

## Optimal Planning of Renewable Energy Management with Energy Storage for an Industrial Microgrid by a New Hybrid Model Based on Deep Machine Learning in Golgohar Industrial and Mining Complex

Farshid Kinia,<sup>1\*</sup> Gholamreza Memarzadeh,<sup>2</sup> Reza Khaksarpour,<sup>3</sup> Ali Abbasinia<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Energy Management and Optimization, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. [f.keynia@kgut.ac.ir](mailto:f.keynia@kgut.ac.ir)

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran. [g.meamarzadeh@vru.ac.ir](mailto:g.meamarzadeh@vru.ac.ir)

<sup>3</sup> Research and Technology Management, Golgohar Sirjan Mining and Industrial Company, Sirjan, Iran. [R.khaksarpour@gmail.com](mailto:R.khaksarpour@gmail.com)

<sup>4</sup> Renewable Energy Management, Golgohar Sirjan Mining and Industrial Company, Sirjan, Iran. [a.abbasinia@gmail.com](mailto:a.abbasinia@gmail.com)

### Keywords:

net load estimation, deep learning, solar generators, energy storage, neural networks.

### Original Research Article

### Paper History:

Received: 04/08/2025

Revise: 18/11/2025

Accepted: 01/02/2026

**Abstract:** Renewable energy sources have attracted much attention as a priority option to reduce costs and reduce greenhouse gas emissions from fossil fuels. However, their use causes uncertainty and reduces reliability in industries. Moreover, rapid fluctuations in renewable energy generation can strain the grid infrastructure and require investment in advanced grid management systems and energy storage solutions to maintain system stability and reliability. This paper proposes a comprehensive framework for optimizing the performance and profitability of a microgrid. To this end, first it used data mining techniques to accurately predict net load and electricity price through using appropriate inputs for a hybrid forecasting model with cascade neural network architecture and deep learning.

**How to cite this article:** Kinia, F., Memarzadeh, Gh., Khaksarpour, R., Abbasinia, A., "Optimal Planning of Renewable Energy Management with Energy Storage for an Industrial Microgrid by a New Hybrid Model Based on Deep Machine Learning in Golgohar Industrial and Mining Complex", Energy Engineering and Management, Vol. 15, No. 2, PP. 42-55, 2025. <https://doi.org/10.22052/EEM.2026.257360.1137>

© 2023 University of Kashan Press.

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



### Extended Abstract

#### Introduction

Renewable energy sources play a vital role in electricity generation in many countries around the world. As a result, the share of renewable energy in the overall electricity demand has become significant. Growing concerns about reducing carbon emissions

and rising the costs of fossil fuels such as natural gas, oil, and coal emphasize the need for renewable alternatives. However, integrating a significant amount of wind energy into power systems poses significant operational challenges. The main issue with renewable energy generation—especially

wind and solar—compared to traditional energy sources is its inherent uncertainty. An effective approach for reducing generation deviation is the use of energy storage resources; therefore, generation deviation can be minimized by integrating renewable energy sources with other energy storage systems in a smart microgrid. The presence of storage resources that can store and discharge electrical energy effectively helps reduce deviations in renewable energy generation. In recent years, researchers have been investigating how to optimize the capacity of energy storage systems as the costs of installing and operating these systems sometimes exceed the benefits of using them. This has made determining the appropriate size of these devices a major challenge in practical applications. Therefore, recent research has focused on using these systems as a complement to other energy generation methods.

### Materials and Methods

In this paper, the industrial microgrid of Golgohar Company, as an industrial company, was invested in an energy storage system to increase performance and to reduce operating costs. The use of smart microgrids was to use the ability to collect data, refine data, analyze data, and conclude decision-making and decision-making, control and management of energy and other features of this type of network. The widespread use of smart grids and microgrids in energy systems has led to the term microgrid being used as a smart microgrid in many cases because intelligence is an integral part of modern energy systems. In particular, a new model was developed to determine the optimal size of an energy storage system suitable for supporting a smart microgrid. This paper presents a comprehensive approach to ensure the efficient and accurate operation of the microgrid, focusing on net load and electricity price as well as optimizing storage capacity and scheduling. The sum of the innovations of the aforementioned article include: considering the net load and

predicting it for the next day, predicting the price of electric energy, determining the optimal storage capacity using the CBSA optimizer method, and determining the optimal charging and discharging strategy for the determined capacity using precise mathematical optimization methods.

### Results

Based on the results obtained, the proposed algorithm achieved an average prediction accuracy of about 6% for net load prediction and 7% for electricity price prediction, which demonstrated its effectiveness in modeling the inherent complexities of these variables. Furthermore, this paper examined the impact of energy storage on microgrid profitability. The results showed that the incorporation of an optimally sized energy storage could significantly increase the microgrid revenue and highlight the economic benefits of energy storage in mitigating the challenges of renewable energy integration.

### Discussion and Conclusion

As different parts of the power system increasingly interest renewable energy sources, power system operators may face higher costs due to variability and uncertainty associated with short-term fluctuations in renewable energy generation. Various strategies can be used to mitigate these challenges. One of strategies is the use of energy storage systems. Consequently, based on the net load and electricity price, determining the optimal scheduling and operation of the energy storage system is essential to enhance the performance of the microgrid. Given the significant costs of installing and maintaining energy storage systems, it is crucial to accurately determine their optimal economic capacity. To improve performance and minimize costs, this paper has proposed a microgrid model that incorporates energy storage systems. To ensure successful and accurate operation of the microgrid, this paper has introduced a method that integrates the net load and electricity price with storage capacity and optimal scheduling. A two-level structure

was used to solve the optimization problem. At the first level, the optimizer determined the optimal storage capacity with the CBSA algorithm. At the second level, after establishing the optimal storage capacity for the energy storage, its optimal charging and discharging strategy was determined using the CPLEX method in the YALMIP framework. The results showed that the

integration of energy storage helps increase the profitability of the microgrid by \$211. To complete the research in the future, the efficiency and complexity of the model can be increased by using methods such as robust optimization to cover severe uncertainties in the energy system and using electric parking lots and examining other storage technologies in the proposed model.

## برنامه‌ریزی بهینه مدیریت انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز برای یک ریزشبکه هوشمند صنعتی با استفاده از مدل ترکیبی جدید مبتنی بر آموزش عمیق ماشین

فرشید کی‌نیا،<sup>۱\*</sup> غلامرضا معمارزاده،<sup>۲</sup> رضا خاکسارپور،<sup>۳</sup> علی عباسی‌نیا<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی،

دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، f.keynia@kgut.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه ولیعصر (عج)، رفسنجان، ایران، g.meamarzadeh@vru.ac.ir

<sup>۳</sup> مدیریت تحقیقات و فناوری، شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان، کرمان، ایران، r.khaksarpour@gmail.com

<sup>۴</sup> مدیریت انرژی‌های تجدیدپذیر، شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان، کرمان، ایران، a.abbasinia@gmail.com

واژه‌های کلیدی:

تخمین بار خالص،

یادگیری عمیق،

مولدهای خورشیدی،

ذخیره‌سازهای انرژی،

شبکه‌های عصبی.

چکیده: منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان یک گزینه اولویت‌دار برای کاهش هزینه و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از سوخت‌های فسیلی توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. با این حال، استفاده از آن‌ها باعث عدم قطعیت و کاهش قابلیت اطمینان در صنایع می‌شود. علاوه بر این، نوسانات سریع در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند زیرساخت‌های شبکه را تحت فشار قرار دهد و به سرمایه‌گذاری در سیستم‌های مدیریت شبکه پیشرفته و راه‌حل‌های ذخیره انرژی برای حفظ ثبات و قابلیت اطمینان سیستم نیاز دارد. در این مقاله یک چارچوب جامع برای بهینه‌سازی عملکرد و سودآوری یک ریزشبکه هوشمند پیشنهاد می‌شود. برای این منظور، ابتدا با استفاده از روش‌های انتخاب مشخصه‌های مناسب برای مدل پیش‌بینی ترکیبی با معماری شبکه‌های عصبی آبخاری و یادگیری عمیق، به‌طور دقیق بار خالص و قیمت برق را پیش‌بینی می‌شود. براساس نتایج به‌دست آمده، الگوریتم پیشنهادی به‌طور میانگین به‌دقت پیش‌بینی قابل توجهی برای پیش‌بینی بار خالص و قیمت برق دست می‌یابد که اثربخشی آن را در مدل‌سازی پیچیدگی‌های ذاتی این متغیرها نشان می‌دهد. علاوه بر این، این مقاله تأثیر ذخیره‌ساز انرژی را بر سودآوری ریزشبکه هوشمند بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب یک ذخیره‌ساز انرژی با اندازه بهینه می‌تواند درآمد ریزشبکه هوشمند را تا میزان قابل توجهی افزایش دهد و مزایای اقتصادی ذخیره‌سازی انرژی را در کاهش چالش‌های ناشی از یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر برجسته کند.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

## ۱. مقدمه

منابع انرژی تجدیدپذیر از آنجاکه نقش حیاتی در تولید برق در بسیاری از کشورهای جهان دارند، توانسته‌اند سهم قابل توجهی در تقاضای کلی برق را به خود اختصاص دهند. نگرانی‌های فزاینده پیرامون کاهش انتشار کربن و افزایش هزینه‌های سوخت‌های فسیلی، مانند گاز طبیعی، نفت و زغال‌سنگ، بر نیاز به جایگزین‌های تجدیدپذیر تأکید می‌کند. باین حال، نفوذ حجم قابل توجهی از انرژی تجدیدپذیر - به‌ویژه باد و خورشید - در سیستم‌های قدرت، چالش‌های عملیاتی قابل توجهی را ایجاد می‌کند. مسئله اصلی تولید انرژی تجدیدپذیر - به‌ویژه باد و خورشید - در مقایسه با منابع انرژی سنتی، عدم قطعیت ذاتی آن است. یک رویکرد مؤثر برای کاهش انحراف تولید ناشی از ناپیچینی، استفاده از منابع ذخیره انرژی است؛ بنابراین، انحراف تولید را می‌توان با ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر با سایر سیستم‌های ذخیره انرژی در ریزشبکه هوشمند به حداقل رساند. وجود منابع ذخیره‌سازی که می‌توانند انرژی الکتریکی را ذخیره و تخلیه کنند، به‌طور مؤثر به کاهش انحرافات در تولید انرژی تجدیدپذیر کمک می‌کند. در سال‌های اخیر، پژوهشگران به بررسی چگونگی بهینه‌سازی ظرفیت سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی پرداخته‌اند، زیرا هزینه‌های نصب و راه‌اندازی این سیستم‌ها گاهی از منافع حاصل از به‌کارگیری آن‌ها بیشتر می‌شود. این مسئله باعث می‌شود که تعیین اندازه مناسب برای این تجهیزات به چالشی مهم در کاربردهای عملی تبدیل شود. از این رو، تحقیقات اخیر بر استفاده از این سیستم‌ها به‌عنوان مکمل برای دیگر روش‌های تولید انرژی متمرکز شده است [۱-۵].

در پژوهش‌های مختلف، روش‌های گوناگونی برای بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی ارائه شده است. برای مثال، براد و لودی یک چارچوب برای تعیین ظرفیت بهینه و شیوه بهره‌برداری کارآمد از این سامانه‌ها پیشنهاد کرده‌اند که در آن، واحدهای ذخیره‌سازی نقش پشتیبان برای نیروگاه‌های بادی و خورشیدی را ایفا می‌کنند. در پژوهش آن‌ها، گونه‌های متعددی از فناوری‌های ذخیره انرژی از جمله باتری‌ها، سامانه‌های ذخیره‌سازی هوای فشرده، ابرخازن‌ها، نیروگاه‌های تلمبه‌ذخیره‌ای و چرخ‌های طیار مورد تحلیل قرار گرفته و مشارکت آن‌ها در بازار انرژی آینده بررسی شده است؛ به‌گونه‌ای که هدف نهایی، بیشینه‌سازی سود حاصل از بهره‌برداری منابع تجدیدپذیر بوده است [۶]. در پژوهشی دیگر، ژینگ و همکاران یک چارچوب برنامه‌ریزی چندهدفه مقاوم برای سیستمی شامل منابع بادی، خورشیدی و واحدهای ذخیره‌سازی پیشنهاد داده‌اند که در آن،

عدم قطعیت‌ها با بهره‌گیری از روش کاپولا و تولید سناریو مدل‌سازی شده است [۷]. فرناندز بلانکو و همکاران رویکردی را برای تعیین مکان‌های بهینه استقرار سامانه‌های ذخیره‌سازی و محاسبه ظرفیت مناسب آن‌ها پیشنهاد کرده‌اند. در پژوهش مذکور، واحدهای ذخیره انرژی به‌صورت هماهنگ و یکپارچه در کنار طیف متنوعی از منابع تولید، شامل نیروگاه‌های حرارتی، برق‌آبی، بادی، خورشیدی، زمین‌گرمایی و زیست‌توده به کار گرفته شده‌اند [۸]. وان و همکاران اقدام به تعیین اندازه و بهره‌برداری سیستم ذخیره‌سازی انرژی برای یک اجتماع انرژی کرده‌اند [۹]. افزون بر این، لیو و همکاران یک رویکرد جامع برای تعیین ظرفیت بهینه منابع مختلف انرژی با توجه به ویژگی‌های عملکردی آن‌ها پیشنهاد کرده‌اند. در پژوهش مذکور، ترکیبی از توربین‌های بادی، سامانه‌های خورشیدی، واحدهای تولید همزمان برق و حرارت، خودروهای برقی و تجهیزات ذخیره انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین، سه فناوری متفاوت ذخیره‌سازی شامل ابرخازن‌ها، باتری‌های لیتیوم‌یون و سرب‌اسید بر پایه شاخص‌هایی نظیر چگالی انرژی، سرعت پاسخ‌گویی و طول عمر بهره‌برداری با یکدیگر مقایسه و ارزیابی شده‌اند [۱۰].

در پژوهش لیو و همکاران، هدف اصلی کاستن از عدم قطعیت‌های مرتبط با این منابع از طریق هماهنگ‌سازی تولید انرژی بادی و خورشیدی با یک واحد برق‌آبی بوده است. در این چارچوب، نیروگاه‌های بادی و خورشیدی در قالب یک نیروگاه مجازی تجمع شده‌اند و توزیع خطای پیش‌بینی تولید آن‌ها با بهره‌گیری از روش تخمین مبتنی بر تابع هسته برآورد شده است [۱۱]. گوگری و همکاران یک راهکار بهینه برای ارائه پیشنهاد قیمت در نیروگاه‌های مجازی پیشنهاد کرده‌اند که دربرگیرنده واحدهای بادی بوده و امکان حضور کارآمد آن‌ها را در بازارهای انرژی و خدمات ذخیره فراهم می‌سازد. در این روش، با بهره‌گیری از یادگیری فازی، عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای سیستم مدل‌سازی شده و عواملی نظیر میزان تقاضا، قیمت برق و سرعت باد به‌صورت توأمان در نظر گرفته شده‌اند [۱۲]. داس و باسو یک راهبرد بهینه برای مدیریت عدم تعادل ناشی از منابع تجدیدپذیر، به‌ویژه مزارع بادی، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مرتبط با تولید این منابع و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار ارائه کرده‌اند. در پژوهش آن‌ها، سناریوهای گوناگون به‌شیوه‌ای تطبیقی و غیرتکراری برای تحلیل همزمان بار و توان تولیدی تمامی منابع تجدیدپذیر از جمله انرژی باد به کار گرفته شده است. افزون بر این، ریسک حضور در بازار رقابتی برق با استفاده از شاخص ارزش شرطی در معرض خطر (CVaR) مورد ارزیابی قرار

تابع هدف این مدل شامل کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های تولید انرژی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری روزانه است [۱۹]. کاردفول و همکاران یک روش کنترل فرکانس مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تعیین ظرفیت بهینه سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری ارائه کردند. هدف این رویکرد کاهش هزینه‌های کلی و حفظ پایداری ریزشبه‌هوشمند است که در آن منابع هیدروالکتریک و فتوولتائیک نیز حضور دارند [۲۰]. ساینی و همکاران رویکردهایی مبتنی بر داده را برای برآورد کمیت عدم قطعیت بار خالص ارائه کرده و مدیریت یکپارچه ذخیره‌سازی انرژی با استفاده از منابع تجدیدپذیر را پیشنهاد کردند [۲۱]. در جدول (۱) مقایسه پیشینه پژوهش آورده شده است.

در این مقاله، ریزشبه‌هوشمند صنعتی شرکت گل‌گهر به‌عنوان یک شرکت صنعتی برای افزایش عملکرد و کاهش هزینه‌های عملیاتی، بر روی یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی سرمایه‌گذاری کرده است. استفاده از ریزشبه‌هوشمند برای استفاده از توانایی جمع‌آوری داده، پالایش داده‌ها، تحلیل و نتیجه‌گیری برای تصمیم‌سازی و تصمیم‌گیری، کنترل و مدیریت انرژی و سایر ویژگی‌های این نوع شبکه‌هاست. گستردگی استفاده از شبکه‌های هوشمند و ریزشبه‌ها در سیستم‌های انرژی باعث شده که در بسیاری از موارد عبارت ریزشبه‌هوشمند به‌عنوان ریزشبه‌هوشمند استفاده شود زیرا هوشمندی جزء لاینفک سیستم‌های انرژی مدرن است [۳-۴].

به‌طور خاص، یک مدل جدید برای تعیین اندازه بهینه یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی مناسب برای پشتیبانی از ریزشبه‌هوشمند توسعه داده شده است. این مقاله یک رویکرد جامع برای اطمینان از عملکرد کارآمد و دقیق ریزشبه‌هوشمند، با تمرکز بر بار خالص و قیمت برق، و همچنین بهینه‌سازی ظرفیت ذخیره‌سازی و برنامه‌ریزی ارائه می‌کند. به بیانی دیگر، در نظر گرفتن بار خالص و پیش‌بینی آن برای روز آینده، پیش‌بینی قیمت انرژی الکتریکی، تعیین ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز با روش بهینه‌ساز CBSA، تعیین استراتژی شارژ و دشارژ بهینه برای ظرفیت تعیین شده با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی دقیق ریاضیاتی مجموع نوآوری مقاله مذکور هستند.

جدول (۱): اطلاعات فنی سیستم ذخیره‌ساز انرژی مورد مطالعه [۲۴]

| مرجع | نوع سیستم انرژی           | روش مدل‌سازی | نوع داده مورد استفاده |
|------|---------------------------|--------------|-----------------------|
| [۶]  | تجدیدپذیر محور            | x            | در دسترس عموم         |
| [۷]  | تجدیدپذیر محور سناریوسازی | سناریوسازی   | در دسترس عموم         |
| [۸]  | تجدیدپذیر محور            | x            | در دسترس عموم         |

گرفته و در نهایت، مدل پیشنهادی در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط فرموله و حل شده است [۱۳]. برای مثال قویدل و همکاران مشارکت راهبردی یک نیروگاه ترکیبی را که شامل یک ژنراتور نیروی بادی و یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده (CAES) با صرفه اقتصادی برای مشارکت در بازارهای برق آینده و تعادلی است، بررسی کرده‌اند. این مطالعه مسئله برنامه‌ریزی نیروگاه‌های ترکیبی را در قالب یک مدل بهینه‌سازی تصادفی سه‌مرحله‌ای بررسی می‌کند که شاخص‌های ریسک نیز در تابع هدف آن ادغام شده‌اند. این چارچوب در شرایط نایقینی امکان اتخاذ تصمیم بهینه را فراهم می‌کند [۱۴]. ژو و همکاران یک چارچوب زمان‌بندی برای سیستم‌های ترکیبی بادی-باتری در بازار برق پیشنهاد کرده‌اند که در آن، تابع هدف شامل درآمد حاصل از مشارکت در بازار، هزینه‌های جریمه ناشی از عدم تعادل تولید باد و همچنین هزینه‌های مربوط به فرسایش و استهلاک باتری است. این مسئله با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی توزیع مقاوم مورد بررسی و حل قرار گرفته است [۱۵]. لک و همکاران یک مدل تصادفی دومرحله‌ای پیشنهاد کرد که به تولیدکنندگان نیروی بادی و سیستم‌های ذخیره انرژی اجازه می‌دهد به‌طور همزمان در بازارهای انرژی، ذخیره چرخشی و تنظیم فرکانس شرکت کنند [۱۶]. اکبری و همکاران یک رویکرد نوین مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی برای بهینه‌سازی راهبرد ارائه پیشنهاد یک شرکت تولیدکننده معرفی کرده‌اند که با بهره‌گیری همزمان از سامانه ذخیره‌سازی هوای فشرده، واحدهای بادی و حرارتی، در پی بیشینه‌سازی سود است. این چارچوب، حضور هماهنگ تولیدکنندگان در بازارهای انرژی و ذخیره گردان را امکان‌پذیر ساخته و همزمان، معیار ریسک نیز به‌صورت صریح در تابع هدف مدل لحاظ شده است [۱۷]. لیو و همکاران یک چارچوب جامع برای تعیین ظرفیت بهینه انواع منابع انرژی با لحاظ تمامی ویژگی‌های عملکردی آن‌ها، از جمله واحدهای بادی، سامانه‌های فتوولتائیک و نیروگاه‌های تولید همزمان برق و حرارت، پیشنهاد کرده‌اند. افزون بر این، در مدل ارائه شده، خودروهای برقی، تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی و بارهای مصرفی نیز به‌عنوان اجزای مؤثر سیستم در نظر گرفته شده‌اند [۱۸]. پاندریچ و همکاران یک رویکرد برنامه‌ریزی سه‌مرحله‌ای برای بهینه‌سازی مکان و ظرفیت واحدهای ذخیره‌سازی ارائه کردند که هم جنبه‌های اقتصادی و هم ملاحظات فنی را در نظر می‌گیرد. این روش ارتباط میان واحدهای ذخیره‌سازی، منابع تولید بادی و نیروگاه‌های سستی را مدل‌سازی کرده و از تحلیل سری زمانی برای شبیه‌سازی عدم قطعیت‌ها بهره می‌برد.



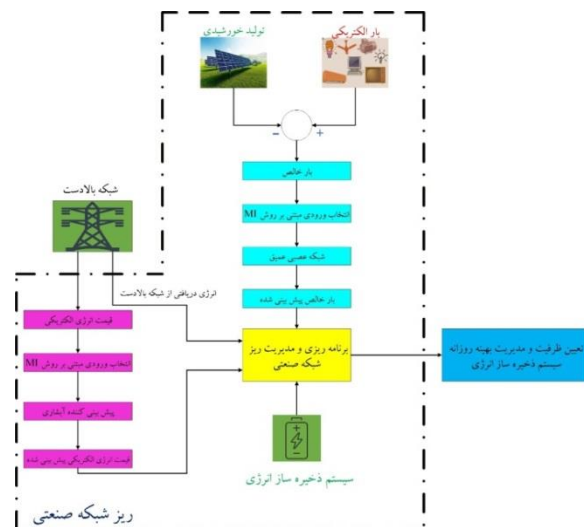
گرفته شده است. با تعیین ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و استفاده کارآمد از آن، هدف ما بهینه‌سازی هزینه تأمین بار در ارتباط با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر است. نمودار بلوکی مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه از سیستم ذخیره‌ساز انرژی، در شکل (۱) نشان داده شده است.

## ۱.۲. تابع هدف مسئله

هدف از مسئله مدل‌سازی بهینه ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی کاهش هزینه‌های ریزشبه هوشمند در بازار روز آینده با بهینه‌سازی ذخیره و استفاده انرژی است. فرمول این مسئله بهینه‌سازی به شرح زیر است:

$$\text{Min} \{C_{ESS} + OM_{ESS} + GE\} \quad (1)$$

در این فرمول،  $C_{ESS}$  هزینه سرمایه‌گذاری سالانه سیستم ذخیره انرژی و واحدهای رابط توان مربوطه را نشان می‌دهد.  $OM_{ESS}$  به هزینه‌های ثابت سالانه عملیات و نگهداری ذخیره‌ساز اشاره دارد.  $GE$  هزینه مبادله انرژی با شبکه اصلی را نشان می‌دهد. این عوامل به هدف کمینه‌سازی هزینه کلی سیستم ذخیره انرژی در ریزشبه هوشمند کمک می‌کنند.



شکل (۱): چهارچوب مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه از سیستم ذخیره‌ساز انرژی

$$C_{ESS} = \frac{1}{365} \times \frac{r}{1 - (1+r)^{-l}} (P^{ESSrated} \times C^{P.ESS} + E^{ESSrated} \times C^{E.ESS}) \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $C^{P.ESS}$  هزینه نصب رابط برق در هر مگاوات را نشان می‌دهد.  $C^{E.ESS}$  به هزینه نصب سیستم ذخیره انرژی در هر مگاوات ساعت اشاره دارد.  $r$  نرخ تنزیل است.  $l$  نشان‌دهنده طول عمر سیستم ذخیره انرژی است که برحسب سال اندازه‌گیری می‌شود. این متغیرها برای محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری کلی ذخیره‌ساز انرژی در مدل بهینه‌سازی بسیار مهم هستند.

| مرجع       | نوع سیستم انرژی | روش مدل‌سازی عدم قطعیت                                              | نوع داده مورد استفاده |
|------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| [۹]        | تجدیدپذیر محور  | x                                                                   | در دسترس عموم         |
| [۱۰]       | اجتماع انرژی    | x                                                                   | در دسترس عموم         |
| [۱۱]       | تجدیدپذیر محور  | سناریوسازی                                                          | در دسترس عموم         |
| [۱۲]       | تجدیدپذیر محور  | LSTM                                                                | در دسترس عموم         |
| [۱۳]       | تجدیدپذیر محور  | سناریوسازی                                                          | در دسترس عموم         |
| [۱۴]       | تجدیدپذیر محور  | x                                                                   | در دسترس عموم         |
| [۱۵]       | تجدیدپذیر محور  | x                                                                   | در دسترس عموم         |
| [۱۶]       | تجدیدپذیر محور  | x                                                                   | در دسترس عموم         |
| [۱۷]       | تجدیدپذیر محور  | سناریوسازی                                                          | در دسترس عموم         |
| [۱۸]       | تجدیدپذیر محور  | x                                                                   | در دسترس عموم         |
| [۱۹]       | تجدیدپذیر محور  | سری زمانی                                                           | در دسترس عموم         |
| [۲۰]       | تجدیدپذیر محور  | x                                                                   | در دسترس عموم         |
| [۲۱]       | تجدیدپذیر محور  | SVR, LSTM, CNN-GRU                                                  | در دسترس عموم         |
| پژوهش حاضر | ریزشبه صنعتی    | شبکه‌های ترکیبی مبتنی بر انتخاب ورودی و شبکه‌های عصبی عمیق و آنباشی | صنعتی و در دسترس عموم |

## ۲. برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه ذخیره‌ساز انرژی

### الکتریکی

در ریزشبه‌ها، تولیدکنندگان نقش کلیدی در کاهش عدم تعادل نیرو دارند. یک راه‌حل مؤثر، ادغام ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی است که می‌تواند نوسانات را در گره عرضه مصرف‌کننده در بازار روز آینده جذب کند. این رویکرد شامل ذخیره انرژی اضافی در صورت موجود بودن و تخلیه آن در دوره‌های کمبود است و در نتیجه تأمین انرژی پایدارتر و قابل اطمینان‌تری را تضمین می‌کند. در این پژوهش، ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی به عنوان یک سیستم پشتیبان با تمرکز اولیه بر به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی شبکه برای روز بعد در نظر

$$C^{P.ESS} \times p^{ESSrated} + C^{E.ESS} \times E^{ESSrated} \leq EB \quad (10)$$

که در این معادله،  $EB$  حداکثر بودجه در سرمایه‌گذاری ذخیره‌ساز انرژی است.

### ۳. روش بهینه‌سازی

یک ساختار دوسطحی برای حل مسئله بهینه‌سازی که قبلاً ذکر شد، پیاده‌سازی شده است. سطح اول بر تعیین ظرفیت ذخیره‌سازی بهینه برای سیستم ذخیره انرژی از جمله رابط توان و قابلیت ذخیره انرژی آن متمرکز است. این تعیین از طریق الگوریتم جست‌وجوی پرندۀ کوت (CBSA) است. کوت‌ها به دلیل حرکات پویا و متنوع خود در سطح آب شناخته می‌شوند که به عنوان پایه‌ای برای این الگوریتم بهینه‌سازی عمل می‌کند. این روش با الهام از رفتارهای حرکتی پرندگان کوت روی سطح آب، یک الگوریتم بهینه‌سازی نوین ارائه می‌دهد که چهار سازوکار حرکتی کلیدی شامل حرکت تصادفی، حرکت زنجیره‌ای، تنظیم موقعیت براساس راهبران گروه و هدایت جمعی به سمت نقاط بهینه را شبیه‌سازی می‌کند. این رویکرد که از ویژگی‌های منحصر به فرد این پرندگان آبی الهام گرفته، قابلیت حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده را با ترکیب رفتارهای منظم و نامنظم حرکتی داراست [۲۲]. این الگوریتم با استفاده از الگوهای ازدحام، به طور مؤثر از عهده بهینه‌سازی پیچیده برمی‌آید و آن را برای تعیین ظرفیت ذخیره‌سازی بهینه در زمینه یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر مناسب می‌کند.

در سطح دوم ساختار دوسطحی، پس از ایجاد ظرفیت ذخیره‌سازی بهینه برای سیستم ذخیره‌ساز انرژی، تمرکز به تدوین راهبرد شارژ و تخلیه بهینه تغییر می‌کند. این مرحله با استفاده از حل‌کننده بهینه‌سازی CPLEX در چارچوب YALMIP تسهیل می‌شود که قابلیت‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی پیشرفته را ارائه می‌دهد. CPLEX به دلیل کارایی خود در حل مسائل برنامه‌نویسی اعداد صحیح خطی و مختلط معروف است و آن را به گزینه‌ای ایدئال برای این کار تبدیل می‌کند.

رویکرد یکپارچه تضمین می‌کند که ظرفیت و راهبردهایی عملیاتی سیستم ذخیره‌ساز انرژی برای بهبود عملکرد کلی سیستم بهینه شده است. روش بهینه‌سازی کامل به صورت بصری در فلوچارت در شکل (۲) نشان داده شده است که فرایندهای متوالی درگیر در هر دو سطح بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. این رویکرد دوسطحی نه تنها دقت اندازه‌گیری سیستم ذخیره‌ساز انرژی را بهبود می‌بخشد، بلکه راهبردهای عملیاتی را نیز بهینه می‌کند و در نهایت به مدیریت مؤثر انرژی در سیستم‌های ریزشبكة هوشمند کمک می‌کند.

$$OM_{ESS} = p^{ESSrated} \times IC_{ESS}^{O\&M} \quad (3)$$

در معادله (۳)،  $IC_{ESS}^{O\&M}$  هزینه ثابت سالانه عملیات و نگهداری واحد ذخیره‌سازی است.

$$GE = \sum_{t=1}^{24} \lambda_t \times (Netload_t - P_t^D + P_t^C) \quad (4)$$

در رابطه (۴)  $\lambda_t$  قیمت برق در ساعت  $t$  است،  $Netload_t$  بار خالص در ساعت  $t$  پیش‌بینی می‌شود،  $P_t^D$  و  $P_t^C$  توان دشارژ و شارژ ذخیره‌ساز در ساعت  $t$  هستند.

### ۲.۲. قیود حاکم بر مسئله

مقدار انرژی ذخیره‌شده در واحد ذخیره‌سازی انرژی در رابطه (۵) بیان شده است که رابطه بین ظرفیت واحد ذخیره‌سازی انرژی و پارامترهای عملیاتی آن را ارائه می‌دهد. این معادله برای تعیین اینکه چه مقدار انرژی می‌تواند در یک دوره معین ذخیره یا آزاد شود، ضروری است که به عملکرد کلی و مقرون به صرفه بودن سیستم کمک می‌کند.

$$E_t^{ESS} = E_{t-1}^{ESS} + \eta^C \times P_t^C - \frac{1}{\eta^D} \times P_t^D \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $E_t^{ESS}$  مقدار انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز را در ساعت  $t$  نشان می‌دهد،  $\eta^C$  و  $\eta^D$  به ترتیب نشان‌دهنده بازده شارژ و تخلیه ذخیره‌ساز است.

معادله (۶) حد پایین و بالایی را برای واحد ذخیره انرژی نشان می‌دهد.

$$0.1 \times E^{ESSrated} \leq E_t^{ESS} \leq 0.9 \times E^{ESSrated} \quad (6)$$

که در آن،  $E^{ESSrated}$  حداکثر ظرفیت ذخیره‌ساز است. در معادله (۷) محدودیت توان ذخیره‌ساز ارائه شده است.

$$0 \leq P_t^{C,D} \leq p^{ESSrated} \quad (7)$$

در معادله (۷)،  $P_t^{C,D}$  توان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز در ساعت  $t$  است و  $p^{ESSrated}$  توان نامی ذخیره‌ساز انرژی است.

برای بهینه‌سازی مزایای ذخیره‌ساز انرژی، یک رویکرد زمان‌بندی مبتنی بر قیمت برای فرایندهای شارژ و تخلیه آن استفاده می‌شود. در این روش، زمانی که قیمت برق  $\lambda_t$  در زمان  $t$  کمتر از قیمت شارژ  $\lambda_C$  باشد، کاربر ESS را شارژ می‌کند. برعکس، اگر قیمت برق از قیمت تخلیه  $\lambda_D$  بیشتر شود، کاربر تمایل به تخلیه ذخیره‌ساز انرژی دارد. قیمت شارژ و تخلیه با استفاده از معادلات (۸) و (۹) تعیین می‌شود.

$$\lambda_C < 0.9 \times \bar{\lambda}_t \quad (8)$$

$$\lambda_D > 1.1 \times \bar{\lambda}_t \quad (9)$$

که  $\bar{\lambda}_t$  میانگین قیمت برق در روز است.



جدول (۲): اطلاعات فنی سیستم ذخیره‌ساز انرژی مورد مطالعه [۲۴]

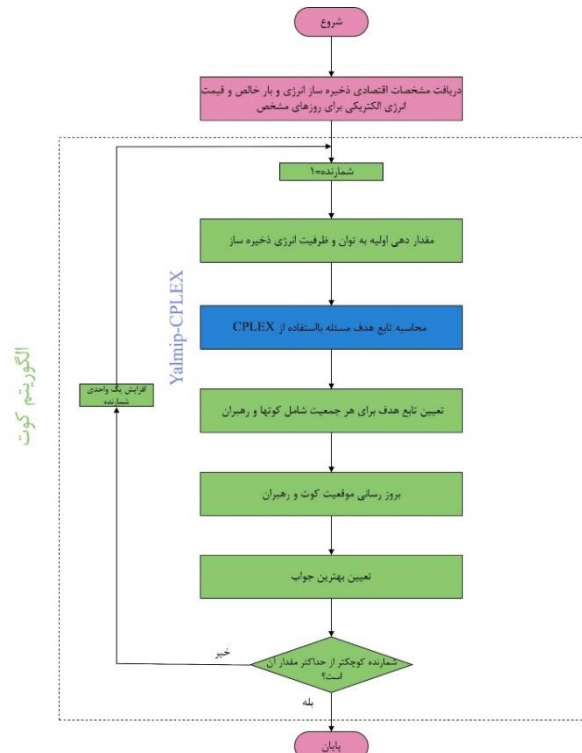
| فناوری سیستم<br>ذخیره‌ساز انرژی | هزینه سرمایه‌گذاری در واحد<br>انرژی (\$/kWh) | هزینه سرمایه‌گذاری در واحد<br>توان (\$/kW) | هزینه ثابت تعمیر و<br>نگهداری (\$/kw-year) | هزینه متغیر تعمیر و<br>نگهداری (\$/MW) | بازده (%) | طول عمر<br>(سال) |
|---------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|-----------|------------------|
| NAS                             | ۲۵۰                                          | ۱۵۰                                        | ۸۰                                         | ۰/۳                                    | ۸۵        | ۱۵               |

#### ۴. شبیه‌سازی و بحث در مورد نتایج

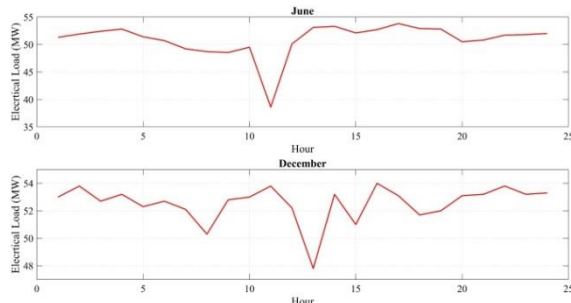
در این مطالعه، ریزشبه‌ صنعتی هوشمندی در نظر گرفته شده که به شبکه متصل است. برای این منظور از داده‌های نیروگاه خورشیدی شرکت گل‌گهر و داده‌های بار الکتریکی آن استفاده شده است. برای قیمت انرژی الکتریکی نیز از داده‌های بازار برق PJM در سال ۲۰۲۴ استفاده شده است [۲۳]. نرخ بهره سرمایه‌گذاری برای تمام سیستم ذخیره‌ساز انرژی ۱۰٪ تعیین شده است و کل بودجه برای نصب ذخیره‌ساز ۳۰۰,۰۰۰ دلار است. برای تجزیه و تحلیل، هم ظرفیت توان واحد رابط برق و هم ظرفیت انرژی واحد ذخیره‌سازی به ترتیب ۱ کیلووات و ۱ کیلووات ساعت در نظر گرفته می‌شود. مشخصات فنی ذخیره‌ساز در جدول (۲) به تفصیل آمده است، که شامل اطلاعات مهمی مانند هزینه‌های نصب اولیه، هزینه‌های عملیاتی و تعمیر و نگهداری، نرخ بهره‌وری و طول عمر مورد انتظار است.

دو روز از هر فصل سال ۲۰۲۴ برای نمونه جهت بررسی و تجزیه و تحلیل استفاده از ذخیره‌ساز در مجتمع گل‌گهر سیرجان ارائه شده است. برای شبیه‌سازی روش پیشنهادی ماه‌های ششم و دوازدهم سال ۲۰۲۴ انتخاب شده‌اند. این ماه‌ها ژوئن و دسامبر هستند؛ یعنی برای هر ماه مقدار بار خالص تعیین شده و همچنین از داده‌های قیمت انرژی الکتریکی استفاده شده است.

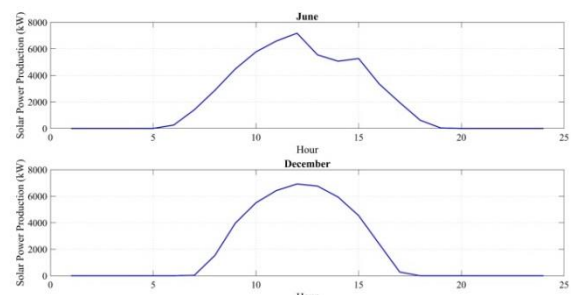
شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) به ترتیب نمودارهای بار الکتریکی، تولید خورشیدی و بار خالص را برای روزهای خاص در سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد. شکل (۶) قیمت‌های برق را برای چند ماه در سال ۲۰۲۴ مقایسه می‌کند.



شکل (۲): روند نامی روش بهینه‌سازی ارائه شده



شکل (۳): بار الکتریکی برای ماه‌های ژوئن و دسامبر ۲۰۲۴



شکل (۴): تولید خورشیدی برای ماه‌های ژوئن و دسامبر ۲۰۲۴

تعدیل‌های مکرر در فرایندهای تصمیم‌گیری داشته باشد. برای کاهش این خطرات، این مدل باید عدم قطعیت‌های ذاتی مرتبط با بار خالص و قیمت‌های برق را در نظر بگیرد که امکان تصمیم‌گیری‌های عملیاتی آگاهانه‌تر و انعطاف‌پذیرتر را فراهم کند. علاوه بر این، با تجزیه و تحلیل کل هزینه‌های برنامه‌ریزی و مدیریت ذخیره انرژی برای یک روز انتخاب شده، همان‌طور که در جدول (۳) ارائه شده است، ذی‌نفعان می‌توانند بینشی در مورد پیامدهای مالی استراتژی‌های ESS خود به دست آورند. در این جدول برای دو الگوریتم بهینه‌سازی مختلف CBSA و PSO این محاسبات آورده شده است. این درک جامع از هزینه‌ها می‌تواند سرمایه‌گذاری‌های آتی و تنظیمات عملیاتی را هدایت کند و در نهایت منجر به بهبود عملکرد مالی و پایداری در عملیات ریزشبكة هوشمند شود.

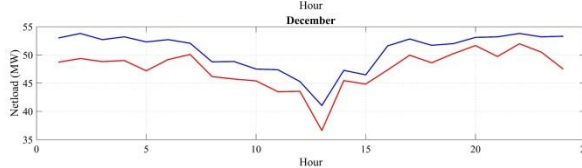
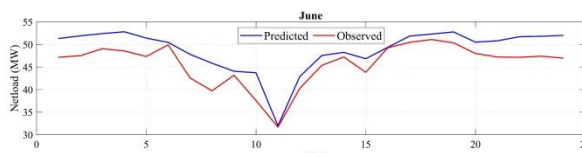
جدول (۳): نتایج تعیین شده برای اندازه ذخیره‌ساز انرژی توسط بهینه‌ساز برای پشتیبانی از ریزشبكة

|                            | CBSA  | PSO   |
|----------------------------|-------|-------|
| اندازه ذخیره‌ساز توان (MW) | ۰/۵۴  | ۶/۷۵  |
| انرژی (MWh)                | ۱۰/۸۲ | ۱۰/۲۷ |

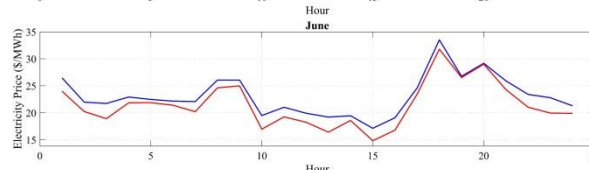
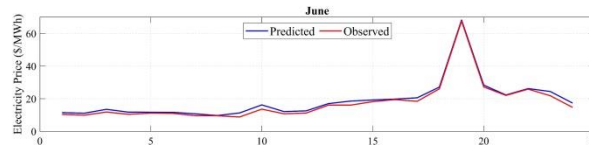
برای ارزیابی تأثیر ذخیره‌ساز انرژی بر سودآوری ریزشبكة، جدول (۳) هزینه‌های مرتبط با ریزشبكة را در ظرفیت‌های بهینه‌مندرج در جدول (۴) نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شد، ترکیب ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند به‌طور قابل توجهی سودآوری یک ریزشبكة هوشمند را افزایش دهد. همان‌طور که در جدول (۴) نشان داده شده است، ذخیره‌ساز انرژی، به ارزش تقریبی ۲۱۱ دلار، تأثیر مثبتی بر سودآوری ریزشبكة هوشمند دارد. به‌رغم اینکه در الگوریتم PSO مقدار کاهش هزینه روزانه بیشتر از روش CBSA است، از آنجاکه در این الگوریتم مجموع هزینه‌های بهره‌برداری و نصب بسیار بیشتر است، الگوریتم CBSA در پیدا کردن جواب بهینه کارتر است. گنجاندن ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند به یک مقدار تابع هدف بالاتر، در مقایسه با سناریوهای بدون ذخیره‌ساز انرژی منجر شود. با این حال، سرمایه‌گذاری اولیه و نگهداری مداوم ذخیره‌ساز انرژی منجر به کاهش هزینه‌های مورد انتظار می‌شود.

جدول (۴): سود ریزشبكة مورد اشاره در حضور ESS

| الگوریتم بهینه‌ساز | مجموع هزینه بهره‌برداری و نصب (\$) | هزینه نصب (\$)         | هزینه روزانه بعد از نصب ذخیره‌ساز (\$) | هزینه روزانه قبل از نصب ذخیره‌ساز (\$) | کاهش هزینه (\$) | کاهش هزینه (%) |
|--------------------|------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|----------------|
| CBSA               | ۵/۲۹۶۶×۱۰ <sup>۴</sup>             | ۲/۳۵۰۶×۱۰ <sup>۳</sup> | ۵/۰۶۱۶×۱۰ <sup>۴</sup>                 | ۵/۰۸۲۷×۱۰ <sup>۴</sup>                 | ۲۱۱             | ۰۰/۴۲          |
| PSO                | ۷/۳۰۴۶×۱۰ <sup>۴</sup>             | ۲/۲۹۱۰×۱۰ <sup>۴</sup> | ۵/۰۱۳۶×۱۰ <sup>۴</sup>                 | ۵/۰۸۲۷×۱۰ <sup>۴</sup>                 | ۶۹۱             | ۱/۳۶           |



شکل (۵): بار خالص برای ماه‌های ژوئن و دسامبر ۲۰۲۴



شکل (۶): قیمت انرژی الکتریکی برای ماه‌های ژوئن و دسامبر ۲۰۲۴ در بازار برق PJM

تعیین ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز انرژی به‌طور قابل توجهی سودآوری ریزشبكة هوشمند را افزایش می‌دهد. ذخیره‌سازی مؤثر انرژی برای کاهش نوسانات در عرضه و تقاضای انرژی بسیار مهم است و در نتیجه امکان تحویل توان پایدارتر و قابل اطمینان‌تر را فراهم می‌کند. تابع هدف، به دنبال به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی کل ریزشبكة هوشمند است در حالی که تأثیر ESS را در نظر می‌گیرد. برای دستیابی به این هدف، از YALMIP-CPLEX برای تعیین پروفیل‌های شارژ و تخلیه بهینه استفاده شده است و اطمینان حاصل می‌شود که تابع هدف در حین رعایت راهبرد قیمت‌گذاری مشخص شده به حداقل می‌رسد. این رویکرد راهبردی، ریزشبكة هوشمند را قادر می‌سازد تا با سرمایه‌گذاری بر قیمت‌های پایین برق برای شارژ و دشارژ در زمان‌های مطلوب، به‌طور کارآمد عمل کند. عملکرد این مدل ارتباط نزدیکی با دقت پیش‌بینی‌های مربوط به بار خالص و قیمت برق دارد. هرگونه اختلاف بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده می‌تواند منجر به زیان‌های مالی شود و نیاز به

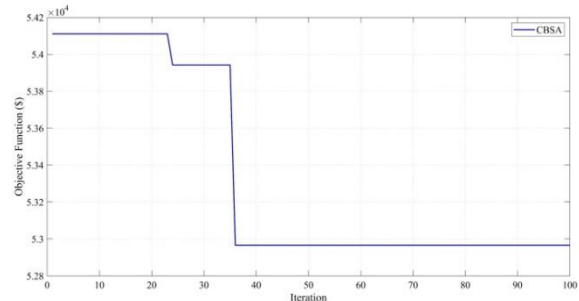
سیستم ذخیره انرژی برای افزایش عملکرد ریزشبه هوشمند ضروری است. با توجه به هزینه‌های قابل توجه نصب و نگهداری سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، تعیین دقیق ظرفیت اقتصادی بهینه آن‌ها حیاتی می‌شود. برای بهبود عملکرد و به حداقل رساندن هزینه‌ها، این مقاله یک مدل ریزشبه هوشمند که سیستم‌های ذخیره انرژی را در بر دارد پیشنهاد می‌کند. برای اطمینان از عملکرد موفقیت‌آمیز و دقیق ریزشبه، این مقاله روشی را معرفی می‌کند که بار خالص و قیمت برق را با ظرفیت ذخیره‌سازی و برنامه‌ریزی بهینه ادغام می‌کند. یک ساختار دوسطحی برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. در سطح اول، بهینه‌ساز ظرفیت ذخیره‌سازی بهینه را با الگوریتم CBSA تعیین می‌کند. در سطح دوم، پس از ایجاد ظرفیت ذخیره‌سازی بهینه برای ذخیره‌ساز انرژی، راهبرد شارژ و دشارژ بهینه آن با استفاده از روش CPLEX در چارچوب YALMIP تعیین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که ادغام ذخیره‌ساز انرژی به افزایش سوددهی ریزشبه هوشمند کمک می‌کند. همچنین در روش پیشنهادی، عدم قطعیت‌ها از طریق خطای پیش‌بینی بار خالص و قیمت برق وارد مدل می‌شوند. از آنجاکه مدل دوسطحی پیشنهادی مبتنی بر داده است، تحلیل حساسیت مفهومی برای پارامترهای کلیدی (خطای پیش‌بینی، قیمت برق، نرخ تنزیل و ظرفیت ذخیره‌ساز) ارائه شده است. رفتار مدل در برابر تغییر این پارامترها براساس ساختار ریاضی مسئله قابل تحلیل بوده و نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی نسبت به این تغییرات پایدار و قابل اتکاست.

برای تکمیل پژوهش در آینده می‌توان با استفاده از روش‌هایی مانند بهینه‌سازی مقاوم برای پوشش عدم قطعیت‌های شدید در سیستم انرژی و استفاده از پارکینگ‌های برقی و بررسی سایر فناوری‌های ذخیره‌ساز در مدل پیشنهادی کارایی و پیچیدگی مدل را افزایش داد.

## سپاسگزاری

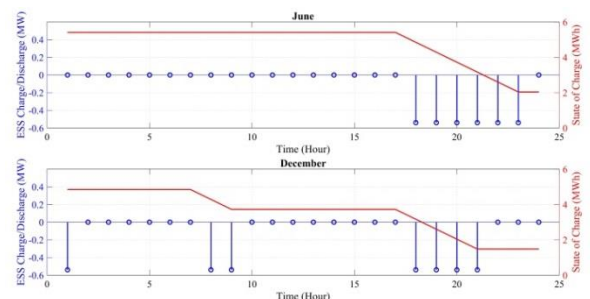
نویسندگان از شرکت صنعتی و معدنی گل‌گهر سیرجان برای حمایت از انجام این پژوهش طی قرارداد شماره ۰۲/۴۸۹۷ سپاسگزاری می‌کنند.

برای نشان دادن نحوه یافتن جواب شدنی اولیه و توسعه آن توسط CBSA، نمودار همگرایی الگوریتم در شکل (۷) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، الگوریتم از یک نقطه شدنی اولیه شروع کرده و پس از چند تکرار به مقدار بهینه پایدار همگرا می‌شود.



شکل (۷): روند همگرایی الگوریتم CBSA

راهبرد شارژ و تخلیه به‌دست‌آمده برای ذخیره‌ساز انرژی در شکل (۸) نشان داده شده است. ذخیره انرژی زمانی شارژ می‌شود که قیمت برق کمتر از نرخ شارژ باشد و زمانی تخلیه می‌شود که قیمت‌ها از نرخ تخلیه بالاتر باشد. برای مثال، در ماه ژوئن، ذخیره‌ساز انرژی در ساعات پایانی که قیمت‌ها افزایش می‌یابد، تخلیه می‌شود. این نشان‌دهنده یک رابطه هماهنگ بین قیمت برق و استراتژی شارژ/تخلیه ذخیره‌ساز انرژی است.



شکل (۸): نرخ شارژ/تخلیه ساعتی برای ESS با در نظر گرفتن وضعیت شارژ

## ۵. نتیجه‌گیری

از آنجاکه بخش‌های مختلف سیستم قدرت به‌طور فزاینده‌ای از منابع انرژی تجدیدپذیر استقبال می‌کند، کارورهای سیستم قدرت ممکن است با هزینه‌های بالاتر ناشی از تغییرپذیری و عدم قطعیت مرتبط با نوسانات کوتاه‌مدت در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر مواجه شوند. برای کاهش این چالش‌ها می‌توان از راهبردهای مختلفی استفاده کرد که یکی از آن‌ها استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی است. در نتیجه، براساس بار خالص و قیمت برق، تعیین برنامه‌ریزی و عملیات بهینه

|                                                         |                   |
|---------------------------------------------------------|-------------------|
| ظرفیت تامی ذخیره‌ساز                                    | $E^{ESSrated}$    |
| هزینه ثابت سالانه بهره‌برداری و نگهداری واحد ذخیره‌سازی | $IC_{ESS}^{O\&M}$ |
| قیمت انرژی الکتریکی در ساعت $t$                         | $\lambda_t$       |
| توان شارژ و تخلیه ذخیره‌ساز برحسب ساعت $t$              | $P_t^{C,D}$       |
| مقدار انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز در ساعت $t$          | $E_t^{ESS}$       |
| بازده شارژ و تخلیه ذخیره‌ساز                            | $\eta^{C,D}$      |
| قیمت شارژ ذخیره‌ساز                                     | $\lambda_C$       |
| قیمت تخلیه ذخیره‌ساز                                    | $\lambda_D$       |
| متوسط قیمت روزانه انرژی الکتریکی                        | $\bar{\lambda}_t$ |
| حداکثر بودجه                                            | $EB$              |

علائم

|                                                             |                |
|-------------------------------------------------------------|----------------|
| بار خالص در زمان $t$                                        | $Netload_t$    |
| هزینه سرمایه‌گذاری سالانه ذخیره‌ساز انرژی                   | $C_{ESS}$      |
| هزینه‌های ثابت سالانه بهره‌برداری و نگهداری ذخیره‌ساز انرژی | $OM_{ESS}$     |
| هزینه تبادل انرژی با شبکه اصلی                              | $GE$           |
| هزینه نصب رابط توان به‌ازای هر مگاوات                       | $C^{P,ESS}$    |
| هزینه نصب سیستم ذخیره انرژی به‌ازای هر مگاوات ساعت          | $C^{E,ESS}$    |
| نرخ تنزیل                                                   | $r$            |
| طول عمر ذخیره‌ساز انرژی برحسب سال                           | $l$            |
| توان نامی ذخیره‌ساز                                         | $P^{ESSrated}$ |

مراجع

- [1] Amusat, O., Shearing, P., Fraga, E., "Optimal design of hybrid energy systems incorporating stochastic renewable resources fluctuations", Journal of Energy Storage, Vol. 15, pp. 379–399, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.12.003>.
- [2] Matos, C., Carneiro, J., Silva, P., "Overview of large-scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification", Journal of Energy Storage, Vol. 21, pp. 241–258, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.11.023>.
- [3] Huang, Qi, N., Fan, K., Z., Xu, B., "Long-term energy management for microgrid with hybrid hydrogen-battery energy storage: A prediction-free coordinated optimization framework", Applied Energy, Vol. 377, pp. 124485, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124485>.
- [4] Nguyen, T. T., Nguyen, H. P., "Optimal operation of battery energy storage system in microgrid to minimize electricity cost based on model predictive control using coyote algorithm", Journal of Energy Storage, Vol. 114, p. 115904, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115904>.
- [5] Ghasemi, A., Monfared, H., Loni, A., Marzband, M., "CVaR-based retail electricity pricing in day-ahead scheduling of microgrids", Energy, Vol. 227, pp. 120529, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120529>.
- [6] Berrada, A., Loudiyi, K., "Operation, sizing, and economic evaluation of storage for solar and wind power plants", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 59, pp. 1117–1129, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.048>.
- [7] Jing, W., Aksoy, M., Rahman, M. A., Alenezi, A. H., Deriche, M., Tao, H., "Multi-objective planning and optimal configuration of wind, solar, and energy storage in interconnected microgrid clusters using Vine Copula scenario generation

- and antlion optimization", Renewable Energy, Vol. 256, p. 124313, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124313>.
- [8] Fernández-Blanco, R., Dvorkin, Y., Xu, B., Wang, Y., Kirschen, D., "Optimal energy storage siting and sizing: A WECC case study", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 8, No. 2, pp. 733–743, 2016, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2616444>.
- [9] Sfikas, E., Katsigiannis, Y., Georgilakis, P., "Simultaneous capacity optimization of distributed generation and storage in medium voltage microgrids", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 67, pp. 101–113, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.11.009>.
- [10] Wan, L., Yang, J., Yang, Y., Li, T., Liu, H., Wen, F., "Optimal sizing and operation of community hybrid energy storage systems", Journal of Energy Storage, Vol. 119, p. 116209, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116209>.
- [11] Liu, B., Lund, J., Liao, S., Jin, X., Liu, L., Cheng, C., "Optimal power peak shaving using hydropower to complement wind and solar power uncertainty", Energy Conversion and Management, Vol. 209, p. 112628, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112628>.
- [12] Gougheri, S., Jahangir, H., Golkar, M., Ahmadian, A., Golkar, M., "Optimal participation of a virtual power plant in electricity market considering renewable energy: A deep learning-based approach", Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 26, p. 100448, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100448>.
- [13] Das, S. Basu, M., "Day-ahead optimal bidding strategy of microgrid with demand response program considering uncertainties and outages of renewable energy resources", Energy, Vol. 190, p. 116441, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116441>.
- [14] Ghavidel, S., Ghadi, M., Azizivahed, A., Aghaei, J., Li, L., Zhang, J., "Risk-constrained bidding strategy for a joint operation of wind power and CAES aggregators", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 11, No. 1, pp. 457–466, 2019, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2895332>.
- [15] Xu, X., Hu, W., Cao, D., Huang, Q., Liu, Z., Liu, W., Blaabjerg, F., "Scheduling of wind-battery hybrid system in the electricity market using distributionally robust optimization", Renewable Energy, Vol. 156, pp. 47–56, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.057>.
- [16] Lak, O., Rastegar, M., Mohammadi, M., Shafiee, S., Zareipour, H., "Risk-constrained stochastic market operation strategies for wind power producers and energy storage systems", Energy, Vol. 215, p. 119092, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119092>.
- [17] Akbari, E., Hooshmand, R., Gholipour, M., Parastegari, M., "Stochastic programming-based optimal bidding of compressed air energy storage with wind and thermal generation units in energy and reserve markets", Energy, Vol. 171, pp. 535–546, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.014>.
- [18] Liu, Z., Chen, Y., Zhuo, R., Jia, H., "Energy storage capacity optimization for autonomy microgrid considering CHP and EV scheduling", Applied Energy, Vol. 210, pp. 1113–1125, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.002>.
- [19] Pandžić, H., Wang, Y., Qiu, T., Dvorkin, Y., Kirschen, D., "Near-optimal method for siting and sizing of distributed storage in a transmission network", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No. 5, pp. 2288–2300, 2014, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2364257>.
- [20] Kerdphol, T., Fuji, K., Mitani, Y., Watanabe, M., Qudaih, Y., "Optimization of a battery energy storage system using particle swarm optimization for stand-alone microgrids", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 81, pp. 32–39, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.02.006>.
- [21] Saini, V., Al-Sumaiti, A., Kumar, R., "Data driven net load uncertainty quantification for cloud energy storage management in residential microgrid", Electric Power Systems Research, Vol. 226, p. 109920, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109920>.
- [22] Naruei, I., Keynia, F., "A new optimization method based on COOT bird natural life model", Expert Systems with Applications, Vol. 183, p. 115352, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115352>.

[23] PJM Web Site. [Online]. Available:  
<http://www.pjm.com>

[24] Memarzadeh, G., Keynia, F., "A new optimal  
energy storage system model for wind power

*producers based on long short term memory and  
Coot Bird Search Algorithm", Journal of Energy  
Storage, Vol. 44, p. 103401, 2021,  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103401>.*