

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.

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، امیرحسین 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 بلوك‌های 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. بلوك 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 بروی ریز شبکه شعاعی ۱۱۹ باسه، نتایج عددی بدست آمده تأیید کننده قابلیت طرح در بهبود همزمان وضعیت اقتصادی و بهره‌برداری ریز شبکه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری ریز شبکه، بلوك 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 باید. از این‌رو استفاده از واحدهای جمع‌کننده مانند ریز شبکه^۱ برای منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده جهت برقراری کنترل و مدیریت ساده‌تر Chowdhury و مطلوب‌تر این عناصر مدد نظر قرار گرفت (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 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 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 (AkbaiZadeh, Niknam, & Kavousi-Fard, ۲۰۲۱). به عنوان مثال، منابع انرژی تجدیدپذیر^۲ به علت دارای بودن سطح آلایندگی و هزینه بهره‌برداری بسیار پایین موجب تأمین انرژی پاک و کم هزینه در شبکه می‌شوند (Nikolova, ۲۰۱۳). سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی^۳ و طرح‌های پاسخگویی بار^۴ با مدیریت انرژی قادر به پیک‌سایی مشخصه بار شبکه هستند، که نتیجه در بهبود شاخص‌های بهره‌برداری

Norouzi, Aghaei, Pirouzi, et al., (۲۰۲۲Aghaei, Pirouzi, & Lehtonen, ۲۰۲۲Niknam, Pirouzi, & Lehtonen, ۲۰۲۰) نیز اجراء شد، با این تفاوت که در آن یک مدل دو سطحی برای بهره‌برداری ریز شبکه ارائه شده است. به طوری که سطح بالای آن جهت محاسبه قیمت انعطاف‌پذیری استفاده شد و سطح پایین آن برای بهره‌برداری بهینه از ریز شبکه استفاده گردید. در (Homayoun, Bahmani-Firouzi, & Rizvani, ۲۰۲۱Niknam, ۲۰۲۰)، بهره‌برداری ریز شبکه دارای بلوک حرارتی ارائه گردید، که در بلوک حرارتی مدل تجمعی شده بار حرارتی، بویله، ذخیره‌ساز حرارتی و سیستم تجدید‌پذیرها و میکروتوبرین^{۱۷} در کنار شبکه همچنین منابع انرژی تجدید‌پذیرها و میکروتوبرین^{۱۸} در کنار شبکه توزیع نیز عهده‌دار تغذیه انرژی مصرفی الکتریکی ریز شبکه بودند. در (Yu, Cai, & Huang, ۲۰۲۰)، مدیریت انرژی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در ریز شبکه 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/دشوار در ساعت‌کم‌باری/پرباری با قیمت انرژی Hooshmand پایین/بالا در زمینه پیک‌سایی شبکه مناسب باشند. در (Hooshmand & Rabiee, ۲۰۱۹& Rabiee, ۲۰۱۹) بهره‌برداری و برنامه‌ریزی بهینه ریز شبکه 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 مغایدی در ریز شبکه 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 با 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 گستته برای حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برده است.

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

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

برقراری سیستم مدیریت توان^{۱۸} مناسب در ریز شبکه و ارائه یک فرمول‌بندی بهینه بهره‌برداری شبکه است.

در زمینه بهره‌برداری بهینه ریز شبکه تحقیقات مختلفی انجام شده است. در (Dini, Pirouzi, Norouzi, & Lehtonen, ۲۰۲۰) نویسنده‌گان بهره‌برداری بهینه منابع و ذخیره‌سازها در ریز شبکه دارای بارهای پاسخ‌ده را ارائه داده‌اند. در این طرح، کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری ریز شبکه و منابع به عنوان تابع هدف مدل نظر بوده است و مقید به مدل بهره‌برداری شبکه و عناصر یاد شده در کنار محدودیت‌های فنی مختلف شبکه است. در ادامه یک مدل خطی سازی 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, ۲۰۲۱) نیز بهره‌برداری چند هدفه چندین ریز شبکه بر پایه سیستم مدیریت انرژی جهت دستیابی به ریز شبکه با قابلیت اطمینان^{۱۹} بالا دارای انرژی پاک و وضعیت بهره‌برداری بهینه ارائه می‌شود. از این‌رو مسئله پیشنهادی هزینه مورد انتظار بهره‌برداری ریز شبکه و منابع تجدیدنپذیر، انرژی مورد انتظار تغذیه نشده^{۲۰} به عنوان شاخص قابلیت اطمینان، میزان مورد انتظار آلودگی زیست محیطی و تابع انحرافات ولتاژ^{۲۱} در توابع هدف مختلف کمینه‌سازی می‌کند. همچنین این طرح مقید به معادلات پخش توان بهینه^{۲۲} در ریز شبکه‌ها، قیود قابلیت اطمینان، مدل ریاضی منابع و بارهای فعلی^{۲۳} می‌باشد. در ادامه برنامه‌ریزی تصادفی^{۲۴} مبتنی بر روش ترکیبی شبیه‌سازی مونت کارلو^{۲۵} و تکنیک کانترویج جهت مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار مصرفی، قیمت انرژی توان تولیدی منابع تجدید‌پذیر، تقاضای انرژی برخی از بارهای فعلی و دسترس پذیری تجهیزات ریز شبکه‌ها استفاده می‌شود. علاوه بر این، جهت دستیابی به راه حل بهینه مطمئن از الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی دسته گرگ‌ها^{۲۶} و بهینه‌سازی آموزش و یادگیری^{۲۷} استفاده می‌گردد. طرحی همانند Roustaee & Kazemi, (۲۰۲۱Roustaee & Kazemi, ۲۰۲۱) اجراء شد، با این تفاوت که آن بر روی ریز شبکه نامتعادل مورد تحلیل قرار گرفت. در (Norouzi, Aghaei, Pirouzi, Niknam, & Roustaei, ۲۰۲۲Fotuhi-Firuzabad, ۲۰۲۲) مدیریت توان منعطه ریز شبکه 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 فر برقی و پارکینگ خودروهای الکتریکی بود. مسئله مذکور کمینه‌سازی تفاوت هزینه مورد انتظار خرید انرژی و سود مورد انتظار انعطاف‌پذیری منابع انعطاف‌پذیر مقید به پخش توان بهینه جریان متناوب ریز شبکه در حضور منابع انرژی‌های تجدید‌پذیر و منابع انعطاف‌پذیر بعلاوه قیود انعطاف‌پذیری بر عده 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, ۲۰۲۱)

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 ریز شبکه قرار دارد که بار حرارتی موجود باشد. در ادامه، طرح پیشنهادی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی بیان می‌شود. در مدل تصادفی آن، تابع هدف آن برابر کمینه‌سازی متفاوت مجموع هزینه بهره‌برداری تولیدات پراکنده و ریز شبکه 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 ریز شبکه است. در این طرح به منظور جبران شکاف تحقیقاتی دوم، حضور منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده 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 ذخیره‌سازها قادر هستند که توان راکتیو عبوری از سیستم خود را کنترل کنند. از این‌رو آنها با کنترل توان راکتیو خود می‌توانند از بازار توان راکتیو کسب منفعت داشته باشد. لذا در تابع هدف پیشنهادی، بهینه‌سازی (کمینه‌سازی فرینه) درآمد منابع و ذخیره‌سازها در بازار توان راکتیو لحاظ می‌شود. این طرح دارای عدم قطعیت‌های قیمت ارزی، توان تجدیدپذیر و بار مصرفی است. لذا به منظور حذف شکاف تحقیقاتی سوم، آنها براساس روش انتقال بی‌بی^۱ 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 ریز شبکه 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 ریز شبکه 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 بی‌بی 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 ریز شبکه در حضور منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده مناسب با محیط بازار انرژی و توان راکتیو روز- بعد در چارچوب بهینه‌سازی تصادفی ارائه می‌شود. این طرح کمینه‌سازی متفاوت هزینه بهره‌برداری مورد انتظار تولیدات

بوده است. علاوه بر این، در بیشتر تحقیقات مرتبط به مدیریت انرژی ریز شبکه، 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 ریز شبکه 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 ریز شبکه 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 ریز شبکه و عناصر 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 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 مسئله بهره‌برداری دارای زمان پایینی (عموماً کمتر از یک ساعت) است. لذا در این مسئله اهمیت زمان محاسباتی پایین بالا خواهد بود (Xie et al., ۲۰۱۶). برای دسترسی به این مورد نیاز است که حجم مسئله 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 راه حل 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 (& Kazemi, ۲۰۲۱). به عنوان مثال برای بررسی وضعیت انعطاف‌پذیری ریز شبکه 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 ریز شبکه دارای بلوک حرارتی، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، طرح‌های پاسخگویی بار و تولیدات پراکنده^{۱۸} مناسب 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

بر حسب P^{DR} , H^{DR} توان اکتیو و حرارتی در طرح پاسخ‌گویی بار بر حسب P^{RES} , Q^{RES} توان اکتیو و راکتیو منابع انرژی تجدیدپذیر بر حسب Q^{ESS} , توان راکتیو سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر حسب Cost هستد. بر حسب \$ معرف تابع هزینه ریزشبكه است.

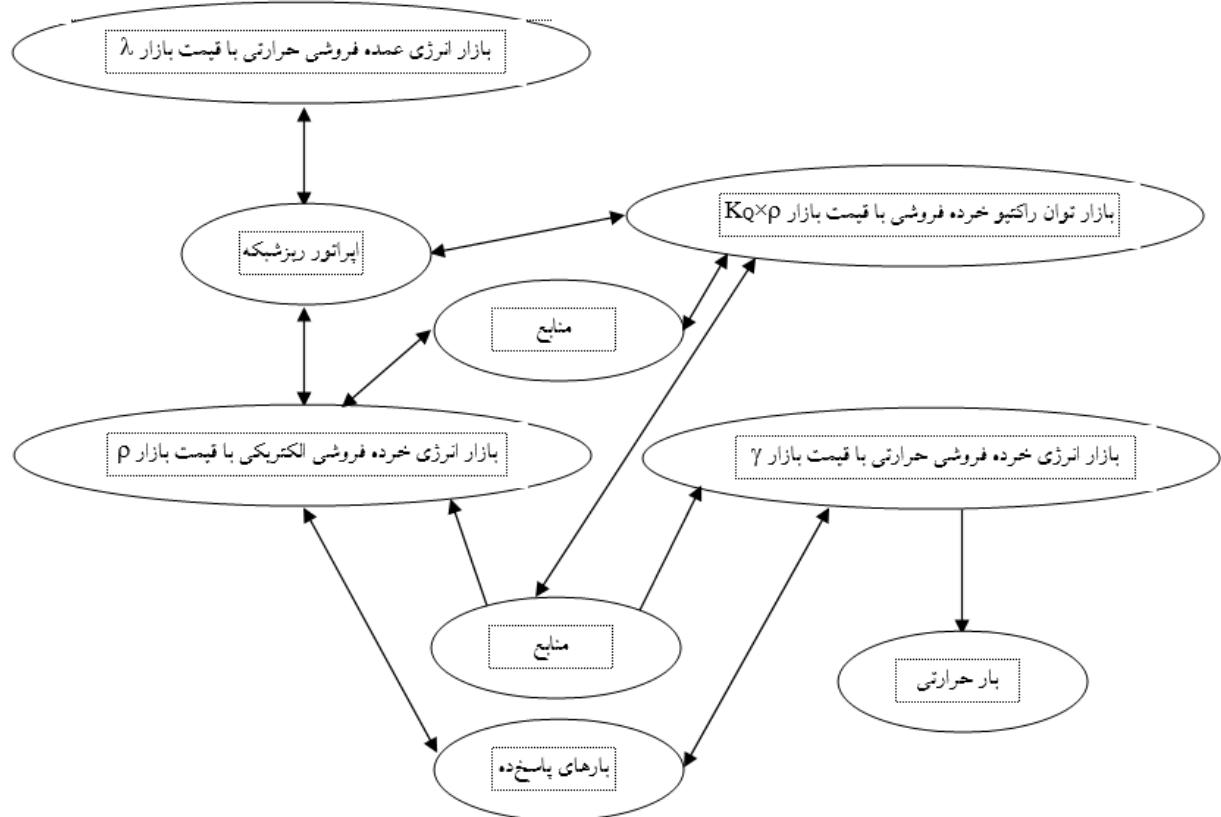
در رابطه (۱) تابع هدف طرح پیشنهادی فرمول‌بندی شده است، و آن برابر با کمینه‌سازی متفاوت هزینه بهره‌برداری مورد انتظار ریزشبكه و تولیدات پراکنده تجدیدناپذیرها (Roustaee & Kazemi, ۲۰۲۱) با درآمد مورد انتظار منابع، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخ‌ده در بازار انرژی و توان راکتیو (Kiani, Hesami, Azarhooshang, Pirouzi, ۲۰۲۱& Safaeef, ۲۰۲۱) است. به طوری که هزینه بهره‌برداری ریزشبكه که بیانگر هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست است، در بخش اول رابطه (۱) مدل‌سازی شده است (Roustaee & Kazemi, ۲۰۲۱). 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 بوک 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 ریزشبكه برقرار است، و همچنین خود ریزشبكه از بازار عمده فروشی در شبکه بالادست خرید توان دارد. از این‌رو قیمت خرید انرژی ریزشبكه (۱) متفاوت با قیمت فروش انرژی بازار خرده فروشی (۲) 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 $K_{Q\times P}$ علاوه بر این، براساس (Kiani et al., ۲۰۲۰; Dini et al., ۲۰۲۱) عموماً منابع توان راکتیو به ازای تقاضای ریزشبكه 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 مدد شارژ (دریافت توان از بازار خرده فروشی) کار کنند، میزان درآمد آنها منفی خواهد بود که این به معنی هزینه برای آنها است.

پراکنده تجدیدناپذیر^۱ و ریزشبكه 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 متنابوب، مدل بهره‌برداری تولیدات پراکنده تجدیدناپذیر، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، طرح‌های پاسخ‌گویی بار و بلوك حرارتی و محدودیت انعطاف‌پذیری ریزشبكه می‌باشد. فرض بر این است که در باس‌هایی از ریزشبكه که مصرف کننده حرارتی وجود دارد، بلوك 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) قبل نگارش می‌باشد:

$$\min C_{ost} =$$

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

که λ قیمت خرید انرژی الکتریکی ریزشبكه از بازار بالادستی بر حسب α^{MT} , β^{MT} , χ^{MT} , \$/MWh (به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب تابع هزینه بهره‌برداری میکروتوربین به ترتیب بر حسب α^{CHP} , β^{CHP} , χ^{CHP} نمایانگر ضرایب تابع هزینه بهره‌برداری سیستم ترکیبی برق و حرارت به ترتیب بر حسب α^{BO} , β^{BO} , χ^{BO} ضرایب تابع هزینه بهره‌برداری بویلر به ترتیب بر حسب α^{BO} , β^{BO} , χ^{BO} و K_Q (\$/MWh) خرده فروشی بر حسب (α^{BO} , β^{BO} , χ^{BO}) و γ نسبت قیمت توان راکتیو به قیمت انرژی هستند. s , b , h , ref , SC , OH و Bus به ترتیب اشاره به مجموعه سناریو، ساعت بهره‌برداری و باس هستند. 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 P^{CHP} , Q^{CHP} توان اکتیو و راکتیو و راکتیو سیستم ترکیبی برق و حرارت بر حسب (p.u)، H^{CHP} , H^{BO} ، P^{CH} , P^{DCH} توان حرارتی سیستم ترکیبی برق و حرارت و بویلر (p.u)، شان‌دهنده توان اکتیو شارژی و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی



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

$$Q_{b,k,h,s}^L = -B_{b,k} (V_{b,h,s})^2 + V_{b,h,s} V_{k,h,s} \times \{G_{b,k} \cos(\delta_{b,h,s} - \delta_{k,h,s}) - B_{b,k} \sin(\delta_{b,h,s} - \delta_{k,h,s})\}, \forall b, k, h, s \quad (۵)$$

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

$$\sqrt{(P_{b,k,h,s}^L)^2 + (Q_{b,k,h,s}^L)^2} \leq S_{b,k}^{Lu} \quad \forall b, k, h, s \quad (۷)$$

که نمایانگر حداقل مقدار مجاز توان ظاهری عبوری از خط توزیع است که بر حسب پریونیت است.

$$\sqrt{(P_{b,h,s}^G)^2 + (Q_{b,h,s}^G)^2} \leq S_b^{Gu} \quad \forall b = ref, h, s \quad (۸)$$

که نمایانگر حداقل مقدار مجاز توان ظاهری عبوری از پست توزیع است که بر حسب پریونیت است.

$$\frac{P_{b,h,s}^G}{\sqrt{(P_{b,h,s}^G)^2 + (Q_{b,h,s}^G)^2}} \geq PF_l \quad \forall b = ref, h, s \quad (۹)$$

که PF_l حداقل مقدار مجاز ضریب قدرت است.

$$V^l \leq V_{b,h,s} \leq V^u \quad \forall b, h, s \quad (۱۰)$$

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

قیود بهره‌برداری ریز شبکه تحت عنوان پخش توان بهینه جریان متناوب در روابط (۲)-(۱۰) مدل‌سازی شده است (Bozorgavari et al., 2019; Faraji, Abbas, Nejatian, Zadehbagheri, & 2021; Norouzi et al., 2022; Parvin, 2022) متناسب با

قیود توابع هدف به شرح زیر می‌باشند:

$$P_{b,h,s}^G + P_{b,h,s}^{MT} + P_{b,h,s}^{RES} + P_{b,h,s}^{CHP} + (P_{b,h,s}^{DCH} - P_{b,h,s}^{CH}) + P_{b,h,s}^{DR} - \sum_{k \in Bus} A_{b,k}^L P_{b,k,h,s}^L = P_{b,h,s}^D \quad \forall b, h, s \quad (۲)$$

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

$$Q_{b,h,s}^G + Q_{b,h,s}^{MT} + Q_{b,h,s}^{RES} + Q_{b,h,s}^{CHP} + Q_{b,h,s}^{ESS} - \sum_{k \in Bus} A_{b,k}^L Q_{b,k,h,s}^L = Q_{b,h,s}^D \quad \forall b, h, s \quad (۳)$$

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

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

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

توان اکتیو قابل تولید متناسب با شرایط آب و هوایی (P^{RESu}) را به ریزشبکه تزریق می کنند. در قید (۱۴) نیز محدودیت توان ظاهری قابل انتقال توسعه این منابع در نظر گرفته شده است. بایستی توجه کرد که منابع انرژی تجدیدپذیر با نوع فتوولتائیک توسط مبدل DC/AC به شبکه متصل می شود، که با در نظر گرفتن وجود پل IGBT در این مبدل، آن قادر است که توان اکتیو و راکتیو فتوولتائیک را همزمان کنترل کند (۲۰۱۹Pirouzi et al.,). منابع انرژی تجدیدپذیر با نوع سیستم بادی نیز توسط مبدل AC/AC به شبکه متصل می شود و آن نیز دارای ژنراتور القایی است (۲۰۱۹Pirouzi et al.,). 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.

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

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

که P^{CHu} , P^{DCHu} حداکثر مقدار مجاز توان اکتیو شارژ و دشارژ سیستم ذخیره ساز انرژی بر حسب (p.u) و x متغیر باینری متناظر با عملکرد شارژ/دشارژ سیستم ذخیره ساز 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} راندمان شارژ و دشارژ در سیستم ذخیره ساز انرژی است. نیز معرف انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز بر حسب پریونیت است.

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

که E^{ini} انرژی اولیه در سیستم ذخیره ساز 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^u , E^l حداقل و حداکثر مقدار مجاز انرژی قابل ذخیره در سیستم ذخیره ساز 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 ذخیره ساز انرژی بر حسب (p.u) است.

فرمول بندی 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 بهره برداری، محدودیت انرژی قابل ذخیره، و محدودیت ظرفیت شارژر ذخیره ساز هستند (۲۰۲۱Asl et al.,). در قیود (۱۵)-(۱۶)، متغیر باینری x به منظور جلوگیری از عملکرد همزمان ذخیره ساز در مد شارژ و دشارژ استفاده می شود. به طوری که $x = 1$ عملکرد ذخیره ساز در مد شارژ است، در غیر این صورت آن در مد دشارژ فعالیت می کند. همچنین در این مقاله فرض بر این است که ذخیره سازها یا از طریق شارژر دارای پل IGBT به شبکه متصل می شوند (مانند باتری) (۲۰۱۹Pirouzi et al.,) و یا دارای ژنراتور سنکرون می باشند (مانند ذخیره ساز هوای فشرده). از اینرو ذخیره ساز قادر به کنترل همزمان توان اکتیو و راکتیو خود

قیود پخش توان جریان متناوب می باشند (۲۰۲۲Faraji et al., ۲۰۲۱Norouzi et al.,) که به ترتیب معرف تعادل توان اکتیو و راکتیو در باس های ریزشبکه، محاسبه توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط توزیع و میزان زاویه ولتاژ باس مرجع^{۲۲} هستند. محدودیت های بهره برداری ریزشبکه نیز در روابط (۷)-(۱۰) ارائه شده است (۲۰۱۹Bozorgavari et al., ۲۰۲۱Norouzi et al.,). در رابطه (۷) / (۸)، محدودیت ظرفیت خط توزیع / پست توزیع مدنظر است، که براساس آن خط توزیع / پست توزیع قادر به انتقال حداکثر توان ظاهری S^{Gu} / S^{Lu} از خود می باشد. قید (۹) نیز اشاره به محدودیت ضریب قدرت پست توزیع دارد، که براساس آن، این پست همواره بایستی در کلیه ساعت های بهره برداری دارای ضریب قدرتی بیش از PF_1 عموماً دارای مقدار ۰/۹ است (باشد). محدودیت دامنه ولتاژ باس های ریزشبکه نیز در رابطه (۱۰) فرمول بندی شده است. قید حد بالای (پایین) آن به منظور جلوگیری از آسیب های عایقی تجهیزات (خاموشی مصرف کننده ها) در اثر اضافه (افت) ولتاژ استفاده می گردد. در این قیود فرض بر این می باشد که ریزشبکه از طریق پست توزیع مستقر در باس مرجع به شبکه بالادست متصل می شود. لذا متغیر های P^G و Q^G تنها به ازای باس مرجع مقدار دارند و در دیگر باس ها آنها برابر صفر هستند. این شرایط برای عملکرد ریزشبکه در ملاقات به شبکه^{۲۳} است. در صورتی که آن در مد جزیره ای فعالیت کند، لذا ریزشبکه از شبکه بالادست قطع ایست، و پس متغیر های P^G و Q^G در کلیه باس ها دارای مقدار صفر هستند.

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

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

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

که Q^{MTl} , Q^{MTu} حداکثر و حداقل مقدار مجاز توان راکتیو میکرو توربین 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 بهره برداری میکرو توربین، (۱۱)-(۱۲)

و منابع انرژی تجدیدپذیر، (۱۳)-(۱۴)، هستند. محدودیت های (۱۱) و (۱۲) اشاره به مدل منحنی قابلیت میکرو توربین دارند که به

ترتیب بیانگر محدودیت توان اکتیو تولید و توان راکتیو قابل کنترل این نوع تولیدات پراکنده تجدیدناپذیر دارند (۲۰۲۰Dini et al.,). در رابطه

(۱۳) میزان توان اکتیو تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه شده است (۲۰۲۱Asl et al.,). از آنجا که هزینه بهره برداری این منابع بسیار پایین است، عموماً آنها براساس این رابطه توان اکتیوی برابر با حداکثر

سیگنال قیمت انرژی، انرژی مصرفی خود را کاهش یا افزایش می‌دهند. به عبارتی، در طرح پاسخ‌گویی بار به منظور کمینه‌سازی رابطه (۱)، مصرف کننده‌ها 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 مصرف کننده‌ها در طرح پاسخ‌گویی بار است، و آنها براساس این رابطه حداکثر با ضریب مشارکت ۳ در طرح پاسخ‌گویی بار شرکت می‌کنند. علاوه بر این فرض شده است که در این طرح پاسخ‌گویی بار، مصرف کننده‌ها 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 پاسخ‌گویی بار تنها برای مدیریت انرژی استفاده می‌شود. لذا پاسخ‌گویی 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 ترانس 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^۵ 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 کند و انعطاف‌پذیری شبکه را ارتقاء دهند. برای برقراری چنین شرایطی، از منظر مدل‌سازی ریاضی می‌توان ماقفایوت 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، به طوری که اگر ترانس 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 ، P^{RESu} و $Q^{D,u}$ ، بار، H^D ، P^D و Q^D ، حداکثر توان اکتیو تجدیدپذیر، ρ ، γ ، به صورت 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 ۱۵ سناریو استخراج و به مسئله بهره‌برداری ریزشبکه پیشنهادی اعمال می‌کند. در این روش n معرف تعداد پارامترهای عدم قطعیت است. از

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

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

H^D بار حرارتی بر حسب (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 نشان‌دهنده راندمان توربین، تلفاتی و حرارتی در سیستم ترکیبی برق و حرارت هستند.

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

که P^{CHPI} ، P^{CHPu} به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار مجاز توان راکتیو سیستم ترکیبی برق و حرارت بر حسب (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 بر حسب (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 بر حسب (p.u) هستند.

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

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

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

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

که ۳ ضریب نرخ مشارکت در طرح پاسخ‌گویی بار است.

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

بلوک حرارتی شامل سیستم ترکیبی برق و حرارت، بویلر و مصرف کننده‌های 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.

به طوری 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)-

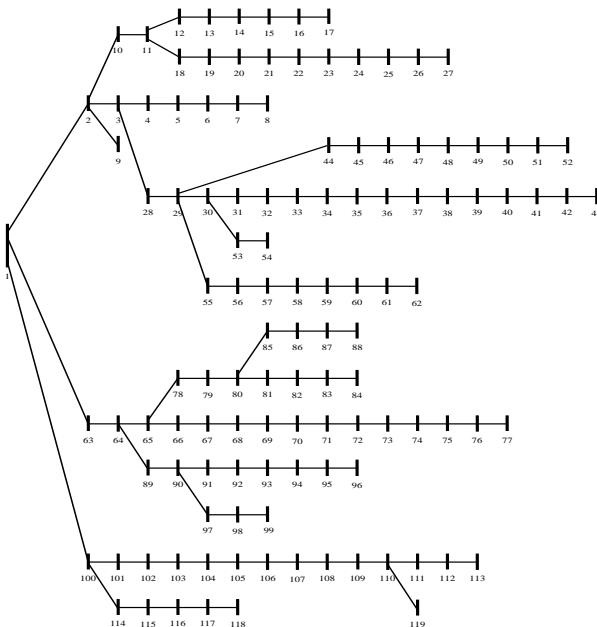
(۲۴) فرمول‌بندی منحنی قابلیت سیستم ترکیبی برق و حرارت در بخش الکتریکی ارائه شده است، که این قیود به ترتیب اشاره به محدودیت توان اکتیو و راکتیو قابل کنترل توسط سیستم ترکیبی برق و حرارت را دارند. محدودیت توان حرارتی قابل تولید توسط سیستم

ترکیبی برق و حرارت نیز در رابطه (۲۵) در نظر گرفته شده است. محدودیت 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.

به طوری که مصرف کننده‌ها در این طرح پاسخ‌گویی بار با توجه به

۱۰۸ مستقر هستند. حداقل (حداکثر) توان اکتیو و راکتیو میکروتوربین به ترتیب برابر $W \cdot kW$ (۶۰۰) و $kVAr$ (۲۵۰) است و ظرفیت (حداکثر توان ظاهری) سیستم بادی و فتوولتائیک به ترتیب برابر kVA (۵۰۰) و kVA (۶۰) 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 خرده فروشی در (Dini et al., ۲۰۲۱Kiani et al., ۲۰۲۱) براساس K_Q (۰.۸٪) برابر است. و فرض شده است که λ برابر ۹۰٪ قیمت انرژی الکتریکی (ρ) است. ΔF نیز جهت دسترسی به انعطاف پذیری بالا در ریز شبکه برابر ۰/۰۵ پریونیت اتخاذ شده است.



شکل (۱): ریز شبکه ۱۱۹-بازه {۲۲# ۲۰۱۳Ghasemi,

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 حل کننده مناسب: در این بخش نتایج همگرایی طرح پیشنهادی بدست آمده توسط حل کننده‌های ریاضی SBB و LINDOGLOBAL، BONMIN، COUENNE، OQNLP (Kallrath, ۲۰۱۲) و الگوریتم‌های تکاملی مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Nagy, Zeineldin, & Woon, ۲۰۱۲)، الگوریتم سینوس-کوسینوس (Sarwagya, Nayak, & Ranjan, ۲۰۲۰)، الگوریتم جستجوی کلاغها (Askarzadeh, ۲۰۱۶)، الگوریتم گرم شبتاب (Homayoun et al., ۲۰۲۱) و بهینه‌سازی شیرمورچه (Shabatab, ۲۰۲۱)

آنچه 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

۱- مورد مطالعاتی

در این بخش، طرح پیشنهادی بر روی ریز شبکه ۱۱۹-بازه همانند شکل (۱) (Ghasemi & Moshtagh, ۲۰۱۳) اعمال می‌شود.

این شبکه دارای توان مبنای $10 MVA$ و ولتاژ مبنای $11 kV$ است. حداقل و حداکثر دامنه مجاز ولتاژ به ترتیب برابر $0/9$ و $1/0/5$ پریونیت است (Ghasemi & Moshtagh, ۲۰۱۳). داده‌های پیک بار Ghasemi & Moshtagh, (۲۰۱۳Moshtagh, ۲۰۱۳) ارائه شده است. علاوه بر این، میزان بار الکتریکی در ساعات مختلف برابر حاصل ضرب پیک بار و ضربی بار است، که منحنی روزانه مورد انتظار این ضربی در (Asl et al., ۲۰۲۱) ارائه شده است. این شبکه دارای ۷ بلوک حرارتی است که موقعیت آنها در باس‌های ۱۱۵، ۱۱۰، ۹۷، ۸۱ و ۱۱۵ است. هر بلوک دارای یک سیستم ترکیبی برق و حرارت، یک بویلر و یک طرح پاسخ‌گویی بار است، به طوری که حداقل (حداکثر) مقدار توان اکتیو، راکتیو و حرارتی سیستم ترکیبی برق و حرارت به ترتیب برابر $W \cdot kW$ (۸۰۰)، $kVAr$ (۵۰۰) و kW (۴۰۰) است. همچنین راندمان‌های η^T و η^H به ترتیب برابر $0/4$ و $0/0/8$ هستند. علاوه بر این، حداقل (حداکثر) توان حرارتی بویلر برابر kW (۵۰۰) می‌باشد. ضرایب هزینه سوخت (α, β, γ) برای میکروتوربین، سیستم ترکیبی برق و حرارت و بویلر به ترتیب برابر (۱۰۰، ۲۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۱۷، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۱۲) می‌باشد. سیستم ذخیره‌ساز انرژی در بخش دارای نوع باتری با راندمان شارژ/دشارژ $/90$ ٪ است که نرخ شارژ/دشارژ آن برابر $150 kW$ ، ظرفیت شارژر برابر $200 kVA$ و حداقل و حداکثر انرژی قبل ذخیره در آن برابر $500 kWh$ است. هر بلوک حرارتی دارای بار با مقدار پیک kW ۷۵۰ است، که منحنی روزانه مورد انتظار ضری بار آن در (Faraji et al., ۲۰۲۲) ارائه شده است. در طرح پاسخ‌گویی بار نیز عبارت \bar{y} برابر $0/3$ 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، ۳۰، ۱۱، ۶۵، ۳۰ و ۱۰۴ قرار دارند، و میکروتوربین‌ها در باس‌های ۲۳، ۳۷، ۷۱ و ۹۰

; ۲۰۱۳; Nikolova et al., ۲۰۱۹; Jithendranath & Das, ۲۰۱۶
۲۰۲۰ 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 راحل بهینه نیستند. از بین BONMIN، OQNLP و LINDOGLOBAL، حل کننده BONMIN توانسته است که کمینه‌ترین هزینه را نسبت به دو حل کننده 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، الگوریتم حل مطلوب‌تری است. در الگوریتم‌های تکاملی، شیرمورچه نسبت به بهینه‌سازی ازدحام ذرات، سینوس-کوسینوس، جستجوی کلاع و کرم شبتاب توانسته است که راحل 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 راحل بهینه دست یافت است، پس آن دارای سرعت همگرایی بالاتری نسبت به حل کننده‌های ریاضی است. بنابراین در این مقاله الگوریتم شیرمورچه یک حل کننده مناسب‌تر نسبت به دیگر حل کننده‌های یاد شده است.

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

حل کننده‌های مختلف

همگرایی	هزینه(\$)	حل کننده	زمان همگرایی (min)	تعداد تکرار
COUENNE	عدم توانایی در دستیابی به راحل بهینه			
BONMIN	-۱۷۲۹/۷		۴۰/۵	۴۳/۵
LINDOGLOBAL	-۱۵۳۷/۴		۴۹۵	۶۰/۳
SBB	عدم توانایی در دستیابی به راحل بهینه			
OQNLP	-۱۴۵۲/۶		۵۶۴	۲۱/۷
PSO	-۱۸۰۵/۱		۳۵۲۲	۱۹/۸
SCA	-۱۸۸۶/۴		۳۰۲۸	۱۷/۹
CSA	-۱۹۲۱/۷		۲۷۸۱	۱۳/۸
FFA	-۱۹۶۷/۲		۲۴۶۳	۱۲/۳
ALO	-۲۰۳۲/۸		۲۰۷۵	۱۰/۵

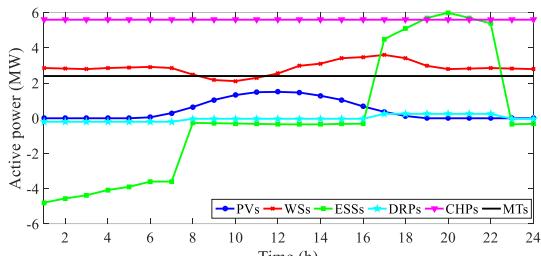
ب) بررسی وضعیت بهره‌برداری و اقتصادی منابع انرژی

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

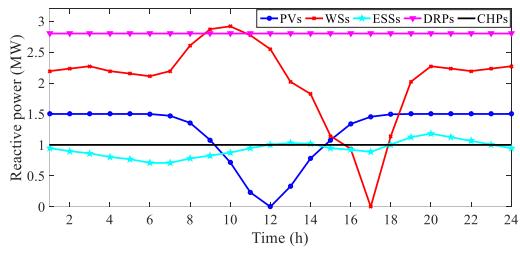
) ۲۰۱۹ Jithendranath & Das, ۲۰۱۶) ارائه می‌شود. برای حل مسئله پیشنهادی توسط الگوریتم‌های ریاضی، مدل مسئله در محیط نرم افزار بهینه‌سازی GAMS کدنویسی می‌شود و هر کدام از الگوریتم‌های مذکور در این نرم افزار دارای تولباکس هستند (Kallrath, ۲۰۱۲). ولی برای حل این مسئله با الگوریتم‌های تکاملی، طرح پیشنهادی 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} , P^{DR} , Q^{CHP} , P^{CHP} , Q^{ESS} , P^{DCH} , Q^{RES} , P^{MT} , Q^{MT} و P^{PM} مناسب با محدودیت عملکرد آنها به ترتیب در معادلات (۱۱)، (۱۲)، (۱۳)، (۱۴)-(۱۸)، (۲۱) و (۲۲) محدودیت محاسبه می‌شود. به طوری که مقادیر P^{RES} , E^{CHP} و H^{BO} به ترتیب از قیود (۱۳)، (۱۷)-(۲۱)، (۲۲) و (۲۳) تعیین می‌شوند. سپس میزان متغیرهای وابسته از قبیل $Cost$, P^G , Q^G , P^L , Q^L , δ , V , E از معادلات (۲)-(۶)، (۱۳)، (۱۷)-(۲۱)، (۲۲) و (۲۳) محاسبه می‌شود. به طوری که مقادیر E و H^{CHP} به ترتیب از قیود (۱۳)، (۱۷)-(۱۸)، (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) تعیین می‌شوند، و مقادیر متغیرهای وابسته دیگر از قیود پخش توان، (۲)-(۶)، محاسبه می‌شوند. در این مقاله برای حل مسئله پخش توان از Ghasemi & Moshtagh, (۲۰۱۳) در ادامه تابع برازندگی برای N مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری محاسبه می‌شود. در این مقاله به منظور برآورد محدودیت‌های بهره‌برداری، (۱۰)-(۱۴)، محدودیت ظرفیت منابع انرژی تجدیدپذیر، ظرفیت شارژ آن، (۱۹)-(۲۰)، محدودیت توان حرارتی سیستم ترکیبی و بویلر، (۲۵)-(۲۶)، و قید طرح پلسخ‌گویی بار، (۲۸)، تابع برازندگی (FF) برابر با کمینه‌سازی مانفآلت تابع هدف اصلی، (۱)، و مجموع توابع جریمه (PeF) خواهد بود (Nikolova et al., ۲۰۱۳).

مجموعه نیز برای محدودیت $a \leq b$ و $a = b$ به ترتیب به صورت جریمه نیز برای محدودیت $a \leq b$ و $a = b$ به قید $\mu \geq 0$ و $\mu \in (-\infty, +\infty)$ است، که $a - b \leq \kappa$ است. ضرایب لاغرانژ هستند که مقادیر آنها همانند متغیر تصمیم‌گیری توسط الگوریتم تکاملی تعیین می‌شود. در ادامه مراحل بهینگامسازی متغیرهای تصادفی و ضرایب لاغرانژ توسط این الگوریتم مبنی بر محدودیت عملکرد آنها و بهینه‌سازی میزان بارگذاری در مرحله قبل انجام می‌شود. فرآیند بهینگامسازی با توجه به نوع الگوریتم تکاملی متفاوت است که آن برای بهینه‌سازی آموزش و یادگیری، Bozorgavari et al., ۲۰۲۲؛ Faraji et al., ۲۰۱۶؛ Chen et al., ۲۰۱۹ et al., ۲۰۲۱؛ Norouzi et al., ۲۰۲۱؛ Kiani et al., ۲۰۱۹ & Rabiee, ۲۰۲۰؛ 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 حداقل تکرار بهینگامسازی (I_{max}) قابل دسترسی است. میزان N و I_{max} به ترتیب برابر ۸۰ و ۴۰۰ برای الگوریتم‌های تکاملی در نظر گرفته شده‌اند، و دیگر پارامترهای تنظیم آنها از Askarzadeh, ۲۰۱۹

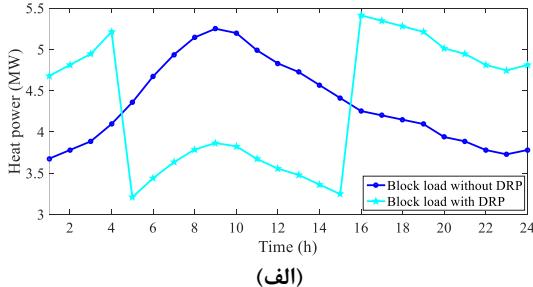
۵:۰۰ و ۱۹:۰۰-۲۴:۰۰ توان اکتیوی تولید نمی‌کنند. از اینرو آنها در این ساعات توان راکتیوی برابر با $MVAr = 1/5$ به شبکه تزریق می‌کنند. اما در ساعات دیگر که توان اکتیو تولیدی آنها افزایش می‌یابد، توان راکتیو تولیدی آنها کاهش می‌یابد. این شرایط برای سیستم‌های توربین بادی با توجه به شکل (۳) وجود دارد. اما سیستم‌های ترکیبی برق و حرارت (میکروتوربین‌ها) در کلیه ساعات، حداکثر توان راکتیو قابل تولید خود، یعنی $MVAr = 2/8$ $(2 \times 0.25 = 1 MVAr)$ را به شبکه تزریق کرده‌اند. در ادامه با مقایسه پروفیل بار ارائه شده در (۲۰۲۱ Asl et al.,) 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 منتظر 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



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 میران تابش خورشید براساس داده‌های (۲۰۲۱ Asl et al.,) 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 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 می‌فروشنند که براساس داده‌های بخش ۱-۴ در حدود $5\% / \text{MWh}$ 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 ساعت ۱۶:۰۰-۱۷:۰۰، ۲۳:۰۰-۲۴:۰۰، ۱:۰۰-۷:۰۰، ۱۱:۰۰-۱۶:۰۰ عملیات شارژ را انجام می‌دهند، به طوری که در ساعت ۱۷:۰۰-۲۲:۰۰ از مدتشارژ (دشوارش) فعالیت خواهند کرد. همچنین آنها در ساعت ۲۲:۰۰-۲۳:۰۰ در مدتشارژ فعالیت می‌کنند و توان اکتیو به ریزشبکه تزریق می‌کنند. عملکرد این عناصر متناظر با قیمت انرژی الکتریکی است. براساس (۲۰۲۰ Yu et al.,)، قیمت انرژی در ساعت ۷:۰۰-۸:۰۰ و ۲۴:۰۰-۲۳:۰۰، ۱:۰۰-۱۶:۰۰ و ۲۲:۰۰-۲۳:۰۰ به ترتیب برابر $17.6 \$ / \text{MWh}$ ، $26.4 \$ / \text{MWh}$ و $33 \$ / \text{MWh}$ است. بنابراین برای کمینه‌سازی تابع هزینه، آنها در ساعت متناظر با قیمت انرژی ارزان (گران) در مدتشارژ (دشوارش) فعالیت خواهند کرد. در نهایت توجه شود که سیستم ترکیبی حرارت و برق، میکروتوربین، سیستم ذخیره‌ساز انرژی و طرح پاسخگویی بار یک منعطف برای منابع انرژی تجدیدپذیر محاسب می‌شوند. از آنجا که منابع انرژی تجدیدپذیر در کلیه ساعت بهره‌برداری توان اکتیو تولید می‌کنند، لذا انتظار می‌رود در کلیه ساعت نیاز به کنترل انعطاف‌پذیری ریزشبکه باشد. از اینرو منابع منعطف براساس شکل (۲) در هیچ ساعت بهره‌برداری خاموش نیستند.

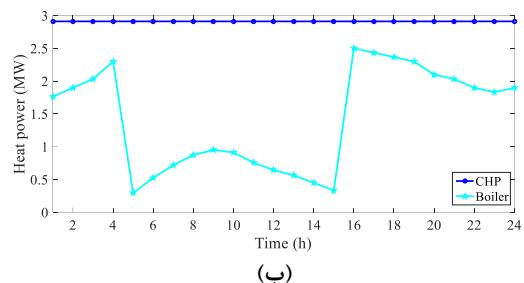
منحنی روزانه مورد انتظار توان راکتیو منابع تولیدات پراکنده و منابع انرژی تجدیدپذیر در شکل (۳) نمایش داده شده است. براساس این شکل، منابع تولیدات پراکنده در بیشتر ساعت بهره‌برداری حداکثر توان اکتیو قابل تولیدی خود را به شبکه تزریق می‌کنند. به عنوان مثال، براساس داده‌های بخش ۱-۴، حداکثر ظرفیت (توان ظاهری) سیستم‌های فتوولتائیک برابر $1/5 \text{ MVA} \times \text{PV}^0.5$ است، و سیستم‌های فتوولتائیک در ساعت ۱:۰۰-

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

(۵) 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 تنها منابع انرژی تجدیدپذیر در طرح پیشنهادی (مورد ۲) یا حضور تنها بلوک‌های حرارتی و میکروتوربین در ریزشبکه (مورد ۵) منجر به کاهش قابل توجهی در هزینه انرژی، تلفات انرژی و افت ولتاژ ریزشبکه نسبت به مورد ۱ می‌شوند. همچنین حداقل ضریب قدرت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، به طوریکه 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 (۱/۰۵) پریوینت است، که میزان آن کمتر از حد مجاز خود یعنی ۰/۰۵ (۰/۰۲) پریوینت است. علکرد سیستم‌های ذخیره انرژی در مورد ۳ اثرباری مطلوبی که در ارتقاء وضعیت تلفات انرژی، حداقل ضریب قدرت و حداکثر افت ولتاژ و اثرباری 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 پریاری 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 اکتیو تولید کنند، که این مورد ناشی از ظرفیت پایین شارژ آنها و تعداد پایین آنها نسبت به منابع تولیدات پراکنده در شبکه ۱۱۹ باشد براساس بخش ۱-۴ است. در زمینه طرح پاسخگویی بار، آن در مورد ۴ نسبت به مورد ۱ توانسته است که هزینه، تلفات انرژی،

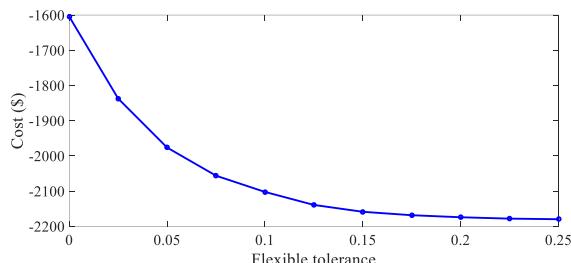


(۴) ب)

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 پاسخگویی بار حرارتی ترسیم شده است. براساس شکل (۴-الف)، طرح پاسخگویی بار حرارتی موجب کاهش مصرف انرژی حرارتی در ساعت پریاری حرارتی، ۱۵:۰۰-۱۶:۰۰، می‌شود، ولی آن در ساعت دیگر، انرژی مصرفی مصرف‌کننده‌های حرارتی را افزایش می‌دهد. براساس (Dini et al., ۲۰۱۹)، قیمت انرژی حرارتی در ساعت ۵:۰۰-۲۲ \$/MWh ۱۵:۰۰ برابر ۳۰ \$/MWh است، و دیگر ساعت آن برابر 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 ساعت‌های بهره‌برداری براساس شکل (۴-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 به صورت 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 ریزشبکه و عناصر آن از قبیل هزینه بهره‌برداری ریزشبکه، هزینه بهره‌برداری منابع تجدیدناپذیر، درآمد منابع انرژی پراکنده و هزینه خالص ریزشبکه 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 مدل سازی 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



شکل (۵): منحنی تابع هزینه بر حسب ترانس انعطاف‌پذیری

۵- نتیجه

این مقاله مسئله مدیریت توان الکتریکی و حرارتی در ریز شبکه 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 پاسخ‌گویی بار کاهش می‌باشد، با عدم تغییر وضعیت توان راکتیو نسبت به مورد I، براساس رابطه (۶)، ضریب قدرت پست توزیع نسبت به مورد I 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. به طوری 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 ۵/۰٪، ۱۷/۶٪ و ۳۸٪ می‌باشد. در نهایت، منحنی هزینه بر حسب ترانس 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 ۱۶:۰۰-۸:۰۰ و ۲۴:۰۰-۲۳:۰۰ خواهند بود و توانی از شبکه دریافت نخواهند کرد. این امر نتیجه کاهش هزینه بهره‌برداری آنها دارد.

جدول (۳): میزان مورد انتظار شاخص‌های اقتصادی و بهره‌برداری به ازای $\Delta F = 0.05 \text{ p.u}$

مورد مطالعاتی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
هزینه	۱۰۸۷۶	۶۹۳۶	۸۲۶۹	۹۹۳۸	۳۸۹۵	۲۰۳۲/۸
تلفات انرژی (MWh)	۴/۰۰۲	۵/۰۲۳۱	۵/۰۷۴۵	۴/۶۲۲	۶/۰۱۸	۰/۰۲۲
حداقل ضریب	۰/۸۰۱	۰/۸۶۹	۰/۸۲۹	۰/۷۹۱	۰/۹۰۹	۰/۹۴۲
قدرت	۰/۰۹۲	۰/۰۶۲	۰/۰۸۵	۰/۰۶۹	۰/۰۶۳	۰/۰۵۷
حداکثر افت ولتاژ (p.u)	۰/۰۲۲	۰/۰۲۱	۰	۰	۰/۰۱۷	۰
حداکثر اضافه ولتاژ (p.u)	۰	۰	۰	۰	۰	۰
هزینه انرژی می‌شود	۰/۰۵۷	۰/۰۶۳	۰/۰۸۵	۰/۰۶۹	۰/۰۶۳	۰/۰۳۲

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, 68, 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, 117795, 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), 1350-1356, 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), 2422-2442, 2019.
- Roustaee, M., & Kazemi, A. *Multi-objective energy management strategy of unbalanced multi-microgrids considering technical and economic situations.* Sustainable Energy Technologies and Assessments, 47, 101448, 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, 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, 30050-3015, 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, 54406-54464, 2020.
- virtual power plant.* Electric Power Systems Research, 194, 10784, 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 2019 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, 11655, 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), 1-10, 2022.
- Ghasemi, S., & Moshtaghi, 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, 10(3), 2013.
- Homayoun, R., Bahmani-Firooz, 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, 27, 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*

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

-
- 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