

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 †saleemiah@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.

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

مهدی سرلک^۱، ابوذر صمیمی^۲، استادیار، مهدی نیک زاد^۳، استادیار، امیر حسین سالمی^۱، 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 ریز شبکه 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 ریز شبکه و منابع و مجموع درآمد فروش انرژی و توان راکتیو عناصر یاد شده در بازارهای مذکور مستقر در ریز شبکه را کمینه می‌کند. آن نیز مقید به معادلات پخش توان AC، محدودیت‌های بهره‌برداری شبکه، مدل بهره‌برداری این عناصر است. علاوه بر این 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 بر روی ریز شبکه شعاعی ۱۱۹ باسه، نتایج عددی بدست آمده تأییدکننده قابلیت طرح در بهبود همزمان وضعیت اقتصادی و بهره‌برداری ریز شبکه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری ریز شبکه، بلوک حرارتی، روش انتقال بی‌بو، بازار انرژی، بازار توان راکتیو.

۱- مقدمه

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 ریز شبکه^۱ 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 ریز شبکه، اپراتور عناصر مذکور با اپراتور ریز شبکه در هماهنگی دوطرفه هستند. لذا اپراتور ریز شبکه 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 ریز شبکه 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

به منظور کاهش آلاینده‌های 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 بر این، 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 (AkbariZadeh, Niknam, & Kavousi-Fard, ۲۰۲۱). به عنوان مثال، منابع انرژی تجدیدپذیر^۱ به علت دارای بودن سطح آلاینده‌گی و هزینه بهره‌برداری بسیار پایین موجب تأمین انرژی پاک و کم هزینه در شبکه می‌شوند (Nikolova, Causevski, & Al-Salaymeh, ۲۰۱۳). سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی^۲ و طرح‌های پاسخگویی بار^۳ با مدیریت انرژی قادر به پیک‌سایی مشخصه بار شبکه هستند، که نتیجه در بهبود شاخص‌های بهره‌برداری

برقراری سیستم مدیریت توان^۵ مناسب در ریزشبكة و ارائه یک فرمول بندی بهینه بهره برداری شبکه است.

در زمینه بهره برداری بهینه ریزشبكة تحقیقات مختلفی انجام شده است. در (Dini, Pirouzi, Norouzi, & Lehtonen, ۲۰۲۰) نویسندگان بهره برداری بهینه منابع و ذخیره سازها در ریزشبكة دارای بارهای پاسخده را ارائه داده اند. در این طرح، کمینه سازی هزینه بهره برداری ریزشبكة و منابع به عنوان تابع هدف مد نظر بوده است و مقید به مدل بهره برداری شبکه و عناصر یاد شده در کنار محدودیت های فنی مختلف شبکه است. در ادامه یک مدل خطی سازی شده برای آن بدست آمده است، سپس برنامه ریزی استوار برای مدل سازی عدم قطعیت های بار، قیمت انرژی، توان تجدیدپذیر و انرژی مصرفی ذخیره سازهای سیار استفاده شده است. در (Roustae & Kazemi, ۲۰۲۱b) نیز بهره برداری چند هدفه چندین ریزشبكة بر پایه سیستم مدیریت انرژی جهت دستیابی به ریزشبكة با قابلیت اطمینان^۶ بالا دارای انرژی پاک و وضعیت بهره برداری بهینه ارائه می شود. از اینرو مسأله پیشنهادی هزینه مورد انتظار بهره برداری ریزشبكة و منابع تجدیدناپذیر، انرژی مورد انتظار تغذیه نشده^۷ به عنوان شاخص قابلیت اطمینان، میزان مورد انتظار آلودگی زیست محیطی و تابع انحرافات ولتاژ^۸ در توابع هدف مختلف کمینه سازی می کند. همچنین این طرح مقید به معادلات پخش توان بهینه^۹ در ریزشبكة ها، قیود قابلیت اطمینان، مدل ریاضی منابع و بارهای فعال^{۱۰} می باشد. در ادامه برنامه ریزی تصادفی^{۱۱} مبتنی بر روش ترکیبی شبیه سازی مونت کارلو^{۱۲} و تکنیک کانترویچ جهت مدل سازی عدم قطعیت های بار مصرفی، قیمت انرژی توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، تقاضای انرژی برخی از بارهای فعال و دسترس پذیری تجهیزات ریزشبكة ها استفاده می شود. علاوه بر این، جهت دستیابی به راه حل بهینه مطمئن از الگوریتم ترکیبی بهینه سازی دسته گرگ ها^{۱۳} و بهینه سازی آموزش و یادگیری^{۱۴} استفاده می گردد. طرحی همانند (Roustae & Kazemi, ۲۰۲۱b) در (Norouzi, Aghaei, Pirouzi, Niknam, & a, ۲۰۲۱) اجراء شد، با این تفاوت که آن بر روی ریزشبكة نامتعادل مورد تحلیل قرار گرفت. در (Norouzi, Aghaei, Pirouzi, Niknam, & Fotuhi-Firuzabad, ۲۰۲۲)، مدیریت توان منعطف^{۱۵} ریزشبكة متصل به شبکه در حضور منابع انرژی تجدیدپذیرها و منابع انعطاف پذیری ارائه شد. منابع انعطاف پذیر شامل طرح های پاسخگویی بار مبتنی بر مدل تشویق و واحد ترکیبی فنر برقی و پارکینگ خودروهای الکتریکی بود. مسأله مذکور کمینه سازی تفاوت هزینه مورد انتظار خرید انرژی و سود مورد انتظار انعطاف پذیری منابع انعطاف پذیر مقید به پخش توان بهینه جریان متناوب ریزشبكة در حضور منابع انرژی های تجدیدپذیر و منابع انعطاف پذیر بعلاوه قیود انعطاف پذیری را بر عهده دارد. از برنامه ریزی تصادفی جهت مدل سازی عدم قطعیت های بار، قیمت انرژی، توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیرها و تقاضای انرژی خودروهای الکتریکی استفاده شد. طرحی همانند (Norouzi,

Norouzi, Aghaei, Pirouzi, et al., ۲۰۲۲) در (Norouzi, Aghaei, Pirouzi, et al., ۲۰۲۲) نیز اجراء شد، با این تفاوت که در آن یک مدل دو سطحی برای بهره برداری ریزشبكة ارائه شده است. به طوری که سطح بالای آن جهت محاسبه قیمت انعطاف پذیری استفاده شد و سطح پایین آن برای بهره برداری بهینه از ریزشبكة استفاده گردید. در (Homayoun, Bahmani-Firouzi, & Niknam, ۲۰۲۱) بهره برداری ریزشبكة دارای بلوک حرارتی ارائه گردید، که در بلوک حرارتی مدل تجمیع شده بار حرارتی، بویلر، ذخیره ساز حرارتی و سیستم ترکیبی برق و حرارت^{۱۶} ارائه شده بود. همچنین منابع انرژی تجدیدپذیرها و میکروتوربین^{۱۷} در کنار شبکه توزیع نیز عهده دار تغذیه انرژی مصرفی الکتریکی ریزشبكة بودند. در (Yu, Cai, & Huang, ۲۰۲۰)، مدیریت انرژی سیستم های ذخیره ساز انرژی در ریزشبكة متناسب با مشارکت بهینه این شبکه در بازار انرژی زمان واقعی تحت الگوریتم های یادگیری ماشین مدل سازی شده است. پیرو نتایج ارائه شده در (Yu et al., ۲۰۲۰)، سیستم های ذخیره ساز انرژی نیز می توانند با مدیریت انرژی مناسب و با انجام عملیات شارژ/دشارژ در ساعات کم باری/پر باری با قیمت انرژی پایین/بالا در زمینه پیک سایی شبکه مناسب باشند. در (Hooshmand & Rabiee, ۲۰۱۹) بهره برداری و برنامه ریزی بهینه ریزشبكة در حضور سیستم های ذخیره ساز انرژی، طرح های پاسخگویی بار و منابع انرژی تجدیدپذیر که از سیستم مدیریت انرژی استفاده کرده است، فرمول بندی شده است. براساس (Hooshmand & Rabiee, ۲۰۱۹)، سیستم های ذخیره ساز انرژی، طرح های 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 می تواند قابلیت مفیدی در ریزشبكة از نظر بهبود شاخص های بهره برداری 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 ذخیره ساز انرژی مجازی استفاده می کند. در مرجع (Chen, Yu, & Jiang, ۲۰۱۶) دو مدل خطی به منظور برنامه ریزی تعیین تولید واحدهای سیستم ترکیبی برق و حرارت در کنار ذخیره سازهای انرژی با هدف هماهنگی با توربین های بادی ارائه شده است. در مرجع (Xie, Lu, Sun, Gu, & Li, ۲۰۱۶) مدلی برای بهره برداری 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 می شود. این مقاله از یک مدل بهینه سازی گسسته برای حل مسأله بهینه سازی بهره برده است.

با توجه به پیشینه تحقیق، شکاف های تحقیقاتی عمده زیر در زمینه بهره برداری ریزشبكة وجود دارد:

- در بیشتر تحقیقات عموماً مدل بخش الکتریکی سیستم ترکیبی برق و حرارت در مسائل بهره برداری و برنامه ریزی ریزشبكة مدنظر

بوده است. علاوه بر این، در بیشتر تحقیقات مرتبط به مدیریت انرژی ریزشبه، مدل مصرف کننده 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 می کند. لذا به منظور مدل سازی مناسب تر بهره برداری ریزشبه لازم است که مدل حرارتی منابع و مصرف کننده ها نیز فرمول بندی شود.

• توجه شود که با مدیریت زمان بندی منابع، ذخیره سازها و بارهای پاسخ ده می توان منفعت مالی مناسبی را برای آنها از بازار انرژی و خدمات جانبی کسب کرد. ولی در بیشتر تحقیقات مدل بهره برداری ریزشبه مد نظر بوده است که هدف آن بهبود شاخص های فنی شبکه مانند کاهش تلفات توان و افت ولتاژ در کنار دستیابی به کمینه ترین هزینه بهره برداری ریزشبه و عناصر مذکور است. در کمتر تحقیقاتی مانند (Homayoun et al., ۲۰۲۱; Norouzi, Aghaei, Niknam, et al., ۲۰۲۲) 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 می توانند 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 بهره برداری 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 مدل سازی تصادفی عدم قطعیت ها بر پایه تکنیک های دارای تولید و کاهش سناریو چنین شرایطی را به وجود نمی آورند. چونکه آنها جهت دسترسی به یک راه حل بهینه مطمئن نیاز به تعداد قابل توجهی سناریو هستند. لذا نیاز به روش هایی است که دارای کمینه ترین تعداد سناریو باشند. متناسب با این موضوع، برخی از تحقیقات مدل سازی استوار را برای عدم قطعیت های استفاده می کنند. اما این روش تنها بدترین مورد سناریو را در نظر می گیرد، در صورتی که محاسبه برخی از شاخص ها نیاز به بررسی چندین سناریو از یک پارامتر عدم قطعیت است (Roustaei & Kazemi, ۲۰۲۱b). به عنوان مثال برای بررسی وضعیت انعطاف پذیری ریزشبه 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 ریزشبه دارای بلوک حرارتی، سیستم های ذخیره ساز انرژی، طرح های پاسخگویی بار و تولیدات پراکنده^{۱۸} متناسب با مشارکت این عناصر در بازار انرژی و توان راکتیو روز- بعد^{۱۹} ارائه می شود. در این مقاله فرض بر این که تولیدات پراکنده از نوع سیستم

ترکیبی برق و حرارت و بویلر می توانند میزان انرژی مصرفی مصرف کننده گان حرارتی که در طرح های پاسخگویی بار نیز شرکت می کنند، را تأمین کنند. از اینرو این عناصر در یک واحد مجتمع تحت عنوان «بلوک حرارتی» قرار می گیرند و آن در باس هایی از ریزشبه قرار دارد که بار حرارتی موجود باشد. در ادامه، طرح پیشنهادی در قالب یک مسأله بهینه سازی بیان می شود. در مدل تصادفی آن، تابع هدف آن برابر کمینه سازی مافاوت مجموع هزینه بهره برداری تولیدات پراکنده و ریزشبه و مجموع درآمد منابع، ذخیره سازها و بارهای پاسخ ده در بازارهای یاد شده می باشد. آن نیز مقید به معادلات پخش توان بهینه جریان متناوب مدل بهره برداری بلوک حرارتی، تولیدات پراکنده، سیستم های ذخیره ساز انرژی، طرح های پاسخگویی بار و محدودیت انعطاف پذیری ریزشبه است. در این طرح به منظور جبران شکاف تحقیقاتی دوم، حضور منابع، ذخیره سازها 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. زیرا که عموماً منابع و ذخیره سازها 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 باشند. لذا در تابع هدف پیشنهادی، بهینه سازی (کمینه سازی قرینه) درآمد منابع و ذخیره سازها در بازار توان راکتیو لحاظ می شود. این طرح دارای عدم قطعیت های قیمت انرژی، توان تجدیدپذیر و بار مصرفی است. لذا به منظور حذف شکاف تحقیقاتی سوم، آنها براساس روش انتقال بی بو^{۲۰} مدل سازی می شوند. زیرا که این روش دارای کمینه ترین تعداد سناریو در برنامه ریزی تصادفی است. در نهایت نوآوری های طرح مذکور به صورت زیر خلاصه می گردد:

- ارائه مدل بهره برداری ریزشبه دارای بلوک حرارتی، منابع، ذخیره سازها و بارهای پاسخ ده جهت دستیابی به وضعیت بهینه بهره برداری و اقتصادی برای شبکه و عناصر مذکور،
 - دستیابی به منفعت مالی برای منابع، ذخیره سازها و بارهای پاسخ ده از بازار انرژی و خدمات جانبی مانند توان راکتیو به منظور تشویق مالکان این عناصر در بهره برداری بهینه ریزشبه
- در ادامه این مقاله بدین صورت سازمان دهی می شود: در بخش دوم مدل تصادفی طرح پیشنهادی بیان می شود. سپس در بخش سوم مدل سازی عدم قطعیت ها بر مبنای روش بی بو ارائه می گردد. در ادامه، نتایج عددی حاصل از موارد مطالعاتی مختلف در بخش چهارم ارزیابی می شوند. در نهایت، نتیجه گیری ها در بخش پنجم ذکر می شوند.

۲- مدل تصادفی طرح پیشنهادی

در این بخش، مدل ریاضی بهره برداری ریزشبه که در حضور منابع، ذخیره سازها و بارهای پاسخ ده متناسب با محیط بازار انرژی و توان راکتیو روز- بعد در چارچوب بهینه سازی تصادفی ارائه می شود. این طرح کمینه سازی مافاوت هزینه بهره برداری مورد انتظار تولیدات

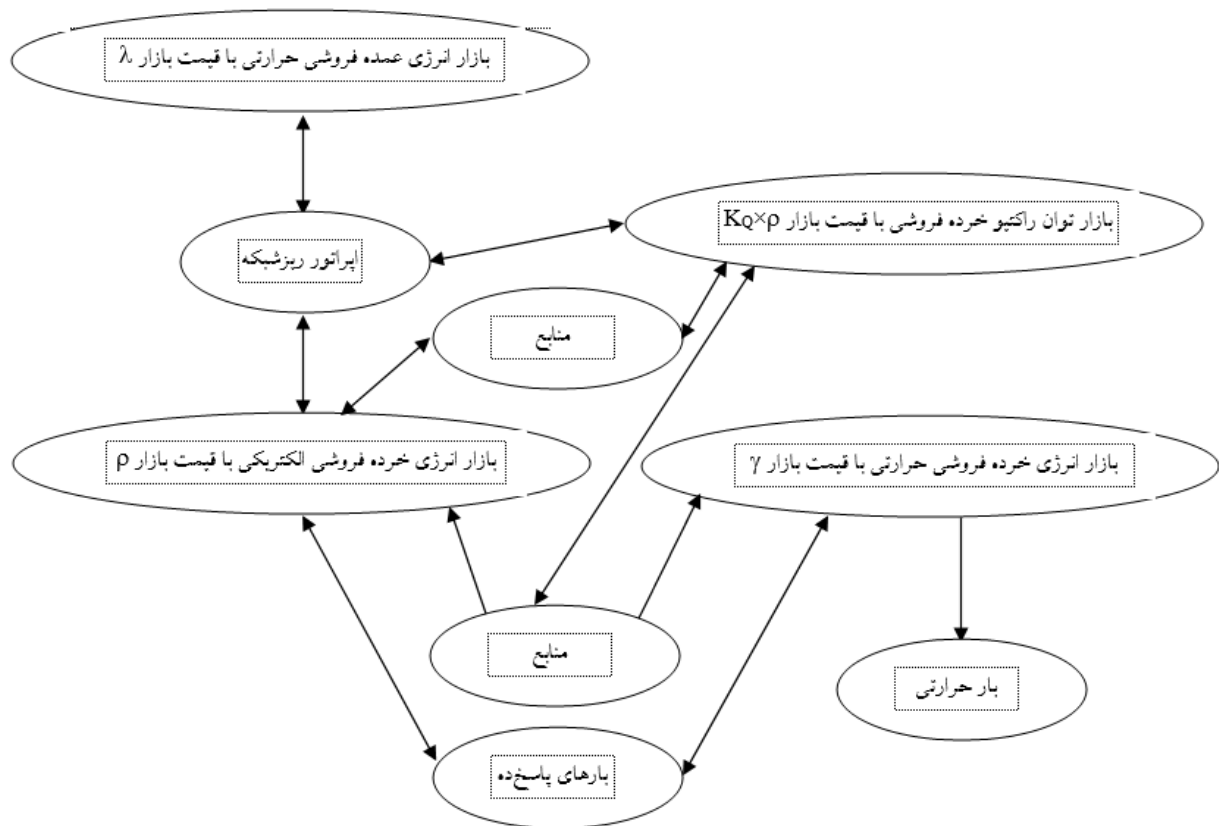
پراکنده تجدیدناپذیر^{۲۱} و ریزشبهه با درآمد مورد انتظار حاصل از فروش انرژی/توان راکتیو در بازارهای مذکور توسط عناصر یاد شده را بر عهده دارد. آن نیز مقید به معادلات پخش توان بهینه جریان متناوب، مدل بهره‌برداری تولیدات پراکنده تجدیدناپذیر، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، طرح‌های پاسخ‌گویی بار و بلوک حرارتی و محدودیت انعطاف‌پذیری ریزشبهه می‌باشد. فرض بر این است که در باس‌هایی از ریزشبهه 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 به صورت رابطه (۱) قابل نگارش می‌باشد:

$$\min Cost = \sum_{s \in SC} (\pi_s \sum_{h \in OH} \{ \lambda_{h,s} P_{ref,h,s}^G + \sum_{b \in Bus} \{ (\alpha_b^{MT} + \beta_b^{MT} P_{b,h,s}^{MT} + \chi_b^{MT} (P_{b,h,s}^{MT})^2) + (\alpha_b^{CHP} + \beta_b^{CHP} P_{b,h,s}^{CHP} + \chi_b^{CHP} (P_{b,h,s}^{CHP})^2) + (\alpha_b^{BO} + \beta_b^{BO} H_{b,h,s}^{BO} + \chi_b^{BO} (H_{b,h,s}^{BO})^2) - \rho_{h,s} [(P_{b,h,s}^{MT} + P_{b,h,s}^{CHP} + P_{b,h,s}^{RES} + P_{b,h,s}^{DR} + P_{b,h,s}^{DCH} - P_{b,h,s}^{CH}) + K_Q (|Q_{b,h,s}^{MT}| + |Q_{b,h,s}^{CHP}| + |Q_{b,h,s}^{RES}| + |Q_{b,h,s}^{ESS}|)] - \gamma_{h,s} (H_{b,h,s}^{CHP} + H_{b,h,s}^{BO} + H_{b,h,s}^{DR}) \} \}) \quad (1)$$

که λ قیمت خرید انرژی الکتریکی ریزشبهه از بازار بالادستی برحسب $(\$/MWh)$ ، α^{MT} ، β^{MT} ، χ^{MT} به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب تابع هزینه بهره‌برداری میکروتوربین به ترتیب برحسب $\$/MWh$ ، $\$/MWh^2$ و $\$/MWh$ و α^{CHP} ، β^{CHP} ، χ^{CHP} نمایانگر ضرایب تابع هزینه بهره‌برداری سیستم ترکیبی برق و حرارت به ترتیب برحسب $\$/MWh$ ، $\$/MWh^2$ و $\$/MWh$ و α^{BO} ، β^{BO} ، χ^{BO} ضرایب تابع هزینه بهره‌برداری بویلر به ترتیب برحسب $\$/MWh$ ، $\$/MWh^2$ و $\$/MWh$ ، 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، Bus به ترتیب اشاره به مجموعه سناریو، ساعت بهره‌برداری و باس دارند. همچنین، P^{MT} ، Q^{MT} ، P^{PG} 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 $(p.u)$ ، H^{DR} ، P^{DR} توان اکتیو و حرارتی در طرح پاسخ‌گویی بار برحسب $(p.u)$ ، Q^{RES} ، P^{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 ریزشبهه است.

در رابطه (۱) تابع هدف طرح پیشنهادی فرمول‌بندی شده است، و آن برابر با کمینه‌سازی ماتفاوت هزینه بهره‌برداری مورد انتظار ریزشبهه و تولیدات پراکنده تجدیدناپذیرها (Roustaei & Kazemi, ۲۰۲۱b) با درآمد مورد انتظار منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده در بازار انرژی و توان راکتیو (Kiani, Hesami, Azarhooshang, Pirouzi, Safaei & ۲۰۲۱) است. به‌طوری که هزینه بهره‌برداری ریزشبهه که بیانگر هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست است، در بخش اول رابطه (۱) مدل‌سازی شده است (Roustaei & Kazemi, ۲۰۲۱b). 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 ریزشبهه برقرار است، و همچنین خود ریزشبهه از بازار عمده فروشی در شبکه بالادست خرید توان دارد. از اینرو قیمت خرید انرژی ریزشبهه (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 (Dini et al., ۲۰۲۰، Kiani et al., ۲۰۲۱) عموماً منابع توان راکتیو به ازای تقاضای ریزشبهه 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. به-طوری 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.



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

$$Q_{b,k,h,s}^L = -B_{b,k} (V_{b,h,s})^2 + V_{b,h,s} V_{k,h,s} \times \{G_{b,k} \cos(\delta_{b,h,s} - \delta_{k,h,s}) - B_{b,k} \sin(\delta_{b,h,s} - \delta_{k,h,s})\}, \forall b, k, h, s \quad (5)$$

$$\delta_{b,h,s} = 0 \quad \forall b = ref, h, s \quad (6)$$

$$\sqrt{(P_{b,k,h,s}^L)^2 + (Q_{b,k,h,s}^L)^2} \leq S_{b,k}^{Lu} \quad \forall b, k, h, s \quad (7)$$

که $S_{b,k}^{Lu}$ نمایانگر حداکثر مقدار مجاز توان ظاهری عبوری از خط توزیع است که بر حسب پریونیت است.

$$\sqrt{(P_{b,h,s}^G)^2 + (Q_{b,h,s}^G)^2} \leq S_b^{Gu} \quad \forall b = ref, h, s \quad (8)$$

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

$$\frac{P_{b,h,s}^G}{\sqrt{(P_{b,h,s}^G)^2 + (Q_{b,h,s}^G)^2}} \geq PF_l \quad \forall b = ref, h, s \quad (9)$$

که PF_l حداقل مقدار مجاز ضریب قدرت است.

$$V^l \leq V_{b,h,s} \leq V^u \quad \forall b, h, s \quad (10)$$

که V^l , V^u حداقل و حداکثر مقدار مجاز دامنه ولتاژ بر حسب (p.u) هستند.

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

قیود توابع هدف به شرح زیر می‌باشند:

$$P_{b,h,s}^G + P_{b,h,s}^{MT} + P_{b,h,s}^{RES} + P_{b,h,s}^{CHP} + (P_{b,h,s}^{DCH} - P_{b,h,s}^{CH}) + P_{b,h,s}^{DR} - \sum_{k \in Bus} A_{b,k}^L P_{b,k,h,s}^L = P_{b,h,s}^D \quad \forall b, h, s \quad (2)$$

که P^D و P^L , A^L به ترتیب نشان‌دهنده ماتریس تلاقی خط توزیع و باس ریزشکبه، توان اکتیو خط توزیع و توان اکتیو بار بر حسب (p.u) هستند.

$$Q_{b,h,s}^G + Q_{b,h,s}^{MT} + Q_{b,h,s}^{RES} + Q_{b,h,s}^{CHP} + Q_{b,h,s}^{ESS} - \sum_{k \in Bus} A_{b,k}^L Q_{b,k,h,s}^L = Q_{b,h,s}^D \quad \forall b, h, s \quad (3)$$

که Q^D و Q^G , Q^L به ترتیب نمایانگر توان راکتیو خط توزیع، توان راکتیو پست توزیع و توان راکتیو بار بر حسب (p.u) هستند.

$$P_{b,k,h,s}^L = G_{b,k} (V_{b,h,s})^2 - V_{b,h,s} V_{k,h,s} \times \{G_{b,k} \cos(\delta_{b,h,s} - \delta_{k,h,s}) + B_{b,k} \sin(\delta_{b,h,s} - \delta_{k,h,s})\}, \forall b, k, h, s \quad (4)$$

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

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 ریزشبه، محاسبه توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط توزیع و میزان زاویه ولتاژ باس مرجع^{۲۲} هستند. محدودیت‌های بهره‌برداری ریزشبه نیز در روابط (۷)–(۱۰) ارائه شده است (Norouzi et al., ۲۰۱۹; Bozorgavari 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^{Gu} / S^{Lu} 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 ریزشبه 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 ریزشبه 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 ریزشبه در مد اتصال به شبکه^{۲۳} است. در صورتی که آن در مد جزیره‌ای فعالیت کند، لذا ریزشبه از شبکه بالادست قطع است، و پس متغیرهای P^G و Q^G در کلیه باس‌ها دارای مقدار صفر هستند.

$$P_b^{MTl} \leq P_b^{MTu} \leq P_b^{MTu} \quad \forall b, h, s \quad (11)$$

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

$$Q_b^{MTl} \leq Q_b^{MTu} \leq Q_b^{MTu} \quad \forall b, h, s \quad (12)$$

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

$$P_{b,h,s}^{RES} = P_{b,h,s}^{RESu} \quad \forall b, h, s \quad (13)$$

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

$$\sqrt{(P_{b,h,s}^{RES})^2 + (Q_{b,h,s}^{RES})^2} \leq S_b^{RESu} \quad \forall b, h, s \quad (14)$$

که S^{RESu} حداکثر مقدار مجاز توان ظاهری قابل کنترل بر حسب (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 ریزشبه 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.

$$0 \leq P_{b,h,s}^{CH} \leq P_v^{CHu} x_{b,h,s} \quad \forall b, h, s \quad (15)$$

$$0 \leq P_{b,h,s}^{DCH} \leq P_b^{DCHu} (1 - x_{b,h,s}) \quad \forall b, h, s \quad (16)$$

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

$$E_{b,h+1,s} = E_{b,h,s} + \eta_b^{CH} P_{b,h,s}^{CH} - \frac{1}{\eta_b^{DCH}} P_{b,h,s}^{DCH} \quad \forall b, h, s \quad (17)$$

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

$$E_{b,h,s} = E_b^{ini} \quad \forall b, h = 1, s \quad (18)$$

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

$$E_b^l \leq E_{b,h,s} \leq E_b^u \quad \forall b, h, s \quad (19)$$

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

$$\sqrt{(P_{b,h,s}^{DCH} - P_{b,h,s}^{CH})^2 + (Q_{b,h,s}^{ESS})^2} \leq S_b^{ESSu} \quad \forall b, h, s \quad (20)$$

که S^{ESSu} حداکثر مقدار مجاز توان ظاهری سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر حسب (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 $\alpha = 1$ عملکرد ذخیره‌ساز در مد شارژ است، در غیر این صورت 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 ذخیره‌ساز قادر به کنترل همزمان توان اکتیو و راکتیو خود

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

$$H_{b,h,s}^{CHP} + H_{b,h,s}^{BO} + H_{b,h,s}^{DR} = H_{b,h,s}^D \quad \forall b, h, s \quad (21)$$

که H^D بار حرارتی برحسب (p.u) است

$$H_{b,h,s}^{CHP} = \frac{P_{b,h,s}^{CHP} (1 - \eta_b^T - \eta_b^L)}{\eta_b^T} \cdot \eta_b^H \quad \forall b, h, s \quad (22)$$

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

$$P_b^{CHPI} \leq P_{b,h,s}^{CHP} \leq P_b^{CHPu} \quad \forall b, h, s \quad (23)$$

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

$$Q_b^{CHPI} \leq Q_{b,h,s}^{CHP} \leq Q_b^{CHPu} \quad \forall b, h, s \quad (24)$$

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

$$H_b^{CHPI} \leq H_{b,h,s}^{CHP} \leq H_b^{CHPu} \quad \forall b, h, s \quad (25)$$

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

$$H_b^{BOI} \leq H_{b,h,s}^{BO} \leq H_b^{BOu} \quad \forall b, h, s \quad (26)$$

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

$$-\xi_b P_{b,h,s}^D \leq P_{b,h,s}^{DR} \leq \xi_b P_{b,h,s}^D, \quad \forall b, h, s \quad (27)$$

$$-\xi_b H_{b,h,s}^D \leq H_{b,h,s}^{DR} \leq \xi_b H_{b,h,s}^D, \quad \forall b, h, s \quad (28)$$

که ξ ضریب نرخ مشارکت در طرح پاسخ گویی بار است.

$$\sum_{h \in OH} P_{b,h,s}^{DR} \text{ (or } H_{b,h,s}^{DR} \text{)} = 0 \quad \forall b, s \quad (29)$$

بلوک حرارتی شامل سیستم ترکیبی برق و حرارت، بویلر و مصرف کننده های حرارتی دارای قابلیت طرح پاسخ گویی بار است. فرمول بندی بهره برداری آن در قیود (۲۱)-(۲۹) ارائه شده است. در قید (۲۱) تعادل حرارتی در این بلوک مدل سازی شده است. در روابط (۲۲)-(۲۵) مدل سیستم ترکیبی برق و حرارت در نظر گرفته شده است. به طوری که توان حرارتی تولید سیستم ترکیبی برق و حرارت براساس رابطه (۲۲) محاسبه می شود، که آن ضریبی از توان اکتیو تولیدی سیستم ترکیبی برق و حرارت می باشد. در قیود (۲۳)-(۲۴) فرمول بندی 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) مدل سازی شده است. در نهایت مدل بهره برداری طرح پاسخ گویی بار برای مصرف کننده حرارتی (الکتریکی) در قیود (۲۷) - (۲۹) بیان شده است. این نوع طرح پاسخ گویی بار متناسب با مدل تشویقی است. به طوری که مصرف کننده ها در این طرح پاسخ گویی بار با توجه به

سیگنال قیمت انرژی، انرژی مصرفی خود را کاهش یا افزایش می دهند. به عبارتی، در طرح پاسخ گویی بار به منظور کمینه سازی رابطه (۱)، مصرف کننده ها در ساعتی که قیمت انرژی بالا (پایین) است، انرژی مصرفی خود را کاهش (افزایش) می دهند. بنابراین قیود (۲۷) و (۲۸) متناسب با محدوده تغییرات توان مصرف کننده ها در طرح پاسخ گویی بار است، و آنها براساس این رابطه حداکثر با ضریب مشارکت ξ در طرح پاسخ گویی بار شرکت می کنند. علاوه بر این فرض شده است که در این طرح پاسخ گویی بار، مصرف کننده ها تا افق بهره برداری 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 فرمول بندی طرح پیشنهادی اضافه می شود (Homayoun et al., ۲۰۲۱). در طرح پیشنهادی، فرض شده است که پاسخ گویی بار تنها برای مدیریت انرژی استفاده می شود. لذا پاسخ گویی بار تنها دارای توان اکتیو و حرارتی است.

$$|P_{b,h,s=1}^G - P_{b,h,s}^G| \leq \Delta F \quad \forall b, h, s \quad (30)$$

که ΔF معرف تلرانس انعطاف پذیری بر حسب پریونیت است. بایستی گفت که وجود عدم قطعیت در توان اکتیو تولید منابع انرژی تجدید پذیر موجب کاهش انعطاف پذیری شبکه می شود. پیرو این موضوع امکان دارد که تعادل مابین بهره برداری های روز بعد و زمان واقعی برآورده نشود و عدم تعادل توان اکتیو در زمان بندی ۲۵ زمان واقعی برای شبکه حاصل شود. لذا نیاز به استفاده از منابع انعطاف پذیری مانند پاسخ گویی بار و ذخیره ساز در شبکه است، که آنها قادر هستند در بهره برداری زمان واقعی، نوسانات توان اکتیو منابع انرژی تجدید پذیر را نسبت به بهره برداری روز- بعد جبران کنند و انعطاف پذیری شبکه را ارتقاء دهند. برای برقراری چنین شرایطی، از منظر مدل سازی ریاضی می توان متفاوت توان اکتیو ریز شبکه در سناریو متناظر با مدل قطعی (در اینجا سناریو اول در نظر گرفته شده است و آن دارای داده های پیش بینی است) و سناریوهای دیگر را تا حد امکان کمینه کرد. این موضوع در رابطه (۲۹) ارائه شده است، به طوری که اگر تلرانس انعطاف پذیری (ΔF) به صفر میل کند، انعطاف پذیری ۱۰۰٪ حاصل می شود و عدم تعادلی بین بهره برداری های مذکور در شبکه شامل منابع انرژی تجدید پذیر حذف خواهد شد.

۳- مدل سازی عدم قطعیت ها

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 تجدید پذیر، P^{RESu} ، به صورت عدم قطعیت هستند. در این مقاله از روش انتقال بی-بو برای مدل سازی پارامترهای مذکور استفاده می شود (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 بهره برداری ریز شبکه پیشنهادی اعمال می کند. در این روش n معرف تعداد پارامترهای عدم قطعیت است. از

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 بی‌یو حاصل شود (Norouzi et al., ۲۰۲۱). جزئیات بیشتر این روش از قبیل فرمول‌بندی آن در (Norouzi et al., ۲۰۲۱) ارائه شده است.

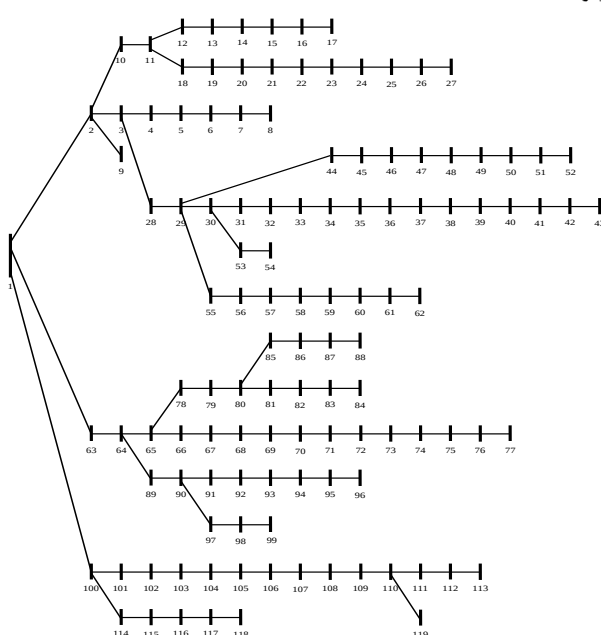
۴- نتایج عددی

۴-۱- مورد مطالعاتی

در این بخش، طرح پیشنهادی بر روی ریزشبه 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 حاصل ضرب 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 0 kW (400 kVar)، راندمان‌های η^T ، η^H و η^L به ترتیب برابر ۰/۴، ۰/۴ و ۰/۸ هستند. علاوه بر این، حداقل (حداکثر) توان حرارتی بویلر برابر 0 kW (0 kW) می‌باشد. ضرایب هزینه سوخت (α , β , χ) برای میکروتوربین، سیستم ترکیبی برق و حرارت و بویلر به ترتیب برابر (۱۰۰، ۲۱، ۰/۰۲)، (۹۳، ۲۰، ۰/۰۱۷) 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 150 kW ، ظرفیت شارژر برابر 150 kVA و 200 ، و حداقل و حداکثر انرژی قابل ذخیره در آن برابر 50 kWh و 104 است، که موقعیت آن در باس‌های ۴، ۱۰، ۳۰، ۶۴ و 104 است. هر بلوک حرارتی دارای بار با مقدار پیک 750 kW است، که منحنی روزانه مورد انتظار ضری بار آن در (Faraji et al., ۲۰۲۲) ارائه شده است. در طرح پاسخ‌گویی بار نیز عبارت $\frac{1}{3}$ برابر 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 و ۷۱ و

۱۰۸ مستقر هستند. حداقل (حداکثر) توان اکتیو و راکتیو میکروتوربین به ترتیب برابر 0 kW (600 kW) و 250 kVar است و ظرفیت (حداکثر توان ظاهری) سیستم بادی و فتوولتائیک به ترتیب برابر 600 kVA و 500 kVA می‌باشد. توجه شود که منحنی روزانه مورد انتظار حداکثر توان اکتیو تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر برابر با حاصل ضرب 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 خرده‌فروشی در (Dini et al., ۲۰۱۹) ارائه شده است، KQ براساس (Kiani et al., ۲۰۲۱) برابر ۰/۸، و فرض شده است که λ برابر ۹۰٪ قیمت انرژی الکتریکی (ρ) است. ΔF نیز جهت دسترسی به انعطاف‌پذیری بالا در ریزشبه برابر ۰/۰۵ پریونیت اتخاذ شده است.



شکل (۱): ریزشبه 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 حل‌کننده‌های 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}

(Jithendranath & Das, ۲۰۱۹) ارائه می‌شود. برای حل مسئله پیشنهادی توسط الگوریتم‌های ریاضی، مدل مسئله 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 مسئله با الگوریتم‌های تکاملی، طرح پیشنهادی به همراه روند حل مبنی بر این الگوریتم در محیط نرم افزار متلب کدنویسی می‌شوند. در حل این مسئله توسط الگوریتم‌های مذکور، ابتدا الگوریتم N (اندازه جمعیت) مقدار تصادفی برای متغیرهای تصمیم‌گیری شامل H^{DR} و P^{DR} , Q^{CHP} , P^{CHP} , Q^{ESS} , α , P^{DCH} , P^{CH} , Q^{RES} , Q^{MT} , P^{MT} 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 Q^G , P^G , $Cost$, δ , V , Q^L , P^L , E^{PRES} و H^{BO} از معادلات (۲)–(۶)، (۱۳)، (۱۷)–(۱۸)، (۲۱) و (۲۲) محاسبه می‌شود. به‌طوری که مقادیر P^{PRES} , E^{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 مسئله پخش توان از روش پرسو- 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 مافاوت 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 et al., ۲۰۱۹; Faraji et al., ۲۰۱۶; Chen et al., ۲۰۱۹; Hooshmand et al., ۲۰۲۲; Norouzi et al., ۲۰۲۱; Kiani et al., ۲۰۱۹ & Rabiee, ۲۰۲۱; Yu et al., ۲۰۱۶; Xie et al., ۲۰۱۸; Patnam & Pindoriya, ۲۰۲۰) 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, ۲۰۲۱) و (Asl et al., ۲۰۲۱) متنظر با منابع انرژی تجدیدپذیر، مشاهده

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، شیرموچه 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 شیرموچه نسبت به BONMIN از لحاظ سرعت پاسخ‌دهی و نقطه بهینه دارای شرایط مطلوب‌تری است. زیرا که آن دارای کمترین مقدار هزینه نسبت به BONMIN است. از آنجا که تکرار همگرایی شیرموچه 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 شیرموچه یک حل‌کننده مناسب‌تر نسبت به دیگر حل‌کننده‌های یاد شده است.

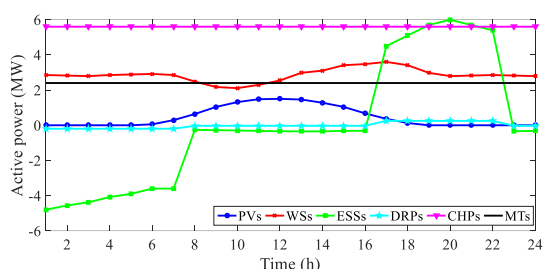
جدول (۱): وضعیت همگرایی مسئله پیشنهادی بدست آمده از

حل‌کننده‌های مختلف			
حل‌کننده	هزینه (\$)	تعداد تکرار 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

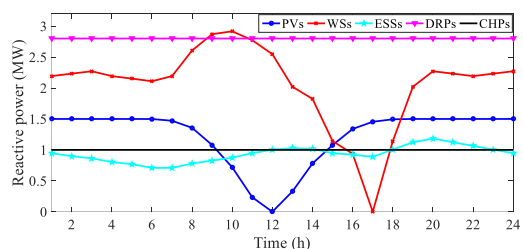
ب) بررسی وضعیت بهره‌برداری و اقتصادی منابع انرژی پراکنده: منحنی روزانه مورد انتظار توان اکتیو و راکتیو منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده الکتریکی در شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب نمایش داده شده است. براساس شکل (۲) و داده‌های بخش ۴- ۱ و (Asl et al., ۲۰۲۱) متنظر با منابع انرژی تجدیدپذیر، مشاهده

(Jithendranath & Das, ۲۰۱۹) ارائه می‌شود. برای حل مسئله پیشنهادی توسط الگوریتم‌های ریاضی، مدل مسئله 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 مسئله با الگوریتم‌های تکاملی، طرح پیشنهادی به همراه روند حل مبنی بر این الگوریتم در محیط نرم افزار متلب کدنویسی می‌شوند. در حل این مسئله توسط الگوریتم‌های مذکور، ابتدا الگوریتم N (اندازه جمعیت) مقدار تصادفی برای متغیرهای تصمیم‌گیری شامل H^{DR} و P^{DR} , Q^{CHP} , P^{CHP} , Q^{ESS} , α , P^{DCH} , P^{CH} , Q^{RES} , Q^{MT} , P^{MT} 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 Q^G , P^G , $Cost$, δ , V , Q^L , P^L , E^{PRES} و H^{BO} از معادلات (۲)–(۶)، (۱۳)، (۱۷)–(۱۸)، (۲۱) و (۲۲) محاسبه می‌شود. به‌طوری که مقادیر P^{PRES} , E^{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 مسئله پخش توان از روش پرسو- 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 مافاوت 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 et al., ۲۰۱۹; Faraji et al., ۲۰۱۶; Chen et al., ۲۰۱۹; Hooshmand et al., ۲۰۲۲; Norouzi et al., ۲۰۲۱; Kiani et al., ۲۰۱۹ & Rabiee, ۲۰۲۱; Yu et al., ۲۰۱۶; Xie et al., ۲۰۱۸; Patnam & Pindoriya, ۲۰۲۰) 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, ۲۰۲۱) و (Asl et al., ۲۰۲۱) متنظر با منابع انرژی تجدیدپذیر، مشاهده

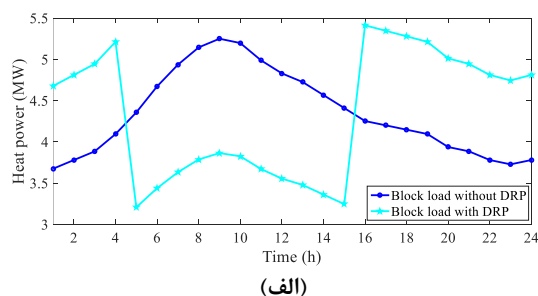
۵:۰۰ و ۱۹:۰۰-۲۴:۰۰ براساس شکل (۲) توان اکتیوی تولید نمی‌کنند. از اینرو آنها در این ساعات توان راکتیوی برابر با MVar ۱/۵ به شبکه تزریق می‌کنند. اما در ساعات دیگر که توان اکتیو تولیدی آنها افزایش می‌یابد، توان راکتیو تولیدی آنها کاهش می‌یابد. این شرایط برای سیستم‌های توربین بادی با توجه به شکل (۳) وجود دارد. اما سیستم‌های ترکیبی برق و حرارت (میکروتوربین‌ها) در کلیه ساعات، حداکثر توان راکتیو قابل تولید خود، یعنی $MVar \frac{2}{8} = 0.25$ 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 ریزشکته 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)

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 ریزشکته تزریق می‌کنند. در شکل (۲) منحنی روزانه توان اکتیو سیستم ترکیبی برق و حرارت و میکروتوربین‌های نمایش داده شده است. براساس این شکل، این ریزشکته‌ها 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 (۸) در برخی از ساعات از قیمت سوخت ریزشکته‌ها بیشتر است، از اینرو اپراتور ریزشکته تمایل به استفاده از این ریزشکته‌ها برای تأمین انرژی مصرفی دارد، و (۲) این ریزشکته‌ها با قیمت P انرژی به ریزشکته می‌فروشند که براساس داده‌های بخش ۴-۱ در حدود 90% P می‌باشد. از اینرو به منظور کمینه‌سازی تابع هزینه در رابطه (۱) انتظار می‌رود که ریزشکته‌ها 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 ۱۶:۰۰-۱۰:۰۰ و ۲۴:۰۰-۲۳:۰۰ عملیات شارژ را انجام می‌دهند، به طوری که در ساعات ۷:۰۰-۱۰:۰۰ انرژی بالایی را ریزشکته دریافت می‌کنند. همچنین آنها در ساعات ۱۷:۰۰-۲۲:۰۰ در مد دشارژ فعالیت می‌کنند و توان اکتیو به ریزشکته تزریق می‌کنند. عملکرد این عناصر متناظر با قیمت انرژی الکتریکی است. براساس (Yu et al., ۲۰۲۰)، قیمت انرژی در ساعات ۷:۰۰-۱۰:۰۰، ۱۶:۰۰-۸:۰۰ و ۲۳:۰۰-۲۴:۰۰، و ۱۷:۰۰-۲۲:۰۰ به ترتیب برابر $\$17/6$ ، $\$26/4$ و $\$33$ 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 پاسخگویی 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 ریزشکته باشد. از اینرو منابع منعطف براساس شکل (۲) در هیچ ساعت بهره‌بردار 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 $MVA \frac{1}{5}$ (۳ عدد $MVA \times PV \frac{5}{5}$) ظرفیت فتوولتائیک است، و سیستم‌های فتوولتائیک در ساعات ۱-۱۰-

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

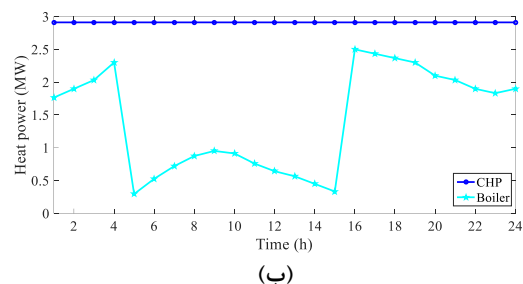
(د) ارزیابی وضعیت اقتصادی و فنی MG: در این بخش به

منظور بررسی قابلیت‌های طرح پیشنهادی، شش مورد مطالعاتی به شرح زیر مورد تحلیل قرار می‌گیرند:

- مورد ۱: مطالعات پخش بار ریزشبه
- 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 تنه‌های منابع انرژی تجدیدپذیر در طرح پیشنهادی (مورد ۲) یا حضور تنه‌های بلوک‌های حرارتی و میکروتوربین در ریزشبه (مورد ۵) منجر به کاهش قابل توجهی در هزینه انرژی، تلفات انرژی و افت ولتاژ ریزشبه 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 ۰/۰۵ (۱ - ۱/۰۵) پریونت است، که میزان آن کمتر از حد مجاز خود یعنی ۰/۰۵ (۱ - ۱/۰۵) پریونت است. عملکرد 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 پاسخگوی بار، آن در مورد ۴ نسبت به مورد ۱ توانسته است که هزینه، تلفات انرژی،

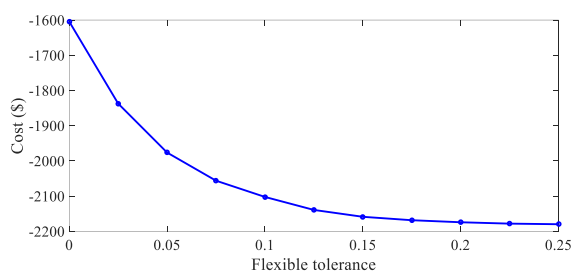


شکل (۴): منحنی روزانه توان حرارتی، الف) بار بلوک با/بدون طرح

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 \$/MWh ۳۰ است، و دیگر ساعات آن برابر \$/MWh ۲۲ 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 متفاوت 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 ریزشبه و عناصر آن از قبیل هزینه بهره‌برداری ریزشبه، 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 ریزشبه 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 ریزشبه براساس داده‌های پیش‌بینی شده پارامترهای عدم قطعیت است (مدل قطعی و عدم در نظر گرفتن خطای پیش‌بینی)، درآمد ریزشبه برابر ۲۶۰۴/۷ دلار است. به عبارتی هزینه حاصل از در نظر گرفتن خطای پیش‌بینی در حدود ۵۷۱/۹ دلار (۲۶۰۴/۷ - ۲۰۳۲/۸) است.

جدول (۲): میزان شاخص‌های اقتصادی در ریزشبه



شکل (۵): منحنی تابع هزینه بر حسب تolerانس انعطاف پذیری

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 پاسخ گوی بار تعبیه کرده است. در ادامه طرح مذکور کمینه سازی ماتفاوت مجموع هزینه بهره برداری 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 بهره برداری بلوک حرارتی و منابع انرژی پراکنده، و محدودیت انعطاف پذیری ریزشبکه بود. در این مقاله از برنامه ریزی تصادفی مبنی بر بی بو برای مدل سازی عدم قطعیت های بار، قیمت بازار و توان تجدیدپذیر استفاده شد. در نهایت براساس نتایج عددی بدست آمده مشاهده گردید که الگوریتم بهینه سازی شیرمورچه توانایی مطلوبی در دستیابی به راه حل بهینه در کمترین زمان محاسباتی را نسبت به روش های حل ریاضی و برخی الگوریتم های تکاملی دیگر دارد. همچنین طرح پیشنهادی با دستیابی به منحنی عملکرد بهینه در توان اکتیو، راکتیو و حرارتی منابع، ذخیره سازها و بارهای پاسخده توانست که نسبت به مطالعات پخش بار شاخص های 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 ۰/۱۱۸/۷٪، ۰/۵۰٪، ۰/۱۷/۶٪ و ۰/۳۸٪ ارتقاء دهد. علاوه بر این به منظور دسترسی به انعطاف پذیری بالا در شبکه نیاز به افزایش هزینه بهره برداری منابع منعطف است که این موضوع موجب افزایش هزینه انرژی می شود

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 پایین تر، ولی نسبت به مورد ۳ بیشتر است. علاوه بر این، در مورد ۴، طرح پاسخ گویی بار تنها در کنترل توان اکتیو نقش دارد، و میزان توان راکتیو را تغییر نمی دهد. از اینرو براساس شکل (۲)، در ساعات پرباری که میزان توان اکتیو مصرفی (توان اکتیو پست توزیع) توسط طرح پاسخ گویی بار کاهش می باشد، با عدم تغییر وضعیت توان راکتیو نسبت به مورد ۱، 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 شاخص های مطرح شده نسبت به مورد ۱ ارتقاء یابند. به طوری که تابع هزینه در مورد ۶ نسبت به مورد ۱ در حدود ۰/۱۱۸/۷٪ 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 ۰/۵۰٪، ۰/۱۷/۶٪ و ۰/۳۸٪ می باشد. در نهایت، منحنی هزینه بر حسب تolerانس انعطاف پذیری (ΔF) در شکل (۵) رسم شده است. براساس این شکل دیده می شود که با افزایش ΔF ، هزینه کاهش می یابد. زیرا که در این شرایط هزینه بهره برداری منابع، ذخیره سازها و بارهای پاسخده کاهش می یابد. به عنوان مثال، در صورتی ΔF افزایش یابد، پس اهمیت انعطاف پذیری شبکه کاهش می یابد. از اینرو طرح های پاسخگویی بار و سیستم های ذخیره ساز 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 بهره برداری آنها دارد.

جدول (۳): میزان مورد انتظار شاخص های اقتصادی و بهره برداری به

$\Delta F = 0.05 \text{ p.u}$ ازای						
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

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

integrated renewable energy sources. *Energy Conversion and Management*, 65, 697-703, 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*, 31, 100684, 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*, 239, 122080, 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*, 300, 117395, 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*, 15(3), 1250-1260, 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*, 13(3), 3433-3442, 2019.

Roustaei, M., & Kazemi, A. *Multi-objective energy management strategy of unbalanced multi-microgrids considering technical and economic situations*. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 10448, 2021a.

Roustaei, 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*, 194, 106970, 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*, 187, 106435, 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*, 4, 2005-2015, 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*, 8, 54456-54464, 2020.

virtual power plant. *Electric Power Systems Research*, 194, 107085, 2021.

Bozorgavari, S. A., Aghaei, J., Pirouzi, S., Vahidinasab, V., Farahmand, H., & Korpås, M. *Two-stage hybrid stochastic/robust optimal coordination of distributed battery storage planning and flexible energy management in smart distribution network*. *Journal of Energy Storage*, 26, 100970, 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 2016 IEEE 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*, 188, 116055, 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*, 24, 100400, 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*, 12(1), 000, 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*, 3(3), 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*, 15(9), 1451-1462, 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*, 13(4), 511-520, 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*, 13(5), 785-800, 2019.

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

Kiani, H., Hesami, K., Azarhooshang, A., Pirouzi, S., & Safaei, S. *Adaptive robust operation of the active distribution network including renewable and flexible sources*. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 26, 100476, 2021.

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*, 60(4), 1668-1677, 2012.

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

زیر نویس ها

- 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

-
- 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