Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers
Vol. 21 No. 4, 2024
DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.74

A multiobjective framework for simultaneous placement of electric vehicle battery swapping and charging stations in centralized charging mode

Mohamad Hasan Shaker[1] , Hossein Farzin[2], Elaheh Mashhour[3]

[1] MSc Graduate, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
mohmmad_shaker07@yahoo.com
[2] Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
farzin@scu.ac.ir
[3] Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
e.mashhour@scu.ac.ir

Abstract:
The purpose of this paper is to introduce a framework for simultaneous optimal placement of battery charging and swapping stations for electric vehicles in centralized charging mode. In the centralized charging mode, unlike the decentralized mode, the charging equipment is located in a place other than the battery swapping station, which is called the central charging station. The batteries are charged in this place and are distributed among the battery swapping stations on a regular basis. The objective functions of the presented model include minimization of the batteries' transportation cost, improving the voltage index, and reducing the cost of distribution grid losses. For this purpose, a nonlinear multi-objective model is presented to calculate the objective function values of the problem. Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) is used to solve the optimization problem in this article. The output of the genetic algorithm is a set of pareto optimal points, from which the final solution is selected using fuzzy decision-making method. Finally, the model is implemented on the 69-bus IEEE test system, and the results have been examined in different scenarios. The obtained results verify the efficiency of the presented model.

Keywords: **Electric Vehicle, Battery Swapping Station, Centralized Charging, Battery Wear, Placement, Swappable Battery.**

Article Type: Research

Received: 31. 01. 2023

Revised: 01. 07. 2023

Accepted: 10. 07. 2023

Corresponding author: H. Farzin

Corresponding author's address: Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

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

In recent years, considerable attention has been paid to the use of electric vehicles (EVs), owing to major developments in power electronics. Many studies and researches have been done in the field of EVs, and EVs are mentioned as one of the best alternatives to internal combustion cars. Initially, electric cars were not a suitable option for the general public from an economic point of view. In the recent years, this problem was greatly resolved with the development of battery and electric vehicle charging technology [1]. But there were still other problems that slowed down the penetration of electric cars. One of these problems was the long charging time of batteries, and the other was the small distance that the driver could travel with each charge [1]. The mentioned problems can be effectively solved using Battery swapping Stations (BSS). Battery swapping stations are also divided into centralized charging and decentralized charging according to the method they use to charge batteries. In decentralized charging stations, the depleted batteries that are delivered to the stations are charged at the location of the station and the related equipment is located at the same location [2]. But in the case of centralized charging, the equipment related to charging the batteries is located in a place other than the battery swapping stations, called the Central Charging Station (CCS). Optimal placement of these stations at the same time in centralized charging mode plays a vital role for a power grid.

2. Contributions

The review of studies that have been done in the past in this field reveals that less attention has been paid to the simultaneous placement of battery charging and swapping stations in the centralized charging mode, as well as EVs battery wear over time due to multiple charges and discharges. Moreover, presence of the CCS in the grid could influence the important technical parameters of the network, such as power loss and voltage. The two mentioned parameters directly affect the optimal location of this station. On the other hand, due to random battery swapping pattern of the customers, it is necessary to have a probabilistic model to calculate the amount of energy consumed by the central charging station at different hours of the day. Based on this, the main contributions of this article can be expressed as follows:

• Presenting a non-linear model based on multi-objective genetic algorithm, which is used to locate the BSSs and the CCS at the same time.

• Fuzzy decision-making method has been used to select the most appropriate solution and the compromise between different objective functions has been investigated.

• Network parameters such as network losses and voltage index are included in the study.

• The effects of battery wear and battery charging management in the CCS are considered in this study, and their impacts on the optimal location of the stations has been investigated through various numerical studies.

3. Procedures

The main purpose of this paper is to provide a framework for simultaneous placement of battery swapping stations and central charging station in centralized charging mode. For this purpose, a probabilistic model is firstly presented to estimate the amount of power consumed in a central charging station during 24 hours in a sample day, based on the random pattern of swapping requests. In the next step, a non-linear model is presented for optimal placement of the battery swapping station and the central charging station, in such a way that the costs related to moving the batteries, the amount of network losses and the network voltage index are in their most optimal state. The reason behind the nonlinearity of the model is the presence of powerflow equations in the calculations. The output of the probabilistic model of power consumption in the central charging station is used as the input of the nonlinear model. There are different zones, each including a number of candidate locations for stations. The multi-objective genetic algorithm (NSGA-II) has been used to solve the optimization problem. Finally, the fuzzy decision-making method has been used to select the most suitable solution among the obtained results.

4. Findings

The developed model is implemented on IEEE 69-bus test network, and different scenarios are defined to verify the model. To do this, the mentioned system is divided into 5 different zones, and 15 candidate points for building BSSs and 12 candidate points for building CCS have been identified. In total, 3 different scenarios are defined, in the first 2 scenarios, the issues of charging method and considering the battery wearing were discussed, and in the last scenario, presence of photovoltaic panels in the charging station as an energy source was investigated. The results showed that the participation of CCS in V2G programs will have a significant effect on the placement of stations. On the other hand, it was observed that the number of times the batteries are distributed has a great effect on the optimal placement of the stations. Additionally, neglecting the battery wear caused the batteries to be charged with a higher power but in fewer hours, which caused an increase in power losses in some hours, and its effect on the location of the stations was observed. It was also observed that the presence of photovoltaic panels affects the placement of the stations. The effect of the priorities of different objective functions on the final solution was also investigated through appropriate selection of μ_d values in the fuzzy method.

5. Conclusion

The goal of this article is to present a model for the simultaneous placement of battery exchange stations and central charging stations in centralized charging mode. To do this, firstly, a probabilistic model was introduced

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

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

to calculate the amount of energy consumption in the central charging station. Then a multi-objective model was proposed, whose objective functions included transportation cost, loss cost and voltage index. The decision variables of this model were the locations of CCS and BSSs, and the problem was solved using multi-objective genetic algorithm (NSGA-II). Based on the obtained results, it can be concluded that different factors such as the charging method, the number of times the batteries are distributed, and the presence of photovoltaic panels can affect the optimal location of the station. For instance, photovoltaic panels can improve the performance of the CCS, and increasing the number of batteries daily distribution times increases the power consumption at the CSS.

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

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال بیست و یکم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۷۴-۸۸

DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.74

چارچوبی چندهدفه برای جایابی هم‌زمان ایستگاه‌های تعویض و شارژ باتری خودروهای الکتریکی در حالت شارژ متمرکز

محمدحسن شاکر[۱]، حسین فرزین[۲] ، الهه مشهور[۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- گروه برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز- اهواز - ایران

mohmmad_shaker07@yahoo.com

۲- دانشیار- گروه برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز- اهواز - ایران

farzin@scu.ac.ir

۳- دانشیار- گروه برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز- اهواز - ایران

e.mashhour@scu.ac.ir

چکیده: هدف از این مقاله ارائه چارچوبی چندهدفه برای جایابی بهینه هم‌زمان ایستگاه‌های تعویض و شارژ باتری خودروهای الکتریکی در حالت شارژ متمرکز است. در حالت شارژ متمرکز، برخلاف حالت غیرمتمرکز، تجهیزات شارژ در محلی غیر از ایستگاه تعویض باتری قرار دارند که به آن ایستگاه مرکزی شارژ گفته می‌شود. باتری‌ها در این محل شارژ شده و در فواصل زمانی معین میان ایستگاه‌های تعویض باتری توزیع می‌شوند. توابع هدف مدل ارائه‌شده در این مقاله، کمینه کردن هزینه جابه‌جایی باتری‌ها، بهبود شاخص ولتاژ و کاهش هزینه تلفات شبکه توزیع است. به این منظور یک مدل غیرخطی چندهدفه جهت محاسبه مقادیر توابع هدف مسئله ارائه‌شده است. از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) برای حل مسئله بهینه‌سازی در این مقاله استفاده‌شده است. خروجی الگوریتم ژنتیک یک سطح پَرِتو شامل چند مجموعه‌ای از پاسخ‌ها خواهد بود که پاسخ نهایی از میان آن‌ها با استفاده از روش تصمیم‌گیری فازی انتخاب می‌شود. درنهایت مدل پیشنهادی بر روی سیستم آزمون ۶۹ باسه IEEE پیاده‌سازی شده است و نتایج در سناریوهای متفاوت موردبررسی قرارگرفته‌اند. نتایج به‌دست‌آمده به‌خوبی کارایی مدل ارائه‌شده را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: خودروی الکتریکی، ایستگاه تعویض باتری، شارژ متمرکز، فرسودگی باتری، جایابی، باتری قابل تعویض

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حسین فرزین

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – اهواز – بلوار گلستان – دانشگاه شهید چمران اهواز – دانشکده‌ی مهندسی

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

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

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/)

۱- مقدمه

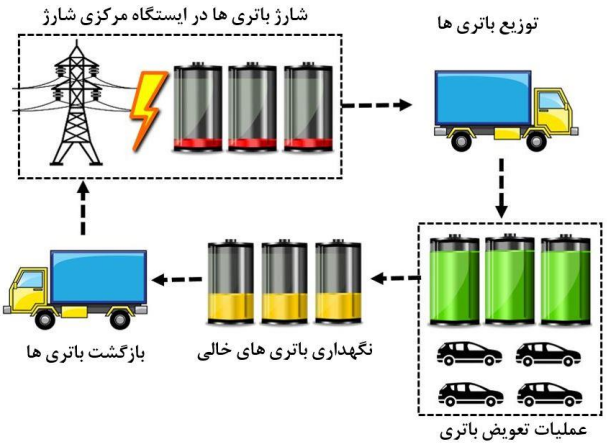
۱-۱- معرفی اهمیت خودروهای الکتریکی

دولت‌ها همواره در رابطه با مشکلاتی که افزایش جمعیت و گسترش وسعت شهرها برای سیستم‌های حمل‌ونقل ایجاد می‌کنند نگرانی‌های زیادی داشته‌اند، و مشکلات زیست‌محیطی را می‌توان از عمده این نگرانی‌ها دانست. در صورت نبود برنامه‌ای مناسب و عدم پیش‌بینی رخدادهای مرتبط، ممکن است مشکلات متعددی به وجود آید [۱]. ازجمله، با افزایش جمعیت نیاز به وسایل حمل‌ونقل عمومی مانند اتوبوس‌ها یا تاکسی افزایش می‌یابد و از طرف دیگر، شاهد حضور تعداد بیشتری خودروی شخصی در سطح شهرها خواهیم بود. بخش عمده‌ای از ناوگان حمل‌ونقلی که در حال حاضر در سطح شهرها مورداستفاده قرار می‌گیرد، از سوخت فسیلی به‌عنوان منبع انرژی خود استفاده می‌کنند. این نوع سوخت در طول سال‌های گذشته اثرات مخرب خود را بر روی محیط‌زیست نشان داده است [۲]. با افزایش جمعیت، مشکلات سوخت‌های فسیلی نیز بیش‌ازپیش خواهند شد.

مطالعات و تحقیقات زیادی درزمینه خودروهای الکتریکی انجام‌شده است، و از خودروهای الکتریکی به‌عنوان یکی از بهترین جایگزین‌ها برای خودروهای احتراق داخلی یادشده است [۳]. سرعت نفوذ و همه‌گیری استفاده از خودروهای الکتریکی درگذشته نسبت به سال‌های اخیر بسیار کمتر بوده است [۴]، به این دلیل که فناوری ساخت آن‌ها در مراحل ابتدایی قرار داشته و درنتیجه، ساخت نمونه‌های اولیه با هزینه‌های بالایی انجام می‌گرفت که این موضوع باعث می‌شد خودروهای الکتریکی ازلحاظ اقتصادی برای عموم مردم گزینه مناسبی نباشند. در سال‌های بعد، با پیشرفت فناوری مربوط به باتری و شارژ خودروهای الکتریکی این مشکل تا حد زیادی برطرف شد [۵]. اما کماکان مشکلات دیگری وجود داشتند که از سرعت نفوذ خودروهای الکتریکی کم می‌کردند. یکی از این مشکلات طولانی بودن مدت‌زمان شارژ باتری خودروها بود، و دیگری نیز مسافت کمی که راننده با هر بار شارژ می‌توانست طی کند [۵]. همچنین به دلیل کم بودن تعداد این خودروها، مکان‌های شارژ این خودروها در سطح شهرها نیز محدود بود. این مشکلات با بهینه شدن روش‌های شارژ [۶] و بهبود بازدهی مصرف انرژی در خودروها و همچنین افزایش جایگاه‌های شارژ تا حدود بسیار زیادی برطرف شدند [۷].

بر اساس نحوه دریافت انرژی در خودروهای الکتریکی، می‌توان آن‌ها را به دودسته اتصال مستقیم (Plug-in) و باتری قابل تعویض(SB[1]) تقسیم کرد [۸]. در حالت SB برخلاف حالت Plug-in، باتری خودرو به‌راحتی و در مدت کوتاهی قابل تعویض است. هنگامی‌که خودرو از باتری قابل تعویض بهره می‌برد، راننده می‌تواند با توقفی کوتاه در محلی به نام ایستگاه تعویض باتری (BSS[2])، باتری خود را توسط ربات‌هایی با باتری کاملاً شارژ شده تعویض کند [۹] . در این حالت، مشکل مربوط به طولانی بودن زمان شارژ رفع می‌شود [۱۰]. بر اساس این دسته‌بندی، ایستگاه‌های شارژ را می‌توان به دودسته ایستگاه‌های شارژ مستقیم و ایستگاه‌های تعویض باتری تقسیم کرد.

ایستگاه‌های تعویض باتری نیز با توجه به روشی که برای شارژ باتری‌ها به کار می‌گیرند، خود به دودسته شارژ متمرکز و شارژ غیرمتمرکز تقسیم می‌شوند. در ایستگاه‌های شارژ غیرمتمرکز، باتری‌های خالی که به ایستگاه تحویل داده می‌شوند در محل ایستگاه شارژ می‌شوند و تجهیزات مربوطه در همان محل قرار دارند [۱۱]. اما در حالت شارژ متمرکز، تجهیزات مربوط به شارژ باتری‌ها در محلی غیر از ایستگاه‌های تعویض باتری به نام ایستگاه شارژ مرکزی (CCS[3]) قرار دارند و در بازه‌های زمانی مشخص باتری‌های خالی‌شده توسط خودروهایی از ایستگاه‌ها جمع‌آوری و به محل شارژ منتقل می‌شوند. پس از شارژ مجدد، باتری‌ها میان ایستگاه‌های تعویض باتری توزیع می‌شوند [۱۲]. شکل (۱) نحوه عملکرد ایستگاه‌ها در حالت شارژ متمرکز را نشان می‌دهد.



شکل (۱): نحوه عملکرد ایستگاه‌ها در حالت شارژ متمرکز

۱-۲- مرور منابع

مطالعات زیادی درزمینه برنامه‌ریزی و جایابی ایستگاه‌های تعویض باتری در سال‌های اخیر انجام‌شده است که هرکدام از آن‌ها این موضوع را از جنبه‌های خاصی موردبررسی قرار داده‌اند. در [۱۳] روشی برای یافتن بهترین مکان جهت احداث ایستگاه تعویض باتری در حالتی که انواع مختلفی از خودروهای الکتریکی در سیستم حضور دارند ارائه‌شده است. در [۱۴]، نویسندگان با استفاده از اطلاعات GPS[4] به‌دست‌آمده از تاکسی‌های درون‌شهری، مدلی برای پیدا کردن بهینه‌ترین نقطه برای احداث ایستگاه تعویض باتری ارائه داده‌اند، به‌طوری‌که مسافت طی شده توسط رانندگان در کمترین حالت خود قرار گیرد. هدف نویسندگان در [۱۵] پیدا کردن اندازه بهینه (تعداد ربات‌های تعویض باتری) و محل احداث ایستگاه‌های تعویض باتری بوده است. در این مقاله برای کمینه کردن هزینه‌های ساخت و تلفات شبکه از الگوریتم ژنتیک استفاده‌شده است.

مقاله [۱۶] مدلی برای یافتن بهترین نقطه ساخت ایستگاه‌های تعویض باتری و DG[5] ها و باهدف پایدارسازی ولتاژ شبکه و کاهش تلفات

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

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

ارائه‌شده است. تلاش نویسندگان در [۱۷] بر ارائه مدلی بهینه برای شارژ باتری‌ها در ایستگاه تعویض باتری بوده است. هدف مدل کمینه کردن هزینه‌های ایستگاه بوده است، و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی[۶] انجام‌شده است. در [۱۸] مدیریت نگهداری و شارژ باتری‌ها در محل ایستگاه مرکزی شارژ و باهدف بیشینه‌سازی درآمد به‌دست‌آمده صورت گرفته است. با توجه به پارامترهای شبکه، مقاله [۱۹] به دنبال کمینه کردن هزینه ایستگاه از طریق یافتن اندازه و محل بهینه ایستگاه‌های تعویض باتری بوده است. مسئله بهینه‌سازی حاصل‌شده با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی حل‌شده است. مرجع [۲۰] طراحی بهینه و جایابی ایستگاه تعویض باتری در یک ریز شبکه را موردبررسی قرار داده است. در [۲۱]، نویسندگان مدلی برای جایابی و تعیین اندازه بهینه ایستگاه شارژ متمرکز مبتنی بر سلول‌های خورشیدی و باتری در یک ریز شبکه ارائه داده‌اند.

در[۲۲] مدلی برای بهینه‌سازی عملکرد یک ایستگاه تعویض باتری مجهز به سلول‌های خورشیدی معرفی‌شده است. هدف مدل بیشینه کردن درآمد حاصل از ایستگاه است و از الگوریتم ازدحام ذرات[۷] برای بهینه‌سازی استفاده‌شده است. مدل ارائه‌شده در [۲۳] می‌تواند خودروهای الکتریکی را در هنگام نیاز به تعویض باتری به‌گونه‌ای به ایستگاه‌ها تخصیص دهد که مسافت طی شده توسط رانندگان در کمترین حالت خود قرار داشته باشد و همچنین هزینه‌های شارژ کمینه شوند. در [۲۴] یک مدل برای برنامه‌ریزی شارژ باتری‌ها در ایستگاه مرکزی شارژ معرفی‌شده است. تابع هدف در این مدل کمینه کردن هزینه و زمان شارژ باتری‌ها است. نویسندگان در [۲۵] یک چارچوب برای شارژ خودروهای الکتریکی در یک ایستگاه شارژ فتوولتائیک پیشنهاد کرده‌اند. هدف مدل کمینه کردن تأثیرات قطع اتصال شبکه و همچنین هزینه انرژی است. مسئله جایابی ایستگاه‌های شارژ برای ناوگان اتوبوس‌های شهری در [۲۶] ارائه‌شده است. این مدل تلاش می‌کند که هزینه‌های ساخت ایستگاه‌ها در کمترین حالت خود قرار داشته باشد. مرجع [۲۷] نیز روشی برای جایابی ایستگاه‌های تعویض باتری در حالت متمرکز ارائه داده است، به‌طوری‌که هزینه‌های تقویت شبکه، هزینه تلفات و هزینه‌های مربوط به ایستگاه‌های تعویض باتری کمینه شوند.

جدول (۱) مقایسه‌ای بین مطالعات گذشته درزمینه جایابی ایستگاه‌های تعویض باتری و مقاله حاضر را ارائه می‌کند.

۱-۳- معرفی روش و نوآوری‌ها

بررسی مطالعاتی که درگذشته در این زمینه صورت گرفته است، نشان می‌دهد که توجه کمتری به جایابی هم‌زمان ایستگاه‌های تعویض و شارژ باتری در حالت شارژ متمرکز معطوف شده است. به‌علاوه ، باتری‌های خودروهای الکتریکی در اثر شارژ و دشارژهای متعدد به‌مرورزمان فرسوده می‌شوند. همچنین حضور ایستگاه شارژ مرکزی در شبکه قدرت به معنای تأثیرگذاری روی پارامترهای فنی مهم شبکه ازجمله تلفات و ولتاژ است. دو پارامتر بیان‌شده به‌صورت مستقیم بر روی جایابی این ایستگاه تأثیرگذار هستند. از سوی دیگر، با توجه این موضوع که مراجعه‌کنندگان با الگوهای تصادفی برای تعویض باتری خود مراجعه می‌کنند، لازم است مدلی احتمالاتی برای محاسبه میزان انرژی مصرفی ایستگاه مرکزی شارژ در ساعات مختلف روز در دسترس باشد. برخلاف پژوهش‌های بررسی‌شده توسط نویسندگان، در این مطالعه تمام فاکتورهای بیان‌شده در نظر گرفته‌شده‌اند، که این موضوع در جدول (۱) قابل‌مشاهده است.

جدول (۱): مقایسه مطالعات گذشته با مدل بیان‌شده در این مقاله

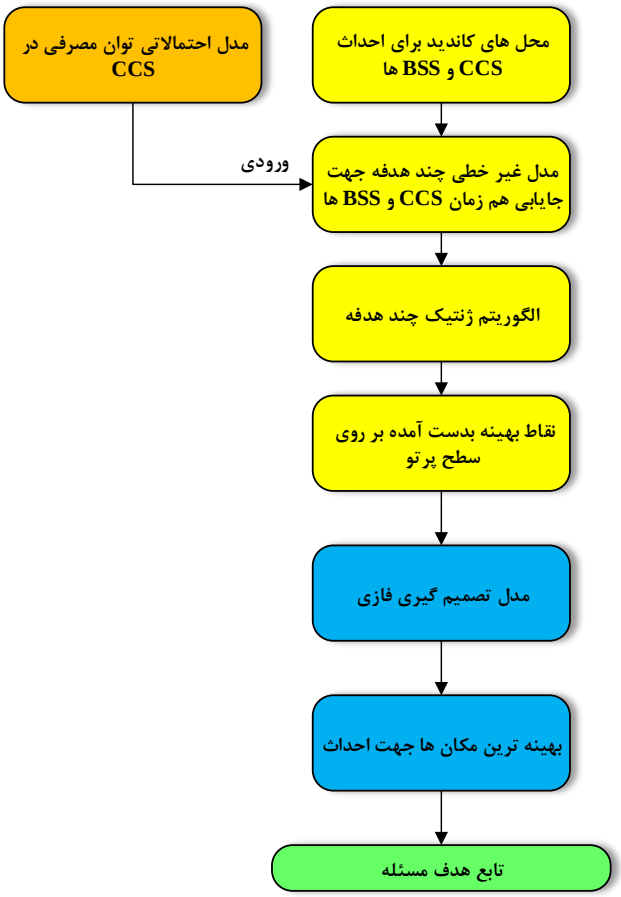
ویژگی / مرجع	الف	ب	ج	د	ه	و	ی
[۱۲]	×	✓	×	×	✓	✓	×
[۱۳]	×	×	×	×	✓	×	×
[۱۴]	×	×	×	×	✓	×	×
[۱۵]	×	×	×	✓	✓	×	×
[۱۶]	✓	×	×	×	×	×	×
[۱۷]	×	✓	✓	×	×	✓	×
[۱۹]	×	×	×	×	✓	×	×
[۲۰]	×	✓	×	×	×	×	×
[۲۷]	✓	✓	×	✓	✓	✓	×
مدل ارائه‌شده	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

الف: در نظر گرفتن فرسودگی باتری، **ب**: حالت شارژ متمرکز،**ج**: جایابی ایستگاه شارژ مرکزی، **د**: در نظر گرفتن پخش بار شبکه، **ه**: جایابی ایستگاه تعویض باتری، **و**: در نظر گرفتن سیستم حمل‌ونقل باتری‌ها، **ی**: استفاده از روش تصمیم‌گیری فازی برای تصمیم‌گیری نهایی

بر این اساس هدف اصلی این مقاله ارائه چارچوبی برای جایابی هم‌زمان ایستگاه‌های تعویض باتری و ایستگاه مرکزی شارژ در حالت شارژ متمرکز است. به این منظور ابتدا یک مدل احتمالاتی ارائه می‌شود که با استفاده از آن میزان توان مصرفی در یک ایستگاه مرکزی شارژ در طول ۲۴ ساعت در یک روز نمونه تخمین زده شود. در قدم بعدی یک مدل غیرخطی ارائه می‌شود تا با استفاده از آن جایابی بهینه ایستگاه تعویض باتری و ایستگاه مرکزی شارژ به‌گونه‌ای صورت گیرد که هزینه‌های مربوط به جابه‌جایی باتری‌ها، میزان تلفات شبکه و شاخص ولتاژ شبکه در بهینه‌ترین حالت خود قرار داشته باشند. علت غیرخطی بودن مدل حضور معادلات مربوط به پخش بار در محاسبات است. خروجی مدل احتمالاتی توان مصرفی در ایستگاه مرکزی شارژ به‌عنوان ورودی مدل غیرخطی مورداستفاده قرار می‌گیرد. از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده‌شده است. درنهایت، از روش تصمیم‌گیری فازی برای انتخاب مناسب‌ترین پاسخ از میان جواب‌های به‌دست‌آمده استفاده‌شده است. شکل (۲) نحوه عملکرد مدل بیان‌شده در این مقاله و همچنین ارتباط بین قسمت‌های مختلف آن را نشان می‌دهد.

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

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]



شکل (۲): روند نمای مدل ارائه‌شده

بر این اساس نوآوری‌های این مقاله به‌صورت زیر قابل‌بیان هستند:

- ارائه یک مدل غیرخطی بر اساس الگوریتم ژنتیک چندهدفه که با استفاده از آن جایابی ایستگاه‌های تعویض باتری و ایستگاه شارژ مرکزی به‌صورت هم‌زمان صورت می‌گیرد.
- از روش تصمیم‌گیری فازی برای انتخاب مناسب‌ترین پاسخ برای حل مسئله استفاده‌شده است و مصالحه میان توابع هدف مختلف موردبررسی قرارگرفته است.
- پارامترهای شبکه ازجمله تلفات شبکه و شاخص ولتاژ در مطالعه لحاظ شده‌اند.
- تأثیر فرسودگی باتری‌ها و نحوه مدیریت شارژ باتری‌ها در ایستگاه مرکزی شارژ در این مطالعه در نظر گرفته‌شده است و همچنین اثر این عوامل بر جایابی بهینه ایستگاه‌ها از طریق مطالعات عددی گوناگون موردبررسی قرارگرفته است.

سایر بخش‌های این مقاله به‌صورت زیر تنظیم‌شده است: در بخش ۲ مدل احتمالاتی توان مصرفی در ایستگاه مرکزی شارژ معرفی‌شده است. در بخش ۳ به توضیح الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جهت جایابی هم‌زمان ایستگاه‌های تعویض و ایستگاه شارژ متمرکز پرداخته‌شده است. بخش ۴ به تشریح روش تصمیم‌گیری فازی اختصاص‌یافته است. نتایج عددی در بخش ۵ آورده شده‌اند و درنهایت، در بخش ۶ نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی احتمالاتی شارژ باتری‌ها

باتری‌های خالی‌شده که از ایستگاه‌های تعویض باتری جمع‌آوری‌شده‌اند، در زمان‌های مشخصی برای شارژ مجدد به ایستگاه مرکزی شارژ تحویل داده می‌شوند. باتری‌ها با استفاده از تجهیزات شارژ با توان‌های متفاوتی در این محل شارژ می‌شوند و سپس بین ایستگاه‌های تعویض باتری توزیع می‌شوند. برای پی بردن به این موضوع که چه مقدار توان در ایستگاه مرکزی شارژ در طول یک روز نمونه مصرف می‌شود، ابتدا باید مدلی برای مدیریت شارژ باتری‌ها در ایستگاه مرکزی شارژ معرفی شود [۲۷].

در این مقاله از مدل ارائه‌شده در مرجع [۲۷] برای محاسبه میزان توان مصرفی در ایستگاه مرکزی شارژ استفاده‌شده است. تابع هدف مدل ارائه‌شده در [۲۷] با استفاده از مدل ارائه‌شده در [۲۸] برای در نظرگیری تأثیر فرسودگی باتری‌ها، اصلاح‌شده است. همچنین با استفاده از مدل احتمالاتی بیان‌شده در [۲۹]، تعداد درخواست‌های تعویض باتری در طول یک روز تخمین زده شده است.

همچنین باید به این موضوع اشاره کرد که خودروهای الکتریکی با سطوح شارژ[۸] مختلف و ظرفیت‌های متفاوت باتری برای تعویض باتری خود مراجعه می‌کنند. این موضوع باعث می‌شود که سناریوهای متفاوتی برای شارژ باتری‌ها در ایستگاه مرکزی شارژ ایجاد شود. احتمالات مربوط به سطح شارژ و ظرفیت باتری‌ها به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده‌شده‌اند. درنتیجه لازم است در این حالت و با فرض استقلال این دو پارامتر از یکدیگر، ۱۵ سناریوی ترکیبی متفاوت برای شارژ باتری‌ها در مدل‌سازی احتمالاتی شارژ در نظر گرفته شود.

شکل (۳) روند نمای مدل احتمالاتی استفاده‌شده در این مقاله را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، در مرحله اول تعداد دفعات جمع‌آوری و توزیع باتری‌ها باید مشخص شود؛ برای مثال دو یا سه بار در طول روز. سپس احتمال وقوع برای سناریوی ترکیبی موردنظر به دست می‌آید. با فرض استقلال، احتمال وقوع هر سناریو حاصل‌ضرب احتمالات متناظر با میزان سطح شارژ اولیه و ظرفیت باتری مراجعه شده برای تعویض است. پس‌ازآن با استفاده از احتمال به‌دست‌آمده در مرحله قبل، تعداد باتری‌هایی که با این سناریو به ایستگاه‌ها مراجعه می‌کنند تخمین زده می‌شود. سپس، این مقادیر به مدل مدیریت شارژ باتری‌ها داده می‌شوند تا پروفیل توان مصرفی ایستگاه مرتبط با این سناریو به دست آید.

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

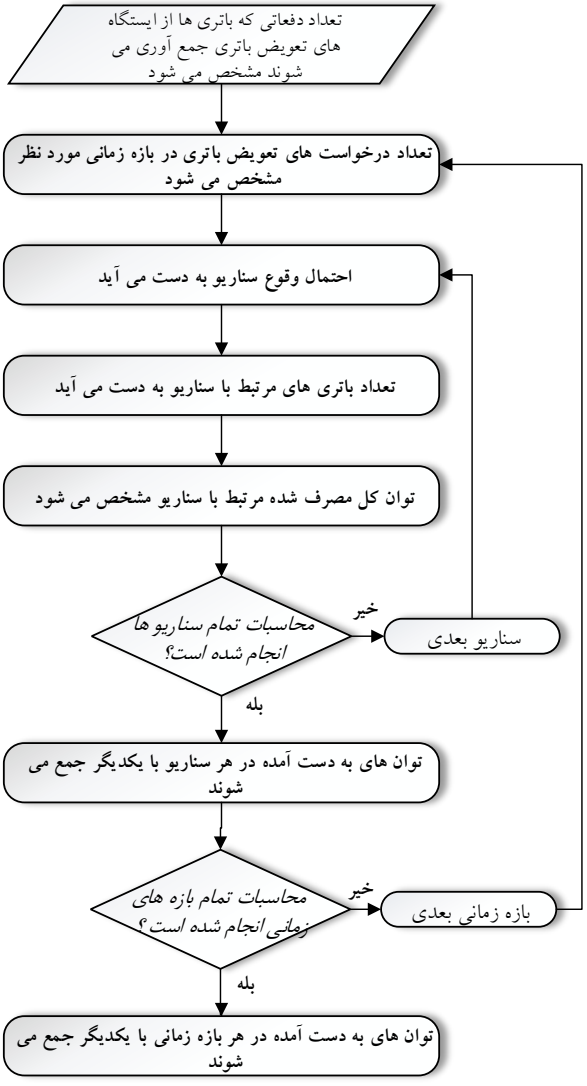
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

جدول (۲): میزان سطح شارژ اولیه و احتمال مرتبط با آن‌ها

سطح شارژ اولیه	۰,۱	۰,۲	۰,۳	۰,۴	۰,۵
احتمال وقوع	۰,۱	۰,۳	۰,۳	۰,۲	۰,۱

جدول (۳): میزان ظرفیت باتری‌های موجود در سیستم و احتمال حضور هرکدام

ظرفیت	۳۰kWh	۶۰kWh	۱۰۰kWh
احتمال وقوع	۰,۳	۰,۵	۰,۲



شکل (۳): روند نمای مدل احتمالاتی محاسبه توان مصرفی در ایستگاه مرکزی شارژ

این مراحل برای تمامی سناریوها انجام‌شده و توان های به‌دست‌آمده با یکدیگر تجمیع می‌شوند تا میزان توان کل برای بازه موردنظر به دست آید. مراحل گفته‌شده در بالا لازم است برای تمام بازه‌های زمانی مدیریت شارژ (مثلا دو یا سه بار در روز) تکرار شده و با تجمیع توان-های شارژ/دشارژ به‌دست‌آمده برای تمام بازه‌های زمانی، امید ریاضی میزان توان کل مصرفی در طول یک روز نمونه محاسبه شود. لازم به ذکر است که در صورت متفاوت بودن الگوی تعویض باتری در زمان-های گوناگون در طول یک سال، لازم است مراحل فوق برای هر یک از بازه‌های موردبررسی تکرار شود.

۳- مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت جایابی هم‌زمان ایستگاه‌های تعویض و شارژ متمرکز

حضور ایستگاه‌های شارژ مرکزی در شبکه باعث تأثیرگذاری بر روی پارامترهایی مثل تلفات شبکه و شاخص ولتاژ خواهد شد. در این مدل تأثیر این دو پارامتر در نظر گرفته خواهد شد. تابع هدف مدل پیشنهادی در معادله (۱) نشان داده‌شده است.

$$Min\ Obj = \min(C_{Tr}.V_{index}.C_{loss}) \qquad (۱)$$

که در آن C_{Tr} ، C_{loss} ، V_{index} به ترتیب بیانگر هزینه سالیانه جابه‌جایی باتری‌ها، هزینه تلفات شبکه و شاخص ولتاژ می‌باشند. همان‌گونه که در معادله (۱) مشاهده می‌شود، تابع هدف کلی مدل خود از ۳ تابع هدف دیگر تشکیل‌شده است. درنتیجه مسئله بهینه‌سازی به‌صورت چندهدفه خواهد بود.

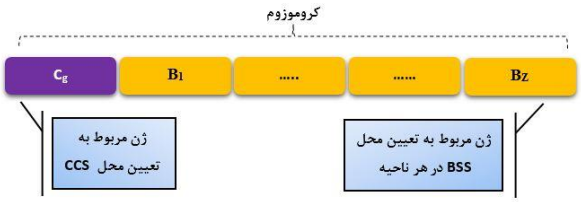
دلیل استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه در حل این مسئله آن است که نهادهای ذینفع در جایابی هم‌زمان ایستگاه‌ها در حالت کلی متفاوت هستند. ایستگاه‌های تعویض و شارژ باتری ممکن است توسط نهادی غیردولتی احداث و مدیریت شوند. از سوی دیگر، شاخص‌های فنی شبکه ازجمله ولتاژ و تلفات برای شرکت توزیع حائز اهمیت هستند. همچنین ۳ تابع هدف مسئله از یک جنس نیستند. درنتیجه، بهینه-سازی چندهدفه در این مقاله مورداستفاده قرارگرفته است.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، خروجی مدل احتمالاتی محاسبه توان مصرفی در ایستگاه مرکزی شارژ به‌عنوان ورودی در این مرحله مورداستفاده قرار می‌گیرد. توان مصرفی در طول ۲۴ ساعت به‌عنوان یک‌بار بر روی باس کاندیدایی که قرار است ایستگاه مرکزی شارژ بر روی آن احداث شود قرار می‌گیرد و به این صورت، شبکه موردمطالعه با مقادیر جدید بار اصلاح می‌شود. در این مقاله معادلات پخش بار توسط نرم‌افزار MATPOWER بر روی شبکه با بار اصلاح‌شده انجام می‌شود تا درنهایت میزان تلفات شبکه و شاخص ولتاژ محاسبه شوند. MATPOWER در محیط نرم‌افزار MATLAB اجرا می‌شود و می‌تواند به‌راحتی جهت انجام محاسبات پخش بار در انواع شبکه‌های قدرت مورداستفاده قرار گیرد. همچنین به این موضوع باید اشاره کرد که میزان بار شبکه در طول فصول گرم (تابستان و بهار) و سرد (پاییز و زمستان) متفاوت است که این مورد نیز در مدل ارائه‌شده در این مقاله در نظر گرفته‌شده است. هم‌زمان با مشخص شدن محل کاندیدا برای ایستگاه مرکزی شارژ، فاصله این ایستگاه با محل ایستگاه‌های تعویض باتری انتخابی نیز مشخص می‌شوند.

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

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

ساختار کروموزوم به کار گرفته‌شده در الگوریتم ژنتیک چندهدفه در شکل (۴) نمایش داده‌شده است.



شکل (۴): ساختار کروموزوم مورداستفاده در الگوریتم

در شکل (۴)، ژن بنفش‌رنگ نماینده محل انتخاب‌شده از میان محل‌های کاندیدا برای ساخت ایستگاه مرکزی شارژ است، و g برابر با تعداد کل محل‌های کاندیدا است. ژن‌های نارنجی‌رنگ نیز بیانگر محل انتخاب‌شده برای احداث ایستگاه تعویض باتری در هر ناحیه هستند و z بیانگر تعداد کل نواحی در نظر گرفته‌شده است. لازم به توضیح است که در این مدل، شبکه موردمطالعه به نواحی متفاوتی تقسیم می‌شود که در هر ناحیه، تعدادی محل کاندیدا برای احداث ایستگاه تعویض باتری قرار دارد و در هر ناحیه، یک محل برای احداث ایستگاه انتخاب می‌شود. تعیین نواحی بر اساس توزیع تخمینی از تقاضای تعویض باتری صورت می‌گیرد.

برای محاسبه توابع هدف مختلف به ازای هر کروموزوم، قدم‌های زیر لازم است طی شود:

۱- مختصات نقاط انتخاب‌شده برای BSSها و CCS توسط کروموزوم تولیدشده مشخص می‌شود.

۲- فاصله BSS انتخابی در هر ناحیه با محل CCS طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$d_{gh} = \sqrt{(x_g - x_h)^2 + (y_g - y_h)^2} \qquad (۲)$$

در این رابطه، g اندیس مربوط به محل کاندیدای ایستگاه شارژ و h اندیس مربوط به محل کاندیدای ایستگاه تعویض باتری است. x_g و y_g مختصات مربوط g-اُمین محل کاندیدای CCS هستند. x_h و y_h نیز بیانگر مختصات مربوط h-اُمین محل کاندیدای BSS است. d_{gh} نیز فاصله بین g-اُمین CCS و h-اُمین BSS را نشان می‌دهد.

۳- مجموع فواصل BSSها با CCS مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$d_{tot} = \sum_{h} d_{gh} \qquad (۳)$$

در این رابطه d_{tot} مجموع فواصل BSSها از CCS انتخابی در کروموزوم است.

۴- هزینه کل جابه‌جایی باتری‌ها بین BSSها و CCS در رابطه (۴) محاسبه‌شده است.

$$C_{Tr} = d_{tot} * \varphi * q * 2 * 365 \qquad (۴)$$

در این رابطه، φ هزینه جابه‌جایی باتری‌ها به ازای هر کیلومتر است. q تعداد دفعات توزیع باتری‌ها بین ایستگاه‌های تعویض باتری در هرروز (مثلاً دو یا سه بار در روز) است. علت استفاده از عدد ۲ در رابطه به این منظور است که عملیات توزیع شامل رفت‌وبرگشت میان CSS و BSSها می‌باشد. همچنین ضرب شدن رابطه در ۳۶۵ به این خاطر است که هزینه سالیانه جابجایی باتری‌ها مدنظر است.

۵- خروجی مدل احتمالاتی توان مصرفی در ایستگاه مرکزی شارژ در طول روز به بار باس محل قرارگیری CSS اضافه می‌شود.

۶- شبکه موردمطالعه با استفاده از اطلاعات گام ۵ و مشخصات بار مربوط به فصول سرد و یا گرم سال اصلاح می‌شود.

۷- پخش بار توسط نرم‌افزار MATPOWER انجام می‌شود تا ولتاژ باس‌ها و سایر پارامترهای شبکه محاسبه شوند.

۸ – قدر مطلق اختلاف ولتاژ هر باس برحسب پریونیت از مقدار نامی (یک پریونیت) محاسبه می‌شود. این موضوع در معادله (۵) نشان داده‌شده است. این کار برای تمامی باس‌ها تکرار می‌شود.

$$V_{abs.j} = |V_{bus.j} - 1| \qquad (۵)$$

در این معادله $V_{bus.j}$ ولتاژ باس j ام و $V_{abs.j}$ قدر مطلق اختلاف ولتاژ باس j ام از یک پریونیت است.

۹– ماکزیمم مقدار به‌دست‌آمده در مرحله ۸ در هر ساعت روز نمونه موردبررسی مطابق رابطه (۶) مشخص می‌شود.

$$V_{abs.w} = \max_{j} V_{abs.j} \qquad (۶)$$

در این معادله، $V_{abs.w}$ حداکثر مقدار به‌دست‌آمده برای $V_{abs.j}$ در ساعت w است.

۱۰– تلفات کل شبکه در ساعت w محاسبه می‌شود.

۱۱ – قدم‌های ۷ تا ۱۰ برای ۲۴ ساعت روز نمونه تکرار می‌شود.

۱۲ – حداکثر مقدار به‌دست‌آمده برای $V_{abs.w}$ در طول ۲۴ ساعت به‌عنوان شاخص ولتاژ در روز نمونه فصول سرد یا گرم در نظر گرفته می‌شود. این موضوع در رابطه (۷) نشان داده‌شده است.

$$V_{abs.se} = \max_{w} V_{abs.w} \qquad (۷)$$

۱۳- تلفات به‌دست‌آمده در تمامی ساعت‌ها با یکدیگر جمع می‌شوند تا تلفات کل در طول روز نمونه محاسبه شود. رابطه متناظر در معادله (۸) نشان داده‌شده است:

$$P_{loss.daily.se} = \sum_{w=1}^{24} P_{loss.w} \qquad (۸)$$

در این معادله، $P_{loss.w}$ میزان تلفات در ساعت w است و میزان کل تلفات روزانه توسط $P_{loss.daily}$ مشخص شده است.

۱۴ – میزان هزینه تلفات در روز نمونه فصل موردنظر محاسبه می‌شود.

$$C_{loss.se} = P_{loss.daily.se} * p_{el} * D_{se} \qquad (۹)$$

در این رابطه $C_{loss.se}$ هزینه کل تلفات در هر فصل است و p_{el} هزینه تلفات به ازای هر کیلووات ساعت و D_{se} تعداد روزهای مربوط به فصول گرم یا سرد سال است. در این مطالعه طول مدت فصول سرد ۱۸۰ روز و برای فصول گرم ۱۸۶ روز در نظر گرفته‌شده است.

۱۵ – قدم‌های ۶ تا ۱۴ برای هر فصل تکرار می‌شود.

۱۶- میزان تلفات به‌دست‌آمده برای فصول سرد و گرم با یکدیگر جمع می‌شوند تا هزینه سالیانه تلفات محاسبه شود. این موضوع در رابطه (۱۰) نشان داده‌شده است.

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

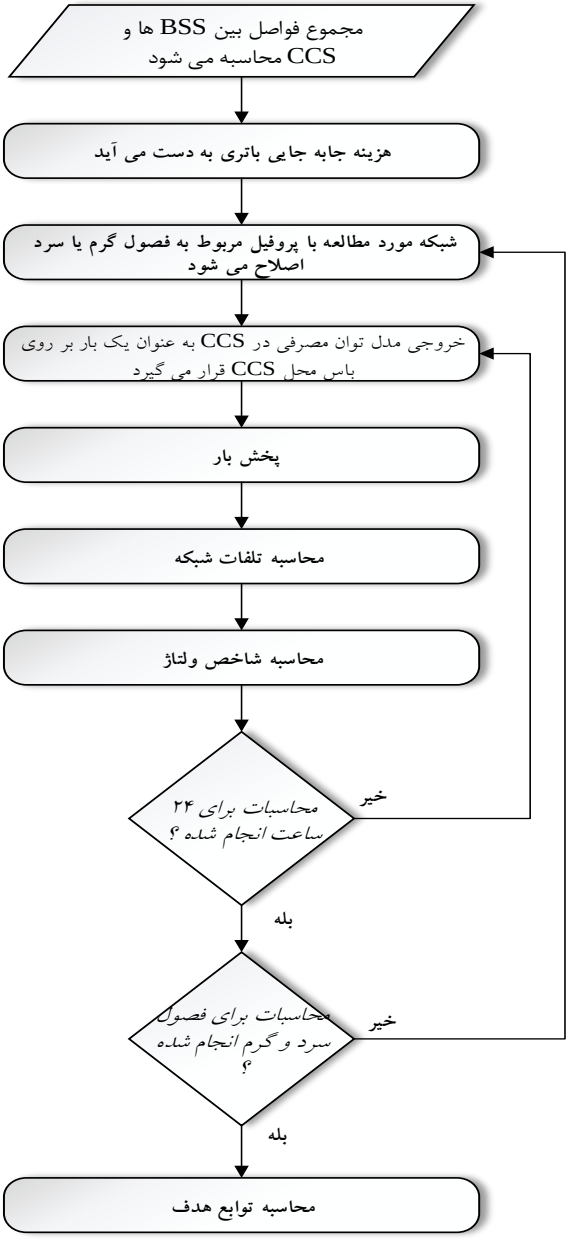
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

$$C_{loss} = \sum_{se} C_{loss.se} \quad (۱۰)$$

۱۷ - بیشینه مقدار به‌دست‌آمده در مرحله ۱۲ برای هر دو فصل به‌عنوان شاخص ولتاژ در نظر گرفته می‌شود. رابطه (۱۱) بیانگر این موضوع است.

$$V_{index} = \max_{se} V_{abs.se} \quad (۱۱)$$

شکل (۵) روند نمای محاسبه توابع هدف مدل بیان‌شده را نمایش می‌دهد.



شکل (۵): روند نمای مدل جایابی ایستگاه‌ها

الگوریتم ژنتیک چندهدفه با تولید مقادیر تصادفی برای کروموزوم‌ها و در نظر گرفتن آن‌ها به‌عنوان ورودی به این مدل، مقدار هر سه تابع هدف مسئله را محاسبه می‌کند. قیدهای مربوط به الگوریتم ژنتیک در روابط (۱۲) تا (۱۴) آورده شده است.

$$1 \le c_g \le g \quad (۱۲)$$

$$O_z \le B_z \le P_z \quad (۱۳)$$

$$c_g, B_z \in \mathbb{N} \quad (۱۴)$$

c_g و g در رابطه (۱۲) به ترتیب بیانگر شماره محل CCS کاندیدای انتخابی در کروموزوم و تعداد کل نقاط کاندیدا برای احداث CCS هستند. همچنین، P_z و O_z در رابطه (۱۳) به ترتیب بیانگر بالاترین و پایین‌ترین شماره محل BSS کاندیدای موجود در ناحیه z هستند، و B_z شماره محل BSS انتخابی در آن ناحیه را نشان می‌دهد. برای مثال فرض کنید در ناحیه ۲، شماره اولین BSS کاندیدا برابر ۵ و آخرین شماره برابر ۱۱ باشد. پس ژن انتخابی برای B_2 باید عددی بین ۵ و ۱۱ باشد. درنهایت، قید (۱۴) بیانگر این است که شماره‌های انتخابی برای موقعیت ایستگاه‌ها باید اعدادی طبیعی باشند.

به‌عنوان یک مثال دیگر، فرض کنید کروموزوم تولیدشده به‌صورت شکل (۶) باشد. این کروموزوم به این معنا است که CCS کاندیدای شماره ۱۰ ، BBS شماره ۲ در ناحیه ۱ ، BBS شماره ۴ در ناحیه ۲، BBS شماره ۵ در ناحیه ۳ و BBS شماره ۸ در ناحیه ۴ انتخاب‌شده‌اند.



شکل (۶): نمونه کروموزوم به‌دست‌آمده

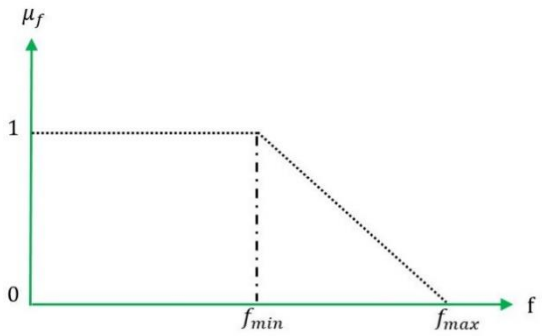
درنهایت، الگوریتم ژنتیک یک سطح پرتو متشکل از نقاط بهینه به‌دست‌آمده را در خروجی نمایش می‌دهد که انتخاب بهترین نقطه از میان این نقاط، توسط روش تصمیم‌گیری فازی انجام می‌شود. در بخش بعدی به این روش پرداخته می‌شود.

۴- روش تصمیم‌گیری فازی

بعد از اجرای الگوریتم ژنتیک چندهدفه بر روی مدل ارائه‌شده در بخش ۳، خروجی آن‌یک سطح پرتو با تعدادی نقطه خواهد بود. بااین‌حال، لازم است روشی به کار گرفته شود تا تصمیم نهایی را از بین این گزینه‌ها اتخاذ کند، به‌گونه‌ای که هر ۳ تابع هدف تعریف‌شده در مسئله در بهینه‌ترین حالت خود قرار داشته باشند. برای این منظور، روش‌های زیادی معرفی‌شده است. در میان این روش‌ها، روش تصمیم‌گیری فازی[۹] به‌عنوان یک روش ساده و کارآمد در این زمینه معرفی‌شده است [۳۰]. برای انجام این کار توابع فازی برای نشان دادن میزان رضایت تصمیم‌گیرنده با توجه به مقادیر توابع هدف مختلف مرتبط با پاسخ بهینه به کار گرفته می‌شوند. با توجه به شکل (۷)، در این مطالعه برای مدل‌سازی سطوح رضایت شخص تصمیم گیر از میزان تحقق توابع هدف مختلف، از توابع ذوزنقه‌ای استفاده‌شده است؛ به این شکل که اگر μ_f برابر ۱ باشد، بیانگر رضایت کامل شخص تصمیم گیر از تحقق تابع هدف f است و در مقابل، اگر این مقدار برابر صفر باشد، بیانگر عدم رضایت فرد تصمیم گیر است. در این شکل، f_{min}نشان‌دهنده بیشترین مقدار تابع هدفی است که رضایت کامل

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

شخص تصمیم گیر را تأمین می‌کند و در مقابل، مقادیر تابع هدف برابر یا بیشتر از f_{max}نیز عدم رضایت کامل شخص تصمیم گیر را به دنبال خواهد داشت.



شکل (۷): نحوه ارتباط سطوح مختلف رضایت با مقادیر تابع هدف درروش تصمیم‌گیری فازی

بر این اساس، درصورتی‌که مشابه این مطالعه تابع هدف کلی شامل ۳ تابع هدف باشد، برای هرکدام از آن‌ها باید مقادیر μ_d ، f_{min} و f_{max} توسط شخص تصمیم گیر تعیین شود. مقدار μ_d برای هر تابع هدف را می‌توان بر اساس اولویت یا حساسیت آن تابع در مطالعه مشخص کرد، به‌طوری‌که مقادیر بزرگ‌تر بیانگر اولویت بالاتر تحقق آن تابع هدف برای شخص تصمیم گیر است. برای مثال، اگر تابع هدف اول اولویت بیشتری نسبت به تابع هدف دوم داشته باشد و تابع هدف دوم نیز اولویت بیشتری نسبت به تابع هدف سوم داشته باشد، یکی از حالت‌هایی که می‌توان برای μهای این توابع در نظر گرفت به ترتیب برابر ۰,۹ ، ۰,۵ ، و ۰,۲ است. به این شکل برای مدل تصمیم‌گیری فازی مشخص می‌شود که هرکدام از توابع چه مقدار نسبت به دیگر توابع هدف اولویت دارد.

درنهایت، جوابی تصمیم نهایی خواهد بود که سطوح رضایت مرتبط با آن کمترین انحراف (MSD[۱۰]) را از مقادیر μ_d موردنظر داشته باشد. برای پی بردن به این موضوع لازم است مسئله بهینه‌سازی موجود در معادله (۱۵) حل شود. جواب حاصل از این مسئله بهینه‌سازی تصمیم نهایی گرفته‌شده توسط مدل تصمیم‌گیری فازی را مشخص می‌کند.

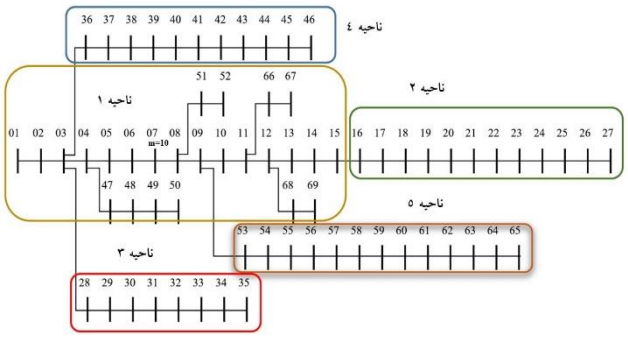
$$MSD = Min \sum_{i=1}^{3} \left|\mu_{di} - \mu_{fi}(X)\right|^{n} . n \geq 1. \qquad (۱۵)$$
$$X \in Solutionset$$

در این رابطه n میزان حساسیت جواب نهایی به سطوح مورد انتظار است که در این مطالعه، برابر ۳ در نظر گرفته‌شده است.

۵- نتایج عددی

۵-۱- مطالعات موردی

در این بخش مدل توسعه داده‌شده بر روی شبکه آزمون ۶۹ باسه IEEE پیاده‌سازی، و سناریوهای متفاوتی برای بررسی نتایج تعریف‌شده است. شبکه مورداستفاده در این بخش در شکل (۸) نمایش داده‌شده است. اطلاعات کامل مربوط به این شبکه توزیع در مرجع [۳۱] قابل‌دسترسی است.



شکل (۸): شبکه توزیع ۶۹ باسه IEEE

برای انجام این کار سیستم موردمطالعه به ۵ ناحیه مختلف تقسیم‌شده است و ۱۵ نقطه کاندیدا برای ساخت BSSها و ۱۲ نقطه کاندیدا برای ساخت CCS در آن مشخص‌شده است. شکل (۹) موقعیت مکانی نقاط کاندیدا و تعداد ایستگاه‌ها در هر ناحیه را نمایش می‌دهد.



شکل (۹): موقعیت مکانی و تعداد نقاط کاندیدا برای احداث BSSها و CCS

در شکل (۹) دایره‌های قرمزرنگ نشان‌دهنده ایستگاه تعویض باتری و مثلث‌های زردرنگ نشان‌دهنده ایستگاه مرکزی شارژ می‌باشند. در این مطالعه فرض شده است که تنها یک CCS در شبکه توزیع وجود خواهد داشت.

اطلاعات مربوط به پارامترهای ورودی، مختصات محل‌های کاندیدای BSS و مختصات محل‌های کاندیدای CCS به ترتیب در جدول‌های (۴)، (۵) و (۶) نمایش داده شده‌اند.

جدول (۴): مقادیر پارامترهای ورودی

پارامتر	مقدار
p_{el}	۰,۰۵ US$/kWh
φ	۵ US$/km

مطالعه موردی شماره ۱ : در این حالت فرض شده که CCS توانی به شبکه تزریق نمی‌کند و اصطلاحا در حالت No V2G قرار دارد [۲۷]. تعداد کل خودروهای الکتریکی برابر با ۳۴۰ است و باتری‌ها هر ۱۲

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

ساعت یک‌بار جمع‌آوری می‌شوند؛ پس در طول ۲۴ ساعت این عمل ۲ بار اتفاق می‌افتد. حداکثر توان برای شارژ هر باتری در CCS برابر با ۳۰ kW در نظر گرفته‌شده است. همچنین اثر فرسودگی باتری‌ها در این حالت مطابق مرجع [۲۸] در نظر گرفته‌شده است. شکل (۱۰) پروفیل توان مصرفی در این حالت را نمایش می‌دهد.

جدول (۵): مختصات نقاط کاندیدا BSS

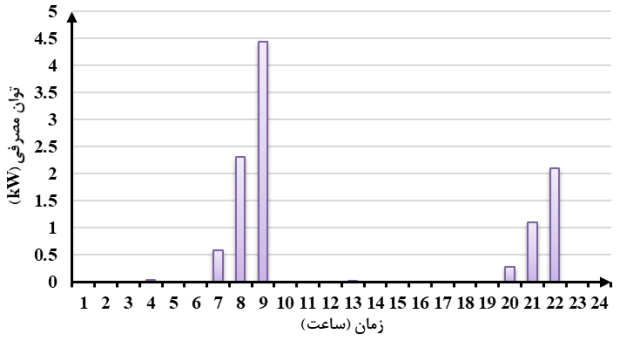
شماره BSS	X	Y	ناحیه قرارگیری
۱	۱۵۷	۲۰۶	۱
۲	۱۲۷	۲۰۰	۱
۳	۱۵۵	۱۹۱	۱
۴	۱۲۸	۲۰۳	۱
۵	۱۳۴	۱۸۸	۱
۶	۱۳۹	۱۸۲	۱
۷	۱۶۴	۲۴۰	۲
۸	۱۷۲	۲۳۰	۲
۹	۲۱۴	۲۳۰	۳
۱۰	۲۰۴	۲۳۵	۳
۱۱	۱۵۹	۱۵۸	۴
۱۲	۱۲۲	۱۴۱	۴
۱۳	۱۴۸	۱۷۴	۴
۱۴	۱۸۹	۱۶۰	۵
۱۵	۱۹۵	۱۶۹	۵

جدول (۶): مختصات نقاط کاندیدا CSS

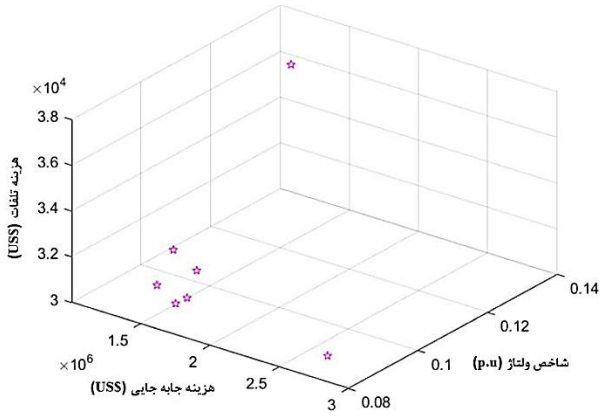
شماره CSS	X	Y	شماره باس
۱	۱۲۱	۱۹۱	۶۶
۲	۱۴۵	۱۹۸	۶
۳	۱۵۰	۲۳۸	۱۱
۴	۱۸۴	۲۳۲	۲۷
۵	۱۶۰	۱۸۴	۱۷
۶	۲۲۲	۲۱۰	۲۳
۷	۲۰۰	۲۳۲	۳۱
۸	۲۰۵	۱۹۰	۳۵
۹	۱۲۷	۱۳۹	۵۴
۱۰	۱۵۲	۱۶۸	۶۳
۱۱	۱۸۶	۱۲۳	۳۷
۱۲	۱۹۷	۱۶۳	۴۳

همان‌گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، مدل مدیریت شارژ تلاش کرده باتری‌ها را به‌صورت عمده در ساعات ابتدایی یا پایانی روز شارژ نماید که این موضوع به دلیل هزینه برق مصرفی کمتر در این ساعات نسبت به ساعات دیگر است.

شکل (۱۱) سطح پرتوی به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک برای این حالت را نمایش می‌دهد.



شکل (۱۰): پروفیل توان مصرفی در مطالعه موردی شماره ۱



شکل (۱۱): سطح پرتو در مطالعه موردی شماره ۱

همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، ۷ نقطه متفاوت بر روی سطح پرتو انتخاب‌شده است. کروموزوم مرتبط با این نقاط و همچنین مقادیر هرکدام از توابع هدف در جدول (۷) نمایش داده‌شده است.

جدول (۷): کروموزوم‌های به‌دست‌آمده در مطالعه موردی ۱

کروموزوم						C_{Tr} (US$)	V_{index} (p.u)	C_{loss} (US$)
۸	۳	۸	۹	۱۱	۱۵	۱۶۲۱۸۰۰	۰,۰۸۴۷	۳۳۰۷۵
۵	۳	۸	۱۰	۱۳	۱۴	۱۲۹۰۴۰۰	۰,۱۳۱۷	۳۶۶۳۸
۲	۳	۸	۱۰	۱۳	۱۵	۱۵۰۱۷۰۰	۰,۰۸۴۸	۳۱۳۰۳
۳	۱	۷	۱۰	۱۳	۱۵	۱۸۰۶۰۰۰	۰,۰۸۴۰	۳۲۵۷۴
۱۱	۳	۸	۹	۱۱	۱۴	۲۷۳۴۴۰۰	۰,۰۸۴۷	۳۰۵۳۸
۷	۱	۸	۱۰	۱۳	۱۵	۱۶۳۸۲۰۰	۰,۰۸۴۷	۳۰۵۳۸
۱۲	۳	۸	۱۰	۱۳	۱۵	۱۷۲۱۱۰۰	۰,۰۸۴۷	۳۱۱۶۳

همان‌طور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، کمترین هزینه جابه‌جایی در کروموزوم دوم به‌دست‌آمده است. کمترین شاخص ولتاژ و کمترین هزینه تلفات نیز به ترتیب در کروموزوم‌های چهارم و پنجم حاصل‌شده است.

حال مقدار μ_d را برای هر ۳ تابع هدف برابر ۰,۹ در نظر گرفته و نقاط به روش تصمیم‌گیری فازی داده می‌شود تا تصمیم نهایی از بین نقاط

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

به‌دست‌آمده اتخاذ شود. سطر سبزرنگ در جدول (۷) نتیجه حاصل از روش تصمیم‌گیری فازی را نشان می‌دهد. مقادیر f_{min} و f_{max} برای هر ۳ تابع هدف درروش تصمیم‌گیری فازی در جدول (۷) نشان داده شده است.

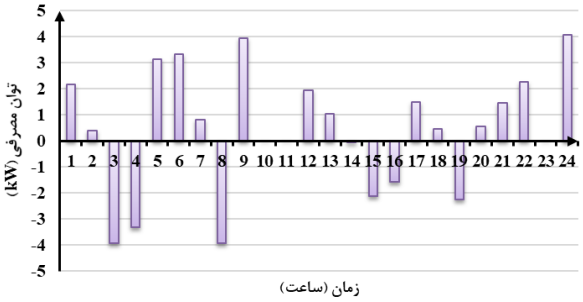
جدول (۸): مقادیر f_{min} و f_{max} در مطالعه موردی ۱

	C_{Tr}	V_{index}	C_{loss}
f_{min}	۱۲۸۰۰۰۰	۰,۰۸۳	۳۰۰۰۰
f_{max}	۲۷۵۰۰۰۰	۰,۱۴	۳۷۰۰۰

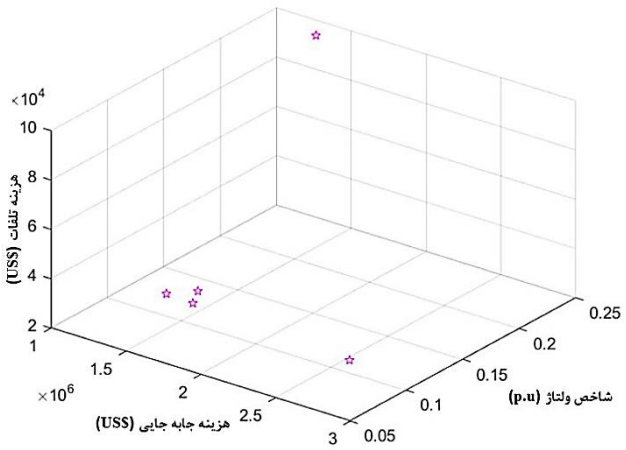
کروموزوم به‌دست‌آمده از روش فازی بیان‌گر این موضوع است که CCS نامزد شماره ۲ که روی باس شماره ۶ قرار دارد برای ساخت انتخاب‌شده است. همچنین در ناحیه‌های ۱ تا ۵ به ترتیب BSSهای شماره ۳، ۸، ۱۰، ۱۳ و ۱۵ برای احداث انتخاب‌شده‌اند. این در حالی است که در کروموزوم دوم و هنگامی‌که CCS شماره ۵ قرارگرفته روی باس ۱۷ انتخاب‌شده است، کمترین حالت هزینه جابه‌جایی اتفاق افتاده است، اما انتخاب این باس باعث شده است تا بیشترین هزینه تلفات به دست آید. از سوی دیگر بدترین حالت شاخص ولتاژ نیز در این نقطه رقم خورده است؛ اما با جابه‌جایی CCS به محل کاندیدای شماره ۳ بر روی باس شماره ۱۱ در کروموزوم چهارم، کمترین مقدار شاخص ولتاژ به‌دست‌آمده است و هزینه تلفات در حدود ۵۰۰۰ هزار دلار کاهش پیداکرده است، اما شاهد افزایش هزینه جابه‌جایی در این حالت هستیم. درنتیجه، در هرکدام از نقاط، تابع یا تابع هدف‌هایی وضعیت بهتری از بقیه دارند، اما نمی‌توان یک پاسخ را به‌عنوان بهترین پاسخ در نظر گرفت. روش فازی این امکان را فراهم می‌کند که با تعیین پارامترهای رضایت تصمیم‌گیری، مناسب‌ترین نقطه انتخاب شود که در این حالت، کروموزوم سوم انتخاب‌شده است.

مطالعه موردی شماره ۲: در این حالت برخلاف حالت قبل، ایستگاه مرکزی شارژ می‌تواند به شبکه قدرت توان تزریق کند و در اصطلاح، در حالت V2G قرار دارد. تعداد کل خودروهای الکتریکی برابر با ۳۴۰ است و باتری‌ها مشابه حالت قبل هر ۱۲ ساعت یک‌بار جمع‌آوری و توزیع می‌شوند. حداکثر توان برای شارژ در CCS برای هر باتری برابر kW ۳۰ است. برخلاف حالت قبل، در این حالت فرسودگی باتری‌ها در نظر گرفته نشده است. شکل (۱۲) پروفیل توان مصرفی در این حالت را نمایش می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل (۱۲) دیده می‌شود، در برخی ساعات میزان توان مصرفی منفی است که این موضوع نشان می‌دهد ایستگاه در این ساعات در حال تزریق توان به شبکه (دشارژ) بوده است. همچنین مجموع توان مصرفی در این حالت نسبت به حالت قبل افزایش پیداکرده است. این موضوع به این دلیل اتفاق افتاده است که مدل در تلاش بوده تا توانی را که در برخی ساعات به شبکه تزریق کرده جبران نماید؛ از طرفی حداکثر توان مصرفی در بیشتر ساعات نسبت به حالت قبل افزایش داشته است. این افزایش به دلیل در نظر نگرفتن عامل فرسودگی باتری در این حالت رخداده است. به‌عبارت‌دیگر، مدل مدیریت شارژ در این حالت دیگر مانع فرسودگی را بر سر راه خود نمی‌بیند و درنتیجه، با توان بیشتری باتری‌ها را شارژ و یا دشارژ می‌کند. شکل (۱۳) سطح پرتوی به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک برای این حالت را نمایش می‌دهد.



شکل (۱۲): پروفیل توان مصرفی در مطالعه موردی شماره ۲



شکل (۱۳): سطح پرتو در مطالعه موردی شماره ۲

همان‌گونه که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، این بار الگوریتم ۵ نقطه متفاوت بر روی سطح پرتو انتخاب کرده است. کروموزوم مرتبط با این نقاط و همچنین مقادیر هرکدام از توابع هدف در جدول (۹) نمایش داده‌شده است.

جدول (۹): کروموزوم‌های به‌دست‌آمده در مطالعه موردی ۲

کروموزوم						C_{Tr} (US$)	V_{index} (p.u)	C_{loss} (US$)
۲	۳	۸	۱۰	۱۳	۱۵	۱۵۰۱۷۰۰	۰,۰۸۶۰	۳۴۳۹۳
۵	۳	۸	۱۰	۱۳	۱۴	۱۲۹۰۴۰۰	۰,۲۴۶۵	۹۴۹۰۴
۱۱	۳	۸	۹	۱۱	۱۴	۲۷۳۴۴۰۰	۰,۰۸۴۷	۳۱۰۰۷
۱۲	۳	۸	۹	۱۱	۱۵	۱۷۲۱۱۰۰	۰,۰۸۴۷	۳۹۹۴۱
۷	۱	۸	۱۰	۱۱	۱۵	۱۶۸۷۲۰۰	۰,۰۸۴۷	۳۴۳۸۲

همان‌طور که در جدول (۹) مشاهده می‌شود، در این حالت کروموزوم‌های به‌دست‌آمده مشابه باحالت قبل هستند، با این تفاوت که ۲ نقطه از ۷ نقطه نسبت به حالت قبل حذف‌شده است و به این معنا است که نقاط یافته شده در مطالعه قبلی همچنان بهینه‌ترین نقاط برای احداث ایستگاه‌ها به شمار می‌روند. این در حالی است که هزینه تلفات در تمام نقاط نسبت به حالت قبل افزایش پیداکرده است. این موضوع در کروموزوم دوم به شکل آشکارتری رخداده است و هزینه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

تلفات و شاخص ولتاژ به‌طور قابل‌توجهی افزایش پیداکرده‌اند. این اتفاق به این دلیل رخداده است که در حالت V2G، توان بیشتری مصرف‌شده و ایستگاه مبادلات توان بیشتری با شبکه داشته است که این به معنای افزایش تلفات و به دنبال آن افزایش هزینه است.

در این حالت نیز مشابه حالت قبل مقدار μ_d برای هر ۳ تابع هدف برابر ۰٫۹ در نظر گرفته‌شده است؛ اما همان‌گونه که در سطر سبزرنگ دیده می‌شود، روش تصمیم‌گیری فازی برای این حالت هم کروموزومی مشابه حالت قبل را انتخاب کرده است. علت این اتفاق را می‌توان این‌گونه توجیه کرد: چون در این حالت مقادیر μ_d یکسان بوده و هیچ‌کدام از توابع هدف بر دیگری برتری نداشته است، باوجود نقاطی که هزینه تلفات و یا شاخص ولتاژ کمتر داشته‌اند، این نقطه به این خاطر انتخاب‌شده است که هزینه‌های جابه‌جایی در آن نسبت به سایر نقاط به میزان قابل‌توجهی کمتر بوده است و این مقدار به‌اندازه‌ای بوده که باوجود بیشتر بودن هزینه تلفات و شاخص ولتاژ، بازهم مدل این نقطه را انتخاب کند. در قسمت‌های بعد با تغییر مقادیر μ_d برای توابع هدف مختلف تأثیر این موضوع بیشتر موردبررسی قرار خواهد گرفت. مقادیر f_{min} و f_{max}انتخابی در این حالت برای هر ۳ تابع هدف در جدول (۱۰) نشان داده شده است.

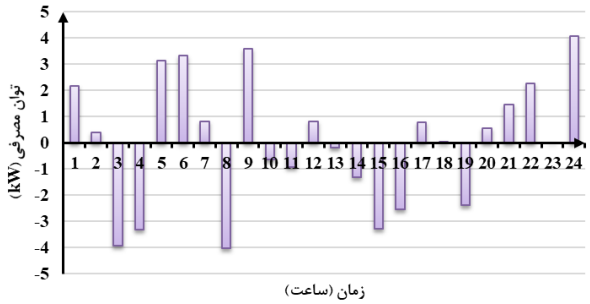
جدول (۱۰): مقادیر f_{min} و f_{max} در مطالعه موردی ۲

	C_{Tr}	V_{index}	C_{loss}
f_{min}	۱۲۸۰۰۰۰	۰٫۰۸۳	۳۰۰۰۰
f_{max}	۲۹۵۰۰۰۰	۰٫۲۶	۹۵۰۰۰

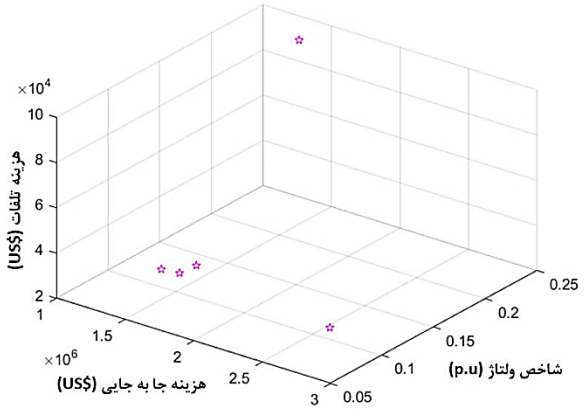
مطالعه موردی شماره ۳: استفاده از انرژی‌های نو همچون انرژی خورشیدی در تولید برق به دلایل زیست‌محیطی و داشتن صرفه اقتصادی بالا همواره در سال‌های اخیر موردتوجه بوده است [۳۲]. ترکیب استفاده از پنل‌های فتوولتائیک (PV[۱۱]) در ایستگاه‌های شارژ باتری‌های خودروهای الکتریکی می‌تواند بهره‌وری این ایستگاه‌ها را بهبود بخشد. همچنین در ساعاتی که نیاز به استفاده از انرژی تولیدشده توسط این پنل‌ها نیست، می‌توان مقادیر مازاد بر مصرف را به شبکه تزریق کرد و به این شکل میزان درآمد حاصل از ایستگاه را نیز افزایش داد [۳۳].

بنابراین در این مطالعه موردی به موضوع ترکیب پنل‌های PV و ایستگاه مرکزی شارژ پرداخته‌شده است و این‌گونه در نظر گرفته‌شده است که در ایستگاه مرکزی شارژ، پنل‌های PV با مجموع ظرفیت ۱٫۵ مگاوات قرار دارند. پروفیل توان تولیدی در پنل‌های PV از مرجع [۳۴] استخراج‌شده است. در این حالت تمام پارامترها مشابه با مطالعه موردی شماره ۲ است و تنها تفاوت، حضور پنل‌های PV در ایستگاه است. همچنین جهت انجام مطالعات پخش بار در فصول گرم و سرد، متوسط توان تولیدی پنل‌های PV در این بازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. شکل شماره (۱۴) پروفیل توان خالص مصرفی شبکه را در فصل گرم و در حضور پنل‌های PV نمایش می‌دهد.

در این حالت انتظار داریم که در ساعات مختلف، توان خالص مصرفی در ایستگاه مرکزی شارژ نسبت به حالت قبل کاهش داشته باشد، یا در ساعات نبود تابش مقدار مشابه با حالت قبل داشته باشد که این موضوع کاملا در شکل (۱۴) قابل‌مشاهده است. علت کاهش توان مصرفی در برخی ساعات به این دلیل است که توان تولیدشده در پنل‌های خورشیدی به کمک ایستگاه شارژ در این ساعات آمده و حتی در برخی ساعات که ایستگاه در حالت V2G قرار داشته و در حال تزریق توان به شبکه بوده، توان تولیدی در پنل‌های خورشیدی نیز به آن مقدار اضافه شده است. علت ثابت بودن توان در ساعت ابتدایی روز مثل ساعات ۱ تا ۶ بامداد به این خاطر است که خورشید تابش لازم برای تولید توان در این ساعات را نداشته است؛ بنابراین توانی در پنل‌ها تولید نشده است. شکل (۱۵) سطح پرتوی به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک در این حالت را نمایش می‌دهد.



شکل (۱۴): پروفیل توان خالص مصرفی در فصل گرم و در حضور PV



شکل (۱۵): سطح پرتو در مطالعه موردی شماره ۳

همان‌گونه که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، این بار نیز الگوریتم ۵ نقطه متفاوت بر روی سطح پرتو انتخاب کرده است، اما برخی از این نقاط متفاوت با حالت قبل است که باعث شده کروموزوم‌های متفاوتی تولید شود. کروموزوم مرتبط با این نقاط و همچنین مقادیر هرکدام از توابع هدف در جدول (۱۱) نمایش داده شده است.

همان‌گونه که در جدول (۱۱) مشاهده می‌شود، دو کروموزوم مشابه حالت قبل است، اما سه کروموزوم دیگر دچار تغییراتی شده‌اند. در دو کروموزوم مشابه مقدار هزینه تلفات یا تقریبا ثابت باقی‌مانده یا به مقدار قابل‌توجهی کاهش داشته است که این اتفاق به این دلیل رخ

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

داده است که مقداری از توان از طریق پنل‌های خورشیدی تهیه‌شده است و در نتیجه، تلفات شبکه کاهش پیداکرده است. مقادیر مربوط به جابه‌جایی نیز در این کروموزوم‌ها ثابت باقی‌مانده است، زیرا محل CCS و BSSها تغییری نداشته است. در سایر کروموزوم‌ها نیز درمجموع کروموزوم‌هایی انتخاب‌شده است که هزینه تلفات در آن‌ها کم‌تر از حالت قبل است. اندازه شاخص ولتاژ نیز در همان محدوده حالت قبل باقی‌مانده است.

جدول (۱۱): کروموزوم‌های به‌دست‌آمده در مطالعه موردی ۳

کروموزوم						C_{Tr} (US$)	V_{index} (p.u)	C_{loss} (US$)
۱۱	۳	۸	۹	۱۱	۱۴	۲۷۳۴۴۰۰	۰,۰۸۴۷	۳۱۰۱۹
۷	۱	۸	۱۰	۱۳	۱۵	۱۶۳۸۲۰۰	۰,۰۸۴۷	۳۴۵۱۹
۲	۳	۸	۱۰	۱۳	۱۴	۱۵۰۴۱۰۰	۰,۰۸۴۸	۳۳۶۲۰
۵	۳	۸	۱۰	۱۳	۱۴	۱۲۹۰۴۰۰	۰,۲۴۶۵	۹۰۵۰۷
۱۲	۳	۸	۱۰	۱۱	۱۴	۱۷۶۰۸۰۰	۰,۰۸۴۷	۴۰۱۸۳

در این حالت نیز مشابه حالت قبل مقدار μ_d برای هر ۳ تابع هدف برابر ۰,۹ در نظر گرفته شده است. سطر سبزرنگ در جدول شماره (۱۱) کروموزوم انتخاب‌شده توسط روش فازی در این حال را نمایش می‌دهد. کروموزوم انتخابی در این حالت تقریبا مشابه کروموزوم انتخابی در حالت قبل است و تنها تفاوت در ژن آخر آن‌ها است که محلی متفاوت برای ایستگاه احداثی در منطقه پنجم انتخاب‌شده است. در نتیجه، به‌کارگیری انرژی خورشیدی در ایستگاه‌های شارژ، علاوه بر تاثیر بر شاخص‌های فنی شبکه همچون تلفات و پروفیل ولتاژ، بر جایابی بهینه ایستگاه نیز تاثیرگذار است؛ چرا که در این حالت، عملاً جایابی همزمان ایستگاه و پنل فتوولتاییک مدنظر قرار می‌گیرد. مقادیر f_{min} و f_{max}انتخابی در این حالت برای هر ۳ تابع هدف در جدول (۱۲) نشان داده شده است.

جدول (۱۲): مقادیر f_{min} و f_{max} در مطالعه موردی ۳

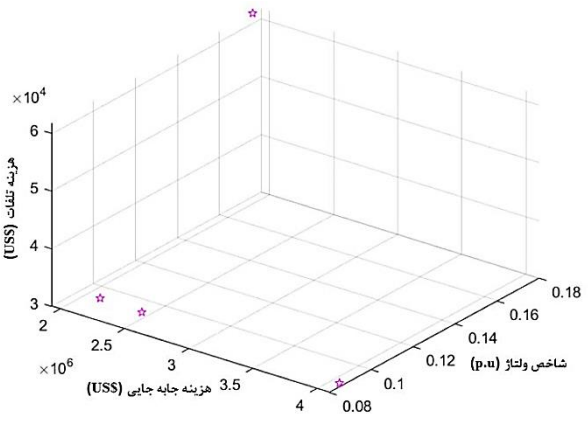
	C_{Tr}	V_{index}	C_{loss}
f_{min}	۱۲۹۰۰۰۰	۰,۰۸۳	۳۰۰۰۰
f_{max}	۲۸۰۰۰۰۰	۰,۳	۹۱۰۰۰

۵-۲- تحلیل حساسیت

در این بخش برخی پارامترهای مهم مؤثر بر عملکرد مدل مانند تعداد دفعات توزیع باتری‌ها، حداکثر توان شارژ/دشارژ باتری در CCS و همچنین مقادیر μ_d را تغییر داده، و تأثیر آن‌ها بر روی نتایج مشاهده می‌شود.

تحلیل حساسیت شماره ۱: ابتدا همه‌ی پارامترها را مشابه مطالعه موردی شماره ۲ قرار داده، با این تفاوت که تعداد دفعات توزیع و جمع‌آوری باتری‌ها از ۲ بار در طول روز به ۳ بار افزایش پیدا می‌کند. شکل (۱۶) سطح پرتوی به‌دست‌آمده برای این حالت را نمایش می‌دهد.

در این حالت، الگوریتم ۴ نقطه متفاوت را روی سطح پرتو پیداکرده است. کروموزوم مرتبط با این نقاط و همچنین مقادیر هرکدام از توابع هدف در جدول (۱۳) نمایش داده شده است.



شکل (۱۶): سطح پرتو هنگام افزایش تعداد دفعات توزیع باتری

جدول (۱۳): کروموزوم‌های به‌دست‌آمده هنگام افزایش تعداد دفعات توزیع باتری

کروموزوم						C_{Tr} (US$)	V_{index} (p.u)	C_{loss} (US$)
۵	۳	۸	۱۰	۱۳	۱۴	۱۹۳۵۶۰۰	۰,۱۷۵۹	۶۱۸۰۴
۱۱	۳	۸	۹	۱۱	۱۴	۴۱۰۱۶۰۰	۰,۰۸۴۷	۳۰۷۵۱
۷	۱	۸	۱۰	۱۳	۱۴	۲۵۶۲۹۰۰	۰,۰۸۴۷	۳۲۳۹۹
۲	۳	۸	۱۰	۱۳	۱۵	۲۲۵۲۵۰۰	۰,۰۸۳۸	۳۲۸۵۸

افزایش تعداد دفعات توزیع و جمع‌آوری باتری‌ها از دو جهت تأثیرگذار خواهد بود. اولین مورد به این دلیل است که با افزایش تعداد دفعات جابجایی، هزینه مربوطه افزایش می‌یابد و درنتیجه، مدل تلاش می‌کند نقاطی را پیدا کند که درنهایت، مجموع فواصل BSSها با CCS در کمترین حالت ممکن باشد. از طرف دیگر، افزایش تعداد دفعات باعث می‌شود تا زمان کمتری برای شارژ باتری‌ها در CCS در دسترس باشد و این اتفاق باعث می‌شود در برخی بازه‌های زمانی، توان مصرفی در CCS افزایش پیدا کند و به دنبال آن، شاهد افزایش هزینه‌های تلفات باشیم. در این حالت نیز مشابه حالت قبل، مقدار μ_d برای هر ۳ تابع هدف برابر ۰,۹ در نظر گرفته‌شده است. درنهایت، روش تصمیم‌گیری فازی سومین نقطه را به‌عنوان پاسخ بهینه انتخاب کرده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این بار روش تصمیم‌گیری فازی نقطه متفاوتی را انتخاب کرده است؛ زیرا در این حالت طبق جدول (۱۳)، هزینه‌های جابه‌جایی نیز دچار افزایش شده‌اند، پس مدل به دنبال نقطه‌ای بوده است که در عین داشتن هزینه جابه‌جایی کم، دارای هزینه تلفات کمتری نیز باشد.

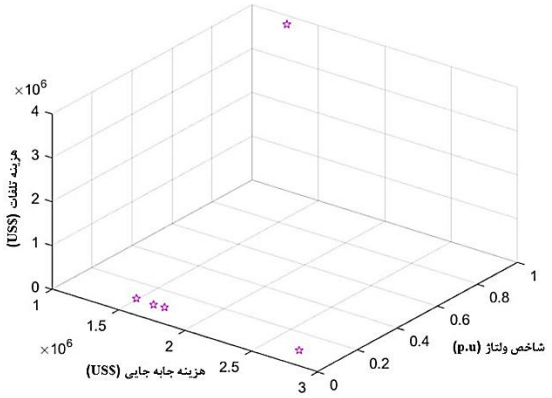
تحلیل حساسیت شماره ۲: حال این بار همه پارامترها را مشابه مطالعه موردی دوم قرار داده، و مقدار حداکثر توان در دسترس برای شارژ باتری‌ها را از مقدار۳۰ kW به مقدار ۶۰ kW افزایش می‌دهیم.

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

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

شکل (۱۷) سطح پرتوی به‌دست‌آمده برای این حالت را نمایش می‌دهد.

در این حالت، الگوریتم ۵ نقطه متفاوت را روی سطح پرتو پیداکرده است. کروموزوم مرتبط با این نقاط و همچنین مقادیر هرکدام از تابع هدف‌ها در جدول (۱۴) نمایش داده‌شده است.



شکل (۱۷): سطح پرتو هنگام افزایش حداکثر توان شارژ

جدول (۱۴): کروموزوم‌های به‌دست‌آمده هنگام افزایش حداکثر توان شارژ باتری

کروموزوم						C_{Tr} (US$)	V_{index} (p.u)	C_{loss} (US$)
۷	۱	۸	۱۰	۱۳	۱۵	۱۶۳۸۲۰۰	۰,۰۸۴۶	۴۱۷۸۱
۵	۳	۸	۱۰	۱۳	۱۴	۱۲۹۰۴۰۰	۰,۸۸۴۸	۳۸۶۴۶
۱۱	۳	۸	۹	۱۱	۱۴	۲۷۳۴۴۰۰	۰,۰۸۴۷	۳۱۹۵۳
۱۲	۳	۸	۹	۱۱	۱۵	۱۷۲۱۱۰۰	۰,۰۸۴۷	۵۸۳۸۳
۲	۳	۸	۱۰	۱۳	۱۵	۱۵۰۱۷۰۰	۰,۰۸۹۷	۳۹۹۵۹

با افزایش حداکثر توان شارژ/دشارژ در ایستگاه مرکزی، انتظار می‌رود میزان تلفات نیز افزایش پیدا کند که این موضوع در جدول (۱۴) قابل‌مشاهده است. در این حالت، روش تصمیم‌گیری فازی کروموزوم پنجم را انتخاب کرده است. این اتفاق به این دلیل رخ‌داده است که در این حالت، به دلیل افزایش توان شارژ، تلفات نسبت به حالت قبل افزایش پیداکرده است. درنتیجه، مدل به دنبال نقطه‌ای بوده است که در عین داشتن تلفات کم، دارای هزینه جابه‌جایی و شاخص ولتاژ بهتری باشد.

تحلیل حساسیت شماره ۳: در تمام حالات قبل، مقادیر μ_d مربوط به تمام توابع هدف یکسان در نظر گرفته‌شده بود که درنتیجه، تمام توابع هدف میزان اولویت یکسانی داشته‌اند؛ حال این‌گونه فرض می‌شود که این توابع هدف، دارای اولویت‌های گوناگونی هستند و مقادیر μ_d برای آن‌ها متفاوت در نظر گرفته می‌شود تا تأثیر آن بر پاسخ نهایی انتخابی توسط روش تصمیم‌گیری فازی مشاهده شود. تمامی پارامترها مشابه مطالعه موردی شماره ۲ است. مقادیر جدید μ_d در جدول (۱۵) آورده شده است.

در حالت ۱، تابع هدف سوم یعنی هزینه تلفات دارای اهمیت بیشتری است. نقطه انتخاب‌شده در این حالت بارنگ نارنجی در جدول (۹) نمایش داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این نقطه هزینه جابه‌جایی دارای بیشترین مقدار در بین سایر نقاط است، اما چون در این نقطه هزینه تلفات کمتر از سایر نقاط است و این تابع هدف دارای μ_d و اهمیت بیشتری است، روش تصمیم‌گیری این نقطه را انتخاب کرده است. در حالت دوم تابع هدف اول یعنی هزینه جابه‌جایی دارای اهمیت بیشتری است. نقطه انتخاب‌شده در این حالت بارنگ آبی در جدول (۹) نمایش داده‌شده است. با همان منطق حالت قبل، این بار مدل نقطه‌ای را انتخاب کرده است که کمترین هزینه جابه‌جایی را دارد.

جدول (۱۵): مقادیر μ_d در تحلیل حساسیت شماره ۳

	μ_{d1}	μ_{d2}	μ_{d3}
حالت ۱	۰,۲	۰,۱	۰,۹
حالت ۲	۰,۹	۰,۱	۰,۴

۶- نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله ارائه یک مدل برای جایابی هم‌زمان ایستگاه‌های تعویض باتری و ایستگاه مرکزی شارژ در حالت شارژ متمرکز بوده است. برای انجام این کار ابتدا یک مدل احتمالاتی برای محاسبه میزان مصرف انرژی در ایستگاه مرکزی شارژ معرفی شد. سپس یک مدل چندهدفه پیشنهاد شد که توابع هدف آن شامل هزینه جابه‌جایی، هزینه تلفات و شاخص ولتاژ بودند. متغیرهای تصمیم‌گیری این مدل محل‌های احداث ایستگاه‌های تعویض و شارژ باتری بودند و مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) حل شد. سپس از روش تصمیم‌گیری فازی برای انتخاب نهایی از میان پاسخ‌های حاصل از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. صحت مدل ارائه‌شده با پیاده‌سازی آن بر روی یک سیستم آزمون بررسی و کارایی این مدل در جایابی ایستگاه‌ها در نتایج مشاهده شد. نتایج نشان دادند شرکت یا عدم شرکت CCS در برنامه‌های V2G تأثیر قابل‌توجهی بر روی جایابی ایستگاه‌ها خواهد داشت. از طرفی دیگر، مشاهده شد که تعداد دفعات توزیع باتری‌ها بر جایابی بهینه ایستگاه‌ها تأثیر چشمگیری دارد. همچنین، در نظر نگرفتن فرسودگی باتری‌ها باعث شد تا باتری‌ها با نرخ توان بیشتر اما در ساعات کم‌تری شارژ شوند که این موضوع، باعث افزایش تلفات در برخی ساعات شد و تأثیر آن بر روی جایابی ایستگاه‌ها مشاهده شد. همچنین تأثیر اولویت توابع هدف مختلف روی پاسخ نهایی از طریق انتخاب مناسب مقادیر μ_d درروش فازی موردبررسی قرار گرفت.

سپاسگزاری

نویسنده مسئول این مقاله از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب گرَنت شماره SCU.EE1403.37219 کمال سپاسگزاری را دارد.

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

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

مراجع

[1] J. Buberger, A. Kersten, M. Kuder, R. Eckerle, T. Weyh, and T. Thiringer, "Total CO2-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 159, p. 112158, 2022.

[2] L. Gustavsson, T. Nguyen, R. Sathre, and U. Y. A. Tettey, "Climate effects of forestry and substitution of concrete buildings and fossil energy", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 136, p. 110435, 2021.

[3] S. Hemavathi and A. Shinisha, "A study on trends and developments in electric vehicle charging technologies", Journal of Energy Storage, vol. 52, p. 105013, 2022.

[4] O. Sadeghian, A. Oshnoei, B. Mohammadi-Ivatloo, V. Vahidinasab, and A. Anvari-Moghaddam, "A comprehensive review on electric vehicles smart charging: Solutions, strategies, technologies, and challenges", Journal of Energy Storage, vol. 54, p. 105241, 2022.

[5] N. Ding, K. Prasad, and T. Lie, "The electric vehicle: a review", International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, vol. 9, no. 1, pp. 49-66, 2017.

[6] K. Koirala and M. Tamang, "Planning and establishment of battery swapping station-A support for faster electric vehicle adoption", Journal of Energy Storage, vol. 51, p. 104351, 2022.

[7] M. Khalid, F. Ahmad, B. K. Panigrahi, and L. Al-Fagih, "A comprehensive review on advanced charging topologies and methodologies for electric vehicle battery", Journal of Energy Storage, vol. 53, p. 105084, 2022.

[8] X. Yang, C. Shao, C. Zhuge, M. Sun, P. Wang, and S. Wang, "Deploying battery swap stations for shared electric vehicles using trajectory data", Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 97, p. 102943, 2021.

[9] S. R. Revankar and V. N. Kalkhambkar, "Grid integration of battery swapping station: A review", Journal of Energy Storage, vol. 41, p. 102937, 2021.

[10] H. Farzin, "Reliability cost/worth assessment of emergency B2G services in two modes of battery swap technology", Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 31, p. 100787, 2022.

[11] W. Li, Y. Li, H. Deng, and L. Bao, "Planning of electric public transport system under battery swap mode", Sustainability, vol. 10, no. 7, p. 2528, 2018.

[12] C. Li, N. Wang, W. Li, Q. Yi, and D. Qi, "A battery centralized scheduling strategy for battery swapping of electric vehicles", Journal of Energy Storage, vol. 51, p. 104327, 2022.

[13] S. Wang, L. Yu, L. Wu, Y. Dong, and H. Wang, "An improved differential evolution algorithm for optimal location of battery swapping stations considering multi-type electric vehicle scale evolution", IEEE Access, vol. 7, pp. 73020-73035, 2019.

[14] M. Zeng, Y. Pan, D. Zhang, Z. Lu, and Y. Li, "Data-driven location selection for battery swapping stations", IEEE Access, vol. 7, pp. 133760-133771, 2019.

[15] R. A. G. Rendón, R. A. H. Isaza, and F. A. O. Cruz, "Optimal location of battery swap stations for electric vehicles", Scientia et technica, vol. 24, no. 3, pp. 377-384, 2019.

[16] U. Sultana, A. B. Khairuddin, B. Sultana, N. Rasheed, S. H. Qazi, and N. R. Malik, "Placement and sizing of multiple distributed generation and battery swapping stations using grasshopper optimizer algorithm", Energy, vol. 165, pp. 408-421, 2018.

[17] H. Wu, G. K. H. Pang, K. L. Choy, and H. Y. Lam, "An optimization model for electric vehicle battery charging at a battery swapping station", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 2, pp. 881-895, 2017.

[18] L. Ni, B. Sun, X. Tan, and D. H. Tsang, "Inventory Planning and Real-time Routing for Network of Electric Vehicle Battery Swapping Stations", IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020.

[19] Y. Zheng, Z. Y. Dong, Y. Xu, K. Meng, J. H. Zhao, and J. Qiu, "Electric vehicle battery charging/swap stations in distribution systems: comparison study and optimal planning", IEEE transactions on Power Systems, vol. 29, no. 1, pp. 221-229, 2013.

[20] A. R. Jordehi, M. S. Javadi, and J. P. Catalão, "Optimal placement of battery swap stations in microgrids with micro pumped hydro storage systems, photovoltaic, wind and geothermal distributed generators", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 125, p. 106483, 2021.

[21] M. Ban, D. Guo, J. Yu, and M. Shahidehpour, "Optimal sizing of PV and battery-based energy storage in an off-grid nanogrid supplying batteries to a battery swapping station", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 7, no. 2, pp. 309-320, 2019.

[22] J. Feng, S. Hou, L. Yu, N. Dimov, P. Zheng, and C. Wang, "Optimization of photovoltaic battery swapping station based on weather/traffic forecasts and speed variable charging", Applied Energy, vol. 264, p. 114708, 2020.

[23] P. You et al., "Scheduling of EV battery swapping—Part I: Centralized solution", IEEE Transactions on Control of Network Systems, vol. 5, no. 4, pp. 1887-1897, 2017.

[24] H.-M. Chung, W.-T. Li, C. Yuen, C.-K. Wen, and N. Crespi, "Electric vehicle charge scheduling mechanism to maximize cost efficiency and user convenience", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 3, pp. 3020-3030, 2018.

[25] W. Tushar, C. Yuen, S. Huang, D. B. Smith, and H. V. Poor, "Cost minimization of charging stations with photovoltaics: An approach with EV classification", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 17, no. 1, pp. 156-169, 2015.

[26] X. Wang, C. Yuen, N. U. Hassan, N. An, and W. Wu, "Electric vehicle charging station placement for urban public bus systems", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 18, no. 1, pp. 128-139, 2016.

[27] M. H. Shaker, H. Farzin, and E. Mashhour, "Joint planning of electric vehicle battery swapping stations and distribution grid with centralized charging", Journal of Energy Storage, vol. 58, p. 106455, 2023.

[28] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghtaie, "A practical scheme to involve degradation cost of lithium-ion batteries in vehicle-to-grid applications", ieee transactions on sustainable energy, vol. 7, no. 4, pp. 1730-1738, 2016.

[29] H. Farzin, M. Moeini-Aghtaie, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Reliability studies of distribution systems integrated with electric vehicles under battery-exchange mode", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, no. 6, pp. 2473-2482, 2015.

[30] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghtaie, "A stochastic multi-objective framework for

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

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]

optimal scheduling of energy storage systems in microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 1, pp. 117-127, 2016.

[31] J. Savier and D. Das, "Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 4, pp. 2473-2480, 2007.

[32] Razmi H, Doagou-Mojarrad H, Niknam T. Optimal Stochastic Operation of CHP/WT/PV Generation Units. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2022; 19 (1) :149-160

[33] Varshosaz F, Moazzami M, Fani B. Scheduling and Stochastic Capacity Estimation of an EV Charging Station with PV Rooftop Using Queuing Theory and Random Forest. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2019; 16 (1) :31-39

[34] M. Bahrami, M. Vakilian, H. Farzin, and M. Lehtonen, "A CVaR-based stochastic framework for storm-resilient grid, including bus charging stations", Sustainable Energy, Grids and Networks, p. 101082, 2023.

زیرنویس‌ها

[1] Swappable Battery

[2] Battery Swapping Station

[3] Central Charging Station

[4] Global Positioning System

[5] Distributed Generation

[6] Differential Evolution

[7] Particle Swarm Optimization

[8] State of Charge

[9] Fuzzy Decision Making

[10] Mean Squared Deviations

[11] Photovoltaic

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

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.61]