
Multi-objective optimization for integrated management of distributed generation resources and electric vehicle charging/discharging in distribution networks using locational marginal pricing mechanism

Mohsen Asgari¹, Ehsan Azad-Farsani¹, Amir Hosseini¹

Electrical and Computer Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan 87717-67498, Iran
mohsenasgari13631363@gmail.com

Electrical and Computer Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan 87717-67498, Iran
e.azad@iut.ac.ir

Electrical and Computer Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan 87717-67498, Iran
s.hosseini@iut.ac.ir

Abstract:

This paper examines the coordinated charging and discharging of plug-in electric vehicles (PEVs) in distribution networks with the dual aim of improving techno-economic performance and mitigating environmental impacts. Rapid growth in electric vehicle adoption is transforming traditional power systems, creating new and highly stochastic demand patterns that challenge distribution network operation, protection, and planning. Uncontrolled or poorly coordinated charging can lead to feeder overloading, voltage violations, increased power losses, and protection miscoordination, while also raising system operating costs and emissions. At the same time, the inherent flexibility and distributed storage capability of PEV batteries offer significant opportunities for demand response, loss reduction, and provision of ancillary services if they are optimally managed.

Motivated by these challenges and opportunities, the paper develops an optimization framework that explicitly models PEV charging and discharging decisions alongside distributed generation (DG) units within a distribution system. The problem is formulated as a multi-objective optimization model that simultaneously minimizes power losses, energy not supplied (or interruption-related costs), and the total operational cost associated with PEV participation and network operation. The framework incorporates locational marginal pricing (LMP) signals, grid constraints, and PEV owner preferences to determine spatio-temporal charging patterns that are both system-feasible and economically attractive. In addition, the model accounts for battery degradation costs through depth-of-discharge (DoD)-based expressions, ensuring that intensive use of vehicle-to-grid (V2G) services does not impose unrealistic or uneconomic wear on PEV batteries.

The proposed method is solved using a population-based metaheuristic algorithm inspired by particle swarm optimization (PSO), which is well suited to handling the nonlinear, nonconvex, and

mixed-integer structure of the underlying problem. Decision variables include unit commitment of DGs, charging/discharging schedules of PEV fleets, and several network operation parameters over a 24-hour horizon. The optimization evaluates different operating scenarios with varying levels of PEV penetration and DG integration, allowing the authors to compare uncoordinated, partially coordinated, and fully coordinated charging strategies. Performance indices such as total cost, energy losses, reliability-related costs, and emission indices (e.g., CO_2 , NO_x , and SO_2) are used to assess the effectiveness of the scheduling framework.

Simulation studies are carried out on a test distribution network to demonstrate the applicability and benefits of the proposed scheme. Results show that coordinated PEV charging and discharging can significantly reduce active power losses and distribution network operating costs compared with conventional uncoordinated charging. The model also achieves noticeable improvements in reliability indices by lowering expected interruption costs through better utilization of PEV storage during operation periods. Furthermore, by shaping the net load profile and enabling higher penetration of clean distributed resources, the framework contributes to emission reductions relative to baseline operation. Sensitivity analyses on the level of PEV penetration, DG capacity, and pricing structures highlight how economic signals and technical constraints jointly influence optimal scheduling outcomes.

Keywords: Electric Vehicles , Location Marginal Pricing , Charging and Discharge Management , ptimization

Date of sending the article: 2025/10/04
Acceptance date of the article: 2025/12/27

Corresponding author's name: Ehsan Azad-Farsanu
Corresponding author's address: Isfahan University of Technology

بهینه‌سازی چندهدفه برای مدیریت یکپارچه منابع تولید پراکنده و شارژ/دشارژ خودروهای برقی در شبکه‌های توزیع با استفاده از مکانیزم قیمت‌گذاری حاشیه‌ای مکانی

نوع مطالعه: پژوهشی

محسن عسگری^۱، احسان آزاد فارسانی^۱ و سید امیر حسینی^۱

۱- گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران
-e.azad@iut.ac.ir -s.hosseini@iut.ac.ir

چکیده: این مقاله یک چارچوب نوین بهینه‌سازی چندهدفه برای مدیریت همزمان شارژ و دشارژ خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه (PHEV) و واحدهای تولید پراکنده (DG) در شبکه‌های توزیع ارائه می‌دهد. رویکرد پیشنهادی با در نظر گرفتن همزمان سه بعد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، به دنبال بهبود بهره‌وری شبکه و مدیریت هوشمند انرژی است. این مدل با بهره‌گیری از مکانیزم قیمت‌گذاری حاشیه‌ای مکانی (LMP) در باس‌های مجهز به خودروهای برقی و ایستگاه‌های شارژ، سه هدف اصلی را دنبال می‌کند: (۱) افزایش سود واحدهای DG و مالکان EV، (۲) بهبود شاخص‌های فنی شبکه از جمله کاهش تلفات و ارتقای قابلیت اطمینان، و (۳) کاهش آلاینده‌گی ناشی از تولید برق. مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی بر روی شبکه شعاعی ۸۳ باس IEEE پیاده‌سازی شده و با موفقیت به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) حل گردیده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که چارچوب پیشنهادی توانایی چشمگیری در موازنه اهداف متضاد داشته و ابزار مناسبی برای اپراتورهای شبکه در جهت اتخاذ تصمیم‌های بهینه مبتنی بر اولویت‌های لحظه‌ای فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: خودروهای برقی - قیمت‌گذاری حاشیه‌ای مکانی - مدیریت شارژ و دشارژ - بهینه‌سازی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

نام نویسنده‌ی مسئول: احسان آزاد فارسانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشگاه صنعتی اصفهان

۱- مقدمه

با این وجود، همان‌گونه که در جدول (۱) نشان داده شده است، حضور خودروهای برقی در شبکه‌های توزیع می‌تواند به تضعیف پارامترهای فنی مختلف شبکه منجر شود (ESLAMI, NAFISI, & HOSSEINI, 2019). از این رو یکی از موانع اصلی گسترش این فناوری در شبکه‌های قدرت، نگرانی بهره‌برداران از تأثیرات منفی آن بر عملکرد فنی شبکه است (Hosseini, Sadeghi, & Nasiri, 2023). یکی از مهم‌ترین دلایل بروز این مشکلات، شارژ و دشارژ ناهماهنگ و تصادفی خودروهای برقی است (Roy, Alahakoon, Van, Rensburg, & Arachchillage, 2024). به همین دلیل، مطالعات متعددی روش‌های گوناگونی برای مدیریت شارژ و دشارژ این خودروها پیشنهاد کرده‌اند که عمدتاً با اهداف متفاوتی تدوین شده‌اند.

به‌عنوان نمونه، در (An et al., 2023) روش مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای مدیریت شارژ خودروهای برقی با هدف کاهش زمان کل شارژ و کاهش اضطراب کاربران ارائه شد. در این مطالعه، حفظ یا بهبود پارامترهای فنی شبکه مدنظر قرار نگرفته و همچنین از مکانیزم‌های قیمت‌گذاری برای ترغیب کاربران استفاده نشده است. در (Ortega-Vazquez, 2014) نیز مدیریت شارژ و دشارژ با هدف کاهش هزینه استهلاک باتری خودروها انجام شده، بدون آن‌که مکانیزم‌های قیمت‌گذاری در نظر گرفته شود.

در مطالعات (Aljafari, Jeyaraj, Kathiresan, & Thanikanti, 2023; Dorokhova, Martinson, Ballif, & Wyrsh, 2021; Maeng, Min, & Kang, 2023; Mhaisen, Fetais, & Massoud, 2020) روش‌های مبتنی بر یادگیری تقویتی به کار گرفته شده‌اند. به‌طور مشخص، در (Dorokhova et al., 2021) هدف بهینه‌سازی خودمصرفی انرژی خورشیدی و سطح شارژ خودرو در زمان خروج، در (Aljafari et al., 2023) کاهش زمان انتظار و هزینه برق مشتریان، در (Maeng et al., 2023) حداقل سازی هزینه شارژ برای کاربران منفرد و افزایش بهره‌وری باتری در چرخه‌های مختلف و در (Mhaisen et al., 2020) کاهش هزینه مالکان خودروهای برقی دنبال شده است. با این حال، این مطالعات عموماً پارامترهای فنی شبکه را وارد مدل نکرده‌اند. ضمن آنکه تنها در (Aljafari et al., 2023) از قیمت‌گذاری دینامیک مبتنی بر فرایند تصمیم‌گیری مارکوف استفاده شده است تا جذابیت طرح پیشنهادی افزایش یابد.

مدیریت شارژ و دشارژ ارائه شده در (Hadian, Akbari, Farzinfar, & Saeed, 2021) با هدف اصلاح منحنی بار و ارتقای تاب‌آوری شبکه طراحی شده است. با وجود این، مطالعه مذکور صرفاً بر جنبه‌های فنی تمرکز داشته و ملاحظات اقتصادی مالکان خودروها را لحاظ نکرده است. در (Ren, Yuan, & Jiao, 2023) نیز روش مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی بهبودیافته همراه با یادگیری عمیق (LSTM-ILP) برای کاهش هزینه‌های شارژ و دشارژ و تعدیل اختلاف پیک و دره بار شبکه پیشنهاد شده است. در این مطالعه، قیمت‌گذاری پویا با استفاده از شبکه عصبی LSTM طراحی گردید. با این حال، چنین رویکردی مستلزم زیرساخت‌های مخابراتی گسترده است که نه تنها با تأخیر زمانی

سیستم حمل و نقل مبتنی بر موتور احتراق داخلی (ICE)، منبع اصلی آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای است (Aghajan-Eshkevari, Azad, Nazari-Heris, Ameli, & Asadi, 2022). به همین دلیل است که استفاده از حمل و نقل الکتریکی به عنوان آینده‌ای اجتناب‌ناپذیر برای بسیاری از کشورها مطرح گردیده است و به‌عنوان یک رکن اساسی از مفهوم سیستم‌های هوشمند حمل و نقل لحاظ می‌گردد (Tilly, Yigitcanlar, Degirmenci, & Paz, 2024). بنابراین، بررسی جنبه‌های گوناگون حضور این نوع تکنولوژی جدید می‌تواند به‌خوبی چراغی بر سر راه طراحان و سیاست‌گذاران سیستم‌های حمل و نقل باشد تا بیش از پیش با ویژگی‌های این نوع فن‌آوری جدید آشنا شده و آن را در مسیر هدایت نمایند (Majid, J, & Ahmed, 2024).

جدول (۱): دسته بندی تأثیر حضور خودروهای برقی بر پارامترهای فنی شبکه

مرجع	پارامترهای در نظر گرفته شده	پارامترهای در نظر گرفته شده	مرجع
(Baharin & Abdullah, 2013)	افت ولتاژ تلفات	پایداری ولتاژ	(Turan & Gökalp, 2022)
(Wirasingha, Schofield, & Emadi, 2008)	تلفات پیری ترانسفورماتورها سرویس ترانسفورماتورها	تلفات کاهش پیک بار پروفیل ولتاژ	(Hung, Dong, & Trinh, 2016)
(Lou, Wu, Shi, & Yang, 2022)	پایداری ولتاژ	هماهنگی حفاظتی	(Saldarriaga-Zuluaga, López-Lezama, Zuluaga Ríos, & Villa Jaramillo, 2022)
(Dulău & Bică, 2020)	جریان اتصال کوتاه پروفیل ولتاژ تلفات	پروفیل ولتاژ کیفیت توان تعادل تولید و مصرف	(Putrus, Suwanapinklart, Johnston, Bentley, & Narayana, 2009)
(Anastasiadis, Kondylis, Polyzakis, & Vokas, 2019; Obeidat et al., 2021)	پروفیل ولتاژ	تلفات اختلال ات‌کل هارمونی کی	(Partovi, Esmaeili, & Aein, 2022)

مدیریت پیه‌شنهادی لحاظ گردیده است. از این‌رو، روش پیه‌شنهادی نه تنها سود صاحبان خودروهای برقی و مالکان منابع تولید پراکنده را افزایش می‌دهد، بلکه منجر به کاهش تلفات شبکه، بهبود قابلیت اطمینان، و همچنین کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید برق خواهد شد.

روش پیه‌شنهادی بر روی شبکه استاندارد ۸۳ باس IEEE پیاده‌سازی شده است. نتایج به دست آمده از حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به روشی نشان می‌دهند که چارچوب پیه‌شنهادی قادر است به طور هم‌زمان عملکرد فنی شبکه را بهبود بخشد، سودآوری تمامی ذی‌نفعان را افزایش داده و در کاهش آلاینده‌ها مؤثر واقع شود. همچنین شبیه‌سازی‌ها بیانگر آن است که با اولویت‌بندی اهداف مختلف، اپراتور شبکه می‌تواند به نتایج متنوعی دست یابد؛ موضوعی که انعطاف‌پذیری و ارزشمندی طرح پیه‌شنهادی را در مدیریت هوشمند انرژی دوچندان می‌کند. ساختار مقاله به این ترتیب است: در بخش دوم، روش پیه‌شنهادی برای مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی و تولیدات پراکنده ارائه می‌گردد. در بخش سوم، نتایج شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد روش پیه‌شنهادی بر روی شبکه نمونه ارائه می‌شود.

۲- فرمول‌بندی مسئله

مدیریت بهینه شارژ و دشارژ خودروهای برقی در روش جدید پیه‌شنهادی، مستلزم اجرای بهینه‌سازی با در نظر گرفتن فاکتورهای فنی شبکه، اقتصادی خودروهای برقی و زیست‌محیطی می‌باشد. بنابراین مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را می‌توان به صورت رابطه (۱) تعریف کرد. لازم به ذکر است از آنجایی که نوع فاکتورهای دخیل در مدیریت شارژ و دشارژ مقاله حاضر متفاوت می‌باشند، لذا در این مقاله کلیه فاکتورهای مدنظر مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی به صورت هزینه و برحسب \$ وارد توابع هدف رابطه (۱) خواهند شد.

$$\min F = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)]^T$$

$$g_i(X) < 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{ueq}} \quad (1)$$

$$h_i(X) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{eq}}$$

در این رابطه $f_i(X)$ تابع هدف شماره i و $g_i(X)$ قید نابرابری و $h_i(X)$ قید برابری می‌باشد. همچنین X به عنوان بردار کنترل به صورت رابطه زیر تعریف شده است:

$$X = [X_{U_c}, X_{U_d}, X_{U_i}, X_{\text{ImpPHEV}}, X_{\text{ImpDG}}] \quad (2)$$

در این رابطه و $X_{U_c}, X_{U_d}, X_{U_i}$ به عنوان متغیرهای باینری برابر با ۰ یا ۱ تعریف می‌شوند و بترتیب بیانگر وضعیت شارژ، دشارژ و در حرکت خودروی برقی هستند. همچنین در این رابطه X_{ImpPHEV} و X_{ImpDG} به عنوان LMP به ترتیب در باس‌های متصل به PHEV (ناوگان) و DG تعریف می‌شود.

و نیاز به همگام‌سازی داده‌ها همراه هستند، بلکه عدم قطعیت عملکردی آن‌ها می‌تواند به قیمت‌گذاری نادقیق و کاهش بهینگی منجر شود. افزون بر این، استراتژی قیمت‌گذاری پیه‌شنهادی تصادفی بودن حضور خودروها را در نظر نمی‌گیرد و تضمین‌کننده بهینگی کلی نیست (Ren et al., 2023).

در (Yao, Damiran, & Lim, 2017) چارچوبی برای مدیریت شارژ و دشارژ با هدف افزایش رضایت مالکان خودروهای برقی (از طریق برآورده کردن درخواست‌های شارژ/دشارژ) و کاهش هزینه‌های عملیاتی ایستگاه شارژ ارائه شده است. مطالعه (Ran, Liao, Liang, Lu, & Zhong, 2024) نیز با بهره‌گیری از روش‌های قیمت‌گذاری، به کاهش آثار منفی شارژ نامنظم خودروها بر شبکه قدرت (افزایش پیک بار، افت ولتاژ و تلفات توان) و حتی بر شبکه حمل‌ونقل شهری (ازدحام ترافیک و افزایش زمان سفر) پرداخته است. با این وجود، در این مطالعه نیز ملاحظات اقتصادی کاربران خودرو در نظر گرفته نشده است.

در نهایت، پیش‌بینی دقیق تقاضای شارژ خودروهای برقی نقش مهمی در کارایی و اثربخشی راهبردهای مدیریت دارد (Bharat et al., 2024). از این‌رو، در (Bharat et al., 2024) یک روش نوین مبتنی بر α^2 -LSTM برای پیش‌بینی تقاضای شارژ با دقت بالا و در بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای پیشنهاد شده است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، می‌توان مهم‌ترین کاستی‌های مطالعات گذشته را در موارد زیر خلاصه نمود:

- علیرغم اینکه یکی از اهداف اصلی حضور خودروهای برقی در شبکه‌های توزیع، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی است، این موضوع در مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در هیچ‌یک از مطالعات مورد توجه قرار نگرفته است.
- فقدان یک چارچوب مدیریتی نوین و چندهدفه که بتواند هماهنگی هم‌زمان میان خودروهای برقی و منابع تولید پراکنده را فراهم آورد. در این راستا، بهره‌گیری از رویکرد قیمت‌گذاری حاشیه‌ای مکانی (LMP) در باس‌های مجهز به خودروهای برقی و ایستگاه‌های شارژ، می‌تواند زمینه بهبود بهره‌وری شبکه و مدیریت هوشمند انرژی را فراهم سازد (An et al., 2023).
- عدم توجه هم‌زمان به ملاحظات اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی. در حالی که لازم است توابع هدف شامل حداکثرسازی سود مالکان خودروهای برقی و منابع تولید پراکنده، بهبود شاخص‌های فنی شبکه و کاهش آلاینده‌های ناشی از تولید توان الکتریکی به صورت یکپارچه در نظر گرفته شوند.

با توجه به چالش‌های فوق، در این مقاله یک روش نوین برای مدیریت توان شارژ و دشارژ خودروهای برقی و منابع تولید پراکنده مبتنی بر مکانیزم قیمت‌گذاری LMP ارائه شده است. در این چارچوب، مشوق‌های لازم برای مشارکت رانندگان خودروهای برقی در برنامه

۲-۱- تابع هدف فنی

یکی از فاکتورهای تاثیرگذار در رابطه (۱)، فاکتور فنی شبکه می باشد. این فاکتور شامل عوامل فنی تاثیرگذار بر مدیریت شارژ و د شارژ خودروهای برقی می باشد. در این مقاله هزینه تلفات شبکه $(Cost_{Ploss})$ و هزینه قابلیت اطمینان $(Cost_{Rel})$ آن بعنوان فاکتورهای فنی دخیل در پروسه مدیریت شارژ و د شارژ مقاله حاضر در نظر گرفته شده اند. این دو فاکتور در روابط (۳) و (۴) ارائه شده اند. همانطور که از رابطه (۴) مشخص است در این مقاله از شاخص هزینه مورد انتظار قطع برق $ECOST^1$ برای تعیین هزینه قابلیت اطمینان استفاده شده است.

$$Cost_{Ploss} = \sum_{t=1}^T C_{loss}^t P_{loss}^t \quad (3)$$

$$Cost_{Rel} = \sum_{i=1}^{N_b} ECOST_i = \sum_{i=1}^{N_b} L_{ai} C_i \lambda_i \quad (4)$$

در این روابط C_{loss}^t هزینه تلفات ساعتی و P_{loss}^t تلفات توان اکتیو ساعتی شبکه می باشد. همچنین λ_i میزان خرابی خط i ام، r_i نرخ تعمیر خط i ام، L_{ai} میانگین بار متصل خط i ام، N_b تعداد انشعابات و C_i هزینه قطع خط i ام می باشند.

۲-۲- تابع هدف اقتصادی خودروهای برقی

در صورتیکه اهداف اقتصادی رانندگان از مدیریت شارژ و د شارژ خودروهای برقی، تامین نشود، ضمانتی جهت پیوستن آن ها به برنامه مدیریتی اعمال شده نیست. به همین دلیل لازم است اهداف اقتصادی رانندگان نیز در مسئله بهینه سازی مدنظر وارد شوند. به همین دلیل در این مقاله فاکتورهای اقتصادی خودروهای برقی $(Cost_{PHEV})$ شامل هزینه های عملکرد $(Cost_{Op})$ و هزینه های استهلاک $(Cost_{deg})$ خودروهای برقی وارد تابع هدف مسئله شده اند (رابطه (۵)).

$$Cost_{PHEV} = Cost_{Op} + Cost_{deg} \quad (5)$$

در این مقاله بمنظور در نظر گرفتن کلیه فاکتورهای موثر بر هزینه عملکرد خودروهای برقی از رابطه (۶) استفاده شده است.

$$Cost_{Op} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_v} \frac{|\pi^t - X_{ImpPHEV,k}^t|}{\pi^t - X_{ImpPHEV,k}^t} \times P_k^t \times X_{ImpPHEV,k}^t \quad (6)$$

که π^t قیمت بازار در ساعت t ام، P_k^t انرژی شارژ یا دشارژ که توسط k - امین ناوگان در طول ساعت t بر حسب Kwh استفاده می شود. لازم به ذکر است وقتی PHEV ها در حالت شارژ هستند P_k^t منفی و در زمان د شارژ P_k^t مثبت است. همچنین در این رابطه $X_{ImpPHEV}^t$ LMP در باس های متصل به PHEV در ساعت t ام می باشد.

بنابراین اگر قیمت بازار کمتر از قیمت LMP در PHEV باشد، $(\pi^t < X_{ImpPEV}^t)$ حا صل عبارت $\frac{|\pi^t - X_{ImpPHEV,k}^t|}{\pi^t - X_{ImpPHEV,k}^t}$ برابر ۱- خواهد شد و چنانچه $(\pi^t > X_{ImpPHEV}^t)$ حا صل عبارت $\frac{|\pi^t - X_{ImpPHEV,k}^t|}{\pi^t - X_{ImpPHEV,k}^t}$ برابر با ۱+ خواهد شد.

- در حالت اول که $(\pi^t < X_{ImpPHEV}^t)$ چون $P_k > 0$ بهتر است PHEV ها د شارژ شوند. بنابراین، در این حالت، مقدار مثبت P_k تابع هدف را کاهش می دهد، یعنی PHEV ها با انرژی گران قیمت به شبکه دشارژ می شوند.
- در حالت دوم هنگامی که $\pi^t > X_{ImpPHEV}^t$ ، حالت شارژ PHEV ها که منجر به مقادیر منفی P_k می شود، برای کاهش تابع هدف مناسب تر خواهد بود.

از سوی دیگر در این مقاله هزینه استهلاک ناوگان PHEV با استهلاک باتری، مدل سازی شده است. استهلاک باتری به دلیل چرخه اضافی باتری های مورد استفاده در فرآیندهای V2G خوروهای برقی رخ می دهد و برای مدل سازی آن از منحنی wöhler استفاده شده است (Kavousi-Fard & Niknam, 2014).

در منحنی wöhler تعداد چرخه های استهلاک باتری با افزایش عمق دشارژ باتری (DoD2) کاهش می یابد. بنابراین مدل ریاضی این منحنی مطابق رابطه زیر است:

$$N_c(DoD) = a \cdot DoD^b \quad (7)$$

در این رابطه پارامترهای a و b بر اساس نوع باتری انتخاب می شوند. هزینه های تخریب را می توان به عنوان تابعی از DoD در شروع و پایان فرآیند شارژ تعریف کرد. رابطه زیر برای محاسبه هزینه استهلاک باتری برای یک بار د شارژ از حالت شارژ کامل ($DoD = 0$) به سطح DoD_s ($DoD = DoD_s$) استفاده می شود.

$$C_d(0, DoD_s) = \frac{C_{Bat} \times DoD_s \times E_{Bat}}{N_c(DoD_s)} \quad (8)$$

در این رابطه $C_d(0, DoD_s)$ هزینه استهلاک باتری برای شارژ از $DoD = 0$ تا DoD_s می باشد. همچنین C_{Bat} هزینه کل باتری، E_{Bat} ظرفیت اسمی باتری (kWh) و N_c تعداد چرخه عمر باتری با آن عمق تخلیه می باشند.

بنابراین، هزینه تخریب یک چرخه تخلیه از DoD_i به DoD_f را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$C_d(DoD_i, DoD_f) = C_d(0, DoD_f) - C_d(0, DoD_i) \quad (9)$$

هزینه استهلاک کل در زمان محدود $(Cost_{deg})$ باید با مجموع هزینه های استهلاک بر تعداد تمام دشارژها در آن دوره زمانی محاسبه شود. بنابراین این هزینه از رابطه زیر محاسبه می شود.

². Depth Of Discharge

¹. Expected cost of interruption

$$P_{DG,k} = \frac{X_{ImpDG,k} - b_k}{2a_k} \quad (15)$$

$$CF_k = a_k P_{DG,k}^2 + b_k P_{DG,k} + c_k \quad (16)$$

که در آن $P_{DG,k}$ توان خروجی k -امین واحد DG است، a_k ، b_k و c_k ضرایب هزینه و CF_k تابع هزینه k -امین واحد DG است.

۲-۴-۲- محدودیت‌های مرتبط با شبکه

محدودیت‌های مرتبط با شبکه شامل محدودیت در توان مبادله شده با شبکه بالادستی، ولتاژ باس‌ها، حداکثر جریان در فیدها و انحراف سود DISCO (مازاد تجاری) می‌باشد که به ترتیب از روابط زیر قابل محاسبه هستند (Azad-Farsani et al., 2021).

$$|P_{sub}^t| \leq P_{sub}^{max} \quad (17)$$

$$S_{ij}^t \leq S_{ij}^{max} \quad (18)$$

$$V_i^{max} \leq V_i \leq V_i^{min} \quad (19)$$

$$MS \leq \varepsilon \quad (20)$$

همچنین MS به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$MS = B_{red} - B_{ori} = \pi(LOSS - LOSS') + \left(\sum_{i=1}^{N_a} (La_i C_i \lambda_i - La'_i C'_i \lambda_i) \right) + \left(\sum_{j=1}^{N_v} (\pi - X_{ImpPHEV,j}) \cdot P_j \right) - \sum_{h=1}^{NDG} Q_{DG,h} \cdot (X_{ImpR,h}) - \sum_{h=1}^{NDG} P_{DG,h} \cdot (X_{ImpDG,h} - \pi) \quad (21)$$

در این رابطه B_{red} منفعت DISCO پس از بهره‌برداری بهینه (پس از بهره‌برداری از واحدهای DG و PHEVs)، B_{ori} منفعت DISCO قبل از بهره‌برداری بهینه (مورد پایه)، π قیمت توان اکتیو در باس i است، $LOSS'$ تلفات سیستم توزیع پس از بهره‌برداری بهینه، La'_i بار متوسط متصل به شین i پس از بهره‌برداری بهینه، C'_i هزینه قطع شدن باس i پس از بهره‌برداری بهینه، $Q_{DG,h}$ توان راکتیو h امین واحد DG است و $X_{ImpR,h}$ قیمت توان راکتیو این واحد DG است.

به طور کلی MS بزرگتر از صفر است. با عملیاتی نمودن PHEVs و DGs، هزینه شبکه کاهش می‌یابد و DISCO هزینه‌های قابلیت اطمینان و تلفات را جزیایی می‌کند. رابطه (۲۰) ارزش کل پاداش‌های PHEVs و DGs را از روی قابلیت اطمینان بازیافتی و هزینه‌های تلفات تعیین می‌کند.

$$Cost_{deg} = \sum_{k=1}^{N_{dis}} C_c^k (DoD_i, DoD_f) \quad (10)$$

در این رابطه N_{dis} تعداد چرخه‌های د شارژ باتری و C_c^k هزینه فرسودگی باتری در سیکل k می‌باشند.

۲-۳- تابع هدف کاهش آلودگی هوا

برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید توان، مجموع انتشار آلاینده‌ها (Emission(X)) از منابع تولید پراکنده و شبکه بالادست به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Emission(X) = \sum_{i=1}^{N_{DG}} (E_{DG}^i) + E_{Grid} \quad (11)$$

$$E_{DG}^i = \left(NO_x^{DG^i} + CO_2^{DG^i} + SO_2^{DG^i} \right)^{lb/MW} \times p_{g,i} \quad (12)$$

$$E_{Grid} = \left(NO_x^{Grid} + CO_2^{Grid} + SO_2^{Grid} \right)^{lb/MW} \times p_{sub} \quad (13)$$

که در آن E_{DG}^i آلودگی تولید شده توسط دی جی ها، E_{Grid} آلودگی تولید شده از شبکه بالادست، N_{DG} تعداد تولیدات پراکنده نصب شده در شبکه، $p_{g,i}$ توان تولیدی واحد i (MW) DG^i و p_{sub} توان تأمین شده از شبکه بالادست (MW) می‌باشند. همچنین آلودگی تولید شده توسط تولیدات پراکنده (E_{DG}^i) و شبکه (E_{Grid}) خود وابسته به پارامترهای $NO_x^{DG^i}$ ، $CO_2^{DG^i}$ ، $SO_2^{DG^i}$ ، NO_x^{Grid} ، CO_2^{Grid} ، SO_2^{Grid} که مقادیر تولید شده اکسید نیتروژن، دی اکسید کربن و دی اکسید گوگرد توسط تولید پراکنده نام (DG^i) یا شبکه (Grid) می‌باشند، وابسته است.

۲-۴-۲- محدودیت‌های مسئله

مسئله مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی بر اساس تابع هدف پی‌شده دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. این محدودیت‌ها در سه دسته محدودیت‌های تولیدات پراکنده، شبکه و خودروهای برقی تقسیم می‌شوند.

۲-۴-۱- محدودیت‌های مرتبط با تولیدات پراکنده:

این محدودیت مرتبط با توان تولیدی هر یک از واحدهای تولید پراکنده بوده و بر اساس رابطه (۱۴) تعریف می‌شود (Azad-Farsani, & Abedini, & Sardou, 2021).

$$P_{DG,k}^{min} \leq P_{DG,k} \leq P_{DG,k}^{max} \quad k = 1, \dots, Ng \quad (14)$$

همچنین توان اکتیو واحدهای DG بر اساس تابع هزینه واحدهای DG با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$\exists k \in \{1, 2, \dots, n\}, f_k(X_1) < f_k(X_2) \quad (31)$$

در مسئله چند هدفه پیشنه‌ی راه‌حل‌های غیر غالب به دست آمده در یک ماتریس با اندازه ثابت ذخیره می‌شوند. از آنجایی که توابع اهداف نادقیق هستند، یک روش خوش‌شبه‌بندی مبتنی بر منطق فازی برای کنترل اندازه ماتریس استفاده می‌شود. سپس تصمیم‌گیری پس از پر شدن مخزن انجام می‌شود. تابع عضویت هر تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود (Azad-Farsani et al., 2021).

$$\mu_{f_i}(X) = \begin{cases} 1 & \text{for } f_i(X) \leq f_i^{min} \\ 0 & \text{for } f_i(X) \geq f_i^{max} \\ \frac{f_i^{max} - f_i(X)}{f_i^{max} - f_i^{min}} & f_i^{min} \leq f_i(X) \leq f_i^{max} \end{cases} \quad (32)$$

که در آن، f_i^{min} و f_i^{max} به ترتیب حد پایین و بالای هر تابع هدف هستند. در الگوریتم پیشنه‌ی مقادیر f_i^{min} و f_i^{max} با استفاده از نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی هر تابع هدف، به طور جداگانه ارزیابی می‌شوند. برای هر تصمیم در مخزن، مقدار عضویت نرمال شده به صورت زیر ارزیابی می‌شود:

$$N\mu(j) = \frac{\sum_{k=1}^n \omega_k \times \mu_{f_k}(X_j)}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \omega_k \times \mu_{f_k}(X_j)} \quad (33)$$

که در آن m تعداد راه‌حل‌های غیر غالب و k وزن تابع هدف k ام است. این تابع عضویت نوعی معیار تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد که تطبیقی است و با گزینه‌های تصمیم‌گیری موجود تغییر می‌کند (Masoum, Deilami, Abu-Siada, & Masoum, 2015).

۳- نتایج شبیه‌سازی

۳-۱- شبکه نمونه

الگوریتم پیشنه‌ی در این مقاله بر روی شبکه شعاعی ۸۳ شینه IEEE پیاده‌سازی شده است. دیاگرام تک خطی این شبکه در شکل (۱) ارائه شده است. این شبکه دارای ۸۳ خط و ۱۱ فیدراست. همچنین ۵ واحد DG و ۵ ایستگاه شارژ و دشارژ در این شبکه در نظر گرفته شده است. اطلاعات ایستگاه‌های شارژ در این شبکه مطابق جدول (۲) می‌باشد. همچنین پارامترها الگوریتم PSO شامل اندازه جمعیت = ۲۰۰، ضرایب شتاب $c_1 = c_2 = 2$ ، وزن اینرسی $w = 0.7$ ، و معیار توقف برابر ۲۰۰ تکرار می‌باشد.

جدول (۲): اطلاعات تولیدات پراکنده و ایستگاه‌های شارژ در شبکه

مورد مطالعه

شماره DG	ظرفیت (kW)	مکان شین	ضریب توان (Lag)	ضرایب تابع هزینه		
				$a \times 10^{-6} (\frac{\$}{MW^2})$	$b (\frac{\$}{MW})$	$c (\$)$

۳-۴-۲- محدودیت‌های مرتبط با خودروهای برقی

اگر ناوگان PHEV به شبکه متصل باشد ($U_v^t = 1$) آنگاه حداکثر/حداقل نرخ شارژ توان، حداکثر/حداقل نرخ دشارژ توان، تعادل انرژی در باتری‌های PHEV، محدودیت ظرفیت انرژی هر ناوگان و محدودیت وضعیت شارژ (SOC) ناوگان PHEV در اولین سفر محدودیت‌های در نظر گرفته شده در این مقاله برای خودروهای برقی خواهند بود که از روابط زیر محاسبه می‌شوند (Azad-Farsani et al., 2021).

$$U_{c,v}^t P_{c,v}^{min} \leq P_{c,v}^t \leq U_{c,v}^t P_{c,v}^{max} \quad (22)$$

$$U_{d,v}^t P_{d,v}^{min} \leq P_{d,v}^t \leq U_{d,v}^t P_{d,v}^{max} \quad (23)$$

$$E_v^t = E_v^{ini} + \sum_{m=1}^t (U_{c,v}^m P_{c,v}^m \eta_{c,v} - U_{d,v}^m P_{d,v}^m \eta_{d,v}) \quad (24)$$

$$- \sum_{m=1}^t (1 - U_v^m) E_{D,v}^m$$

$$P_v^t = E_v^t - E_v^{t-1} \quad (25)$$

$$E_v^{min} \leq E_v^t \leq E_v^{max} \quad (26)$$

$$E_v^{fin} = E_v^{ini} \quad (27)$$

$$SOC^{min} \leq SOC_v \leq SOC^{max} \quad (28)$$

در این مقاله فرض بر این است که SOC (وضعیت شارژ) ناوگان PHEV هنگامی که ایستگاه را در اولین سفر در اولین ساعت روز (t') ترک می‌کند، ۱۰۰٪ است. بنابراین رابطه زیر برای محدودیت وضعیت شارژ (SOC) ناوگان PHEV در اولین سفر تعریف می‌شود.

$$E_v' = E_v^{max} \quad (29)$$

در این روابط E_v' سطح شارژ ناوگان PHEV در ابتدای اولین سفر و E_v^{max} ظرفیت اسمی کامل باتری ناوگان PHEV است.

۲-۵- مسئله چند هدفه

تابع جدید پیشنه‌ی در این مقاله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO بهینه می‌شود. از آنجا که تابع هدف رابطه (۱) خود از سه تابع هدف فنی، اقتصادی و زیست محیطی تشکیل شده است لذا ممکن است چندین جواب در پروسه بهینه‌سازی این تابع هدف وجود داشته باشد. براین اساس جواب X_1 بر جواب X_2 غالب است، اگر هر دو شرط زیر برآورده شوند:

۱. راه حل X_1 برای همه اهداف بهتر از X_2 است یعنی:

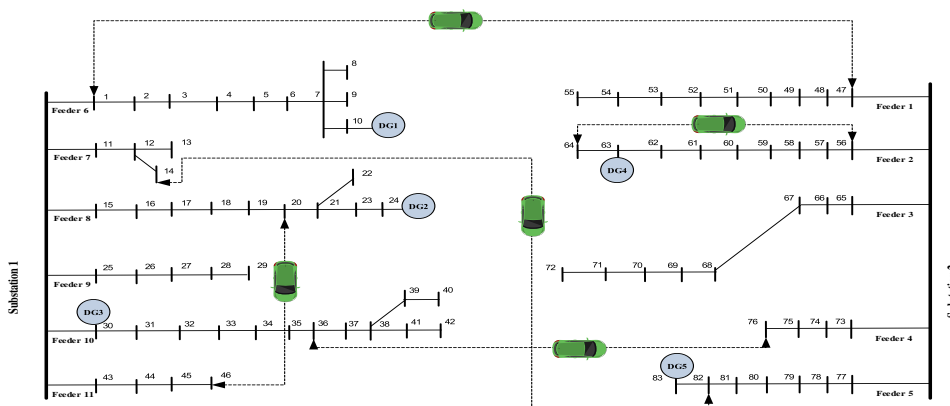
$$\forall j \in \{1, 2, \dots, n\}, f_j(X_1) \leq f_j(X_2) \quad (30)$$

۲. راه حل X_1 حداقل در یک تابع هدف کاملاً بهتر از X_2 است یعنی:

در شبکه شکل (۱) پنج ناوگان PHEV در نظر گرفته شده است. اطلاعات حرکتی و مشخصات این پنج ناوگان در جداول (۳) و (۴) ارائه شده است.

با استفاده از تابع هدف سه‌گانه ارائه شده در رابطه (۱)، بهینه‌سازی چند هدفه برای اهداف فنی ($f_1(X)$)، اقتصادی ناوگان ($f_2(X)$) و کاهش آلاینده‌های ناشی از تولید برق ($f_3(X)$) انجام شده است. در ادامه به بررسی نتایج ایجاد شده پرداخته می‌شود.

۱	۲۰۰۰	۱۰	۰/۹	۲/۲	۲۱	۰
۲	۲۰۰۰	۲۴	۰/۹	۲/۴	۲۵	۰
۳	۲۰۰۰	۳۰	۰/۹	۲/۳	۲۳	۰
۴	۲۰۰۰	۶۳	۰/۹	۲/۵	۲۶	۰
۵	۲۰۰۰	۸۳	۰/۹	۲/۳	۲۵	۰



شکل (۱): سیستم تست توزیع ۸۳ باس IEEE شامل DG و PHEV

جدول (۳): ویژگی‌های حرکت ناوگان PHEV

شماره ناوگان	تعداد ناوگان	سفر اول				سفر دوم				انرژی مصرفی سفر %
		حرکت		رسیدن		حرکت		رسیدن		
		زمان	باس	زمان	باس	زمان	باس	زمان	باس	
۱	۶۸	۶	۱	۹	۴۷	۱۷	۴۷	۲۰	۱	%۷۵
۲	۴۰	۷	۵۶	۸	۶۴	۱۷	۶۴	۱۸	۵۶	%۲۵
۳	۲۰	۵	۱۴	۸	۸۱	۱۶	۸۱	۱۹	۱۴	%۷۵
۴	۳۲	۸	۲۰	۹	۴۶	۲۰	۴۶	۲۱	۲۰	%۲۵
۵	۴۰	۵	۳۶	۷	۷۶	۱۸	۷۶	۲۰	۳۶	%۵۰

جدول ۴: مشخصات ناوگان PHEV

شماره ناوگان	ظرفیت (کیلووات ساعت)		نرخ شارژ و دشارژ	
	Min	Max	Min	Max
۱	۲۶۳	۱۹۷۳	۷.۳۰	۴۹۶
۲	۲۱۹	۱۶۴۴	۷.۳۰	۲۹۲
۳	۱۰۹	۸۲۲	۷.۳۰	۱۴۶
۴	۱۷۵	۱۳۱۵	۷.۳۰	۲۳۳
۵	۲۱۹	۱۶۴۴	۷.۳۰	۲۹۲

۲-۳- بررسی نتایج با اعمال کمترین میزان برای تابع هدف فنی

در شکل (۲) اقدام نماید و در هر ساعت متناسب با قیمت های ارائه شده مطابق با جدول (۵) اقدام نماید تا بیشترین سود و بهره را در هر ساعت کسب نماید. شایان ذکر است که علامت منفی نشان دهنده آن است که سود حاصل از مشارکت خودروهای برقی در بهینه سازی اهداف فنی شبکه، بیش از هزینه های آن ها بوده است.

در شکل (۳)، سود بهره بردار شبکه ناشی از بهینه سازی با توجه به اولویت کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان شبکه نشان داده شده است. در این مدل، مازاد تجاری به عنوان تفاضل میان سود حاصل از بهبود تلفات و ارتقای قابلیت اطمینان شبکه و هزینه های پرداختی جهت ترغیب صاحبان خودروهای برقی و واحدهای تولید پراکنده برای مشارکت در اهداف کنترلی/مدیریتی تعریف می شود.

بزرگ بودن مازاد تجاری به معنای باقی ماندن سهم بیشتری از سود برای بهره بردار شبکه است، در حالی که کوچک بودن آن بیانگر اعطای مشوق های بیشتر به مالکان خودروهای برقی و تولیدات پراکنده می باشد.

در جدول (۵) نتایج شبیه سازی کلیه توابع هدف در ۲۴ ساعت شبانه روز با اعمال کمترین میزان تلفات و بیشترین قابلیت اطمینان سیستم (تابع هدف f_1) اعمال شده است. به بیان دیگر، اولویت اصلی در نتایج ایجاد شده در جدول (۵) کمترین میزان تابع f_1 بوده و سایر مقادیر در هر ساعت با هدف بهینه نمودن تابع هدف f_1 شبیه سازی و درج گردیده است.

با توجه به نتایج ایجاد شده در جدول (۵)، شکل (۲) به مقایسه کلیه توابع هدف ارائه شده در این مقاله (f_1-f_3) متناظر با بهترین f_1 پرداخته است. در این شکل روند تغییرات تابع هدف f_1 در ساعات مختلف شبانه روز بصورت نمودار پیوسته و سایر توابع بصورت نمودار میله ای نمایش داده شده است. چنانچه اولویت بهره بردار شبکه کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان سیستم باشد می تواند طبق نمودار f_1

جدول (۵): نتایج شبیه سازی توابع هدف و وضعیت ساعتی ناوگان متناظر با بهترین f_1

ساعت	وضعیت ساعتی ناوگان حمل و نقل الکتریکی					مازاد تجاری (MS) \$	هزینه تلفات و قابلیت اطمینان سیستم (\$)	هزینه مربوط به خودروهای برقی (\$)	آلودگی (kg)	مقدار نرمالایز شده f_1 تابع	مقدار نرمالایز شده f_2 تابع	مقدار نرمالایز شده f_3 تابع	مجموع نرمالایز شده تابع هدف
	شارژ ۱	شارژ ۱- ساکن و یا حرکت	شارژ ۱- حالت	شارژ ۱- ساکن و یا حرکت	شارژ ۱- حالت								
۱	۱	۰	۱	-۱	۱	۱۲,۵۷	۶۰۹۰,۸۳	-۶۹۳,۶۵	۲۱۲۶۴,۹۵	۰,۲۰	۰,۸۳	۰,۵۴	۰,۳۱
۲	۱	۱	-۱	۱	۱	۱۲,۲۵	۵۲۵۴,۳۷	-۱۳۷۵,۵	۱۸۵۲۲,۸۷	۰,۳۶	۱	۰,۷۴	۰,۵۳
۳	۱	۱	-۱	۱	۱	۸,۸۹	۵۸۰۸,۹۳	-۸۸۷,۹۴	۲۰۳۱۷,۹۷	۰,۲۴۵	۰,۹۱	۰,۶۰	۰,۲۵
۴	۱	۱	۱-	۱	-۱	۷,۴۱	۵۸۴۹,۵۰	-۳۱۹,۰۲	۲۰۵۶۵,۲۵	۰,۲۳	۰,۷۱	۰,۵۸	۰,۱۵
۵	۱	-۱	-۱	۱	-۱	۶,۸۴	۵۹۵۸,۶۵	۱۳۶,۵۶	۲۱۰۴۶,۲۹	۰,۲۱	۰,۵۵۱	۰,۵۴	۰,۱۱
۶	۱	-۱	۰	۱	۰	۵,۹۰	۶۱۹۱,۷۴	-۷۳۶,۰۶	۲۱۶۹۸,۶۹	۰,۱۶	۰,۸۶	۰,۴۹	۰,۱۲
۷	-۱	۰	۰	-۱	۰	۷,۳۴	۳۵۵۹,۱۴	-۱۰۰۵,۶	۱۳۴۱۹,۹۹	۰,۷۲	۰,۹۵	۱	۰,۴۹
۸	۰	۰	۰	-۱	۱	۳,۵۹	۳۰۸۴,۳۶	۳۴۰,۱۷	۱۰۷۳۵,۵۲	۰,۸۲	۰,۴۷	۱	۰,۴۴
۹	۱	۱	۱	۰	۱	۱۴,۵۴	۴۳۷۳,۴۲	-۳۶۲۹,۲	۱۲۸۵۶,۶۸	۱	۱	۱	۰,۰۱
۱۰	۱	۱	۱	۱	۱	۹,۹۱	۴۶۸۱,۲۵	-۳۶۳۸,۲	۱۲۷۷۰,۸۹	۱	۱	۱	۰,۰۱۹
۱۱	۱	۱	-۱	۱	۱	۸,۸۸	۴۷۸۹,۳۳	-۳۱۱۲,۱	۱۲۹۰۳,۳۰	۱	۱	۱	۰,۰۱
۱۲	۱	۱	۱	۰	۱	۸,۳۹	۴۷۱۸,۱۶	-۳۹۸۱,۸	۱۳۰۰۴,۴۹	۱	۱	۱	۰,۰۱
۱۳	۱	۱	-۱	۱	۱	۰,۹۹	۷۴۳۵,۳۴	-۲۳۳۹,۷	۲۰۹۷۷,۷۷	۰,۴۰	۱	۰,۷۱	۱
۱۴	۱	۱	-۱	۰	۱	۱۵,۲۹	۷۴۹۶,۹۰	-۲۱۶۸,۸	۲۱۲۲۸,۸۹	۰,۳۸	۱	۰,۷۰	۰,۵۰
۱۵	۱	-۱	-۱	۱	۱	۱۰,۰۳	۷۳۶۲,۴۴	-۸۱۵,۳۳	۲۱۶۰۲,۴۹	۰,۴۱	۰,۸۹	۰,۶۸	۰,۴۸
۱۶	۱	-۱	-۱	۱	۱	۹,۶۵	۷۴۸۱,۳۵	۲۲۸,۵۶	۲۱۸۸۲,۷۱	۰,۳۹	۰,۵۱	۰,۶۷	۰,۲۰
۱۷	-۱	۰	۰	۱	-۱	۷,۷۱	۷۹۲۵,۴۵	۱۴,۸۲	۲۶۴۴۸,۶۳	۰,۳۰	۰,۵۹	۰,۴۶	۰,۱۲

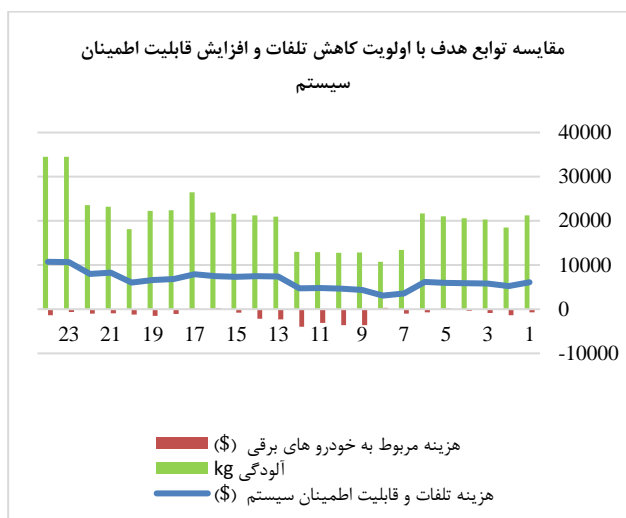
۱۸	۰	۰	۰	۱	-۱	۵,۳۹	۶۸۱۹,۵۰	-۱۰۸۰,۰	۲۲۳۹۳,۰۶	۰,۳۷	۰,۹۰	۰,۶۱	۰,۲۱
۱۹	۱	۱	۰	۱	۰	۹,۴۱	۶۶۲۱,۱۰	-۱۵۱۰,۸	۲۲۲۸۳,۵۳	۰,۴۱	۱	۰,۶۱	۰,۵۰
۲۰	۱	۱	۰	۱	۰	۲۰,۸۸	۶۰۶۳,۳۲	-۱۱۸۳,۳	۱۸۱۴۹,۴۳	۰,۵۵	۰,۹۳	۰,۸۱	۰,۳۳
۲۱	۱	۱	۱	۰	۱	۲۳,۰۵	۸۲۶۲,۴۱	-۸۹۳,۷۱	۲۳۲۲۰,۵۰	۰,۳۸	۰,۸۹	۰,۶۴	۰,۴۸
۲۲	۱	۱	-۱	۰	۱	۲۷,۴۷	۷۹۸۸,۲۰	-۱۰۰۷,۳	۲۳۵۴۳,۹۳	۰,۴۲	۰,۹۳	۰,۶۳	۰,۳۵
۲۳	۱	۰	۰	۱	۱	۱۲,۰۷	۱۰۶۵۵,۲۱	-۶۳۲,۴۹	۳۴۴۸۳,۶۸	۰,۰۲	۰,۸۱	۰,۱۴	۰,۳۱
۲۴	۱	۱	-۱	۱	۱	۱۰,۰۶	۱۰۷۲۸,۰۸	-۱۳۲۶,۹	۳۴۵۳۲,۴۲	۰,۰۱	۱	۰,۱۴	۱

۳-۳- بررسی نتایج با اعمال کمترین میزان برای تابع هدف اقتصادی

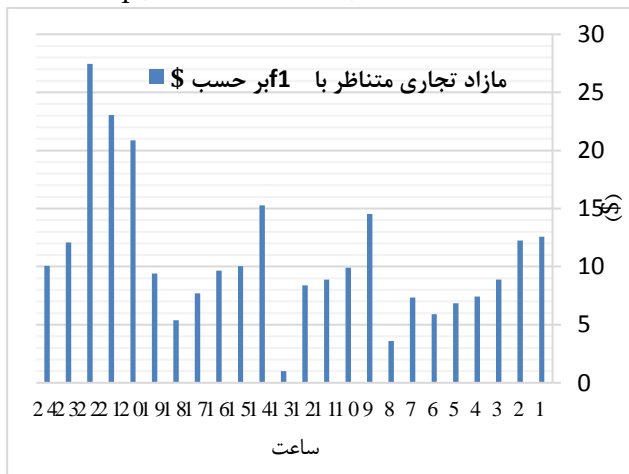
همانطور که ذکر شد، تابع هدف $f_2(X)$ شامل بهینه‌سازی قیمت‌ها بر اساس هزینه‌های خودروهای برقی در شبکه توزیع می‌باشد که با توجه به قیمت‌های بدست آمده توسط الگوریتم LMP در ساعت‌های شبانه روز شبیه‌سازی شده است. براین اساس در جدول (۶) نتایج شبیه‌سازی کلیه توابع هدف در ۲۴ ساعت شبانه روز با اعمال بهینه‌سازی هزینه‌های ناوگان حمل و نقل الکتریکی (تابع هدف f_2) ارائه شده است. به بیان دیگر، اولویت اصلی در نتایج ارائه شده در این جدول، کمترین میزان تابع f_2 بوده است و سایر مقادیر در هر ساعت با هدف بهینه نمودن تابع هدف f_2 شبیه‌سازی و ارائه شده است.

در شکل (۴) مقایسه‌ای بین توابع هدف f_1 و f_2 و f_3 در ۲۴ ساعت شبانه روز با اولویت بهینه‌سازی هزینه‌های ناوگان خودروهای برقی، ارائه شده است. در این شکل تابع هدف f_2 بصورت نمودار پیوسته و سایر توابع بصورت نمودار میله‌ای نمایش داده شده است. چنانچه اولویت بهره‌بردار شبکه بهینه‌سازی هزینه‌های مربوط به ناوگان حمل و نقل الکتریکی باشد، می‌تواند طبق نمودار f_2 در شکل (۴) اقدام نماید تا بیشترین سود را در هر ساعت کسب نماید.

در شکل (۵) مازاد تجاری حاصل از بهینه‌سازی با توجه به اولویت بهره‌بردار به جهت بهینه‌سازی هزینه در ناوگان خودروهای الکتریکی مدل‌سازی شده است.



شکل (۲): مقایسه توابع هدف متناظر با بهترین f_1



شکل (۳): مازاد تجاری حاصل از اجرای تابع هدف f_1 (تلفات و قابلیت اطمینان سیستم)

جدول (۶): نتایج شبیه‌سازی توابع هدف و وضعیت ساعتی ناوگان متناظر با f_2

ساعت	وضعیت ساعتی ناوگان حمل و نقل الکتریکی					مازاد تجاری (MS) \$	تلفات و قابلیت اطمینان سیستم (\$)	هزینه‌های مربوط به خودروهای برقی (\$)	آلودگی (kg)	مقدار نرمالایز شده f_1 تابع	مقدار نرمالایز شده f_2 تابع	مقدار نرمالایز شده f_3 تابع	مجموع نرمالایز شده تابع هدف
	شارژ ۱	شارژ ۰	حالت ساکن	یا حرکت	۰								
	ناوگان ۱	ناوگان ۲	ناوگان ۳	ناوگان ۴	ناوگان ۵								

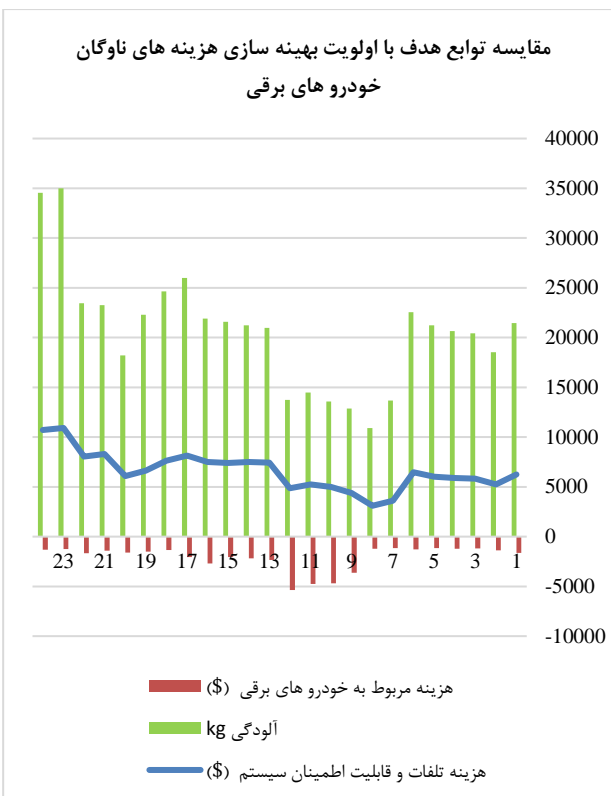
۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱۳,۱۵	۶۲۴۴,۹۳	-۱۶۴۷,۰۹	۲۱۴۴۹,۹	۰,۱۷	۱	۰,۵۳	۰,۳۴
۲	۱	۱	-۱	۱	۱	۱۲,۲۵	۵۲۵۴,۳۷	-۱۳۷۵,۵	۱۸۵۲۲,۸	۰,۳۶	۱	۰,۷۴	۰,۵۳
۳	۱	۰	۰	۱	۱	۹,۲۶	۵۸۲۶,۱۳	-۱۱۷۵,۳۷	۲۰۴۲۷,۹	۰,۲۴	۱	۰,۵۹	۰,۲۶
۴	۱	۱	-۱	۱	-۱	۵,۹۵	۵۸۸۸,۳۳	-۱۲۲۱,۴۹	۲۰۶۵۲,۳	۰,۲۲	۱	۰,۵۷	۰,۱۸
۵	۱	-۱	-۱	۰	-۱	۵,۶۰	۶۰۱۹,۸۷	-۱۱۵۹,۰۰	۲۱۲۳۴,۱	۰,۱۹	۱	۰,۵۲	۰,۱۵
۶	-۱	-۱	۰	۱	۰	۲,۲۲	۶۴۷۳,۷۹	-۱۲۸۶,۷۴	۲۲۵۶۲,۰	۰,۱۰	۱	۰,۴۲	۰,۱۲
۷	-۱	۰	۰	-۱	۰	۷,۴۱	۳۶۲۲,۴۳	-۱۱۴۰,۲۴	۱۳۶۷۱,۲	۰,۷۰	۱	۱	۰,۵۰
۸	۰	۰	۰	-۱	۱	۶,۸۷	۳۱۰۰,۹۴	-۱۲۱۳,۹۶	۱۰۸۹۸,۱	۰,۸۱	۱	۱	۰,۵۵
۹	۱	۱	۱	۰	۱	۱۴,۵۴	۴۳۷۳,۴۲	-۳۶۲۹,۲۲	۱۲۸۵۶,۶	۱	۱	۱	۰,۰۱
۱۰	۱	-۱	۰	-۱	۱	۲۲,۳۲	۴۹۸۰,۹۶	-۴۶۹۹,۸۸	۱۳۵۶۷,۱	۱	۱	۱	۰,۰۱
۱۱	-۱	-۱	۰	۱	-۱	۲,۷۶	۵۲۴۸,۰۱	-۴۷۵۵,۰۱	۱۴۴۹۳,۵	۱	۱	۱	۰,۰۱
۱۲	-۱	۱	-۱	۱	۱	۱۷,۵۵	۴۸۶۳,۴۵	-۵۳۵۹,۳۳	۱۳۷۲۲,۰	۱	۱	۱	۰,۰۱۶
۱۳	۱	۱	-۱	۱	۱	۰,۹۹	۷۴۳۵,۳۴	-۲۳۳۹,۷۶	۲۰۹۷۷,۷	۰,۴۰	۱	۰,۷۱	۱
۱۴	۱	۱	-۱	۰	۱	۱۵,۲۹	۷۴۹۶,۹۰	-۲۱۶۸,۸۸	۲۱۲۲۸,۸	۰,۳۸	۱	۰,۷۰	۰,۵۰
۱۵	۱	-۱	-۱	۱	۱	۵,۵۵	۷۳۸۸,۱۲	-۲۰۵۳,۵۲	۲۱۵۹۶,۷	۰,۴۰	۱	۰,۶۸	۰,۵۱
۱۶	۱	-۱	-۱	۱	۰	۳,۲۴	۷۵۰۸,۸۷	-۲۷۰۷,۶۴	۲۱۹۰۹,۶	۰,۳۸	۱	۰,۶۷	۰,۲۷
۱۷	۱	۰	۰	-۱	-۱	۹,۴۵	۸۱۳۶,۱۹	-۲۰۶۶,۲۰	۲۵۹۹۱,۳	۰,۲۶	۱	۰,۴۸	۰,۱۵
۱۸	۰	۰	۰	۱	-۱	۱۶,۵۴	۷۶۱۸,۷۹	-۱۳۴۶,۹۰	۲۴۶۲۷,۲	۰,۱۸	۰,۹۷	۰,۵۰	۰,۱۹
۱۹	۱	۱	۰	۱	۰	۹,۴۱	۶۶۲۱,۱۰	-۱۵۱۰,۸۸	۲۲۲۸۳,۵	۰,۴۱	۱	۰,۶۱	۰,۵۰
۲۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱۸,۰۷	۶۰۷۱,۰۶	-۱۶۰۰,۴۵	۱۸۲۱۵,۷	۰,۵۵	۱	۰,۸۱	۰,۳۳
۲۱	۱	۱	۱	۰	۱	۴۰,۴۹	۸۲۹۰,۱۹	-۱۴۲۳,۴۵	۲۳۲۶۴,۹	۰,۳۸	۱	۰,۶۴	۰,۵۱
۲۲	۱	۱	۱	۰	۱	۶,۰۰	۸۰۵۰,۶۸	-۱۶۷۶,۰۳	۲۳۴۶۳,۲	۰,۴۱	۱	۰,۶۳	۰,۳۶
۲۳	۱	۱	۰	۱	۱	۸,۴۸	۱۰۹۱۷,۳	-۱۲۵۴,۱۸	۳۴۹۸۵,۵	۰	۱	۰,۱۲	۰,۳۵
۲۴	۱	۱	-۱	۱	۱	۱۰,۰۶	۱۰۷۲۸,۰	-۱۳۲۶,۹۰	۳۴۵۳۲,۴	۰,۰۱	۱	۰,۱۴	۱

شکل (۵): مازاد تجاری حاصل از اجرای تابع هدف f_2 (بهینه سازی هزینه‌های ناوگان خودروهای الکتریکی)

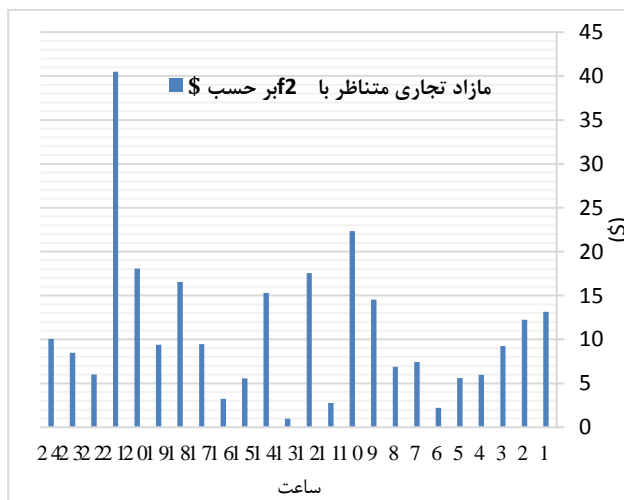
۳-۴- بررسی نتایج با اعمال کمترین میزان برای تابع هدف کاهش آلاینده‌گی

جدول شماره (۷) نتایج شبیه سازی کلیه توابع هدف در ۲۴ ساعت شبانه روز با اعمال بهینه سازی کاهش انتشار آلودگی (تابع هدف f_3) ارائه شده است. در نتایج ارائه شده در این جدول، اولویت اصلی ایجاد کمترین مقدار برای تابع هدف f_3 بوده است و سایر مقادیر در هر ساعت با هدف بهینه نمودن تابع هدف f_3 شبیه‌سازی و ارائه شده است. در شکل (۶) توابع هدف f_1 و f_2 و f_3 در ۲۴ ساعت ارائه شده است. در این شکل تابع هدف f_3 بصورت نمودار پیوسته و سایر توابع بصورت نمودار میله‌ای نمایش داده شده است. چنانچه اولویت دستگاه بهره‌بردار بهینه سازی کاهش انتشار آلودگی و جرائم ناشی از آن باشد، می‌تواند طبق نمودار f_3 در شکل ۴-۱۲ اقدام نماید و در هر ساعت متناسب با قیمت‌های ارائه شده مطابق با جدول ۴-۱۰ اقدام نماید تا بیشترین سود و بهره را در هر ساعت کسب نماید.

در شکل (۷)، مازاد تجاری حاصل از بهینه سازی با در نظر گرفتن اولویت بهره‌بردار در کاهش هزینه‌های ناشی از انتشار آلاینده‌ها و جرائم مربوطه مدل سازی شده است. کاهش مازاد تجاری در این حالت نسبت به دو حالت قبلی (اهداف فنی و اقتصادی) نشان‌دهنده اهمیت کاهش آلودگی و مشارکت فعال‌تر مالکان خودروهای برقی و واحدهای تولید پراکنده در راستای این هدف است. از این‌رو، بهره‌بردار شبکه با اعطای مشوق‌های بیشتر، آن‌ها را به تنظیم عملکرد خود در جهت کاهش آلاینده‌ها ترغیب نموده است.



شکل (۴): مقایسه توابع هدف متناظر با بهترین f_2

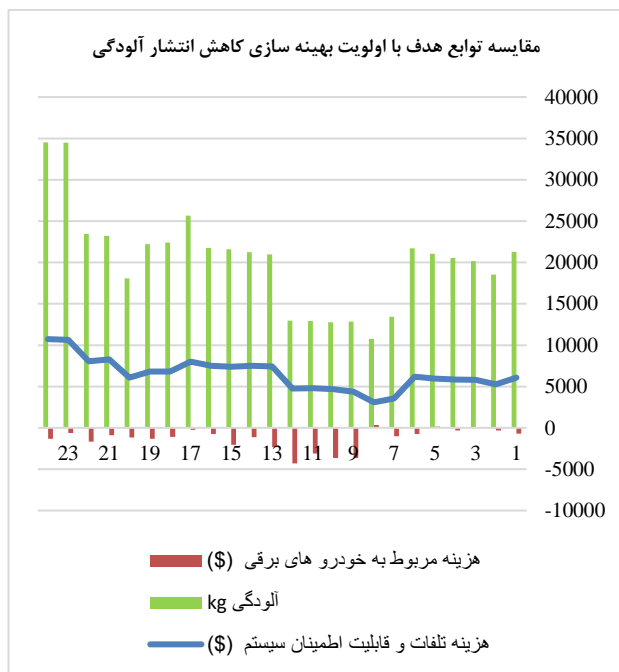


جدول (۷): نتایج شبیه‌سازی توابع هدف و وضعیت ساعتی ناوگان با اولویت بهینه سازی کاهش انتشار آلودگی

ساعت	وضعیت ساعتی ناوگان حمل و نقل الکتریکی					مازاد تجاری (MS) \$	تلفات و قابلیت اطمینان سیستم (\$) \$	هزینه های مربوط به خودروهای برقی (\$) \$	آلودگی (kg)	مقدار نرمالایز شده تابع f_1	مقدار نرمالایز شده تابع f_2	مقدار نرمالایز شده تابع f_3	مجموع نرمالایز شده تابع هدف
	شارژ ۱ / دشارژ -۱ / یا حرکت ۰												
	ناوگان ۱	ناوگان ۲	ناوگان ۳	ناوگان ۴	ناوگان ۵								
۱	۱	۰	۱	-۱	۱	۱۲,۵۷	۶۰۹۰,۸۳	-۶۹۳,۶۵	۲۱۲۶۴,۹۵	۰,۲۰	۰,۸۳	۰,۵۴	۰,۳۱
۲	۱	۱	-۱	۰	۰	۱۱,۵۸	۵۲۶۹,۶۸	-۳۲۷,۰۹	۱۸۵۱۷,۴۹	۰,۳۵	۰,۷۱	۰,۷۴	۰,۴۶
۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱۰,۷۶	۵۸۰۹,۸۳	۷,۱۷	۲۰۱۷۳,۳۴	۰,۲۴	۰,۵۹	۰,۶۱	۰,۲۱
۴	۱	۱	-۱	۱	-۱	۷,۴۱	۵۸۴۹,۵۰	-۳۱۹,۰۲	۲۰۵۶۵,۲۵	۰,۲۳	۰,۷۱	۰,۵۸	۰,۱۵
۵	۱	-۱	-۱	۱	-۱	۶,۸۴	۵۹۵۸,۶۵	۱۳۶,۵۶	۲۱۰۴۶,۲۹	۰,۲۱	۰,۵۵۱	۰,۵۴	۰,۱۱

۶	۱	-۱	۰	۱	۰	۵,۹۰	۶۱۹۱,۷۴	-۷۳۶,۰۶	۲۱۶۹۸,۶۹	۰,۱۶	۰,۸۶	۰,۴۹	۰,۱۲
۷	-۱	۰	۰	-۱	۰	۷,۳۴	۳۵۵۹,۱۴	-۱۰۰۵,۶	۱۳۴۱۹,۹۹	۰,۷۲	۰,۹۵	۱	۰,۴۹
۸	۰	۰	۰	-۱	۱	۳,۵۹	۳۰۸۴,۳۶	۳۴۰,۱۷	۱۰۷۳۵,۵۲	۰,۸۲	۰,۴۷	۱	۰,۴۴
۹	۱	۱	۱	۰	۱	۱۴,۵۴	۴۳۷۳,۴۲	-۳۶۲۹,۲	۱۲۸۵۶,۶۸	۱	۱	۱	۰,۰۱
۱۰	۱	۱	۱	۱	۱	۹,۹۱	۴۶۸۱,۲۵	-۳۶۳۸,۲	۱۲۷۷۰,۸۹	۱	۱	۱	۰,۰۱۹
۱۱	۱	۱	-۱	۱	۱	۸,۸۸	۴۷۸۹,۳۳	-۳۱۱۲,۱	۱۲۹۰۳,۳۰	۱	۱	۱	۰,۰۱
۱۲	۱	۱	۰	۰	۱	۱۶,۲۳	۴۷۴۱,۷۷	-۴۲۹۲,۷	۱۲۹۶۰,۱۳	۱	۱	۱	۰,۰۱۶
۱۳	۱	۱	-۱	۱	۱	۰,۹۹	۷۴۳۵,۳۴	-۲۳۳۹,۷	۲۰۹۷۷,۷۷	۰,۴۰	۱	۰,۷۱	۱
۱۴	۱	۱	-۱	۱	۱	۱۶,۴۳	۷۵۱۰,۸۶	-۱۱۳۰,۹	۲۱۲۲۴,۷۷	۰,۳۸	۱	۰,۷۰	۰,۴۹
۱۵	۱	-۱	-۱	۱	۱	۵,۵۵	۷۳۸۸,۱۲	-۲۰۵۳,۵۲	۲۱۵۹۶,۷۱	۰,۴۰	۱	۰,۶۸	۰,۵۱
۱۶	۱	-۱	-۱	۱	۰	۱۸,۹۷	۷۴۸۶,۱۲	-۷۳۰,۵۹	۲۱۷۴۷,۰۴	۰,۳۹	۰,۸۶	۰,۶۷	۰,۲۵
۱۷	۰	۰	۰	۰	-۱	۹,۲۲	۸۰۲۴,۰۴	-۲۳۶,۹۱	۲۵۶۷۱,۳۷	۰,۲۸	۰,۶۸	۰,۴۹	۰,۱۲
۱۸	۰	۰	۰	۱	-۱	۵,۳۹	۶۸۱۹,۵۰	-۱۰۸۰,۰	۲۲۳۹۳,۰۶	۰,۳۷	۰,۹۰	۰,۶۱	۰,۲۱
۱۹	۱	۱	۰	۱	۰	۱۰,۰۳	۶۸۲۵,۱۷	-۱۳۲۷,۲	۲۲۲۰۱,۶۴	۰,۳۶	۰,۹۷	۰,۶۲	۰,۴۹
۲۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱۸,۶۲	۶۰۷۳,۲۰	-۱۱۴۹,۱	۱۸۰۸۰,۰۲	۰,۵۵	۰,۹۲	۰,۸۲	۰,۳۲
۲۱	۱	۱	۱	۰	۱	۲۳,۰۵	۸۲۶۲,۴۱	-۸۹۳,۷۱	۲۳۲۲۰,۵۰	۰,۳۸	۰,۸۹	۰,۶۴	۰,۴۸
۲۲	۱	۱	۱	۰	۱	۶,۰۰	۸۰۵۰,۶۸	-۱۶۷۶,۰	۲۳۴۶۳,۲۳	۰,۴۱	۱	۰,۶۳	۰,۳۶
۲۳	۱	۰	۰	۱	۱	۱۲,۰۷	۱۰۶۵۵,۲۱	-۶۳۲,۴۹	۳۴۴۸۳,۶۸	۰,۰۲	۰,۸۱	۰,۱۴	۰,۳۱
۲۴	۱	۱	-۱	۱	۱	۱۰,۰۶	۱۰۷۲۸,۰۸	-۱۳۲۶,۹	۳۴۵۳۲,۴۲	۰,۰۱	۱	۰,۱۴	۱

مقایسه توابع هدف با اولویت بهینه سازی کاهش انتشار آلودگی



شکل (۶): مقایسه توابع هدف متناظر با بهترین f_3

در شکل (۶) توابع هدف f_1 و f_2 و f_3 در ۲۴ ساعت ارائه شده است. در این شکل تابع هدف f_3 بصورت نمودار پیوسته و سایر توابع بصورت نمودار میله ای نمایش داده شده است. چنانچه اولویت د ستگاه بهره بردار بهینه سازی کاهش انتشار آلودگی و جرائم ناشی از آن باشد می تولند طبق نمودار f_3 در شکل ۴-۱۲ اقدام نماید و در هر ساعت متناسب با قیمت های ارائه شده مطابق با جدول ۴-۱۰ اقدام نماید تا بیشترین سود و بهره را در هر ساعت کسب نماید. در شکل (۷)، مازاد تجاری حاصل از بهینه سازی با در نظر گرفتن اولویت بهره بردار در کاهش هزینه های ناشی از انتشار آلاینده ها و جرائم مربوطه مدل سازی شده است. کاهش مازاد تجاری در این حالت نسبت به دو حالت قبلی (اهداف فنی و اقتصادی) نشان دهنده اهمیت کاهش آلودگی و مشارکت فعال تر مالکان خودروهای برقی و واحدهای تولید پراکنده در راستای این هدف است. از این رو، بهره بردار شبکه با اعطای مشوق های بیشتر، آن ها را به تنظیم عملکرد خود در جهت کاهش آلاینده ها ترغیب نموده است.

۳-۵- مقایسه نتایج

شکل (۷): مازاد تجاری حاصل از اجرای تابع هدف f_3 (بهینه‌سازی کاهش انتشار آلودگی)

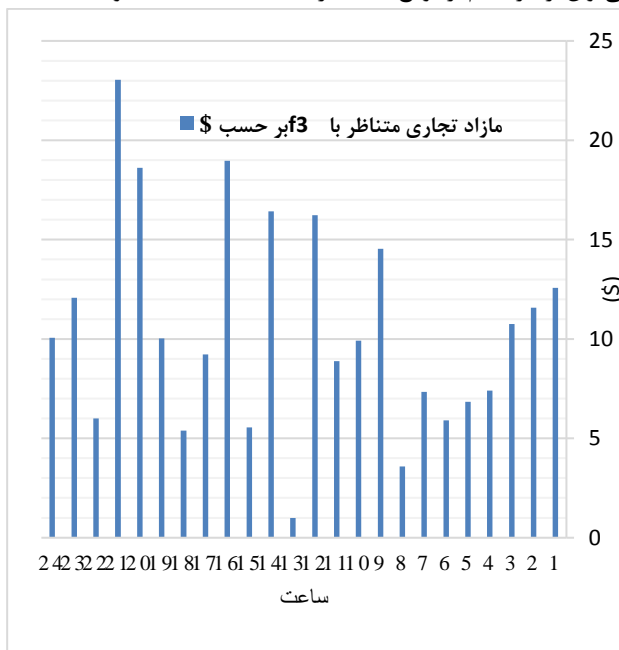
۳-۵-۱- تحلیل خروجی‌های ایجاد شده برای ساعت ۱۷

در صورتی که هدف بهره‌بردار شبکه کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان شبکه باشد، بهترین جواب جهت تابع هدف f_1 در ساعت ۱۷ عدد ۷۹۲۵.۴۶ می‌باشد و در صورت انتخاب این گزینه می‌توان قیمت‌های LMP در دی‌جی‌ها و ناوگان حمل و نقل را متناظر با ستون مذکور اعمال نمود و سود تجاری حاصل از این اعمال قیمت‌ها در ساعت ۱۷ برابر با ۷.۷۲ دلار در ساعت خواهد بود.

در صورتی که هدف بهره‌بردار کاهش هزینه‌های مربوط به ناوگان حمل و نقل الکتریکی باشد، بهترین جواب تابع هدف f_2 در ساعت ۱۷ برابر با ۲۰۶۶.۲۰ می‌باشد (علامت منفی به معنای تزریق توان از خودروها به شبکه می‌باشد) و در صورت انتخاب این گزینه می‌توان قیمت‌های LMP در دی‌جی‌ها و ناوگان حمل و نقل الکتریکی را متناظر با ستون مذکور اعمال نمود و سود تجاری حاصل از این اعمال قیمت‌ها در ساعت برابر با ۹.۴۵ دلار در ساعت خواهد بود.

در صورتی که هدف بهره‌بردار کاهش انتشار آلودگی باشد، بهترین جواب تابع هدف f_3 در ساعت ۱۷ برابر با ۲۵۶۷۱.۳۷ می‌باشد و در صورت انتخاب این گزینه می‌توان قیمت‌های LMP در دی‌جی‌ها و ناوگان حمل و نقل الکتریکی را متناظر با ستون مذکور اعمال نمود و سود تجاری حاصل از این اعمال قیمت‌ها در ساعت ۱۷ برابر با ۹.۲۳ دلار در ساعت خواهد بود.

بمنظور ارزیابی دقیق‌تر از مدیریت شارژ و دشارژ پیشنهاد شده، در این بخش به مقایسه نتایج برای یک ساعت فرضی پرداخته می‌شود. بدین منظور تحلیل نتایج برای ساعت ۱۷ بهره‌برداری ارائه می‌شود. براین اساس در جدول (۸) برخی از خروجی‌های ایجاد شده برای حالات بهینه توابع هدف f_1 ، f_2 و f_3 در ساعت ۱۷ ارائه گردیده است. همانطور که از این جدول مشخص است، بهترین توابع هدف در ساعت ۱۷ با رنگ‌بندی کاملاً مشخص گردیده است و طبق نظر بهره‌بردار می‌توان از هر کدام از توابع هدف در ساعت ۱۷ استفاده نمود.



جدول (۸): نتایج ساعت ۱۷ گرفته شده از خروجی نرم‌افزار متلب

قیمت توان دی‌جی‌ها (\$/MW)	دی‌جی ۱	۲۹.۴۰	۲۷.۴۹	۲۹.۶۰	۲۹.۴۶	۲۹.۵۴	۲۸.۵۷	۲۹.۸۳
	دی‌جی ۲	۲۹.۵۸	۲۹.۹۲	۲۸.۷۱	۲۹.۰۱	۲۹.۲۸	۲۹.۲۹	۲۹.۸۹
	دی‌جی ۳	۲۸.۴۰	۲۸.۷۳	۲۷.۷۲	۲۷.۴۹	۲۸.۹۸	۲۹.۸۸	۲۶.۴۱
	دی‌جی ۴	۲۷.۰۳	۲۹.۱۷	۲۹.۹۲	۲۸.۴۱	۲۸.۶۷	۲۹.۴۰	۲۹.۵۹
	دی‌جی ۵	۲۹.۵۴	۲۹.۲۶	۲۹.۴۴	۲۹.۵۱	۲۹.۶۸	۲۹.۳۸	۲۹.۹۴
قیمت توان شارژ خودروها (\$/MW)	ناوگان ۱	۲۷.۰۷	۲۹.۳۲	۲۳.۰۰	۲۵.۲۹	۲۵.۹۰	۲۱.۶۷	۲۵.۶۹
	ناوگان ۲	۲۱.۲۹	۲۹.۶۰	۲۶.۳۳	۲۳.۰۰	۲۵.۳۱	۲۵.۱۰	۲۵.۶۴
	ناوگان ۳	۲۲.۵۳	۲۲.۹۴	۲۵.۷۶	۲۲.۹۶	۲۵.۷۳	۲۳.۰۴	۲۲.۵۵
	ناوگان ۴	۲۴.۶۳	۲۱.۴۵	۲۳.۸۱	۲۲.۱۳	۲۲.۲۷	۲۵.۸۸	۲۶.۹۸
	ناوگان ۵	۲۵.۸۷	۲۳.۳۹	۲۳.۱۰	۲۱.۹۵	۲۴.۶۶	۲۴.۳۶	۲۳.۷۳
توان دی‌جی‌ها (kW)	دی‌جی ۱	۴۷۸.۳۶	۴۷۸.۹۷	۳۵۰.۷۸	۴۷۸.۳۳	۱۰۰.۵۰	۰	۳۸۷.۰۰
	دی‌جی ۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	دی‌جی ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	دی‌جی ۴	۶۸.۹۰	۳۳۱.۳۱	۰	۲۲۹.۰۳	۰	۰	۱۲۳.۷۹
	دی‌جی ۵	۹۷.۲۹	۹۷.۲۹	۹۷.۲۹	۹۷.۲۹	۹۷.۲۹	۹۷.۲۹	۲۷۵.۳۹
وضعیت شارژ و دشارژ خودروها	ناوگان ۱	۱	۱	-۱	۱	۱	۰	-۱
	ناوگان ۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	ناوگان ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

	ناوگان ۴	-۱	-۱	۰	۱	۰	۰	۱
	ناوگان ۵	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱
توان ناوگان خودروها (kW)	ناوگان ۱	۱۹۰۹۸۰	۱۴۷۳۹۸	۱۹۵۴۳۷	۱۹۲۱۷۶	۱۹۴۱۰۲	۱۷۲۱۴۷	۲۰۰
	ناوگان ۲	۹۵۳۶۵	۱۰۲۴۴۲	۷۷۲۱۰	۸۳۵۵۳	۸۹۱۳۰	۸۹۳۰۰	۱۰۱۸۹۱
	ناوگان ۳	۷۰۸۲۴	۷۷۷۹۱	۵۶۶۳۰	۵۷۱۸۱	۸۲۹۷۲	۱۰۱۶۸۴	۲۹۴۴۱
	ناوگان ۴	۱۳۷۰۰۱	۱۸۵۷۱۶	۲	۱۶۸۴۵۸	۱۷۴۲۱۸	۱۹۱۰۲۲	۱۹۵۲۷۱
	ناوگان ۵	۱۹۴۰۹۹	۱۸۷۸۱۹	۱۹۱۹۰۲	۱۹۳۴۸۱	۱۹۷۲۸۴	۱۹۰۳۷۳	۲۰۰
مزاد تجاری (\$) f1	۱۲۴۶	۹۴۵	۸۳۱	۱۴۰۳	۹۹۴	۹۲۳	۷۷۲	۷۷۲
تابع هدف f1 (\$)	۸۱۰۵۹۶	۸۱۳۶۱۹	۸۰۲۷۰۷	۷۹۷۳۱۹	۷۹۶۰۴۱	۸۰۲۴۰۵	۷۹۲۵۴۶	۷۹۲۵۴۶
تابع هدف f2 (\$)	-۱۱۵۱۲۵	-۲۰۶۶۲۰	-۱۰۳۱۴۹	-۸۳۴۵۳	-۴۹۳۶۸	-۲۳۶۹۲	۱۴۸۲	۱۴۸۲
تابع هدف f3 (\$)	۲۶۰۲۵۰۵	۲۵۹۹۱۳۲	۲۶۴۲۲۷۸	۲۵۷۹۰۲۸	۲۵۶۹۹۷۸	۲۵۶۷۱۳۷	۲۶۴۴۸۶۳	۲۶۴۴۸۶۳
مقدار نرمالایز شده تابع هدف f1	۰.۲۷	۰.۲۷	۰.۲۹	۰.۳۰	۰.۳۰	۰.۲۹	۰.۳۱	۰.۳۱
مقدار نرمالایز شده تابع هدف f2	۰.۰۰۱	۰	۰.۹۷	۰.۹۰	۰.۷۸	۰.۶۸	۰.۵۹	۰.۵۹
مقدار نرمالایز شده تابع هدف f3	۰.۴۸	۰.۴۸	۰.۴۶	۰.۴۹	۰.۵۰	۰.۵۰	۰.۴۶	۰.۴۶
مجموع تابع هدف	۰.۱۶	۰.۱۵	۰.۱۵	۰.۱۵	۰.۱۴	۰.۱۳	۰.۱۲	۰.۱۲

به ابزاری قدرتمند برای تصمیم‌گیری در سیستم‌های توزیع مدرن تبدیل می‌نماید.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک استراتژی جامع و چندبعدی برای مدیریت یکپارچه شارژ و دشارژ خودروهای برقی و منابع تولید پراکنده ارائه گردید. این استراتژی با بهره‌گیری از مکانیزم قیمت‌گذاری حاشیه‌ای مکانی (LMP)، عوامل فنی شبکه، ملاحظات اقتصادی و الزامات زیست‌محیطی را در قالب یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه و کارآمد ترکیب می‌کند.

پیاده‌سازی چارچوب پیشنهادی بر روی شبکه تست استاندارد-IEEE 83 با نشان داد که این رویکرد از کارایی بالایی برخوردار است و تولنایی مدیریت مؤثر چالش‌های پیچیده ناشی از حضور همزمان خودروهای برقی و تولیدات پراکنده را دارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) انجام شد، به وضوح بیانگر آن است که روش پیشنهادی می‌تواند به‌طور همزمان موجب بهبود عملکرد فنی شبکه (مانند کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان)، افزایش سودآوری ذی‌نفعان (شامل مالکان خودروهای برقی و اپراتورهای منابع پراکنده) و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی شود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که با تغییر اولویت‌های بهره‌بردار، می‌توان به خروجی‌های متفاوتی دست یافت. به عنوان نمونه، اولویت‌دهی به اهداف فنی منجر به شبکه‌ای پایدارتر و قابل‌اعتمادتر می‌شود، در حالی که اولویت اقتصادی انگیزه بیشتری برای مشارکت فعال مالکان خودروهای برقی فراهم می‌کند. این انعطاف‌پذیری ارزش طرح پیشنهادی را در مدیریت هوشمند انرژی برجسته ساخته و آن را

مراجع

- Aghajan-Eshkevari, S., Azad, S., Nazari-Heris, M., Ameli, M. T., & Asadi, S. (2022). Charging and Discharging of Electric Vehicles in Power Systems: An Updated and Detailed Review of Methods, Control Structures, Objectives, and Optimization Methodologies. *Sustainability*, 14(4), 2137. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/4/2137>
- Aljafari, B., Jeyaraj, P. R., Kathiresan, A. C., & Thanikanti, S. B. (2023). Electric vehicle optimum charging-discharging scheduling with dynamic pricing employing multi agent deep neural network. *Computers and Electrical Engineering*, 105, 108555. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108555>
- An, Y., Gao, Y., Wu, N., Zhu, J., Li, H., & Yang, J. (2023). Optimal scheduling of electric vehicle charging operations considering real-time traffic condition and travel distance. *Expert Systems with Applications*, 213, 118941. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118941>
- Anastasiadis, A. G., Kondylis, G. P., Polyzakis, A., & Vokas, G. (2019). Effects of Increased Electric Vehicles into a Distribution Network. *Energy Procedia*, 157, 586-593. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.223>

- Delivery, 2, ۱۳۵۳-۱۳۴۴, (۳)^۹
doi:10.1109/TPWRD.2013.2292951
- Lou, Y. L., Wu, C. X., Shi, Z. Z., & Yang, R. (2022). Evaluation of EV penetration level limit in distribution system applying charging and scheduling strategies. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 32, ۱۰۰۹۲۲, doi:https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100922
- Maeng, J., Min, D., & Kang, Y. (2023). Intelligent charging and discharging of electric vehicles in a vehicle-to-grid system using a reinforcement learning-based approach. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 36, 101224. doi:https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101224
- Majid, M. A., J, C. R. K., & Ahmed, A. (2024). Advances in electric vehicles for a self-reliant energy ecosystem and powering a sustainable future in India. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 10, 100753. doi:https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100753
- Masoum, A. S., Deilami, S., Abu-Siada, A., & Masoum, M. A. S. (2015). Fuzzy Approach for Online Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grid. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(3), 1112-1121. doi:10.1109/TSTE.2014.2327640
- Mhaisen, N., Fetais, N., & Massoud, A. (2020, 2-5 Feb. 2020). *Real-Time Scheduling for Electric Vehicles Charging/Discharging Using Reinforcement Learning*. Paper presented at the 2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIoT).
- Obeidat, M. A., Almutairi, A., Alyami, S., Dahoud, R., Mansour, A. M., Aldaoudeyeh, A.-M., & Hrayshat, E. S. (2021). Effect of Electric Vehicles Charging Loads on Realistic Residential Distribution System in Aqaba-Jordan. *World Electric Vehicle Journal*, 12(4), 218. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2032-6653/12/4/218>
- Ortega-Vazquez, M. A. (2014). Optimal scheduling of electric vehicle charging and vehicle-to-grid services at household level including battery degradation and price uncertainty. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(6), 1007-1016. doi:https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0624
- Partovi, M., Esmaeili, S., & Aein, M. (2022). (Y)Increasing the Penetration of Electric Vehicles in Distribution Networks Using Optimal Charging/Discharging Control and Reactive Power Support in the Presence of Nonlinear Loads. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2022, 3838113. doi:10.1155/2022/3838113
- Putrus, G. A., Suwanapingkarl, P., Johnston, D., Bentley, E. C., & Narayana, M. (2009, 7-10 Sept. 2009). *Impact of electric vehicles on power distribution*
- Azad-Farsani, E., Abedini, S., & Sardou, I. G. (2021). Optimal coordination of plug-in hybrid electric vehicles: A stochastic market-based approach. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128990. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128990
- Baharin, N., & Abdullah, T. A. R. T. (2013). Challenges of PHEV Penetration to the Residential Network in Malaysia. *Procedia Technology*, 11, 359-370. doi:https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.203
- Bharat, M., Dash, R., Reddy, K. J., Murty, A. S. R., C, D., & Muyeen, S. M. (2024). Secure and efficient prediction of electric vehicle charging demand using α 2-LSTM and AES-128 cryptography. *Energy and AI*, 16, 100307. doi:https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100307
- Dorokhova, M., Martinson, Y., Ballif, C., & Wyrsh, N. (2021). Deep reinforcement learning control of electric vehicle charging in the presence of photovoltaic generation. *Applied Energy*, 30, 117504. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117504
- Dulău, L. I., & Bică, D. (2020). Effects of Electric Vehicles on Power Networks. *Procedia Manufacturing*, 46, 370-377. doi:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.054
- ESLAMI, R., NAFISI, H & .HOSSEINI, A. (2019). Presenting a new method for charging and discharging PHEVs for improving in electrical parameters of the network. *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, 8(1), 41-52. Retrieved from <http://ieijqp.ir/article-1-6-۰۴fa.html>
- Hadian, E., Akbari, H., Farzinfar, M., & Saeed, S. A. (2021). Optimal Charging/Discharging Control of Electric Vehicle Charging Station Considering Grid Resiliency. *International Journal of Industrial Electronics Control and Optimization*, 4, ۴۶۴-۴۵۳, (۴) doi:10.22111/ieco.2021.37211.1335
- Hosseini, S. A., Sadeghi, S. H. H., & Nasiri, A. (2023, 29 Aug.-1 Sept. 2023). *Penetration Evaluation of Residential EV Chargers Considering Grid Parameters and Constraints*. Paper presented at the 2023 12th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA).
- Hung, D. Q., Dong, Z. Y., & Trinh, H. (2016). Determining the size of PHEV charging stations powered by commercial grid-integrated PV systems considering reactive power support. *Applied Energy*, 183, 160-169. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.168
- Kavousi-Fard, A., & Niknam, T. (2014). Optimal Distribution Feeder Reconfiguration for Reliability Improvement Considering Uncertainty. *IEEE Transactions on Power*

- networks. Paper presented at the 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference.
- Ran, Y., Liao, H., Liang, H., Lu, L., & Zhong, J. (2024). Optimal Scheduling Strategies for EV Charging and Discharging in a Coupled Power-Transportation Network with V2G Scheduling and Dynamic Pricing. *Energies*, 17(23), 6167. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/23/6167>
- Ren, L., Yuan, M., & Jiao, X. (2023). Electric vehicle charging and discharging scheduling strategy based on dynamic electricity price. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123, 106320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106320>
- Roy, R. B., Alahakoon, S., Van Rensburg, P. J., & Arachchillage, S. J. (2024). Impact analysis of uncoordinated electric ferry charging on distribution network. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 10, 100783. doi:<https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100783>
- Saldarriaga-Zuluaga, S. D., López-Lezama, J. M., Zuluaga Ríos, C. D., & Villa Jaramillo, A. (2022). Effects of the Incorporation of Electric Vehicles on Protection Coordination in Microgrids. *World Electric Vehicle Journal*, 13(9), 163. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2032-6653/13/9/163>
- Tilly, N., Yigitcanlar, T., Degirmenci, K., & Paz, A. (2024). How sustainable is electric vehicle adoption? Insights from a PRISMA review. *Sustainable Cities and Society*, 117, 105950. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105950>
- Turan, M. T., & Gökalp, E. (2022). Integration Analysis of Electric Vehicle Charging Station Equipped with Solar Power Plant to Distribution Network and Protection System Design. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 17(2), 903-912. doi:10.1007/s42835-021-00927-x
- Wirasingha, S. G., Schofield, N., & Emadi, A. (2008, 3-5 Sept. 2008). *Plug-in hybrid electric vehicle developments in the US: Trends, barriers, and economic feasibility*. Paper presented at the Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE.
- Yao, L., Damiran, Z., & Lim, W. H. (2017). Optimal Charging and Discharging Scheduling for Electric Vehicles in a Parking Station with Photovoltaic System and Energy Storage System. *Energies*, 10(4), 550. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/4/550>