Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 48-62

Vol. 11/ No. 4/ Winter 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

Electric vehicles' classification for the participation of retailers in day-ahead energy and reserve markets taking into account different uncertainties simultaneously

Ramin Dehghani[1], Asghar Akbari Foroud[2]

1- Ph.D. student, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
,r_dehghani@semnan.ac.ir
2- Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, (Corresponding author) aakbari@semnan.ac.ir

Abstract:

Following the deregulation of the electricity grids, power systems have faced new challenges in terms of diversification of generation units and demand types, which requires a more comprehensive management framework. Therefore, several new players have been introduced to resolve the challenges between the generation and demand side among which retailers play a crucial role by creating a link between electricity market operators and consumers, seeking to maximize profits and reduce the costs of their customers. Electric vehicles (EVs) are, in the meanwhile, among the bilateral consumers that retailers can both provide energy for and see as energy sources for sales in Day-Ahead (DA) energy and reserve markets. Nevertheless, Retailers face several uncertainties regarding the physical characteristics of electric vehicles and the behavior of their owners, in addition to the uncertainties inherent in energy and reserve markets faced by any player. In order for the optimal participation of retailers in those markets and the supply of the needs of EVs, this paper presents a two-stage optimization framework. Vehicle clustering is also utilized to model all uncertainties simultaneously. According to the results obtained from the simulations performed in GAMS software, the applicability of the proposed method will be proved.

Key words:
Electric vehicle, retailer, Day-Ahead energy market, Day-Ahead reserve market, two-stage optimization, Electric vehicles' classification.

Submit date: 2022/03/04
Accepted date: 2022/05/31

Corresponding author Name: Asghar Akbari Foroud
Corresponding author address: Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۶۲-۴۸

Vol. 11 / No. 4/ Winter 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

دسته‌بندی خودروها به منظور مشارکت خرده‌فروش در بازارهای روزپیش انرژی و رزرو با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مختلف به صورت همزمان

نوع مطالعه: پژوهشی

رامین دهقانی[۱] ، دانشجوی دکتری، اصغر اکبری فرود[۲]، استاد
۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه سمنان- سمنان- ایران
r_dehghani@semnan.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه سمنان- سمنان- ایران
aakbari@semnan.ac.ir

چکیده: با ظهور شبکه‌های هوشمند، سیستم قدرت با چالش‌های جدیدی در رابطه با تغییرات ایجاد شده در زیرساخت‌ها، تنوع واحدهای تولیدی و انواع تقاضا مواجه شده است که نیازمند مدیریت بهتر در این خصوص خواهد بود. بدین منظور شرکت‌های واسطه‌ای ایجاد گردیدند تا با ایجاد ارتباط بین دو سمت تولید و تقاضا چالش‌های ایجاد شده را برطرف کنند. شرکت‌های خرده فروش یکی از این شرکت‌های عامل می‌باشند که به ایفای نقش بین بهره‌برداران بازار برق و بازیگران طرف تقاضا پرداخته و در صدد افزایش سود هستند. خودروهای الکتریکی (EVs) جزو مصرف-کنندگانی هستند که خرده‌فروشان علاوه بر تأمین انرژی مورد نیاز برای شارژ باتری آن‌ها، می‌توانند از آن‌ها به عنوان منابع تولید انرژی برای فروش در بازارهای روزپیش (DA) انرژی و رزرو استفاده نمایند. در این میان خرده‌فروش با عدم قطعیت‌های بسیاری در خصوص مشخصات فیزیکی خودروهای الکتریکی، رفتار مالکان آن‌ها و همچنین عدم قطعیت‌های مربوط به بازارهای انرژی و رزرو مواجه می‌باشند. به منظور مشارکت بهینه خرده‌فروش در بازارهای مذکور و همچنین تأمین نیازمندی‌های خودروهای الکتریکی، یک چارچوب بهینه‌سازی دو مرحله‌ای در این مقاله ارائه می‌گردد. همچنین از دسته‌بندی خودروها به منظور مدلسازی تمامی عدم قطعیت‌ها به صورت همزمان بهره گرفته می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار GAMS، کاربردی بودن روش پیشنهادی اثبات خواهد شد.

واژه های کلیدی: خودرو برقی، خرده‌فروش، بازار انرژی روز پیش، بازار رزرو روز پیش، بهینه سازی دو مرحله‌ای، دسته‌بندی خودروها.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۰/۱۲/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۱/۰۳/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر اصغر اکبری فرود

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه سمنان- سمنان- ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]

۱- مقدمه

از زمانی که مفهوم شبکه هوشمند وارد صحنه صنعت شده است، بسیاری از فناوری‌های مرتبط با سیستم قدرت و بخش‌های فرعی آن را توسعه و ترویج داده است تا از مزایای کامل آن‌ها استفاده کند (Bai et al., 2021). با این وجود، سیستم قدرت با چالش‌های جدید دیگری در رابطه با تغییرات ایجاد شده در زیرساخت‌ها، واحدهای تولیدی و انواع تقاضا مواجه است که به عنوان مثال، منابع انرژی پراکنده (DER) نیاز به مدیریت بهتر در برق دارند (Khojasteh, 2022).

اخیراً، خرده‌فروشان با توجه به توانایی‌هایشان برای کاهش این مشکلات و قدرت مدیریت بالا، به عنوان عامل میانی بین بهره‌برداران بازار و DERها، مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. در بازار انرژی، هدف اصلی خرده‌فروش، به حداکثر رساندن سود در عین برآورده ساختن نیازهای مصرف کننده است (Nasouri-Gilvaei and Baghramian, 2019). خرده‌فروش، به عنوان یکی از سهامداران عمده در بخش برق، ممکن است انرژی را از منابع مختلف برای برآورده کردن نیازهای مصرف‌کنندگان و تعیین قیمت قابل قبول جمع‌آوری کند (حاجی-آبادی و همکاران، ۱۳۹۹). با این حال، او ممکن است با عدم قطعیت ناشی از مشتریان یا محیط بازار برق به چالش کشیده شود (Nojavan et al., 2019). علاوه بر این، منابع اضافی عدم قطعیت نیز بر اساس منابع تولیدی که با آن‌ها سروکار دارد به موضوع بهینه‌سازی خرده‌فروش اضافه می‌شود که عملکرد پیش‌بینی‌شده را بیشتر پیچیده می‌کند (Liu et al., 2021). به خاطر داشته باشید که عملکرد خرده-فروش ممکن است همیشه به نفع او نبوده و او متحمل ضرر گردد. در نتیجه، در زمان حل مسئله تصمیم‌گیری، او باید سطح معینی از ریسک مرتبط با نتایج نهایی را در نظر بگیرد (Wang et al., 2021).

همانطور که قبلا گفته شد، خرده‌فروشان ممکن است با انواع DERها سر و کار داشته باشند. با در نظر گرفتن DERهایی که قبلا ذکر شد، خرده‌فروشان می‌توانند با تجمیع وسایل نقلیه الکتریکی (EVs) به عنوان یک انتخاب بالقوه به منظور تأمین نیاز مصرف-کنندگان خود و کسب سود در حال توسعه خود بهره ببرند (Zeynali et al., 2021; Pak et al., 2022). خودروهای برقی می‌توانند در فناوری‌های خودرو به شبکه و شبکه به خودرو، به عنوان منبع انرژی برای بازار انرژی از طریق تجمیع توسط یک خرده‌فروش مورد استفاده قرار گیرند (Chen and Chang, 2018; Zeynali et al., 2021). در (Chen and Chang, 2018)، EV ها در یک شبکه مبتنی بر ابر برای مدیریت نوسانات در شبکه قدرت استفاده شده‌اند. در حالی که پارکینگ خودروهای برقی به عنوان یک برنامه پاسخگویی به تقاضا توسط خرده‌فروشان در (Zeynali et al., 2021) برای تأمین بخشی از توان مورد نیاز مصرف‌کنندگان خود در نظر گرفته می‌شود. در (Norouzi et al., 2022; Sekizaki et al., 2016)، اثرات بارهای انعطاف‌پذیر بر قیمت برق خرده‌فروشان در حضور تجمیع‌کننده وسایل نقلیه الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. در (Norouzi et al., 2022;)، اثرات خودروهای برقی بر قیمت‌های خرده‌فروشی به‌عنوان منابع انعطاف‌پذیر تحلیل شده و به این نتیجه رسیدند که این منابع انعطاف‌پذیر می‌تواند منجر به سود بیشتر برای بهره‌برداران شبکه و صاحبان خودروهای برقی شود. یک رویکرد برنامه‌نویسی دو سطحی برای تجمیع وسایل نقلیه الکتریکی بر اساس مدل بازی Stackelberg در (Yang et al., 2017) بررسی شده است. در این تحقیق، نویسندگان به این نتیجه رسیده‌اند که خودروهای الکتریکی به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، می‌توانند در بازار خرده‌فروشی مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، آن‌ها چارچوبی را برای مشارکت تجمیع-کننده EV در بازار بلادرنگ در کنار معاملات روز آینده پیشنهاد کردند. همچنین یک روش مناقصه در (Khojasteh, and Jadid, 2018) برای به حداقل رساندن هزینه‌های مربوط به نوسانات قیمت مورد مطالعه قرار گرفت. اظهار در خصوص نحوه مشارکت در بازارهای روز آینده انرژی و رزرو از طریق پارکینگ‌های الکتریکی با استفاده از دستورالعمل دسترسی در (Norouzi et al., 2022) مورد بررسی قرار گرفت. نوسانات قیمت خرده‌فروشی به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و پتانسیل بالا برای پاسخگویی به نیازهای برق کوتاه مدت خرده‌فروشان توسط وسایل نقلیه الکتریکی کنترل می‌شود. عملکرد بهینه تجمیع-کننده وسایل نقلیه الکتریکی در بازارهای انرژی و ذخیره در (Shafie-Khah et al., 2015) بررسی شده است. این مطالعه با در نظر گرفتن دسته ای از نوسانات تعرفه‌ها در یک محیط رقابتی در حضور بازیگران بازار، درآمد تجمیع‌کننده EV را با استفاده از خودروهای برقی متصل به شبکه به حداکثر رساند. با توجه به تأثیرات بالای EV ها در دوره-های کوتاه‌مدت بازارهای برق، در (Kaur et al., 2019) یک ساز و کار کنترلی برای تجمیع‌کننده EV ها بر اساس ساز و کار کنترل سلسله مراتبی برای تنظیم فرکانس ثانویه (SFR) با استفاده از خودروهای برقی متصل به شبکه پیشنهاد شده است. در آن مقاله، مبادله بین نیازهای انرژی دوطرفه SFR و EV، مسائل تخریب باتری و ارسال بهینه سیگنال‌های تنظیمی در بین تجمیع‌کننده‌ها و ایستگاه‌های شارژ مورد بررسی قرار گرفته است. پارکینگ‌های ادغام‌شده با منابع تجدیدپذیر، مانند پارکینگ‌های EV در پشت بام، همچنین می‌توانند عملکرد انعطاف‌پذیر و قابل اعتمادی در بازارهای رزرو فرکانسی داشته باشند (Osório et al., 2021). با توجه به مشارکت خرده فروش در بازار رزرو، خودروها بایستی امکان آزادسازی سریع انرژی تخصیص یافته برای رزرو را داشته باشند. به همین منظور پارکینگ‌هایی که خرده فروش از آن برای مشارکت در بازار رزرو استفاده می‌کند، بایستی امکان فیدبک مستقیم از فرکانس شبکه و همچنین دشارژ سریع و خودکار باتری‌های خودروهایی که در هر ساعت برای رزرو

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]

تخصیص داده می‌شوند را داشته باشد. در (Pavić et al., 2017)، یک روش واحد خدمات چندگانه با استفاده از مقادیر شارژ سریع و آهسته برای تولید برق بادی، نیروگاه‌های معمولی و EV با در نظر گرفتن منابع عدم قطعیت محدود نشان داده شده است. این تحقیق همچنین به دنبال دوره‌هایی است که انعطاف‌پذیری وسایل نقلیه الکتریکی برای بهره‌برداران سیستم قدرت مفید باشد. در (رشیدی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷) یک مدل دو سطحی برای مشارکت تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی در بازار روز آینده و تعادل با هدف بیشینه کردن سود خود و همچنین کمینه کردن هزینه مالکان خودرو ارائه شده است. در (تازیکه و همکاران، ۱۴۰۰) روشی جدید جهت برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ تجمیع‌کننده خصوصی خودروهای الکتریکی با هدف افزایش سود آن‌ها همزمان با هموار کردن منحنی بار شبکه پیشنهاد شده است. در حل مسئله مذکور با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک در یک شبکه ۳۳ شینه نمونه مشاهده شد که این روش کاهش تلفات و بهبود ولتاژ مشترکین را نیز به دنبال خواهد داشت. علاوه بر منابع انرژی معروف و سنتی (Pérez-Díaz et al., 2020)، برخی از منابع مهم در بازیابی فرکانس، ذخیره‌سازها، سایر حامل‌های انرژی و منابع تجدیدپذیر هستند که در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Angenendt et al., 2020).

مطالعات ذکر شده در بالا عدم قطعیت‌های مختلفی را در نظر گرفته‌اند. با این حال، باید توجه داشت که مجموعه عدم قطعیت یک خرده‌فروش در صورتی که DERهای تجمیع شده توسط آن شامل خودروهای برقی باشند، گسترده است. این وسایل نقلیه دارای پارامترهای مختلفی هستند، از جمله زمان رسیدن، در دسترس بودن، ظرفیت باتری و انرژی مورد نیاز برای شارژ، که همگی منابع جدیدی از عدم قطعیت را معرفی می‌کنند که مشکل موجود را پیچیده‌تر می کند. در نظر گرفتن همزمان تمامی این عدم قطعیت‌ها نیز بار محاسباتی را بسیار افزایش داده و حل مسئله بهینه‌سازی را تقریباً غیر ممکن می‌نماید.

نوآوری‌های اصلی این مقاله را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

❖ روش جدیدی برای دسته‌بندی خودروهای برقی در انواع محدود بر اساس ویژگی‌های باتری (مانند ظرفیت باتری، نرخ شارژ و دشارژ و غیره) و رفتارهای مالکان (در دسترس بودن در ایستگاه‌های پارکینگ، زمان ورود و خروج، وضعیت اولیه شارژ و غیره) ارائه می‌گردد. این خوشه‌بندی به دلیل اجتناب از محاسبات تکراری به کاهش بار محاسباتی کمک می‌کند.

❖ در مطالعات پیشین مشارکت خرده‌فروشان در بازار رزرو با بهره‌گیری از قابلیت‌های خودروهای الکتریکی بررسی نشده و تنها نقش سنتی خرده‌فروش در بازار برق فقط به تأمین انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان کوچک زیردست خود محدود شده است. بنابراین، در این مقاله خرده‌فروشان با استفاده از پتانسیل خودروهای برقی به طور همزمان در بازارهای انرژی و رزرو شرکت می‌کنند.

❖ یک مدل خطی دو مرحله‌ای مبتنی بر چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی برای در نظر گرفتن کل پارامترهای نامشخص با توجه به ترکیب پتانسیل EV ها توسط خرده‌فروش برای برنامه‌ریزی مشارکت خود در بازارهای مختلف برق مورد استفاده قرار گرفته است.

❖ با استفاده از چارچوب بهینه‌سازی پیشنهادی و استفاده از دسته‌بندی خودروها، تمامی عدم قطعیت‌های مربوط به میزان شارژ اولیه باتری خودروها، نوع و ظرفیت باتری‌ها، میزان شارژ نهایی مورد انتظار، زمان ورود و خروج خودروها به/از پارکینگ‌ها، نرخ شارژ و دشارژ باتری خودروها، راندمان باتری خودروها، وضعیت فراخوانی بازار رزرو و همچنین عدم قطعیت‌های مربوط به قیمت‌های بازار روزپیش انرژی و رزرو چرخان و تعداد خودروها در پارکینگ‌ها به صورت همزمان مدل شده است.

مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. در بخش دوم مدل احتمالاتی پیشنهادی و مفروضات به صورت فرایند بهینه‌سازی دو مرحله‌ای ارائه شده است. در بخش سوم فرمول‌بندی ریاضی مسئله به همراه تابع هدف و قیود مربوط به بازار انرژی و رزرو مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین در این بخش اطلاعات دسته‌بندی خودروها و اطلاعات مربوط به سناریوها ارائه می‌گردد. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی مدل احتمالاتی پیشنهادی در دو حالت با وجود یا عدم وجود قابلیت فروش در بازار انرژی و رزرو برای خرده‌فروش مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در بخش آخر نیز جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کل مقاله ارائه خواهد شد.

۲- مدل احتمالاتی پیشنهادی و مفروضات

هر خرده‌فروش با گردآوری و تجمیع چندین خودرو برقی، با مدیریت بهینه شارژ و دشارژ باتری‌های در دسترس به سودآوری خواهد پرداخت. خرده‌فروش با ارائه برنامه‌ریزی بهینه و بکارگیری تعرفه‌های مناسب برای فروش انرژی به خودروها، سود خود را حداکثر کرده و نیازمندی‌های مالکان خودرو برقی با الگوی مصرف متفاوت را پوشش خواهد داد. در این مقاله هدف اصلی تعیین استراتژی بهینه خرده‌فروش جهت مشارکت در بازارهای برق با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های قیمت برق در بازارهای انرژی و رزرو، در دسترس‌پذیری خودروهای برقی و وضعیت فراخوانی از سوی بهره‌بردار سیستم جهت تحویل ظرفیت رزرو شده می‌باشد.

در این مساله، افق زمانی مورد مطالعه شامل ۲۴ بازه یک ساعته خواهد بود. نهاد خرده‌فروش قادر به کنترل و مدیریت خودروهای برقی در سه وضعیت، شارژ، دشارژ و استراحت می‌باشد؛ به گونه‌ای که خودروهای در وضعیت استراحت، به شبکه متصل بوده ولی در حال شارژ و دشارژ نیستند. از طرفی نهاد خرده‌فروش بهترین استراتژی‌های شارژ و دشارژ خودروهای برقی دردسترس را برای بازارهای انرژی و رزرو ارائه می‌دهد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]

در این مقاله جهت مدل‌سازی و بررسی تاثیر عدم قطعیت‌های مربوط به قیمت‌های خرید برق از بازار انرژی، قیمت‌های بازار رزرو، در دسترس‌پذیری انواع خودروهای برقی و همچنین فراخوانی جهت تحویل توان رزرو شده، چارچوبی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی مورد استفاده قرار گرفته است. بهره‌برداران در برنامه‌ریزی تصادفی با یک افق زمانی تصمیم‌گیری روبرو می‌باشند. در این افق زمانی تعدادی مرحله قابل تعریف خواهد بود؛ به طوری که هر مرحله بیانگر یک نقطه از زمانی است که تصمیمات اتخاذ می‌شود و یا قسمتی از عدم قطعیت‌های موجود برطرف خواهند شد. در برنامه‌ریزی دو مرحله‌ای مرحله اول به عنوان here and now و مرحله دوم به عنوان wait and see شناخته می‌شود. متغیرهای مرحله اول است که تصمیم‌گیری آن‌ها قبل از تحقق سناریوهای متغیرهای تصادفی انجام می‌گیرد و متغیرهای مرحله دوم که تصمیم‌گیری آن‌ها بعد از تحقق سناریوها انجام می‌پذیرد و به همین دلیل، به ازای هر سناریو مقدار مجزایی دارند. با توجه به نوع مسئله برنامه‌ریزی خرده‌فروش در بازارهای روز بعد انرژی و رزرو، فرایند بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای بسیار مناسب خواهد بود.

بدین منظور ابتدا لازم است بر اساس داده‌ها و اطلاعات موجود از سوابق بازارهای انرژی و رزرو و رفتار مالکان خودروهای برقی سناریوهایی پیش‌بینی شود. برای مدیریت بهتر مساله بهینه‌سازی، ابتدا با استفاده از اطلاعات و داده‌های مربوط به انواع خودروهای برقی، مشخصات فنی و الکتریکی آن‌ها و همچنین بر اساس رفتار مالکان خودروها و میزان دسترس‌پذیری خودروهای برقی برای حضور در پارکینگ‌های عمومی دسته‌بندی خواهد شد. در واقع خودروهای مربوطه با توجه ویژگی‌های ذکر شده به دسته‌های متفاوتی تقسیم‌بندی می‌شوند. خودروهای موجود در هر دسته به صورت یکسان مورد بهره‌برداری و کنترل خرده‌فروش قرار خواهند گرفت.

دسته‌بندی خودروها بر اساس ویژگی‌های فنی و مشخصات الکتریکی خودرو و همچنین الگوی مصرف و نحوه عملکرد مالکان آن انجام خواهد شد. خودروهایی با ویژگی‌های کاملا یکسان در یک دسته قرار خواهند گرفت. برای مثال در صورتی که دو خودرو با ویژگی‌های الکتریکی و فنی کاملا یکسان دارای زمان‌های ورود و خروج متفاوت با یکدیگر باشند نیز در دو دسته جداگانه قرار خواهند گرفت.

خرده‌فروش برای مدیریت بهتر منابع دردسترس و سودآوری بالاتر بایستی میزان دسترس‌پذیری هر دسته از خودروها در هر ساعت از دوره مورد مطالعه را به صورت مناسبی پیش‌بینی نماید. در واقع میزان مشارکت خودروهای برقی در هر ساعت و میزان دسترس‌پذیری هر دسته، با توجه به ویژگی‌های فنی و الکتریکی خودروها، قابلیت مشارکت خرده‌فروش مربوطه در هر دوره زمانی را تعیین می‌نماید.

در فرایند مدل‌سازی مساله، محدودیت تعداد دفعات شارژ و دشارژ خودروهای برقی، با توجه به عمر و فرسودگی باتری خودروها، برای تأمین انرژی و فراهم‌سازی رزرو مورد توجه قرار خواهد گرفت. همچنین فرض می‌شود هر خودرویی که وارد پارکینگ می‌شود، نیازمندی خود (رسیدن به سطح معینی از سطح شارژ) را تعیین می‌نماید. خرده‌فروش موظف می‌باشد انرژی مورد نیاز خودروهای برقی را با توجه به سطح شارژ درخواستی آن‌ها، نیازمندی‌های مربوطه و محدودیت‌های فنی خودروها تأمین نماید.

با توجه به ابعاد گسترده مسئله، در این مقاله فرض‌های زیر مدنظر خواهند بود:

- مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای برقی از دید نهاد خرده‌فروش انجام شده است. همچنین این نهاد دارای قرارداد تأمین انرژی با یک یا چندین پارکینگ خودرو برقی با ظرفیت مشخص می‌باشد.
- دوره مورد مطالعه ۲۴ ساعت است.
- در ساختار بازار، بازار روز بعد انرژی و رزرو در نظر گرفته شده‌اند.
- برای تأمین و مشارکت در بازار رزرو اولیه، خرده‌فروش از پارکینگ‌های با قابلیت شارژ و دشارژ سریع استفاده خواهد نمود.
- با توجه به ابعاد کوچک نهاد خرده‌فروش نسبت به سایر بازیگران بازار، پیشنهادهای عرضه و یا تقاضای آن، تأثیری بر قیمت‌های تسویه بازار نخواهد داشت.
- منابع عدم‌قطعیت در نظر گرفته شده شامل رفتار تصادفی صاحبان خودروها و قیمت برق در بازارهای انرژی و رزرو، وضعیت فراخوانی از سوی بهره‌بردار جهت تحویل توان رزرو شده خواهد بود.

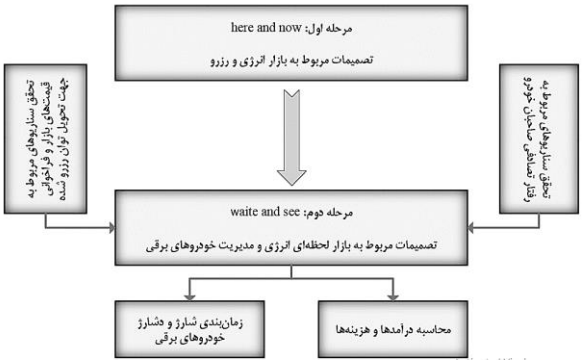
همانطور که در شکل (۱) ملاحظه می‌شود، فرایند بهینه‌سازی مساله به صورت دو مرحله‌ای انجام می‌شود. در مرحله اول، تصمیمات مربوط به متغیرهای بدون عدم قطعیت گرفته خواهند شد و در مرحله دوم بنا به تحقق هر یک از سناریوها، دیگر متغیرهای باقی‌مانده تعیین خواهد شد. به عبارت بهتر، مرحله اول در زمان تصمیم‌گیری برای تعیین مشارکت بهینه خرده‌فروش در بازارهای انرژی و رزرو خواهد بود و مرحله‌ی دوم بسته به تحقق هر یک از سناریوهای مربوطه در زمان بهره‌برداری انجام می‌شود و شامل قیود و محدودیت‌های مساله می‌باشد. همچنین خرده‌فروش مورد بررسی قادر به تبادل انرژی با شبکه و خرید و فروش انرژی با آن می‌باشد. به عبارت دیگر، در مدل پیشنهادی، خرده‌فروش می‌تواند از خودروهای برقی با قابلیت اتصال به شبکه برای مدیریت عدم قطعیت‌ها و سودآوری بیشتر استفاده نماید. الگوهای مختلف شارژ و دشارژ خودرهای برقی نیز در این مقاله در نظر گرفته شده است.

به دلیل توان‌مندی و کارآمدی بالای روش‌های خطی در حل مسائل بزرگ‌اندازه، مدل‌سازی و فرمولاسیون مدل پیشنهادی در قالب یک مساله بهینه‌سازی خطی عدد صحیح (MILP) پیاده‌سازی شده است. خروجی مساله بهینه‌سازی، میزان مشارکت خرده‌فروش در

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]

بازارهای انرژی و رزرو را تعیین می‌نماید، همچنین میزان شارژ و دشارژ باتری خودروهای برقی و مدیریت هوشمند آن‌ها در طول دوره برنامه‌ریزی به ازای سناریوهای مختلف و برای شرایط کاری گوناگون محاسبه خواهد شد.



شکل (۱): چارچوب مساله بهینه‌سازی

چارچوب ارائه شده در این مقاله یک مسئله بهینه‌سازی تخصیص رزرو در کنار برنامه‌ریزی تأمین انرژی بدون برنامه‌ریزی روزانه شبکه است. بدین صورت که در روش تخصیص رزرو، بر اساس پیشنهاد استفاده از رزرو، ظرفیت رزرو در صورت نیاز شبکه فراخوانی می‌شود. ذخایر تعیین شده در تخصیص رزرو در صورت وقوع رویداد فرکانسی به صورت بلادرنگ اجرا می‌شود. سپس با در نظر گرفتن وضعیت شبکه با توجه به برنامه‌های روزانه، برنامه‌های استفاده از رزرو تخصیص یافته تعیین می‌گردد.

۳- فرمول‌بندی ریاضی

در این بخش، مساله تعیین برنامه‌ریزی بهینه خرده‌فروش خودروهای برقی برای مشارکت در بازارهای انرژی و رزرو، در قالب یک مساله بهینه‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (MILP) فرمول‌بندی شده است. همچنین همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، از چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی جهت مدل‌سازی عدم قعطیت‌های مربوط به قیمت خرید برق از بازار انرژی، قیمت تأمین خدمات رزرو، فراخوانی برای تحویل آن و در دسترس‌پذیری انواع خودروهای برقی در طول دوره برنامه‌ریزی استفاده شده است.

۳-۱- تابع هدف

رابطه (۱) تابع هدف مساله مشارکت بهینه را از دید خرده‌فروش فرمول‌بندی نموده است. در این رابطه، جمله اول، درآمد انتظاری خرده‌فروش از تبادل توان و خرید و فروش انرژی در بازار روزبعد را نشان می‌دهد. جمله دوم و سوم نیز درآمد حاصل از مشارکت خرده‌فروش در بازار رزرو می‌باشد. در این مقاله فرض شده است که خرده‌فروش مذکور در صورت شرکت در بازار رزرو، بابت ظرفیتی که در اختیار بهره‌بردار قرار می‌دهد، مبلغی به عنوان پاداش (حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد کل درآمد حاصل از تحویل توان رزرو شده) دریافت می‌نماید که این مقدار در جمله دوم آورده شده است. جمله چهارم نیز درآمد خرده‌فروش از فروش انرژی الکتریکی به خودروهای برقی و تأمین نیازمندی‌های آن‌ها را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به اینکه شارژ و دشارژ باتری خودروهای برقی موجب کاهش طول عمر و استهلاک این ادوات خواهد شد، این موارد به صورت هزینه‌های استهلاک به صورت جمله پنجم در تابع هدف آورده شده است. همچنین در صورتی که خرده‌فروش مذکور به دلیل عدم پیش‌بینی صحیح از وضعیت و ظرفیت خودروهای در دسترس در روز بهره‌برداری، قادر به ایفای تعهدات خود نباشد، بایستی کمبود توان مورد نیاز را از بازار لحظه‌ای خریداری نماید. این مقادیر نیز در جمله ششم تابع هدف آورده شده است.

رابطه (۲) نیز نحوه مشارکت خرده‌فروش در بازار روزبعد و خرید و فروش انرژی از طریق شارژ و دشارژ باتری خودروهای در دسترس را برای هر ساعت از دوره بهره‌برداری نشان می‌دهد.

$$\max \quad obj = \sum_{\omega\in\Omega}\pi(\omega)\times\left[\sum_{t\in T}\left(\begin{array}{l}\lambda_e(t,\omega)\times P_e^{trade}(t)\\ +0.15\times\lambda_s(t,\omega)\times P_s^{trade}(t)+\lambda_s(t,\omega)\times P_s^{trade}(t)\\ +\sum_{v\in V}\left(\lambda^{sell}\times En^{req}(v,\omega)\right)\\ -\sum_{v\in V}\left(\lambda_{\deg}\times\left(P_e^{dis}(t,\omega,v)+P_s^{dis}(t,\omega,v)\right)\right)\\ -\lambda_{spot}(t,\omega)\times En^{dif}(t,\omega)\end{array}\right)\right] \quad (۱)$$

$$P_e^{trade}(t)=\sum_{v\in V}P_e^{dis}(t,\omega,v)\times DE(v)-\sum_{v\in V}P_e^{ch}(t,\omega,v)\times\frac{1}{CE(v)}+En^{dif}(t,\omega) \quad (۲)$$
$$,\forall t\in T,\ \forall\omega\in\Omega$$

۳-۲- قیود بازار انرژی و رزرو

روابط (۳) الی (۵) محدودیت‌های مربوط به میزان تبادل انرژی خرده‌فروش را به صورت خرید و یا فروش انرژی نشان می‌دهند. روابط (۴) و (۵) بیان می‌کنند که در هر یک از ساعات دوره مورد مطالعه، خرده‌فروش فقط قادر به فروش و یا خرید انرژی خواهد بود. در صورتی که متغیر باینری $u^{sell}(t)$ برابر یک باشد، خرده‌فروش در حالت فروش انرژی بوده و در صورت صفر بودن متغیر مذکور حالت خرید انرژی برای خرده‌فروش انتخاب می‌شود. همچنین این روابط توان قابل خرید یا فروش در هر ساعت را نیز با توجه به مقادیر حداکثر توان قابل تبادل محدود می‌نماید.

$$P_e^{trade}(t)=P_e^{sell}(t)+P_e^{buy}(t)\quad,\forall t\in T \quad (۳)$$

$$P_e^{sell}(t)\le u^{sell}(t)\times P^{trade,\max}\quad,\forall t\in T \quad (۴)$$

$$P_e^{buy}(t)\le\left(1-u^{sell}(t)\right)\times P^{trade,\max}\quad,\forall t\in T \quad (۵)$$

روابط (۶) الی (۱۰) نیز محدودیت‌های مربوط به فروش انرژی در بازار روزبعد و تأمین توان رزرو در سناریوها با توجه به وضعیت نیاز از سوی بهره‌بردار جهت تحویل توان مربوطه را نشان می‌دهد. رابطه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]

(۶) بیان می‌کند که در هر ساعت از دوره بهره‌برداری، مجموع میزان توان در نظر گرفته شده برای فروش انرژی در بازار روزبعد انرژی و رزرو چرخان بایستی کمتر از حداکثر توان قابل عرضه توسط خرده‌فروش در آن ساعت باشد. مقدار حداکثر توان قابل عرضه نیز مطابق رابطه (۷) بر مبنای بیشترین تعداد ممکن از خودروهای قابل دردسترس در ساعت مورد نظر در همه پارکینگ‌ها بدست می‌آید. رابطه (۸) نیز میزان توان فراهم شده برای تأمین نیازمندی رزرو که توسط بهره‌بردار در ساعت مورد نظر استفاده شده است و از طریق دشارژ انرژی ذخیره شده در باتری خودروهای برقی فراهم می‌شود را نشان می‌دهد. همچنین این رابطه بیان می‌نماید که خرده‌فروش برای دوره زمانی مشخص تنها در صورتی قادر به مشارکت در بازار رزرو می‌باشد که در حالت بهره‌برداری فروش انرژی باشد. در این رابطه برای مدل‌سازی عدم قطعیت مربوط به نیاز به رزرو چرخان از پارامتر $Call(t,\omega)$ استفاده شده است که در هر ساعت و هر سناریو، احتمال مربوطه را نشان می‌دهند. از طرفی با توجه به اینکه میزان ظرفیت در دسترس از خودروهای برقی دارای عدم قطعیت بوده و از آنجا که تأمین رزرو تعهد شده الزامی می‌باشد، رابطه (۹) حداکثر رزرو قابل تأمین توسط خرده‌فروش را با توجه به کمترین تعداد ممکن از خودروهای برقی در دسترس در آن ساعت در همه پارکینگ‌ها، محدود می‌نماید. به عبارت بهتر، خرده‌فروش به مقداری می‌تواند در بازار رزرو شرکت نماید که قطعاً قادر به تأمین آن باشد. مقدار حداقل توان قابل عرضه نیز مطابق رابطه (۱۰) بر مبنای کمترین تعداد ممکن از خودروهای قابل دردسترس در ساعت مورد نظر در همه پارکینگ‌ها بدست می‌آید.

$$P_e^{sell}(t)+P_s^{trade}(t)\le u^{sell}(t)\times P^{cap,\max}(t)\quad ,\forall t\in T \qquad (۶)$$

$$P^{cap,\max}(t)=\sum_{v\in V} nMax(v,t)\times DR(v)\times DE(v) \qquad (۷)$$

$$Call(t,\omega)\times P_s^{trade}(t)=\sum_{v\in V} P_s^{dis}(v,t,\omega)\times DE(v) \quad ,\forall t\in T,\forall\omega\in\Omega \qquad (۸)$$

$$P_s^{trade}(t)\le u^{sell}(t)\times P^{cap,\min}(t)\quad ,\forall t\in T \qquad (۹)$$

$$P^{cap,\min}(t)=\sum_{v\in V} nMin(v,t)\times DR(v)\times DE(v) \qquad (۱۰)$$

روابط (۱۱) و (۱۲) نیز نحوه تأمین نیازمندی‌های انرژی مصرفی صاحبان خودروهای برقی تحت پوشش خرده‌فروش را نشان می‌دهند. با توجه به عدم قطعیت‌های مربوط به تعداد و نوع خودروهای دردسترس در دوره زمانی مورد مطالعه، انرژی مورد نیاز هر نوع از خودروها در هر سناریو، مطابق با رابطه (۱۱) با توجه به تعداد خودروهای در دسترس از آن نوع و شارژ اولیه در زمان ورود به پارکینگ و شارژ نهایی مورد نظر تعیین خواهد شد. رابطه (۱۴) نیز انرژی ذخیره شده در باتری خودروهای مورد نظر جهت تأمین نیازمندی مربوطه را مدل می‌نماید.

$$En^{req}(v,\omega)=n(v,\omega)\times\left[SOE^{final}(v)-SOE^{ini}(v)\right] \quad ,\forall v\in V,\forall\omega\in\Omega \qquad (۱۱)$$

$$En^{req}(v,\omega)=\sum_{t\in T}\begin{pmatrix}CE(v)\times P_e^{ch}(v,t,\omega)-P_e^{dis}(v,t,\omega)\\ -P_s^{dis}(v,t,\omega)\end{pmatrix} \quad ,\forall v\in V,\forall\omega\in\Omega \qquad (۱۲)$$

روابط (۱۳) و (۱۴) نیز مقدار توان برنامه‌ریزی شده برای شارژ و یا دشارژ خودروهای برقی از هر نوع، در هر ساعت و هر سناریو را مدل می‌نماید. رابطه (۱۳) بیان می‌کند که مجموع توان رزرو و دشارژ برنامه‌ریزی شده برای تحویل انرژی به بازار روزبعد بایستی کمتر از مقدار توان قابل دشارژ با توجه به تعداد خودروهای در دسترس و نرخ دشارژ باتری خودرو باشد. همچنین رابطه (۱۴) نیز مقدار توان برنامه-ریزی شده برای شارژ انرژی برای هر یک از انواع خودروها را با توجه به تعداد خودروهای دردسترس از آن نوع و نرخ شارژ مربوطه محدود می‌نماید. همچنین روابط مذکور وضعیت شارژ و یا دشارژ باتری‌ها را نیز نشان می‌دهد.

$$P_e^{dis}(v,t,\omega)+P_s^{dis}(v,t,\omega)\le n(v,\omega)\times DR(v)\times\left(1-u^{ch}(v,t,\omega)\right) \quad ,\forall t\in T,\forall v\in V,\forall\omega\in\Omega \qquad (۱۳)$$

$$P_e^{ch}(v,t,\omega)\le n(v,\omega)\times CR(v)\times u^{ch}(v,t,\omega) \quad ,\forall t\in T,\forall v\in V,\forall\omega\in\Omega \qquad (۱۴)$$

روابط (۱۵) الی (۲۰) نیز برای مدل‌سازی محدودیت‌های سطح شارژ خودروهای برقی در طول دوره مورد مطالعه استفاده می‌شود.

$$SOE^{all}(v,t,\omega)=SOE^{all}(v,t-1,\omega)+CE(v)\times P_e^{ch}(v,t,\omega)-P_e^{dis}(v,t,\omega)-P_s^{dis}(v,t,\omega) \quad \forall v\in V,\forall\omega\in\Omega,\forall t\in(T_a(v)\ \ T_d(v)) \qquad (۱۵)$$

$$SOE^{all}(v,t,\omega)=n(v,\omega)\times SOE^{ini}(v)+CE(v)\times P_e^{ch}(v,t,\omega)-P_e^{dis}(v,t,\omega)-P_s^{dis}(v,t,\omega) \quad \forall v\in V,\forall\omega\in\Omega,\forall t=T_a(v) \qquad (۱۶)$$

$$SOE^{all}(v,t,\omega)=n(v,\omega)\times SOE^{final}(v) \quad \forall v\in V,\forall\omega\in\Omega,\forall t=T_d(v) \qquad (۱۷)$$

$$SOE_{ev}^{all}(m,j,t,\omega)\ge n(v,\omega)\times SOE^{\min}(v) \quad ,\ \forall v\in V,\forall\omega\in\Omega,\forall t\in[T_a\ \ T_d] \qquad (۱۸)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]

$$SOE_{ev}^{all}(m,j,t,\omega) \le n(v,\omega) \times SOE^{\max}(v) \quad (۱۹)$$
$$, \quad \forall v \in V, \forall \omega \in \Omega, \forall t \in [T_a \quad T_d]$$

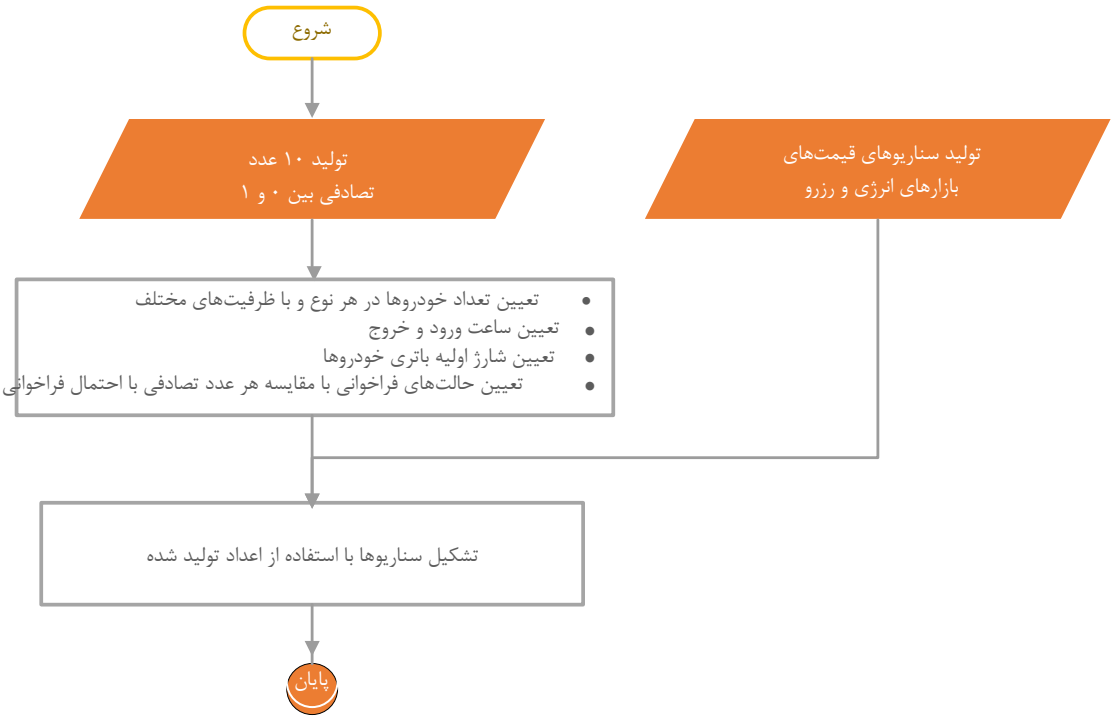
$$SOE^{all}(v,t,\omega) = P_e^{dis}(v,t,\omega)$$
$$= P_e^{ch}(v,t,\omega) = P_s^{dis}(v,t,\omega) = 0 \quad (۲۰)$$
$$, \quad \forall v \in V, \forall \omega \in \Omega, \forall t \notin [T_a(v) \quad T_d(v)]$$

رابطه (۱۵) نحوه تغییرات سطح شارژ خودرو برقی از هر نوع را در طول دوره برنامه‌ریزی با توجه به مقادیر شارژ و دشارژ صورت گرفته مدل می‌نماید. رابطه (۱۶) سطح شارژ خودرو برقی را در ابتدای ساعت اتصال به شبکه، به مقدار محدود می‌نماید. رابطه (۱۷) نیز سطح شارژ خودرو برقی را در انتهای ساعت آخر اتصال به شبکه، به مقدار $SOE_{ev}^{\max}$ محدود می‌نماید. روابط (۱۸) و (۱۹) نیز محدودیت‌های مربوط به حداکثر و حداقل سطح شارژ مجاز برای خودرو برقی را نشان می‌دهند. رابطه (۲۰) نیز بیان می‌نماید که در زمان‌هایی که خودرو برقی به شبکه متصل نیست، میزان مشارکت آن در بازارهای انرژی و رزرو برابر با صفر خواهد بود.

۳-۳- دسته‌بندی خودروها

در این مطالعه فرض می‌شود که خرده‌فروش چندین پارکینگ برای وسایل نقلیه الکتریکی دارد. خودروهای برقی امروزی تنوع زیادی با ظرفیت باتری‌های مختلف (از ۵ تا ۱۰۰ کیلووات ساعت) دارند و از استانداردهای شارژ مختلف پشتیبانی می‌کنند. خودروهای شخصی، به طور متوسط، تنها در حدود ۴ درصد از زمان‌ها در طول روز (به طور متوسط ۵۲ دقیقه) برای حمل و نقل استفاده می‌شوند و در ۹۶ درصد باقی‌مانده زمان در پارکینگ‌ها متوقف می‌باشند، که آن‌ها را به عنوان یک عملکرد ثانویه در دسترس قرار می‌دهد (Kiaee et al., 2015; National Household Travel Survey, 2009). طبق آن مطالعه، میانگین مسافت طی شده توسط این خودروهای برقی ۳۲ مایل بود که برای ۶۰ درصد وسایل نقلیه کمتر از ۵۰ مایل است. این بدان معناست که اکثر وسایل نقلیه هنگام اتصال به شبکه، سطح شارژ قابل قبولی برای عملکرد V2G خواهند داشت.

همانطور که قبلاً ذکر شد، برای جلوگیری از پیچیدگی مسئله به دلیل تعداد زیاد خودروها در پارکینگ‌ها و عدم قطعیت‌های مختلف، دسته‌بندی خودروهای برقی در انواع محدود بر اساس ویژگی‌های باتری و رفتار مالکان پیشنهاد شده است. در این مطالعه ۱۰ نوع مختلف برای خودروهای الکتریکی در نظر گرفته شده است. به دلیل نبود اطلاعات کافی از ورود و خروج خودروهای برقی به پارکینگ های مربوطه، از داده‌های تصادفی استفاده شده است. دسته‌بندی خودروهای برقی در انواع محدود بر اساس ویژگی‌های باتری (مانند ظرفیت باتری، نرخ شارژ یا دشارژ و غیره) و رفتارهای مالکان (در دسترس بودن در ایستگاه‌های پارکینگ، زمان ورود و خروج، وضعیت اولیه شارژ و غیره) بوده و در صورت مشابهت تمامی این ویژگی‌ها، خودروها در یک دسته قرار گرفته‌اند. پس از انجام دسته‌بندی خودروها، اطلاعات مربوط به مشخصات خودروهای برقی موجود در هر دسته مطابق جدول (ضمیمه-۱) می‌باشد.



شکل (۲): روندنمای نحوه تشکیل سناریو

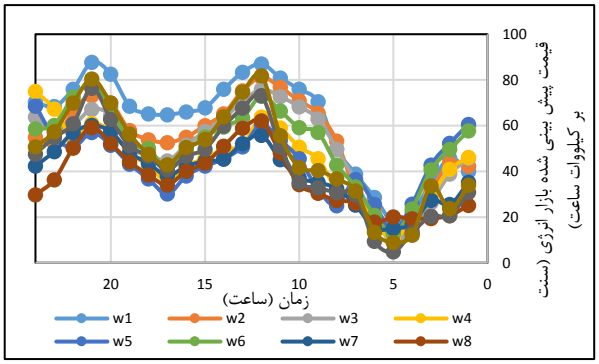
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]

۳-۴- اطلاعات مربوط به سناریوها

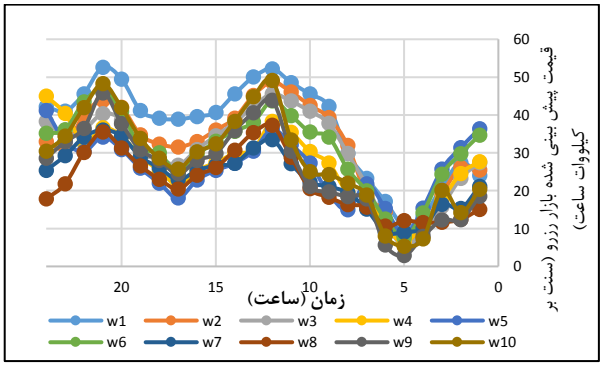
برای مدل‌سازی و بررسی تاثیر عدم قطعیت‌های مربوط به قیمت‌های بازار روزپیش، قیمت بازار رزرو، وضعیت فراخوانی برای تحویل توان رزرو و نوع و ظرفیت دردسترس از خودروهای برقی، برای هر ساعت از دوره مورد مطالعه، ۱۰ سناریو در نظر گرفته شده است. جواب بهینه یک مساله برنامه‌ریزی تصادفی در گرو تولید تعداد بسیار زیادی سناریو خواهد بود به گونه‌ای که تمام حالت‌های رخداد یک پارامتر دارای عدم قطعیت را در نظر بگیرد. ولی با توجه حجم بالای محاسبات در مسائل پیچیده و محدودیت زمانی در حل مساله، لزوم کاهش تعداد سناریوها و انتخاب سناریوهایی منتخب احساس می‌شود. از این رو، در این پژوهش از یک روش کاهش سناریو مبتنی بر فاصله برای انتخاب مجموعه کوچکتری از سناریو استفاده Kantorovich شده است. ظرفیت پارکینگ خودرو در این مطالعه ۱۰۰ عدد در نظر گرفته شده است. خودروهای الکتریکی در نظر گرفته شده از آمار فروش به دست آمده از بازار ایالات متحده انتخاب می‌شوند. جزئیات بیشتر در مورد داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی را می‌توان در (Khalkhali and Hosseinian, 2020) مشاهده کرد. با توجه به تعداد خودروهای در نظر گرفته شده و مشخصات آن‌ها و همچنین از طریق روش مذکور، تعداد بهینه سناریو در این مقاله، ۱۰ سناریو محاسبه شده است. مکانیزم چرخ رولت برای تولید سناریوهای مربوط به قیمت بازار انرژی و تعداد خودروهای برقی موجود از هر نوع استفاده بینی سازی خطای پیش‌شده است. تابع توزیع نرمال نیز برای مدل قیمت (Conejo et al., 2010). پارامترهای مربوطه استفاده می‌شود (www.nordpoolgroup.com/Market-data1#/nordic/table) های اولیه انرژی نیز از استخراج شده و به قیمت‌های بازار نورد پول مربوط می‌شود. فرض بر این است که به دلیل کوچک بودن خرده‌فروش، بر قیمت تسویه بازار تأثیری نخواهد داشت. داده‌های تاریخی مربوط به دوره محدودی از بازار مذکور برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت برق در بازارهای انرژی و رزرو فعلی پردازش می‌شود. سپس این داده‌ها به منظور تولید سناریوهای مربوطه با استفاده از مکانیزم چرخ رولت و با استفاده از نرم افزار MATLAB مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل (۲) روندنمای نحوه تشکیل سناریوها ارائه شده است. اطلاعات مربوط به مقادیر پیش‌بینی شده برای قیمت‌های بازار انرژی و رزرو (بر حسب سنت بر کیلووات ساعت) در شکل‌های (۳) و (۴) آورده شده است. اطلاعات مربوط به تعداد خودروهای برقی دردسترس از هر نوع در هر سناریو نیز مطابق شکل (۵) می‌باشد.

هزینه استهلاک باتری خودرو نیز در این شبیه‌سازی‌ها برابر صفر قرار داده شده است. بدین ترتیب خرده‌فروش خودرو برقی می‌تواند مشارکت انواع خودروهای برقی با نیازمندی‌های متفاوت شارژ را در فرایند حضور در بازارهای انرژی و رزرو مورد بررسی قرار دهد. از طرفی برای وضعیت فراخوانی ظرفیت اختصاص داده شده برای بازار رزرو، ۱۰ سناریو مطابق با جدول (ضمیمه-۲) در نظر گرفته شده است. عددهای صفر در این جدول به معنی عدم فراخوانی از سوی بهره‌بردار سیستم جهت تحویل توان رزرو شده و عدد یک به معنای ضرورت تحویل رزرو در سناریوی متناظر می‌باشد. همچنین احتمال وقوع هر یک از سناریوها مطابق جدول (ضمیمه-۳) است. پاداش در نظر گرفته شده برای مشارکت در بازار رزرو برای خرده‌فروش نیز برابر ۱۵ درصد میزان مشارکت می‌باشد. از طرفی قیمت‌های بازار لحظه‌ای نیز ۱/۱ برابر قیمت‌های بازار روزپیش در نظر گرفته شده است. همچنین قیمت فروش توان به خودرو نیز برابر ۴۰ سنت برای هر کیلووات ساعت می‌باشد.

فرآیند شبیه‌سازی مربوط به چارچوب بهینه‌سازی پیشنهادی، شامل به دست آوردن استراتژی‌های مختلف برای یک خرده‌فروش تحت شرایط مختلف است که ممکن است با پارامترهای دارای عدم قطعیت اتفاق بیفتد. مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MIP) مدل‌سازی شده است، که در بسته بهینه‌سازی GAMS تحت حل‌کننده CPLEX (Nourollahi et al., 2022) حل می‌شود. بنابراین با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک در GAMS می‌توان از بهینه‌سازی سراسری نتایج به‌دست‌آمده اطمینان حاصل کرد.



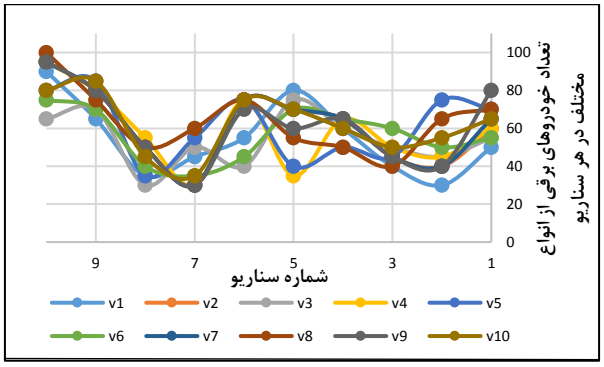
شکل (۳): سناریوهای مربوط به قیمت‌های بازار روزپیش



شکل (۴): سناریوهای مربوط به قیمت‌های پیش‌بینی شده برای بازار رزرو

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]



شکل (۵): تعداد خودروهای برقی از انواع مختلف در هر سناریو

۴- شبیه‌سازی و نتایج عددی

در این بخش چارچوب پیشنهادی به منظور تعیین مشارکت بهینه خرده‌فروش در بازارهای انرژی و رزرو مورد بررسی قرار گرفته است. مساله مورد نظر برای ۲۴ ساعت روز بعد حل شده است. جهت حل مساله بهینه‌سازی خطی MILP توسعه داده شده، از نرم‌افزار GAMS و بسته نرم‌افزاری Cplex استفاده شده است.

۴-۱- مطالعه موردی ۱

در حالت اول فرض می‌شود خرده‌فروش قابلیت فروش در بازار-های انرژی و رزرو را دارا می‌باشد. با بکارگیری چارچوب پیشنهادی، مقدار تابع هدف بدست آمده در کل دوره ۲۴ ساعته برابر ۳۱۹/۶۸ دلار می‌باشد. این مقدار، درآمد انتظاری کل خرده‌فروش را برای یک روز نشان می‌دهد. درآمد حاصل شده به دلیل مشارکت جهت فروش انرژی ذخیره شده در بازارهای روزپیش انرژی، رزرو و همچنین تأمین انرژی مورد نیاز خودروهای برقی می‌باشد.

۴-۲- مطالعه موردی ۲

در حالت دوم قابلیت فروش انرژی و مشارکت در بازار رزرو برای خرده‌فروش در نظر گرفته نمی‌شود. در این حالت سود انتظاری خرده‌فروش برابر ۱۰۷/۹- دلار خواهد بود. به عبارت بهتر بدون در نظر گرفتن قابلیت فروش توان به بازار انرژی و مشارکت در بازار رزرو، خرده‌فروش سودی حاصل نکرده و تنها متحمل پرداخت هزینه خواهد شد. دلیل این امر پایین بودن قیمت فروش انرژی به خودروهای برقی (۴۰ سنت به ازای هر کیلووات ساعت) نسبت به قیمت‌های خرید انرژی از بازار روزپیش می‌باشد.

جدول (۲) سود انتظاری حاصل را برای مقادیر متفاوت قیمت‌های فروش انرژی به خودروهای برقی برای دو حالت با قابلیت شرکت در بازارهای انرژی و رزرو (Case1) و بدون در نظر گرفتن این قابلیت (Case2) نشان می‌دهد. از نتایج مشخص است که تعیین قیمت بهینه برای ارائه خدمات به خودروهای برقی و تأمین نیازمندی‌های آن‌ها می‌تواند تاثیر بسزایی در سودآوری خرده‌فروش داشته باشد.

جدول (۲): سود انتظاری حاصل شده

قیمت (سنت بر کیلو وات ساعت)	حالت اول: سود (دلار)	حالت دوم: سود (دلار)
۴۰	۳۱۹/۶۸	-۱۰۷/۹
۳۹	۲۴۲/۴۲	-۱۸۵/۱
۳۸	۱۶۵/۱۶	-۲۶۲/۴
۳۷	۸۷/۹۰	-۳۳۹/۶
۳۶	۱۰/۶۴۵	-۴۱۶/۹
۳۵	-۶۶/۶۱۴	-۴۹۴/۲
۳۴	-۱۴۳/۹	-۵۷۱/۴

در ادامه به بررسی نتایج به دست آمده از مطالعه موردی حالت اول که در آن خرده‌فروش قابلیت فروش در بازارهای انرژی و رزرو را دارا می‌باشد، پرداخته می‌شود. شکل‌های (۶) و (۷) نیز به ترتیب وضعیت و میزان مشارکت خرده‌فروش مذکور را در بازارهای انرژی و رزرو در طول دوره بهره‌برداری روزانه نشان می‌دهد. در شکل (۶)، مقادیر مثبت نشان‌دهنده فروش انرژی ذخیره شده در باتری خودروهای برقی به شبکه بوده و مقادیر منفی میزان خرید از بازار جهت شارژ خودروهای برقی و تأمین نیازمندی‌های مربوطه است. البته با توجه به اینکه تنها رزرو چرخان افزایشی برای مشارکت خرده‌فروش در بازار رزرو در نظر گرفته شده است، به همین دلیل نیز مقادیر شکل (۷) تنها اعداد مثبت خواهند بود. به عبارت دیگر، در صورت فراخوانی بهره‌بردار سیستم برای تحویل توان، خرده‌فروش با تخلیه انرژی ذخیره شده در باتری خودروهای برقی به فراخوانی بهره‌بردار پاسخ خواهد داد. همچنین از بررسی نتایج بدست امده در شکل (۶) قابل استنباط است که خرده‌فروش در ساعاتی که قیمت برق در بازار انرژی مقدار پایین‌تری است، اقدام به خرید و ذخیره‌سازی نموده و در دوره‌هایی با قیمت بالاتر، با فروش انرژی ذخیره‌سازی شده به کسب سود پرداخته است.

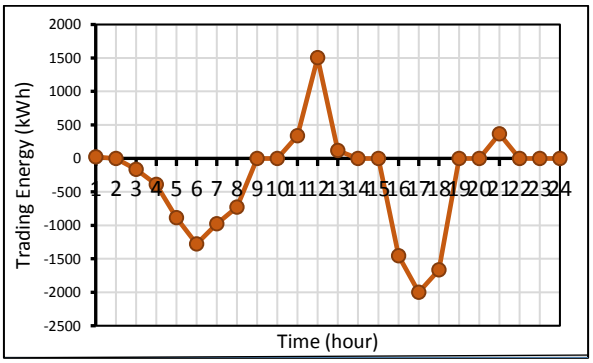
در جدول (۸) نیز سود انتظاری حاصل از مشارکت در بازارهای انرژی و رزرو، سود حاصل از فروش انرژی به خودروهای برقی و هزینه‌های انتظاری حاصل از عدم برنامه‌ریزی دقیق فروش انرژی به شبکه آورده شده است. مشاهده می‌شود عمده درآمد خرده‌فروش از فروش انرژی الکتریکی به خودروهای برقی حاصل می‌شود. مقدار منفی سود انتظاری حاصل از مشارکت در بازار انرژی نشان می‌دهد که خرده‌فروش مذکور عمدتاً به صورت خریدار در این بازار شرکت خواهد نمود.

همچنین در شکل (۸) وضعیت سطح شارژ باقی‌مانده در باتری خودروهای برقی از نوع یک (v1) تا نوع ده (v10) به ازای تمامی سناریوها در مدت زمان حضور در پارکینگ برای هر نوع خودرو نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مدل پیشنهادی به خوبی توانسته نیازمندی‌های شارژ لازم برای خودروهای برقی را پوشش داده و برای

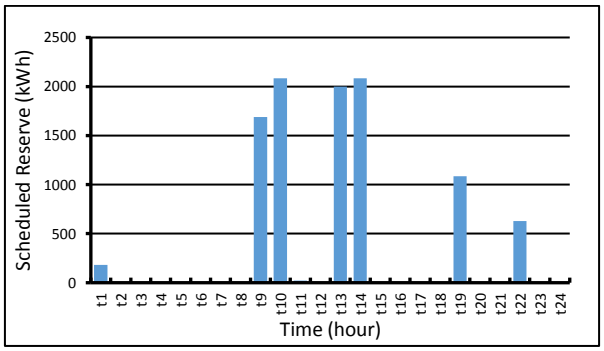
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]

هر نوع از خودروهای مورد بررسی در انتهای دوره زمانی مربوطه، سطح شارژ مورد نیاز تأمین شده است.



شکل (۶): خرید و فروش برنامه‌ریزی شده برای مشارکت خرده‌فروش در بازارانرژی



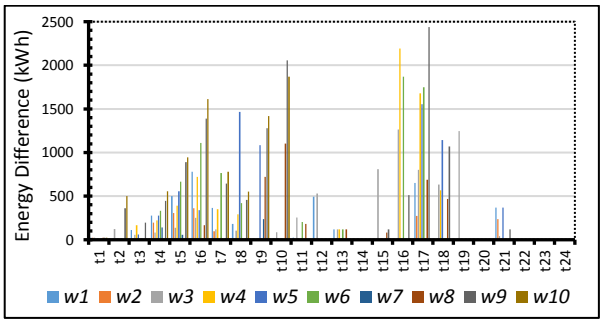
شکل (۷): نحوه مشارکت خرده‌فروش در بازار رزرو

جدول (۸): تفکیک سود انتظاری کل

کل سود انتظاری ($)	هزینه ناشی از عدم برنامه‌ریزی دقیق میزان فروش به شبکه ($)	سود انتظاری حاصل شده از فروش انرژی به خودروهای برقی ($)	سود انتظاری حاصل شده از مشارکت در بازار رزرو ($)	سود انتظاری حاصل شده از مشارکت در بازار انرژی ($)
۳۱۹/۶	۱۷۹۰/۱	۳۰۹۰/۴	۸۵۹/۲۹	- ۱۸۴۰

همچنین با توجه به اینکه، خرده‌فروش قابلیت فروش توان به بازار انرژی را نیز دارا می‌باشد، ممکن است در بعضی از سناریوها با توجه به عدم در اختیار داشتن ظرفیت کافی از خودروهای برقی، قادر به فروش و تحویل توان فروخته شده در زمان تعیین شده نباشد. در مدل‌سازی مساله فرض شده است در چنین مواقعی خرده‌فروش برای عمل به تعهدات فروش توان خود، کمبود توان مورد نیاز را از بازار لحظه‌ای (Spot Market) که قیمتی بالاتر از بازار روزپیش دارد، تهیه کرده و به بهره‌بردار سیستم تحویل می‌دهد.

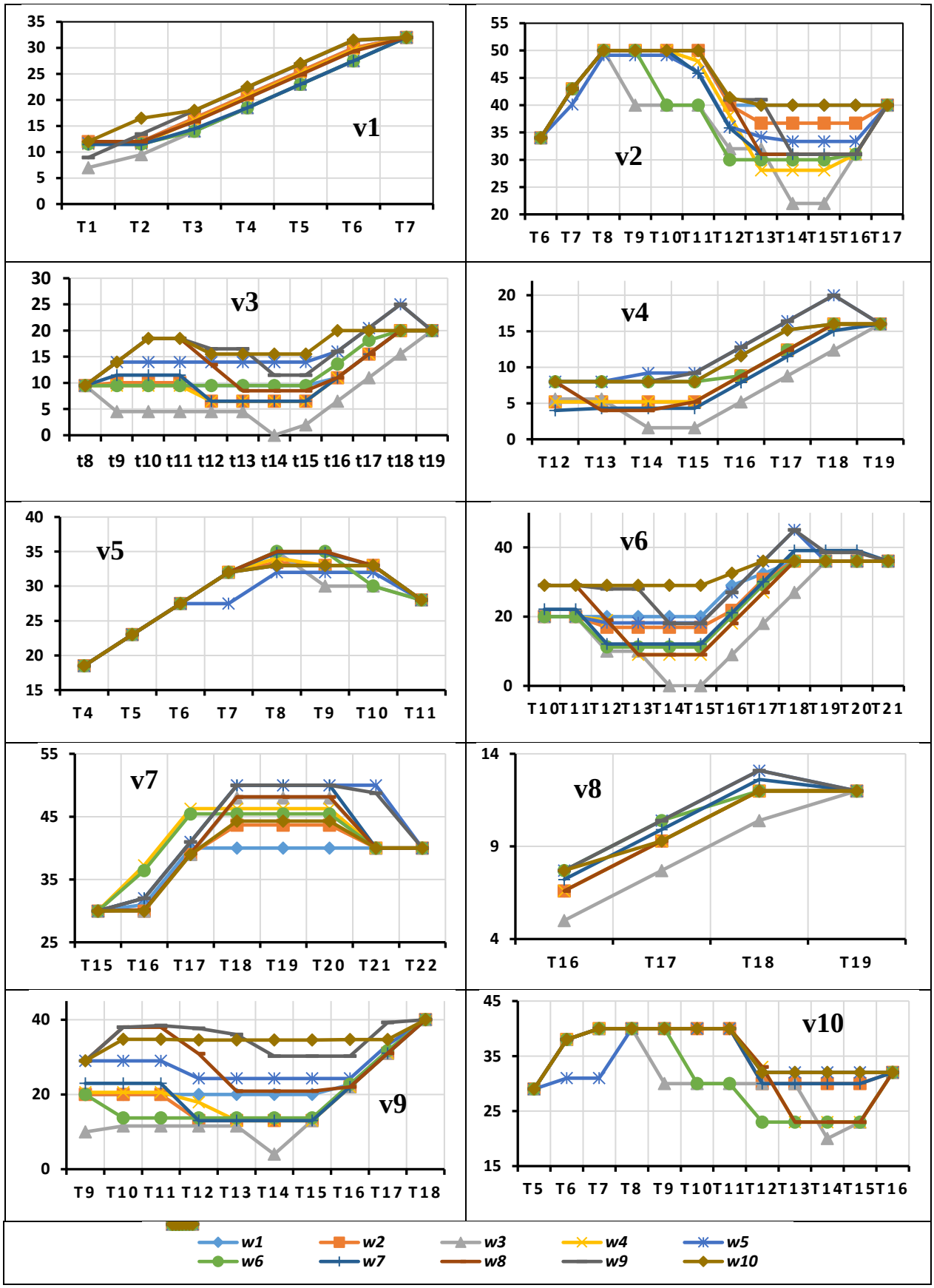
با توجه به بالاتر بودن قیمت‌های بازار لحظه‌ای نسبت به قیمت‌های بازار روزپیش، در صورت خرید از بازار لحظه‌ای، خرده‌فروش متحمل ضرر خواهد شد. در شکل (۹) میزان اختلاف توان فروخته شده به بازار روزپیش و انرژی حاصل از دشارژ خودروهای برقی را نشان می‌دهد. در واقع در این نمودار توان خریداری شده از بازار لحظه‌ای برای عمل به تعهدات فروش توان در بازار روزپیش برای هر دوره زمانی از روز مورد مطالعه و در هر سناریو را می‌توان مشاهده نمود.



شکل (۹): انرژی تأمین شده از بازار لحظه‌ای برای جبران کمبود فروش برنامه‌ریزی شده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]



شکل (۸): سطح شارژ باتری خودروهای از دسته یک تا ده در تمامی سناریوها و دوره اتصال (محور افقی: زمان، محور عمودی: (SOE (kWh)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]

با توجه به اینکه دسته‌بندی خودروها به منظور در نظر گرفتن عدم قطیت‌های مرتبط با مشخصات فیزیکی خودروها و رفتار مالکان آن‌ها بسیار مهم می‌باشد، بایستی روشی برای دسته‌بندی خودروها در صورت زیاد بودن تعداد آن‌ها در پارکینگ‌ها ارائه گردد. همچنین می‌توان روشی برای مشارکت خرده فروش در انواع بازار رزرو (اولیه و ثانویه) با توجه به نرخ شارژ پارکینگ‌ها (سریع و کند) ارائه داد. موارد فوق در مطالعات بعدی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله روش جدیدی را برای مدل‌سازی مشارکت خرده‌فروش با حضور خودروهای الکتریکی در در بازارهای انرژی و رزرو چرخان روز پیش ارائه می‌نماید. در این مطالعه، خرده‌فروش به عنوان فروشنده و خریدار در بازار انرژی و به عنوان فروشنده در بازار رزرو شرکت کرده و همچنین انرژی مورد نیاز برای شارژ خودروهای الکتریکی را تأمین می‌کند. بدین منظور نیاز بود خرده‌فروش تمامی عدم قطعیت‌های مربوط به میزان شارژ اولیه باتری خودروها، نوع و ظرفیت باتری‌ها، میزان شارژ نهایی مورد انتظار، زمان ورود و خروج خودروها به/از پارکینگ‌ها، نرخ شارژ و دشارژ باتری خودروها، راندمان باتری خودروها، وضعیت فراخوانی بازار رزرو و همچنین عدم قطعیت‌های مربوط به قیمت‌های بازار روزپیش انرژی و رزرو چرخان و تعداد خودروها در پارکینگ‌ها در نظر بگیرد. حال آنکه پیاده کردن تمامی این عدم قطعیت‌ها به طور همزمان بار محاسباتی مسئله را بسیار بالا برده و درنتیجه امکان رسیدن به پاسخ مطلوب و صحیح کاهش پیدا می‌کند. بنابراین در این مقاله از خوشه‌بندی خودروها به منظور قرار دادن خودروها با مشخصات فیزیکی خودروها و همچنان رفتار یکسان مالکان خودروها در یک دسته استفاده گردید. در ادامه با استفاده از نرم افزار گمز و از طریق یک مسئله بهینه‌سازی دو مرحله‌ای، مشارکت خودروها در دو حالت و با در نظر گرفتن امکان/ عدم امکان مشارکت خرده‌فروش به عنوان فروشنده در بازارهای روزپیش انرژی و رزرو چرخان مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که در صورتی که خرده-فروش قابلیت فروش در بازارهای روزپیش انرژی و رزرو را داشته باشد، حتی با فروش انرژی با قیمت پایین به خودروهای الکتریکی موجود در پارکینگ‌ها می‌تواند سود مناسبی را دریافت نماید.

ضمیمه

جدول (ضمیمه-۱): مشخصات خودروهای برقی در هردسته

	SOEmax (kWh)	SOEmin (kWh)	SOEfinal (kWh)	SOEini (kWh)	CR	DR	CE	DE	T_a	T_d
v1	۴۰	۰	۳۲	۱۲	۵	۵	۰/۹	۰/۹	۱:۰۰	۸:۰۰
v2	۵۰	۰	۴۰	۲۵	۱۰	۱۰	۰/۹	۰/۹	۶:۰۰	۱۸:۰۰
v3	۲۵	۰	۲۰	۵	۵	۵	۰/۹	۰/۹	۸:۰۰	۲۰:۰۰
v4	۲۰	۰	۱۶	۸	۴	۴	۰/۹	۰/۹	۱۲:۰۰	۲۰:۰۰
v5	۳۵	۰	۲۸	۱۴	۵	۵	۰/۹	۰/۹	۴:۰۰	۱۲:۰۰
v6	۴۵	۰	۳۶	۲۰	۱۰	۱۰	۰/۹	۰/۹	۱۰:۰۰	۲۲:۰۰
v7	۵۰	۰	۴۰	۳۰	۱۰	۱۰	۰/۹	۰/۹	۱۵:۰۰	۲۳:۰۰
v8	۱۵	۰	۱۲	۵	۳	۳	۰/۹	۰/۹	۱۶:۰۰	۲۰:۰۰
v9	۵۰	۰	۴۰	۲۰	۱۰	۱۰	۰/۹	۰/۹	۹:۰۰	۱۹:۰۰
v10	۴۰	۰	۳۲	۲۰	۱۰	۱۰	۰/۹	۰/۹	۵:۰۰	۱۷:۰۰

جدول (ضمیمه-۲): سناریوهای مربوط به وضعیت فراخوانی جهت تحویل توان رزرو شده

	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9	w10
t1	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
t2	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
t3	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰
t4	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰
t5	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
t6	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰
t7	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
t8	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
t9	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
t10	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
t11	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱
t12	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]

t13	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰
t14	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
t15	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰
t16	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱
t17	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
t18	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰
t19	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰
t20	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰
t21	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰
t22	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰
t23	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
t24	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰

جدول (ضمیمه-۳): احتمال وقوع سناریوها

	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9	w10
Probability	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۲۰	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۱

مراجع

Angenendt, G., Merten, M., Zurmühlen S. and Sauer, DU. “Evaluation of the effects of frequency restoration reserves market participation with photovoltaic battery energy storage systems and power-to-heat coupling.” Applied Energy, vol.260, 2020:114186.

Bai, Y., Chou, L. and Zhang, W., “Industrial innovation characteristics and spatial differentiation of smart grid technology in China based on patent mining,” J. Energy Storage, vol. 43, p. 103289, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103289.

Chen Y. and Chang, J. M. "Fair demand response with electric vehicles for the cloud based energy management service, "IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 1, pp. 458-468, Jan. 2018, doi:10.1109/TSG.2016.2609738.

Conejo, A. J., Carrión, M. and Morales, J. M. "Decision making under uncertainty in electricity markets" Springer, vol. 1, 2010.

Khojasteh, M. “Multi-objective energy procurement strategy of electricity retail companies based on normalized normal constraint methodology,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 135, p. 107281, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.IJEPES.2021.107281.

Khojasteh, M. and Jadid, S. "Reliability-constraint energy acquisition strategy for electricity retailers." International Journal of Electrical Power & Energy Systems.Vol. 101, pp. 223-233, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.03.032.

Khalkhali, H. and Hosseinian, SH. “Multi-stage stochastic framework for simultaneous energy management of slow and fast charge electric vehicles in a restructured smart parking lot.” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol.116, 2020:105540.

Kaur, K., Singh M. and Kumar, N. "Multi objective optimization for frequency support using electric vehicles: an aggregator-based Hierarchical control mechanism" IEEE Systems Journal, vol. 13, no. 1, pp.771-782, March 2019, doi:10.1109/JSYST.2017.2771948.

Kiaee, M., Cruden A. and Sarkh, S. "Estimation of cost savings from participation of electric vehicles in vehicle to grid (V2G) schemes," Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 3, pp. 249-258, 2015, doi: 10.1007/s40565-015-0130-2.

Nasouri-Gilvaei M. and Baghramian, A. “A two-stage stochastic framework for an electricity retailer considering demand response and uncertainties using a hybrid clustering technique,” Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, vol. 43, p. 541-558, 2019, doi: 10.1007/s40998-018-0150-9.

Liu, J., Chen, X., Xiang, Y., Huo, D. and Liu, J. “Optimal planning and investment benefit analysis of shared energy storage for electricity retailers,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 126, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106561.

Nojavan, S., Nourollahi, R., Pashaei-Didani, H. and Zare, K. "Uncertainty-based electricity procurement by retailer using robust optimization approach in the presence of demand response exchange." International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 105, pp. 237-248, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.08.041.

Norouzi, M., Aghaei, J., Pirouzi, S., Niknam, and T. Fotuhi-Firuzabad, M. “Flexibility pricing of integrated unit of electric spring and EVs parking in microgrids,” Energy, vol. 239, p. 122080, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY. 2021.122080.

Nourollahi, R., Tabar, VS., Zadeh, SG. And Akbari-Dibavar, A. “A hybrid optimization approach to analyze the risk-constrained operation of a residential hybrid energy system incorporating responsive loads.” Computers and Chemical Engineering, vol.157, 2022:107603.

Osório, GJ., Lotfi, M., Gough, M., Javadi, M. Espassandim, HMD., Shafie-khah, M. et al. “Modeling an electric vehicle parking lot with solar rooftop participating in the reserve market and in ancillary services provision.” Journal of Cleaner Production, vol.318, 2021:128503.

Pak, O., Galbreth, M. and Ferguson, M. “Retailer strategies to encourage reduced packaging adoption,” Journal of Cleaner Production, vol.354, 131318 2022.

Pavić, I., Capuder T. and Kuzle, I. "A Comprehensive Approach for Maximizing Flexibility Benefits of Electric Vehicles" IEEE Systems Journal, vol. 12, no. 3, pp.2882-2893, Sept. 2018, doi:10.1109/JSYST.2017.2730234.

Pérez-Díaz, JI., Guisández, I., Chazarra M. and Helseth, A. “Medium-term scheduling of a hydropower plant participating as a price-maker in the automatic frequency restoration reserve market.” Electric Power Systems Research, vol.185, 2020: 106399.

Shafie-Khah, M., Moghaddam, M. P., Sheikh-El-Eslami, M. K. and Catalão, J. P. S. "Optimised performance of plug-in electric vehicle aggregator in energy and reserve markets" Energy Conversion and Management. Vol. 97, pp. 393-408, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.03.074.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]

Sekizaki, S., Ichiro, N. and Tomohiro, H. "Impact of retailer and consumer behavior on voltage in distribution network under liberalization of electricity retail market, "Electrical Engineering in Japan, vol. 194, no. 4, pp. 27-41, 2016, doi:10.1002/eej.22743.

Wang, Z. H., Qi, L., Zhang, Y. and Liu, Z. "A trade-credit-based incentive mechanism for a risk-averse retailer with private information," Comput. Ind. Eng., vol. 154, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107101.

Yang, H., Zhang, S., Qiu, J., Qiu, D., Lai M. and Dong, Z. "CVaR- constrained optimal bidding of electric vehicle aggregators in day-ahead and real-time markets, "IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 13, no. 5, pp.2555-2565, Oct. 2017, doi: 10.1109/TII.2017.2662069.

Zeynali, S., Rostami, N., Ahmadian, A. and Elkamel, A. "Stochastic energy management of an electricity retailer with a novel plug-in electric vehicle-based demand response program and energy storage system: A linearized battery degradation cost model," Sustain. Cities Soc., vol. 74, p. 103154, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.SCS.2021.103154.

https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1#/nordic/table.

"National Household Travel Survey," 2009 [Online]. Available: http://nhts.ornl.gov.

تازیکه آ، ابراهیمی ر و ذکریازاده ع. "خودبرنامه‌ریزی تجمیع کننده خودروهای الکتریکی در بازار انرژی براساس طرح قیمت‌گذاری TOU ." نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران. ۱۴۰۰; ۱۰ (۴) :۳۸-۴۶.

حاجی‌آبادی م، قنبری ح و صمدی م. "بررسی تحلیلی و آماری اثر حضور جمع‌کننده خودروهای الکتریکی بر رفتار تصادفی LMP با کمک تجزیه ساختاری قیمت برق." نشریه علمی -پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران ۱۳۹۹ ;۹ (۴): ۱-۱۲.

رشیدی‌زاده ه، واحدی‌پور م و نجفی ح. "ارائه یک مدل دوسطحی برای برنامه‌ریزی تجمیع‌گر خودروهای الکتریکی در فضای رقابتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها." نشریه علمی -پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران ۱۳۹۷; ۷ (۱) :۶۸-۸۳.

فهرست علائم و اختصارات

Sets

t	دوره‌های زمانی
ω	شاخص زمانی
v	دسته‌های خودرو

Parameters

$E(v)$	سطح انرژی برای هر نوع EV [کیلووات ساعت]
$SOE^{\min}(v)$, $SOE^{\max}(v)$	حداقل و حداکثر انرژی مجاز برای هر نوع EV [کیلووات ساعت]
$SOE^{ini}(v), SOE^{final}(v)$	انرژی اولیه/نهایی برای هر نوع EV در زمان رسیدن/خروج [کیلووات ساعت]
$CR(v), DR(v)$	نرخ شارژ و دشارژ برای هر نوع EV [کیلووات]
$CE(v), DE(v)$	راندمان شارژ و دشارژ برای هر نوع EV (٪)
T_a , T_d	زمان ورود و خروج برای هر نوع EV (ساعت)
$nMin(v,t), nMax(v,t)$	حداقل و حداکثر تعداد خودروهای برقی در هر نوع و زمان
$\lambda_{\deg}(v)$	هزینه استهلاک خودروهای الکتریکی مختلف به ازای هر کیلووات ساعت تخلیه انرژی (دلار/کیلووات ساعت)
$\lambda^{sell}(t)$	قیمت فروش انرژی به دارندگان خودروهای برقی (دلار/کیلووات ساعت)
$\pi(\omega)$	احتمال وقوع سناریو ω
$\lambda_e(t,\omega)$	قیمت برق در بازار انرژی (دلار/کیلووات ساعت)
$\lambda_S(t,\omega)$	قیمت رزرو چرخان (دلار/کیلووات ساعت)
$\lambda_{spot}(t,\omega)$	قیمت انرژی در بازار لحظه‌ای (دلار/کیلووات ساعت)
$n(v,\omega)$	تعداد خودروهای برقی در هر سناریو و دسته
$Call(t,\omega)$	وضعیت فراخوانی برای تحویل در بازار رزرو [۰،۱]
$P^{trade,\max}$	حداکثر توان قابل مبادله با بازار انرژی (کیلووات)
$P^{cap,\max}(t)$	حداکثر ظرفیت برای شرکت در بازارهای روز پیش انرژی و رزرو (کیلووات)

Variables

$P_e^{trade}(t)$	میزان مشارکت در بازار انرژی [کیلووات]
$P_S^{trade}(t)$	میزان مشارکت در بازار رزرو [کیلووات]
$P_e^{sell}(t), P_e^{buy}(t)$	انرژی فروخته/خرید شده در بازار با دشارژ/شارژ انرژی [کیلووات]
$P_e^{ch}(v,t,\omega), P_e^{dis}(v,t,\omega)$	انرژی شارژ/دشارژ شده از/به خرید/فروش به بازار انرژی [کیلووات]
$P_S^{dis}(v,t,\omega)$	انرژی دشارژ شده جهت فروش به بازار رزرو [کیلووات]
$SOE^{all}(v,t,\omega)$	سطح انرژی باتری‌ها [کیلووات ساعت]
$En^{req}(v,\omega)$	انرژی مورد نیاز برای هر نوع EV برای برآوردن الزامات [کیلووات ساعت]
$En^{dif}(t,\omega)$	تفاوت بین انرژی تبادلی برنامه ریزی شده و انرژی تعیین شده در هر سناریو [کیلووات ساعت]

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]

$P_e^{sell}(t)$	انرژی فروخته شده در بازار انرژی
$P_e^{buy}(t)$	انرژی خریداری شده در بازار انرژی
Binary variables	
$u^{ch}(v,t,\omega)$	وضعیت شارژ انواع EV [۰,۱]
$u^{sell}(t)$	وضعیت فروش انرژی [۰,۱]

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-01-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.4.5.3]