Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers
Vol. 21 No. 4, 2024
DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.60

Fast-Charging Station Planning on Coupled Transportation and Distribution Networks Considering Power Quality Indexes of Distribution Network and Road Traveling Time of Transportation Network

Fatemeh Keramati[1] , Hamid Reza Mohammadi[2] , Gholam Reza Shiran[3]

[1] Master of Science Student, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
f.keramati_93@grad.kashanu.ac.ir
[2] Associate Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
mohammadi@kashanu.ac.ir
[3] Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran
gh.shiran@trn.ui.ac.ir

Abstract:

In recent years, with the increasing application of electric vehicles, studies about fast-charging stations have received more attention. One of the most important factors in developing electric transportation is the availability of fast-charging stations. This paper examines the sizing and siting of fast-charging stations while taking into account how they will affect the traffic flow of urban transportation networks and the power quality indexes of the distribution network. On the other hand, the optimal usage of reactive power compensation and active filtering capabilities of fast-charging stations have been considered. In the proposed method, the harmonic power flow, staircase cost facility location model (SCFLM), and user-equilibrium traffic assignment are used for modeling the constraints of distribution and transportation networks. The proposed model aims to reduce the traveling time in the transportation network by considering a penalty cost for incremental road traffic congestion in the objective function. Also, the proposed model aims to improve the power quality in the distribution network. The proposed integer linear programming model is implemented in GAMS software and finally, the effectiveness of the proposed method is shown using numerical results.

Keywords: **Electric vehicles, Fast charging stations, Optimization, Traveling time, Reactive power compensation, Harmonic reduction.**

Article Type: Research

Received: 12. 01. 2023

Revised: 11. 07. 2023

Accepted: 02. 10. 2023

Corresponding author: H.R. Mohammadi

Corresponding author's address: Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Ravand Blvd. , P.O. Box, 8731753153, Kashan-IRAN.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]

Copyright © 2024 The Authors. Published by Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. Motivation of the work

The widespread application of electric transportation and the popularity of electric vehicles (EVs) demanded optimization of fast-charging station planning. Incorrect siting and sizing of charging stations will result in increased loss, voltage deviation, increased peak load [1], and unacceptable power quality [2]. The optimal management of electric vehicle battery charging and discharging causes improved voltage profile, reduced power losses, and reduced peak demand. In addition, charging stations are capable of improving power quality by using power electronic converters with a special control method [3]. Charging stations are capable of compensating reactive power and reducing voltage THD. Therefore, the optimal planning of plug-in electric vehicle fast charging stations (PEVFCSs) for electric vehicles can improve power quality in distribution networks [4].

On the other hand, the location and size of PEVFCSs affect traffic conditions and the behavior of EV drivers in the transportation network. Moreover, integrating PEVFCSs into the transportation network requires careful attention to avoid worsening traffic congestion and increasing travel time due to the limited capacity of transportation roads.

Based on the aforementioned considerations, effectively addressing the sizing and placement of fast charging stations necessitates considering the capacity of PEVFCSs to improve the power quality in the coupled transportation and distribution networks. Power loss and power quality indexes such as voltage THD in distribution networks and road travel time in transportation networks are important indexes that must be considered. In this paper, the proposed mixed integer linear programming (MILP) aims to minimize the costs related to PEVFCS installation besides reducing the negative effects on the transportation and distribution networks.

2. Contributions

In this study, the planning of PEVFCSs in coupled distribution and transportation networks has been addressed. In reference [4] the travel time of roads in the planning of PEVFCSs was assumed constant while the placement of PEVFCSs affects the traffic flow of roads directly. In other words, the placement of PEVFCs can increase the traffic volume in some transportation lines and the growth of traffic volume increases the road travel time. In the proposed method, the dependence of the travel time on the capacity of the transportation lines is taken into account to reduce the volume of traffic and the travel time of the lines. Introducing the improved SCFLM considering the travel time and the capacity limitation of the transportation lines, as well as the presentation of the MILP model, are among the innovations of this paper. On the other hand, we are looking for optimal planning of PEVFCSs that improve the power quality indexes of the distribution network.

The most important contributions of this paper can be summarized as follows:

- The placement and sizing of PEVFCSs by considering the power quality indexes of the distribution network and the capacity of the transportation lines.
- Considering the dependence of the travel time on the capacity of transportation lines.
- Reducing the traffic volume of transportation lines.

3. Procedures

Due to using power electronic equipment, PEVFCSs are capable of compensating reactive power and filtering current harmonic caused by nonlinear loads. In this study, four different scenarios are defined. In the first and second scenarios, only equations of the transportation network are considered, and in the third and fourth scenarios, the equations of both the transportation and distribution networks are considered. In the first and third scenarios, the travel time of roads is considered constant and independent of the capacity of transportation lines. In the second and fourth scenarios, the travel time of roads is considered dependent on the capacity of the transportation lines. To observe and compare the effect of PEVFCS placement on urban traffic in different scenarios, the terms traffic congestion and traffic congestion time have been used. The expression of traffic congestion indicates the total difference between the number of electric vehicles in the lines after PEVFCS placement and the capacity of the lines. Also, the expression of traffic congestion time indicates the total difference between the travel time of the lines after placement and the fixed travel time of the lines. Voltage profile and voltage THD are analyzed before and after placing PEVFCs.

Optimal planning of fast charging stations in coupled transportation and distribution networks should consider both the distribution and transportation network equations. These equations are modeled by cartesian harmonic power flow and improved SCFLM.

Two small and large networks are considered as test networks to verify the effectiveness of the proposed method. The small coupled transportation and distribution network consists of 5 traffic nodes and 6 buses and the large network consists of 24 traffic nodes and 62 buses [5]. By implementation in GAMS software, the effectiveness of the proposed method is shown using numerical results.

4. Findings

In this study, a new method for sizing and placement of PEVFCSs by considering the coupled transportation and distribution networks and taking into account the variable travel time and the capability of PEVFCSs to improve the power quality of the distribution network is presented. In the first stage, the results of planning PEVFCSs by considering the constant travel time of transportation

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]

lines have shown some nodes as optimal locations to install PEVFCSs while by implementing the proposed method (considering variable travel time) in both small and large networks, the optimal locations have changed compared the previous scenario. It has shown the importance of considering the variable travel time of transportation lines in the planning of PEVFCSs. In addition, the travel time, travel cost, and traffic congestion of roads are decreased in the proposed method compared to the previous scenario.

At the last stage, the planning of PEVFCSs is addressed in coupled transportation and distribution networks and the results have shown that the optimal location of PEVFCSs changes by taking into account the variable travel time. On the other hand, the placement of PEVFCSs with the proposed method improves the voltage profile, reduces voltage THD at the buses of the distribution network, and declines the traffic congestion in the transportation network. In addition, all installation costs related to the PEVFCSs have decreased significantly.

5. Conclusion

The purpose of this paper is to reduce the installation and operational costs of fast charging stations, as well as reduce the travel time of PEV drivers and optimally usage of the charging station's capabilities for improving power quality indexes. The simulation results show that although the optimal location of PEVFCSs by considering the transportation network equations leads to the maximum coverage of the traffic flow and reduces the travel time, these optimal places change by considering both the transportation and distribution network equations. Therefore, PEVFCS planning should be done by considering coupled transportation and distribution networks, and considering only one of these two networks will not lead to optimal results. Also, considering the fixed travel time of roads leads to the traffic congestion of transportation lines. In comparison with the case of considering fixed travel time, the PEVFCS placement with variable travel time not only improves the power quality indexes of the distribution network but also reduces the traffic volume of the transportation network and the travel time of PEV drivers.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال بیست و یکم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۶۰-۷۰

DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.60

برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع در شبکه‌های توزیع الکتریکی و حمل‌ونقل شهری با درنظرگرفتن شاخص‌های کیفیت توان شبکه توزیع و زمان سفر خطوط شبکه حمل‌ونقل

فاطمه کرامتی[۱]، حمیدرضا محمدی [۲]، غلامرضا شیران [۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- ایران

f.keramati_93@grad.kashanu.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- ایران

mohammadi@kashanu.ac.ir

۳- استادیار- دانشکده عمران و حمل‌و نقل- دانشگاه اصفهان - ایران

gh.shiran@trn.ui.ac.ir

چکیده: در سالیان اخیر با افزایش خودروهای الکتریکی، مطالعات پیرامون ایستگاه‌های شارژ سریع مورد توجه قرار گرفته است. ایستگاه‌های شارژ سریع قابل دسترس یکی از موارد تاثیرگذار در جهت گسترش حمل‌ونقل الکتریکی است. در این مقاله جایگذاری و تعیین اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با توجه به تأثیر آن بر ترافیک شبکه حمل‌ونقل شهری و شاخص‌های کیفیت توان از جمله افت ولتاژ و THD ولتاژ بررسی شده است. از طرفی استفاده بهینه از قابلیت ایستگاه‌های شارژ سریع جهت جبران‌سازی توان راکتیو و جبران‌سازی جریانهای هارمونیکی ناشی از بارهای غیرخطی مورد توجه قرار گرفته است. در روش ارائه شده از پخش بار هارمونیکی، مدل جایگذاری تاسیسات با هزینه پله‌ای و مدل تخصیص ترافیک بر مبنای تعادل کاربر جهت مدل‌سازی محدودیت شبکه‌های توزیع و حمل‌ونقل استفاده شده است. مدل پیشنهادی با درنظرگرفتن یک هزینه جریمه برای افزایش ازدحام ترافیک خطوط در تابع هدف، درصدد کاهش زمان سفر در شبکه حمل‌ونقل است. همچنین مدل پیشنهادی درصدد بهبود شاخص‌های کیفیت توان در شبکه توزیع می‌باشد. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح پیشنهادی در نرم افزار گمز پیاده‌سازی و در انتها، کارایی روش پیشنهادی با استفاده از نتایج عددی نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: خودروهای الکتریکی، ایستگاه‌های شارژ سریع، بهینه‌سازی، زمان سفر، جبرانسازی توان راکتیو، کاهش هارمونیک

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حمیدرضا محمدی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – کاشان – بلوار قطب راوندی – دانشگاه کاشان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۳ ©. ناشر این مقاله، انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]

۱- مقدمه

در سالیان اخیر به دلیل کاهش منابع انرژی سوخت فسیلی، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG[۱]) و مشکلات اقتصادی، سیاستگذاری دولت‌ها در جهت گسترش کاربرد خودروهای الکتریکی بوده است. در سال ۲۰۱۸ سهم انتشار بخش حمل‌ونقل ۱۴ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای و نزدیک به یک چهارم انتشارات ناشی از سوزاندن سوخت‌های تجدیدناپذیر بود. در این میان وسایل نقلیه مسافربری در حدود ۷۲ درصد از این انتشارات را به خود اختصاص می‌داد [۱]. کشورهای مختلف ازجمله چین، ایالت متحده امریکا با حمایت‌های مالی در خرید خودروهای الکتریکی به صورت یارانه خرید و یا کاهش مالیات بر خرید سعی در گسترش خودروهای الکتریکی داشته‌اند. این حمایت‌ها در قسمت‌های فروش برق نیز اعمال شده است [۲]. از طرفی افزایش نفوذ خودروهای الکتریکی در راستای گسترش حمل‌ونقل الکتریکی چالش‌های جدیدی را برای هردو شبکه حمل‌ونقل و توزیع به وجود آورده است. همچنین فراگیری استفاده از خودروهای الکتریکی نیاز به ایستگاه‌های شارژ سریع را بیش از پیش مطرح نموده است. جایگذاری و تعیین ظرفیت غیربهینه اندازه ایستگاه‌های شارژ سریع، می‌تواند مشکلات زیادی را برای صاحبان خودروهای الکتریکی، شبکه‌های حمل‌ونقل و توزیع به همراه داشته باشد. از این رو برنامه-ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع به عنوان زیرساخت اساسی شارژ خودروهای الکتریکی امری ضروری است.

ایستگاه‌های شارژ سریع با ظرفیت بالا جهت تأمین تقاضای شارژ خودروهای الکتریکی می‌توانند تأثیر نامطلوبی بر عملکرد شبکه توزیع داشته باشند. تقاضای شارژ خودروهای الکتریکی به دلیل ماهیت تصادفی، غیرخطی و تکانه‌ای می‌تواند باعث افت ولتاژ، افزایش اعوجاج هارمونیکی کل (THD[۲]) برخی باس‌ها و همچنین افزایش تلفات شبکه توزیع شوند[۳-۸]. از طرفی افزایش انحراف ولتاژ و تقاضای انرژی بالا در شبکه توزیع باعث کاهش طول عمر مفید تجهیزات شبکه توزیع ازجمله ترانسفورماتورها و تنظیم‌کننده‌های ولتاژ می‌شود [۹].

در مرجع [۱۰]، برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با درنظرگرفتن قابلیت انتقال توان از باتری خودروهای الکتریکی به شبکه توزیع (V2G[۳]) بررسی شده است. این مطالعه با درنظرگرفتن ایستگاه-های شارژ به عنوان منابع تولید پراکنده باعث بهبود پروفیل ولتاژ شبکه توزیع شده است. در مرجع [۱۱]، به منظور استفاده بهینه از ظرفیت ایستگاه شارژ و کاهش زمان انتظار و شارژ خودروهای الکتریکی، یک مساله بهینه‌سازی را مطرح و با استفاده از الگوریتم ژنتیک به حل آن پرداخته است. نتایج این مطالعه نشان داده است که با استفاده از ظرفیت ایستگاه می‌توان تعداد مناسب شارژر را بدست آورد. مرجع [۱۲] با استفاده از روش غربالگری دو مرحله‌ای، به جایگذاری و تعیین اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ پرداخته است. شناسایی بهینه عوامل و درنظرگرفتن خدمات برای ایستگاه‌های شارژ منجر به کاهش توان تلفاتی و انحراف ولتاژ باس‌های شبکه توزیع شده است. در مطالعات ذکر شده تنها محدودیت‌های شبکه توزیع درنظرگرفته شده است.

برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی با رویکردهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۳]، مکان بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی با توجه به تراکم خودروهای الکتریکی و دیدگاه ناحیه‌بندی بر روی شهر مشهد انجام شده است. از طرف دیگر، جایگذاری ایستگاه‌های شارژ سریع درشبکه حمل‌ونقل، میزان حجم ترافیک خودروهای الکتریکی در مسیرهای مختلف را تحت تأثیر قرار می‌دهد، که این مطالعه این موضوع را درنظر نگرفته است. در مرجع [۱۴]، مدل برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه شارژ سریع با استفاده از نظریه صف و مدل تخصیص ترافیک بر اساس تعادل کاربر در شبکه حمل‌ونقل ارائه شده است. بر اساس قانون تعادل کاربر، جریان ترافیکی پایدار، زمانی به وجود خواهد آمد که در آن رانندگان مسیر خود را به نحوی انتخاب کنند که کمترین زمان را در راه باشند. از طرف دیگر هیچ یک از رانندگان نتوانند به طور یکجانبه با تغییر مسیر خود، زمان سفر خود را بهبود بخشند که، معمولا به قانون تعادل کاربر یا قانون واردراپ (Wardrop) موسوم است. همچنین از آن‌جایی که زمان و نرخ ورود خودروهای الکتریکی به ایستگاه‌های شارژ متغیرهای تصادفی هستند، ایستگاه‌های شارژ را می‌توان به عنوان سیستم صف M/M/C مدل کرد. در این مطالعه زمان و نرخ ورود خودروهای الکتریکی به ترتیب با کمک تابع توزیع پوآسون و نمایی منفی مدل و ظرفیت خطوط حمل‌ونقل نیز درنظرگرفته شده است. از آن‌جایی که رفتار رانندگان خودروهای الکتریکی می‌تواند به‌طور همزمان بر هر دوشبکه تأثیر بگذارد، نادیده گرفتن یکی از شبکه‌ها، منجر به تصمیم بهینه نمی‌شود.

در مرجع [۱۵]، با استفاده از مدل مکان‌یابی پوشش‌دهنده‌ی جریان ترافیکی و مقید به ظرفیت (CFRLM[۴]) و تئوری صف جایگذاری و تعیین اندازه ایستگاه‌های شارژ سریع درشبکه حمل‌ونقل و توزیع انجام شده است. مرجع [۱۶] مدل برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم (SOCP[۵]) و روش CFRLM بر اساس مسیرهای فرعی (CFRLM-SP[۶]) را برای برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع در شبکه حمل‌ونقل و توزیع پیشنهاد داده است. این مطالعه با اعمال فرم بسته‌ای برای خدمات ایستگاه‌های شارژ باعث کاهش زمان محاسبات شده است. در مرجع [۱۷]، هزینه‌های درازمدت تجهیزات شبکه توزیع در برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ درشبکه حمل‌ونقل و توزیع درنظرگرفته شده است. در مرجع [۱۸]، جایگذاری و تعیین اندازه ایستگاه شارژ با درنظرگرفتن اصل تعادل کاربر در شبکه حمل‌ونقل و توزیع انجام شده است. در این مطالعه هدف کاهش هزینه‌های سرمایه-گذاری و تلفات شبکه توزیع بوده است. مرجع [۱۹] به بررسی مکان و اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ با هدف حداکثرسازی سود شرکت‌های توزیع و مالکان ایستگاه‌های شارژ پرداخته است. در این مطالعه از نظریه صف و مدل تخصیص بر مبنای تعادل کاربر استفاده شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]

در مرجع [۲۰]، جایگذاری و اندازه‌یابی ایستگاه شارژ با استفاده از تخصیص ترافیک نامحدود انجام شده است. اگرچه در مطالعات ذکر شده حداکثرسازی پوشش جریان ترافیک در شبکه حمل‌ونقل و محدودیت‌های شبکه توزیع درنظرگرفته شده است، ولی شاخص‌های کیفیت توان شبکه توزیع و قابلیت جبرانسازی توان راکتیو ایستگاه‌های شارژ نادیده گرفته شده است.

ایستگاه‌های شارژ سریع به دلیل استفاده از تجهیزات الکترونیک قدرت، قادر به جبران توان راکتیو، تنظیم ولتاژ و فیلترکردن هارمونیک‌ها در شبکه توزیع هستند. ایستگاه‌های شارژ سریع با رویکرد کنترلی جدید می‌توانند، بدون درگیر شدن باتری و تأثیری بر فرآیند شارژگیری، توان راکتیو مورد نیاز شبکه را تأمین کنند. این جبران توان راکتیو باعث بهبود ضریب قدرت و پروفیل ولتاژ بارهای مجاور و کاهش تلفات شبکه می‌شود [۲۱]. مرجع [۲۲] با درنظرگرفتن قابلیت بهبوددهندگی کیفیت توان به برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ پرداخته شده است. از طرفی در این مطالعه زمان سفر رانندگان خودروهای الکتریکی در شبکه حمل‌ونقل ثابت درنظرگرفته شده است. این درحالی است که تغییر مسیر جریان‌های ترافیکی به واسطه جایگذاری ایستگاه‌های شارژ سریع باعث افزایش حجم ترافیک در برخی خطوط حمل‌ونقل می‌شوند و افزایش حجم ترافیک افزایش زمان سفر را به همراه دارد.

در این مطالعه یک مدل خطی عدد صحیح برای جایگذاری و تعیین اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع به منظور بهبود شاخص‌های کیفیت توان شبکه توزیع و کاهش حجم ترافیک خطوط شبکه حمل‌ونقل با درنظرگرفتن وابستگی زمان سفر به محدودیت خطوط حمل‌ونقل ارائه شده است.

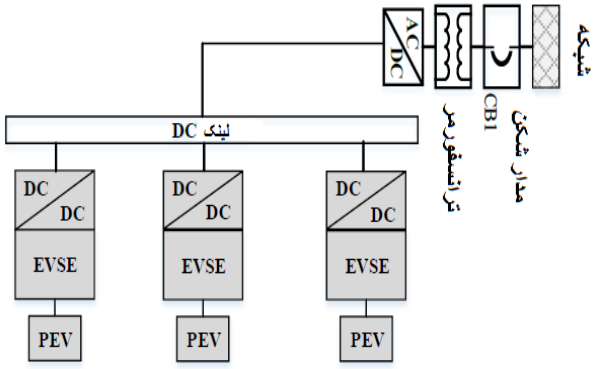
در مطالعه حاضر، جایگذاری و تعیین اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با استفاده از دو مدل غیرخطی عدد صحیح و خطی عدد صحیح ارائه شده است. در روش پیشنهادی، قابلیت ایستگاه‌های شارژ سریع مجهز به تجهیزات الکترونیک قدرت جهت جبرانسازی توان راکتیو و فیلتر کردن هارمونیک‌های جریان ناشی از بارهای غیرخطی درنظرگرفته شده است. از طرفی طبق اصل تعادل کاربر (UE^{v}) متغیر بودن زمان سفر رانندگان خودروی الکتریکی و محدودیت ظرفیت خطوط شبکه حمل‌ونقل به عنوان دو پارامتر مهم شبکه حمل‌ونقل درنظرگرفته شده‌اند. با توجه به موارد فوق، نوآوری‌های مقاله حاضر عبارتند از:

- جایگذاری و تعیین اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با درنظرگرفتن شاخص‌های کیفیت توان شبکه توزیع و ظرفیت خطوط شبکه حمل‌ونقل
- درنظرگرفتن وابستگی زمان سفر به ظرفیت خطوط حمل‌ونقل
- کاهش حجم ترافیک خطوط شبکه حمل‌ونقل

ساختار مقاله به این شرح است: در بخش دوم مدل‌سازی ریاضی غیرخطی و خطی مسأله ارائه شده است. در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی دو شبکه با مقیاس‌های متفاوت آمده است. در نهایت در بخش چهارم نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی ریاضی

در برنامه‌ریزی جامع ایستگاه‌های شارژ سریع فرض بر این است که گره‌های ترافیکی شبکه حمل‌ونقل بر باس‌های شبکه توزیع منطبق هستند. ساختار نمونه ایستگاه‌های شارژ سریع در شکل ۱ نشان داده شده است [۲۲].



شکل (۱): ساختار ایستگاه‌های شارژ سریع

ایستگاه‌های شارژ سریع به واسطه تجهیزات الکترونیک قدرت قادر به جبرانسازی توان راکتیو و فیلتر کردن هارمونیک‌های شبکه توزیع می‌باشند. لازم به ذکر است تمامی متغیرها و پارامترها مورد استفاده در پایان مقاله معرفی شده اند. در این مقاله تابع هدف به صورت معادله (۱) تعریف می‌شود:

$$F = \sum_{n}(C_n^{fix} n_n + C_i^{spot} u_n) + \sum_{(i,n)\in A_i^n} C_i^u s_i^{cs} n_n + \sum_{i\in A^{mainI}} C^p P_i^s + \sum_{i\in A^{mainI}} C^q q_i^s + \sum_{n}\sum_{o} C_{n,o}^w \omega_{n,o} + \eta \sum_{l}\sum_{n}\sum_{k} \gamma_k fc_{n,k} Tr_{n,k} + \sum_{t}\sum_{l} C^{tc}\left(\frac{v_{l,t}}{ca_l}\right)^4 \quad (1)$$

این مطالعه به دنبال کمینه‌سازی هزینه‌های مختلف ازجمله هزینه‌های مرتبط به شبکه توزیع، شبکه حمل‌ونقل و احداث ایستگاه‌های شارژ سریع میباشد. هزینه احداث ایستگاه‌های شارژ سریع شامل عبارت‌های اول، دوم و سوم است که به ترتیب هزینه ثابت راه‌اندازی ایستگاه‌های شارژ، هزینه نقاط شارژ و هزینه تجهیزات الکترونیک قدرت نصب شده در ایستگاه‌های شارژ سریع را نشان می‌دهند. عبارت‌های چهارم و پنجم به ترتیب هزینه خرید توان اکتیو و راکتیو از شبکه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]

بالادست را نشان می‌دهند و مربوط به هزینه‌های شبکه توزیع میباشند. در نهایت هزینه‌های شبکه حمل‌ونقل شامل عبارت‌های ششم، هفتم و هشتم است که به ترتیب هزینه زمان انتظار رانندگان PEV در ایستگاه‌های شارژ سریع، هزینه سفر با ثابت درنظرگرفتن زمان سفر خطوط در شبکه حمل‌ونقل و هزینه جریمه ازدحام خطوط حمل‌ونقل را نشان می‌دهند.

۲-۱- محدودیت‌های شبکه توزیع

برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع در شبکه توزیع می‌بایست، محدودیت شاخص‌های شبکه توزیع را رعایت کند. محدودیت شاخص‌های شبکه توزیع شامل محدودیت‌های عملیاتی، امنیتی و محدودیت‌های ایستگاه شارژ می‌شود. در این مقاله از مدل پخش بار هارمونیکی دکارتی برای برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه شارژ استفاده شده است [۲۲]. محدودیت‌های پخش بار هارمونیکی به شرح زیر است:

$$i_{h,i}^{R} = \sum_{j\in A^{I}} (Y_{h,i,j}^{R} v_{h,i}^{R} - Y_{h,i,j}^{I} v_{h,i}^{I}) \qquad \forall h,i \qquad (۲)$$

$$i_{h,i}^{I} = \sum_{j\in A^{I}} (Y_{h,i,j}^{R} v_{k,i}^{I} + Y_{h,i,j}^{I} v_{h,i}^{R}) \qquad \forall h,i \qquad (۳)$$

$$i_{h,i}^{R} = -ics_{h,i}^{R} - inl_{h,i}^{R} \qquad \forall h\neq 1,i \qquad (۴)$$

$$i_{h,i}^{I} = -ics_{h,i}^{I} - inl_{h,i}^{I} \qquad \forall h\neq 1,i \qquad (۵)$$

$$p_{i}^{s} = i_{h,i}^{R} v_{h,i}^{R} + i_{h,i}^{I} v_{h,i}^{I} \qquad \forall h\neq 1,i \qquad (۶)$$

$$q_{i}^{s} = -i_{h,i}^{I} v_{h,i}^{R} + i_{h,i}^{R} v_{h,i}^{I} \qquad \forall h\neq 1,i \qquad (۷)$$

$$p_{i}^{s} = P_{i}^{G} + \sum_{(nl,i)\in M_{i}^{nl}} (-P_{i}^{NL} - P_{i}^{D} - p_{i}^{cs}) \qquad \forall i \qquad (۸)$$

$$q_{i}^{s} = Q_{i}^{G} + \sum_{(nl,i)\in A_{i}^{nl}} (-Q_{i}^{NL} - Q_{i}^{D} - q_{i}^{cs}) \qquad \forall i \qquad (۹)$$

$$inl_{h,i}^{R/I} = \sum_{(nl,i)\in A_{i}^{nl}} (Cf_{nl,h} S_{i}^{NL}) \qquad \forall h,i \qquad (۱۰)$$

$$p_{i}^{cs} = ics_{1,i}^{R} v_{1,i}^{R} + ics_{1,i}^{I} v_{1,i}^{I} \qquad \forall i \qquad (۱۱)$$

$$p_{i}^{cs} = \frac{(\Sigma_{o}\omega_{n,o})\times Ec\times D_{rng}}{\Delta t\times \mu\times S_{b}} \qquad \forall i \qquad (۱۲)$$

$$q_{i}^{cs} = -ics_{1,i}^{I} v_{1,i}^{R} + ics_{1,i}^{R} v_{1,i}^{I} \qquad \forall i \qquad (۱۳)$$

$$il_{h,i,j}^{R} = Y_{h,i,j}^{R} (v_{h,i}^{R} - v_{h,j}^{R}) - Y_{h,i,j}^{I} (v_{h,i}^{I} - v_{h,j}^{I}) \qquad \forall h,i,j \qquad (۱۴)$$

$$il_{h,i,j}^{I} = Y_{h,i,j}^{R} (v_{h,i}^{I} - v_{h,j}^{I}) + Y_{h,i,j}^{I} (v_{h,i}^{R} - v_{h,j}^{R}) \qquad \forall h,i,j \qquad (۱۵)$$

محدودیت‌های (۲) تا (۵) تعادل جریان و محدودیت‌های (۶) تا (۹) تعادل توان اکتیو و راکتیو در هر باس برای مولفه اصلی و مولفه‌های هارمونیکی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است روابط (۴) و (۵) نشان می‌دهد هارمونیک جریان ناشی از بارهای غیرخطی توسط ایستگاه‌های شارژ سریع جبران می‌شود. رابطه (۱۰) جریان بار غیرخطی را در هارمونیک‌های مختلف نمایش می‌دهد. به عبارت دیگر هارمونیک جریان تولیدی توسط بار غیرخطی در این رابطه محاسبه و در روابط (۴) و (۵) توسط ایستگاه‌های شارژ سریع در حد ا.مکان جبران می‌شود. محدودیت‌های (۱۱) تا (۱۳) به ترتیب توان اکتیو و راکتیو ایستگاه شارژ سریع را ارائه می‌دهند. جریان حقیقی و موهومی خطوط شبکه توزیع از روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شود.

محدودیت‌های عملیاتی و امنیتی شبکه توزیع به صورت زیر است:

$$il_{i,j}^{rms} = \sqrt{\sum_{h}(il_{h,i,j}^{R})^{2} + (il_{h,i,j}^{I})^{2}} \qquad \forall i,j \qquad (۱۶)$$

$$il_{i,j}^{rms} \le I_{i,j}^{\max} \qquad \forall i,j \qquad (۱۷)$$

$$ics_{i}^{rms} = \sqrt{\sum_{h}(ics_{h,i}^{R})^{2} + (ics_{h,i}^{I})^{2}} \qquad \forall i \qquad (۱۸)$$

$$ics_{i}^{rms} \le \frac{s_{i}^{cs} n_{n}}{V_{\max}^{rms}} \qquad \forall i \qquad (۱۹)$$

$$v_{h,i}^{M} = \sqrt{(v_{h,i}^{R})^{2} + (v_{h,i}^{I})^{2}} \qquad \forall h,i \qquad (۲۰)$$

$$v_{i}^{rms} = \sqrt{\sum_{h}(v_{h,i}^{M})^{2}} \qquad \forall i \qquad (۲۱)$$

$$V_{\min}^{rms} \le v_{i}^{rms} \le V_{\max}^{rms} \qquad \forall i \qquad (۲۲)$$

$$\frac{v_{h,i}^{M}}{v_{1,i}^{M}} \le IHD_{\max} \qquad \forall h\neq 1,i \qquad (۲۳)$$

$$THD_{i}^{v} = \frac{\sqrt{\sum_{h\neq 1}(v_{h,i}^{M})^{2}}}{v_{1,i}^{M}} \qquad \forall i \qquad (۲۴)$$

$$THD_{i}^{v} \le THD_{\max} \qquad \forall i \qquad (۲۵)$$

در روابط (۱۶) تا (۲۳) نحوه محاسبه و همچنین محدودیت جریان و ولتاژ ایستگاه‌های شارژ و باس‌های شبکه توزیع مشخص شده‌اند. همچنین نحوه محاسبه و محدوده مجاز THD ولتاژ باس‌های شبکه توزیع به ترتیب در روابط (۲۴) و (۲۵) داده شده‌اند [۲۳]. رابطه (۱۹)

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]

به صورت خاص ظرفیت ایستگاه شارژ سریع نصب شده در باس i را با توجه به ولتاژ و جریان ایستگاه محاسبه می‌کند.

۲-۲- محدودیت‌های شبکه حمل‌ونقل

در این مقاله زمان انتظار رانندگان PEV در ایستگاه شارژ به صورت تابع پله‌ای از سطح عملیاتی ایستگاه شارژ درنظرگرفته شده است. به عبارتی افزایش تعداد خودرو در ایستگاه شارژ افزایش زمان انتظار و سطح عملیاتی ایستگاه را به همراه دارد [۲۲, ۲۴]. محدودیت-های شبکه حمل‌ونقل به شرح زیر است:

$$\sum_o \omega_{n,o} = \sum_k \gamma_k \, fc_{n,k} \qquad \forall n \qquad (۲۶)$$

$$\omega_{n,o} \le \Delta h_{n,o} u_n \qquad \forall n,o \qquad (۲۷)$$

$$\sum_o fc_{n,k,t} = 1 \qquad \forall n \qquad (۲۸)$$

$$\sum_k \gamma_k \, fc_{n,k} \le \frac{Pc \times \Delta t}{Ec \times D_{PEV}} u_n \qquad \forall n \qquad (۲۹)$$

$$f^{link}_{n,l,k} = \gamma_k \, fc_{n,k} \alpha_{n,k,l} \qquad \forall n,k,l \qquad (۳۰)$$

$$v_l = \sum_n \sum_k f^{link}_{n,l,k} \qquad \forall l \qquad (۳۱)$$

$$t_l = T_l^0 (1 + 0.15 (\frac{v_l}{Ca_l})^4) \qquad \forall (l) \in A^l \qquad (۳۲)$$

$$n_n \le u_n \le n_n \bar{U} \qquad \forall n \qquad (۳۳)$$

$$n_n \in \{0,1\} \qquad \forall n \qquad (۳۴)$$

$$fc_{n,k} \ge 0 \qquad \forall n,k \qquad (۳۵)$$

$$\omega_{n,o} \ge 0 \qquad \forall n,o \qquad (۳۶)$$

محدودیت (۲۶) نشان می‌دهد مجموع خودروهایی که ایستگاه شارژ را انتخاب می‌کنند با مجموع خودروهایی که نیاز به شارژ دارند، برابر هستند. محدودیت (۲۷) تعداد خودروهای موجود در هر سطح عملیاتی ایستگاه شارژ را محدود می‌کند. برای اطمینان از پوشش کامل جریان-های ترافیکی شبکه حمل‌ونقل محدودیت (۲۸) قرار داده شده است. محدودیت (۲۹) نرخ شارژ هر شارژر را نشان می‌دهد. روابط (۳۰) تا (۳۲) نحوه محاسبه زمان سفر خطوط حمل‌ونقل را مشخص می‌کنند. محدودیت (۳۳) تعداد نقاط شارژ ایستگاه‌های شارژ سریع را محدود می‌کند. محدودیت‌های (۳۴) تا (۳۶) متغیرهای تصمیم مسأله هستند. در مراجع [۲۰, ۲۲, ۲۵] مدل خطی عدد صحیح روابط بالا ارائه شده است بنابراین از تکرار این توضیحات صرفنظر شده است.

۳- نتایج شبیه‌سازی

برای پیاده‌سازی و بررسی روش پیشنهادی از دو شبکه کوچک و بزرگ استفاده شده است. شبکه یکپارچه حمل‌ونقل و توزیع کوچک از ۵ گره ترافیکی و ۶ باس تشکیل شده است. شکل (۲) شبکه کوچک حمل‌ونقل را نشان می‌دهد. شبکه کوچک توزیع شامل باس‌های ۱، ۲، ۳، ۲۹، ۳۰ و ۳۱ شبکه ۳۱ باس IEEE است [۲۶]. پیک جریان ترافیک و پیک بار شبکه توزیع درنظرگرفته شده اند [۲۲]. شبکه یکپارچه حمل‌ونقل و توزیع بزرگ از ۲۴ گره ترافیکی و ۶۲ باس تشکیل شده است [۲۷]. در واقع شبکه توزیع بزرگ از دو شبکه ۳۱ باس IEEE و شبکه حمل‌ونقل بزرگ شبکه ترافیکی ۲۴ گره‌ای سوفالز[۸] است. برای مشاهده و مقایسه تاثیر جایگذاری ایستگاه‌های شارژ سریع بر ترافیک شهری در سناریوهای مختلف از عبارت ازدحام ترافیک و زمان ازدحام ترافیک استفاده شده است. عبارت ازدحام ترافیک نشان‌دهنده مجموع تفاضل تعداد خودروهای الکتریکی موجود در خطوط بعد از جایگذاری و ظرفیت خطوط است. همچنین عبارت زمان ازدحام ترافیک نشان‌دهنده مجموع تفاضل زمان سفر خطوط بعد از جایگذاری و زمان سفر ثابت خطوط است. پارامترهای برنامه‌ریزی در جدول (۱) آمده است. از آنجایی که توان شارژرها معادل ۶۰ کیلووات در نظر گرفته شده است، ایستگاههای شارژ مورد مطالعه از نوع شارژ سریع میباشند.

جدول (۱): پارامترهای برنامه‌ریزی [۱۸، ۲۰]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
C_n^{fix}	۱۶۳۰۰۰$	$\Delta h_{n,o}$	۱
C_i^{spot}	۲۰۹۰۷/۴۴$	S_b	۱۰۰MVA
$\bar{U}$	۲۰	μ	٪۹۲
C_i^u	۶۶۳۰۰$/kVA	Ec	۰/۱۵kWh/km
D_{pev}	۱۰۰km	Pc	۶۰kW

۳-۱- شبکه یکپارچه حمل‌ونقل و توزیع کوچک

در ابتدا جایگذاری و تعیین اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با زمان سفر ثابت و در مرحله بعد جایگذاری و تعیین اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با متغیر بودن زمان سفر در شبکه حمل‌ونقل کوچک بررسی شده است. برای مطالعه این مسئله شبکه کوچک بخشی از شبکه بزرگ فرض شده است. با این فرض می‌توان تقاضای شارژ مبدأ-مقصد در شبکه حمل‌ونقل کوچک را مطابق جدول ۲ درنظر گرفت تا میزان افزایش ازدحام خطوط شبکه حمل‌ونقل به واسطه جایگذاری ایستگاه‌های شارژ سریع را بررسی نمود. با توجه به افزایش روز افزون خودروهای الکتریکی این فرض خیلی دور از واقعیت

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]

نیست. نتایج دو روش خطی در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. با درنظرگرفتن متغیر بودن زمان سفر و محدودیت ظرفیت خطوط حمل-ونقل، حجم ترافیک خطوط و زمان سفر در شبکه حمل‌ونقل کاهش پیدا کرد. از طرفی درنظرگرفتن وابستگی زمان سفر به ظرفیت خطوط حمل‌ونقل باعث افزایش سایر هزینه‌های مسأله نشده و تنها در تعیین مکان بهینه تاثیرگذار بود.

مدل برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع در شبکه حمل‌ونقل با دو مدل خطی و غیرخطی انجام شده است. از آن‌جایی که در محدودیت-های شبکه حمل‌ونقل تنها رابطه (۳۲) مسأله را غیرخطی می‌کند و همچنین مقیاس شبکه کوچک است، زمان شبیه‌سازی این دو حالت تفاوت چندانی نداشت.

جدول(۲): تقاضای شارژ مبدأ-مقصد شبکه حمل‌ونقل کوچک

مبدا-مقصد	۳-۱	۴-۱	۳-۲	۴-۲
تقاضای شارژ	۲۱۰	۱۸۵	۱۵۰	۱۳۰

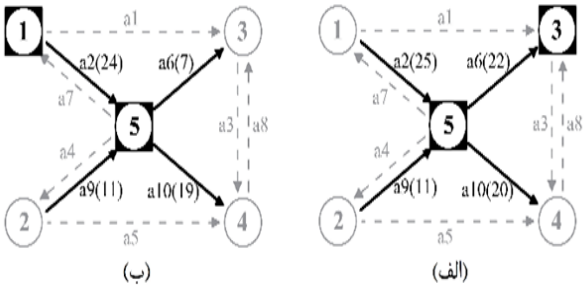
جدول(۳): مقایسه نتایج شبیه‌سازی در شبکه کوچک فقط با درنظرگرفتن شبکه حمل‌ونقل

	زمان سفر ثابت	زمان سفر متغیر
مکان بهینه (گره ترافیکی)	۵-۳	۵-۱
تعداد نقاط شارژ	۱۷	۱۷
هزینه نصب	۶۸۱۴۲۶	۶۸۱۴۲۶
هزینه عملیاتی	۱۹۵	۱۸۹
هزینه سفرها	۶۴۸۵۰	۵۰۴۶۰
زمان ازدحام ترافیک (دقیقه)	۱۹۲/۷	۱۴۰/۷
ازدحام ترافیک	۷۸	۶۱

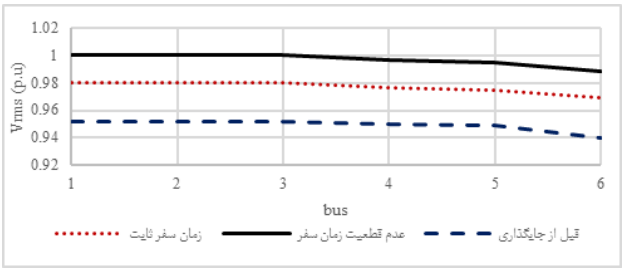
در ادامه برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ با درنظرگرفتن محدودیت‌های شبکه یکپارچه حمل‌ونقل و توزیع کوچک پیاده شد. نتایج برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع با درنظرگرفتن ثابت بودن زمان سفر خطوط حمل‌ونقل نشان داد، گره‌های ترافیکی ۳ و ۵ همچنان مکان‌های بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع هستند. درحالی که با پیاده‌سازی روش پیشنهادی در شبکه حمل‌ونقل و توزیع کوچک، گره‌های ترافیکی ۴ و ۱ به عنوان مکان‌های بهینه برنامه‌ریزی ایستگاه-های شارژ سریع انتخاب شدند. تغییر مکان‌های بهینه با درنظرگرفتن شبکه توزیع، اهمیت درنظرگرفتن شبکه توزیع در برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. نتایج دو روش با مدل خطی در جدول ۴ نشان داده شده است. شکل ۲ خطوط ترافیکی را در دو روش ذکر شده نشان می‌دهد. ازدحام ترافیک روی هر لینک نوشته است، همانطور که مشاهده می-شود ازدحام ترافیک خطوط a6، a2 و a10 کاهش پیدا کرده است. ولتاژ و THD باس‌ها بعد از جایگذاری ایستگاه‌های شارژ سریع با درنظرگرفتن متغیر بودن زمان سفر بهبود پیدا کردند. شکل (۳) و (۴) به ترتیب ولتاژ و THD باس‌ها در پیک تقاضای شبکه توزیع را قبل و بعد از جایگذاری ایستگاه شارژ سریع، نشان می‌دهد. مدل خطی و غیرخطی عدد صحیح روش پیشنهادی به ترتیب با CPLEX و LINDO در برنامه گمز پیاده‌سازی شده است. مقایسه نتایج این دو مدل در جدول ۵ آمده است. زمان شبیه‌سازی مدل خطی بسیار کمتر از مدل غیرخطی بوده است که این کارایی مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول(۴): مقایسه نتایج شبیه‌سازی در شبکه کوچک با درنظرگرفتن همزمان شبکه حمل‌ونقل و توزیع

نتایج	زمان سفر ثابت	زمان سفر متغیر
مکان بهینه (گره ترافیکی)	۵-۳	۴-۱
تعداد نقاط شارژ	۱۷	۱۷
هزینه نصب	۷۵۳۰۷۵	۷۵۲۵۲۰
هزینه عملیاتی	۱۹۵	۱۹۲
هزینه سفرها	۶۴۸۵۰	۵۳۰۴۴
توان ظاهری ایستگاه‌ها (مگاولت آمپر)	۱/۱	۱/۱
زمان ازدحام ترافیک (دقیقه)	۱۹۲	۱۴۹
ازدحام ترافیک	۷۸	۶۱



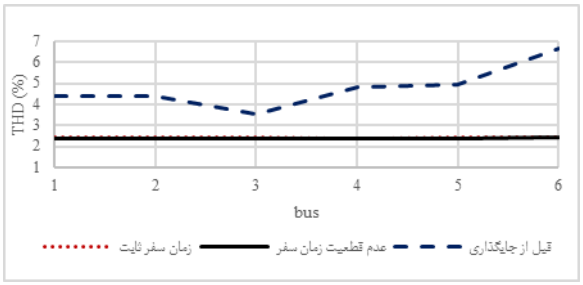
شکل (۲): خطوط ترافیکی شبکه حمل‌ونقل کوچک بعد از جایگذاری ایستگاه‌های شارژ (الف) با درنظرگرفتن زمان ثابت سفر و (ب) متغیر بودن زمان سفر



شکل (۳): ولتاژ باس‌ها در پیک تقاضای شبکه توزیع کوچک قبل و بعد از جایگذاری ایستگاه‌های شارژ سریع

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]



شکل (۴): THD باس‌ها در پیک تقاضای شبکه توزیع قبل و بعد از جایگذاری ایستگاه‌های شارژ سریع سریع

جدول(۵): مقایسه نتایج مدل خطی و غیرخطی روش پیشنهادی در شبکه کوچک با درنظرگرفتن همزمان شبکه حمل‌ونقل و توزیع

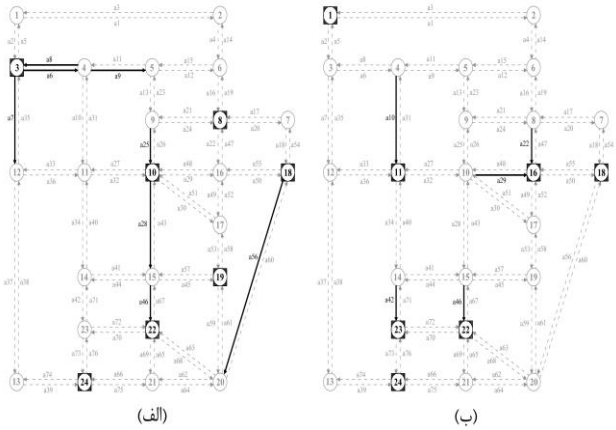
نتایج	مدل غیرخطی	مدل خطی
زمان شبیه‌سازی (ثانیه)	۱۸۷۰	۴۸۰
هزینه نصب	۷۵۲۵۴۸	۷۵۲۵۲۰
هزینه عملیاتی	۱۹۲/۵	۱۹۲
هزینه سفرها	۵۳۴۰۵	۵۳۰۴۴

۳-۲- شبکه یکپارچه حمل‌ونقل و توزیع بزرگ

در مرحله اول جایگذاری و تعیین اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با زمان سفر ثابت و در مرحله بعد با درنظرگرفتن متغیر بودن زمان سفر (روش پیشنهادی) درشبکه حمل‌ونقل ۲۴ گره‌ای بررسی شده است. در این مقاله تعداد خودروهای الکتریکی برابر ۲۰۰۰۰ خودرو درنظرگرفته شده و از طرفی میزان ظرفیت خطوط حمل‌ونقل، برای مشاهده کارایی روش برنامه‌ریزی پیشنهادی، کاهش یافته است. نتایج جایگذاری و تعیین اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با زمان سفر ثابت و زمان سفر متغیر در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج برنامه-ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع با درنظرگرفتن زمان سفر ثابت نشان می‌دهد که بدون درنظرگرفتن متغیر بودن زمان سفر، ۸ لینک حمل-ونقل بعد از جایگذاری ایستگاه‌های شارژ دچار ترافیک شدید می‌شوند. درصورتی که با درنظرگرفتن زمان سفر متغیر در روش پیشنهادی ازدحام ترافیک خطوط کاهش می‌یابد. شکل (۵) خطوط ترافیکی بعد از پیاده‌سازی دو روش ذکر شده را نشان می‌دهد.

جدول(۶): مقایسه نتایج برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع در شبکه بزرگ فقط با درنظرگرفتن شبکه حمل‌ونقل

نتایج	زمان سفر ثابت	زمان سفر متغیر
مکان بهینه (گره ترافیکی)	۱-۱۱-۱۶-۱۸-۲۲-۲۳-۲۴	۳-۸-۱۰-۱۸-۱۹-۲۲-۲۴
تعداد نقاط شارژ	۵۱۸	۵۱۸
هزینه عملیاتی	۵۱۶۳	۵۱۴۸
هزینه سفرها	۴۸۷۶۳	۳۹۰۰۸
زمان ازدحام ترافیک (دقیقه)	۱۷۵/۷۶	۱۳۳/۱۹۳۰
ازدحام ترافیک	۲۴۷۰	۸۲۰



شکل (۵): خطوط ترافیکی شبکه حمل‌ونقل بزرگ بعد از جایگذاری ایستگاه‌های شارژ با درنظرگرفتن محدودیت‌های شبکه‌ی حمل‌ونقل، (الف) زمان ثابت سفر و (ب) زمان سفر متغیر

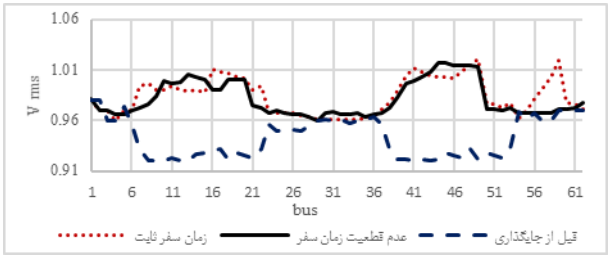
در ادامه برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع در شبکه بزرگ با درنظرگرفتن همزمان شبکه حمل‌ونقل و توزیع پیاده‌سازی شده است. جدول ۷ مقایسه نتایج دو روش است. مکان بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با درنظرگرفتن متغیر بودن زمان سفر تغییر پیدا می‌کند. از طرفی جایگذاری ایستگاه‌های شارژ سریع با روش پیشنهادی، باعث بهبود پروفیل ولتاژ و THD باس‌ها در شبکه توزیع و کاهش ازدحام خودروهای الکتریکی در خطوط شبکه حمل‌ونقل می‌شود. شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب ولتاژ و THD باس‌ها را قبل و بعد از جایگذاری ایستگاه شارژ سریع، نشان می‌دهد. شکل (۸) خطوط ترافیکی بعد از پیاده‌سازی دو روش ذکر شده در شبکه حمل‌ونقل و توزیع بزرگ را نشان می‌دهد.

جدول(۷): مقایسه نتایج برنامه‌ریزی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع در شبکه بزرگ با درنظرگرفتن همزمان شبکه حمل‌ونقل و توزیع

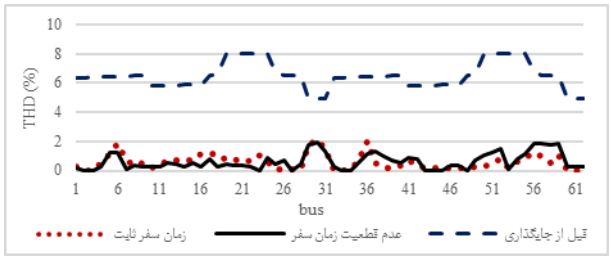
نتایج	زمان سفر ثابت	زمان سفر متغیر
مکان بهینه (گره ترافیکی)	۸-۱۱-۱۷-۱۸-۲۲-۲۳-۲۴	۳-۶-۸-۱۵-۱۸-۲۰-۲۲
تعداد نقاط شارژ	۵۱۷	۵۱۶
هزینه عملیاتی	۵۲۷۸	۵۲۷۸
هزینه سفرها	۴۴۶۶۵۰	۳۹۰۵۲۱
هزینه خرید توان اکتیو	۶۷۶۸	۶۶۸۴
زمان ازدحام ترافیک (دقیقه)	۱۵۴	۳۹/۱۵۳
ازدحام ترافیک	۱۰۷۹	۳۸۴

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

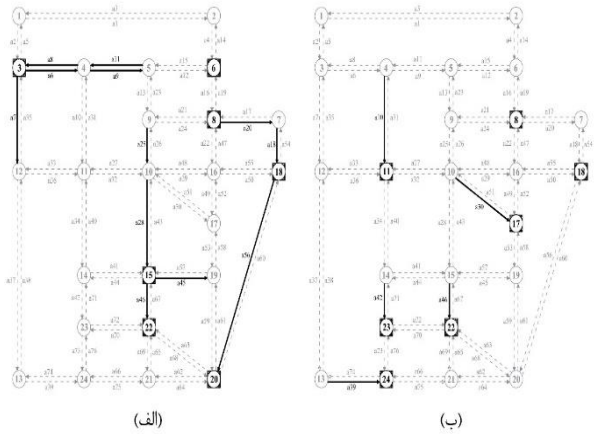
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]



شکل (۶): ولتاژ باس‌ها در پیک تقاضای شبکه توزیع بزرگ قبل و بعد از جایگذاری ایستگاه شارژ سریع



شکل (۷): THD باس‌ها در پیک تقاضای شبکه توزیع بزرگ قبل و بعد از جایگذاری ایستگاه شارژ سریع



شکل (۸): خطوط ترافیکی شبکه حمل‌ونقل بزرگ بعد از جایگذاری ایستگاه‌های شارژ با درنظرگرفتن محدودیت‌های شبکه یکپارچه حمل‌ونقل و توزیع، (الف) زمان سفر ثابت و (ب) زمان سفر متغیر

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای جایگذاری و تعیین اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با درنظرگرفتن کوپلینگ شبکه حمل‌ونقل و شبکه توزیع و لحاظ نمودن متغیر بودن زمان سفر و قابلیت بهبوددهندگی کیفیت توان ایستگاه‌های شارژ، ارائه شده است. هدف این مقاله کاهش هزینه-های نصب و بهره‌برداری ایستگاه‌های شارژ سریع و همچنین کاهش زمان سفر رانندگان PEV و استفاده بهینه از قابلیت ایستگاه‌های شارژ در بهبود شاخص‌های کیفیت توان است. در این روش از مدل SCFLM با درنظرگرفتن محدودیت ظرفیت و متغیر بودن زمان سفر خطوط شبکه حمل‌ونقل استفاده شده است. از طرفی پخش بار هارمونیکی برای محاسبه THD و ولتاژ باس‌ها پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد، اگر چه مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع با درنظرگرفتن محدودیت‌های شبکه حمل‌ونقل منجر به پوشش حداکثری جریان ترافیک و کاهش زمان سفر می‌شود، اما این مکان‌ها با درنظرگرفتن همزمان محدودیت‌های شبکه حمل‌ونقل و توزیع تغییر می‌یابد. بنابراین برنامه‌ریزی ایستگاه‌های شارژ سریع باید با درنظرگرفتن همزمان محدودیت‌های شبکه حمل‌ونقل و توزیع انجام پذیرد و درنظرگرفتن تنها یکی از این دو شبکه منجر به نتایج بهینه نمی‌شود. همچنین نتایج نشان داد، ثابت درنظرگرفتن زمان سفر در جایگذاری و تعیین اندازه بهینه ایستگاه‌های شارژ سریع منجر به ازدحام خطوط حمل‌ونقل می‌شود. جایگذاری ایستگاه‌های شارژ سریع با متغیر درنظرگرفتن زمان سفر در مقایسه با زمان سفر ثابت نه تنها شاخص‌های کیفیت توان شبکه توزیع را بهبود می‌دهد بلکه باعث کاهش حجم ترافیک خطوط شبکه حمل‌ونقل و زمان سفر رانندگان PEV می‌شود. این مطالعه عدم تعادل ولتاژ شبکه و تاثیرات حضور ایستگاه‌های شارژ سریع را بررسی نکرده است و این موضوع می‌تواند به عنوان تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد. لازم بذکر است دامنه رانندگی و توان مصرفی خودروهای الکتریکی متنوع است ولی در این مطالعه برای سهولت محاسبات به صورت قطعی در نظر گرفته شده است. دامنه رانندگی و توان مصرفی می‌تواند به صورت چند دسته مختلف و یا غیرقطعی درنظر گرفته شود و این موضوع به عنوان کارهای آینده پیشنهاد می‌شود. همچنین در این مطالعه محدودیت عملی در انتخاب مکان یا مکانهای کاندید، مورد بررسی قرار نگرفته است و این موضوع میتواند با استفاده از داده های سیستم اطلاعات جغرافیای در کارهای آینده مورد مطالعه قرار گیرد.

ضمایم

مجموعه‌ها

A^{mainI}	مجموعه باس اسلک
A^{I}	مجموعه باس‌های سیستم
A^{l}	مجموعه خطوط شبکه حمل‌ونقل
A^{k}	مجموعه تقاضای مبدأ-مقصد
A_i^{nl}	مجموعه بارغیرخطی nl و باس مربوطه
A_i^{n}	مجموعه باس و گره ترافیکی متصل

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]

اندیس‌ها

i,j	اندیس باس
h	اندیس مرتبه هارمونیکی
l	اندیس خطوط شبکه حمل‌ونقل
n	اندیس گره ترافیکی
nl	اندیس بار غیرخطی
k	اندیس سفر مبدا-مقصد
o	اندیس سطح عملیاتی ایستگاه

پارامترها

$C_{n,o}^{W}$	هزینه انتظار *PEV*ها در ایستگاه شارژ سریع در گره ترافیکی n و سطح عملیاتی o ام *($/h)*
Ec	انرژی مصرفی*PEV* *(kWh/km)*
C_n^{fix}	هزینه ثابت نصب ایستگاه شارژ سریع واقع در گره ترافیکی n *($)*
C_i^u	هزینه تجهیزات الکترونیک قدرت ایستگاه شارژ سریع در باس i *($/MVA)*
C_i^{spot}	هزینه هر نقطه شارژ در ایستگاه واقع در باس i *($)*
$C^{p/q}$	هزینه خرید توان اکتیو/راکتیو از شبکه بالادست در ساعت پیک تقاضا *($/MVA)* و *($/MVA)*
$Cf_{nl,h}^{R/I}$	ضریب حقیقی/موهومی جریان هارمونیکی بار غیرخطی nl در مرتبه هارمونیکی h
γ_k	تعداد *PEV* های موجود در سفر مبدأ-مقصد k در ساعت پیک ترافیک
Ca_l	ظرفیت خطوط حمل‌ونقل
D_{pev}	دامنه رانندگی*PEV* *(km)*
$IHD_{\max}$	حداکثر *IHD* مجاز
$I_{i,j}^{\max}$	حداکثر جریان مجاز خطوط
$\alpha_{n,k,l}$	پارامتر باینری که اگر سفر مبدا-مقصد k ایستگاه شارژ واقع در n را انتخاب و از خط l عبور کند، برابر ۱ می‌شود.
P/Q_i^D	توان اکتیو/راکتیو مصرفی بار باس i
P/Q_i^G	توان اکتیو/راکتیو تولیدی توسط منابع تولید پراکنده و خازن‌ها در باس i
$S/P/Q_i^{NL}$	توان ظاهری/اکتیو/راکتیو مصرفی بارهای غیرخطی در باس i
Pc	ظرفیت هر نقطه شارژ *(kW)*
S_b	توان مبنا
$Tr_{n,k}$	کوتاه‌ترین زمان سفر مبدا-مقصد k که از ایستگاه شارژ سریع واقع درگره ترافیکی n حتما عبور کند *(h)*
T_l^0	زمان سفر ثابت خطوط حمل‌ونقل
$\bar{U}$	حداکثر تعداد نقاط شارژ
$V_{max/min}^{rms}$	محدوده مجاز ولتاژ
$Y_{h,i,j}^{R/I}$	قسمت حقیقی/موهومی ادمیتاس خطوط شبکه توزیع در مرتبه هارمونیکی h
$\Delta h_{n,o}$	اندازه هر بازه عملیاتی در تابع هزینه عملیاتی
μ	ضریب بازده *PEV*
η	پارامتر تبدیل زمان سفر به هزینه*($/h)*

متغیرها

$fc_{n,k}$	تعداد *PEV*های سفر مبدا-مقصد k که ایستگاه واقع در nرا انتخاب کردند.
$il_{h,i,j}^{rms/R/I}$	مقدار *rms*/حقیقی/موهومی جریان خطوط شبکه توزیع در مرتبه هارمونیکی h
$ics_{h,i}^{rms/M/R/I}$	مقدار *rms*/حقیقی/موهومی جریان ایستگاه شارژ سریع در مرتبه هارمونیکی h
$inl_{h,i}^{R/I}$	مقدار حقیقی/موهومی جریان بار غیرخطی در مرتبه هارمونیکی h
$i_{h,i}^{R/I}$	مقدار حقیقی/موهومی جریان تزریقی به باس i در مرتبه هارمونیکی h
p/q_i^{cs}	توان اکتیو/راکتیو مصرفی ایستگاه شارژ سریع در باس i
p/q_i^{s}	توان اکتیو/راکتیو تزریقی در باس i
s_i^{cs}	توان ظاهری ایستگاه شارژ سریع در باس i
THD_i^v	*THD* ولتاژ باس i
$v_{h,i}^{M/R/I}$	مقدار اندازه/حقیقی/موهومی ولتاژ باس i در مرتبه هارمونیکی h

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]

v_i^{rms}	مقدار rms ولتاژ باس i
n_n	متغیر باینری مربوط به نصب ایستگاه شارژ سریع در گره ترافیکی n
u_n	تعداد نقاط شارژ موجود در ایستگاه شارژ سریع در گره ترافیکی n
$\omega_{n,o}$	تعداد PEVهایی که ایستگاه واقع درگره ترافیکی n را انتخاب و درسطح عملیاتی o قرار دارند.
t_l	زمان سفر خطوط حمل‌ونقل
v_l	مجموع تعداد PEVهای موجود در خطوط حمل‌ونقل
$f_{n,l,k}^{link}$	جریان ترافیکی سفر مبدأ-مقصد k که ایستگاه شارژ سریع واقع در گره ترافیکی n را انتخاب و از خطوط l عبور می‌کند.

مراجع

[1] J. N. Barkenbus, "Prospects for electric vehicles", Sustainability, vol. 12, no. 14, p. 5813, 2020.

[2] M.-H. Lin, J. G. Carlsson, D. Ge, J. Shi, and J.-F. Tsai, "A review of piecewise linearization methods", Mathematical problems in Engineering, 2013.

[3] A. Ahmed, A. Iqbal, I. Khan, A. Al-Wahedi, H. Mehrjerdi, and S. Rahman, "Impact of EV charging station penetration on harmonic distortion level in utility distribution network: a case study of Qatar", in 2021 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), 2021: IEEE, pp. 1-6 .

[4] L. Caro, G. Ramos, D. Montenegro, and D. Celeita, "Variable harmonic distortion in electric vehicle charging stations", in 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2020: IEEE, pp. 1-6 .

[5] K. Clement-Nyns, E. Haesen, and J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid", IEEE Transactions on power systems, vol. 25, no. 1, pp. 371-380, 2009.

[6] A. Dubey and S. Santoso, "Electric vehicle charging on residential distribution systems: Impacts and mitigations", IEEE Access, vol. 3, pp. 1871-1893, 2015.

[7] A. K. Karmaker, S. Roy, and M. R. Ahmed, "Analysis of the impact of electric vehicle charging station on power quality issues", in 2019 international conference on electrical, computer and communication engineering (ECCE), 2019: IEEE, pp. 1-6 .

[8] R. C. Leou et al., "Stochastic analysis of electric transportation charging impacts on power quality of distribution systems", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 12, no. 11, pp. 2725-2734, 2018.

[9] D. Mao, Z. Gao, and J. Wang, "An integrated algorithm for evaluating plug-in electric vehicle's impact on the state of power grid assets", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 105, pp. 793-802, 2019.

[10] M. Moradijoz, M. P. Moghaddam, M. Haghifam, and E. Alishahi, "A multi-objective optimization problem for allocating parking lots in a distribution network", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 46, pp. 115-122, 2013.

[11] Amiri A B, Ghayeni M. Improving Fast Charging Methods Using Genetic Algorithm and Coordination between Chargers in Fast Charging Station of Electric Vehicles in Order to Optimal Utilization of Power Capacity of Station. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2019; 16 (1) :21-29

[12] Z. Liu, F. Wen, and G. Ledwich, "Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems", IEEE transactions on power delivery, vol. 28, no. 1, pp. 102-110, 2012.

[13] Azad M, Ghayeni M. Optimal placement of fast charging stations for electric vehicles with consideration of exchange between regions using genetic algorithm - Case study for Mashhad. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2022; 19 (1) :319-329

[14] Y. Xiang et al., "A traffic flow based planning strategy for optimal siting and sizing of charging stations", in 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2015: IEEE, pp. 1-5 .

[15] H. Zhang, S. J. Moura, Z. Hu, and Y. Song, "PEV fast-charging station siting and sizing on coupled transportation and power networks", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 4, pp. 2595-2605, 2016.

[16] H. Zhang, S. J. Moura, Z. Hu, W. Qi, and Y. Song, "A second-order cone programming model for planning PEV fast-charging stations", IEEE Transactions on power Systems, vol. 33, no. 3, pp. 2763-2777, 2017.

[17] D. Mao, J. Tan, and J. Wang, "Location planning of PEV fast charging station: an integrated approach under traffic and power grid requirements", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 22, no. 1, pp. 483-492, 2020.

[18] G. Ferro, R. Minciardi, L. Parodi, and M. Robba, "Optimal Planning of Charging Stations in Coupled Transportation and Power Networks Based on User Equilibrium Conditions", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 19, no. 1, pp. 48-59, 2021.

[19] Y. Sahraei, P. Hosseini, and M. S. Sepasian, "Multi-objective planning of charging stations considering the benefits of distribution companies and private station owners," Scientific-Research Journal of Quality and Productivity of Iranian Industry, vol. 9, no. 3, 2020.

[20] X. Wang, M. Shahidehpour, C. Jiang, and Z. Li, "Coordinated planning strategy for electric vehicle charging stations and coupled traffic-electric networks", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 1, pp. 268-279, 2018.

[21] J. Y. Yong, V. K. Ramachandaramurthy, K. M. Tan, and N. Mithulananthan, "Bi-directional electric vehicle fast charging station with novel reactive power compensation for voltage regulation", International

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]

Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 64, pp. 300-310, 2015.

[22] S. N. Hashemian, M. A. Latify, and G. R. Yousefi, "PEV fast-charging station sizing and placement in coupled transportation-distribution networks considering power line conditioning capability", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 6, pp. 4773-4783, 2020.

[23] I. o. Electrical and E. Engineers, IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. IEEE, 2014.

[24] M. Miralinaghi, B. B. Keskin, Y. Lou, and A. M. Roshandeh, "Capacitated refueling station location problem with traffic deviations over multiple time periods", Networks and Spatial Economics, vol. 17, no. 1, pp. 129-151, 2017.

[25] A. Bagheri, V. Vahidinasab, and K. Mehran, "A novel multiobjective generation and transmission investment framework for implementing 100% renewable energy sources", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 12, no. 2, pp. 455-465, 2018.

[26] M. Bajaj and A. K. Singh, "A single index for voltage quality ranking in the distribution power networks using multiple criteria decision-making", International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 31, no. 8, p. e12965, 2021.

[27] L. J. LeBlanc, E. K. Morlok, and W. P. Pierskalla, "An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem", Transportation research, vol. 9, no. 5, pp. 309-318, 1975.

زیرنویس‌ها

[1] Green House Gas

[2] Total Harmonic Distortion

[3] Vehicle to Grid

[4] Capacitated Flow Refueling Location Model

[5] Second Order Cone Programming

[6] Capacitated Flow Refueling Location Model Based on Sub-Paths

[7] User Equilibrium

[8] Sioux-Falls Network

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.49]