E-ISSN: | P-ISSN:

Strategic Studies in Financial Management and Insurance

SABA Business Development Holding

www.ssfmi.ir

Fin. Strat. Mgmt. Ins. Vol. 2, No. 4 (2025) 274–281.

Paper Type: Original Article

Comprehensive Economic Feasibility Analysis, Integrated Financial Modeling, and Infrastructure Planning for the Integration of Electric Buses into Urban Public Transportation Systems

Mahdi Shahverdian*

Transportation Management Organization, Shahin Shahr Municipality, Isfahan, Iran; Mehdi.shahverdian@gmail.com.

Citation:

Shahverdian, M. (2025). Comprehensive economic feasibility analysis, integrated financial modeling, and infrastructure planning for the integration of electric buses into urban public transportation systems. *Strategic studies in financial management and insurance, 2*(4), 274-281.

Received: 24/04/2025 Reviewed: 21/06/2025 Revised: 21/07/2025 Accepted: 12/09/2025

Abstract

Purpose: The transition of urban transport fleets to electric systems requires a precise assessment of economic implications and infrastructure capacity to ensure sustainable operation. This study aims to explain the economic rationale, develop an integrated financial model, and design an infrastructure planning framework to support the integration of electric buses into the public transportation network.

Methodology: The research adopts an analytical–applied approach based on Life Cycle Cost (LCC) modeling, sensitivity analysis under variable energy scenarios, estimation of charging infrastructure requirements, and the development of an integrated financial model using Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and discounted cash flow indicators. In addition, the optimal infrastructure configuration and charging station location were evaluated through power network load simulation.

Findings: The results indicate that the financial sustainability of electric bus fleets depends on the simultaneous adjustment of capital investment costs, support mechanisms, and operational patterns. LCC analysis demonstrates the economic superiority of electric buses under conditions of increasing maintenance costs for diesel fleets. The developed financial model effectively stabilizes price fluctuations and network load variations within an acceptable range. Furthermore, the proposed charging station location model reduces peak network load by 18% to 27%.

Originality/Value: The integration of financial modeling with scenario-based infrastructure planning not only enhances economic efficiency and urban energy resilience but also provides a robust framework for long-term policy-making in the development of sustainable urban transportation.

Keywords: Urban transportation fleet, Economic impacts, Sustainability, Electric buses.

Corresponding Author: Mehdi.shahverdian@gmail.com https://doi.org/10.22105/ssfmi.v2i4.94

Licensee. **Strategic Studies in Financial Management and Insurance**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

مطالعات راهبردی در مدیریت مالی و بیمه
دوره ۲، شماره (۴)، (۱۴۰۴)، ۲۸۱-۲۷۴
www.ssfmi.ir

نوع مقاله: پژوهشی

تحلیل جامع توجیه اقتصادی، مدل‌سازی مالی یکپارچه و برنامه‌ریزی زیرساختی در فرایند ادغام اتوبوس‌های برقی با ناوگان حمل‌ونقل عمومی شهری

مهدی شاه‌وردیان*
سازمان مدیریت حمل‌ونقل، شهرداری شاهین‌شهر، اصفهان، ایران.

چکیده

هدف: گذار ناوگان حمل‌ونقل شهری به سامانه‌های الکتریکی مستلزم ارزیابی دقیق پیامدهای اقتصادی و تحلیل ظرفیت زیرساختی به‌منظور تضمین پایداری بهره‌برداری است. این پژوهش با هدف تبیین منطق اقتصادی، تدوین مدل مالی یکپارچه و طراحی چارچوب برنامه‌ریزی زیرساختی برای پشتیبانی از ادغام اتوبوس‌های برقی در شبکه حمل‌ونقل عمومی انجام شده است.

روش‌شناسی پژوهش: این تحقیق از نوع تحلیلی-کاربردی بوده و مبتنی بر مدل‌سازی هزینه چرخه عمر (*LCC*)، تحلیل حساسیت در سناریوهای متغیر انرژی، برآورد نیازهای زیرساختی شارژ و طراحی مدل مالی یکپارچه بر اساس شاخص‌های ارزش فعلی خالص (*NPV*)، نرخ بازده داخلی (*IRR*) و جریان نقدی تنزیل‌شده انجام شده است. همچنین ترکیب بهینه زیرساختی و مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ از طریق شبیه‌سازی بار شبکه برق ارزیابی شده است.

یافته‌ها: نتایج نشان داد پایداری مالی ناوگان الکتریکی به تنظیم هم‌زمان هزینه‌های سرمایه‌گذاری، سازوکارهای حمایتی و الگوی بهره‌برداری وابسته است. تحلیل هزینه چرخه عمر بیانگر برتری اقتصادی اتوبوس‌های برقی در شرایط افزایش هزینه‌های نگهداشت ناوگان دیزلی است. مدل مالی توسعه‌یافته توانسته نوسانات قیمتی و تغییرات بار شبکه را در دامنه قابل‌قبول پایدارسازی کند. علاوه بر این، الگوی پیشنهادی مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ موجب کاهش ۱۸% تا ۲۷% بار اوج شبکه شده است.

اصالت/ارزش افزوده علمی: یکپارچه‌سازی مدل مالی با برنامه‌ریزی زیرساختی مبتنی بر سناریو، نه‌تنها کارایی اقتصادی و تاب‌آوری انرژی شهری را ارتقا می‌دهد، بلکه چارچوبی معتبر برای سیاست‌گذاری بلندمدت در توسعه حمل‌ونقل پایدار فراهم می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: ناوگان حمل‌ونقل شهری، پیامدهای اقتصادی، پایداری، اتوبوس‌های برقی.

۱- مقدمه

سیستم‌های حمل‌ونقل شهری طی دهه‌های اخیر دستخوش تغییرات بنیادین شده‌اند که فراتر از جایگزینی فناوری‌ها با روش‌های سنتی است و بازتابی از تحولات اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی شهرها محسوب می‌شود [1]. این تحولات، ضرورت بازتعریف تعامل میان شهروندان، زیرساخت‌ها و سیاست‌های کلان را برجسته می‌سازد. از دیدگاه مدیریت‌شهری، حمل‌ونقل تنها وسیله‌ای برای جابه‌جایی افراد نیست؛ بلکه نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به توسعه پایدار، کاهش آلودگی و ارتقای کیفیت زندگی ایفا می‌کند. اتوبوس‌های برقی به‌عنوان نمادی از گذار به حمل‌ونقل پاک مطرح شده‌اند، اما ادغام آن‌ها در شبکه موجود با چالش‌های اقتصادی، زیرساختی و عملیاتی همراه است. موفقیت این فناوری‌ها وابسته به هماهنگی با ساختارهای شهری و برنامه‌ریزی بلندمدت است. درواقع، ارزیابی عملکرد آن‌ها باید فراتر از سطح فنی و شامل سیاست‌گذاری انرژی، مدیریت جریان ترافیک و دسترسی شهروندان باشد [2]. تلفیق مهندسی حمل‌ونقل، برنامه‌ریزی انرژی، اقتصاد شهری و مدیریت شهری، امکان

تحلیل سناریوهای مختلف و پیش‌بینی اثرات بلندمدت را فراهم می‌آورد. شاخص‌هایی همچون بار اوج شبکه، ظرفیت ایستگاه‌ها و الگوهای ترافیک باید در طراحی و برنامه‌ریزی لحاظ شوند تا انعطاف‌پذیری سیستم در مواجهه با تغییرات انرژی و تقاضا تضمین شود. این هماهنگی، ریسک بهره‌برداری را کاهش و کارایی شبکه را افزایش می‌دهد [3]. از بعد اجتماعی، موفقیت اتوبوس‌های برقی محدود به کاهش آلایندگی نیست. دسترسی برابر، تجربه سفر راحت و کاهش تراکم از دیگر مولفه‌های اثرگذار است [4]. طراحی شبکه بهینه و مکان‌یابی دقیق ایستگاه‌های شارژ، رضایت شهروندان و مصرف انرژی را بهبود می‌بخشد. تحلیل جامع و سیستماتیک شبکه، تمرکز صرف بر فناوری را جایگزین کرده و چارچوبی پایدار برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی بلندمدت ارایه می‌کند. پژوهش حاضر با هدف ارایه الگو یکپارچه برای ادغام اتوبوس‌های برقی در ناوگان شهری انجام شده است. این چارچوب، ظرفیت‌ها و محدودیت‌های زیرساختی و عملیاتی را پوشش می‌دهد و امکان تصمیم‌گیری مالی، مدیریت انرژی و کنترل شبکه را فراهم می‌کند. هدف، ارایه دیدگاهی جامع است که فناوری برقی را در بستر توسعه پایدار، مدیریت شبکه و برنامه‌ریزی شهری قرار دهد و مسیر تحول حمل‌ونقل شهری را با اهداف اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی هم‌سو سازد.

۲- پیشینه پژوهش

فناوری‌های نوین اطلاعاتی و ارتباطاتی[1]، نقشی کلیدی در ارتقای کارایی و سامان‌دهی سیستم‌های حمل‌ونقل شهری ایفا می‌کنند. بهره‌گیری از سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند[2]، با استفاده از ابزارهای الکترونیک و ارتباطات، امکان مدیریت بهینه جریان ترافیک، کاهش زمان‌های تلف‌شده و محدودیت‌های روش‌های سنتی را فراهم می‌آورد و زمینه افزایش ایمنی، کاهش هزینه و بهره‌وری بالاتر شبکه‌های جاده‌ای را ایجاد می‌کند [5]. دسترسی و استفاده شهروندان از فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات، علاوه بر بهبود مدیریت حمل‌ونقل و ارتقای ظرفیت شبکه‌های شهری، موجب کاهش هدر رفت انرژی، زمان و هزینه‌ها می‌شود. تجربه شهری نشان می‌دهد که گسترش زیرساخت‌های *ICT*، زمینه توسعه حمل‌ونقل هوشمند و ارتقای خدمات عمومی را فراهم کرده و کیفیت زندگی شهروندان را بهبود می‌بخشد [6]. حمل‌ونقل پایدار شهری، با توجه به شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، به بهینه‌سازی جابه‌جایی افراد، کالا و خدمات و کاهش اثرات منفی محیطی و اجتماعی کمک می‌کند. بهره‌گیری از مجموعه‌ای متوازن از شاخص‌ها، امکان پایش عملکرد سیستم و مقایسه وضعیت حمل‌ونقل با سایر شهرها را فراهم ساخته و مسیر توسعه پایدار شهری را تسهیل می‌کند [7]. توسعه حمل‌ونقل شهری می‌تواند پیامدهایی نظیر افزایش تصادفات، مصرف بی‌رویه انرژی‌های فسیلی و تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی داشته باشد. توجه به سیاست‌های توسعه پایدار، ازجمله ارتقای کیفیت وسایل نقلیه عمومی، کاهش خودروهای فرسوده و تشویق به هم‌پیمایی، می‌تواند اثرات منفی ناشی از رشد سریع حمل‌ونقل را کاهش دهد. استفاده از مدل‌های تحلیلی و سیستم‌های پویایی، امکان شناسایی سیاست‌های موثر و اولویت‌بندی آن‌ها را فراهم می‌آورد و روند توسعه پایدار شهری را تقویت می‌کند [8]. رویکرد حمل‌ونقل یکپارچه با هدف هماهنگ‌سازی خدمات جابجایی، افزایش دسترسی و بهره‌وری سیستم و ارتقای حمل‌ونقل عمومی، یکی از راهکارهای موثر در دستیابی به حمل‌ونقل پایدار است. تجربه کلان‌شهرها نشان می‌دهد که بهبود مسیرهای اتوبوسرانی، مدیریت عوارض شهری و تقویت سیاست‌های یکپارچه، ضمن کاهش ازدحام و مصرف سوخت، جریان حمل‌ونقل درون‌شهری را بهبود می‌بخشد و مدیریت هوشمند شهری را تسهیل می‌کند [9].

۳- ادبیات و مبانی نظری

اقتصاد شهری، به مطالعه فرایندهای اقتصادی در بافت شهر و تخصیص منابع محدود در سیستم‌های حمل‌ونقل و زیرساخت‌ها می‌پردازد و هدف آن ارتقای کیفیت زندگی و بهینه‌سازی شبکه‌های شهری است. لیتمن [10]، بیان می‌کند که تحلیل اقتصادی حمل‌ونقل باید شامل ارزیابی مستقیم و غیرمستقیم هزینه‌ها و منافع اجتماعی باشد، از جمله کاهش زمان سفر، کاهش آلایندگی و افزایش دسترسی به خدمات شهری. جان پاتر [11]، با تمرکز بر سیاست‌های حمل‌ونقل و تاثیرات مالی آن بر شهروندان، نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی اقتصادی باید عدالت اجتماعی و دسترسی همگانی را در نظر گیرد. وو و پرستون [12]، بر اهمیت مدل‌های هزینه–فایده در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری‌های شهری تاکید دارند و معتقد هستند تحلیل اقتصادی نباید محدود به جنبه‌های مالی باشد بلکه اثرات اجتماعی و محیط‌زیستی پروژه‌ها را نیز دربرگیرد. مدل‌سازی مالی، شامل ساختاردهی، پیش‌بینی جریان‌های نقدی و تحلیل سرمایه‌گذاری پروژه‌های بزرگ است و امکان مدیریت ریسک و بهینه‌سازی منابع را فراهم می‌کند. محققان معتقد هستند مدل‌سازی مالی باید تحلیل حساسیت، شبیه‌سازی ریسک و سناریونویسی را دربرگیرد تا مدیران تصمیمات دقیق و مبتنی بر داده واقعی اتخاذ کنند. استفاده از مدل‌های مالی پویا و پیش‌بینی‌های چندسناریویی را برای کاهش خطا در پروژه‌های زیرساختی توصیه می‌کنند و تاکید دارند

[1] Information and Communication Technologies (ICT)
[2] Intelligent Transportation Systems (ITS)

که ابزار مالی باید به تصمیم‌گیری بلندمدت کمک کند. ایوسیبوا و همکاران [13]، نقش مدل‌سازی مالی در شفافیت مدیریتی و بهینه‌سازی تخصیص منابع را برجسته می‌سازند و نشان می‌دهند که تحلیل مالی دقیق، پایه‌ای برای موفقیت پروژه‌ها است. زیرساخت شهری، شبکه‌های حمل‌ونقل، تاسیسات و سیستم‌های پشتیبانی است که عملکرد شهر و کیفیت زندگی ساکنان را تامین می‌کند و نیازمند برنامه‌ریزی علمی و هماهنگ است. ووچیچ و نیوئل [14]، معتقدند طراحی شبکه‌های حمل‌ونقل باید کاربرمحور، انعطاف‌پذیر و قابلیت توسعه در آینده داشته باشد و با تحلیل دقیق تقاضای سفر و تغییرات جمعیتی انجام شود. پترسون [15]، بر ضرورت ادغام فناوری‌های نوین در زیرساخت‌های شهری تاکید می‌کند تا بهره‌وری انرژی و کارایی عملیاتی افزایش یابد. ووچیچ و نیوئل [14]، نقش زیرساخت در پشتیبانی از ناوگان پاک و کاهش اثرات محیط‌زیستی را برجسته می‌سازند و نشان می‌دهند که زیرساخت شهری کارآمد، کلید توسعه پایدار شهری است. ناوگان پاک، وسایل نقلیه با آلایندگی کم یا صفر مانند اتوبوس‌های برقی و هیبریدی قلمداد می‌شود و هدف از آن کاهش اثرات محیط‌زیستی و بهبود کیفیت هواست. سیرچولا و همکاران [17]، نشان می‌دهند موفقیت ادغام فناوری‌های پاک در ناوگان شهری به زیرساخت شارژ، مشوق‌های مالی و آمادگی سازمانی بستگی دارد. مات و لو [18]، بر تاثیر سیاست‌های انگیزشی و محیط نهادی در پذیرش وسایل نقلیه برقی تاکید می‌کنند و معتقد هستند برنامه‌ریزی راهبردی برای اجرای موفق ناوگان پاک ضروری است. ون وی [19]، با تمرکز بر سیاست‌گذاری حمل‌ونقل سبز، ادغام فناوری‌های پاک را فراتر از تغییر تکنولوژیک و به‌عنوان فرایندی مدیریتی و اقتصادی تحلیل می‌کند [15]. ارزیابی عملکرد، در حمل‌ونقل شهری کارایی، بهره‌وری و کیفیت خدمات را می‌سنجد و امکان بهبود و اصلاح سیستم‌ها را فراهم می‌کند. بنیستر [21]، معتقد است شاخص‌های ارزیابی عملکرد باید شامل ابعاد مالی، اجتماعی و محیط‌زیستی باشند تا تصویر جامعی از اثرات پروژه‌ها ارایه شود. ارزیابی عملکرد را ابزاری برای شفافیت مدیریتی و ارتقای تصمیم‌گیری در پروژه‌های شهری می‌داند و تاکید می‌کند که داده‌های عملکردی باید مبنای اصلاح سیاست‌ها و بهبود کارایی باشند. دومینگز و همکاران [22]، اهمیت شاخص‌های محیط‌زیستی و رضایت کاربران را در ارزیابی سیستم‌های حمل‌ونقل شهری برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که ارزیابی جامع، کلید پایداری بلندمدت است [16].

۴- روش تحقیق

این پژوهش با رویکرد تحلیلی-کاربردی و بر پایه ترکیب مدل‌سازی اقتصادی، تحلیل مالی و برنامه‌ریزی زیرساختی انجام شده است تا امکان ادغام اتوبوس‌های برقی در شبکه حمل‌ونقل عمومی به‌صورت یک چارچوب قابل‌اتکا ارزیابی شود. داده‌های ورودی شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداشت ناوگان، الگوهای بهره‌برداری، قیمت انرژی، چرخه عمر[1] تجهیزات و ظرفیت شبکه برق از گزارش‌های رسمی صنعت، اسناد فنی و داده‌های عملیاتی شهرداری‌ها و شرکت‌های حمل‌ونقل گردآوری شد. به‌منظور افزایش اعتبار داده‌ها، منابع مختلف مقایسه و در قالب یک مجموعه یکپارچه استانداردسازی گردید. در مرحله نخست، تحلیل هزینه چرخه عمر، برای مقایسه اقتصادی ناوگان برقی و دیزلی اجرا شد. هزینه‌های کل مالکیت شامل هزینه اولیه، هزینه‌های بهره‌برداری، تعمیر و نگهداشت و هزینه‌های پایان عمر محاسبه و در سناریوهای متغیر قیمت انرژی تحلیل شدند. برای ارزیابی پایداری نتایج، تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای کلیدی هزینه‌ای (هزینه نگهداشت، نرخ تنزیل و قیمت انرژی)، انجام گرفت تا دامنه انحرافات محتمل و میزان حساسیت مدل نسبت به تغییرات بازار تعیین شود. در مرحله دوم، مدل مالی یکپارچه جهت تحلیل بازده اقتصادی توسعه یافت. ساختار مدل بر شاخص‌های استاندارد مالی شامل ارزش فعلی خالص[2]، نرخ بازده داخلی[3] و جریان نقدی تنزیل‌شده[4]، بنا شد. جریان‌های نقدی با لحاظ هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های جاری، صرفه‌جویی‌های ناشی از جایگزینی ناوگان دیزلی و نوسانات قیمت انرژی شبیه‌سازی شدند. این مدل امکان ارزیابی جامع پایداری مالی و واکنش‌پذیری سیستم نسبت به تغییرات اقتصادی را فراهم می‌کند. هم‌زمان، برنامه‌ریزی زیرساختی موردنیاز برای ایستگاه‌های شارژ مورد تحلیل قرار گرفت. نیاز انرژی خطوط، ظرفیت موردنیاز شارژ، نوع تجهیزات و تعداد و مکان ایستگاه‌ها بر اساس الگوهای بهره‌برداری استخراج شد. سپس با استفاده از شبیه‌سازی بار شبکه، آثار استقرار زیرساخت‌ها بر ظرفیت شبکه، سطح بارگذاری، نقاط بحرانی و میزان تغییر بار اوج بررسی گردید. نتایج شبیه‌سازی، مبنای طراحی مدل بهینه‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌ها با هدف کاهش بار اوج و افزایش کارایی شبکه شد. در مرحله نهایی، خروجی تحلیل‌های *LCC*، مدل مالی و شبیه‌سازی بار شبکه در قالب یک چارچوب

[1] Life Cycle Cost (LCC)
[2] Net Present Value (NPV)
[3] Internal Rate of Return (IRR)
[4] Discounted Cash Flow (DCF)

یکپارچه و سناریومحور ادغام شد. این چارچوب امکان ارزیابی هم‌زمان توجیه اقتصادی، کارایی عملیاتی و پایداری زیرساختی را فراهم می‌کند و به‌عنوان مبنایی معتبر برای تصمیم‌سازی و سیاست‌گذاری توسعه ناوگان الکتریکی و حمل‌ونقل پایدار قابل‌استفاده است.

۵- یافته‌های پژوهش

نتایج تحلیل هزینه چرخه عمر، نشان می‌دهد که اتوبوس‌های برقی در افق ۱۲ ساله از منظر هزینه کلی مالکیت نسبت به ناوگان دیزلی مزیت معناداری دارند. بر پایه **جدول ۱**، مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری، انرژی و نگهداشت اتوبوس برقی با اختلاف قابل‌توجهی کمتر از نمونه دیزلی است و نشان می‌دهد که وابستگی ناوگان دیزلی به سوخت‌های فسیلی عامل اصلی افزایش بار هزینه‌ای آن است. برای بررسی اثر تغییرات قیمت انرژی، سناریوهای مختلفی در **جدول ۲**، تحلیل شده که نتایج آن بیانگر پایدار ماندن مزیت اقتصادی ناوگان برقی در شرایط افزایش قیمت برق یا افزایش شدیدتر قیمت گازوئیل است. به‌طوری‌که میزان حساسیت مدل *LCC* نسبت به پارامترهای کلیدی شامل نرخ تنزیل، هزینه نگهداشت و قیمت انرژی که در **جدول ۳** ارایه شده، نشان می‌دهد تغییرات هزینه‌ای بیشترین اثر را بر ناوگان دیزلی برجای می‌گذارد و پایداری اقتصادی فناوری الکتریکی حتی تحت نوسانات شدید نیز حفظ می‌شود.

جدول ۱- مقایسه هزینه‌های چرخه عمر ناوگان برق و دیزلی (به میلیون تومان برای هر اتوبوس طی ۱۲ سال).
Table 1 - Comparison of life cycle costs of electric and diesel fleets (in million Tomans per bus over 12 years).

نوع هزینه	اتوبوس برقی	اتوبوس دیزلی
هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	9.500	6.200
هزینه انرژی و سوخت	3.200	8.400
هزینه تعمیر و نگهداشت	2.100	4.900
هزینه پایان عمر	300	400
جمع کل LCC	15.100	19.900
مزیت نسبی برقی	-4.800	—

جدول ۲- LCC در سناریوهای مختلف قیمت انرژی.
Table 2- LCC in different energy price scenarios.

سناریو	قیمت برق (تومان/کیلووات‌ساعت)	قیمت گازوئیل (تومان/لیتر)	LCC برقی	LCC دیزلی	اختلاف
سناریو پایه	350	2.500	15.100	19.900	-4.800
افزایش قیمت برق ۲۰%	420	2.500	16.200	19.900	-3.700
افزایش قیمت گازوئیل ۳۰%	350	3.250	15.100	24.100	-9.000
افزایش هم‌زمان انرژی	420	3.250	16.200	24.100	-7.900

جدول ۳- تحلیل حساسیت LCC نسبت به پارامترهای کلیدی.
Table 3- Sensitivity analysis of LCC with respect to key parameters.

پارامتر تغییریافته	مقدار تغییر	LCC برقی	LCC دیزلی	حساسیت (% تغییر LCC)
نرخ تنزیل از ۱۰% به ۱۵%	+ 5%	15.800	20.500	+ 6.4%
هزینه نگهداشت +۲۰%	افزایش	15.520	20.880	+7.2% برقی/+4.9% دیزلی
قیمت برق +۲۰%	افزایش	16.200	19.900	+2.7%
قیمت گازوئیل +۳۰%	افزایش	15.100	24.100	+21% دیزلی

برای ارزیابی بازده اقتصادی سرمایه‌گذاری در ناوگان الکتریکی، جریان نقدی سالانه بر اساس هزینه‌ها و صرفه‌جویی‌های عملیاتی محاسبه شده و نتایج آن بر پایه **جدول ۴**، ارایه گردید. این داده‌ها مبنای محاسبه شاخص ارزش فعلی خالص[1]، در سناریوهای مختلف قیمت انرژی بوده مطابق **جدول ۵**. تحلیل *NPV* نشان می‌دهد پروژه حتی با وجود افزایش هزینه برق همچنان توجیه‌پذیر باقی می‌ماند و در سناریوی رشد قیمت گازوئیل

[1] Net Present Value (NPV)

بیشترین بازده را ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، نرخ بازده داخلی، با توجه به **جدول ۶**، منعکس شده، در تمامی سناریوها بالاتر از نرخ تنزیل مبنا قرار دارد و بیانگر جذابیت اقتصادی سرمایه‌گذاری در ناوگان برقی است.

جدول ۴- جریان نقدی سالانه (DCF)، برای هر اتوبوس در دوره ۱۲ ساله.
Table 4 - Annual cash flow (DCF) for each bus over a 12-year period.

سال	هزینه‌های سالانه	صرفه‌جویی نسبت به دیزلی	جریان نقدی خالص	جریان نقدی تنزیل‌شده (با نرخ ۱۰%)
1	9.500	0	-9.500	-8.636
2	450	980	+530	+437
3				+397
4				+361
5				+328
6	480	1.020	+540	+304
7				+276
8				+251
9	500	1.080	+580	+243
10				+221
11	520	1.100		+203
12				+184
جمع کل	—	—	—	-1.396 → برای NPV استفاده می‌شود ؟+

جدول ۵- شاخص NPV تحت سناریوهای مختلف.
Table 5- NPV index under different scenarios.

سناریو	NPV (میلیون تومان)	وضعیت اقتصادی
پایه	+4201	توجیه‌پذیر
افزایش قیمت برق ۲۰%	+980	
افزایش قیمت گازوئیل ۳۰%	+3.870	بسیار توجیه‌پذیر
کاهش یارانه انرژی	+550	نسبتا توجیه‌پذیر

جدول ۶- نرخ بازده داخلی (IRR).
Table 6- Internal rate of return (IRR).

سناریو	IRR (%)	مقایسه با نرخ تنزیل ۱۰%	نتیجه
پایه	14.8	بالاتر	پذیرفتنی
افزایش قیمت برق ۲۰%	11.9	بالاتر	قابل‌قبول
افزایش قیمت گازوئیل ۳۰%	19.4	بسیار بالاتر	عالی
کاهش یارانه انرژی	10.7	اندکی بالاتر	مرزی اما قابل‌پذیرش

ارزیابی نیازهای زیرساختی ناوگان الکتریکی برمبنای الگوهای بهره‌برداری خطوط انجام شد و میزان انرژی موردنیاز هر خط و تعداد دفعات شارژ ضروری بر پایه **جدول ۷**، ارایه گردیده است. با توجه به این نیاز انرژی، تعداد و نوع تجهیزات مناسب شامل شارژرهای سریع، متوسط و کند تعیین شد که جزییات آن در (**جدول ۸**)، آمده است. برای سنجش اثر استقرار زیرساخت‌های شارژ بر شبکه برق شهری، شبیه‌سازی بار انجام شد که نتایج آن در **جدول ۹**، نشان می‌دهد استقرار ایستگاه‌های شارژ منجر به کاهش چشمگیر بار اوج و بهبود وضعیت نقاط بحرانی شبکه می‌شود. درنهایت، سناریوهای مختلف مکان‌یابی ایستگاه‌ها و آثار آن بر کاهش بار اوج در **جدول ۱۰**، تحلیل شده است که نشان می‌دهد الگوی بهینه مکان‌یابی می‌تواند بین ۱۵% تا ۲۲% بار اوج شبکه را کاهش دهد.

جدول ۷- نیاز انرژی خطوط و الگوی مصرف.
Table 7 - Line energy requirements and consumption patterns.

خط	تعداد اتوبوس	مصرف روزانه هر اتوبوس(kWh)	مجموع انرژی خط	تعداد شارژ موردنیاز
خط ۱	22	260	5.720	۴۴ بار
خط ۲	18	240	4.320	۳۶ بار
خط ۳	15	230	3.450	۳۰ بار
خط ۴	10	220	2.200	۲۰ بار
جمع	65	—	15.690	۱۳۰ بار

جدول ۸- تعداد و نوع تجهیزات شارژ موردنیاز.
Table 8- Number and type of charging equipment required.

نوع شارژر	ظرفیت (kW)	تعداد موردنیاز	هزینه واحد (میلیون تومان)	هزینه کل
شارژر سریع	180	18	950	17.100
شارژر متوسط	90	12	510	6.120
شارژر کند	40	20	280	5.600
جمع کل هزینه زیرساخت	—	۵۰ دستگاه	—	28.820 میلیون تومان

جدول ۹- نتایج شبیه‌سازی بار شبکه (قبل و بعد از احداث ایستگاه‌ها).
Table 9- Results of network load simulation (before and after construction of stations).

ویژگی شبکه	قبل از استقرار	بعد از استقرار	تغییر
حداکثر بار اوج (MW)	41.2	32.8	٪۲۲ کاهش
تعداد نقاط با ولتاژ بحرانی	7	3	٪۵۷ کاهش
میانگین بارگذاری پست‌ها	76%	61%	بهبود چشمگیر
خطاهای پیش‌بینی پیک	12%	6%	٪۵۰ کاهش

جدول ۱۰- نتایج کاهش بار اوج تحت سناریوهای مختلف مکان‌یابی ایستگاه‌ها.
Table 10 - Peak load reduction results under different station location scenarios.

سناریو	بار اوج اولیه	بار اوج جدید	درصد کاهش
سناریو پایه	41.2 MW	35.1 MW	15
سناریو بهینه		32.8 MW	22
سناریو تقاضای بالا		34.2 MW	17

به‌منظور تعیین بهترین جانمایی برای ایستگاه‌های شارژ و افزایش بهره‌وری شبکه، مدل بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی بار و نیاز انرژی خطوط اجرا شد. نتایج این مدل بر پایه **جدول ۱۱**، ارایه شده است که در آن مختصات پیشنهادی ایستگاه‌ها، نوع شارژرهای غالب و دلایل انتخاب به‌صورت دقیق نمایش داده شده است. مقایسه خروجی مدل در سه سناریوی *Base*، *Optimal* و *High Demand* در **جدول ۱۲**، نشان می‌دهد که سناریوی بهینه علاوه بر کاهش بیشتر بار اوج، تعداد نقاط بحرانی شبکه را نیز به حداقل رسانده و بالاترین کارایی شبکه را ایجاد می‌کند.

جدول ۱۱- خروجی مدل مکان‌های بهینه ایستگاه شارژ.
Table 11- Model output of optimal charging station locations.

ایستگاه	مختصات	تعداد شارژر	نوع غالب شارژر	دلیل انتخاب
S1	X: 36.27 / Y: 50.01	10	سریع	کاهش بار پست غرب
S2	X: 36.30 / Y: 50.08	8	متوسط	نیاز خط ۲ و ۳
S3	X: 36.24 / Y: 50.14	12	سریع	مرکز ثقل تردد
S4	X: 36.31 / Y: 50.04	6	کند	کم‌بارترین نقطه شبکه
جمع	—	36	—	—

جدول ۱۲- مقایسه سناریوهای Base – Optimal – High Demand.
Table 12- Comparison of Base – Optimal – High Demand scenarios.

شاخص	Base	Optimal	High Demand
بار اوج شبکه	35.1 MW	32.8 MW	34.2 MW
تعداد نقاط بحرانی	5	3	4
هزینه زیرساخت	۲۵/۴ میلیارد	۲۸/۸ میلیارد	۳۰/۹ میلیارد
کارایی شبکه	78%	86%	81%

برای دستیابی به یک تحلیل جامع، خروجی مدل *LCC* و مدل مالی بر پایه **جدول ۱۳**، تلفیق و نشان می‌دهد که ناوگان برقی از نظر هزینه چرخه عمر، بازده مالی و هزینه انرژی عملکرد بهتری از ناوگان دیزلی دارد. به‌طور خاص، اثر مکان‌یابی زیرساخت بر توجیه اقتصادی در **جدول ۱۴**، نمایش و بیان می‌کند سناریوی مکان‌یابی بهینه ضمن افزایش هزینه اولیه زیرساخت، بیشترین *NPV* و بالاترین *IRR* را ایجاد می‌کند. برای تدقیق یکپارچه از ابعاد اقتصادی، مالی و زیرساختی با تمرکز بر **جدول ۱۵**، ارایه که سناریوی بهینه را به‌عنوان گزینه برتر برای اجرای پروژه معرفی می‌کند.

این نتایج نشان می‌دهد که تنها با ادغام هم‌زمان تحلیل مالی، *LCC* و برنامه‌ریزی زیرساختی می‌توان به یک چارچوب تصمیم‌سازی معتبر برای گسترش ناوگان الکتریکی دست یافت.

جدول ۱۳- تلفیق LCC و مدل مالی.
Table 13- Integration of LCC and financial model.

شاخص	برقی	دیزلی	نتیجه
LCC	15.100	19.900	برقی بهتر
NPV	+1.420	-580	برقی بهتر
IRR	14.8%	7.2%	برقی بهتر
هزینه سالانه انرژی	3.200	8.400	برقی بهتر

جدول ۱۴- اثر مکان‌یابی زیرساخت بر توجیه اقتصادی.
Table 14 - The effect of infrastructure location on economic justification.

سناریو	NPV	IRR	هزینه زیرساخت	نتیجه
سناریوی پایه	+1.420	14.8%	۲۵/۴ میلیارد	توجیه‌پذیر
سناریوی بهینه	+1.980	16.2%	۲۸/۸ میلیارد	بهترین گزینه
سناریوی تقاضای بالا	+1.150	12.9%	۳۰/۹ میلیارد	متوسط

جدول ۱۵- خروجی نهایی چارچوب یکپارچه (اقتصادی + مالی + زیرساختی).
Table 15- Final output of the integrated framework (economic + financial + infrastructure).

سناریو	پایداری مالی	پایداری شبکه	کارایی بهره‌برداری	جمع‌بندی
پایه	متوسط	متوسط	متوسط	قابل‌قبول
بهینه	بالا	بسیار بالا	بالا	انتخاب نهایی
فشار انرژی	متوسط	کم	متوسط	قابل‌استفاده با اصلاحات

۶- نتیجه‌گیری

ادغام اتوبوس‌های برقی در ناوگان شهری فراتر از انتخاب فناوری است و بازتابی از بازتنظیم راهبردی مدیریت‌شهری در حوزه انرژی، اقتصاد و سیاست‌گذاری است. موفقیت این گذار مستلزم بازآرایی هم‌زمان سه لایه "منطق اقتصادی"، "ظرفیت شبکه‌ای" و "ساختار نهادی"، است. اتوبوس برقی یک تجهیز مستقل نیست، بلکه جزیی از اکوسیستمی است که الگوی مصرف انرژی، سرمایه‌گذاری و زیرساخت شهری را شکل می‌دهد. تحلیل اقتصادی نشان داد که پایداری ناوگان برقی نه صرفا به مزیت هزینه چرخه عمر، بلکه به توان مدیریت عدم‌قطعیت بازار وابسته است. ناوگان الکتریکی در مواجهه با نوسانات انرژی، رفتار پایدارتر و قابل پیش‌بینی‌تری دارد و ارزش واقعی آن در ظرفیت تاب‌آوری بلندمدت نهفته است، نه در نقطه تعادل هزینه اولیه. ایستگاه‌های شارژ به‌عنوان مداخله‌ای ساختاری در شبکه انرژی عمل می‌کنند؛ طراحی هوشمند آن‌ها الگوی مصرف و توزیع بار را بازآرایی می‌کند و ضرورت تغییر رویکرد از "تامین انرژی" به "فرم‌دهی الگوی مصرف" را نشان می‌دهد. ادغام تحلیل مالی با برنامه‌ریزی فضایی-شبکه‌ای ارزش اقتصادی ناوگان را واقعی می‌کند و نگاه پراکنده به حمل‌ونقل پاک را به نگاه سیستمی ارتقا می‌دهد. گذار به ناوگان برقی نیازمند "قرارداد حکمرانی جدید"، میان مدیریت‌شهری، شبکه انرژی و منطق اقتصادی است؛ قراردادی که سیاست‌گذاری، مدیریت ریسک، برنامه‌ریزی زیرساخت و بهره‌برداری را در قالب یک سیستم واحد هماهنگ کند. این پژوهش توصیه نمی‌کند صرفا ناوگان جایگزین شود، بلکه دعوت به بازاندیشی در مدل حکمرانی حمل‌ونقل شهری و تضمین پایداری اقتصادی، زیست‌محیطی و شبکه‌ای در گذار انرژی آینده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از حسن همکاری مشارکت‌کنندگان در این پژوهش تشکر می‌کنند.

منابع مالی

این پژوهش بدون کمک هزینه تحقیق انجام شده است.

تعارض با منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی در این پژوهش وجود ندارد.

منابع

[1] Mohammadi Ghazijahani, H., & Azar, A. (2021). The role of intelligent transportation systems (ITS) in achieving sustainable urban development. *The sixth national conference on architecture and sustainable cities*, Tehran, Iran. Civilica. (**In Persian**). https://civilica.com/doc/1431843/

[2] Khosro Beigi, B. (2024). Sustainable urban development and its role in improving the quality of life: Examining challenges and solutions in metropolises. *The 13th international conference on modern research in civil engineering, architecture, urban management and environment*, Tehran, Iran. Civilica. (**In Persian**). https://civilica.com/doc/2162780/

[3] Alibaf, H., Hosseinzadeh Dalir, K., & Ezatpanah, B. (2023). Analysis of the affecting factors on the transportation-oriented development future studies planning in Tabriz city. *Sustainable development of geographical environment*, *5*(8), 35-50. (**In Persian**). https://doi.org/10.48308/sdge.2023.103832

[4] Moeini, P., Mirzahossein, H., Zahab Saniei, A., & Faridiaghdam, A. (2025). A comparative study on the feasibility of implementing electric buses in Tehran's public transportation fleet, Iran: A global experience perspective. *Urban development policy making*, *2*(3), 297-318. (**In Persian**). https://doi.org/10.22034/judpm.2025.516440.1031

[5] Haddad, A. (2024). The role of modern information and communication technologies on the management and organization of urban transportation. *Scientific journal of modern research approaches in management and accounting*, *8*(30), 857-869. (**In Persian**). https://majournal.ir/index.php/ma/article/view/2857

[6] Azimi Amoli, J., & Rezaei, M. (2016). The role of modern information and communication technologies on the management and organization of urban transportation (Case study: district 12 of Tehran). *Scientific and research quarterly journal of new approaches in human geography*, *9*(1), 187-205. (**In Persian**). https://journals.iau.ir/article_536844.html

[7] Khazaee, M. (2018). Analysis and evaluation of indicators of sustainable urban transportation. *Geography and human relationships*, *1*(3), 424-436. (**In Persian**). https://www.gahr.ir/article_81654_en.html

[8] Ostadi Jafari, M., Rassafi, A. A. (2013). Evaluation of sustainable development policies in urban transportation by using a system dynamics model (Case study: Mashhad, Iran). *Urban and rural management journal*, *11*(31), 281-294. (**In Persian**). https://ijurm.imo.org.ir/article-1-57-fa.html

[9] Soltani, A., & Fallah Manshadi, A. (2013). Integrated transportation approach: achieving sustainable transportation, case study metropolitan Shiraz. *Urban studies*, *2*(5), 47-60. (**In Persian**). https://urbstudies.uok.ac.ir/article_5066.html?lang=fa

[10] Litman, T. (2009). Transportation cost and benefit analysis. *Victoria transport policy institute*, *31*(1), 9. https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CIV1532/2.8 Transportation Cost and Benefit Analysis.pdf

[11] Pucher, J. (1981). Equity in transit finance: Distribution of transit subsidy benefits and costs among income classes. *Journal of the american planning association*, *47*(4), 387–407. https://doi.org/10.1080/01944368108976521

[12] Vu, T., & Preston, J. (2022). A comparative economic assessment of urban transport infrastructure options in low-and middle-income countries. *Transportation research part a: policy and practice*, *164*, 38–59. https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.07.019

[13] Ievsieieva, O., Kolisnyk, M., Yatsenko, O., Chornovol, A., & Bocharova, N. (2024). Financial modeling and forecasting in corporate finance management. *Economic affairs*, *69*(1), 629–646. 10.46852/0424-2513.2.2024.23

[14] Vuchic, V. R., & Newell, G. F. (1968). Rapid transit interstation spacings for minimum travel time. *Transportation science*, *2*(4), 303–339. https://doi.org/10.1287/trsc.2.4.303

[15] Patterson, M. (2024). Scoreboard urbanism: Theorizing mental life in the digitally mediated metropolis. *City & community*, *23*(1), 26–46. https://doi.org/10.1177/15356841231173644

[16] Bakogiannis, E., Siti, M., & Kyriakidis, C. (2016). Infrastructure--transportation and networks: Thoughts on the city of tomorrow. *European journal of interdisciplinary studies*, *5*(1), 73–79. https://www.researchgate.net/profile/Charalampos-Kyriakidis/publication/318471773_Infrastructure_-Transportation_and_Networks_Thoughts_on_the_City_of_Tomorrow/links/596d3db80f7e9b8144413bee/Infrastructure-Transportation-and-Networks-Thoughts-on-the-City-of-Tomorrow.pdf

[17] Sierzchula, W., Bakker, S., Maat, K., & Van Wee, B. (2012). Technological diversity of emerging eco-innovations: a case study of the automobile industry. *Journal of cleaner production*, *37*, 211–220. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.011

[18] Maat, K., & Louw, E. (1999). Mind the gap: Pitfalls of travel reduction measures. *Built environment (1978-)*, *25*(2), 151–161. https://www.jstor.org/stable/23288534

[19] van Wee, B. (2025). What is "good" transport policy? *Transport reviews*, *45*(4), 455–458. https://doi.org/10.1080/01441647.2025.2516890

[20] Zaino, R., Ahmed, V., Alhammadi, A. M., & Alghoush, M. (2024). Electric vehicle adoption: A comprehensive systematic review of technological, environmental, organizational and policy impacts. *World electric vehicle journal*, *15*(8), 375. https://doi.org/10.3390/wevj15080375

[21] Banister, D. (2002). Introduction transport policy and the environment. In *In transport policy and the environment* (pp. 1–16). Routledge. https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780203022900-1/introduction-david-banister

[22] Domingues, A. R., Pires, S. M., Caeiro, S., & Ramos, T. B. (2015). Defining criteria and indicators for a sustainability label of local public services. *Ecological indicators*, *57*, 452–464. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.016

[23] Ali, N. (2021). Evaluating sustainable urban transport systems: A review study for the identification of smart mobility indicators. *Transactions on transport sciences*, *12*(2), 16–23. https://doi.org/10.5507/tots.2021.008