Journal of Sustainable Energy Systems

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Research Paper

Optimal Operation of Smart Electric Vehicle Parking Lots Equipped with Renewable Energy Sources under Various Uncertainties

Amir Mirzapour-Kamanaj[1], Masoud Agabalaye-Rahvar[1], Amir Talebi[1], Kazem Zare[2*], Behnam Mohammadi-Ivatloo[2]

[1] PhD Student in Power Electrical Engineering, University of Tabriz, Faculty of Electrical and Computer Engineering
[2] Professor of Power Electrical Engineering, University of Tabriz, Faculty of Electrical and Computer Engineering

ARTICLE INFO

Article History:

Received 05 January, 2022
Revised 29 January, 2022
Accepted 28 February, 2022

Keywords:
Stochastic programming
smart electric vehicle parking lots
uncertainty
renewable energy sources

ABSTRACT

Introduction
By the extensive presence of electric vehicles (EVs) in today's communities, the smart management of EVs should be completely investigated. On the other hand, the integration of renewable energy sources (RESs) in the smart electric vehicles parking lot (SEVsPL) reduces the dependency on the upstream network and also the whole operation costs. So, under finite energy sources around the world, in order to supply various demands along with generating low greenhouse gas emissions (GHGEs), policymakers and different scholars seek to find cost-effective, eco-friendly, efficient, and sustainable solutions. With investigating the literature review in the field of management and optimal operation of SEVsPL can be obviously concluded that multiple approaches and strategies from different perspectives were used to improve the efficient usage of energy based on smart grids (SGs) framework in SEVsPL. It was indicated that none of the analyzed references, addressee the simultaneous effects of different uncertainties, i.e., the random behavior of EVs owners, RES, and the upstream network electricity price on the charging and discharging processes for the operation of SEVsPL. Certainly, applying the nature of such uncertainty sources in an appropriate path will have significant impacts on the bringing results as close as possible to the real-world solutions.

Model description and method of solution
Therefore, in the current paper, a stochastic scheduling methodology for the optimal operation of SEVsPL has been proposed as an interactive user interface between the respective operator and EVs owners to facilitate charging and discharging activities and operation costs. The total capacity of SEVsPL is 50 in which three various EVs' models with 10 scenarios for the arrival time, departure time, and initial state of energy (SoE) were considered. Furthermore, the other uncertainties oriented from RES and the upstream network electricity price have also taken into account with relative 10 scenarios. It is worth to mention that Mont Carlo simulation (MCS) implemented in MATLAB software to produce 1000 scenarios and then reduce them to 10 scenarios with the assistance of SCENRED algorithm in GAMS software. This stochastic optimization model of SEVsPL was formulated as mixed integer linear programming (MILP) problem, which was solved by CPLEX solver in GAMS software.

Simulation results and discussion
According to the obtained results in different scenarios, it was obviously seen that the lowest profit of SEVsPL was occurred in scenario 8, which can be considered as the worst case scenario, although, the highest profit has been achieved in scenario 9 and can be taken as the best case scenario. So, it can be mentioned that the optimal utilization of SEVsPL in the presence of RES

*Corresponding Author, Email: kazem.zare@tabrizu.ac.ir

uncertainty and the unpredictable behavior of EVs can be different. By considering the probabilities of the aforementioned uncertainties, the expected profit for SEVsPL was $ 1571.31. For the plotted figures of photovoltaic (PV) and wind turbine (WT) power plants in scenario 9, the generated WT power can be sold to the upstream network within the period in which EVs have not yet entered the SEVsPL and also for the PV generated power can be utilized to charge EVs. To realize the aim of the SEVsPL operator in maximizing his/her profit, the smart operating strategy was accomplished in purchased /sold power from /to the upstream network, which were indicated in relative figures for two worst case and best case scenarios. These outcomings highlighted that sold power has happened when electricity price is high (e.g., 10 o'clock in scenario 8 and 17 o'clock in scenario 9); however, the purchased power has taken place when electricity price is low (e.g., 10 o'clock in Scenario 9 and 12 o'clock in Scenario 8). This strategy is true for all EVs in all scenarios such that results to gain profit from electricity price arbitrage by the SEVsPL operator. If the EVs owners are looking for the maximum charge when leaving the SEVsPL, the respective operator will earn less profit according to different gamma coefficients presented in relevant expected SEVsPL profit's figure. In other words, the chance of discharging EVs will be less when attending SEVsPL.

Conclusions

The proposed stochastic optimal operation strategy of SEVsPL in this paper has been accomplished to flatten charging and discharging processes along with operation costs. In the presence of different considered uncertainties, the optimal operation strategy of SEVsPL can be diverse for different scenarios such that the highest and lowest profits were equal to $1740.84 and $1359.22, respectively. Although by considering the probability of all scenarios, the expected profit was equal to $ 1571.31. These various uncertainties affect the obtained profit of SEVsPL which the respective operator seeks to charge EVs at low price hours and discharge EVs at high price hours under the smart performance strategy.

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار
سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

مقالهٔ پژوهشی

بهره‌برداری بهینهٔ پارکینگ هوشمند خودروهای الکتریکی مجهز به منابع انرژی تجدیدپذیر تحت عدم قطعیت‌های مختلف

امیر میرزاپور کمانج[۱]، مسعود آقابالائی رهور[۱]، امیر طالبی[۱]، کاظم زارع[۲*]، بهنام محمدی ایواتلو[۲]

[۱] دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی برق قدرت، دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر
[۲] استاد مهندسی برق قدرت، دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر

اطلاعات مقاله

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۱۵
تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۱۱/۰۹
تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۱۲/۰۹

کلیدواژه:
برنامه‌ریزی تصادفی
پارکینگ هوشمند خودروهای الکتریکی
عدم قطعیت
منابع انرژی تجدیدپذیر

چکیده

با حضور گستردهٔ خودروهای الکتریکی در جوامع امروزی لازم است مدیریت هوشمند خودروهای الکتریکی مورد بررسی قرار بگیرد. از طرفی، ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در پارکینگ خودروهای هوشمند سبب کاهش وابستگی به شبکهٔ بالادستی و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. در همین زمینه، در مقالهٔ پیش رو بهره‌برداری بهینهٔ پارکینگ هوشمند خودروهای الکتریکی مجهز به منابع انرژی تجدیدپذیر مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. همچنین، به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر، قیمت برق شبکهٔ بالادستی و رفتار صاحبان خودروهای الکتریکی از روش برنامه‌ریزی تصادفی استفاده شده است. منظور از عدم قطعیت رفتار صاحبان خودروهای الکتریکی شامل زمان ورود خودرو به پارکینگ، زمان خروج از پارکینگ و انرژی اولیهٔ آن‌ها هنگام ورود به پارکینگ هستند که به صورت پارامتر دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شده‌اند. مسئلهٔ بهینه‌سازی یادشده به صورت یک مدل برنامه‌نویسی آمیخته با اعداد صحیح (MILP[1]) ارائه شده و توسط حل‌کنندهٔ CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد بهره‌بردار پارکینگ هوشمند با شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی می‌تواند سود کسب کند. همچنین، در حضور سناریوها و عدم قطعیت‌های مختلف، استراتژی عملکرد پارکینگ هوشمند متفاوت است، به طوری که بیشترین و کمترین سود کسب‌شده برابر با ۱۷۴۰/۸۴ و ۱۳۵۹/۲۲ دلار حاصل شد، ولی با در نظر گرفتن احتمال تمام سناریوها سود مورد انتظار برابر با ۱۵۷۱/۳۱ دلار حاصل شد. در نتیجهٔ عدم قطعیت‌های مختلف، سود حاصل از پارکینگ هوشمند را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

مقدمه

انگیزه و طرح موضوع پژوهش

در سالیان اخیر، با توجه به رشد روزافزون تقاضاهای مختلف انرژی و محدود بودن منابع تأمین آن از یک طرف و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHGEs[2]) از سوی دیگر، سیاست‌گذاران و محققان زیادی را در سراسر جهان برای یافتن راه‌حل‌های به‌صرفه، سازگار با محیط زیست، کارآمد و پایدار سوق داده است. از این‌رو، برای نیل به اهداف یادشده از منابع انرژی تجدیدپذیر (RES[3])

* نویسندهٔ مسئول
Email: kazem.zare@tabrizu.ac.ir

1. Mixed Integer Linear Programming
2. Greenhouse Gas Emissions
3. Renewable Energy Sources

به‌خصوص منابع انرژی بادی (WT[1]) و خورشیدی (PV[2]) به دلیل دسترس‌پذیری زیاد استفاده و وجود فناوری‌های پیشرفته در تولید برق مقیاس بزرگ رایگان با انتشار صفر آلودگی در مسائل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهره گرفته می‌شود [۱ و ۲]. در این منابع، سرعت باد و تشعشع خورشید وابسته به موقعیت جغرافیایی و شرایط آب‌وهوایی بوده که ماهیت تصادفی پیدا می‌کنند و درنتیجه، اهمیت و لزوم به‌کارگیری روش‌های مدیریت مناسب عدم قطعیت‌ها را مشخص می‌سازند [۳]. ظهور این منابع سبب فراهم شدن قابلیت انعطاف‌پذیری در سمت تقاضای انرژی در بهره‌برداری از شبکه‌های برق جدید می‌شود که به لطف مفهوم شبکه‌های هوشمند (SGs[3]) محقق می‌شود [۴]. علاوه بر آن، از جمله تجهیزات استفاده‌شده فراگیر در ساختار SGs، خودروهای الکتریکی (EVs[4]) است که به دلیل فراهم کردن کاهش GHGEs و استفادهٔ کارآمدتر از انرژی است. مطابق گزارش منتشرشده در [۵]، تعداد خودروهای الکتریکی در جهان حدود ۷/۲ میلیون بوده که پیش‌بینی می‌شود این تعداد به صورت بی‌وقفه افزایش خواهد یافت. با وجود مزایای ارزشمند به‌دست‌آمده از ادغام EVs در SGs، نگرانی‌های اجتناب‌ناپذیری برای بهره‌برداری ایمن به وجود می‌آید که طراحی یک چارچوب مدیریت انرژی پارکینگ هوشمند EVs (SEVsPL[5]) را برای شارژ EVs بیش از پیش تداعی می‌شود [۶].

مرور منابع علمی مرتبط با موضوع پژوهش

با توجه به اهمیت موضوع برنامه‌ریزی بهره‌برداری شارژ در SEVsPL، محققان بسیاری در سراسر جهان به دنبال ارائهٔ راهکارها و استراتژی‌های معقول و منحصربه‌فرد هستند. نویسندگان در [۷] استراتژی‌های بهینه‌ای برای حداکثرسازی سود مالک SEVsPL با پیشنهاد دادن مدل مبتنی بر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار (DRPs[6]) قیمت‌محور و تشویق‌محور و همچنین، لحاظ کردن عدم قطعیت‌های زمان ورود خودرو به پارکینگ و قیمت بازارهای برق ایجاد کرده‌اند. ارزیابی تخصیص SEVsPL در شبکهٔ توزیع [۸] به منظور حداقل‌سازی هزینه‌های سیستم با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکهٔ برق در قالب یک رویکرد تصادفی انجام گرفته است. مدل‌سازی تصادفی چندمرحله‌ای فرایند شارژ EVs در SEVsPL تحت عدم قطعیت تقاضاهای آینده در مکانیسم‌های برنامه‌ریزی شارژ و کنترل تطبیقی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های کل انرژی مورد انتظار در [۹] ارائه‌شده که از روش برنامه‌ریزی پویا دوگانهٔ تصادفی[7] در تطابق با شرایط شارژ وابسته به زمان استفاده شده است. سیستم مدیریت شارژ هوشمند زمان-واقعی[8] در SEVsPL یکپارچه شده با PV و سیستم ذخیره‌سازی انرژی (ESS[9]) با تابع هدف حداقل‌سازی هزینه در [۱۰] پیشنهاد شده، به طوری که الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی موسوم به گرگ خاکستری باینری توسعه‌یافته (IBGWO[10]) برای یافتن جواب بهینه به کار رفته است. در مسائل هاب‌های انرژی (EHs[11]) نیز که تأمین انواع متعدد از تقاضاهای انرژی توسط حامل‌های مختلف انرژی بعد از انجام فرایندهای تبدیل، تهویه و ذخیره‌سازی صورت می‌گیرد، بهره‌برداری بهینهٔ SEVsPL مورد توجه نویسندگان در سالیان اخیر قرار گرفته است. رویکرد توسعه‌یافته تصادفی جدید برای مشارکت واحدها در EH در مرجع [۱۱] که شامل SEVsPL، PV، پیل سوختی، چیلرها و سیستم‌های متنوع ذخیره‌ساز انرژی با اعمال ابزار شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS[12]) برای ارزیابی عدم قطعیت‌های مربوط به تقاضاهای مختلف انرژی، توان تولیدی PV و انرژی اولیه EVs هنگام ورود به پارکینگ معرفی شده است. برای EH مشخص‌شده در [۱۲]، رویکرد ترکیبی تصادفی- مقاوم به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مرتبط با توان تولیدی WT، تقاضاهای مختلف انرژی و قیمت بازار برق معرفی شده که انعطاف‌پذیری بیشتری را برای بهره‌بردار فراهم می‌آورد. همچنین، در سیستم‌های چندحاملهٔ انرژی برای اطمینان از شرایط بهره‌برداری مناسب، سیستم‌های ذخیره‌ساز چندگانهٔ انرژی (MESSs[13]) باید مورد ارزیابی صحیح و منطقی قرار بگیرند که نمونه‌ای از این تحلیل و بررسی در [۱۳] صورت

1. Wind Turbine
2. Photovoltaic
3. Smart Grids
4. Electric Vehicles
5. Smart Electric Vehicles Parking Lot
6. Demand Response Programs
7. Stochastic Dual Dynamic Programming
8. Real Time
9. Energy Storage System
10. Improved Binary Gray Wolf Optimizer
11. Energy Hubs
12. Monte Carlo Simulation
13. Multi-energy Storage Systems

گرفته و نقش مهمی در بازارهای چندگانهٔ انرژی می‌گذارد. در مرجع [۱۴] برای تعیین زمان دقیق فرایندهای شارژ و دشارژ با اولویت‌های اعلامی حداکثر هزینهٔ قابل قبول برای فرایند شارژ و حداقل سود مطلوب برای فرایند دشارژ EVs از طرف صاحبان، نوعی رویکرد نوآورانهٔ دومرحله‌ای برای مدیریت بهینهٔ انرژی SEVsPL توسط بهره‌بردار مشخص شده است. مقایسهٔ وضعیت شارژ طی روز برای SEVsPL در نزدیکی مکان‌های تجاری با وضعیت شارژ در SEVsPL واقع در ساختمان‌های مسکونی طی شب با هدف مشخص‌سازی میزان هزینهٔ انرژی در [۱۵] انجام شده که عدم قطعیت‌های زمان‌های ورود/ خروج EVs به/ از پارکینگ و همچنین، انرژی اولیهٔ آن‌ها هنگام ورود به پارکینگ با روش تصادفی توسط چارچوب برنامه‌ریزی پویا لحاظ شده‌اند. برای برآورده ساختن جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی SEVsPL مبتنی بر PV، چارچوب بهینه‌سازی دو هدفه در حضور DRP مبتنی بر زمان‌ـ استفاده[1] در [۱۶] بیان شده است که در حل چنین مسئله‌ای، الگوریتم‌های تصمیم‌گیری فازی و جمع وزن‌دار (WS[2]) به کار رفته‌اند. از آنجا که عدم قطعیت قیمت برق شبکهٔ بالادستی تأثیر چشمگیری روی عملکرد تجمیع‌کنندهٔ EVs (AGEVs[3]) در SGs دارد. بنابراین، مرجع [۱۷] روش بهینه‌سازی بازه‌ای[4] را پیشنهاد داده که تابع سود مبتنی بر عدم قطعیت AGEVs به مسئلهٔ بهینه‌سازی دو هدفهٔ قطعی تبدیل می‌شود که میانگین سود و انحراف سود به عنوان توابع هدف متناقض لحاظ می‌شوند. درخور یادآوری است روش اپسیلونـ محدود برای تولید جواب‌های بهینهٔ پارتو و از رویکرد تصمیم‌گیری فازی جهت انتخاب بهترین جواب مصالحه‌ای استفاده می‌شود. از جمله ابزارهای مهم در مدیریت سمت تقاضا در بهره‌برداری کارآمد از شبکه‌های توزیع و SEVsPLها، بارهای پاسخ‌گو (RLs[5]) و EVs هستند. از این‌رو، مرجع [۱۸] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای اهداف هزینه‌های بهره‌برداری، تلفات توان، شاخص پایداری ولتاژ و GHGEs با استفاده از ابزارهای مشخص‌شده در بازآرایی فیدر SEVsPL، پخش بار اقتصادی و نیز کلیدزنی خازن با لحاظ کردن EVs و RLs پیشنهاد داده است. همچنین، برای مدل‌سازی دقیق، ماهیت‌های تصادفی مربوط به RES، تقاضاهای الکتریکی و حرارتی و EVs در نظر گرفته شده‌اند.

نوآوری و اهداف پژوهش

با بررسی منابع متعدد انجام‌شده در زمینهٔ مدیریت و بهره‌برداری بهینه از SEVsPL می‌توان به این نتیجه رسید که رویکردها و استراتژی‌های گوناگونی از دیدگاه‌های مختلف به منظور بهبود استفادهٔ کارآمد از انرژی بر اساس چارچوب SGs در SEVsPL به کار گرفته شده‌اند. با این‌حال، در هیچ‌یک از این منابع تأثیرات همزمان عدم قطعیت‌های مختلف یعنی رفتار تصادفی صاحبان EVs، RES و قیمت برق شبکهٔ بالادستی روی فرایندهای شارژ و دشارژ در SEVsPL منظور نشده‌اند که بی‌شک اعمال ماهیت چنین منابع عدم قطعیت با روشی مناسب در بهره‌برداری بهینهٔ انرژی SEVsPL، تأثیرات قابل توجهی در نزدیک شدن هر چه بیشتر جواب‌های به‌دست‌آمده به جواب‌های دنیای واقعی خواهد داشت. در مقالهٔ حاضر، مدل برنامه‌نویسی آمیخته با اعداد صحیح (MILP[6]) برای بهره‌برداری بهینهٔ SEVsPL در حضور عدم قطعیت‌های متعدد یادشده با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی پیشنهاد شده است که تأثیر بهره‌برداری فرایندهای شارژ و دشارژ EVs در SEVsPL روی هزینه‌های بهره‌برداری و عدم وابستگی به شبکهٔ بالادستی مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری‌های مقاله به صورت خلاصه در زیر آورده شده‌اند:

- مدل‌سازی ماهیت تصادفی رفتار صاحبان EVs شامل زمان‌های ورود/ خروج EVs به/ از پارکینگ و همچنین، انرژی اولیهٔ آن‌ها هنگام ورود به پارکینگ علاوه بر توان تولیدی منابع PV و WT و قیمت برق شبکهٔ بالادستی
- ارائهٔ رویکرد بهره‌برداری بهینه از SEVsPL به صورت واسط کاربری تعاملی بین بهره‌بردار و صاحبان EVs در تسهیل فرایندهای شارژ و دشارژ و هزینه‌های بهره‌برداری

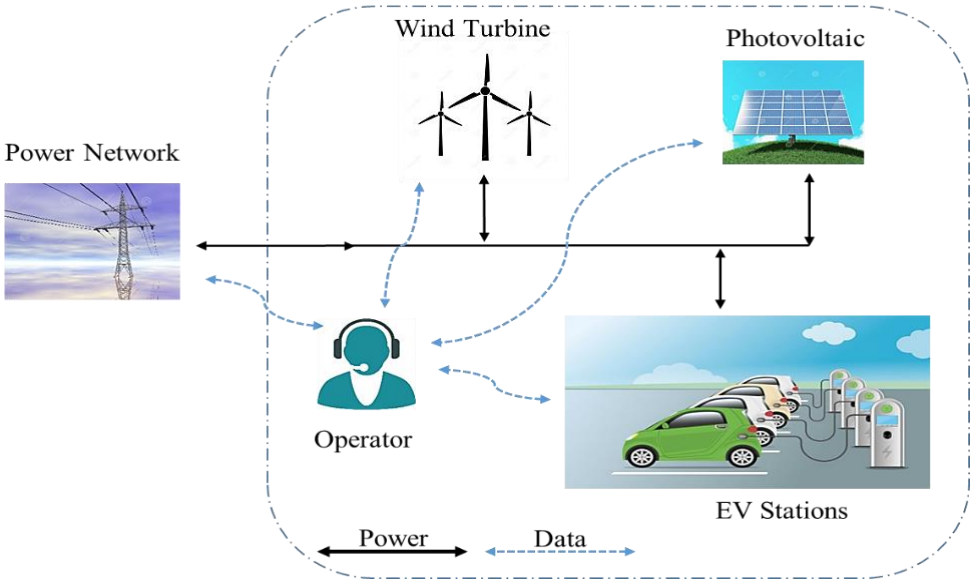
1. Time-of-use
2. Weighted Sum
3. Aggregator Electric Vehicles
4. Interval Optimization Approach
5. Responsive Loads
6. Mixed Integer Linear Programming

سازماندهی بخش‌های مختلف مقاله

باقی بخش‌های مقاله حاضر به این صورت تقسیم می‌شود که توصیف مسئلهٔ پیشنهادی لحاظ‌شده در بخش ۲ بوده و بخش ۳ به مدل‌سازی ریاضی بهره‌برداری بهینهٔ تصادفی SEVsPL می‌پردازد. داده‌های ورودی مسئله به همراه بررسی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در بخش ۴ ارائه شده‌اند. در نهایت، بخش ۵ به یافته‌های برجسته و پیشنهادهای صورت‌گرفته برای ادامهٔ مطالعات و کارهای تحقیقاتی در همین زمینه اختصاص می‌یابد.

توصیف مسئله

شکل ۱ ساختار SEVsPL مبتنی بر RES متصل به شبکهٔ بالادستی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این SEVsPL شامل RES (منابع PV و WT) و همچنین، EVs است. هدف بهره‌بردار SEVsPL یادشده، حداکثر کردن سود خود از طریق برنامه‌ریزی بهینهٔ تمام منابع در دسترس است. عدم قطعیت‌های موجود در توان تولیدی منابع PV و WT، قیمت برق و نیز رفتار صاحبان EVs از طریق برنامه‌ریزی تصادفی در مدل پیشنهادی لحاظ شده است. همچنین، امکان تبادل توان با شبکهٔ بالادستی برای بهره‌بردار SEVsPL فراهم شده تا از این طریق بتواند توان مازاد خود را به فروش برساند و یا در مواقعی که با کمبود توان مواجه است، توان مورد نیاز خود را از شبکهٔ بالادستی خریداری کند.



شکل ۱. ساختار SEVsPL مبتنی بر RES متصل به شبکهٔ پیشنهادی

فرمول‌بندی ساختار مسئله

تابع هدف مسئلهٔ مورد نظر، حداکثر کردن سود بهره‌بردار SEVsPL پیشنهادی از طریق افزایش فروش و کاهش خرید توان از شبکهٔ بالادستی است، که به صورت معادلهٔ ۱ بیان می‌شود.

$$Max \quad Profit = \sum_{t}^{T}\sum_{\omega}^{\Omega}(P_{t,\omega}^{Sell}\times\lambda_{t,\omega}^{Sell} - P_{t,\omega}^{Buy}\times\lambda_{t,\omega}^{Buy}) \qquad (۱)$$

در معادلهٔ بالا، $P_{t,\omega}^{sell}$ و $P_{t,\omega}^{buy}$ به‌ترتیب مقدار توان فروخته‌شده به شبکهٔ بالادستی و مقدار توان خریداری‌شده از شبکهٔ بالادستی در ساعت t و سناریوی ω است. $\lambda_{t,\omega}^{sell}$ و $\lambda_{t,\omega}^{buy}$ نیز به‌ترتیب قیمت برق فروخته‌شده و خریداری‌شده از شبکهٔ بالادستی است.

قید تعادل توان الکتریکی

معادلهٔ ۲ قید تعادل توان الکتریکی در SEVsPL مورد نظر را نشان می‌دهد. این قید باید در تمامی ساعت‌های روز و تمامی سناریوها برقرار باشد.

$$P_{t,\omega}^{PV} + P_{t,\omega}^{WT} + \sum_{v}^{V} P_{t,v,\omega}^{EV,dch} + P_{t,\omega}^{Buy} = \sum_{v}^{V} P_{t,v,\omega}^{EV,ch} + P_{t,\omega}^{Sell} \qquad \forall t,\omega \qquad (۲)$$

معادلهٔ بالا بیانگر آن است که توان تولیدی نیروگاه‌های

خورشیدی ($P_{t,\omega}^{PV}$)، بادی ($P_{t,\omega}^{WT}$)، توان خروجی EVs در حالت دشارژ ($P_{t,v,\omega}^{EV,dch}$) و همچنین، توان خریداری‌شده از شبکهٔ بالادستی برابر با توان دریافتی EVs در حالت شارژ ($P_{t,v,\omega}^{EV,ch}$) و توان فروخته‌شده به شبکهٔ بالادستی است.

قیود خودروهای الکتریکی

به منظور بهینه کردن رفتار EVs، انتخاب یک برنامه‌ریزی مناسب برای شارژ و دشارژ این خودروها ضروری است. معادلات ۳ـ ۱۰ قیود مربوط به EVs را به ازای هر خودرو و در هر سناریو نشان می‌دهد. معادلهٔ ۳ مقدار انرژی EVs را در مدت زمان بین ورود و خروج خودرو از پارکینگ مشخص می‌کند.

$$E_{t,v,\omega}^{EV} = E_{t-1,v,\omega}^{EV} + (P_{t,v,\omega}^{EV,ch}\eta_v^{EV,ch} - \frac{P_{t,v,\omega}^{EV,dch}}{\eta_v^{EV,dch}}) \quad (۳)$$
$$\forall t_v^{arrival} < t < t_v^{departure}, v, \omega$$

در این رابطه $E_{t,v,\omega}^{EV}$ بیانگر مقدار انرژی خودروی v در ساعت t و سناریوی ω است. $\eta_v^{EV,ch}$ و $\eta_v^{EV,dch}$ بازده شارژ و دشارژ خودرو و $t_v^{departure}$ و $t_v^{arrival}$ زمان ورود و خروج خودرو به پارکینگ است.

معادلهٔ ۴ نیز مشابه با معادلهٔ ۳ است و بیانگر انرژی خودرو در لحظهٔ ورود به پارکینگ است. معادلهٔ ۵ بیان‌کنندهٔ مقدار انرژی خودرو در لحظهٔ خروج از پارکینگ است که به صورت درصدی از حداکثر انرژی خودرو (γ_v^{EV}) در نظر گرفته شده است.

$$E_{t,v,\omega}^{EV} = E_{v,\omega}^{EV,arrival} + (P_{t,v,\omega}^{EV,ch}\eta_v^{EV,ch} - \frac{P_{t,v,\omega}^{EV,dch}}{\eta_v^{EV,dch}}) \quad (۴)$$
$$\forall t = t_v^{arrival}, v, \omega$$

$$E_{t,v,\omega}^{EV} \geq \gamma_v^{EV} E_v^{EV,Max}$$
$$\forall t = t_v^{departure}, v, \omega \quad (۵)$$

بر اساس رابطهٔ ۶، مقدار انرژی خودرو بین یک مقدار حداکثر و یک مقدار حداقل قرار دارد. $E_v^{EV,Max}$ و $E_v^{EV,Min}$ به‌ترتیب بیانگر مقادیر حداقل و حداکثر انرژی EVs است.

$$E_v^{EV,Min} \leq E_{t,v,\omega}^{EV} \leq E_v^{EV,Max}$$
$$\forall t_v^{arrival} < t < t_v^{departure}, v, \omega \quad (۶)$$

روابط ۷ و ۸ به‌ترتیب محدودیت‌های شارژ و دشارژ EVs را بیان می‌کنند. در این روابط $B_{t,v,\omega}^{EV,dch}$ و $B_{t,v,\omega}^{EV,ch}$ به‌ترتیب متغیرهای باینری حالت شارژ و دشارژ EVs است و همچنین، $P_v^{EV,ch,Max}$ و $P_v^{EV,dch,Max}$ به‌ترتیب حداکثر توان شارژ و دشارژ خودرو را بیان می‌کند.

$$0 \leq P_{t,v,\omega}^{EV,ch} \leq P_v^{EV,ch,Max} B_{t,v,\omega}^{EV,ch}$$
$$\forall t_v^{arrival} < t < t_v^{departure}, v, \omega \quad (۷)$$

$$0 \leq P_{t,v,\omega}^{EV,dch} \leq P_v^{EV,dch,Max} B_{t,v,\omega}^{EV,dch}$$
$$\forall t_v^{arrival} < t < t_v^{departure}, v, \omega \quad (۸)$$

معادلهٔ ۹ نشان می‌دهد EVs نمی‌تواند به طور هم‌زمان شارژ و دشارژ شود.

$$B_{t,v,\omega}^{EV,ch} + B_{t,v,\omega}^{EV,dch} \leq 1$$
$$\forall t_v^{arrival} < t < t_v^{departure}, v, \omega \quad (۹)$$

رابطهٔ ۱۰ تعداد دفعات شارژ و دشارژ مجاز هر خودرو را طی زمان ورود و خروج خودرو از پارکینگ نشان می‌دهد.

$$\sum_t^T \left(B_{t,v,\omega}^{EV,ch} + B_{t,v,\omega}^{EV,dch}\right) \leq N_v^{Max}$$
$$\forall t_v^{arrival} < t < t_v^{departure}, v, \omega \quad (۱۰)$$

قیود منابع انرژی تجدیدپذیر

توان تولیدی نیروگاه‌های خورشیدی ($P_{t,\omega}^{PV}$) در هر ساعت و هر سناریو از طریق معادلهٔ ۱۱ به دست می‌آید که به‌شدت تابش خورشید ($I_{t,\omega}$)، مساحت سلول‌های خورشیدی (A^{PV}) و بازده سلول‌های خورشیدی (η^{PV}) وابسته است.

$$P_{t,\omega}^{PV} = \eta^{PV} A^{PV} I_{t,\omega} \; ; \; \forall t, \omega \quad (۱۱)$$

توان تولیدی نیروگاه‌های بادی ($P_{t,\omega}^{WT}$) در هر ساعت و در هر سناریو از طریق منحنی سرعت-توان به دست می‌آید که در معادلهٔ ۱۲ نشان داده شده است. در این معادله V^{CI}، V^{CO}، V^{R}، $V_{t,\omega}^{Wind}$ و P_{rated}^{WT} به‌ترتیب بیانگر سرعت وصل، سرعت قطع، سرعت نامی، سرعت باد در ساعت t و سناریوی ω و توان نامی نیروگاه‌های بادی است.

$$P_{t,\omega}^{WT} = P_{Rated}^{WT} \times \begin{cases} 0 & ; V_{t,\omega}^{Wind} < V^{CI} \ \text{ or } \ V_{t,\omega}^{Wind} \geq V^{CO} \\ \dfrac{V_{t,\omega}^{Wind} - V^{CI}}{V^{R} - V^{CI}} & ; V^{CI} \leq V_{t,\omega}^{Wind} < V^{R} \\ 1 & ; V^{R} \leq V_{t,\omega}^{Wind} < V^{CO} \end{cases} \qquad \forall t, \omega \qquad (۱۲)$$

نتایج عددی و شبیه‌سازی

اطلاعات ورودی

همان طور که پیش‌تر اشاره شد، پارکینگ هوشمند مجهز به RES است که نیروگاه‌های PV و WT به عنوان RES در نظر گرفته شده‌اند. اطلاعات مربوط به WT در جدول ۱ ارائه شده است. مساحت نیروگاه‌های PV ۲۰۰ متر مربع و راندمان آن‌ها ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است. تشعشع خورشید و سرعت باد به صورت شکل ۲ ارائه شده‌اند. قیمت خرید برق از شبکهٔ بالادستی به صورت شکل ۳ در نظر گرفته شده و همچنین، قیمت فروش توان به شبکهٔ بالادستی ۱۰ درصد کمتر از قیمت خرید توان از شبکهٔ بالادستی لحاظ شده است. سه مدل EVs متفاوت منظور شده که اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی آن‌ها در جدول ۲ خلاصه شده است. ظرفیت SEVsPL ۵۰ خودرو است که شامل ۱۰ خودرو از مدل نوع ۱، ۲۰ خودرو از مدل نوع ۲ و ۲۰ خودرو از مدل نوع ۳ است. بازه حضور EVs در SEVsPL از ساعت ۶ صبح تا ۱۲ شب در نظر گرفته شده است. زمان ورود EVs به SEVsPL، زمان خروج EVs از SEVsPL و انرژی اولیهٔ آن‌ها هنگام ورود به SEVsPL به صورت پارامتر دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، عدم قطعیت ناشی از RES و قیمت برق نیز لحاظ شده‌اند که برای مدل‌سازی آن‌ها در مدل ارائه‌شده از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده شده است. در همین راستا، تعداد ۱۰۰۰ سناریو به روش MCS در نرم‌افزار MATLAB تولید شده است. به منظور کاهش بار محاسباتی، این تعداد سناریو به کمک الگوریتم کاهش سناریو (SCENRED) در نرم‌افزار GAMS به تعداد ۱۰ سناریو کاهش یافته است. احتمال هریک از سناریوها در جدول ۳ آورده شده است. مدل مسئله به صورت یک مسئلهٔ MILP بوده و تمام شبیه‌سازی‌های انجام‌یافته در نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی و توسط حل‌کنندهٔ CPLEX حل شده است.

جدول ۱. مشخصات فنی توربین بادی [۱۹]

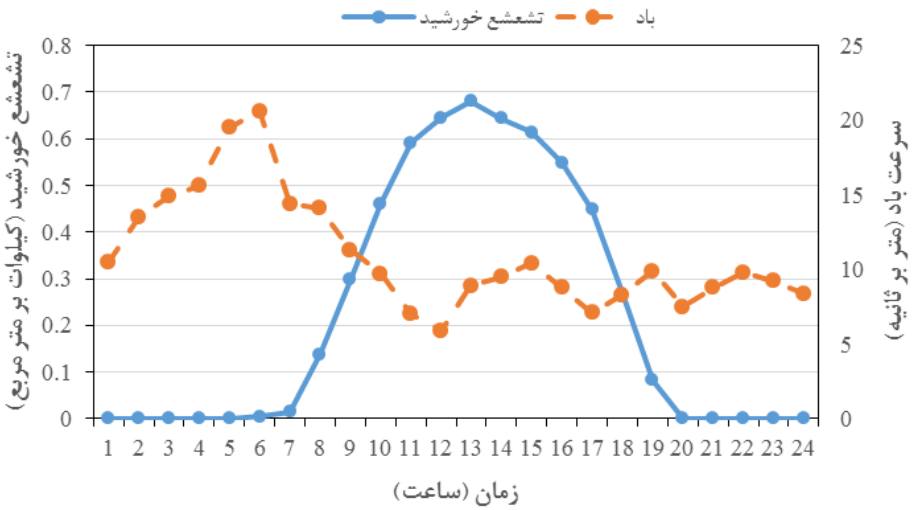
پارامتر	واحد	مقدار
P_r^{WT}	kw	۳۰۰
V_{ci}	m/s	۲
V_r	m/s	۱۴
V_{co}	m/s	۲۵

جدول ۲. مشخصات خودروهای الکتریکی [۲۰]

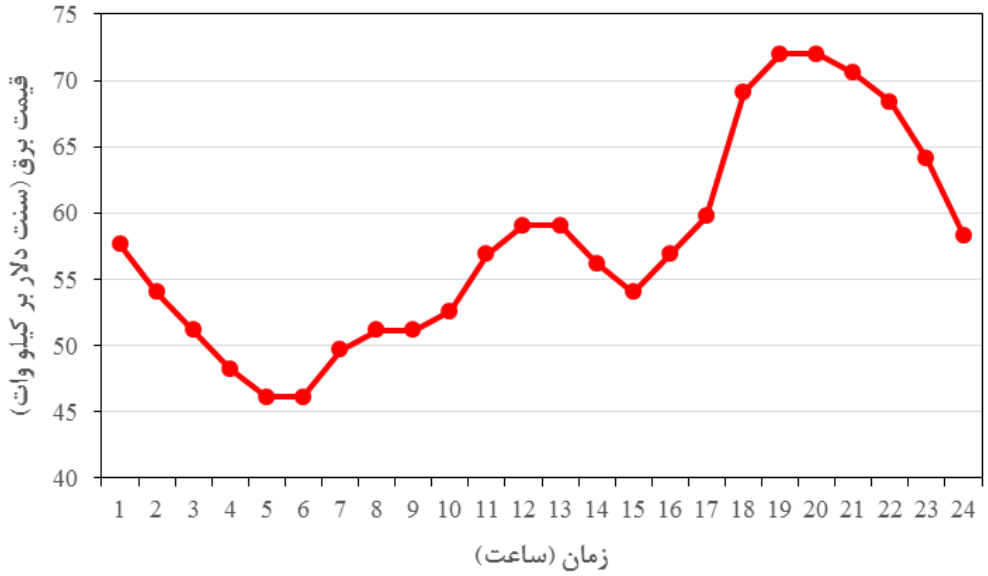
مدل	$E_v^{EV,Cap}$ (kWh)	$P_v^{EV,ch,Max}$ (kW)	$P_v^{EV,dch,Max}$ (kW)	$E_v^{EV,Min}$ (kWh)	$E_v^{EV,Max}$ (kWh)	$\eta_v^{EV,ch}$ (%)	$\eta_v^{EV,dch}$ (%)
مدل ۱	۱۰۰	۱۷/۲۰	۱۷/۲۰	۱۰	۹۰	۹۰	۹۵
مدل ۲	۴۱	۲۰	۲۰	۴	۳۷	۸۸	۹۰
مدل ۳	۲۵	۱۲/۵	۱۲/۵	۲/۵	۲۲/۵	۹۰	۹۳

جدول ۳. احتمال هر یک از سناریوها

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
احتمال سناریو	۰/۰۹۲	۰/۱۳۲	۰/۰۹۴	۰/۰۹	۰/۱۳۷	۰/۰۸	۰/۱۱۶	۰/۰۸۵	۰/۰۸۹	۰/۰۸



شکل ۲. تشعشع و سرعت باد [۱۹]



شکل ۳. قیمت برق [۲۱]

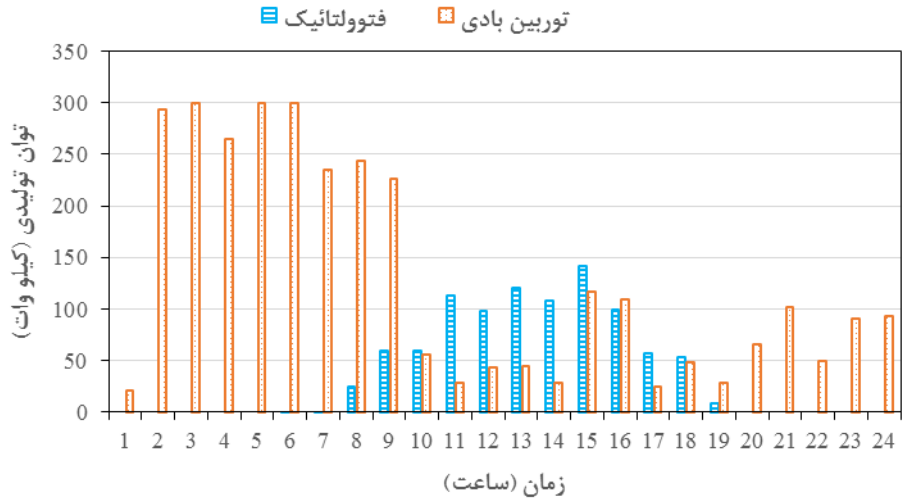
بررسی نتایج شبیه‌سازی

سود SEVsPL به ازای سناریوهای مختلف در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده دیده می‌شود بیشترین و کمترین سود برای بهره‌بردار SEVsPL به‌ترتیب در سناریوهای ۹ و ۸ حاصل شده است. با این‌حال، با در نظر گرفتن احتمال سناریوها، سود مورد انتظار برای SEVsPL برابر ۱۵۷۵/۳۱ دلار شده است. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که بهره‌برداری بهینهٔ SEVsPL در حضور عدم قطعیت RES و رفتار غیر قابل پیش‌بینی EVs می‌تواند متفاوت باشد.

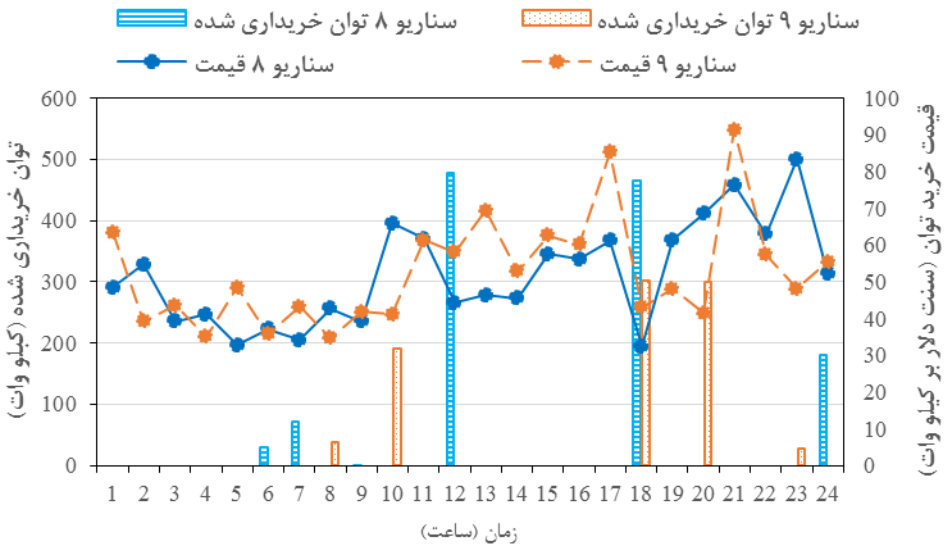
جدول ۴. سود پارکینگ به ازای سناریوهای مختلف

سناریو	سود
۱	۱۷۰۳/۹۵
۲	۱۳۸۹/۵۷
۳	۱۳۹۹/۰۵
۴	۱۴۳۰/۲۴
۵	۱۵۰۰/۰۵
۶	۱۶۲۹/۹۸
۷	۱۷۲۵/۹۴
۸	**۱۳۵۹/۲۲**
۹	**۱۷۴۰/۸۴**
۱۰	۱۶۴۷/۴۳

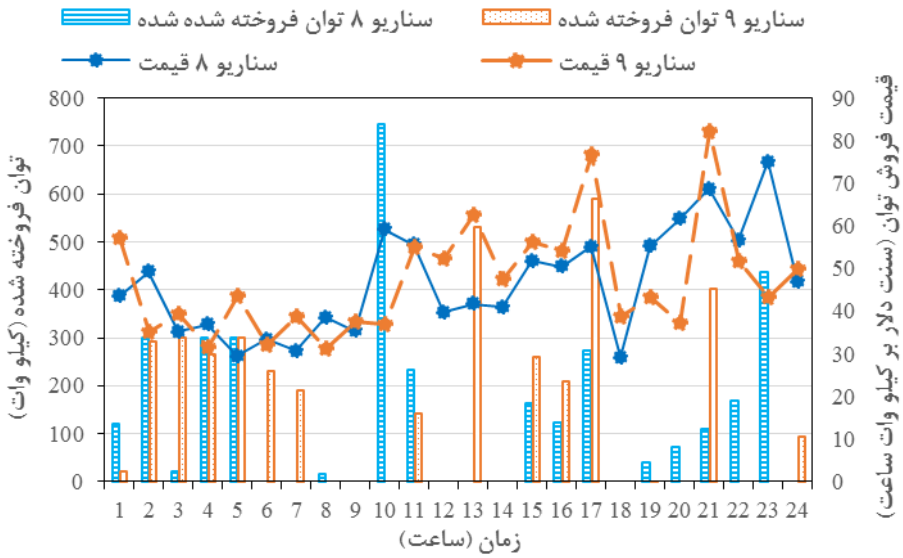
شکل ۴ توان تولیدی نیروگاه‌های PV و WT را برای سناریوی ۹ نشان می‌دهد. دیده می‌شود که توان تولیدی WT از ساعت ۲ تا ۶ مقدار قابل توجهی دارد و با توجه به اینکه در این بازه EVs هنوز وارد SEVsPL نشده‌اند، توان تولیدی WT می‌تواند به شبکه فروخته شود. همچنین، توان تولیدی PV در بازه‌های ۹ تا ۱۹ می‌تواند بیشتر برای شارژ EVs استفاده شود. توان خریداری‌شده از شبکه در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای به‌دست‌آمده، بهره‌بردار SEVsPL به دنبال خرید توان در ساعت‌های با قیمت برق پایین است (مثلاً ساعت ۱۰ در سناریوی ۹ و ساعت ۱۲ در سناریوی ۸). شکل ۶ نیز فروش توان به شبکهٔ بالادستی را در سناریوهای ۸ و ۹ نشان می‌دهد با توجه به منحنی‌های به‌دست‌آمده، بهره‌بردار SEVsPL به دنبال فروش توان به شبکهٔ بالادستی در ساعت‌هایی است که قیمت برق زیاد است (مثلاً ساعت ۱۰ در سناریوی ۸ و ساعت ۱۷ در سناریوی ۹).



شکل ۴. توان تولیدی PV و WT در سناریوی ۹



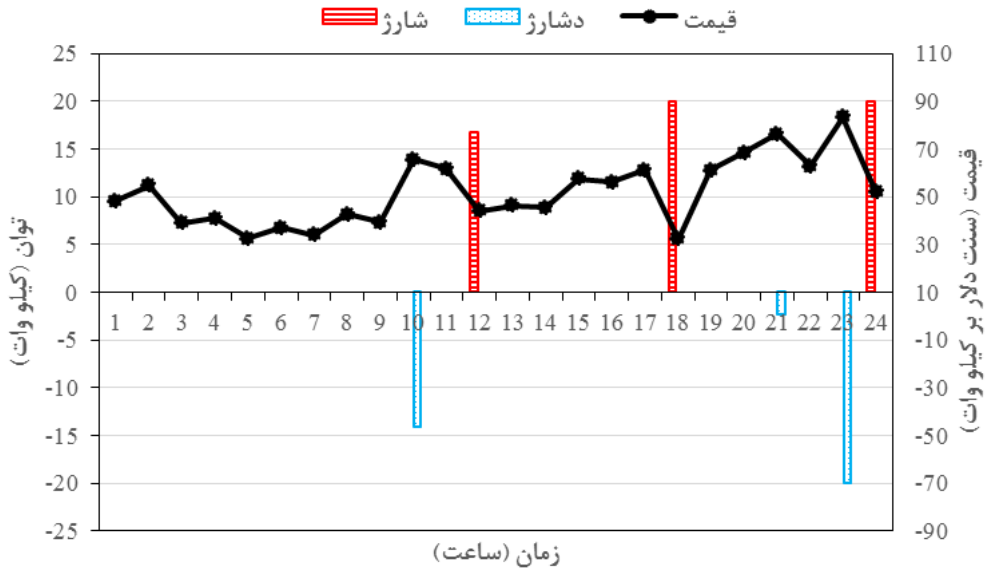
شکل ۵. توان خریداری‌شده از شبکهٔ بالادستی توسط پارکینگ



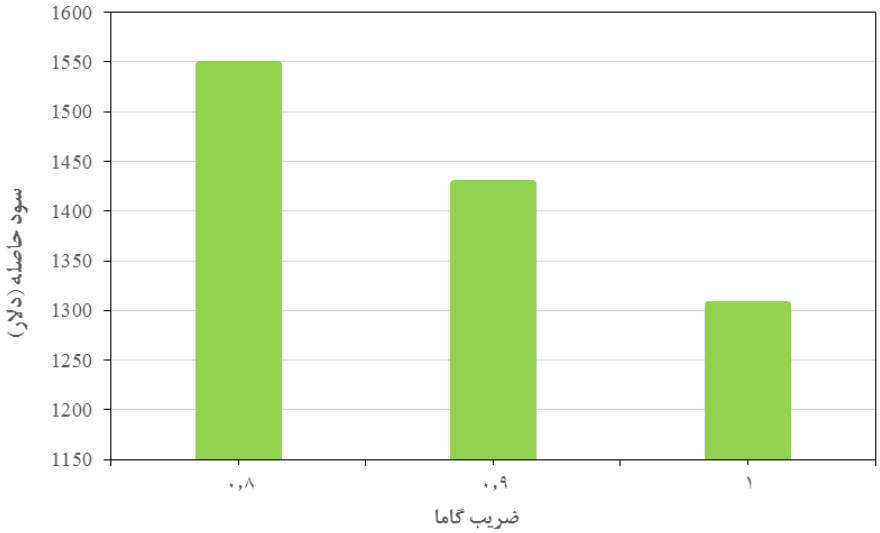
شکل ۶. توان فروخته‌شده به شبکهٔ بالادستی توسط پارکینگ

خودروی شمارهٔ ۱۳ از ساعت ۱۰ تا ۲۴ در SEVsPL حضور دارد. الگوی بهینهٔ شارژ و دشارژ این خودرو برای سناریوی ۸ در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، دیده می‌شود که بهره‌بردار SEVsPL به دنبال شارژ خودرو در ساعت‌های با قیمت کم برق و دشارژ خودرو در ساعت‌های با قیمت زیاد برق است. این استراتژی بهره‌برداری هوشمند برای تمام خودروها در تمام سناریوها صادق است که توسط بهره‌بردار SEVsPL منجر به کسب سود از تبادل انرژی در قیمت‌های متفاوت برق می‌شود.

در نهایت، شکل ۸ سود SEVsPL را به ازای ضرایب مختلف گاما نشان می‌دهد. در واقع، این ضریب بیانگر این است که اگر صاحبان EVs به دنبال شارژ حداکثری در موقع خروج از پارکینگ باشند، بهره‌بردار SEVsPL سود کمتری را کسب خواهد کرد. به بیان دیگر، فرصت دشارژ EVs موقع حضور در SEVsPL کمتر خواهد بود.



شکل ۷. الگوی بهینهٔ شارژ و دشارژ خودروی سیزدهم در سناریوی ۸



شکل ۸. سود مورد انتظار پارکینگ به ازای ضرایب گاما مختلف

نتیجه‌گیری و کارهای آینده

به دلیل رشد روزافزون EVs در جوامع امروزی باید مدیریت هوشمند آن‌ها در سیستم‌های انرژی امروزی مورد توجه قرار بگیرد. همچنین، به منظور استفاده از انرژی‌های پاک، کاهش وابستگی به شبکهٔ بالادستی و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری استفاده از RES شامل نیروگاه‌های PV و WT پیشنهاد می‌شود. در همین راستا، در این مقاله بهره‌برداری بهینهٔ پارکینگ هوشمند مجهز به RES مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، به منظور مدل‌سازی رفتار غیر قابل پیش‌بینی صاحبان EVs و RES، برنامه‌ریزی تصادفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند در حضور عدم قطعیت‌ها، بهره‌برداری بهینهٔ SEVsPL می‌تواند به ازای سناریوهای مختلف متفاوت باشد. با بررسی نتایج مشاهده شد کمترین سود SEVsPL در سناریوی هشتم بوده، در حالی که سناریوی نهم منجر به کسب بیشترین سود برای بهره‌بردار SEVsPL شد. سود مورد انتظار با در نظر گرفتن احتمال سناریوها برابر با ۱۵۷۵/۳۱ دلار شد. علاوه بر این، با تحلیل نتایج دیده می‌شود که بهره‌بردار SEVsPL به دنبال شارژ خودروها در ساعت‌های با قیمت کم و دشارژ خودروها در ساعت‌های با قیمت زیاد است. این استراتژی عملکردی هوشمند منجر به خرید توان در ساعت‌های قیمت پایین و فروش توان در ساعت‌های قیمت زیاد شد. بررسی بهره‌برداری بهینهٔ SEVsPL با سایر روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت و همچنین، بهره‌برداری بهینهٔ SEVsPL متصل به هم به منظور تبادل توان می‌توانند به عنوان مطالعات و کارهای تحقیقاتی آینده مورد بررسی قرار بگیرند.

منابع

[1].Remani T, Jasmin E, Ahamed TI. Residential load scheduling with renewable generation in the smart grid: A reinforcement learning approach. IEEE Systems Journal. 2018;13(3):3283-94.

[2].Luz T, Moura P, de Almeida A. Multi-objective power generation expansion planning with high penetration of renewables. Renewable Sustainable Energy Reviews. 2018;81:2637-43.

[3].García Vera YE, Dufo-López R, Bernal-Agustín JL. Energy management in microgrids with renewable energy sources: A literature review. Applied Sciences. 2019;9(18):3854.

[4].Şengör İ, Erenoğlu AK, Erdinç O, Taşcıkaraoğlu A, Catalão JP, editors. Optimal Coordination of EV Charging through Aggregators under Peak Load Limitation Based DR Considering Stochasticity. 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST); 2018: Ieee.

[5].IEA C. Global EV outlook 2020.. URL: https://www iea org/reports/global-ev-outlook-2020. 2020 Jun 15.

[6].Mohan V, Singh JG, Ongsakul W. Sortino ratio based portfolio optimization considering EVs and renewable energy in microgrid power market. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2016;8(1):219-29.

[7].Shafie-Khah M, Heydarian-Forushani E, Osório GJ, Gil FA, Aghaei J, Barani M, et al. Optimal behavior of electric vehicle parking lots as demand response aggregation agents. IEEE Transactions on Smart Grid. 2015;7(6):2654-65.

[8].Neyestani N, Damavandi MY, Shafie-Khah M, Contreras J, Catalão JP. Allocation of plug-in vehicles' parking lots in distribution systems considering network-constrained objectives. IEEE Transactions on Power Systems. 2014;30(5):2643-56.

[9].Fallah-Mehrjardi O, Yaghmaee MH, Leon-Garcia A. Charge scheduling of electric vehicles in smart parking-lot under future demands uncertainty. IEEE Transactions on Smart Grid. 2020;11(6):4949-59.

[10]. Jiang W, Zhen Y. A real-time EV charging scheduling for parking lots with PV system and energy store system. IEEE Access. 2019;7:86184-93.

[11]. Jordehi AR, Javadi MS, Catalão JP. Day-ahead scheduling of energy hubs with parking lots for electric vehicles considering uncertainties. Energy. 2021;229:120709.

[12]. Mansour-Satloo A, Agabalaye-Rahvar M, Mirazaei MA, Mohammadi-Ivatloo B, Zare K, Anvari-Moghaddam A. A hybrid robust-stochastic approach for optimal scheduling of interconnected hydrogen-based energy hubs. IET Smart Grid. 2021;4(2):241-54.

[13]. Mansour-Saatloo A, Agabalaye-Rahvar M, Mirzaei MA, Mohammadi-Ivatloo B, Zare K. Economic analysis of energy storage systems in multicarrier microgrids. Energy Storage in Energy Markets: Elsevier; 2021. p. 173-90.

[14]. Mirzaei MJ, Kazemi A. A two-step approach to optimal management of electric vehicle parking lots. Sustainable Energy Technologies Assessments. 2021;46:101258.

[15]. Zhang L, Li Y. Optimal management for parking-lot electric vehicle charging by two-stage approximate dynamic programming. IEEE Transactions on Smart Grid. 2015;8(4):1722-30.

[16]. Jannati J, Nazarpour D. Optimal performance of electric vehicles parking lot considering environmental issue. Journal of cleaner production. 2019;206:1073-88.

[17]. Ahmadi-Nezamabad H, Zand M, Alizadeh A, Vosoogh M, Nojavan S. Multi-objective optimization based robust scheduling of electric vehicles aggregator. Sustainable Cities Society. 2019;47:101494.

[18]. Sedighizadeh M, Fazlhashemi SS, Javadi H, Taghvaei M. Multi-objective day-ahead energy management of a microgrid considering responsive loads and uncertainty of the electric vehicles. Journal of Cleaner Production. 2020;267:121562.

[19]. Farsangi AS, Hadayeghparast S, Mehdinejad M, Shayanfar H. A novel stochastic energy management of a microgrid with various types of distributed energy resources in presence of demand response programs. Energy. 2018;160:257-74.

[20]. Aliasghari P, Mohammadi-Ivatloo B, Abapour M. Risk-based scheduling strategy for electric vehicle aggregator using hybrid Stochastic/IGDT approach. Journal of Cleaner Production. 2020;248:119270.

[21]. Yaprakdal F, Baysal M, Anvari-Moghaddam A. Optimal operational scheduling of reconfigurable microgrids in presence of renewable energy sources. Energies. 2019;12(10):1858.