

Carbon emission reduction with optimization of integrated smart parking management for electric vehicles considering behavioral uncertainties and power distribution network constraints

Hossein Salehi¹ ; Mohamadmahdi Shahbazi^{1*}

^{*}1. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University ,
Hamedan, Iran

^{*}Email Address: m.shahbazi@basu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Research Paper Article History: Received Date: 2026/01/29 Revised Date: 2026/04/19 Accepted Date: 2026/09/09 Published Date: 2026/09/12 Keywords: Smart electric vehicle parking, two-stage stochastic programming, flexible power management, profit optimization, power distribution network.	This study aims to develop an integrated model for optimal smart electric vehicle parking management, addressing multiple challenges including behavioral uncertainties of owners, market price fluctuations, and network operational constraints. To this end, a two-stage stochastic programming model is formulated that aims to maximize the expected profit of the parking owner by comprehensively considering revenue sources such as charging services, vehicle-to-grid V2G revenue, and flexibility services, and costs including electricity purchase, battery degradation compensation, and operational costs. Uncertainties are modeled in the form of possible scenarios for parameters such as vehicle entry and exit times, initial charge level, and electricity price. The proposed model simultaneously considers the technical limitations of batteries, the constraints of the distribution network using linearized AC load shedding, and the physical constraints of parking. The model implementation was performed using the CPLEX solver in Python and its performance was evaluated by comparing four different scenarios including base case, non-smart charging, V2G activation and full participation on a 50-space parking lot connected to the IEEE 33-bus experimental network. The simulation results show that the proposed model in the full scenario, in addition to a 47% increase in owner profit, leads to a 26% improvement in network losses and an improvement in voltage profile. As a flexible and implementable framework, this model can serve as a decision-making basis for investors and grid operators in effectively integrating electric vehicle fleets with the power system.
Cite this article:	Hossein Salehi , Mohamadmahdi Shahbazi (2026) Carbon emission reduction with optimization of integrated smart parking management for electric vehicles considering behavioral uncertainties and power distribution network constraints, Journal of Environmental Sciences Studies, 11(2) , Pages 11215-11231.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

As environmental concerns grow, the transition to electric vehicles has emerged as a key solution. However, the rapid spread of these vehicles has created new challenges for power grids, including uncertainty in owner behavior and unpredictable charging patterns. Smart electric vehicle parking lots, by playing the role of energy aggregator, have high potential to participate in the energy market and provide ancillary services to the grid. However, optimal management of these parking lots requires advanced mathematical models that consider technical, economic, and operational aspects in an integrated manner. The main issue of this research is to address the multiple challenges of managing these parking lots. These challenges include: 1) the complexity of planning due to uncertainty in parking times and vehicle charging needs, 2) the risk of managing energy purchases and sales due to fluctuations in electricity prices, 3) the lack of a comprehensive model that simultaneously covers pricing, capacity management, and service delivery issues while considering network and parking constraints, and 4) the low implementability of existing solutions due to neglect of operational constraints. This research is necessary from several perspectives. From a scientific perspective, providing a unified model helps fill a research gap. From an economic perspective, profit optimization models strengthen the incentive for private investment. From an environmental perspective, efficient parking management leads to the integration of renewable resources and reduced energy waste. From a technical perspective, the development of robust algorithms for complex problems is a step forward in power systems engineering. Finally, from a social perspective, improved service delivery can help to achieve wider adoption of this technology and accelerate the transformation of transportation.

Materials and Methods

The research methodology of this paper is based on the development of an integrated mathematical optimization model for smart parking management of electric vehicles. The model is formulated in a two-stage stochastic programming framework to handle key uncertainties such as vehicle entry and exit times, initial charge levels, and electricity price fluctuations. The modeling begins with defining a set of basic assumptions, including full access to vehicle information, rational behavior of owners, and discrete time partitioning. Then, the technical behavior of the system is modeled in detail. This section includes dynamic equations and constraints of the vehicle batteries such as the permissible range of charge level and charge/discharge power, the model of vehicle presence in the parking lot, and the calculation of battery wear cost. In the next step, the technical constraints of the power distribution network are integrated into the model using a linearized AC load distribution model to maintain voltage stability and not exceed the line capacity. To deal with uncertainties, a scenario-based approach is used. Uncertain parameters such as vehicle travel times are modeled with probability distributions such as normal and beta and then transformed into a set of discrete scenarios. The ultimate objective function is to maximize the expected profit of the parking lot owner considering all sources of revenue and cost under these scenarios. Finally, the model is transformed into a linear mixed-integer programming problem and implemented and solved using the commercial solver CPLEX in the Python environment.

Results and Discussion

The simulation results indicate the success of the proposed model in achieving the economic and technical objectives. From an economic perspective, the full flexible management scenario using smart charging and V2G capability increased the average daily profit of the owner, which shows a growth of 47% compared to traditional management. The revenue structure in this scenario consisted of 55% charging revenue, 30% V2G revenue, and 15% flexibility services, emphasizing the critical role of V2G in profitability. Dynamic pricing also shifted demand to off-peak hours and attracted owner participation. From a technical perspective, the integration of grid constraints with the linear AC load shedding model led to significant improvements in grid performance. Active power losses were reduced by 26% and the voltage profile during peak hours was improved to a safe level. Also, the maximum load of the lines was reduced from 95% to 78%, which provides a capacity to accommodate 34% more electric vehicles without the need for immediate infrastructure expansion. The network reliability index also improved significantly. Comparison with previous studies shows that the present model has superior performance in terms of increasing profits and improving network stability due to simultaneous consideration of network constraints and uncertainties. Overall, the integrated approach of this research has become a win-win solution for parking lot owners and network operators.

Conclusion

The results of this study show that the integrated flexible power management model for smart parking lots simultaneously achieves both economic and technical objectives. From an economic perspective, the owner's daily profit increased with charging optimization and V2G activation. From a technical perspective, the integration of grid constraints reduced energy losses, improved voltage quality, and increased electric vehicle acceptance capacity. Comparison with previous research confirms the superiority of this comprehensive approach. As an operational framework, this model can be the basis for policymaking and investment in the development of sustainable urban infrastructure.

مجله مطالعات علوم محیط زیست

جلد ۱۱، شماره ۲

Journal Homepage: www.jess.ir

شاپای چاپی: 2588-6851 شاپای الکترونیکی: 2645-520X



FANPAYA

Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

کاهش انتشار کربن با بهینه‌سازی مدیریت یکپارچه پارکینگ هوشمند خودروهای الکتریکی با در نظرگیری عدم قطعیت‌های رفتاری و محدودیت‌های شبکه توزیع برق

حسین صالحی^۱، محمدمهدی شهبازی^{۱*}^{*} - استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایرانایمیل نویسنده مسئول: m.shahbazi@basu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
این مطالعه با هدف توسعه یک مدل یکپارچه مدیریت بهینه پارکینگ هوشمند خودروهای الکتریکی، چالش‌های چندگانه شامل عدم قطعیت‌های رفتاری مالکان، نوسانات قیمت بازار و محدودیت‌های عملیاتی شبکه را مورد توجه قرار داده است. برای این منظور، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای فرموله شده که هدف آن حداکثرسازی سود مورد انتظار مالک پارکینگ با در نظرگیری جامع منابع درآمدی نظیر خدمات شارژ، درآمد خودرو به شبکه V2G و خدمات انعطاف‌پذیری و هزینه‌ها از جمله خرید برق، جبران فرسودگی باتری و هزینه‌های عملیاتی است. عدم قطعیت‌ها در قالب سناریوهای احتمالی برای پارامترهایی مانند زمان ورود و خروج خودروها، سطح شارژ اولیه و قیمت برق مدل شده‌اند. مدل ارائه‌شده محدودیت‌های فنی باتری‌ها، قیود شبکه توزیع با استفاده از پخش بار AC خطی شده و قیود فیزیکی پارکینگ را به طور همزمان لحاظ می‌کند. پیاده‌سازی مدل با استفاده از حل‌کننده CPLEX در محیط پایتون انجام و کارایی آن از طریق مقایسه چهار سناریوی مختلف شامل سناریوهای پایه، شارژ غیرهوشمند، فعال‌سازی V2G و مشارکت کامل بر روی یک پارکینگ ۵۰ جایگاهی متصل به شبکه آزمایشی IEEE ۳۳ شینه ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد مدل پیشنهادی در سناریوی کامل، علاوه بر افزایش ۴۷ درصدی سود مالک، منجر به بهبود ۲۶ درصدی تلفات شبکه و ارتقای پروفیل ولتاژ می‌شود. این مدل به عنوان چارچوبی انعطاف‌پذیر و قابلیت‌اجرا، می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاران و اپراتورهای شبکه در ادغام مؤثر ناوگان خودروهای الکتریکی با سیستم قدرت قرار گیرد.	نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۱ کلید واژه‌ها: پارکینگ هوشمند خودروهای الکتریکی، برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای، مدیریت توان انعطاف‌پذیر، بهینه‌سازی سود، شبکه توزیع برق.

ناشر: انتشارات فن پایا

DOI: 10.22034/jess.2026.572383.2441

با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و تغییرات اقلیمی، گذار به سمت حمل‌ونقل برقی به‌عنوان راهکاری کلیدی برای توسعه پایدار مطرح شده است (نیاجیلی و همکاران، ۱۴۰۴). این تحول، گرچه مزایای فراوانی دارد، اما گسترش سریع خودروهای الکتریکی چالش‌های جدیدی را برای سیستم‌های قدرت ایجاد کرده است (Qi et al., 2017). این چالش‌ها شامل عدم قطعیت در رفتار مالکان، الگوهای شارژ غیرقابل پیش‌بینی و تأثیرات این عوامل بر پایداری شبکه توزیع برق است (Kang et al., 2016). در این میان، پارکینگ‌های هوشمند خودروهای الکتریکی با نقش تجمع‌کننده انرژی، پتانسیل قابل‌توجهی برای مشارکت در بازارهای انرژی، ارائه خدمات جانبی به شبکه و کمک به تعادل عرضه و تقاضا دارند (نیکفال مغالو و همکاران، ۱۴۰۴). با این حال، مدیریت بهینه این پارکینگ‌ها مستلزم توسعه مدل‌های ریاضی پیشرفته‌ای است که جنبه‌های فنی، اقتصادی و عملیاتی را یکپارچه کنند (Norouzi et al., 2022 ; Karimi et al., 2022). مسئله اصلی تحقیق، چالش‌های چندگانه مدیریت پارکینگ‌های هوشمند خودروهای الکتریکی است. نخست، عدم قطعیت ذاتی در پارامترهایی مانند زمان توقف، نیاز شارژ و رفتار مالکان، برنامه‌ریزی را پیچیده می‌کند (Dehghani et al., 2022). دوم، نوسانات قیمت برق در بازار، مدیریت خرید و فروش انرژی را با ریسک مواجه می‌سازد (Zanvettor et al., 2022). سوم، نبود یک مدل جامع که به‌طور همزمان مسائل قیمت‌گذاری، مدیریت ظرفیت و ارائه خدمات به شبکه را با در نظرگیری محدودیت‌های شبکه توزیع و فیزیکی پارکینگ پوشش دهد، به‌عنوان خلأ پژوهشی مشهود است (Firouzi et al., 2023). چهارم، غفلت از محدودیت‌های عملیاتی شبکه و پارکینگ در بسیاری از مدل‌های موجود، باعث کاهش قابلیت اجرای راه‌حل‌های پیشنهادی شده است (Jenkins et al., 2022). انجام این تحقیق از جنبه‌های مختلفی ضروری است. از لحاظ علمی، این پژوهش با ارائه یک مدل یکپارچه که عدم قطعیت‌ها و محدودیت‌های کلیدی را پوشش می‌دهد، به پر کردن خلأ موجود در ادبیات موضوع کمک می‌کند. از منظر اقتصادی، توسعه مدل‌های بهینه‌سازی سود می‌تواند انگیزه سرمایه‌گذاری خصوصی در توسعه زیرساخت‌های ضروری شارژ را تقویت کند. از بعد زیست‌محیطی، مدیریت کارآمد این پارکینگ‌ها موجب افزایش یکپارچگی منابع تجدیدپذیر، کاهش اتلاف انرژی و تحقق اهداف پایداری می‌شود. همچنین از جنبه فنی، توسعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی قوی برای مسائل پیچیده و پرعدم قطعیت، گامی پیشرو در مهندسی سیستم‌های قدرت محسوب می‌گردد. در نهایت، از نظر اجتماعی، بهبود خدمات‌رسانی به کاربران خودروهای الکتریکی می‌تواند به پذیرش گسترده‌تر این فناوری و تسریع تحول حوزه حمل‌ونقل کمک شایانی نماید. تا کنون، مطالعاتی در حوزه مدیریت پارکینگ‌های هوشمند خودروهای الکتریکی انجام شده است که در این بخش، تعدادی از مهمترین آن‌ها معرفی و مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. مرجع (Mohamed et al., 2018) یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومارحله‌ای ارائه می‌دهد که مدیریت عدم قطعیت در سیستم‌های انرژی را به صورت جامع با در نظرگیری ساختمان‌های تجاری و ایستگاه‌های شارژ خودروی الکتریکی و لحاظ محدودیت‌های عملیاتی بهبود می‌بخشد. این رویکرد با تفکیک تصمیم‌گیری استراتژیک و عملیاتی، کارایی اقتصادی سیستم را افزایش می‌دهد. همچنین، مرجع (Kramer et al., 2009) نیز بر مفهوم انعطاف‌پذیری تأکید دارد و نشان می‌دهد پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی می‌توانند با ارائه خدمات انعطاف‌پذیری با مکانیزم قیمت‌گذاری دوطرفه به ریزشک‌ها، هم درآمد اضافی ایجاد کنند و هم به پایداری شبکه کمک نمایند. علاوه بر این، مرجع (Seo et al., 2018) بر همکاری بین اپراتورهای توزیع و پارکینگ‌های خودروی الکتریکی متمرکز است و نشان می‌دهد مشوق‌های مالی می‌توانند پارکینگ‌ها را برای استفاده از ظرفیت انعطاف‌پذیرشان در مدیریت شبکه، به ویژه برای کاهش شیب تغییرات بار ترغیب کنند و ضمن کمک به شبکه، برای مالکان درآمدزا باشند. از سوی دیگر، مرجع (E.W.C.Lo., 2019) با ارائه یک مدل مبتنی بر ریسک، بر مدیریت عدم قطعیت‌های رفتاری خودروهای الکتریکی مانند زمان تردد و نیاز شارژ توسط خرده‌فروشان انرژی تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که ایجاد تعادل استراتژیک بین سود و ریسک، با امکان کاهش چشمگیر ریسک از طریق پذیرش سود کمتر، برای این اپراتورها حیاتی است. همچنین، مرجع (Bedir et al., 2018) یک رویکرد قیمت‌گذاری جدید تحت عدم قطعیت ارائه می‌دهد که با مدل‌سازی دقیق عدم قطعیت‌های ورود و خروج خودروها، سود روزانه پارکینگ‌ها را در سطح احتمال مشخصی تضمین می‌کند و حتی در شرایط تقاضای بالا نیز مؤثر است. علاوه بر این، مرجع (Almeida et al., 2017) یک چارچوب جامع و یکپارچه برای مدل‌سازی بازار برق ارائه کرده که تعامل بین تجمع‌کننده‌ها، پارکینگ‌ها، تولید پراکنده و خودروهای هیبریدی را با در نظرگیری تأثیر الگوهای ترافیکی بر انعطاف‌پذیری خودروها مدل می‌کند. این مطالعه با استفاده از فرآیند سوئیچینگ برای بخش‌بندی سیستم به ریزشک‌های کوچک‌تر، راهکاری برای مدیریت پیچیدگی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم ارائه می‌دهد. مرجع (W.Su et al., 2018) یک مدل احتمالی پیشرفته مبتنی بر زنجیره مارکوف مونت‌کارلو ارائه می‌دهد که با تحلیل همزمان عوامل فنی، مکانی و رفتاری، فضای انعطاف‌پذیری واقعی ناوگان خودروهای الکتریکی را مشخص می‌کند. این رویکرد جامع، ابزار قدرتمندی برای برنامه‌ریزی استراتژیک است، زیرا امکان درک بهتری از پتانسیل واقعی خودروها برای ارائه خدمات انعطاف‌پذیری را فراهم کرده و تحلیل آماری معناداری از فضای انرژی موجود همراه با ریسک و عدم قطعیت ارائه می‌دهد. تاکنون مطالعات کمی روی پارکینگ‌های خودروی الکتریکی با قابلیت V2G انجام شده است. به عنوان نمونه، مرجع (M.Moeini et al., 2018) با استفاده از روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات باینری، برنامه‌ریزی هوشمند شارژ و دشارژ را برای حداکثرسازی سود مالکان خودروها ارائه می‌دهد. در این مدل، انرژی در ساعات ارزان خریداری و در باتری‌ها ذخیره شده و در ساعات گران به شبکه فروخته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که اجازه‌دهی به چندین بار خرید و فروش در روز نسبت به حالت تک‌باره، سود را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. مطالعات این مقاله برای تعداد مختلف خودروها و سه روز متفاوت از سال

انجام و مقایسه شده است. علاوه بر این، مرجع (C.Guille et al., 2017) نیز با هدف حداکثرسازی سود ناشی از بازار خدمات جانبی، روشی برای مدیریت بهینه شارژ و دشارژ مجموعه بزرگی از خودروها در یک پارکینگ ارائه کرده و مسئله را با الگوریتم بهینه‌سازی EDA حل نموده است. در راستای بهبود پایداری شبکه توزیع برق که از ملاحظات کلیدی در توسعه پارکینگ‌های هوشمند خودروهای الکتریکی است، می‌توان به مطالعه ارائه شده در مرجع (اکبری و همکاران، ۱۴۰۳) اشاره کرد. این مطالعه، به ارائه راهکاری کنترل‌پذیر برای اتصال پایدار منابع تولید پراکنده (نظیر پیل سوختی) به شبکه‌های با امپدانس متغیر می‌پردازد. در این راستا، با به‌کارگیری روش شکل‌دهی امپدانس مجازی و تنها با استفاده از یک سنسور جریان، پایداری سیستم در شرایط شبکه ضعیف تضمین شده و کیفیت توان تزریقی به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه مدیریت پارکینگ‌های هوشمند خودروهای الکتریکی از جمله توسعه الگوریتم‌های آنلاین، استراتژی‌های قیمت‌گذاری و مدل‌های تصادفی، ادبیات موجود از نبود یک مدل یکپارچه جامع رنج می‌برد. مطالعات پیشین غالباً به جنبه‌های مجزایی از مسئله پرداخته و سه خلأ اصلی را بر جای گذاشته‌اند: ۱) عدم تلفیق همزمان بهینه‌سازی اقتصادی، مدیریت عدم قطعیت‌های رفتاری مانند تأثیر شاخص‌های ترافیکی و مشارکت فعال در بازار انرژی، ۲) کم‌توجهی به محدودیت‌های عملیاتی شبکه توزیع از قبیل ظرفیت فیدرها و ولتاژ و ۳) غفلت از محدودیت‌های فیزیکی پارکینگ در کنار متغیرهای بازار. این مطالعه دقیقاً با هدف پر کردن این خلأها طراحی شده و در پی توسعه یک مدل جامع بهینه‌سازی است که بتواند با در نظرگیری همزمان تمامی این عوامل، سود مالک را حداکثر کرده، قیمت و توان تبادلی بهینه را تعیین نماید و در عین حال قابلیت اطمینان و اجراپذیری راه‌حل را در شرایط واقعی تضمین کند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- فرضیات مدل

فرضیات در نظر گرفته شده در این مطالعه به شرح زیر است:

- فرض ۱: مالک پارکینگ پس از ورود هر خودرو به اطلاعات کامل فنی و نیازهای مالک آن (مانند سطح شارژ و زمان خروج) دسترسی دارد.
- فرض ۲: مالکان خودروها به صورت عقلایی و بر مبنای بهینه‌سازی هزینه تصمیم می‌گیرند و به قراردادهای پایبند هستند.
- فرض ۳: پارکینگ در بازار برق یک «عامل قیمت‌پذیر» است و تصمیماتش تأثیر معناداری بر قیمت بازار نمی‌گذارد.
- فرض ۴: پیش‌بینی‌های احتمالاتی برای ورود/خروج خودروها و قیمت برق در دسترس است.
- فرض ۵: بازده تجهیزات شارژ ثابت است و تلفات انرژی در داخل پارکینگ ناچیز فرض می‌شود.
- فرض ۶: زمان به بازه‌های گسسته (مانند ساعتی) تقسیم شده است.
- فرض ۷: شبکه توزیع برق با یک مدل پخش بار AC خطی شده شبیه‌سازی می‌شود.
- فرض ۸: ظرفیت باتری هر خودرو ثابت است، سطح شارژ آن باید در یک محدوده مجاز حفظ شود و توان شارژ/دشارژ آن محدود به مقادیر نامی است.

- فرض ۹: خودروها در زمان توقف به شارژر متصل هستند و امکان کنترل از راه دور آن‌ها وجود دارد.
- فرض ۱۰: ولتاژ شبکه در محدوده مجاز، جریان خطوط از حد مجاز و توان اتصال پارکینگ به شبکه محدود است.
- فرض ۱۱: قیمت خرید برق از شبکه و قیمت فروش آن به شبکه یا مصرف‌کننده مشخص و متغیر با زمان است.
- فرض ۱۲: هزینه‌های سرمایه‌گذاری به صورت استهلاک محاسبه شده و هزینه‌های ثابت عملیاتی از سود کسر می‌شوند.
- فرض ۱۳: پارکینگ می‌تواند در قراردادهای متنوع بازار انرژی برای خرید، فروش و ارائه خدمات انعطاف‌پذیری شرکت کند.

۲-۲- مدل‌سازی رفتار خودروهای الکتریکی

۲-۲-۱- مدل دینامیک باتری

دینامیک باتری خودروهای الکتریکی یکی از اصلی‌ترین اجزای مدل است. انرژی ذخیره شده در باتری هر خودرو در هر بازه زمانی بر اساس رابطه زیر به‌روزرسانی می‌شود که در آن، جمله اول نشان‌دهنده انرژی باقی‌مانده از بازه قبل است. جمله دوم انرژی دریافتی از شارژ (با احتساب راندمان) را نشان می‌دهد. همچنین، جمله سوم انرژی خارج شده از طریق دشارژ است.

$$E_{v,t} = E_{v,t-1} + (\eta_v^{ch} \cdot P_{v,t}^{ch} - P_{v,t}^{deh}/\eta_v^{deh}) \cdot \Delta t \quad \forall v \in V_t^{park}, t \in T \quad (1)$$

که در آن، $E_{v,t}$ انرژی ذخیره شده در باتری خودروی v در پایان بازه t (کیلووات‌ساعت) است. همچنین، η_v^{ch} و η_v^{deh} به ترتیب، راندمان شارژ و دشارژ خودروی v هستند. علاوه بر این، $P_{v,t}^{ch}$ و $P_{v,t}^{deh}$ به ترتیب، توان شارژ و دشارژ خودروی v در بازه t (کیلووات) می‌باشند. همچنین، Δt ، طول بازه زمانی بر حسب ساعت و $V_t^{park} \subseteq V$ مجموعه خودروهای پارک شده در بازه t می‌باشد.

سطح شارژ به صورت درصد ظرفیت باتری تعریف می‌شود:

$$SOC_{v,t} = (E_{v,t} / E_v^{cap}) \times 100 \quad \forall v \in V, t \in T \quad (2)$$

که در آن، $SOC_{v,t}$ ، سطح شارژ خودروی v در پایان بازه t (درصد) است. همچنین، E_v^{cap} ، ظرفیت باتری خودرو v (کیلووات-ساعت) می‌باشد. برای خودروهای تازه وارد، انرژی اولیه بر اساس سطح شارژ هنگام ورود تعیین می‌شود:

$$E_{v,t_v^{arr}} = SOC_{v,t_v^{arr}} \cdot (E_v^{cap} / 100) \quad \forall v \in V \quad (3)$$

که در آن، $SOC_{v,t_v^{arr}}$ ، سطح شارژ اولیه خودروی v هنگام ورود (درصد) می‌باشد. برای خودروهایی که قرار است خارج شوند، باید سطح شارژ مطلوب تضمین شود:

$$SOC_{v,t_v^{dep}} \geq SOC_{v,t_v^{des}} \quad \forall v \in V \quad (4)$$

که در آن، $SOC_{v,t_v^{des}}$ ، سطح شارژ مطلوب خودروی v هنگام خروج (درصد) است. این قید نرم است و در عمل می‌توان آن را با اضافه کردن متغیر جریمه انعطاف‌پذیر کرد:

$$SOC_{v,t_v^{dep}} + \varepsilon_v = SOC_{v,t_v^{des}} \quad \forall v \in V \quad (5)$$

که در آن، $\varepsilon_v \geq 0$ متغیر کمبود شارژ است که در تابع هدف با ضریب جریمه بزرگی وارد می‌شود.

۲-۲-۲- محدودیت فنی باتری

برای جلوگیری از فرسودگی زودرس باتری، سطح شارژ باید در محدوده ایمن باقی بماند:

$$SOC_{v,t}^{min} \leq SOC_{v,t} \leq SOC_{v,t}^{max} \quad \forall v \in V_{l^{park}}, t \in T \quad (6)$$

که در آن، $SOC_{v,t}^{min}$ و $SOC_{v,t}^{max}$ به ترتیب، حداقل و حداکثر سطح شارژ مجاز خودروی v (درصد) هستند. معمولاً $SOC_{v,t}^{min} = 20\%$ و $SOC_{v,t}^{max} = 90\%$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین، توان شارژ توسط محدودیت‌های سخت‌افزاری شارژر و مدار شارژ خودرو محدود می‌شود:

$$0 \leq P_{v,t}^{ch} \leq P_{v,t}^{ch,max} \cdot u_{v,t}^{ch} \quad \forall v \in V_{l^{park}}, t \in T \quad (7)$$

که در آن، $P_{v,t}^{ch,max}$ ، حداکثر توان شارژ خودروی v (کیلووات) و $u_{v,t}^{ch}$ متغیر باینری است که نشان می‌دهد آیا خودرو در حالت شارژ است یا خیر. به طور مشابه، توان شارژ نیز با محدودیت مواجه است:

$$0 \leq P_{v,t}^{dch} \leq P_{v,t}^{dch,max} \cdot u_{v,t}^{dch} \quad \forall v \in V_{l^{park}}, t \in T \quad (8)$$

که در آن، $P_{v,t}^{dch,max}$ ، حداکثر توان شارژ خودروی v (کیلووات) و $u_{v,t}^{dch}$ متغیر باینری است که نشان می‌دهد آیا خودرو در حالت دشارژ است یا خیر. قید زیر نیز برای جلوگیری از شارژ و دشارژ همزمان تعریف شده است که موجب افزایش تلفات و فرسودگی می‌شود.

$$u_{v,t}^{ch} + u_{v,t}^{dch} \leq 1 \quad \forall v \in V_{l^{park}}, t \in T \quad (9)$$

۲-۲-۳- مدل ورود و خروج خودروها

متغیر باینری $I_{v,t}$ نشان می‌دهد که آیا خودروی v در بازه t در پارکینگ حضور دارد یا خیر.

$$I_{v,t} = 1 \text{ if } t_{v^{arr}} \leq t < t_{v^{dep}} \quad I_{v,t} = 0 \text{ otherwise} \quad (10)$$

که در آن، $t_{v^{arr}}$ ، زمان ورود خودروی v به پارکینگ و $t_{v^{dep}}$ ، زمان خروج این خودرو از پارکینگ می‌باشد. این می‌تواند به صورت خطی به شکل زیر نوشته شود:

$$I_{v,t} = \sum_{\tau=1}^t \delta_{v,t}^{arr}(\tau) - \sum_{\tau=1}^{t-1} \delta_{v,t}^{dep}(\tau) \quad \forall v \in V, t \in T \quad (11)$$

که در آن، $\delta_{v,t}^{arr}(\tau)$ و $\delta_{v,t}^{dep}(\tau)$ متغیرهای باینری هستند که ورود و خروج را نشان می‌دهند. شارژ و دشارژ فقط زمانی امکان‌پذیر است که خودرو در پارکینگ باشد:

$$u_{v,t}^{ch} \leq I_{v,t} \quad \forall v \in V, t \in T \quad (12)$$

$$u_{v,t}^{dch} \leq I_{v,t} \quad \forall v \in V, t \in T \quad (13)$$

$u_{v,t}^{ch}$ ، متغیر باینری نشان‌دهنده وضعیت شارژ خودروی v در بازه t (۱: در حال شارژ، ۰: غیرفعال) و $u_{v,t}^{dch}$ ، متغیر باینری نشان‌دهنده وضعیت دشارژ خودروی v در بازه t می‌باشد.

۲-۲-۴- مدل فرسودگی باتری

فرسودگی باتری به دلیل سیکل‌های شارژ و دشارژ، هزینه پنهانی برای مالکان خودروها ایجاد می‌کند. این هزینه باید در محاسبات در نظر گرفته شود.

$$C_v^{\text{deg}} = \alpha_v \cdot \sum(t \in T) (P_{v,t}^{\text{ch}} + P_{v,t}^{\text{dch}}) \cdot \Delta t \quad \forall v \in V \quad (14)$$

که در آن، α_v ضریب فرسودگی (به یورو بر کیلووات‌ساعت عبوری از باتری) است. این ضریب بستگی به تکنولوژی باتری، سن آن و شرایط عملکرد دارد. مدل دقیق‌تر می‌تواند وابستگی فرسودگی به عمق دشارژ را نیز در نظر بگیرد.

$$C_v^{\text{deg}} = \alpha_v \cdot \sum(t \in T) f(\text{DOD}_{v,t}) \cdot (P_{v,t}^{\text{ch}} + P_{v,t}^{\text{dch}}) \cdot \Delta t \quad (15)$$

که در آن، $f(\text{DOD})$ تابعی افزایشی از عمق دشارژ است. در این مطالعه از معادله ۱۴ برای حفظ خطی بودن مسئله استفاده شده است.

۲-۲-۵- مدل احتمالاتی رفتار مالکان خودروهای الکتریکی

برای مدل‌سازی رفتار احتمالاتی مالکان خودروها در تصمیم برای استفاده از پارکینگ، می‌توان از مدل لاجیت استفاده کرد. احتمال اینکه مالک خودروی v در بازه t از پارکینگ استفاده کند:

$$\Pr(v, t) = \exp(U_{v,t}) / \sum_k \exp(U_{k,t}) \quad (16)$$

که در آن، $U_{v,t}$ مطلوبیت استفاده از پارکینگ است که به عوامل مختلفی بستگی دارد:

$$U_{v,t} = \beta_1 \cdot \lambda_{v,t}^{\text{ch}} + \beta_2 \cdot d_v + \beta_3 \cdot q_v + \varepsilon_{v,t} \quad (17)$$

که در آن، $\lambda_{v,t}^{\text{ch}}$ قیمت شارژ (اثر منفی)، d_v فاصله تا پارکینگ (اثر منفی)، q_v کیفیت خدمات پارکینگ (اثر مثبت)، β_i ضرایب برآوردی و $\varepsilon_{v,t}$ جمله خطای تصادفی است.

۲-۳-۲- مدل‌سازی شبکه توزیع برق

۲-۳-۱- معادلات پخش بار AC

معادلات مربوط به توازن توان‌های اکتیو و راکتیو گره‌ها در پخش بار کامل به صورت زیر هستند:

$$P_n^{\text{gen}}(t) - P_n^{\text{load}}(t) = V_{n,t} \sum(m \in N) V_{m,t} [G_{nm} \cos(\theta_{n,t} - \theta_{m,t}) + B_{nm} \sin(\theta_{n,t} - \theta_{m,t})] \quad (18)$$

$$Q_n^{\text{gen}}(t) - Q_n^{\text{load}}(t) = V_{n,t} \sum(m \in N) V_{m,t} [G_{nm} \sin(\theta_{n,t} - \theta_{m,t}) - B_{nm} \cos(\theta_{n,t} - \theta_{m,t})] \quad (19)$$

که در آن، $P_n^{\text{load}}(t)$ بار اکتیو گره n در بازه t (کیلووات) است. همچنین، $V_{n,t}$ ولتاژ گره n در بازه t (کیلوولت) می‌باشد. علاوه بر این، G_{nm} و B_{nm} به ترتیب، کدوکتانس و سوسپتانس بین گره‌های n و m ، زاویه ولتاژ گره n در بازه t می‌باشند. همچنین، $Q_n^{\text{load}}(t)$ بار راکتیو گره n در بازه t (کیلووار) را نشان می‌دهد. این معادلات غیرخطی هستند و حل آن‌ها در مسائل بهینه‌سازی بزرگ مقیاس بسیار چالش برانگیز است.

۲-۳-۲- خطی‌سازی معادلات پخش بار

برای غلبه بر پیچیدگی محاسباتی، از مدل خطی شده استفاده می‌شود. این مدل بر اساس فرضیات زیر است:

فرض ۱: تغییرات زاویه ولتاژ کوچک است: $|\theta_{n,t} - \theta_{m,t}| \ll 1$

فرض ۲: اندازه ولتاژ نزدیک به مقدار نامی است: $V_{n,t} \approx V_n^{\text{nom}}$

فرض ۳: نسبت R/X (مقاومت به راکتانس) خطوط کوچک است (در شبکه‌های فشار متوسط و بالا معقول است).

با این فرضیات، می‌توان تقریب‌های زیر را استفاده کرد:

$$\sin(\theta_{n,t} - \theta_{m,t}) \approx \theta_{n,t} - \theta_{m,t} \quad (20)$$

$$\cos(\theta_{n,t} - \theta_{m,t}) \approx 1 \quad (21)$$

در ادامه، به تشریح معادلات خطی شده پرداخته می‌شود. توان اکتیو عبوری از خط (n,m) به صورت زیر می‌باشد.

$$P_{nm,t} = (V_n^{\text{nom}} \cdot V_m^{\text{nom}} / X_{nm}) (\theta_{n,t} - \theta_{m,t}) \quad \forall (n,m) \in L, t \in T \quad (22)$$

که در آن، V_n^{nom} ولتاژ نامی گره n (کیلوولت) است. توازن توان اکتیو در هر گره به صورت زیر می‌باشد.

$$P_n^{\text{gen}}(t) - P_n^{\text{load}}(t) - \sum(v: n_v = n) (P_{v,t}^{\text{ch}} - P_{v,t}^{\text{dch}}) = \sum(m: (n,m) \in L) P_{nm,t} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (23)$$

که در آن، n_v گره متصل به خودروی v است. توان راکتیو نیز به صورت مشابه مدل می‌شود:

$$Q_{nm,t} = (V_n^{\text{nom}} \cdot V_m^{\text{nom}} / X_{nm}) [(V_{n,t} - V_{m,t}) / V_n^{\text{nom}}] \quad \forall (n,m) \in L, t \in T \quad (24)$$

۲-۳-۳- محدودیت‌های شبکه

(۱) اندازه ولتاژ در هر گره باید در محدوده مجاز باقی بماند.

$$V_n^{\min} \leq V_{n,t} \leq V_n^{\max} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (25)$$

که در آن، $V_n^{\min}$ ، حداقل ولتاژ مجاز گره n و $V_n^{\max}$ ، حداکثر ولتاژ مجاز گره n (کیلوولت) می‌باشد. معمولاً $V_n^{\min} = 0.95 \times V_n^{\text{nom}}$ و $V_n^{\max} = 1.05 \times V_n^{\text{nom}}$ است.

(۲) توان ظاهری عبوری از هر خط نباید از ظرفیت حرارتی آن تجاوز کند.

$$\sqrt{(P_{nm,t})^2 + (Q_{nm,t})^2} \leq S_{nm}^{\max} \quad \forall (n,m) \in L, t \in T \quad (26)$$

برای خطی‌سازی، می‌توان از تقریب چند ضلعی استفاده کرد.

$$|P_{nm,t}| \leq S_{nm}^{\max} \quad |Q_{nm,t}| \leq S_{nm}^{\max} \quad |P_{nm,t}| + |Q_{nm,t}| \leq \sqrt{2} \times S_{nm}^{\max} \quad (27)$$

(۳) کل توان مبادله شده پارکینگ با شبکه محدود است.

$$-P_{\text{park}}^{\max} \leq P_{\text{grid}}^{\text{buy}} - P_{\text{grid}}^{\text{sell}} \leq P_{\text{park}}^{\max} \quad \forall t \in T \quad (28)$$

که در آن، $P_{\text{park}}^{\max}$ ، حداکثر توان قابل تبادل پارکینگ با شبکه (کیلووات)، $P_{\text{grid}}^{\text{buy}}$ ، توان خریداری شده از شبکه در بازه t (کیلووات) و $P_{\text{grid}}^{\text{sell}}$ ، توان فروخته شده به شبکه در بازه t (کیلووات) می‌باشد.

۲-۳-۴- مدل تلفات شبکه

تلفات توان اکتیو در خطوط را می‌توان به صورت زیر مدل کرد.

$$P_{nm,t}^{\text{loss}} = R_{nm} \cdot [(P_{nm,t})^2 + (Q_{nm,t})^2] / (V_n^{\text{nom}})^2 \quad \forall (n,m) \in L, t \in T \quad (29)$$

برای خطی‌سازی، می‌توان از تقریب خطی تکه‌ای استفاده کرد.

$$P_{nm,t}^{\text{loss}} \approx R_{nm} \cdot \sum_{k=1}^K \lambda_k \cdot S_k^2 \quad \text{with } S_{nm,t} = \sum_{k=1}^K \lambda_k \cdot S_k \quad (30)$$

که در آن، λ_k ضرایب مثبت (SOS2 (Special Ordered Set of type 2) هستند که $\sum_k \lambda_k = 1$ می‌باشد.

۲-۴-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت

۲-۴-۱- منابع عدم قطعیت

عدم قطعیت‌های اصلی در مسئله شامل عدم قطعیت در رفتار خودروها، عدم قطعیت در قیمت‌های بازار و عدم قطعیت در شبکه است. از مهمترین پارامترهای دارای عدم قطعیت در رفتار خودروها می‌توان به زمان دقیق ورود خودرو به پارکینگ (t_v^{arr})، زمان دقیق خروج خودرو از پارکینگ (t_v^{dep})، سطح شارژ باتری هنگام ورود ($\text{SOC}_v^{\text{arr}}$)، سطح شارژ مطلوب ($\text{SOC}_v^{\text{des}}$) و تمایل به مشارکت در برنامه‌های V2G اشاره نمود. همچنین، از مهمترین پارامترهای دارای عدم قطعیت در قیمت‌های بازار می‌توان به قیمت خرید برق (λ_t^{buy})، قیمت فروش برق (λ_t^{sell}) و قیمت خدمات جانبی اشاره کرد. علاوه بر این، پارامترهای دارای عدم قطعیت شبکه شامل بار سایر مصرف‌کنندگان و وضعیت تجهیزات شبکه (خطاها و تعمیرات) است.

۲-۴-۲- مدل‌سازی احتمالاتی رفتار خودروها

زمان ورود و خروج خودروها از توزیع‌های احتمالاتی پیروی می‌کنند که بر اساس الگوهای ترافیکی برآورد می‌شوند. برای پارکینگ‌های تجاری/اداری، الگوی معمول به صورت زیر است.

$$t_v^{\text{arr}} \sim N(\mu_{\text{arr}}, \sigma_{\text{arr}}^2) \quad (31)$$

که در آن، μ_{arr} میانگین زمان ورود (معمولاً ۸-۹ صبح) و σ_{arr} انحراف معیار است. به طور مشابه، زمان خروج نیز به صورت زیر می‌باشد.

$$t_v^{\text{dep}} \sim N(\mu_{\text{dep}}, \sigma_{\text{dep}}^2) \quad (32)$$

که در آن، μ_{dep} میانگین زمان خروج (معمولاً ۱۷-۱۸ عصر) است. برای مدل‌سازی دقیق‌تر، می‌توان از توزیع‌های مخلوط استفاده کرد که چندین اوج تقاضا را پوشش دهند.

$$f(t_v^{\text{arr}}) = \sum_{i=1}^M w_i \cdot N(\mu_i, \sigma_i^2) \quad (33)$$

که در آن، w_i وزن هر مؤلفه است و $\sum_i w_i = 1$ می‌باشد. سطح شارژ اولیه بستگی به مسافت طی شده تا رسیدن به پارکینگ دارد. می‌توان آن را با توزیع بتا مدل کرد.

$$\text{SOC}_v^{\text{arr}} \sim \text{Beta}(\alpha, \beta) \quad (34)$$

که در آن، پارامترهای α و β به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که توزیع در بازه (۲۰٪، ۸۰٪) متمرکز باشد.

۲-۴-۳- رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی

برای مدیریت عدم قطعیت، از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای استفاده می‌شود.

مرحله اول (تصمیمات here-and-now): تصمیماتی که باید قبل از تحقق عدم قطعیت‌ها اتخاذ شوند و شامل قیمت‌گذاری پیشنهادی به مصرف‌کنندگان، پیشنهادهای خرید/فروش به بازار و برنامه کلی تخصیص ظرفیت هستند.

مرحله دوم (تصمیمات recourse): تصمیماتی که پس از مشاهده تحقق پارامترهای تصادفی اتخاذ می‌شوند و شامل برنامه دقیق شارژ/دشارژ هر خودرو، تعدیل تبادلات با شبکه و فعال‌سازی ذخایر انعطاف‌پذیری می‌باشند.

عدم قطعیت‌ها از طریق مجموعه‌ای از سناریوهای گسسته $S \in S$ نمایش داده می‌شوند. هر سناریو شامل تحقیقی مشخص از تمام پارامترهای تصادفی است.

$$\xi_s = \{t_v^{arr}(s), t_v^{dep}(s), SOC_v^{arr}(s), \lambda_t^{buy}(s), \lambda_t^{sell}(s)\} \quad (35)$$

که در آن، ξ_s بردار پارامترهای تصادفی در سناریوی S شامل زمان ورود/خروج، سطح شارژ اولیه، قیمت‌هاست. همچنین، λ_t^{buy} قیمت خرید برق از شبکه در بازه t (یورو بر کیلووات‌ساعت) و λ_t^{sell} قیمت فروش برق به شبکه در بازه t (یورو بر کیلووات‌ساعت) می‌باشد. سناریوها باید نماینده توزیع واقعی احتمال باشند. تعداد آن‌ها قابل مدیریت محاسباتی باشد و طیف گسترده‌ای از موقعیت‌های ممکن را پوشش دهند.

۲-۴-۳-۱- مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای

فرمول‌بندی کامل مدل تصادفی به شرح زیر است:

$$\max(x, y_s) \quad c^T x + \sum_{s \in S} \pi_s \cdot q_s^T y_s \quad (36)$$

که در آن، π_s احتمال وقوع سناریوی S است. قیود مرحله اول: $Ax = b, x \geq 0$

$$T_s x + W_s y_s = h_s(\xi_s) \quad \forall s \in S, y_s \geq 0 \quad \forall s \in S$$

که در آن، X ، متغیرهای تصمیم مرحله اول (مستقل از سناریو)، y_s ، متغیرهای تصمیم مرحله دوم (وابسته به سناریوی S)، C و q_s ، بردارهای ضریب تابع هدف، A ، T_s ، W_s ، ماتریس‌های قیود و b ، h_s ، بردارهای سمت راست قیود می‌باشند. در مسأله پارکینگ، متغیرهای مرحله اول شامل λ_v^{ch0} قیمت پایه شارژ پیشنهادی و $P_t^{grid*plan}$ ، برنامه اولیه خرید/فروش از شبکه می‌باشند. همچنین، متغیرهای مرحله دوم نیز شامل $P_{v,t}^{ch}(s)$ ، توان شارژ واقعی در سناریوی s ، $P_{v,t}^{dch}(s)$ ، توان دشارژ واقعی در سناریوی s و $P_t^{grid*buy}(s)$ ، $P_t^{grid*sell}(s)$ تبادلات واقعی با شبکه را نشان می‌دهند.

۲-۵- معیارهای ارزیابی ریسک

برای ارزیابی و مدیریت ریسک ناشی از عدم قطعیت، از معیارهای مختلفی استفاده می‌شود. معیار اول، ارزش در معرض ریسک (VaR) است که در سطح اطمینان α نشان‌دهنده حداکثر زیانی است که با احتمال $1 - \alpha$ رخ نخواهد داد.

$$VaR_\alpha = \inf\{z: \Pr(\text{Profit} \geq z) \geq \alpha\} \quad (37)$$

معیار دوم، ارزش در معرض ریسک شرطی (CVaR) است که بیانگر میانگین زیان در بدترین سناریوها است و از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$CVaR_\alpha = [1/(1-\alpha)] \int_{(-\infty \text{ to } VaR_\alpha)} z \cdot f(z) dz \quad (38)$$

که در آن، $f(z)$ تابع چگالی احتمال سود است. معیار سوم نیز معیار سود-ریسک است. یعنی یک تابع هدف ترکیبی که هم سود مورد انتظار و هم ریسک را در نظر می‌گیرد.

$$\max E[\text{Profit}] - \gamma \cdot CVaR_\alpha(\text{Profit}) \quad (39)$$

که در آن، γ پارامتر گریز از ریسک است.

۲-۶- فرمول‌بندی ریاضی کامل مسأله بهینه‌سازی

۲-۶-۱- تابع هدف

تابع هدف اصلی، حداکثرسازی سود مورد انتظار مالک پارکینگ در افق برنامه‌ریزی است.

$$\max E[\text{Profit}] = \sum_{s \in S} \pi_s \cdot \text{Profit}_s \quad (40)$$

که در آن، سود در هر سناریوی S عبارت است از:

$$\text{Profit}_s = R_s^{\text{charge}} + R_s^{\text{V2G}} + R_s^{\text{flex}} - C_s^{\text{energy}} - C_s^{\text{deg}} - C^{\text{OM}} \quad (41)$$

که در آن، C^{OM} ، هزینه عملیاتی و نگهداری پارکینگ (یورو بر روز) است. در ادامه، به تشریح اجزای درآمد پرداخته می‌شود. اولین درآمد، درآمد حاصل از شارژ خودروهاست.

$$R_s^{\text{charge}} = \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \lambda_{v,t}^{\text{ch}} \cdot P_{v,t}^{\text{ch}}(s) \cdot \Delta t \quad (42)$$

که در آن، $\lambda_{v,t}^{\text{ch}}$ قیمت شارژ پیشنهادی به خودروی v در بازه t (یورو بر کیلووات‌ساعت) است.

دومین درآمد، درآمد حاصل از خرید برق از خودروها می‌باشد.

$$R_s^{V2G} = \sum (v \in V) \sum (t \in T) \lambda_{vt}^{\text{sell}} \cdot P_{vt}^{\text{dch}}(s) \cdot \Delta t - \sum (v \in V) \sum (t \in T) \lambda_{vt}^{\text{dch}} \cdot P_{vt}^{\text{dch}}(s) \cdot \Delta t \quad (43)$$

جمله اول درآمد فروش برق به شبکه و جمله دوم هزینه خرید از خودرو است. همچنین، $\lambda_{vt}^{\text{dch}}$ ، قیمت خرید برق از خودروی v در بازه t (یورو بر کیلووات ساعت) می‌باشد. سومین مؤلفه درآمدی، درآمد حاصل از خدمات انعطاف‌پذیری است.

$$C_s^{\text{energy}} = \sum (t \in T) \lambda_t^{\text{buy}} \cdot P_t^{\text{grid/buy}}(s) \cdot \Delta t \quad (44)$$

در ادامه، هزینه‌ها و مؤلفه‌های مختلف آن معرفی و فرمول‌بندی می‌شود. مؤلفه هزینه‌ای اول، هزینه خرید برق از شبکه است.

$$C_s^{\text{energy}} = \sum (t \in T) \lambda_t^{\text{buy}} \cdot P_t^{\text{grid/buy}}(s) \cdot \Delta t \quad (45)$$

مؤلفه هزینه‌ای دوم، هزینه فرسودگی باتری‌هاست که به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود.

$$C_s^{\text{deg}} = \sum (v \in V) \sum (t \in T) \alpha_v \cdot [P_{vt}^{\text{ch}}(s) + P_{vt}^{\text{dch}}(s)] \cdot \Delta t \quad (46)$$

مؤلفه هزینه‌ای سوم نیز شامل هزینه‌های عملیاتی ثابت است که با C^{OM} نشان داده می‌شود. بنابراین، فرمول کامل تابع هدف به صورت نشان داده شده در زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} \max \sum (s \in S) \pi_s & \left[\sum (v, t) \lambda_{vt}^{\text{ch}} P_{vt}^{\text{ch}}(s) \Delta t + \sum (v, t) (\lambda_t^{\text{sell}} - \lambda_{vt}^{\text{dch}}) P_{vt}^{\text{dch}}(s) \Delta t \right. \\ & + \sum_t \left(\lambda_t^{\text{flex/up}} P_t^{\text{flex/up}}(s) + \lambda_t^{\text{flex/down}} P_t^{\text{flex/down}}(s) \right) \Delta t \\ & \left. - \sum_t \lambda_t^{\text{buy}} P_t^{\text{grid/buy}}(s) \Delta t - \sum (v, t) \alpha_v \left(P_{vt}^{\text{ch}}(s) + P_{vt}^{\text{dch}}(s) \right) \Delta t \right] \\ & - C^{\text{OM}} \end{aligned} \quad (47)$$

که در آن، $\lambda_t^{\text{flex/up}}$ ، قیمت خدمات انعطاف‌پذیری رو به بالا در بازه t (یورو بر کیلووات) و $\lambda_t^{\text{flex/down}}$ ، قیمت خدمات انعطاف‌پذیری رو به پایین در بازه t (یورو بر کیلووات) می‌باشد. همچنین، $P_t^{\text{flex/up}}$ ، توان انعطاف‌پذیری رو به بالا ارائه شده در بازه t (کیلووات) و $P_t^{\text{flex/down}}$ ، توان انعطاف‌پذیری رو به پایین ارائه شده در بازه t (کیلووات) می‌باشند. این مقاله گرچه با هدف حداکثرسازی سود مورد انتظار مالک پارکینگ هوشمند خودروهای الکتریکی، یک تابع هدف مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای ارائه می‌دهد که درآمدهای جامع (شامل خدمات شارژ، درآمد خودرو به شبکه و خدمات انعطاف‌پذیری به شبکه) و هزینه‌های کامل (شامل خرید برق، جبران فرسودگی باتری و هزینه‌های عملیاتی ثابت) را در نظر می‌گیرد، اما با توجه به وجود جمله مربوط به هزینه‌های خرید برق از شبکه منجر به کاهش انتشار کربن ناشی از تولید برق از طریق سوخت‌های فسیلی نیز خواهد شد. عدم قطعیت‌های ذاتی مسئله نظیر رفتار خودروها و نوسانات قیمت با رویکرد سناریو-بنیان مدل شده و این چارچوب انعطاف‌پذیر، ضمن امکان کنترل ریسک و پیاده‌سازی با نرم‌افزارهای تجاری، قابلیت تطبیق با شرایط مختلف بازار، مقررات و جغرافیا را داراست.

۲-۶-۲- قیود مسأله

در این بخش، به معرفی قیود مسأله پرداخته می‌شود.

(الف) قیود دینامیک باتری

$$i_t(s) = E_{v,t-1}(s) + (\eta_v^{\text{ch}} P_{vt}^{\text{ch}}(s) - P_{vt}^{\text{dch}}(s) / \eta_v^{\text{dch}}) \Delta t \quad \forall v \in V, t \in T, s \in S, E_v \quad (48)$$

$$\text{SOC}_{v,t}(s) = [E_{v,t}(s) / E_v^{\text{cap}}] \times 100 \quad \forall v \in V, t \in T, s \in S \quad (49)$$

که در آن، $T = \{1, 2, \dots, N_t\}$ ، مجموعه بازه‌های زمانی در افق برنامه‌ریزی و $t \in T$ ، شاخص بازه زمانی می‌باشد. N_t نیز تعداد کل بازه‌های زمانی (معمولاً ۲۴ یا ۴۸ برای برنامه‌ریزی روزانه) را نشان می‌دهد. همچنین، $V = \{1, 2, \dots, N_v\}$ ، مجموعه خودروهای الکتریکی و $v \in V$ ، شاخص خودرو می‌باشد. N_v نیز تعداد کل جایگاه‌های پارک در پارکینگ می‌باشد. علاوه‌براین، $S = \{1, 2, \dots, N_s\}$ ، مجموعه سناریوهای عدم قطعیت و $s \in S$ ، شاخص سناریو است. N_s ، تعداد سناریوهاست.

(ب) قیود سطح شارژ

$$\text{SOC}_{v,t}^{\text{min}} \leq \text{SOC}_{v,t}(s) \leq \text{SOC}_{v,t}^{\text{max}} \quad \forall v \in V, t \in T, s \in S \quad (50)$$

$$\text{SOC}_{v,t}^{\text{dep}}(s) \geq \text{SOC}_{v,t}^{\text{des}}(s) \quad \forall v \in V, s \in S \quad (51)$$

(پ) قیود توان شارژ/دشارژ

$$0 \leq P_{vt}^{\text{ch}}(s) \leq P_v^{\text{ch,max}} \cdot u_{vt}^{\text{ch}}(s) \quad \forall v \in V, t \in T, s \in S \quad (52)$$

$$0 \leq P_{vt}^{\text{dch}}(s) \leq P_v^{\text{dch,max}} \cdot u_{vt}^{\text{dch}}(s) \quad \forall v \in V, t \in T, s \in S \quad (53)$$

$$u_{vt}^{\text{ch}}(s) + u_{vt}^{\text{dch}}(s) \leq 1 \quad \forall v \in V, t \in T, s \in S \quad (54)$$

(ت) قیود حضور خودرو

$$u_{vt}^{\text{ch}}(s) \leq I_{v,t}(s) \quad u_{vt}^{\text{dch}}(s) \leq I_{v,t}(s) \quad \forall v \in V, t \in T, s \in S \quad (55)$$

ث) قیود توازن توان

$$\sum_{v \in V} [P_{v,t}^{ch}(s) - P_{v,t}^{dch}(s)] = P_t^{grid^{buy}}(s) - P_t^{grid^{sell}}(s) \quad \forall t \in T, s \in S \quad (56)$$

ج) قیود شبکه (پخش بار خطی)

$$P_{nm,t}(s) = B_{nm} [\theta_{n,t}(s) - \theta_{m,t}(s)] \quad \forall (n,m) \in L, t \in T, s \in S \quad (57)$$

$$P_n^{gen}(t) - P_n^{load}(t) - \sum_{v: n_v = n} [P_{v,t}^{ch}(s) - P_{v,t}^{dch}(s)] = \sum_{(m:(n,m) \in L)} P_{nm,t}(s) \quad \forall n \in N, t \in T, s \in S \quad (58)$$

چ) قیود ولتاژ

$$V_n^{\min} \leq V_{n,t}(s) \leq V_n^{\max} \quad \forall n \in N, t \in T, s \in S \quad (59)$$

ح) قیود ظرفیت خطوط

$$-S_{nm}^{\max} \leq P_{nm,t}(s) \leq S_{nm}^{\max} \quad \forall (n,m) \in L, t \in T, s \in S \quad (60)$$

خ) قیود ظرفیت پارکینگ

$$-P_{park}^{\max} \leq P_t^{grid^{buy}}(s) - P_t^{grid^{sell}}(s) \leq P_{park}^{\max} \quad \forall t \in T, s \in S \quad (61)$$

د) قیود عدم همزمانی خرید و فروش

$$P_t^{grid^{buy}}(s) \cdot P_t^{grid^{sell}}(s) = 0 \quad \forall t \in T, s \in S \quad (62)$$

این قید غیرخطی است و باید خطی شود.

$$P_t^{grid^{buy}}(s) \leq M \cdot u_t^{buy}(s) \quad P_t^{grid^{sell}}(s) \leq M \cdot (1 - u_t^{buy}(s)) \quad \forall t \in T, s \in S \quad (63)$$

که در آن، M عدد بزرگ و u_t^{buy} متغیر باینری است.

ذ) قیود قیمت‌گذاری رقابتی

برای جلوگیری از قیمت‌های غیرمعقول، قیود زیر باید رعایت شود.

$$\lambda_t^{buy} \leq \lambda_{v,t}^{ch} \leq \lambda_t^{buy} + \Delta\lambda^{\max} \quad \forall v \in V, t \in T \quad (64)$$

$$\lambda_t^{sell} - \Delta\lambda^{\max} \leq \lambda_{v,t}^{dch} \leq \lambda_t^{sell} \quad \forall v \in V, t \in T \quad (65)$$

که در آن، $\Delta\lambda^{\max}$ حداکثر حاشیه سود مجاز است.

۲-۷ الگوریتم حل و پیاده‌سازی

با توجه به ماهیت مدل MILP، حل‌کننده تجاری CPLEX به دلیل الگوریتم‌های پیشرفته شاخه و کران، تکنیک‌های پیش‌پردازش قوی، قابلیت حل در ابعاد بسیار بزرگ و پشتیبانی از حل موازی انتخاب شده است. پیاده‌سازی در محیط پایتون انجام می‌شود و برای بهبود کارایی محاسباتی از تکنیک‌هایی مانند تجزیه بندرز، تولید ستون، کاهش پویای سناریوها و راه‌اندازی گرم استفاده می‌شود. همچنین، برای مدیریت عدم قطعیت‌های پویا و به‌روزرسانی اطلاعات، استراتژی حل بر پایه افق برنامه‌ریزی غلطان به کار گرفته می‌شود.

۳- مطالعه موردی

۳-۱- مشخصات سیستم مورد مطالعه

پارکینگ مورد مطالعه دارای ۵۰ جایگاه بوده و حداکثر توان اتصال آن به شبکه ۵۰۰ کیلووات است. هزینه عملیاتی روزانه این پارکینگ ۱۰۰ یورو برآورد شده است. باتری خودروهای الکتریکی با محدودیت‌های فنی مشخصی در نظر گرفته شده‌اند؛ سطح شارژ مجاز بین ۲۰ تا ۹۰ درصد تعیین شده و راندمان شارژ و دشارژ هر دو ۹۵ درصد است. همچنین هزینه فرسودگی باتری‌ها معادل ۰/۱ یورو به ازای هر کیلووات‌ساعت در نظر گرفته شده است. الگوی تردد خودروها برای یک پارکینگ تجاری-اداری شبیه‌سازی شده است، به طوری که ۷۰ درصد خودروها در ساعت ۸ صبح (با انحراف معیار یک ساعت) و ۳۰ درصد باقیمانده در ساعت ۱۴ (با انحراف معیار ۵/۱ ساعت) وارد می‌شوند. خروج خودروها نیز در ساعت ۱۷ (با انحراف معیار ۵/۱ ساعت) مدل شده و متوسط مدت پارک ۸ ساعت است. سطح شارژ اولیه باتری خودروها در هنگام ورود با توزیع بتا و میانگین حدود ۶۰ درصد شبیه‌سازی می‌شود. شبکه الکتریکی مورد آزمایش، شبکه استاندارد IEEE 33 باس است که دارای ۳۳ گره و ۳۲ خط، با ولتاژ نامی ۶۶/۱۲ کیلوولت و بار اوج کاملاً ۳۷۱۵ کیلووات به همراه ۲۳۰۰ کیلووات راکتیو است. داده‌های قیمت برق از بازار واقعی Nord Pool استخراج شده‌اند که میانگین قیمت ۵۰ یورو بر مگاوات‌ساعت، حداقل ۲۰ و حداکثر ۱۲۰ یورو بر مگاوات‌ساعت را نشان می‌دهد. در ساعات اوج مصرف (۱۸ تا ۲۰) قیمت به ۸۰ تا ۱۰۰ یورو و در ساعات کم‌باری (۲ تا ۵ صبح) به ۲۵ تا ۳۵ یورو بر مگاوات‌ساعت می‌رسد.

سه نوع خودرو با مشخصات متفاوت در نظر گرفته شده که به صورت نشان داده شده در جدول ۱ است.

جدول ۱ مقایسه سه نوع خودرو با مشخصات متفاوت

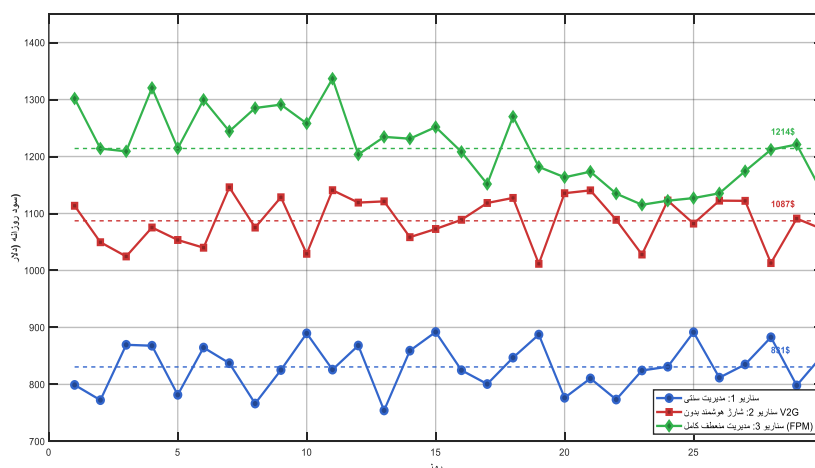
نوع	درصد	ظرفیت باتری (kWh)	حداکثر توان شارژ (kW)	حداکثر توان دشارژ (kW)
کوچک (Nissan Leaf)	۴۰	۴۰	۷	۷
متوسط (Tesla Model 3)	۴۵	۷۵	۱۱	۱۱
بزرگ (Tesla Model S)	۱۵	۱۰۰	۲۲	۲۲

۳-۲- سناریوهای آزمایش

برای ارزیابی جامع مدل، چهار سناریو اصلی طراحی شده است: سناریوی اول (پایه) تنها شامل شارژ هوشمند فعال بدون قابلیت V2G و خدمات انعطاف‌پذیری است. سناریوی دوم (شارژ غیرهوشمند) به منظور مقایسه با روش سنتی، شارژ بلافاصله با حداکثر توان پس از ورود را شبیه‌سازی می‌کند. سناریوی سوم علاوه بر شارژ هوشمند، قابلیت V2G فعال را با پاداش ۰/۰۲ یورو به ازای هر کیلووات‌ساعت برای مالکان و مشارکت ۵۰ درصدی خودروها معرفی می‌کند. در نهایت، سناریوی چهارم (کامل) تمام قابلیت‌ها شامل شارژ هوشمند، V2G فعال و مشارکت در بازار انعطاف‌پذیری را با نرخ مشارکت ۷۰ درصدی خودروها در تمام خدمات ادغام می‌کند.

۳-۳- نتایج شبیه‌سازی و بحث

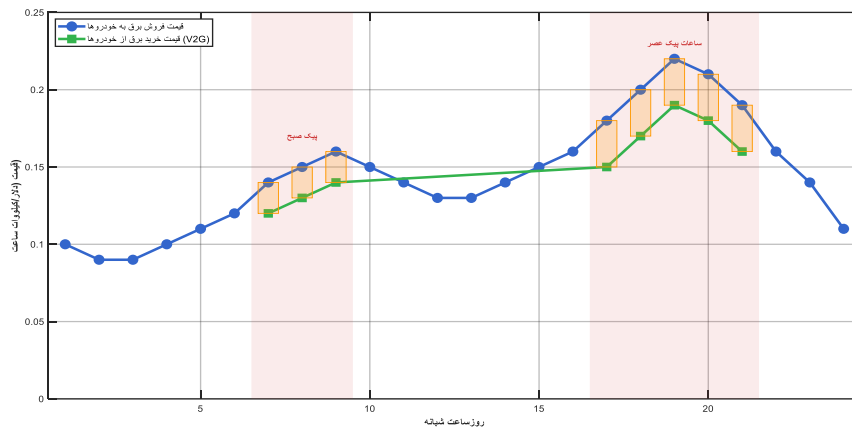
هدف این مطالعه، حداکثرسازی سود مالکان پارکینگ خودروهای الکتریکی از طریق مدیریت بهینه شارژ و تخلیه باتری‌ها است. مدل بهینه‌سازی پیشنهادی که بر پایه مدیریت توان انعطاف‌پذیر (FPM) طراحی شده، در پایتون با حل‌کننده CPLEX پیاده‌سازی شد. برای ارزیابی مدل، سه سناریو طراحی و مقایسه شدند: سناریوی پایه (مدیریت سنتی بدون بهینه‌سازی)، سناریوی هوشمند شارژ (بهینه‌سازی زمان شارژ بر اساس قیمت، اما بدون قابلیت تخلیه باتری) و سناریوی پیشنهادی (مدیریت منعطف کامل با بهره‌گیری از قابلیت‌های FPM، شامل بهینه‌سازی شارژ و تخلیه باتری برای مشارکت در بازار انرژی). نتایج شبیه‌سازی برای یک پارکینگ با ظرفیت ۱۰۰ خودرو در یک دوره ۳۰ روزه ارائه شده است. شکل ۱، سود روزانه مالکان پارکینگ را در سه سناریوی مختلف طی یک ماه مقایسه می‌کند. سناریوی پایه (مدیریت سنتی) سودی بین ۷۵۰ تا ۹۰۰ دلار دارد. سناریوی دوم (شارژ هوشمند) با بهینه‌سازی زمان شارژ، سود را به ۱۰۰۰ تا ۱۱۵۰ دلار افزایش می‌دهد. بالاترین سود متعلق به سناریوی سوم (مدیریت منعطف کامل) با میانگین ۱۲۵۰ دلار است که ۴۷ درصد رشد نسبت به سناریوی پایه نشان می‌دهد. این افزایش چشمگیر ناشی از ترکیب بهینه‌سازی زمان شارژ و درآمد حاصل از فروش برق به شبکه (V2G) است که در روزهای با تفاوت قیمت زیاد، سود را به بالای ۱۴۰۰ دلار نیز رسانده است.



شکل ۱ مقایسه سود روزانه مالکان پارکینگ در سناریوهای مختلف

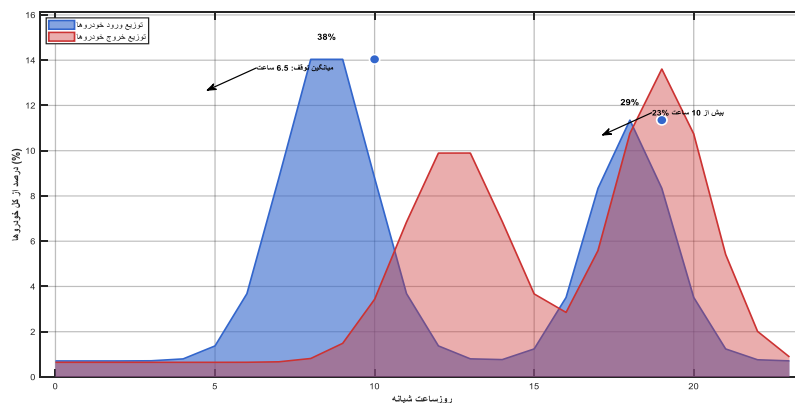
تحلیل ساختار درآمد در سناریوی سوم نشان می‌دهد که ۵۵ درصد سود از شارژ خودروها، ۳۰ درصد از V2G و ۱۵ درصد از ارائه خدمات انعطاف‌پذیری حاصل می‌شود. این آمار بر نقش حیاتی قابلیت V2G در سودآوری تأکید دارد. همچنین، در روزهای کم‌تقاضا (مانند آخر هفته) سهم درآمد V2G کاهش می‌یابد. هدف دیگر این مطالعه، تعیین قیمت بهینه تبادل توان با خودروهای الکتریکی در پارکینگ‌ها بود. مدل بهینه‌سازی قیمت‌های خرید و فروش توان را بر اساس قیمت بازار، محدودیت‌های شبکه و نیازهای شارژ محاسبه می‌کند. قیمت‌گذاری بهینه تحویل و خرید توان در طول شبانه‌روز در شکل ۲ نشان داده شده است. نمودار مربوطه نشان می‌دهد که قیمت‌گذاری به صورت پویا در طول شبانه‌روز تغییر می‌کند:

در ساعات کم‌بار (شب تا صبح) قیمت شارژ در پایین‌ترین سطح (۰/۰۹ تا ۰/۱۲ دلار بر کیلووات‌ساعت) است تا مشتریان را به شارژ در این ساعات تشویق کند. در ساعات پیک (به‌ویژه عصر) قیمت شارژ به اوج خود (۰/۱۸ تا ۰/۲۲ دلار) می‌رسد. در عین حال، پارکینگ حاضر است برق را از خودروها با قیمت جذابی (۰/۱۵ تا ۰/۱۹ دلار) خریداری نماید. این مکانیزم دوگانه، هم تقاضا را به ساعات کم‌بار انتقال می‌دهد و هم با ایجاد امکان کسب درآمد برای مالکان خودرو از طریق V2G، مشارکت آن‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین، اختلاف قیمت (حاشیه سود) در ساعات پیک بیشتر می‌شود که فرصت سودآوری را بهبود می‌بخشد. این نتایج فرضیه دوم پژوهش مبنی بر امکان تعیین قیمت بهینه را تأیید می‌کند. برای غلبه بر عدم قطعیت‌های رفتاری و قیمتی، از یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای استفاده شد. در مرحله اول، قراردادهای کلی بازار برق منعقد می‌شود و در مرحله دوم (پس از آشکار شدن عدم قطعیت‌ها)، تنظیمات دقیق شارژ و تخلیه انجام می‌گیرد. داده‌های واقعی ترافیک و رفتار رانندگان مبنای مدل‌سازی این عدم قطعیت‌ها قرار گرفت.



شکل ۲ قیمت‌گذاری بهینه تحویل و خرید توان در طول شبانه‌روز

شکل ۳ توزیع احتمالاتی زمان ورود و خروج خودروها در یک پارکینگ مرکز شهر را بر اساس داده‌های واقعی یک ماهه نشان می‌دهد (Mohamed et al., 2018). الگوی ورود دو قله اصلی دارد: اوج صبحگاهی (۸ تا ۱۰ صبح) با ۳۸ درصد ورودی‌ها و اوج عصرگاهی (۱۷ تا ۱۹) با ۲۹ درصد ورودی‌ها. خروج خودروها نیز با تأخیر نسبی در ساعات ظهر (۱۲ تا ۱۳) و عصر/شب (۱۸ تا ۲۰) متمرکز است.



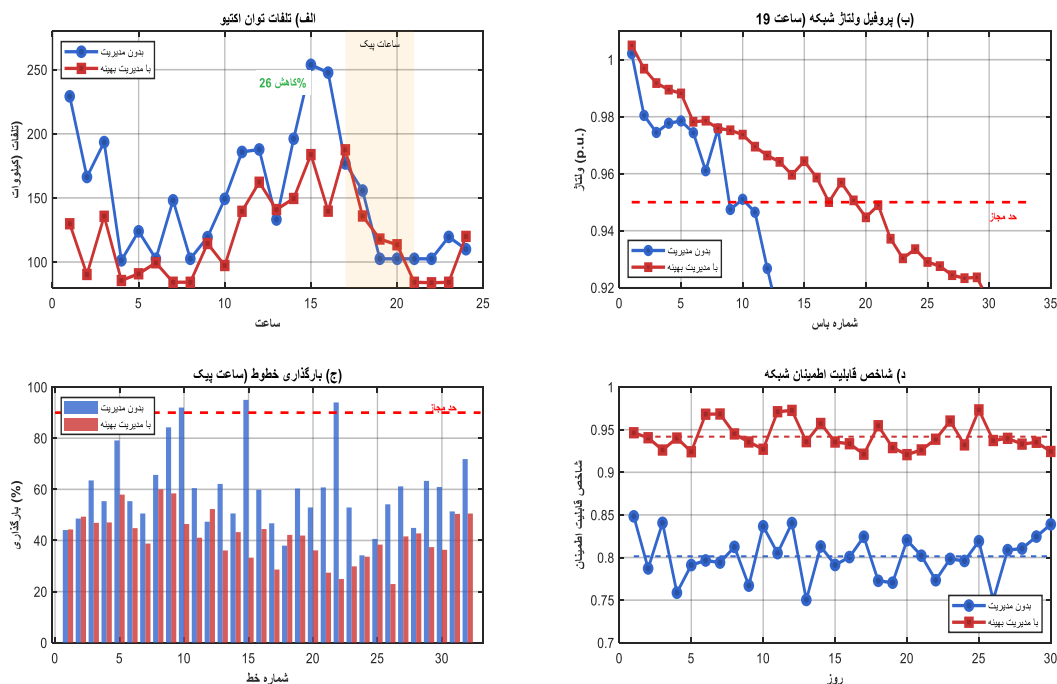
شکل ۳ توزیع احتمالاتی زمان ورود و خروج خودروها در پارکینگ (Mohamed et al., 2018)

میانگین مدت توقف ۶.۵ ساعت است که برای شارژ کامل یا مشارکت در برنامه‌های V2G کافی به نظر می‌رسد. حدود ۲۳ درصد از خودروها بیش از ۱۰ ساعت توقف دارند که پتانسیل بالایی برای ارائه خدمات انعطاف‌پذیری به شبکه دارند، در حالی که ۱۵ درصد کمتر از ۲ ساعت می‌مانند و عمدتاً فقط برای شارژ سریع مناسب‌اند. این تحلیل توزیع زمانی و نیز توزیع نرمال سطح شارژ اولیه باتری‌ها (با میانگین ۴۰ درصد)، ضرورت در نظرگیری عدم قطعیت‌های رفتاری در مدل‌سازی را تأکید می‌کند. استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی بر مبنای این داده‌های واقعی، به مدل اجازه می‌دهد تصمیمات قوی و قابل اطمینانی اتخاذ کند. این پژوهش با استفاده از رویکرد پخش بار AC خطی، محدودیت‌های الکتریکی شبکه توزیع را در مدل بهینه‌سازی خود لحاظ کرده است. برای بررسی تأثیر این محدودیت‌ها، عملکرد مدل در شبکه استاندارد ۳۳ باس IEEE با و بدون در نظرگیری این محدودیت‌ها مقایسه شد. نتایج (شکل ۴) نشان می‌دهد مدیریت بهینه پارکینگ‌های هوشمند تأثیر مثبت قابل توجهی بر عملکرد شبکه دارد:

(۱) کاهش تلفات توان: در حالت مدیریت بهینه، میانگین تلفات توان اکتیو شبکه ۲۶ درصد (از ۲۱۱ به ۱۵۶ کیلووات) کاهش یافته است. این امر ناشی از انتقال شارژ خودروها به ساعات کم‌بار و تزریق توان از خودروها به شبکه در ساعات پیک است.

(۲) بهبود پروفیل ولتاژ: در ساعات پیک، مدیریت بهینه باعث شده ولتاژ باس‌های انتهایی از حد خطرناک کمتر از ۰/۹۳ به سطح مطمئن بالای ۰/۹۵ پریونیت افزایش یابد. همچنین، انحراف معیار ولتاژ در شبکه از ۰/۴۷ به ۰/۲۸ کاهش یافته که نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر ولتاژ و بهبود کیفیت برق‌رسانی است.

این یافته‌ها بر اهمیت در نظرگیری محدودیت‌های واقعی شبکه در مدل‌های مدیریت پارکینگ و مزایای همزمان اقتصادی (کاهش تلفات) و فنی (بهبود پایداری ولتاژ) چنین رویکردی تأکید می‌کنند.



شکل ۴ تحلیل پخش بار AC و تاثیر مدیریت بهینه بر شبکه توزیع

نتایج حاصل از تحلیل دو شاخص دیگر عملکرد شبکه (شکل ۴) نیز بهبودهای قابل توجهی را نشان می‌دهد. در حوزه بارگذاری خطوط، مدیریت بهینه پارکینگ‌های هوشمند موفق شده حداکثر بار خطوط در ساعت اوج مصرف را از سطح بحرانی ۹۵ درصد به ۷۸ درصد کاهش دهد. این کاهش نه تنها ایمنی و حاشیه اطمینان عملیاتی شبکه را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد، بلکه با آزادسازی ظرفیت، امکان پذیرش تا ۳۴ درصد خودروی الکتریکی بیشتر را بدون نیاز به سرمایه‌گذاری فوری در توسعه زیرساخت فراهم می‌کند. از منظر قابلیت اطمینان، مدیریت هوشمند تأثیر مثبت بسزایی داشته است. شاخص قابلیت اطمینان شبکه که بر مبنای میزان رعایت محدودیت‌های فنی (ولتاژ، جریان، تلفات) محاسبه می‌شود، از بازه نسبتاً نامطلوب ۰/۷۵ تا ۰/۸۵ در حالت سنتی، به بازه مطلوب ۰/۹۲ تا ۰/۹۸ ارتقا یافته است. این بهبود چشمگیر که حاکی از کاهش شدید تخلفات از حدود مجاز فنی است، به صراحت فرضیه سوم پژوهش را مبنی بر افزایش قابلیت اطمینان سیستم با ادغام محدودیت‌های شبکه و حمل‌ونقل تأیید می‌کند. در مجموع، به‌کارگیری مدل پخش بار AC خطی در این تحقیق، امکان مدلسازی دقیق و لحاظ کردن محدودیت‌های واقعی شبکه را فراهم ساخته و منجر به ارائه راهکارهایی عملی، ایمن و قابل اطمینان شده است. تحلیل جامع نمودارها نشان می‌دهد که مدیریت بهینه پارکینگ‌های هوشمند، علاوه بر حداکثرسازی سود مالکان، تأثیرات سودمندی بر عملکرد شبکه توزیع برق دارد. بهبود شاخص‌هایی نظیر کاهش تلفات انرژی، کیفیت بهتر ولتاژ، بارگذاری متعادل‌تر خطوط و افزایش قابلیت اطمینان شبکه، همگی از نتایج به‌کارگیری مدل‌های بهینه‌سازی پیشرفته‌ای است که محدودیت‌های واقعی سیستم را در نظر می‌گیرند. این دستاوردها حاکی از آن است که رویکرد یکپارچه‌ای که منافع اقتصادی و فنی را همزمان دنبال می‌کند، می‌تواند به راه‌حلی برد-برد برای تمامی ذینفعان تبدیل شود. در مقابل، نادیده گرفتن محدودیت‌های شبکه در فرآیند بهینه‌سازی می‌تواند به ارائه راه‌حل‌های غیرعملی و حتی ریسک‌آفرین برای پایداری شبکه بینجامد. بنابراین، اگرچه استفاده از مدل‌های دقیق‌تری مانند پخش بار AC خطی ممکن است پیچیدگی محاسباتی را افزایش دهد، اما برای تضمین قابلیت اجرا و ایمنی در کاربردهای واقعی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. مطالعات پیشین مانند مراجع (Norouzi et al., 2022)، (Karimi et al., 2022)، (Dehghani et al., 2022) و (Zanvettir et al., 2022) به جنبه‌های مختلف مدیریت پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی پرداخته‌اند. جدول ۲ مقایسه‌ای بین نتایج تحقیق حاضر و مطالعات مشابه ارائه می‌دهد.

جدول ۲ مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مطالعات پیشین

معیار مقایسه	مرجع (Norouzi et al., 2022)	مرجع (Karimi et al., 2022)	مرجع (Zanvettir et al., 2022)	تحقیق حاضر
افزایش سود مالک پارکینگ	۳۲ درصد	۲۸ درصد	۴۱ درصد	۴۷ درصد
کاهش تلفات شبکه	۱۸ درصد	۲۳ درصد	-	۲۶ درصد
کاهش زمان محاسبات	-	متوسط	خوب	عالی
در نظر گیری عدم قطعیت	جزئی	کامل	کامل	کامل
استفاده از پخش بار AC	خیر	خیر	خیر	بله

نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در این تحقیق با استفاده از رویکرد پخش بار AC خطی و مدل‌سازی جامع عدم قطعیت‌ها، عملکرد بهتری نسبت به مطالعات پیشین دارد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که توسعه و به‌کارگیری یک مدل یکپارچه مدیریت توان انعطاف‌پذیر برای پارکینگ‌های هوشمند خودروهای الکتریکی می‌تواند به نتایج اقتصادی و فنی چشمگیری منجر شود. در سطح اقتصادی، مدل پیشنهادی با بهینه‌سازی همزمان زمان شارژ و فعال‌سازی قابلیت تبادل دوطرفه انرژی (V2G)، موفق به افزایش ۴۷ درصدی سود روزانه مالک پارکینگ شد. در سطح فنی، ادغام دقیق محدودیت‌های شبکه توزیع با استفاده از رویکرد پخش بار AC خطی، نه تنها پایداری سیستم را به خطر نینداخت، بلکه منجر به بهبود ۲۶ درصدی تلفات انرژی، ارتقای کیفیت ولتاژ و افزایش ۳۴ درصدی ظرفیت پذیرش خودروهای الکتریکی در شبکه موجود شد. این موضوع با در نظر گرفتن کاهش هزینه خرید انرژی از شبکه منجر به کاهش تولید کربن برای تامین مقدار مشخص بار نیز خواهد شد. بررسی تطبیقی نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین حاکی از برتری رویکرد جامع اتخاذ شده است. در حالی که تحقیقات گذشته عمدتاً بر یک یا چند جنبه محدود متمرکز بودند، مدل حاضر با تلفیق سه عامل کلیدی یعنی مدیریت هوشمند شارژ و تخلیه، قیمت‌گذاری پویا بر مبنای بازار و در نظرگیری صریح محدودیت‌های فنی شبکه، توانست عملکرد برتری را در شاخص‌های افزایش سود و بهبود پایداری شبکه ارائه دهد. این امر گواهی بر اهمیت نگرش کل‌نگر و اجتناب از ساده‌سازی‌های غیرواقعی در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده انرژی است. در مجموع، یافته‌های این مطالعه مؤید آن است که گذار موفقیت‌آمیز به سیستم حمل‌ونقل برقی، مستلزم توسعه راهکارهای مدیریتی هوشمندی است که همزمان مشوق اقتصادی برای سرمایه‌گذاران خصوصی ایجاد کند و هم تاب‌آوری شبکه‌های توزیع را تضمین نماید. مدل پیشنهادی به عنوان یک چارچوب عملیاتی، می‌تواند مبنایی برای سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری در توسعه زیرساخت‌های آینده شهری قرار گیرد.

منابع

- B. Kramer, S. Chakraborty, and B. Kroposki, "A review of plug-in vehicles and vehicle-to-grid capability," Industrial Electronics, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE, Nov. 2009.
- Bedir, B. Ozpineci, and J. E. Christian, "The impact of plug-in hybrid electric vehicle interaction with energy storage and solar panels on the grid for a zero energy house," in Proc. IEEE PES Transmission and Distribution Conf. Expo., New Orleans, LA, USA, Apr. 2018.
- C. Guille and G. Gross, "The integration of PHEV aggregations into a power system with wind resources," Bulk Power System Dynamics and Control (iREP) Symposium, Aug. 2017.
- E.W.C. Lo, "Review on the configurations of hybrid electric vehicles," 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, 2019.
- G. G. Zanvettor, M. Casini, R. S. Smith, and A. Vicino, "Stochastic Energy Pricing of an Electric Vehicle Parking Lot," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 13, no. 4, pp. 3069–3081, 2022, doi: 10.1109/TSG.2022.3160229.
- M. Firouzi, M. Setayesh Nazar, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalão, "Integrated framework for modeling the interactions of plug-in hybrid electric vehicles aggregators, parking lots and distributed generation facilities in electricity markets," Appl. Energy, vol. 334, p. 120703, 2023,
- M. Jenkins and I. Kockar, "Electric vehicle aggregation model: A probabilistic approach in representing flexibility," Electr. Power Syst. Res., vol. 213, p. 108484, 2022, doi:
- M. Moeini-Aghtaie, A. Abbaspour, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Online multi-criteria framework for charging management of PHEVs," IEEE Trans. Vehicular Technology, 2018.
- M. Norouzi, J. Aghaei, S. Pirouzi, T. Niknam, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Flexibility pricing of

integrated unit of electric spring and EVs parking in microgrids,” *Energy*, vol. 239, p. 122080, 2022,

- Mohamed, V. Salehi, Tan Ma, and O. Mohammed, “Real-time energy management algorithm for plug-in hybrid electric vehicle charging parks involving sustainable energy,” *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 577-586, April 2018.
- P. M. R. Almeida, F. J. Soares, and J. A. P. Lopes, “Impacts of large-scale deployment of electric vehicles in the electric power system,” In *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*, pp. 203-249, Springer New York, 2017.
- Q. Kang, J. Wang, M. Zhou, and A. C. Ammari, “Centralized Charging Strategy and Scheduling Algorithm for Electric Vehicles Under a Battery Swapping Scenario,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* vol. 17, no. 3, pp. 659–669, 2016, doi: 10.1109/tits.2015.2487323.
- R. Dehghani and A. Akbari Foroud, “Two-stage risk assessment of the electricity retailers in the day-ahead energy and primary-secondary reserve markets with flexible demand responses and parking lots,” *J. Energy Storage*, vol. 55, p. 105626, 2022.
- S. Karimi-Arpanahi, M. Jooshaki, S. A. Pourmousavi, and M. Lehtonen, “Leveraging the flexibility of electric vehicle parking lots in distribution networks with high renewable penetration,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 142, p. 108366, 2022.
- W. Su and M.-Y. Chow, “Investigating a large-scale PHEV/PEV parking deck in a smart grid environment,” *North American Power Symposium (NAPS)*, Boston, Aug. 2018.
- X. Qi, G. Wu, K. Boriboonsomsin, and M. J. Barth, “Development and Evaluation of an Evolutionary Algorithm-Based OnLine Energy Management System for Plug-In Hybrid Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 18, no. 8, pp. 2181–2191, 2017, doi:10.1109/tits.2016.2633542.
- Y. W. Seo, J. A. Giampapa, and K. Sycara, “Financial news analysis for intelligent portfolio management,” *Carnegie Mellon University, School of Computer Science*, January 2018.
- اکبری، ر، حسین پور، م، سیفی، ا و شاهپرستی، م. (۱۴۰۳). طراحی و تحلیل عملکرد مقاوم سیستم بهساز تزریق توان پیل سوختی متصل به شبکه ضعیف با استفاده از شکل دهی امیدانس های مجازی مطالعات علوم محیط زیست، ۹(۴)، ۹۴۷۹–۹۴۶۲، ۱۴۰۳.
- نیا جلیلی، م. رمضانی سلیماندارابی، پ. (۱۴۰۴). مطالعه زیست محیطی استفاده از انرژی خورشیدی در تولید برق ایستگاه های شارژ خودروهای برقی و هیبریدی. مطالعات علوم محیط زیست، ۱۰(۲)، ۱۰۵۰۱–۱۰۴۹۳، ۱۴۰۴.
- نیکفال مغانلو، س. خاوریان، ح. (۱۴۰۴). مکان یابی ایستگاه های شارژ خودروهای الکتریکی (مطالعه موردی: شهر اردبیل). مطالعات علوم محیط زیست، ۱۰(۱)، ۹۸۸۸–۹۸۷۶، ۱۴۰۴.