دهد ضعف هماهنگی نهادی یکی از ریسک‌های اصلی برقی سازی ناوگان تهران است. برقی سازی ناوگان تنها در اختیار یک سازمان نیست و به همکاری هم‌زمان میان شهرداری، شرکت واحد اتوبوسرانی، شرکت‌های برق، وزارت نیرو، وزارت صمت، سازمان استاندارد، نهادهای مالی، تولیدکنندگان، واردکنندگان، شرکت‌های فناوری و بخش خصوصی نیاز دارد. نبود سازوکار هماهنگ کننده میان این نهادها می‌تواند موجب موازی کاری، تأخیر در تصمیم‌گیری، ناهماهنگی زیرساختی و افزایش هزینه‌ها شود.

یافته‌های مقاله نشان می‌دهد تهران برای توسعه پایدار ناوگان برقی به یک ساختار راهبر نیاز دارد؛ ساختاری که بتواند تصمیم‌های مربوط به ناوگان، شبکه توزیع برق، شارژ، تأمین مالی، استانداردها، آموزش، نگهداری و بازیافت را هماهنگ کند. تجربه توسعه حامل‌های انرژی جدید در حمل‌ونقل، مانند گاز طبیعی فشرده (CNG)، نیز نشان می‌دهد ورود یک فناوری جدید بدون نهاد راهبر و تقسیم کار مشخص، با کندی و ناهماهنگی مواجه می‌شود.

بنابراین، گذار از مرحله پایلوت به مقیاس شهری، بدون حکمرانی یکپارچه امکان‌پذیر نیست. حکمرانی یکپارچه در اینجا به معنای ایجاد سازوکاری برای تصمیم‌گیری مشترک، تعریف مسئولیت هر نهاد، تدوین نقشه راه، تأمین مالی پایدار، تنظیم استانداردهای فنی و پایش مستمر عملکرد است. در غیر این صورت، برقی سازی ممکن است به مجموعه‌ای از خریدهای پراکنده و پروژه‌های ناهماهنگ تبدیل شود که اثرگذاری محدودی بر کیفیت حمل‌ونقل و کاهش آلاینده‌گی خواهد داشت.

به منظور افزایش شفافیت فرایند تحلیل و نشان دادن ارتباط میان داده‌های نشست و یافته‌های نهایی پژوهش، شواهد اصلی استخراج شده از گزارش نشست در کنار مضامین محوری و پیامدهای سیاستی آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد هر یک از محورهای نهایی تحلیل بر چه نوع شواهد فنی، اجرایی، اقتصادی یا نهادی موجود در داده‌های نشست استوار بوده و چگونه این شواهد به پیامدهای سیاستی مرتبط با برقی سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران منجر شده‌اند.

جدول ۲. پیوند شواهد مستخرج از نشست با مضامین محوری و پیامدهای سیاستی برقی سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران

پیشنهادهای سیاستی	پیامد برای تهران	مضمون محوری	شواهد مستخرج از نشست
تهیه نقشه اولویت‌بندی خطوط بر اساس شاخص‌های حمل‌ونقلی، زیرساختی و محیطی	همه خطوط ظرفیت و اولویت یکسانی برای برقی سازی ندارند	اولویت‌بندی خطوط	طرح ۸ معیار شامل تعداد مسافر، طول مسیر، آلودگی هوا و صوتی، ویژگی‌های جغرافیایی و جمعیتی، ملاحظات امنیتی، ظرفیت شبکه برق و زیرساخت ICT
اجرای پایلوت‌های خط‌محور در شرایط واقعی تهران پیش از توسعه گسترده	احتمال بیش‌طراحی یا کم‌طراحی ناوگان در صورت اتکا به مشخصات یا الگوهای غیربومی	بومی سازی فناوری	تأکید بر نبود «تسخه واحد» و نامناسب بودن انتقال مستقیم الگوهای جهانی به تهران
تهیه نقشه ظرفیت میزبانی شبکه و توسعه مدیریت هوشمند شارژ	جانمایی و زمان شارژ می‌تواند محدودیت موضعی شبکه ایجاد کند	ظرفیت شبکه توزیع برق	تفاوت ظرفیت میزبانی شبکه‌ها و امکان بروز گرفتگی، افت ولتاژ و کاهش کیفیت توان در صورت تمرکز بار شارژ
بازطراحی برنامه حرکت، زمان شارژ و تعداد ناوگان متناسب با شرایط هر خط حرکت	احتمال کاهش برد عملیاتی، افزایش نیاز به ناوگان ذخیره و اختلال در برنامه حرکت	بازطراحی بهره‌برداری	تأکید بر تفاوت برد اسمی و واقعی و گزارش افزایش مصرف انرژی تا حدود ۱/۶۶ برابر تحت تأثیر شیب
تحلیل هزینه چرخه عمر شامل ناوگان، شارژر، شبکه، نگهداری و باتری	امکان پنهان ماندن هزینه‌های آتی در تصمیمات مبتنی بر قیمت خرید	اقتصاد عمر	انتقال بخشی از هزینه واقعی برقی سازی به سال‌های آینده و تأکید بر هزینه جایگزینی باتری
ایجاد سازوکار مالی برای جایگزینی باتری و برنامه‌ریزی برای بازیافت	احتمال شکل‌گیری تعهد مالی آینده و پیامدهای محیط زیستی	مدیریت باتری	تأکید بر عمر محدود باتری، هزینه جایگزینی و ضرورت بازیافت
ایجاد ساختار راهبر دائمی برای برقی سازی ناوگان عمومی تهران	خطر موازی کاری، تأخیر و تصمیم‌های ناسازگار میان نهادهای درگیر	حکمرانی یکپارچه	تأکید بر حکمرانی چندذی‌نفعی و ضرورت هماهنگی میان حوزه‌های انرژی، حمل‌ونقل و مدیریت شهری

۴-۸. جمع‌بندی یافته‌ها در قالب چارچوب کاربردی

همان‌گونه که جدول ۲ نشان می‌دهد، هفت مضمون محوری استخراج‌شده از نشست، مجموعه‌ای به هم پیوسته از الزامات حمل‌ونقلی، زیرساختی، اقتصادی و نهادی را تشکیل می‌دهند. با تجمع این یافته‌ها در سطح سیاستگذاری، چارچوب کاربردی برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران را می‌توان در قالب پنج اصل اصلی خلاصه کرد.

نخست، برقی‌سازی باید خط‌محور و منطقه‌محور باشد، نه فقط ناوگان‌محور. دوم، توسعه ناوگان باید بر اساس ظرفیت واقعی شبکه توزیع برق و امکان مدیریت شارژ انجام شود. سوم، طراحی عملیات اتوبوسرانی باید متناسب با محدودیت‌های برد، زمان شارژ و شرایط اقلیمی تهران بازنگری شود. چهارم، تحلیل اقتصادی باید کل چرخه عمر ناوگان، به‌ویژه هزینه باتری و زیرساخت شارژ را دربرگیرد. پنجم، اجرای موفق پروژه نیازمند نهاد هماهنگ‌کننده و نقشه راه یکپارچه میان حوزه حمل‌ونقل و انرژی است. به این ترتیب، یافته‌های مقاله نشان می‌دهد برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران از نظر راهبردی قابل دفاع است، اما تنها در صورتی می‌تواند موفق باشد که به صورت تدریجی، بومی، داده‌محور و هماهنگ با ظرفیت شبکه و توان مدیریتی شهر اجرا شود. در غیر این صورت، خطر آن وجود دارد که پروژه از یک فرصت برای تحول حمل‌ونقل همگانی به مجموعه‌ای از هزینه‌های تجهیزاتی، فشارهای شبکه‌ای و تعهدات مالی آینده تبدیل شود.

۵. بحث و پیشنهاد‌های سیاستی

مقایسه یافته‌های این مقاله با مطالعات پیشین نشان می‌دهد بخش مهمی از مضامین استخراج‌شده با جهت‌گیری‌های اصلی ادبیات جدید برقی‌سازی ناوگان هم‌راستا است. در محور اولویت‌بندی خطوط، نتایج پژوهش حاضر با مطالعه Wenz و همکاران [۷] و مطالعات جدیدتر درباره برنامه‌ریزی خط‌محور و یکپارچه ناوگان برقی [۱۱ و ۱۲] همسو است؛ این مطالعات نیز تأکید دارند که انتخاب خطوط و فناوری مناسب باید بر اساس ویژگی‌های عملیاتی، تقاضا، شرایط مسیر و زیرساخت شارژ انجام شود.

در محور شبکه برق و زیرساخت شارژ نیز یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعات Arif و همکاران [۸]، Zhao و همکاران [۹] و Najafi و همکاران [۱۵] هم‌راستا است. این مطالعات نشان داده‌اند توسعه ناوگان برقی می‌تواند بارهای متمرکز جدیدی بر شبکه توزیع ایجاد کند و در صورت نبود مدیریت مناسب، به افت ولتاژ، افزایش پیک و محدودیت‌های محلی شبکه منجر شود. تأکید پژوهش حاضر بر ظرفیت میزبانی شبکه و مدیریت هوشمند شارژ، در امتداد همین شواهد قرار می‌گیرد.

در بعد اقتصادی، یافته‌های مقاله درباره ضرورت تحلیل هزینه چرخه عمر و توجه به هزینه‌های آتی باتری با مطالعات مربوط به هزینه کل مالکیت و تحلیل چرخه عمر ناوگان برقی [۱۳ و ۱۶] هم‌راستا است. با این حال، در شرایط تهران، عواملی مانند یارانه انرژی، نوسانات ارزی، هزینه واردات قطعات و محدودیت‌های مالی مدیریت شهری، اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند و می‌توانند نتیجه تحلیل اقتصادی را نسبت به بسیاری از نمونه‌های بین‌المللی تغییر دهند.

در بعد حکمرانی نیز نتایج این مطالعه با پژوهش‌های جدید درباره حکمرانی گذار به تحرک برقی و هماهنگی میان بخش‌های انرژی و حمل‌ونقل [۱۷ و ۱۸] هم‌خوانی دارد. این مطالعات نیز بر ضرورت هماهنگی میان نهادهای مختلف، تقسیم روشن مسئولیت‌ها و انسجام سیاستی تأکید دارند. با این حال، تعدد نهادهای تصمیم‌گیر، ساختار نهادی مدیریت شهری و شرایط خاص سیاستگذاری انرژی در ایران، این موضوع را در تهران به مسئله‌ای برجسته‌تر تبدیل می‌کند.

در مجموع، مقایسه با مطالعات پیشین نشان می‌دهد یافته‌های پژوهش حاضر از نظر اصول کلی با ادبیات جهانی هم‌راستا است، اما ارزش افزوده آن در بومی‌سازی این مضامین و پیوند هم‌زمان مسائل حمل‌ونقل، شبکه برق، بهره‌برداری، اقتصاد باتری و حکمرانی در شرایط تهران است.

یافته‌های مطالعه نشان می‌دهد برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران، در صورت طراحی درست، می‌تواند یکی از ابزارهای مؤثر برای نوسازی حمل‌ونقل همگانی، کاهش آلودگی محلی و ارتقای کیفیت خدمات شهری باشد. با این حال، این سیاست زمانی موفق خواهد بود که از سطح خرید ناوگان فراتر رود و به عنوان برنامه‌ای یکپارچه در مرز میان حمل‌ونقل، انرژی، زیرساخت، اقتصاد و حکمرانی شهری دنبال شود. بر این اساس، پیشنهاد‌های سیاستی مقاله در پنج محور اصلی قابل ارائه است.

نخست، توسعه ناوگان برقی باید بر پایه اولویت‌بندی خطوط و اجرای پایلوت‌های داده‌محور انجام شود. تهران نباید برقی‌سازی را به صورت یکسان و سراسری آغاز کند؛ زیرا خطوط اتوبوسرانی از نظر طول مسیر، شیب، حجم مسافر، تراکم ترافیک، ظرفیت پایانه، امکان جانمایی شارژر و دسترسی به شبکه توزیع برق شرایط متفاوتی دارند. بنابراین، لازم است پیش از توسعه گسترده، نقشه اولویت‌بندی خطوط برقی‌سازی تهیه شود. در این نقشه، خطوط مناسب برای فاز نخست، خطوط نیازمند تقویت زیرساخت و خطوط پرریسک باید از یکدیگر تفکیک شوند. اجرای پایلوت در چند خط با ویژگی‌های متفاوت، مانند خط پرتدد، خط دارای شیب، خط طولانی و خط دارای دسترسی مناسب به شبکه توزیع برق، می‌تواند داده‌های واقعی لازم برای تصمیم‌گیری را فراهم کند.

دوم، برنامه برقی‌سازی باید با ظرفیت واقعی شبکه توزیع برق و نظام مدیریت شارژ هماهنگ شود. مسئله اصلی فقط تعداد اتوبوس‌های برقی یا مقدار کل انرژی مورد نیاز نیست، بلکه زمان، مکان و توان شارژ ناوگان اهمیت تعیین‌کننده دارد. استقرار شارژرها بدون توجه به ظرفیت شبکه توزیع می‌تواند به ایجاد پیک‌های محلی، افت ولتاژ، عدم تعادل بار و کاهش کیفیت توان منجر شود. از این‌رو، تهیه نقشه ظرفیت میزبانی شبکه توزیع برق برای شارژ ناوگان عمومی، یکی از پیش‌نیازهای اصلی اجرای طرح است. همچنین، توسعه زیرساخت شارژ باید همراه با سامانه مدیریت هوشمند، پایش لحظه‌ای بار، ارتباط مخابراتی پایدار و تعرفه‌گذاری زمانمند انجام شود. الگوی شارژ نیز باید متناسب با شرایط هر خط تعیین شود و می‌تواند ترکیبی از شارژ شبانه در پایانه‌ها و شارژ سریع در نقاط راهبردی باشد.

سوم، ورود اتوبوس برقی به ناوگان تهران نیازمند بازطراحی بهره‌برداری است. اتوبوس برقی را نمی‌توان بدون تغییر در برنامه حرکت، زمان‌بندی توقف، تعداد ناوگان ذخیره و نظام نگهداری، جایگزین مستقیم اتوبوس دیزلی کرد. برد واقعی اتوبوس‌های برقی تحت تأثیر شیب مسیر، دمای محیط، بار مسافر، ترافیک، رفتار راننده و استفاده از سیستم سرمایش و گرمایش قرار دارد. بنابراین، برای هر خط منتخب باید مطالعه طراحی عملیات برقی انجام شود. این مطالعه باید مصرف انرژی، برد واقعی، زمان شارژ، نیاز به ناوگان ذخیره، ظرفیت باتری، محل شارژ و اثر شارژ بر برنامه حرکت را مشخص کند. بدون چنین بازطراحی، خطر کاهش قابلیت اطمینان خدمات و افزایش خواب ناوگان وجود دارد.

چهارم، تصمیم‌گیری اقتصادی درباره برقی‌سازی باید بر اساس هزینه چرخه عمر انجام شود، نه فقط قیمت خرید اولیه. هزینه واقعی ناوگان برقی شامل خرید اتوبوس، زیرساخت شارژ، تقویت شبکه، نگهداری تخصصی، آموزش نیروی انسانی، خدمات پس از فروش، قطعات یدکی، خواب ناوگان، تعویض باتری و بازیافت است. اگر این هزینه‌ها از ابتدا در مدل مالی لحاظ نشوند، پروژه ممکن است در سال‌های نخست قابل دفاع به نظر برسد، اما در سال‌های بعد با هزینه‌های سنگین و پیش‌بینی نشده مواجه شود. به‌ویژه، باتری باید به عنوان یک دارایی پرهزینه و دارای عمر محدود مدیریت شود. ایجاد صندوق یا سازوکار مالی برای تعویض و بازیافت باتری، استفاده از ضمانت بلندمدت عملکرد باتری، قرارداد خدمات باتری یا مشارکت تولیدکننده در بازیافت، از گزینه‌هایی است که می‌تواند ریسک مالی آینده را کاهش دهد.

پنجم، موفقیت برقی‌سازی ناوگان به حکمرانی یکپارچه و توسعه سرمایه انسانی وابسته است. این پروژه در اختیار یک نهاد واحد نیست و به همکاری شهرداری، شرکت واحد اتوبوسرانی، شرکت‌های برق، وزارت نیرو، وزارت صمت، سازمان استاندارد، نهادهای مالی، تولیدکنندگان، واردکنندگان و بخش خصوصی نیاز دارد. نبود ساختار هماهنگ‌کننده می‌تواند موجب موازی‌کاری، تأخیر اجرایی، تصمیم‌های ناسازگار و افزایش هزینه‌ها شود. بنابراین، ایجاد ساختار راهبر یا کارگروه دائمی برقی‌سازی ناوگان عمومی تهران ضروری است. این ساختار باید مسئولیت تدوین نقشه راه، تعیین خطوط اولویت‌دار، هماهنگی با شبکه توزیع برق، استانداردسازی خرید و شارژ، طراحی مدل مالی و پایش عملکرد را به عهده داشته باشد. هم‌زمان، آموزش رانندگان، تکنسین‌ها، مدیران خطوط و اپراتورهای شارژ باید از مرحله پایلوت آغاز شود تا ریسک‌های عملیاتی و ایمنی کاهش یابد.

در مجموع، برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران از نظر راهبردی قابل پیگیری است، اما موفقیت آن مشروط به اجرای تدریجی، داده‌محور و هماهنگ با ظرفیت‌های واقعی شهر است. اگر این سیاست با اولویت‌بندی خطوط، ظرفیت‌سنجی شبکه، مدیریت هوشمند شارژ، بازطراحی بهره‌برداری، تحلیل هزینه چرخه عمر و حکمرانی یکپارچه همراه شود، می‌تواند به ابزاری مؤثر

برای نوسازی حمل‌ونقل همگانی و کاهش آلاینده‌گی تبدیل شود. در غیر این صورت، خطر آن وجود دارد که برقی‌سازی به مجموعه‌ای از خریده‌های پرهزینه، کم‌بازده و دشوار در بهره‌برداری تبدیل شود. جدول ۳، نقشه راه پیشنهادی برای برقی‌سازی مرحله‌ای ناوگان اتوبوسرانی تهران را نشان می‌دهد.

جدول ۳. نقشه راه پیشنهادی برای برقی‌سازی مرحله‌ای ناوگان اتوبوسرانی تهران

افق زمانی	اقدام پیشنهادی	نهادهای درگیر	خروجی مورد انتظار
کوتاه‌مدت	انتخاب چند خط پابلوت با شرایط متفاوت از نظر شیب، تقاضا و ظرفیت شبکه	شهرداری، شرکت واحد، شرکت برق	تولید داده واقعی از عملکرد ناوگان برقی
کوتاه‌مدت	تهیه نقشه ظرفیت میزبانی شبکه توزیع برق برای شارژ ناوگان	شرکت برق، شهرداری، مشاور فنی	شناسایی نقاط مجاز و پرریسک برای نصب شارژر
کوتاه‌مدت	تدوین استاندارد اولیه برای خرید، شارژ و ایمنی ناوگان	شهرداری، سازمان استاندارد، وزارت صمت	کاهش ریسک خرید و بهره‌برداری
میان‌مدت	توسعه ترکیبی شارژ شبانه و شارژ سریع در خطوط منتخب	شهرداری، شرکت واحد، شرکت برق	افزایش قابلیت اطمینان بهره‌برداری
میان‌مدت	طراحی مدل مالی چرخه عمر و صندوق جایگزینی باتری	شهرداری، نهادهای مالی، تولیدکنندگان	کنترل هزینه‌های آینده و جلوگیری از بدهی پنهان
میان‌مدت	آموزش رانندگان، تکنسین‌ها و مدیران خطوط	شرکت واحد، تولیدکنندگان، مراکز آموزشی	کاهش ریسک عملیاتی و افزایش بهره‌وری
بلندمدت	ایجاد ساختار راهبر برقی‌سازی ناوگان عمومی	شهرداری، وزارت نیرو، وزارت صمت، شرکت برق	هماهنگی نهادی و اجرای نقشه راه
بلندمدت	توسعه صنعت بازیافت و مدیریت باتری‌های فرسوده	شهرداری، بخش خصوصی، سازمان محیط زیست	کاهش پیامدهای محیط زیستی و وابستگی خارجی

۶. نتیجه‌گیری

برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران فقط به معنای خرید اتوبوس برقی نیست، بلکه بخشی از یک تحول گسترده در نظام حمل‌ونقل همگانی، شبکه توزیع برق، زیرساخت شارژ و مدیریت شهری است. یافته‌های این مقاله نشان می‌دهد موفقیت این سیاست بیش از آنکه به اصل فناوری وابسته باشد، به نحوه برنامه‌ریزی، اولویت‌بندی خطوط، ظرفیت‌سنجی شبکه توزیع برق، مدیریت شارژ، تأمین مالی و هماهنگی نهادی بستگی دارد.

یکی از نتایج اصلی مقاله آن است که برقی‌سازی نباید به صورت یکسان و سراسری اجرا شود. خطوط اتوبوسرانی تهران از نظر طول مسیر، شیب، تقاضای سفر، تراکم ترافیک، ظرفیت پایانه، امکان جانمایی شارژر و دسترسی به شبکه توزیع برق شرایط متفاوتی دارند. بنابراین، توسعه ناوگان برقی باید به صورت خط‌محور و مرحله‌ای انجام شود و پیش از اجرای گسترده، خطوط مناسب بر اساس شاخص‌های فنی، اقتصادی، عملیاتی و زیرساختی اولویت‌بندی شوند.

همچنین، شبکه توزیع برق یکی از عوامل تعیین‌کننده در امکان‌پذیری برقی‌سازی است. مسئله اصلی فقط تأمین انرژی نیست، بلکه زمان و مکان شارژ ناوگان اهمیت اساسی دارد. در صورت نبود مدیریت هوشمند شارژ و ارزیابی ظرفیت شبکه، توسعه شارژرها می‌تواند به ایجاد پیک‌های محلی، افت ولتاژ و کاهش کیفیت توان منجر شود. از این رو، تهیه نقشه ظرفیت میزبانی شبکه توزیع برق و طراحی نظام مدیریت هوشمند شارژ، از الزامات اصلی اجرای این سیاست در تهران است.

از منظر بهره‌برداری نیز، برد اسمی اتوبوس‌های برقی نمی‌تواند مبنای کافی برای تصمیم‌گیری باشد. شرایط واقعی تهران، از جمله شیب مسیرها، دمای محیط، بار مسافر و ترافیک، بر مصرف انرژی و برد عملیاتی ناوگان اثر می‌گذارد. بنابراین، برقی‌سازی باید همراه با بازطراحی برنامه حرکت، زمان‌بندی شارژ، تعداد ناوگان ذخیره، آموزش رانندگان و نظام نگهداری تخصصی انجام شود.

در بعد اقتصادی، مقاله نشان می‌دهد تحلیل هزینه برقی‌سازی باید بر پایه چرخه عمر انجام شود، نه فقط قیمت خرید اولیه. هزینه زیرساخت شارژ، تقویت شبکه، نگهداری، آموزش، خواب ناوگان، تعویض باتری و بازیافت باید از ابتدا در مدل مالی پروژه

لحاظ شود. به‌ویژه، هزینه جایگزینی باتری می‌تواند در سال‌های آینده به یکی از ریسک‌های مالی جدی مدیریت شهری تبدیل شود؛ بنابراین، تعریف سازوکار مالی مشخص برای مدیریت باتری ضروری است. در نهایت، برقی‌سازی ناوگان اتوبوسرانی تهران از نظر راهبردی قابل دفاع است، اما تنها در صورتی می‌تواند موفق باشد که به صورت تدریجی، داده‌محور، بومی و هماهنگ با ظرفیت شبکه توزیع برق و توان مدیریتی شهر اجرا شود. مسیر مناسب برای تهران، اجرای پایلوت‌های محدود و قابل ارزیابی، جمع‌آوری داده‌های واقعی از عملکرد ناوگان، و سپس توسعه مرحله‌ای بر اساس نتایج این پایلوت‌هاست. در چنین رویکردی، برقی‌سازی می‌تواند به ابزاری مؤثر برای کاهش آلاینده‌ها، نوسازی ناوگان و ارتقای کیفیت حمل‌ونقل همگانی تبدیل شود؛ اما در صورت محدود شدن به خرید تجهیزات، خطر تبدیل شدن به پروژه‌ای پرهزینه و کم‌بازده وجود خواهد داشت.

۷. سیاستگذاری

نویسندگان مراتب سپاس خود را از مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران، به‌ویژه گروه مطالعاتی حمل‌ونقل و ترافیک، به دلیل فراهم‌سازی بستر برگزاری نشست تخصصی برقی‌سازی ناوگان حمل‌ونقل شهری و همکاری در دسترسی و استفاده پژوهشی از محتوای ارائه‌شده در این نشست، اعلام می‌دارند.

منابع

1. IEA. Global EV Outlook 2025. 2025. Report No.: CC BY 4.0.
2. ITDP. Advancing E-Buses: A Guide to Batteries and Charging. Institute for Transportation and Development Policy; 2025.
3. ITDP. For E-Buses to Succeed, Cities Need to Focus on Charging and Implementation. Institute for Transportation and Development Policy; 2025.
4. World Bank. Mapping Urban Transport Governance (English) .Washington, D.C. : World Bank Group; 2024.
5. Moeini P, Mirzahosseini H, Zahab Saniei A, Faridiaghdam A. 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. 2025 Jun 1;2(3):297-318 [Persian].
6. IFC. What We Do Sector Expertise Infrastructure Transportation Electric Buses. International Finance Corporation; 2025.
7. Wenz K-P, Serrano-Guerrero X, Barragán-Escandón A, González LG, 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.
8. Arif SM, Lie TT, Seet BC, Ahsan SM, Khan HA. Plug-In Electric Bus Depot Charging with PV and ESS and Their Impact on LV Feeder. Energies [Internet]. 2020; 13(9):[2139 p.].
9. Zhao X, Chaoyue Zhao, and Grace Jia, editor Grid-Aware Robust Fast-Charging Station Deployment for Electric Buses Under Socioeconomic Considerations2023.
10. Chen YZ, Weimin; Berlin, Annika; Deng, Huijing; Tian, Danhui; Wang, Jin-1498055; Zhang, Xiuli; Jenn, Alan; Wang, Yunshi; Liu, Yu; Li, Jingyun; Wei, Fulei; Wang, Qian-000536199; Bian, Yong; Li, Chunmei. Electrification of Public Transport : A Case Study of the Shenzhen Bus Group (English). 2021.
11. Frieß NM, Pferschy U. Planning a zero-emission mixed-fleet public bus system with minimal life cycle cost. Public Transport. 2024;16(1):39–79. doi:10.1007/s12469-023-00345-4.
12. Nath RB, Rambha T, Schiffer M. On the impact of co-optimizing station locations, trip assignment, and charging schedules for electric buses. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2024;167:104839. doi:10.1016/j.trc.2024.104839.
13. Zhou Y, Ong GP, Meng Q. The road to electrification: Bus fleet replacement strategies. Applied Energy. 2023;337:120903. doi:10.1016/j.apenergy.2023.120903.
14. Kapatsila B, Grisé E, Crumley M, El-Geneidy A. Empirical analysis of battery-electric bus transit operations in Portland, OR, USA. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2024;128:104120. doi:10.1016/j.trd.2024.104120.
15. Najafi A, Gao K, Parishwad O, Tsaousoglou G, Jin S, Yi W. Integrated optimization of charging infrastructure, electric bus scheduling and energy systems. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2025;141:104664. doi:10.1016/j.trd.2025.104664.
16. Pei M, Hu Y, Han W, Qu X, Zou C. Life-Cycle analysis of economic and environmental effects for electric bus transit systems. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2024;131:104205. doi:10.1016/j.trd.2024.104205.
17. Toering A, de Bruijne M, Veeneman W. Exploring governance challenges of sustainable infrastructure development on the nexus between energy and mobility. npj Sustainable Mobility and Transport. 2025;2:1. doi:10.1038/s44333-024-00018-0.
18. Tilly N, Yigitcanlar T, Degirmenci K, He SY, Loo BPY, Paz A. Electric vehicles and sustainable development goals: A multi-level governance analysis. Transport Policy. 2025;171:239–255. doi:10.1016/j.tranpol.2025.06.008.