Optimal Operation of Microgrid Including Electrical and Thermal Energies Considering Uncertainties of Generation and Consumption

Mehdi Sarlak [1], Ph.D. Student, Abouzar Samimi [2], Assistant Professor, Mehdi Nikzad [3*], Assistant Professor, Amir Hossein Salemi [1], Assistant Professor
1-Department of Electrical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
mohsen.sarlak862@gmail.com ،salemiah@yahoo.com
2-Department of Electrical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran
a.samimi@arakut.ac.ir, abouzarsamimi@alumni.iust.ac.ir
3-Department of Electrical Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran
mehdi.nikzad@iau.ac.ir, mehdi.nikzad@yahoo.com

Abstract:

This paper presents the optimal operation of a microgrid in the presence of thermal blocks, distributed generations, storages, and demand response to achieve the optimal scheduling of active, reactive, and thermal power of these elements in the day-ahead energy and reactive power markets. The thermal block includes combined heat and power system, boiler, and thermal demand response. This scheme minimizes the difference between the total operation cost of the microgrid and sources and the total revenue obtained from these markets. It is subjected to AC power flow equations, network operation limits, and the operation model of these elements. Moreover, the scheme includes uncertainties of energy price, load, and renewable power, where the unscented transformation method models these uncertainty parameters. Finally, by implementing the proposed scheme on a 119-bus radial microgrid, the simulation results confirm the capability of the scheme in the improving economic and operation situation of the microgrid.

Keywords: Microgrid operation, Thermal block, Unscented transformation method, Energy market, Reactive power market.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]

بهره‌برداری بهینه ریزشبکه دارای انرژی‌های الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تولید و مصرف

مهدی سرلک[1]، ابوذر صمیمی[2] ،استادیار،مهدی نیک زاد[3] ،استادیار،امیرحسین سالمی[1]،استادیار
۱- دانشکده مهندسی برق ،واحد اراک،دانشگاه آزاد اسلامی،اراک،ایران.
Mohsen.sarlak862@gmail.com,salemiah@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق-دانشگاه صنعتی اراک-اراک-ایران
a.samimi@arakut.ac.ir abouzarsamimi@alumni.iust.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق ،واحد اسلامشهر،دانشگاه آزاد اسلامی،اسلامشهر،ایران.
mehdi.nikzad@iau.ac.ir, mehdi.nikzad@yahoo.com

چکیده: در این مقاله، بهره‌برداری بهینه ریزشبکه در حضور بلوک‌های حرارتی، تولیدات پراکنده، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده جهت دستیابی به زمان‌بندی بهینه توان اکتیو، راکتیو و حرارتی عناصر مذکور در محیط بازار انرژی و توان راکتیو روز- بعد ارائه می‌شود. بلوک حرارتی دارای سیستم ترکیبی برق و حرارت، بویلر و بارهای پاسخ‌ده حرارتی است. این طرح پیشنهادی تفاوت مجموع هزینه بهره‌برداری ریزشبکه و منابع و مجموع درآمد فروش انرژی و توان راکتیو عناصر یاد شده در بازارهای مذکور مستقر در ریزشبکه را کمینه می‌کند. آن نیز مقید به معادلات پخش توان AC، محدودیت‌های بهره‌برداری شبکه، مدل بهره‌برداری این عناصر است. علاوه براین طرح دارای عدم قطعیت‌های قیمت انرژی، بار و توان تجدیدپذیر است، که از روش انتقال بی‌بو برای مدل‌سازی آنها استفاده می‌شود. در نهایت با اجرای طرح پیشنهادی برروی ریزشبکه شعاعی ۱۱۹ باسه، نتایج عددی بدست آمده تأییدکننده قابلیت طرح در بهبود همزمان وضعیت اقتصادی و بهره‌برداری ریزشبکه می‌باشد.

واژه های کلیدی: بهره‌برداری ریزشبکه، بلوک حرارتی، روش انتقال بی‌بو، بازار انرژی، بازار توان راکتیو.

۱- مقدمه

به منظور کاهش آلایندگی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف کنترل نشده سوخت فسیلی، استفاده از منابع، ذخیره‌سازها و برنامه‌های مدیریت انرژی دوستدار محیط زیست در محل مصرف انرژی مورد توجه قرار گرفت (Asl, Bagherzadeh, Pirouzi, Norouzi, & Lehtonen, ۲۰۲۱). علاوه براین، حضور این عناصر در نقاط مصرف موجب بهبود شاخص‌های فنی و اقتصادی شبکه از قبیل کاهش تلفات انرژی، ارتقاء پروفیل ولتاژ به منحنی صاف‌تر، کاهش هزینه بهره‌برداری شبکه و بسیاری موارد دیگر می‌شود (AkbaiZadeh, Niknam, & Kavousi-Fard, ۲۰۲۱). به عنوان مثال، منابع انرژی تجدیدپذیر[1] به علت دارای بودن سطح آلایندگی و هزینه بهره‌برداری بسیار پایین موجب تأمین انرژی پاک و کم هزینه در شبکه می‌شوند (Nikolova, Causevski, & Al-Salaymeh, ۲۰۱۳). سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی[2] و طرح‌های پاسخگویی بار[3] با مدیریت انرژی قادر به پیک‌سایی مشخصه بار شبکه هستند، که نتیجه در بهبود شاخص‌های بهره‌برداری مانند کاهش تلفات انرژی، افت ولتاژ و کاهش هزینه بهره‌برداری شبکه دارد (Dini, Pirouzi, Norouzi, & Lehtonen, ۲۰۱۹). لذا پیش‌بینی می‌شود که تعداد این عناصر در محل مصرف افزایش یابد. از اینرو استفاده از واحدهای جمع‌کننده مانند ریزشبکه[4] برای منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده جهت برقراری کنترل و مدیریت ساده‌تر و مطلوب‌تر این عناصر مد نظر قرار گرفت (Chowdhury, Chowdhury, & Crossley, ۲۰۲۲). در این طرح با فرض برقراری بستری هوشمند در ریزشبکه، اپراتور عناصر مذکور با اپراتور ریزشبکه در هماهنگی دوطرفه هستند. لذا اپراتور ریزشبکه با اشراف بر داده‌های پایین‌دستی مانند تقاضای انرژی و ظرفیت منابع برای تولید انرژی و اپراتور عناصر یاد شده با اشراف به داده‌های بالادستی مانند قیمت انرژی می‌توانند وضعیت بهینه‌ای را برای شاخص‌های فنی و اقتصادی ریزشبکه در کنار دستیابی به زمان‌بندی بهینه عملکرد منابع ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده بدست آورند (Chowdhury et al., ۲۰۲۲). البته توجه شود که دستیابی به قابلیت‌های اشاره شده ملزم به

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]

برقراری سیستم مدیریت توان[5] مناسب در ریزشبکه و ارائه یک فرمول‌بندی بهینه بهره‌برداری شبکه است.

در زمینه بهره‌برداری بهینه ریزشبکه تحقیقات مختلفی انجام شده است. در (Dini, Pirouzi, Norouzi, & Lehtonen, ۲۰۲۰) نویسندگان بهره‌برداری بهینه منابع و ذخیره‌سازها در ریزشبکه دارای بارهای پاسخ‌ده را ارائه داده‌اند. در این طرح، کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری ریزشبکه و منابع به عنوان تابع هدف مد نظر بوده است و مقید به مدل بهره‌برداری شبکه و عناصر یاد شده در کنار محدودیت‌های فنی مختلف شبکه است. در ادامه یک مدل خطی‌سازی شده برای آن بدست آمده است، سپس برنامه‌ریزی استوار برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار، قیمت انرژی، توان تجدیدپذیر و انرژی مصرفی ذخیره‌سازهای سیار استفاده شده است. در (Roustaee & Kazemi, b۲۰۲۱) نیز بهره‌برداری چند هدفه چندین ریزشبکه بر پایه سیستم مدیریت انرژی جهت دستیابی به ریزشبکه با قابلیت اطمینان[6] بالا دارای انرژی پاک و وضعیت بهره‌برداری بهینه ارائه می‌شود. از اینرو مسأله پیشنهادی هزینه مورد انتظار بهره‌برداری ریزشبکه و منابع تجدیدناپذیر، انرژی مورد انتظار تغذیه نشده[7] به عنوان شاخص قابلیت اطمینان، میزان مورد انتظار آلودگی زیست محیطی و تابع انحرافات ولتاژ[8] در توابع هدف مختلف کمینه‌سازی می‌کند. همچنین این طرح مقید به معادلات پخش توان بهینه[9] در ریزشبکه‌ها، قیود قابلیت اطمینان، مدل ریاضی منابع و بارهای فعال[10] می‌باشد. در ادامه برنامه‌ریزی تصادفی[11] مبتنی بر روش ترکیبی شبیه‌سازی مونت کارلو[12] و تکنیک کانترویچ جهت مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار مصرفی، قیمت انرژی توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، تقاضای انرژی برخی از بارهای فعال و دسترس‌پذیری تجهیزات ریزشبکه‌ها استفاده می‌شود. علاوه بر این، جهت دستیابی به راه‌حل بهینه مطمئن از الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی دسته گرگ‌ها[13] و بهینه‌سازی آموزش و یادگیری[14] استفاده می‌گردد. طرحی همانند (Roustaee & Kazemi, b۲۰۲۱) در (Roustaee & Kazemi, a۲۰۲۱) اجراء شد، با این تفاوت که آن برروی ریزشبکه نامتعادل مورد تحلیل قرار گرفت. در (Norouzi, Aghaei, Pirouzi, Niknam, & Fotuhi-Firuzabad, ۲۰۲۲)، مدیریت توان منعطف[15] ریزشبکه متصل به شبکه در حضور منابع انرژی تجدیدپذیرها و منابع انعطاف‌پذیری ارائه شد. منابع انعطاف‌پذیر شامل طرح‌های پاسخگویی بار مبتنی بر مدل تشویق و واحد ترکیبی فنر برقی و پارکینگ خودروهای الکتریکی بود. مسأله مذکور کمینه‌سازی تفاوت هزینه مورد انتظار خرید انرژی و سود مورد انتظار انعطاف‌پذیری منابع انعطاف‌پذیر مقید به پخش توان بهینه جریان متناوب ریزشبکه در حضور منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و منابع انعطاف‌پذیر بعلاوه قیود انعطاف‌پذیری را بر عهده دارد. از برنامه‌ریزی تصادفی جهت مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار، قیمت انرژی، توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیرها و تقاضای انرژی خودروهای الکتریکی استفاده شد. طرحی همانند (Norouzi, Aghaei, Pirouzi, et al., ۲۰۲۲) در (Norouzi, Aghaei, Pirouzi, Niknam, & Lehtonen, ۲۰۲۲) نیز اجراء شد، با این تفاوت که در آن یک مدل دو سطحی برای بهره‌برداری ریزشبکه ارائه شده است. به‌طوری که سطح بالای آن جهت محاسبه قیمت انعطاف‌پذیری استفاده شد و سطح پایین آن برای بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه استفاده گردید. در (Homayoun, Bahmani-Firouzi, & Niknam, ۲۰۲۱) بهره‌بردای ریزشبکه دارای بلوک حرارتی ارائه گردید، که در بلوک حرارتی مدل تجمیع شده بار حرارتی، بویلر، ذخیره‌ساز حرارتی و سیستم ترکیبی برق و حرارت[16] ارائه شده بود. همچنین منابع انرژی تجدیدپذیرها و میکروتوربین[17] در کنار شبکه توزیع نیز عهده‌دار تغذیه انرژی مصرفی الکتریکی ریزشبکه بودند. در (Yu, Cai, & Huang, ۲۰۲۰)، مدیریت انرژی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در ریزشبکه متناسب با مشارکت بهینه این شبکه در بازار انرژی زمان واقعی تحت الگوریتم‌های یادگیری ماشین مدل‌سازی شده است. پیرو نتایج ارائه شده در (Yu et al., ۲۰۲۰)، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نیز می‌توانند با مدیریت انرژی مناسب و با انجام عملیات شارژ/دشارژ در ساعات کم‌باری/پرباری با قیمت انرژی پایین/بالا در زمینه پیک‌سایی شبکه مناسب باشند. در (Hooshmand & Rabiee, ۲۰۱۹) بهره‌برداری و برنامه‌ریزی بهینه ریزشبکه در حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، طرح‌های پاسخگویی بار و منابع انرژی تجدیدپذیر که از سیستم مدیریت انرژی استفاده کرده است، فرمول‌بندی شده است. براساس (Hooshmand & Rabiee, ۲۰۱۹)، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، طرح‌های پاسخگویی بار و منابع انرژی تجدیدپذیر به علت اینکه در نقاط مصرف قرار دارند، لذا هماهنگی آنها با سیستم مدیریت انرژی جهت مدیریت انرژی آنها می‌تواند قابلیت مفیدی در ریزشبکه از نظر بهبود شاخص‌های بهره‌برداری آن ایجاد کند. همچنین سیستم مذکور در (Patnam & Pindoriya, ۲۰۱۸) به جهت دست یافتن به یک مشخصه بار تخت در شبکه توزیع هوشمند از مدیریت توان اکتیو و یا انرژی ذخیره‌ساز انرژی مجازی استفاده می‌کند. در مرجع (Chen, Yu, & Jiang, ۲۰۱۶) دو مدل خطی به منظور برنامه‌ریزی تعیین تولید واحدهای سیستم ترکیبی برق و حرارت در کنار ذخیره‌سازهای انرژی با هدف هماهنگی با توربین‌های بادی ارائه شده است. در مرجع (Xie, Lu, Sun, Gu, & Li, ۲۰۱۶) مدلی برای بهره‌برداری بهینه از واحدهای سیستم ترکیبی برق و حرارت در محیط سیستم تجدید ساختار شده ارائه شده است. در این مدل تغییرات نسبت بار حرارتی به بار الکتریکی به صورت پویا تنظیم می‌شود. این مقاله از یک مدل بهینه‌سازی گسسته برای حل مسأله بهینه‌سازی بهره برده است.

با توجه به پیشینه تحقیق، شکاف‌های تحقیقاتی عمده زیر در زمینه بهره‌برداری ریزشبکه وجود دارد:

- در بیشتر تحقیقات عموماً مدل بخش الکتریکی سیستم ترکیبی برق و حرارت در مسائل بهره‌برداری و برنامه‌ریزی ریزشبکه مدنظر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]

بوده است. علاوه بر این، در بیشتر تحقیقات مرتبط به مدیریت انرژی ریزشبکه، مدل مصرف‌کننده الکتریکی ارائه شده است. ولی در نقاط مصرف، استفاده از انرژی الکتریکی و حرارتی مشهود است. همچنین سیستم ترکیبی برق و حرارت در خروجی خود دو انرژی الکتریکی و حرارتی را تولید می‌کند. لذا به منظور مدل‌سازی مناسب‌تر بهره‌برداری ریزشبکه لازم است که مدل حرارتی منابع و مصرف‌کننده‌ها نیز فرمول‌بندی شود.

- توجه شود که با مدیریت زمان‌بندی منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده می‌توان منفعت مالی مناسبی را برای آنها از بازار انرژی و خدمات جانبی کسب کرد. ولی در بیشتر تحقیقات مدل بهره‌برداری ریزشبکه مد نظر بوده است که هدف آن بهبود شاخص‌های فنی شبکه مانند کاهش تلفات توان و افت ولتاژ در کنار دستیابی به کمینه‌ترین هزینه بهره‌برداری ریزشبکه و عناصر مذکور است. در کمتر تحقیقاتی مانند (Homayoun et al., ۲۰۲۲; Norouzi, Aghaei, Niknam, et al., ۲۰۲۱)نیز مشارکت آنها در بازار انرژی مد نظر بوده است. همچنین این منابع با قابلیت کنترل توان اکتیو و راکتیو قادر هستند، در خدمات جانبی مانند جبران توان راکتیو نقش داشته باشند. از اینرو آنها می‌توانند از بازار خدمات جانبی نیز کسب منفعت کنند، که این موضوع کمتر در تحقیقات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.
- شایان ذکر است که گام اجرایی در مسأله بهره‌برداری دارای زمان پایینی (عموماً کمتر از یک ساعت) است. لذا در این مسأله اهمیت زمان محاسباتی پایین بالا خواهد بود (Xie et al., ۲۰۱۶). برای دسترسی به این مورد نیاز است که حجم مسأله پایین باشد، ولی مدل‌سازی تصادفی عدم قطعیت‌ها بر پایه تکنیک‌های دارای تولید و کاهش سناریو چنین شرایطی را به وجود نمی‌آورند. چونکه آنها جهت دسترسی به یک راه‌حل بهینه مطمئن نیاز به تعداد قابل توجهی سناریو هستند. لذا نیاز به روش‌هایی است که دارای کمینه‌ترین تعداد سناریو باشند. متناسب با این موضوع، برخی از تحقیقات مدل‌سازی استوار را برای عدم قطعیت‌های استفاده می‌کنند. اما این روش تنها بدترین مورد سناریو را در نظر می‌گیرد، در صورتی که محاسبه برخی از شاخص‌ها نیاز به بررسی چندین سناریو از یک پارامتر عدم قطعیت است (Roustaee & Kazemi, ۲۰۲۱b). به عنوان مثال برای بررسی وضعیت انعطاف‌پذیری ریزشبکه نیاز است که چندین سناریو از توان تجدیدپذیر بررسی شود (Asl et al., ۲۰۲۱).

در این مقاله به منظور حذف شکاف تحقیقاتی اول و دوم، مدیریت توان در یک ریزشبکه دارای بلوک حرارتی، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، طرح‌های پاسخگویی بار و تولیدات پراکنده[۱۸] متناسب با مشارکت این عناصر در بازار انرژی و توان راکتیو روز- بعد[۱۹] ارائه می‌شود. در این مقاله فرض بر این که تولیدات پراکنده از نوع سیستم ترکیبی برق و حرارت و بویلر می‌توانند میزان انرژی مصرفی مصرف‌کننده‌گان حرارتی که در طرح‌های پاسخگویی بار نیز شرکت می‌کنند، را تأمین کنند. از اینرو این عناصر در یک واحد مجتمع تحت عنوان «بلوک حرارتی» قرار می‌گیرند و آن در باس‌هایی از ریزشبکه قرار دارد که بار حرارتی موجود باشد. در ادامه، طرح پیشنهادی در قالب یک مسأله بهینه‌سازی بیان می‌شود. در مدل تصادفی آن، تابع هدف آن برابر کمینه‌سازی ماتفاوت مجموع هزینه بهره‌برداری تولیدات پراکنده و ریزشبکه و مجموع درآمد منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده در بازارهای یاد شده می‌باشد. آن نیز مقید به معادلات پخش توان بهینه جریان متناوب مدل بهره‌برداری بلوک حرارتی، تولیدات پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، طرح‌های پاسخگویی بار و محدودیت انعطاف‌پذیری ریزشبکه است. در این طرح به منظور جبران شکاف تحقیقاتی دوم، حضور منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ ده در بازارهای انرژی و خدمات جانبی در نظر گرفته شد. در این مقاله بازار خدمات جانبی شامل بازار توان راکتیو است. زیراکه عموما منابع و ذخیره‌سازها قادر هستند که توان راکتیو عبوری از سیستم خود را کنترل کنند. از اینرو آنها با کنترل توان راکتیو خود می توانند از بازار توان راکتیو کسب منفعت داشته باشد. لذا در تابع هدف پیشنهادی، بیشینه‌سازی (کمینه‌سازی قرینه) درآمد منابع و ذخیره‌سازها در بازار توان راکتیو لحاظ می‌شود. این طرح دارای عدم قطعیت‌های قیمت انرژی، توان تجدیدپذیر و بار مصرفی است. لذا به منظور حذف شکاف تحیقاتی سوم، آنها براساس روش انتقال بی‌بو[۲۰] مدل‌سازی می‌شوند. زیرا که این روش دارای کمینه‌ترین تعداد سناریو در برنامه‌ریزی تصادفی است. در نهایت نوآوری‌های طرح مذکور به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- ارائه مدل بهره‌برداری ریزشبکه دارای بلوک حرارتی، منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده جهت دستیابی به وضعیت بهینه بهره‌برداری و اقتصادی برای شبکه و عناصر مذکور،
- دستیابی به منفعت مالی برای منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده از بازار انرژی و خدمات جانبی مانند توان راکتیو به منظور تشویق مالکان این عناصر در بهره‌برداری بهینه ریزشبکه

در ادامه این مقاله بدین صورت سازمان‌دهی می‌شود: در بخش دوم مدل تصادفی طرح پیشنهادی بیان می‌شود. سپس در بخش سوم مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها بر مبنای روش بی‌بو ارائه می‌گردد. در ادامه، نتایج عددی حاصل از موارد مطالعاتی مختلف در بخش چهارم ارزیابی می‌شوند. در نهایت، نتیجه‌گیری‌ها در بخش پنجم ذکر می‌شوند.

۲- مدل تصادفی طرح پیشنهادی

در این بخش، مدل ریاضی بهره‌برداری ریزشبکه در حضور منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده متناسب با محیط بازار انرژی و توان راکتیو روز- بعد در چارچوب بهینه‌سازی تصادفی ارائه می‌شود. این طرح کمینه‌سازی ماتفاوت هزینه بهره‌برداری مورد انتظار تولیدات

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]

پراکنده تجدیدناپذیر[۲۱] و ریزشبکه با درآمد مورد انتظار حاصل از فروش انرژی/توان راکتیو در بازارهای مذکور توسط عناصر یاد شده را بر عهده دارد. آن نیز مقید به معادلات پخش توان بهینه جریان متناوب، مدل بهره‌برداری تولیدات پراکنده تجدیدناپذیر، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، طرح‌های پاسخ‌گویی بار و بلوک حرارتی و محدودیت انعطاف‌پذیری ریزشبکه می‌باشد. فرض بر این است که در باس‌هایی از ریزشبکه که مصرف‌کننده حرارتی وجود دارد، بلوک حرارتی نیز در این باس قرار می‌گیرد. آن شامل دو تولیدات پراکنده تجدیدناپذیر از نوع سیستم ترکیبی برق و حرارت و بویلر است و همچنین طرح‌های پاسخگویی بار برای بار حرارتی نیز در نظر گرفته شده است. بنابراین مدل تصادفی طرح پیشنهادی به‌صورت رابطه (۱) قابل نگارش می‌باشد:

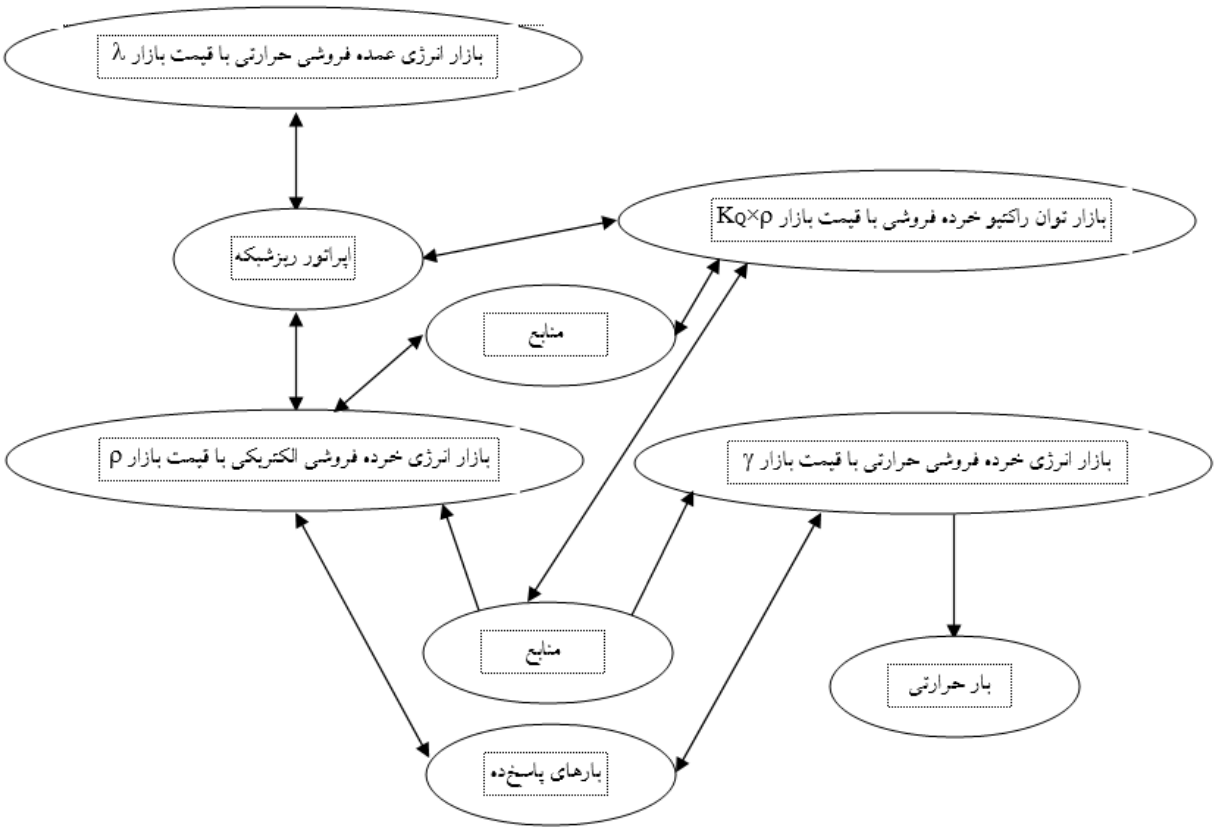
$$\min C\cos t = \sum_{s\in SC}\Big(\pi_s \sum_{h\in OH}\Big\{\lambda_{h,s}P^{G}_{ref,h,s} + \sum_{b\in Bus}\Big\{\Big(\alpha^{MT}_b+\beta^{MT}_b P^{MT}_{b,h,s}+\chi^{MT}_b\left(P^{MT}_{b,h,s}\right)^2\Big) + \Big(\alpha^{CHP}_b+\beta^{CHP}_b P^{CHP}_{b,h,s}+\chi^{CHP}_b\left(P^{CHP}_{b,h,s}\right)^2\Big) + \Big(\alpha^{BO}_b+\beta^{BO}_b H^{BO}_{b,h,s}+\chi^{BO}_b\left(H^{BO}_{b,h,s}\right)^2\Big) - \rho_{h,s}\Big[\Big(P^{MT}_{b,h,s}+P^{CHP}_{b,h,s}+P^{RES}_{b,h,s}+P^{DR}_{b,h,s}+P^{DCH}_{b,h,s}-P^{CH}_{b,h,s}\Big) + K_Q\Big(\left|Q^{MT}_{b,h,s}\right|+\left|Q^{CHP}_{b,h,s}\right|+\left|Q^{RES}_{b,h,s}\right|+\left|Q^{ESS}_{b,h,s}\right|\Big)\Big] - \gamma_{h,s}\Big(H^{CHP}_{b,h,s}+H^{BO}_{b,h,s}+H^{DR}_{b,h,s}\Big)\Big\}\Big\}\Big) \quad (1)$$

که λ قیمت خرید انرژی الکتریکی ریزشبکه از بازار بالادستی برحسب ($/MWh)، α^{MT}, β^{MT}, χ^{MT} به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب تابع هزینه بهره‌برداری میکروتوربین به ترتیب برحسب $، $/MWh و $/MWh^2$ و α^{CHP}, β^{CHP}, χ^{CHP} نمایانگر ضرایب تابع هزینه بهره‌برداری سیستم ترکیبی برق و حرارت به ترتیب برحسب $، $/MWh و $/MWh^2$، α^{BO}, β^{BO}, χ^{BO} ضرایب تابع هزینه بهره‌برداری بویلر به ترتیب بر حسب $، $/MWh و $/MWh^2$، ρ, γ قیمت انرژی الکتریکی و حرارتی در بازار خرده فروشی برحسب ($/MWh) و K_Q نسبت قیمت توان راکتیو به قیمت انرژی هستند. b, h, ref , s به ترتیب نشان‌دهنده سناریو، باس مرجع، ساعت بهره‌برداری و اندیس باس هستند. SC، OH و Bus به ترتیب اشاره به مجموعه سناریو، ساعت بهره‌برداری و باس دارند. همچنین، P^{MT}, Q^{MT} ،P^{G} به ترتیب توان اکتیو پست توزیع، توان اکتیو و راکتیو میکروتوربین برحسب (p.u)، P^{CHP}, Q^{CHP} توان اکتیو و راکتیو سیستم ترکیبی برق و حرارت برحسب (p.u)، H^{CHP}, H^{BO} به ترتیب توان حرارتی سیستم ترکیبی برق و حرارت و بویلر (p.u)، P^{CH}, P^{DCH} نشان‌دهنده توان اکتیو شارژی و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی برحسب (p.u)، P^{DR}, H^{DR} توان اکتیو و حرارتی در طرح پاسخ‌گویی بار برحسب (p.u)، P^{RES}, Q^{RES} توان اکتیو و راکتیو منابع انرژی تجدیدپذیر برحسب (p.u)، Q^{ESS} توان راکتیو سیستم ذخیره‌ساز انرژی برحسب (p.u)، هستند. Cost بر حسب $ معرف تابع هزینه ریزشبکه است.

در رابطه (۱) تابع هدف طرح پیشنهادی فرمول‌بندی شده است، و آن برابر با کمینه‌سازی ماتفاوت هزینه بهره‌برداری مورد انتظار ریزشبکه و تولیدات پراکنده تجدیدناپذیرها (Roustaee & Kazemi, b۲۰۲۱) با درآمد مورد انتظار منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخده در بازار انرژی و توان راکتیو (Kiani, Hesami, Azarhooshang, Pirouzi, Safaee, &۲۰۲۱) است. به‌طوری که هزینه بهره‌برداری ریزشبکه که بیانگر هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست است، در بخش اول رابطه (۱) مدل‌سازی شده است (Roustaee & Kazemi, b۲۰۲۱). در بخش دوم این رابطه، عبارت‌های دوم الی چهارم به ترتیب اشاره به هزینه بهره‌برداری (سوخت) تولیدات پراکنده تجدیدناپذیر از نوع میکروتوربین، سیستم ترکیبی برق و حرارت و بویلر دارند (Dini et al., ۲۰۲۰). عبارت‌های پنجم الی هفتم در این بخش از رابطه (۱) به ترتیب مربوط به درآمد فروش انرژی الکتریکی منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخده در بازار انرژی الکتریکی روز- بعد، درآمد فروش توان راکتیو توسط منابع و ذخیره‌سازها در بازار توان راکتیو روز- بعد، و درآمد فروش انرژی بلوک حرارتی (و سیستم ترکیبی برق و حرارت، بویلر و طرح‌های پاسخ‌گویی بار حرارتی) در بازار انرژی حرارتی روز- بعد هستند. قابل توجه است که در این بخش فرض بر این است که این بازارها به عنوان یک بازار خرده فروشی در محیط ریزشبکه برقرار است، و همچنین خود ریزشبکه از بازار عمده فروشی در شبکه بالادست خرید توان دارد. از اینرو قیمت خرید انرژی ریزشبکه (λ) متفاوت با قیمت فروش انرژی بازار خرده فروشی (ρ و γ) خواهد بود. همچنین در این بخش براساس (Kiani et al., ۲۰۲۱) فرض شده است که قیمت توان راکتیو ضریبی از قیمت انرژی الکتریکی می‌باشد، یعنی $K_Q\times\rho$. علاوه بر این، براساس (Kiani et al., ۲۰۲۰Dini et al., ; ۲۰۲۱) عموماً منابع توان راکتیو به ازای تقاضای ریزشبکه توان راکتیو به / از شبکه تزریق / دریافت می‌کنند، از اینرو قدر مطلق توان راکتیو این منابع در رابطه (۱) استفاده شد. به عنوان نکته دیگر، هزینه بهره‌برداری ذخیره‌سازها و طرح‌های پاسخ‌گویی بار در عبارت‌های چهارم الی ششم در بخش دوم رابطه (۱) در نظر گرفته شده است. به‌طوری که براساس این رابطه، در صورتی که این عناصر در مد شارژ (دریافت توان از بازار خرده فروشی) کار کنند، میزان درآمد آنها منفی خواهد بود که این به معنی هزینه برای آنها است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]



شکل (۱): مشارکت ریزشبکه و عناصر آن در بازار انرژی و توان راکتیو

قیود توابع هدف به شرح زیر می‌باشند:

$$P^{G}_{b,h,s}+P^{MT}_{b,h,s}+P^{RES}_{b,h,s}+P^{CHP}_{b,h,s}+\left(P^{DCH}_{b,h,s}-P^{CH}_{b,h,s}\right)+P^{DR}_{b,h,s}-\sum_{k\in Bus}A^{L}_{b,k}P^{L}_{b,k,h,s}=P^{D}_{b,h,s}\qquad \forall b,h,s \tag{۲}$$

که A^{L}، P^{L} و P^{D} به ترتیب نشان‌دهنده ماتریس تلاقی خط توزیع و باس ریزشبکه، توان اکتیو خط توزیع و توان اکتیو بار برحسب (p.u) هستند.

$$Q^{G}_{b,h,s}+Q^{MT}_{b,h,s}+Q^{RES}_{b,h,s}+Q^{CHP}_{b,h,s}+Q^{ESS}_{b,h,s}-\sum_{k\in Bus}A^{L}_{b,k}Q^{L}_{b,k,h,s}=Q^{D}_{b,h,s}\qquad \forall b,h,s \tag{۳}$$

که Q^{L}، Q^{G} و Q^{D} به ترتیب نمایانگر توان راکتیو خط توزیع، توان راکتیو پست توزیع و توان راکتیو بار برحسب (p.u) هستند.

$$P^{L}_{b,k,h,s}=G_{b,k}\left(V_{b,h,s}\right)^{2}-V_{b,h,s}V_{k,h,s}\times\left\{G_{b,k}\cos\left(\delta_{b,h,s}-\delta_{k,h,s}\right)+B_{b,k}\sin\left(\delta_{b,h,s}-\delta_{k,h,s}\right)\right\}\quad ,\forall b,k,h,s \tag{۴}$$

که k, δ, V, B, G به ترتیب نشان‌دهنده سوسپتانس و رسانایی خط توزیع بر حسب پریونیت، دامنه ولتاژ برحسب (p.u)، زاویه ولتاژ برحسب رادیان و اندیس کمکی نمایانگر باس هستند.

$$Q^{L}_{b,k,h,s}=-B_{b,k}\left(V_{b,h,s}\right)^{2}+V_{b,h,s}V_{k,h,s}\times\left\{G_{b,k}\cos\left(\delta_{b,h,s}-\delta_{k,h,s}\right)-B_{b,k}\sin\left(\delta_{b,h,s}-\delta_{k,h,s}\right)\right\}\ ,\forall b,k,h,s \tag{۵}$$

$$\delta_{b,h,s}=0\quad \forall b=ref,h,s \tag{۶}$$

$$\sqrt{\left(P^{L}_{b,k,h,s}\right)^{2}+\left(Q^{L}_{b,k,h,s}\right)^{2}}\le S^{Lu}_{b,k}\qquad \forall b,k,h,s \tag{۷}$$

که S^{Lu} نمایانگر حداکثر مقدار مجاز توان ظاهری عبوری از خط توزیع است که بر حسب پریونیت است.

$$\sqrt{\left(P^{G}_{b,h,s}\right)^{2}+\left(Q^{G}_{b,h,s}\right)^{2}}\le S^{Gu}_{b}\qquad \forall b=ref,h,s \tag{۸}$$

که S^{Gu} نمایانگر حداکثر مقدار مجاز توان ظاهری عبوری از پست توزیع است که بر حسب پریونیت است.

$$\frac{P^{G}_{b,h,s}}{\sqrt{\left(P^{G}_{b,h,s}\right)^{2}+\left(Q^{G}_{b,h,s}\right)^{2}}}\ge PF_{l}\qquad \forall b=ref,h,s \tag{۹}$$

که PF_l حداقل مقدار مجاز ضریب قدرت است.

$$V^{l}\le V_{b,h,s}\le V^{u}\qquad \forall b,h,s \tag{۱۰}$$

که V^{l}, V^{u} حداقل و حداکثر مقدار مجاز دامنه ولتاژ برحسب (p.u) هستند.

قیود بهره‌برداری ریزشبکه تحت عنوان پخش توان بهینه جریان متناوب در روابط (۲)-(۱۰) مدل‌سازی شده است (Bozorgavari et al., ۲۰۱۹; Faraji, Abbasi, Nejatian, Zadehbagheri, & Parvin, ۲۰۲۱; Norouzi et al., ۲۰۲۲). روابط (۲)-(۶) متناسب با

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]

قیود پخش توان جریان متناوب می‌باشند (Faraji et al., ۲۰۲۲; Norouzi et al., ۲۰۲۱)، که به ترتیب معرف تعادل توان اکتیو و راکتیو در باس‌های ریزشبکه، محاسبه توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط توزیع و میزان زاویه ولتاژ باس مرجع[۲۲] هستند. محدودیت‌های بهره‌برداری ریزشبکه نیز در روابط (۷)-(۱۰) ارائه شده است (Bozorgavari et al., ۲۰۱۹; Norouzi et al., ۲۰۲۱). در رابطه (۷) / (۸)، محدودیت ظرفیت خط توزیع / پست توزیع مد نظر است، که براساس آن خط توزیع / پست توزیع قادر به انتقال حداکثر توان ظاهری S^{Lu} / S^{Gu} از خود می‌باشد. قید (۹) نیز اشاره به محدودیت ضریب قدرت پست توزیع دارد، که براساس آن، این پست همواره بایستی در کلیه ساعات بهره‌برداری دارای ضریب قدرتی بیش از PF_l (عموماً دارای مقدار ۰/۹ است) باشد. محدودیت دامنه ولتاژ باس‌های ریزشبکه نیز در رابطه (۱۰) فرمول‌بندی شده است. قید حد بالای (پایین) آن به منظور جلوگیری از آسیب‌های عایقی تجهیزات (خاموشی مصرف‌کننده‌ها) در اثر اضافه (افت) ولتاژ استفاده می‌گردد. در این قیود فرض بر این می‌باشد که ریزشبکه از طریق پست توزیع مستقر در باس مرجع به شبکه بالادست متصل می‌شود. لذا متغیرهای P^G و Q^G تنهای به ازای باس مرجع مقدار دارند و در دیگر باس‌ها آنها برابر صفر هستند. این شرایط برای عملکرد ریزشبکه در مد اتصال به شبکه[۲۳] است. در صورتی که آن در مد جزیره‌ای فعالیت کند، لذا ریزشبکه از شبکه بالادست قطع است، و پس متغیرهای P^G و Q^G در کلیه باس‌ها دارای مقدار صفر هستند.

$$P_b^{MTl} \le P_{b,h,s}^{MT} \le P_b^{MTu} \qquad \forall b,h,s \qquad (۱۱)$$

که P^{MTl}, P^{MTu} حداکثر و حداقل مقدار مجاز توان اکتیو میکروتوربین برحسب (p.u) هستند.

$$Q_b^{MTl} \le Q_{b,h,s}^{MT} \le Q_b^{MTu} \qquad \forall b,h,s \qquad (۱۲)$$

که Q^{MTl}, Q^{MTu} حداکثر و حداقل مقدار مجاز توان راکتیو میکروتوربین برحسب (p.u) هستند.

$$P_{b,h,s}^{RES} = P_{b,h,s}^{RESu} \qquad \forall b,h,s \qquad (۱۳)$$

که P^{RESu} حداکثر مقدار مجاز توان اکتیو قابل تولید متناسب با شرایط آب و هوایی برحسب (p.u) است.

$$\sqrt{\left(P_{b,h,s}^{RES}\right)^2 + \left(Q_{b,h,s}^{RES}\right)^2} \le S_b^{RESu} \qquad \forall b,h,s \qquad (۱۴)$$

که S^{RESu} حداکثر مقدار مجاز توان ظاهری قابل کنترل برحسب (p.u) است.

قیود (۱۱)-(۱۴) شامل مدل بهره‌برداری میکروتوربین، (۱۱)-(۱۲)، و منابع انرژی تجدیدپذیر، (۱۳)-(۱۴)، هستند. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) اشاره به مدل منحنی قابلیت میکروتوربین دارند که به ترتیب بیانگر محدودیت توان اکتیو تولید و توان راکتیو قابل کنترل این نوع تولیدات پراکنده تجدیدناپذیر دارند (Dini et al., ۲۰۲۰). در رابطه (۱۳) میزان توان اکتیو تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه شده است (Asl et al., ۲۰۲۱). از آنجا که هزینه بهره‌برداری این منابع بسیار پایین است، عموماً آنها براساس این رابطه توان اکتیوی برابر با حداکثر توان اکتیو قابل تولید متناسب با شرایط آب و هوایی (P^{RESu}) را به ریزشبکه تزریق می‌کنند. در قید (۱۴) نیز محدودیت توان ظاهری قابل انتقال توسط این منابع در نظر گرفته شده است. بایستی توجه کرد که منابع انرژی تجدیدپذیر با نوع فتوولتائیک توسط مبدل DC/AC به شبکه متصل می‌شود، که با در نظر گرفتن وجود پل IGBT در این مبدل، آن قادر است که توان اکتیو و راکتیو فتوولتائیک را همزمان کنترل کند (Pirouzi et al., ۲۰۱۹). منابع انرژی تجدیدپذیر با نوع سیستم بادی نیز توسط مبدل AC/AC به شبکه متصل می‌شود و آن نیز دارای ژنراتور القایی است (Pirouzi et al., ۲۰۱۹). پس این منبع نیز قادر به کنترل همزمان توان اکتیو و راکتیو است. از اینرو با در نظر گرفتن این موارد، قید (۱۴) برای منابع انرژی تجدیدپذیر قابل مدل‌سازی است.

$$0 \le P_{b,h,s}^{CH} \le P_v^{CHu} x_{b,h} \qquad \forall b,h,s \qquad (۱۵)$$

$$0 \le P_{b,h,s}^{DCH} \le P_b^{DCHu} \left(1 - x_{b,h}\right) \qquad \forall b,h,s \qquad (۱۶)$$

که P^{CHu}, P^{DCHu} حداکثر مقدار مجاز توان اکتیو شارژی و دشارژی سیستم ذخیره‌ساز انرژی برحسب (p.u) و x متغیر باینری متناظر با عملکرد شارژ/دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی هستند.

$$E_{b,h+1,s} = E_{b,h,s} + \eta_b^{CH} P_{b,h,s}^{CH} - \frac{1}{\eta_b^{DCH}} P_{b,h,s}^{DCH} \qquad \forall b,h,s \quad (۱۷)$$

که η^{CH}, η^{DCH} راندمان شارژ و دشارژ در سیستم ذخیره‌ساز انرژی است. E نیز معرف انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز بر حسب پریونیت است.

$$E_{b,h,s} = E_b^{ini} \qquad \forall b,h=1,s \qquad (۱۸)$$

که E^{ini} انرژی اولیه در سیستم ذخیره‌ساز انرژی برحسب (p.u) است.

$$E_b^l \le E_{b,h,s} \le E_b^u \qquad \forall b,h,s \qquad (۱۹)$$

که E^u, E^l حداقل و حداکثر مقدار مجاز انرژی قابل ذخیره در سیستم ذخیره‌ساز انرژی برحسب (p.u) است.

$$\sqrt{\left(P_{b,h,s}^{DCH} - P_{b,h,s}^{CH}\right)^2 + \left(Q_{b,h,s}^{ESS}\right)^2} \le S_b^{ESSu} \quad ,\forall b,h,s \qquad (۲۰)$$

که S^{ESSu} حداکثر مقدار مجاز توان ظاهری سیستم ذخیره‌ساز انرژی برحسب (p.u) است.

فرمول‌بندی این بخش در قیود (۱۵)-(۲۰) بیان شده است، که به ترتیب معرف محدودیت نرخ شارژ و دشارژ، انرژی ذخیره شده، انرژی اولیه در ساعت اول بهره‌برداری، محدودیت انرژی قابل ذخیره، و محدودیت ظرفیت شارژر ذخیره‌ساز هستند (Asl et al., ۲۰۲۱; Dini et al., ۲۰۲۰). در قیود (۱۵)-(۱۶)، متغیر باینری x به منظور جلوگیری از عملکرد همزمان ذخیره‌ساز در مد شارژ و دشارژ استفاده می‌شود. به‌طوری که $x = 1$، عملکرد ذخیره‌ساز در مد شارژ است، در غیر این‌صورت آن در مد دشارژ فعالیت می‌کند. همچنین در این مقاله فرض بر این است که ذخیره‌سازها یا از طریق شارژر دارای پل IGBT به شبکه متصل می‌شوند (مانند باتری) (Pirouzi et al., ۲۰۱۹) و یا دارای ژنراتور سنکرون می‌باشند (مانند ذخیره‌ساز هوای فشرده[۲۴]). از اینرو ذخیره ساز قادر به کنترل همزمان توان اکتیو و راکتیو خود

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]

خواهد بود، و در این شرایط قید (۲۰) قابل مدل‌سازی برای این عنصر است.

$$H^{CHP}_{b,h,s} + H^{BO}_{b,h,s} + H^{DR}_{b,h,s} = H^{D}_{b,h,s} \quad \forall b,h,s \qquad (۲۱)$$

که H^D بار حرارتی برحسب (p.u) است

$$H^{CHP}_{b,h,s} = \frac{P^{CHP}_{b,h,s}\left(1-\eta^{T}_{b}-\eta^{L}_{b}\right)}{\eta^{T}_{b}}.\eta^{H}_{b} \quad \forall b,h,s \qquad (۲۲)$$

که η^H, η^L, η^T به ترتیب نشان‌دهنده راندمان توربین، تلفاتی و حرارتی در سیستم ترکیبی برق و حرارت هستند.

$$P^{CHPl}_{b} \le P^{CHP}_{b,h,s} \le P^{CHPu}_{b} \quad \forall b,h,s \qquad (۲۳)$$

که P^{CHPu}, P^{CHPl} به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار مجاز توان اکتیو سیستم ترکیبی برق و حرارت برحسب (p.u) هستند.

$$Q^{CHPl}_{b} \le Q^{CHP}_{b,h,s} \le Q^{CHPu}_{b} \quad \forall b,h,s \qquad (۲۴)$$

که Q^{CHPu}, Q^{CHPl} به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار مجاز توان راکتیو سیستم ترکیبی برق و حرارت برحسب (p.u) هستند.

$$H^{CHPl}_{b} \le H^{CHP}_{b,h,s} \le H^{CHPu}_{b} \quad \forall b,h,s \qquad (۲۵)$$

که H^{CHPu}, H^{CHPl} به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار مجاز توان حرارتی سیستم ترکیبی برق و حرارت برحسب (p.u) هستند.

$$H^{BOl}_{b} \le H^{BO}_{b,h,s} \le H^{BOu}_{b} \quad \forall b,h,s \qquad (۲۶)$$

که H^{BOu}, H^{BOl} به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار مجاز توان حرارتی بویلر (p.u) هستند.

$$-\xi_b P^{D}_{b,h,s} \le P^{DR}_{b,h,s} \le \xi_b P^{D}_{b,h,s} \quad ,\forall b,h,s \qquad (۲۷)$$

$$-\xi_b H^{D}_{b,h,s} \le H^{DR}_{b,h,s} \le \xi_b H^{D}_{b,h,s} \quad ,\forall b,h,s \qquad (۲۸)$$

که ξ ضریب نرخ مشارکت در طرح پاسخ‌گویی بار است.

$$\sum_{h\in OH} P^{DR}_{b,h,s}\,(\text{or } H^{DR}_{b,h,s}) = 0 \quad \forall b,s \qquad (۲۹)$$

بلوک حرارتی شامل سیستم ترکیبی برق و حرارت، بویلر و مصرف‌کننده‌های حرارتی دارای قابلیت طرح پاسخ‌گویی بار است. فرمول‌بندی بهره‌برداری آن در قیود (۲۱)-(۲۹) ارائه شده است. در قید (۲۱) تعادل توان حرارتی در این بلوک مدل‌سازی شده است. در روابط (۲۲)-(۲۵) مدل سیستم ترکیبی برق و حرارت در نظر گرفته شده است. به‌طوری که توان حرارتی تولید سیستم ترکیبی برق و حرارت براساس رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود، که آن ضریبی از توان اکتیو تولیدی سیستم ترکیبی برق و حرارت می‌باشد. در قیود (۲۳)-(۲۴) فرمول‌بندی منحنی قابلیت سیستم ترکیبی برق و حرارت در بخش الکتریکی ارائه شده است، که این قیود به ترتیب اشاره به محدودیت توان اکتیو و راکتیو قابل کنترل توسط سیستم ترکیبی برق و حرارت را دارند. محدودیت توان حرارتی قابل تولید توسط سیستم ترکیبی برق و حرارت نیز در رابطه (۲۵) در نظر گرفته شده است. محدودیتی همانند رابطه (۲۵) برای بویلر وجود دارد که در رابطه (۲۶) مدل‌سازی شده است. در نهایت مدل بهره‌برداری طرح پاسخ‌گویی بار برای مصرف کننده حرارتی (الکتریکی) در قیود (۲۷) - (۲۹) بیان شده است. این نوع طرح پاسخ‌گویی بار متناسب با مدل تشویقی است. به‌طوری که مصرف‌کننده‌ها در این طرح پاسخ‌گویی بار با توجه به سیگنال قیمت انرژی، انرژی مصرفی خود را کاهش یا افزایش می‌دهند. به عبارتی، در طرح پاسخ‌گویی بار به منظور کمینه‌سازی رابطه (۱)، مصرف‌کننده‌ها در ساعتی که قیمت انرژی بالا (پایین) است، انرژی مصرفی خود را کاهش (افزایش) می‌دهند. بنابراین قیود (۲۷) و (۲۸) متناسب با محدوده تغییرات توان مصرف‌کننده‌ها در طرح پاسخ‌گویی بار است، و آنها براساس این رابطه حداکثر با ضریب مشارکت ξ در طرح پاسخ‌گویی بار شرکت می‌کنند. علاوه بر این فرض شده است که در این طرح پاسخ‌گویی بار، مصرف‌کننده‌ها تا افق بهره‌برداری قادر هستند که کلیه انرژی مصرفی مورد تقاضای خود را از بازار انرژی خرده فروشی دریافت کنند. بنابراین برای رعایت این شرایط، قید (۲۹) به فرمول‌بندی طرح پیشنهادی اضافه می‌شود (Homayoun et al., ۲۰۲۱). در طرح پیشنهادی، فرض شده است که پاسخ گویی بار تنها برای مدیریت انرژی استفاده می‌شود. لذا پاسخ گویی بار تنها دارای توان اکتیو و حرارتی است.

$$\left|P^{G}_{b,h,s=1} - P^{G}_{b,h,s}\right| \le \Delta F \quad \forall b,h,s \qquad (۳۰)$$

که ΔF معرف تلرانس انعطاف‌پذیری بر حسب پریونیت است. بایستی گفت که وجود عدم قطعیت در توان اکتیو تولید منابع انرژی تجدیدپذیر موجب کاهش انعطاف‌پذیری شبکه می‌شود. پیرو این موضوع امکان دارد که تعادل مابین بهره‌برداری‌های روز-بعد و زمان واقعی برآورده نشود و عدم تعادل توان اکتیو در زمان‌بندی[۲۵] زمان واقعی برای شبکه حاصل شود. لذا نیاز به استفاده از منابع انعطاف‌پذیری مانند پاسخ‌گویی بار و ذخیره‌ساز در شبکه است، که آنها قادر هستند در بهره‌برداری زمان واقعی، نوسانات توان اکتیو منابع انرژی تجدیدپذیر را نسبت به بهره‌برداری روز- بعد جبران کنند و انعطاف‌پذیری شبکه را ارتقاء دهند. برای برقراری چنین شرایطی، از منظر مدل‌سازی ریاضی می‌توان ماتفاوت توان اکتیو ریزشبکه در سناریو متناظر با مدل قطعی (در اینجا سناریو اول در نظر گرفته شده است و آن دارای داده‌های پیش‌بینی است) و سناریوهای دیگر را تا حد امکان کمینه کرد. این موضوع در رابطه (۲۹) ارائه شده است، به‌طوری که اگر تلرانس انعطاف‌پذیری (ΔF) به صفر میل کند، انعطاف‌پذیری ۱۰۰٪ حاصل می‌شود و عدم تعادلی بین بهره‌برداری‌های مذکور در شبکه شامل منابع انرژی تجدیدپذیر حذف خواهد شد.

۳- مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها

در طرح پیشنهادی، (۱)-(۲۸)، پارامترهایی از قبیل قیمت انرژی، λ، ρ و γ، بار، P^D، Q^D و H^D، حداکثر توان اکتیو تجدیدپذیر، P^{RESu}، به‌صورت عدم قطعیت هستند. در این مقاله از روش انتقال بی‌بو برای مدل‌سازی پارامترهای مذکور استفاده می‌شود (Norouzi et al., ۲۰۲۱). در این روش بردار عدم قطعیت شامل ۷ پارامتر عدم قطعیت λ، ρ، γ، P^D، Q^D، H^D و P^{RESu} است. از اینرو آن در روش $2n + 1$، ۱۵ سناریو استخراج و به مسأله بهره‌برداری ریزشبکه پیشنهادی اعمال می‌کند. در این روش n معرف تعداد پارامترهای عدم قطعیت است. از

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]

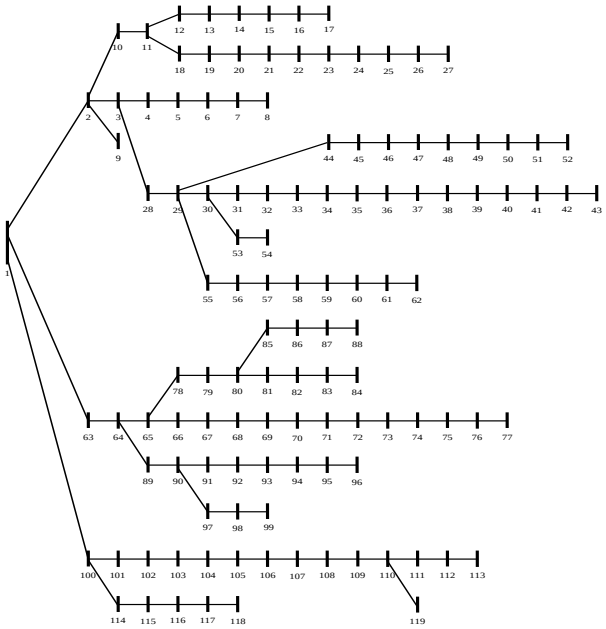
آنجا که این روش تعداد پایینی سناریو تولید می‌کند، نیاز به روش کاهش سناریو نیست. همچنین چون تعداد سناریو اعمال شده به مسأله پیشنهادی نسبت به روش غیرپارامتری یعنی برنامه‌ریزی تصادفی مبنی بر تولید و کاهش سناریو کمتر است، لذا انتظار می‌رود که زمان محاسباتی پایینی در مدل‌سازی مسأله مبنی بر بی‌بو حاصل شود (Norouzi et al., ۲۰۲۱). جزئیات بیشتر این روش از قبیل فرمول‌بندی آن در (Norouzi et al., ۲۰۲۱) ارائه شده است.

۴- نتایج عددی

۴-۱- مورد مطالعاتی

در این بخش، طرح پیشنهادی برروی ریزشبکه ۱۱۹-باسه همانند شکل (۱) (Ghasemi & Moshtagh, ۲۰۱۳) اعمال می‌شود.

این شبکه دارای توان مبنای ۱۰ MVA و ولتاژ مبنای ۱۱ kV است. حداقل و حداکثر دامنه مجاز ولتاژ به ترتیب برابر ۰/۹ و ۱/۰۵ پریونیت است (Ghasemi & Moshtagh, ۲۰۱۳). داده‌های پیک بار الکتریکی و مشخصات خطوط و پست توزیع در (Ghasemi & Moshtagh, ۲۰۱۳) ارائه شده است. علاوه بر این، میزان بار الکتریکی در ساعات مختلف برابر حاصل‌ضرب پیک بار و ضریب بار است، که منحنی روزانه مورد انتظار این ضریب در (Asl et al., ۲۰۲۱) ارائه شده است. این شبکه دارای ۷ بلوک حرارتی است که موقعیت آنها در باس‌های ۶، ۱۵، ۵۱، ۸۱، ۹۷، ۱۱۰ و ۱۱۵ است. هر بلوک دارای یک سیستم ترکیبی برق و حرارت، یک بویلر و یک طرح پاسخ‌گوی بار است، به‌طوری که حداقل (حداکثر) مقدار توان اکتیو، راکتیو و حرارتی سیستم ترکیبی برق و حرارت به ترتیب برابر ۰ kW (۸۰۰ kW)، ۴۰۰ kVAr- (۴۰۰ kVAr) و ۰ kW (۵۰۰ kW) است. همچنین راندمان‌های η^T، η^H و η^L به ترتیب برابر ۰/۴، ۰/۴ و ۰/۰۸ هستند. علاوه بر این، حداقل (حداکثر) توان حرارتی بویلر برابر ۰ kW (۵۰۰ kW) می‌باشد. ضرایب هزینه سوخت (α, β, χ) برای میکروتوربین، سیستم ترکیبی برق و حرارت و بویلر به ترتیب برابر (۱۰۰، ۲۱، ۰/۰۰۲)، (۹۳، ۲۰، ۰/۰۰۱۷) و (۱۱۲، ۲۲ و ۰/۰۰۲) می‌باشد. سیستم ذخیره‌ساز انرژی در بخش دارای نوع باتری با راندمان شارژ/دشارژ ۹۰٪ است که نرخ شارژ/دشارژ آن برابر ۱۵۰ kW، ظرفیت شارژر برابر ۲۰۰ kVA، و حداقل و حداکثر انرژی قابل ذخیره در آن برابر ۵۰ kWh و ۵۰۰ kWh است، که موقعیت آن در باس‌های ۴، ۱۰، ۳۰، ۶۴ و ۱۰۴ است. هر بلوک حرارتی دارای بار با مقدار پیک ۷۵۰ kW است، که منحنی روزانه مورد انتظار ضری بار آن در (Faraji et al., ۲۰۲۲) ارائه شده است. در طرح پاسخ‌گویی بار نیز عبارت ξ برابر ۰/۳ است (Asl et al., ۲۰۲۱). در شبکه پیشنهادی سیستم‌های فتوولتائیک، میکروتوربین و بادی وجود دارد که موقعیت فتوولتائیک‌ها در باس‌های ۱۰، ۲۹ و ۶۴ است، سیستم‌های بادی در باس‌های ۴، ۱۱، ۳۰، ۶۵، ۹۰ و ۱۰۴ قرار دارند، و میکروتوربین‌ها در باس‌های ۲۳، ۳۷، ۷۱ و ۱۰۸ مستقر هستند. حداقل (حداکثر) توان اکتیو و راکتیو میکروتوربین به ترتیب برابر ۰ kW (۶۰۰ kW) و ۲۵۰ kVAr- (۲۵۰ kVAr) است و ظرفیت (حداکثر توان ظاهری) سیستم بادی و فتوولتائیک به ترتیب برابر ۶۰۰ kVA و ۵۰۰ kVA می‌باشد. توجه شود که منحنی روزانه مورد انتظار حداکثر توان اکتیو تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر برابر با حاصل‌ضرب ظرفیت آن و منحنی روزانه مورد انتظار نرخ توان تولیدی آن است، که این منحنی در (Asl et al., ۲۰۲۱) ارائه شده است. در نهایت، منحنی روزانه مورد انتظار قیمت انرژی الکتریکی و حرارتی در بازار خرده فروشی در (Dini et al., ۲۰۱۹) ارائه شده است، K_Q براساس (Kiani et al., ۲۰۲۱) برابر ۸٪، و فرض شده است که λ برابر ۹۰٪ قیمت انرژی الکتریکی (ρ) است. ΔF نیز جهت دسترسی به انعطاف‌پذیری بالا در ریزشبکه برابر ۰/۰۵ پریونیت اتخاذ شده است.



شکل (۱): ریزشبکه ۱۱۹-باسه {Ghasemi, ۲۰۱۳ #۲۲}

۴-۲- نتایج

در این بخش مسأله پیشنهادی متناسب با داده‌های بخش پیشین در محیط نرم افزار متلب (گمز (Kallrath, ۲۰۱۲)) در صورت استفاده از الگوریتم‌های حل تکاملی (ریاضی) شبیه‌سازی می‌شود. سپس نتایج عددی حاصل از موارد مطالعاتی مختلف در ادامه گزارش می‌شود.

الف) دستیابی به حل‌کننده مناسب: در این بخش نتایج همگرایی طرح پیشنهادی بدست آمده توسط حل کننده‌های ریاضی مانند COUENNE، BONMIN، LINDOGLOBAL، SBB و OQNLP (Kallrath, ۲۰۱۲) و الگوریتم‌های تکاملی مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۲۶] (Najy, Zeineldin, & Woon, ۲۰۱۲)، الگوریتم سینوس-کوسینوس[۲۷] (Sarwagya, Nayak, & Ranjan, ۲۰۲۰)، الگوریتم جستجوی کلاغ‌ها[۲۸] (Askarzadeh, ۲۰۱۶)، الگوریتم گرم شب‌تاب[۲۹] (Homayoun et al., ۲۰۲۱) و بهینه‌سازی شیرمورچه[۳۰]

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]

(,Jithendranath & Das, ۲۰۱۹) ارائه می‌شود. برای حل مسأله پیشنهادی توسط الگوریتم‌های ریاضی، مدل مسأله در محیط نرم افزار بهینه‌سازی GAMS کدنویسی می‌شود و هر کدام از الگوریتم‌های مذکور در این نرم افزار دارای تولباکس هستند (,Kallrath ۲۰۱۲). ولی برای حل این مسأله با الگوریتم‌های تکاملی، طرح پیشنهادی به همراه روند حل مبنی بر این الگوریتم در محیط نرم افزار متلب کدنویسی می‌شوند. در حل این مسأله توسط الگوریتم‌های مذکور، ابتدا الگوریتم N (اندازه جمعیت) مقدار تصادفی برای متغیرهای تصمیم‌گیری شامل P^{MT}، Q^{MT}، Q^{RES}، P^{CH}، P^{DCH}، x، Q^{ESS}، P^{CHP}، Q^{CHP}، P^{DR} و H^{DR} متناسب با محدودیت عملکرد آنها به ترتیب در معادلات (۱۱)، (۱۲)، $[0, S^{RESu}]$، (۱۵)، (۱۶)، $\{0, 1\}$، $[0, S^{ESSu}]$، (۲۳)، (۲۴)، (۲۷) و (۲۷) تولید می‌کند. سپس میزان متغیرهای وابسته از قبیل $Cost$، P^{G}، Q^{G}، P^{L}، Q^{L}، V، δ، P^{RES}، E، H^{BO} و H^{CHP} از معادلات (۲)-(۶)، (۱۳)، (۱۷)-(۱۸)، (۲۱) و (۲۲) محاسبه می‌شود. به‌طوری که مقادیر P^{RES}، E، H^{BO} و H^{CHP} به ترتیب از قیود (۱۳)، (۱۷)-(۱۸)، (۲۱) و (۲۲) تعیین می‌شوند، و مقادیر متغیرهای وابسته دیگر از قیود پخش توان، (۲)-(۶)، محاسبه می‌شوند. در این مقاله برای حل مسأله پخش توان از روش پسرو- پیشرو استفاده شده است (,Ghasemi & Moshtagh ۲۰۱۳). در ادامه تابع برازندگی برای N مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری محاسبه می‌شود. در این مقاله به منظور برآورد محدودیت‌های بهره‌برداری، (۷)-(۱۰)، محدودیت ظرفیت منابع انرژی تجدیدپذیر، (۱۴)، محدودیت انرژی قابل ذخیره در سیستم ذخیره‌ساز انرژی و ظرفیت شارژر آن، (۱۹)-(۲۰)، محدودیت توان حرارتی سیستم ترکیبی و بویلر، (۲۵)-(۲۶)، و قید طرح پلسخ‌گویی بار، (۲۸)، تابع برازندگی (FF) برابر با کمینه‌سازی ماتفاوت تابع هدف اصلی، (۱)، و مجموع توابع جریمه (PeF) خواهد بود (,Nikolova et al. ۲۰۱۳). تابع جریمه نیز برای محدودیت $a \leq b$ و قید $a = b$ به ترتیب به‌صورت $\mu_{.\max}(0, a - b)$ و $\kappa.(b - a)$ است، که $\mu \geq 0$ و $\kappa \in (-\infty, +\infty)$ معرف ضرایب لاگرانژ هستند که مقادیر آنها همانند متغیر تصمیم‌گیری توسط الگوریتم تکاملی تعیین می‌شود. در ادامه مراحل بهنگام‌سازی متغیرهای تصادفی و ضرایب لاگرانژ توسط این الگوریتم مبنی بر محدودیت عملکرد آنها و بهترین میزان تابع برازندگی در مرحله قبل انجام می‌شود. فرآیند بهنگام‌سازی با توجه به نوع الگوریتم تکاملی متفاوت است که آن برای بهینه‌سازی آموزش و یادگیری، تکاملی تفاضلی، فاخته، دسته گرگ‌ها و شیرموچه به ترتیب در (Bozorgavari ; Hooshmand ۲۰۲۲; Faraji et al., ۲۰۱۶; Chen et al., ۲۰۱۹et al., ; ۲۰۲۱; Norouzi et al., ۲۰۲۱; Kiani et al., ۲۰۱۹& Rabiee, (۲۰۲۰; Yu et al., ۲۰۱۶; Xie et al., ۲۰۱۸Patnam & Pindoriya, گزارش شده است. در نهایت در این مقاله فرض بر این است که نقطه همگرایی بعد از حداکثر تکرار بهنگام‌سازی (I_{max}) قابل دسترسی است. میزان N و I_{max} به ترتیب برابر ۸۰ و ۴۰۰۰ برای الگوریتم‌های تکاملی در نظر گرفته شده‌اند، و دیگر پارامترهای تنظیم آنها از (,Askarzadeh ; ۲۰۱۳; Nikolova et al., ۲۰۱۹; Jithendranath & Das, ۲۰۱۶ ,.Sarwagya et al ۲۰۲۰) انتخاب شده است.

نتایج این بخش در جدول (۱) ارائه شده است. براساس این جدول دیده می‌شود که از بین الگوریتم‌های ریاضی، COUENNE و SBB قادر به دستیابی راه‌حل بهینه نیستند. از بین BONMIN، LINDOGLOBAL و OQNLP، حل‌کننده BONMIN توانسته است که کمینه‌ترین هزینه را نسبت به دو حل‌کننده دیگر بدست آورد. البته آن این نقطه را در کمترین تکرار همگرایی و زمان همگرایی در بین روش‌های ریاضی بدست آورده است. بنابراین از بین روش‌های ریاضی، BONMIN از لحاظ دارای بودن سرعت همگرایی بالاتر و نقطه بهینه‌تر الگوریتم حل مطلوب‌تری است. در الگوریتم‌های تکاملی، شیرمورچه نسبت به بهینه‌سازی ازدحام ذرات، سینوس-کوسینوس، جستجوی کلاغ و کرم شب‌تاب توانسته است که راه‌حل بهینه‌تری (کمینه‌ترین مقدار هزینه) را در کمترین تکرار همگرایی و زمان همگرایی بدست آورد. علاوه بر این در مقایسه روش‌های حل ریاضی و الگوریتم‌های تکاملی، براساس جدول (۱) مشاهده می‌شود که شیرمورچه نسبت به BONMIN از لحاظ سرعت پاسخ‌دهی و نقطه بهینه دارای شرایط مطلوب‌تری است. زیراکه آن دارای کمترین مقدار هزینه نسبت به BONMIN است. از آنجا که تکرار همگرایی شیرمورچه بیشتر از BONMIN است، ولی آن در زمان محاسباتی بسیار پایین‌تری از BONMIN به راه‌حل بهینه دست یافت است، پس آن دارای سرعت همگرایی بالاتری نسبت به حل‌کننده‌های ریاضی است. بنابراین در این مقاله الگوریتم شیرمورچه یک حل‌کننده مناسب‌تر نسبت به دیگر حل‌کننده‌های یاد شده است.

جدول (۱): وضعیت همگرایی مسأله پیشنهادی بدست آمده از حل‌کننده‌های مختلف

حل‌کننده	هزینه($)	تعدادتکرار همگرایی	زمان همگرایی (min)
COUENNE	عدم توانایی در دستیابی به راه‌حل بهینه		
BONMIN	-۱۷۲۹/۷	۴۰۵	۴۳/۵
LINDOGLOBAL	-۱۵۳۷/۴	۴۹۵	۶۰/۳
SBB	عدم توانایی در دستیابی به راه‌حل بهینه		
OQNLP	-۱۴۵۲/۶	۵۶۴	۷۱/۷
PSO	-۱۸۰۵/۱	۳۵۲۲	۱۹/۸
SCA	-۱۸۵۶/۴	۳۰۲۸	۱۷/۹
CSA	-۱۹۲۱/۷	۲۷۸۱	۱۳/۸
FFA	-۱۹۶۷/۲	۲۴۶۳	۱۲/۳
ALO	-۲۰۳۲/۸	۲۰۷۵	۱۰/۵

ب) بررسی وضعیت بهره‌برداری و اقتصادی منابع انرژی

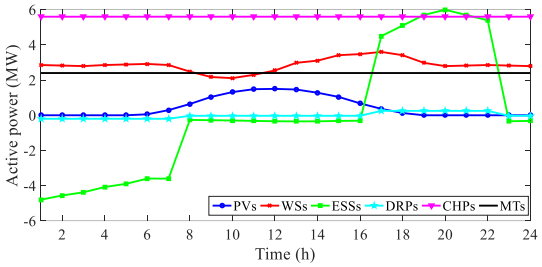
پراکنده: منحنی روزانه مورد انتظار توان اکتیو و راکتیو منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده الکتریکی در شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب نمایش داده شده است. براساس شکل (۲) و داده‌های بخش ۴-۱ و (,Asl et al. ۲۰۲۱) متناظر با منابع انرژی تجدیدپذیر، مشاهده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

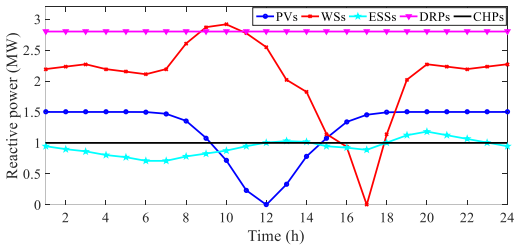
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]

می‌شود که توان اکتیو تزریقی سیستم‌های بادی و فتوولتائیک‌ها در کلیه ساعات بهره‌برداری برابر با حداکثر توان اکتیو تولیدی آنها متناسب با شرایط آب و هوایی است. به عنوان مثال، در ساعت ۱۲:۰۰ میزان تابش خورشید براساس داده‌های (Asl et al., ۲۰۲۱) بالاترین است، از اینرو سیستم‌های فتوولتائیک در این ساعت بیشترین توان اکتیو را به ریزشبکه تزریق می‌کنند. در شکل (۲) منحنی روزانه توان اکتیو سیستم ترکیبی برق و حرارت و میکروتوربین‌های نمایش داده شده است. براساس این شکل، این ریزشبکه‌ها در کلیه ساعات بهره‌برداری، حداکثر توان اکتیو قابل تولید توسط خود را به شبکه تزریق می‌کنند. این بدین دلیل است که: ۱) قیمت خرید انرژی (λ) در برخی از ساعات از قیمت سوخت ریزشبکه‌ها بیشتر است، از اینرو اپراتور ریزشبکه تمایل به استفاده از این ریزشبکه‌ها برای تأمین انرژی مصرفی دارد، و ۲) این ریزشبکه‌ها با قیمت ρ انرژی به ریزشبکه می‌فروشند که براساس داده‌های بخش ۴-۱ در حدود ۹۰٪ ρ می‌باشد. از اینرو به منظور کمینه‌سازی تابع هزینه در رابطه (۱) انتظار می‌رود که ریزشبکه‌ها تا حد امکان انرژی بالایی را به شبکه تزریق کنند، پس آنها همواره در نقطه متناظر با حداکثر توان اکتیو تولیدی کار خواهند کرد. در زمینه عملکرد طرح‌های پاسخگویی بار و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در شکل (۲) دیده می‌شود که آنها در ساعات ۱:۰۰-۱۶:۰۰ و ۲۳:۰۰-۲۴:۰۰ عملیات شارژ را انجام می‌دهند، به‌طوری که در ساعات ۱:۰۰-۷:۰۰ انرژی بالایی را ریزشبکه دریافت می‌کنند. همچنین آنها در ساعات ۱۷:۰۰-۲۲:۰۰ در مد دشارژ فعالیت می‌کنند و توان اکتیو به ریزشبکه تزریق می‌کنند. عملکرد این عناصر متناظر با قیمت انرژی الکتریکی است. براساس (Yu et al., ۲۰۲۰)، قیمت انرژی در ساعات ۱:۰۰-۷:۰۰، ۱۶:۰۰-۸:۰۰ و ۲۳:۰۰-۲۴:۰۰، و ۱۷:۰۰-۲۲:۰۰ به ترتیب برابر ۱۷/۶ $/MWh، ۲۶/۴ $/MWh و ۳۳ $/MWh است. بنابراین برای کمینه‌سازی تابع هزینه، آنها در ساعات متناظر با قیمت انرژی ارزان (گران) در مد شارژ (دشارژ) فعالیت خواهند کرد. در نهایت توجه شود که سیستم ترکیبی حرارت و برق، میکروتوربین، سیستم ذخیره‌ساز انرژی و طرح پاسخ‌گوی بار یک منبع منعطف برای منابع انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌شوند. از آنجا که منابع انرژی تجدیدپذیر در کلیه ساعات بهره‌برداری توان اکتیو تولید می‌کنند، لذا انتظار می‌رود در کلیه ساعات نیاز به کنترل انعطاف‌پذیری ریزشبکه باشد. از اینرو منابع منعطف براساس شکل (۲) در هیچ ساعت بهره‌برداری خاموش نیستند.

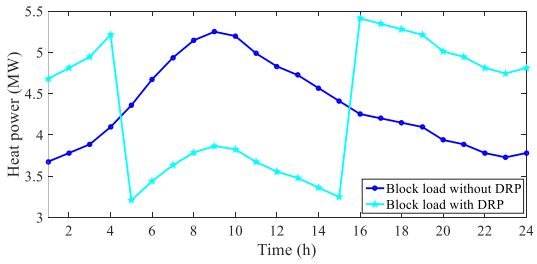
منحنی روزانه مورد انتظار توان راکتیو منابع تولیدات پراکنده و منابع انرژی تجدیدپذیر در شکل (۳) نمایش داده شده است. براساس این شکل، منابع تولیدات پراکنده در بیشتر ساعات بهره‌برداری حداکثر توان اکتیو قابل تولیدی خود را به شبکه تزریق می‌کنند. به عنوان مثال، براساس داده‌های بخش ۴-۱، حداکثر ظرفیت (توان ظاهری) سیستم‌های فتوولتائیک برابر ۱/۵ MVA (۳ عدد PV × ۰/۵ MVA ظرفیت فتوولتائیک) است، و سیستم‌های فتوولتائیک در ساعات ۱:۰۰-۵:۰۰ و ۱۹:۰۰-۲۴:۰۰ براساس شکل (۲) توان اکتیوی تولید نمی‌کنند. از اینرو آنها در این ساعات توان راکتیوی برابر با ۱/۵ MVAr به شبکه تزریق می‌کنند. اما در ساعات دیگر که توان اکتیو تولیدی آنها افزایش می‌یابد، توان راکتیو تولیدی آنها کاهش می‌یابد. این شرایط برای سیستم‌های توربین بادی با توجه به شکل (۳) وجود دارد. اما سیستم‌های ترکیبی برق و حرارت (میکروتوربین‌ها) در کلیه ساعات، حداکثر توان راکتیو قابل تولید خود، یعنی ۲/۸ MVAr = ۷×۰/۴ (۴×۰/۲۵ = ۱ MVAr)، را به شبکه تزریق کرده‌اند. در ادامه با مقایسه پروفیل بار ارائه شده در (Asl et al., ۲۰۲۱) و شکل (۳) مشاهده می‌شود که منحنی روزانه توان راکتیو سیستم ذخیره‌ساز انرژی همانند پروفیل روزانه بار راکتیو است. به عبارتی، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در ساعات کم‌باری بار راکتیو کمی را تأمین می‌کنند، اما در ساعات پرباری توان راکتیو تولیدی آنها بالا است. توجه شود که این عملکرد منابع و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در روند تأمین توان راکتیو ریزشبکه متناظر با بیشینه‌سازی درآمد خود در بازار توان راکتیو براساس رابطه (۱) است.



شکل (۲): منحنی روزانه مورد انتظار توان اکتیو منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخده



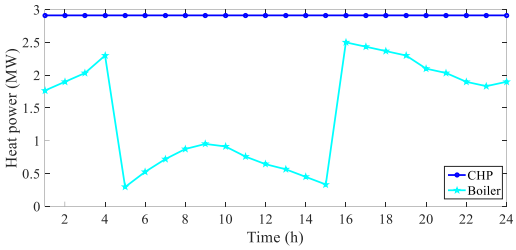
شکل (۳): منحنی روزانه مورد انتظار توان راکتیو منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخده



(الف)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]



(ب)

شکل (۴): منحنی روزانه توان حرارتی، الف) بار بلوک با/بدون طرح پاسخ‌گویی بار، ب) منابع

در شکل (۴) منحنی روزانه مورد انتظار توان حرارتی منابع و بارهای پاسخ‌ده بلوک حرارتی ترسیم شده است. براساس شکل (۴-الف)، طرح پاسخگویی بار حرارتی موجب کاهش مصرف انرژی حرارتی در ساعات پرباری حرارتی، ۵:۰۰-۱۵:۰۰، می‌شود، ولی آن در ساعات دیگر، انرژی مصرفی مصرف‌کننده‌های حرارتی را افزایش می‌دهد. براساس (Dini et al., ۲۰۱۹)، قیمت انرژی حرارتی در ساعات ۵:۰۰-۱۵:۰۰ برابر ۳۰ $/MWh است، و دیگر ساعات آن برابر ۲۲ $/MWh می‌باشد. از اینرو، عملکرد طرح پاسخگویی بار حرارتی در شکل مذکور متناظر با کمینه‌سازی تابع هزینه در رابطه (۱) است. علاوه بر این، از آنجا که توان اکتیو تولیدی سیستم ترکیبی برق و حرارت در کلیه ساعات بهره‌برداری براساس شکل (۲-ب) ثابت بود، لذا براساس رابطه (۲۲)، میزان توان حرارتی تولیدی سیستم ترکیبی برق و حرارت نیز به ازای تغییرات زمان ثابت خواهد بود و دارای منحنی روزانه‌ای به‌صورت شکل (۴-ب) خواهد بود. در نهایت براساس رابطه (۲۱)، توان حرارتی بویلر برابر با ماتفاوت میزان بار حرارتی و مجموع توان حرارتی سیستم ترکیبی برق و حرارت و طرح پاسخ‌گویی بار حرارتی خواهد بود، از اینرو پروفیل روزانه مورد انتظار آن همانند شکل (۴-ب) خواهد بود. در نهایت میزان مورد انتظار شاخص‌های اقتصادی ریزشبکه و عناصر آن از قبیل هزینه بهره‌برداری ریزشبکه، هزینه بهره‌برداری منابع تجدیدناپذیر، درآمد منابع انرژی پراکنده و هزینه خالص طرح پیشنهادی در جدول (۲) گزارش شده است. براساس این جدول مشاهده می‌شود که بیشترین هزینه حاصل از منابع است. ولی مشارکت آنها در کنار ذخیره‌سازها و بلوک‌های حرارتی در بازار انرژی و توان راکتیو توانسته است که ۱۸۰۹۹/۵ دلار درآمد از بازارهای مذکور کسب کند. این مورد باعث شده است که هزینه خالص ریزشبکه منفی شود، به عبارتی آن در این شرایط به طور خالص ۲۰۳۲/۸ دلار درآمد از بازارهای مذکور کسب کرده است. البته این مورد برای حالتی است که مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته شده است. ولی در شرایطی که بهره‌برداری ریزشبکه براساس داده‌های پیش‌بینی شده پارامترهای عدم قطعیت است (مدل قطعی و عدم در نظر گرفتن خطای پیش‌بینی)، درآمد ریزشبکه برابر ۲۶۰۴/۷ دلار است. به عبارتی هزینه حاصل از در نظر گرفتن خطای پیش‌بینی در حدود ۵۷۱/۹ دلار (۲۰۳۲/۸ – ۲۶۰۴/۷) است.

جدول (۲): میزان شاخص‌های اقتصادی در ریزشبکه

پارامتر		میزان
هزینه بهره‌برداری مورد انتظار ریزشبکه ($)		۳۷۶۲/۲
هزینه بهره‌برداری مورد انتظار تولیدات پراکنده تجدیدناپذیر ($)		۱۲۳۶۱
درآمد مورد انتظار منابع انرژی پراکنده ($)		۱۸۱۵۶
هزینه خالص مورد انتظار ($)	مدل تصادفی	-۲۰۳۲/۸
	مدل قطعی	-۲۶۰۴/۷

د) ارزیابی وضعیت اقتصادی و فنی MG: در این بخش به منظور بررسی قابلیت‌های طرح پیشنهادی، شش مورد مطالعاتی به شرح زیر مورد تحلیل قرار می‌گیرند:

مورد ۱: مطالعات پخش بار ریزشبکه

مورد ۲: طرح پیشنهادی تنها دارای منابع انرژی تجدیدپذیر

مورد ۳: طرح پیشنهادی تنها دارای سیستم‌های ذخیره انرژی

مورد ۴: طرح پیشنهادی تنها دارای طرح‌های پاسخگوی بار

مورد ۵: طرح پیشنهادی تنها دارای تولیدات پراکنده تجدیدناپذیر (میکروتوربین‌ها و بلوک حرارتی)

مورد ۶: طرح پیشنهادی تنها دارای همه منابع انرژی پراکنده

نتایج این بخش در جدول (۳) ارائه شده است، که آن مقادیر هزینه، تلفات انرژی، حداقل ضریب قدرت پست توزیع، حداکثر افت ولتاژ و حداکثر اضافه ولتاژ را در موارد ۱ الی ۶ گزارش می‌دهد. براساس این جدول، حضور تنهای منابع انرژی تجدیدپذیر در طرح پیشنهادی (مورد ۲) یا حضور تنهای بلوک‌های حرارتی و میکروتوربین در ریزشبکه (مورد ۵) منجربه کاهش قابل توجهی در هزینه انرژی، تلفات انرژی و افت ولتاژ ریزشبکه نسبت به مورد ۱ می‌شوند. همچنین حداقل ضریب قدرت به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، به‌طوریکه در مورد ۵ آن به بیش از ۰/۹ سوق پیدا کرده است. این شرایط متناظر با ظهور حداکثر اضافه ولتاژ در حوالی ۰/۰۲ پریوینت است، که میزان آن کمتر از حد مجاز خود یعنی ۰/۰۵ (۱ – ۱/۰۵) پریوینت است. علمکرد سیستم‌های ذخیره انرژی در مورد ۳ اثرگذاری مطلوبی که در ارتقاء وضعیت تلفات انرژی، حداقل ضریب قدرت و حداکثر افت ولتاژ و اثرگذاری پایینی در کاهش هزینه بدون ایجاد اضافه ولتاژ نسبت به مطالعات پخش بار دارد، ولی میزان درصد بهبودیت این پارامترها در این مورد مطالعاتی کمتر از موارد ۲ و ۵ است. زیرا که در موارد ۲ و ۵ همزمان توان اکتیو و راکتیو بالایی براساس شکل‌های (۲) و (۳) توسط تولیدات پراکنده (DGها) به شبکه تزریق می‌شود. ولی در مورد ۳، سیستم‌های ذخیره انرژی تنها در ساعات پرباری توان اکتیو به شبکه تزریق می‌کنند و در دیگر ساعات مصرف‌کننده توان اکتیو هستند. همچنین سیستم ذخیره انرژی نتوانسته‌اند به اندازه منابع تولیدات پراکنده توان راکتیو تولید کنند، که این مورد ناشی از ظرفیت پایین شارژر آنها و تعداد پایین آنها نسبت به منابع تولیدات پراکنده در شبکه ۱۱۹ باسه براساس بخش ۴-۱ است. در زمینه طرح پاسخ‌گویی بار، آن در مورد ۴ نسبت به مورد ۱ توانسته است که هزینه، تلفات انرژی،

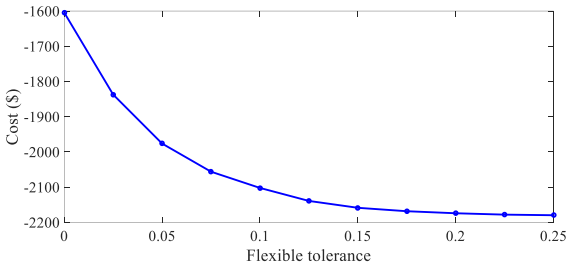
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]

حداکثر افت ولتاژ را بدون ایجاد اضافه ولتاژ ارتقاء دهد، ولی موجب پسرفت حداقل ضریب قدرت شده است. البته درصد بهبودیت هزینه، تلفات انرژی، حداکثر افت ولتاژ در این مورد مطالعاتی نسبت به مورد ۲ و ۵ پایین‌تر، ولی نسبت به مورد ۳ بیشتر است. علاوه بر این، در مورد ۴، طرح پاسخ‌گویی بار تنها در کنترل توان اکتیو نقش دارد، و میزان توان راکتیو را تغییر نمی‌دهد. از اینرو براساس شکل (۲)، در ساعات پرباری که میزان توان اکتیو مصرفی (توان اکتیو پست توزیع) توسط طرح پاسخ‌گویی بار کاهش می‌باشد، با عدم تغییر وضعیت توان راکتیو نسبت به مورد I، براساس رابطه (۹)، ضریب قدرت پست توزیع نسبت به مورد ۱ کاهش خواهد یافت. در نهایت استفاده تمامی منابع انرژی پراکنده در طرح پیشنهادی (مورد ۶) باعث شده است که کلیه شاخص‌های مطرح شده نسبت به مورد ۱ ارتقاء یابند. به‌طوری که تابع هزینه در مورد ۶ نسبت به مورد ۱ در حدود ۱۱۸/۷٪ کاهش یافته است. این مقدار (درصد بهبودیت) برای تلفات انرژی، حداقل ضریب قدرت و حداکثر افت ولتاژ با ایجاد حداکثر اضافه ولتاژ برابر با ۰/۰۲۲ پریونیتی به ترتیب در حدود ۵۰٪، ۱۷/۶٪ و ۳۸٪ می‌باشد. در نهایت، منحنی هزینه بر حسب تلرانس انعطاف‌پذیری (ΔF) در شکل (۵) رسم شده است. براساس این شکل دیده می‌شود که با افزایش ΔF، هزینه کاهش می‌یابد. زیرا که در این شرایط هزینه بهره‌برداری منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در صورتی ΔF افزایش یابد، پس اهمیت انعطاف‌پذیری شبکه کاهش می‌یابد. از اینرو طرح‌های پاسخگویی بار و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی در ساعات ۸:۰۰-۱۶:۰۰ و ۲۳:۰۰-۲۴:۰۰ خاموش خواهند بود و توانی از شبکه دریافت نخواهند کرد. این امر نتیجه در کاهش هزینه بهره‌برداری آنها دارد.

جدول (۳): میزان مورد انتظار شاخص‌های اقتصادی و بهره‌برداری به ازای ΔF = 0.05 p.u

مورد مطالعاتی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
هزینه	۱۰۸۷۶	۶۹۳۶	۹۹۳۸	۸۲۶۹	۳۸۹۵	-۲۰۳۲/۸
تلفات انرژی (MWh)	۶/۰۱۸	۴/۶۲۲	۵/۷۴۵	۵/۲۳۱	۴/۰۰۲	۳/۰۰۵
حداقل ضریب قدرت	۰/۸۰۱	۰/۸۶۹	۰/۸۲۹	۰/۷۹۱	۰/۹۰۹	۰/۹۴۲
حداکثر افت ولتاژ(p.u)	۰/۰۹۲	۰/۰۶۲	۰/۰۸۵	۰/۰۶۹	۰/۰۶۳	۰/۰۵۷
حداکثر اضافه ولتاژ(p.u)	۰	۰/۰۱۷	۰	۰	۰/۰۲۱	۰/۰۲۲



شکل (۵): منحنی تابع هزینه برحسب تلرانس انعطاف‌پذیری

۵- نتیجه

این مقاله مسأله مدیریت توان الکتریکی و حرارتی در ریزشبکه دارای بلوک حرارتی و منابع انرژی پراکنده متناسب با شرایط بازار انرژی و توان راکتیو روز- بعد را ارائه داد. بلوک حرارتی برای تأمین انرژی مصرفی خود، در خود سیستم ترکیبی برق و حرارت بویلر و طرح پاسخ‌گوی بار تعبیه کرده است. در ادامه طرح مذکور کمینه‌سازی ماتفاوت مجموع هزینه بهره‌برداری مورد انتظار ریزشبکه و منابع تولیدات پراکنده تجدیدناپذیر و درآمد مورد انتظار منابع انرژی پراکنده بار در بازارهای مذکور را برعهده داشت. آن نیز مقید به قیود پخش توان بهینه جریان متناوب و مدل بهره‌برداری بلوک حرارتی و منابع انرژی پراکنده، و محدودیت انعطاف‌پذیری ریزشبکه بود. در این مقاله از برنامه‌ریزی تصادفی مبنی بر بی‌بو برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار، قیمت بازار و توان تجدیدپذیر استفاده شد. در نهایت براساس نتایج عددی بدست آمده مشاهده گردید که الگوریتم بهینه‌سازی شیرمورچه توانایی مطلوبی در دستیابی به راه‌حل بهینه در کمترین زمان محاسباتی را نسبت به روش‌های حل ریاضی و برخی الگوریتم‌های تکاملی دیگر دارد. همچنین طرح پیشنهادی با دستیابی به منحنی عملکرد بهینه در توان اکتیو، راکتیو و حرارتی منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخده توانست که نسبت به مطالعات پخش بار شاخص‌های هزینه انرژی، تلفات انرژی، حداقل ضریب قدرت پست توزیع و حداکثر افت ولتاژ شبکه را با ایجاد حداکثر اضافه ولتاژ ۰/۰۲۲ پریونیتی به ترتیب در حدود ۱۱۸/۷٪، ۵۰٪، ۱۷/۶٪ و ۳۸٪ ارتقاء دهد. علاوه بر این به منظور دسترسی به انعطاف‌پذیری بالا در شبکه نیاز به افزایش هزینه بهره‌برداری منابع منعطف است که این موضوع موجب افزایش هزینه انرژی می‌شود

مراجع

AkbaiZadeh, M., Niknam, T., & Kavousi-Fard, A. *Adaptive robust optimization for the energy management of the grid-connected energy hubs based on hybrid meta-heuristic algorithm*. Energy, ۲۳۵,۱۲۱۱۷۱ , 2021.

Askarzadeh, A. A *novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: crow search algorithm*. Computers & structures, ۱۶۹, 1-12, 2016.

Asl, S. A. F., Bagherzadeh, L., Pirouzi, S., Norouzi, M., & Lehtonen, M. *A new two-layer model for energy management in the smart distribution network containing flexi-renewable*

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]

integrated renewable energy sources. Energy Conversion and Management, ۶۵, ۶۹۷-۷۰۳, 2013.

Norouzi, M., Aghaei, J., Niknam, T., Pirouzi, S., & Lehtonen, M. *Bi-level fuzzy stochastic-robust model for flexibility valorizing of renewable networked microgrids.* Sustainable Energy, Grids and Networks, ۳۱, ۱۰۰۶۸۴, 2022.

Norouzi, M., Aghaei, J., Pirouzi, S., Niknam, T., & Fotuhi-Firuzabad, M. *Flexibility pricing of integrated unit of electric spring and EVs parking in microgrids*. Energy, ۲۳۹, ۱۲۲۰۸۰, 2022.

Norouzi, M., Aghaei, J., Pirouzi, S., Niknam, T., Fotuhi-Firuzabad, M., & Shafie-khah, M. *Hybrid stochastic/robust flexible and reliable scheduling of secure networked microgrids with electric springs and electric vehicles.* Applied Energy, ۳۰۰, ۱۱۷۳۹۵, 2021.

Patnam, B. S. K., & Pindoriya, N. M. *Centralized stochastic energy management framework of an aggregator in active distribution network.* IEEE Transactions on Industrial Informatics, ۱۵(۳), ۱۳۵۰-۱۳۶۰, 2018.

Pirouzi, S., Aghaei, J., Niknam, T., Khooban, M. H., Dragicevic, T., Farahmand, H., Blaabjerg, F. *Power conditioning of distribution networks via single-phase electric vehicles equipped.* IEEE Systems Journal, ۱۳(۳), ۳۴۳۳-۳۴۴۲, 2019.

Roustaee, M., & Kazemi, A. *Multi-objective energy management strategy of unbalanced multi-microgrids considering technical and economic situations.* Sustainable Energy Technologies and Assessments, ۴۷, ۱۰۱۴۴۸, 2021a.

Roustaee, M., & Kazemi, A. *Multi-objective stochastic operation of multi-microgrids constrained to system reliability and clean energy based on energy management system.* Electric Power Systems Research, ۱۹۴, ۱۰۶۹۷۰, 2021b.

Sarwagya, K., Nayak, P. K & ,.Ranjan, S. *Optimal coordination of directional overcurrent relays in complex distribution networks using sine cosine algorithm.* Electric Power Systems Research, ۱۸۷, ۱۰۶۴۳۵, 2020.

Xie, D., Lu, Y., Sun, J., Gu, C., & Li, G. *Optimal operation of a combined heat and power system considering real-time energy prices.* IEEE Access, ۴, ۳۰۰۵-۳۰۱۵, 2016.

Yu, Y., Cai, Z., & Huang, Y. *Energy storage arbitrage in grid-connected micro-grids under real-time market price uncertainty: A double-q learning approach.* IEEE Access, ۸, ۵۴۴۵۶-۵۴۴۶۴, *2020.*

virtual power plant. Electric Power Systems Research, ۱۹۴, ۱۰۷۰۸۵, 2021.

Bozorgavari, S. A., Aghaei, J., Pirouzi, S., Vahidinasab, V., Farahmand, H., & Korpås, M. T*wo-stage hybrid stochastic/robust optimal coordination of distributed battery storage planning and flexible energy management in smart distribution network.* Journal of Energy Storage, ۲۶, ۱۰۰۹۷۰, 2019.

Chen, H., Yu, Y., & Jiang, X. *Optimal scheduling of combined heat and power units with heat storage for the improvement of wind power integration.* Paper presented at the ۲۰۱۶IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2016.

Chowdhury, S., Chowdhury, S. P., & Crossley, P. *Microgrids and active distribution networks*, 2022.

Dini, A., Pirouzi, S., Norouzi, M., & Lehtonen, M. *Grid-connected energy hubs in the coordinated multi-energy management based on day-ahead market framework*. Energy, ۱۸۸,۱۱۶۰۵۵ , 2019.

Dini, A., Pirouzi, S., Norouzi, M., & Lehtonen, M. *Hybrid stochastic/robust scheduling of the grid-connected microgrid based on the linear coordinated power management strategy.* Sustainable Energy, Grids and Networks, ۲۴,۱۰۰۴۰۰ , 2020.

Faraji, E., Abbasi, A. R., Nejatian, S., Zadehbagheri, M., & Parvin, H. *Planning and Operation of the Active and Reactive sources Constrained to Voltage Security in the Reconfigurable Smart Distribution Network.* Energy Engineering & Management, ۱۲(۱), ۰-۰, 2022.

Ghasemi, S., & Moshtagh, J. *Radial distribution systems reconfiguration considering power losses cost and damage cost due to power supply interruption of consumers.* International Journal on Electrical Engineering & Informatics, (۳)۵, 2013.

Homayoun, R., Bahmani-Firouzi, B., & Niknam, T. *Multi-objective operation of distributed generations and thermal blocks in microgrids based on energy management system.* IET Generation, Transmission & Distribution, ۱۵(۹), ۱۴۵۱-۱۴۶۲, 2021.

Hooshmand, E., & Rabiee, A. *Robust model for optimal allocation of renewable energy sources, energy storage systems and demand response in distribution systems via information gap decision theory.* IET Generation, Transmission & Distribution, ۱۳(۴), ۵۱۱-۵۲۰, 2019.

Jithendranath, J., & Das, D. *Scenario-based multi-objective optimisation with loadability in islanded microgrids considering load and renewable generation uncertainties.* IET Renewable Power Generation, ۱۳(۵), ۷۸۵-۸۰۰, 2019.

Kallrath, J. A*lgebraic Modeling Systems: Modeling and Solving Real World Optimization Problems*, Springer Science & Business Media, 2012.

Kiani, H., Hesami, K., Azarhooshang, A., Pirouzi, S., & Safaee, S. *Adaptive robust operation of the active distribution network including renewable and flexible sources.* Sustainable Energy, Grids and Networks, ۲۶, ۱۰۰۴۷۶, 22021.

Najy, W. K., Zeineldin, H. H., & Woon, W. L. *Optimal protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capability.* IEEE Transactions on industrial electronics, ۶۰(۴), ۱۶۶۸-۱۶۷۷, 2012.

Nikolova, S., Causevski ,A., & Al-Salaymeh, A. *Optimal operation of conventional power plants in power system with*

زیرنویس‌ها

[1] Renewable Energy Sources
[2] Energy Storage Systems
[3] Demand Response Programs
[4] Micro Grid
[5] Power Management System
[6] Reliability
[7] Expected Energy Not Supplied
[8] Voltage Deviation Function
[9] Optimal Power Flow
[10] Active Loads
[11] Stochastic Programming

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]

[12] Mont Carlo Simulation
[13] Grey Wolf Optimizer
[14] Teaching-Learning-Based Optimization
[15] Flexibility Power Management
[16] Combined Heat And Power
[17] Micro Turbine
[18] Distributed Generations
[19] Day-Ahead
[20] Unscented Transformation
[21] Non-Renewable Distributed Generations
[22] Slack
[23] Grid-Connected Mode
[24] Compressed Air Energy Storage
[25] Scheduling
[26] Particle Swarm Optimization
[27] Sine Cosine Algorithm
[28] Crow Search Algorithm
[29] Firefly Algorithm
[30] Ant-Lion Optimizer

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.2.3]