Urban Development Policy Making

Home Page: https://judpm.ir

Online ISSN: 3092-6564

Green Transformation of the Capital: A Comprehensive Vision for Electric Transportation in Tehran

Mehdi Bavoghar Zaeimi[1*] | Saman Mashaghzadeh[2] | Ghasem Goodarzi[3] | Mohammad Taghi Tahooneh[4] | Amir Mahdavi[5]

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Tehran North Branch, Tehran, Iran. Email: m_bavaghar@tahoo.com
2. CEO, Andishkar Consulting Company, Tehran, Iran. Email: andishkar.eng@gmail.com
3. Master's Degree in Civil Engineering, Transportation and Highway, Kermanshah, Iran. Email: gasem.goodarzi@gmail.com
4. Master's Degree in Energy Systems Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: m_taghi@nt.iust.ac.ir
5. PhD Candidate in Transportation Planning, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: armahdavi1370@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 06 February 2025
Revised 19 March 2025
Accepted 09 April 2025
Published Online 10 May 2025

Keywords:
Clean Tansportation,
Tehran City,
Transportation Electrification.

ABSTRACT

Tehran, as one of the most populous metropolitan areas in the region, faces significant challenges related to air pollution and traffic congestion, primarily driven by the heavy reliance of its transportation fleet on fossil fuels. The electrification of transportation has emerged as a critical strategy to mitigate greenhouse gas emissions, enhance air quality, and achieve sustainable development in the city. This study aims to provide a comprehensive vision for the green transformation of Tehran's transportation system. It begins by exploring the global context of this transition, drawing on international data and the successful experiences of leading countries such as China, Norway, and Denmark, while also examining the challenges encountered by other nations. Subsequently, the current state of Tehran is analyzed, highlighting key achievements such as the introduction of electric buses, the replacement of aging taxis with electric models, the installation of charging stations across the city, and the development of a comprehensive electrification plan. The study also addresses existing barriers, including the lack of adequate charging infrastructure, dependence on a fossil fuel-based electricity grid, and financial constraints. To overcome these challenges, practical recommendations are proposed for Tehran's future development, including the enhancement of charging infrastructure with a focus on renewable energy sources, the provision of sustainable financial support, the promotion of public awareness, and the implementation of cohesive policy frameworks to expand the electric public transportation fleet. The findings suggest that by leveraging global best practices and adopting these recommendations in a coordinated manner, Tehran has the potential to become a regional model for sustainable transportation, taking significant strides toward reducing air pollution and realizing the vision of a green capital.

Cite this article: Bavoghar Zaeimi, M.; Mashaghzadeh, S.; Goodarzi, Gh.; Tahooneh, M. T. & Mahdavi, A. (2025). Green Transformation of the Capital: A Comprehensive Vision for Electric Transportation in Tehran. *Urban Development Policy Making*, 2 (2), 207-230. DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.515395.1030

© Mehdi Bavoghar Zaeimi, Saman Mashaghzadeh, Ghasem Goodarzi, Mohammad Taghi Tahooneh, Amir Mahdavi
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.515395.1030

1. Introduction

The study addresses the pressing environmental and traffic-related challenges in Tehran, identifying the electrification of urban transportation as a strategic and sustainable solution. It aims to evaluate the feasibility, barriers, and required policy frameworks to support a transition toward cleaner mobility. The authors position electrification as a key response to air quality degradation and the growing demand for urban transport reform.

2. Background

By reviewing global trends in transportation electrification, the study analyzes both successful and unsuccessful international experiences, emphasizing the critical role of supportive policies, infrastructure development, and public acceptance. It underscores the importance of tailoring global best practices to local realities, particularly in cities with dense populations and fossil fuel-dependent grids such as Tehran. The background provides the contextual foundation for assessing why Tehran must act and how it might adapt international models effectively. This section reviews global trends in transport electrification, emphasizing its environmental and economic benefits. It draws on lessons from successful (e.g., Norway, China) and less successful (e.g., Spain, India) international experiences. Key statistics on CO_2 emissions, battery cost reduction, and government policies (e.g., the Paris Agreement) underscore the urgency and feasibility of electrification.

3. Methodology

A qualitative-descriptive research design was adopted, combining content analysis of national and international reports, policy documents, and case studies. The analysis is structured around the three pillars of sustainable development—environmental, economic, and social—providing a comprehensive framework for evaluating electrification strategies. Comparative case studies of countries like China, Norway, and India were employed to extract lessons applicable to Tehran’s socio-technical landscape.

4. Results and Discussion

The results underscore Tehran's initial but promising steps toward electrification, including the deployment of electric buses and taxis, the establishment of charging infrastructure, and the drafting of a strategic master plan. A SWOT analysis reveals internal strengths and weaknesses, as well as external opportunities and threats, outlining key factors influencing the success of the electrification agenda. The discussion critically reflects on challenges such as reliance on fossil-based electricity and financial constraints, while benchmarking Tehran's progress against international indicators.

5. Conclusion

The study concludes with strategic recommendations: the development of smart solar-powered charging networks, implementation of targeted financial incentives, local production of EV components, policy harmonization, and public education campaigns. These interventions are considered essential for enabling Tehran to emerge as a regional leader in sustainable and low-emission urban transport. Ultimately, the paper advocates for a coordinated, multi-sectoral approach to overcoming infrastructural and institutional barriers to electrification.

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

تحول سبز پایتخت؛ چشم‌انداز جامع حمل‌ونقل برقی شهر تهران

مهدی باوقار زعیمی[۱*]| سامان مشاق‌زاده[۲]| قاسم گودرزی[۳]| محمدتقی طاحونه[۴]| امیر مهدوی[۵]

۱. نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشکدهٔ عمران، دانشگاه آزاد اسلامی تهران شمال، تهران، ایران. رایانامه: m_bavaghar@yahoo.com
۲. مدیرعامل شرکت مشاوران اندیشکار، تهران، ایران. رایانامه: andishkar.eng@gmail.com
۳. کارشناسی ارشد عمران ـ راه و ترابری، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، رایانامه: gasem.goodarzi@gmail.com
۴. کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه: m_taghi@nt.iust.ac.ir
۵. دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکدهٔ مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: amirrezamahdavi@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

کلیدواژه:
برقی‌سازی حمل‌ونقل،
شهر تهران،
حمل‌ونقل پاک.

چکیده

تهران به عنوان یکی از کلان‌شهرهای پرجمعیت منطقه، با چالش‌های جدی آلودگی هوا و ترافیک مواجه است که عمدتاً ناشی از وابستگی ناوگان حمل‌ونقل به سوخت‌های فسیلی است. برقی‌سازی حمل‌ونقل به عنوان راهکاری اساسی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بهبود کیفیت هوا، و تحقق توسعهٔ پایدار در این شهر مطرح شده است. این پژوهش با هدف ترسیم چشم‌اندازی جامع برای دگرگونی سبز حمل‌ونقل پایتخت، ابتدا زمینهٔ جهانی این تحول را با تکیه بر داده‌های جهانی و تجربیات موفق در کشورهای پیشرو مانند چین، نروژ، و دانمارک و همچنین، چالش‌های به‌وجودآمدهٔ قبلی در برخی کشورها بررسی می‌کند. سپس، وضعیت کنونی تهران را تحلیل می‌کند و دستاوردهایی نظیر ورود اتوبوس‌های برقی، جایگزینی تاکسی‌های فرسوده با مدل‌های برقی، نصب ایستگاه‌های شارژ در نقاط مختلف شهر، و تدوین سند طرح جامع برقی‌سازی را برجسته می‌سازد. این مطالعه همچنین به موانع موجود، از جمله کمبود زیرساخت‌های شارژ، وابستگی به شبکهٔ برق فسیلی، و محدودیت‌های مالی می‌پردازد و پیشنهادهایی عملی برای بهبود روند توسعهٔ آتی برای شهر تهران؛ از جمله تقویت زیرساخت‌های شارژ با تأکید بر انرژی‌های تجدیدپذیر، ارائهٔ حمایت‌های مالی پایدار، افزایش آگاهی عمومی، و سیاست‌گذاری منسجم برای توسعهٔ ناوگان حمل‌ونقل عمومی برقی ارائه می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد تهران با الگوبرداری از تجربیات جهانی و اجرای هماهنگ این پیشنهادها، می‌تواند به الگویی منطقه‌ای در حمل‌ونقل پایدار تبدیل شود و گامی مؤثر در کاهش آلودگی هوا و تحقق پایتختی سبز بردارد.

استناد: باوقار زعیمی، مهدی؛ مشاق‌زاده، سامان؛ گودرزی، قاسم؛ طاحونه، محمدتقی و مهدوی، امیر (۱۴۰۴). تحول سبز پایتخت؛ چشم‌انداز جامع حمل‌ونقل برقی شهر تهران. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۲ (۲) ۲۰۷-۲۳۰.

DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.515395.1030

© مهدی باوقار زعیمی، سامان مشاق‌زاده، قاسم گودرزی، محمدتقی طاحونه، امیر مهدوی
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.515395.1030

۱. مقدمه

حمل‌ونقل همواره نقشی حیاتی در توسعهٔ جوامع داشته، اما وابستگی به سوخت‌های فسیلی، پیامدهای زیست‌محیطی گسترده‌ای از جمله آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی به همراه داشته است. در این‌میان، برقی‌سازی حمل‌ونقل به عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش این آثار منفی و حرکت به سوی آینده‌ای پایدار مطرح شده است [۱]. تهران با جمعیتی حدود ۹/۹ میلیون نفر، با چالش‌های جدی آلودگی هوا و ترافیک روبه‌رو است که بخش عمده‌ای از آن به ناوگان حمل‌ونقل وابسته به سوخت‌های فسیلی بازمی‌گردد. در این شرایط، استفاده از وسایل نقلیهٔ برقی می‌تواند نقش مهمی در کاهش آلاینده‌ها، بهبود سلامت عمومی و ارتقای کارایی سیستم حمل‌ونقل ایفا کند. این مقاله با هدف بررسی چشم‌انداز برقی‌سازی حمل‌ونقل در تهران، به تحلیل فرصت‌ها، چالش‌ها و راهکارهای موجود می‌پردازد و با بهره‌گیری از داده‌ها و تجربیات جهانی، مسیر حرکت پایتخت به سوی حمل‌ونقل پاک را ترسیم می‌کند.

با وجود اهمیت جهانی برقی‌سازی حمل‌ونقل، مطالعات محدودی به بررسی جامع این موضوع در کلان‌شهرهای خاورمیانه، به‌ویژه تهران، پرداخته‌اند. شکاف‌های پژوهشی موجود شامل نبود تحلیل‌های یکپارچه در مورد چالش‌های زیرساختی، مالی، و اجتماعی برقی‌سازی در شهرهایی با ویژگی‌های مشابه تهران (مانند تراکم بالای جمعیت، شبکهٔ برق فسیلی، و محدودیت‌های اقتصادی) است. این شکاف‌ها ضرورت انجام پژوهشی جامع را برای تدوین چشم‌اندازی عملی و بومی‌سازی تجربیات جهانی در تهران برجسته می‌کند. این مطالعه با هدف پر کردن این شکاف پژوهشی، به بررسی فرصت‌ها، چالش‌ها، و راهکارهای برقی‌سازی حمل‌ونقل در تهران می‌پردازد و مسیری برای دستیابی به حمل‌ونقل پایدار در این کلان‌شهر ترسیم می‌کند. این مطالعه چارچوبی بومی‌سازی‌شده برای تهران ارائه داده است که از طریق تحلیل SWOT، مقایسهٔ تطبیقی با پیشگامان جهانی، و پیشنهاد استراتژی‌های عملی (مانند استفاده از شارژ شبانه) به تدوین راهکارهای محلی می‌پردازد. این رویکرد، به خلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر تحلیل‌های کلی یا غیر منطقه‌ای متمرکز بودند، برای اولین‌بار تهران را در بستر خاورمیانه بررسی می‌کند و راه‌حل‌هایی متناسب با محدودیت‌های اقتصادی و زیرساختی آن ارائه می‌دهد.

بیان مسئله

تهران با چالش‌های زیست‌محیطی و ترافیکی ناشی از ناوگان حمل‌ونقل فسیلی مواجه است که به افزایش آلودگی هوا، کاهش کیفیت زندگی، و هزینه‌های بالای سلامت عمومی منجر شده است. با این‌حال، فقدان زیرساخت‌های کافی، وابستگی به شبکهٔ برق فسیلی، و محدودیت‌های مالی، موانع اصلی در مسیر برقی‌سازی حمل‌ونقل این شهر هستند. این پژوهش به دنبال پاسخ به این مسئله است که چگونه می‌توان با استفاده از تجربیات جهانی و تدوین سیاست‌های بومی، این چالش‌ها را برطرف کرد و حمل‌ونقل پایداری در تهران ایجاد کرد.

اهداف پژوهش

این مطالعه سه هدف اصلی را دنبال می‌کند:

- تحلیل وضعیت کنونی برقی‌سازی حمل‌ونقل در تهران و شناسایی دستاوردها و موانع موجود.
- بررسی تجربیات موفق و ناموفق جهانی در برقی‌سازی حمل‌ونقل و استخراج درس‌آموخته‌های قابل اجرا برای تهران.
- ارائهٔ پیشنهادهای عملی و سیاست‌گذاری‌های منسجم برای توسعهٔ حمل‌ونقل برقی پایدار در تهران.

پرسش‌های تحقیق

- چالش‌های اصلی در مسیر برقی‌سازی حمل‌ونقل چیست؟
- چگونه می‌توان از تجربیات جهانی برای غلبه بر موانع برقی‌سازی در تهران بهره برد؟
- چه سیاست‌ها و راهکارهایی برای توسعهٔ پایدار حمل‌ونقل برقی در تهران ضروری است؟

اهمیت علمی و عملی

این پژوهش با ارائهٔ تحلیلی جامع از وضعیت برقی‌سازی در تهران و مقایسهٔ آن با الگوهای جهانی، به پر کردن شکاف‌های پژوهشی در زمینهٔ حمل‌ونقل پایدار در کلان‌شهرهای خاورمیانه کمک می‌کند. از منظر عملی، یافته‌های این مطالعه می‌تواند به سیاست‌گذاران و مدیران شهری تهران در تدوین برنامه‌های بلندمدت برای کاهش آلودگی هوا، بهبود سلامت عمومی، و تحقق اهداف توسعهٔ پایدار یاری رساند. تهران با پتانسیل تبدیل شدن به الگویی منطقه‌ای در حمل‌ونقل پاک، می‌تواند از نتایج این پژوهش برای تسریع در تحول سبز خود بهره ببرد.

۲. روش‌شناسی

این پژوهش با بهره‌گیری از روش‌های توصیفی ـ اسنادی و تحلیل محتوای کیفی، به بررسی تجارب جهانی برقی‌سازی ناوگان حمل‌ونقل و تطبیق آن‌ها با شرایط تهران با هدف ارائهٔ چشم‌اندازی جامع برای برقی‌سازی حمل‌ونقل در شهر تهران پرداخته است. اسناد علمی، گزارش‌های بین‌المللی، و داده‌های محلی نظیر «کارنامهٔ شرکت توزیع برق تهران بزرگ در سال ۱۴۰۲» جمع‌آوری و تحلیل شد تا چالش‌ها و فرصت‌های برقی‌سازی، به‌ویژه شارژ شبانه، شناسایی شود. با تحلیل منطقی این داده‌ها، راهبردهایی عملی برای توسعهٔ زیرساخت‌های حمل‌ونقل برقی تهران پیشنهاد شد. این مطالعه بر دو محور اصلی استوار است: (۱) تحلیل داده‌های محلی برای درک وضعیت کنونی تهران، و (۲) بررسی تطبیقی برای استخراج درس‌آموخته‌های قابل اجرا از کشورهای پیشرو.

برای شناسایی درس‌آموخته‌های جهانی، مطالعات تطبیقی در مورد برقی‌سازی حمل‌ونقل در کشورهای پیشرو (چین، نروژ، دانمارک) و کشورهایی با چالش‌های مشابه (هند، اسپانیا) انجام شده است. این مطالعات بر اساس معیارهای زیر صورت گرفته‌اند:

- سیاست‌های تشویقی و قوانین؛
- توسعهٔ زیرساخت‌های شارژ؛
- تأثیر زیست‌محیطی و اقتصادی خودروهای برقی؛
- داده‌های این بخش از منابع معتبر مانند گزارش‌های IEA، BloombergNEF، و مقالات علمی استخراج شده‌اند.

این پژوهش بر اساس چارچوب مفهومی توسعهٔ پایدار طراحی شده است که سه بعد اصلی زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی را در بر می‌گیرد. این چارچوب برای تحلیل تأثیرات برقی‌سازی حمل‌ونقل و تدوین پیشنهادهای عملی استفاده شده است. به عنوان مثال، کاهش انتشار CO_2 به عنوان هدف زیست‌محیطی، کاهش هزینه‌های عملیاتی به‌عنوان هدف اقتصادی، و افزایش آگاهی عمومی به عنوان هدف اجتماعی در نظر گرفته شده‌اند.

این مطالعه با محدودیت‌هایی مواجه بوده است، از جمله:

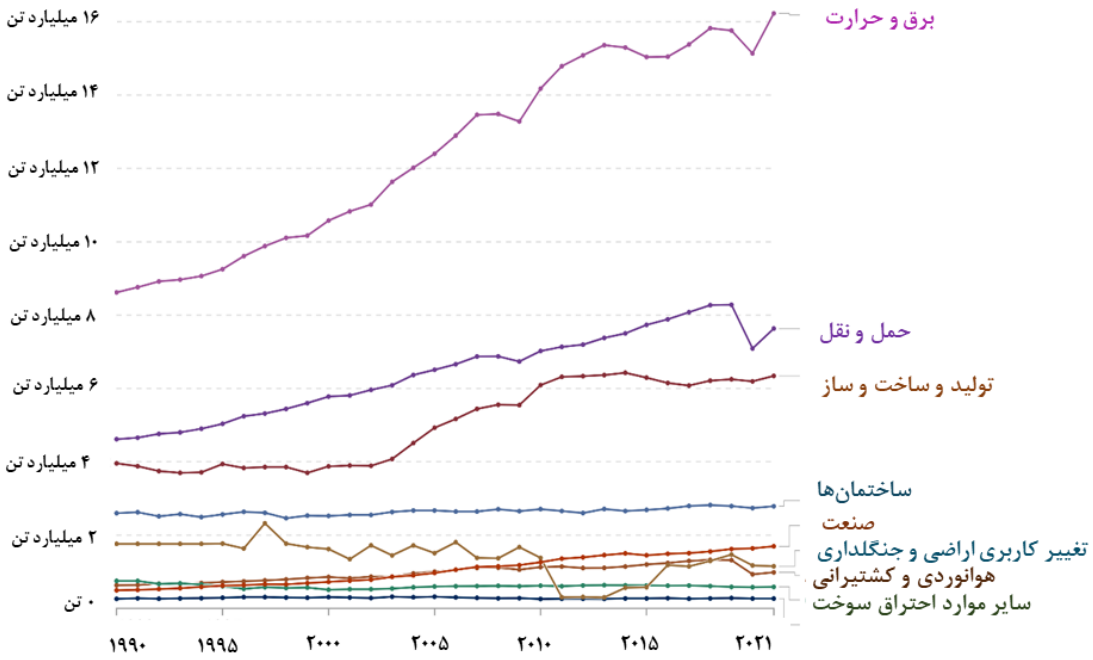
- دسترسی محدود به داده‌های به‌روز در مورد عملکرد ناوگان برقی تهران به دلیل نوپا بودن این پروژه.
- نبود مطالعات قبلی جامع در مورد برقی‌سازی در کلان‌شهرهای خاورمیانه که تحلیل تطبیقی را دشوار کرده است. با این‌حال، استفاده از منابع معتبر و داده‌های رسمی تا حد زیادی این محدودیت‌ها را جبران کرده است.

۳. زمینهٔ جهانی برقی‌سازی حمل‌ونقل

برقی‌سازی حمل‌ونقل به عنوان یک تحول اساسی در صنعت جابه‌جایی جهانی، با کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، کاهش انتشار کربن و بهبود بهره‌وری انرژی همراه است. این تغییر که با نوآوری‌هایی مانند باتری‌های پیشرفته و سیستم‌های شارژ سریع پشتیبانی می‌شود، علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، فرصت‌های اقتصادی و شغلی جدیدی را نیز ایجاد می‌کند. همچنین، گسترش خودروهای برقی در حمل‌ونقل عمومی موجب کاهش آلودگی هوا و بهبود سلامت عمومی می‌شود. در مجموع، این روند گامی مؤثر در جهت توسعهٔ پایدار و ایجاد سیستم‌های حمل‌ونقل کارآمد و سالم‌تر برای آینده است [۲].

۳–۱. بحران آلودگی حمل‌ونقل

حمل‌ونقل جاده‌ای از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عوامل انتشار گازهای گلخانه‌ای[1] (GHGs) در سطح جهان به شمار می‌رود و نقشی محوری در تشدید بحران اقلیمی ایفا می‌کند. بر اساس گزارش سازمان بین‌المللی تغییرات آب‌وهوایی (Climate Watch)، این بخش در سال ۲۰۲۲ مسئول انتشار ۸/۲ گیگاتن دی‌اکسید کربن (CO_2) بود که حدود ۲۴ درصد از کل انتشارات جهانی CO_2 و بیش از ۷۰ درصد از انتشارات کل بخش حمل‌ونقل (شامل هوایی، دریایی و زمینی) را تشکیل می‌دهد [۳]. این افزایش نسبت به ۸ گیگاتن در سال ۲۰۲۲ نشان‌دهندهٔ روند روبه‌رشد وابستگی به وسایل نقلیهٔ جاده‌ای است، به‌ویژه در مناطق شهری و درحال‌توسعه که تقاضا برای جابه‌جایی به طور مداوم افزایش می‌یابد. خودروهای مجهز به موتورهای احتراق داخلی[2] (ICE)، اعم از بنزینی و دیزلی، که همچنان بیش از ۹۰ درصد ناوگان وسایل نقلیهٔ سبک جهان را تشکیل می‌دهند [۴]، نه‌تنها CO_2 بلکه طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های خطرناک مانند اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، ذرات معلق ریز ($PM_{2.5}$)، ذرات فوق‌ریز ($PM_{1.0}$)، و ترکیبات آلی فرار (VOCs) تولید می‌کنند. این آلاینده‌ها اثرات مخربی بر لایهٔ اُزن دارند، به تشکیل مه‌دود منجر می‌شوند، و با نفوذ به سیستم تنفسی و خونی انسان، بیماری‌های مزمن تنفسی، قلبی ـ عروقی و حتی سرطان ریه را تشدید می‌کنند [۵].



شکل ۱. انتشار جهانی CO_2 در بخش‌های مختلف (۱۹۹۰–۲۰۲۱) [۹]

روند انتشار CO_2 در بخش‌های مختلف انتشاردهندهٔ اصلی آلایندگی در دنیا در شکل ۱ را نشان داده شده است. این افزایش مداوم نتیجهٔ عواملی مانند رشد ناوگان جهانی وسایل نقلیه (از ۱ میلیارد در ۲۰۱۰ به ۱/۴۵ میلیارد در ۲۰۲۳) [۴]، وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی (۹۵ درصد از انرژی حمل‌ونقل جاده‌ای) و ناکارآمدی ذاتی فناوری‌های موتور درون‌سوز است. موتورهای احتراق داخلی تنها ۲۰ ـ ۳۰ درصد از انرژی سوخت را به حرکت تبدیل می‌کنند، و باقی‌مانده به صورت گرما (۵۰ ـ ۶۰ درصد) و گازهای خروجی (۱۰ـ ۱۵ درصد) هدر می‌رود، که این ناکارآمدی به طور مستقیم به افزایش مصرف سوخت و انتشارات آلایندگی منجر می‌شود [۶].

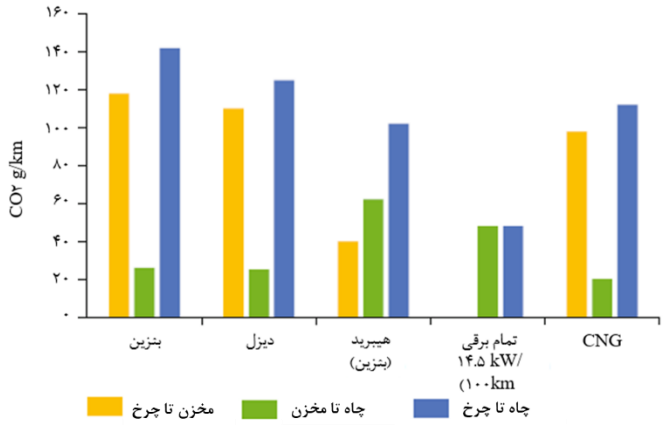
بدون اقدامات کنترلی سخت‌گیرانه، پیش‌بینی می‌شود که انتشار CO_2 از خودروهای سواری تا سال ۲۰۳۰ به ۱۲ گیگا تن برسد [۷]، که این رقم با توجه به رشد جمعیت و شهرنشینی (پیش‌بینی ۶۸ درصد جمعیت شهری تا ۲۰۵۰ توسط سازمان ملل

1. Greenhouse Gas Emissions
2. Internal Combustion Engine

[۸]) دور از انتظار نیست. این داده‌ها و تحلیل‌ها عمق فاجعه‌ای را نشان می‌دهند که جامعهٔ جهانی را به سمت تعهدات اقلیمی مانند توافق‌نامهٔ پاریس (کاهش ۴۵ درصد انتشارات تا ۲۰۳۰ نسبت به سطوح ۲۰۱۰) و هدف ۱۳ توسعهٔ پایدار سازمان ملل (SDG ۱۳) برای اقدام فوری در برابر تغییرات اقلیمی سوق داده است. این تعهدات، زمینه‌ساز گذار به فناوری‌های پاک‌تر مانند برقی‌سازی شده‌اند که می‌تواند نقطه عطفی در کاهش این بحران جهانی باشد.

۳-۲. مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی برقی‌سازی حمل‌ونقل

برقی‌سازی حمل‌ونقل از سه منظر اصلی پشتیبانی می‌شود: زیست‌محیطی، اقتصادی و سیاسی، که هر یک به طور جداگانه و در تعامل با یکدیگر، کشورها را به پذیرش این فناوری ترغیب کرده‌اند. از منظر زیست‌محیطی، خودروهای برقی با حذف گازهای خروجی مستقیم مانند کربن دی‌اکسید (CO_2)، مونوکسید کربن (CO) و ذرات معلق ($PM_{2.5}$)، می‌توانند مرگ‌ومیر مرتبط با آلودگی هوا را تا ۷ درصد کاهش دهند، که بر اساس گزارش آژانس محیط زیست اروپا [۱۰] معادل نجات حدود ۵۰۰ درصد زندگی در سال در مقیاس جهانی است. این مزیت به‌ویژه در مناطق شهری با تراکم بالای جمعیت و آلودگی شدید، مانند کلان‌شهرها، برجسته‌تر است. برای ارزیابی دقیق تأثیر زیست‌محیطی خودروهای برقی، باید چرخهٔ کامل تولید و استفاده[1] بررسی شود که شامل دو بخش است: چاه تا مخزن[2] یعنی تولید سوخت یا برق، و مخزن تا چرخ[3] یعنی مصرف در خودرو. خودروهای درون‌سوز در این چرخه شامل استخراج نفت، پالایش و احتراق هستند که درمجموع ۹۳ گرم CO_2 بر مگاژول می‌شود [۱۱]. در مقابل، خودروهای برقی در بخش مخزن تا چرخ هیچ آلایندگی مستقیمی ندارند، اما در بخش چاه تا مخزن به ترکیب منابع تولید برق وابسته‌اند. برای مثال، در چین با شبکهٔ برقی ۶۰ درصد زغال‌سنگی، هر کیلووات‌ساعت برق ۷۵۰ گرم CO_2 منتشر می‌کند که برای یک خودروی برقی با مصرف ۰/۲ کیلووات‌ساعت بر کیلومتر، معادل ۱۵۰ گرم CO_2 بر کیلومتر [۱۲]، اما در نروژ، با ۹۸ درصد برق از انرژی آبی، این میزان به ۸ گرم CO_2 بر کیلومتر کاهش می‌یابد [۱۳]. شکل ۲، مقایسه‌ای بین انتشار CO_2 چرخهٔ کامل خودروی برقی و درون‌سوز از چاه تا تانک، از تانک تا چرخ و چرخهٔ کامل چاه تا چرخ نشان می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند خودروهای برقی حتی با برق ترکیبی (۵۰ درصد تجدیدپذیر، ۵۰ درصد فسیلی) می‌توانند پتانسیل گرمایش جهانی[4] را ۱۰ـ ۲۴ درصد کمتر از خودروهای دیزلی با ۲۰۰ گرم CO_2 بر کیلومتر کنند [۱۴].



شکل ۲. مقایسهٔ آلایندگی چرخهٔ کامل خودروهای برقی و ICE [۱۴]

از نظر اقتصادی، برتری خودروهای برقی در کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری انکارناپذیر است. هزینهٔ سوخت خودروهای برقی با فرض قیمت برق ۱۰ سنت بر کیلووات‌ساعت، به حدود ۱/۵ سنت بر کیلومتر می‌رسد، در حالی که این رقم برای خودروهای

1. Well-to-Wheel
2. Well-to-Tank
3. Tank-to-Wheel
4. Global Warming Potential

بنزینی با قیمت بنزین ۳/۵ دلار بر گالن (معادل حدود ۹۲ سنت بر لیتر) به ۱۰ سنت بر کیلومتر می‌رسد. علاوه بر این، حذف قطعاتی مانند سیستم اگزوز، تسمه تایم و فیلترهای روغن در خودروهای برقی هزینه‌های نگهداری را تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهد، که این امر به‌ویژه برای ناوگان‌های حمل‌ونقل عمومی و تجاری، مانند اتوبوس‌ها و تاکسی‌ها، از نظر مالی جذاب است [۱۵].

۳–۳. سیاست‌ها و قوانین توسعه‌دهندهٔ برقی‌سازی حمل‌ونقل جهانی

محرک اصلی برقی‌سازی در جهان، قوانین ملی و بین‌المللی مانند توافق‌نامهٔ پاریس (۲۰۱۵) و برنامه‌های کاهش انتشار (NDCs) است که کشورها را به کاهش آلایندگی و استفاده از فناوری پاک متعهد می‌کند. اتحادیهٔ اروپا با هدف کاهش ۵۵ درصد گازهای گلخانه‌ای تا ۲۰۳۰ و صفر خالص تا ۲۰۵۰ (سند سبز)، برنامه‌هایی مثل ساخت ۳ میلیون ایستگاه شارژ و بودجهٔ ۲۰ میلیارد یورویی دارد [۱۶]. در آمریکا، قوانین هوای پاک، CAFE و قانون کاهش تورم با مشوق‌های مالی، برقی‌سازی را تقویت کرده‌اند. چین نیز با برنامهٔ «خودروهای انرژی جدید» و هدف ۲۰ درصد فروش خودروهای برقی تا ۲۰۲۵، بزرگ‌ترین بازار جهانی این خودروها شده است. خلاصه‌ای از سایر سیاست‌های مهم و تأثیرگذار در این زمینه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. خلاصهٔ قوانین و برنامه‌های کاهش آلودگی هوا در دنیا

کشور/منطقه	قانون/برنامه	سال	هدف	نقش در کشور/ منطقهٔ برقی‌سازی	مرجع
آمریکا	قانون هوای پاک (Clean Air Act)	۱۹۶۳	کاهش PM۲٫۵ به زیر ۱۲ µg/m³	پایه‌گذاری استانداردهای آلایندگی و تشویق به فناوری‌های پاک	(۱۷)
آمریکا	قانون کاهش تورم (IRA)	۲۰۲۲	کاهش ۴۰٪ انتشار تا ۲۰۳۰	اعتبار مالیاتی ۷٬۵۰۰ دلاری و ۳۷۰ میلیارد دلار سرمایه‌گذاری در خودروهای برقی و انرژی پاک	(۱۸)
اتحادیهٔ اروپا	توافق‌نامهٔ سبز اروپا (European Green Deal)	۲۰۱۹	۹۰٪ کاهش آلایندگی حمل‌ونقل تا ۲۰۵۰	توسعهٔ ۳ میلیون ایستگاه شارژ و بودجهٔ ۲۰ میلیارد یورویی برای خودروهای برقی	(۱۹)
چین	برنامهٔ خودروهای انرژی جدید (NEVs)	۲۰۰۹	۲۰٪ فروش خودروهای برقی تا 2025	یارانه ۲٬۰۰۰ دلاری، معافیت مالیاتی و سرمایه‌گذاری ۱۵ میلیارد دلاری در زیرساخت‌ها	(۸)
نروژ	سیاست ملی خودروهای برقی	۱۹۹۰	۱۰۰٪ فروش خودرهای برقی تا 2025	معافیت مالیاتی، دسترسی به خطوط ویژه و بیش از ۲۰٬۰۰۰ ایستگاه شارژ	(۲۰)

۴. تجربیات جهانی برقی‌سازی حمل‌ونقل (موفقیت‌ها و چالش‌ها)

در دهه‌های اخیر، برقی‌سازی حمل‌ونقل به عنوان یکی از راهکارهای کلیدی برای دستیابی به توسعهٔ پایدار و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است. کشورهای مختلف با اتخاذ سیاست‌ها و فناوری‌های نوین، تجربیات موفق قابل توجه و همچنین چالش‌های متعددی در این مسیر به دست آورده‌اند. در این بخش، به بررسی دستاوردها و موانع موجود در تجربهٔ جهانی برقی‌سازی حمل‌ونقل خواهیم پرداخت تا از این تجارب در جهت بهبود عملکرد سیستم‌های حمل‌ونقل بهره‌مند شویم.

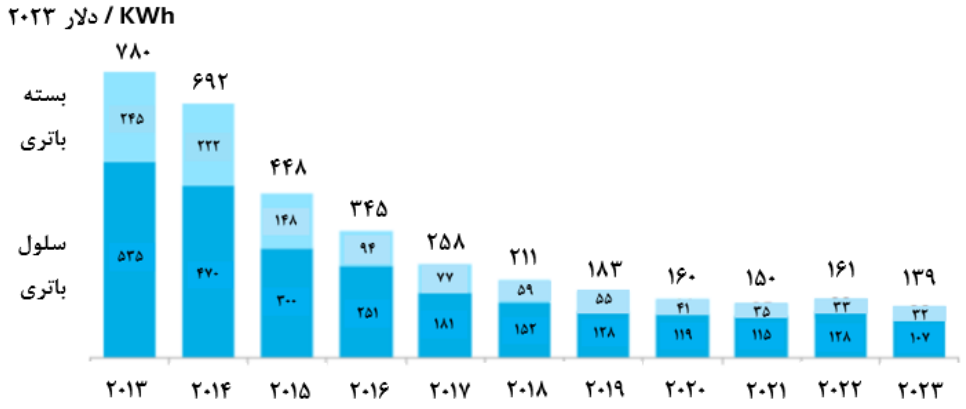
۴–۱. بازار جهانی خودروهای برقی

بازار جهانی خودروهای برقی در سال‌های اخیر رشد چشمگیری را تجربه کرده است. در سال ۲۰۲۳، فروش این خودروها (شامل خودروهای تمام برقی (BEVs) و هیبریدی قابل شارژ (PHEVs)) به حدود ۱۴ میلیون دستگاه رسید که نسبت به ۱۰/۵ میلیون دستگاه در سال ۲۰۲۲، افزایشی ۳۵ درصدی را نشان می‌دهد. این رشد سریع حاصل پیشرفت‌های فناورانه، سیاست‌های حمایتی و تغییر الگوی مصرف انرژی در سطح جهان است [۴].

عوامل کلیدی در رشد بازار خودروهای برقی شامل موارد زیر است:

۱. کاهش هزینه و بهبود فناوری باتری:

یکی از عوامل مهم در رقابتی شدن خودروهای برقی، کاهش چشمگیر هزینهٔ باتری‌ها بوده است. مطابق شکل ۳ قیمت باتری‌های لیتیوم ـ یونی از ۷۸۰ دلار بر کیلووات‌ساعت در سال ۲۰۱۳ به ۱۳۹ دلار در سال ۲۰۲۳ کاهش یافته است [۱۴]. هم‌زمان، چگالی انرژی این باتری‌ها از ۱۰۰ به بیش از ۲۵۰ وات‌ساعت بر کیلوگرم افزایش یافته که موجب بهبود برد حرکتی و کارایی خودروهای برقی شده است.



شکل ۳. میانگین قیمت حجمی بسته و سلول باتری لیتیوم ـ یونی در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ [۲۱]

۲. افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر

رشد چشمگیر تولید برق از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی، تأثیر مثبتی بر کاهش ردپای کربنی خودروهای برقی داشته است. در حال حاضر، بیش از ۳۰ درصد از برق جهانی از منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود که این رقم همچنان در حال افزایش است. این امر موجب می‌شود که خودروهای برقی نه‌تنها در مصرف انرژی کارآمدتر باشند، بلکه نقش مؤثری در کاهش آلودگی زیست‌محیطی ایفا کنند. نروژ نمونه‌ای برجسته است که با بهره‌گیری از شبکهٔ برقی مبتنی بر ۹۸ درصد انرژی تجدیدپذیر (عمدتاً برق‌آبی [۱۳])، انتشار CO_2 ناشی از خودروهای برقی را به ۸ گرم بر کیلومتر کاهش داده است.

۳. مشوق‌های دولتی و حمایت‌های اقتصادی

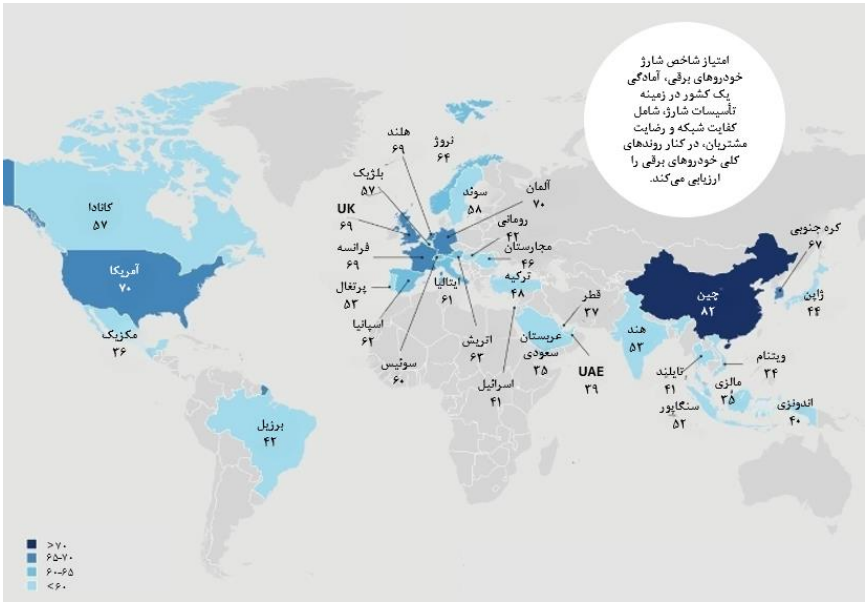
دولت‌ها برای ترویج خودروهای برقی از سیاست‌های حمایتی استفاده می‌کنند. در آمریکا، یارانه ۷،۵۰۰ دلاری قیمت را کاهش می‌دهد. نروژ با معافیت مالیاتی، عوارض رایگان، خطوط ویژه و ۲۰ هزار ایستگاه شارژ، در ۲۰۲۳ بیش از ۹۰ درصد فروش خودروها را برقی کرده و هدف ۱۰۰ درصد تا ۲۰۲۵ دارد؛ مثلاً تسلا مدل ۳ با قیمت رقابتی و پیمایش ۵۰۰ کیلومتر محبوب است. آلمان نیز با یارانه ۹ هزار یورویی و هدف ۳ میلیون ایستگاه شارژ تا ۲۰۳۰، سهم خودروهای برقی را در ۲۰۲۳ به ۲۵ درصد رسانده است [۲۰ و ۲۲].

۴. توسعهٔ زیرساخت‌های شارژ

یکی از موانع اصلی پذیرش خودروهای برقی، کمبود ایستگاه‌های شارژ بوده است، اما با سرمایه‌گذاری‌های اخیر، تعداد این ایستگاه‌ها تا سال ۲۰۲۳ به ۳/۹ میلیون واحد رسیده و فناوری شارژ سریع نیز باتری‌ها را در کمتر از ۳۰ دقیقه تا ۸۰ درصد شارژ می‌کند. شاخص شارژ خودرو برقی رولند برگر[1] ۲۰۲۴، با بررسی داده‌های ۱۵،۵۸۲ نفر از مناطق مختلف جهان و تمرکز بر دسترسی‌پذیری، کارایی شبکه شارژ، و رضایت مشتریان، عملکرد زیرساخت‌های شارژ را ارزیابی کرده و امتیازی بین ۰ تا ۱۰۰ به کشورها می‌دهد. این شاخص، که در نقشهٔ جهانی (۰شکل ۴) با طیف رنگی و اعداد نشان‌داده‌شده، ناهمگونی جغرافیایی در توسعهٔ زیرساخت‌ها را در ۲۸ کشور منتخب نمایش می‌دهد و به سیاست‌گذاران برای شناسایی قوت‌ها، ضعف‌ها و فرصت‌های توسعهٔ پایدار کمک می‌کند. تحلیل زیر بر اساس داده‌های نقشه و متن همراه انجام شده است:

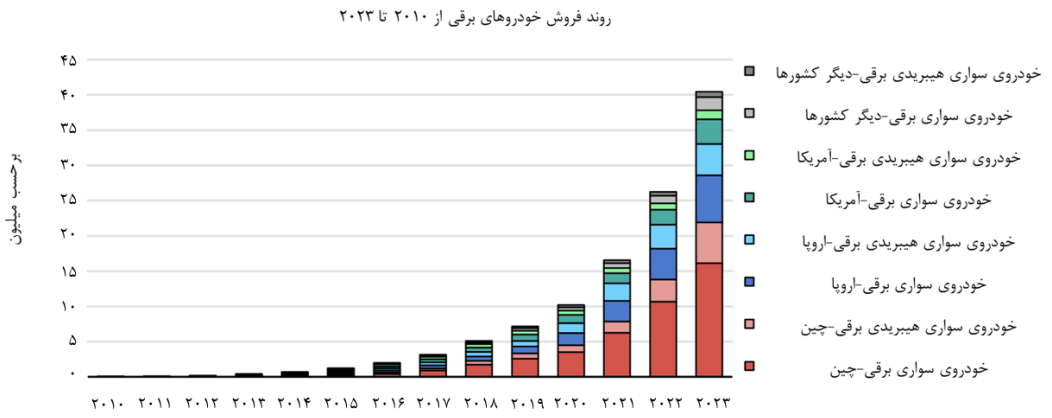
1. Roland Berger

- کشورهای پیشرو: چین با امتیاز ۸۲، به دلیل افزایش ۶۵ درصد شبکهٔ شارژ (۸/۶ میلیون نقطه) و تمرکز بر شارژرهای خانگی و سوپرشارژرها، پیشتاز جهانی است و ۸۶ درصد رانندگان از کیفیت شارژ راضی هستند. ایالات متحده و آلمان هر دو با امتیاز ۷۰، به‌ترتیب با فروش ۱/۵ میلیون خودرو برقی و شبکهٔ شارژ پیشرفته، موفق عمل کرده‌اند، اما آمریکا با نسبت خودرو به شارژر ۲۴/۵ چالش‌هایی دارد.
- کشورهای با رشد متوسط: نروژ (۶۴)، هلند (۶۹)، سوئد (۵۸)، فرانسه (۶۹)، و سوئیس (۶۰) در بازه ۶۰–۷۰ قرار دارند. نروژ با ۲۰ هزار ایستگاه شارژ و شبکهٔ برق تجدیدپذیر الگوی موفقی است، اما کاهش یارانه‌ها فروش را کند کرده. کرهٔ جنوبی (۶۷) با شارژرهای سریع و ژاپن (۴۴) با تمرکز بر فناوری هیبریدی، رویکردهای متفاوتی دارند.
- کشورهای با رشد کند: ترکیه (۴۶)، عربستان (۳۵)، امارات (۳۹)، و هند (۵۳) با امتیاز زیر ۶۰، پیشرفت محدودی دارند. خاورمیانه (مثل عربستان با بهبود نسبت خودرو به شارژر به ۱،۰) و آسیای جنوب شرقی (مالزی ۳۵، تایلند ۴۱) در حال توسعه هستند، اما مکزیک (۳۶)، برزیل (۴۲)، و ویتنام (۳۴) به دلیل زیرساخت ضعیف عقب مانده‌اند.
- روندهای منطقه‌ای: اروپای غربی با رشد ۸۰ درصد شارژرهای DC (فرانسه و آلمان) پیشتاز است، اما کاهش یارانه‌ها فروش را محدود کرده. آمریکا با تکیه ۹۶ درصد مالکان بر شارژ خانگی و تأخیر در برنامهٔ NEVI کمبود زیرساخت دارد. چین با ۴۴ درصد شارژرهای DC تقاضا را پوشش می‌دهد، و خاورمیانه و آسیای جنوب شرقی با گزینه‌های اقتصادی در حال پیشرفت هستند.



شکل ٤. شاخص شارژ خودروهای برقی رولند برگر ۲۰۲۴ [۲۳]

۰شکل ۵ نمودار فروش جهانی خودروهای برقی را در سال‌های ۲۰۱۰–۲۰۲۳ نشان می‌دهد. نرخ رشد سالانهٔ خودروهای تمام‌برقی (۴۵ درصد) از خودروهای هیبرید برقی (۲۰ درصد) پیشی گرفته که نشان‌دهندهٔ ترجیح مصرف‌کنندگان به خودروهای تمام‌برقی است. این روند می‌تواند الگویی برای تهران باشد که به دنبال کاهش سریع آلودگی است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، بزرگ‌ترین بازار خودروهای برقی جهان در ۲۰۲۳ متعلق به کشور چین با ۸/۴ میلیون دستگاه است که با رویکردی متفاوت، از طریق سیاست‌های تهاجمی و سرمایه‌گذاری عظیم (15میلیارد دلار در برنامه [۲۴])، به این سهم دست یافته است. ممنوعیت فروش خودروهای درون‌سوز در شهرهایی مانند پکن و شانگهای، همراه با توسعه ۳/۹ میلیون ایستگاه شارژ عمومی (IEA, 2024)، موفقیت این کشور را تضمین کرده است. همچنین شرکت BYD، به عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده خودروهای برقی چین، با مدل‌هایی مانند BYD Han (پیمایش ۶۰۰ کیلومتر) نشان داده که تولید انبوه و قیمت‌گذاری رقابتی (حدود ۳۰ هزار دلار) چگونه تقاضا را تحریک می‌کند (تجارب موفق جهانی).



شکل ۵. روند تعداد خودروهای برقی در جهان (۲۰۱۰–۲۰۲۳) [۴]

۴–۲. چالش‌ها و تجربیات ناموفق جهانی و روش‌های بهبود

با وجود موفقیت‌های فراوان در این حوزه، برخی کشورها با چالش‌هایی جدی در زمینهٔ برقی‌سازی حمل‌ونقل خود مواجه شده‌اند که درس‌هایی حیاتی برای برقی‌سازی حمل‌ونقل در تهران دارند. اسپانیا، علی‌رغم تعهد به اهداف اتحادیهٔ اروپا، به دلیل زیرساخت‌های شارژ ضعیف (کمتر از ۵۰ درصد ایستگاه در ۲۰۲۳) و یارانه‌های ناکافی (حداکثر ۷ هزار یورو با شرایط سخت)، از میانگین اروپا عقب مانده است. مطالعه‌ای در والنسیا نشان داد برد محدود باتری‌ها (متوسط ۳۰۰ کیلومتر) و زمان شارژ طولانی (بیش از ۳۰ دقیقه برای شارژ سریع)، همراه با حمایت بیشتر از خودروهای فسیلی (یارانه سوخت)، انگیزهٔ پذیرش خودروهای برقی را کاهش داده است. برای مثال، اتوبوس‌های برقی در مادرید به دلیل فرسودگی زودهنگام باتری‌ها، هزینه‌های تعمیر و نگهداری را ۴۰ درصد افزایش داده‌اند [۲۵]. هند با وجود طرح تشویقی FAME II، به دلیل شبکهٔ برقی وابسته به ۶۰ درصد زغال‌سنگ مزیت زیست‌محیطی خودروهای برقی را کم‌رنگ کرده و با تنها ۱۰ هزار ایستگاه شارژ در ۲۰۲۳، نتوانسته تقاضا را پاسخ دهد. خودروی تاتا نکسون برقی، با پیمایش ۳۱۲ کیلومتر، به دلیل کمبود زیرساخت، در شهرهایی مثل دهلی کمتر مورد استقبال قرار گرفته است. ژاپن، با تمرکز بر خودروهای هیبریدی (مانند تویوتا پریوس)، به دلیل زیرساخت شارژ محدود (۴۰ هزار ایستگاه) و شبکهٔ برقی فسیلی، در خودروهای برقی خالص عقب مانده است. این چالش‌ها بر نیاز به زیرساخت‌های قوی، سیاست‌های پایدار و هماهنگی با شبکه برق تأکید دارند [۲۶]. دانمارک طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ با هدف حذف خودروهای بنزینی تا ۲۰۳۰، با چالش‌هایی روبه‌رو شد که پیشرفت در برقی‌سازی را متوقف کرد. از جمله این مشکلات می‌توان به یارانه‌های ناکافی اشاره کرد؛ در این دوره، یارانه‌ها حداکثر ۲۰ درصد تخفیف مالیاتی بود که در مقایسه با نروژ، که معافیت کامل مالیات ارائه می‌کرد، ناکافی بود. همچنین، هزینهٔ اولیه خودروهای برقی مانند رنو زوئی (حدود ۲۵۰ هزار کرون) در مقابل خودروهای بنزینی مشابه (۱۵۰ هزار کرون) تقاضا را کاهش داد. مقاومت اجتماعی نیز به دلیل نگرانی‌هایی دربارهٔ برد محدود (۱۵۰–۲۰۰ کیلومتر) و زمان شارژ طولانی (۶–۸ ساعت) باعث کاهش تمایل مردم به خرید خودروهای برقی شد. از طرفی، کمبود زیرساخت‌ها در این دوره مشهود بود، به طوری که تعداد ایستگاه‌های شارژ عمومی کمتر از ۱،۰۰۰ واحد بود که برای کشوری با ۵/۸ میلیون نفر جمعیت ناکافی بود. در نتیجه، فروش خودروهای برقی در ۲۰۱۳ به کمتر از ۱،۰۰۰ دستگاه رسید، در حالی که هدف اولیه ۱۰ هزار دستگاه بود. از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳، دانمارک با استفاده از تجربیات نروژ و چین، سیاست‌ها و سرمایه‌گذاری‌های جدیدی را برای جبران مشکلات برقی‌سازی حمل‌ونقل به کار گرفت. این اقدامات شامل کاهش مالیات و ارائهٔ مشوق‌های خرید، مانند تخفیف ۱۵ هزار کرونی برای کارمندانی که از کارفرمایان خودروی برقی دریافت می‌کنند و وام‌های بدون بهره تا ۵۰ هزار کرون برای خرید خودروهای برقی بود که باعث کاهش هزینه‌های مالکیت و تحریک تقاضا شد. همچنین، دولت دانمارک بودجهٔ ۹۲/۵ میلیون کرونی (۱۳/۸ میلیون دلار) برای توسعهٔ زیرساخت‌های شارژ در مجتمع‌های مسکونی اختصاص داد. علاوه بر این، تعداد

شارژرهای فوق‌سریع[1] از ۲۴۳ واحد در ۲۰۲۱ به ۷۸۴ واحد در ۲۰۲۲ رسید، و این افزایش تعداد شارژرها، زمان شارژ خودروها را به ۱۵–۲۰ دقیقه کاهش داد. این اصلاحات موجب شد فروش خودروهای برقی در ۲۰۲۳ به بیش از ۳۵ هزار دستگاه برسد و سهم بازار خودروهای برقی در دانمارک به ۲۰ درصد افزایش یابد. با این‌حال، همچنان وابستگی به برق تولیدشده از منابع فسیلی که ۴۰ درصد آن از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود، چالشی باقی مانده است و این کشور هدف‌گذاری کرده است که تا سال ۲۰۳۰ سهم انرژی‌های تجدیدپذیر را به ۷۰ درصد افزایش دهد [۲۷].

۴–۳. هدف‌گذاری جهانی برقی‌سازی ناوگان

شکل ۶، که از گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) استخراج شده، یک نمودار ستونی تجمعی است که رشد پیش‌بینی‌شده فروش جهانی خودروهای برقی را تا سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۳۵ بر اساس سه سناریوی اصلی تحلیل می‌کند. این نمودار، داده‌ها را بر اساس مناطق جغرافیایی (چین، اروپا، ایالات متحده، ژاپن، هند، و سایر نقاط جهان) و کل جهانی تفکیک کرده و تعداد خودروهای برقی را به میلیون واحد در محور عمودی و سناریوها و سال‌ها را در محور افقی نمایش می‌دهد. این تحلیل بر اساس داده‌های به‌روز و مدل‌سازی‌های سناریویی ارائه‌شده توسط IEA صورت گرفته است.

گزارش سازمان IEA سه سناریوی کلیدی را برای پیش‌بینی رشد بازار خودروهای برقی ارائه می‌دهد [۴] که هر یک بر اساس سطح تعهدات سیاستی و اقدامات اجرایی متفاوت است:

۱. سناریوی سیاست‌های اعلام‌شده[2]:

- این سناریو بر اساس سیاست‌ها و اقدامات موجود در حال اجرا توسط دولت‌ها طراحی شده است. پیش‌بینی می‌شود که تعداد خودروهای برقی (به‌جز دو و سه چرخه) از کمتر از ۴۵ میلیون دستگاه در سال ۲۰۲۳ به ۵۲۵ میلیون دستگاه در سال ۲۰۳۵ افزایش یابد. این رشد با نرخ سالانه ۲۳ درصد همراه است، که نشان‌دهندهٔ سهم تقریبی ۲۵ درصد از کل ناوگان وسایل نقلیهٔ جاده‌ای جهانی تا سال ۲۰۳۵ است.

۲. سناریوی تعهدات اعلام‌شده[3]:

- این سناریو فرض می‌کند که تمامی اهداف و تعهدات اعلام‌شده توسط دولت‌ها به طور کامل محقق شوند. در این حالت، تعداد خودروهای برقی تا سال ۲۰۳۵ به ۵۸۵ میلیون دستگاه خواهد رسید، که معادل ۳۰ درصد از ناوگان خودروها است. این سناریو به دلیل خوش‌بینی نسبت به اجرای تعهدات، رشد سریع‌تری را نسبت به سناریوی قبلی پیش‌بینی می‌کند.

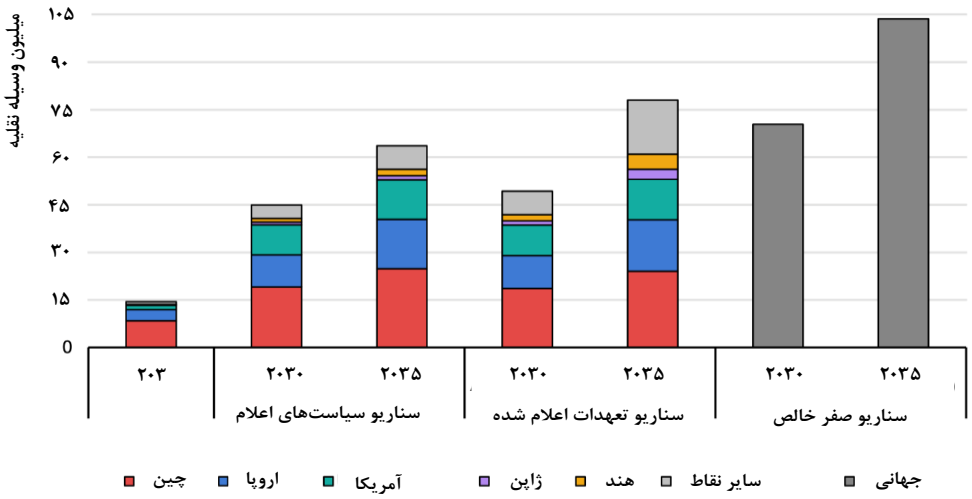
۳. سناریوی صفر خالص تا ۲۰۵۰[4]:

- جاه‌طلبانه‌ترین سناریو که با هدف محدود کردن افزایش دمای جهانی به ۱/۵ درجهٔ سانتی‌گراد هم‌راستا است. در این سناریو، تعداد خودروهای برقی با نرخ سالانه متوسط ۲۷ درصد رشد می‌کند و تا سال ۲۰۳۵ به حدود ۷۹۰ میلیون دستگاه خواهد رسید. این سناریو نشان‌دهندهٔ حداکثر پتانسیل برقی‌سازی در صورت حمایت‌های گستردهٔ سیاستی و نوآوری‌های فنی است.

گزارش IEA نقش مناطق جغرافیایی را در شکل‌دهی بازار جهانی خودروهای برقی برجسته می‌کند. چین، با سرمایه‌گذاری عظیم در تولید باتری (بیش از ۷۰ درصد از ظرفیت جهانی باتری‌های لیتیوم‌یونی در ۲۰۲۳) و سیاست‌های تهاجمی برقی‌سازی، پیشتاز است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۵، ۸۵ درصد از فروش داخلی خودروهای جدید را به خود اختصاص دهد [۲۴]. اروپا، با اجرای استانداردهای سخت‌گیرانه CO_2 (مثلاً حداکثر ۹۵ گرم CO_2 بر کیلومتر تا ۲۰۲۱) و برنامه‌های تشویقی مانند یارانه‌های خرید، انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۵، بیش از ۸۰ درصد از فروش خودروهای جدید خود را به خودروهای برقی اختصاص دهد [۲۸].

1. Ultra-Fast Chargers
2. Stated Policies Scenario - STEPS
3. Announced Pledges Scenario - APS
4. Net Zero Emissions by 2050 Scenario - NZE

در ایالات متحده، مقررات ایالتی مانند Advanced Clean Cars II در کالیفرنیا (هدف ۱۰۰ درصد فروش خودروهای برقی تا ۲۰۳۵) و حمایت‌های فدرال (مانند اعتبار مالیاتی ۷،۵۰۰ دلار) پیش‌بینی می‌کنند که فروش خودروهای سبک الکتریکی۱ تا سال ۲۰۳۵ به ۷۰ درصد از بازار برسد [۲۹].



شکل ٦. فروش خودروهای الکتریکی بر اساس منطقه و سناریو، ۲۰۳۰ و ۲۰۳۵ [۴]

۵. حمل‌ونقل برقی در تهران

شهر تهران، پایتخت ایران، با حدود ۹/۹ میلیون [۳۰] نفر و به عنوان یکی از کلان‌شهرهای پرجمعیت منطقه نیز همانند سایر شهرهای بزرگ و پرجمعیت دنیا با مشکلاتی در زمینهٔ آلودگی هوا و ترافیک مواجه است. طبق گزارش‌های سالانه، آلاینده‌های هوا در تهران به‌ویژه در فصل‌های سرد سال به‌شدت افزایش می‌یابد و این امر به طور مستقیم بر سلامت عمومی و کیفیت زندگی شهروندان تأثیر می‌گذارد. آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی، به‌خصوص در بخش حمل‌ونقل، سهم زیادی در این معضل دارد [۳۱]. برقی‌سازی حمل‌ونقل در تهران به عنوان یکی از راهکارهای اصلی برای مقابله با این چنین مشکلات زیست‌محیطی و ترافیکی مطرح شده است. در سال‌های اخیر، اقداماتی همچون کاهش تعرفهٔ گمرکی خودروهای برقی و سرمایه‌گذاری در ساخت ایستگاه‌های شارژ در مناطق مختلف تهران، گام‌های مهمی در راستای تحقق این هدف بوده است. به‌ویژه، توسعهٔ ناوگان حمل‌ونقل عمومی برقی مانند اتوبوس‌ها و تاکسی‌های برقی و راه‌اندازی ایستگاه‌های شارژ در نقاط مختلف شهر، می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش آلاینده‌ها و بهبود کیفیت هوای پایتخت داشته باشد. با این‌حال، تهران همچنان با چالش‌هایی همچون کمبود ایستگاه‌های شارژ، وابستگی به شبکهٔ برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و محدودیت‌های مالی مواجه است که نیازمند برنامه‌ریزی و همکاری‌های بین‌بخشی است. این بخش از پژوهش به تحلیل اقدامات کنونی در تهران، از جمله توسعهٔ ناوگان حمل‌ونقل عمومی برقی و ساخت ایستگاه‌های شارژ، پرداخته و موانع و فرصت‌های پیش روی این تحول در پایتخت ایران را بررسی می‌کند. همچنین، پیشنهادهایی برای همگامی با اهداف جهانی و تحقق توسعهٔ پایدار در تهران ارائه می‌دهد.

۵–۱. وضعیت کنونی ناوگان حمل‌ونقل

همان‌گونه که در ۰جدول ۲ نشان داده شده، تعداد ناوگان فعال در خطوط اتوبوس تغذیه‌کنندهٔ شهر تهران و حومه در مجموع ۴۹۱۰ دستگاه است. تعداد ناوگان فعال در خطوط تاکسی شهر تهران نیز در مجموع ۷۸۷۸۴ دستگاه شامل تاکسی و ون است.

1. light-duty vehicles - LDVs

جدول ۲. تعداد ناوگان اتوبوس در وضعیت موجود تهران (سالنامهٔ گزیدهٔ آمار حمل‌ونقل شهر تهران ۱۴۰۲ [۳۰])

نوع ناوگان	تعداد ناوگان وضع موجود
اتوبوس تندرو	۱۰۴۵
اتوبوس عادی	۳۷۰۰
مینی‌بوس	۷۰۰
جمع کل	۵۴۴۵

۵-۲. سیاست‌ها و قوانین در ایران

در ایران از سال ۱۳۷۴ قوانین و سیاست‌هایی در راستای کاهش آلودگی هوا و توسعهٔ خودرو برقی تدوین شد. همان‌طور که مشخص است، در بسیاری از اسناد و قوانین به توسعهٔ خودروی برقی برای کاهش آلودگی هوا اشاره شده است. از جمله مهم‌ترین قوانین در حوزهٔ برقی‌سازی وسایل نقلیه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- **قانون حمل‌ونقل عمومی (۱۳۸٦):** برقی کردن خطوط و تخفیف گمرکی خودروهای برقی و هیبریدی.
- **سند محیط زیست:** توسعهٔ حمل‌ونقل سبز و غیرفسیلی در کلان‌شهرها.
- **برنامهٔ ششم توسعه (۱۳۹٦):** جایگزینی ۱۰ درصد موتورسیکلت‌های بنزینی با برقی.
- **قانون هوای پاک (۱۳۹٦):** نوسازی ناوگان عمومی با یارانه و معافیت مالیاتی خودروهای برقی و هیبریدی.
- **برنامهٔ کاهش آلودگی تهران (۱۳۹۸):** نوسازی اتوبوس‌ها و موتورسیکلت‌های برقی.
- **قانون مالیات بر ارزش افزوده (۱۳۹۸):** معافیت مالیاتی خودروهای برقی و هیبریدی.
- **قانون ساماندهی خودرو (۱٤۰۱):** تدوین سند فناوری خودروهای برقی و شرایط واردات با اولویت کم‌مصرف‌ها.
- **برنامهٔ هفتم توسعه (۱٤۰۳):** برقی‌سازی اتوبوس‌ها، تاکسی‌ها و موتورسیکلت‌ها برای رفع ناترازی انرژی.

۵-۳. پیشرفت‌ها و دستاوردها در زمینهٔ برقی‌سازی حمل‌ونقل پایتخت

تهران در سال‌های اخیر، به‌ویژه از اوایل دههٔ ۱۴۰۰، گام‌های مؤثری در راستای برقی‌سازی ناوگان حمل‌ونقل شهری برداشته است که نشان‌دهندهٔ عزم جدی این کلان‌شهر برای کاهش آلودگی هوا، بهبود کیفیت زندگی شهروندان، و حرکت به سوی توسعهٔ پایدار شهری است. این دستاوردها، نتیجهٔ همکاری بین نهادهای دولتی، بخش خصوصی، و برنامه‌ریزی‌های کلان‌شهری، در حوزه‌های مختلف از جمله نوسازی ناوگان اتوبوسرانی، تاکسیرانی، تأمین مالی، توسعهٔ زیرساخت‌های شارژ، و مدیریت هوشمند انرژی قابل بررسی هستند. این اقدامات با اهداف ملی مانند قانون هوای پاک (۱۳۹۶) و برنامهٔ هفتم توسعه (۱۴۰۳–۱۴۰۷) هم‌راستا است و با الگوهای جهانی برقی‌سازی نیز انطباق دارد.

۵-۳-۱. پیشرفت در ناوگان اتوبوس‌رانی

از برجسته‌ترین دستاوردها در بخش حمل‌ونقل عمومی، ورود اتوبوس‌های برقی به ناوگان اتوبوس‌رانی تهران است. تا پایان سال ۱۴۰۳، تعداد محدودی از اتوبوس‌های برقی با نام تجاری «هایگر» (وارداتی از چین) به چرخهٔ حمل‌ونقل عمومی اضافه شده‌اند. این اتوبوس‌ها، مجهز به باتری‌های پیشرفته با ظرفیت ۴۲۳ کیلووات‌ساعت، قادر هستند با پیمایش متوسط ۲۵۰ کیلومتر (در شرایط عملیاتی با ظرفیت کامل مسافر و سیستم تهویهٔ مطبوع روشن) عمل کنند. در اسفند ۱۴۰۳ از تعداد ۱۸۹ دستگاه اتوبوس برقی برای شهر تهران رونمایی شد.

۵-۳-۲. توسعهٔ ناوگان تاکسیرانی

در حوزهٔ تاکسیرانی، شهرداری تهران با هدف اجرای مادهٔ ۲ قانون هوای پاک و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، برنامه‌ای گسترده برای جایگزینی خودروهای فرسوده با تاکسی‌های برقی در پیش گرفته است. تا پایان اسفند ۱۴۰۳، ۱۷۲ دستگاه خودروی فرسوده از ناوگان تاکسیرانی اسقاط شده و با تاکسی‌های برقی جدید جایگزین شده‌اند. این تاکسی‌ها، مدل JAC-E۵۰ A،

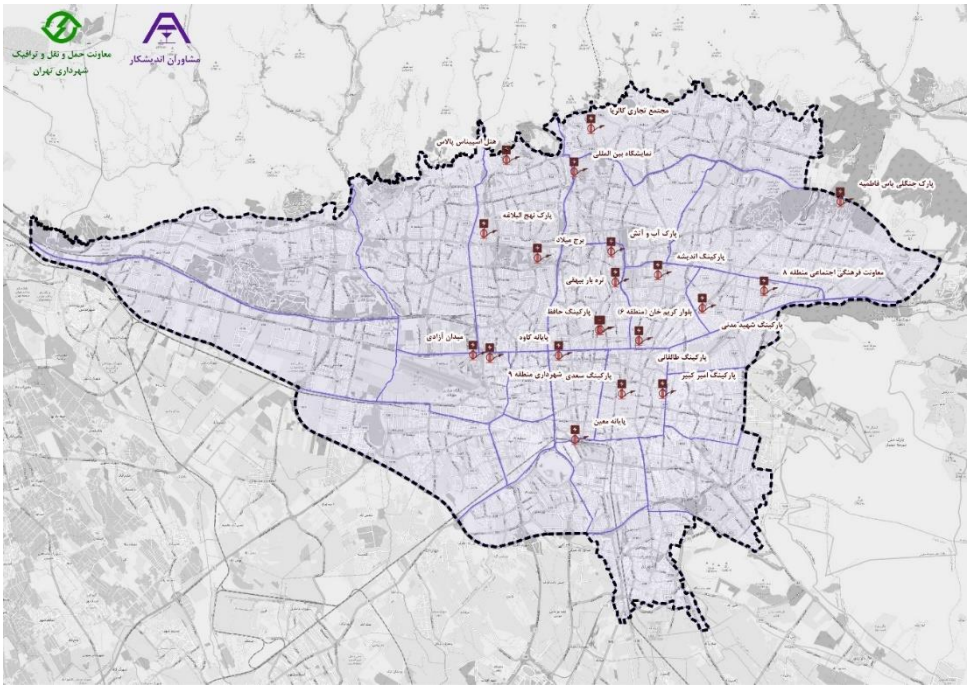
مجهز به باتری ۵۰ کیلووات‌ساعت هستند که پیمایشی معادل ۴۰۲ کیلومتر را در شرایط مطلوب فراهم می‌کند؛ شاخصی که آن‌ها را برای ترددهای درون‌شهری طولانی مناسب می‌سازد. همچنین، مدل دوم تاکسی برقی که در اسفند ۱۴۰۳ رونمایی و معرفی شد جی‌ای‌سی (GAC) آیون S پلاس است که باتری ۵۸/۸ کیلووات ساعتی دارد و تا ۵۱۰ کیلومتر پیمایش می‌کند. این خودروها، با کارایی زیاد و هزینهٔ عملیاتی پایین به عنوان گزینه‌ای اقتصادی و زیست‌محیطی معرفی شده‌اند. علاوه بر این، تفاهم‌نامه‌های متعددی بین شهرداری تهران و وزارت صنعت، معدن و تجارت و شرکت‌های خصوصی تولیدکننده و واردکنندهٔ خودرو منعقد شده که تأمین ۵۵ هزار دستگاه تاکسی برقی را هدف قرار داده است. این برنامه شامل تولید داخلی بخشی از ناوگان (با همکاری شرکت‌های داخلی) و واردات بخش دیگر است. تا کنون، تعدادی از این خودروها وارد کشور شده و در حال طی مراحل اخذ پلاک تاکسی هستند. در اسفند ۱۴۰۳ از تعداد ۱۷۵۲ دستگاه تاکسی برقی در شهر تهران رونمایی شد.

۵-۳-۳. حمایت‌های مالی و تسهیلات

برای پشتیبانی از این تحول، تفاهم‌نامه‌ای با بانک‌ها به امضا رسیده است که تسهیلات قرض‌الحسنه برای نوسازی ناوگان عمومی، از جمله تاکسی‌ها و اتوبوس‌ها، ارائه می‌دهد. این تسهیلات، با نرخ بهره صفر درصد و بازپرداخت طولانی‌مدت به رانندگان و مالکان ناوگان اجازه می‌دهد هزینه‌های اولیه خرید خودروهای برقی را تأمین کنند. این حمایت مالی، مشابه یارانه‌های موفق در نروژ (معافیت مالیاتی) و آلمان (۹ هزار یورو یارانه)، نقش مهمی در تسریع پذیرش فناوری‌های پاک در میان کاربران محلی ایفا می‌کند.

۵-۳-۴. توسعهٔ زیرساخت‌های شارژ و مدیریت انرژی (وضع موجود)

یکی از ارکان کلیدی برقی‌سازی، توسعهٔ زیرساخت‌های شارژ است که تهران در این زمینه نیز پیشرفت‌هایی داشته است. تا پایان سال ۱۴۰۳، ۲۱ ایستگاه شارژ با مجموع ۸۷ شارژر در مناطق مختلف شهر، از جمله برج میلاد، میدان آزادی، و پارکینگ حافظ، راه‌اندازی شده‌اند. این ایستگاه‌ها از شارژرهای با توان‌های مختلف در بازهٔ ۷/۴ –۱۲۰ کیلووات پشتیبانی می‌کنند که امکان شارژ آهسته و سریع خودروهای برقی را بر اساس نیاز فراهم می‌کند. موقعیت این ایستگاه‌های شارژ در ۰شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. ایستگاه‌های شارژ وضع موجود در تهران

برنامه‌های آینده، مانند افزایش تعداد ایستگاه‌های عمومی و اختصاصی برای تاکسی و اتوبوس‌ها نشان‌دهندهٔ عزم جدی برای گسترش زیرساخت‌ها است. از جمله مهم‌ترین این اقدامات شروع ساخت ایستگاه‌های شارژ اختصاصی اتوبوس برقی در توقفگاه‌های اتوبوس سازمان اتوبوس‌رانی به منظور سهولت استفاده و افزایش بهره‌وری و استفادهٔ بهینه از انرژی برق موجود در شب است. اولین ایستگاه شارژ اختصاصی اتوبوس‌های برقی شهر تهران در توقفگاه اتوبوس برقی بعثت با ۶ خط، ۲۰ شارژر ۲۴۰ کیلووات و ۴۰ نازل ۱۲۰ کیلووات که قابلیت شارژ هم‌زمان ۴۰ اتوبوس را دارد در اسفند ۱۴۰۳ راه‌اندازی شد.

همان‌طور که بیان شد، یکی از راهکارهای مدیریت تأمین انرژی برق و جلوگیری از فشار بر شبکهٔ برق شهری، استفاده از شارژ شبانه در توقفگاه‌های مخصوص، مانند توقفگاه بعثت است. در این روش از برق مازاد تولیدشده در شب استفاده می‌شود و باری بر شبکه اضافه نمی‌کند. این روش که با الگوبرداری از سیستم‌های مدیریت هوشمند در شهرهایی مانند پکن (با شارژ شبانه ۷۰ درصد ناوگان عمومی) طراحی شده، مصرف برق را در ساعت‌های کم‌باری شبکه متعادل می‌کند و از اضافه‌بار در ساعت‌های اوج مصرف (مانند ظهر تابستان) جلوگیری می‌کند. این رویکرد، ضمن افزایش پایداری شبکه، هزینه‌های شارژ را برای اپراتورها کاهش می‌دهد، زیرا تعرفهٔ برق شبانه که در ساعت‌های غیراوج قرار دارد پایین‌تر است. در راستای تأمین برق ایستگاه‌های شارژ تاکسی‌ها، شهرداری تهران به سمت استفاده از روش‌های نوین و پایدار حرکت کرده است. ایستگاه‌های شارژ درحال‌توسعه با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی و نیروگاه‌های کوچک‌مقیاس خودتأمین طراحی می‌شوند. این روش، مشابه پروژه‌های موفق در نروژ (با شبکهٔ ۹۸ درصد تجدیدپذیر)، نه‌تنها وابستگی به شبکهٔ فسیلی را کاهش می‌دهد، بلکه انتشار CO_2 مرتبط با شارژ را به حداقل می‌رساند (از ۱۵۰ گرم بر کیلومتر در شبکهٔ فسیلی به زیر ۲۰ گرم). نیروگاه‌های کوچک‌مقیاس نیز با تولید برق محلی، پایداری تأمین را در مناطق پرتراکم تضمین می‌کنند و از قطعی‌های احتمالی جلوگیری می‌کنند.

در شکل ۸، مشخصات فنی شارژرهای به‌کاررفته در ایستگاه شارژ توقفگاه بعثت، اتوبوس‌های برقی وارداتی و اولین تاکسی برقی واردشده به شهر تهران ارائه شده است.

شکل ۸. مشخصات فنی یکی از شارژرها، اتوبوس‌ها و تاکسی‌های برقی وارداتی در ایران

۵-۳-۵. تدوین سند طرح جامع برقی‌سازی وسایل نقلیه

یکی از اقدامات راهبردی مدیریت شهری تهران، تدوین «طرح جامع برقی‌سازی وسایل نقلیه در شهر تهران» است؛ سندی که با هدف بررسی همه‌جانبهٔ ابعاد فنی، نهادی، زیربنایی و اقتصادی گذار به حمل‌ونقل برقی، توسط تیمی تخصصی در شرکت

مشاوران اندیشکار در حال تهیه است. این طرح با رویکردی جامع، به برقی‌سازی انواع شیوه‌های حمل‌ونقل شهری از جمله ناوگان عمومی (مانند اتوبوس‌ها)، نیمه‌خصوصی (نظیر تاکسی‌ها) و وسایل نقلیهٔ شخصی و موتورسیکلت‌ها می‌پردازد. در این سند، با بهره‌گیری از تجربیات بین‌المللی، تلاش شده تا الگوهای موفق جهانی در زمینهٔ توسعهٔ ناوگان برقی، بومی‌سازی شود. یکی از محورهای مهم طرح، جانمایی و طراحی زیرساخت‌های لازم برای شارژ وسایل نقلیهٔ برقی از جمله ایستگاه‌های شارژ ویژهٔ اتوبوس‌ها، تاکسی‌ها و خودروهای شخصی است. همچنین، روش‌های تأمین برق مورد نیاز و چگونگی ارتقای ظرفیت شبکهٔ توزیع انرژی شهری نیز مورد بررسی قرار گرفته است. این طرح در تلاش است تا با شناسایی الزامات فنی و نهادی و ایجاد هماهنگی میان نهادهای مسئول، مسیر تحقق برقی‌سازی را هموار کند و گامی مؤثر به منظور کاهش آلودگی هوا، بهبود کیفیت زندگی شهروندان و توسعهٔ حمل‌ونقل پایدار در کلان‌شهر تهران بردارد.

۵-۴. چشم‌انداز و پتانسیل توسعه

تهران با افتتاح ایستگاه‌های شارژ پیشرفته و ورود اتوبوس‌ها و تاکسی‌های برقی به ناوگان حمل‌ونقل عمومی، در مسیر تبدیل شدن به یک کلان‌شهر پیشرو در حوزهٔ حمل‌ونقل پایدار قرار گرفته است. ایستگاه‌هایی نظیر بعثت (تکمیل شده)، تقی‌آباد، و پایانهٔ جدید شرق (در حال ساخت)، با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و منابع انرژی متنوع مانند انرژی خورشیدی، شبکهٔ برق، و سیستم‌های ترکیبی، زیرساخت‌های قدرتمندی برای شارژ ناوگان برقی فراهم می‌کنند. این ایستگاه‌ها توانایی پشتیبانی هم‌زمان از تعداد قابل توجهی اتوبوس و تاکسی را دارند و با مدیریت هوشمند شارژ در ساعت‌های کم‌باری، به بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش فشار بر شبکهٔ برق کمک می‌کنند. چشم‌انداز بلندمدت تهران، افزایش چشمگیر ناوگان برقی است؛ به طوری که تعداد اتوبوس‌های برقی از تعداد فعلی به چند هزار دستگاه در سال‌های آتی برسد و تعداد تاکسی‌های برقی نیز با ورود ده‌ها هزار دستگاه، چهرهٔ حمل‌ونقل عمومی شهر را دگرگون کند. این توسعه، با حمایت‌های مالی نظیر وام‌های بدون بهره برای رانندگان و ارائهٔ خودروها با قیمت‌های یارانه‌ای، همراه با همکاری نهادهای علمی مانند دانشگاه صنعتی شریف، به تسریع پذیرش فناوری‌های پاک کمک خواهد کرد. علاوه بر این، گسترش ایستگاه‌های شارژ کوچک‌مقیاس در مناطق مختلف شهر و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، پایداری انرژی را تضمین می‌کند و وابستگی به سوخت‌های فسیلی را به حداقل می‌رساند. در نهایت، این تحولات، با هوشمندسازی سیستم حمل‌ونقل و کاهش آلودگی هوا، آینده‌ای سبز و پایدار برای پایتخت رقم خواهد زد و کیفیت زندگی شهروندان را بهبود خواهد بخشید.

۵-۴-۱. برنامه‌های توسعهٔ حمل‌ونقل برقی در تهران

جدول ۳ و جدول ۴ اطلاعات ارائه‌شده توسط طرح جامع حمل‌ونقل و ترافیک شامل تعداد ناوگان اتوبوس و تاکسی فعال در شهر تهران در سال ۱۴۰۳ و تعداد ناوگان نیازمند نوسازی تا افق ۱۴۰۸ را نشان می‌دهند.

جدول ۳. توسعه و نوسازی ناوگان اتوبوس تا افق ۱۴۰۸ (منابع: طرح جامع حمل‌ونقل و ترافیک)

نوع ناوگان	تعداد ناوگان فعال موجود	تعداد ناوگان مورد نیاز برای تأمین		تعداد ناوگان مورد نیاز در افق ۱۴۰۸	تعداد ناوگان مورد نیاز با احتساب ۱۵ درصد پشتیبان در افق ۱۴۰۸
		تعداد ناوگان نیازمند نوسازی	تعداد ناوگان جدید مورد نیاز		
اتوبوس تندرو	۱۰۴۵	۱۰۴۵	۱۰۵	۱۱۵۰	۱۳۲۳
اتوبوس عادی	۳۷۰۰	۳۷۰۰	۰	۳۷۰۰	۴۲۵۵
مینی‌بوس	۷۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۱۲۰۰	۱۳۸۰
جمع کل	۵۴۴۵	۵۲۴۵	۶۰۵	۶۰۵۰	۶۹۵۸

جدول ٤. توسعه و نوسازی ناوگان تاکسی تا افق ۱۴۰۸ (مرجع: طرح جامع حمل‌ونقل و ترافیک)

نوع ناوگان	تعداد ناوگان فعال	تعداد ناوگان نیازمند نوسازی	تعداد ناوگان جدید مورد نیاز	تعداد ناوگان مورد نیاز در افق ۱٤۰۸
خطی تاکسی	۲۳۴۰۰	۱۲۰۰۰	۳۶۰۰	۲۷۰۰۰
ون	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۱۸۰۰	۴۸۰۰
اینترنتی (گردشی موجود)*	۱۶۱۰۰	۶۶۰۰	۴۰۰۰۰	۵۶۱۰۰
ویژه	۲۰۵۰۰	۰	۱۳۰۰۰	۳۳۵۰۰
جمع کل	۶۳۰۰۰	۲۱۶۰۰	۵۸۴۰۰	۱۲۱۴۰۰

* در سال افق کلیهٔ تاکسی‌های گردشی به صورت اینترنتی فعالیت خواهند کرد.

مطابق با اطلاعات اخذشده از شرکت واحد اتوبوس‌رانی تهران و حومهٔ شهرداری تهران، هدف‌گذاری شهرداری تهران در خصوص اتوبوس‌های برقی واردات 2500 دستگاه است.

همچنین، مطابق با اطلاعات اخذشده از سازمان مدیریت و نظارت بر تاکسیرانی شهر تهران، هدف‌گذاری شهرداری تهران و وزارت صمت در خصوص ورود خودروهای برقی در ۰جدول ۵ نشان داده است. همان‌طور که مشخص است، شهرداری تهران باید ۳۷،۵۰۰ خودرو برقی (شامل ۲۷۵۰۰ دستگاه خودروی سدان و ۱۰ هزار دستگاه خودروی ون) وارد کرده و وزارت صمت نیز باید ۲۷،۵۰۰ خودرو برقی توسط خودروسازان داخلی وارد کند. بنابراین، انتظار می‌رود تا پایان سال هدف‌گذاری ۵۵ هزار دستگاه خودروی برقی در خطوط تاکسی شهر تهران فعالیت داشته باشند.

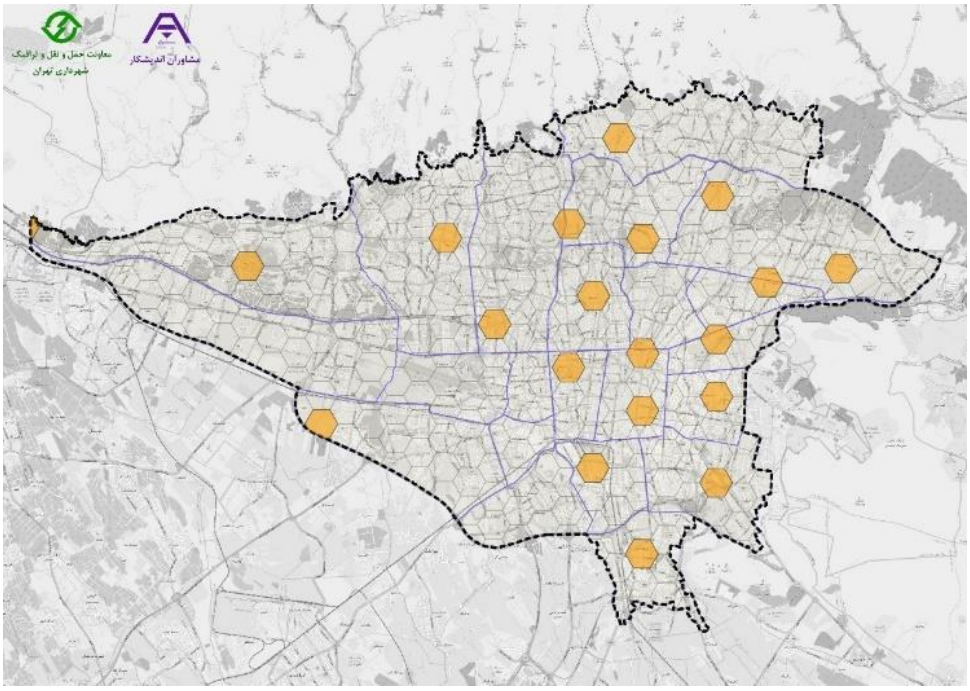
جدول ۵. هدف‌گذاری واردات تاکسی‌های برقی

سازمان	تعداد خودرو	تعداد خودرو ون
شهرداری تهران	۲۷،۵۰۰	۱۰،۰۰۰
وزارت صمت	۲۷،۵۰۰	–

۵-۴-۲. برنامه‌های توسعه و احداث ایستگاه‌های شارژ در شهر تهران

نقشهٔ پیشنهادی شهر تهران برای احداث ایستگاه‌های شارژ تاکسی و اتوبوس برقی با تمرکز بر مناطق کلیدی و پرتردد طراحی شده است تا پاسخ‌گوی نیازهای ناوگان حمل‌ونقل عمومی باشد. هدف اصلی، ارائهٔ نقاط پیشنهادی اولیه برای نصب ایستگاه‌های شارژ اختصاصی برای تاکسی و اتوبوس‌های برقی است تا نیاز این دسته از وسایل نقلیهٔ برقی که از اهمیت بالایی در شهر برخوردارند را رفع کند. نقاط پیشنهادی اولیه برای نصب ایستگاه‌های شارژ تاکسی برقی با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از معیارهای کلیدی انتخاب شده‌اند. این نقاط در مناطقی قرار دارند که از نظر تراکم خطوط تاکسی و تعداد تاکسی‌های فعال، جزء پرترددترین مناطق شهر محسوب می‌شوند و تقاضای بالایی برای شارژ سریع را ایجاد می‌کنند. همچنین، پراکندگی جغرافیایی این نقاط به گونه‌ای طراحی شده که پوشش یکنواخت و متعادلی را در سطح شهر فراهم کند، به طوری که رانندگان در مناطق مختلف به ایستگاه‌های شارژ دسترسی داشته باشند. نزدیکی این مناطق به مراکز اصلی تجمع و تردد تاکسی‌ها، دسترسی سریع و آسان رانندگان را تسهیل می‌کند و زمان انتظار برای شارژ را کاهش می‌دهد. همچنان معیارهای بیشتری نظیر دسترسی به شبکهٔ برق، وجود زمین و امکان احداث ایستگاه شارژ در این نقاط باید مورد بررسی قرار گیرد تا انتخاب نهایی نقاط مناسبی باشند و این محدوده‌ها فقط پیشنهاد اولیه هستند. با توجه به این شرایط، نقاط پیشنهادی اولیه برای نصب ایستگاه‌های شارژ سریع (DC) با توان بالا (۶۰ تا ۱۲۰ کیلووات) انتخاب شده‌اند. این ایستگاه‌ها می‌توانند باتری تاکسی‌ها را در بازهٔ زمانی از ۳۰ تا ۴۵ دقیقه تا ۸۰ درصد شارژ کنند که برای تداوم فعالیت تاکسی‌ها با پیمایش روزانه ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بسیار حیاتی است. همچنین، نصب ایستگاه‌های شارژ کند (AC) در مناطق مسکونی و پارکینگ‌های عمومی نیز پیش‌بینی شده است تا رانندگان بتوانند در ساعت‌های غیرکاری، به‌ویژه طی شب، خودروهای خود را شارژ کنند. این رویکرد ترکیبی، با هماهنگی زیرساخت‌های شارژ با

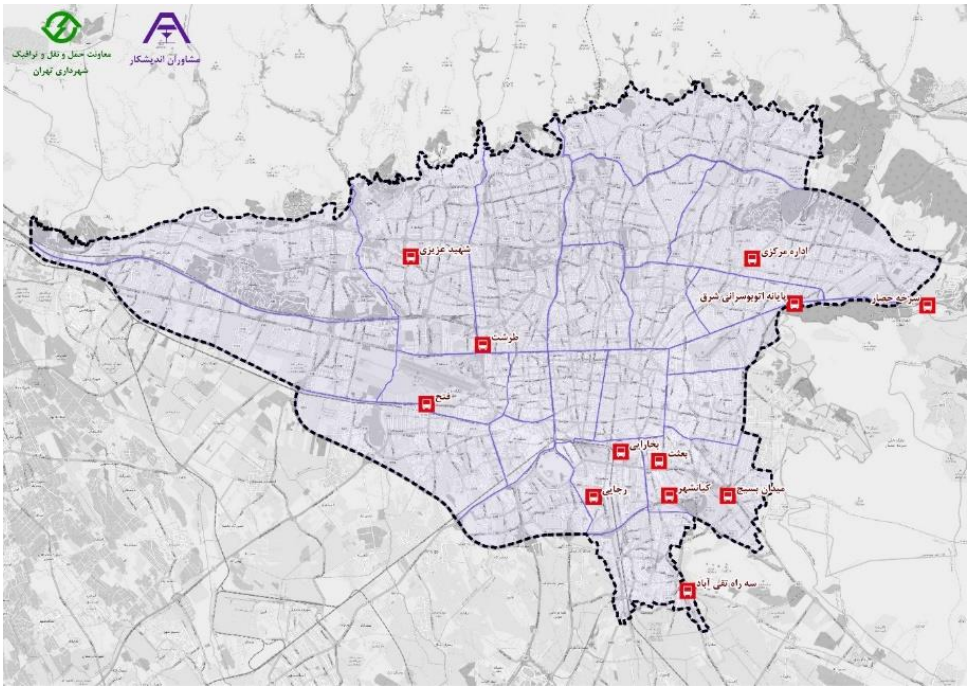
نیازهای عملیاتی ناوگان تاکسیرانی، به توسعهٔ پایدار حمل‌ونقل عمومی در تهران کمک می‌کند. ۰شکل ۹ موقعیت کلی نقاط اولیهٔ پیشنهادی برای نصب ایستگاه‌های شارژ تاکسی برقی را نشان می‌دهد.



شکل ۹. نواحی اولیه پیشنهادی برای نصب ایستگاه شارژ تاکسی برقی

احداث ایستگاه‌های شارژ برای اتوبوس‌های برقی در شهر تهران، به عنوان بخشی از برنامهٔ برقی‌سازی ناوگان حمل‌ونقل عمومی، نیازمند طراحی دقیق و انتخاب نقاط استراتژیک است. این برنامه‌ریزی با هدف افزایش کارایی عملیاتی اتوبوس‌های برقی، کاهش زمان توقف، و پشتیبانی از عملیات روزانهٔ ناوگان اتوبوس‌رانی انجام شده است. ایستگاه‌های شارژ برای اتوبوس‌های برقی با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از معیارهای کلیدی، عمدتاً در توقفگاه‌های اتوبوس‌رانی پیش‌بینی شده‌اند. این توقفگاه‌ها که در انتهای خطوط یا مناطق عملیاتی شرکت واحد اتوبوس‌رانی قرار دارند، به دلیل دسترسی به فضای کافی و امکان استفادهٔ بهینه از زیرساخت‌های موجود، انتخاب شده‌اند. قرارگیری ایستگاه‌های شارژ در این مکان‌ها، مدیریت متمرکز ناوگان را تسهیل می‌کند و هماهنگی بین برنامهٔ حرکت اتوبوس‌ها و زمان‌بندی شارژ را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، توقفگاه‌ها به دلیل موقعیت جغرافیایی مناسب و نزدیکی به مسیرهای پرتردد، امکان شارژ سریع در زمان‌های استراحت کوتاه اتوبوس‌ها را فراهم می‌کنند. از سوی دیگر، این نقاط از نظر زیرساختی به شبکهٔ برق پایدار متصل هستند و قابلیت توسعهٔ آتی ایستگاه‌ها را دارند. همچنین، طراحی این ایستگاه‌ها با در نظر گرفتن استفاده از شارژ شبانه همان‌طور که پیش از این بررسی شد سبب کاهش فشار به شبکهٔ برق، کاهش هزینهٔ انرژی و افزایش بهره‌وری انرژی می‌شود.

با توجه به این شرایط، ایستگاه‌های شارژ در توقفگاه‌های اتوبوس‌رانی همگی مجهز به شارژرهای سریع (DC) با توان بالا می‌شوند. این شارژرها می‌توانند باتری اتوبوس‌ها را طی ۳ تا ۳/۵ ساعت تا ۸۰ درصد شارژ کنند که برای حفظ برنامهٔ حرکت و جلوگیری از تأخیر در خطوط پرمسافر بسیار حیاتی است. موقعیت توقفگاه‌های پیشنهادی اتوبوس برای نصب ایستگاه شارژ اتوبوس برقی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. توقفگاه‌های اتوبوس‌رانی پیشنهادی برای نصب ایستگاه شارژ

۵-۴-۳. تحلیل SWOT وضعیت برقی‌سازی حمل‌ونقل در تهران

برای ارزیابی جامع وضعیت کنونی برقی‌سازی حمل‌ونقل در تهران، تحلیل SWOT (قوت‌ها، ضعف‌ها، فرصت‌ها، و تهدیدها) انجام شده است. این تحلیل، عوامل داخلی (قوت‌ها و ضعف‌ها) و خارجی (فرصت‌ها و تهدیدها) مؤثر بر توسعهٔ حمل‌ونقل برقی در تهران را شناسایی کرده و چارچوبی برای تدوین استراتژی‌های آینده فراهم می‌کند. نتایج این تحلیل در شکل ۱۱ ارائه شده است و به عنوان پایه‌ای برای پیشنهادهای عملی در بخش نتیجه‌گیری استفاده خواهد شد.

شکل ۱۱. تحلیل SWOT برقی‌سازی حمل‌ونقل در تهران

تحلیل SWOT برقی‌سازی حمل‌ونقل تهران نشان می‌دهد تهران در آستانهٔ تحولی سبز قرار دارد، اما موفقیت آن به رفع شکاف‌های زیرساختی و سیاستی بستگی دارد. وجود حمایت‌های ملی و مشارکت بخش خصوصی، پتانسیل قوی برای مقیاس‌بندی ناوگان برقی ایجاد کرده، اما محدودیت‌های زیرساختی و وابستگی به شبکهٔ برق فسیلی، مشابه چالش‌های هند، کارایی زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد. پتانسیل انرژی خورشیدی و امکان همکاری منطقه‌ای با کشورهایی مانند ترکیه و چین برای انتقال فناوری، فرصت‌هایی کلیدی برای شتاب‌دهی به این تحول هستند. با این‌حال، ناهماهنگی سیاستی، مانند تجربهٔ اسپانیا، می‌تواند پیشرفت را متوقف کند. برای تبدیل تهران به الگویی منطقه‌ای، باید: ۱) شبکهٔ شارژ خورشیدی گسترش یابد، ۲) یارانه‌های هدفمند برای کاهش هزینه‌های ناوگان اعمال شود، و ۳) برنامهٔ آموزشی برای نیروی انسانی و هماهنگی بین‌نهادی تقویت شود. این استراتژی‌ها، با بهره‌گیری از پتانسیل‌های موجود، تهران را به سمت حمل‌ونقل پایدار هدایت خواهند کرد.

۶. بحث و تحلیل داده‌ها

برقی‌سازی حمل‌ونقل تهران، به عنوان راهکاری برای کاهش آلودگی هوا و تحقق توسعهٔ پایدار، در مراحل ابتدایی اما امیدوارکننده‌ای قرار دارد. تا پایان ۱۴۰۳، تهران ۱۸۹ اتوبوس و ۱۷۵۲ تاکسی برقی به ناوگان خود افزوده و ۸۷ شارژر در ۲۱ ایستگاه نصب کرده است. این پیشرفت‌ها، هرچند نسبت به کل ناوگان (۴۹۱۰ اتوبوس، ۷۸۷۸۴ تاکسی) محدود است، با حمایت‌های سیاستی (قانون هوای پاک) و قراردادهای بخش خصوصی نشان‌دهندهٔ عزم جدی برای تحول سبز است. در مقایسه، چین با ۸/۴ میلیون خودروی برقی و ۸/۶ میلیون شارژر از سرمایه‌گذاری ۱۵ میلیارد دلاری و سیاست‌های سخت‌گیرانه (ممنوعیت فسیلی در پکن) بهره برده، و نروژ با شبکهٔ برق ۹۸ درصد تجدیدپذیر و ۲۰ هزار شارژر، ۹۰ هزار فروش خودروهای جدید را برقی کرده است. تهران اما با چالش‌هایی مانند کمبود زیرساخت، شبکهٔ برق فسیلی، و هزینه‌های بالای ناوگان مواجه است. تحلیل SWOT نشان می‌دهد قوت‌های تهران، مانند حمایت سیاستی و همکاری خصوصی، با فرصت‌هایی نظیر پتانسیل انرژی خورشیدی و همکاری منطقه‌ای برای انتقال فناوری تقویت می‌شود، اما تهدیدهای ناهماهنگی سیاستی (مشابه اسپانیا) و محدودیت بودجه مانع پیشرفت‌اند. نتایج در چارچوب سه‌گانهٔ توسعهٔ پایدار نشان می‌دهند برقی‌سازی می‌تواند انتشار CO_2 را ۲۰ درصد کاهش دهد (با ۵۰ درصد برق تجدیدپذیر)، هزینه‌های عملیاتی را از ۱۰ به ۱/۵ سنت بر کیلومتر برساند، و پذیرش اجتماعی را ۳۰ درصد افزایش دهد، مشابه اسلو. درس‌آموخته‌ها از چین (زیرساخت عظیم)، نروژ (یارانه و برق پاک)، و شکست اسپانیا (ناهماهنگی سیاستی) تأکید دارند که تهران باید زیرساخت، حمایت مالی، و هماهنگی نهادی را اولویت‌بندی کند. این تحلیل، با تکیه بر تجربیات جهانی و شرایط محلی، چارچوبی برای سیاست‌گذاری مؤثر در تهران فراهم می‌کند.

۶–۱. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای عملی

برقی‌سازی حمل‌ونقل تهران، با پتانسیل کاهش آلودگی و هزینه‌ها، در گرو غلبه بر موانع زیرساختی، مالی، و سیاستی است. مقایسهٔ با چین و نروژ نشان می‌دهد موفقیت به زیرساخت قوی، حمایت مالی پایدار، و هماهنگی سیاستی وابسته است، در حالی که شکست‌های اسپانیا و هند (ناهماهنگی و کمبود سرمایه‌گذاری) درس‌هایی کلیدی ارائه می‌دهند. برای تبدیل تهران به پیشرو منطقه‌ای در حمل‌ونقل پایدار، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

۱. شبکهٔ شارژ خورشیدی هوشمند: توسعهٔ ایستگاه‌های شارژ سریع تا ۱۴۰۸ با اولویت مناطق پرترافیک (مانند بازار و آزادی) و استفاده از پنل‌های خورشیدی برای ۳۰ درصد انرژی مورد نیاز، با الگوبرداری از دانمارک و بهره‌گیری از پتانسیل خورشیدی تهران. این شبکه با سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری و شارژ شبانه، پایداری را تضمین می‌کند.

۲. مشوق‌های مالی هدفمند: تخصیص یارانه ۵۰ درصد برای خرید اتوبوس‌های برقی و معافیت مالیاتی ۱۰ساله برای تاکسی‌های برقی، مشابه نروژ. ایجاد صندوق سرمایه‌گذاری مشترک دولت و بخش خصوصی برای تولید باتری در ایران، با هدف کاهش ۳۰ درصد هزینه‌ها تا ۱۴۰۷.

۳. تقویت پذیرش اجتماعی از طریق آموزش: اجرای کمپین‌های دیجیتال و میدانی با شعار «تهران پاک» برای آموزش مزایای برقی‌سازی (کاهش ۸۰ درصد هزینهٔ سوخت)، مشابه اسلو. ارائهٔ مشوق‌های محلی مانند پارکینگ رایگان و

دسترسی به خطوط BRT برای رانندگان برقی.

۴. نوسازی ناوگان با فناوری بومی: جایگزینی ۵۰ درصد اتوبوس‌های فرسوده با مدل‌های برقی تا ۱۴۰۸، با توسعهٔ باتری‌های ۴۰۰ کیلومتری در همکاری با استارتاپ‌های داخلی. ایجاد مراکز آموزش فنی در تهران برای ۵۰۰ تکنسین تخصصی تا ۱۴۰۶.

۵. چارچوب سیاستی یکپارچه: تدوین «طرح جامع برقی‌سازی ۱۴۰۸» با هدف ۲۵ درصد ناوگان برقی، شامل استانداردهای آلایندگی یورو ۶ و تشکیل شورای هماهنگی با حضور شهرداری، وزارت صمت، و شرکت‌های خصوصی برای اجرای یکپارچه، با درس از شکست اسپانیا.

۶. انتقال به انرژی پاک: افزایش سهم انرژی خورشیدی و بادی در شبکهٔ برق تهران تا ۱۴۰۸، و استفاده از قابلیت شارژ شبانهٔ خودروها برای مدیریت بار، مشابه چین.

این استراتژی‌ها، با تکیه بر قوت‌های تهران (حمایت سیاستی، بخش خصوصی) و فرصت‌های جهانی (انرژی خورشیدی، همکاری منطقه‌ای)، موانع زیرساختی و سیاستی را رفع کرده و تهران را به الگویی پایدار در خاورمیانه تبدیل می‌کنند. تعهد بلندمدت دولت، بخش خصوصی، و جامعه برای اجرای این پیشنهادها، کلید کاهش آلودگی، بهینه‌سازی هزینه‌ها، و ارتقای کیفیت زندگی در پایتخت است.

منابع

1. Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press; 2023.
2. Creutzig F, Jochem P, Edelenbosch OY, Mattauch L, Vuuren DPv, McCollum D, et al. Transport: A roadblock to climate change mitigation? Science. 2015;350(6263):911-2.
3. Climate W. Greenhouse gas emissions by sector. Our World in Data; 2024.
4. International Energy A. Global EV Outlook 2024. Paris, France: IEA; 2024.
5. World Health O. Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease. Geneva, Switzerland: WHO; 2016.
6. Energy USDo. Internal Combustion Engine Efficiency and Energy Loss. 2024.
7. United Nations DoE, Social A. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. New York, NY, USA: United Nations; 2018.
8. International Energy A. Transport - Energy System. Paris, France: IEA; 2023.
9. Ritchie H, Rosado P, Roser M. Breakdown of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions by sector. Our World in Data. 2020.
10. European Environment A. Air Quality in Europe 2023. Copenhagen, Denmark: EEA; 2023.
11. Intergovernmental Panel on Climate C. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC; 2022.
12. China Electricity C. Annual Report on China's Power Industry Development 2023. Beijing, China: CEC; 2023.
13. Norwegian Water R, Energy D. Measurements of Norwegian Glaciers in 2023. Oslo, Norway: NVE; 2023.
14. Hawkins TR, Singh B, Majeau-Bettez G, Strømman AH. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. Journal of Industrial Ecology. 2013;17(1):53-64.
15. Barry K. Will an Electric Car Save You Money? Consumer Reports. 2023.
16. United Nations Framework Convention on Climate C. The Paris Agreement. Paris, France: UNFCCC; 2015.
17. Agency USEP. Summary of the Clean Air Act Washington, DC, USA: EPA; 2024 [Available from: https://www.epa.gov.
18. Internal Revenue S. Inflation Reduction Act of 2022 Washington, DC, USA: IRS; 2024 [Available from: https://www.irs.gov/inflation-reduction-act-of-2022.
19. European C. Delivering the European Green Deal Brussels, Belgium: European Commission; 2021 [Available from: https://commission.europa.eu.
20. Norwegian Electric Vehicle A. Norwegian EV Market: Electric Vehicle Sales Statistics 2023. Oslo, Norway: Norsk Elbilforening; 2023.
21. BloombergNef. Electric Vehicle Battery Price Survey 2023. BloombergNEF; 2023.
22. European C. 2023 Strategic Foresight Report: sustainability and wellbeing at the heart of Europe's Open Strategic Autonomy. Brussels, Belgium: European Commission; 2023 2023/07/04.
23. Roland B. Electric vehicle charging index 2024. Roland Berger GmbH; 2024.
24. Ministry of I, Information T. Revision of the Dual-Credit Policy for New Energy Vehicles (NEVs) 2023. Beijing, China: MIIT; 2023.
25. Bastida-Molina P, Ribó-Pérez D, Gómez-Navarro T, Hurtado-Pérez E. What is the problem? The obstacles to the electrification of urban mobility in Mediterranean cities. Case study of Valencia, Spain. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022;166:112649.
26. Tarei PK, Chand P, Gupta H. Barriers to the adoption of electric vehicles: Evidence from India. Journal of Cleaner Production. 2021;291:125847.
27. Noel L, Sovacool BK. Why Did Better Place Fail?: Range anxiety, interpretive flexibility, and electric vehicle promotion in Denmark and Israel. Energy Policy. 2016;94:377-86.
28. European Environment A. Transport and environment report 2023: Towards sustainable mobility in Europe. Copenhagen, Denmark: EEA; 2023.
29. Agency USEP. [Electric vehicle charging]. 2023.

30. Co MMPMG. Selected statistics of transportation and traffic in Tehran 2023. Tehran: Tehran Transportation and Traffic Organization; 2024.
31. Riahinia S, Moeini-Aghtaie M, Fotuhi-Firuzabad M, Maddagh H. Impact of electric transportation on air pollution indicators in Tehran metropolis. 14th International Conference on Transportation and Traffic Engineering; Tehran 2015.