Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 13 - No. 4 – Winter 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Intelligent Cost Optimization in Hybrid Electricity-Gas Microgrids Considering Distributed Generation and Energy Storage

Shahryar Behnia[1], PhD Student, Saeed Kharrati[*2], Assistant Professor, Farshad Khosravi[3], Assistant Professor, Abdollah Rastgou[4], Assistant Professor

[1] Department of Electrical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, behnia.shahryar@gmail.com
[1] Department of Electrical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, dr.kharrati@iauksh.ac.ir
[1] Department of Electrical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, fkhosravi@iauksh.ac.ir
[1] Department of Electrical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, a.rastgou@iauksh.ac.ir

Abstract:
This paper presents a comprehensive framework for smart cost optimization in integrated electricity-gas microgrids considering distributed generation units, energy storage systems, and market price uncertainties. The primary objective is to minimize operational costs while enhancing the performance of microgrids under realistic and uncertain conditions. To this end, a hybrid optimization model based on Mixed-Integer Linear Programming (MILP) and Distributionally Robust Chance Constraints (DRCC) is developed and implemented in GAMS software using the CPLEX solver. The proposed model is formulated within a two-stage market structure, including the day-ahead and real-time markets, to ensure efficient planning and adaptive corrections under uncertainty. To evaluate the performance of the model, a typical hybrid microgrid comprising photovoltaic (PV), wind turbine (WT), microturbines, fuel cells, and battery energy storage systems (BESS) along with variable and interruptible loads is simulated. Numerical results indicate that the proposed framework leads to an 18% reduction in total operational cost, a 27% reduction in load curtailment, and over 95% utilization rate of renewable energy sources. Moreover, the deviation from market schedules is reduced by 55%, indicating improved robustness and resilience. The flexibility of the proposed model also enables its extension to other energy carriers such as heating and cooling, making it a promising solution for future multi-energy systems.

Keywords: Hybrid microgrid, Energy hub, Robust planning, Cost optimization, Energy storage, DRCC, Renewable energy sources

Received: 25 Dec. 2024
Revised: 20 Feb. 2025
Accepted: 26 Feb. 2025

Citation: Sh. Behnia, S. Kharrati, F. Khosravi, A. Rastgou, “Intelligent Cost Optimization in Hybrid Electricity-Gas Microgrids Considering Distributed Generation and Energy Storage”, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 4, pp. 65- 83, Ferbruary 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی هوشمند هزینه‌های انرژی در ریزشبکه‌های ترکیبی برق و گاز با در نظر گرفتن تولید پراکنده و ذخیره‌سازی

شهریار بهنیا[1]، دانشجوی دکتری، سعید خراطی[2*]، استادیار، فرشاد خسروی[3]، استادیار، عبداله راستگو[4]، استادیار

۱- گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، behnia.shahryar@gmail.com
۲- گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، dr.kharrati@iauksh.ac.ir
۳- گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، fkhosravi@iauksh.ac.ir
۴- گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، a.rastgou@iauksh.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک چارچوب جامع برای بهینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری در ریزشبکه‌های ترکیبی برق و گاز با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازی انرژی، و نوسانات قیمتی در بازار انرژی ارائه شده است. هدف اصلی، کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش کارایی بهره‌برداری از منابع در شرایط واقعی و نامطمئن است. برای این منظور، یک مدل ترکیبی بهینه‌سازی بر پایه برنامه‌ریزی خطی صحیح آمیخته (MILP) و روش برنامه‌ریزی مقاوم مبتنی بر قیود احتمالاتی (DRCC) توسعه یافته و در محیط نرم‌افزار گمز با استفاده از حل‌کننده CPLEX پیاده‌سازی شده است. مدل پیشنهادی در قالب یک ساختار دو مرحله‌ای بازار (شامل بازار روز-قبل و بازار لحظه‌ای) تدوین شده تا تصمیم‌گیری‌های برنامه‌ریزی و اصلاح انحرافات تولید در شرایط عدم‌قطعیت به‌صورت مؤثر انجام گیرد. برای ارزیابی عملکرد مدل، یک ریزشبکه شامل منابع خورشیدی، بادی، میکروتوربین، سلول سوختی، و باتری، همراه با بارهای متغیر و قابل کنترل شبیه‌سازی شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که استفاده از مدل پیشنهادی باعث کاهش ۱۸ درصدی هزینه کل بهره‌برداری، کاهش ۲۷ درصدی بار قطع‌شده، و افزایش نرخ بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر به بیش از ۹۵ درصد شده است. همچنین، انحراف از برنامه بازار به میزان ۵۵ درصد کاهش یافته و پایداری سیستم بهبود یافته است. انعطاف‌پذیری ساختار مدل، قابلیت تعمیم آن به حامل‌های دیگر مانند گرما و سرمایش را نیز فراهم می‌سازد.

کلمات کلیدی: ریزشبکه ترکیبی، هاب انرژی، برنامه‌ریزی مقاوم، بهینه‌سازی هزینه، ذخیره‌سازی انرژی، منابع تجدیدپذیر

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۸

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر سعید خراطی
نشانی نویسنده مسئول: گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4 - Winter 2025

۱- مقدمه

با افزایش تقاضای انرژی، کاهش منابع فسیلی و رشد تولیدات تجدیدپذیر، مدیریت هوشمند منابع انرژی به یکی از چالش‌های اساسی در شبکه‌های قدرت تبدیل شده است. از آن‌جا که تولید برق در بسیاری از نیروگاه‌ها وابسته به گاز طبیعی است، مدیریت هم‌زمان شبکه‌های برق و گاز اهمیت ویژه‌ای می‌یابد.

ریزشبکه (MG^1) های ترکیبی برق و گاز، به‌ویژه در قالب ساختارهای مرکز انرژی (EH^2)، راهکاری نوین برای بهره‌برداری بهینه و کاهش هزینه‌ها محسوب می‌شوند. با این حال، پیچیدگی مدل‌سازی و وجود منابع پراکنده (DG^3)، ذخیره‌سازها و عدم‌قطعیت‌های قیمتی، نیازمند توسعه روش‌های بهینه‌سازی هوشمند و دقیق است. در این پژوهش، تلاش شده تا با مدل‌سازی یکپارچه و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، هزینه‌های بهره‌برداری در ریزشبکه ترکیبی برق و گاز به‌صورت هوشمند کاهش یابد.

بدون تردید، یکی از چالش‌های اصلی قرن اخیر، چالش انرژی تلقی شده است. این چالش، که در حوزه‌هایی چون تأمین، تبادل و مصرف انرژی مشاهده می‌شود، به‌واسطه عواملی نظیر رشد جمعیت، افزایش جهانی تقاضا برای انرژی، کاهش منابع فسیلی، آلودگی‌های زیست‌محیطی و نگرانی‌های مرتبط با امنیت انرژی، به یکی از موضوعات مهم جهانی تبدیل شده است [۱].

اهمیت انرژی، به‌واسطه ارتباط تنگاتنگ آن با جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و امنیتی، دوچندان شده است. در این راستا، موضوعاتی چون امنیت انرژی، توزیع عادلانه، قابلیت پرداخت، قابلیت اطمینان، بهره‌وری، و سازگاری با محیط زیست، به‌عنوان چالش‌های مهم در این حوزه مطرح شده‌اند [۱].

تولید برق در نزدیکی محل مصرف، راهکاری دانسته شده است که علاوه بر کاهش تلفات شبکه، امکان انعطاف‌پذیری بیشتری را در ارائه خدمات متنوع به مصرف‌کنندگان فراهم می‌سازد. با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه‌های قدرت و تنوع فناوری‌های مورد استفاده، به‌ویژه در انواع تجدیدپذیر آن‌ها، چالش‌هایی اساسی در طراحی آینده سیستم‌های قدرت ایجاد شده است. یکی از مفاهیم نوین برای تجمیع این منابع، ریزشبکه‌ها هستند که به‌عنوان شبکه‌های توزیع فعال در سطوح ولتاژ پایین و متوسط تعریف شده‌اند و از مجموعه‌ای از بارها، منابع تولید و تجهیزات کنترلی تشکیل می‌شوند. این شبکه‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که بتوانند در شرایط لازم از شبکه اصلی جدا شده و به‌صورت مستقل (جزیره‌ای) به فعالیت خود ادامه دهند. هدف اصلی از شکل‌گیری ریزشبکه‌ها، ارتقاء قابلیت اطمینان و بهبود کیفیت توان تحویلی به مصرف‌کننده‌ها در سطح محلی بوده و این ساختارها، از منظر شبکه‌های بالادستی، گاه به‌عنوان بار و گاه به‌عنوان منبع تولید تلقی می‌شوند.

در گذشته، سامانه‌های مختلف انرژی به‌صورت مستقل برنامه‌ریزی و مدیریت می‌شده‌اند. اما با توسعه فناوری‌هایی نظیر سامانه‌های چندتولیدی با بازده بالا، امکان بهره‌برداری از مزایای زیرساخت‌های انرژی یکپارچه نظیر شبکه‌های برق، گاز طبیعی و گرمایش ناحیه‌ای فراهم شده است و در نتیجه، حرکت سریعی به‌سوی سامانه‌های چندحامله انرژی (MES^4) شکل گرفته است. در این سامانه‌ها، حامل‌های انرژی و سامانه‌های مختلف به‌صورت هم‌افزا با یکدیگر تعامل دارند. با این حال، تحقق عملی این رویکرد مستلزم بهره‌گیری از ابزاری مناسب جهت مدیریت یکپارچه اجزای سامانه است. در این میان، مفهوم «مرکز انرژی» به‌عنوان مکانی که در آن فرآیندهای تولید، تبدیل، ذخیره‌سازی و مصرف حامل‌های انرژی به‌صورت متمرکز انجام می‌شود، به‌عنوان یکی از گزینه‌های امیدوارکننده برای مدیریت یکپارچه سامانه‌های چندحامله معرفی شده است [۲].

بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده [۳]، یک چرخه پیشرفته و ترکیبی تولید توان مورد ارزیابی قرار گرفته است تا انرژی پایدار با توان و بازده بالا به‌دست آید. در این چرخه ترکیبی، از فرایند گازی‌سازی زیست‌توده، توربین پیشرفته مرطوب‌شونده مرحله‌ای ($CHAT^5$)، و توربین بخار استفاده شده است. سوخت مورد نیاز این سامانه، از گازی تأمین می‌شود که طی فرایند تبدیل زیست‌توده به گاز تولید می‌گردد.

در مطالعه‌ای، برنامه‌ریزی بهینه برای سامانه‌های منطقه‌ای انرژی با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف تأمین انرژی و بارهای انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته است؛ به‌طوری که برای سامانه‌های چندحامله، مدلی از مرکز انرژی شامل سامانه ذخیره‌ساز انرژی و خودروی برقی یکپارچه توسعه داده شده است [۴].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

در ساختار سامانه مرکز انرژی چندحامله (MCHES[6])، تأمین هم‌زمان نیازهای متنوع انرژی مانند گرمایش، سرمایش و برق با استفاده از منابع مختلف انرژی امکان‌پذیر شده است. همچنین در پژوهشی دیگر، یک رویکرد بهینه‌سازی مقاوم (ROA[7]) برای برنامه‌ریزی این سامانه‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، عدم‌قطعیت در قیمت بازار، و حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی به تقاضای چندگانه (MDRP[8]) ارائه شده است [۵].

در سال‌های اخیر، توسعه فناوری‌های مرتبط با شبکه‌های هوشمند و ریزشبکه‌ها اهمیت فزاینده‌ای یافته است. به‌ویژه، بهینه‌سازی مشارکت هاب‌های انرژی در بازارهای روز-بعد و زمان واقعی، نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها و کاهش آلودگی محیط زیست ایفا می‌کند [۶].

در مرجع دیگری، مسیرهای برق و گاز به‌طور هم‌زمان مرور شده‌اند و بررسی تعادل بین این دو حامل انرژی به‌عنوان گامی در جهت تبدیل آن‌ها به مرکز انرژی مدنظر قرار گرفته است [۷]. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، اثر متقابل مسیرهای الکتریکی بر تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مسیرهای گازی و بالعکس تحلیل و این مسیرها به‌صورت بهینه تنظیم شده‌اند [۸]. در نهایت، تأثیر هم‌زمان این دو شبکه در سطح تصمیم‌گیری کلان برای طراحی مراکز انرژی ترکیبی نیز بررسی شده است [۹].

گسترش منابع تولید تجدیدپذیر که به‌صورت پراکنده در شبکه توزیع شده‌اند، چالش‌های متعددی را برای شبکه‌های توزیع برق به همراه داشته است. پیشرفت‌های اخیر در فناوری باتری، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر باتری (BESS[9]) را از نظر اقتصادی نسبت به گذشته مقرون‌به‌صرفه‌تر ساخته است؛ از این‌رو، به‌کارگیری این تجهیزات در سطح شبکه، به‌ویژه در لایه توزیع، مناسب ارزیابی شده است. همچنین، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی پراکنده، عاملی مؤثر در افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر در شبکه توزیع محسوب می‌شوند. در یکی از مطالعات، بهینه‌ترین شرایط برای جانمایی و ظرفیت‌یابی این باتری‌ها به‌دست آمده است؛ شرایطی که بر پایه هزینه سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و نگهداری تجهیزات تعیین شده است [۱۰].

یکی از روش‌های کلیدی در کنترل ریزشبکه‌ها، راهبرد کنترل افتی است که به‌عنوان یک روش غیرمتمرکز برای تنظیم مستقل ولتاژ و فرکانس بدون نیاز به ارتباط میان واحدها شناخته شده است و کاربرد آن در ریزشبکه‌های جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر بسیار حائز اهمیت است [۱۱]. با توجه به افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌خصوص انرژی خورشیدی، نوسانات در تولید این منابع موجب ضرورت استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی شده است که بتوانند تعادل توان را حفظ کرده و عملکرد پایدار سیستم را تضمین کنند. در این راستا، سیستم‌های ترکیبی باتری-ابرخازن با استراتژی‌های کنترلی پیشرفته، توانسته‌اند عملکرد بهینه‌ای در مدیریت انرژی ارائه دهند [۱۲]. علاوه بر این، برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های انرژی که شامل تولید، انتقال و ذخیره‌سازی با توجه به تأثیرات منابع تجدیدپذیر و شبکه‌های گاز طبیعی، نیازمند مدل‌های پیچیده و کارآمد است. مدل‌های دو سطحی تصادفی که تعامل بین برق، گاز و انرژی‌های تجدیدپذیر را به‌صورت جامع در نظر می‌گیرند، ابزارهای مناسبی برای طراحی استراتژی‌های توسعه پایدار و یکپارچه محسوب می‌شوند [۱۳].

بر اساس گزارش ارائه‌شده در مرجع [۱۴]، در لایه کنترلی، هر بهره‌بردار ریزشبکه با بهره‌بردار شبکه توزیع (DNO[10]) در ارتباط قرار داده شده است تا مدیریت تولید و مصرف به‌صورت هماهنگ انجام گیرد. در این چارچوب، برنامه‌ریزی منابع تولیدی توسط DNO با در نظر گرفتن احتمال جزیره‌ای شدن ریزشبکه‌ها در سطح شبکه توزیع انجام شده است.

در مطالعه‌ای دیگر، تحلیل حساسیت به‌منظور ارزیابی تأثیر فناوری‌های نوین بر شبکه‌های مسکونی با ولتاژ پایین و نامتعادل در منطقه ایرلند شمالی انجام گرفته و اثر توان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است؛ نتایج نیز با استفاده از شاخص‌های فنی گوناگون تحلیل شده‌اند [۱۵].

همچنین، در مرجع [۱۶]، روشی بهینه برای تعیین محل مناسب نصب سامانه ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر باتری و همچنین ظرفیت نفوذ بهینه توان بادی با هدف بهره‌برداری مؤثر از عملیات شارژ و دشارژ باتری‌ها ارائه شده است.

در مرجع [۱۷]، تخصیص بهینه سامانه ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر باتری در شبکه‌های توزیع شعاعی بررسی شده است؛ به‌گونه‌ای که هدف از این تخصیص، تنظیم ولتاژ باس‌ها و کاهش هزینه‌های انرژی در سطح شبکه بیان شده است. همچنین، بر اساس یافته‌های ارائه‌شده در مرجع [۱۸]، در سال‌های اخیر، سامانه ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر باتری به‌عنوان راهکاری امیدبخش برای کاهش نوسانات فرکانسی ناشی از ژنراتورهای بادی در نظر گرفته شده است. همچنین، در منابع [۱۹] تا [۲۱]،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4 - Winter 2025

برآورد طول عمر تجهیزات شبکه‌های الکتریکی مطالعه و تحلیل شده است تا بتوان از دیدگاه پایداری و نگهداری پیشگیرانه، عملکرد بهینه تجهیزات را در بلندمدت تضمین کرد.

در شبکه‌های توزیع، شاخص پایداری ولتاژ به‌عنوان یکی از مسائل مهم مطرح شده و به‌عنوان یک تابع هدف امنیتی در نظر گرفته می‌شود. به همین دلیل، بررسی این شاخص از طریق مدیریت انرژی در سطح شبکه توزیع ضروری دانسته شده است. بر اساس مطالعه ارائه‌شده در مرجع [۲۲]، این شاخص در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ شده و روش پیکربندی پویای فیدر توزیع (DDFR[11]) به‌عنوان روشی مناسب برای مدیریت آن معرفی گردیده است. در این مطالعه، شاخص پایداری ولتاژ، تلفات توان و هزینه‌های بهره‌برداری در حضور واحدهای خورشیدی (PV[12])، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی، و خازن‌ها به‌طور هم‌زمان بررسی شده است.

با توجه به اینکه در شبکه‌های توزیع، قیمت برق و الگوی بار همواره در حال تغییر است، مسائل بهره‌برداری نیز به‌طور مستمر تحت تأثیر این نوسانات قرار می‌گیرند. لذا، برای جلوگیری از بروز مشکلات عملیاتی، مدل‌سازی مسئله در بازه‌های زمانی مختلف پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۳]، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر روش DDFR و در حضور واحدهای PV و سامانه‌های ذخیره‌سازی، در بازه‌های زمانی متوالی ارائه شده است. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، یک سامانه مرکز انرژی مقرون‌به‌صرفه با استفاده از برنامه‌ریزی خطی معرفی شده است که در آن تجهیزاتی نظیر مبدل‌های ترانسفورمری، واحدهای ترکیبی حرارت و برق (CHP[13])، مبدل‌های حرارتی، ذخیره‌سازهای انرژی و ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی (EVCS[14]) در نظر گرفته شده‌اند [۲۴].

در سیستم‌های قدرت، حفظ تعادل میان تولید و مصرف توان حیاتی است تا نوسانات فرکانس که ناشی از این عدم تعادل است، به حداقل برسد. کنترل فرکانس بار به عنوان یک راهکار کلیدی در سطح دوم کنترل، با هدف کاهش تغییرات فرکانس و تضمین پایداری سیستم قدرت به کار گرفته می‌شود و شبیه‌سازی‌های آن بر روی نیروگاه‌های توربین گازی نشان‌دهنده تأثیر پارامترهای مختلف سیستم بر عملکرد و پایداری است [۲۵]. از سوی دیگر، توسعه شبکه انتقال برق در مقیاس‌های بزرگ و واقعی، نیازمند استفاده از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته برای مدیریت پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌ها است. الگوریتم بهینه‌سازی گلف به عنوان یکی از روش‌های قدرتمند در حل مسائل تصادفی برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال، توانسته است با ارائه راهکارهای دقیق و کارآمد، به ویژه در شبکه‌های بزرگ و پیچیده‌ای مانند شبکه برق ایران، بهبود عملکرد و افزایش بهره‌وری سیستم‌های انرژی را ممکن سازد [۲۶].

در مطالعه انجام‌شده در [۲۷]، بهبود عملکرد توربین‌های بادی با هدف کاهش ضرایب خطا و تزریق داده‌های اشتباه در ریزشبکه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۲۸] نیز طرح هماهنگی حفاظتی بهینه در یک ریزشبکه شامل منابع تجدیدپذیر که به شبکه سراسری متصل است را بیان می‌کند.

ریزشبکه‌ها به‌عنوان واحدهای محلی تولید، مصرف و مدیریت انرژی، نقش کلیدی در گذار از شبکه‌های سنتی به سامانه‌های چندحامله ایفا می‌کنند. این ریزشبکه‌ها با بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر، ذخیره‌سازها، و بارهای قابل‌کنترل، می‌توانند هم به‌صورت متصل به شبکه اصلی و هم به‌صورت جزیره‌ای عمل کنند. در سامانه‌های چندحامله، ریزشبکه‌ها به‌عنوان اجزای انعطاف‌پذیر و هوشمند، قابلیت تلفیق و هماهنگی میان حامل‌های انرژی مختلف مانند برق، گاز، گرما و سرمایش را فراهم می‌سازند. به‌ویژه زمانی که ساختار مرکز انرژی در آن‌ها پیاده‌سازی شود، ریزشبکه‌ها به نقاط تصمیم‌گیری محلی تبدیل می‌شوند که می‌توانند جریان‌های انرژی را به‌صورت بهینه بین منابع و مصرف‌کننده‌ها مدیریت کنند. بنابراین، ریزشبکه‌ها در بستر سامانه‌های چندحامله، نه تنها موجب افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌ها می‌شوند، بلکه امکان تاب‌آوری و پایداری بیشتر در برابر نوسانات بازار و شرایط بحرانی را نیز فراهم می‌سازند.

مرور منابع پیشین نشان می‌دهد که در اغلب پژوهش‌های مرتبط با مدیریت انرژی در شبکه‌های میکروگرید، تمرکز عمده بر بهینه‌سازی یک حامل انرژی، اعم از برق یا گاز، به‌صورت مجزا بوده است. همچنین در بسیاری از مطالعات، استفاده از مدل‌های ساده‌شده و مفروضات محدودکننده، از جمله ثابت فرض کردن قیمت انرژی، در نظر نگرفتن بارهای مختلف و عدم مدل‌سازی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

دقیق منابع تولید پراکنده، سبب شده است تا نتایج حاصل از این پژوهش‌ها از کارایی کافی در شرایط عملیاتی واقعی برخوردار نباشند.

از سوی دیگر، در بخش قابل‌توجهی از تحقیقات گذشته، ارتباط دوسویه میان شبکه‌های گاز و برق به‌صورت جامع مورد تحلیل قرار نگرفته و نقش کلیدی هاب انرژی به عنوان یک واحد یکپارچه جهت مدیریت تبدیل، ذخیره و توزیع چند حامل انرژی مغفول مانده است. در برخی مطالعات نیز، از دیدگاه زمان‌بندی کوتاه‌مدت یا مدل‌سازی تک‌هدفه بهره گرفته شده و تحلیل چندهدفه‌ی هزینه‌ای در بازه زمانی شبانه‌روزی کمتر مدنظر قرار گرفته است.

همچنین در مدل‌های موجود، استفاده از رویکردهای مقاوم در برابر عدم قطعیت (نظیر روش DRCC) به‌منظور مدیریت نوسانات قیمت انرژی و تولید منابع تجدیدپذیر بسیار محدود بوده و اغلب فرضیات قطعی بر مدل‌ها حاکم بوده است.

بنابراین، خلأهای اصلی پژوهشی که پژوهش حاضر در صدد رفع آن‌هاست، به شرح زیر هستند:

- فقدان مدل یکپارچه و واقع‌گرایانه برای بهینه‌سازی هم‌زمان شبکه‌های گاز و برق در میکروگریدهای ترکیبی؛
- عدم استفاده از مدل‌های چندهدفه و چندبازه زمانی با لحاظ منابع تولید پراکنده متنوع و رفتار بار متغیر؛
- نبود تحلیل اقتصادی دقیق با رویکرد مقاوم در برابر عدم قطعیت‌های بازار انرژی؛
- بی‌توجهی به نقش عملیاتی هاب انرژی به عنوان مرکز تجمیع و مدیریت چند حامل انرژی به‌صورت هم‌زمان.

بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌های شبکه‌های میکروگرید الکتریکی و گازی با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده و مدیریت هوشمند انرژی در قالب مفهوم هاب انرژی است. در این راستا، با بهره‌گیری از مدل‌سازی دقیق اجزای شبکه‌های الکتریکی و گازی، از جمله منابع تولید انرژی تجدیدپذیر، سلول‌های سوختی، میکروتوربین‌ها و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، تلاش شده است تا الگویی عملیاتی و بهینه برای برنامه‌ریزی تولید انرژی در یک بازه زمانی ۲۴ ساعته ارائه شود.

برخلاف اکثر مطالعات قبلی که یا تنها به یک حامل انرژی پرداخته‌اند یا از مدل‌های ساده و قطعی استفاده کرده‌اند، در این پژوهش یک مدل واقع‌گرایانه و مقاوم با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها، منابع متنوع و ساختار بازار دو مرحله‌ای توسعه یافته است که منجر به تصمیم‌گیری دقیق‌تر و کاهش هزینه‌ها شده است. جدول (۱) نقاط قوت و نوآوری‌های کلیدی این مقاله را بیان می‌کند.

Table (1): Comparison of the present study with other related studies

جدول (۱): مقایسه پژوهش حاضر با سایر مطالعات مرتبط

مرجع	تمرکز پژوهش	روش بهینه‌سازی	عدم‌قطعیت‌ها	چند حامل انرژی	نوآوری کلیدی
[۴]	مشارکت هاب انرژی با EV	MILP	عدم‌قطعیت قیمت	بله	استفاده از EV در مدل انرژی
[۵]	برنامه‌ریزی مقاوم هاب انرژی	ROA	بله	بله	برنامه‌ریزی با محدودیت زیست‌محیطی
[۸]	فناوری Power-to-Gas	مدل‌سازی شبکه	خیر	بله	کاهش ازدحام گاز
[۱۰]	برنامه‌ریزی BESS در شبکه	MINLP	خیر	خیر	طراحی برای ولتاژ نامتعادل
مقاله حاضر	بهینه‌سازی هزینه در ریزشبکه ترکیبی	MILP + DRCC	بله	بله	مدل چندهدفه مقاوم با ساختار بازار دو مرحله‌ای و تعامل برق-گاز

نوآوری‌های اصلی پژوهش حاضر را می‌توان به شرح زیر برشمرد:

۱) بهینه‌سازی هم‌زمان شبکه‌های گاز و برق با در نظر گرفتن وابستگی متقابل این دو حامل انرژی در فرایند تولید و مصرف، که در مطالعات پیشین کمتر به‌صورت تلفیقی بررسی شده است،

۲) مدل‌سازی واقع‌گرایانه و چندهدفه با استفاده از الگوریتم MILP در محیط گمز، که علاوه‌بر کاهش هزینه‌های عملیاتی، به بررسی رفتار دینامیکی بارها، قیمت‌های متغیر انرژی و عملکرد منابع در شرایط واقعی می‌پردازد،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4 - Winter 2025

۳) بررسی تفصیلی نقش سیستم هاب انرژی در ارتقای کارایی و مدیریت انرژی در میکروگریدهای ترکیبی، و تحلیل تأثیر آن بر کاهش هزینه و بهبود قابلیت اطمینان سیستم،
۴) در نظر گرفتن انواع مختلف بار و منابع انرژی تجدیدپذیر در قالب یک مدل ترکیبی شامل تولیدات بادی، خورشیدی، سوختی و ذخیره‌سازی، که موجب افزایش دقت در تحلیل و تصمیم‌گیری می‌شود،
۵) استفاده از روش (DRCC مدل مقاوم مبتنی بر قیود احتمالاتی) به‌منظور مدیریت عدم قطعیت‌ها در قیمت انرژی و تولید منابع تجدیدپذیر، که تضمینی برای پایداری و قابلیت اطمینان برنامه‌ریزی پیشنهادی در مواجهه با شرایط متغیر فراهم می‌آورد.

در مجموع، پژوهش حاضر با ارائه مدلی ترکیبی، چندهدفه و مقاوم، گامی مؤثر در جهت بهبود مدیریت انرژی در میکروگریدهای چندحامله برداشته و امکان کاهش هزینه‌های بهره‌برداری را به‌صورت معنادار فراهم می‌سازد.

با توجه به آنچه گفته شد، این مقاله در شش بخش تنظیم شده است. در ابتدا و در بخش مقدمه، به بررسی چالش‌های موجود در مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها و مرور ادبیات پیشین پرداخته شده است. سپس در بخش دوم، معرفی مفهومی و ساختاری هاب انرژی و تعاملات بین برق و گاز بیان شده است. در ادامه و در بخش سوم، توسعه مدل ریاضی برای اجزای شبکه و اتصال آن‌ها بیان شده است. سپس در بخش چهارم، توابع هدف، روشMILP ، قیود فنی و قیود.DRCC تعریف شده است. در ادامه و در بخش پنجم، به ارزیابی عملکرد مدل در سناریوهای مختلف و تحلیل عددی رفتار سیستم پرداخته شده و در نهایت و در بخش ششم، تفسیر نتایج و ارائه پیشنهادات برای استفاده عملی از مدل بیان شده است.

۲- طراحی ساختار انرژی هوشمند

افزایش پیچیدگی شبکه‌های انرژی و رشد منابع تجدیدپذیر، لزوم بهره‌گیری از ساختارهای هوشمند و یکپارچه را دوچندان کرده است. در این راستا، **هاب انرژی** به‌عنوان یک راهکار نوین، امکان تبدیل، ذخیره و مدیریت هم‌زمان حامل‌های مختلف انرژی را فراهم می‌سازد. این بخش به بررسی مفهومی، ساختاری و عملیاتی این مرکز در شبکه‌های میکروگرید پرداخته و تعاملات میان برق و گاز در قالب سیستم‌های چندحامله را تبیین می‌نماید.

۲-۱- معرفی مفهومی مرکز انرژی

در راستای حرکت به‌سوی سیستم‌های انرژی آینده و به‌منظور بهره‌برداری از هم‌افزایی میان حامل‌های مختلف انرژی، مفهوم «هاب انرژی» ه‌عنوان یک ساختار یکپارچه جهت تبدیل، ذخیره و مدیریت چندین نوع حامل انرژی معرفی شده است. این مفهوم نخستین‌بار در چارچوب پروژه‌ای با عنوان (VOFEN[19]) توسط تیمی پژوهشی در آزمایشگاه سامانه‌های قدرت ولتاژ بالا در زوریخ توسعه یافت. هدف اصلی این پروژه، ترسیم آینده‌ای پایدار برای شبکه‌های انرژی در افق ۲۰ تا ۳۰ ساله با رویکرد سبز بوده است.

اصول بنیادینی که پروژه VOFEN بر آن‌ها تأکید دارد، به شرح زیر است [۱]:

- حرکت به‌سوی سیستم‌های چندحامله (MES) برای بهره‌مندی از مزایای هم‌افزایی بین حامل‌های مختلف انرژی؛
- فاصله گرفتن از ساختارهای سلسله‌مراتبی و حرکت به‌سوی ساختارهای یکپارچه و غیرمتمرکز؛
- ارتقای سطح همگرایی و اتصال میان سامانه‌های مختلف تولید، انتقال، تبدیل و مصرف انرژی

۲-۲- ساختار و اجزای اصلی یک مرکز انرژی

در راستای تحقق این اهداف، دو مفهوم کلیدی در طراحی ساختار انرژی هوشمند معرفی می‌گردد [۱]:

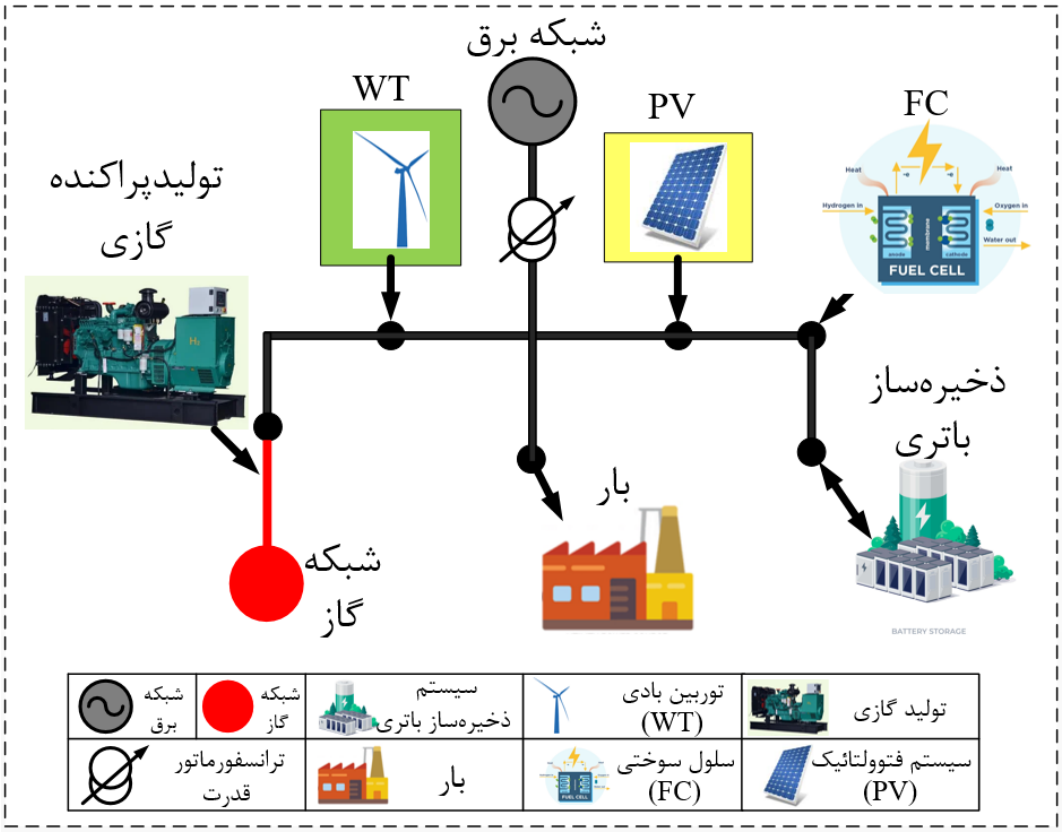
- اتصالات انرژی: تجهیزاتی برای انتقال هم‌زمان چند حامل انرژی در مسیرهای مشترک و بهینه‌سازی زیرساخت‌های فیزیکی؛
- هاب انرژی: واحدی مجتمع برای تبدیل و ذخیره انرژی، که نقش واسط میان منابع تولید، تجهیزات تبدیل، ذخیره‌سازی و مصرف‌کنندگان نهایی را ایفا می‌نماید.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

هاب انرژی به‌عنوان عنصر مرکزی در ساختار انرژی هوشمند، وظیفه‌ی مدیریت ورودی‌ها و خروجی‌های حامل‌های مختلف انرژی از جمله برق، گاز، حرارت و حتی سرمایش را برعهده دارد. همچنین این ساختار امکان تبدیل متقابل حامل‌ها (مانند تبدیل برق به حرارت یا بالعکس) و نیز ذخیره‌سازی انرژی را به شیوه‌ای انعطاف‌پذیر فراهم می‌سازد.

در مدل‌سازی ریاضی هاب انرژی، یک ماتریس جفت‌سازی برای نشان‌دادن ارتباط میان ورودی‌ها و خروجی‌های انرژی تعریف می‌گردد. هر عنصر این ماتریس نشان‌دهنده ویژگی‌های درونی هاب، شامل ضرایب تبدیل و ارتباط میان اجزای مختلف داخلی است. این مدل‌سازی زمینه‌ساز طراحی ساختارهای بهینه برای بهره‌برداری توأمان از حامل‌های انرژی خواهد بود.

به‌طور دقیق‌تر، هاب انرژی به‌عنوان یک واحد مجتمع تعریف می‌شود که در آن، چندین حامل انرژی می‌توانند وارد شده (ورودی)، تبدیل یا تنظیم شده (تبدیل)، ذخیره شده (ذخیره‌سازی) و در نهایت مصرف یا ارسال شوند (خروجی). شماتیک این سیستم در شکل (۱) نشان داده شده است. در برخی منابع، واژه‌ی «هیبرید» نیز برای توصیف این نوع هاب‌ها استفاده شده که به تعامل میان حامل‌های مختلف انرژی در داخل هاب اشاره دارد [۱].



شکل (۱): سیستم مرکز انرژی موردنظر مقاله

Figure (1): The energy center system in question in the article

طراحی چنین ساختاری در سامانه‌های میکروگرید ترکیبی، امکان مدیریت بهینه منابع انرژی، پاسخ‌گویی به نوسانات بار، و ارتقاء پایداری و انعطاف‌پذیری شبکه را فراهم می‌آورد. این ساختار همچنین پیش‌نیاز اجرای موفق برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا، پاسخگویی بار، و استفاده حداکثری از منابع تجدیدپذیر محسوب می‌گردد.

۳-۲- انواع منابع تولید پراکنده در ریزشبکه‌ها

در هاب‌های انرژی و به‌ویژه در ساختارهای میکروگرید، منابع تولید پراکنده نقش کلیدی در تأمین انرژی مورد نیاز ایفا می‌کنند. این منابع شامل تولیدات تجدیدپذیر مانند توربین‌های بادی، سلول‌های خورشیدی (PV)، سلول‌های سوختی (FC[15]) و میکروتوربین‌ها هستند. همچنین سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مانند باتری‌ها (BESS) به‌منظور متعادل‌سازی تولید و مصرف در بازه‌های زمانی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4 - Winter 2025

استفاده از این منابع در کنار هاب انرژی، موجب انعطاف‌پذیری بیشتر شبکه، امکان عملکرد جزیره‌ای، کاهش تلفات انتقال و پاسخ‌گویی سریع به نوسانات تقاضا می‌شود. در طراحی هاب انرژی، هر منبع تولید پراکنده دارای مدل عملکرد خاص و محدودیت‌های فنی مرتبط با توان خروجی، نرخ تغییر توان، هزینه عملکرد و وابستگی به شرایط محیطی است.

۴-۲- تعاملات دوسویه میان حامل‌های انرژی برق و گاز

یکی از ویژگی‌های مهم و متمایز ساختار هاب انرژی، تعامل دوسویه و وابستگی عملکردی میان حامل‌های انرژی مختلف به‌ویژه برق و گاز طبیعی است. در این ساختار، گاز طبیعی نه‌تنها به‌عنوان منبع اولیه برای تولید برق در واحدهایی نظیر میکروتوربین‌ها و سلول‌های سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بلکه فشار و جریان گاز نیز خود تحت تأثیر تقاضای برق تغییر می‌کند. از سوی دیگر، تولید برق از منابع تجدیدپذیر مانند خورشید و باد می‌تواند میزان نیاز به استفاده از منابع گازی را کاهش دهد.

به‌همین دلیل، طراحی بهینه‌ی عملکرد هاب انرژی مستلزم در نظر گرفتن هم‌زمان شبکه‌های گاز و برق، مدل‌سازی دقیق مصرف گاز، تحلیل جریان در لوله‌ها و کمپرسورها، و همچنین مدیریت هم‌زمان عدم قطعیت‌ها در تولید برق تجدیدپذیر و قیمت حامل‌ها است.

وجود این تعامل دوسویه، امکان بهینه‌سازی ترکیبی دو حامل انرژی را فراهم می‌سازد و موجب کاهش هزینه‌های کلی، ارتقاء پایداری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم انرژی می‌شود [۱].

۳- مدل‌سازی ریزشبکه‌های برق و گاز

در ریزشبکه‌های چندحامله، مدل‌سازی دقیق و یکپارچه‌ی شبکه‌های الکتریکی و گازی از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که این دو شبکه نه‌تنها از نظر عملکردی به یکدیگر وابسته‌اند، بلکه بر هزینه‌های عملیاتی، پایداری و قابلیت اطمینان سیستم تأثیر متقابل می‌گذارند. در این بخش، ابتدا ساختار و مدل ریاضی اجزای شبکه برق شامل تولید، بار و ذخیره‌سازی انرژی بررسی می‌شود. سپس مدل جریان و فشار گاز، عملکرد کمپرسورها و ذخیره‌سازی در خطوط گاز (Line-pack) ارائه می‌گردد. در ادامه، نحوه اتصال این دو شبکه از طریق منابع مشترک تحلیل می‌شود و در نهایت، فرضیات و پارامترهای کلیدی مدل معرفی خواهد شد [۱].

۳-۱- مدل‌سازی ریزشبکه الکتریکی (شامل تولید، بار، ذخیره‌سازی)

در ریزشبکه الکتریکی مورد بررسی، منابع تولید شامل سه میکروتوربین (MT1 تا MT3)، توربین بادی، سلول خورشیدی (PV)، سلول سوختی (FC) و یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی باتری (BESS) هستند. بار شبکه شامل بارهای عادی و بارهای قابل قطع (IL^{16}) است که در شرایط اضطراری قابل کاهش می‌باشند.

❖ **معادله موازنه توان الکتریکی:**

مجموع توان تولیدی از منابع مختلف به‌علاوه توان از دست رفته باید با مجموع بارها مطابقت داشته باشد. این موازنه در (۱) آمده است [۱].

$$P_t^{Act} = P_{Wind,t} + P_{PV,t} + P_{DG,t} + P_{BESS,t} - P_{Load,t} - P_{IL,t} \quad (۱)$$

در رابطه فوق، P_t^{Act} توان خالص واقعی در زمان t، $P_{Wind,t}$ توان تولیدی توربین بادی، $P_{PV,t}$ توان تولیدی سلول خورشیدی، $P_{DG,t}$ توان تولیدی واحد تولیدپراکنده گازی، $P_{BESS,t}$ توان شارژ و دشارژ باتری، $P_{Load,t}$ توان بار الکتریکی شبکه و $P_{IL,t}$ مقدار بار قطع شده می‌باشد.

❖ **هزینه عدم تعادل (Imbalance Cost):**

در صورت وجود تفاوت بین توان واقعی و توان پیشنهادی به بازار، هزینه‌ای تحت عنوان هزینه عدم تعادل محاسبه می‌شود. این هزینه در (۲) آمده است [۱].

$$Cost_t^{\mathrm{Im}ba} = \Delta P_t^{\mathrm{Im}ba} . \left(\rho_t^{\mathrm{Re}+} - \rho_t^{\mathrm{Re}-} \right) \quad (۲)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

در رابطه فوق، $\Delta P_t=P_t^{Act}-P_t^{Bid}$ انحراف بین توان واقعی و توان پیشنهادی در بازار، ρ_t^{Re+} قیمت خرید برق از بازار تراز لحظه‌ای و ρ_t^{Re-} قیمت فروش برق در بازار تراز لحظه‌ای می‌باشد.

❖ **مدل ذخیره‌ساز انرژی (BESS):**

در این بخش، محدودیت‌های شارژ و دشارژ، تلفات، و انرژی ذخیره‌شده می‌تواند مدل شود. هزینه عملکرد BESS در (۳) آمده است [۱]:

$$Cost_{BESS} = BLD_{BESS} \cdot \left(\frac{BIC}{LCN.ERC} \right) + \text{Loss Term} \quad (۳)$$

که در آن، BLD_{BESS} نرخ استهلاک چرخه عمر باتری، BIC هزینه سرمایه‌گذاری اولیه باتری، LCN تعداد چرخه عمر قابل استفاده، ERC ظرفیت نامی انرژی باتری، η_{Loss} ضریب تلفات انرژی باتری و E_t انرژی ذخیره‌شده در زمان t می‌باشد.

❖ **مدل هزینه واحد تولید پراکنده (DG):**

در ادامه هزینه‌ای تحت عنوان هزینه سوخت تولیدپراکنده محاسبه می‌شود. این هزینه در (۴) آمده است [۱].

$$Cost_{DG} = \alpha_1 P_{DG}^2 + \alpha_2 P_{DG} + \alpha_3 \quad (۴)$$

که در آن، $\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3$ ضرایب هزینه تولید برق و P_{DG} توان تولیدی واحد DG در یک بازه زمانی می‌باشد.

۲-۳- مدل‌سازی سامانه گاز طبیعی (فشار، جریان، کمپرسور و Line-pack)

شبکه گاز شامل خطوط انتقال، کمپرسورها و مصرف‌کنندگان گازی (همچون تولیدات پراکنده و سلول‌های سوختی) است. این مدل، با لحاظ فشار، جریان، عملکرد کمپرسور و ذخیره‌سازی انرژی در خطوط لوله (Line-pack) ارائه می‌شود.

❖ **مدل Line-pack:**

این هزینه در (۵) آمده است [۱].

$$\theta_{ij,t} = \theta_{ij}^{Initial} + \Delta P_{ij,t}^{Gas} \quad (۵)$$

که در آن، $\theta ij,t$ مقدار گاز ذخیره‌شده در لوله بین گره‌های i و j، $\theta_{ij}^{Initial}$ مقدار اولیه Line-pack و $\Delta P_{ij,t}^{Gas}$ اختلاف گاز ورودی و خروجی در لوله در زمان t می‌باشد.

❖ **مدل جریان گاز:**

این هزینه در (۶) آمده است [۱].

$$f_{ij}^{Gas} = \text{sgn}_{ij} \cdot \sqrt{P_i^2 - P_j^2} \quad (۶)$$

که در آن، f_{ij}^{Gas} جریان گاز بین گره‌های i و j، Sgn_{ij} جهت جریان و P_i و P_j فشار گاز در گره‌های i و j می‌باشد.

❖ **مدل توان مصرفی کمپرسور:**

این هزینه در (۷) آمده است [۱].

$$P_{Comp} = l_1 + l_2 f + l_3^2 f \quad (۷)$$

که در آن، P_{Comp} توان مصرفی کمپرسور، f جریان عبوری از کمپرسور و l ضرایب مشخصه عملکرد کمپرسور می‌باشد.

۳-۳- مدل‌های اتصال بین دو شبکه (برق-گاز)

رابطه میان این دو شبکه از طریق منابعی برقرار می‌شود که از گاز برای تولید برق استفاده می‌کنند (مانند میکروتوربین‌ها و سلول‌های سوختی). مصرف گاز این واحدها تابعی از توان تولیدی آن‌ها است. بر این اساس، مدل مصرف گاز واحد تولیدپراکنده بصورت (۸) بدست می‌آید [۱].

$$P_{Gas}^{DG} = HR.P_{DG} \quad (۸)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4 - Winter 2025

که در آن، P_{Gas}^{DG} مصرف گاز توسط واحد تولیدپراکنده، HR نرخ حرارتی و P_{DG} توان تولیدی توسط منبع تولیدپراکنده می‌باشد.

۴-۳- فرضیات و پارامترهای کلیدی در مدل‌سازی

مدل‌سازی شبکه ترکیبی برق و گاز مبتنی بر مجموعه‌ای از فرضیات کلیدی است:

- **زمان‌بندی:** بازه زمانی مدل ۲۴ ساعت با تفکیک ساعتی است.
- **بازار برق و گاز:** قیمت‌ها متغیر و تابعی از بازار روز قبل و بازار تراز لحظه‌ای هستند.
- **عدم قطعیت:** برای مقابله با نوسانات قیمت و تولید انرژی تجدیدپذیر، از روش DRCC استفاده شده است.

بر این اساس، مدل DRCC بصورت (۹) است.

$$P\left(\alpha^T x \le b\right) \ge \phi \qquad (۹)$$

که در آن ϕ سطح اطمینان و a، x و b به ترتیب بردارهای ضرایب، تصمیم‌گیری و محدودیت می‌باشد.

در این مدل، عدم‌قطعیت های موجود در قیمت بازار برق و گاز و همچنین در توان خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر خورشید و باد، به‌صورت صریح مدل‌سازی شده‌اند. برای این منظور، از روش برنامه‌ریزی مقاوم مبتنی بر قیود احتمالاتی (DRCC) استفاده شده است. این روش با تعریف یک سطح اطمینان مشخص، شرایطی فراهم می‌سازد تا تصمیم‌گیری‌ها در برابر نوسانات قیمتی و تولید تجدیدپذیر، پایدار و مقاوم باشد.

۴- برنامه‌ریزی انرژی بهینه در ریزشبکه‌های برق و گاز

برنامه‌ریزی انرژی بهینه در ریزشبکه‌های چندحامله با هدف استفاده هم‌زمان از حامل‌های انرژی (برق و گاز) به‌گونه‌ای انجام می‌گیرد که ضمن کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، پایداری، قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری شبکه نیز تضمین شود. مدل پیشنهادی در این پژوهش مبتنی بر رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه مقاوم و استفاده از مدل ترکیبی MILP/DRCC در ساختار دو مرحله‌ای بازار انرژی توسعه یافته است.

۴-۱- تدوین تابع هدف چندمنظوره (حداقل‌سازی هزینه، کاهش انحراف، مدیریت عدم‌قطعیت)

در مدل پیشنهادی، تابع هدف شامل سه جزء اصلی است:

❖ **مدل توان مصرفی کمپرسور:**

این مدل در (۱۰) آمده است.

$$Min\left(\sum_{t=1}^{T}\left[Cost_t^{Fuel}+Cost_t^{BESS}+Cost_t^{Imba}+Cost_t^{Curtail}\right]\right) \qquad (۱۰)$$

که در آن، $Cost_t^{Fuel}$ هزینه مصرف سوخت واحدهای گازسوز، $Cost_t^{BESS}$ هزینه چرخه عمر باتری و تلفات انرژی، $Cost_t^{Imba}$ هزینه ناشی از عدم تعادل در بازار تراز و $Cost_t^{Curtail}$ جریمه مربوط به قطع بار یا تولید تجدیدپذیر می‌باشد.

❖ **کاهش انحراف از تعادل برنامه‌ریزی شده:**

این کاهش انحراف در (۱۱) آمده است.

$$Min\left(\sum_{t=1}^{T}\left|\Delta P_t^{Imba}\right|\right) \qquad (۱۱)$$

که در آن، $\Delta P_t=P_t^{Act}-P_t^{Bid}$ انحراف بین توان واقعی و توان پیشنهادی در بازار می‌باشد.

❖ **مدیریت عدم قطعیت‌ها با درنظر گرفتن سطح اطمینان:**

در قالب تابع هدف، قیود عدم‌قطعیت به‌صورت داخلی (قیود DRCC) لحاظ می‌شوند تا مدل در برابر نوسانات پارامترهای غیرقطعی مقاوم باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

۲-۴- روش بهینه‌سازی مورد استفاده (برنامه‌ریزی خطی صحیح آمیخته MILP یا MINLP)

مدل پیشنهادی به‌صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی صحیح آمیخته (MILP) تدوین شده که قابلیت حل در محیط گمز داراست.

❖ **مشخصات کلی مدل MILP:**

- متغیرهای پیوسته (برای توان، انرژی، قیمت و جریان)
- متغیرهای صحیح (برای وضعیت روشن/خاموش واحدها، قطع بار، و سوئیچ‌های تصمیم‌گیری)
- قیود خطی (در حالت خطی‌شده) برای مدل‌های تولید، ذخیره‌سازی، شبکه گاز و برق

مزیت استفاده از MILP، تضمین یافتن جواب بهینه سراسری در زمان معقول و قابلیت انعطاف‌پذیری برای افزودن قیود جدید است.

۳-۴- قیود فنی مربوط به تولید، ذخیره‌سازی، قطع بار و تبادل انرژی

مدل شامل مجموعه‌ای از قیود فنی برای تضمین عملکرد قابل‌قبول و واقعی سیستم است:

❖ **قید توان تولیدی واحد تولیدپراکنده:**

این قید مطابق (۱۲) خواهد بود.

$$P_{DG}^{\min}.u_t \le P_{DG,t} \le P_{DG}^{\max}.u_t \quad (۱۲)$$

که در آن، u_t متغیر باینری روشن/خاموش بودن واحد تولیدپراکنده در زمان t می‌باشد.

❖ **قید ذخیره‌سازی انرژی باتری:**

این قید مطابق (۱۳) خواهد بود.

$$E_{t+1} = E_t + \eta_{ch}.P_{BESS,t}^{ch} - \frac{P_{BESS,t}^{dis}}{\eta_{dis}} \quad (۱۳)$$

که در آن، E_t انرژی ذخیره‌شده در زمان t و η_{ch},η_{dis} بازدهی شارژ و دشارژ می‌باشد.

❖ **قید قطع بار:**

این قید مطابق (۱۴) خواهد بود.

$$0_t \le P_{IL,t} \le P_{Load,t} \quad (۱۴)$$

❖ **قید موازنه توان:**

این قید مطابق (۱۵) خواهد بود.

$$P_{Gen,t}^{Total} + P_{BESS,t}^{dis} = P_{Load,t} + P_{IL,t} + P_{BESS,t}^{ch} \quad (۱۵)$$

❖ **قید تبادل انرژی:**

در صورت اتصال به شبکه بالادست یا بازار، این قید مطابق (۱۶) خواهد بود.

$$\Delta P_t = P_{Grid,t}^{import} - P_{Grid,t}^{export} \quad (۱۶)$$

۴-۴- استفاده از مدل مقاوم احتمالاتی (DRCC) برای مدیریت عدم‌قطعیت‌ها

برای مقابله با عدم‌قطعیت در تولید انرژی تجدیدپذیر (باد و خورشید) و قیمت بازار، از مدل DRCC استفاده شده است. فرم کلی قید DRCC بصورت (۱۷) است.

$$P\left(\alpha^T x \le b\right) \ge \phi \quad (۱۷)$$

که در آن ϕ سطح اطمینان و a، x و b به ترتیب بردارهای ضرایب، تصمیم‌گیری و محدودیت می‌باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4 - Winter 2025

۵-۴- ساختار دو مرحله‌ای بازار (روز قبل و لحظه‌ای)

مدل پیشنهادی بر مبنای یک ساختار دو سطحی بازار طراحی شده است.

- بازار روز قبل (DA[17])

در این مرحله، منابع تولیدی، باتری‌ها، و خرید/فروش بازار، بر اساس پیش‌بینی تقاضا و تولید برنامه‌ریزی می‌شوند.

- بازار لحظه‌ای (RTB[18])

در این مرحله، عدم تعادل بین توان واقعی و توان برنامه‌ریزی‌شده رفع می‌شود و انحرافات منجر به هزینه عدم‌تعادل می‌گردند. این ساختار کمک می‌کند تا سیستم در مقابل پیش‌بینی‌های نادرست مقاوم بوده و پاسخ‌گویی اقتصادی به نوسانات داشته باشد.

۵- تحلیل نتایج

در این بخش، عملکرد مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی بهینه انرژی در ریزشبکه‌های برق و گاز، از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور، سناریوهای بهره‌برداری مختلف مورد مقایسه قرار گرفته و رفتار اجزای کلیدی سیستم از جمله واحدهای تولید، بارها، سیستم ذخیره‌سازی و شاخص‌های اقتصادی تحلیل شده‌اند. این تحلیل به درک بهتر اثرات اجرای مدل پیشنهادی در افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و بهبود پایداری سیستم کمک می‌کند.

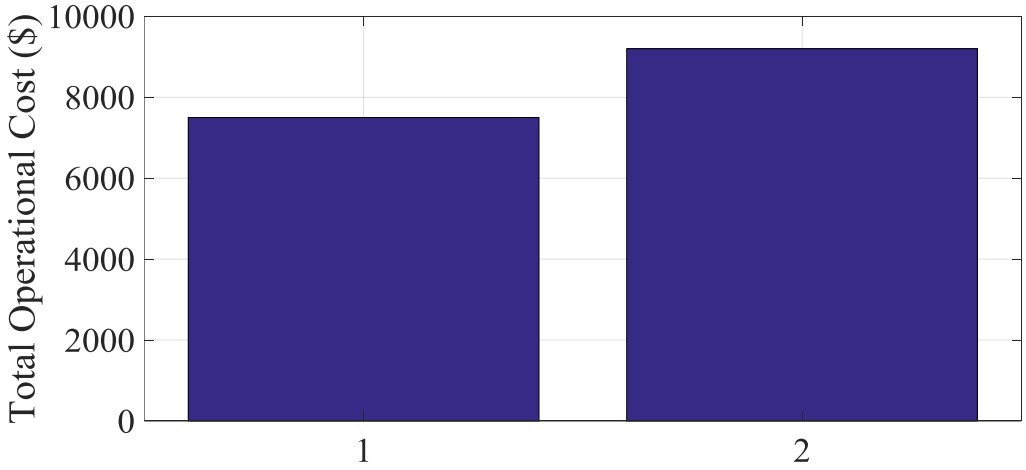
۵-۱- سناریوهای مقایسه‌ای: حالت بهینه و حالت غیربهینه

در این سناریو، دو حالت بهره‌برداری سیستم بررسی شده است:

۱) **حالت غیربهینه:** عملکرد سیستم بدون در نظر گرفتن اتصال بین برق و گاز، بدون مدل DRCC و بدون بهینه‌سازی هماهنگ

۲) **حالت بهینه:** اجرای مدل کامل پیشنهادی شامل بهینه‌سازی هم‌زمان شبکه برق و گاز، لحاظ عدم‌قطعیت‌ها و مدیریت بار

نتایج مطابق شکل (۲) نشان می‌دهد که در حالت بهینه، هزینه کل بهره‌برداری به میزان قابل توجهی (حدود ۱۸ درصد) کاهش یافته و میزان بار قطع‌شده نیز به‌طور چشمگیری کاهش پیدا کرده است.



شکل (۲): مقایسه هزینه‌های عملیاتی

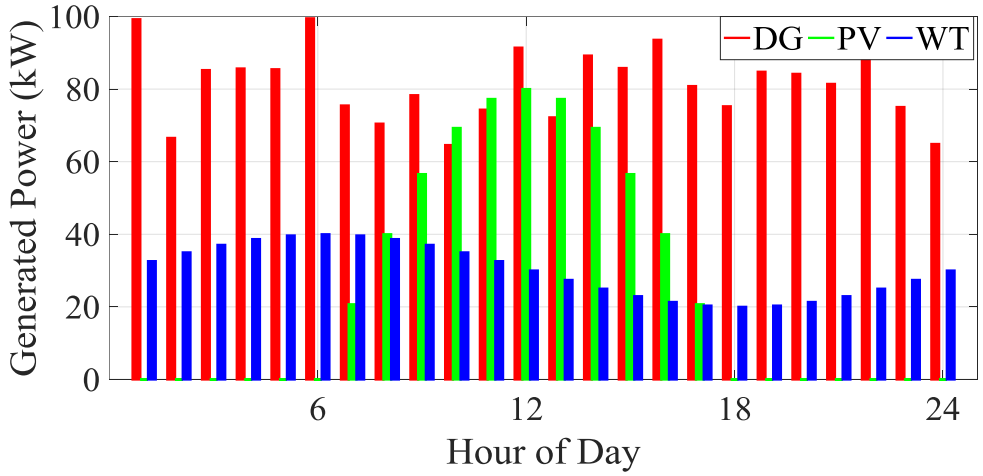
Figure (2): Comparison of operating costs

این شکل نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی باعث کاهش چشمگیر هزینه‌های کلی بهره‌برداری شده است. حالت بهینه ضمن استفاده از هاب انرژی و قابلیت انعطاف، هزینه انرژی خریداری‌شده از بازار را نیز کاهش داده است.

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

۵-۲- بررسی توان تولیدی هر واحد در طول شبانه‌روز

در این بخش، پروفیل زمانی توان خروجی منابع مختلف انرژی در طول ۲۴ ساعت ارائه شده است. عملکرد منابع نشان می‌دهد که منابع تولید پراکنده در ساعات پیک بار به حداکثر خروجی رسیده‌اند، در حالی که منابع PV و WT بیشتر در ساعات روز فعال بوده‌اند. ترکیب منابع مختلف به مدل کمک کرده تا تعادل بین تولید و مصرف با کمترین هزینه حفظ شود.



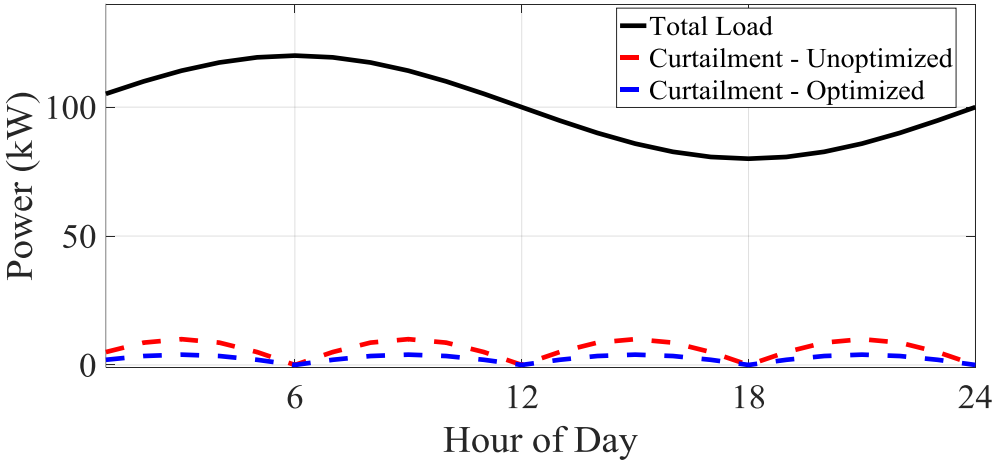
شکل (۳): پروفایل‌های تولید DG، PV و WT

Figure (3): DG, PV and WT generation profiles

بر این اساس، شکل (۳) بیانگر نحوه توزیع بار بین منابع مختلف در پاسخ به تقاضای روزانه است. تولید خورشیدی در میانه روز بیشینه است، در حالی که منابع تولید پراکنده بیشتر در ساعات غیرفعال خورشید عمل می‌کنند.

۵-۳- تحلیل وضعیت بار در دو حالت

در این بخش، وضعیت پاسخگویی سیستم به بار در حالت بهینه و غیربهینه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت بهینه، مقدار بار قطع‌شده به‌شدت کاهش یافته است، به‌ویژه در ساعات اوج بار که سیستم با کمک BESS و DG پاسخگویی بهتری دارد.



شکل (۴): مقایسه کاهش بار

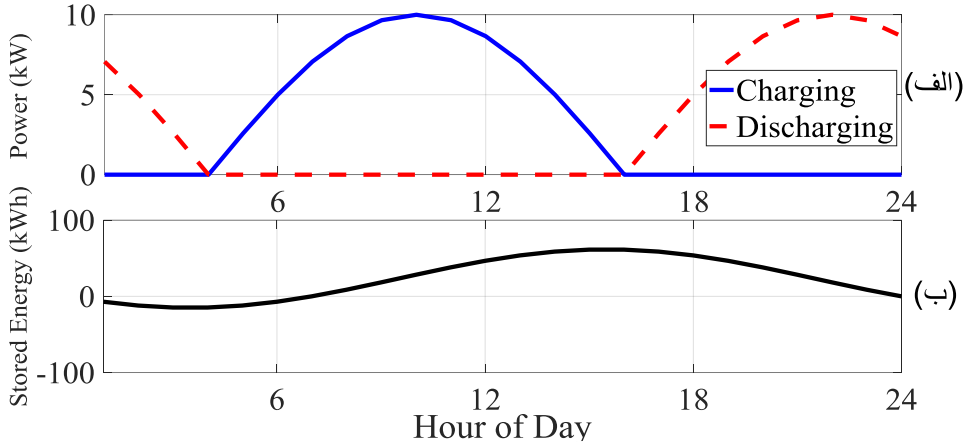
Figure (4): Load reduction comparison

بر این اساس، شکل (۴) نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی با استفاده از پاسخ بار و ذخیره‌سازی، مقدار قطع بار را به کمتر از نصف رسانده است که نشان‌دهنده افزایش پایداری و کاهش هزینه اجتماعی است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4 - Winter 2025

۴-۵- رفتار سیستم ذخیره‌سازی در پاسخ به نوسانات تولید و بار

در این تحلیل، تغییرات توان شارژ/دشارژ و سطح انرژی ذخیره‌شده در باتری در طول ۲۴ ساعت بررسی شده است. رفتار سیستم ذخیره‌سازی مطابق انتظار تطابق بالایی با الگوی بار دارد. در ساعات کم‌باری، باتری شارژ و در ساعات اوج، دشارژ می‌شود.



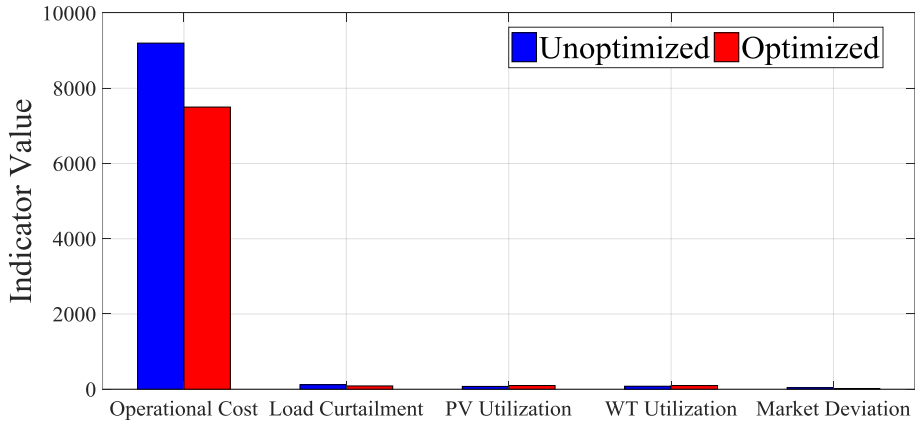
شکل (۵): وضعیت باتری (الف) وضعیت شارژ و دشارژ (ب) مقدار SOC

Figure (5): Battery status (a) Charge and discharge status (b) SOC value

شکل (۵-الف) نشان‌دهنده رفتار شارژ و دشارژ باتری در ساعات مختلف است. شکل (۵-ب) نیز سطح انرژی باتری را نمایش می‌دهد که تابعی از توازن بین شارژ و دشارژ می‌باشد. این الگو نقش کلیدی در کاهش هزینه خرید انرژی ایفا می‌کند.

۵-۵- بررسی شاخص‌های فنی و اقتصادی

در این بخش، شاخص‌های کلیدی مانند هزینه بهره‌برداری، مقدار بار قطع‌شده، استفاده از منابع تجدیدپذیر و انحراف از برنامه بازار در دو سناریو مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی ضمن افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر (بیش از ۹۵ درصد)، میزان انحراف بازار و هزینه‌های مرتبط با آن را نیز کاهش داده است.



شکل (۶): مقایسه شاخص‌های کلیدی عملکرد

Figure (6): Comparison of key performance indicators

شکل (۶) به‌صورت خلاصه نشان می‌دهد که استفاده از مدل پیشنهادی باعث بهبود چشمگیر در عملکرد فنی و اقتصادی سیستم شده است. استفاده از PV و WT تقریباً کامل بوده و هزینه‌های انحراف به حداقل رسیده‌اند.

۶- بحث و بررسی حول نتایج بدست آمده

نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی مدل پیشنهادی در ریزشبکه ترکیبی برق و گاز، گویای بهبود معنادار عملکرد سیستم از جنبه‌های اقتصادی، فنی و عملیاتی است. تحلیل این نتایج در قالب مقایسه سناریوهای بهینه و غیربهینه، و بررسی دقیق رفتار

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

اجزای مختلف ریزشبکه (تولید، ذخیره‌سازی، بار، بازار و مدیریت عدم‌قطعیت)، نشان می‌دهد که رویکرد ارائه‌شده می‌تواند به‌طور مؤثر در افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری سیستم‌های انرژی چندحامله مورد استفاده قرار گیرد.

نخست، با مقایسه عملکرد سیستم در دو حالت بهینه و غیربهینه، مشخص گردید که هزینه کل بهره‌برداری در حالت بهینه به میزان ۱۸ درصد کاهش یافته است. این کاهش عمدتاً ناشی از استفاده هوشمندانه از منابع تجدیدپذیر، به‌کارگیری ذخیره‌سازی انرژی در زمان‌های مناسب، و کاهش وابستگی به بازار تراز لحظه‌ای بوده است. مطابق جدول (۲)، مقدار بار قطع‌شده نیز در سناریوی بهینه نسبت به سناریوی غیربهینه حدود ۲۷ درصد کاهش یافته که نشان‌دهنده افزایش تاب‌آوری و پایداری شبکه در شرایط بهره‌برداری واقعی است.

همچنین، یکی از نتایج قابل توجه، افزایش بهره‌برداری از ظرفیت منابع تجدیدپذیر بوده است. به‌طوری‌که در حالت بهینه، نرخ استفاده از توان تولیدی سلول‌های خورشیدی (PV) از ۷۵ درصد به ۹۸ درصد، و نرخ استفاده از توان توربین‌های بادی (WT) از ۸۰ درصد به ۹۷ درصد افزایش یافته است. این بهبود که در جدول (۲) نیز گزارش شده، ناشی از هماهنگی دقیق در زمان‌بندی تولیدات، ذخیره‌سازی و قطع بار در مدل پیشنهادی است. به بیان دیگر، مدل پیشنهادی توانسته است محدودیت‌های زمانی و ساختاری تولیدات تجدیدپذیر را با دقت مدل‌سازی کرده و از ظرفیت آن‌ها حداکثر استفاده را داشته باشد.

Table (2): Comparison of key indicators in two optimal and non-optimal cases

جدول (۲): مقایسه شاخص‌های کلیدی در دو حالت بهینه و غیربهینه

شاخص عملکرد	حالت غیربهینه	حالت بهینه	درصد بهبود
هزینه کل بهره‌برداری (دلار)	۹۲۰۰	۷۵۰۰	۱۸ درصد ↓
مقدار بار قطع‌شده (kWh)	۱۲۰	۸۸	۲۷ درصد ↓
درصد استفاده از انرژی PV	۷۵ درصد	۹۸ درصد	۲۳ درصد ↑
درصد استفاده از انرژی WT	۸۰ درصد	۹۷ درصد	۱۷ درصد ↑
انحراف از برنامه بازار (kWh)	۴۰	۱۸	۵۵ درصد ↓

در ادامه، کاهش انحراف از برنامه بازار به میزان ۵۵ درصد در حالت بهینه نیز حائز اهمیت است. این بهبود در عملکرد بازار، حاصل استفاده از رویکرد مدل مقاوم با قیود احتمالاتی (DRCC) است که امکان مدیریت عدم‌قطعیت‌های موجود در تولید تجدیدپذیر و قیمت‌های بازار را با سطح اطمینان بالا فراهم می‌سازد. لازم به ذکر است که استفاده از DRCC منجر به افزایش ناچیز در هزینه کل (کمتر از ۳ درصد) شده که با توجه به کاهش ریسک عملیاتی، کاملاً قابل قبول است.

همچنین مطابق جدول (۳)، هر یک از اجزای کلیدی مدل پیشنهادی نقش مستقلی در بهبود عملکرد سیستم ایفا کرده‌اند. برای نمونه، «پاسخ‌گویی بار» موجب کاهش قطع بار شده، سیستم ذخیره‌سازی انرژی نقش مهمی در انتقال بار از ساعات اوج به ساعات کم‌باری داشته و ساختار دو مرحله‌ای بازار باعث بهبود هماهنگی بین تولید و مصرف شده است. همچنین، برنامه‌ریزی هم‌زمان شبکه‌های برق و گاز، امکان تخصیص بهینه منابع را فراهم کرده و موجب افزایش بهره‌وری در دو بخش شده است.

Table (3): The role of key components of the proposed model in improving microgrid performance

جدول (۳): نقش اجزای کلیدی مدل پیشنهادی در بهبود عملکرد ریزشبکه

مؤلفه مدل پیشنهادی	تأثیر مستقیم	پیامد عملکردی
برنامه‌ریزی هماهنگ برق و گاز	بهینه‌سازی تخصیص انرژی	کاهش هزینه و تلفات
پاسخ‌گویی بار	انعطاف‌پذیری در بار مصرفی	کاهش بار قطع‌شده
سیستم ذخیره‌سازی انرژی	انتقال بار به زمان کم‌باری	کاهش هزینه بازار
مدل DRCC	مقاومت در برابر عدم‌قطعیت	کاهش انحراف از برنامه بازار
ساختار دو مرحله‌ای بازار	هماهنگی با بازار واقعی	بهبود قابلیت اطمینان و پایداری

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4 - Winter 2025

در مجموع، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که چارچوب پیشنهادی پژوهش حاضر، نه‌تنها موجب بهینه‌سازی هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری فنی می‌شود، بلکه از لحاظ قابلیت پیاده‌سازی در سیستم‌های انرژی هوشمند و چندحامله نیز از انعطاف‌پذیری مناسبی برخوردار است. با توجه به ساختار ماژولار مدل، امکان توسعه آن به دیگر حامل‌های انرژی مانند حرارت و آب نیز فراهم بوده و می‌تواند مبنایی برای طراحی سیستم‌های انرژی پایدار آینده قرار گیرد.

۷- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، که بر پایه برنامه‌ریزی خطی صحیح آمیخته (MILP) و رویکرد مقاوم مبتنی بر قیود احتمالاتی (DRCC) توسعه یافته است، می‌تواند به‌طور مؤثر هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبکه‌های ترکیبی برق و گاز را کاهش داده و عملکرد فنی و اقتصادی سیستم را بهبود بخشد. مقایسه سناریوهای بهینه و غیربهینه بیانگر آن است که استفاده از این چارچوب، هزینه کل بهره‌برداری را تا ۱۸ درصد کاهش داده، مقدار بار قطع‌شده را تا ۲۷ درصد کم کرده و بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر را به بیش از ۹۵ درصد افزایش داده است. مزیت کلیدی این مدل در درک هم‌زمان تعامل میان حامل‌های انرژی مختلف، در نظر گرفتن نوسانات قیمتی بازار و پاسخ به تغییرات ناگهانی بار است. استفاده از ساختار دو مرحله‌ای بازار و مدل مقاوم DRCC موجب شده تا راهکار ارائه‌شده نه‌تنها از نظر نظری، بلکه از منظر عملیاتی نیز قابل اعتماد باشد. این مدل قابلیت پیاده‌سازی در مراکز داده، ساختمان‌های هوشمند، بیمارستان‌ها و شهرک‌های صنعتی را دارد که هم‌زمان از چند حامل انرژی (برق، گاز، حرارت) بهره می‌برند. همچنین، به‌دلیل ماژولار بودن ساختار مدل، می‌توان آن را به‌راحتی با داده‌های واقعی بازار انرژی ایران یا سایر کشورها سازگار نمود. توصیه می‌شود در مطالعات آتی، توسعه مدل برای دربرگیری حامل‌هایی چون سرمایش، حرارت و آب، و همچنین در نظر گرفتن پاسخ‌گویی تقاضا در سطح مصرف‌کننده نیز لحاظ گردد. در مجموع، چارچوب پیشنهادی گامی عملی و علمی در جهت تحقق ریزشبکه‌های هوشمند، چندحامله و پایدار است که می‌تواند مبنایی برای سیاست‌گذاری انرژی و طراحی سیستم‌های آینده‌نگر در سطح ملی و منطقه‌ای باشد.

مراجع
References

[1] M. Mohammad, N. Younes, and M. I. Behnam, "Energy hub: From a model to a concept – A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 80, pp. 1512–1527, 2017.

[2] T. Ma, J. Wang, and L. Han, "Energy flow modeling and optimal operation analysis of the micro energy grid based on energy hub", Energy Conversion and Management, vol. 133, pp. 292–306, 2017.

[3] S. Hosseinpour, S. A. Haji Seyed Mirza Hosseini, R. Mehdipour, A. H. Hemmasi, and H. A. Ozgoli, "Energy modeling and techno-economic analysis of a biomass gasification-CHAT-ST power cycle for sustainable approaches in modern electricity grids", Journal of Renewable Energy and Environment, vol. 7, no. 2, pp. 43–51, 2020, doi: 10.30501/jree.2020.106780.

[4] W. Luo, X. Zhang, D. Yang, and Q. Sun, "Emission trading based optimal scheduling strategy of energy hub with energy storage and integrated electric vehicles", Journal of Modern Power System and Clean Energy, vol. 8, no. 2, pp. 267–275, 2020.

[5] A. N. Ghalelou, S. Nojavan, K. Zare, and B. M. Ivatloo, "Robust scheduling of thermal, cooling and electrical hub energy system under market price uncertainty", Applied Thermal Engineering, vol. 149, no. 25, pp. 862–880, 2019.

[6] M. J. Nafehfeshan, B. Bahmani-Firouzi, and M. Nafar, "Improved gray wolf optimizer based optimized scheduling of energy hub with renewable energy resources and metro," Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 1, pp. 45–61, 2024.

[7] A. A. Eladl, M. I. E. Afifi, M. M. E. Saadawi, and B. E. Sedhom, "A review on energy hubs: Models, methods, classification, application, and future trends", Alexandria Engineering Journal, vol. 68, no. 1, pp. 315–342, 2023.

[8] J. Salehi, A. Namvar, F. S. Gazijahani, M. S. Khah, and J. P. S. Caraloa, "Effect of power-to-gas technology in energy hub optimal operation and gas network congestion reduction", Energy, vol. 240, no. 1, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122835.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

[9] M. Mohmoudian, S. Sadi, J. Gholami, and A. Karimi, "Sensitivity analysis in a multi-carrier energy hub system through electrical and thermal profile procurement", Renewable Energy Research and Application (RERA), vol. 3, no. 2, pp. 217–228, 2022.
[10] A. Mugbel, A. T. A. Awami, and M. Parvania, "Optimal planning of distributed battery energy storage systems in unbalanced distribution networks", IEEE Systems Journal, vol. 16, no. 1, pp. 1194–1205, 2021.
[11] G. Shahgholian, "A short review on application of droop control strategy in inverter-based microgrid in island mode," Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 1, pp. 23–31, 2024.
[12] P. Tabakhnejad, A. Tavakoli, and M. Forouzanfar, "Improving current sharing and voltage regulation in DC microgrids based on hybrid energy storage," Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 1, pp. 63–75, 2024.
[13] D. Abazari, R. Ebrahimi, M. Samiei Moghaddam, and N. Salehi, "Generation, transmission and battery expansion planning according to the natural gas network: A two-level approach," Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 2, pp. 18–33, 2024.
[14] A. H. Alobaidi, M. E. Khodayar, and M. Shahidehpour, "Decentralized energy management for unbalanced networked microgrids with uncertainty", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 15, no. 13, pp. 1922–1938, 2021.
[15] A. A. R. Mohamed, R. J. Best, D. J. Morrow, A. Cupples, and I. Bailie, "Impact of the deployment of solar photovoltaic and electrical vehicle on the low voltage unbalanced networks and the role of battery energy storage systems", Journal of Energy Storage, vol. 42, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102975.
[16] P. Rajesh, C. Naveen, A. K. Venkatesan, and F. H. Shajin, "An optimization technique for battery energy storage with wind turbine generator integration in unbalanced radial distribution network", Journal of Energy Storage, vol. 43, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103160.
[17] Y. Zheng, Y. Song, A. Huang, and D. J. Hill, "Hierarchical optimal allocation of battery energy storage systems for multiple services in distribution systems", IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 11, no. 3, pp. 1911–1921, 2020.
[18] M. R. Nayak, D. Behura, and S. Nayak, "Performance analysis of unbalanced radial feeder for integrating energy storage system with wind generator using inherited competitive swarm optimization algorithm", Journal of Energy Storage, vol. 38, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102574.
[19] A. Aranizadeh, S. M. Shahrtash, and A. Gholami, "Comprehensive condition assessment of circuit breakers in a power network for maintenance scheduling", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 17, no. 15, pp. 63–3476, 2023.
[20] A. Aranizadeh, S. M. Shahrtash, and A. Gholami, "Prioritizing CBs maintenance and identifying mandatory maintenance at higher priorities", International Transaction on Electrical Energy Systems, 2022, doi: 10.1155/2022/5008166.
[21] A. Aranizadeh, H. Shad, B. Vahidi, A. Khorsandi, "A novel small-scale wind-turbine blade failure detection according to monitored-data", Results in Engineering, Vol. 25, 2025.
[22] H. Lotfi, "Multi-objective energy management approach in distribution grid integrated with energy storage units considering the demand response program", International Journal of Energy Research, vol. 44, no. 13, pp. 10662–10681, 2020.
[23] H. Lotfi and R. Ghazi, "Optimal participation of demand response aggregators in reconfigurable distribution system considering photovoltaic and storage units", Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, vol. 12, pp. 2233–2255, 2020.
[24] M. H. Nikkhah, H. Lotfi, M. Samadi, and M. E. Hajiabadi, "Energy hub management considering demand response, distributed generation, and electric vehicle charging station", 2023, doi: 10.1155/2023/9042957.
[25] M. Riahinasab, M. Moazzami, S. M. Zanjani, N. Behzadfar, and A. Golsorkhi Esfahani, "Load frequency control system in power grid with gas turbine power plant: Stability analysis for parameter changes," Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 1, pp. 13–21, 2024.

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4 - Winter 2025 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[26] V. Khademi, F. Barzgar, S. Joolaei, and A. Ghaffari, “Optimizing energy infrastructure in big cities: A case study of Iran's electricity transmission network,” Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 4, pp. 1–12, 2025.
[27] M. H. Tanha, Z. Tanha, A. Aranizadeh, M. Mirmozaffari, “Sustainable Wind Energy Security: Assessing the Impact of False Data Injection on Wind Turbine Performance”, Sustainability, Vol 17, No. 4654, 2025.
[28] H. Shad, H. A. Khanavandi, S. A. F. Asl, A. Aranizadeh, B. Vahidi, M. Mirmozaffari, “Optimal Protection Coordination for Grid-Connected and Islanded Microgrids Assisted by the Crow Search Algorithm: Application of Dual-Setting Overcurrent Relays and Fault Current Limiters”, Energies, Vol. 18, No. 1601, 2025.

زیرنویس‌ها:

1. Micro Grid
2. Energy Hub
3. Distributed Generation
4. Multi-Energy Systems
5. Cascaded Humidified Advanced Turbine
6. Multi-Carrier Hub Energy System
7. Robust Optimization Approach
8. Multi-Demand Response Programs
9. Battery Energy Storage Systems
10. Distribution Network Operator
11. Dynamic Distribution Feeder Reconfiguration
12. Photovoltaic
13. Combined Heat and Power
14. Electric Vehicle Charging Stations
15. Fuel Cell
16. Interrupted Loads
17. Day-Ahead
18. Real-Time Balancing
19. Vision of Future Energy Networks

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.534] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025