



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Optimal Scheduling of Energy Storage Systems with Private Ownership Based on a Stochastic-Robust Hybrid Optimization Model in Energy and Ancillary Services Markets

Mohammad Farahani ^a, Abouzar Samimi ^{b,*}, Hossien Shateri^b

^a MSc, Department of Electrical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

^b Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 21 February 2022

Revised: 22 July 2023

Accepted: 20 August 2023

Keywords:

Electricity market,
Stochastic-robust hybrid optimization,
Energy-storage system,
Uncertainty,
Ancillary services markets.

ABSTRACT

In this paper, the problem of participation of a Battery Energy Storage (BES) in the Day-Ahead Market (DAM) and Real-Time Market (RTM) in three cases including Joint Energy and Reactive Power Market (JERPM), Energy Market (EM) and Energy and Reserve Market (ERM) is modeled based on a hybrid Stochastic Robust Optimization (SRO) model and it tries to maximize the profit of the BES owner in the face of uncertainty pertaining to the market prices. In the proposed model, in the first step, the decision maker or BES owner predicts energy, reserve and reactive power prices in each market according to historical network information. In the second step, by determining the uncertainty interval of prices for DAM and RTM, robust optimization is implemented aiming at maximizing the profit of the BES owner using a model of forming a robust counterpart of the objective function and dual theory. In the next step, by defining some different scenarios for the robust budget, Stochastic Programming (SP) assigns a probability to each scenario. Then, the final profit of each market is calculated through probabilistic weighting, and finally the market with more profit is opted as considered participation market. The proposed formulation based on the Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) model is implemented in the GAMS software environment and the results demonstrate the maximum profitability of BES in EM (21% more) and also show participation in providing ancillary services, such as reserve to provide security in incidents and reactive power to maintain stability and reduce cost and losses, despite the decrease in profit, leads to neutralizing the negative impact of uncertainties in the BES profit.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.26339.2226>

© 2024 Published by Semnan University Press.

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

* Corresponding author.

E-mail address: abouzarsamimi@alumni.iust.ac.ir

How to cite this article:

Farahani, M., Samimi, A., & Shateri, H. (2024). Optimal scheduling of energy storage systems with private ownership based on a stochastic-robust hybrid optimization model in energy and ancillary services markets. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(76), 1-12. doi: 10.22075/jme.2023.26339.2226

برنامه زمان بندی بهینه سیستم های ذخیره سازی انرژی با مالک خصوصی مبتنی بر بهینه سازی ترکیبی تصادفی - مقاوم در بازارهای انرژی و خدمات جانبی

محمد فراهانی^۱، ابوذر صمیمی^{۲*}، حسین شاطری^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲	در این مقاله، مسأله مشارکت یک ذخیره ساز باتری (BES) ^۱ ، در بازار روز آتی (DAM) ^۲ و زمان واقعی (RTM) ^۳ در سه حالت بازار همزمان انرژی و توان راکتیو (JERPM) ^۴ ، بازار انرژی (EM) ^۵ و بازار انرژی-رزرو (ERM) ^۶ ، با رویکرد ترکیبی بهینه سازی تصادفی-مقاوم (SRO) ^۷ مدل سازی شده و سعی بر حداکثرسازی سود ذخیره ساز در مواجهه با عدم قطعیت قیمت ها دارد. در مدل پیشنهادی، در مرحله اول تصمیم گیرنده یا مالک BES، قیمت های انرژی، رزرو و توان راکتیو در هر بازار را با توجه به اطلاعات شبکه پیش بینی می کند. در مرحله دوم، با تعیین بازه عدم قطعیت قیمت ها برای DAM و RTM، بهینه سازی مقاوم با هدف بیشینه سازی سود مالک BES با استفاده از روش تشکیل همتای مقاوم تابع هدف و تئوری دوگان اجرا می شود. در مرحله بعد، با تعریف سناریوهای مختلف برای بودجه مقاوم، برنامه ریزی تصادفی (SP) ^۸ به هریک از این سناریوها، احتمالی را تخصیص می دهد. سپس، سود نهایی هر بازار از طریق وزن دهی احتمالاتی محاسبه شده و در نهایت بازار با سود بیشتر بعنوان بازار مشارکت، انتخاب می گردد. فرمول بندی پیشنهادی بر اساس مدل برنامه ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح (MINLP) ^۹ در محیط نرم افزار GAMS پیاده سازی شده و نتایج نشان دهنده حداکثر سودآوری BES در EM بوده (۲۱٪ بیشتر) و همچنین نشان می دهد مشارکت در تأمین خدمات جانبی مانند رزرو جهت تأمین امنیت در پیشامدهای شبکه و توان راکتیو جهت حفظ پایداری و کاهش هزینه و تلفات، علیرغم کاهش سود، منجر به خنثی سازی تأثیر منفی عدم قطعیت ها در سود BES می شود.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۳۱	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹	
واژگان کلیدی: بازار برق، بهینه سازی ترکیبی مقاوم تصادفی، ذخیره ساز انرژی، عدم قطعیت، بازار خدمات جانبی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.26339.2226>

© 2024 Published by Semnan University Press.

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

۱-مقدمه
بهره بردار مستقل سیستم (ISO)^{۱۰} است که از طریق تأمین AS جهت انتقال امن و پایدار انرژی، به آن دست می یابد. رزرو و توان راکتیو یکی از مهم ترین AS هستند که بازیگران

۱-۱- مرور موضوع و مطالعات قبلی
رعایت امنیت و قابلیت اطمینان سیستم از مهم ترین وظایف

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: abouzarsamimi@alumni.iust.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اراک

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اراک

¹ Battery Energy Storage (BES)

² Day Ahead Market (DAM)

³ Real Time Market (RTM)

⁴ Join Energy and Reactive Power Market (JERPM)

⁵ Energy Market (EM)

⁶ Energy and Reserve Market (ERM)

⁷ Stochastic-Robust Optimization (SRO)

⁸ Stochastic Programming (SP)

⁹ Mix Integer Non-Linear Programming (MINLP)

¹⁰ Independent System Operator (ISO)

استناد به این مقاله:

فراهانی، محمد، صمیمی، ابوذر، و شاطری، حسین. (۱۴۰۳). برنامه زمان بندی بهینه سیستم های ذخیره سازی انرژی با مالک خصوصی مبتنی بر بهینه سازی ترکیبی تصادفی-مقاوم در بازارهای انرژی و خدمات جانبی. *مدل سازی در مهندسی*، ۱۲-۱. doi: 10.22075/jme.2023.26339.2226

اطمینان و مسائل زیست‌محیطی ارائه داده است. افزایش مشارکت RES و اعمال برنامه پاسخ‌گوئی تقاضا (DRP)^{۱۶} و رفتار غیرقطعی بارها، ISO را در تصمیم‌گیری‌های خود با چالش روبرو می‌کند. در مرجع [۸]، این عدم قطعیت‌ها در مسأله برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها با بهره‌گیری از RO دو مرحله‌ای بدون بازگشت بررسی شده است. در این مرجع، در کنار RES، از BES بعنوان عنصر کمک‌کننده در مدیریت عدم قطعیت شبکه استفاده شده است. روش حل RO در این مرجع، بهره‌گیری از تجزیه بندرز بوده و اثبات برتری RO نسبت به SP در این نوع مسائل از دیگر نتایج این مرجع است.

مرجع [۹] با یک مدل دو سطحی مبتنی بر سناریو، مشارکت نیروگاه‌های مجازی (VPP)^{۱۸} در ERM را فرمول‌بندی کرده است. در سطح بیرونی مسأله، امکان افزودن عناصری چون ESS و منابع سنتی و تجدیدپذیر به VPP و در سطح درونی، تسویه بازار تحت شرایط مختلف و با هدف حداکثرسازی سود انجام می‌شود. عدم قطعیت‌های RES با روش خوشه‌بندی اصلاح شده و عدم قطعیت‌های رزرو مورد نیاز شبکه، تحت سناریوهای مختلف مدل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد تغییر رفتار VPP از یک عنصر پذیرنده قیمت به تعیین‌کننده قیمت، باعث افزایش سود ۱۰۸٪ شده و همچنین مشارکت در ERM نسبت به EM، افزایش ۲۶٪ درآمد را در پی داشته است.

روند بازار برق و شبکه قدرت، باعث افزایش حضور مشترکان فعالی شده است که مایل به مشارکت دو سویه تولید/مصرف با شبکه هستند. مرجع [۱۰] با در نظر گرفتن مشترکان مقیاس کوچک دارای RES و DRP، به ارائه مدلی دو سطحی جهت مشارکت یکپارچه‌ساز این مشترکان در ERM پرداخته است. تابع هدف سطح بیرونی و سطح درونی به ترتیب حداکثرسازی سود یکپارچه‌ساز و رفاه اجتماعی با توجه به اقناع انواع بارهای حرارتی، تهویه و... و همچنین بهره‌برداری بهینه از ESS است. بکارگیری شرایط KKT^{۱۹} و اعمال معادلات دوگانی باعث تبدیل مسأله دو سطحی به تک سطحی شده و نتایج شبیه‌سازی حاکی از کارایی مدل معرفی شده است. مرجع [۱۱]، با در نظر گرفتن

اصلی شبکه قدرت همچون مولد سنکرون و عناصر نوظهور بازار می‌توانند با مشارکت فعال در این زمینه، کسب درآمد کنند. مهم‌ترین اثر تأمین درست و بجای توان راکتیو، حفظ پایداری ولتاژ و کاهش تلفات شبکه است. در اکثر مطالعات، تأکید بر تأمین محلی توان راکتیو و روش پرداخت به ازای پیشنهاد است [۱-۳]. یکی از مهم‌ترین ابزارهای حفظ امنیت و قابلیت اطمینان سیستم، نظارت بر شاخص‌های امنیتی، پایداری ولتاژ و کنترل رزرو موجود در شبکه می‌باشد. تغییر ناگهانی تقاضا و پیشامدهای شبکه، امنیت سیستم را در معرض خطر قرار می‌دهد. لذا برای بهره‌برداری ایمن و مطمئن از شبکه قدرت، در نظر گرفتن مقداری از ظرفیت تولید مولدها بعنوان رزرو ضروری است [۴]. با داشتن رزرو مناسب، هزینه و ریسک ناشی از عدم تعادل تولید-بار به دلیل خروج مولدها، تغییرات توان منابع انرژی تجدیدپذیر (RES)^{۱۱} و پیشامدهای شبکه کاهش می‌یابد. رزرو عملیاتی به دو دسته رزرو چرخان^{۱۲} و رزرو غیرچرخان^{۱۳} دسته‌بندی می‌شود [۵]. رزرو تأمین‌شده توسط BES بدلیل سرعت بالای عرضه، رزرو چرخان محسوب می‌شود. RES ماهیتی غیرقابل برنامه‌ریزی و کنترل دارند. عدم تأمین انرژی اعلام شده در برنامه‌ریزی بازار، منجر به پرداخت جریمه و کاهش سود و یا حتی ضرر منابع تجدیدپذیری چون باد و خورشید می‌شود. در مرجع [۶]، مشارکت هماهنگ واحدهای برق حرارتی و منابع تجدیدپذیر بادی برای شرکت در ERM با رویکردی فازی و در چارچوب برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (MIP)^{۱۴} پیشنهاد شده است. عدم قطعیت‌های مورد بررسی در این تحقیق، قیمت‌های DAM، RTM، رزرو و میزان تولید توان بادی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی این مقاله، حاکی از افزایش سود در حالت عملکرد مشترک دارد. برای نیل به اهداف مختلف و گاه متضاد چون کاهش هزینه بهره‌برداری، کاهش میزان آلودگی و افزایش قابلیت اطمینان، سیستم‌های ترکیبی RES، بهمراه عناصری چون ذخیره‌ساز انرژی (ESS)^{۱۵} و دیزل ژنراتور مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. مرجع [۷]، با بهره‌گیری از الگوریتم ازدحام ذرات و شناور کردن حدود بالا و پائین میزان ظرفیت (SOC)^{۱۶} در ساعات مختلف، مدیریتی کارا در کاهش هزینه تولید برق، قابلیت

¹⁶ State Of Charge (SOC)

¹⁷ Demand Response Program (DRP)

¹⁸ Virtual Power Plant (VPP)

¹⁹ Karush-Kuhn-Tucker (KKT)

¹¹ Renewable Energy Sources (RES)

¹² Spinning Reserve

¹³ Non-Spinning Reserve

¹⁴ Mix Integer linear Programming (MIP)

¹⁵ Energy Storage System (ESS)

را با توجه به قیمت تسویه شده در بازار گاز، اخذ می‌کند. بازار گاز نیز متأثر از میزان مصرف نیروگاه‌های گازسوز بوده که از تسویه بازار برق به دست می‌آید. مدل ارائه شده باعث عملکرد هماهنگ بازارهای برق و گاز شده و کاهش هزینه‌ها و قیمت‌های مکانی برق و گاز را به دنبال دارد. در مرجع [۲۰]، مدل تصادفی دومرحله‌ای برای شرکت در بازار اشتراکی و قراردادهای دوجانبه EM ارائه شده است. در این مدل، قیمت انرژی به عنوان پارامتر عدم قطعیت در نظر گرفته شده و شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی (CVaR)^{۲۰}، به عنوان معیاری برای ریسک‌گریزی بازیگران بازار بررسی شده است. در مرجع [۲۱]، استراتژی پیشنهاددهی بهینه قیمت‌دهی برای یک سیستم ترکیبی شامل مزرعه بادی، ذخیره‌ساز هوای فشرده و تکنولوژی برق به گاز مورد بررسی قرار گرفته است. عدم قطعیت‌های ناشی از توان بادی با SP و قیمت DAM با RO مدل می‌شوند. در مرجع [۲۲] با در نظر گرفتن ۳ سناریو برای مالکین بخش خصوصی و خطی‌سازی منحنی کاری، مشارکت BES در JERPM بررسی شده است. این مرجع نشان دهنده تأثیر مثبت مشارکت BES در کاهش تلفات و هزینه، علاوه بر کسب سود است.

۱-۲- روش پیشنهادی و نوآوری‌ها

با وجود مطالعات وسیع صورت گرفته در رابطه با ESS، در هیچ یک از مراجع مذکور، مشارکت ESS در بازار برق تحت مالکیت بخش خصوصی با ملاحظه عدم قطعیت قیمتی و زمانی بررسی نشده است. برای رفع این خلاء، در این مقاله عدم قطعیت قیمتی (انحراف از قیمت پیش‌بینی) تحت سناریوهای بازه عدم قطعیت^{۲۱} و با بهره‌گیری از RO دو مرحله‌ای و عدم قطعیت زمانی (بازه‌های احتمالی وقوع عدم قطعیت) با رویکردی سناریو-محور و تصادفی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله با در دست داشتن اطلاعات گذشته شبکه و علاقه‌مندی‌های مالک، RO در مرحله اولیه، تحلیل حساسیت را بر بازه‌های عدم قطعیت قیمت مدل کرده و بهینه‌سازی ابتدائی را انجام می‌دهد. در مدل پیشنهادی فرض می‌شود که محدودیت‌های مبدل باتری برآورده شده است. قابلیت پشتیبانی توان راکتیو BES با استفاده از مرجع [۲۲] مدل شده است. در مرحله بعدی با تعریف ۵ سناریو روی توزیع بودجه مقاوم^{۲۲}

عدم قطعیت RES و قیمت‌های بازار، در RO با اهداف چندگانه، به بررسی تأثیر انواع DRP پرداخته است. افق زمانی مدنظر نویسندگان این مرجع، به صورت روزانه و ماهانه بوده و ESS این مطالعه، ذخیره‌ساز هیدروژنی یکپارچه با سلول خورشیدی است. هزینه مشترکان با DRP و بدون توجه به مقاوم بودن یا نبودن مدل، کاهش داشته (۸٪ تا ۹٪) و بهره‌گیری از ذخیره‌ساز منجر به پیک‌سائی و جابجایی بار شبکه از نتایج شبیه‌سازی‌های این مرجع است. نویسندگان مرجع [۱۲] عدم قطعیت توربین بادی را با بهره‌گیری از توزیع ویبال و رفتار غیرقطعی بار شبکه را با متغیرهای تصادفی و گوسی مدل کرده و JERPM را در شبکه توزیع هوشمند با بهره‌گیری از مدل SP فرمول‌بندی کرده‌اند.

یکی از مؤثرترین روش‌های کاهش ناترازی تولید و مصرف، استفاده از ESS است. در بین انواع ESS، انتظار بر رشد سریع BES تا سال آینده و تا ظرفیت ۱۲ GW است [۱۳]. اولین مورد استفاده ESS در اروپا بکارگیری واحدهای تلمبه‌ذخیره آبی برای تسطیح بار بود [۱۴]. مرجع [۱۵] با معرفی چارچوب مقاوم برنامه‌ریزی ESS، به بررسی مشارکت ESS در افق زمانی DAM پرداخته است. کارایی روش معرفی شده در این مرجع از دید ISO کاهش تلفات و از دید مالک ESS تضمین سود مشارکت است. ESS مورد بررسی در این مرجع، به علت ظرفیت بالای خود در دسته تعیین‌کننده قیمت قرار می‌گیرند. مرجع [۱۶] با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بار، تولید و قیمت، یک مدل RO دومرحله‌ای جهت برنامه‌ریزی و پیشنهاددهی ESS را فرمول‌بندی کرده است. در این مرجع سلول‌های خورشیدی به عنوان منبع اصلی RES در بازار شرکت می‌کند. در مرجع [۱۷] جهت تسویه مقاوم ERM از دو روش تجزیه بندرز و الگوریتم برش صفحه استفاده شده است، در ادامه الگوریتم برش صفحه، به دلیل همگرایی سریع‌تر، به عنوان روش تسویه بازار انتخاب شده است.

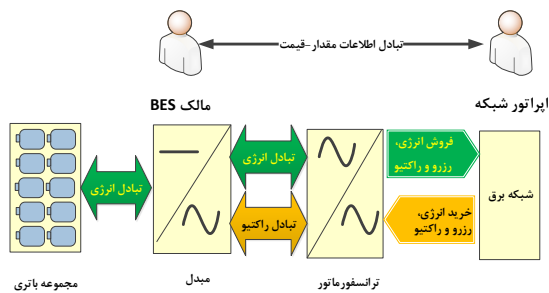
در مرجع [۱۸] تسویه بازار با مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت‌های RTM بر اساس روش RO و عدم قطعیت قیمت‌های DAM با SP اجرا شده است. در مرجع [۱۹]، مدل خطی تسویه هماهنگ بازارهای رقابتی-تعاملی برق و گاز ارائه شده است. ISO، تصمیمات شبکه برق برای DAM

²² Uncertainty Budget

²⁰ Conditional Value at Risk (CVaR)

²¹ Uncertainty Intervals

سپس با معرفی RO و کاربرد آن در پیشنهاددهی باتری، مدل مقاوم برای پیشنهاددهی BES (نحوه شارژ-دشارژ) در بازار فرمول‌بندی می‌شود. در ادامه سناریوهای مورد نظر برای بودجه مقاوم تحت SP به مدل اضافه شده و تابع هدف وزن‌دهی می‌شود. در شکل (۲)، طرح‌واره نحوه ارتباط بخش خصوصی با شبکه و اجزای داخلی BES نمایش داده شده است. فرض می‌شود محدودیت‌های ترانسفورماتور و کانورتر (مبدل) در تمام دوره‌ها رعایت شده است. مالک با در نظر گرفتن اطلاعات قیمتی کسب شده از عملکرد بازار و همچنین ملاحظات فنی خود، اقدام به خرید و فروش (شارژ/دشارژ) در بازار می‌نماید.



شکل ۲- نحوه تبادل فنی و اقتصادی یک BES با ISO

معادلات عمومی مربوط به مدل یک BES به شرح زیر است [۲۲-۲۳]:

$$SOC_{t_{24}} = SOC_{t_0} \quad (1)$$

$$SOC_{t_i} = SOC_{t_0} + \sum_{t \in T} P_{CH,t} \times \eta^{ch} - \sum_{t \in T} P_{DIS,t} \div \eta^{dis} \quad (2)$$

$$0 \leq SOC_t \leq SB^{rated} \quad (3)$$

$$U_t^{PCH} + U_t^{PDIS} \leq 1 \quad (4)$$

$$U_t^{QCH} + U_t^{QDIS} \leq 1 \quad (5)$$

$$P_{DIS,t} \leq U_t^{PDIS} \times SB^{rated} \quad (6)$$

$$P_{CH,t} \leq U_t^{PCH} \times SB^{rated} \quad (7)$$

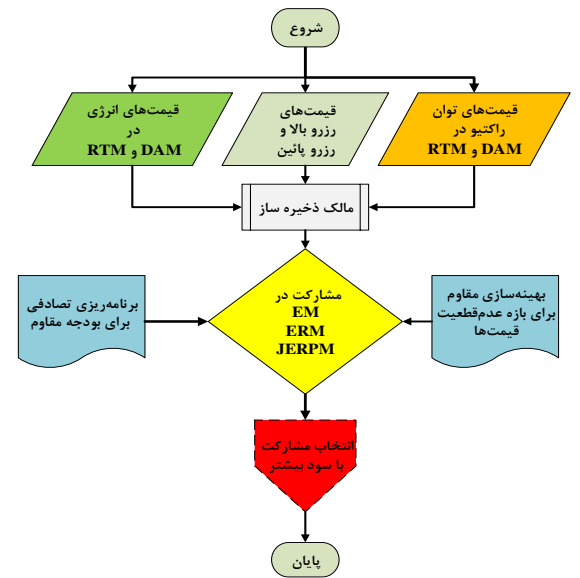
$$Q_{DIS,t} \leq U_t^{QDIS} \times SB^{rated} \quad (8)$$

$$Q_{CH,t} \leq U_t^{QCH} \times SB^{rated} \quad (9)$$

$$\sum_{t \in T} U_t^{PCH} + U_t^{PDIS} \leq SL \quad (10)$$

(ریسک‌گریز، معقول، میانه‌رو، محافظه‌کار و سودمحور) تابع هدف برابر با میانگین وزن‌دار احتمالی تصمیم‌گیرنده در نظر گرفته می‌شود. در نهایت تأثیر بازه و بودجه عدم قطعیت در هر بازار بررسی شده و بازاری که حداکثر سود را در پی دارد، به عنوان بستر مناسب مشارکت BES انتخاب می‌شود. روندنمایه پیشنهادی این مقاله در شکل (۱) نشان داده شده است. به طور خلاصه می‌توان نوآوری‌های مقاله را به صورت زیر بیان کرد:

- بهینه‌سازی ترکیبی تصادفی-مقاوم پیشنهاددهی
- در نظر گرفتن عدم قطعیت مرتبط با DAM و RTM
- بررسی تأثیر تأمین خدمات جانبی بر سود
- تحلیل حساسیت بودجه مقاوم و بازه عدم قطعیت بر سود هر بازار



شکل ۱- روندنمایه مدل پیشنهادی

بخش‌های مختلف مقاله به صورت زیر است: در بخش ۲ مدل عمومی BES و قیود آن و بررسی نحوه پیشنهاددهی آن آمده است. بخش ۳ شامل شبیه‌سازی مدل پیشنهادی و تحلیل نتایج حاصل از آن است. در پایان نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۴ ارائه شده است.

۲- فرمول‌بندی

۲-۱- مدل‌سازی باتری و مدل قیمت دهی

در این بخش، ابتدا مدل‌سازی مرسوم BES معرفی می‌شود. با توجه به افق زمانی مسأله (۲۴ ساعت)، نیازی به در نظر گرفتن هزینه استهلاک و کلیدزنی وجود ندارد. در مرحله پیشنهاددهی، مالک BES نیاز به جمع‌آوری اطلاعات قیمت‌های بازار در هر دوره زمانی DAM و RTM دارد.

در هر دوره زمانی، تنها یکی از متغیرهای باینری U_t^{PCH} و U_t^{PDIS} ، U_t^{QCH} ، U_t^{QDIS} انتخاب می‌شوند. η^{ch} و η^{dis} به ترتیب بازده شارژ و دشارژ باتری را مشخص می‌کنند. حداکثر ظرفیت مجاز برای شارژ/دشارژ برای انرژی و توان راکتیو در هر دوره زمانی، طبق روابط (۶)–(۹) برابر با ظرفیت BES در نظر گرفته می‌شود. رابطه (۱۰) حداکثر تعداد کلیدزنی مجاز در طی دوره را برابر با ${}^{23}SL$ در نظر می‌گیرد.

که در این روابط SOC_{t_0} انرژی اولیه BES در ابتدای دوره برنامه‌ریزی است که طبق رابطه (۱) باید برای انتهای دوره، دوباره به همین میزان ظرفیت برسد. SOC_t ظرفیت BES در زمان t است که طبق رابطه (۲)، وابسته به SOC_{t_0} و برنامه‌ریزی (خرید/فروش) انرژی BES در دوره‌های قبل است. طبق رابطه (۳)، ظرفیت انرژی در هر دوره نباید از توان نامی BES فراتر رود. در روابط (۴) و (۵) برای جلوگیری از شارژ و دشارژ همزمان

$$JERPM^{profit} = \sum_{s \in S} \min \sum_{t \in T} \rho_s \times \begin{bmatrix} Z_0 \times \Gamma_s + a_t - [\rho_t^{RTM} \times (P_{DIS,t}^{RTM} - P_{CH,t}^{RTM})] + \\ W_0 \times \Gamma_s + c_t - [\rho_t^{DAM} \times (P_{DIS,t}^{DAM} - P_{CH,t}^{DAM})] + \\ Y_0 \times \Gamma_s + b_t - [v_t^{DAM} \times (Q_{DIS,t}^{RTM} - Q_{CH,t}^{RTM})] + \\ X_0 \times \Gamma_s + d_t - [v_t^{DAM} \times (Q_{DIS,t}^{DAM} - Q_{CH,t}^{DAM})] \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$EM^{profit} = \sum_{s \in S} \min \sum_{t \in T} \rho_s \times \begin{bmatrix} Z_0 \times \Gamma_s + a_t - [\rho_t^{RTM} \times (P_{DIS,t}^{RTM} - P_{CH,t}^{RTM})] + \\ W_0 \times \Gamma_s + c_t - [\rho_t^{DAM} \times (P_{DIS,t}^{DAM} - P_{CH,t}^{DAM})] \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$ERM^{profit} = \sum_{s \in S} \min \sum_{t \in T} \rho_s \times \begin{bmatrix} Z_0 \times \Gamma_s + a_t - [\rho_t^{RTM} \times (P_{DIS,t}^{RTM} - P_{CH,t}^{RTM})] + \\ W_0 \times \Gamma_s + c_t - [\rho_t^{DAM} \times (P_{DIS,t}^{DAM} - P_{CH,t}^{DAM})] + \\ V_0 \times \Gamma_s + e(t) - [q_t \times (UR_t - DR_t)] \end{bmatrix} \quad (13)$$

(۱۱)–(۱۳) مشخص می‌شود که برای JERPM شامل چهار بخش هزینه برنامه‌ریزی انرژی در DAM، هزینه برنامه‌ریزی انرژی در RTM، هزینه برنامه‌ریزی توان راکتیو در DAM و هزینه برنامه‌ریزی توان راکتیو در RTM و تحت قیود (۱)–(۱۰) و (۱۴)–(۲۷) می‌باشد. در مورد EM تابع هدف (۱۲) تنها شامل هزینه برنامه‌ریزی انرژی در DAM و هزینه برنامه‌ریزی انرژی در RTM و تحت قیود (۱)–(۱۰) و (۱۴)–(۱۵)، (۱۸)، (۱۹)، (۲۴) و (۲۶) است. در نهایت در مورد ERM، تابع هدف (۱۲) شامل هزینه برنامه‌ریزی انرژی در DAM، هزینه برنامه‌ریزی انرژی در RTM و برنامه‌ریزی رزرو افزایشی (UR)^{۲۴} و رزرو کاهش‌ی (DR)^{۲۵} تحت قیود (۱)–(۱۰) و (۲۳) و (۲۸) می‌باشد. در نهایت رابطه (۲۹) تعلق بازه‌های عدم قطعیت به مجموعه U را بیان می‌کند. در این مقاله این بازه از ۰ تا ۰.۲۵٪ در نظر گرفته شده‌است.

برنامه‌ریزی (خرید/فروش) انرژی BES در دوره‌های قبل است. طبق رابطه (۳)، ظرفیت انرژی در هر دوره نباید از توان نامی BES فراتر رود. در روابط (۴) و (۵) برای جلوگیری از شارژ و دشارژ همزمان در هر دوره زمانی، تنها یکی از متغیرهای باینری U_t^{PCH} و U_t^{PDIS} ، U_t^{QCH} ، U_t^{QDIS} انتخاب می‌شوند. η^{ch} و η^{dis} به ترتیب بازده شارژ و دشارژ باتری را مشخص می‌کنند. حداکثر ظرفیت مجاز برای شارژ/دشارژ برای انرژی و توان راکتیو در هر دوره زمانی، طبق روابط (۶)–(۹) برابر با ظرفیت BES در نظر گرفته می‌شود. رابطه (۱۰) حداکثر تعداد کلیدزنی مجاز در طی دوره را برابر با SL در نظر می‌گیرد.

۲-۲- پیشنهاددهی در EM، JERPM و ERM

مدل پیشنهاددهی BES را می‌توان به صورت زیر بیان کرد. سود BES ناشی از برنامه‌ریزی‌های سه بازار با $JERPM^{profit}$ ، EM^{profit} و ERM^{profit} در رابطه‌های

²⁵ Down Reserve (DR)

²³ Switching Limit (SL)

²⁴ Up Reserve (UR)

می‌دهد. Γ نشان دهنده بودجه مقاوم (تعداد دوره‌های زمانی وقوع عدم قطعیت) برای دوره‌های زمانی بازار می‌باشد. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، رویکرد ریسک‌گریزی (محافظه‌کاری) BES بیشتر می‌شود، بدین معنی که مالک در تصمیم‌گیری خود، احتمال بیشتری برای وقوع انحراف از پیش‌بینی قیمت‌ها را در نظر می‌گیرد. در این مقاله مقدار این پارامتر در سناریوهای مختلف به ترتیب از ۰٪ (در هیچ ساعتی انحرافی رخ نمی‌دهد) تا ۱۰۰٪ (در تمام ۲۴ ساعت ممکن است انحراف از مقدار پیش‌بینی رخ دهد)، تغییر می‌کند.

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

اولین قدم در شبیه‌سازی، اعمال قیمت‌ها به تصمیم‌گیرنده است. قیمت‌های RTM به دلیل پیشامدهای شبکه و تغییر وضعیت عناصر بازار، عموماً بالاتر بوده و مشارکت BES در RTM بیشتر به صورت دشارژ خواهد بود. قیمت‌های انرژی و توان راکتیو طبق مرجع [۲۲] و قیمت رزرو طبق مرجع [۲۴] انتخاب شده است. افق برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده در این مقاله، ۲۴ ساعت بوده که در صورت افزایش دوره، لازم است هزینه‌های تعمیر، نگهداری و استهلاک ناشی از کلیدزنی نیز در نظر گرفته شود [۲۵]. شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب قیمت‌های انرژی-رزرو و توان راکتیو را در DAM و RTM نشان می‌دهند. با توجه به قیمت پائین رزرو، BES در ERM رزرو پائین را می‌خرد (شارژ) و انرژی می‌فروشد (دشارژ). مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار GAMS^{۲۶} در چارچوب MINLP و روش حل شاخه و کرانه استاندارد (SBB)^{۲۷} اجرا شده است [۲۶]. در جدول (۱) مشخصات BES شامل ظرفیت، توان، بازده در حالات شارژ و دشارژ و پارامترهای مرتبط با مدل بیان شده است.

جدول ۱- پارامترهای BES مورد مطالعه

BES	
ظرفیت	۱۰ مگاوات ساعت
حداکثر توان	۱۰ مگاوات
بازده شارژ	۰٫۹۷
بازده دشارژ	۰٫۹۲
بازه عدم قطعیت DAM	۰-٪۲۵
بازه عدم قطعیت RTM	۰-٪۲۵
تعداد مجاز کلیدزنی	۱۵ بار

$$Z_0 + a_t \geq \Delta \rho_t^{RTM} \times z_t \quad (14)$$

$$P_{DIS,t}^{RTM} - P_{CH,t}^{RTM} \leq z_t \quad (15)$$

$$Y_0 + b_t \geq \Delta v_t^{RTM} \times y_t \quad (16)$$

$$Q_{DIS,t}^{RTM} - Q_{CH,t}^{RTM} \leq y_t \quad (17)$$

$$W_0 + c_t \geq \Delta \rho_t^{DAM} \times w_t \quad (18)$$

$$P_{DIS,t}^{DAM} - P_{CH,t}^{DAM} \leq w_t \quad (19)$$

$$X_0 + d_t \geq \Delta v_t^{DAM} \times x_t \quad (20)$$

$$Q_{DIS,t}^{DAM} - Q_{CH,t}^{DAM} \leq x_t \quad (21)$$

$$V_0 + e_t \geq \Delta q_t \times v_t \quad (22)$$

$$UR_t - DR_t \leq v_t \quad (23)$$

$$Z_0, a_t, z_t \geq 0 \quad (24)$$

$$Y_0, b_t, y_t \geq 0 \quad (25)$$

$$W_0, c_t, w_t \geq 0 \quad (26)$$

$$X_0, d_t, x_t \geq 0 \quad (27)$$

$$V_0, e_t, v_t \geq 0 \quad (28)$$

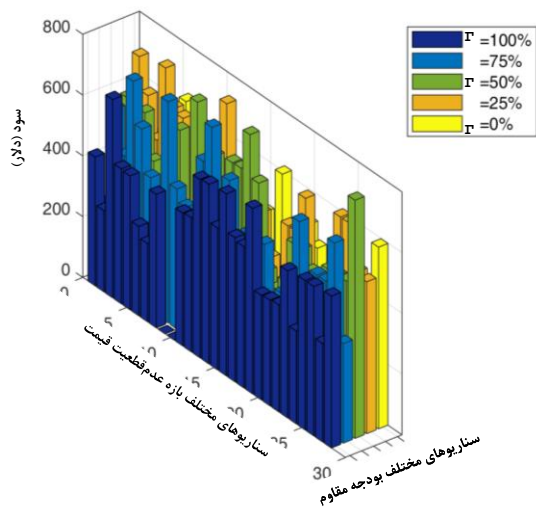
$$\text{in (14) to (28): } \forall a_t, b_t, c_t, d_t, e_t \in [U] \quad (29)$$

در مرحله بعد، احتمال تصمیم‌گیری در مورد بودجه عدم قطعیت در هر سناریو (Γ_s) وارد مدل‌سازی می‌شود. احتمال هر سناریو (ρ_s) در مقدار بهینه مقاوم ضرب شده و مجموع وزن‌دهی شده سود، میزان سود تضمین شده در بدترین شرایط بازار (بیشترین بازه عدم قطعیت قیمت) و تصمیم‌گیری مالک (اتخاذ رویکرد نامناسب در Γ_s) به دست می‌آید. در این رویکرد، هر اتفاق غیرمترقبه و تصمیم نادرست نیز مانع دستیابی مالک به این سود نخواهد شد. تحت هر شرایطی (وقوع بدترین سناریو)، سود مالک برابر یا بیشتر از مقدار به دست آمده از روابط (۱۱)-(۱۳) خواهد بود. جزئیات فرمول‌بندی و نحوه اعمال RO به تفصیل در مرجع [۲۲] آمده است. در مقایسه با این مرجع، بودجه عدم قطعیت دو بازار، یکسان در نظر گرفته شده است و تمرکز بیشتر بر بازه عدم قطعیت (انحراف از میزان پیش‌بینی شده) است. $\Delta \rho_t^{RTM}$ ، $\Delta \rho_t^{DAM}$ ، Δv_t^{RTM} و Δv_t^{DAM} به ترتیب حداکثر اختلاف قیمت انرژی و توان راکتیو را در دوره زمانی t در DAM و RTM نشان می‌دهد. Δq_t نیز تفاوت میان حداکثر و حداقل قیمت رزرو را در دوره زمانی t نشان

²⁷- Standard Branch and Bound (SBB)

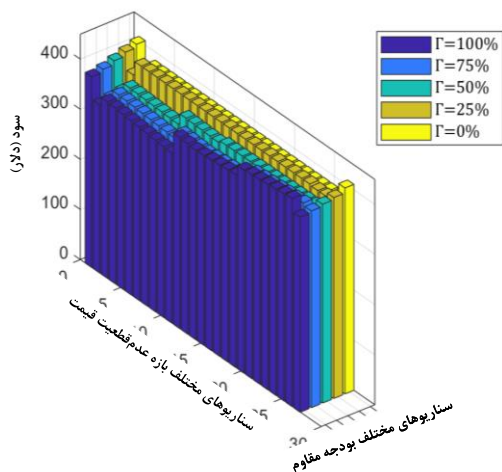
²⁶- General Algebraic Modeling System (GAMS)

با در دست داشتن اطلاعات فوق و طی شبیه‌سازی اولیه، شکل‌های (۶)–(۸) به ترتیب سود ناشی از مشارکت در هر بازار را نشان می‌دهند.



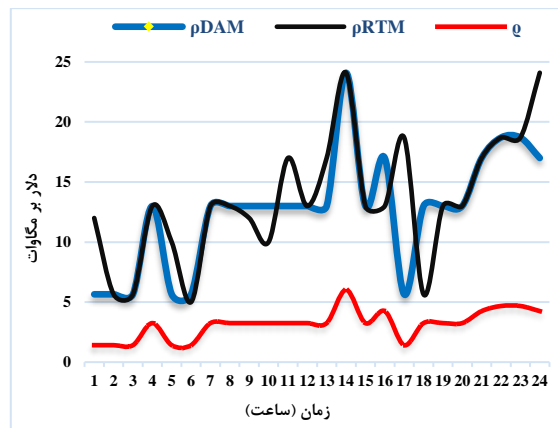
شکل ۶- سود ناشی از مشارکت در EM

مطابق شکل (۶)، با افزایش بودجه مقاوم و بازه عدم قطعیت، عموماً سود کاهش می‌یابد. به دلیل نوسانات قیمتی انرژی، هیچ الگوی خاصی برای سود BES متصور نیست. به خاطر رویکرد ریسک‌گریز، مالک در سناریو اول ($\Gamma=100\%$) در یک مرحله خاص، سود به صفر می‌رسد.

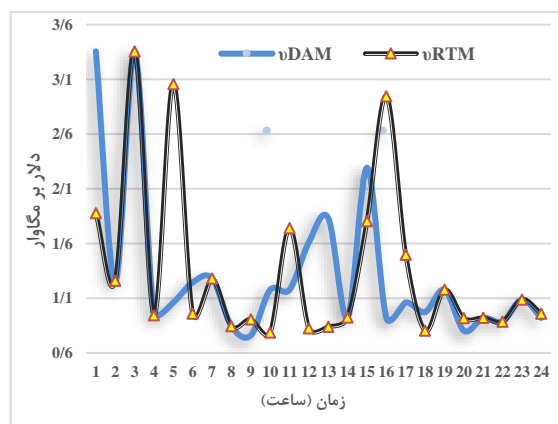


شکل ۷- سود ناشی از مشارکت در JERPM

در شکل (۷) با مشارکت در تأمین توان راکتیو، تأثیر عدم قطعیت‌های زمانی (Γ) و قیمتی (بازه عدم قطعیت) کاهش می‌یابد. در JERPM، حداکثر سود در بازه‌های عدم قطعیت صفر و $\Gamma=0\%$ کسب می‌شود. سود در سناریو ۴، حساسیتی نسبت به تغییرات فضای مسأله ندارد. در این بازار، در اکثر دوره‌ها، مالک توان راکتیو را می‌فروشد.

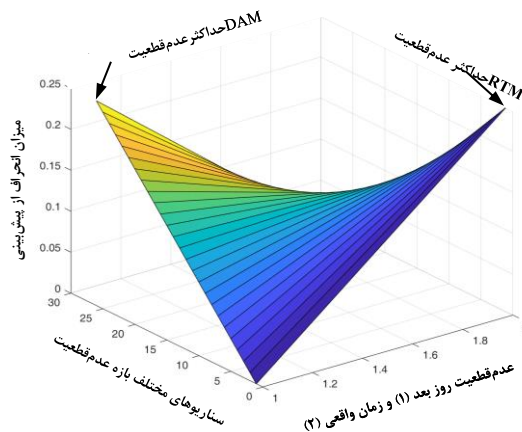


شکل ۳- قیمت انرژی و رزرو در شبانه‌روز مورد نظر



شکل ۴- قیمت توان راکتیو در شبانه‌روز مورد نظر

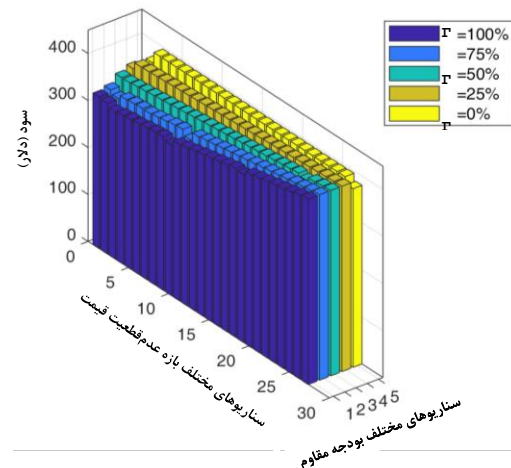
بازه‌های عدم قطعیت دو بازار، فضایی از عدم قطعیت را در دو بازار پدیدار می‌سازند. شکل (۵) فضای عدم قطعیت مسأله را نشان می‌دهد. ارتفاع هر سناریو، نشان دهنده میزان انحراف از پیش‌بینی قیمت است. عرض نشان از شماره سناریو قیمت و طول بازار مورد نظر را مشخص می‌کند. دومین مرحله، تخصیص احتمال به هر سناریو برای بودجه عدم قطعیت است.



شکل ۵- سناریوهای تشکیل دهنده فضای عدم قطعیت مسأله

جدول ۲- سناریو و احتمال وقوع

عنوان سناریو	Γ	تعداد ساعات	احتمال وقوع
سودمحور	۰٪	۰	۰,۰۵۰
معقول	۲۵٪	۶ ساعت	۰,۲۷۵
میان	۵۰٪	۱۲ ساعت	۰,۳۵۰
محافظة کار	۷۵٪	۱۸ ساعت	۰,۲۷۵
ریسک‌گریز	۱۰۰٪	۲۴ ساعت	۰,۰۵۰

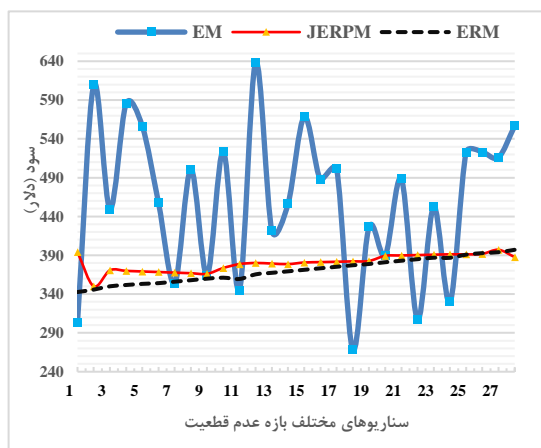


شکل ۸- سود ناشی از مشارکت در ERM

در جدول ۳، متوسط تعداد کلیدزنی BES در شبانه‌روز مورد نظر و با احتساب وزن‌دهی سناریوها آمده است (\bar{SL}). کسب سود بیشتر در EM، به طور متوسط مستلزم ۲ بار کلیدزنی بیشتر در شبانه‌روز است که در افق زمانی طولانی، می‌تواند باعث تحمیل هزینه قابل توجهی شود.

جدول ۳- متوسط تعداد کلیدزنی در هر بازار

	ERM	JERPM	EM
\bar{SL}	۱۱,۲	۱۱,۵	۱۳,۴

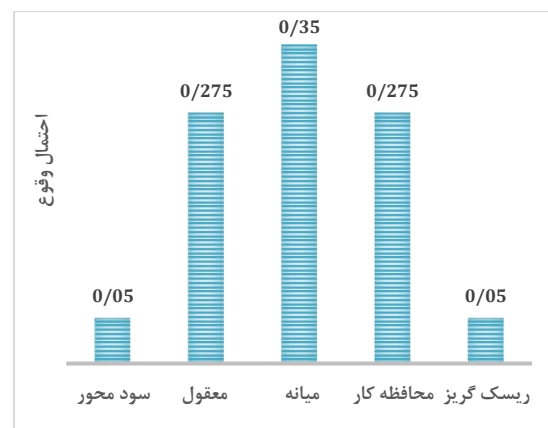


شکل ۱۰- مقایسه سود مالک از مشارکت در بازارهای مختلف

سود مشارکت در ERM و JERPM با کاهش بازه عدم‌قطعیت DAM، افزایش می‌یابد. ولی در EM در بازه‌های عدم‌قطعیت بالای RTM سود بیشتری نصیب مالک می‌شود. کسب میانگین سود بالاتر در EM مستلزم ریسک بالاتر است، همانگونه که در شکل (۱۰) مشخص است در ۵ سناریو، سود EM کمتر از دو بازار دیگر است ولی در نهایت مطابق جدول ۴، متوسط سود مشارکت در این بازار بالاتر است. برای دقت در میزان درآمد مالک در

مطابق شکل (۸) علیرغم کاهش سود نسبت به بازار انرژی، مشارکت در ERM، تأثیر عدم‌قطعیت را تا حد زیادی خنثی می‌کند. الگوی تغییرات سود نسبت به Γ کاملاً منطقی بوده: با کاهش بودجه و بازه عدم‌قطعیت سود افزایش می‌یابد. طی سناریوهای ۳، ۴ و ۵ (متناظر با تحقق عدم‌قطعیت در بیشتر از ۱۲ ساعت) سود تقریباً ثابت می‌ماند.

در مرحله دوم و سطح بالایی حل، نیاز به ورود SP به عنوان وزن‌دهنده در مورد هر سناریو می‌باشد. در این مقاله احتمال وقوع هر بازه زمانی مطابق شکل (۹) در نظر گرفته شده‌است. مجموع احتمالات برابر با واحد بوده و تقارن گوسی بر شکل حاکم است. بیشترین احتمال مرتبط با ۱۲ ساعت است.



شکل ۹- تخصیص احتمال سناریوهای پنج‌گانه

در جدول ۲، عنوان و احتمال عددی هر سناریو نیز آمده است.

با اعمال مرحله دوم و وزن‌دهی بر اساس احتمالات فوق، شکل (۱۰) میزان سود مالک بر حسب سناریوهای بازه قیمتی را نشان می‌دهد.

ظرفیت باقی مانده خود را تقویت می کند.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با بهره گیری از ترکیب دو روش بهینه سازی در فضای عدم قطعیت، فضای غیرقطعی مسأله پیشنهاددهی یک BES در بازارهای مختلف بررسی شد. RO برای بازه عدم قطعیت و SP برای تعیین بودجه مقاوم بکار گرفته شد. BES در نظر گرفته شده در این مقاله، قابلیت شارژ/دشارژ توان راکتیو و خرید و فروش رزرو را در کنار تأمین انرژی دارا بوده و بعنوان بازیگری مستقل و پذیرنده قیمت در بازار شرکت می کند. نتایج شبیه سازی نشان از ۲۱٪ سود بیشتر در مشارکت BES در EM نسبت به JERPM و ERM دارد. علیرغم سود بیشتر، مشارکت در این بازار با ریسک بالاتری همراه بوده و بازارهای خدمات جانبی می توانند بخوبی تأثیر هر دو نوع عدم قطعیت زمانی و قیمتی را تا حد قابل قبول، خنثی کند. شاخص های آماری سود سه بازار مورد مطالعه، حاکی از ثبات سود در ERM و JERPM نسبت به EM دارند. در ادامه می توان از دید ISO تأثیر مشارکت BES را بررسی کرد. تعیین بهینه جایابی BES در کنار منابع تجدیدپذیر برای دستیابی همزمان به اهدافی چون کاهش هزینه بهره برداری، کسب حداکثر سود مالک و کاهش تلفات از دیگر کارهای پیش رو است. بدیهی است بررسی و تلفیق دیگر روش های بهینه سازی و بررسی عدم قطعیت می تواند باعث کسب دیدگاه واقع بینانه تری از روند تصمیم سازی در بازار برق شود.

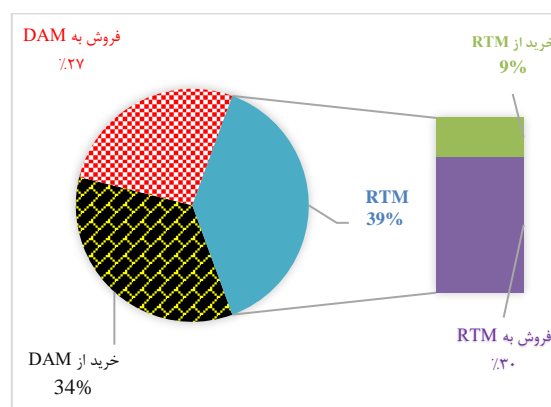
فهرست پارامترها و متغیرها

- Γ_s : بودجه مقاوم در سناریو s
- $P_{DIS,t}^{RTM}, P_{DIS,t}^{DAM}$: انرژی فروخته شده در RTM و DAM در t
- $P_{CH,t}^{RTM}, P_{CH,t}^{DAM}$: انرژی خریداری شده در RTM و DAM در t
- $Q_{DIS,t}^{RTM}, Q_{DIS,t}^{DAM}$: توان راکتیو فروخته شده در RTM و DAM در t
- $Q_{CH,t}^{RTM}, Q_{CH,t}^{DAM}$: توان راکتیو خریداری شده در RTM و DAM در t
- UR_t, DR_t : رزرو بالا و پائین در t
- $\rho_t^{RTM}, \rho_t^{DAM}$: قیمت انرژی در t در RTM و DAM
- v_t^{RTM}, v_t^{DAM} : قیمت توان راکتیو در t در RTM و DAM
- Q_t : قیمت رزرو در t
- ρ_s : احتمال سناریو s
- a_t, b_t, c_t, d_t, e_t : بازه عدم قطعیت قیمت های انرژی، راکتیو و رزرو
- Z_0, z_t, W_0, w_t : متغیرهای کمکی خطی سازی و دوگانی انرژی
- Y_0, y_t, X_0, x_t : متغیرهای کمکی خطی سازی و دوگانی توان راکتیو
- V_0, v_t : متغیرهای کمکی خطی سازی و دوگانی رزرو
- [U]: بازه عدم قطعیت

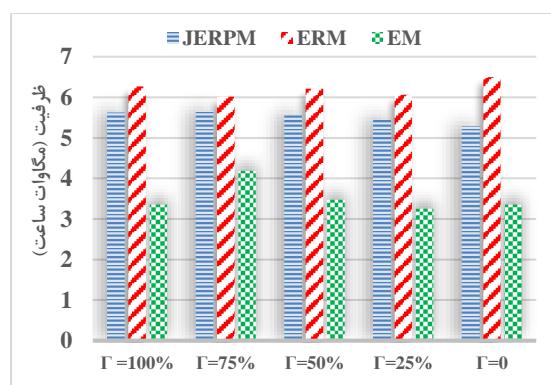
EM می توان به شکل (۱۱) دقت نمود. میزان تبادل انرژی مالک با RTM و DAM به ترتیب ۳۹٪ و ۶۱٪ است، در حالیکه درآمد مالک از RTM و DAM به ترتیب ۳۰٪ و ۲۷٪ نشان از نسبت درآمد به انرژی ($\frac{profit}{Energy}$) بالاتر در RTM دارد. نحوه تصمیم گیری مالک مبتنی بر خرید در DAM و فروش در RTM است.

جدول ۴- شاخص آماری سود سه بازار

	EM	JERPM	ERM
واریانس	۹۷۶۰,۴۸	۱۲۲,۸۴	۲۵۰,۸۳
میانگین	۴۶۰,۸۳	۳۷۹,۷۳	۳۷۰,۲۵
انحراف معیار	۹۷,۰۱	۱۰,۸۸	۱۵,۵۵



شکل ۱۱- درآمد EM بر حسب خرید و فروش (شارژ/دشارژ)



شکل ۱۲- SOC در بازارهای مختلف و سناریوهای گوناگون

در شکل (۱۲) میانگین ظرفیت BES در شبانه روز و طی هر سناریو مشاهده می شود. طبیعی است که برای کسب سود بالاتر، مالک در EM تا حد ممکن ظرفیت خود را برای شارژ و دشارژ در معرض ریسک بهره برداری قرار می دهد، ولی در دو بازار دیگر از طریق خرید رزرو و فروش راکتیو،

مراجع

- [1] N. Amjady, A. Rabiee, and H.A. Shayanfar. "Pay-as-bid based reactive power market." *Energy Conversion and Management* 51, no. 2 (2010): 376-381.
- [2] O. Gandhi, W. Zhang, C.D. Rodríguez-Gallegos, H. Verbois, H. Sun, T. Reindl, and D. Srinivasan. "Local reactive power dispatch optimisation minimising global objectives." *Applied energy* 262 (2020): 114529.
- [3] H. Ahmadi, and A. Akbari Foroud. "Improvement of the simultaneous active and reactive power markets pricing and structure." *IET Generation, Transmission & Distribution* 10, no. 1 (2016): 81-92.
- [4] K. Afshar, M. Ehsan, M. Fotuhi-Firuzabad, and N. Amjady. "Cost-benefit analysis and MILP for optimal reserve capacity determination in power system." *Applied Mathematics and Computation* 196, no. 2 (2008): 752-761.
- [5] M. Shahidepour, H. Yamin, and Z. Li. *Market operations in electric power systems: forecasting, scheduling, and risk management*. John Wiley & Sons, 2002.
- [6] M. Khaji, M. Amiri, and M.T. Taghavifard. "Co-optimized bidding strategy of an integrated wind-thermal system in electricity day ahead and reserve market under uncertainties." *Journal of Modeling in Engineering* 21, no. 75 (2023): 29-51.
- [7] A. Ebrahimi, A. Dideban, and R. Keypour. "A novel control strategy for solar-wind hybrid energy systems based on optimal battery charge and discharge limits in various time domain." (2019): 163-173.
- [8] J. Aghaei, A. Rahimi Rezaei, and M. Karimi. "Coordination of Wind Power Plants and Energy Storage Devices in Security-Constrained Unit Commitment Problem Using Robust Optimization." *Journal of Modeling in Engineering* 16, no. 53 (2018): 207-220.
- [9] S. Maiz, L. Baringo, and R. García-Bertrand. "Expansion planning of a price-maker virtual power plant in energy and reserve markets." *Sustainable Energy, Grids and Networks* 32 (2022): 100832
- [10] G. Sun, S. Shen, S. Chen, Y. Zhou, and Z. Wei. "Bidding strategy for a prosumer aggregator with stochastic renewable energy production in energy and reserve markets." *Renewable Energy* 191 (2022): 278-290.
- [11] R. Khalili, A. Khaledi, M. Marzband, A. Foroughi Nematollahi, B. Vahidi, and P. Siano. "Robust multi-objective optimization for the Iranian electricity market considering green hydrogen and analyzing the performance of different demand response programs." *Applied Energy* 334 (2023): 120737.
- [12] A. Samimi, "Probabilistic day-ahead simultaneous active/reactive power management in active distribution systems." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 7, no. 6 (2019): 1596-1607.
- [13] M. Kazemi, H. Zareipour, N. Amjady, W.D. Rosehart, and M. Ehsan. "Operation scheduling of battery storage systems in joint energy and ancillary services markets." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 8, no. 4 (2017): 1726-1735.
- [14] H. Mehrjerdi, R. Hemmati, and E. Farrokhi. "Nonlinear stochastic modeling for optimal dispatch of distributed energy resources in active distribution grids including reactive power." *Simulation Modelling Practice and Theory* 94 (2019): 1-13.
- [15] A. Barbry, M.F. Anjos, E. Delage, and K.R. Schell. "Robust self-scheduling of a price-maker energy storage facility in the New York electricity market." *Energy Economics* 78 (2019): 629-646.
- [16] Z. Wang, A. Negash, and D.S. Kirschen. "Optimal scheduling of energy storage under forecast uncertainties." *IET Generation, Transmission & Distribution* 11, no. 17 (2017): 4220-4226.
- [17] M. Zugno, and Antonio J. Conejo. "A robust optimization approach to energy and reserve dispatch in electricity markets." *European Journal of Operational Research* 247, no. 2 (2015): 659-671.
- [18] A. Akbari-Dibavar, K. Zare, and S. Nojavan. "A hybrid stochastic-robust optimization approach for energy storage arbitrage in day-ahead and real-time markets." *Sustainable Cities and Society* 49 (2019): 101600.
- [19] E. Abedini, and M. Jafari Nokandi. "Clearing for Coordinated Electricity and Gas Markets." *Journal of Modeling in Engineering* 19, no. 64 (2021): 53-66.
- [20] N. Amjady, B. Vatani, and H. Sharifzadeh. "OPTIMUM STOCHASTIC SELF-SCHEDULING FOR GENCOS CONSIDERING POOL AUCTION AND BILATERAL CONTRACTS." (2011): 21-29.
- [21] A. Hosseini, A. Sadeghi Yazdan, M. Hemmati, and M. Abapour. "Hybrid Robust Stochastic Bidding Strategy for Wind Farms Integrated with Compressed Air Energy Storage and Power to Gas Technology." *Journal of Modeling in Engineering* 19, no. 65 (2021): 137-148.
- [22] M. Farahani, A. Samimi, and H. Shateri. "Robust bidding strategy of battery energy storage system (BESS) in joint active and reactive power of day-ahead and real-time markets." *Journal of Energy Storage* 59 (2023): 106520.

- [23] H. Mehrjerdi, and R. Hemmati. "Modeling and optimal scheduling of battery energy storage systems in electric power distribution networks." *Journal of Cleaner Production* 234 (2019): 810-821.
- [24] A. Zakariazadeh, S. Jadid, and P. Siano. "Economic-environmental energy and reserve scheduling of smart distribution systems: A multiobjective mathematical programming approach." *Energy Conversion and Management* 78 (2014): 151-164.
- [25] C. Opathella, A. Elkasrawy, A.A. Mohamed, and B. Venkatesh. "Optimal scheduling of merchant-owned energy storage systems with multiple ancillary services." *IEEE Open Access Journal of Power and Energy* 7 (2019): 31-40.
- [26] M. Bussieck, J.H. Jagla, and L. Westermann. "GAMs General Algebraic Modeling System." 2010.