Urban Development Policy Making

Home Page: https://judpm.ir

Online ISSN:

Assessing the role of electricity infrastructure and regulatory frameworks in the development of electric public transportation: Comparative analysis and policy recommendations

Moein Moeini-Aghtaie[1*] | Hassan Bazoubandi[2] | Ali Pasban[3]

1. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Energy Systems Engineering, School of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: moeini@sharif.edu
2. Ph.D. Candidate, Department of Energy Systems Engineering, School of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: hassan.bazoubandi@energy.sharif.edu
3. Energy Innovation Center, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: Alipasban.ap@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 15 December 2024
Revised 14 January 2025
Accepted 13 February 2025
Published Online 05 April 2025

Keywords:
Electric public transportation,
electrification infrastructure,
regulatory frameworks,
power grid integration,
charging policy.

ABSTRACT

The transition toward electric public transportation marks a vital step in reducing environmental pollutants and enhancing energy efficiency. However, without robust electricity infrastructure and well-adapted regulatory frameworks, this transition is unlikely to meet its full potential. This study investigates the interrelationship between power grid capacity and electricity sector regulations in supporting the development of electric public transit systems, with a specific focus on developing countries. By analyzing technical and economic aspects—such as time-of-use electricity tariffs, grid connection protocols, and standards for high-capacity charging stations—the paper draws on international experiences from China, Europe, and the United States. Findings highlight that successful electrification relies on three essential pillars: tariff reform, regulatory standardization, and enabling private investment. According to projections by the International Energy Agency, electric vehicle electricity demand could exceed 1,155 TWh by 2040, nearly double Brazil's current total annual electricity consumption. Without strategic interventions—such as smart charging management and grid upgrades—this demand may overwhelm existing infrastructure. Furthermore, in countries like Iran, the lack of a dedicated electricity tariff for charging stations remains a key obstacle to growth. The paper concludes by proposing a set of actionable policy recommendations aimed at supporting the widespread adoption of electric public transportation and addressing core challenges related to regulation, infrastructure readiness, and investment.

Cite this article: Moeini-Aghtaie, M.; Bazoubandi, H. & Pasban, A. (2025). Assessing the role of electricity infrastructure and regulatory frameworks in the development of electric public transportation: Comparative analysis and policy recommendations. *Urban Development Policy Making*, 2 (1), 31-47. DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.510165.1013

© Moein Moeini-Aghtaie, Hassan Bazoubandi, Ali Pasban
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.510165.1013

Introduction

The electrification of public transportation has emerged as a strategic response to global environmental concerns and energy efficiency goals. Unlike conventional transport planning that mainly emphasizes vehicle operation or fleet logistics, the current study adopts a comprehensive, system-level perspective focused on the enabling role of electricity infrastructure and regulatory frameworks. With rising urban demand and increasing electric vehicle (EV) adoption, electric public transportation introduces new complexities for power systems, including increased peak loads and

infrastructure stress. To address these challenges, the paper highlights the importance of adapting electricity tariffs, ensuring grid compatibility, and implementing robust technical standards for EV charging infrastructure. Drawing from successful global case studies—including China, the U.S., and the EU—the paper offers a policy-driven analysis grounded in real-world implementation.

Methodology

This research follows a qualitative policy review and technical narrative approach, synthesizing secondary data from academic articles, international energy reports, and regulatory documents. The study categorizes insights across two main axes: (1) technical challenges and capacities of electricity grids in the face of increasing EV charging demand, and (2) the regulatory and policy mechanisms required to facilitate large-scale electric public transit deployment. Countries with leading EV infrastructure were selected as benchmarks for comparative analysis.

Results

The findings reveal that successful public transportation electrification hinges on three foundational pillars: (1) deployment of time-based electricity tariffs to manage load curves; (2) clear and standardized grid-connection protocols for charging stations; and (3) financial incentives to attract private sector investment. In countries like Iran, the current classification of charging stations under general-use tariffs poses a significant barrier to infrastructure expansion. Moreover, unmanaged EV charging could lead to grid instability, especially during peak demand hours. The study also provides a breakdown of technical impacts across generation, transmission, distribution, and tariff structures—especially in developing country contexts.

Conclusion

The transition to electric public transportation demands an integrated approach encompassing infrastructure readiness, regulatory flexibility, and market-driven investment. Without these elements, grid congestion, voltage drops, and economic inefficiencies may arise. The research concludes that customized regulatory reform—including the establishment of EV-specific electricity tariffs, targeted subsidies, and smart grid investments—is vital to achieving sustainable electrification goals. By learning from international best practices and adapting them to local contexts, developing countries can accelerate their transition toward cleaner, more efficient transport systems.

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

ارزیابی نقش زیرساخت‌های برق و چارچوب‌های مقرراتی در توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی برقی: تحلیل تطبیقی و ارائهٔ توصیه‌های سیاستی و چالش‌های موجود

معین معینی اقطاعی[1*] | حسن بازوبندی[2] | علی پاسبان[3]

۱. نویسندهٔ مسئول، دانشیار گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه: moeini@sharif.edu
۲. دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکدهٔ مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه: hassan.bazoubandi@energy.sharif.edu
۳. مرکز نوآوری انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه: Alipasban.ap@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵

کلیدواژه:
حمل‌ونقل عمومی الکتریکی، زیرساخت‌های برقی‌سازی حمل‌ونقل عمومی، زمینه‌های قانونی و مقررات برقی‌سازی حمل‌ونقل عمومی.

چکیده

گذار به حمل‌ونقل عمومی برقی، گامی اساسی در جهت کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و ارتقای بهره‌وری انرژی محسوب می‌شود، اما این گذار بدون آماده‌سازی زیرساخت‌های صنعت برق و بازنگری در آیین‌نامه‌های مرتبط، به نتایج مطلوب نخواهد رسید. این مقاله با هدف بررسی تعامل میان زیرساخت شبکهٔ برق و چارچوب‌های مقرراتی صنعت برق در توسعهٔ ناوگان عمومی برقی تدوین شده است. برای این‌منظور، ضمن تحلیل سیاست‌های تعرفه‌گذاری، ساختار اتصال به شبکه، و استانداردهای فنی ایستگاه‌های شارژ، نمونه‌هایی از تجربه‌های موفق در چین، اروپا و ایالات متحده بررسی شده‌اند. نتایج بیانگر آن است که اعمال تعرفه‌های زمان‌محور، تدوین مقررات اتصال فنی و تسهیل سرمایه‌گذاری خصوصی، سه رکن کلیدی در توسعهٔ پایدار ناوگان برقی به شمار می‌روند. بر اساس پیش‌بینی آژانس بین‌المللی انرژی، تقاضای برق خودروهای برقی تا سال ۲۰۴۰ به بیش از ۱۱۵۵ تراوات‌ساعت خواهد رسید، که حدود دو برابر کل مصرف برق سالانهٔ کشور برزیل است. این فشار، به‌ویژه در ساعت‌های اوج، می‌تواند بدون مدیریت هوشمند شارژ و تقویت شبکهٔ توزیع، به افت ولتاژ یا خاموشی منجر شود. همچنین، بررسی ساختار تعرفهٔ برق در ایران نشان می‌دهد دسته‌بندی ایستگاه‌های شارژ تحت عنوان «سایر مصارف» از مهم‌ترین موانع اقتصادی برای گسترش زیرساخت محسوب می‌شود. در پایان، این مقاله به ارائهٔ مجموعه‌ای از راهکارهای سیاستی در زمینهٔ تعرفه‌گذاری اختصاصی، مشوق‌های سرمایه‌گذاری، و استانداردسازی اتصال، چارچوبی عملیاتی برای توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی برقی و بررسی چالش‌های اساسی موجود در کشورهای درحال‌توسعه می‌پردازد.

استناد: معینی اقطاعی، معین؛ بازوبندی، حسن و پاسبان، علی (۱۴۰۴). ارزیابی نقش زیرساخت‌های برق و چارچوب‌های مقرراتی در توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی برقی: تحلیل تطبیقی و ارائهٔ توصیه‌های سیاستی و چالش‌های موجود. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۲ (۱) ۳۱-۴۷.
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.510165.1013

© معین معینی اقطاعی، حسن بازوبندی، علی پاسبان
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.510165.1013

مقدمه

بخش حمل‌ونقل جهانی در دهه‌های اخیر با فشار فزاینده‌ای برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای[1] و بهبود امنیت انرژی مواجه بوده است. در این‌میان، توسعهٔ ناوگان حمل‌ونقل عمومی برقی به عنوان راهکاری کارآمد، کم‌کربن و بهینه از نظر مصرف انرژی، توجه سیاست‌گذاران و نهادهای بین‌المللی را به خود جلب کرده است. با افزایش تراکم جمعیت در مراکز شهری، برقی‌سازی ناوگان اتوبوس‌ها، تراموا‌ها و قطارهای شهری می‌تواند سهم چشمگیری در بهبود کیفیت هوای شهرها، کاهش آلاینده‌های محلی و تحقق اهداف اقلیمی ایفا کند. با این‌حال، پذیرش گستردهٔ حمل‌ونقل عمومی الکتریکی، پیشرفت‌های اساسی در زیرساخت‌های شبکهٔ برق و چارچوب‌های نظارتی را ضروری می‌کند. افزایش تقاضا برای شارژ وسایل نقلیهٔ الکتریکی[2] پیچیدگی‌های جدیدی را برای تولید، انتقال و توزیع برق ایجاد می‌کند و اپراتورهای شبکه و سیاست‌گذاران را ملزم به اجرای استراتژی‌های تطبیقی می‌کند. فناوری‌های شارژ هوشمند، یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر و سرمایه‌گذاری در گسترش شبکه برای حفظ پایداری و کارایی برق ضروری هستند [۱].

آژانس بین‌المللی انرژی[3] انتظار دارد در صورت اجرای سیاست‌های اعلام‌شده، تقاضای وسایل نقلیهٔ برقی برای برق در سطح جهان از ۵۵ تراوات‌ساعت[4] در سال ۲۰۲۰ به ۱۱۵۵ تراوات‌ساعت تا سال ۲۰۴۰ افزایش یابد. این تقاضا تقریباً معادل دو برابر کل مصرف برق امروزی در برزیل است. برای اکثر کشورها، آژانس بین‌المللی انرژی انتظار دارد که سهم برق مصرفی خودروهای برقی از ۶ درصد تا سال ۲۰۳۰ و از ۱۰ درصد تا سال ۲۰۴۰ تجاوز نکند، در حالی که امروز حدود ۱ درصد است [۱].

علاوه بر این، مصرف برق آن باید به زمینهٔ برقی‌سازی گسترده‌تر بسیاری از کاربری‌های دیگر انرژی (مانند گرمایش و سرمایش)، تغییر الگوهای تقاضای بخش به دلیل بازسازی اقتصادی، و بهره‌وری انرژی بیشتر در نظر گرفته شود. چالش بزرگ‌تر این است که این تقاضا احتمالاً زمانی متمرکز می‌شود که بسیاری از دارندگان خودروهای برقی به طور هم‌زمان شارژ می‌کنند یا جایی که پذیرش زیاد است. شارژ ناهماهنگ – که این خطر را به همراه دارد که تقاضای مجدد وسیلهٔ نقلیه می‌تواند به‌شدت در مکان‌های خاص یا در ساعت‌های خاصی از روز متمرکز شود – ممکن است شبکه‌های توزیع موجود را تحت الشعاع قرار دهد یا نیاز به ارتقای گران‌قیمت برای مطابقت با پیک تقاضای کوتاه‌مدت داشته باشد. چنین نگرانی‌هایی می‌تواند با سرمایه‌گذاری بیشتر در ارتقای شبکه برطرف شود و با اقدامات مدیریت تقاضای فعالیت شارژ را در مکان‌ها و دوره‌های زمانی دوباره توزیع می‌کند، به طور مؤثر برطرف کند. راه حل‌های مختلفی در این حوزه از اطلاعات نسبتاً ساده در برنامه‌های تشویقی تا راه حل‌های فنی پیچیده‌تر شامل می‌شود [۲].

از آنجا که وسایل نقلیهٔ برقی[5] به‌تدریج جایگزین وسایل نقلیه با سوخت فسیلی می‌شوند، افزایش مطلق تقاضای برق احتمالاً کمتر از توزیع آن طی زمان و مکان خواهد بود که این موضوع برای دولت‌ها و شرکت‌ها چالش‌برانگیز است. مدیریت به‌روزرسانی‌های لازم در زیرساخت‌ها، به‌ویژه در کشورهای با درآمد کم و متوسط که شرکت‌های برق برای ارائهٔ خدمات اولیه با مشکل مواجه هستند، چالشی اساسی خواهد بود. یک چالش مهم دیگر، تنظیم قیمت‌گذاری انرژی و ساختارهای مالی است تا اطمینان حاصل شود که مصرف‌کنندگان انگیزهٔ لازم برای رفتار کارآمد در مورد شارژ خودرو دارند و توازن مالی شرکت‌های برق حفظ می‌شود. بدون آماده‌سازی اولیه و جامع، کشورها در معرض خطر تضعیف بیشتر سیستم‌های تأمین برق قرار دارند که برای رشد و رفاه ضروری هستند [۳].

بررسی شواهد اولیه و مطالعات علمی سه اولویت سیاستی را پیشنهاد می‌کند.

1. **برنامه‌ریزی دقیق سیستم انرژی:** کشورها باید با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی، تأثیر تحرک برقی بر سیستم انرژی خود را ارزیابی کنند، که شامل تولید، انتقال و توزیع برق می‌شود. چنین تحلیل‌هایی به برنامه‌ریزی، سرمایه‌گذاری و اصلاحات تنظیم‌گری کمک می‌کند که سیستم انرژی را برای پذیرش گسترده وسایل نقلیهٔ برقی آماده می‌سازد.

1. GHG Emissions
2. Electric Vehicles
3. IEA
4. TWh
5. EVs

۲. **مدیریت تقاضا:** یک عنصر حیاتی از استراتژی‌های بخش برق مبتنی بر وسایل نقلیهٔ برقی، مدیریت تقاضاست که بارهای اوج را کاهش می‌دهد و در نهایت، وسایل نقلیهٔ برقی را به بخشی جدایی‌ناپذیر از سیستم انرژی با یکپارچگی شدید شبکه تبدیل می‌کند. یکی از عناصر مهم مدیریت تقاضا، اصلاح ساختارهای قیمت‌گذاری برق و سوخت است [۴].

۳. **بهبود بهره‌وری انرژی و سبز کردن تولید برق:** برای تضمین بیشترین منافع زیست‌محیطی و کاهش آلودگی با استفاده از خودروهای برقی، سیاست‌گذاران و شرکت‌های برق باید با بهبود بهره‌وری انرژی طی زنجیرهٔ تأمین برق و همچنین، افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق، پیشرفت کنند.

قیمت‌گذاری برق در زمان استفاده، انگیزه‌هایی برای کاربران خودروهای برقی ایجاد می‌کند تا زمانی که تقاضای کمتری است شارژ کنند. ادغام نزدیک‌تر خودروهای برقی با شبکه از طریق شارژ هوشمند به اپراتورهای سیستم اجاره می‌دهد تا برنامه‌های شارژ را هدایت کنند و ممکن است در آینده باتری‌های وسایل نقلیهٔ برقی به بخشی جدایی‌ناپذیر از شبکه تبدیل کنند. با این‌حال، چنین ادغامی نیاز به سرمایه‌گذاری اضافی در زیرساخت‌های شارژ هوشمند داشته باشد. خودروهای برقی تنها یکی از استفاده‌های جدید از برق خواهند بود که سیستم‌های تأمین برق را تحت فشار قرار می‌دهد، در حالی که در مسیر کربن‌زدایی تلاش می‌کنند تا با تقاضاهای توسعهٔ اقتصادی همگام شوند [۵]. ارتقای تولید و انتقال نیاز به سرمایه‌گذاری قابل توجهی دارد. ارتقای سیستم‌های توزیع محلی و تغذیه‌کننده بسیار چالش‌برانگیزتر است. اگر انحرافات مداوم قیمت در بخش‌های انرژی بسیاری از کشورها برطرف نشود، انجام سرمایه‌گذاری‌های مورد نیاز دشوارتر خواهد بود. برنامه‌ریزی و تجزیه‌وتحلیل کارآمدترین گزینه‌های فنی را شناسایی می‌کند، سطح مورد نیاز سرمایه‌گذاری را می‌سنجد، و اصلاحات نظارتی و بازار را پیشنهاد می‌کند که به پرداخت هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تضمین امنیت عرضه کمک می‌کند. از آنجا که خودروهای برقی در استفاده از انرژی به طور قابل توجهی کارآمدتر هستند، در حال حاضر، به هدف جهانی اجتناب از تغییرات آب‌وهوایی خطرناک حتی در کشورهایی که سوخت‌های فسیلی بر تولید برق غالب هستند، کمک می‌کنند. طی فرایند آماده‌سازی برای حمل‌ونقل برقی، سیاست‌گذاران و شرکت‌های برق نیاز به جست‌وجوی فرصت‌هایی برای بهبود کارایی سیستم قدرت و تغییر منابع انرژی کم‌کربن دارند. انرژی بادی و خورشیدی در حال حاضر به‌صرفه هستند، اما تأمین برق قابل اعتماد همچنین به ذخیره‌سازی برق در مقیاس بزرگ نیاز دارد که انتظار می‌رود هزینهٔ آن در سال‌های آینده کاهش یابد. جدول ۱ نمای کلی از نگرانی‌های اصلی مورد بحث در این حوزه را در زمینهٔ کشورهای در حال توسعه ارائه می‌دهد [۶].

در این میان، مقالهٔ حاضر یک مطالعهٔ مرور تطبیقی و سیاست‌محور است که به تحلیل چالش‌های فنی و مقرراتی مرتبط با گسترش حمل‌ونقل عمومی برقی می‌پردازد. روش تحقیق، مرور روایتی با تمرکز بر تحلیل آیین‌نامه‌ها، سیاست‌ها و تجارب موفق در سطح جهانی است. منابع مورد استفاده شامل گزارش‌های رسمی نهادهای بین‌المللی (IEA, UNEP)، مقررات داخلی ایران و مقالات علمی منتخب منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ است. کشورهای چین، ایالات متحده و اتحادیهٔ اروپا به عنوان مطالعات موردی انتخاب شده‌اند، زیرا دارای تجربه‌های موفق در توسعهٔ زیرساخت‌های شارژ، تدوین ساختار تعرفه‌ای، و تنظیم مقررات اتصال به شبکه هستند.

مرور بر ادبیات

متعددی از مطالعات اخیر به توسعهٔ خودروهای برقی پرداخته‌اند که برخی از مهم‌ترین آن‌ها در ادامه ذکر شده‌اند. برای نمونه، آقای رزمجو و همکارانش بررسی کردند که چگونه خودروهای برقی می‌توانند در شهرهای هوشمند نقش مؤثری ایفا کنند. آن‌ها نشان دادند این وسایل نقلیه نه‌تنها باعث کاهش انتشار دی‌اکسید کربن می‌شوند، بلکه به بهبود سامانه‌های حمل‌ونقل شهری آینده نیز کمک خواهند کرد [۷].

جدول ۱. تأثیرات سیستم برق EV در کشورهای درحال‌توسعه

دسته‌بندی	تأثیرات	موضوعات کشورهای درحال‌توسعه
تأثیر بر تقاضای برق	افزایش مصرف کل انرژی تغییر شکل منحنی بار روزانه تغییر بزرگی، مدت زمان و احتمالاً زمان اوج بار تغییرپذیری مشخصات بار و افزایش عدم قطعیت بار	موقعیت جغرافیایی، آب‌وهوایی، جمعیت‌شناسی و الگوهای رانندگی نیز بر جذب، مصرف برق خودروهای برقی و رفتار شارژ تأثیر می‌گذارند. دوچرخه برقی و سه‌چرخه برقی ممکن است یک حالت غالب در بسیاری از اقتصادها باشد. موانع اقتصادی، مقرراتی و جغرافیایی در ایجاد زیرساخت‌های شارژ عمومی
تأثیر بر سیستم توزیع	اضافه بار فیدرها و ترانسفورماتورها تلفات برق اضافی انحرافات ولتاژ مشکلات کیفیت برق (اوج‌بار، هارمونیک)	سیستم‌های توزیع نامناسب و ضعیف سطح بالای تلفات سیستم توزیع نرخ بالای خرابی ترانسفورماتور فقدان یا مدیریت استانداردها و مقررات مناسب نیاز زیاد به تقویت‌کننده‌ها
تأثیر بر سیستم انتقال	خطر ازدحام به دلیل ظرفیت ناکافی انتقال افزایش نیاز به توان واکنشی انعطاف‌پذیر	سطح پایین اتصال و ظرفیت فقدان مقررات مناسب مانع از سرمایه‌گذاری الزامات سرمایه‌گذاری بالا برای ارائهٔ سطح مناسبی از ارتباطات متقابل با تقاضای رو به رشد
تأثیر بر تولید نیرو	نیاز به سرمایه‌گذاری ایجاد ظرفیت نسل جدید افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای سیستم قدرت نیازهای فزاینده به دلیل افزایش شدید تقاضای توان افزایش نیاز به خدمات جانبی افزایش نیاز به ذخیره‌سازی	ظرفیت و قابلیت اطمینان ناکافی برای برآوردن نیازهای فعلی نیازهای سرمایه‌گذاری بالا به دلیل تقاضای رو به رشد سریع ناتوانی تولیدکنندگان فشرده، اغلب بر اساس واحدهای سوخت فسیلی با کیفیت پایین تنظیم ضعیف بازار برق و مشکلات در تأمین ذخایر
تأثیر بر تعرفیات	ساختارهای تعرفهٔ برق بار در نظر گرفتن شارژ EV طراحی نشده‌اند در مواردی که به برق یارانه داده می‌شود، موقعیت مالی شرکت‌های آب و برق ممکن است با پذیرش EV تضعیف شود	افزایش تعرفه‌های بلوکی امری عادی است و ممکن است شارژ خودروهای برقی را جریمه کند ساختار زمان استفاده و کنتورهای هوشمند مرتبط بسیار نادر است قیمت برق یارانه‌ای است

مطالعهٔ دیگری که توسط آقای گنان[1] و همکارانش انجام شد، به ارزیابی تأثیر خودروهای برقی قابل شارژ بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در آلمان طی سال ۲۰۲۰ پرداخت. آن‌ها دریافتند که قیمت انرژی و هزینهٔ باتری‌ها تأثیر قابل توجهی بر گسترش بازار این خودروها دارند، به گونه‌ای که انتظار می‌رفت خودروهای برقی بین ۰/۴ تا ۳ درصد از کل ناوگان خودروهای سواری آلمان را تا سال ۲۰۲۰ تشکیل دهند [۸].

برای مدیریت بحران‌های زیست‌محیطی و بهینه‌سازی سامانه‌های انرژی، هو و همکاران[2] تأثیر سیاست‌های دولتی بر میزان پذیرش خودروهای برقی را بررسی کرد. نتایج نشان داد اقداماتی نظیر حمایت از توسعهٔ زیرساخت‌ها و ارائهٔ یارانه‌های تولیدی می‌توانند نرخ پذیرش این خودروها را تا ۷۰ درصد افزایش دهند [۹]. در مطالعه‌ای دیگر، آقایان کاپوستین و گروشونکو[3]، تأثیر رشد خودروهای ـ برقی بر شبکهٔ برق را در بازهٔ زمانی طولانی‌مدت تحلیل کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد در صورت حمایت گستردهٔ دولت‌ها، بین ۱۱ تا ۲۸ درصد از ناوگان جهانی خودروها تا سال ۲۰۴۰ می‌توانند به خودروهای برقی تبدیل شوند [۱۰]. مو[4] و همکارانش نیز روندهای نوین و فناوری‌های در حال ظهور در صنعت خودروهای برقی را مورد بررسی قرار دادند. برخی از این فناوری‌ها شامل سیستم‌های خودرو به شبکه[5]، توزیع برق هوشمند، ارتباطات خودرو به خودرو[6]، فناوری شارژ بی‌سیم و سامانه‌های خودرو به خانه[7] است [۱۱]. علاوه بر این، آن‌ها به بررسی تجاری‌سازی خودروهای برقی در هنگ‌کنگ پرداختند و چالش‌هایی مانند کمبود زیرساخت‌های شارژ، مدیریت ضعیف امکانات عمومی و دشواری در یافتن خدمات تعمیر و نگهداری را

1. Gnann
2. Y. Hu
3. Kapustin and Grushevenko
4. Mo
5. V2G: Vehicle to Grid
6. V2V: Vehicle to Vehicle
7. V2H: Vehicle to Home

برای کاربران خصوصی مطرح کردند. در بخش مربوط به خودروهای برقی تجاری، مشکلاتی نظیر مدل‌های محدود، کمبود زیرساخت‌های شارژ، طولانی بودن زمان شارژ و کمبود جای پارک مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، آن‌ها پیشنهادهایی مانند توسعهٔ فناوری، ارائهٔ مشوق‌های مالی برای خودروهای تجاری، تقویت همکاری ذی‌نفعان، ایجاد ایستگاه‌های شارژ سریع و گسترش زیرساخت‌های لازم برای خودروهای شخصی و تجاری ارائه کردند [۱۲].

بر اساس تحلیل انجام‌شده در [۱۳] تا پایان سال ۲۰۱۹ حدود ۷/۳ میلیون ایستگاه شارژ خودروهای برقی در سطح جهان نصب شده بود که ۰/۹ میلیون مورد آن‌ها عمومی بودند. همچنین، تخمین زده می‌شود که تولید خودروهای برقی در اروپا از ۷۵۰ هزار دستگاه در سال ۲۰۱۹ به بیش از چهار میلیون دستگاه در سال ۲۰۲۵ برسد. علاوه بر این، برخی تحقیقات بر بررسی عوامل مؤثر بر پذیرش خودروهای برقی و انگیزه‌های خرید مشتریان تمرکز داشته‌اند. به عنوان نمونه، وانگ[1] و همکارانش (۲۰۱۷) سیاست‌های حمایتی را در سه گروه مشوق‌های مالی، آموزش عمومی و سیاست‌های تسهیل‌کننده طبقه‌بندی کرده و تأثیر هر یک بر رفتار مصرف‌کنندگان را بررسی کردند [۱۴]. در مطالعه‌ای دیگر، لو[2] و همکارانش رویکرد مصرف‌کنندگان نسبت به خودروهای انرژی نوین[3] را از طریق مدل معادلات ساختاری[4] تحلیل کرده و دریافتند که افراد تمایل بیشتری به خودروهای هیبریدی[5] و خودروهای برقی قابل شارژ[6] دارند، اما آگاهی کافی از این فناوری‌ها و سیاست‌های مرتبط با آن‌ها ندارند]۱۵[. همچنین، جاوید و همکارانش با استفاده از مدل فعال‌سازی هنجار[7]، میزان پذیرش خودروهای برقی را در میان مسافران پاکستانی ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد افزایش آگاهی عمومی دربارهٔ مزایای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی خودروهای برقی، تأثیر مثبتی بر هنجارهای رفتاری مصرف‌کنندگان دارد [۱۶]. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که ترویج و توسعهٔ حمل‌ونقل برقی، به‌ویژه در ناوگان شهری، گامی کلیدی در راستای تحقق اهداف زیست‌محیطی، افزایش بازدهی انرژی، و بهبود کیفیت زندگی تلقی می‌شود.

روش کار

این مطالعه به صورت مرور تحلیلی روایتی انجام شده است که هدف آن بررسی نقش زیرساخت‌های صنعت برق و چارچوب‌های مقرراتی در توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی برقی، با تمرکز بر کشورهای درحال‌توسعه و به طور خاص ایران است. این نوع مرور پژوهشی با استفاده از تحلیل محتوای موضوع‌محور و تطبیقی، تلاش دارد تا از طریق دسته‌بندی منابع علمی، مستندات فنی، و اسناد سیاستی، مهم‌ترین چالش‌ها و راهکارهای سیاست‌گذاری را شناسایی کند.

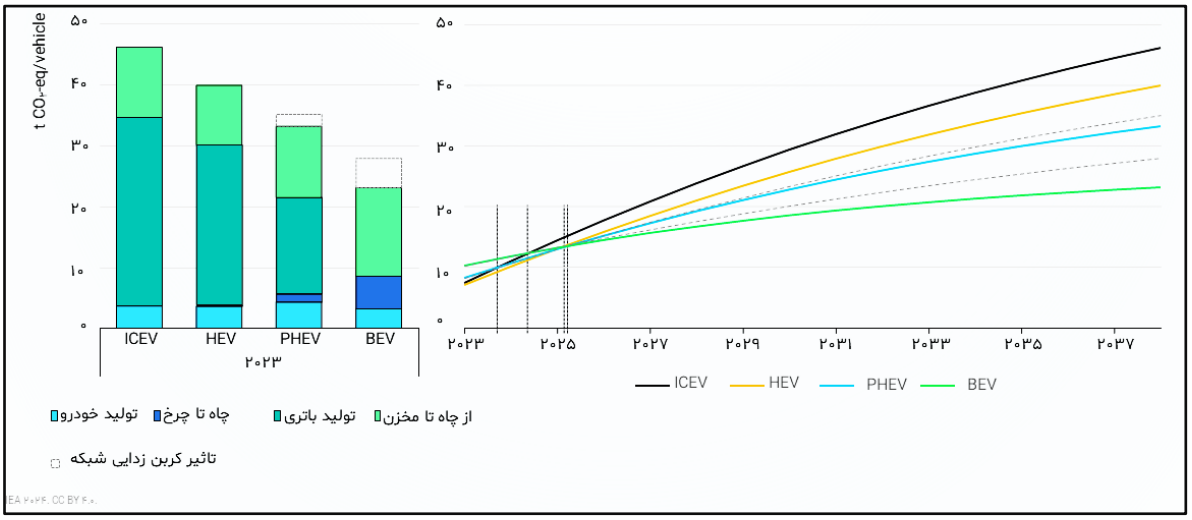
مطالعهٔ حاضر به جای تکیه بر داده‌های اولیه، از منابع ثانویه معتبر برای استخراج اطلاعات استفاده کرده است. برای این‌منظور، ابتدا پایگاه‌های دادهٔ علمی از جمله ScienceDirect، Scopus، Springer، IEEE Xplore و Google Scholar برای دستیابی به مقالات منتشرشده در زمینهٔ حمل‌ونقل برقی، زیرساخت شارژ، تعرفه‌گذاری برق، و سیاست‌های تنظیم‌گری در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ مورد جست‌وجو قرار گرفتند. همچنین، اسناد سیاستی و فنی از سوی نهادهای بین‌المللی مانند IEA، IRENA، UNEP، WRI و نیز مستندات رسمی منتشرشده توسط وزارت نیرو، شرکت توانیر، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی ایران (ساتبا) بررسی و تحلیل شدند.

گسترش حمل‌ونقل برقی، به‌ویژه در حوزهٔ ناوگان عمومی، از جنبه‌های مختلف می‌تواند به بهبود وضعیت زیست‌محیطی و پایداری انرژی کمک کند؛ پنج محور اصلی در این زمینه عبارت‌اند از:

1. Wang
2. Lou
3. NEVs: New Electric Vehicles
4. SEM: Structural Equetion Model
5. HEVs: Hybrid Electric Vehicles
6. PEVs: ؟؟ Electric Vehicles
7. NAM: ???

۱. کاهش انتشار آلاینده‌های محیط زیستی

خودروهای برقی به خلاف خودروهای احتراقی[1] انتشار مستقیم آلاینده‌هایی همچون NOx، CO_2 و ذرات معلق ندارند. این موضوع به‌ویژه در مناطق شهری پرتراکم، تأثیر چشمگیری بر کاهش مه‌دود و آلودگی هوای تنفسی دارد. شکل ۱ مقایسه‌ای آلایندگی انواع فناوری‌های خودورا[2] نشان می‌دهد حتی با محاسبهٔ چرخهٔ عمر باتری، در بلندمدت، استفاده از خودروهای برقی به کاهش ۲۵ درصدی انتشار کلی آلاینده‌ها منجر می‌شود. کاهش آلاینده‌های مستقیم و هم‌زمان کاهش آلودگی صوتی موتورهای احتراقی، می‌تواند کیفیت زندگی و سلامت عمومی را در شهرها ارتقا دهد.



شکل ۱. میانگین جهانی انتشار چرخهٔ عمر خودروهای متوسط در STEPS، 2023

۲. بهبود کارایی مصرف انرژی

مطابق جدول ۲ بازده موتورهای برقی نسبت به موتورهای احتراق داخلی، به‌مراتب بیشتر است. بنابراین در ازای هر واحد انرژی الکتریکی، مسافت بیشتری طی می‌شود و اتلاف انرژی حرارتی کاهش می‌یابد.

جدول ۲. مقایسهٔ راندمان در خودروهای برقی و خودروهای احتراق داخلی [۱۷]

مرحله	خودروی احتراق داخلی (ICEV)		خودروی برقی (EV)	
	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه
نفت خام	–	–	–	–
پالایش (نفت خام / نفت کوره)	۹۰	۸۵	۹۷	۹۵
توزیع سوخت / تولید برق	۹۹	۹۵	۴۰	۳۳
انتقال تا ورودی نهایی	–	–	۹۲	۹۰
شارژر باتری	–	–	۹۰	۸۵
باتری (اسید–سربی)	–	–	۷۵	۷۵
موتور / کنترلر	۲۲	۲۰	۸۵	۸۰
انتقال نیرو به چرخها	۹۸	۹۵	۹۸	۹۵
بازده کلی (از نفت خام تا چرخها)	۱۹	۱۵	۲۰	۱۴

1. ICEV
2. ICEV/HEV/PHEV/BEV

خودروهای برقی می‌توانند از ترمز احیاکننده[1] بهره ببرند و بخشی از انرژی جنبشی را به انرژی الکتریکی برگردانند. این قابلیت باعث بهره‌وری بیشتر و مدیریت بهتر انرژی در ترافیک شهری می‌شود.

۳. کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی

با جایگزینی سوخت‌های فسیلی توسط برق در حمل‌ونقل عمومی، نیاز به بنزین و گازوئیل کاهش می‌یابد و در بلندمدت، وابستگی کشور به واردات یا مصرف این سوخت‌ها کم می‌شود. به این‌ترتیب، می‌توان امنیت و تنوع عرضهٔ انرژی را نیز افزایش داد، به‌ویژه اگر برق مصرفی از منابع انرژی تجدیدپذیر تولید شود. همچنین قیمت برق معمولاً در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، نوسان کمتری دارد (به‌شرط مدیریت صحیح تعرفه‌ها). از این‌رو، استفاده از حمل‌ونقل برقی در درازمدت ثبات اقتصادی بالاتری را فراهم می‌کند.

۴. هم‌افزایی با انرژی‌های تجدیدپذیر

در صورتی که تولید برق به طور هم‌زمان از منابع تجدیدپذیر نظیر نیروگاه‌های خورشیدی یا بادی تأمین شود، میزان آلایندگی چرخهٔ کامل انرژی تا حد چشمگیری کاهش خواهد یافت. پیوند میان حمل‌ونقل برقی و توسعهٔ انرژی‌های پاک، راهکاری مؤثر برای کاهش اثرات زیست‌محیطی بخش حمل‌ونقل است.

۵. بهبود سلامت شهروندان و ارتقای کیفیت زندگی

جایگزینی ناوگان عمومی برقی در شهرهای پرجمعیت، علاوه بر کنترل آلاینده‌های مضر، اثر قابل توجهی بر سلامت عمومی خواهد داشت. تحقیقات متعدد بیانگر آن که کاهش آلودگی هوا مستقیم با کاهش بیماری‌های تنفسی و قلبی ـ عروقی در ارتباط است. بنابراین، توسعهٔ ناوگان برقی به عنوان یک سرمایه‌گذاری در سلامت و رفاه اجتماعی نیز تلقی می‌شود.

در این بخش، به منظور تحلیل منسجم یافته‌ها، محتوای گردآوری‌شده دو قالب یک ساختار دووجهی (فنی ـ مقرراتی) سازمان‌دهی و تحلیل شد.

محور اول: تحلیل فنی و زیربنایی شامل چالش‌ها و ظرفیت‌های زیرساختی شبکهٔ برق در گذار به حمل‌ونقل عمومی الکتریکی

محور دوم: تحلیل محتوای مقرراتی و سیاست‌گذاری شامل نقش آیین‌نامه‌ها و مقررات صنعت برق در راستای پاسخ به نیازهای شارژ خودروهای برقی

محور اول: چالش‌ها و ظرفیت‌های زیرساختی شبکهٔ برق در گذار به حمل‌ونقل عمومی الکتریکی

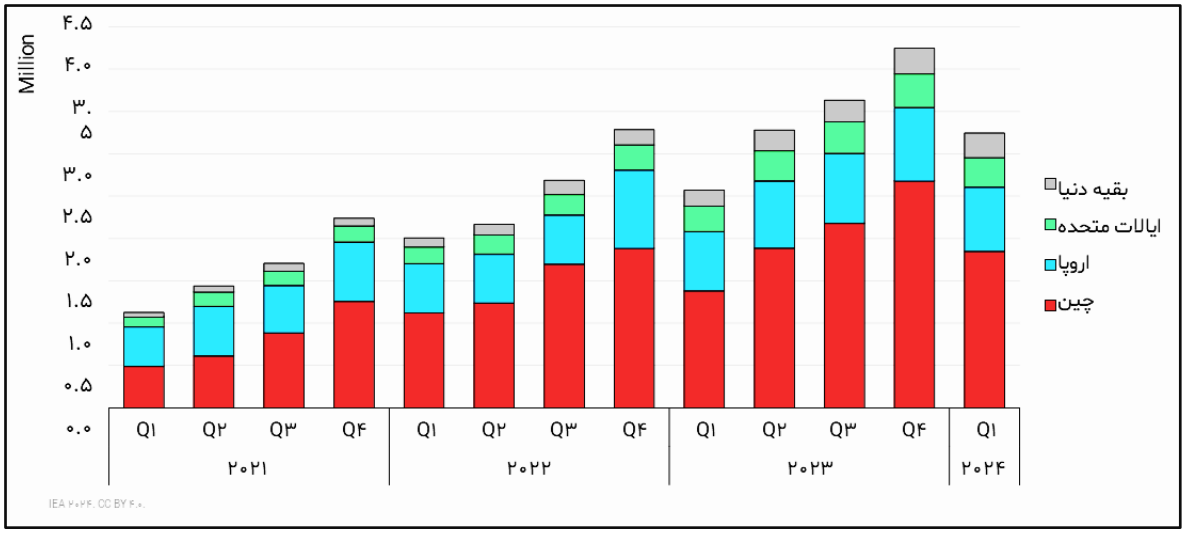
با گسترش خودروهای برقی در بازارهای جهانی و ورود آن‌ها به ناوگان شهری، تقاضای شارژ به‌سرعت رو به افزایش است. شکل (۱-۳) که روند فروش سه‌ماههٔ خودروهای برقی در دنیا و پیش‌بینی تا سال ۲۰۲۴ را نشان می‌دهد، بیانگر رشد چشمگیر این صنعت است. در این میان، صنعت برق باید خود را از چند جهت آماده کند:

- **افزایش تقاضای شارژ خودروهای برقی**

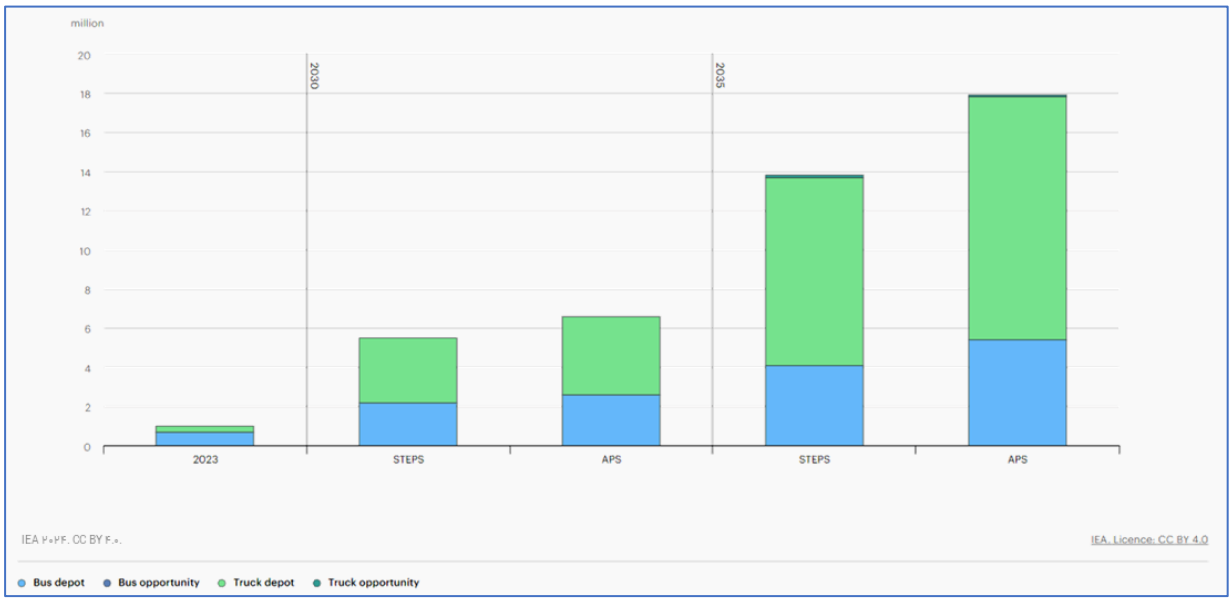
نمودارهای IEA در شکل ۲نشان می‌دهد تعداد خودروهای برقی فروخته‌شده سال به سال رشد چشمگیری داشته و پیش‌بینی‌ها حکایت از ادامه این روند در دههٔ جاری دارد.

وقتی اتوبوس‌ها، تاکسی‌ها و حتی کامیون‌های برقی وارد بازار شوند، بار شارژ مورد نیاز بسیار بالاتر از خودروهای سواری شخصی خواهد بود. مطابق شکل ۳ همان‌طور که اتوبوس‌ها و کامیون‌های بیشتری برقی می‌شوند، ظرفیت شارژ تا ۲۰۳۵ بیست برابر می‌شود که باید زیرساخت گسترده‌تری فراهم شود.

1. Regenerative Braking



شکل ۲. فروش سه‌ماههٔ خودروهای برقی بر اساس منطقه



شکل ۳. ظرفیت نصب‌شده شارژرهای خودروهای برقی سنگین

➢ ظرفیت محدود شبکهٔ برق فعلی

عدم تناسب ظرفیت شبکه با روند رشد برقی‌سازی: اگر تعداد زیاد خودرو به‌صورت هم‌زمان در ساعت‌های پیک نیاز به شارژ داشته باشند، ممکن است شبکهٔ برق با فشار شدیدی مواجه شود. تأثیر منفی افزایش بار ناشی از شارژ: بار اضافه ناشی از شارژ شبانه یا در ساعت‌های اوج، می‌تواند پایداری، کیفیت و قابلیت اطمینان شبکهٔ برق را به مخاطره بیندازد؛ از جمله ریسک خاموشی گسترده یا افت ولتاژ در مناطق شهری.

➢ نیاز به توسعهٔ ظرفیت تولید، انتقال و توزیع برق

سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌ها: سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌ها برای پاسخ‌گویی به بار اضافی شبکه ضروری است و باید ظرفیت نیروگاه‌های حرارتی و تجدیدپذیر افزایش یابد. توسعه و بهبود شبکهٔ انتقال و توزیع برق نیز از طریق احداث پست‌های فوق توزیع، ارتقای خطوط انتقال و ایجاد پست‌های محلی پرقدرت، به‌ویژه برای ایستگاه‌های شارژ سریع و فوق سریع، از اقدامات زیرساختی حیاتی محسوب می‌شود. بر اساس مصوبات هیئت وزیران و دستورالعمل‌های وزارت نیرو، کلیهٔ مشترکان برق با قدرت

بیش از یک مگاوات موظف‌اند از ابتدای خردادماه سال جاری، انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را از طریق بورس انرژی و یا قراردادهای دوجانبه تأمین کنند. این الزام با هدف کاهش فشار بر شبکهٔ سراسری و بهینه‌سازی مصرف برق اعمال شده است. شرکت‌های برق منطقه‌ای و توزیع نیروی برق باید لزوم دریافت کد معاملاتی بورس و خرید انرژی از طریق بورس یا قراردادهای دوجانبه را به مشترکان اطلاع‌رسانی کنند و فهرست مشترکان مشمول را به شرکت بورس انرژی ارسال کنند تا حداکثر تا پایان خردادماه، کد معاملاتی برای آن‌ها صادر شود. در صورتی که مشترکی اقدامی در جهت تأمین برق از روش‌های پیش‌بینی‌شده انجام ندهد، در اولویت برنامهٔ مدیریت بار قرار خواهد گرفت و شرکت‌های برق منطقه‌ای و توزیع برق می‌توانند برق مصرفی این مشترکان را به نیابت از آن‌ها تأمین کرده و هزینهٔ برق مصرفی را با ضریب ۱/۲ برابر حداکثر قیمت برق بازار عمده‌فروشی محاسبه و دریافت کنند. علاوه بر هزینهٔ انرژی، مشترکان موظف‌اند هزینه‌های دیگری ازجمله هزینهٔ ترانزیت برق، آبونمان، تجاوز از قدرت مجاز، بهای انرژی راکتیو، عوارض برق و مالیات بر ارزش افزوده را نیز پرداخت کنند. مشترکانی که تعرفهٔ آن‌ها بالاتر از متوسط نرخ بازار است، باید مابه‌التفاوت اجرای مقررات را برای هر کیلووات ساعت برق خریداری‌شده از بورس پرداخت کنند. این مبلغ به صورت علی‌الحساب دریافت و به حساب شرکت توانیر واریز خواهد شد. همچنین، مشترکان باید سقف قدرت مجاز تعیین‌شده توسط شرکت مدیریت شبکهٔ برق ایران را در تأمین برق از طریق بورس انرژی و قراردادهای دوجانبه رعایت کنند. مشترکان دارای انشعاب برق آزاد با قدرت بیش از یک مگاوات باید هزینه‌های عمومی برقراری انشعاب را بر اساس شرایط جاری پرداخت کنند و در صورت درخواست، این هزینه‌ها می‌تواند تا سه سال تقسیط شود. شرکت توانیر موظف است به تمامی مشترکان پرمصرف، لزوم همکاری با برنامه‌های مدیریت بار را اطلاع‌رسانی کند. تسویه‌حساب بهای سوخت مبادلات برق مطابق مقررات بازار عمده‌فروشی انجام خواهد شد و خرده‌فروشان دارای مجوز از وزارت نیرو، در صورت رعایت ضوابط مربوط، مجاز به تأمین برق مشترکان مشمول این مقررات خواهند بود. بهبود شبکهٔ انتقال و توزیع: ایجاد پست‌های فوق توزیع جدید، ارتقای خطوط انتقال، یا احداث پست‌های محلی پرقدرت (برای ایستگاه‌های شارژ سریع و فوق‌سریع) از اقدامات زیرساختی حیاتی به شمار می‌رود.

➢ ایجاد زیرساخت‌های هوشمند شارژ و مدیریت بار

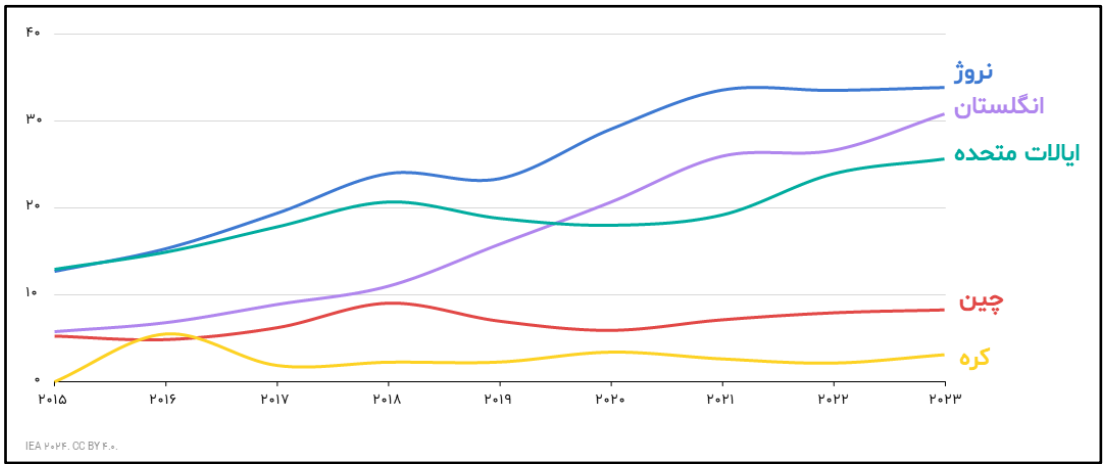
- مدیریت تقاضا (Demand Response): یکی از راهکارهای اصلی برای جلوگیری از فشار بیش از حد به شبکه، تعرفه‌های تشویقی در ساعت‌های کم‌بار یا مدیریت هوشمند شارژ است (مثلاً شارژ شبانه با تعرفهٔ ارزان).
- نرم‌افزارهای زمان‌بندی شارژ: پلتفرم‌های نرم‌افزاری می‌توانند به مالکان و ناوگان عمومی اجازه دهند زمان‌های خلوت شبکه را برای شارژ انتخاب کنند.
- شبکهٔ هوشمند (Smart Grid): بهره‌گیری از ارتباط دوطرفه میان خودرو و شبکه (V2G) یا حتی محدودسازی لحظه‌ای شارژ در ساعت‌های بحرانی می‌تواند بهره‌وری زیرساخت موجود را بالا برده و از توسعه فراتر از حد نیاز جلوگیری کند.

➢ پایش مستمر رشد EV و توسعهٔ مرحله‌ای زیرساخت

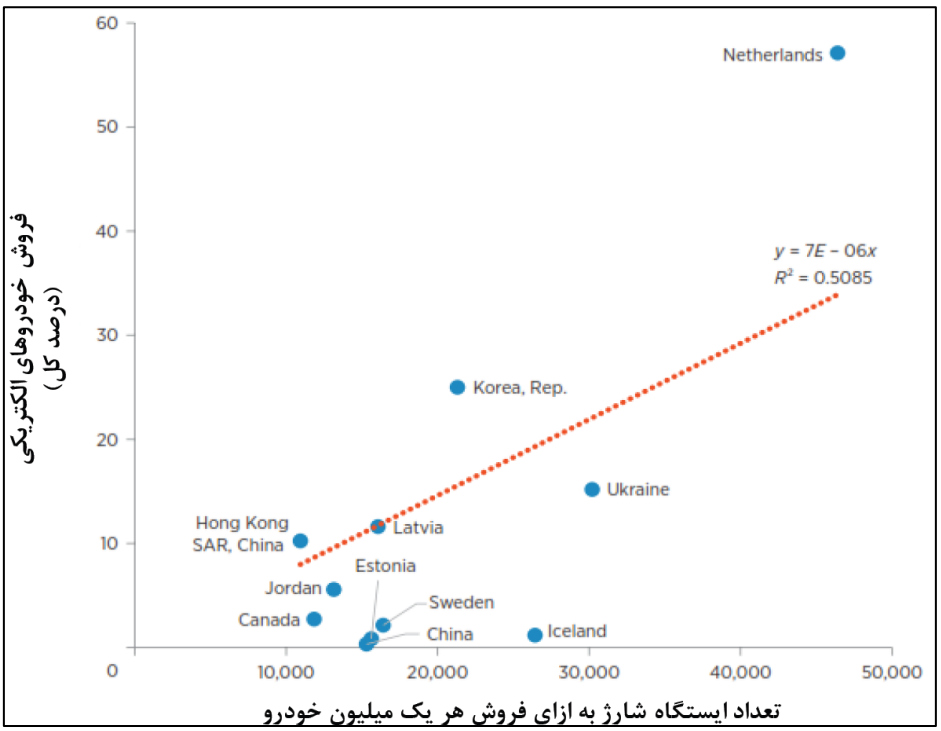
در شکل ۴ مقایسه‌ای میانگین تعداد خودروهای الکتریکی به ازای هر نقطه شارژ عمومی (مثلاً در چین، نروژ، انگلستان) دیده می‌شود که سرمایه‌گذاری پیوسته در ایستگاه‌های شارژ صورت گرفته و دولت‌ها نیز راهکارهای تشویقی ارائه کرده‌اند.

شکل ۵ رابطه بین تعداد ایستگاه‌های شارژ به ازای هر یک میلیون خودروی فروخته‌شده و سهم خودروهای الکتریکی از کل فروش خودرو را در کشورهای مختلف نشان می‌دهد. محور افقی تعداد ایستگاه‌های شارژ را نشان می‌دهد، در حالی که محور عمودی درصد فروش خودروهای الکتریکی را مشخص می‌کند. نقاط پراکنده نشان‌دهندهٔ کشورهای مختلف هستند، و یک روند کلی با یک خط رگرسیون مشخص شده است که نشان می‌دهد با افزایش تعداد ایستگاه‌های شارژ، سهم خودروهای الکتریکی در بازار نیز افزایش می‌یابد. مقدار R^2=۰/۵۰۸۵ نشان‌دهندهٔ همبستگی متوسط بین این دو متغیر است، که بیانگر این است که تعداد ایستگاه‌های شارژ یکی از عوامل تأثیرگذار بر افزایش فروش خودروهای الکتریکی است اما تنها عامل تعیین‌کننده نیست. کشورهایی مانند هلند دارای سهم بالایی از خودروهای الکتریکی هستند، در حالی که برخی کشورها مانند کانادا و اردن با وجود داشتن

ایستگاه‌های شارژ، سهم نسبتاً کمی از خودروهای الکتریکی در بازار دارند، که ممکن است به سیاست‌های دولتی، انگیزه‌های اقتصادی یا زیرساخت‌های دیگر مرتبط باشد.



شکل ٤. تعداد خودروهای سبک الکتریکی به ازای هر نقطه شارژ عمومی



شکل ۵. نسبت شارژرهای عمومی به ازای هر خودروی برقی، ۲۰۲۰

توسعهٔ گام‌به‌گام در ایران: با توجه به ضوابط و بخشنامه‌های وزارت نیرو دربارهٔ تأمین توان مشترکان پرقدرت، پیشنهاد می‌شود مدل‌های کسب‌وکار بخش خصوصی برای احداث ایستگاه‌های شارژ، به طور شفاف تعریف شود. همچنین، اصلاح تعرفه‌ها و آیین‌نامه‌های اتصال به شبکه برای ظرفیت‌های بالاتر از پنج مگاوات، الزامی به نظر می‌رسد.

در مجموع، با افزایش تقاضای شارژ چه در بخش خصوصی و چه در ناوگان عمومی باید برنامه‌ای جامع برای ارتقای تولید، انتقال و توزیع برق و نیز مدیریت هوشمند بار تدوین شود. موفقیت در برقی‌سازی ناوگان عمومی بدون تأمین زیرساخت مستحکم و مقررات انعطاف‌پذیر ممکن نیست. بنابراین، صنعت برق و رگولاتورهای مرتبط (وزارت نیرو، شرکت توانیر و غیره) باید به‌سرعت، اصلاحات لازم را در آیین‌نامه‌ها، تعرفه‌ها و ظرفیت‌های شبکه صورت دهند تا رشد حمل‌ونقل برقی تسهیل شود.

محور دوم؛ نقش آیین‌نامه‌ها و مقررات صنعت برق در راستای پاسخ به نیازهای شارژ خودروهای برقی

از مهم‌ترین پیش‌نیازهای توسعهٔ حمل‌ونقل برقی، وجود مقررات و آیین‌نامه‌های شفاف در حوزهٔ تعرفه، اتصال به شبکه، و الزامات فنی برای ایستگاه‌های شارژ است. دولت و وزارت نیرو در ایران در سال‌های اخیر اقداماتی انجام داده‌اند که می‌توان آن‌ها را به چند بخش تقسیم کرد:

➢ تعریف چارچوب برای نرخ‌گذاری برق در ایستگاه‌های شارژ

در آیین‌نامهٔ تکمیلی تعرفه‌های برق، بند «و» (جزء ۴-۱۶۰-۱) ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی را مشمول تعرفهٔ «سایر مصارف» می‌داند. به بیان دیگر، تا زمان تصویب تعرفهٔ اختصاصی، ایستگاه‌های شارژ ناگزیر به پرداخت تعرفه‌ای هستند که ممکن است در برخی مواقع از نظر مالی صرفهٔ کافی نداشته باشد.

تعرفه‌های برق و دسته‌بندی «سایر مصارف»:

جدول‌های ۳-۵ مربوط به تعرفه سایر مصارف نشان می‌دهد نرخ انرژی و توان در ساعت‌های پیک و نیمه‌پیک چگونه محاسبه می‌شود. با توجه به نمودار قیمت انرژی در ساعت‌های اوج بار، میان‌بار، و کم‌بار، هزینهٔ تمام‌شده برای ایستگاه‌های شارژ می‌تواند متفاوت باشد.

این نحوهٔ قیمت‌گذاری در کنار عدم تعریف کد تعرفهٔ اختصاصی برای اتوبوس‌های برقی یا تاکسی‌های برقی، یکی از موانع گسترش زیرساخت شارژ عمومی به شمار می‌رود.

جدول ۳. تعرفهٔ مشترکان با قدرت بیش از ۳۰ کیلووات

بهای قدرت (ریال بر کیلووات)	بهای انرژی (ریال بر کیلووات‌ساعت)		
	ساعت‌های اوج بار	ساعت‌های میان‌باری	ساعت‌های کم‌باری
۲۰۰۰۰۰	۱۴۰۰۰	۷۰۰۰	۳۵۰۰

جدول ٤. تعرفهٔ سایر مصارف برای مناطق گرم (با دمای ۳۰ درجه و بیشتر)

متوسط انرژی مصرفی ماهانه (کیلووات‌ساعت در ماه)	قیمت پایه هر کیلووات‌ساعت (ریال)
تا ۱۰۰	۱۰۰۴
بیش از ۱۰۰ تا ۲۰۰	۱۷۶۷
بیش از ۲۰۰ تا ۳۰۰	۲۲۷۱
بیش از ۳۰۰ تا ۴۰۰	۲۷۸۸
بیش از ۴۰۰ تا ۵۰۰	۳۲۹۴
بیش از ۵۰۰ تا ۶۰۰	۳۵۴۰
بیش از ۶۰۰ تا ۷۰۰	۳۷۶۴
بیش از ۷۰۰	۳۹۹۱

جدول ۵. تعرفهٔ سایر مصارف برای مناطق عادی (با دمای کمتر از ۳۰ درجه)

متوسط انرژی مصرفی ماهانه (کیلووات‌ساعت در ماه)	قیمت پایه هر کیلووات‌ساعت (ریال)
تا ۱۰۰	۱۰۰۴
بیش از ۱۰۰ تا ۲۰۰	۲۳۵۷
بیش از ۲۰۰ تا ۳۰۰	۲۶۶۰
بیش از ۳۰۰ تا ۴۰۰	۳۰۵۷
بیش از ۴۰۰ تا ۵۰۰	۳۵۸۸
بیش از ۵۰۰ تا ۶۰۰	۳۷۸۸
بیش از ۶۰۰ تا ۷۰۰	۴۰۳۵
بیش از ۷۰۰	۴۵۰۱

- **نگاه ویژه به مشترکان با قدرت مصرف بالا**

طبق «بخشنامهٔ وزارت نیرو – محاسبهٔ صورت‌حساب مشترکان با قدرت بیش از یک مگاوات»، از خرداد ۱۴۰۲ مشترکان پرمصرف ملزم شده‌اند انرژی مورد نیاز خود را از طریق بورس انرژی یا قراردادهای دوجانبه تأمین کنند.

این الزام می‌تواند بر ایستگاه‌های شارژ با توان بالا (مثلاً شارژرهای فوق‌سریع یا تأمین برق ناوگان اتوبوس‌های برقی) اثرگذار باشد، چرا که باید قسمتی از برق مصرفی را مستقیم از بازار عمده‌فروشی خریداری کنند. این موضوع، در صورت نبود راهکارهای حمایتی، ممکن است هزینهٔ اولیه سرمایه‌گذاران را بالا ببرد.

- **استانداردهای فنی و حفاظتی**

بهره‌برداری ایمن از ایستگاه‌های شارژ، به‌ویژه در زمینهٔ ولتاژ بالا یا شارژهای سریع، نیازمند تدوین ضوابط فنی و حفاظتی جامع است. مواردی نظیر ظرفیت قراردادی مشترک، شرایط اتصال به شبکه‌های فوق توزیع و توزیع، و دستورالعمل‌های ایمنی برای استفاده عمومی، همگی باید در آیین‌نامه‌ای دقیق و تخصصی ساماندهی شوند.

- **ضرورت بازنگری و تکمیل آیین‌نامهٔ موجود**

شواهد نشان می‌دهد برای ایجاد بستر مناسب به منظور توسعهٔ ناوگان برقی در حمل‌ونقل عمومی، لازم است قوانین مرتبط در بخش برق تکمیل یا بازنگری شود. به عنوان نمونه، تعیین کد تعرفه‌ای مستقل برای اتوبوس‌ها و تاکسی‌های برقی یا ایجاد بسته‌های تشویقی سرمایه‌گذاری می‌تواند انگیزهٔ ورود بخش خصوصی را در این عرصه افزایش دهد. همچنین، باید چارچوب روشنی برای مدیریت بار و تأمین برق در ساعت‌های اوج مصرف ایجاد شود تا زیرساخت برق شهرها از فشار ناگهانی حفظ شود.

در مجموع، آیین‌نامه‌ها و مقررات صنعت برق نقشی کلیدی در شکل‌دهی مدل کسب‌وکار و تسهیل توسعهٔ زیرساخت شارژ دارند. از همین‌رو، حرکت به سمت وضع دستورالعمل‌های شفاف و پایدار، به موازات تدوین مقررات اختصاصی برای حمل‌ونقل عمومی برقی، می‌تواند مسیر گذار به ناوگان برقی را هموارتر کند.

- **تعیین کد تعرفه‌ای مستقل برای اتوبوس و تاکسی‌های برقی**

چنین اقدامی ضمن ایجاد شفافیت بیشتر، اجازه می‌دهد سرمایه‌گذاران با مدل مالی مشخص‌تر وارد این عرصه شوند و بخش عمومی (شهرداری‌ها و شرکت‌های حمل‌ونقل) نیز بتوانند هزینه‌های بهره‌برداری را دقیق‌تر محاسبه کنند.

به طور کلی، می‌توان گفت که آیین‌نامه‌ها و مقررات صنعت برق در ایران هنوز نیازمند اصلاحات و تکمیل است تا پاسخ‌گوی رشد فزاینده تقاضای شارژ خودروهای برقی، به‌ویژه در ناوگان عمومی، باشد. اصلاح نظام تعرفه‌گذاری، حمایت از سرمایه‌گذاری بخش خصوصی، و تبیین استانداردهای فنی اتصال به شبکه مهم‌ترین اقداماتی است که طبق مستندات ارائه‌شده در اسلایدها باید مد نظر مسئولان و سیاست‌گذاران قرار گیرد.

۴. نتایج

در بررسی‌های انجام‌شده در مورد انوع چالش‌ها و مشکلات گسترش ناوگان برقی در حمل‌ونقل عمومی مورد بررسی قرار گرفت. ناوگان برقی در حمل‌ونقل عمومی مزایای قابل توجهی همچون کاهش آلایندگی و هزینه‌های سوخت را به همراه دارد، اما هم‌زمان با چالش‌هایی اساسی در حوزهٔ زیرساخت، اقتصاد و مقررات مواجه است. در عین حال، فرصت‌های گوناگونی برای توسعه و همکاری میان بخش‌های مختلف ایجاد می‌شود که در ادامه به هر دو بُعد اشاره می‌شود. فهرست چالش‌های موجود در جدول ۶ ذکر شده است.

جدول ٦. فهرست چالش‌ها و فرصت‌های کلیدی در توسعهٔ حمل‌ونقل برقی

موضوع	چالش‌ها و فرصت‌ها	توضیحات
چالش‌های فنی و زیرساختی	ظرفیت محدود شبکه در مناطق پرتراکم	ایستگاه‌های شارژ در پایانه‌ها و مراکز شهرها نیازمند توان الکتریکی بالاست که ممکن است باعث افت ولتاژ یا قطعی برق شود.
	مدیریت اوج مصرف	افزایش نامنظم تقاضای شارژ می‌تواند اوج مصرف جدیدی برای شبکه ایجاد کند که نیازمند مدیریت هوشمند شارژ و تعرفه‌های زمان‌محور است.
چالش‌های اقتصادی و مالی	هزینهٔ ایجاد زیرساخت شارژ	ایجاد ایستگاه‌های شارژ سریع و فوق سریع نیازمند سرمایه‌گذاری در تجهیزات و شبکهٔ توزیع برق است.
	خرید برق از بازار عمده‌فروشی	تأمین برق از بورس انرژی می‌تواند هزینه‌های متغیر و غیرقابل پیش‌بینی برای اپراتورها ایجاد کند، مگر با قراردادهای دوجانبه بلندمدت.
چالش‌های مقرراتی و قانونی	عدم تعریف کد تعرفهٔ اختصاصی	تعرفه‌های عمومی یا «سایر مصارف» موجب عدم شفافیت سرمایه‌گذاری در ایستگاه‌های شارژ می‌شود.
	ضرورت تکمیل دستورالعمل اتصال به شبکه	تدوین دستورالعمل جامع برای استانداردهای حفاظتی، تجهیزات و شرایط قراردادی انشعاب برق ضروری است.
فرصت‌های توسعه و همکاری	جذب سرمایه بخش خصوصی	اصلاح تعرفه‌ها و شفافیت قوانین می‌تواند موجب افزایش سرمایه‌گذاری، اشتغال‌زایی و بهبود خدمات شود.
	همکاری میان شهرداری‌ها و نهادهای دولتی	برقی‌سازی ناوگان حمل‌ونقل عمومی نیازمند هم‌افزایی میان مدیریت شهری و بخش خصوصی است تا هزینه‌ها کاهش یابد.
	ارتقای بهره‌وری انرژی و سلامت عمومی	ناوگان برقی علاوه بر کاهش آلودگی، می‌تواند به عنوان الگویی برای سایر بخش‌های حمل‌ونقل عمل کند.
آینده‌نگری و توسعهٔ برقی‌سازی	توجه به ناوگان باری و سنگین	زیرساخت شارژ برای کامیون‌ها و وانت‌های برقی باید در مسیرهای بین‌شهری و مبادی ورودی و خروجی شهرها توسعه یابد.
	همگام‌سازی با انرژی‌های تجدیدپذیر	افزایش سهم انرژی خورشیدی و بادی همراه با مدیریت زمان‌بندی شارژ، می‌تواند هزینه‌های برق و آلودگی را کاهش دهد.

به طور خلاصه، شرایط فعلی و رویکردهای آینده‌نگر نشان می‌دهد حمل‌ونقل عمومی برقی با وجود چالش‌های زیرساختی، مالی و قانونی، ظرفیت آن را دارد که به عنوان یک راهکار کارآمد در کاهش آلودگی و بهبود بهره‌وری انرژی ایفای نقش کند. سیاست‌گذاری منسجم، رفع موانع مقرراتی، و ارتقای زیرساخت برق در کنار همکاری همه‌جانبه ذی‌نفعان می‌تواند روند عملیاتی شدن این راهکار را شتاب بخشد.

۵. نتیجه‌گیری

نتایج بررسی منابع و مطالعات میدانی نشان می‌دهد استقرار موفق ناوگان حمل‌ونقل برقی، شامل اتوبوس‌ها، تاکسی‌ها و کامیون‌های سبک، مستلزم همکاری نزدیک میان بازیگران حوزهٔ برق و بخش حمل‌ونقل است. بخش برق باید ظرفیت تولید، انتقال و توزیع خود را متناسب با الگوی جدید تقاضا که تحت‌تأثیر شارژ وسایل نقلیهٔ برقی خواهد بود، ارتقا دهد. این تحول در مقیاس وسیع می‌تواند الگوی سنتی مصرف برق را متحول کند و سبب ایجاد پیک‌های ناگهانی شود. بنابراین، هوشمندسازی شارژ از طریق اعمال تعرفه‌های زمان‌محور و بهره‌گیری از فناوری‌های مدیریت بار، ازجمله راهکارهای کلیدی برای جلوگیری از فشار مضاعف بر شبکه محسوب می‌شود. در غیر این‌صورت، مشکلاتی همچون افت ولتاژ، خاموشی‌های موضعی یا نیاز به سرمایه‌گذاری‌های سنگین در زیرساخت برق اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. مرور آیین‌نامه‌های جاری صنعت برق نشان می‌دهد برای توسعهٔ ایستگاه‌های شارژ و بهره‌برداری از ناوگان برقی، اصلاحات مقرراتی و تعرفه‌ای ضروری است. این اصلاحات شامل بازنگری در ساختار تعرفه‌ها، تعریف کد تعرفهٔ مخصوص برای ناوگان عمومی برقی و تکمیل آیین‌نامه‌های فنی اتصال به شبکه است. در صورت ادامه استفاده از تعرفه‌های عمومی یا دسته‌بندی آن تحت عنوان «سایر مصارف»، جذابیت اقتصادی برای سرمایه‌گذاران در ایجاد زیرساخت‌های شارژ عمومی کاهش خواهد یافت و روند نفوذ حمل‌ونقل برقی به‌کندی پیش خواهد رفت.

مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد ناوگان برقی در مقایسه با وسایل نقلیهٔ سنتی از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر است، به‌ویژه در بلندمدت. از سوی دیگر، کاهش آلایندگی هوا و بهبود کارایی انرژی ازجمله پیامدهای مثبت این تغییر است که به بهبود کیفیت زندگی شهری کمک خواهد کرد. این ترکیب از مزایا، توجیه قوی برای اعمال اصلاحات ساختاری و سیاست‌های حمایتی در دو

بخش انرژی و حمل‌ونقل ایجاد می‌کند. با این‌حال، در کشورهای درحال‌توسعه، چالش‌هایی نظیر کیفیت پایین شبکهٔ توزیع و کمبود منابع مالی، موانع عمده‌ای محسوب می‌شوند. این کشورها برای توسعهٔ ناوگان برقی نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان و همکاری چندجانبه میان دولت، بخش خصوصی و نهادهای مالی بین‌المللی هستند.

ادغام گستردهٔ ناوگان عمومی برقی نباید بدون برنامه‌ریزی دقیق و به صورت ضربتی انجام شود. تجربهٔ کشورهای پیشرو مانند چین، برخی کشورهای اروپایی و ایالات متحده نشان داده است که توسعهٔ گام‌به‌گام و پایش مداوم شرایط شبکه، علاوه بر کاهش ریسک‌های سرمایه‌گذاری، پذیرش اجتماعی و اقتصادی این تحول را نیز تسهیل خواهد کرد. در این راستا، برخی از اقدامات پیشنهادی شامل بازنگری ساختار تعرفه‌ای، تدوین کد تعرفهٔ مستقل، توسعهٔ ایستگاه‌های شارژ، مدیریت هوشمند بار، تقویت مقررات فنی و ارتقای استانداردهای ایمنی است. در زمینهٔ اصلاح ساختار تعرفه‌ای، پیشنهاد می‌شود که وزارت نیرو و نهادهای قانون‌گذار تعرفه‌ای اختصاصی برای ناوگان حمل‌ونقل عمومی برقی، به‌ویژه اتوبوس‌ها و تاکسی‌ها، تعریف کنند. این اقدام علاوه بر ایجاد شفافیت در هزینه‌های بهره‌برداری، انگیزهٔ سرمایه‌گذاران خصوصی را نیز افزایش خواهد داد. همچنین، اعمال تعرفه‌های زمان‌محور (ToU) با نرخ‌های ارزان‌تر در ساعت‌های کم‌بار می‌تواند به کاهش هزینهٔ برق برای اپراتورهای ناوگان برقی و جلوگیری از شکل‌گیری پیک‌های جدید کمک کند.

در حوزهٔ توسعهٔ زیرساخت، نوسازی و تقویت پست‌های فوق توزیع برای پاسخ‌گویی به نیاز بار بالا در پایانه‌های اتوبوس یا مسیرهای پرتردد درون‌شهری ضروری است. همچنین، ایجاد مکانیزم‌های تشویقی سرمایه‌گذاری، مانند اعطای تسهیلات ارزان‌قیمت، معافیت‌های مالیاتی و امکان دریافت برق از بورس انرژی با نرخ ترجیحی در فاز اولیه، ازجمله راهکارهایی است که می‌تواند مشارکت بخش خصوصی را در احداث ایستگاه‌های شارژ سریع و فوق سریع تسهیل کند. به‌کارگیری فناوری شارژ هوشمند یکی دیگر از راهکارهای مؤثر در مدیریت بار است. نصب شارژرهای مجهز به سیستم‌های کنترل از راه دور و قابلیت برنامه‌ریزی، این امکان را فراهم می‌کند که فرایند شارژ با ساعت‌های کم‌بار شبکه هماهنگ شود. همچنین، این فناوری‌ها امکان بهره‌گیری از الگوهای شارژ واکنش‌گرا (Demand Response) را نیز فراهم می‌کنند. در همین راستا، پیشنهاد می‌شود که پروژه‌های پایلوت V2G (تعامل خودرو و شبکه) در شهرهای بزرگ اجرا شود تا کارایی این فناوری و نیازهای زیرساختی آن ارزیابی شود.

برای تقویت مقررات فنی اتصال به شبکه، تدوین دستورالعمل جامعی برای ایستگاه‌های شارژ ضروری است. این دستورالعمل باید شامل جزئیاتی همچون ظرفیت قراردادی انشعاب، سیستم‌های حفاظتی، مدیریت حرارتی شارژرهای سریع و فوق سریع، الزامات ولتاژ بالا و پروتکل‌های اتصال باشد. همچنین، شرکت‌های توزیع باید ملزم به نظارت و صدور گواهی تطابق شوند تا از بروز مشکلاتی نظیر اضافه‌بار یا افت ولتاژ موضعی جلوگیری شود. در زمینهٔ همکاری میان بخش‌های دولتی و خصوصی، توسعهٔ مدل‌های مشارکت عمومی ـ خصوصی (PPP) می‌تواند راهگشا باشد. این مدل می‌تواند بخشی از بار مالی دولت را کاهش داده و روند پیاده‌سازی زیرساخت‌های حمل‌ونقل برقی را تسریع کند. همچنین، راه‌اندازی پلتفرم‌های جامع اطلاعاتی توسط وزارت نیرو و شهرداری‌ها، به‌اشتراک‌گذاری داده‌های ترافیکی، نقاط با اولویت نصب شارژر و ظرفیت شبکه را برای سرمایه‌گذاران و شرکت‌های حمل‌ونقل تسهیل خواهد کرد. در کنار تمامی این اقدامات، همگام‌سازی توسعهٔ ناوگان برقی با انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند نقش مهمی در کاهش آلایندگی ایفا کند. توسعهٔ نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، به‌ویژه در مناطق گرم و آفتابی، می‌تواند مزایای قابل توجهی برای شبکه و محیط زیست به همراه داشته باشد. همچنین، طراحی سازوکارهای خرید برق سبز از طریق قراردادهای خرید تضمینی (PPA) یا بورس انرژی، علاوه بر کاهش انتشار آلاینده‌های چرخهٔ عمر، گامی مهم در جهت تحقق اهداف کربن‌زدایی خواهد بود.

در نهایت، روند توسعهٔ ناوگان حمل‌ونقل برقی باید گام‌به‌گام و تحت نظارت مستمر صورت گیرد. در مرحلهٔ نخست، تمرکز بر کلان‌شهرها و شهرهای پرجمعیت می‌تواند بیشترین بازدهی زیست‌محیطی و اقتصادی را به همراه داشته باشد. علاوه بر این، سازمان‌های مسئول باید به طور مداوم شاخص‌هایی نظیر ظرفیت شبکه، کیفیت ولتاژ، میزان آمادگی زیرساختی و میزان نفوذ ناوگان برقی را پایش کنند و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، سیاست‌های اجرایی را اصلاح یا توسعه دهند.

منابع

1. Global EV Outlook 2023 – Analysis - IEA [Internet]. [cited 2025 Mar 30]. Available from: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023
2. Update on electric vehicle costs in the United States through 2030 - International Council on Clean Transportation [Internet]. [cited 2025 Mar 30]. Available from: https://theicct.org/publication/update-on-electric-vehicle-costs-in-the-united-states-through-2030/
3. Policies to promote electric vehicle deployment – Global EV Outlook 2021 – Analysis - IEA [Internet]. [cited 2025 Mar 30]. Available from: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/policies-to-promote-electric-vehicle-deployment
4. Figenbaum E. Perspectives on Norway's supercharged electric vehicle policy. Environ Innov Soc Transit. 2017 Dec 1;25:14–34.
5. IRENA, Charging ES, Hosts S. Plug-In Electric Vehicle Handbook for Public Charging. The National Renewable Energy Laboratory (NREL), [Internet]. 2019 [cited 2025 Mar 30];DOE/GO-102:2–20. Available from: www.cleancities.energy.gov%0Awww.irena.org
6. Pamidimukkala A, Kermanshachi S, Rosenberger JM, Hladik G. Barriers and motivators to the adoption of electric vehicles: A global review. Green Energy and Intelligent Transportation. 2024 Apr 1;3(2):100153.
7. Razmjoo A, Nezhad MM, Kaigutha LG, Marzband M, Mirjalili S, Pazhoohesh M, et al. Investigating Smart City Development Based on Green Buildings, Electrical Vehicles and Feasible Indicators. Sustainability 2021, Vol 13, Page 7808 [Internet]. 2021 Jul 13 [cited 2025 Feb 25];13(14):7808. Available from: https://www.mdpi.com/2071-1050/13/14/7808/htm
8. Gnann T, Plötz P, Kühn A, Wietschel M. Modelling market diffusion of electric vehicles with real world driving data – German market and policy options. Transp Res Part A Policy Pract. 2015 Jul 1;77:95–112.
9. Hu Y, Wang Z, Li X. Impact of policies on electric vehicle diffusion: An evolutionary game of small world network analysis. J Clean Prod. 2020 Aug 20;265:121703.
10. Kapustin NO, Grushevenko DA. Long-term electric vehicles outlook and their potential impact on electric grid. Energy Policy. 2020 Feb 1;137:111103.
11. Mo T, Li Y, Lau KT, Poon CK, Wu Y, Luo Y. Trends and Emerging Technologies for the Development of Electric Vehicles. Energies 2022, Vol 15, Page 6271 [Internet]. 2022 Aug 28 [cited 2025 Feb 25];15(17):6271. Available from: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/17/6271/htm
12. Mo T, Lau KT, Li Y, Poon CK, Wu Y, Chu PK, et al. Commercialization of Electric Vehicles in Hong Kong. Energies 2022, Vol 15, Page 942 [Internet]. 2022 Jan 27 [cited 2025 Feb 25];15(3):942. Available from: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/942/htm
13. Novotny A, Szeberin I, Kovács S, Máté D. National Culture and the Market Development of Battery Electric Vehicles in 21 Countries. Energies 2022, Vol 15, Page 1539 [Internet]. 2022 Feb 19 [cited 2025 Feb 25];15(4):1539. Available from: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/4/1539/htm
14. Wang S, Li J, Zhao D. The impact of policy measures on consumer intention to adopt electric vehicles: Evidence from China. Transp Res Part A Policy Pract. 2017 Nov 1;105:14–26.
15. Lou Y, Wang W, Yang X. Customers' Attitude on New Energy Vehicles' Policies and Policy Impact on Customers' Purchase Intention. Energy Procedia. 2017 May 1;105:2187–93.
16. Ashraf Javid M, Ali N, Abdullah M, Campisi T, Shah SAH. Travelers' Adoption Behavior towards Electric Vehicles in Lahore, Pakistan: An Extension of Norm Activation Model (NAM) Theory. J Adv Transp [Internet]. 2021 Jan 1 [cited 2025 Feb 25];2021(1):7189411. Available from: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2021/7189411
17. Hsu CW, Fingerman K. Public electric vehicle charger access disparities across race and income in California. Transp Policy (Oxf). 2021 Jan 1;100:59–67.