

Demand Management in off-Grid 100% Renewable Energy Microgrid Integrated with Electric Vehicle Charging Station based on Battery Swapping

Reza Hemmati

Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran
r.hemmati@kut.ac.ir

Keywords:

renewable energy
battery swapping
electric vehicle charging station
microgrid
demand response program
energy outage

Abstract: In this paper an off-grid microgrid, based on 100% renewable energy, integrated with an electric vehicle charging station, an electric vehicle parking station, and a demand-response program was modeled. The electric vehicle charging station operated based on a battery swapping model in order to charge the electric vehicles in the shortest time possible. The electric vehicle parking station was used to park vehicles during various hours of the 24-hour period. The vehicles inside the parking had to be fully charged by the microgrid when leaving the parking station. Since these vehicles were parked for several hours, their charging time was not limited, and they are charged by direct chargers rather than battery swapping. The loads of the microgrid were under a demand-response program, and they were curtailable, non-curtailable, shiftable, and interruptible loads. The only energy source of microgrid was solar PV systems; the solar-energy related issues such as zero energy during night, output power variations, and the possibility of losing the whole or a part of energy due to shade should be dealt with. In the proposed method, an optimal programming was applied to the charging-discharging of the swapping batteries in charging station, to the charging-discharging of electric vehicles in the parking station, and to the energy management of loads (i.e., curtailable, non-curtailable, shiftable, and interruptible loads). The mismatch of energy and the lack of solar energy were compensated by the discharging power from charging and parking stations as well as by the management of the power of loads. Simulation results demonstrated that the unavailability of solar energy during the night resulted in paying 50% of the daily revenue as penalty cost. During hours such as 7 to 19, when the solar energy was available, the plan used the solar power as much as possible and limited the extracted energy from other energy resources. The energy of shiftable loads was supplied mostly from 13 to 15 hours, when solar energy was at the maximum level.

Original Research Article

Paper History:

Received: 20/04/2023
Revise: 21/06/2023
Accepted: 25/06/2023

How to cite this article: Hemmati, R., "Demand Management in off-Grid 100% Renewable Energy Microgrid Integrated with Electric Vehicle Charging Station based on Battery Swapping", Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 3, PP. 16-31, Autumn 2023. <https://doi.org/10.22052/EEM.2023.252837.1011>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Introduction

In the recent decade, the barriers of fossil fuel energies have motivated societies for moving toward renewable energies. The 100% renewable energy systems are one of the emerging schemes to address challenges like climate change, environmental pollutions, as well as economic and energy security concerns. Among the renewable energies, solar energy has the highest number of applications in the residential and industrial sectors. Alongside renewables, electric vehicles have also been developed to handle the fossil fuel barriers. In this paper, the off-grid microgrid, based on 100% renewable energy, integrated with and electric vehicle charging station, an electric vehicle battery swapping station, and a demand-response program has been addressed.

Materials and Methods

The problem maximizes the profit of the off-grid microgrid. The optimal programming was applied to determine the optimal charging-discharging pattern for swapping batteries in the charging station, the optimal charging scheduling of electric vehicles in the parking station, and the optimal energy management of loads (i.e., curtailable, non-curtailable, shiftable, and interruptible loads). The uncertainties of the renewable

and the load were taken into account and modeled through stochastic mixed integer linear programming.

Results

The simulation results were carried out by GAMS software. The results demonstrated that the proposed model maximized the microgrid profit by selling energy to consumers while it guaranteed the feasible operation of 100% of the renewable, based on microgrid under all 24-hour. The loads were properly adjusted at all hours of the day. All electric vehicles were charged based on the desired pattern. The mismatch of energy and the lack of solar energy were compensated by discharging power from the electric vehicles in the stations as well as by the management of the power of loads.

Discussion and Conclusion

Although 100% renewable energy systems provided plenty of advantages to electrical grids, the renewable energy intermittency made their operation very vulnerable. They needed precise energy management systems. Furthermore, the off-grid operation of 100% renewable energy systems was much more complicated. This paper addressed a novel strategy for the feasible operation of 100% renewable-based microgrid by the optimal scheduling of resources and loads.

مدیریت بار در ریزشبهکۀ جدا از شبکۀ سراسری با تغذیۀ ۱۰۰٪ انرژی تجدیدپذیر متصل به ایستگاه شارژ خودرو مبتنی بر مدل تعویض باطری

رضا همتی

دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه ایران
r.hemmati@kut.ac.ir

واژه‌های کلیدی:	چکیده: در این مقاله یک ریزشبهکۀ جدا از شبکۀ سراسری با تغذیۀ ۱۰۰ درصد انرژی تجدیدپذیر و با اتصال ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی، ایستگاه پارکینگ خودرو الکتریکی و برنامه مدیریت سمت بار مدل‌سازی می‌گردد. ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی مبتنی بر مدل تعویض باطری است. ایستگاه پارکینگ خودروهای الکتریکی برای پارک نمودن خودروهای الکتریکی طی ساعات مختلف شبانه‌روز است. در این ایستگاه خودروها هنگام ترک پارکینگ باید کاملاً شارژ شده باشند، اما به‌علت فقدان محدودیت زمانی برای شارژ، از مدل شارژ مستقیم خودرو استفاده می‌شود. بارهای شبکۀ تحت برنامه مدیریت بار بوده و شامل بارهای قابل قطع، غیرقابل قطع، قابل شیفت و قابل وقفه هستند. تنها منبع تأمین انرژی ریزشبهکۀ، انرژی خورشید است. لذا مشکلات انرژی خورشیدی مانند نبود توان در طول شب و تغییرات احتمالی توان باید به روش مناسبی مرتفع گردد. در مدل پیشنهادی یک برنامه‌ریزی بهینه بر روی شارژ-دشارژ بهینه باطری‌های موجود در ایستگاه تعویض باطری، شارژ-دشارژ بهینه خودروهای موجود در ایستگاه پارک خودرو و مدیریت انرژی بارها صورت می‌پذیرد. عدم تعادل بین توان تولیدی و مصرفی شبکۀ از طریق دشارژ توان از ایستگاه تعویض باطری، دشارژ توان از خودروهای الکتریکی پارکینگ و مدیریت انرژی بارها جبران می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که فقدان انرژی در ساعات شب باعث پرداخت جریمۀ معادل حدود ۵۰ درصد درآمد روزانۀ بهره‌بردار شبکۀ می‌گردد. برنامه‌ریزی در ساعت‌هایی که انرژی خورشیدی وجود دارد، مانند ساعات ۷ تا ۱۹ حداکثر استفاده را از این انرژی نموده و انرژی سایر منابع را محدود می‌نماید. انرژی ۴۰۰ کیلووات ساعتی بارهای قابل شیفت عمدتاً در زمان‌هایی که انرژی خورشیدی حداکثر است، مانند ساعات ۱۳ تا ۱۵ تأمین می‌گردد.
انرژی تجدیدپذیر	
ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی	
تعویض باطری	
ریزشبهکۀ	
مدیریت سمت تقاضا	
قطعی انرژی	
مقاله علمی پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۳۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴	

۱. مقدمه

هم به صورت متصل به شبکه برق و هم جدا از شبکه و جزیره‌ای عمل نماید. در حالت اتصال به شبکه برق سراسری یا ریزشبكة، ایستگاه شارژ به عنوان یک بار بر روی شبکه ظاهر شده و نیاز به برنامه‌ریزی مناسب برای تأمین آن است [۱۰]. معمولاً برای کاهش زمان شارژ خودروها، شارژرهای پر قدرت و یا روش‌های دیگری مانند تعویض باطری (Battery Swapping) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش تعویض باطری، تعدادی باطری با شارژ کامل در ایستگاه موجود و به محض ورود خودروی جدید، باطری آن با یک باطری شارژ شده تعویض می‌گردد [۱۱].

مدیریت سمت تقاضا و مدیریت بار نیز یکی از روش‌های غلبه بر موانع موجود در تولید انرژی است. در این روش، معمولاً بارها با بهره‌بردار دارای تفاهم‌نامه هستند که انرژی مصرفی آن‌ها بتواند توسط بهره‌بردار شبکه مدیریت و کاهش یابد و در مقابل، از مشوق‌هایی برخوردار گردند. انواع مختلف بارها در این نوع برنامه‌ریزی مدل می‌گردد. بارهای غیرقابل قطع دارای یک توان ثابت هستند و امکان مدیریت انرژی آن‌ها وجود ندارد. بارهای قابل قطع معمولاً بارهای غیرحساسی هستند که امکان قطع آن‌ها وجود دارد. بارهای قابل وقفه، بارهایی هستند که می‌توان اتصال آن‌ها به شبکه را از یک ساعت به ساعت دیگری جابه‌جا نمود. بارهای قابل شیفت بارهایی هستند که می‌توان آن‌ها را در ساعات مختلفی متصل نمود تا انرژی مورد نیاز تأمین گردد و لازم نیست حتماً در ساعات متوالی به شبکه متصل باشند [۱۲].

۱-۱. ساختار و اهداف تحقیق

با توجه به مطالب مطرح شده درخصوص نیاز به انرژی تجدیدپذیر در آینده و مزیت‌های سیستم‌های مبتنی بر ۱۰۰٪ انرژی تجدیدپذیر، نیاز است که عملکرد این سیستم‌های تحت شرایط کاری مختلف بررسی و مدل‌سازی گردد. یکی از کاربردهای اساسی منابع تولید پراکنده برای تغذیه بارهای دور از شبکه سراسری است که برای تأمین این بارها می‌توان یک ریزشبكة جدا از شبکه سراسری طراحی نمود. در صورتی که این ریزشبكة مبتنی بر ۱۰۰٪ انرژی تجدیدپذیر باشد، عملکرد پیوسته آن تحت تمام ساعات شبانه‌روز بسیار مشکل است؛ زیرا توان تولیدی توسط انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار متغیر است و احتمال قطعی و صفر شدن خروجی توان آن‌ها نیز وجود دارد. لذا نیاز به یک برنامه‌ریزی پیچیده‌ای برای هماهنگی تمام منابع و بارهای موجود است که بتوان عملکرد را تحت تمام ۲۴ ساعت تضمین نمود و از طرفی به اهداف دیگری همچون کاهش هزینه، افزایش سود و تأمین بارهای حساس نیز دست یافت.

طی دهه اخیر، با توسعه تکنولوژی انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان و مشکلات مربوط به محدودیت سوخت‌های فسیلی، اکثر شبکه‌های قدرت الکتریکی به سمت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان بخشی و یا حتی ۱۰۰ درصد منابع تأمین‌کننده انرژی سوق پیدا کرده‌اند. در این میان، بهره‌برداری از سیستم‌هایی با ۱۰۰٪ انرژی تجدیدپذیر جذاب و جدید است [۱]. در این نوع سیستم‌ها سعی می‌گردد تا تمام انرژی شبکه بر مبنای انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین گردد. البته مشکلات مربوط به این انرژی‌ها نظیر متغیر بودن توان تولیدی باید با روش‌های مناسب و یا تجهیزات کمکی مرتفع گردد [۲].

در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، بهره‌برداری از انرژی خورشیدی معمولاً ساده‌تر بوده و قابلیت دسترسی بیشتری دارد. این انرژی در نقاط مختلف جغرافیایی حتی با سطح تابش کم نیز قابل بهره‌برداری است. از مشکلات انرژی خورشیدی نیاز به زمین زیاد برای نصب سلول‌های خورشیدی است که معمولاً به ازای هر کیلووات حدود ۱۱ متر مربع فضا مورد نیاز است [۳]. از دیگر مشکلات انرژی خورشیدی، نبود توان در طول شب، تغییرات احتمالی توان در طول روز و احتمال قطع شدن کامل توان تولیدی در بعضی از ساعات روز به علت سایه و... است. لذا بهره‌برداری از این انرژی نیاز به برنامه‌ریزی مناسب و هماهنگی با سایر منابع و بارهای شبکه دارد [۴].

با توجه به فواید بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌های الکتریکی، ریزشبكة‌ها به عنوان یکی از محل‌های مناسب بهره‌برداری از این نوع از انرژی تعریف شده‌اند [۵]. ریزشبكة‌ها به دلیل ساختار کوچک و قابل کنترل و برنامه‌ریزی، قادر به فراهم نمودن بستری مناسب برای استفاده از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله باد، خورشید، آب و هیدروژن هستند [۶]. معمولاً به منظور رفع مشکلات انرژی‌های تجدیدپذیر از تجهیزات کمکی مانند سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، روش‌های مدیریت بار، سیستم‌های به هم پیوسته برق و گاز و آب^۱، ریزشبكة‌های حامل چندین انرژی^۲ [۷] و سیستم‌های شامل چندین ریزشبكة [۸] استفاده می‌گردد.

خودروهای الکتریکی از جمله تجهیزاتی هستند که در دهه اخیر توسعه پیدا کرده‌اند. خودروهای الکتریکی نیاز به ایستگاه‌های شارژ مناسب در سطح شهرها و جاده‌ها دارند [۹]. ایستگاه شارژ می‌تواند

در این مقاله، یک ریزشبکه جدا از شبکه سراسری با ۱۰۰٪ انرژی تجدیدپذیر برای تغذیه ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی و بارهای محلی مدل‌سازی می‌گردد. این ریزشبکه به‌علت جدا بودن از شبکه سراسری در ساعاتی که انرژی خورشیدی صفر است، با مشکل تأمین توان مواجه می‌گردد. لذا نیاز است برنامه‌ریزی جامعی بر روی منابع و بارها صورت پذیرد که عملکرد ریزشبکه طی ۲۴ ساعت تضمین شود. در ساختار ریزشبکه پیشنهادی، یک ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی مبتنی بر مدل تعویض باتری، یک ایستگاه پارکینگ خودرو الکتریکی و انواع بارهای الکتریکی مدل می‌شوند.

در ایستگاه شارژ خودرو الکتریکی با تعویض باتری، باتری‌های مناسبی تعبیه شده‌اند و به‌محض ورود یک خودرو با باتری تقریباً خالی، باتری خودرو تعویض و یک باتری پر بر روی آن نصب می‌گردد و باتری خالی در ایستگاه تحت شارژ قرار می‌گیرد تا در ساعات بعدی، برای خودروهای دیگر استفاده گردد. در پارکینگ خودرو الکتریکی، معمولاً خودروها چندین ساعت توقف نموده و ممکن است در تمام مدت روز یا شب خودرو آنجا در محل پارک باقی بماند. در این ایستگاه پارک نیز خودرو توسط ریزشبکه کاملاً شارژ شده و در هنگام ترک پارکینگ می‌بایست باتری خودرو پر باشد. در پارکینگ خودرو به‌علت وجود زمان کافی برای شارژ، از مدل تعویض باتری استفاده نمی‌گردد و خودروها مستقیم شارژ می‌شوند.

با توجه به اینکه تمام انرژی این ریزشبکه از انرژی خورشیدی تأمین می‌گردد، سه مشکل موجود شامل نبود توان در طول شب، تغییرات احتمالی توان در طول روز و احتمال قطع شدن کامل توان تولیدی در بعضی از ساعات روز وجود دارد. در طرف مقابل، وظایف ریزشبکه شامل نصب باتری تعویضی با شارژ کامل بر روی تمام خودروهای ورودی به ایستگاه شارژ طی ۲۴ ساعت، شارژ کامل خودروهای داخل پارکینگ و تأمین بارهای مختلف تا حد ممکن است. برای اینکه ریزشبکه بتواند وظایف خود را در حالت مشکلات بیان‌شده برای انرژی خورشیدی تأمین نماید، باید هماهنگی بهینه بین عملکرد انرژی خورشیدی، ایستگاه شارژ، ایستگاه پارک و بارها صورت پذیرد. با توجه به قابلیت شارژ خودروهای موجود در ایستگاه پارک خودرو، قابلیت شارژ باتری‌های موجود در ایستگاه تعویض باتری و قابلیت مدیریت انرژی بارها، بهره‌برداری از این سه قابلیت می‌تواند بر مشکلات انرژی خورشیدی فائق آید.

در مدل پیشنهادی، یک برنامه‌ریزی جامع و بهینه بر روی

بهره‌برداری از انرژی خورشیدی تحت نامعینی، شارژ - دشارژ بهینه باتری‌های موجود در ایستگاه تعویض باتری، شارژ - دشارژ بهینه خودروهای موجود در ایستگاه پارک خودرو و مدیریت انرژی بارها (شامل بارهای قابل قطع، قابل وقفه و قابل شیفت) صورت می‌پذیرد. در مدل پیشنهادی درحالی‌که ریزشبکه سود خود را از فروش انرژی به بارها و خودروهای الکتریکی در طی روز ماکزیمم می‌نماید، درعین حال تضمین می‌کند که تمام خودروها را در زمان مقرر شارژ نموده و عملکرد شبکه را تحت ۲۴ ساعت ادامه دهد.

بارهای الکتریکی مدل‌شده در این مقاله به‌صورت بارهای قابل قطع، غیرقابل قطع، قابل شیفت و قابل وقفه‌اند. بارهای قابل قطع معمولاً مصرف‌کنندگانی هستند که می‌توان در صورت ضرورت آن‌ها را قطع نمود. بارهای غیرقابل قطع نیاز است تمام ۲۴ ساعت انرژی آن‌ها تأمین گردند؛ مانند یخچال‌های نگهداری مواد غذایی. بار قابل شیفت باری است که می‌توان عملکرد آن را به ساعت دیگری منتقل نمود؛ مثلاً دستگاه خشکشویی که می‌تواند در ساعات بعدی استفاده گردد. بار قابل وقفه باری است که می‌توان عملکرد آن را متوقف نمود و در ساعات بعدی ادامه داد؛ مانند دستگاهی که باتری دارد و نیاز است شارژ گردد که می‌توان آن را در زمان‌های مختلفی شارژ نمود.

۲. مدیریت انرژی ریزشبکه با مدل پیشنهادی

شکل (۱) ساختار پیشنهادی برای ریزشبکه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است تنها منبع تأمین توان ریزشبکه سلول‌های خورشیدی هستند. ریزشبکه به بارهای مختلف، ایستگاه شارژ خودرو و ایستگاه پارکینگ خودرو الکتریکی متصل است. در ساختار پیشنهادی چند نکته اساسی به‌صورت زیر وجود دارد:

الف. تمام انرژی ریزشبکه از منبع خورشیدی تأمین می‌گردد. لذا مشکلات انرژی خورشیدی مانند عدم وجود انرژی در طول شب، تغییرات انرژی در طول روز و احتمال قطعی کامل یا موقتی در طول روز باید لحاظ گردد.

ب. ریزشبکه به یک ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی مبتنی بر مدل تعویض باتری متصل است. وظیفه ریزشبکه تأمین انرژی تمام خودروهای ورودی در ۲۴ ساعت است. باتری‌های تعویضی موجود در این ایستگاه می‌توانند با دشارژ در زمان مناسب در مدیریت انرژی ریزشبکه مشارکت نمایند [۱۳].

ج. ریزشبکه به یک ایستگاه پارکینگ خودرو الکتریکی نیز متصل است. وظیفه ریزشبکه تأمین انرژی خودروهای داخل پارکینگ است؛ به‌گونه‌ای که هنگام ترک پارکینگ در زمان مقرر،

ج. تأمین توان بارهای غیرقابل قطع در تمام ساعت. در مدل ارائه شده، بعضی فرضیات و ساده سازی‌ها لحاظ شده است. پارکینگ خودروهای الکتریکی، هزینه‌ای بابت پارک خودرو از مالکین دریافت نمی‌کند. تلفات انرژی در شبکه لحاظ نشده و راندمان ذخیره‌سازهای انرژی برابر ۱۰۰ درصد است. طول هر بازه زمان یک ساعت است و فرض می‌شود طی این بازه زمانی، توان‌های تولیدی و مصرفی ثابت‌اند. همچنین فرض می‌شود که ماکزیمم توان قابل استخراج از سلول‌های خورشیدی کسب شده و قابل تزریق به شبکه است.

۳. فرمول‌بندی ریاضی مسئله

۱.۳. توابع هزینه و درآمد

در مسئله مدل‌سازی شده، درآمد سیستم حاصل فروش انرژی به بارها، شارژ خودروهای الکتریکی داخل پارکینگ و شارژ باتری‌های ایستگاه تعویض باتری خودرو است. رابطه (۱) بیانگر درآمد کل سیستم از فروش انرژی به این مصرف‌کنندگان است. در طرف مقابل، سیستم نیاز دارد که خودروهای الکتریکی داخل پارکینگ را در صورت نیاز شارژ نماید و به آن‌ها جریمه‌ای معادل (۲) پرداخت نماید. همچنین در صورت شارژ باتری‌های ایستگاه تعویض باتری باید جریمه‌ای معادل (۳) پرداخت نماید. در نهایت، جریمه عدم تأمین بارها مطابق (۴) محاسبه می‌شود. در نهایت، سود خالص کل سیستم در یک روز طبق (۵) به دست می‌آید. رابطه (۵) تابع هدف مسئله می‌باشد که نیاز است ماکزیمم گردد. واحد تابع هدف به صورت دلار در روز می‌باشد و سود و زیان به صورت روزانه (\$/day) محاسبه می‌شود.

$$z_1 = \sum_{t \in T} [P_{con}^t \times C_{con}^t] \quad (1)$$

$$z_2 = \sum_{t \in T} [P_{dps}^t \times C_{dps}^t] \quad (2)$$

$$z_3 = \sum_{t \in T} [P_{dcs}^t \times C_{dcs}^t] \quad (3)$$

$$z_4 = \sum_{t \in T} [P_{cur}^t \times C_{cur}^t] \quad (4)$$

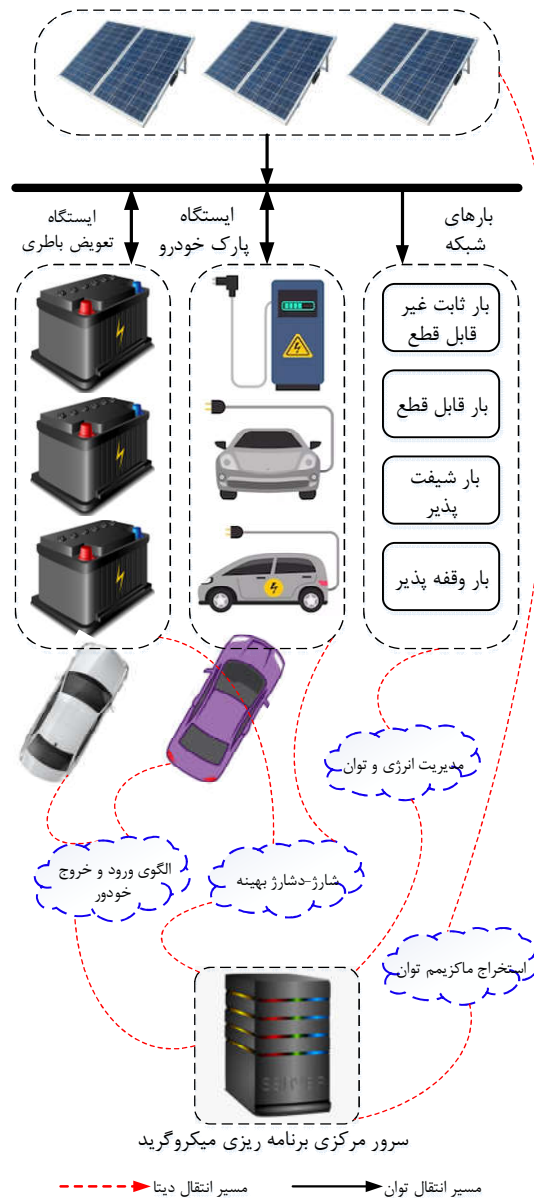
$$z_5 = \sum_{t \in T} (z_1 - z_2 - z_3 - z_4) \quad (5)$$

۲.۳. بارها و توان‌های مصرفی و تولیدی

کل توان مصرفی سیستم توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود که بخش اول بیانگر توان مصرفی توسط ایستگاه تعویض باتری، بخش دوم توان مصرفی ایستگاه پارک خودروها و بخش‌های دیگر توان مصرفی انواع بارهاست. رابطه (۷) نیز کل تولید را

کاملاً شارژ شده باشند. خودروهای پارک شده در پارکینگ نیز می‌توانند با دشارژ در زمان مناسب در مدیریت انرژی ریزشبکه مشارکت نمایند.

د. بارهای متصل به ریزشبکه با چهار مدل بارهای قابل قطع، غیرقابل قطع، قابل شیفت و قابل وقفه تعریف می‌شوند. برنامه مدیریت انرژی ریزشبکه می‌تواند مدیریت انرژی این بارها در ساعات مختلف را برنامه‌ریزی نماید.



شکل (۱): ساختار پیشنهادی برای ریزشبکه تحت مطالعه

دسترسی به اهداف زیر باید تضمین گردد:

الف. شارژ کامل خودروهای داخل پارکینگ در زمان ترک پارکینگ؛

ب. شارژ کامل خودروهای ورودی به ایستگاه شارژ طی ۲۴

ساعت؛

$$\begin{cases} \text{if } (u_{int}^t + \dots + u_{int}^{t+k_{int}}) = k_{int} \quad \forall t \in T \\ \Rightarrow [u_{int}^t, \dots, u_{int}^{t+k_{int}}] = 1 \end{cases} \quad (15)$$

۳.۳. مدل سازی ایستگاه پارک خودروها

در ایستگاه پارک خودروها تعدادی خودرو طبق یک الگوی پیش‌بینی شده وارد پارکینگ می‌شوند و معمولاً چندین ساعت آنجا بوده و سپس پارکینگ را ترک می‌کنند. ریزش‌بکه باید این خودروها را به‌گونه‌ای شارژ نماید که در زمان ترک پارکینگ، کاملاً شارژ شده باشند. در طی زمان حضور خودرو الکتریکی در پارکینگ، ریزش‌بکه مجاز به دشارژ باطری و پرداخت جریمه در مقابل آن است. روابط (۱۶) تا (۱۸) بیان می‌کنند که هر خودرو در هر بازه زمانی صرفاً می‌تواند شارژ یا دشارژ گردد و هر دو عملکرد به صورت همزمان مجاز نیست. روابط (۱۹) تا (۲۰) حداکثر ظرفیت شارژ و دشارژ خودرو را مشخص می‌کنند که بر اساس ظرفیت دستگاه شارژ تعیین می‌شود [۵].

$$u_{cev}^{v,t} + u_{dev}^{v,t} \leq 1 \quad \forall v \in V, t \in T \quad (16)$$

$$P_{cev}^{v,t} = u_{cev}^{v,t} \times B_m \quad \forall v \in V, t \in T \quad (17)$$

$$P_{dev}^{v,t} = u_{dev}^{v,t} \times B_m \quad \forall v \in V, t \in T \quad (18)$$

$$P_{dev}^{v,t} \leq P_{ev}^{max} \quad \forall v \in V, t \in T \quad (19)$$

$$P_{cev}^{v,t} \leq P_{ev}^{max} \quad \forall v \in V, t \in T \quad (20)$$

رابطه (۲۱) انرژی خودرو در هر بازه را محاسبه می‌نماید و رابطه (۲۲) ظرفیت باطری خودرو را مدل می‌نماید. در رابطه (۲۳) قید مربوط به انرژی اولیه موجود در باطری خودرو هنگام رسیدن به پارکینگ مدل می‌گردد. رابطه (۲۴) قید مربوط به انرژی خودرو هنگام ترک پارکینگ را مدل نموده است. طبق رابطه (۲۵)، هر خودرو قادر است با ریزش‌بکه یک قرارداد داشته باشد تا در مقابل شارژ شدن کمتر از ظرفیت کامل، تشویقی دریافت نماید. کل توان مصرفی و تولیدی ایستگاه به ترتیب توسط روابط (۲۶) و (۲۷) محاسبه می‌شود.

$$E_{ev}^{v,t} = E_{ev}^{v,t-1} + [P_{cev}^{v,t} \times \eta_{ev} - P_{dev}^{v,t}] \times pot^t \quad \forall v \in V, t \in T \quad (21)$$

$$E_{ev}^{v,t} \leq E_{ev}^{max} \quad \forall v \in V, t \in T \quad (22)$$

$$\text{if } t = (t_{in}^v - 1) \Rightarrow E_{ev}^{v,t-1} = E_{ev}^{v,ini} \quad \forall v \in V \quad (23)$$

$$\text{if } t = t_{out}^v \Rightarrow E_{ev}^{v,t-1} = E_{ev}^{v,max} \times k_{ev}^v \quad \forall v \in V \quad (24)$$

$$k_{ev}^{v,min} \leq k_{ev}^v \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (25)$$

$$P_{eps}^t = \sum_{v \in V} (P_{cev}^{v,t}) \quad \forall t \in T \quad (26)$$

نشان می‌دهد که شامل تولید سیستم خورشیدی، توان دشارژ شده از ایستگاه تعویض باطری و توان دشارژ شده از ایستگاه پارک خودروهاست. تعادل توان مصرفی و تولیدی در هر بازه زمانی طبق قید (۸) برقرار می‌گردد.

$$P_{con}^t = P_{ccs}^t + P_{eps}^t + P_{int}^t + P_{shi}^t + P_{fix}^t + P_{cur}^t \quad (6)$$

$$\forall t \in T$$

$$P_{pro}^t = P_{pv}^t + P_{dcs}^t + P_{dps}^t \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$P_{con}^t = P_{pro}^t \quad \forall t \in T \quad (8)$$

در این سیستم، چهار نوع بار مدل‌سازی شده تا رفتار بارها منطبق بر واقعیت باشد. اولین نوع بار شامل بارهای قابل قطع است که با رابطه (۹) مدل شده‌اند. در این بارها، با تغییر ضریب بار می‌توان انرژی بار را مدیریت و به بار جریمه پرداخت نمود. روابط (۱۰) و (۱۱) بارهای قابل شیفت را مدل می‌نمایند که در این نوع بارها، می‌توان زمان اتصال بار به شبکه را جابه‌جا و در زمان‌های مختلفی انرژی آن را تأمین کرد [۱۴].

$$\begin{cases} P_{cur}^t = P_{cur}^t \times k_{cur}^t \quad \forall t \in T \\ 0 \leq k_{cur}^t \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$E_{shi}^t = \sum_{t \in T} [P_{shi}^t \times pot^t] \quad (10)$$

$$P_{shi}^t \leq P_{shi}^{max} \quad \forall t \in T \quad (11)$$

نوع سوم بارها شامل بارهای قابل وقفه است. در این نوع بارها می‌توان زمان شروع عملکرد مصرف‌کننده را به وقفه انداخت و در زمان مناسبی آن را روشن نمود. اما نکته‌ای که وجود دارد، در این نوع بارها معمولاً پس از روشن شدن دستگاه دیگر نمی‌توان آن را خاموش نمود تا زمانی که وظیفه خود را تکمیل نماید. لذا در این نوع بارها باید زمان روشن شدن دستگاه و همچنین بازه‌های زمانی پیوسته که دستگاه نیاز به عملکرد دارد، بهینه و مشخص گردند. روابط (۱۲) و (۱۵) بارهای قابل وقفه را مدل می‌نمایند که هم‌زمان شروع به فعالیت بار و هم تعداد ساعت‌های پیوسته‌ای که دستگاه باید حتماً روشن باشد مشخص می‌گردند. چهارمین نوع باری شامل بارهای توان ثابت بوده که هیچ‌گونه تغییری در انرژی مصرفی آن‌ها مجاز نیست و حتماً باید توان ثابت مورد نیاز آن‌ها تأمین گردد.

$$0 \leq u_{int}^t \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (12)$$

$$P_{int}^t = P_{int}^{max} \times u_{int}^t \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{t \in T} [u_{int}^t] = k_{int} \quad (14)$$

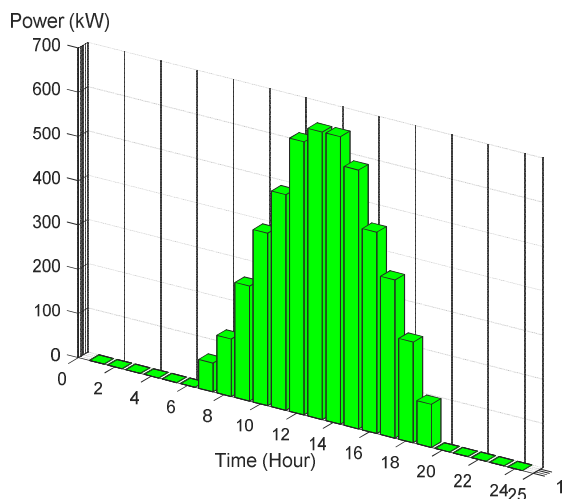
۴. سیستم تحت مطالعه

ریزشبه‌جدا تحت مطالعه به صورت ۱۰۰ درصد توسط انرژی تجدیدپذیر تأمین می‌گردد و بر روی این ریزشبه‌جدا انواع بارهای الکتریکی شامل بارهای شیفت‌پذیر، قابل قطع، قابل وقفه و ثابت متصل‌اند. همچنین ایستگاه تعویض باتری و پارکینگ خودروهای الکتریکی هم توسط این سیستم تغذیه می‌شود. جدول (۱) مشخصات ریزشبه‌جدا را نمایش می‌دهد. انرژی اولیه خودروهای ورودی به پارکینگ برابر ۱۵ کیلووات ساعت لحاظ می‌گردد.

جدول (۱): مشخصات تولید و مصرف ریزشبه‌جدا تحت مطالعه

مقدار	پارامتر و واحد
۶۵۰	توان نامی واحد خورشیدی (kW)
۵۰	ظرفیت خودروهای الکتریکی (kWh)
۵۰	توان سیستم شارژ خودروهای الکتریکی (kW)
۴۰۰	انرژی بار قابل شیفت (kWh)
۱۰۰	پیک توان بار قابل وقفه (kW)
۲۱۰	پیک توان بار ثابت (kW)
۲۰۰	پیک توان بارهای قابل قطع (kW)

پروفایل انرژی واحد خورشیدی به عنوان تنها منبع انرژی ریزشبه‌جدا در شکل (۲) نمایش داده شده است [۱۵]. ریزشبه‌جدا طی ساعات صبح و شب انرژی ندارد و نیاز است که در این ساعات از طریق مدیریت بارها، دشارژ خودروهای موجود در پارکینگ و دشارژ باتری‌ها ایستگاه تعویض باتری انرژی مورد نیاز خود را تأمین نماید.



شکل (۲): پروفایل انرژی تولیدی واحد خورشیدی

شکل (۳) پروفایل توان بارهای ثابت و قابل قطع را نمایش می‌دهد. همچنین بارهای قابل وقفه نیاز دارند حتماً ۵ ساعت متوالی کار کنند و حداکثر توان آن‌ها ۱۰۰ کیلووات لحاظ می‌گردد [۱۵].

$$P_{dps}^t = \sum_{v \in V^t} (P_{dev}^{v,t}) \quad \forall t \in T \quad (27)$$

۳.۴. مدل‌سازی ایستگاه تعویض باتری

در ایستگاه تعویض باتری، باتری خالی خودروهای الکتریکی وارد شده به ایستگاه با باتری‌های تعویضی که از قبل شارژ کامل شده‌اند جابه‌جا می‌گردد. باتری‌های خالی جدا شده از خودروهای الکتریکی معمولاً تا رسیدن خودرو بعدی شارژ کامل نمی‌گردد. بنابراین نیاز است تعداد باتری‌های موجود در ایستگاه تعویض باتری بیشتر از تعداد خودروهای ورودی پیش‌بینی شده باشد. بهره‌بردار ریزشبه‌جدا مجاز به دشارژ این باتری‌ها و پرداخت جریمه در مقابل آن است. روابط (۲۸) تا (۳۰) بیان می‌کنند که هر باتری در هر بازه زمانی صرفاً یا شارژ یا دشارژ می‌گردد. روابط (۳۱) تا (۳۳) ظرفیت شارژر موجود در ایستگاه و ظرفیت باتری هر خودرو را تعیین می‌کنند [۱۳].

$$u_{cbs}^{b,t} + u_{dbs}^{b,t} \leq 1 \quad \forall b \in B, t \in T \quad (28)$$

$$P_{cbs}^{b,t} = u_{cbs}^{b,t} \times B_m \quad \forall b \in B, t \in T \quad (29)$$

$$P_{dbs}^{b,t} = u_{dbs}^{b,t} \times B_m \quad \forall b \in B, t \in T \quad (30)$$

$$P_{cbs}^{b,t} \leq P_{bs}^{\max} \quad \forall b \in B, t \in T \quad (31)$$

$$P_{dbs}^{b,t} \leq P_{bs}^{\max} \quad \forall b \in B, t \in T \quad (32)$$

$$E_{bs}^{b,t} \leq E_{bs}^{\max} \quad \forall b \in B, t \in T \quad (33)$$

رابطه (۳۴) انرژی باتری در هر ساعت را نشان می‌دهد. رابطه (۳۵) شرایط تعویض باتری را مدل می‌نماید که در زمان تعویض، انرژی و توان شارژ و دشارژ باتری صفر می‌گردد و با یک باتری خالی جایگزین می‌شود. طبق رابطه (۳۶)، انرژی اولیه باتری‌ها در زمان شروع برنامه‌ریزی مدل می‌گردد. کل توان مصرفی و تولیدی ایستگاه تعویض باتری به ترتیب توسط روابط (۳۷) و (۳۸) محاسبه می‌شوند.

$$E_{bs}^{b,t} = E_{bs}^{b,t-1} + [P_{cbs}^{b,t} \times \eta_{bs} - P_{dbs}^{b,t}] \times pot^t \quad \forall b \in B, t \in T \quad (34)$$

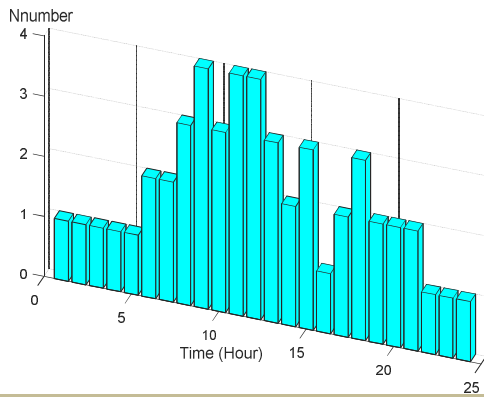
$$f t = t_{ari} \Rightarrow \begin{cases} E_{bs}^{b,t} = 0 \\ P_{cbs}^{b,t} = 0 \quad \forall b \in B \\ P_{dbs}^{b,t} = 0 \end{cases} \quad (35)$$

$$if t = 1 \Rightarrow E_{bs}^{b,t} = E_{bs}^{b,ini} \quad \forall b \in B \quad (36)$$

$$P_{ccs}^t = \sum_{b \in B} (P_{cbs}^{b,t}) \quad \forall t \in T \quad (37)$$

$$P_{dcs}^t = \sum_{b \in B} (P_{dbs}^{b,t}) \quad \forall t \in T \quad (38)$$

تعویض گردد، باتری خالی باید برای استفاده خودروهای بعدی شارژ گردد. معمولاً به خاطر طولانی بودن زمان شارژ، این باتری به محض رسیدن خودروی بعدی شارژ کامل و آماده استفاده نمی‌گردد. لذا باید تعداد باتری‌های موجود در ایستگاه بیشتر از تعداد خودروهای ورودی در هر لحظه باشد. باتری‌های با انرژی اولیه برابر ۵۰ کیلووات ساعت مدل می‌گردند.



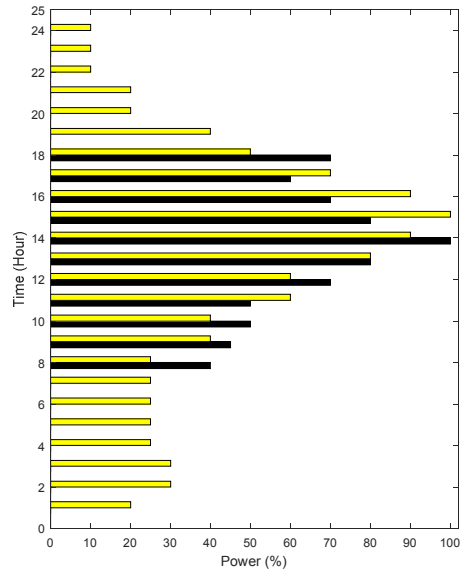
شکل (۴): تعداد خودرو ورودی به ایستگاه تعویض باتری در ساعت

جدول (۳) بیانگر قیمت فروش انرژی و جریمه‌های مرتبط با مدیریت انرژی است که توسط بهره‌بردار ریزشبهه اعمال می‌گردد. خودروهای پارک شده در پارکینگ به علت اینکه چندین ساعت از پارکینگ رایگان استفاده می‌کنند، جریمه کمتری دریافت می‌نمایند. همچنین جریمه قطعی بار بیشتر از جریمه دشارژ خودروها لحاظ شده است که این گزینه به عنوان آخرین راهکار مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

مقدار	پارامتر و واحد
۰/۲	قیمت فروش برق به مصرف‌کنندگان (\$/kWh)
۰/۲	جریمه دشارژ خودروهای موجود در پارکینگ (\$/kWh)
۰/۲۵	جریمه دشارژ باتری‌های ایستگاه شارژ (\$/kWh)
۰/۳۰	جریمه قطع بارهای پاسخ‌گو (\$/kWh)

۵. نتایج شبیه‌سازی عددی

شبکه تحت مطالعه در نرم‌افزار GAMS به صورت یک مدل خطی ترکیبی عدد صحیح مدل‌سازی و با استفاده از حل‌کننده CPLEX حل می‌گردد. جدول (۴) نشان‌دهنده درآمد، هزینه‌ها یا همان جریمه‌ها و سود خالص بهره‌بردار ریزشبهه طی یک روز است. به علت تأمین انرژی ریزشبهه به صورت کامل از انرژی رایگان خورشیدی، طبعاً سود روزانه قابل قبول است. البته در مطالعات بلندمدت می‌توان هزینه نصب و سرمایه‌گذاری واحدهای خورشیدی و... را نیز لحاظ نمود. اما در این تحقیق، صرفاً مطالعات کوتاه‌مدت روزانه و عملی بودن بهره‌برداری از ریزشبهه



شکل (۳): پروفایل توان بارهای ثابت و قابل قطع

میله زرد: بارهای قابل قطع؛ میله مشکی: بارهای ثابت

جدول (۲) زمان ورود-خروج خودروها از پارکینگ را نمایش می‌دهد که ۱۰ خودرو به عنوان الگوی ورودی پیش‌بینی شده و زمان حضور هر خودرو در پارکینگ با عدد ۱ نمایش داده شده است؛ مثلاً خودروی شماره ۱ ساعت ۱ وارد و در ساعت ۸ پارکینگ را ترک می‌کند. این خودرو باید در زمان ترک پارکینگ به صورت کامل شارژ شده باشد. بهره‌بردار ریزشبهه مجاز است در صورت نیاز خودروهای موجود در پارکینگ را به جای ۱۰۰ درصد تا ۸۰ درصد ظرفیت شارژ نموده و در مقابل، جریمه پرداخت نماید. راندمان باتری خودروها برابر ۱۰۰ درصد لحاظ می‌گردد.

جدول (۲): زمان حضور خودروها در پارکینگ (عدد ۱ نشان‌دهنده ساعت‌های حضور خودرو در پارکینگ)

ساعت	شماره خودرو									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۸ تا ۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۹	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۱۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰
۱۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰
۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰
۱۳ تا ۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۱۹ تا ۲۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱
۲۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱
۲۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱

شکل (۴) تعداد خودروهای وارد شده به ایستگاه تعویض باتری در هر ساعت شبانه‌روز را نمایش می‌دهد [۱۶]. برای تعویض باتری این خودروها، ۱۶ باتری برای تعویض در ایستگاه تعبیه شده است. به محض اینکه یک باتری پر با یک باتری خالی

دشارژ سایر منابع صفر یا بسیار محدود است. در سایر ساعات، ایستگاه تعویض باطری و پارکینگ خودرو به عنوان منابع تأمین انرژی ریزشبه‌جدا عمل نموده و انرژی مورد نیاز برای بارها و شارژ خودروها را تأمین می‌کنند.

جدول (۶): بارهای شبکه تحت برنامه مدیریت بار

ساعت	بار قابل وقفه (kW)	بار قابل شیفت (kW)	بارهای قابل قطع (kW)
۱	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۳۲/۵
۳ تا ۹	۰	۰	۰
۱۰	۰	۰	۶۲/۵
۱۱	۱۰۰	۰	۳۵/۴
۱۲	۱۰۰	۰	۱۰۰
۱۳	۱۰۰	۷۲/۵	۱۰۰
۱۴	۱۰۰	۲۰۰	۷۷۸
۱۵	۱۰۰	۱۱۷	۰
۱۶	۰	۰	۳۲/۲
۱۷	۰	۰	۱/۱
۱۸ تا ۱۹	۰	۰	۰
۲۰	۰	۱۰/۵	۷۳/۷
۲۱ تا ۲۴	۰	۰	۰

جدول (۶) توان مصرفی بارهای شبکه را نمایش می‌دهد که تحت برنامه مدیریت بار تنظیم شده‌اند. توان بار ثابت نمایش داده نشده است؛ زیر این بار طبق الگوی مصرفی تعریف شده یک توان ثابت را مصرف می‌کند و هیچ‌گونه مدیریتی روی انرژی آن صورت نگرفته است. طبق جدول (۶)، بارهای قابل وقفه در ۵ ساعت متوالی از ساعت ۱۱ تا ۱۵ تغذیه شده‌اند. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، این بارها نیاز است در صورت وصل شدن تا زمان اتمام وظیفه، به صورت پیوسته وصل باشند که نتایج شبیه‌سازی به درستی این امر را نمایش می‌دهد. همچنین زمان وصل بار به ساعاتی اوج انرژی خورشیدی منتقل شده است تا از این انرژی رایگان استفاده بهینه نماید. بارهای قابل شیفت کل انرژی مصرفی ۴۰۰ کیلووات ساعت نیاز دارند که طبق الگوی بهینه به دست آمده این انرژی در ساعاتی مختلف و عمدتاً در زمان‌های پیک انرژی خورشیدی تأمین شده است. بارهای قابل قطع نیز در زمان‌هایی که انرژی خورشیدی در دسترس نیست، تا حد ممکن با کاهش انرژی مواجه شده‌اند. مدیریت بهینه این بارها سبب شده که اولاً انرژی این بارها تا حد مقدور تأمین گردد و کمترین قطعی در این بارها رخ دهد؛ ثانیاً ریزشبه‌جدا بتواند به وظایف دیگر خود شامل تغذیه بارهای ثابت، شارژ کامل خودروهای ورودی به ایستگاه تعویض باطری و شارژ خودروهای

با ۱۰۰ درصد انرژی تجدیدپذیر هدف است. همان‌طور که مشخص است، به علت عدم وجود انرژی خورشید در ساعات‌های مختلف، ریزشبه‌جدا مجبور به استفاده از گزینه‌های مدیریت انرژی بارهای پاسخگو و همچنین دشارژ باطری‌های ایستگاه تعویض باطری و دشارژ خودروهای پارکینگ خودرو می‌باشد که این امر منجر به کاهش سود کلی بهره‌بردار شده است. اما استفاده از این گزینه‌ها سبب شده که ریزشبه‌جدا بتواند ۲۴ ساعته فعال باشد.

جدول (۴): درآمد و هزینه‌های بهره‌بردار ریزشبه‌جدا

پارامتر و واحد	مقدار بهینه
درآمد فروش انرژی (\$/day)	۱۱۲۶/۶
جریمه دشارژ خودروهای پارکینگ (\$/day)	۷۲/۱
جریمه دشارژ باطری‌های تعویضی (\$/day)	۷۵
جریمه قطع بار (\$/day)	۴۱۰/۷
سود خالص (\$/day)	۵۶۸/۸

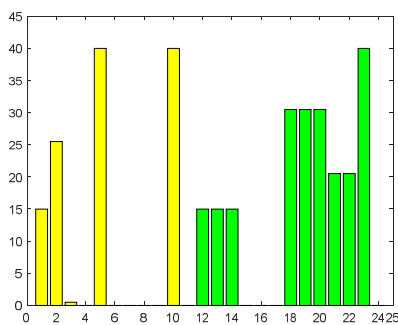
جدول (۵): توان تولیدی خورشیدی، ایستگاه شارژ و پارک خودرو

ساعت	توان خورشیدی (kW)	ایستگاه تعویض باطری (kW)	پارکینگ خودرو (kW)
۱	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۳۰
۳	۰	۰	۴۰
۴	۰	۴۸	۰/۵
۵	۰	۴۰	۰
۶	۰	۰	۸۰
۷	۶۵	۵۰	۳۰
۸	۱۳۰	۶۰	۰
۹	۲۶۰	۰	۱۵
۱۰	۳۹۰	۰	۴۵
۱۱	۴۸۷/۵	۰	۰
۱۲	۶۱۷/۵	۰	۰
۱۳	۶۵۰	۰	۰
۱۴	۶۵۰	۰	۰
۱۵	۵۸۵	۰	۳۰
۱۶	۴۵۵	۰	۰
۱۷	۳۵۷/۵	۰	۰
۱۸	۲۷۷/۵	۰	۰
۱۹	۹۷/۵	۲/۵	۰
۲۰	۰	۰	۴۰
۲۱	۰	۰	۵۰
۲۲	۰	۴۰	۰
۲۳	۰	۵۹/۵	۰
۲۴	۰	۰	۰

جدول (۵) نشان‌دهنده توان تولیدی ریزشبه‌جدا طی ۲۴ ساعت شامل توان تولیدی سلول‌های خورشیدی، توان دشارژ شده از ایستگاه تعویض باطری و توان دشارژ شده از پارکینگ خودروهای الکتریکی است. همان‌طور که مشخص است، در ساعات‌هایی که انرژی خورشیدی در دسترس است، مثل ساعات ۷ تا ۱۹، انرژی

داخل پارکینگ برسد.

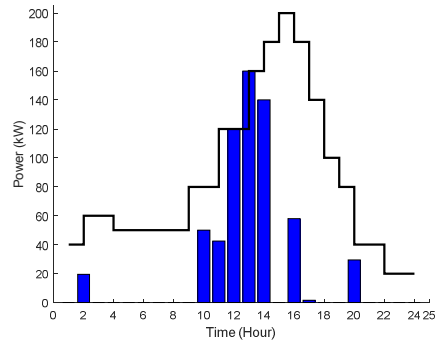
ساعت ۱۵ انرژی خودرو دشارژ شده و به شبکه تزریق می‌گردد و لذا باتری خودرو خالی می‌شود. سپس در ساعت ۱۷ خودرو تا ۴۰ کیلووات ساعت شارژ می‌شود و این انرژی را تا ساعت ۱۹ نگه می‌دارد. در ساعت ۲۰ مجدد خودرو کاملاً دشارژ شده و از انرژی آن برای مدیریت توان شبکه استفاده گردیده است. در نهایت، خودرو در ساعت ۲۳ کاملاً شارژ شده و در ساعت ۲۴ با ظرفیت باتری ۸۰ درصد شارژ کامل پارکینگ را ترک می‌نماید. انرژی خودروهای ۴ و ۹ نیز در شکل (۷) نمایش داده شده و مشخص است این خودروها طی زمان حضور در پارکینگ چندین بار عمل دشارژ را تجربه و در نهایت با ۸۰ درصد ظرفیت کامل یعنی ۴۰ کیلووات ساعت پارکینگ را ترک می‌نمایند.



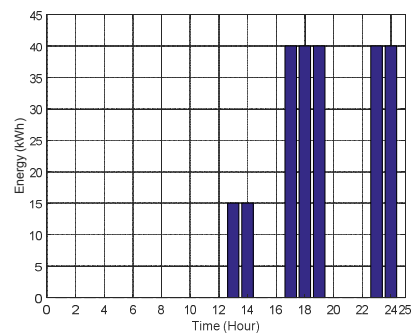
شکل (۷): انرژی خودروهای شماره ۴ و ۹
میله زرد: خودرو؛ میله سبز: خودرو ۹

جدول (۷) جزئیات عملکرد ایستگاه تعویض باتری در تأمین انرژی خودروهای ورودی را نمایش می‌دهد. ستون دوم تعداد خودرو ورودی در هر ساعت را نشان می‌دهد. همچنین انرژی خودروها در ساعت صفر بیانگر انرژی اولیه است که برابر شارژ کامل یعنی ۵۰ کیلووات ساعت لحاظ شده است. در جدول (۷)، باتری‌های جابه‌جا شده در هر ساعت به صورت رنگی مشخص شده‌اند. نکته قابل ذکر این است که هر باتری‌ای که قرار است تعویض گردد و بر روی یک خودرو ورودی نصب شود، باید حتماً در ساعت قبل شارژ کامل شده باشد. برای مثال، در ساعت ۱ فقط یک خودرو وارد ایستگاه می‌شود و باتری شماره ۱ بر روی آن نصب می‌گردد. باتری شماره ۱ در ساعت قبل (یعنی ساعت صفر) شارژ کامل بوده است، لذا می‌تواند بر روی خودرو نصب گردد. باتری خالی خودرو نیز جایگزین باتری ۱ گردیده است؛ لذا باتری شماره ۱ در این ساعت خالی از انرژی شده و به صورت یک باتری خالی مدل شده است و در ساعات بعدی می‌تواند مجدد شارژ گردد. باتری شماره ۱ مجدداً در ساعت ۸ با یک خودرو تعویض شده که مشخص است در ساعت قبلی یعنی ۷ کاملاً شارژ بوده است و از ساعت ۸ و مابعد نیز به صورت خالی

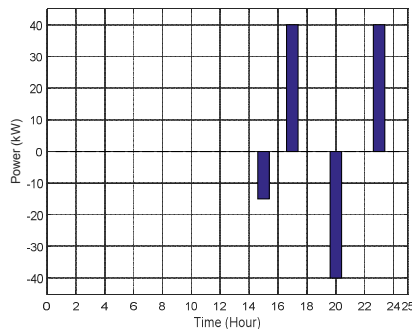
شکل (۵) نشان‌دهنده مقدار توان نامی بارهای قابل قطع و توان تأمین شده است. همان‌طور که مشخص است در اکثر ساعاتی که انرژی خورشیدی صفر است، مانند طول شب و ابتدای روز، این بارها قطع و یا توان آن‌ها کاهش یافته است. در ساعات‌هایی که انرژی خورشیدی زیاد است، برنامه سعی نموده این بارها را تا حد ممکن تأمین نموده تا جریمه کمتری پرداخت نماید.



شکل (۵): پروفیل توان بارهای قابل قطع و توان تأمین شده
خط مشکی: پروفیل توان بار؛ میله آبی: توان تأمین شده



الف. انرژی



ب. توان شارژ (قسمت مثبت) و دشارژ (قسمت منفی)

شکل (۶): انرژی و توان شارژ و دشارژ خودروی شماره ۱۰

انرژی و فرایند شارژ-دشارژ خودروی شماره ۱۰ به‌عنوان نمونه، به ترتیب در شکل (۶-الف) و (۶-ب) ارائه شده است. این خودرو در ساعت ۱۳ وارد پارکینگ می‌شود و در ساعت ۲۴ آن را ترک می‌نماید. انرژی اولیه خودرو ۱۵ کیلووات ساعت است. در

شارژ کامل بوده‌اند. از ساعت ۱۲ به بعد، باطری‌های خالی جایگزین باطری‌های شماره ۴ تا ۷ شده‌اند که در ادامه، مجدد شارژ و برای جابه‌جایی بعدی آماده شده‌اند. نتایج کامل بیان‌شده برای کل ساعت‌های شبانه‌روز مشخص می‌کند که عملکرد جابه‌جایی باطری به صورت بسیار بهینه و مناسبی انجام شده و باطری‌های خالی مجدداً شارژ شده‌اند.

مدل شده است. این باطری برای عملکرد مناسب در تعویض ساعت ۸ نیاز به شارژ قبلی داشته که این امر در ساعت‌های ۴ تا ۷ رخ داده است. برای نمونه دیگر می‌توان ساعت ۱۲ را مثال زد که ۴ خودرو وارد ایستگاه شده‌اند و باطری‌های شماره ۴ تا ۷ بر روی این خودروها نصب شده است. این باطری‌ها در ساعت قبلی یعنی ۱۱

جدول (۷): عملکرد ایستگاه تعویض باطری در جابه‌جایی باطری خودروها

تعداد خودرو	شماره باطری ایستگاه تعویض باطری									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۰	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
۱	۱	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
۲	۱	۰	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
۳	۱	۰	۰	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
۴	۱	۴۸	۰	۰	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
۵	۱	۴۸	۰	۰	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
۶	۲	۴۸	۰	۰	۰	۵۰	۰	۰	۵۰	۵۰
۷	۲	۵۰	۵۰	۰	۴۳	۵۰	۵۰	۰	۰	۵۰
۸	۳	۰	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰	۹/۵	۰
۹	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰
۱۰	۳	۵۰	۵۰	۵۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰
۱۱	۴	۰	۰	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰	۰
۱۲	۴	۵۰	۰.۵	۵۰	۰	۰	۰	۰	۵۰	۵۰
۱۳	۳	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	۲	۰	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۳	۰	۵۰	۰	۰	۰	۵۰	۰	۵۰	۰
۱۶	۱	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰	۵۰	۵۰	۰
۱۷	۲	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰	۰	۵۰
۱۸	۳	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰	۰
۱۹	۲	۰	۰	۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۰	۵۰
۲۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰	۵۰	۰	۵۰
۲۱	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰	۵۰
۲۲	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰
۲۳	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰
۲۴	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول (۸): تعادل توان تولیدی و مصرفی در شبکه

توان ایستگاه باطری (kW)	توان پارکینگ (kW)	توان خورشیدی (kW)	توان بار (kW)	ساعت
۰	۳۰	۰	۳۰	۱
۳۰	۵۰	۶۵	۱۴۵	۷
۰	۰	۶۵۰	۶۵۰	۱۴
۴۰	۰	۰	۴۰	۲۲

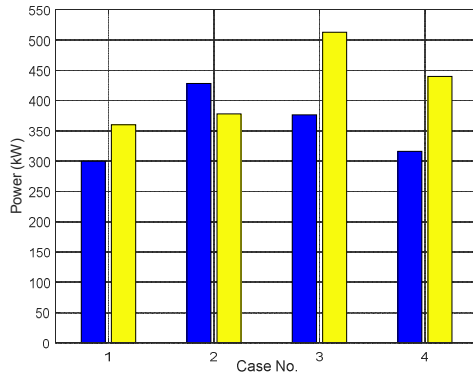
۱-۵. رفتار شبکه در برابر قطع و کاهش انرژی

خورشید

در ساعاتی که انرژی خورشیدی به صورت طبیعی صفر است مثل شب، برنامه‌ریزی توانست با بهینه‌سازی منابع و بارهای مختلف توان مورد نیاز را تأمین و بارها را تغذیه و خودروها را

نحوه تعادل توان‌های تولیدی و مصرفی ریزشبه‌جدا در جدول

(۸) نمایش داده شده است. در ساعت ۱ که انرژی خورشیدی صفر است، تمام توان بارها توسط دشارژ خودروهای پارکینگ خودرو تأمین می‌گردد. در ساعت ۷ انرژی خورشیدی افزایش یافته، اما هنوز برای تأمین توان بارها کافی نیست؛ لذا بار توسط منابع خورشیدی، پارکینگ خودرو و ایستگاه تعویض باطری تأمین شده است. در ساعت ۱۴ انرژی خورشیدی در اوج می‌باشد و بدون نیاز به سایر منابع به‌تنهایی بار را تأمین نموده است. در ساعت ۲۲ مجدد انرژی خورشیدی از دست رفته و تأمین بارها بر عهده ایستگاه تعویض باطری بوده است.



شکل (۸): توان دریافتی از ایستگاه تعویض باتری و ایستگاه پارک خودرو در حالت قطعی انرژی خورشید طی روز میله زرد: ایستگاه تعویض باتری؛ میله آبی: پارکینگ خودرو

۶. نتیجه گیری

در این مقاله یک ریزشبه جدا از شبکه سراسری با تغذیه ۱۰۰٪ انرژی تجدیدپذیر شبیه سازی شد. این ریزشبه با هدف تأمین انرژی ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی مبتنی بر تعویض باتری، پارکینگ خودرو الکتریکی و بارها طراحی گردید. بارهای قابل قطع، غیرقابل قطع، قابل شیفت و قابل وقفه مدل و برنامه مدیریت بار بر روی آن‌ها اعمال گردید.

به علت فقدان انرژی خورشید طی بسیاری از ساعات، ریزشبه مجبور به مدیریت انرژی بارها و دشارژ باتری‌های ایستگاه تعویض باتری و دشارژ خودروهای پارکینگ خودرو می‌گردد که جریمه پرداختی به‌خاطر این موارد حدود ۵۰٪ درآمد روزانه بهره‌بردار شبکه را شامل می‌شود. برنامه‌ریزی پیشنهادی به‌گونه‌ای عمل نمود که در ساعات‌های وجود انرژی خورشیدی مثل ساعات ۷ تا ۱۹، انرژی دشارژ سایر منابع صفر یا بسیار محدود گردد. در سایر ساعات ایستگاه تعویض باتری و پارکینگ خودرو به‌عنوان منابع تأمین‌کننده انرژی ریزشبه عمل نموده و انرژی مورد نیاز را برای بارها و شارژ خودروها تأمین می‌کنند. بارهای غیرقابل قطع طبق تعریف شده در تمام ساعات تأمین توان شدند. بارهای قابل وقفه طبق الگوی تعریف شده، در ۵ ساعت متوالی از ساعت ۱۱ تا ۱۵ تغذیه شده است. انرژی ۴۰۰ کیلووات ساعت بارهای قابل شیفت عمدتاً در زمان‌های پیک انرژی خورشیدی تأمین گردید. بارهای قابل قطع نیز در زمان‌هایی که انرژی خورشیدی در دسترس نیست، تا حد ممکن از طریق کاهش انرژی مدیریت شدند.

در ساعاتی که انرژی خورشید صفر است، خودروهای الکتریکی و باتری‌های ایستگاه شارژ به‌صورت مناسبی دشارژ

شارژ نماید. اما اگر در طول روز انرژی خورشیدی قطع گردد یا کاهش یابد، این امر ممکن است سبب عدم تعداد توان و کمبود انرژی در شبکه گردد و نتیجه آن قطعی بارها یا عدم توانایی در شارژ خودروها و تعویض باتری خواهد بود. برنامه پیشنهادی به‌علت بهینه‌سازی تمام منابع و بارها، می‌تواند با این اتفاق نیز به‌خوبی مواجهه نماید. جدول (۹) خروجی برنامه تحت سه سناریوی مختلف کاهش انرژی خورشیدی را نمایش می‌دهد. مشخص است که با کاهش انرژی خورشید در کل شبانه‌روز، برنامه توانسته عملکرد شبکه را ممکن نموده و صرفاً هزینه قطع بارها افزایش یافته است. نکته مهم این است که برنامه از فروپاشی کل شبکه جلوگیری نموده و کاهش انرژی در شبکه را صرفاً با قطع بار مدیریت نموده است؛ درحالی‌که تمام خودروها در زمان مقرر کاملاً شارژ شده، ایستگاه تعویض باتری در طی ۲۴ ساعت به کار خود ادامه داده و بارهای حساس تأمین انرژی شده‌اند.

جدول (۹): عملکرد تحت سناریوهای مختلف کاهش انرژی

خورشید			
۸۵	۹۰	۱۰۰	درصد انرژی خورشیدی
۱۰۲۴	۱۰۸۷	۱۱۲۶	درآمد فروش انرژی (\$/day)
۶۹	۸۲	۷۲	جریمه دشارژ خودروهای پارکینگ (\$/day)
۷۵	۷۵	۷۵	جریمه دشارژ باتری‌های تعویضی (\$/day)
۵۵۹	۴۵۸	۴۱۰	جریمه مدیریت بار (\$/day)
۳۲۰	۴۴۴	۵۶۸	سود خالص (\$/day)

شکل (۸) عملکرد شبکه تحت قطعی انرژی خورشید طی روز را نمایش می‌دهد. در این شکل، چهار حالت به‌صورت زیر مدل‌سازی شده‌اند:

حالت ۱: حالت نامی بدون قطعی طی روز؛

حالت ۲: قطع کامل و صفر شدن توان خورشیدی در ساعت

؛۱۸

حالت ۳: قطع کامل و صفر شدن توان خورشیدی در ساعت

؛۱۷

حالت ۴: قطع کامل و صفر شدن توان خورشیدی در ساعت

؛۱۶

همان‌طور که مشخص است، طی این قطعی‌ها شبکه عملکرد خود را ادامه داده است. برنامه‌ریزی پیشنهادی توانسته است با تأمین توان از ایستگاه تعویض باتری و ایستگاه پارک خودرو کمبود انرژی را تأمین و بارها را تغذیه و از فروپاشی شبکه جلوگیری نماید.

P_{con}^t	توان مصرفی کل سیستم (kW)
P_{cur}^t	توان مصرفی بارهای پاسخ‌گو (kW)
P_{ccs}^t	توان شارژ کل ایستگاه تعویض باتری (kW)
P_{eps}^t	توان شارژ کل ایستگاه پارک خودرو (kW)
P_{curf}^t	توان نامی بارهای پاسخ‌گو (kW)
$P_{cev}^{v,t}$	توان شارژ خودرو الکتریکی (kW)
$P_{cbs}^{b,t}$	توان شارژ باتری تعویضی (kW)
P_{dps}^t	توان دشارژ کل ایستگاه پارک خودرو (kW)
P_{dcs}^t	توان دشارژ کل ایستگاه تعویض باتری (kW)
$P_{dev}^{v,t}$	توان دشارژ خودرو الکتریکی (kW)
$P_{dbs}^{b,t}$	توان دشارژ باتری تعویضی (kW)
P_{ev}^{max}	توان نامی شارژر خودرو الکتریکی (kW)
P_{fix}^t	توان نامی بارهای ثابت (kW)
P_{int}^t	توان مصرفی بار قابل وقفه (kW)
P_{int}^{max}	پیک توان بار قابل وقفه (kW)
pot^t	طول هر بازه زمانی در برنامه‌ریزی (ساعت)
P_{pv}^t	توان تولیدی سیستم خورشیدی (kW)
P_{shi}^t	توان مصرفی بارهای قابل شیفت (kW)
P_{shi}^{max}	پیک توان بار قابل شیفت (kW)
t_{ari}	زمان ورود خودرو به ایستگاه تعویض باتری
t_{in}^v	زمان ورود خودرو به پارکینگ
t_{out}^v	زمان خروج خودرو از پارکینگ
$u_{cev}^{v,t}$	متغیر باینری مرتبط با شارژ خودرو
$u_{cbs}^{b,t}$	متغیر باینری مرتبط با شارژ باتری تعویضی
$u_{dev}^{v,t}$	متغیر باینری مرتبط با دشارژ خودرو
$u_{dbs}^{b,t}$	متغیر باینری مرتبط با دشارژ باتری تعویضی
u_{int}^t	متغیر باینری مرتبط با بار قابل وقفه
z_1	درآمد فروش انرژی به بارها (\$/day)
z_2	هزینه دشارژ خودروهای الکتریکی (\$/day)
z_3	هزینه دشارژ باتری‌های تعویضی (\$/day)
z_4	هزینه قطع بارها (\$/day)
z_5	سود خالص در یک روز (\$/day)

شدند تا عدم دسترسی به انرژی خورشید جبران گردد. مثلاً خودروی شماره ۱۰ در ساعت ۲۰ کاملاً دشارژ و ۴۰ کیلووات توان به شبکه تزریق می‌کند. در ایستگاه تعویض باتری نیز برنامه‌ریزی به گونه‌ای انجام شد که باتری هر خودرو ورودی با یک باتری شارژ کامل تعویض گردید. برای نمونه در ساعت ۱۲ تعداد ۴ خودرو وارد ایستگاه شدند و باتری‌های شماره ۴ تا ۷ بر روی آن‌ها نصب شده است. این ۴ باتری در ساعت قبلی یعنی ۱۱ شارژ کامل بوده‌اند. تحت سه سناریوی کاهش یا قطعی انرژی خورشید، برنامه‌ریزی به‌خوبی عملکرد شبکه را مقدور نمود و صرفاً هزینه قطع بارها افزایش یافت.

فهرست علائم

ایندها و مجموعه‌ها	
t, T	ایندها و مجموعه بازه‌های زمانی
v, V	ایندها و مجموعه خودروهای الکتریکی
b, B	ایندها و مجموعه باتری‌های تعویضی
متغیرها و پارامترها	
C_{con}^t	قیمت فروش انرژی به مصرف‌کنندگان (\$/kWh)
C_{cur}^t	جریمه دشارژ انرژی از باتری‌های تعویضی (\$/kWh)
C_{dps}^t	جریمه دشارژ انرژی از خودروهای الکتریکی (\$/kWh)
C_{dcs}^t	جریمه قطع بارهای پاسخ‌گو (\$/kWh)
$E_{bs}^{b,t}$	انرژی باتری تعویضی (kWh)
$E_{bs}^{b,ini}$	انرژی اولیه باتری تعویضی (kWh)
E_{bs}^{max}	ظرفیت باتری تعویضی (kWh)
$E_{ev}^{v,t}$	انرژی خودرو الکتریکی (kWh)
$E_{ev}^{v,ini}$	انرژی اولیه خودرو الکتریکی (kWh)
E_{ev}^{max}	ظرفیت خودرو الکتریکی (kWh)
E_{shi}	انرژی بار قابل شیفت (kWh)
k_{cur}^t	ضریب قطع بارهای پاسخ‌گو
k_{ev}^v	ضریب شارژ خودرو الکتریکی
$k_{ev}^{v,min}$	حد پایین شارژ خودرو الکتریکی
k_{int}	تعداد بازه زمانی مجاز برای عملکرد بار قابل وقفه
P_{bs}^{max}	توان نامی شارژر باتری تعویضی (kW)

مراجع

- [1] Hansen, K., Breyer, C., Lund, H., "Status and perspectives on 100% renewable energy systems", Energy, Vol. 175, pp. 471-480, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.092>.
- [2] Tostado-Véliz, M., Rezaee Jordehi, A., Amir Mansouri, S., Jurado, F., "Day-ahead scheduling of 100% isolated communities under uncertainties through a novel stochastic-robust model", Applied Energy, Vol. 328, pp. 120257, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120257>.
- [3] Hai, T., Ashraf Ali, M., Dhahad, H. A., Alizadeh, A. a., Sharma, A., Fahad Almojil, S., Ibrahim Almohana, A., Fahmi Alali, A., Wang, D., "Optimal design and transient simulation next to environmental consideration of net-zero energy buildings with green hydrogen production and energy storage system", Fuel, Vol. 336, pp. 127126, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127126>.
- [4] Liao, S., Liu, H., Liu, B., Zhao, H., Wang, M., "An information gap decision theory-based decision-making model for complementary operation of hydro-wind-solar system considering wind and solar output uncertainties", Journal of Cleaner Production, Vol. 348, pp. 131382, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131382>.
- [5] Mehrjerdi, H., Saboori, H., Jadid, S., "Power-to-gas utilization in optimal sizing of hybrid power, water, and hydrogen microgrids with energy and gas storage", Journal of Energy Storage, Vol. 45, pp. 103745, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103745>.
- [6] Gharai, M. A., Hooshmand, R.-A., Nosratabadi, S. M., "Eco-Environmental uncertain management of various energy hubs within a microgrid concentrated on demand response, intelligent parking lots, and power-to-gas unit effects", International Journal of Energy Research, Vol. 2023, pp. 3173099, 2023, <https://doi.org/10.1155/2023/3173099>.
- [7] Mehrjerdi, H., Hemmati, R., Mahdavi, S., Shafiekhah, M., Catalao, J. P., "Multi-Carrier microgrid operation model using stochastic mixed integer linear programming", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 18, No. 7, pp. 4674 - 4687, 2022.
- [8] Firouzmakan, P., Hooshmand, R.-A., Bornapour, M., Khodabakhshian, A., "A comprehensive stochastic energy management system of micro-CHP units, renewable energy sources and storage systems in microgrids considering demand response programs", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 108, pp. 355-368, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.001>.
- [9] Hashemian, S. M., Khodabakhshian, A., Gholipour, M., Esmaili, M. R., Malekpour, M., "Approach for prediction of cold loads considering electric vehicles during power system restoration", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 14, No. 22, pp. 5249-5260, 2020, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2020.0046>.
- [10] Mehrjerdi, H., "Off-grid solar powered charging station for electric and hydrogen vehicles including fuel cell and hydrogen storage", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, No. 23, pp. 11574-11583, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.158>.
- [11] Uribe, A., Fernández-Montoya, M., Vargas, J., Osorio-Gómez, G., Montoya, A., "Discrete event simulation for battery-swapping station sizing for hybrid and electric motorcycles", Journal of Cleaner Production, Vol. 390, pp. 136155, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136155>.
- [12] Ostadi Azari, T., Sohrabi Tabar, V., Tohidi, S., "Stochastic multi-objective expansion of renewable resources in distribution systems incorporating responsive loads towards achieving zero energy structure", International Journal of Energy Research, Vol. 46, No. 7, pp. 9667-9683, 2022, <https://doi.org/10.1002/er.7837>.
- [13] Mehrjerdi, H., "Resilience oriented vehicle-to-home operation based on battery swapping mechanism", Energy, Vol. 218, pp. 119528, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119528>.
- [14] Mehrjerdi, H., Bornapour, M., Hemmati, R., Ghiasi, S. M. S., "Unified energy management and load control in building equipped with wind-solar-battery incorporating electric and hydrogen vehicles under both connected to the grid and islanding modes", Energy, Vol. 168, pp. 919-930, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.131>.
- [15] Mehrjerdi, H., Hemmati, R., Shafiekhah, M., Catalão, J. P. S., "Zero energy building by multicarrier energy systems including hydro, wind, solar, and hydrogen", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 17, No. 8, pp. 5474-5484, 2021, <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3034346>.
- [16] Mehrjerdi, H., Hemmati, R., "Electric vehicle charging station with multilevel charging infrastructure and hybrid solar-battery-diesel

generation incorporating comfort of drivers",
Journal of Energy Storage, Vol. 26, pp. 100924,

2019, <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100924>.