

A Decentralized Framework to Improve Resilience in Microgrids Based on Peer to Peer Transactions, Considering Independence and Privacy

Mohammad Doostizadeh¹, *Ph.D. Student*, Hassan Jalili², *Assistant Professor*, Abbas Babaei², *Assistant Professor*

¹Department of Electrical Engineering- Khomein Branch, Islamic Azad University, Khomein, Iran

²Department of Electrical Engineering- Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran
stu_doostizadeh@iaukhomein.ac.ir; h.jalili@riau.ac.ir, babaei@riau.ac.ir

Abstract

Severe events such as floods, earthquakes and hurricanes cause disruption in the operation of distribution networks and lead to their islanding. In such cases, if the distribution networks have microgrids, these microgrids are able to separate from the main network and exchange energy with each other to reduce the operation and outage costs. Therefore, the energy management in a multi-microgrid network requires a decentralized operating framework to encourage microgrids to have transactions with each other by providing the necessary incentives.

This paper develops a completely decentralized framework to improve the resilience of microgrids based on the organization of peer-to-peer energy transactions, taking into account the appropriate financial incentives for the participation of microgrids. The developed model protects the private data of each microgrid, such as load information and distributed generation resources, during market settlement. Using the developed decentralized model, microgrids can increase network resilience in the context of peer-to-peer energy exchanges, in addition to reducing their operating costs compared to the island mode. The proposed decentralized approach does not require a central controller and has a high convergence speed. Simulations are performed on a system with fourteen microgrids and the results are compared with the island approach to evaluate the performance of the proposed method. The simulations are performed in MATLAB R2020b environment using YALMIP toolbox. CPLEX 12.9 is also used to solve the optimization problem. The results show the efficiency of the proposed method in increasing the resilience and reducing the operating costs.

Keywords: decentralized scheduling, microgrid, peer to peer energy transactions, resilience

Received: 10 May 2022

Revised: 6 June 2022

Accepted: 28 July 2022

Corresponding Author: Dr. Hassan Jalili

Citation: M. Doostizadeh, H. Jalili, A. Babaei, "A decentralized framework to improve resilience in microgrids based on peer to peer transactions, considering independence and privacy", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 57, pp. 31-50, June 2024 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1403.15.57.3.2>

مقاله پژوهشی

یک چارچوب غیرمتمرکز مبتنی بر تبادل‌های انرژی رخ‌به‌رخ در ریزشبکه‌ها برای بهبود تاب‌آوری با در نظر گرفتن استقلال و حریم خصوصی

محمد دوستی‌زاده^۱، دانشجوی دکتری، حسن جلیلی^۲، استادیار، عباس بابایی^۲، استادیار

۱- گروه مهندسی برق- واحد خمین، دانشگاه آزاد اسلامی، خمین، ایران

۲- گروه مهندسی برق- واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
stu_doostizadeh@iaukhomein.ac.ir h.jalili@riau.ac.ir, babaei@riau.ac.ir

چکیده: بروز حوادث شدیدی مانند رخداد سیل، زلزله و طوفان سبب ایجاد اختلال در عملکرد شبکه‌های توزیع شده و جزیره‌ای شدن آن‌ها را به دنبال دارد. در این شرایط، در صورتی که شبکه‌های توزیع دارای ریزشبکه‌ها باشند، این ریزشبکه‌ها قادرند تا با کمک زیرساخت‌های فنی و ارتباطی خود از شبکه اصلی جدا شده و با اتصال به یکدیگر به تبادل انرژی پرداخته و هزینه‌های بهره‌برداری و خاموشی خود را کاهش دهند. بنابراین مدیریت انرژی در یک شبکه چند-ریزشبکه‌ای نیازمند یک چارچوب بهره‌برداری غیرمتمرکز است تا با ایجاد مشوق‌های لازم، ریزشبکه‌ها را تشویق به تراکنش‌های میان ریزشبکه‌ای کند.

در این مقاله یک چارچوب کاملاً غیرمتمرکز جهت بهبود تاب‌آوری ریزشبکه‌ها بر اساس سازماندهی تبادل‌های رخ‌به‌رخ انرژی آنها با در نظر گرفتن انگیزه‌های مالی مناسب جهت مشارکت ریزشبکه‌ها پیشنهاد شده است. در مدل پیشنهادی داده‌های خصوصی هر کدام از ریزشبکه‌ها مانند اطلاعات بار و منابع تولید پراکنده، در هنگام تسویه بازار محفوظ باقی می‌ماند. با استفاده از مدل غیرمتمرکز پیشنهادی، ریزشبکه‌ها می‌توانند در بستر تبادل‌های رخ‌به‌رخ انرژی، علاوه بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری خویش نسبت به حالت جزیره‌ای، تاب‌آوری شبکه را نیز افزایش دهند. رویکرد غیرمتمرکز پیشنهادی به کنترل‌کننده مرکزی نیاز نداشته و سرعت همگرایی بالایی دارد. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها برای یک سیستم دارای چهارده ریزشبکه انجام و نتایج به دست آمده با رویکرد جزیره‌ای مقایسه شده است. شبیه‌سازی‌ها در محیط متلب و با استفاده از جعبه‌ابزار Yalmip انجام شده است. برای حل مدل برنامه‌ریزی نیز از CPLEX 12.9 استفاده شده است. نتایج به دست آمده کارایی روش پیشنهادی در افزایش تاب‌آوری و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری را نشان داده است.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی غیرمتمرکز، تاب‌آوری، تبادل‌های رخ‌به‌رخ انرژی، ریزشبکه

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۲/۲۰

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۳/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۵/۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حسن جلیلی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: رودهن- بلوار آیت‌الله خامنه‌ای- دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

شبکه‌های برق در برابر بلایای طبیعی مانند زلزله و طوفان و سیل آسیب‌پذیر هستند. به‌عنوان نمونه، طوفان‌های ایرما و ماریا شبکه برق پورتوریکو را تخریب کردند که به موجب آن نزدیک به ۸۰ درصد مشترکینی که تحت تاثیر این طوفان‌ها واقع شدند به مدت یک ماه بدون برق بودند [۱]. رخداد این حادثه و سایر موارد مشابه سبب تعریف مفهوم تاب‌آوری^۱ در شبکه‌های برق شد. برای بهبود تاب‌آوری در شبکه‌های برق دو دسته راه‌کارها و اقدام‌ها پیشنهاد شدند، راه‌کارهای بر مبنای برنامه‌ریزی (سرمایه‌گذاری) و بهره‌برداری [۲]. در راه‌کارهای بر مبنای برنامه‌ریزی، با اقدام‌هایی مانند تقویت تجهیزات موجود در شبکه مانند تقویت خطوط [۳]، نصب تجهیزات جدید مانند نصب کلیدهای کنترل از راه دور [۴] و خریداری منابع تولیدپراکنده^۲ متحرک [۵]، تاب‌آوری شبکه بهبود داده می‌شود. این اقدام‌ها تاثیر قابل توجه بر بهبود تاب‌آوری شبکه دارند، ولی با توجه به احتمال پایین وقوع بلایای طبیعی، نصب آنها باید به صورت بهینه انجام شود تا از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشند. در راه‌کارهای بر مبنای بهره‌برداری، با تغییر بهره‌برداری شبکه، سعی می‌شود تا تاب‌آوری شبکه در برابر بلایای طبیعی با تکیه بر زیرساخت‌ها و امکانات موجود بهبود یابد. این راه‌کارها و اقدام‌ها، خود به دو دسته پیشگیرانه و ترمیمی تقسیم می‌شوند. در اقدام‌های پیشگیرانه^۳، پس از دریافت هشدار وقوع حادثه، بهره‌برداری از شبکه به گونه‌ای تغییر می‌یابد که تاب‌آوری در برابر حادثه پیش‌رو افزایش یابد. در مرجع [۶] یک چارچوب مدیریت پیشگیرانه برای مقابله با اثرهای نامطلوب طوفان‌های شدید بر عملکرد ریزشکه ارائه شده است. در این چارچوب، پس از دریافت هشدار وقوع طوفان، بهره‌برداری از ریزشکه به گونه‌ای تغییر می‌یابد که حداقل تعداد خطوط آسیب‌پذیر وارد مدار شوند و در عین حال کل بار شبکه نیز تأمین گردد. اقدام‌ها بر مبنای بهره‌برداری از نوع ترمیمی مربوط به بازیابی شبکه بعد از وقوع حادثه هستند. در این دسته از اقدام‌ها، بازیابی شبکه بر اساس ظرفیت‌های موجود در آن صورت می‌گیرد. از جمله این ظرفیت‌ها می‌توان به ریزشکه‌ها اشاره کرد [۷]. ریزشکه‌ها زیرساخت‌های فنی و ارتباطی لازم برای پشتیبانی از شبکه در شرایط عادی [۸،۹] و وقوع حادثه [۱۰] را دارند. در یک شبکه دارای چند ریزشکه، اتصال ریزشکه‌ها سبب ایجاد مناطق تاب‌آور با ابعاد بزرگ‌تر می‌گردد [۱۱]. با توجه به اثرهای مخرب قابل توجه طوفان‌ها و بلایای طبیعی دیگر بر شبکه توزیع، ایده استفاده از ریزشکه برای افزایش انعطاف‌پذیری شبکه برق و ارائه خدمات حیاتی به مشترکین محلی مطرح شده که ایده بسیار مناسبی است [۱۲].

مطالعات مربوط به بهبود تاب‌آوری در ریزشکه‌ها را می‌توان در دو دسته تقسیم‌بندی کرد. دسته اول مطالعاتی هستند که به بهبود تاب‌آوری در ریزشکه‌ها به صورت مجزا و بدون در نظر گرفتن تعامل ریزشکه‌ها با یکدیگر پرداخته‌اند. در مرجع [۱۳] یک روش برنامه‌ریزی تصادفی اقتصادی - تاب‌آوری چندهدفه برای یک ریزشکه ارائه شده است. برنامه‌ریزی تصادفی دوسطحی تاب‌آوری محور پیشنهادی، چشم‌انداز اقتصادی را همراه با تاب‌آوری به طور هم‌زمان با استفاده از یک رویکرد برنامه‌ریزی خطی چندهدفه عدد صحیح-مختلط یکپارچه می‌کند. تابع تاب‌آوری در نظر گرفته شده شامل معیارهای مختلفی مانند توانایی مقاومت، بازیابی سریع و معیارهای فنی در برابر بار رویدادهای مخرب است. روش پیشنهادی برای سیستم ۳۳ شین استاندارد توزیع با مجموعه‌ای از منابع انرژی توزیع‌شده، سیستم‌های ذخیره انرژی و پارکینگ‌های وسایل نقلیه الکتریکی آزمون شده است. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه ادغام معیارهای تاب‌آوری در برنامه‌ریزی ریزشکه‌ها، هزینه ریزشکه را ۲۵ درصد افزایش داده، اما تاب‌آوری ریزشکه را بیش از ۷۰ درصد بهبود بخشیده است. در مرجع [۱۴] یک روش بهینه‌سازی مقاوم-تصادفی ترکیبی^۴ برای برنامه‌ریزی بهینه یک ریزشکه با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، تحت حالت‌های بهره‌برداری نرمال و تاب‌آور مورد استفاده قرار گرفته است. تاثیر عدم قطعیت قیمت شبکه بالادست بر برنامه‌ریزی بهینه ریزشکه‌ها با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی مقاوم مدل‌سازی شده است. عدم قطعیت‌های غالب دیگرمانند توان بادی، توان فتوولتائیک و بارهای الکتریکی اکتیو و راکتیو نیز با بهینه‌سازی تصادفی از طریق ایجاد مجموعه‌ای از سناریوهای مربوطه مدل‌سازی شده‌اند. همچنین برنامه‌های پاسخ‌گویی بار قابل تنظیم و قابل قطع برای بهبود عملکرد تاب‌آوری ریزشکه تحت حوادث اجرا می‌شوند. رویکرد پیشنهادی تلاش می‌کند تا بهره‌برداری از ریزشکه را تحت عدم قطعیت در حالت‌های تاب‌آوری و نرمال شبکه بهبود ببخشد. در مرجع [۱۵] نقش سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی^۵ در ارتقای تاب‌آوری مرکزهای مراقبت‌های بهداشتی با بارهای بحرانی بررسی شده است. در این مقاله مزیت‌های استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی در ریزشکه‌های پیشنهادی مورد بحث

قرار گرفته است. به دلیل گسترش بیماری همه‌گیر کروناویروس، مرکزهای مراقبت بهداشتی با تعداد فزاینده‌ای از بیماران مبتلا روبرو شده‌اند. بنابراین تاب‌آوری بیمارستان‌ها در طول قطع برق پیش‌بینی نشده موضوعی است که باید به‌طور مناسب مورد توجه قرار گیرد. قطع برق می‌تواند زندگی بیماران را به خطر بیاندازد، به‌خصوص آن‌هایی که به مراقبت‌های ویژه نیاز دارند. در این مطالعه، یک ریزشبکه ترکیبی شامل منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و ژنراتورهای دیزلی برای افزایش تاب‌آوری بیمارستان در طول قطع برق پیش‌بینی نشده، پیشنهاد شده است. برای ارزیابی عملکرد تاب‌آوری ریزشبکه پیشنهادی، قطعی‌های تصادفی در روزهای مختلف سال ایجاد شده‌اند. همچنین، یک شاخص تاب‌آوری برای اندازه‌گیری میزان تقاضای بار الکتریکی برآورده نشده، معرفی شده است.

دسته دوم مطالعاتی هستند که به بهبود تاب‌آوری در ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن تعامل آنها با یکدیگر پرداخته‌اند. مطالعات موجود در این زمینه در حالت کلی به دو دسته رویکردهای متمرکز و غیرمتمرکز تقسیم می‌شوند. در رویکرد متمرکز کلیه ریزشبکه‌ها به‌صورت متمرکز و توسط یک واحد کنترل مرکزی کنترل می‌شوند. در مرجع [۱۶] یک رویکرد متمرکز جهت تعیین اقدام‌های پیشگیرانه با هدف تأمین حداکثری بارهای حیاتی توسط واحدهای تولیدپراکنده در برابر با رویدادهای شدید پیشنهاد شده است. رویکرد متمرکز سرعت حل و دقت بالایی دارد، ولی با افزایش تعداد ریزشبکه‌ها مدل برنامه‌ریزی متمرکز نیز گسترده می‌شود که این مورد افزایش حجم محاسبات را به دنبال دارد. همچنین رویکرد متمرکز به یک سیستم ارتباطی گسترده دوسویه در سطح شبکه نیاز دارد تا داده‌های مورد نیاز را میان مرکز کنترل و اجزای شبکه منتقل کند [۱۷]. سیستم گسترده ارتباطی آسیب‌پذیری سیستم در برابر بلایای طبیعی را افزایش و به دنبال آن تاب‌آوری شبکه کاهش می‌یابد. در مقایسه با کنترل متمرکز، کنترل غیرمتمرکز ممکن است راه حل بهینه سراسری را تضمین نکند، با این حال قابلیت حفظ استقلال عملکردی و حفظ حریم خصوصی هر ریزشبکه را ممکن می‌سازد [۹]. همچنین مدل‌سازی انگیزه‌های فردی ریزشبکه‌ها برای شرکت در تبادل‌های رخ‌به‌رخ در رویکرد متمرکز ممکن نیست که این موضوع مزیت دیگر رویکرد غیرمتمرکز است. برای پوشش معایب روش برنامه‌ریزی متمرکز، در چند سال اخیر رویکردهای غیرمتمرکز معرفی شده‌اند که امکان تعیین برنامه‌ریزی هر ریزشبکه به‌صورت مستقل در آن امکان‌پذیر شده است. در مرجع [۱۸] یک چارچوب همکارانه غیرمتمرکز برای تعیین برنامه‌ریزی یک شبکه توزیع فعال دارای چند ریزشبکه پیشنهاد شده که در این چارچوب، هزینه‌های بهره‌برداری، حذف بار و قطع تولید تجدیدپذیر لحاظ شده‌اند. با این حال، هزینه مبادله‌های رخ‌به‌رخ میان عامل‌های مختلف موجود در شبکه مدل نشده است. در مرجع [۱۹] یک رویکرد غیرمتمرکز با قابلیت پردازش موازی برای بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع فعال در حضور ریزشبکه‌ها ارائه شده که در این چارچوب، بهره‌برداری از کل شبکه به‌صورت هم‌زمان و موازی توسط عامل‌های موجود در شبکه، یعنی ریزشبکه‌ها انجام شده است. در مرجع‌های [۹] و [۱۷] به‌ترتیب یک چارچوب برنامه‌ریزی غیرمتمرکز همکارانه برای بهره‌برداری بهینه از شبکه توزیع فعال دارای چند ریزشبکه و شبکه توزیع فعال چند ناحیه‌ای با هدف کاهش هزینه‌های روزانه ارائه شده است. با این حال، در این مرجع‌ها برنامه‌ریزی با هدف کاهش هزینه‌های کل شبکه انجام شده و برنامه‌ریزی ریزشبکه‌ها با هدف کاهش هزینه‌های خود آن‌ها انجام نشده است که پیاده‌سازی عملی این چارچوب‌های غیرمتمرکز را چالش برانگیز می‌کند. ریزشبکه‌های مستقل و مشترکین شبکه توزیع با استفاده از مبادله‌های رخ‌به‌رخ انرژی می‌توانند انرژی مازاد خود را به‌گونه‌ای اقتصادی با همسایگان خود مبادله کنند [۲۰]. با این حال، باید انگیزه‌های فردی عامل‌های مستقل موجود در شبکه برای شرکت در هنگام تسویه بازار مبادله‌های رخ‌به‌رخ غیرمتمرکز در نظر گرفته شود. در مرجع [۲۱] یک روش غیرمتمرکز غیرهمکارانه مبتنی بر نظریه بازی برای ایجاد انگیزه در مشتریان فعال موجود در شبکه برای تجارت انرژی رخ‌به‌رخ در هر دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه پیشنهاد شده است. با این حال افزایش تاب‌آوری شبکه در مبادله‌های رخ‌به‌رخ مدنظر قرار نگرفته است. در این مقاله یک رویکرد غیرمتمرکز برای افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع دارای چندین ریزشبکه ارائه شده است. در این رویکرد، ریزشبکه‌ها بر اساس مبادله‌های رخ‌به‌رخ انرژی، هزینه‌های بهره‌برداری و میزان بار از دست رفته خود را به‌طور هم‌زمان کاهش می‌دهند. مهم‌ترین نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

- برنامه‌ریزی هر ریزشبکه به‌صورت مستقل توسط بهره‌بردار آن ریزشبکه و با هدف کاهش هزینه‌های کلی بهره‌بردار آن ریزشبکه مدل شده است. در این مدل، ریزشبکه‌ها به جز اطلاعات مربوط به معامله رخ‌به‌رخ، شامل قیمت و میزان انرژی

تبادل شده، هیچ گونه اطلاع دیگری را به اشتراک نمی گذارند. بنابراین مدل غیرمتمرکز پیشنهادی قابلیت حفظ اطلاعات خصوصی ریزشبکه ها را دارد.

- در مدل پیشنهادی مدل برنامه ریزی هر ریزشبکه در تمامی حالت های عملکردی، یعنی شرایط عملکرد عادی، جزیره ای، وقوع بلاای طبیعی و اتصال به سایر ریزشبکه ها در یک مدل واحد بیان شده است. این مدل برنامه ریزی منابع محلی موجود در ریزشبکه و مبادله های رخ به رخ و تبادل های انرژی با شبکه اصلی را با هدف کاهش مجموع هزینه های ریزشبکه برنامه ریزی می کند. با این مدل ریزشبکه ها استقلال داشته و اجباری برای شرکت در مبادله های رخ به رخ ندارند و تنها انگیزه های مالی آن ها را به این امر تشویق می کند. مدل سازی به گونه ای انجام شده است که هزینه های بهره برداری در هنگام مبادله های رخ به رخ کمتر یا مساوی با هزینه های ریزشبکه در حالت جزیره ای باشد. به این ترتیب انگیزه بهره بردارهای ریزشبکه ها برای مشارکت در تبادل های رخ به رخ حفظ می شود،

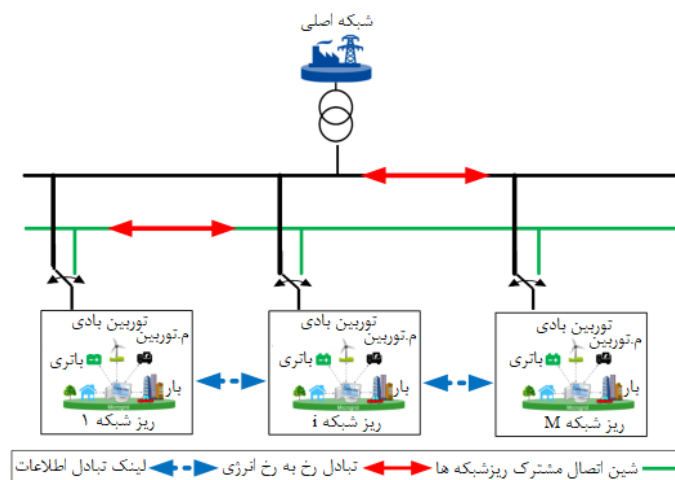
- در مدل غیرمتمرکز پیشنهادی هر ریزشبکه برنامه ریزی خود را به صورت مجزا انجام می دهد. بنابراین روش پیشنهادی به تعداد ریزشبکه ها حساس نیست و با افزایش تعداد آن ها حجم محاسبات افزایش نمی یابد. در ادامه و در بخش دوم فرمول بندی مسئله توسعه یافته است. چارچوب غیرمتمرکز پیشنهادی برای حل مسئله در بخش سوم تشریح شده است. شبیه سازی ها و نتایج عددی برای بررسی کارایی مدل پیشنهادی در بخش چهارم ارائه شده و در نهایت در بخش پنجم نتیجه گیری بیان شده است.

۲- فرمول بندی مسئله

یک شبکه توزیع دارای چند ریزشبکه در شکل (۱) نمایش داده شده است. هر کدام از ریزشبکه های موجود در شبکه به صورت مستقل و با هدف کمینه سازی هزینه های بهره برداری خود بهره برداری می شوند. ریزشبکه ها در حالت عادی به شبکه اصلی متصل و در شرایط وقوع خطا و بی برق شدن شبکه اصلی، از شبکه اصلی جدا و از طریق شین اتصال مشترک به یکدیگر متصل می شوند. ریزشبکه هایی که به شین مشترک متصل می شوند می توانند بر اساس مبادله های رخ به رخ، هزینه های بهره برداری خود را کاهش دهند.

۲-۱- تابع هدف

در این بخش به معرفی تابع هدف مسئله پرداخته شده است. تابع هدف مسئله شامل مجموع هزینه های بهره برداری و تاب آوری (قطع بار) ریزشبکه i است که در (۱) بیان شده است. بخش اول تابع هدف، هزینه های تولید توان توسط منابع تولیدپراکنده ریزشبکه است.



شکل (۱): تبادل های انرژی و اطلاعات در یک شبکه توزیع دارای چندین ریزشبکه [۱]
Figure (1): Energy and information transactions in multi-microgrids distribution network [1]

بخش دوم هزینه قطع بار، بخش سوم هزینه خرید انرژی از شبکه اصلی، بخش چهارم هزینه‌های شارژ و تخلیه ذخیره‌سازهای الکتریکی، بخش پنجم هزینه تبادل‌های انرژی رخ‌به‌رخ میان ریزشبه‌مدنظر با سایر ریزشبه‌ها و بخش ششم هزینه ژنراتور مجازی ریزشبه‌مدنظر است. هزینه مبادله‌های رخ‌به‌رخ و هزینه تولید مجازی در بخش سوم تشریح خواهند شد. هدف بهره-بردار ریزشبه‌i کمینه‌سازی تابع هدف بیان‌شده است. قیدهای مربوطه نیز در ادامه در رابطه‌های (۲) تا (۱۴) ذکر شده‌اند.

$$\tau_i = \sum_{t=1}^T \sum_{n \in G_i} (c_n^G P_{n,t}^G) + \sum_{t=1}^T (c_i^{sh} P_{i,t}^{sh}) + \sum_{t=1}^T (c_{i,t}^{buy} P_{i,t}^{buy}) + \sum_{t=1}^T (c_i^{ESS,c} P_{i,t}^c + c_i^{ESS,d} P_{i,t}^d) + C O_i^{P2P} + C O_i^{Dom} \quad (1)$$

قید تعادل توان^۶ در رابطه (۲) بیان شده است. بر اساس این قید، مجموع توان وارد شده از شبکه اصلی، تولید ریزتوربین‌های موجود در ریزشبه‌i نام، توان دشارژ ذخیره‌ساز این ریزشبه‌i، توان تولید شده توسط توربین‌های بادی محلی موجود در ریزشبه‌i، بار قطع شده در ریزشبه‌i، توان وارد شده از شین اتصال مشترک به ریزشبه‌i نام در مبادله‌های رخ به رخ و توان ژنراتور مجازی این ریزشبه‌i نام در بازه زمانی نام باید با مجموع توان مصرفی ریزشبه‌i و توان شارژ ذخیره‌ساز ریزشبه‌i نام برابر باشد. بر اساس قیدهای (۳) و (۴) میزان افزایش و کاهش توان تولیدی ریزتوربین‌ها در طول بازه زمانی نام باید کمتر از بیشینه میزان مجاز خود باشد. محدوده مجاز تولید ریزتوربین‌ها در رابطه (۵) بیان شده است. در رابطه (۶) حد تبادل توان^۷ با شبکه اصلی مشخص شده است. محدودیت‌های مرتبط با حداکثر توان شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای ریزشبه‌i نیز به ترتیب در رابطه-های (۷) و (۸) بیان شده‌اند. وضعیت شارژ ذخیره‌ساز ریزشبه‌i در زمان نام نیز بر حسب میزان شارژ آن در ساعت قبل، توان-های شارژ و دشارژ، بازدهی شارژ و دشارژ و ظرفیت ذخیره‌ساز در رابطه (۹) بیان شده است. بر اساس قید رابطه (۱۰) میزان شارژ ذخیره‌ساز در زمان انتهایی افق برنامه‌ریزی، باید بزرگ‌تر یا مساوی میزان شارژ اولیه خود باشد. محدوده مجاز شارژ ذخیره‌ساز نیز در رابطه (۱۱) بیان شده است. ظرفیت تولید مجازی ریزشبه‌i نام نیز در رابطه (۱۲) برای ریزشبه‌های فروشنده توان در مبادله‌های رخ‌به‌رخ در نظر گرفته شده تا در صورت رویارویی ریزشبه‌i با پیشنهادهای خرید بزرگ‌تر از ظرفیت خود، از تولید مجازی با هزینه‌ی بالا برای تأمین آن استفاده کند. جزئیات تولید مجازی در بخش سوم تشریح خواهد شد. محدوده مجاز حذف بار در رابطه (۱۳) تعیین شده است. بر اساس قید رابطه (۱۴) میزان هزینه‌های ریزشبه‌i نام در حالت شرکت در مبادله-های رخ‌به‌رخ باید از هزینه‌های آن در حالت جزیره‌ای بزرگ‌تر نباشد. لازم به ذکر است، زمانی که ریزشبه‌i نام در حالت جزیره‌ای قرار دارد متغیرهای مربوط به خرید از شبکه اصلی، مبادله‌های رخ‌به‌رخ و نیروگاه مجازی برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند.

$$P_{i,t}^{buy} + \sum_{n \in G_i} P_{n,t}^G + P_{i,t}^d + P_{i,t}^{wind} + P_{i,t}^{sh} + P_{i,t}^{P2P} + P_{i,t}^{Dom} = P_{i,t}^D + P_{i,t}^c + P_{i,t}^{sell} \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$P_{n,t}^G - P_{n,t-1}^G \leq \delta_n^G \quad \forall n \in G_{i,t} \quad (3)$$

$$P_{n,t-1}^G - P_{n,t}^G \leq \delta_n^G \quad \forall n \in G_{i,t} \quad (4)$$

$$0 \leq P_{n,t}^G \leq P_n^{G,max} \quad \forall n \in G_{i,t} \quad (5)$$

$$-P_{i,t}^{xin} \leq P_{i,t}^{buy} \leq P_{i,t}^{xin} \quad \forall t \quad (6)$$

$$0 \leq P_{i,t}^c \leq \delta_i^{c,ES} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$0 \leq P_{i,t}^d \leq \delta_i^{d,ES} \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$SOC_{i,t} = SOC_{i,t-1} + \left(P_{i,t}^c \eta_i^c - \frac{P_{i,t}^d}{\eta_i^d} \right) \left(\frac{\Delta T}{C_i^{ES}} \right) \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$SOC_{i,0} = SOC_{i,T} \quad (10)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_{i,t} \leq SOC_{max} \quad \forall t \in T \quad (11)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{Dom} & \forall m \in M_s \\ P_{i,t}^{Dom} = 0 & otherwise \end{cases} \quad (12)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{sh} \leq P_{i,t}^D \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$\tau_i \leq \tau_i^{IS} \quad (14)$$

۳- چارچوب غیرمتمرکز پیشنهادی

در مدل غیرمتمرکز پیشنهادی ابتدا باید خریدارها و فروشندگان توان در تبادلهای رخ به رخ انرژی میان ریزشکدهها تعیین شوند. به این منظور هر یک از ریزشکدهها در حالت جزیره‌ای برنامه‌ریزی خود را انجام می‌دهند. ریزشکده‌هایی که فاقد حذف بار باشند در لیست فروشندگان توان (مجموعه M_s) و ریزشکده‌هایی که ناچار به حذف بار هستند در مجموعه ریزشکده‌های خریدار توان (مجموعه M_b) قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، در مدل غیرمتمرکز پیشنهادی، برای تعیین ریزشکده‌های خریدار و فروشندگان توان الکتریکی ابتدا مطابق شکل (۲) اندیس i برابر یک در نظر گرفته می‌شود، تا اولین ریزشکده وارد مدل پیشنهادی شود. در گام بعدی شماره ریزشکده بررسی می‌شود. چنانچه شماره این ریزشکده از تعداد کل ریزشکده‌ها (M) بیشتر باشد روندنا خاتمه می‌یابد، در غیر این صورت ریزشکده i برنامه‌ریزی خود را در حالت جزیره‌ای (یعنی زمانی که ریزشکده‌ها بر اثر حادثه شدید آب‌وهوایی از شبکه اصلی جدا شده‌اند) انجام می‌دهد و میزان حذف بار و هزینه حاشیه‌ای را در هر ساعت از افق برنامه‌ریزی محاسبه می‌کند. اگر این ریزشکده دارای حذف بار بود در لیست ریزشکده‌های خریدار توان الکتریکی و اگر دارای حذف بار نبود در لیست ریزشکده‌های فروشندگان توان الکتریکی قرار می‌گیرد. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که شماره ریزشکده از تعداد کل ریزشکده‌ها بزرگ‌تر نباشد. ریزشکده‌های خریدار توان در مجموعه M_b و ریزشکده‌های فروشندگان توان در مجموعه M_s ذخیره می‌شوند. هزینه تبادلهای رخ به رخ در ریزشکده نام به صورت زیر در (۱۵) محاسبه می‌شود.

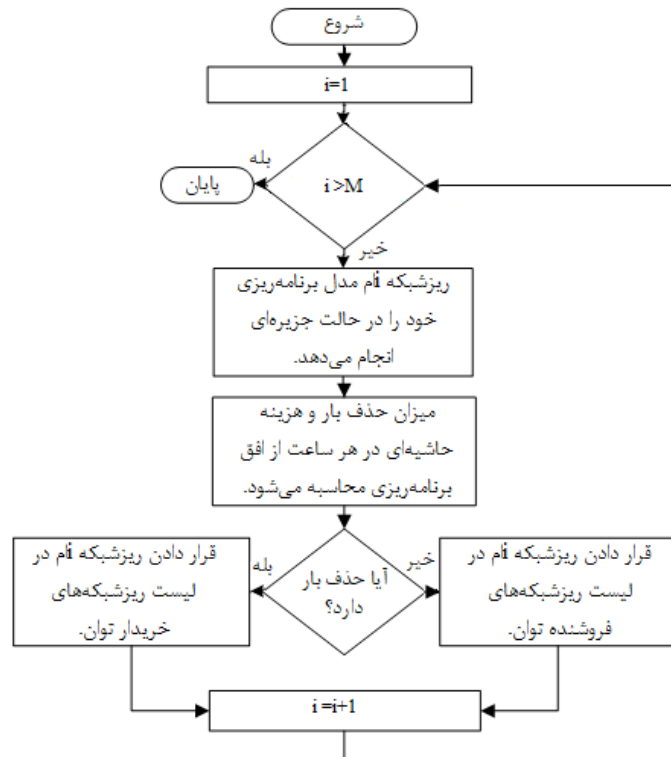
$$CO_i^{P2P} = \sum_{t=1}^T \sum_{m \in M_s} c_{m,t}^{P2P} P_{m,t}^{P2P} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵) مجموعه ریزشکده‌های فروشندگان توان M_s است. لازم به ذکر است که فقط ریزشکده‌های خریدار (یعنی ریزشکده‌هایی که در حالت جزیره‌ای دارای حذف بار هستند) می‌توانند در بازار تبادلهای رخ به رخ تقاضای خرید توان داشته باشند. هزینه تولید مجازی نیز که فقط برای ریزشکده‌های فروشندگان در نظر گرفته می‌شود در رابطه (۱۶) ارائه شده است.

$$CO_i^{Dom} = \begin{cases} \sum_{t=1}^T c_{i,t}^{Dom} P_{i,t}^{Dom} & \forall m \in M_s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

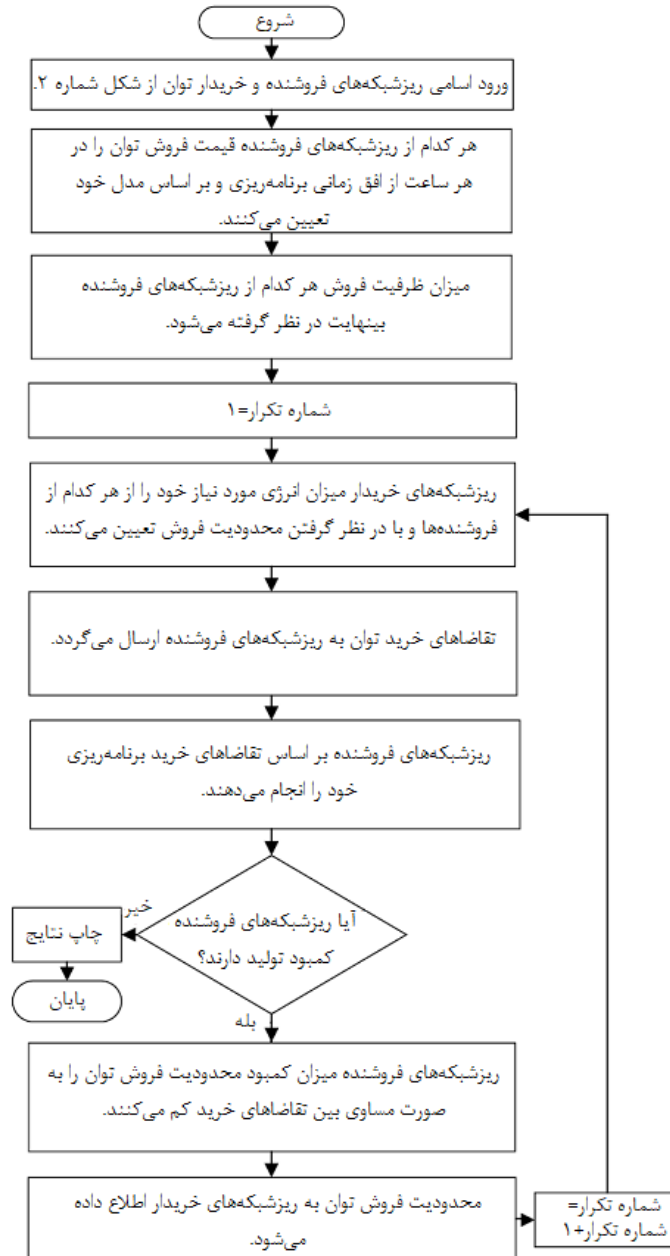
قیمت تولید مجازی در رابطه فوق یک عدد نسبتاً بزرگ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که زمانی برنامه‌ریزی به دست آمده قابل قبول خواهد بود که میزان تولید مجازی ریزشکده نام در تمام بازه‌های زمانی و برای تمام ریزشکده‌ها برابر صفر به دست آید. میزان تولید مجازی ریزشکده نام برای جبران کمبود تولید توان ریزشکده‌های تولیدکننده در نظر گرفته شده است که بتوانند تمامی تقاضاهای خرید توان ارسالی از سوی ریزشکده‌های خریدار را پوشش دهند تا خللی در همگرایی الگوریتم رخ ندهد. لازم به ذکر است که قیمت تولید این توان به اندازه‌ای بزرگ در نظر گرفته می‌شود که ریزشکده‌های خریدار پیشنهاد خرید انرژی خود را به سایر ریزشکده‌ها ارائه کنند تا به ریزشکده‌ای که امکان تولید بیشتر ندارد، پیشنهاد دیگری ارائه نشود. با این حال در صورتی که مقدار این متغیر بزرگ‌تر از صفر شود، ریزشکده‌های فروشندگان باید در ادامه تکرارهای الگوریتم حل مسئله به ریزشکده‌های خریدار اطلاع دهند تا آنها میزان پیشنهاد تقاضای خرید خود را کاهش دهند. این اعمال کاهش بر اساس رابطه (۱۷) انجام خواهد شد. بازار تبادلهای رخ به رخ در یک فرایند تکرار شونده تسویه می‌شود که روندنمای آن در شکل (۳) نشان داده شده است.

$$P_{m,max,t}^{P2P,iter+1} = P_{m,t}^{P2P,iter} - \frac{P_{i,t}^{Dom}}{N_i^{buyers}} \quad (17)$$



شکل (۲): روندنمای تعیین ریز شبکه‌های خریدار و فروشنده توان در مدل غیرمتمرکز پیشنهادی
 Figure (2): Flowchart of determining the buyer and seller microgrids in the proposed decentralized model

مطابق روندنمای نشان داده شده در شکل (۳)، ابتدا اسامی ریز شبکه‌های خریدار و فروشنده توان الکتریکی که از روندنمای شکل شماره (۲) به دست آمده‌اند وارد می‌شوند. در گام بعدی ریز شبکه‌های فروشنده توان قیمت فروش توان مازاد تولیدی خود را اعلام می‌کنند. با توجه به شکل (۳) قیمت پیشنهاد شده توسط ریز شبکه فروشنده تنها یک بار و آن هم در ابتدای شروع بازار تبادل‌های رخ‌به‌رخ و با توجه به هزینه‌های حاشیه ساعتی که در مدل جزیره‌ای [شکل (۲)] محاسبه شده، تعیین می‌شود. در این مرحله، محدودیتی برای فروش توان الکتریکی در نظر گرفته نمی‌شود و ظرفیت فروش هر کدام از ریز شبکه‌های فروشنده بی‌نهایت فرض می‌شود. در گام بعدی شماره تکرار برابر یک تنظیم می‌شود. سپس ریز شبکه‌های خریدار میزان انرژی مورد نیاز خود را با توجه به قیمت‌های پیشنهادی محاسبه و به فروشنده‌ها اعلام می‌کنند. فروشنده‌ها توان بر اساس پیشنهادی دریافتی از خریدارها، برنامه‌ریزی محلی خود را انجام می‌دهند. اگر هیچ‌کدام از فروشنده‌ها کمبود تولید نداشته باشند، یعنی میزان تولید مجازی آن‌ها برابر صفر باشد، در این مرحله بازار تسویه می‌شود. در غیر این صورت، فروشنده‌ها توان متناسب با ظرفیت تولیدشان بخشی از تقاضای خرید را کاهش می‌دهند و به خریدارها اعلام می‌کنند. سپس شماره تکرار یک واحد افزایش داده شده و ریز شبکه‌های خریدار با توجه به محدودیت فروش توان توسط فروشنده‌ها، میزان خرید خود از آن‌ها را بروزرسانی می‌کنند. این روند تا زمانی که هیچ فروشنده‌ای کمبود تولید نداشته باشد ادامه می‌یابد. لازم به ذکر است که در این مدل، قیمت پیشنهاد فروش هر کدام از ریز شبکه‌های فروشنده در تمام تکرارهای چارچوب غیرمتمرکز پیشنهادی یکسان بوده و به صورت پارامتر ثابت مدل می‌شود. در هر معامله رخ‌به‌رخ که بین دو ریز شبکه صورت می‌گیرد، ریز شبکه‌های فروشنده قیمت فروش برق و ریز شبکه‌های خریدار نیز بر اساس قیمت پیشنهاد شده توسط ریز شبکه فروشنده میزان خرید توان را مشخص می‌کنند. بنابراین در مدل مشارکت ریز شبکه‌های خریدار، میزان توان خریداری شده، به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری باید تعیین شود و قیمت فروش برق به صورت پارامتر برابر با هزینه تمام شده تولید برق توسط ریز شبکه فروشنده در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در مدل مشارکت فروشنده‌های توان، میزان خرید توان که از طرف خریدارها ارائه می‌شود یک پارامتر ثابت در نظر گرفته می‌شود که باید تأمین شود. در صورتی که یک ریز شبکه فروشنده قادر به تأمین تمام نیاز خریدارها نباشد از تولید مجازی کمک می‌گیرد.



شکل (۳): روندنمای الگوریتم غیرمتمرکز پیشنهادی
Figure (3): Flowchart of proposed decentralized algorithm

ریزشکته‌های فروشنده تنها فروشنده توان هستند و حق خرید توان در بازار تبادل‌های رخ به رخ را ندارند. همچنین، مطابق قید (۱۸) باید میزان بار حذف‌شده در ریزشکته‌های فروشنده برابر صفر باشد.

$$P_{i,t}^{sh} = 0 \quad \forall i \in M_s \quad (18)$$

بر اساس رابطه (۱۹)، میزان تقاضای خرید توان ریزشکته‌های خریدار باید کمتر و یا مساوی حداکثر میزان اعلام شده توسط ریزشکته فروشنده باشد.

$$P_{i,m,t}^{P2P} \leq P_{i,m,max,t}^{P2P,iter} \quad \forall t, m \quad (19)$$

همان‌گونه که در روندنمای شکل (۳) نشان داده شده است، شرط همگرایی چارچوب پیشنهادی صفر شدن توان مجازی (یا عدم وجود کمبود تولید) در نظر گرفته شده است.

۴- مطالعه موردی

برای ارزیابی کارایی روش غیرمتمرکز پیشنهادی یک شبکه توزیع با چهارده ریزشبکه مستقل در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها در این مطالعه در دو سناریوی زیر انجام شده است:

- سناریوی اول: حالت جزیره‌ای

- سناریوی دوم: رویکرد غیرمتمرکز پیشنهادی

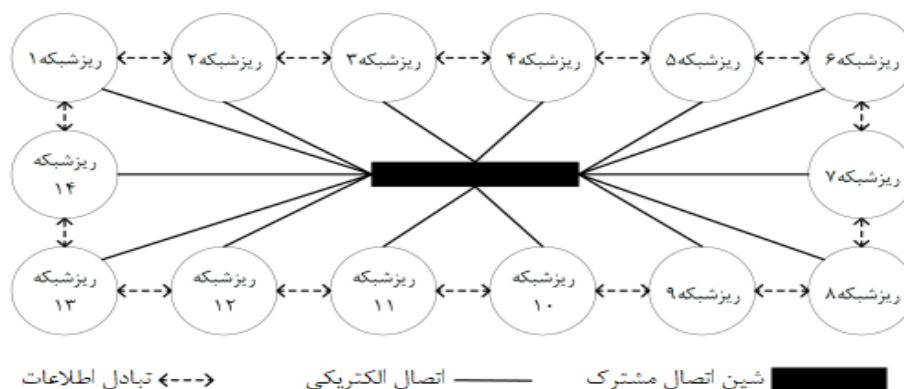
انتظار می‌رود که در سناریوی اول بیشترین حذف بار رخ دهد و مجموع هزینه‌های کل شبکه نسبت به سناریوی دیگر بیشتر باشد. زیرا در سناریوی اول، ریزشبکه‌ها در حالت جزیره‌ای قرار دارند و نمی‌توانند از قابلیت‌های یکدیگر استفاده کنند. در سناریوی دوم، برنامه‌ریزی عملکردی ریزشبکه‌ها به صورت مستقل و با استفاده از چارچوب پیشنهادی تعیین می‌شود. انتظار می‌رود که هزینه‌های بهره‌برداری تمامی ریزشبکه‌ها کوچک‌تر و یا مساوی هزینه‌های متناظرشان در سناریوی اول باشد. در پایان این بخش، نتایج حاصل از این دو رویکرد با هم مقایسه و تحلیل خواهند شد. هدف از مقایسه نتایج نشان دادن اثر روش غیرمتمرکز پیشنهادی در سازماندهی معامله‌های رخ‌به‌رخ و کاهش حذف بار و به دنبال آن افزایش تاب‌آوری شبکه است.

۴-۱- داده‌های مسئله

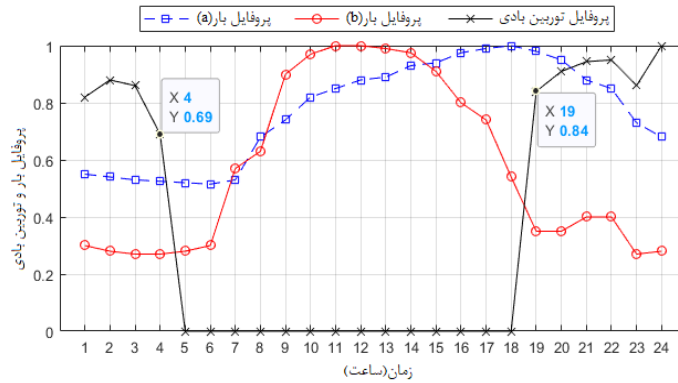
شبکه مورد مطالعه یک شبکه چندریزشبکه‌ای است که شمای کلی آن در شکل (۴) نشان داده شده است. این شبکه دارای چهارده ریزشبکه است که از شش نوع A, B, C, D, E و F تشکیل شده‌اند. اطلاعات این سیستم در مرجع [۱] ارائه شده است. در این شبکه، ریزشبکه‌ها می‌توانند در شرایط عدم دسترس‌پذیری شبکه اصلی، از طریق شین اتصال مشترک نشان داده شده در شکل (۴) به یکدیگر متصل و تجارت انرژی کنند. مطالعه در افق ۲۴ ساعته و در بازه‌های یک ساعته انجام شده است. در اینجا فرض شده که در ساعت‌های ۸ الی ۲۰، شبکه اصلی در اثر طوفان از دسترس خارج و توربین‌های بادی نیز از ساعت ۵ الی ۱۸ از سرویس‌دهی خارج شده‌اند. نمایه میزان بار مصرفی و تولید توربین‌های بادی در افق مورد مطالعه در شکل (۵) نمایش داده شده است. داده‌های نشان داده شده در شکل (۵) میزان کمیت متناظر خود را بر حسب پریونیت و نسبت به مقادیر نامی نشان می‌دهند. به عنوان نمونه میزان نمایه تولید توربین بادی در ساعت ۱۹ برابر ۰/۸۴ است که نشان می‌دهد در ساعت ۱۹ توربین‌های بادی برابر ۸۴ درصد ظرفیت نامی‌شان توان تولید کرده‌اند. قیمت تولید مجازی ریزشبکه‌ها است برابر با ۵۰۰۰۰ دلار بر مگاوات‌ساعت در نظر گرفته شده است. در ادامه شبیه‌سازی‌های مربوط به سناریوهای بیان شده انجام و نتایج آنها ارائه شده است. شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار متلب و با استفاده از جعبه ابزار Yalmip انجام شده است. برای حل مدل برنامه‌ریزی نیز از CPLEX 12.9 استفاده شده است.

۴-۲- نتایج عددی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی‌ها در دو سناریوی مدنظر مقاله ارائه شده است.



شکل (۴): شبکه مورد مطالعه [۱]
Figure (4): The network under study [1]



شکل (۵): میزان بار مصرفی شبکه و تولید توربین های بادی [۱]

Figure (5): Electrical load of network and wind generation [1]

۱-۲-۴- سناریوی اول: حالت جزیره‌ای

در این سناریو فرض شده است که ریزشکته‌ها در ساعت‌های ۸ الی ۲۰ وارد حالت جزیره‌ای می‌شوند و نمی‌توانند با یکدیگر تبادل‌های رخ‌به‌رخ انجام دهند. نتایج به‌دست آمده در این سناریو در جدول (۱) بیان شده است. از آنجا که در سناریوی اول ریزشکته‌ها هیچ‌گونه مبادله انرژی رخ‌به‌رخ با یکدیگر ندارند، هزینه تبادل‌های رخ‌به‌رخ انرژی در تمامی چهارده ریزشکته صفر است. در این سناریو، مجموع هزینه‌های بهره‌برداری کل شبکه، یعنی مجموع هزینه‌های بهره‌برداری تمامی چهارده ریزشکته برابر ۳۰۷۹۱۷/۶ دلار و مجموع کل حذف بار برابر ۵۰/۵۶۱ مگاوات-ساعت محاسبه شده است. مجموع هزینه خرید توان از شبکه اصلی برابر ۷۹۱۱/۰۹ دلار است. این به آن معنا است که شبکه مورد مطالعه در طول ساعت‌های ۱ الی ۸ و ۲۱ الی ۲۴ باید مبلغ ۷۹۱۱/۰۹ دلار را از شبکه اصلی بابت فروش توان به آن دریافت نماید. با این حال، در ساعت‌های ۵ الی ۱۸ به دلیل از مدار خارج شدن توربین‌های بادی، ظرفیت تولید ریزشکته‌ها کاهش می‌یابد.

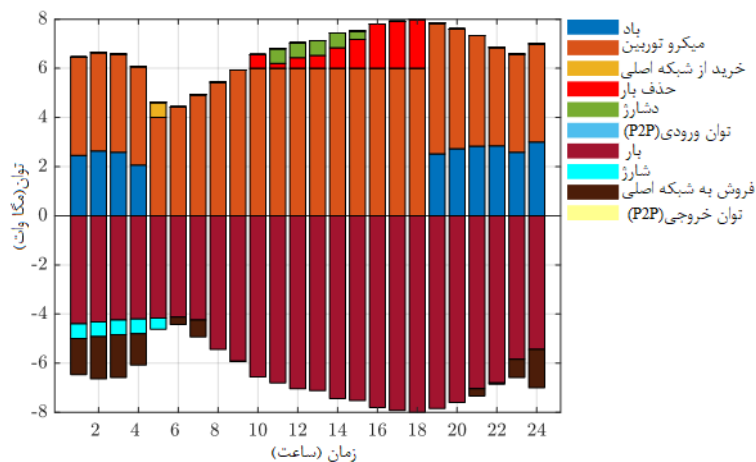
Table (1): The results of first scenario

جدول (۱): نتایج سناریوی اول

ریزشکته	نوع ریزشکته	کل هزینه (دلار)	هزینه میکروتوربین (دلار)	هزینه حذف بار (دلار)	هزینه مبادله‌های رخ به رخ (دلار)	هزینه خرید برق از شبکه اصلی (دلار)	هزینه ذخیره‌ساز انرژی (دلار)	مجموع حذف بار (مگاوات-ساعت)
۱	A	۴۲۱۱۳/۵۸	۴۶۳۹/۱۹۶	۳۷۸۲۴	۰	-۳۵۰/۱۸	۰/۵۶۲۱۱۴	۹/۴۵۶
۲	B	۱۸۶۷۹/۹۲	۳۴۰۱/۵۳۵	۱۶۰۱۲	۰	-۷۳۳/۸۹۴	۰/۲۸۰۰۵۷	۴/۰۰۳
۳	C	۹۵۰۹/۵۹۱	۳۸۶۳/۸۲۹	۵۹۶۴	۰	-۳۱۸/۹۰۶	۰/۶۶۸۰۹۱	۱/۴۹۱
۴	D	۴۰۰۱/۹۴۷	۴۳۳۷/۰۸۹	۰	۰	-۳۳۵/۹۲۴	۰/۷۸۱۶۳۹	۰
۵	E	۳۸۸۱۸/۵۵	۲۲۷۱/۱۶۳	۳۷۳۵۰	۰	-۸۰۳/۷	۱/۰۸۸۳۰۲	۳/۷۳۵
۶	F	۳۶۹/۱۲۲۳	۱۲۰۵/۱۲۲	۰	۰	-۸۳۶	۰	۰
۷	E	۳۸۸۱۸/۵۵	۲۲۷۱/۱۶۳	۳۷۳۵۰	۰	-۸۰۳/۷	۱/۰۸۸۳۰۲	۳/۷۳۵
۸	A	۴۲۱۱۳/۵۸	۴۶۳۹/۱۹۶	۳۷۸۲۴	۰	-۳۵۰/۱۸	۰/۵۶۲۱۱۴	۹/۴۵۶
۹	A	۴۲۱۱۳/۵۸	۴۶۳۹/۱۹۶	۳۷۸۲۴	۰	-۳۵۰/۱۸	۰/۵۶۲۱۱۴	۹/۴۵۶
۱۰	B	۱۸۶۷۹/۹۲	۳۴۰۱/۵۳۵	۱۶۰۱۲	۰	-۷۳۳/۸۹۴	۰/۲۸۰۰۵۷	۴/۰۰۳
۱۱	C	۹۵۰۹/۵۹۱	۳۸۶۳/۸۲۹	۵۹۶۴	۰	-۳۱۸/۹۰۶	۰/۶۶۸۰۹۱	۱/۴۹۱
۱۲	D	۴۰۰۱/۹۴۷	۴۳۳۷/۰۸۹	۰	۰	-۳۳۵/۹۲۴	۰/۷۸۱۶۳۹	۰
۱۳	E	۳۸۸۱۸/۵۵	۲۲۷۱/۱۶۳	۳۷۳۵۰	۰	-۸۰۳/۷	۱/۰۸۸۳۰۲	۳/۷۳۵
۱۴	F	۳۶۹/۱۲۲۳	۱۲۰۵/۱۲۲	۰	۰	-۸۳۶	۰	۰
کل شبکه	-	۳۰۷۹۱۷/۶	۴۶۳۴۶/۲۳	۲۶۹۴۷۴	۰	-۷۹۱۱/۰۹	۸/۴۱۰۸۲۵	۵۰/۵۶۱

به‌گونه‌ای که بیشتر ریزشکبه‌ها مجبور هستند بخشی از بار خود را در این ساعت‌ها حذف کنند. همان‌طور که در جدول (۱) ارائه شده است، ریزشکبه‌های نوع D و F فاقد حذف بار هستند ولی سایر ریزشکبه‌ها به‌دلیل کمبود تولید نیاز به خرید توان دارند. با این‌حال، به‌دلیل این‌که در این سناریو امکان تبادل برق به‌صورت رخ‌به‌رخ وجود ندارد، ریزشکبه‌های نوع D و F نمی‌توانند مازاد تولید را به سایر ریزشکبه‌ها بفروشند. لذا ریزشکبه‌های نوع A, B, C و E مجبور هستند بخشی از بار خود را حذف کنند. بنابراین در صورتی که شرایط مبادله رخ‌به‌رخ در سناریوی دوم فراهم شود، ریزشکبه‌های نوع A, B, C و E به‌عنوان ریزشکبه‌های بحرانی که خریدار توان هستند و ریزشکبه‌های D و F به‌عنوان ریزشکبه‌های فروشنده توان در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه به‌عنوان نمونه در شکل‌های (۶) تا (۸)، به‌ترتیب نحوه بهره‌برداری از ریزشکبه‌های اول، هفتم و چهاردهم در سناریوی اول در شبکه مورد مطالعه ارائه شده است.

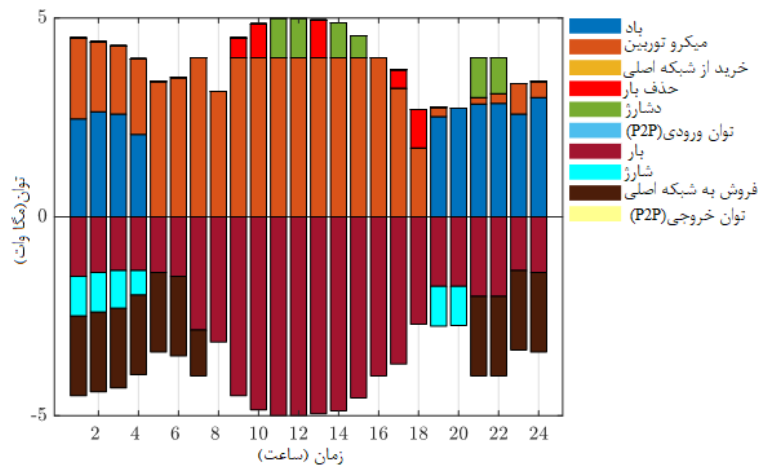
همان‌طور که در شکل شماره (۶) مشاهده می‌شود، ریزشکبه شماره یک در سناریوی اول یعنی حالت جزیره‌ای که در آن ریزشکبه‌ها از ساعت ۸ الی ۲۰ به‌علت شرایط آب و هوایی شدید از شبکه اصلی جدا شده‌اند و نمی‌توانند با یکدیگر مبادله‌های رخ‌به‌رخ انرژی الکتریکی داشته باشند، در ساعت‌های ۱ الی ۴ علاوه بر میکروتوربین‌ها از توربین‌های بادی خود برای تامین بار محلی استفاده کرده است. با این‌حال از آنجایی که میزان تولید محلی بیش از توان الکتریکی مورد نیاز داخلی ریزشکبه است، بخشی از آن را در ذخیره‌ساز محلی خود ذخیره و مابقی اضافه تولید خود را به شبکه اصلی فروخته است. در ساعت ۵ این ریزشکبه تولید بادی را در اثر وقوع طوفان از دست داده و بنابراین حدود ۰/۴۷ مگاوات ساعت انرژی از شبکه اصلی خریداری کرده است. این ریزشکبه بخشی از این انرژی خریداری‌شده را صرف تامین بار و بخش دیگر آن را در ذخیره‌ساز الکتریکی خود ذخیره کرده است. در ساعت ۶ و ۷ بار محلی مورد نیاز ریزشکبه شماره یک کاهش یافته و ریزشکبه ترجیح داده است که ظرفیت در دسترس نیروگاه‌های خود را به شبکه اصلی بفروشد. در ساعت ۸ و ۹ تمام ظرفیت میکروتوربین‌های ریزشکبه یک صرف تولید توان محلی مورد نیاز آن ریزشکبه شده و توانی برای فروش به شبکه اصلی وجود ندارد. در ساعت ۱۰ میکروتوربین‌های ریزشکبه قادر به تامین تمام بار ریزشکبه نیستند و به‌ناچار بهره‌بردار ریزشکبه بخشی از بار خود را حذف می‌کند. در ساعت‌های ۱۱ تا ۱۵ با توجه به افزایش بار محلی، بهره‌بردار ریزشکبه مجدداً ناچار به حذف بخشی از بار شده و همچنین از ظرفیت ذخیره‌سازهای محلی خود نیز برای تامین بار استفاده می‌کند. در ساعت‌های ۱۶ الی ۱۸ با توجه به اتمام ظرفیت ذخیره‌سازها تنها راه‌حل حذف بار می‌باشد، تا ریزشکبه قادر به حفظ قید تعادل توان الکتریکی باشد. در ساعت‌های ۱۹ الی ۲۴ با توجه به بازگشت توربین‌های بادی به مدار تولید، مشکل کمبود تولید برطرف شده و حذف بار صفر می‌شود. در ساعت‌های ۲۱، ۲۳ و ۲۴ با اتصال مجدد ریزشکبه شماره یک به شبکه اصلی، شاهد فروش توان مازاد تولید توربین‌های بادی به شبکه اصلی هستیم. با توجه به شکل (۷)، ریزشکبه شماره هفت در سناریوی اول در ساعت‌های ۱ الی ۴ علاوه بر میکروتوربین‌ها از توربین‌های بادی خود برای تامین بار محلی خود استفاده می‌کند.



شکل (۶): بهره‌برداری از ریزشکبه شماره یک در سناریوی اول

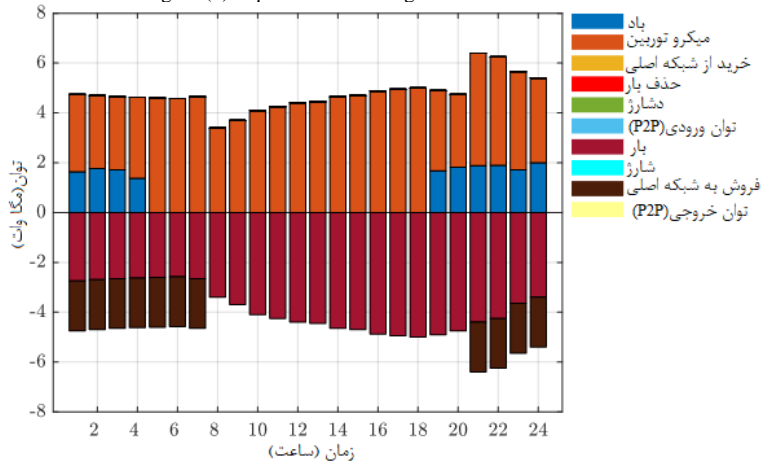
Figure (6): Operation of microgrid 1 in the first scenario

با این حال از آنجایی که میزان تولید محلی بیش از توان الکتریکی مورد نیاز ریزشبهه است، بخشی از آن را در ذخیره ساز محلی خود ذخیره و مابقی اضافه تولید را به شبکه اصلی می فروشد. در ساعت های ۵ تا ۷ نیز به علت در دسترس نبودن توربین های بادی در اثر رخداد طوفان و همچنین به علت شارژ ذخیره سازها، این ریزشبهه مازاد توان خود را به شبکه اصلی می فروشد. در ساعت ۸ کل توان تولیدی میکروتوربین فقط صرف تامین بار محلی گشته و اضافه توانی برای فروش وجود ندارد. در ساعت های ۹ الی ۱۰ با توجه به افزایش بار و نبود توان توربین بادی، ریزشبهه مجبور به حذف بخشی از بار خود می شود. در ساعت های ۱۱ الی ۱۲ که اوج بار مصرفی ریزشبهه است، ریزشبهه برای جلوگیری از حذف بار، انرژی ذخیره شده در ذخیره سازها را تخلیه می کند. در ساعت ۱۳ ریزشبهه مجبور به حذف بار می شود. در ساعت های ۱۴ تا ۱۵ ریزشبهه بخشی از بار مورد نیاز خود را از توان ذخیره سازهای خود تامین می کند. در ساعت ۱۶ توان مصرفی فقط از تولید میکروتوربین ها به دست می آید. در ساعت ۱۷ الی ۱۸ ریزشبهه به علت اتمام شارژ ذخیره سازها مجبور به حذف بار می شود. در ساعت ۱۹ چون مجددا توربین های بادی توان تولید می کنند حذف بار کمتر شده و ذخیره سازها مجددا شارژ می شوند. در ساعت ۲۰ توان تولیدی توربین بادی صرف بار مصرفی و شارژ ذخیره سازها می شود. در ساعت های ۲۱ الی ۲۲ توان حاصل از توربین های بادی، میکروتوربین ها و دشارژ ذخیره سازها صرف بار مصرفی و فروش به شبکه اصلی می شود. در ساعت های ۲۳ الی ۲۴ نیز توان مازاد تولیدی توربین های بادی و میکروتوربین ها به شبکه اصلی فروخته می شود. با توجه به شکل (۸)، ریزشبهه شماره چهارده در سناریوی اول در ساعت های ۱ الی ۴ علاوه بر میکروتوربین ها از توربین های بادی خود برای تامین بار استفاده کرده است. از آنجا که میزان تولید محلی بیش از توان الکتریکی مورد نیاز داخلی ریزشبهه است، مابقی اضافه تولید به شبکه اصلی فروخته شده است.



شکل (۷): بهره برداری از ریزشبهه شماره هفت در سناریوی اول

Figure (7): Operation of microgrid 7 in the first scenario



شکل (۸): بهره برداری از ریزشبهه شماره چهارده در سناریوی اول

Figure (8): Operation of microgrid 14 in the first scenario

توربین‌های بادی در ساعت‌های ۵ الی ۱۸ از دسترس خارج شده‌اند. در ساعت‌های ۵ الی ۷ مازاد تولید میکروتوربین‌ها به شبکه اصلی فروخته شده است. اما با توجه به رشد بار در ساعت‌های ۸ الی ۱۸، توان این واحدها صرف تأمین انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان شده و توانی برای فروش اختصاص نیافته است. در ساعت‌های ۱۹ الی ۲۰ با توجه به ورود توربین‌های بادی به مدار تولید، بخشی از توان مورد نیاز توسط آن‌ها تأمین می‌گردد. در ساعت‌های ۲۱ الی ۲۴ نیز با توجه به وجود مازاد تولید، این اضافه توان به شبکه اصلی فروخته می‌شود.

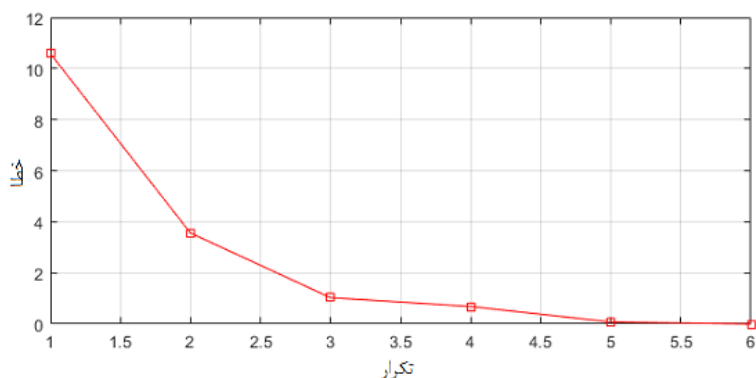
۲-۲-۴- سناریوی دوم: رویکرد غیرمتمرکز پیشنهادی

برنامه‌ریزی ریزشبه‌ها در سناریوی دوم به صورت غیرمتمرکز و بر اساس روش پیشنهادی انجام شده است. در سناریوی دوم، در ساعت‌های ۸ الی ۲۰ ریزشبه‌ها از شبکه اصلی جدا شده و برای تبادل‌های انرژی درون شبکه‌ای به شین اتصال مشترک متصل می‌شوند. بنابراین در سناریوی دوم، در ساعت‌های ۸ الی ۲۰ امکان انجام مبادله‌های ریزشبه‌ها در خریدار با ریزشبه‌های فروشنده از طریق شین اتصال مشترک وجود دارد. متناسب با نتایج به دست آمده از سناریوی اول و با توجه به روندنمای شکل (۲)، دو ریزشبه D و F به عنوان فروشنده و چهار ریزشبه A، B، C و E به عنوان خریدار می‌توانند مبادله‌های ریزشبه‌ها را با یکدیگر انجام دهند. چارچوب غیرمتمرکز پیشنهادی در تکرار ۶ همگرا شده است که روند همگرایی آن در شکل (۹) نشان داده شده است. در این سناریو قیمت فروش انرژی توسط ریزشبه‌های فروشنده به ریزشبه‌های خریدار، بیست درصد بیشتر از هزینه‌های تولید انرژی در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده از سناریوی دوم در جدول (۲) آورده شده است. مطابق نتایج جدول (۲)، میزان حذف بار در سناریوی دوم به ۲/۹۷۱ مگاوات ساعت می‌رسد که نسبت به سناریوی اول بیش از ۴۷/۵۹ مگاوات ساعت کاهش یافته است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که هزینه‌های بهره‌برداری تمامی چهارده ریزشبه در سناریوی دوم از سناریوی اول کوچک‌تر شده است. بنابراین، ریزشبه‌ها برای کاهش هزینه‌های فردی خویش در مبادله‌های ریزشبه شرکت خواهند کرد تا هم‌زمان با کاهش هزینه‌های بهره‌برداری خویش بتوانند میزان حذف بار را نیز کاهش دهند. هزینه بهره‌برداری از مجموع ریزشبه‌ها در سناریوی دوم برابر با ۵۱۹۶۱/۸۴ دلار به دست آمده است که ۸۳/۱۲ درصد کمتر از سناریوی اول است. این مقایسه برتری رویکرد مبادله‌های انرژی ریزشبه‌ها، به رویکرد بهره‌برداری جزیره‌ای از ریزشبه‌ها را نشان می‌دهد.

نحوه بهره‌برداری از برخی از ریزشبه‌ها (ریزشبه‌های اول، هفتم و چهاردهم) به عنوان نمونه در ادامه به ترتیب در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده است. در این سه شکل، توان‌های وارد شده و یا تولید شده در ریزشبه با علامت مثبت و توان‌های خارج شده و یا مصرف شده در ریزشبه با علامت منفی و به صورت تجمعی ترسیم شده‌اند. این سه شکل برقراری قید تعادل توان را نیز تأیید می‌کنند، زیرا همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص است، در هر ساعت از بهره‌برداری، مجموع تولید با مجموع مصرف برابر است. با توجه به شکل (۱۰)، ریزشبه شماره یک در ساعت‌های ۱ الی ۴ علاوه بر میکروتوربین‌ها از توربین‌های بادی خود نیز برای تأمین انرژی مصرف‌کنندگان استفاده کرده است. با این حال از آنجایی که میزان تولید محلی بیش از توان مورد نیاز داخلی ریزشبه است، بخشی از آن را صرف شارژ ذخیره‌ساز و مابقی را به شبکه اصلی می‌فروشد. در ساعت ۵ این ریزشبه تولید بادی را در اثر وقوع طوفان از دست می‌دهد و ترجیح می‌دهد حدود ۰/۴۷ مگاوات ساعت انرژی از شبکه اصلی خریداری کند. در این ساعت‌ها بخشی از انرژی خریداری شده صرف تأمین بار و بخش دیگر آن در ذخیره‌ساز الکتریکی ذخیره شده است. در ساعت‌های ۶ و ۷ بار محلی مورد نیاز ریزشبه کاهش یافته و ریزشبه انرژی در اختیار خود را به شبکه اصلی فروخته است. در ساعت‌های ۸ و ۹ تمام ظرفیت میکروتوربین‌های ریزشبه صرف تأمین بار آن شده‌اند. در ساعت‌های ۱۰ الی ۱۸ ریزشبه در مبادله‌های ریزشبه شرکت کرده و بخشی از انرژی مورد نیاز خود را از این طریق تأمین کرده است. به عنوان نمونه این ریزشبه در ساعت ۱۰ میزان ۰/۵۶ مگاوات ساعت انرژی را از این محل تأمین کرده است. در ساعت‌های ۱۱ الی ۱۳ و ۱۶ الی ۱۸ که بار محلی ریزشبه شماره یک در بالاترین مقدار خود قرار دارد، این ریزشبه ذخیره‌ساز الکتریکی خود را تخلیه کرده و از انرژی آن برای تأمین بارهای محلی خود استفاده کرده است. در ساعت‌های ۱۷ و ۱۸ با این که میکروتوربین‌های موجود در ریزشبه یک در اوج تولید خود هستند و هم‌زمان با آن ذخیره‌ساز نیز در حال تخلیه

است و ریزشبه در حال خریداری توان از طریق مبادله‌های رخ به رخ است، باز هم به دلیل بالابودن تقاضای بار، بخشی از بار حذف می‌شود. حذف بار در ساعت ۱۸ هم‌زمان با رسیدن تقاضای بار به اوج خود افزایش می‌یابد و به حدود ۰/۷۳ مگاوات می‌رسد. در ساعت ۱۹ الی ۲۴ با ورود مجدد توربین‌های بادی به مدار تولید، مشکل کمبود تولید برطرف شده و حذف بار صفر می‌شود. از ساعت ۲۰ به بعد با اتصال مجدد ریزشبه شماره یک به شبکه اصلی، شاهد صدور توان مازاد تولید توربین‌های بادی به شبکه اصلی در ساعت‌های ۲۱ الی ۲۴ هستیم.

با توجه به شکل (۱۱)، ریزشبه شماره هفت در سناریوی دوم در ساعت ۱ مازاد تولید خود را به شبکه اصلی فروخته است. این ریزشبه در ساعت‌های ۲ الی ۴ علاوه بر فروش توان به شبکه اصلی، بخشی از آن را نیز در ذخیره‌سازهای محلی خود ذخیره کرده است تا در ساعت‌های کمبود تولید مورد بهره‌برداری قرار دهد. در ساعت‌های ۵ الی ۱۸ توربین‌های بادی این ریزشبه از دسترس خارج هستند و بنابراین میکروتوربین‌ها با حداکثر توان خود کار کرده و علاوه بر تامین بار محلی، در ساعت‌های ۵ تا ۷، به شبکه اصلی نیز توان مازاد را می‌فروشند. در ساعت ۸ مازاد تولید میکروتوربین‌ها در ذخیره‌سازها ذخیره شده است.



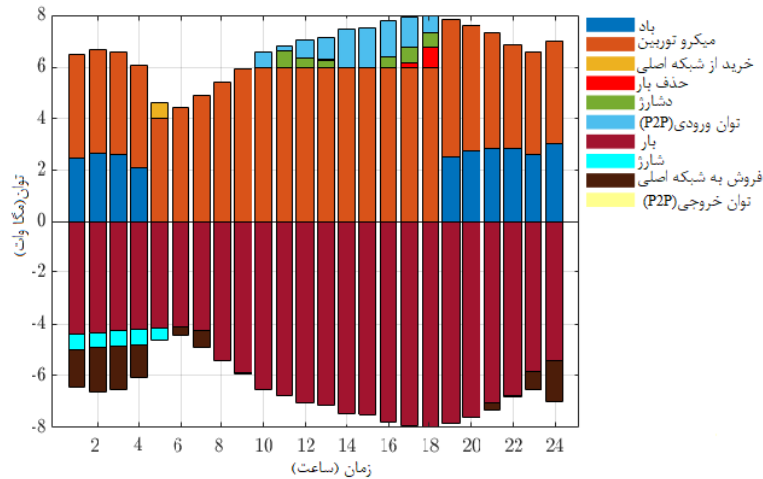
شکل (۹): روند همگرایی الگوریتم غیرمتمرکز پیشنهادی

Figure (9): Convergence trend of the proposed decentralized algorithm

Table (2): The results of second scenario

جدول (۲): نتایج سناریوی دوم (غیر همکارانه)

ریزشبه	نوع ریزشبه	کل هزینه (دلار)	هزینه میکروتوربین (دلار)	هزینه حذف بار (دلار)	هزینه مبادله‌های رخ به رخ (دلار)	هزینه خرید برق از شبکه اصلی (دلار)	هزینه ذخیره ساز انرژی (دلار)	مجموع حذف بار (مگا وات ساعت)
۱	A	۹۱۹۲/۸۵۷	۴۶۳۹/۱۹۶	۳۵۸۱/۱۵۶	۱۳۲۲/۱۲۲	-۳۵۰/۱۸	۰/۵۶۲۱۱۴	۰/۸۹۵
۲	B	۴۳۸۶/۱۴۵	۳۴۰۱/۵۳۵	۱۱۹۶/۱۴۱	۵۲۲/۰۸۳	-۷۳۳/۸۹۴	۰/۲۸۰۰۵۷	۰/۲۹۹
۳	C	۴۷۸۴/۱۰۸	۳۸۶۳/۸۲۹	۹۸۴/۸۴۱	۲۵۳/۶۷۶۴	-۳۱۸/۹۰۶	۰/۶۶۸۰۹۱	۰/۲۴۶
۴	D	۳۴۸۹/۱۱۷	۴۴۵۵/۳۸۱	۰	-۶۰۵/۷۸۱	-۳۶۱/۲۷۹	۰/۷۹۵۳۶۲	۰
۵	E	۲۱۴۳/۴۵۶	۲۲۷۱/۱۶۳	۰	۶۷۴/۷۳۹۸	-۸۰۳/۷	۱/۲۵۳۸۷۱	۰
۶	F	-۱۵۷۹/۹۲	۱۹۲۸/۰۵۳	۰	-۲۶۷۲/۱۵	-۸۳۶	۰/۱۷۹۲۳۷	۰
۷	E	۲۰۳۵/۲۲۸	۲۲۷۱/۱۶۳	۰	۵۶۶/۵۴۵۴	-۸۰۳/۷	۱/۲۲۰۱۳۸	۰
۸	A	۷۶۰۸/۳۳۸	۴۶۳۹/۱۹۶	۲۱۱۶/۵۳۲	۱۲۰۲/۲۲۸	-۳۵۰/۱۸	۰/۵۶۲۱۱۴	۰/۵۲۹
۹	A	۷۶۰۸/۳۳۸	۴۶۳۹/۱۹۶	۲۱۱۶/۵۳۲	۱۲۰۲/۲۲۸	-۳۵۰/۱۸	۰/۵۶۲۱۱۴	۰/۵۲۹
۱۰	B	۴۱۴۵/۱۳۴	۳۴۰۱/۵۳۵	۹۶۷/۴۰۴	۵۰۹/۸۰۸۹	-۷۳۳/۸۹۴	۰/۲۸۰۰۵۷	۰/۲۴۲
۱۱	C	۴۶۷۶/۰۲۲	۳۸۶۳/۸۲۹	۹۲۳/۰۶۹	۲۰۷/۳۶۱۶	-۳۱۸/۹۰۶	۰/۶۶۸۰۹۱	۰/۲۳۱
۱۲	D	۳۱۹۵/۰۸۳	۴۴۵۵/۳۸۱	۰	-۸۹۹/۸۱۵	-۳۶۱/۲۷۹	۰/۷۹۵۳۶۲	۰
۱۳	E	۲۰۳۵/۲۲۸	۲۲۷۱/۱۶۳	۰	۵۶۶/۵۴۵۴	-۸۰۳/۷	۱/۲۲۰۱۳۸	۰
۱۴	F	-۱۷۵۷/۳	۱۹۲۸/۰۵۳	۰	-۲۸۴۹/۶	-۸۳۶	۰/۲۴۳۳۳۱	۰
کل شبکه	-	۵۱۹۶۱/۸۴	۴۸۰۲۸/۶۷	۱۱۸۸۵/۶۸	۰	-۷۹۶۱/۸	۹/۲۹۰۰۷۹	۲/۹۷۱

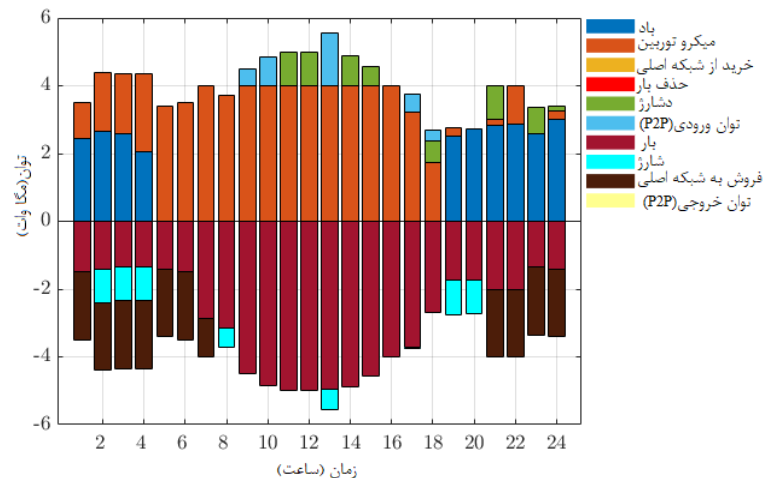


شکل (۱۰): بهره‌برداری از ریزشبکه شماره یک در سناریوی دوم

Figure (10): Operation of microgrid 1 in the second scenario

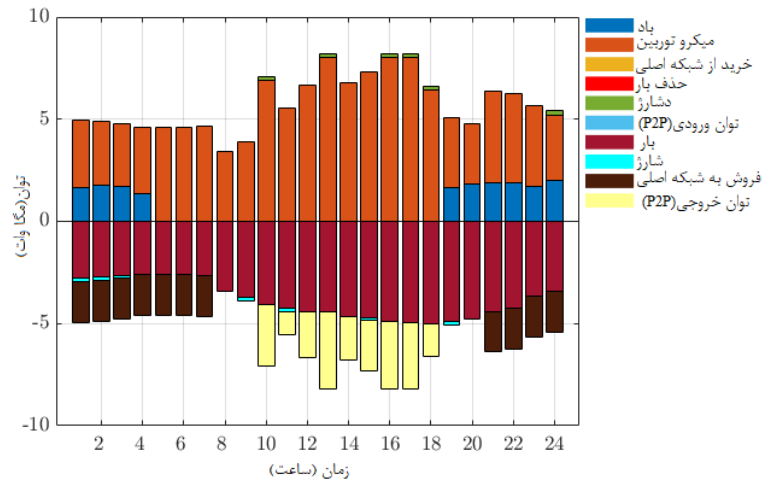
در ساعت‌های ۹ الی ۱۰ ریزشبکه شماره هفت در مبادله‌های رخ‌به‌رخ شرکت کرده و بخشی از انرژی مورد نیاز خود را از این طریق تأمین کرده است. در ساعت‌های ۱۱ الی ۱۲ با افزایش بار مصرفی، ریزشبکه بخشی از توان مورد نیاز خود را با تخلیه ذخیره‌سازها تأمین کرده است. در ساعت ۱۳ توان تولیدی میکروتوربین‌ها برای بار و شارژ ذخیره‌سازها کافی نبوده و ریزشبکه بخشی از انرژی مورد نیاز خود را از بازار مبادله‌های رخ‌به‌رخ تأمین کرده است. در ساعت‌های ۱۴ الی ۱۵ ریزشبکه برای تأمین بار خود ناچار به استفاده از ذخیره‌ساز شده است. در ساعت ۱۶ تولید میکروتوربین‌های ریزشبکه برای بار محلی مورد نیاز کافی است. در ساعت ۱۷ مجدداً ریزشبکه برای تأمین بار خود در مبادله‌های رخ‌به‌رخ شرکت کرده است. در ساعت ۱۸ علاوه بر مبادله‌های رخ‌به‌رخ نیاز به استفاده از ذخیره‌سازهای خود نیز داشته و بخشی از توان مورد نیاز را از آن‌ها تأمین کرده است. در ساعت‌های ۱۹ الی ۲۰ با توجه به ورود مجدد توربین‌های بادی به مدار، مازاد تولید در ذخیره‌سازها ذخیره شده است. در ساعت‌های ۲۱ الی ۲۴ با وصل مجدد به شبکه اصلی به فروش مازاد توان تولیدی خود به شبکه اصلی پرداخته و همچنین بخشی از توان خود را از ذخیره‌سازها تأمین کرده است.

همان‌طور که در شکل (۱۲) قابل مشاهده است ریزشبکه شماره چهارده در سناریوی دوم در ساعت‌های ۱ الی ۳ علاوه بر فروش توان به شبکه اصلی بخشی از آن را نیز در ذخیره‌سازهای خود ذخیره کرده است. این ریزشبکه در ساعت ۴ توان تولیدی توربین بادی و میکروتوربین‌ها را فقط صرف تأمین بار و فروش به شبکه اصلی کرده است.



شکل (۱۱): بهره‌برداری از ریزشبکه شماره هفت در سناریوی دوم

Figure (11): Operation of microgrid 7 in the second scenario



شکل (۱۲): بهره‌برداری از ریزشبکه شماره چهارده در سناریوی دوم
Figure (12): Operation of microgrid 14 in the second scenario

Table (3): Comparison of two scenarios results
جدول (۳): مقایسه نتایج دو سناریو

شرح	حالت جزیره‌ای	رویکرد غیر همکارانه با الگوریتم پیشنهادی	رویکرد غیر همکارانه با الگوریتم ژنتیک	رویکرد غیر همکارانه با الگوریتم تجمعی ذرات
مجموع هزینه بهره‌برداری (دلار)	۳۰۷۹۱۷/۶	۵۱۹۶۱/۸۴	۵۲۱۰۲/۸۴	۵۲۰۵۸/۸۴
مجموع حذف بار (مگاوات ساعت)	۵۰/۵۶۱	۲/۹۷۱	۲/۹۷۱	۲/۹۷۱
زمان اجرا (ثانیه)	۴/۳۰۲۸	۱۵/۰۰۷۰	۴۴/۱۲۱۲	۷۲/۴۵۳۲

در ساعت‌های ۵ الی ۱۸، توربین‌های بادی به‌علت طوفان از مدار خارج شده‌اند بنابراین هیچ تولیدی در این ساعت‌ها ندارند. در ساعت‌های ۵ الی ۷ مازاد توان تولیدی میکروتوربین‌ها به شبکه اصلی فروخته شده است. در ساعت ۸ میزان تولید دقیقاً برابر با میزان مصرف می‌باشد لذا هیچ ذخیره‌سازی یا فروش توان به شبکه وجود ندارد. در ساعت ۹ مازاد توان تولیدی در ذخیره‌سازها ذخیره شده است. در ساعت‌های ۱۰ الی ۱۸ ریزشبکه در تبادل‌های رخ‌به‌رخ شرکت کرده و مازاد توان تولیدی خود را در این بازار به فروش رسانده است.

ریزشبکه چهارده در ساعت‌های ۱۰ و ۱۳ و همچنین ۱۶ الی ۱۸ از توان ذخیره‌شده خود نیز استفاده کرده است. در ساعت‌های ۱۹ الی ۲۴ مجدداً توربین‌های بادی در دسترس قرار گرفته‌اند. در ساعت ۱۹ مازاد توان تولیدی ریزشبکه در ذخیره‌سازهای محلی ذخیره شده است. در ساعت ۲۰ مجموع توان تولیدی میکروتوربین‌ها و توربین‌های بادی برابر با توان مصرفی است. در ساعت‌های ۲۱ الی ۲۳ مازاد توان تولیدی به شبکه اصلی فروخته شده و در نهایت در ساعت ۲۴ علاوه بر فروش به شبکه اصلی از ظرفیت ذخیره‌سازهای ریزشبکه نیز استفاده شده است. در ادامه دو رویکرد مطرح در این دو سناریو با یکدیگر مقایسه و نتایج آنها تحلیل شده است.

۳-۲-۴- تحلیل نتایج

در این بخش نتایج دو سناریوی مطرح در این مقاله با یکدیگر مقایسه و خروجی‌ها تحلیل شده است. همان‌طور که از نتایج بهره‌برداری سه ریزشبکه اول، هفتم و چهاردهم و همچنین نتایج بهره‌برداری از کل ریزشبکه‌ها مشخص است، رویکرد تبادل-های انرژی رخ‌به‌رخ توانسته در زمان‌های نیاز ریزشبکه‌ها به تامین انرژی، به کمک آنها آمده و از خاموشی‌های بیشتر و افزایش هزینه‌ها جلوگیری کند. همچنین از سوی دیگر، ریزشبکه‌های فروشنده توانسته‌اند با استفاده از این رویکرد، انرژی مازاد خود را به فروش رسانده و با کسب درآمد از هزینه‌های بهره‌برداری خود بکاهند. بنابراین نتایج شبیه‌سازی‌های این مقاله نشان داد که به‌کارگیری رویکرد تبادل‌های انرژی رخ‌به‌رخ، هم برای ریزشبکه‌های فروشنده منافع بسیاری داشته و هم برای ریزشبکه‌های

خریدار. در جدول (۳) مجموع هزینه‌های بهره‌برداری، مجموع حذف بار و همچنین زمان اجرای دو سناریوی مذکور با هم مقایسه شده‌اند.

مقایسه نتایج نشان داده که سناریوی غیرمتمرکز پیشنهادی کمترین مجموع هزینه بهره‌برداری و کمترین میزان حذف بار را دارد. در این سناریو، ریزشکده‌ها با به اشتراک‌گذاری بهینه منابع تولیدی خود توانسته‌اند که مجموع هزینه‌های بهره‌برداری را به حداقل مقدار ممکن برسانند. در سناریوی دوم مجموع هزینه‌های بهره‌برداری ۵۱۹۶۱/۸۴ دلار به‌دست آمد که ۸۳/۱۲ درصد کمتر از سناریوی اول است. همچنین میزان قطع بار در سناریوی دوم ۲/۹۷۱ مگاوات-ساعت حاصل شد که ۹۴/۱۲ درصد کمتر از سناریوی اول است. بنابراین همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده است، سناریوی غیرمتمرکز پیشنهادی توانسته به میزان بسیار مناسبی از هزینه‌های بهره‌برداری و تاب‌آوری شبکه بکاهد. رویکرد غیرهمکارانه پیشنهادی با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری ژنتیک^۸ و بهینه‌سازی تجمعی ذرات^۹ (PSO) نیز حل شده است تا کارایی حل مسئله بهینه-سازی مدنظر مقاله با Cplex به اثبات برسد. همان‌طور که از نتایج این جدول مشخص است، الگوریتم‌های ژنتیک و تجمعی ذرات نتوانسته‌اند به نقطه بهینه الگوریتم پیشنهادی دست یابند.

در رویکرد جزیره‌ای برنامه‌ریزی مدنظر ریزشکده‌ها سریع‌تر انجام شده و مدت زمان اجرای شبیه‌سازی‌ها حدود ۴ ثانیه بوده است؛ زیرا در این رویکرد، هر ریزشکده به‌صورت مجزا و مستقل برنامه‌ریزی شده است. زمان حل رویکرد غیرمتمرکز پیشنهادی کمی بیشتر از رویکرد جزیره‌ای است زیرا در این رویکرد تبادل‌های رخ‌به‌رخ انرژی میان ریزشکده‌ها در نظر گرفته شده است. زمان اجرای شبیه‌سازی در رویکرد دوم در حدود ۱۵ ثانیه است. اگر چه این زمان بیشتر از زمان اجرای شبیه‌سازی‌ها در سناریوی اول است، با اینحال زمان بسیار مناسبی برای اجرای شبیه‌سازی‌هایی است که در آنها راهبرد بهره‌برداری از ریزشکده-ها برای مدت زمان یک شبانه‌روز تعیین می‌شود. مدت زمان اجرای شبیه‌سازی‌ها توسط دو الگوریتم ژنتیک و تجمعی ذرات نیز بیشتر از الگوریتم پیشنهادی است، زیرا فرایند یافتن نقطه بهینه توسط این الگوریتم‌ها تصادفی بوده و این الگوریتم‌ها بر مبنای جمعیت عمل می‌کنند. بنابراین طبیعی است که مدت زمان بیشتری برای یافتن نقطه بهینه صرف کنند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش بهره‌برداری جدید برای سازماندهی تبادل‌های رخ‌به‌رخ انرژی، جهت بهبود تاب‌آوری شبکه چند ریزشکده‌ای ارائه شد. در روش پیشنهادی، استقلال عملکردی و حریم خصوصی ریزشکده‌ها حفظ و انگیزه‌های مالی ریزشکده‌ها برای شرکت در تبادل‌های رخ‌به‌رخ در نظر گرفته شد. همچنین برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، یک شبکه توزیع دارای چهارده ریزشکده در دو سناریوی جزیره‌ای و غیرمتمرکز شبیه‌سازی شد. در رویکرد غیرمتمرکز پیشنهادی، کاهش هزینه‌های هر کدام از ریزشکده‌ها مدنظر قرار گرفت. به‌عنوان نمونه هزینه ریزشکده شماره چهارده در سناریوی اول (رویکرد جزیره‌ای) حدود ۳۶۹ دلار بود که این هزینه در سناریوی دوم (رویکرد غیرمتمرکز پیشنهادی) ۱۷۵۷/۳- دلار محاسبه شد. بنابراین این ریزشکده در سناریوی دوم تمامی هزینه‌های خود را پوشش داده و حتی کسب سود نیز کرده است.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که باقی ریزشکده‌ها نیز در سناریوی دوم هزینه کمتری متحمل شده‌اند. با این تفسیر در سناریوی دوم طبیعتاً هزینه مجموع ریزشکده‌ها نیز نسبت به سناریوی اول کاهش یافته است. هزینه مجموع ریزشکده‌ها در سناریوی دوم ۵۱۹۶۱/۸۴ دلار به‌دست آمد که ۸۳/۱۲ درصد کمتر از سناریوی اول است. همچنین بر اساس نتایج به‌دست آمده، مجموع حذف بار ریزشکده‌ها در سناریوی دوم به ۲/۹۷۱ مگاوات کاهش یافت که کمترین مقدار به‌دست آمده در میان سناریوهاست. میزان قطع بار در این سناریو به اندازه ۹۴/۱۲ درصد نسبت به سناریوی اول کاهش داشته است. در مقابل این مزایا، سرعت همگرایی شبیه‌سازی در سناریوی دوم اندکی کمتر از سناریوی اول به‌دست آمد. کل زمان شبیه‌سازی‌های سناریوی دوم، ۱۵ ثانیه طول کشیده است که کمی بیشتر از سناریوی اول است که زمان تقریبی ۴ ثانیه برای آن ثبت شده است. با این حال زمان ۱۵ ثانیه برای اجرای شبیه‌سازی‌های سناریوی دوم نیز زمان قابل قبولی است.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمین است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] M.M. Arsoon, S.M. Moghaddas-Tafreshi, "Peer-to-peer energy bartering for the resilience response enhancement of networked microgrids", *Applied Energy*, vol. 261, Article Number: 114413, Mar. 2020 (doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114413).
- [2] A. Gholami, T. Shekari, M.H. Amiroun, F. Aminifar, M.H. Amini, A. Sargolzaei, "Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 32035-32053, June 2018 (doi: 10.1109/ACCESS.2018.2845378).
- [3] S. Ma, B. Chen, Z. Wang, "Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 9, pp. 1442-1451, Mar. 2018 (doi: 10.1109/TSG.2016.2591885).
- [4] J. Liu, C. Qin, Y. Yu, "Enhancing distribution system resilience with proactive islanding and RCS-based fast fault isolation and service restoration", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 11, pp. 2381-2395, May 2020 (doi: 10.1109/TSG.2019.2953716).
- [5] K.S.A. Sedzro, A.J. Lamadrid, L.F. Zuluaga, "Allocation of resources using a microgrid formation approach for resilient electric grids", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 33, pp. 2633-2643, Aug. 2017 (doi: 10.1109/TPWRS.2017.2746622).
- [6] M.H. Amiroun, F. Aminifar, H. Lesani, "Resilience-oriented proactive management of microgrids against windstorms", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 33, pp. 4275-4284, July 2018 (doi: 10.1109/TPWRS.2017.2765600).
- [7] Y. Wang, A.O. Rousis, G. Strbac, "A resilience enhancement strategy for networked microgrids incorporating electricity and transport and utilizing a stochastic hierarchical control approach", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 26, Article Number: 100464, June 2021 (doi: 10.1016/j.segan.2021.100464).
- [8] M. Mehdinejad, H. Shayanfar, B. Mohammadi-Ivatloo, "Peer-to-peer decentralized energy trading framework for retailers and prosumers", *Applied Energy*, vol. 308, p. 118310, Feb. 2022 (doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118310).
- [9] H. Bastami, M.R. Shakarami, M. Doostizadeh, "Optimal scheduling of a reconfigurable active distribution network with multiple autonomous microgrids", *Electric Power Systems Research*, vol. 201, Article Number: 107499, Dec. 2021 (doi: 10.1016/j.epsr.2021.107499).
- [10] A. Arif, Z. Wang, "Networked microgrids for service restoration in resilient distribution systems", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, pp. 3612-3619, Aug. 2017 (doi: 10.1049/iet-gtd.2017.0380).
- [11] A. Hussain, V.H. Bui, H.M. Kim, "Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience", *Applied Energy*, vol. 240, pp. 56-72, April 2019 (doi: 10.1016/j.apenergy.2019.02.055).
- [12] C. Hotaling, S. Bird, M.D. Heintzelman, "Willingness to pay for microgrids to enhance community resilience", *Energy Policy*, vol. 154, Article Number: 112248, July 2021 (doi: 10.1016/j.enpol.2021.112248).
- [13] A. Younesi, H. Shayeghi, P. Siano, A. Safari, "A multi-objective resilience-economic stochastic scheduling method for microgrid", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 131, Article Number: 106974, Oct. 2021 (doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106974).
- [14] R. Nourollahi, P. Salyani, K. Zare, B. Mohammadi-Ivatloo, "Resiliency-oriented optimal scheduling of microgrids in the presence of demand response programs using a hybrid stochastic-robust optimization approach", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 128, Article Number: 106723, June 2021 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106723).
- [15] J. Liu, L. Jian, W. Wang, Z. Qiu, J. Zhang, P. Dastbaz, "The role of energy storage systems in resilience enhancement of health care centers with critical loads", *Journal of Energy Storage*, vol. 33, Article Number: 102086, Jan. 2021 (doi: 10.1016/j.est.2020.102086).
- [16] Z. Liang, Q. Alsafasfeh, W. Su, "Proactive resilient scheduling for networked microgrids with extreme events", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 112639-112652, Aug. 2019 (doi: 10.1109/ACCESS.2019.2933642).

[17] H. Bastami, M.R. Shakarami, M. Doostizadeh, "A decentralized cooperative framework for multi-area active distribution network in presence of inter-area soft open points", Applied Energy, vol. 300, Article Number: 117416, Oct. 2021 (doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117416).

[18] M. Doostizadeh, M.R. Shakarami, H. Bastami, "Decentralized energy trading framework for active distribution networks with multiple microgrids under uncertainty", Scientia Iranica, vol. 26, no. 6, pp. 3606-3621, Sept. 2019 (doi: 10.24200/sci.2019.53962.3557).

[19] H. Bastami, M.R. Shakarami, M. Doostizadeh, "A non-hierarchical ATC framework for parallel scheduling of active distribution network with multiple autonomous microgrids", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 133, Article Number: 107293, Dec. 2021 (doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107293).

[20] P. Huang, M. Lovati, J. Shen, J. Chai, and X. Zhang, "Investigation of the peer-to-peer energy trading performances in a local community under the future climate change scenario in sweden", Energy Reports, vol. 8, pp. 989-1001, Nov. 2022 (doi: 10.1016/j.egy.2021.12.032).

[21] W. Amin, Q. Huang, K. Umer, Z. Zhang, M. Afzal, A. A. Khan, S. AdreesAhmed, "A motivational game-theoretic approach for peer-to-peer energy trading in islanded and grid-connected microgrid", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 123, Article Number: 106307, Dec. 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106307).

ضمیمه

الف - اندیس‌ها و مجموعه‌ها

اندیس و مجموعه	نماد	اندیس و مجموعه	نماد
اندیس بازه زمانی	T	اندیس میکروتوربین‌ها	N
مجموعه‌ی بازه‌های زمانی موجود در افق برنامه‌ریزی	T	مجموعه‌ی ژنراتورهای محلی موجود در ریزشبکه i ام	G_i
اندیس ریزشبکه	I		

ب - پارامترها

پارامتر	نماد	پارامتر	نماد
هزینه قطع بار در ریزشبکه i ام	c_i^{sh}	هزینه خرید برق از شبکه اصلی	$c_{i,t}^{buy}$
هزینه شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی در ریزشبکه i ام	$c_i^{ESS, ch}$	هزینه دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی در ریزشبکه i ام	$c_i^{ESS, di}$
حداکثر نرخ تغییرات تولید میکروتوربین	δ_n^G	قیمت تولید مجازی	c^{Dom}
پیش‌بینی توان مصرفی ریزشبکه i ام و در بازه زمانی t ام	$P_{i,t}^D$	حداکثر ظرفیت تولید میکروتوربین n ام	$P_n^{G, max}$
حداکثر توان قابل تبادل میان ریزشبکه i ام و شبکه اصلی	$P_{i,t}^{xin}$	پیش‌بینی تولید توربین بادی در بازه زمانی t ام در ریزشبکه i ام	$P_{i,t}^{wind}$
حداکثر توان شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ریزشبکه i ام	$\delta_i^{d, ES}$	بازده شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی موجود در ریزشبکه i ام	η_i^c
بازده دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی موجود در ریزشبکه i ام	η_i^d	میزان ظرفیت ذخیره‌ساز الکتریکی موجود در ریزشبکه i ام	C_i^{ES}
حداقل انرژی مجاز ذخیره شده در ذخیره‌ساز الکتریکی	SOC_{min}	حداکثر انرژی مجاز ذخیره شده در ذخیره‌ساز الکتریکی	SOC_{max}
حداکثر توان شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ریزشبکه i ام	$\delta_i^{c, ES}$		

ج - متغیرهای الکتریکی

متغیر	نماد	متغیر	نماد
توان ژنراتور مجازی ریزشبکه i ام در بازه زمانی t ام	$P_{i,t}^{Dom}$	توان شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی موجود در ریزشبکه i ام در ساعت t ام	$P_{i,t}^c$
میزان تولید ژنراتور n ام در بازه زمانی t ام	$P_{n,t}^G$	توان دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی موجود در ریزشبکه i ام در ساعت t ام	$P_{i,t}^d$
میزان توان الکتریکی وارد شده از شبکه‌ی بالادست به ریزشبکه i ام در ساعت t ام	$P_{i,t}^{buy}$	توان وارد شده از شین اتصال مشترک به ریزشبکه i ام در تبادل‌های رخ به رخ در بازه زمانی t ام	$P_{i,t}^{P2P}$
میزان بار حذف شده در ساعت t ام در ریزشبکه i ام	$P_{i,t}^{sh}$	وضعیت شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی ریزشبکه‌ی i ام در زمان t ام	$SOC_{i,t}$

د- متغیرهای اقتصادی

نماد	متغیر	نماد	متغیر
CO_i^{Dom}	هزینه تولید ژنراتورهای مجازی در ریزشبکه Δm	CO_i^{P2P}	هزینه مبادله‌های رخ‌به‌رخ ریزشبکه Δm
CO_i^{P2P}	هزینه تبادل‌های رخ‌به‌رخ در ریزشبکه Δm	τ_i	مجموع هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبکه Δm
$C_{m,t}^{P2P}$	قیمت پیشنهادی فروش ریزشبکه Δm در بازار مبادله‌های رخ‌به‌رخ انرژی		

زیرنویس‌ها

1. Resilience
2. Distribution generation resources
3. Preventive activities
4. Combined random-robust optimization
5. Energy storage systems
6. Power balance
7. Power exchange limit
8. Genetic metaheuristic optimization algorithm
9. Particle swarm optimization