Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 4 – Winter 2026
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Reveiw Article

A Review of the Role of Flexible Renewable Energy Hubs in Enhancing Economic Indices, Voltage Security, and Reliability of Microgrids

Azadeh Mofidi [1], *Ph.D. Student*, Afshin Lashkarara[*] [2], *Associate Professor*, Hajar Bagheri Tolabi[3], *Assistant Professor*

[1] Department of Electrical Engineering, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran, azadeh.mofidi@iau.ac.ir
[2] Department of Electrical Engineering, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran, Lashkarara@iau.ac.ir
[3] Department of Electrical Engineering, Khor.C., Islamic Azad University, Khorramabad, Iran, ha.btolabi@iau.ac.ir

Abstract:
With the rapid growth of renewable energy resources and the development of smart grids, microgrids have received extensive attention as one of the most effective solutions for providing sustainable, secure, and economical energy supply. However, the intermittent nature of renewable energy sources, uncertainty in generation and load, and the increasing complexity of microgrid operation have further highlighted the need for flexible and intelligent structures. In this context, flexible renewable energy hubs have emerged as a novel solution, playing a significant role in integrating energy resources, optimizing power management, enhancing reliability, and improving voltage security.
This review paper examines and analyzes the latest studies and research achievements related to the application of flexible renewable energy hubs in microgrids. The main focus of this study is to evaluate the role of these hubs in improving economic performance, reducing energy losses, increasing system reliability, enhancing voltage security, and promoting operational flexibility. Furthermore, various energy management methods, multi-objective optimization models, stochastic and uncertainty-based techniques, and the role of technologies such as electric vehicles, energy storage systems, and combined heat and power (CHP) generation within energy hub structures are investigated. In addition, the advantages, challenges, limitations, and future research trends in the field of microgrids based on flexible energy hubs are analyzed, and existing research gaps are identified. The results of this study indicate that the utilization of flexible renewable energy hubs can simultaneously improve economic performance, operational stability, grid resilience, and power quality in microgrids, thereby facilitating the development of future smart energy networks.

Keywords: Microgrid, Flexible renewable energy hub, Energy management, Reliability, Voltage security, Multi-objective optimization, Electric vehicles, Renewable energy.

Received: 16 Oct. 2025
Revised: 6 Dec. 2025
Accepted: 4 Jan. 2026

*** Corresponding Author:** Dr. Afshin Lashkarara

Citation: Azadeh Mofidi, A. Lashkarara, H. Bagheri Tolabi, "A Review of the Role of Flexible Renewable Energy Hubs in Enhancing Economic Indices, Voltage Security, and Reliability of Microgrids", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol.14, no.4, pp. 1-16, 2026 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

مقاله مروری

مروری بر نقش هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر در بهبود شاخص‌های اقتصادی، امنیت ولتاژ و قابلیت اطمینان ریزشبکه‌ها

آزاده مفیدی[۱]، دانشجوی دکتری، افشین لشکرآرا[۲]، دانشیار، هاجر باقری طولابی[۳]، استادیار

۱- گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، azadeh.mofidi@iau.ac.ir
۲- گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، Lashkarara@iau.ac.ir
۳- گروه برق، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران، ha.btolabi@iau.ac.ir

چکیده: با گسترش روزافزون منابع انرژی تجدیدپذیر و توسعه شبکه‌های هوشمند، ریزشبکه‌ها به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارهای تأمین انرژی پایدار، ایمن و اقتصادی مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. با این حال، ماهیت متناوب منابع تجدیدپذیر، عدم‌قطعیت در تولید و بار، و افزایش پیچیدگی بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها، ضرورت استفاده از ساختارهای انعطاف‌پذیر و هوشمند را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این میان، هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر به‌عنوان یک راهکار نوین، نقش مهمی در یکپارچه‌سازی منابع انرژی، مدیریت بهینه توان، افزایش قابلیت اطمینان و بهبود امنیت ولتاژ ایفا می‌کنند. در این مقاله مروری، جدیدترین مطالعات و دستاوردهای پژوهشی مرتبط با کاربرد هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر در ریزشبکه‌ها بررسی و تحلیل شده است. تمرکز اصلی این پژوهش بر ارزیابی نقش این هاب‌ها در بهبود شاخص‌های اقتصادی، کاهش تلفات انرژی، افزایش قابلیت اطمینان شبکه، ارتقای امنیت ولتاژ و توسعه انعطاف‌پذیری بهره‌برداری می‌باشد. همچنین، روش‌های مختلف مدیریت انرژی، مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه، تکنیک‌های تصادفی و مبتنی بر عدم‌قطعیت، و نقش فناوری‌هایی نظیر خودروهای الکتریکی، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و تولید همزمان برق و حرارت در ساختار هاب‌های انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، مزایا، چالش‌ها، محدودیت‌ها و روندهای آینده پژوهش در حوزه ریزشبکه‌های مبتنی بر هاب‌های انرژی انعطاف‌پذیر تحلیل شده و شکاف‌های تحقیقاتی موجود معرفی گردیده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بهره‌گیری از هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر می‌تواند به‌طور هم‌زمان عملکرد اقتصادی، پایداری بهره‌برداری، تاب‌آوری شبکه و کیفیت توان در ریزشبکه‌ها را بهبود بخشد و مسیر توسعه شبکه‌های انرژی هوشمند آینده را هموار سازد.

کلمات کلیدی: ریزشبکه، هاب انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر، مدیریت انرژی، قابلیت اطمینان، امنیت ولتاژ، بهینه‌سازی چندهدفه، خودروهای الکتریکی، انرژی‌های تجدیدپذیر.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر افشین لشکرآرا
نشانی نویسنده مسئول: دزفول، کوی آزادگان، بلوار دانشگاه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دانشکده فنی، گروه برق

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

۱- مقدمه

رشد روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، موجب شده است که توسعه سامانه‌های انرژی پاک و هوشمند به یکی از مهم‌ترین اولویت‌های صنعت برق و سیاست‌گذاری‌های انرژی در جهان تبدیل شود [۱]. در این میان، ریزشبکه‌ها به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارهای نوین در ساختار شبکه‌های قدرت آینده، نقش مهمی در افزایش قابلیت اطمینان، بهره‌وری انرژی، کاهش تلفات شبکه و توسعه پایدار ایفا می‌کنند [۲]. ریزشبکه‌ها مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و بارهای الکتریکی هستند که می‌توانند به‌صورت متصل به شبکه اصلی یا در حالت جزیره‌ای بهره‌برداری شوند و قابلیت مدیریت محلی تولید و مصرف انرژی را فراهم سازند [۳]. در سال‌های اخیر، نفوذ گسترده منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی و بادی در ریزشبکه‌ها، فرصت‌های قابل توجهی را برای کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری انرژی ایجاد کرده است. با این حال، ماهیت متناوب و غیرقابل پیش‌بینی این منابع، چالش‌های متعددی را در زمینه بهره‌برداری ایمن و اقتصادی از ریزشبکه‌ها به همراه داشته است [۴]. نوسانات تولید توان، عدم‌قطعیت در پیش‌بینی بار و تولید، افت کیفیت توان، مشکلات امنیت ولتاژ و کاهش قابلیت اطمینان شبکه از جمله مهم‌ترین مسائل ناشی از توسعه منابع تجدیدپذیر در ساختار ریزشبکه‌ها به شمار می‌روند [۴]. از این‌رو، توسعه روش‌های نوین مدیریت انرژی و بهره‌برداری هوشمند به‌منظور مقابله با این چالش‌ها، به یکی از محورهای اصلی تحقیقات در حوزه سیستم‌های قدرت تبدیل شده است. در این راستا، مفهوم هاب انرژی به‌عنوان یک ساختار یکپارچه و انعطاف‌پذیر برای مدیریت هم‌زمان حامل‌های مختلف انرژی مطرح شده است [۵]. هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر قادرند منابع تولید، ذخیره‌سازهای انرژی، سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت، خودروهای الکتریکی و بارهای قابل کنترل را در قالب یک چارچوب هماهنگ مدیریت کنند. این ساختارها با فراهم کردن قابلیت تبادل و تبدیل انرژی میان بخش‌های مختلف، امکان افزایش انعطاف‌پذیری عملیاتی، بهبود امنیت ولتاژ، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و ارتقای قابلیت اطمینان ریزشبکه را فراهم می‌سازند [۶]. علاوه بر این، توسعه فناوری خودروهای الکتریکی و سیستم‌های ذخیره‌سازی پیشرفته، نقش مهمی در افزایش انعطاف‌پذیری و پایداری ریزشبکه‌های آینده ایفا می‌کند.

از سوی دیگر، پیچیدگی روزافزون ساختار ریزشبکه‌ها و وجود عدم‌قطعیت‌های متعدد در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، قیمت انرژی، وضعیت تجهیزات و رفتار مصرف‌کنندگان، ضرورت استفاده از روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی و مدل‌سازی تصادفی را افزایش داده است. در این زمینه، روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم‌های فرابتکاری، مدل‌های احتمالاتی و تکنیک‌های تصمیم‌گیری هوشمند به‌طور گسترده‌ای برای مدیریت انرژی و بهره‌برداری بهینه ریزشبکه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هدف اصلی این روش‌ها، دستیابی هم‌زمان به عملکرد اقتصادی مطلوب، افزایش قابلیت اطمینان، بهبود امنیت ولتاژ و ارتقای انعطاف‌پذیری سیستم می‌باشد [۲ و ۶]. با توجه به اهمیت روزافزون هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر در ساختار ریزشبکه‌های مدرن، تاکنون مطالعات متعددی در زمینه مدیریت انرژی، بهینه‌سازی بهره‌برداری، تحلیل قابلیت اطمینان و ارزیابی امنیت ولتاژ انجام شده است. با این وجود، بسیاری از پژوهش‌های موجود تنها بر یک یا چند جنبه محدود تمرکز داشته و بررسی جامعی از تعامل میان شاخص‌های اقتصادی، قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و امنیت ولتاژ ارائه نکرده‌اند. همچنین، تلفیق هم‌زمان فناوری‌هایی نظیر خودروهای الکتریکی، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و منابع تجدیدپذیر در قالب هاب‌های انرژی انعطاف‌پذیر همچنان نیازمند تحلیل‌های عمیق‌تر و نظام‌مند می‌باشد. بر این اساس، هدف اصلی این مقاله مروری، بررسی جامع پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر و نقش آن‌ها در بهبود شاخص‌های اقتصادی، قابلیت اطمینان، امنیت ولتاژ و انعطاف‌پذیری ریزشبکه‌ها است. در این مقاله، جدیدترین روش‌های مدیریت انرژی، مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه، تکنیک‌های مدل‌سازی عدم‌قطعیت و راهکارهای ارتقای عملکرد ریزشبکه‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند. همچنین، چالش‌ها، محدودیت‌ها و روندهای آینده پژوهش در این حوزه معرفی شده و شکاف‌های تحقیقاتی موجود تبیین می‌شوند تا زمینه مناسبی برای توسعه تحقیقات آینده فراهم گردد.

ساختار مقاله در ادامه به این صورت تنظیم شده است: در بخش دوم، مفاهیم پایه و ساختار هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر تبیین می‌شود. بخش سوم به بررسی روش‌های مدیریت انرژی و بهینه‌سازی در ریزشبکه‌ها اختصاص دارد. در بخش چهارم،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

مدل‌سازی عدم‌قطعیت و رویکردهای بهره‌برداری تصادفی در ریزشبکه‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. بخش پنجم، موضوعات مرتبط با قابلیت اطمینان، امنیت ولتاژ و انعطاف‌پذیری در ریزشبکه‌ها را بررسی می‌کند. در بخش ششم، مطالعات پیشین در حوزه مدیریت انرژی ریزشبکه‌های مبتنی بر هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر مرور و مقایسه می‌شوند. سپس، چالش‌ها و روندهای آینده این حوزه در بخش هفتم بیان می‌شود. در نهایت، بخش هشتم به ارائه جمع‌بندی و نتیجه‌گیری مقاله اختصاص دارد.

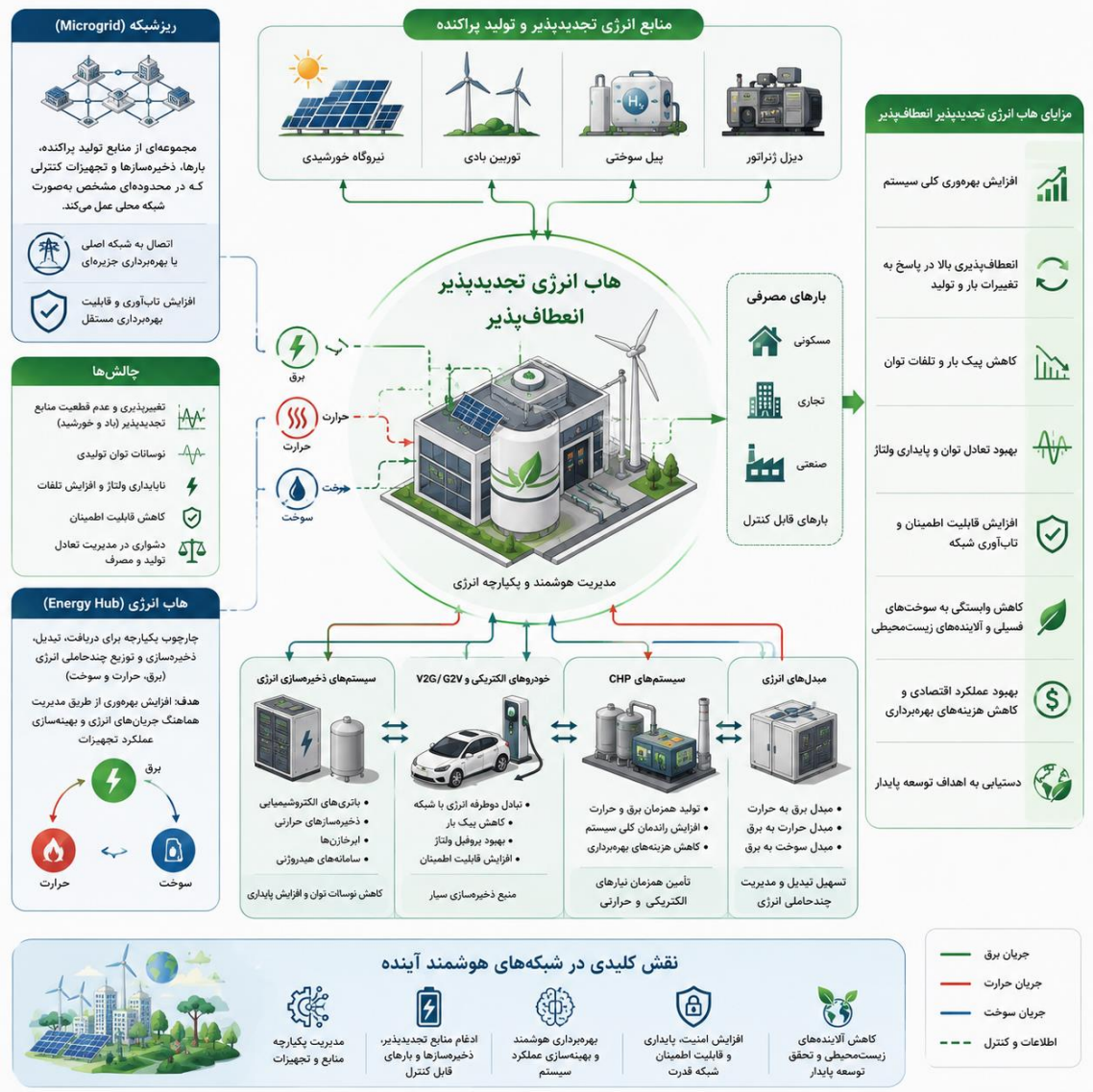
۲- مفاهیم پایه و ساختار هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر

تحولات گسترده در ساختار شبکه‌های قدرت و افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر، موجب شکل‌گیری مفاهیم نوینی در مدیریت و بهره‌برداری سیستم‌های انرژی شده است. در این میان، ریزشبکه‌ها و هاب‌های انرژی به‌عنوان دو مفهوم کلیدی در توسعه شبکه‌های هوشمند، نقش مهمی در افزایش بهره‌وری، انعطاف‌پذیری و پایداری سیستم‌های قدرت براساس شکل (۱) ایفا می‌کنند. ترکیب این دو مفهوم در قالب هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر، بستری مناسب برای مدیریت هماهنگ منابع انرژی، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و ارتقای عملکرد اقتصادی و فنی ریزشبکه‌ها فراهم ساخته است [۶-۵]. ریزشبکه به مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده، بارهای الکتریکی، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و تجهیزات کنترلی اطلاق می‌شود که در محدوده‌ای مشخص به‌صورت یک شبکه محلی عمل می‌کنند. این ساختار می‌تواند به شبکه اصلی متصل بوده یا در شرایط خاص به‌صورت مستقل و جزیره‌ای به فعالیت خود ادامه دهد. قابلیت بهره‌برداری مستقل، افزایش تاب‌آوری در برابر اختلالات شبکه و امکان مدیریت محلی انرژی، از مهم‌ترین ویژگی‌های ریزشبکه‌ها محسوب می‌شود [۷]. ریزشبکه‌ها معمولاً شامل منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر نیروگاه‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، پیل‌های سوختی، دیزل ژنراتورها و سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی هستند که به‌صورت هماهنگ برای تأمین بارهای مصرفی عمل می‌کنند. با وجود مزایای متعدد، توسعه گسترده منابع تجدیدپذیر در ریزشبکه‌ها چالش‌های قابل توجهی را نیز ایجاد کرده است. ماهیت متغیر و وابسته به شرایط محیطی منابعی مانند باد و خورشید، باعث نوسانات توان تولیدی و افزایش عدم‌قطعیت در بهره‌برداری سیستم می‌شود [۸]. این موضوع می‌تواند مشکلاتی نظیر ناپایداری ولتاژ، افزایش تلفات توان، کاهش قابلیت اطمینان و دشواری در مدیریت تعادل تولید و مصرف را به همراه داشته باشد [۸]. در نتیجه، نیاز به ساختارهایی با قابلیت انعطاف‌پذیری بالا برای مدیریت هوشمند انرژی بیش از پیش احساس می‌شود. در این راستا، مفهوم هاب انرژی به‌عنوان یک چارچوب یکپارچه برای مدیریت چندحاملی انرژی معرفی شده است. هاب انرژی سیستمی است که قابلیت دریافت، تبدیل، ذخیره‌سازی و توزیع انواع مختلف انرژی از جمله برق، حرارت و سوخت را دارا می‌باشد [۹]. هدف اصلی هاب انرژی، افزایش بهره‌وری سیستم از طریق مدیریت هماهنگ جریان‌های انرژی و بهینه‌سازی عملکرد تجهیزات مختلف است. در ساختار هاب انرژی، فناوری‌هایی نظیر سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت ۱(CHP) ، بویلرها، ذخیره‌سازهای انرژی، مبدل‌های انرژی و تجهیزات کنترلی هوشمند به‌صورت یکپارچه عمل می‌کنند تا نیازهای انرژی مصرف‌کنندگان با کمترین هزینه و بیشترین بازدهی تأمین شود [۹].

با توسعه فناوری‌های انرژی پاک، مفهوم هاب انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر مطرح گردیده است. این ساختار علاوه بر بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر، قابلیت پاسخگویی پویا به تغییرات شرایط بهره‌برداری، نوسانات بار و عدم‌قطعیت‌های موجود در سیستم را دارا می‌باشد. انعطاف‌پذیری در هاب‌های انرژی به معنای توانایی سیستم در تنظیم تولید، ذخیره‌سازی و مصرف انرژی در شرایط مختلف بهره‌برداری است. این ویژگی امکان بهبود تعادل توان، کاهش پیک بار، افزایش قابلیت اطمینان و ارتقای امنیت ولتاژ را فراهم می‌کند [۱۰]. یکی از مهم‌ترین اجزای هاب‌های انرژی انعطاف‌پذیر، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هستند. این سیستم‌ها با ذخیره انرژی مازاد تولیدشده در زمان‌های کم‌باری و تزریق آن در زمان‌های اوج مصرف، نقش مهمی در کاهش نوسانات توان و افزایش پایداری ریزشبکه ایفا می‌کنند [۱۱]. فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی شامل باتری‌های الکتروشیمیایی، ذخیره‌سازهای حرارتی، ابرخازن‌ها و سامانه‌های هیدروژنی، در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. استفاده از این تجهیزات نه‌تنها موجب افزایش انعطاف‌پذیری عملیاتی می‌شود، بلکه قابلیت پاسخگویی سریع به تغییرات بار و تولید را نیز فراهم می‌سازد. علاوه بر ذخیره‌سازها، خودروهای الکتریکی نیز به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی در هاب‌های انرژی مدرن شناخته می‌شوند. توسعه روزافزون خودروهای الکتریکی و پارکینگ‌های هوشمند، فرصت مناسبی برای استفاده از ظرفیت باتری این خودروها در مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها ایجاد کرده است [۱۲]. فناوری‌های خودرو به شبکه۲ (V2G) و شبکه به خودرو۳ (G2V) امکان تبادل

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

دوطرفه انرژی میان خودروها و شبکه را فراهم می‌کنند [۱۲]. در این شرایط، خودروهای الکتریکی می‌توانند علاوه بر مصرف‌کننده انرژی، به‌عنوان منابع ذخیره‌سازی سیار نیز عمل کرده و در کاهش پیک بار، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان شبکه نقش مؤثری ایفا کنند [۶ و ۱۲]. از سوی دیگر، سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت (CHP) نیز سهم قابل توجهی در افزایش بازدهی هاب‌های انرژی دارند. این سیستم‌ها با تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی از یک منبع سوخت، موجب افزایش راندمان کلی سیستم و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شوند. ترکیب CHP با منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازهای انرژی، امکان ایجاد ساختارهای چندحاملی با راندمان بالا را فراهم می‌کند که قادر به تأمین هم‌زمان نیازهای الکتریکی و حرارتی مصرف‌کنندگان هستند [۱۳]. در مجموع، هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های شبکه‌های هوشمند آینده، قابلیت ایجاد تحول در نحوه مدیریت و بهره‌برداری سیستم‌های انرژی را دارا هستند. این ساختارها با فراهم کردن مدیریت یکپارچه منابع، ذخیره‌سازها، خودروهای الکتریکی و بارهای قابل کنترل، می‌توانند نقش مهمی در دستیابی به اهداف توسعه پایدار، کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و افزایش امنیت و قابلیت اطمینان شبکه‌های قدرت ایفا کنند.



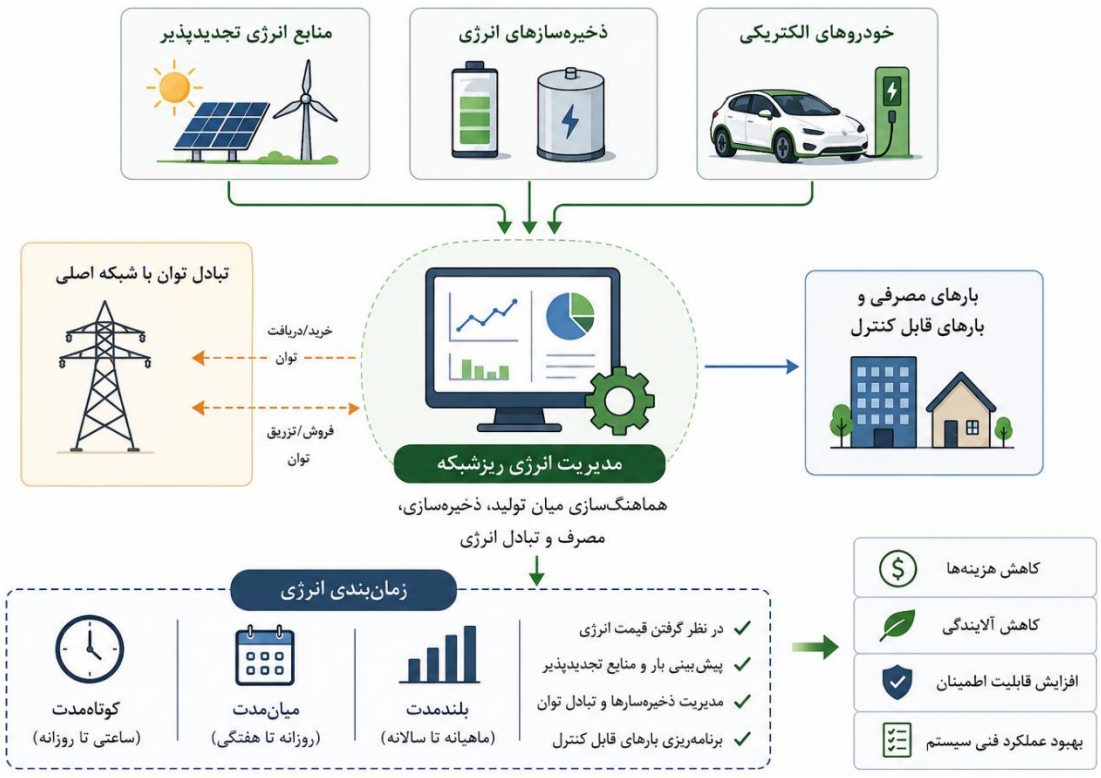
شکل (۱): مدیریت انرژی ریزشبکه در حضور هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر

Figure 1: Microgrid energy management with flexible renewable energy hubs

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

۳- روش‌های مدیریت انرژی و بهینه‌سازی در ریزشبکه‌ها

افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر، توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی و گسترش خودروهای الکتریکی، ساختار بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها را به‌طور چشمگیری همانند شکل (۱) پیچیده کرده است. ماهیت متناوب منابع تجدیدپذیر، تغییرات پیوسته بار مصرفی و وجود عدم‌قطعیت‌های متعدد در سیستم، ضرورت استفاده از راهبردهای پیشرفته مدیریت انرژی و روش‌های بهینه‌سازی هوشمند را بیش از گذشته آشکار ساخته است. در این شرایط براساس شکل (۲)، مدیریت انرژی به‌عنوان هسته اصلی بهره‌برداری ریزشبکه، وظیفه هماهنگ‌سازی میان تولید، ذخیره‌سازی، مصرف و تبادل انرژی را بر عهده دارد تا عملکرد اقتصادی، قابلیت اطمینان و امنیت بهره‌برداری سیستم بهبود یابد. به‌طور کلی، مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها به فرآیند تصمیم‌گیری و زمان‌بندی بهینه منابع انرژی اطلاق می‌شود که هدف آن تأمین نیاز بار با حداقل هزینه، کمترین میزان آلایندگی و بیشترین سطح قابلیت اطمینان است [۲، ۷]. این فرآیند شامل تعیین میزان تولید واحدها، مدیریت شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها، کنترل تبادل توان با شبکه اصلی و برنامه‌ریزی بارهای قابل کنترل می‌باشد. در سال‌های اخیر، با ظهور هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر، مدیریت انرژی از حالت سنتی فراتر رفته و به سمت مدیریت یکپارچه حامل‌های مختلف انرژی شامل برق، حرارت و سوخت حرکت کرده است [۱۳]. یکی از مهم‌ترین راهبردهای مورد استفاده در مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها، زمان‌بندی انرژی۴ است. در این روش، بهره‌برداری منابع مختلف انرژی در بازه‌های زمانی مشخص به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌شود که اهداف اقتصادی و فنی سیستم به‌صورت هم‌زمان تأمین شوند. زمان‌بندی انرژی معمولاً در افق‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت انجام می‌شود و متغیرهایی نظیر قیمت انرژی، پیش‌بینی بار، وضعیت منابع تجدیدپذیر و ظرفیت ذخیره‌سازها در آن نقش اساسی دارند [۱۰-۱۳]. استفاده از زمان‌بندی هوشمند می‌تواند موجب کاهش پیک بار، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش بهره‌وری سیستم گردد.



شکل (۲): اهمیت مدیریت انرژی در ریزشبکه

Figure 2: Importance of energy management in microgrids

با توجه به وجود اهداف متعدد و بعضاً متضاد در بهره‌برداری ریزشبکه‌ها، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است [۱۴]. در این روش‌ها، اهدافی نظیر کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری، کاهش تلفات انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌ها، افزایش قابلیت اطمینان و بهبود امنیت ولتاژ به‌صورت هم‌زمان در مدل لحاظ می‌شوند [۶]. بهینه‌سازی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

چندهدفه امکان دستیابی به راه‌حل‌های متوازن و سازشی را فراهم می‌کند که در آن هیچ هدفی به‌طور کامل فدای هدف دیگر نمی‌شود. روش مجموع وزنی، الگوریتم پارتو و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره از جمله مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده در این زمینه هستند [۱۵]. در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های فرابتکاری به‌دلیل توانایی بالا در حل مسائل پیچیده و غیرخطی، کاربرد گسترده‌ای در مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها یافته‌اند. الگوریتم‌هایی نظیر الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات، الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتم نهنگ، الگوریتم خفاش و بهینه‌سازی مبتنی بر گرگ خاکستری، برای حل مسائل زمان‌بندی و بهره‌برداری بهینه مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۶]. این الگوریتم‌ها قادرند در فضای جستجوی بزرگ و پیچیده، پاسخ‌های نزدیک به بهینه را با سرعت مناسب استخراج کنند. همچنین، انعطاف‌پذیری بالای این روش‌ها موجب شده است که در مدل‌سازی سیستم‌های دارای عدم‌قطعیت و محدودیت‌های متعدد عملکرد مطلوبی داشته باشند. علاوه بر الگوریتم‌های فرابتکاری، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین نیز به‌عنوان نسل جدید سیستم‌های مدیریت انرژی مطرح شده‌اند. این روش‌ها با بهره‌گیری از داده‌های تاریخی و الگوهای رفتاری سیستم، قادر به پیش‌بینی بار، تولید منابع تجدیدپذیر و رفتار مصرف‌کنندگان هستند [۱۷]. شبکه‌های عصبی مصنوعی، منطق فازی، یادگیری عمیق و یادگیری تقویتی از جمله تکنیک‌هایی هستند که در سال‌های اخیر برای توسعه سامانه‌های مدیریت انرژی هوشمند مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کاربرد این روش‌ها موجب افزایش دقت تصمیم‌گیری، کاهش خطاهای پیش‌بینی و بهبود عملکرد عملیاتی ریزشبکه‌ها شده است.

یکی دیگر از موضوعات مهم در مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها، مدیریت پاسخگویی بار و بارهای قابل کنترل است. پاسخگویی بار به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌شود که طی آن الگوی مصرف مشترکان در پاسخ به قیمت انرژی یا شرایط شبکه تغییر می‌کند [۱۸]. این راهکار می‌تواند موجب کاهش پیک مصرف، جلوگیری از اضافه‌بار شبکه و افزایش انعطاف‌پذیری بهره‌برداری شود. در ریزشبکه‌های مدرن، بارهای هوشمند، لوازم خانگی قابل کنترل و ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی به‌عنوان عناصر فعال در برنامه‌های پاسخگویی بار عمل می‌کنند. خودروهای الکتریکی نیز نقش مهمی در فرآیند مدیریت انرژی ایفا می‌کنند. توسعه فناوری «خودرو به شبکه» امکان استفاده از باتری خودروها به‌عنوان منابع ذخیره‌سازی توزیع‌شده را فراهم کرده است [۱۰ و ۱۳]. در این ساختار، خودروهای الکتریکی می‌توانند در زمان کم‌باری شارژ شده و در زمان اوج مصرف بخشی از انرژی ذخیره‌شده را به شبکه تزریق کنند. این قابلیت نه‌تنها موجب افزایش انعطاف‌پذیری سیستم می‌شود، بلکه در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، بهبود امنیت ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان نیز مؤثر است [۱۰]. از سوی دیگر، وجود عدم‌قطعیت در تولید منابع تجدیدپذیر، قیمت بازار انرژی و رفتار مصرف‌کنندگان، استفاده از مدل‌های مدیریت انرژی مبتنی بر عدم‌قطعیت را ضروری ساخته است. در این زمینه، روش‌های تصادفی، برنامه‌ریزی سناریومحور، بهینه‌سازی مقاوم و مدل‌های احتمالاتی به‌طور گسترده برای تحلیل شرایط مختلف بهره‌برداری مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۹]. این مدل‌ها امکان ارزیابی عملکرد سیستم در شرایط واقعی و متغیر را فراهم کرده و موجب افزایش پایداری تصمیمات مدیریتی می‌شوند. به‌طور کلی، مدیریت انرژی و بهینه‌سازی در ریزشبکه‌های مبتنی بر هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر، یکی از مهم‌ترین ارکان توسعه شبکه‌های هوشمند آینده محسوب می‌شود. ترکیب روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته، الگوریتم‌های هوشمند، فناوری‌های ذخیره‌سازی و خودروهای الکتریکی، زمینه ایجاد سیستم‌هایی با بهره‌وری بالا، انعطاف‌پذیری مناسب و قابلیت اطمینان مطلوب را فراهم کرده است. با این حال، پیچیدگی روزافزون ساختار ریزشبکه‌ها و افزایش وابستگی به فناوری‌های دیجیتال، همچنان چالش‌های متعددی را در مسیر توسعه سامانه‌های مدیریت انرژی هوشمند ایجاد می‌کند که نیازمند تحقیقات گسترده‌تر در آینده خواهد بود.

۴- مدل‌سازی عدم‌قطعیت و بهره‌برداری تصادفی در ریزشبکه‌ها

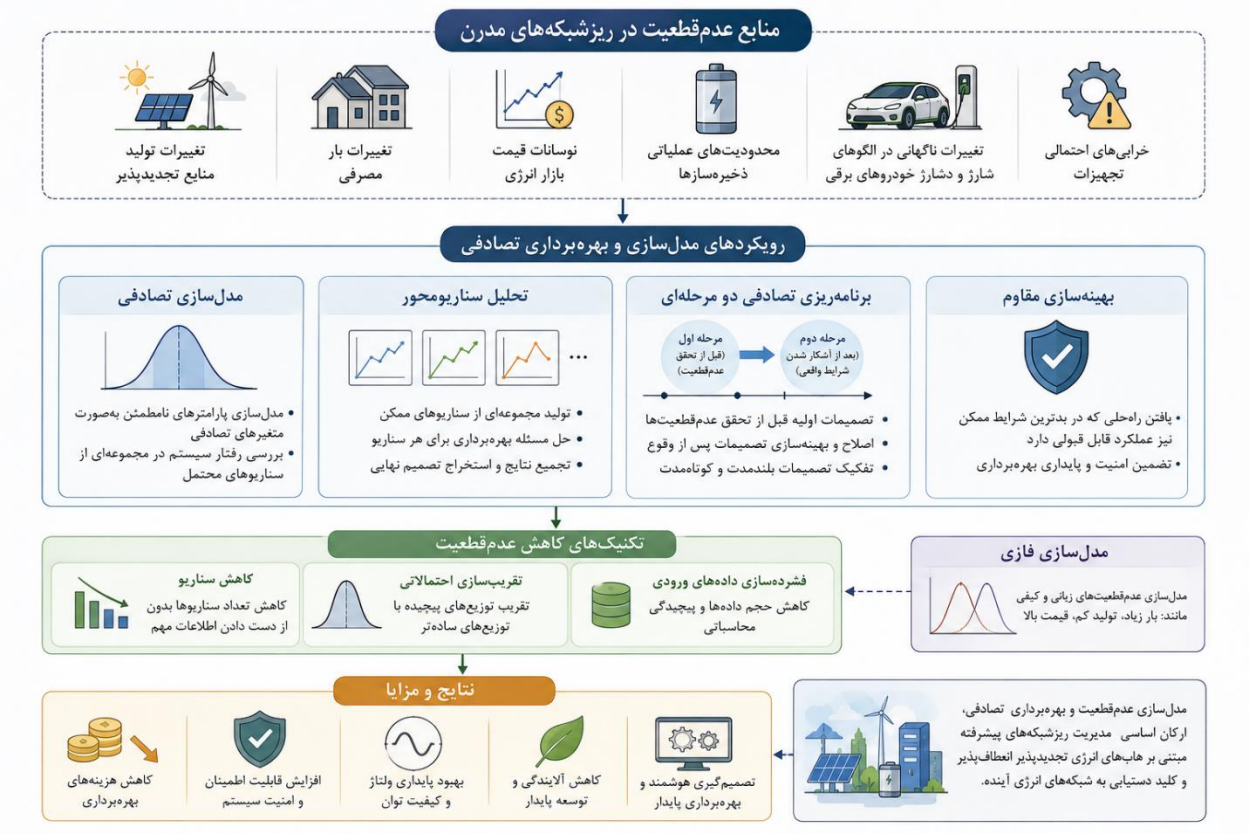
یکی از بنیادی‌ترین چالش‌های بهره‌برداری از ریزشبکه‌های مدرن، حضور گسترده عدم‌قطعیت‌ها در سطوح مختلف تولید، مصرف و زیرساخت‌های شبکه است. برخلاف شبکه‌های سنتی که عمدتاً بر پایه منابع قابل پیش‌بینی و قابل کنترل طراحی شده‌اند، ریزشبکه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر با ماهیتی پویا، متغیر و وابسته به شرایط محیطی مواجه هستند. این ویژگی باعث می‌شود که تصمیم‌گیری در حوزه بهره‌برداری، ذاتاً در یک محیط تصادفی و غیرقطعی همانند شکل (۳) انجام گیرد و نیازمند استفاده از مدل‌های پیشرفته تحلیل عدم‌قطعیت باشد. در ریزشبکه‌های نوین، عدم‌قطعیت‌ها تنها به تولید منابع بادی و خورشیدی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

محدود نمی‌شوند، بلکه طیف گسترده‌ای از عوامل را شامل می‌شوند. این عوامل شامل تغییر در الگوهای رفتاری مصرف‌کنندگان، نوسانات قیمت در بازار انرژی، بروز خرابی‌های احتمالی در تجهیزات، محدودیت‌های عملیاتی سامانه‌های ذخیره‌سازی و نیز تغییرات ناگهانی در الگوهای شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی هستند [۱۳]. ترکیب این عدم‌قطعیت‌ها، فضای تصمیم‌گیری را به یک مسئله پیچیده چندبعدی تبدیل می‌کند که تحلیل دقیق آن بدون استفاده از روش‌های تصادفی امکان‌پذیر نیست. در این راستا، مدل‌سازی تصادفی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای تحلیل سیستم‌های انرژی مطرح شده است [۲۰]. در این رویکرد، پارامترهای نامطمئن سیستم به‌صورت متغیرهای تصادفی در نظر گرفته می‌شوند و رفتار سیستم در قالب مجموعه‌ای از سناریوهای محتمل مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر سناریو نمایانگر یک وضعیت ممکن از شرایط بهره‌برداری است و به سیستم این امکان را می‌دهد که عملکرد خود را در طیف وسیعی از شرایط ارزیابی کند [۲۰]. این روش، دیدی واقع‌بینانه‌تر نسبت به عملکرد ریزشبکه در شرایط واقعی ارائه می‌دهد. یکی از رویکردهای مهم در این حوزه، تحلیل سناریومحور۵ است. در این روش، ابتدا مجموعه‌ای از سناریوهای ممکن برای منابع تجدیدپذیر، بار مصرفی و قیمت انرژی تولید می‌شود و سپس مسئله بهره‌برداری برای هر سناریو به‌صورت جداگانه حل می‌گردد [۲۱]. در نهایت، با استفاده از روش‌های تجمیع نتایج، یک تصمیم نهایی استخراج می‌شود که عملکردی پایدار در برابر تغییرات شرایط محیطی داشته باشد. کیفیت نتایج این روش به دقت تولید سناریوها و نحوه کاهش تعداد آن‌ها بدون از دست دادن اطلاعات مهم وابسته است.

در کنار رویکرد سناریومحور، برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای نیز به‌عنوان یک چارچوب قدرتمند در مدیریت ریزشبکه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۲]. در این ساختار، تصمیمات اولیه پیش از تحقق عدم‌قطعیت‌ها اتخاذ می‌شوند، در حالی که تصمیمات مرحله دوم پس از آشکار شدن شرایط واقعی سیستم اصلاح و بهینه‌سازی می‌گردند. این رویکرد امکان تفکیک تصمیمات بلندمدت و کوتاه‌مدت را فراهم کرده و انعطاف‌پذیری بیشتری در بهره‌برداری سیستم ایجاد می‌کند [۲۲]. در بسیاری از مطالعات، این مدل برای مدیریت هم‌زمان تولید، ذخیره‌سازی و تبادل انرژی با شبکه اصلی به‌کار گرفته شده است. روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم۶ نیز از دیگر ابزارهای مهم در مواجهه با عدم‌قطعیت‌ها محسوب می‌شوند [۲۳]. در این روش‌ها، به‌جای تمرکز بر یک سناریوی خاص یا مجموعه‌ای از سناریوها، هدف یافتن راه‌حلی است که در بدترین شرایط ممکن نیز عملکرد قابل قبولی داشته باشد. این رویکرد به‌ویژه در شرایطی که اطلاعات دقیق از توزیع احتمالاتی پارامترهای نامطمئن در دسترس نیست، کاربرد گسترده‌ای دارد [۲۳]. هرچند این روش معمولاً منجر به راه‌حل‌های محافظه‌کارانه‌تر می‌شود، اما سطح بالایی از امنیت عملیاتی را تضمین می‌کند. در سال‌های اخیر، رویکردهای مبتنی بر تئوری فازی نیز برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت در ریزشبکه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. برخلاف روش‌های احتمالاتی که نیازمند توزیع دقیق داده‌ها هستند، منطق فازی امکان مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌های زبانی و کیفی را فراهم می‌کند [۲۴]. برای مثال، مفاهیمی مانند «بار زیاد»، «تولید کم» یا «قیمت بالا» می‌توانند به‌صورت متغیرهای فازی تعریف شوند و در فرآیند تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گیرند. این ویژگی باعث می‌شود که مدل‌های فازی در شرایط کمبود داده یا عدم دقت اطلاعات، عملکرد مناسبی داشته باشند. در کنار این روش‌ها، تکنیک‌های کاهش عدم‌قطعیت نیز نقش مهمی در بهبود کارایی مدل‌های تصادفی ایفا می‌کنند. این تکنیک‌ها شامل روش‌هایی مانند کاهش سناریو، تقریب‌سازی احتمالاتی و فشرده‌سازی داده‌های ورودی هستند که هدف آن‌ها کاهش پیچیدگی محاسباتی بدون افت دقت قابل توجه در نتایج است. استفاده از این روش‌ها به‌ویژه در سیستم‌های بزرگ‌مقیاس با تعداد زیاد متغیرهای تصادفی، اهمیت ویژه‌ای دارد. از سوی دیگر، بهره‌برداری تصادفی در ریزشبکه‌ها ارتباط مستقیمی با پایداری تصمیمات عملیاتی دارد. تصمیماتی که بدون در نظر گرفتن عدم‌قطعیت اتخاذ می‌شوند، معمولاً در شرایط واقعی عملکرد مطلوبی ندارند و ممکن است منجر به افزایش هزینه‌ها، ناپایداری ولتاژ یا حتی خاموشی‌های ناخواسته شوند. بنابراین، ادغام مدل‌های تصادفی در فرآیند بهره‌برداری، نه‌تنها یک انتخاب بهینه، بلکه یک ضرورت برای تضمین عملکرد پایدار ریزشبکه‌ها محسوب می‌شود. در مجموع، مدل‌سازی عدم‌قطعیت و بهره‌برداری تصادفی یکی از ارکان اساسی در طراحی و مدیریت ریزشبکه‌های پیشرفته مبتنی بر هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر است. ترکیب رویکردهای احتمالاتی، سناریومحور، مقاوم و فازی، چارچوبی جامع برای مواجهه با پیچیدگی‌های واقعی سیستم فراهم می‌سازد و زمینه را برای توسعه راهکارهای تصمیم‌گیری هوشمند و پایدار در شبکه‌های انرژی آینده مهیا می‌کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]



شکل (۳): چارچوب مدل‌سازی عدم‌قطعیت و بهره‌برداری تصادفی در مدیریت انرژی ریزشبکه‌های مبتنی بر هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر

Figure 3: Uncertainty modeling and stochastic operation framework for energy management of flexible renewable energy hub-based microgrids

۵- قابلیت اطمینان، امنیت ولتاژ و انعطاف‌پذیری در ریزشبکه‌ها

با توسعه ریزشبکه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر و افزایش پیچیدگی ساختارهای بهره‌برداری، ارزیابی و ارتقای شاخص‌های عملکردی شبکه از جمله قابلیت اطمینان، امنیت ولتاژ و انعطاف‌پذیری به یکی از موضوعات کلیدی در مطالعات سیستم‌های قدرت تبدیل شده است. این شاخص‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در تضمین عملکرد پایدار ریزشبکه‌ها در شرایط عادی و بحرانی دارند و به‌طور مستقیم بر کیفیت توان، رضایت مصرف‌کنندگان و پایداری اقتصادی سیستم اثر می‌گذارند. در این میان، حضور هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر و منابع تولید پراکنده، فرصت‌ها و در عین حال چالش‌های جدیدی را در حوزه پایداری شبکه براساس شکل (۴) ایجاد کرده است. قابلیت اطمینان در ریزشبکه‌ها به توانایی سیستم در تأمین پیوسته و بدون وقفه انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان تحت شرایط مختلف بهره‌برداری اطلاق می‌شود [۲۵]. این مفهوم شامل دو بعد اصلی است: قابلیت اطمینان در تأمین انرژی۷ و امنیت بهره‌برداری۸. در ریزشبکه‌های مدرن، قابلیت اطمینان تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله نوسانات منابع تجدیدپذیر، محدودیت ظرفیت خطوط، خرابی تجهیزات و محدودیت عملکرد ذخیره‌سازها قرار دارد. از این‌رو، تحلیل قابلیت اطمینان نیازمند مدل‌سازی دقیق رفتار سیستم در شرایط مختلف عملیاتی و در نظر گرفتن سناریوهای احتمالی خرابی و عدم‌دسترس‌پذیری تجهیزات است [۲۵]. در کنار قابلیت اطمینان، امنیت ولتاژ یکی از مهم‌ترین شاخص‌های پایداری در ریزشبکه‌ها محسوب می‌شود. امنیت ولتاژ به توانایی سیستم در حفظ پروفیل ولتاژ در محدوده مجاز تحت شرایط مختلف بارگذاری و تولید اشاره دارد [۲۶]. نوسانات تولید منابع بادی و خورشیدی، تغییرات سریع بار و تبادل توان با شبکه اصلی می‌توانند منجر به افت یا افزایش غیرمجاز ولتاژ در باس‌های مختلف شبکه شوند. این پدیده در صورت عدم کنترل مناسب،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

می‌تواند باعث کاهش کیفیت توان، افزایش تلفات و حتی بروز ناپایداری در سیستم گردد [۶]. در این راستا، استفاده از تجهیزات کنترلی پیشرفته، جبران‌سازهای توان راکتیو و مدیریت هوشمند منابع انرژی نقش مهمی در حفظ امنیت ولتاژ ایفا می‌کند.

یکی از مفاهیم کلیدی مرتبط با پایداری ریزشبکه‌ها، انعطاف‌پذیری۹ است. انعطاف‌پذیری به توانایی سیستم در پاسخگویی مؤثر به تغییرات غیرمنتظره در تولید، بار و شرایط شبکه اطلاق می‌شود [۲۷]. این ویژگی به‌ویژه در ریزشبکه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این منابع ذاتاً دارای رفتار متغیر و غیرقابل پیش‌بینی هستند. انعطاف‌پذیری در ریزشبکه‌ها از طریق منابع مختلفی مانند ذخیره‌سازهای انرژی، بارهای قابل کنترل، خودروهای الکتریکی و قابلیت تبادل توان با شبکه اصلی تأمین می‌شود [۸ و ۱۳]. در این میان، هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر نقش محوری در ارتقای هر سه شاخص قابلیت اطمینان، امنیت ولتاژ و انعطاف‌پذیری ایفا می‌کنند [۶ و ۱۳]. این ساختارها با یکپارچه‌سازی منابع مختلف انرژی و امکان مدیریت هم‌زمان حامل‌های انرژی، شرایطی فراهم می‌کنند که سیستم بتواند به‌صورت پویا به تغییرات محیطی و عملیاتی واکنش نشان دهد. به‌عنوان مثال، در شرایط کاهش تولید انرژی خورشیدی یا بادی، هاب انرژی می‌تواند با استفاده از ذخیره‌سازها یا منابع جایگزین، کمبود توان را جبران کرده و پایداری سیستم را حفظ نماید. از سوی دیگر، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی یکی از مهم‌ترین ابزارهای افزایش قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری در ریزشبکه‌ها محسوب می‌شوند. این سیستم‌ها با جذب انرژی در زمان‌های کم‌باری و تزریق آن در زمان‌های پرباری، نقش مهمی در متعادل‌سازی تولید و مصرف ایفا می‌کنند. علاوه بر این، ذخیره‌سازها می‌توانند در شرایط اضطراری مانند خروج ناگهانی واحدهای تولیدی یا بروز خطا در شبکه، به‌عنوان منبع پشتیبان وارد مدار شده و از بروز خاموشی جلوگیری کنند. این ویژگی تأثیر قابل توجهی در افزایش تاب‌آوری ریزشبکه‌ها دارد.

خودروهای الکتریکی نیز به‌عنوان یکی از عناصر نوظهور در ریزشبکه‌های مدرن، نقش مهمی در بهبود انعطاف‌پذیری و پایداری سیستم ایفا می‌کنند. قابلیت تبادل دوطرفه انرژی میان خودرو و شبکه، امکان استفاده از باتری خودروها به‌عنوان منابع ذخیره‌سازی توزیع‌شده را فراهم کرده است. در این چارچوب، خودروهای الکتریکی می‌توانند در زمان‌های مناسب انرژی ذخیره کرده و در شرایط نیاز، آن را به شبکه بازگردانند [۹-۸]. این فرآیند نه‌تنها موجب بهبود پروفیل ولتاژ می‌شود، بلکه در کاهش فشار بر شبکه و افزایش قابلیت اطمینان نیز مؤثر است. از منظر تحلیل عملکرد، شاخص‌های متعددی برای ارزیابی قابلیت اطمینان و امنیت ولتاژ در ریزشبکه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. شاخص‌هایی مانند میانگین زمان قطع برق، احتمال عدم تأمین بار، شاخص انرژی تأمین‌نشده و انحراف ولتاژ از محدوده مجاز از جمله معیارهای رایج در این حوزه هستند. تحلیل این شاخص‌ها معمولاً در قالب مدل‌های شبیه‌سازی و روش‌های احتمالاتی انجام می‌شود تا رفتار سیستم در شرایط مختلف بهره‌برداری به‌صورت دقیق ارزیابی گردد. در سال‌های اخیر، رویکردهای نوین مبتنی بر کنترل هوشمند و بهینه‌سازی بلادرنگ نیز برای ارتقای پایداری ریزشبکه‌ها توسعه یافته‌اند. این روش‌ها با استفاده از داده‌های لحظه‌ای و الگوریتم‌های پیشرفته تصمیم‌گیری، امکان تنظیم دینامیکی تولید و مصرف انرژی را فراهم می‌کنند [۲۸]. به‌کارگیری این رویکردها در کنار هاب‌های انرژی انعطاف‌پذیر، زمینه‌ساز ایجاد سیستم‌هایی با قابلیت خودتنظیمی و تاب‌آوری بالا در برابر اختلالات می‌باشد. در مجموع، قابلیت اطمینان، امنیت ولتاژ و انعطاف‌پذیری سه رکن اساسی در طراحی و بهره‌برداری ریزشبکه‌های پیشرفته محسوب می‌شوند. تعامل مؤثر میان این شاخص‌ها و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین نظیر هاب‌های انرژی، ذخیره‌سازهای پیشرفته و خودروهای الکتریکی، مسیر توسعه ریزشبکه‌های پایدار، هوشمند و مقاوم در برابر عدم‌قطعیت‌های آینده را هموار می‌سازد.

۶- بررسی و مقایسه مطالعات پیشین در مدیریت انرژی ریزشبکه‌های مبتنی بر هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر

در سال‌های اخیر، با گسترش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت و حرکت تدریجی به سمت شبکه‌های هوشمند، ریزشبکه‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای معماری آینده انرژی مطرح شده‌اند [۲]. در این میان، مفهوم هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر به‌عنوان یک چارچوب یکپارچه برای مدیریت هم‌زمان حامل‌های مختلف انرژی، نقش مهمی در ارتقای بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان ایفا کرده است [۶]. مرور ادبیات علمی نشان می‌دهد که پژوهش‌های

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

انجام‌شده در این حوزه از رویکردهای ساده و تک‌هدفه به سمت مدل‌های پیچیده، چندهدفه و مبتنی بر عدم‌قطعیت حرکت کرده‌اند، به‌گونه‌ای که امروزه تمرکز اصلی بر توسعه چارچوب‌های جامع برای مدیریت انرژی در شرایط واقعی و غیرقطعی است. در مطالعات اولیه، تمرکز اصلی بر بهینه‌سازی اقتصادی بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها بوده است [۲۹]. در این رویکردها، هدف اصلی کاهش هزینه تولید و بهره‌برداری با فرض قطعی بودن پارامترهای سیستم مانند بار مصرفی، تولید منابع و قیمت انرژی بوده است. مدل‌های برنامه‌ریزی خطی، غیرخطی و پخش بار اقتصادی در این دسته از تحقیقات بیشترین کاربرد را داشته‌اند. این مدل‌ها اگرچه از نظر محاسباتی ساده و قابل پیاده‌سازی بودند، اما به دلیل نادیده گرفتن ماهیت متغیر منابع تجدیدپذیر و عدم‌قطعیت‌های موجود در سیستم، در شرایط واقعی عملکرد محدودی از خود نشان می‌دادند. به‌عنوان مثال، در حضور نوسانات شدید تولید انرژی بادی یا خورشیدی، این مدل‌ها قادر به حفظ تعادل دقیق بین تولید و مصرف نبوده و در نتیجه مشکلاتی مانند افزایش انرژی تأمین‌نشده، ناپایداری ولتاژ و کاهش قابلیت اطمینان رخ می‌داد [۱۳ و ۲۹].

با گسترش پیچیدگی سیستم‌های انرژی و افزایش سهم منابع تجدیدپذیر، پژوهش‌ها به سمت مدل‌های چندهدفه حرکت کردند [۳۰]. در این رویکردها، علاوه بر هزینه اقتصادی، شاخص‌هایی نظیر تلفات توان، انتشار آلاینده‌ها، قابلیت اطمینان، امنیت ولتاژ و پایداری سیستم نیز به‌صورت هم‌زمان در تابع هدف در نظر گرفته می‌شوند [۶]. این تغییر رویکرد باعث شد تا تحلیل عملکرد ریزشبکه‌ها از یک بعد صرفاً اقتصادی به یک چارچوب جامع چندمعیاره تبدیل شود. در این مدل‌ها، معمولاً از روش‌های جبهه پارتو یا تکنیک‌های تجمیع اهداف مانند مجموع وزنی استفاده شده است. این روش‌ها امکان بررسی تعادل میان اهداف متضاد را فراهم کرده‌اند؛ برای مثال کاهش هزینه ممکن است منجر به کاهش سطح ذخیره‌سازی و در نتیجه کاهش قابلیت اطمینان شود، یا افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر ممکن است نوسانات ولتاژ را افزایش دهد. بنابراین، مدل‌های چندهدفه امکان تصمیم‌گیری واقع‌گرایانه‌تر و نزدیک‌تر به شرایط عملیاتی را فراهم می‌کنند [۶ و ۳۰].

در ادامه این روند، مفهوم هاب انرژی به‌عنوان یک ساختار یکپارچه برای مدیریت چندحاملی انرژی وارد ادبیات تحقیق شد [۱۰ و ۱۳]. در این چارچوب، انرژی الکتریکی، حرارتی و در برخی موارد سوختی به‌صورت هم‌زمان تولید، تبدیل، ذخیره و مصرف می‌شوند. هدف اصلی این ساختار، افزایش انعطاف‌پذیری و بهینه‌سازی استفاده از منابع انرژی در سطح سیستم است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که استفاده از هاب‌های انرژی می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی، بهبود بهره‌وری کلی سیستم و افزایش قابلیت اطمینان شود. در این مدل‌ها، تجهیزاتی مانند سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت، بویلرها، چیلرها، مبدل‌های انرژی و سیستم‌های ذخیره‌سازی به‌صورت یکپارچه در یک چارچوب مدیریتی مشترک قرار می‌گیرند [۵، ۱۰ و ۱۳]. با این حال، بسیاری از این مدل‌ها در مراحل اولیه توسعه، به‌صورت ایستا طراحی شده بودند و توانایی کافی برای پاسخگویی به تغییرات سریع شرایط بهره‌برداری نداشتند.

در ادامه توسعه این مفهوم، برخی پژوهش‌ها نقش هاب‌های انرژی را از سطح مدیریت داخلی انرژی فراتر برده و آن‌ها را به‌عنوان بازیگران فعال در بازارهای انرژی و خدمات جانبی مورد بررسی قرار داده‌اند. در [۳۱]، مشارکت هاب‌های انرژی منعطف متصل به شبکه‌های الکتریکی، گازی و حرارتی در بازارهای انرژی و رزرو روز بعد مدل‌سازی شده است. در این چارچوب، مسئله بهینه‌سازی بر پایه برنامه‌ریزی تصادفی تدوین شده و هدف آن کمینه‌سازی شکاف میان هزینه انعطاف‌پذیری هاب‌ها و درآمد حاصل از حضور آن‌ها در بازارهای انرژی و رزرو بوده است. مدل پیشنهادی، قیود پخش توان بهینه در شبکه‌های برق، گاز و حرارت، تقاضای رزرو و محدودیت‌های بهره‌برداری هاب‌های انرژی را به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته است. همچنین، عدم‌قطعیت‌هایی نظیر بار، قیمت بازار، تقاضای رزرو، تولید منابع تجدیدپذیر و تقاضای انرژی ذخیره‌سازهای سیار در مدل لحاظ شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که این چارچوب می‌تواند عملکرد اقتصادی و انعطاف‌پذیری هاب‌های انرژی را بهبود داده و بهره‌برداری شبکه‌های مرتبط را ارتقا دهد.

در سال‌های اخیر، با افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر و پیچیدگی شبکه، توجه ویژه‌ای به مدل‌های تصادفی و مبتنی بر عدم‌قطعیت معطوف شده است. در این رویکردها، پارامترهای نامطمئن سیستم مانند تولید منابع بادی و خورشیدی، بار مصرفی، قیمت انرژی و حتی وضعیت تجهیزات به‌صورت متغیرهای تصادفی مدل‌سازی می‌شوند [۲۲-۲۰]. روش‌های سناریومحور، برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای و بهینه‌سازی مقاوم از جمله مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده در این حوزه هستند [۲۳-۲۰]. در مدل‌های

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

سناریومحور، مجموعه‌ای از سناریوهای محتمل برای شرایط مختلف سیستم تولید شده و عملکرد سیستم در هر سناریو بررسی می‌شود [۲۱]. سپس با استفاده از روش‌های تجمیع نتایج، یک راه‌حل کلی استخراج می‌شود. در برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای، تصمیمات اولیه پیش از تحقق عدم‌قطعیت‌ها اتخاذ شده و تصمیمات اصلاحی در مرحله دوم پس از مشخص شدن شرایط واقعی سیستم انجام می‌شود [۲۲]. در رویکرد بهینه‌سازی مقاوم نیز هدف یافتن راه‌حلی است که در بدترین شرایط ممکن نیز عملکرد قابل قبولی داشته باشد [۲۳]. هرچند این روش‌ها دقت مدل‌سازی را افزایش داده‌اند، اما در عین حال پیچیدگی محاسباتی بالاتری نیز به همراه داشته‌اند.

در کنار مدل‌های سناریومحور و تصادفی، ترکیب برنامه‌ریزی مقاوم با ساختارهای بازارمحور نیز به‌عنوان راهکاری مؤثر برای مدیریت عدم‌قطعیت در ریزشبکه‌های چندحاملی مورد توجه قرار گرفته است. در [۳۲]، یک مدل ترکیبی برای بهینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری در ریزشبکه‌های ترکیبی برق و گاز ارائه شده که در آن منابع تولید پراکنده، ذخیره‌سازی انرژی و نوسانات قیمت بازار انرژی به‌صورت هم‌زمان لحاظ شده‌اند. این مدل بر پایه برنامه‌ریزی خطی صحیح آمیخته و برنامه‌ریزی مقاوم مبتنی بر قیود احتمالاتی توسعه یافته و در قالب ساختاری دو مرحله‌ای شامل بازار روز-قبل و بازار لحظه‌ای تدوین شده است. در مرحله نخست، تصمیمات برنامه‌ریزی پیش از تحقق عدم‌قطعیت‌ها اتخاذ می‌شوند و در مرحله دوم، انحرافات تولید و بهره‌برداری در شرایط واقعی بازار اصلاح می‌گردند. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند هزینه بهره‌برداری را کاهش دهد، میزان قطع بار را محدود کند، سهم استفاده از منابع تجدیدپذیر را افزایش دهد و انحراف از برنامه‌های بازار را بهبود بخشد.

یکی دیگر از حوزه‌های مهم در مطالعات اخیر، نقش خودروهای الکتریکی در مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها است. خودروهای الکتریکی به‌عنوان بارهای انعطاف‌پذیر و در عین حال منابع ذخیره‌سازی سیار شناخته می‌شوند. فناوری‌های V2G و G2V امکان تبادل دوطرفه انرژی میان خودرو و شبکه را فراهم کرده‌اند [۳۳-۳۴]. این ویژگی باعث شده است که خودروهای الکتریکی بتوانند در زمان‌های کم‌باری شارژ شده و در زمان‌های پرباری انرژی ذخیره‌شده را به شبکه بازگردانند. مطالعات نشان داده‌اند که ادغام خودروهای الکتریکی در ریزشبکه‌ها می‌تواند به کاهش پیک بار، بهبود پروفیل ولتاژ، افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری کمک کند. با این حال، چالش‌هایی نظیر عدم‌قطعیت در رفتار کاربران، محدودیت ظرفیت باتری و مسائل اقتصادی مرتبط با استهلاک باتری‌ها همچنان در این حوزه وجود دارد [۳۳-۳۴].

افزون بر نقش اقتصادی و انعطاف‌پذیری خودروهای الکتریکی، برخی مطالعات اخیر بر ظرفیت این منابع در بهبود شاخص‌های فنی شبکه، از جمله تعادل بار و کیفیت توان، تمرکز کرده‌اند. در پژوهش [۳۵]، یک چارچوب بهینه‌سازی ترکیبی برای بهبود عملکرد ریزشبکه‌های تجدیدپذیر ارائه شده است که بر دو محور اصلی استوار است: بهره‌برداری هوشمند از سیستم ذخیره‌سازی انرژی و تخصیص هدفمند خودروهای الکتریکی برای بهبود تعادل بار. در بخش ذخیره‌سازی، مدل باتری و بازه‌های مختلف سطح شارژ، یعنیSoC، ارزیابی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که نگه‌داشتن سطح شارژ باتری در بازه‌ای میانی، ضمن افزایش دوام ذخیره‌ساز، به تثبیت عملکرد ریزشبکه کمک می‌کند. همچنین، استفاده از خودروهای الکتریکی تکفاز به‌عنوان منابع کنترلی پویا می‌تواند جریان نول را کاهش داده و شاخص‌های کیفیت توان را بهبود دهد. این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب مدیریت ذخیره‌ساز و کنترل هوشمند بار از طریق خودروهای الکتریکی، رویکردی مؤثر برای افزایش تاب‌آوری، کارایی و کیفیت بهره‌برداری در ریزشبکه‌ها و هاب‌های انرژی تجدیدپذیر است.

از منظر روش‌های بهینه‌سازی، مطالعات اخیر نشان‌دهنده استفاده گسترده از الگوریتم‌های فرابتکاری و هوش مصنوعی در مدیریت انرژی ریزشبکه‌ها هستند [۱۷-۱۶]. الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات، الگوریتم نهنگ، الگوریتم گرگ خاکستری و سایر روش‌های مبتنی بر هوش جمعی، به دلیل توانایی بالا در حل مسائل غیرخطی و چندهدفه، کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. این الگوریتم‌ها قادرند در فضای جستجوی پیچیده، پاسخ‌های نزدیک به بهینه را در زمان مناسب ارائه دهند. در کنار این روش‌ها، تکنیک‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق نیز برای پیش‌بینی بار، تولید منابع تجدیدپذیر و تصمیم‌گیری بلادرنگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها با استفاده از داده‌های تاریخی، امکان بهبود دقت پیش‌بینی و افزایش کیفیت تصمیم‌گیری را فراهم می‌کنند، هرچند نیازمند حجم بالایی از داده و توان محاسباتی بالا هستند [۱۷-۱۶].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، بررسی مطالعات موجود نشان می‌دهد که هنوز شکاف‌های پژوهشی مهمی در این حوزه وجود دارد. یکی از مهم‌ترین این شکاف‌ها، نبود چارچوب‌های یکپارچه برای ترکیب هم‌زمان شاخص‌های اقتصادی، قابلیت اطمینان، امنیت ولتاژ و انعطاف‌پذیری در یک مدل جامع است. بسیاری از مطالعات موجود تنها بر یک یا دو جنبه از این شاخص‌ها تمرکز کرده‌اند و تعامل پیچیده میان آن‌ها به‌طور کامل مورد توجه قرار نگرفته است. علاوه بر این، یکپارچه‌سازی کامل هاب‌های انرژی، خودروهای الکتریکی و سیستم‌های ذخیره‌سازی در قالب یک ساختار منسجم همچنان در مراحل ابتدایی قرار دارد. از سوی دیگر، پیچیدگی محاسباتی بالای مدل‌های تصادفی و چندهدفه یکی دیگر از چالش‌های مهم این حوزه است. افزایش تعداد سناریوها، متغیرهای تصمیم و محدودیت‌ها باعث افزایش زمان حل مسئله شده و کاربرد این مدل‌ها در شرایط بلادرنگ را محدود می‌کند. همچنین، بسیاری از مدل‌های پیشنهادی هنوز از نظر عملیاتی در مقیاس بزرگ و شرایط واقعی شبکه به‌طور کامل آزمایش نشده‌اند. در مجموع، مرور مطالعات موجود نشان می‌دهد که روند پژوهش در حوزه ریزشبکه‌های مبتنی بر هاب‌های انرژی انعطاف‌پذیر به‌طور واضحی به سمت توسعه مدل‌های جامع، چندهدفه و مبتنی بر عدم‌قطعیت حرکت کرده است. با این حال، برای دستیابی به بهره‌برداری بهینه و پایدار، نیاز به توسعه چارچوب‌های یکپارچه‌تر، الگوریتم‌های کارآمدتر و مدل‌های نزدیک‌تر به شرایط واقعی بیش از پیش احساس می‌شود.

۷- چالش‌ها و روندهای آینده

با توجه به رشد سریع ریزشبکه‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر و توسعه هاب‌های انرژی انعطاف‌پذیر، این حوزه به یکی از محورهای کلیدی پژوهش در سیستم‌های قدرت مدرن تبدیل شده است. با این وجود، علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در مدل‌سازی، بهینه‌سازی و بهره‌برداری این سیستم‌ها، همچنان چالش‌های متعددی در سطوح فنی، اقتصادی، محاسباتی و امنیتی وجود دارد که مانع از بهره‌برداری کامل و پایدار از ظرفیت‌های بالقوه این ساختارها می‌شود. یکی از مهم‌ترین چالش‌های فنی، پیچیدگی بالای تعامل میان اجزای مختلف ریزشبکه است. حضور هم‌زمان منابع تولید پراکنده با رفتار غیرخطی و متغیر، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی با محدودیت‌های دینامیکی، خودروهای الکتریکی با الگوهای رفتاری غیرقابل پیش‌بینی و بارهای متغیر باعث شده است که مدل‌سازی دقیق و جامع سیستم به مسئله‌ای پیچیده و چندبعدی تبدیل شود. این پیچیدگی در ساختارهای مبتنی بر هاب‌های انرژی که چندین حامل انرژی را به‌صورت هم‌زمان مدیریت می‌کنند، بیش از پیش افزایش می‌یابد. علاوه بر این، هماهنگی میان زیرسیستم‌های مختلف در شرایط واقعی بهره‌برداری نیز یکی دیگر از چالش‌های اساسی است، زیرا تأخیرهای ارتباطی، محدودیت‌های اندازه‌گیری و عدم دقت داده‌های لحظه‌ای می‌توانند عملکرد الگوریتم‌های مدیریت انرژی را تحت تأثیر قرار داده و کیفیت تصمیم‌گیری را کاهش دهند.

در کنار چالش‌های فنی، مسائل اقتصادی نیز نقش مهمی در توسعه ریزشبکه‌ها ایفا می‌کنند. نوسانات قیمت انرژی در بازارهای رقابتی، عدم قطعیت در سیاست‌های حمایتی و هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه برای پیاده‌سازی هاب‌های انرژی از جمله موانع اصلی گسترش این سیستم‌ها هستند. همچنین نبود مدل‌های دقیق برای ارزش‌گذاری انعطاف‌پذیری انرژی و خدمات جانبی ارائه‌شده توسط ریزشبکه‌ها باعث شده است که بسیاری از مزایای این ساختارها در تحلیل‌های اقتصادی به‌طور کامل منعکس نشود. از این‌رو، توسعه بازارهای محلی انرژی و مکانیزم‌های قیمت‌گذاری پویا می‌تواند نقش مهمی در رفع این چالش‌ها و ایجاد انگیزه اقتصادی برای سرمایه‌گذاری در این حوزه ایفا کند.

یکی دیگر از چالش‌های مهم، وابستگی شدید مدل‌های مدیریت انرژی به داده‌های دقیق و قابل اعتماد است. در بسیاری از موارد، عدم دسترسی به داده‌های کافی یا وجود خطا در پیش‌بینی تولید منابع تجدیدپذیر، بار مصرفی و رفتار کاربران، منجر به کاهش دقت مدل‌های بهینه‌سازی می‌شود. علاوه بر این، افزایش پیچیدگی مدل‌های تصادفی و سناریومحور، هزینه محاسباتی بالایی را به سیستم تحمیل می‌کند که می‌تواند اجرای بلادرنگ الگوریتم‌ها را با مشکل مواجه سازد. این موضوع به‌ویژه در ریزشبکه‌های بزرگ‌مقیاس یک محدودیت جدی محسوب می‌شود.

در کنار این موارد، گسترش دیجیتالی‌سازی در ریزشبکه‌ها و وابستگی روزافزون به سیستم‌های ارتباطی و داده‌محور، مسائل امنیت سایبری را به یکی از دغدغه‌های مهم تبدیل کرده است. حملات سایبری، دستکاری داده‌ها و اختلال در سیستم‌های

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

کنترل می‌توانند عملکرد کل شبکه را تحت تأثیر قرار دهند و حتی منجر به ناپایداری گسترده شوند. بنابراین توسعه چارچوب‌های امنیتی پیشرفته برای حفاظت از داده‌ها و تضمین یکپارچگی سیستم‌های کنترلی، یکی از الزامات اساسی در طراحی ریزشبکه‌های آینده به شمار می‌رود.

در مقابل این چالش‌ها، روندهای نوظهوری نیز در حال شکل‌گیری هستند که می‌توانند آینده مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها را متحول کنند. یکی از مهم‌ترین این روندها، استفاده گسترده از هوش مصنوعی و یادگیری عمیق در فرآیند تصمیم‌گیری است. این فناوری‌ها امکان تحلیل حجم عظیمی از داده‌ها، پیش‌بینی دقیق رفتار سیستم و ارائه تصمیمات بلادرنگ را فراهم می‌کنند و می‌توانند نقش مهمی در بهبود عملکرد هاب‌های انرژی ایفا کنند. روند دیگر، توسعه مفهوم اینترنت انرژی است که در آن ریزشبکه‌ها به‌صورت یک شبکه گسترده و هوشمند با یکدیگر در تعامل هستند و امکان تبادل انرژی و اطلاعات میان آن‌ها فراهم می‌شود. این ساختار می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری کلی سیستم و بهبود پایداری شبکه‌های قدرت در مقیاس گسترده شود. همچنین استفاده از فناوری بلاک‌چین برای ایجاد شفافیت در معاملات انرژی و مدیریت غیرمتمرکز منابع، یکی دیگر از روندهای مهم آینده محسوب می‌شود. این فناوری می‌تواند اعتماد میان بازیگران شبکه را افزایش داده و زمینه توسعه بازارهای انرژی محلی را فراهم سازد. در کنار این موارد، ادغام عمیق‌تر خودروهای الکتریکی در ساختار ریزشبکه‌ها و استفاده از آن‌ها به‌عنوان منابع ذخیره‌سازی توزیع‌شده نیز نقش مهمی در افزایش انعطاف‌پذیری و پایداری سیستم خواهد داشت.

۸- نتیجه‌گیری

در نهایت، ریزشبکه‌های مبتنی بر هاب‌های انرژی تجدیدپذیر انعطاف‌پذیر از مهم‌ترین راهکارها برای دستیابی به شبکه‌های قدرت پایدار، هوشمند و کم‌کربن در آینده به شمار می‌روند. این ساختارها با فراهم کردن امکان مدیریت یکپارچه منابع انرژی، بهبود قابلیت اطمینان، ارتقای امنیت ولتاژ و افزایش انعطاف‌پذیری، نقش مهمی در تحول صنعت برق ایفا می‌کنند. با این حال، بهره‌برداری بهینه از این سیستم‌ها مستلزم غلبه بر چالش‌های فنی، اقتصادی، محاسباتی و امنیتی موجود است. در این راستا، توسعه مدل‌های دقیق‌تر، الگوریتم‌های هوشمندتر و چارچوب‌های یکپارچه‌تر می‌تواند مسیر را برای استفاده گسترده‌تر از این فناوری‌ها هموار سازد و زمینه تحقق شبکه‌های انرژی آینده را فراهم آورد.

سپاسگزاری

از کلیه اعضای محترم هیات علمی گروه برق و حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول که در نشر و چاپ این نشریه کمک می‌کنند صمیمانه سپاسگزاریم.

References

مراجع

[1] Tripathi, S., Shrivastava, A., & Jana, K. C. (2025). An efficient energy management system for a micro-grid system considering the volatility of hybrid renewable energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, *101*, 673-691.

[2] Awdaa, M. A., Mashhour, E., Farzin, H., & Joorabian, M. (2025). Energy management and hosting capacity evaluation of a hybrid AC-DC micro grid including photovoltaic units and battery energy storage systems. Algorithms, 18(2), 114.

[3] Ahmadi, B., Hoogsteen, G., Zawadzki, P., Gerards, M. E., Radziszewska, W., Bykuć, S., & Hurink, J. L. (2025). A novel multi-objective approach to user-centric energy management systems. Energy Reports, 14, 185-204.

[4] Sabzalian, M. H., Pirouzi, S., Aredes, M., Wanderley Franca, B., & Carolina Cunha, A. (2022). Two- layer coordinated energy management method in the smart distribution network including multi- microgrid based on the hybrid flexible and securable operation strategy. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2022(1), 3378538.

[5] Akbari, E., Shabestari, S. F. M., Pirouzi, S., & Jadidoleslam, M. (2023). Network flexibility regulation by renewable energy hubs using flexibility pricing-based energy management. Renewable Energy, 206, 295-308.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

[6] Mofidi, A., Lashkarara, A., & Tolabi, H. B. (2026). A Stochastic Operation Optimization Framework of Micro-Grid to Improve Economic, Reliability and Voltage Security Considering Flexi-Renewable Energy Hubs. Energy, 140375.

[7] Gheouany, S., Ouadi, H., & El Bakali, S. (2025). Experimental and comparative study on optimal Active and Reactive Energy Management in microgrid: Moroccan VS Time of Use Tariff. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 212, 115414.

[8] Azarhooshang, A., Sedighizadeh, D., & Sedighizadeh, M. (2021). Two-stage stochastic operation considering day-ahead and real-time scheduling of microgrids with high renewable energy sources and electric vehicles based on multi-layer energy management system. Electric Power Systems Research, 201, 107527.

[9] Krishnakumar, R., Kumar, U. A., Gomathy, V., & Natraj, N. A. (2025). Energy management of energy hub with renewable energy resources based on GTOA-ACNN approach: Kumar et al. Environment, Development and Sustainability, 1-27.

[10] Dini, A., Pirouzi, S., Norouzi, M., & Lehtonen, M. (2019). Grid-connected energy hubs in the coordinated multi-energy management based on day-ahead market framework. Energy, 188, 116055.

[11] Hai, T., Singh, N. S. S., & Jamal, F. (2025). Energy management of a microgrid with integration of renewable energy sources considering energy storage systems with electricity price. Journal of Energy Storage, 110, 115191.

[12] Kioumarsi, K., & Bolurian, A. (2025). Optimal energy management for electric vehicle charging parking lots with considering renewable energy resources and accurate battery characteristic modeling. Journal of Energy Storage, 107, 114914.

[13] Dini, A., Hassankashi, A., Pirouzi, S., Lehtonen, M., Arandian, B., & Baziar, A. A. (2022). A flexible-reliable operation optimization model of the networked energy hubs with distributed generations, energy storage systems and demand response. Energy, 239, 121923.

[14] Ahmed, D., Ebeed, M., Ali, A., Alghamdi, A. S., & Kamel, S. (2021). Multi-objective energy management of a micro-grid considering stochastic nature of load and renewable energy resources. Electronics, 10(4), 403.

[15] Saini, N., & Saha, S. (2021). Multi-objective optimization techniques: a survey of the state-of-the-art and applications: Multi-objective optimization techniques. The European Physical Journal Special Topics, 230(10), 2319-2335.

[16] Diab, H., Abdelsalam, M., & Abdelbary, A. (2021). A multi-objective optimal power flow control of electrical transmission networks using intelligent meta-heuristic optimization techniques. Sustainability, 13(9), 4979.

[17] Li, Y., Ding, Y., He, S., Hu, F., Duan, J., Wen, G., ... & Zeng, Z. (2024). Artificial intelligence-based methods for renewable power system operation. Nature Reviews Electrical Engineering, 1(3), 163-179.

[18] Aghaei, J., & Alizadeh, M. I. (2013). Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18, 64-72.

[19] Norouzi, M., Aghaei, J., Niknam, T., Pirouzi, S., & Lehtonen, M. (2022). Bi-level fuzzy stochastic-robust model for flexibility valorizing of renewable networked microgrids. Sustainable Energy, Grids and Networks, 31, 100684.

[20] Jamal, R., Khan, N. H., Ebeed, M., Zeinoddini-Meymand, H., & Shahnia, F. (2025). An improved pelican optimization algorithm for solving stochastic optimal power flow problem of power systems considering uncertainty of renewable energy resources. Results in engineering, 26, 104553.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

[21] Giannelos, S., Konstantelos, I., Zhang, X., & Strbac, G. (2025). A stochastic optimization model for network expansion planning under exogenous and endogenous uncertainty. Electric Power Systems Research, 248, 111894.

[22] Li, R., & Yang, Y. (2021). Multi-objective capacity optimization of a hybrid energy system in two-stage stochastic programming framework. Energy Reports, 7, 1837-1846.

[23] Nazari-Heris, M., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2018). Application of robust optimization method to power system problems. Classical and recent aspects of power system optimization, 19-32.

[24] Fazlollahtabar, H. (2026). A fuzzy two-phase model for renewable energy system optimization under uncertainty: from operational to strategic scenario planning. Energy Conversion and Management: X, 101600.

[25] Kovalev, G. F., & Lebedeva, L. M. (2019). Reliability of power systems (Vol. 1, p. 157). Springer International Publishing.

[26] Jiang, Y., Zhao, S., & Wang, C. (2026). A stability-constrained market clearing and pricing approach for coordinated frequency and voltage security in high-renewable electric power systems. Applied Energy, 408, 127425.

[27] Ma, B., & Li, P. H. (2025). Optimal flexible power allocation energy management strategy for hybrid energy storage system with genetic algorithm based model predictive control. Energy, 324, 135958.

[28] Albogamy, F. R., Paracha, M. Y. I., Hafeez, G., Khan, I., Murawwat, S., Rukh, G., ... & Khan, M. U. A. (2022). Real-time scheduling for optimal energy optimization in smart grid integrated with renewable energy sources. IEEE Access, 10, 35498-35520.

[29] Sheng, H., Xu, Y., & Xie, D. (2026). Risk-Aware Prediction-Optimization Integrated Method for Day-ahead Microgrid Operation. IEEE Transactions on Smart Grid.

[30] Altimania, M. R. M., Basem, A., Saydullaev, B., Atamuratova, Z., Madaminov, B., Umarov, A., ... & Chaka, M. D. (2026). Adaptive multi-objective optimization of microgrid energy management using deep reinforcement learning considering battery degradation and renewable uncertainty. Scientific Reports.

[۳۱] کاظمی، م، نیکنام، ط، بهمنی فیروزی، ب، نفر، م، مشارکت هابهای انرژی منعطف متصل شده به شبکه در بازار انرژی و رزرو، مجله علمی- تخصصی تحقیقات نوین در برق- سال نهم- شماره چهارم- - زمستان ۹۹

[32] Behnia, SH., Kharrati, S., Khosravi, F., Rastgou, A., Intelligent Cost Optimization in Hybrid Electricity-Gas Microgrids Considering Distributed Generation and Energy Storage. Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 1 3 - No. 4 – Winter 2025

[33] Pirouzi, A., Aghaei, J., Pirouzi, S., Vahidinasab, V., & Jordehi, A. R. (2022). Exploring potential storage-based flexibility gains of electric vehicles in smart distribution grids. Journal of Energy Storage, 52, 105056.

[34] Kiani, H., Hesami, K., Azarhooshang, A., Pirouzi, S., & Safaee, S. (2021). Adaptive robust operation of the active distribution network including renewable and flexible sources. Sustainable Energy, Grids and Networks, 26, 100476.

[35] Alitabar, M., Sedighi, M., Abedi Pahnehkolaei, S. M., Ghafouri, A., Simultaneous Optimization of Energy Storage Performance and Load Unbalance Reduction in Renewable -Based Microgrids Using Single -Phase Electric Vehicles, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1 – Spring 2025

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

زیرنویس‌ها

[1] Combined Heat and Power (CHP)
[2] Vehicle to grid (V2G)
[3] Grid to vehicle (G2V)
[4] Energy Scheduling
[5] Scenario-Based Analysis
[6] Robust Optimization
[7] Adequacy
[8] Security
[9] Flexibility

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]