

A Three-Level Framework for Determining the Optimal Strategy of Microgrids to Participate in the Day-Ahead Competitive Market by Considering Electric Vehicles and Demand Response Programs

Abolfazl Bayatian¹, M.Sc., Amir Ahmarinejad², Assistant Professor

¹ Department of Electrical Engineering- Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Department of Electrical Engineering- Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
abolfazl.bayatian5@gmail.com, a.ahmarinejad@iauctb.ac.ir

Abstract

In this paper, a three-level scenario-based framework for determining the optimal strategy and planning of microgrids located in a 118-bus distribution system is presented. This paper considers the uncertainties of renewable energy resources, load demand, and the charge / discharge schedule of electric vehicles. In order to increase planning flexibility, the operator will be able to change the flow through the distribution feeder reconfiguration. Also in the proposed model, customers will be able to reduce their costs by participating in a demand response program. In the first level of the proposed model, the bidding strategy of microgrids is determined. In the second level, the market clearing price is determined by the independent system operator and according to the submitted bids. Finally, in the third stage, the problem of final microgrid programming is solved by a participatory game theory method. The proposed model is solved by the CPLEX solver in GAMS software and the results show that the dynamic topology improves the planning flexibility and thus reduces the total operating cost by about 10%. The results also show that the coordination of electric vehicles with scheduling, the presence of storage systems and the implementation of the demand response program leads to a significant reduction in the level of market-clearing price and thus reduce operating costs.

Keywords: cooperative game theory approach, demand response programs, electric vehicles, microgrids scheduling, optimal bidding strategy, renewable energy resources

Received: 16 May 2022

Revised: 23 June 2022

Accepted: 19 August 2022

Corresponding Author: Dr. Amir Ahmarinejad

Citation: A. Bayatian, A. Ahmarinejad, "A three-level framework for determining the optimal strategy of microgrids to participate in the day-ahead competitive market by considering electric vehicles and demand response programs", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 56, pp. 97-118, January 2023 (in Persian).

یک چارچوب سه مرحله‌ای برای تعیین استراتژی بهینه ریزش شبکه‌ها جهت مشارکت در بازار رقابتی روز بعد با در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی و برنامه‌های پاسخگویی تقاضا

ابوالفضل بیاتیان، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، امیر احمدی‌نژاد، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشکده فنی و مهندسی - واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

abolfazl.bayatian5@gmail.com, a.ahmarinejad@iauctb.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک چارچوب سه مرحله‌ای مبتنی بر سناریو برای تعیین استراتژی بهینه و برنامه‌ریزی ریزش شبکه‌های قرار گرفته در یک سیستم توزیع ۱۱۸ شینه ارائه شده است. عدم قطعیت‌های منابع تجدیدپذیر، تقاضای بار و برنامه شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی در نظر گرفته شده است. برای ارتقای انعطاف در برنامه‌ریزی، بهره‌بردار قادر خواهد بود تا از طریق بازآرایی سیستم توزیع مسیر شارش توان را تغییر دهد. همچنین در مدل پیشنهادی مشترکین قادر به کاهش هزینه‌های خود از طریق مشارکت در یک برنامه پاسخگویی تقاضا هستند. در مرحله اول مدل پیشنهادی، استراتژی پیشنهادی ریزش شبکه‌ها تعیین می‌شود. در مرحله دوم قیمت تسویه بازار توسط بهره‌بردار مستقل سیستم و با توجه به پیشنهادات ارسالی مشخص می‌گردد. در نهایت، در مرحله سوم مسئله برنامه‌ریزی نهایی ریزش شبکه‌ها توسط یک روش تئوری بازی مشارکتی حل می‌شود. مدل پیشنهادی توسط حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار گمز حل شده و نتایج نشان می‌دهند که توپولوژی دینامیک انعطاف برنامه‌ریزی را ارتقا داده و از این طریق منجر به کاهش حدود ۱۰ درصدی هزینه بهره‌برداری کل شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که هماهنگی خودروهای الکتریکی با برنامه‌ریزی، حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز و اجرای برنامه پاسخگویی تقاضا منجر به کاهش چشمگیر سطح قیمت تسویه بازار و در نتیجه کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود.

کلمات کلیدی: استراتژی پیشنهادی بهینه، برنامه‌ریزی ریزش شبکه‌ها، برنامه‌های پاسخگویی تقاضا، خودروهای الکتریکی، روش تئوری بازی مشارکتی، منابع انرژی تجدیدپذیر

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۲/۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۴/۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۵/۲۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر امیر احمدی‌نژاد

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

در سالیان اخیر، سرمایه‌گذاران سیستم توزیع توجه ویژه‌ای به احداث منابع تولید پراکنده^۱ (DER) در شبکه داشته‌اند. زیرا این منابع نه تنها تلفات، هزینه‌های بهره‌برداری و آلودگی را کاهش داده، بلکه منجر به افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌شوند [۱]. لازم به ذکر است که از میان DERها، منابع انرژی تجدیدپذیر همچون توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی بیشتر از واحدهای سوخت فسیلی مورد توجه قرار گرفته‌اند. افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر علی‌رغم نکات مثبتی همچون کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های بهره‌برداری ناچیز، منجر به افزایش عدم قطعیت‌های سیستم می‌شوند. یکی از روش‌های بسیار مؤثر برای مقابله با این عدم قطعیت‌ها نصب سیستم‌های ذخیره‌ساز در کنار منابع انرژی تجدیدپذیر (RERS) است. سیستم‌های EES نه تنها مازاد توان تولیدی منابع تجدیدپذیر را در خود ذخیره کرده و از هدر رفتن آن جلوگیری می‌کنند، بلکه با تزریق توان در ساعات‌های پیک به تأمین بار شبکه کمک می‌کنند [۲].

ادغام DERs با سیستم‌های ذخیره‌ساز (EES) و بارهای منعطف، یک شبکه ولتاژ ضعیف را تشکیل می‌دهد، که به این مفهوم ریزشبکه می‌گویند. ریزشبکه‌ها به روش غیرمتمرکز کنترل شده و بسته به شرایط (نرمال یا اضطراری) در دو حالت متصل و منفصل از شبکه قابل بهره‌برداری هستند. در شرایط بهره‌برداری نرمال، ریزشبکه‌ها به شبکه متصل بوده و قادر به تبادل توان با آن است. در مقابل ریزشبکه‌ها در شرایط اضطراری (رخداد خطا در شبکه) قادر به بهره‌برداری در حالت جزیره‌ای^۲ هستند. لازم به ذکر است که در حالت جزیره‌ای ریزشبکه باید بار مصرف‌کنندگان خود را از طریق DERهای خود تامین کند [۳].

در بازارهای برق تجدیدساختار شده استراتژی ریزشبکه‌ها برای شرکت در بازار باید به گونه‌ای تعیین شود که نه تنها جنبه‌های اقتصادی، بلکه جنبه‌های فنی و امنیتی در آن در نظر گرفته شوند. یکی از روش‌های مؤثر که منجر به ارتقای جنبه‌های فنی و اقتصادی می‌شود، اجرای برنامه‌های پاسخگویی تقاضا (DR) است. این برنامه‌ها در دسته‌های مبتنی بر قیمت و مبتنی بر تشویق دسته‌بندی شده و مشارکت در آن‌ها می‌تواند اختیاری و یا اجباری باشد. به‌طور کلی اجرای برنامه‌های DR منجر به ارتقای انعطاف‌پذیری بهره‌برداری می‌شود [۴]. علاوه بر این، در سالیان اخیر و با افزایش چشم‌گیر تعداد خودروهای الکتریکی، استفاده از پتانسیل آن‌ها برای ارتقای انعطاف‌پذیری بهره‌برداری بسیار مورد توجه پژوهشگران این حوزه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که برنامه شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی تاثیر بالایی بر تعیین استراتژی ریزشبکه‌ها برای مشارکت در بازار دارد [۵].

پژوهشگران در طی سالیان اخیر استراتژی‌های متعددی برای مشارکت ریزشبکه‌ها در بازار برق با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها ارائه کرده‌اند. برای مثال، در مرجع [۶] یک استراتژی پیشنهادی برای ریزشبکه‌ها در حضور RERها و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها ارائه شده است. سناریوهای بار و تولید بادی توسط توابع توزیع احتمالاتی تولید شده و توسط روش مبتنی بر سناریو در مدل گنجانده شده‌اند. مدل بر روی یک سیستم توزیع ۳۳ باس پیاده‌سازی شده و تابع هدف آن متشکل از حداکثرسازی سود و حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که استراتژی پیشنهادی معرفی شده، منجر به افزایش سود ریزشبکه و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری آن می‌شوند. در مرجع [۷] یک استراتژی پیشنهادی جدید برای یک نیروگاه مجازی^۳ (VPP) ارائه شده که VPP مطالعه شده متشکل از منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی، توربین‌های گازی و سیستم‌های ذخیره‌ساز است. در این مطالعه برای مقابله با عدم قطعیت‌های مربوط به RERها و بار از روش تئوری تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی^۴ استفاده شده است. مسئله برنامه‌ریزی به‌صورت دوهدفه مدل شده و توابع هدف آن شامل سود و انتشار آلودگی هستند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که استراتژی پیشنهادی انتشار را به‌طور چشم‌گیری کاهش داده است. در مرجع [۸] یک استراتژی مشارکتی برای تبادل نقطه به نقطه^۵ میان ریزشبکه‌ها ارائه شده که برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های قیمت و بار از روش تصادفی^۶ استفاده شده است. تابع هدف مدل پیشنهادی حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری کل ریزشبکه‌ها است. برای خطی‌سازی قسمت درجه دوم^۷ فرمول‌نویسی از روش تقریب درجه دوم مورب^۸ استفاده شده و نتایج نشان‌دهنده تاثیرگذاری استراتژی پیشنهادی هستند. در مرجع [۹] مدل تصادفی سه مرحله‌ای برای مدیریت انرژی هماهنگ خانه‌های هوشمند^۹ و سیستم توزیع ارائه شده که در آن توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی منجر به کاهش هزینه‌های تامین انرژی شده است. در مرجع [۱۰] نویسندگان یک چارچوب مدیریت انرژی ارائه شده که توابع هدف آن حداقل‌سازی هزینه‌های تامین انرژی و حداکثرسازی شاخص رفاه

خانه‌های هوشمند است. مدل مذکور به صورت خطی مدل شده و نتایج شبیه‌سازی تأثیرگذاری مدل پیشنهادی را بر کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری سیستم اثبات می‌کنند.

افزایش نرخ مشارکت در برنامه‌های DR در سالیان اخیر نشان داده که این برنامه‌ها از طریق اصلاح پیک تقاضا منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان می‌شوند. نویسندگان در مرجع [۱۱] یک استراتژی پیشنهادی ارتقا یافته برای مشارکت ریزشکه‌ها در بازار روز بعد ارائه شده که در آن برای حل مسئله برنامه‌ریزی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. در مدل پیشنهادی مصرف‌کنندگان در یک برنامه DR مشارکت کرده و نتایج نشان می‌دهند که اجرای این برنامه‌ها منجر به کاهش هزینه بهره‌برداری و افزایش قابلیت اطمینان می‌شود. در مرجع [۱۲] یک چارچوب مدیریت انرژی برای برنامه‌ریزی روز بعد یک سیستم توزیع ۳۳ شینه متشکل از ریزشکه‌های متصل به هم ارائه شده که در آن ۱۲ درصد مصرف‌کنندگان قادر به مشارکت در یک برنامه DR هستند. در این مطالعه، ریزشکه‌ها پیش از مشارکت در بازار تقاضای بار و تولید منابع تجدیدپذیر قرار گرفته در محدوده خود را از طریق شبکه مصنوعی عصبی یادگیری عمیق^{۱۰} پیش‌بینی می‌کنند. این مدل بر روی یک شبکه توزیع ۳۳ شینه پیاده‌سازی شده و نتایج نشان می‌دهند که اجرای برنامه DR و حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش انعطاف‌پذیری سیستم شده است.

در سالیان اخیر بسیاری از پژوهشگران در مدیریت انرژی شبکه‌های توزیع اثرات زیست محیطی را در نظر گرفته‌اند، از آنجا که مسئله گرمایش زمین به یک مشکل بحرانی تبدیل شده است. در این راستا در مرجع [۱۳] یک مدل بهینه برای برنامه‌ریزی اقتصادی-زیست محیطی ریزشکه‌های چندحاملی^{۱۱} با در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی، سیستم‌های ذخیره‌ساز و تکنولوژی برق به گاز^{۱۲} (P2G) ارائه شده است. تابع هدف این مسئله حداقل‌سازی همزمان هزینه بهره‌برداری و انتشار آلودگی است و نتایج نشان می‌دهند که سیستم‌های ذخیره‌ساز و تکنولوژی P2G منجر به کاهش انتشار شده‌اند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که اجرای برنامه DR منجر به بهبود شاخص‌های اقتصادی و زیست محیطی شده است. نویسندگان در مرجع [۱۴] یک بررسی کامل بر روی شاخص‌های اقتصادی و زیست محیطی ریزشکه‌ها در حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز هوای فشرده انجام داده‌اند. مسئله توسط روش فازی^{۱۳} به صورت دو هدفه مدل شده و توابع هدف آن شامل هزینه بهره‌برداری و آلودگی است. نتایج نشان می‌دهند که سیستم‌های ذخیره‌ساز نه تنها حذف توان بادی را کاهش داده بلکه انتشار CO₂ را نیز کاهش می‌دهند. در مرجع [۱۵] یک چارچوب تصادفی برای مدیریت انرژی ریزشکه‌های متصل به هم ارائه شده که در آن هر ریزشکه دارای منابع حرارتی، بادی و خورشیدی است. مسئله بهره‌برداری به روش سه هدفه مدل شده و اهداف آن حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری، حداقل‌سازی انتشار و حداقل‌سازی پیک بار است. مسئله برنامه‌ریزی به روش متمرکز^{۱۴} حل شده و نتایج نشان می‌دهند که اجرای برنامه DR منجر به استفاده بیشتر از ظرفیت منابع انرژی تجدیدپذیر شده و در نتیجه انتشار را کاهش می‌دهد.

بسیاری از پژوهش‌ها اثبات کرده‌اند که بازآرایی سیستم توزیع (DFR) به طور چشم‌گیری انعطاف‌پذیری سیستم را ارتقا می‌دهد. برای مثال در مرجع [۱۶] مشارکت ریزشکه‌ها در بازار رقابتی روز بعد بر اساس یک استراتژی مبتنی بر تئوری بازی تعیین می‌شود. برای ارتقای انعطاف‌پذیری و کاهش هزینه‌های برنامه‌ریزی، بهره‌برداری با امکان اجرای DFR انجام شده است. همچنین در مدل پیشنهادی عدم قطعیت‌های توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی و بار توسط روش مبتنی بر سناریو مدل شده‌اند. مدل پیشنهادی توسط حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل شده و نتایج نشان می‌دهند که DFR منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که استراتژی مبتنی بر تئوری بازی هزینه‌های بهره‌برداری را حدود ۲۴ درصد کاهش می‌دهد. در مرجع [۱۷] یک مدل جامع برای برنامه‌ریزی روز بعد یک سیستم توزیع ۳۳ شینه ارائه شده که در آن برنامه‌ریزی تولید همراه با DFR انجام می‌شود. مسئله بهره‌برداری به خطی MILP فرموله شده و توسط روش اپسیلون-مقید^{۱۵} به صورت دوهدفه مدل شده است. در این مطالعه تأثیر DFR بر روی شاخص‌های فنی و اقتصادی بررسی شده و نتایج نشان می‌دهند که اجرای DFR منجر به افزایش قابلیت اطمینان، کاهش تلفات و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. در مرجع [۱۸] یک روش مدیریت انرژی بهینه ریزشکه بر اساس معیارهای فنی اقتصادی و زیست محیطی با استفاده از الگوریتم جستجوی کلاغ ارائه شده است. در مرجع [۱۹] مدیریت بهینه انرژی در شبکه‌های هوشمند چند ناحیه‌ای سبب افزایش رفاه اجتماعی، کاهش هزینه‌های اقتصادی و آلودگی زیست محیطی خواهد شد که در آن یک رویکرد دوسطحی برای حل مدل پیشنهادی

ارائه شده که سطح بالایی جهت کمینه‌سازی هزینه اقتصادی و آلاینده‌گی و سطح پایینی برای پیشینه‌سازی رفاه اجتماعی و به‌صورت شرایط خطی کاروش-کوهن-تاکر^{۱۶} (KKT) فرموله شده است. در مرجع [۲۰] خطای حاصل از پیش‌بینی سرعت باد و تابش خورشید به وسیله توابع چگالی احتمال مدل‌سازی شده و یک مدل برنامه‌ریزی احتمالاتی برای بهینه‌سازی عملکرد ریزشبه‌هوشمند در کوتاه مدت جهت حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌گی با حضور منابع تجدیدپذیر پیشنهاد می‌شود.

بررسی مقاله‌ها اخیر نشان می‌دهد که هیچکدام از آن‌ها به‌طور همزمان تاثیر خودروهای الکتریکی، سیستم‌های ذخیره‌ساز، برنامه‌های DR و بازآرایی شبکه را بر قیمت برق در بازار روز بعد بررسی نکرده‌اند. همچنین بررسی دقیق نشان می‌دهد که هیچ یک از پژوهش‌های اخیر یک مدل سه مرحله‌ای با در نظر گرفتن روش تئوری بازی برای برنامه‌ریزی ریزشبه‌هوشمند ارائه نداده‌اند. از این‌رو در این مقاله یک مدل جامع سه مرحله‌ای برای برنامه‌ریزی ریزشبه‌هوشمند ارائه شده که در آن تاثیر حضور همزمان خودروهای الکتریکی، سیستم‌های ذخیره‌ساز، برنامه‌های DR و بازآرایی شبکه بر قیمت بازار به‌طور دقیق بررسی می‌شود. به‌طور کلی، در این مطالعه یک چارچوب سه مرحله‌ای برای تعیین استراتژی بهینه و برنامه‌ریزی ریزشبه‌هوشمند با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های RER، تقاضای بار و برنامه شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی (EVs) ارائه شده است. در مدل پیشنهادی، بهره‌بردار قادر به اجرای DFR بوده و یک برنامه DR مبتنی بر تشویق نیز اجرا می‌شود. برای کاهش فضای حل مسئله به سه قسمت تقسیم شده و مسئله برنامه‌ریزی ریزشبه‌هوشمند در مرحله سوم توسط یک روش تئوری بازی مشارکتی حل می‌شود. به‌طور کلی نوآوری‌های این تحقیق به شرح زیر هستند:

- ارائه یک مدل خطی سه مرحله‌ای برای تعیین استراتژی پیشنهادی و برنامه‌ریزی ریزشبه‌هوشمند در حضور همزمان خودروهای الکتریکی، برنامه DR، سیستم‌های ذخیره‌ساز و بازآرایی شبکه
- کاهش قیمت تسویه بازار از طریق مشارکت خودروهای الکتریکی در برنامه‌ریزی

۲- فرمول‌سازی ریاضی

در این بخش مدل پیشنهادی در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح^{۱۷} (MILP) فرموله می‌شود. در مرحله اول این مدل هر ریزشبه‌هوشمند پیشنهادات خرید و فروش خود را با هدف حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری تعیین کرده و برای بازار حوضچه^{۱۸} ارسال می‌کند. در مرحله دوم قیمت تسویه بازار توسط بهره‌بردار مستقل سیستم^{۱۹} (ISO) شده و در مرحله سوم برنامه‌ریزی نهایی ریزشبه‌هوشمند از طریق یک تئوری بازی مشارکتی انجام می‌شود.

۲-۱- مدل‌سازی مرحله اول

در معادله (۱) تابع هدف مرحله اول ارائه شده که حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری هر ریزشبه‌هوشمند است. قید تعادل توان هر ریزشبه‌هوشمند با در نظر گرفتن تبادل توان آن با بازار در معادله (۲) ارائه شده است. معادله (۳) نیز تبادل توان هر ریزشبه‌هوشمند را محاسبه می‌کند. لازم به ذکر است که معادله (۳) در یک پروسه مبتنی بر تکرار حل می‌شود. تابع‌های ارائه شده در معادله‌های (۴) و (۵) قیمت حاشیه‌ای^{۲۰} مربوط به هر قرارداد پیشنهادی در پارامترهای مربوط به خرید و فروش ذخیره می‌کنند.

$$\text{Min } TC_{mg,s} = \sum_t \left(\sum_{g \in \Delta_{mg}^g} C_{g,t,s}^{gt} + \sum_{g \in \Delta_{mg}^{[w,pv]}} C_{g,t,s}^{ren} + \sum_{e \in \Delta_{mg}^e} C_{e,t,s}^{ees} + \sum_{v \in \Delta_{mg}^v} C_{v,t,s}^{ev} + \sum_{n \in \Delta_{mg}^n} C_{n,t,s}^{dr} + \sum_{n \in \Delta_{mg}^n} C_{n,t,s}^{ens} \right) \quad (1)$$

$$\sum_{g \in \Delta_{mg}^g} P_{g,t,s}^{gt} + \sum_{g \in \Delta_{mg}^w} P_{g,t,s}^w + \sum_{g \in \Delta_{mg}^{pv}} P_{g,t,s}^{pv} + \sum_{e \in \Delta_{mg}^e} (P_{e,t,s}^{dch} - P_{e,t,s}^{ch}) = P_{mg,t,s}^{market} + P_{mg,t,s}^{load} - P_{mg,t,s}^{load,ess}, MC_{mg,t,s} \quad (2)$$

$$P_{mg,t,s}^{market} = P_{mg}^{market,min} + \left(\frac{iter-1}{iter^{max}-1} \right) (P_{mg}^{market,max} - P_{mg}^{market,min}) \quad (3)$$

$$\text{if } P_{mg,t,s}^{market} \leq 0 \rightarrow \begin{cases} \sim \text{buy} \\ P_{mg,i=iter,t,s} = |P_{mg,t,s,iter}^{market}| \\ \sim \text{buy} \\ P_{mg,i=iter,t,s} = MC_{mg,t,t} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{if } P_{mg,t,s}^{\text{market}} \geq 0 \rightarrow \begin{cases} \sim \text{sell} \\ P_{mg,j=\text{iter},t,s} = P_{mg,t,s}^{\text{market}} \\ \pi_{mg,j=\text{iter},t,s}^{\text{sell}} = MC_{mg,t,t} \end{cases} \quad (5)$$

۲-۲- مدل سازی مرحله دوم

رابطه‌های مورد نیاز برای اجرای مرحله دوم مدل پیشنهادی در معادله‌های (۶) تا (۱۱) ارائه شده‌اند. در این مرحله، ISO قیمت تسویه بازار را با توجه به پیشنهادهای ارسال شده توسط ریزشبه‌ها، تعیین می‌کند. در این راستا معادله (۶) نشان می‌دهد که تابع هدف مرحله دوم حداکثرسازی رفاه اجتماعی^{۲۱} است. قید تعادل توان ریزشبه‌ها با در نظر گرفتن تبادل توان با سایر ریزشبه‌ها در معادله (۷) بازنویسی می‌شود. در معادله (۷) میزان تبادل توان هر ریزشبه با شرکت توزیع^{۲۲} (DisCo) محاسبه می‌شود. مقادیر متغیرهای مربوط به خرید و فروش در معادله‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب با توجه به پیشنهادات خرید و فروش ارسال شده، تعیین می‌شود. در نهایت برای جلوگیری از تأیید همزمان پیشنهادات خرید و فروش مربوط به یک ریزشبه، قید (۱۰) ارائه شده است.

$$\text{Max } SW = \sum_s \rho_s \sum_t \sum_{mg} \left(\sum_i \pi_{mg,i,t,s}^{\text{buy}} P_{mg,i,t,s}^{\text{buy}} - \sum_j \pi_{mg,j,t,s}^{\text{sell}} P_{mg,j,t,s}^{\text{sell}} \right) \quad (6)$$

$$P_{mg,t,s}^{\text{market}} + \sum_{g \in \Delta_{mg}^{\text{gt}}} P_{g,t,s}^{\text{gt}} + \sum_{g \in \Delta_{mg}^{\text{w}}} P_{g,t,s}^{\text{w}} + \sum_{g \in \Delta_{mg}^{\text{pv}}} P_{g,t,s}^{\text{pv}} + \sum_{e \in \Delta_{mg}^{\text{es}}} (P_{e,t,s}^{\text{dch}} - P_{e,t,s}^{\text{ch}}) = \sum_{l \in \Delta_{mg}^{\text{l}}} \kappa_{l,mg} P_{l,t,s}^{\text{line}} \quad (7)$$

$$\sum_i P_{mg,i,t,s}^{\text{buy}} - \sum_j P_{mg,j,t,s}^{\text{sell}} = P_{mg,t,s}^{\text{market}} \quad (8)$$

$$P_{mg,j,t,s}^{\text{sell}} \leq P_{mg,j,t,s}^{\text{sell}} I_{mg,j,t,s}^{\text{sell}} \quad (9)$$

$$P_{mg,i,t,s}^{\text{buy}} \leq P_{mg,i,t,s}^{\text{buy}} I_{mg,i,t,s}^{\text{buy}} \quad (10)$$

$$0 \leq \sum_j I_{mg,j,t,s}^{\text{sell}} + \sum_i I_{mg,i,t,s}^{\text{buy}} \leq 1 \quad (11)$$

۲-۳- مدل سازی مرحله سوم

در مرحله سوم مسئله برنامه‌ریزی روز بعد ریزشبه‌ها توسط یک روش تئوری بازی مشارکتی، حل می‌شود [۱۶]. لازم به ذکر است که در این مرحله تمامی قیود امنیتی و شارش توان در نظر گرفته می‌شوند. در معادله‌های (۱۲) تا (۱۵) شرایط مورد نیاز برای اجرای تئوری بازی مشارکتی ارائه شده است. در این راستا در معادله (۱۲) تابع هدف مسئله بهره‌برداری کلیه بازیکنان نشان داده شده است که حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری است. لازم به ذکر است که این تابع به‌طور جداگانه از دیدگاه هر بازیکن حل می‌شود. تابع ارائه شده در معادله (۱۳) مقدار عادی^{۲۳} تابع هدف هر بازیکن را محاسبه می‌کند که تابعی از بهترین (مینیمم) و بدترین (ماکزیمم) مقادیر به‌دست آمده برای آن است. لازم به ذکر است که بهترین مقدار برای هر بازیکن در هنگام حل از دیدگاه خودش به‌دست می‌آید، در حالی که بدترین مقدار آن در هنگام حل توسط سایر بازیکنان به‌دست می‌آید. معادله (۱۴) بدترین مقدار به‌دست آمده برای هر بازیکن را تعیین می‌کند. در نهایت تابع هدف بازی در معادله (۱۵) ارائه شده است، که حداکثرسازی انحراف هر بازیکن از بدترین مقدار خودش است.

$$TC_{mg} = \sum_s \rho_s \sum_t \left(\sum_{g \in \Delta_{mg}^{\text{gt}}} C_{g,t,s}^{\text{gt}} + \sum_{g \in \Delta_{mg}^{\text{ren}}} C_{g,t,s}^{\text{ren}} + \sum_{e \in \Delta_{mg}^{\text{ees}}} C_{e,t,s}^{\text{ees}} + \sum_{v \in \Delta_{mg}^{\text{ev}}} C_{v,t,s}^{\text{ev}} + \sum_{n \in \Delta_{mg}^{\text{dr}}} C_{n,t,s}^{\text{dr}} + \sum_{n \in \Delta_{mg}^{\text{ens}}} C_{n,t,s}^{\text{ens}} \right) \quad (12)$$

$$TC_{mg}(x) \in [TC_{mg}^{\text{min}}(x^{\text{min}}), TC_{mg}^{\text{max}}(x^{\text{max}})] \quad (13)$$

$$TC_{mgi}(x) \xrightarrow{\text{normalize}} TC_{mg}^{\text{norm}}(x)$$

$$TC_{mg}^{\text{worst}} = \max_{\text{player} \in \{mg_1, mg_2, mg_3, mg_4\}} TC_{mg}^{\text{norm}}(x_{\text{player}}^{\text{min}}) \quad (14)$$

$$\text{Max } GW = \prod_{\text{player}=1} (TC_{\text{player}}^{\text{worst}} - TC_{\text{player}}) \quad (15)$$

۴-۲- برنامه پخش بار

برنامه پخش بار توسط معادله‌های (۱۶) تا (۲۵) مدل می‌شود تا از تبادیل غیر واقعی توان در شبکه جلوگیری شود [۱۵]. توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از هر خط به ترتیب از طریق معادله‌های (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌شوند. با توجه به این موضوع که ISO قادر به اجرای DFR است، ممکن است در هر ساعت برخی از خطوط غیرفعال شوند تا ساختار تغییر کند. بنابراین، برای جلوگیری از اعمال قیود (۱۶) و (۱۷) بر روی خطوط غیرفعال از روش Big M استفاده شده است، تا در شرایط مذکور این قیود متعادل^{۲۴} شوند. توان ظاهری عبوری از خطوط توسط قید (۱۸) محدود می‌شود. اندازه ولتاژ و زاویه آن در هر شین نیز به ترتیب توسط قیود (۱۹) و (۲۰) محدود می‌شوند. تلفات توان توسط معادله (۲۱) محاسبه می‌شود که به توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از آن وابسته می‌شد. در نهایت معادله‌های (۲۲) و (۲۳) تعادل تولید و مصرف توان‌های اکتیو و راکتیو را در هر شین تضمین می‌کنند.

$$G_l (V_{n,t,s} - V_{m,t,s}) + B_l (\theta_{n,t,s} - \theta_{m,t,s}) - M(1 - I_{l,t,s}^{line}) \leq \frac{P_{l,t,s}^{line} + P_{l,t,s}^{loss}}{S_{base}} \leq G_l (V_{n,t,s} - V_{m,t,s}) + B_l (\theta_{n,t,s} - \theta_{m,t,s}) + M(1 - I_{l,t,s}^{line}) \quad (16)$$

$$B_l (V_{n,t,s}^{bus} - V_{m,t,s}^{bus}) - G_l (\theta_{n,t,s}^{bus} - \theta_{m,t,s}^{bus}) - M(1 - I_{l,t,s}^{line}) \leq \frac{Q_{l,t,s}^{line}}{S_{base}} \leq B_l (V_{n,t,s}^{bus} - V_{m,t,s}^{bus}) - G_l (\theta_{n,t,s}^{bus} - \theta_{m,t,s}^{bus}) + M(1 - I_{l,t,s}^{line}) \quad (17)$$

$$0 \leq (P_{l,t,s}^{line})^2 + (Q_{l,t,s}^{line})^2 \leq (S_{l,t,s}^{max})^2 I_{l,t,s}^{line} \quad (18)$$

$$V_{n,t,s}^{min} \leq V_{n,t,s}^{bus} \leq V_{n,t,s}^{max} \quad (19)$$

$$\theta_{n,t,s}^{min} \leq \theta_{n,t,s}^{bus} \leq \theta_{n,t,s}^{max} \quad (20)$$

$$P_{l,t,s}^{loss} = r_l \left((P_{l,t,s}^{line})^2 + (Q_{l,t,s}^{line})^2 \right) \quad (21)$$

$$\sum_{n \in \Delta_{sub}} P_{n,t,s}^{sub} + \sum_{g \in \Delta_n^{gt}} P_{g,t,s}^{gt} + \sum_{g \in \Delta_n^w} P_{g,t,s}^w + \sum_{g \in \Delta_n^{pv}} P_{g,t,s}^{pv} + \sum_{e \in \Delta_n^{es}} (P_{e,t,s}^{dch} - P_{e,t,s}^{ch}) = \sum_{l \in \Delta_n^l} \kappa_{l,n} P_{l,t,s}^{line} + P_{n,t,s}^{load} \quad (22)$$

$$\sum_{n \in \Delta_{sub}} Q_{n,t,s}^{sub} + \sum_{g \in \Delta_n^{gt}} Q_{g,t,s}^{gt} + \sum_{g \in \Delta_n^w} Q_{g,t,s}^w + \sum_{g \in \Delta_n^{pv}} Q_{g,t,s}^{pv} = \sum_l \kappa_{l,n} Q_{l,t,s}^{line} + Q_{n,t,s}^{load} \quad (23)$$

۵-۲- قیود بازآرایی سیستم توزیع

قیود (۲۴) تا (۲۶) ارائه شده‌اند تا شعاعی بودن شبکه را در طی اجرای DFR حفظ کنند. جهت شارش توان خط l در زمان t از طریق معادله (۲۴) تعیین می‌شود. قید (۲۵) بیان می‌کند که شین n در زمان t حداکثر از یک خط می‌تواند دریافت کند. در نهایت قید (۲۶) از تزریق توان به شین مرجع جلوگیری می‌کند [۲۱].

$$I_{n,m,t,s}^{parent} + I_{m,n,t,s}^{parent} = I_{l,t,s}^{line} \quad (24)$$

$$\sum_n I_{n,m,t,s}^{parent} \leq 1 \quad (25)$$

$$\sum_{n \in \Delta_{sub}} I_{m,n,t,s}^{parent} = 0 \quad (26)$$

۶-۲- برنامه پاسخگویی تقاضا

در معادله‌های (۲۷) تا (۳۴)، رابطه‌های مورد نیاز برای اجرای یک برنامه DR مبتنی بر تشویق ارائه شده‌اند [۱۷]. در معادله (۲۷) تقاضای بار پس از مشارکت در برنامه DR محاسبه می‌شود، که تابعی از افزایش/کاهش بار توسط مشترکین است. قید (۲۸) برای جلوگیری از تغییر ضریب توان پس از اجرای برنامه DR ارائه شده است. معادله‌های (۲۹) و (۳۰) به ترتیب افزایش و کاهش بار در هر ساعت را محدود می‌کنند. قید (۳۱) از افزایش و کاهش همزمان بار پیش‌گیری می‌کند. قید برابری مجموع افزایش و

کاهش بار در طول دوره بهره‌برداری توسط معادله (۳۲) مدل شده است. در نهایت معادله‌های (۳۳) و (۳۴) هزینه اجرای برنامه DR و جریمه مرتبط با بار تأمین نشده را محاسبه می‌کنند.

$$P_{n,t,s}^{load} = P_{n,t,s}^{load,base} + P_{n,t,s}^{load,dr+} - P_{n,t,s}^{load,dr-} - P_{n,t,s}^{load,ens} \quad (27)$$

$$Q_{n,t,s}^{load} = Q_{n,t,s}^{load,base} + \tan \left(P_{n,t,s}^{load,dr+} - P_{n,t,s}^{load,dr-} - P_{n,t,s}^{load,ens} \right) \quad (28)$$

$$0 \leq P_{n,t,s}^{load,dr+} \leq \delta_n^{max} P_{n,t,s}^{load,base} I_{n,t,s}^{dr+} \quad (29)$$

$$0 \leq P_{n,t,s}^{load,dr-} \leq \delta_n^{max} P_{n,t,s}^{load,base} I_{n,t,s}^{dr-} \quad (30)$$

$$0 \leq I_{n,t,s}^{dr+} + I_{n,t,s}^{dr-} \leq 1 \quad (31)$$

$$\sum_t P_{n,t,s}^{load,dr+} = \sum_t P_{n,t,s}^{load,dr-} \quad (32)$$

$$C_{n,t,s}^{dr} = \pi^{dr} \left(P_{n,t,s}^{load,dr+} + P_{n,t,s}^{load,dr-} \right) \quad (33)$$

$$C_{n,t,s}^{ens} = \pi^{ens} P_{n,t,s}^{load,ens} \quad (34)$$

۲-۷- قیود بهره‌برداری از واحدهای حرارتی

قیود بهره‌برداری از واحدهای حرارتی در رابطه‌های (۳۵) تا (۳۹) ارائه شده‌اند. توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی توسط واحدهای حرارتی به ترتیب توسط قیود (۳۵) و (۳۶) محدود می‌شوند. محدودیت‌های شیب افزایشی^{۲۵} و شیب کاهش^{۲۶} واحدهای حرارتی نیز در رابطه‌های (۳۷) و (۳۸) ارائه شده‌اند. در نهایت معادله (۳۹) توان تولیدی واحدهای حرارتی را محاسبه می‌کند [۱۲].

$$P_{g,t,s}^{gt,min} I_{g,t,s} \leq P_{g,t,s}^{gt} \leq P_{g,t,s}^{gt,max} I_{g,t,s} \quad (35)$$

$$Q_{g,t,s}^{gt,min} I_{g,t,s} \leq Q_{g,t,s}^{gt} \leq Q_{g,t,s}^{gt,max} I_{g,t,s} \quad (36)$$

$$P_{g,t,s}^{gt} - P_{g,t-1,s}^{gt} \leq RU_g \quad (37)$$

$$P_{g,t-1,s}^{gt} - P_{g,t,s}^{gt} \leq RD_g \quad (38)$$

$$C_{g,t,s}^{gt} = a_g I_{g,t,s} + b_g P_{g,t,s}^{gt} + c_g \left(P_{g,t,s}^{gt} \right)^2 \quad (39)$$

۲-۸- قیود بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر

تابع چهار قسمتی ارائه شده در رابطه (۴۰) چگونگی تولید توان توسط توربین‌های بادی را نشان می‌دهد [۲۲]. این تابع بیان می‌کند که اگر سرعت باد در یک محدوده قابل قبول نباشد، خروجی توربین صفر خواهد بود. معادله (۴۱) بیان می‌کند که توان استخراج شده از پنل‌های خورشیدی به شدت تابش در ساعت جاری، شاخص تابش استاندارد، توان نامی پنل و راندمان آن بستگی دارد. در معادله (۴۲) نیز هزینه بهره‌برداری از واحدهای بادی و خورشیدی محاسبه می‌شود.

$$P_{g,t,s}^w = \begin{cases} 0, & v_{g,t,s} < v_g^{ci} \\ P_g^r \frac{v_{g,t,s} - v_g^{ci}}{v_g^r - v_g^{ci}}, & v_g^{ci} \leq v_{g,t,s} < v_g^r \\ P_g^r, & v_g^r \leq v_{g,t,s} < v_g^{co} \\ 0, & v_{g,t,s} \geq v_g^{co} \end{cases} \quad (40)$$

$$P_{g,t,s}^{pv} = \eta^{pv} \frac{G_{g,t,s}}{G_{std}} P_g^r \quad (41)$$

$$C_{g,t,s}^{ren} = \pi_g^{ren} \left(P_{g,t,s}^w + P_{g,t,s}^{pv} \right) \quad (42)$$

۲-۹- سیستم‌های ذخیره‌ساز

سطح انرژی ذخیره شده در سیستم‌های ذخیره‌ساز از طریق معادله (۴۳) به دست می‌آید، که متأثر از سطح انرژی ساعت قبل و شارژ/دشارژ ساعت جاری است [۱۷]. شارژ و دشارژ ساعتی به ترتیب توسط قیود (۴۴) و (۴۵) محدود می‌شوند. محدودیت مربوط به سطح انرژی ذخیره‌ساز نیز توسط قید (۴۶) مدل شده است. قید (۴۷) نشان می‌دهد که سطح انرژی ذخیره‌ساز در ساعت‌های اول و آخر باید برابر باشد. قید (۴۸) محدودیت همزمانی شارژ و دشارژ را مدل می‌کند و در نهایت هزینه بهره‌برداری سیستم‌های ذخیره‌ساز از طریق معادله (۴۹) محاسبه می‌شود.

$$E_{e,t,s} = E_{e,t-1,s} + \left(\eta^{ch} P_{e,t,s}^{ch} - \frac{P_{e,t,s}^{dch}}{\eta^{dch}} \right) dt \quad (43)$$

$$0 \leq P_{e,t,s}^{ch} \leq P_e^{ch,max} I_{e,t,s}^{ch} \quad (44)$$

$$0 \leq P_{e,t,s}^{dch} \leq P_e^{dch,max} I_{e,t,s}^{dch} \quad (45)$$

$$E_e^{min} \leq E_{e,t,s} \leq E_e^{max} \quad (46)$$

$$E_{e,t=0,s} = E_{e,t=24,s} = E_e^{initial} \quad (47)$$

$$0 \leq I_{e,t,s}^{ch} + I_{e,t,s}^{dch} \leq 1 \quad (48)$$

$$C_{e,t,s}^{ees} = \pi^{ees} (P_{e,t,s}^{ch} + P_{e,t,s}^{dch}) \quad (49)$$

۲-۱۰- خودروهای الکتریکی

معادله‌های (۵۰) تا (۵۷) چگونگی بهره‌برداری از EVها را نشان می‌دهند. در این راستا قید (۵۰) مرزهای بالایی و پایینی سطح انرژی EV را محدود می‌کند [۱۷]. لازم به ذکر است که سطح انرژی EV در زمان t از طریق معادله (۵۱) محاسبه می‌شود. محدودیت‌های شارژ و دشارژ ساعتی به ترتیب توسط قیود (۵۲) و (۵۳) مدل می‌شوند. قید (۵۴) عدم همزمانی شارژ و دشارژ را تضمین می‌کند. تعداد EVهای حاضر در پارکینگ در زمان t از طریق معادله (۵۵) تعیین می‌شود، که تابعی از ضریب تحرک^{۲۷} و تعداد پیش‌بینی شده برای حضور EVها در پارکینگ است. لازم به ذکر است که تعداد پیش‌بینی شده برای حضور EVها در پارکینگ از طریق تابع گوسی ارائه شده در معادله (۵۶) به دست می‌آید. در نهایت پاداش پرداختی به EVها از طریق معادله (۵۷) محاسبه می‌شود که تابعی از میزان دشارژ باتری آنها است.

$$E_v^{min, EV} \leq E_{v,t,s}^{EV} \leq E_v^{max, EV} \quad (50)$$

$$E_{v,t,s}^{ev} = E_{v,t-1,s}^{ev} + (P_{v,t,s}^{ch, ev} \eta_{ch}^{ev} - \frac{P_{v,t,s}^{dch, ev}}{\eta_{dch}^{ev}}) \Delta t \quad (51)$$

$$P_{v,t,s}^{ch, ev} \leq P_v^{ch, max} I_{v,t,s}^{ch, ev} \quad (52)$$

$$P_{h,v,t,s}^{dch, ev} \leq P_v^{dch, max} I_{h,v,t,s}^{dch, ev} \quad (53)$$

$$0 \leq I_{v,t,s}^{ch, ev} + I_{v,t,s}^{dch, ev} \leq 1 \quad (54)$$

$$\sum_v (I_{v,t,s}^{ch, ev} + I_{v,t,s}^{dch, ev}) = (1 - m_{mg,t}) N_{mg,t}^{ev} \quad (55)$$

$$N_{mg,t,s}^{ev} = N_{mg}^{max, ev} \int_{t_0}^t \frac{1}{\sigma_{mg} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - \mu_{mg})^2}{\sigma_{mg}^2}} dx \quad (56)$$

$$C_{v,t,s}^{ees} = \pi^{ev} P_{v,t,s}^{dch, ev} \quad (57)$$

۳- روش حل مدل پیشنهادی

یک فلوچارت در شکل (۱) برای نشان دادن پروسه حل ارائه شده است. لازم به ذکر است که مدل MILP پیشنهادی توسط حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار گمز حل شده است. مطابق فلوچارت در گام اول اطلاعات شبکه به نرم‌افزار داده شده و در گام دوم پروسه ساخت سناریوها انجام می‌شود. در این راستا در ابتدا ۱۰۰۰ سناریو برای هر پارامتر نایقین تولید شده و سپس برای

کاهش بار محاسباتی تعداد سناریوهای تولید شده توسط الگوریتم SCENRED که یکی از تولباکس‌های نرم‌افزار گمز است، به ۱۰ عدد کاهش می‌یابد. در این مطالعه، تقاضای بار، سرعت باد و تابش خورشید به عنوان پارامترهای ناپقین در نظر گرفته شده و برای تولید سناریوهای آن‌ها به ترتیب از تابع‌های توزیع احتمالاتی نرمال، ویبول و بتا استفاده شده است. در گام سوم، مرحله اول مدل پیشنهادی حل می‌شود. در این مرحله، ریزشکبه‌ها پیشنهادات خرید و فروش خود را تعیین کرده و به بازار حوضچه ارسال می‌کنند. در گام چهارم، مرحله دوم مدل پیشنهادی حل می‌شود، که تعیین قیمت تسویه بازار توسط ISO است. در نهایت در گام پنجم مرحله سوم مدل پیشنهادی حل می‌شود، که حل مسئله برنامه‌ریزی ریزشکبه‌ها توسط یک روش تئوری بازی مشارکتی است. معادله‌های مورد نیاز برای حل هر یک از مرحله‌های مدل پیشنهادی به شرح زیر هستند:

مرحله اول: معادله‌های (۱) الی (۵) و معادله‌های (۲۷) الی (۵۷)

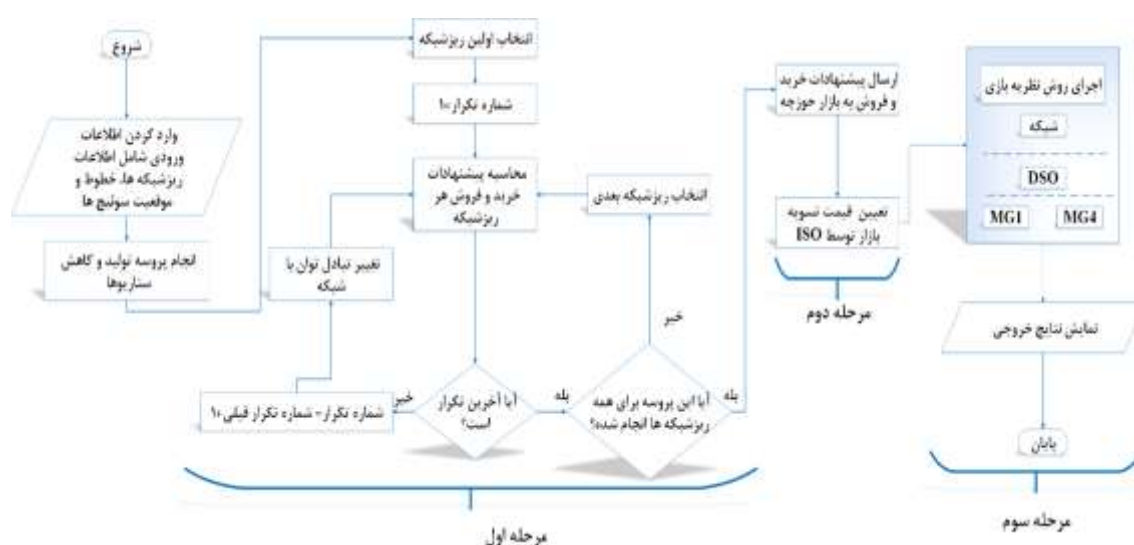
مرحله دوم: معادله‌های (۶) الی (۱۱)

مرحله سوم: معادله‌های (۱۲) الی (۵۷)

۴- شبیه‌سازی مدل پیشنهادی

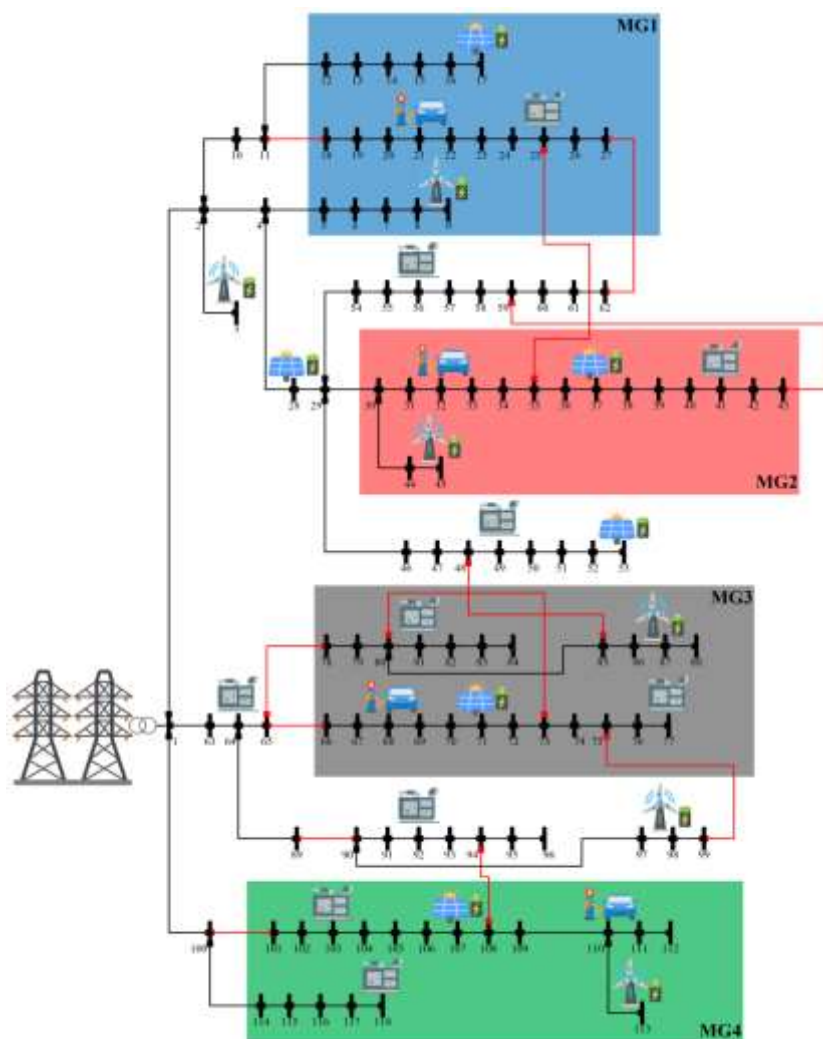
۴-۱- شبکه مورد بررسی و داده‌های ورودی شبیه‌سازی

در شکل (۲) ساختار شبکه تحت مطالعه در این مقاله نشان داده شده که یک شبکه ۱۱۸ شینه اصلاح شده است. همان‌طور که می‌توان دید این شبکه از چهار ریزشکبه تشکیل شده و بخشی از آن نیز متعلق به DisCo است. اطلاعات مربوط به خطوط و ساختار شبکه مطابق با مرجع [۲۱] است. ساختار این شبکه پویا^{۲۸} بوده و خطوط مجهز به کلیدهای سکشنالایزر با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. مطابق شکل، در کنار هر یک از واحدهای بادی و خورشیدی یک سیستم ذخیره‌ساز قرار گرفته است. همچنین هر ریزشکبه مجهز به یک پارکینگ خودروهای الکتریکی است. لازم به ذکر است که در مدل پیشنهادی مالکیت ریزشکبه‌ها خصوصی فرض شده و ISO نیز به عنوان یک نهاد بی طرف، مسئول برگزاری بازار رقابتی است. رایانه استفاده شده برای شبیه‌سازی مسئله دارای پیکربندی CPU: Intel core i5-6400، Ram: 4GB و HDD: 1TB و زمان حل ۱۶۸/۲ ثانیه است. همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده، مدل پیشنهادی در قالب شش مورد مطالعاتی حل می‌شود. در جدول (۲) داده‌های مورد نیاز برای پیاده‌سازی مدل پیشنهادی ارائه شده‌اند. در شکل‌های (۳) و (۴) نیز به ترتیب سناریوهای تولید شده و کاهش داده شده مربوط به پارامترهای ناپقین نشان داده شده‌اند.



شکل (۱): فلوچارت حل مدل سه مرحله‌ای پیشنهادی

Figure (1): Flowchart for solving the proposed three step model



شکل (۲): ساختار شبکه توزیع ۱۱۸ شینه اصلاح شده مورد بررسی در این مقاله

Figure (2): The structure of the 118 modified bus distribution network is examined in this paper

Table (1): Information about case studies

جدول (۱): اطلاعات مربوط به موارد مطالعاتی

مورد مطالعاتی	بازآرایی سیستم توزیع	عدم قطعیت‌ها	سیستم‌های ذخیره‌ساز	خودروهای الکتریکی	برنامه پاسخگویی تقاضا
۱	×	×	×	×	×
۲	✓	×	×	×	×
۳	✓	✓	×	×	×
۴	✓	✓	✓	×	×
۵	✓	✓	✓	✓	×
۶	✓	✓	✓	✓	✓

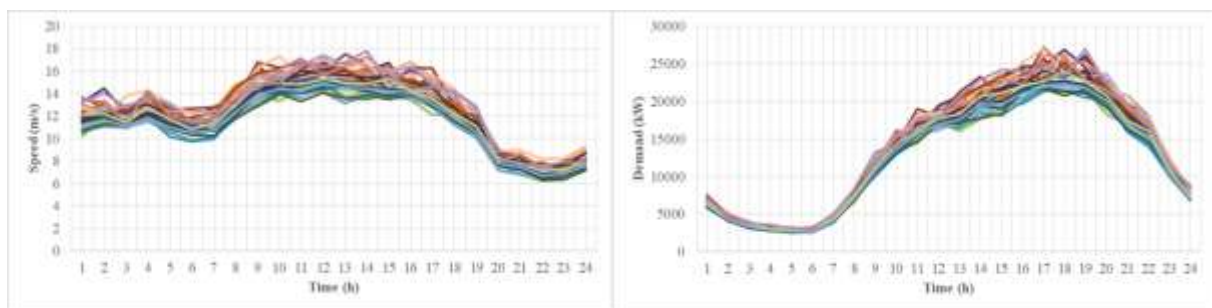
در جدول‌های (۳) و (۴) نتایج بهره‌برداری به‌دست آمده از حل موارد مطالعاتی ۱ و ۲ ارائه شده‌اند. در مورد ۱ ساختار شبکه ثابت بوده، در حالی که در مورد ۲ ساختار دینامیک (امکان اجرای DFR) در نظر گرفته شده است. نتایج بهره‌برداری نشان می‌دهند که ساختار دینامیک در مورد ۲ منجر به کاهش هزینه بهره‌برداری کل نسبت به حالت ۱ شده، که دلیل این امر کاهش هزینه بهره‌برداری ریزشبکه‌ها در این مورد است. قابل ذکر است که ساختار دینامیک در مورد ۲ منجر به تبادل توان بیشتر میان

ریزشبکه‌ها در مقایسه با مورد ۱ شده است. آنالیز این شکل‌ها نشان می‌دهد که ریزشبکه‌ها در مورد ۲ تبادل توان بیشتری با هم داشته‌اند و در مقابل تبادل آن‌ها با DisCo کاهش یافته است، که دلیل این امر افزایش انعطاف شبکه در این مورد است. به عبارت دیگر ساختار دینامیک امکان استخراج توان بیشتر از DERها را فراهم کرده است.

همان‌طور که در بخش فرمول‌سازی گفته شد، در روش تئوری بازی به کار گرفته شده در این مقاله، مسئله برنامه‌ریزی در ابتدا از دید هر بازیکن به‌طور جداگانه حل شده و مقادیر حداقل و حداکثر تابع هدف هر یک از بازیکنان به‌دست می‌آیند. سپس تابع هدف بازی اصلی حل می‌شود، که حداکثرسازی انحراف هر بازیکن از بدترین مقدار خودش است. لازم به ذکر است که با توجه به در نظر گرفتن قیود امنیتی و شارش توان در لایه سوم، جواب نهایی به‌دست آمده برای هر بازیکن نه تنها به مقادیر مینیمم و ماکزیمم تابع هدف آن، بلکه به ساختار شبکه وابسته است. در این راستا در شکل (۵) انحراف مقدار نهایی تابع هدف هر بازیکن از مقدار بهینه آن در موردهای ۱ و ۲ مقایسه شده تا تأثیر ساختار دینامیک بر روی آن بررسی شود. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد انحراف مقدار نهایی ریزشبکه‌ها و DisCo از مقدار بهینه آن‌ها کاهش یافته است. تحلیل این شکل‌ها نشان می‌دهد که ساختار دینامیک منجر به کاهش قدرت بازار و دستیابی به یک نقطه تعادل بهتر شده است.

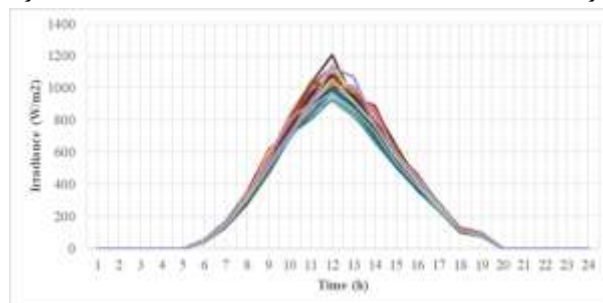
Table (2): Data related to simulation parameters
جدول (۲): داده‌های مربوط به پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
dt	یک ساعت	G_{std}	۱۰۰۰
η^{ch} / η^{dch}	۹۵ درصد	δ_n^{max}	۱۲ درصد
η^{pv}	۹۸٪	$E_e^{initial}$	۵۰ درصد
$iter^{max}$	۲۰	E_e^{min} / E_e^{max}	۱۰۰ درصد / ۳۰ درصد
$v_g^{ci} / v_g^r / v_g^{co}$	۴-۱۴-۲۵ متر بر ثانیه	V^{min} / V^{max}	۰/۹ / ۱/۱ پریونیت
$E_v^{max, EV}$	۱۵۰ (kWh)	$\theta^{min} / \theta^{max}$	$\pi - \pi$ رادیان



(ب) سرعت باد

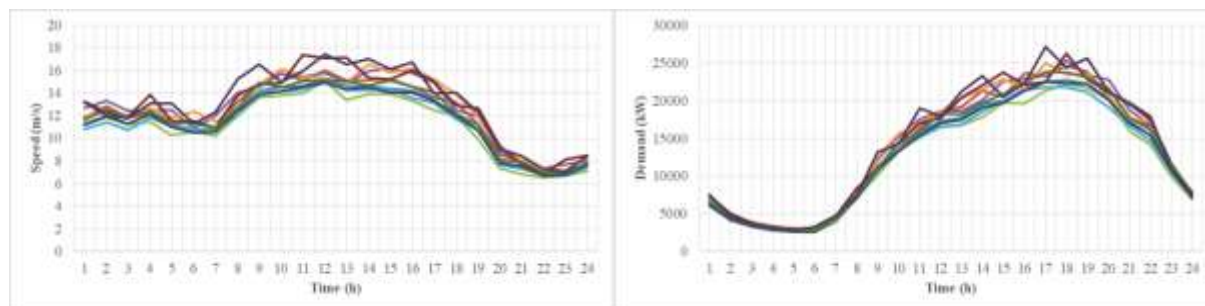
(الف) تقاضای بار



(ج) تابش خورشید

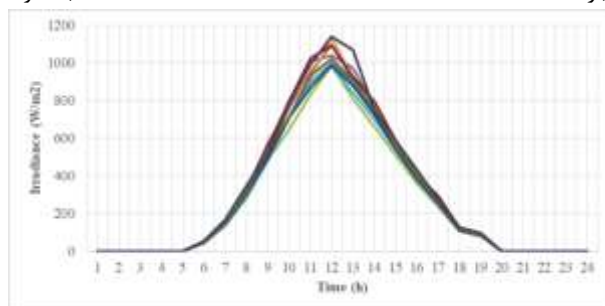
شکل (۳): سناریوهای تولیدی

Figure (3): Generation scenarios, a) Load demand, b) Wind speed, c) Solar radiation



(ب) سرعت باد

(الف) تقاضای بار



(ج) تابش خورشید

شکل (۴): سناریوهای کاهش یافته

Figure (4): Decreased scenarios, a) Load demand, b) Wind speed, c) Solar radiation

Table (3): Results from the first case study

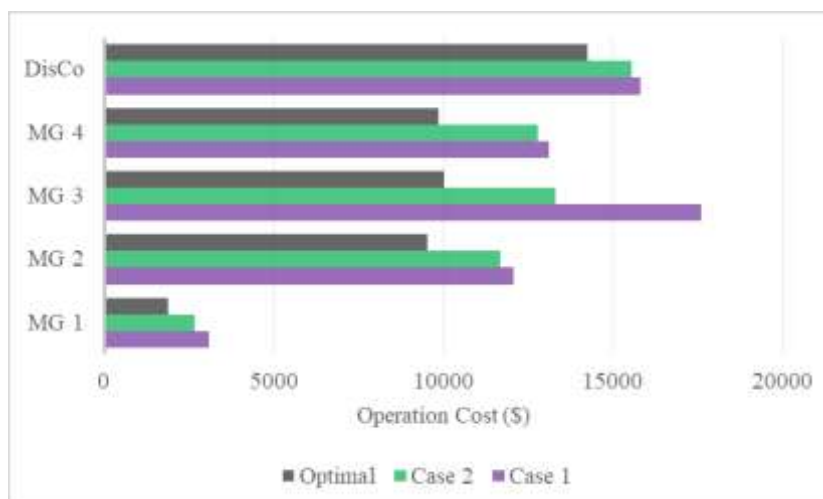
جدول (۳): نتایج بدست آمده از مورد مطالعاتی اول

هزینه (دلار)					مورد مطالعاتی اول
ریز شبکه ۵	ریز شبکه ۴	ریز شبکه ۳	ریز شبکه ۲	ریز شبکه ۱	
۱۰۴۹۹/۳۶	۱۰۶۵۷/۵۶	۱۵۰۷۱/۵۹	۱۱۰۶۳/۴۱	۱۳۷۱/۷۲	تبادل توان
۵۳۴۷/۹۲	۲۴۶۴/۷۳	۲۵۲۲/۸۵	۱۰۰۰/۶۱	۱۷۰۹/۴۳	منابع تولید پراکنده
.	.	.	.	.	سیستم‌های ذخیره‌ساز
.	.	.	.	.	خودروهای الکتریکی
.	.	.	.	.	برنامه پاسخگویی تقاضا
۱۵۷۹۷/۲۸	۱۳۱۲۲/۲۹	۱۷۵۹۴/۴۴	۱۲۰۶۴/۰۲	۳۰۸۱/۱۵	مجموع
۶۱۶۵۹/۱۸					هزینه کل سیستم

Table (4): Results from the second case study

جدول (۴): نتایج به دست آمده از مورد مطالعاتی دوم

هزینه (دلار)					مورد مطالعاتی دوم
شبکه توزیع	ریز شبکه ۴	ریز شبکه ۳	ریز شبکه ۲	ریز شبکه ۱	
۹۸۶۳/۵۷	۹۷۶۸/۱۴	۹۱۰۷/۷۶	۱۰۱۴۰/۰۸	۵۰۷/۲۸	تبادل توان
۵۶۹۰/۶۴	۳۰۰۲/۸۱	۴۱۹۴/۶۹	۱۵۴۹/۷۳	۲۱۶۳/۰۴	منابع تولید پراکنده
.	.	.	.	.	سیستم‌های ذخیره‌ساز
.	.	.	.	.	خودروهای الکتریکی
.	.	.	.	.	برنامه پاسخگویی تقاضا
۱۵۵۵۴/۲۱	۱۲۷۷۰/۹۵	۱۳۳۰۲/۴۵	۱۱۶۸۹/۰۸	۲۶۷۰/۳۲	مجموع
۵۵۹۸۷/۰۱					هزینه کل سیستم



شکل (۵): انحراف مقدار نهایی تابع هدف هر بازیگر از مقدار بهینه آن در مورد های ۱ و ۲

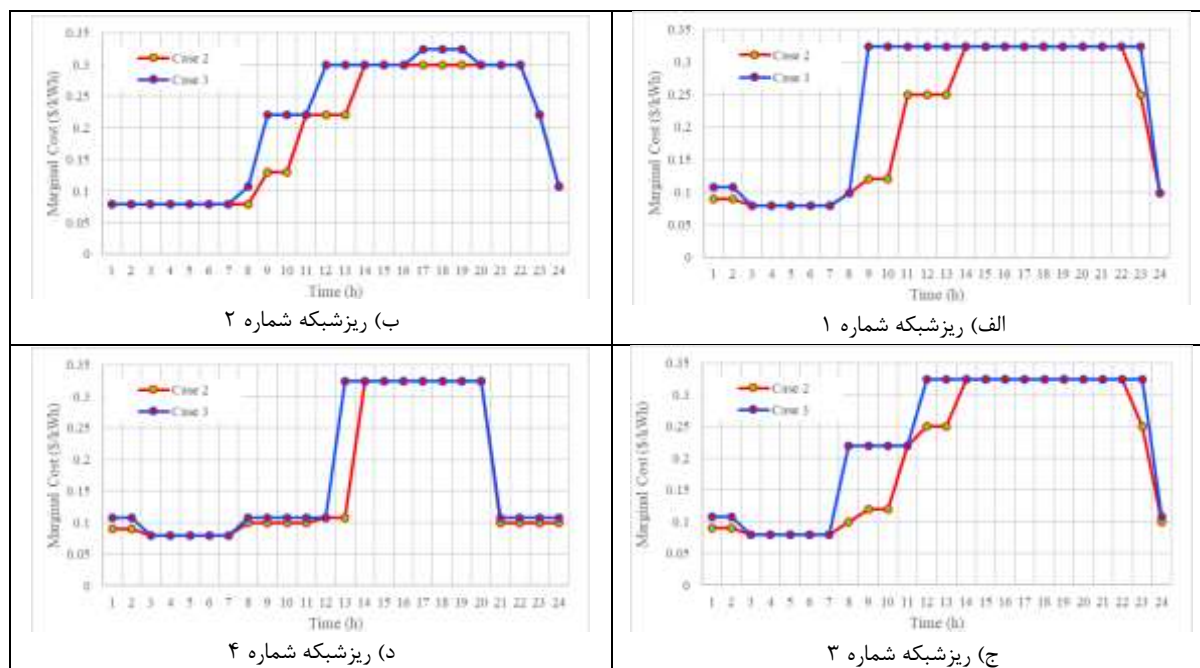
Figure (5): Deviation of the final value of the objective function of each player from its optimal value in cases 1 and 2

در جدول (۵) نتایج به دست آمده از مورد مطالعاتی سوم ارائه شده‌اند. این مورد مشابه مورد ۲ است با این تفاوت که در آن عدم قطعیت‌های تقاضای بار و توان خروجی منابع تجدیدپذیر در آن در نظر گرفته شده‌اند. نتایج جدول (۵) نشان می‌دهند که هزینه بهره‌برداری ریزشکه‌ها نسبت به مورد ۲ افزایش یافته‌اند که دلیل این امر در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در این مورد است. شکل‌های (۶-الف) تا (۶-د) نیز نشان می‌دهند که در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها منجر به افزایش قیمت حاشیه‌ای ریزشکه‌ها در مورد ۳ شده‌اند. لازم به ذکر است که افزایش قیمت حاشیه‌ای ریزشکه‌ها در مورد ۳ منجر به افزایش قیمت تسویه بازار می‌شود، همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است. همچنین باید اشاره گردد که دلیل افزایش قیمت‌های حاشیه‌ای بین ساعت‌های ۷ تا ۲۳ افزایش میزان تقاضای بار در این دوره است. به عبارت دیگر افزایش تقاضای بار منجر به افزایش قیمت حاشیه‌ای محلی شده است. در جدول (۶) نتایج بهره‌برداری حاصل از حل مورد مطالعاتی چهارم ارائه شده است. در این مورد مسئله بهره‌برداری با در نظر گرفتن سیستم‌های ذخیره‌ساز حل می‌شود. همان‌طور که می‌توان دید هزینه بهره‌برداری ریزشکه‌ها و DisCo نسبت به مورد ۳ کاهش یافته است که دلیل این امر افزایش انعطاف برنامه‌ریزی توسط سیستم‌های ذخیره‌ساز است. نتایج عددی نشان می‌دهند که هزینه بهره‌برداری در تمامی ریزشکه‌ها نسبت به مورد ۳ کاهش یافته است. لازم به ذکر است که این واحدها در ساعت‌های ابتدایی روز که قیمت برق ارزان بوده شارژ شده و در ساعت‌های میانی روز که قیمت برق گران است دشارژ شده است و از این طریق منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری در مورد ۴ شده‌اند. علاوه بر این شکل‌های (۸-الف) تا (۸-د) نشان می‌دهند که حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز در مورد ۴ منجر به کاهش قیمت حاشیه‌ای ریزشکه‌ها در ساعت‌های میانی روز نسبت به مورد ۳ شده است. به‌طور مشابه شکل (۹) نشان می‌دهد که قیمت تسویه بازار در مورد ۳ کاهش یافته است که دلیل این امر قیمت حاشیه‌ای پایین‌تر ریزشکه‌ها است.

Table (5): Results from the third case study

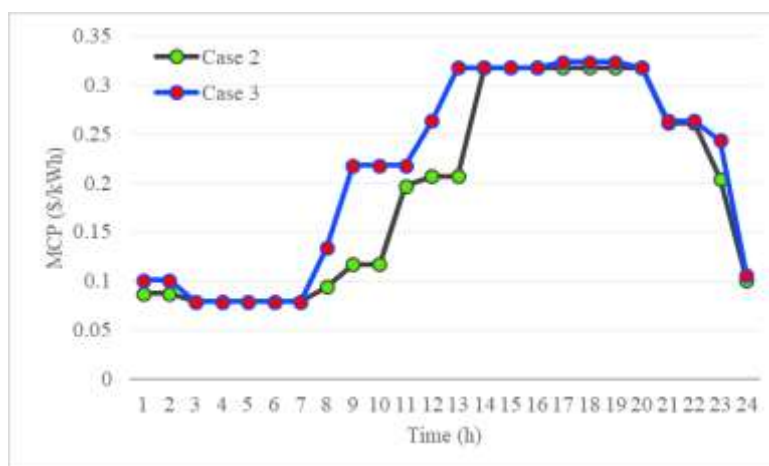
جدول (۵): نتایج به دست آمده از مورد مطالعاتی سوم

هزینه (دلار)					مورد مطالعاتی سوم
ریزشکه ۵	ریزشکه ۴	ریزشکه ۳	ریزشکه ۲	ریزشکه ۱	
۱۰۸۹۰/۱۸	۱۰۵۵۸/۷۵	۹۹۲۴/۹۲	۱۰۷۸۹/۰۱	۸۴۳/۳۱	تبادل توان
۵۶۹۰/۶۴	۳۰۰۲/۸۱	۴۱۹۴/۶۹	۱۵۴۹/۷۳	۲۱۵۸/۸۴	منابع تولید پراکنده
.	.	.	.	.	سیستم‌های ذخیره‌ساز
.	.	.	.	.	خودروهای الکتریکی
.	.	.	.	.	برنامه پاسخگویی تقاضا
۱۶۵۸۰/۸۲	۱۳۵۶۱/۵۶	۱۴۱۱۹/۶۱	۱۲۳۳۸/۷۴	۳۰۰۲/۱۵	مجموع
۵۹۶۰۲/۸۸					هزینه کل سیستم



شکل (۶): قیمت حاشیه‌ای ریزشکه‌ها در مورد‌های ۲ و ۳

Figure (6): The marginal price of microgrids in cases 2 and 3, a) microgrid number1, b) microgrid number2, c) microgrid number3, d) microgrid number4



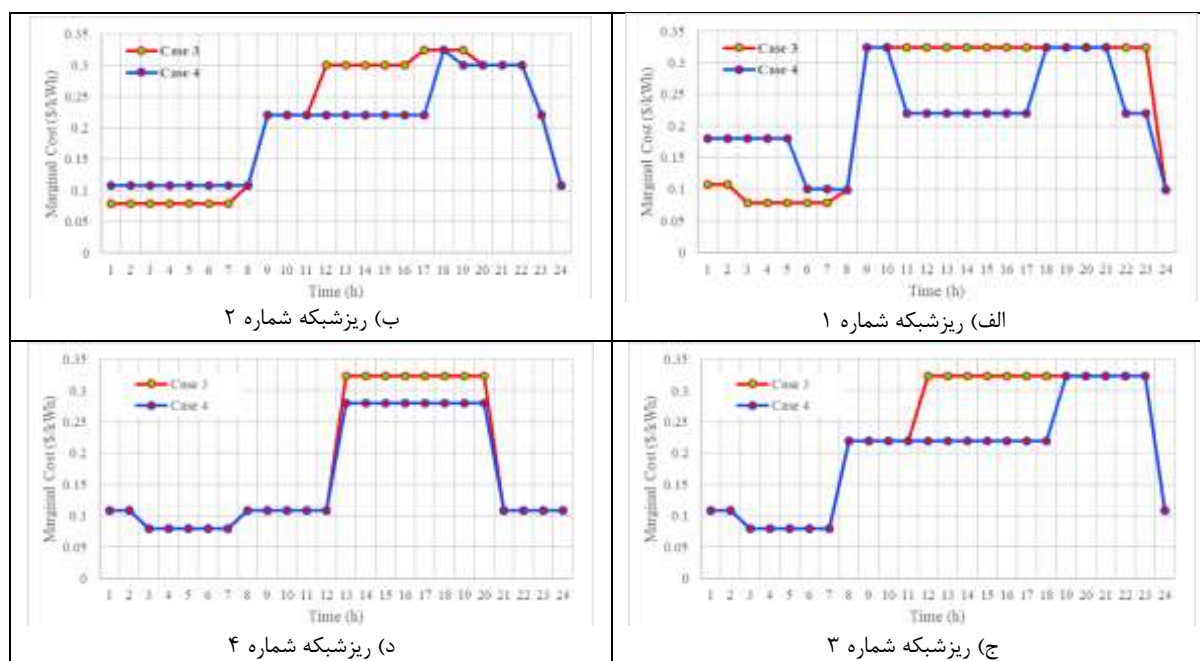
شکل (۷): قیمت تسویه بازار در مورد‌های ۲ و ۳

Figure (7): Market clearing prices in cases 2 and 3

Table (6): Results from the forth case study

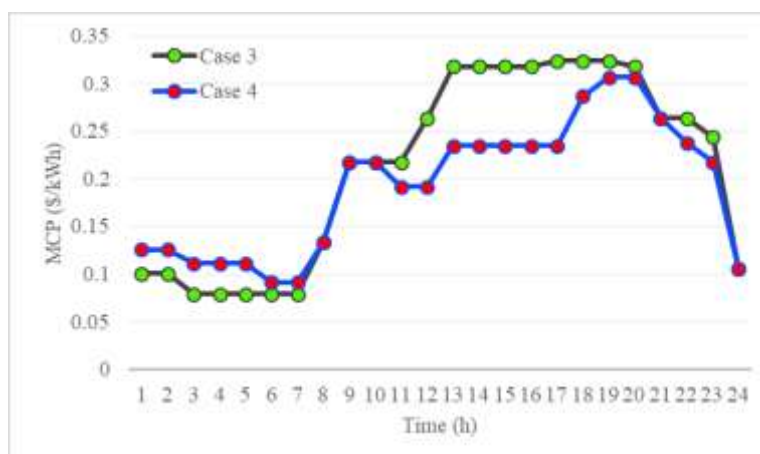
جدول (۶): نتایج به‌دست آمده از مورد مطالعاتی چهارم

هزینه (دلار)					مورد مطالعاتی چهارم
ریزشکه ۵	ریزشکه ۴	ریزشکه ۳	ریزشکه ۲	ریزشکه ۱	
۱۰۳۳۴/۲۸	۱۰۱۳۸/۷۹	۹۵۰۰/۶۴	۱۰۴۴۴/۳۷	۶۵۳/۴۱	تبادل توان
۵۶۹۰/۶۴	۳۰۰۲/۸۱	۴۱۹۴/۶۹	۱۵۴۹/۷۳	۲۱۵۶/۸۱	منابع تولید پراکنده
۷/۸۸	۴/۵۶	۲/۹	۳/۷۳	۴/۱۵	سیستم‌های ذخیره‌ساز
۰	۰	۰	۰	۰	خودروهای الکتریکی
۰	۰	۰	۰	۰	برنامه پاسخگویی تقاضا
۱۶۰۳۲/۸	۱۳۱۴۶/۱۶	۱۳۶۹۸/۲۳	۱۱۹۹۷/۸۳	۲۸۱۴/۳۷	مجموع
۵۷۶۸۹/۳۹					هزینه کل سیستم



شکل (۸): قیمت حاشیه‌ای ریزشکه‌ها در موردهای ۳ و ۴

Figure (8): The marginal price of microgrids in cases 3 and 4, a) microgrid number1, b) microgrid number2, c) microgrid number3, d) microgrid number4



شکل (۹): قیمت تسویه بازار در موردهای ۳ و ۴

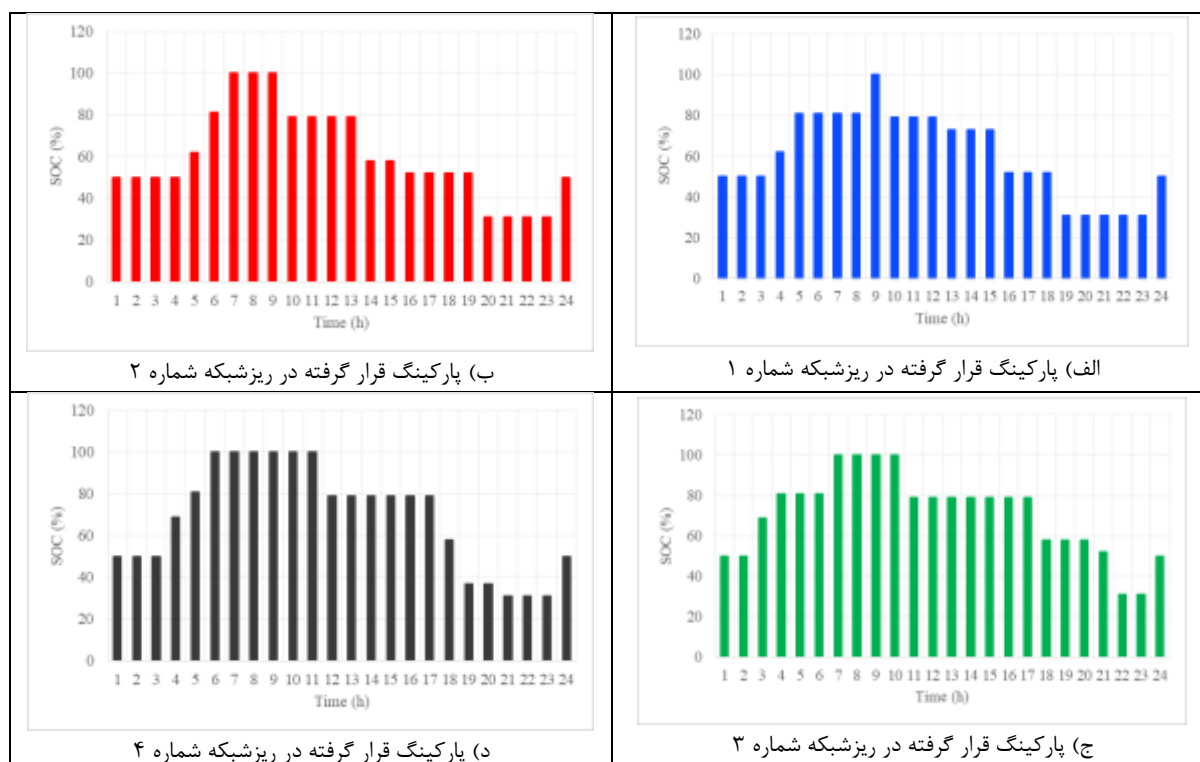
Figure (9): Market clearing prices in cases 3 and 4

در مورد مطالعاتی ۵ مسئله با در نظر گرفتن مشارکت EVها در برنامه‌ریزی حل شده و نتایج آن در جدول (۷) ارائه شده‌اند. همان‌طور که می‌توان دید مشارکت EVها در برنامه‌ریزی منجر به کاهش ۱۰۰۰ دلاری هزینه بهره‌برداری کل نسبت به مورد ۴ شده است که دلیل این امر امکان استخراج توان از EVها در ساعات گران است. در شکل‌های (۱۰-الف) تا (۱۰-ج) وضعیت شارژ^{۲۹} (SoC) EVها در ساعات‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که می‌توان دید EVها در ساعات‌های پیک در وضعیت دشارژ بوده و در ساعات‌های ابتدایی روز در وضعیت شارژ هستند. بنابراین این برنامه شارژ و دشارژ منجر به ارتقای انعطاف برنامه‌ریزی و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری شده است. در نهایت در جدول (۸) نتایج بهره‌برداری حاصل از مورد مطالعاتی ششم ارائه شده‌اند. در این مورد مشترکین ریزشکه‌ها در یک برنامه DR مبتنی بر تشویق مشارکت کرده‌اند. مطابق جدول (۸) مشارکت در برنامه DR در مورد ۶ منجر به کاهش هزینه بهره‌برداری ریزشکه‌ها و DisCo نسبت به مورد ۵ شده است، که دلیل این امر اصلاح الگوی مصرف در این مورد است.

Table (7): The results obtained from the fifth case study

جدول (۷): نتایج به دست آمده از مورد مطالعاتی پنجم

هزینه (دلار)					مورد مطالعاتی پنجم
ریزشبکه ۵	ریزشبکه ۴	ریزشبکه ۳	ریزشبکه ۲	ریزشبکه ۱	
۹۸۲۰/۹۷	۹۷۲۱/۰۶	۹۰۶۹/۶۴	۱۰۰۹۷/۴۸	۴۶۷/۳	تبادل توان
۵۶۹۰/۶۴	۳۰۰۲/۸۱	۴۱۹۴/۶۹	۱۵۴۹/۷۳	۲۱۵۰/۹۹	منابع تولید پراکنده
۷/۸۸	۴/۵۶	۲/۹	۳/۷۳	۴/۱۵	سیستم‌های ذخیره‌ساز
۰	۴/۱۵	۴/۱۵	۴/۱۵	۴/۱۵	خودروهای الکتریکی
۰	۰	۰	۰	۰	برنامه پاسخگویی تقاضا
۱۵۵۱۹/۴۹	۱۲۷۳۲/۵۸	۱۳۲۷۱/۳۸	۱۱۶۵۵/۰۹	۲۶۲۶/۵۹	مجموع
۵۵۸۰۵/۱۳					هزینه کل سیستم



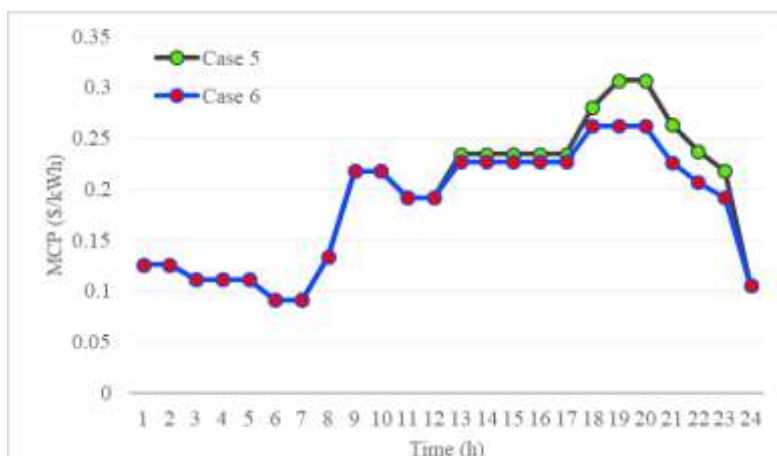
شکل (۱۰): وضعیت شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی در مورد ۵

Figure (10): Charging / discharging status of electric vehicles about 5 case, a) parking located in microgrid number1, b) parking located in microgrid number3, c) parking located in microgrid number3, d) parking located in microgrid number4

Table (8): The results obtained from the sixth case study

جدول (۸): نتایج به دست آمده از مورد مطالعاتی ششم

هزینه (دلار)					مورد مطالعاتی ششم
ریزشبکه ۵	ریزشبکه ۴	ریزشبکه ۳	ریزشبکه ۲	ریزشبکه ۱	
۹۲۴۷/۷۹	۹۲۷۹/۶۵	۸۶۱۳/۴۱	۹۷۳۵/۱۷	۲۴۱/۱۱	تبادل توان
۵۶۹۰/۶۴	۳۰۰۲/۸۱	۴۱۹۴/۶۹	۱۵۴۹/۷۳	۲۱۴۳/۵۹	منابع تولید پراکنده
۷/۸۸	۴/۵۶	۲/۹	۳/۷۳	۴/۱۵	سیستم‌های ذخیره‌ساز
۰	۴/۱۵	۴/۱۵	۴/۱۵	۴/۱۵	خودروهای الکتریکی
۸۳/۳۴	۶۴/۱۸	۶۶/۳۴	۵۲/۶۸	۳۶/۰۲	برنامه پاسخگویی تقاضا
۱۵۰۲۹/۶۵	۱۲۳۵۵/۳۵	۱۲۸۸۱/۴۹	۱۱۳۴۵/۴۶	۲۴۲۹/۰۲	مجموع
۵۴۰۴۰/۹۷					هزینه کل سیستم



شکل (۱۱): قیمت تسویه بازار در موردهای ۵ و ۶

Figure (11): Market clearing prices in cases 5 and 6

لازم به ذکر است که پس از مشارکت در برنامه DR، سطح تقاضا در ساعاتی پیک کاهش یافته است. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که کاهش تقاضای بار در ساعاتی پیک منجر به کاهش قیمت تسویه بازار در این ساعاتی شده است. بنابراین نتایج اثبات می‌کنند که مشارکت در برنامه DR نه تنها الگوی مصرف را اصلاح می‌کند بلکه منجر به خرید ارزان‌تر توان در ساعاتی پیک می‌شود.

در جدول (۹) نتایج به‌دست آمده از حل مورد ۶ توسط مدل پیشنهادی در این مقاله، با دو مقاله اخیر در این زمینه مقایسه شده است. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی مقاله‌های مذکور به‌طور دقیق پیاده‌سازی شده است. مرجع [۱۵] برای حل مسئله برنامه‌ریزی ریزشکده‌ها از روش متمرکز استفاده کرده، در حالی که مرجع [۲۲] از یک روش سه سطحی غیرمتمرکز استفاده کرده است. قابل ذکر است که در روش متمرکز مسئله برنامه‌ریزی تمامی ریزشکده‌ها به‌صورت یکپارچه کمینه‌سازی شده، در حالی که در روش غیرمتمرکز مسئله برنامه‌ریزی هر ریزشکده به‌صورت جداگانه و با حفظ حریم خصوصی آن‌ها حل می‌شود. مطابق نتایج می‌توان دید که مدل پیشنهادی در این مقاله در مجموع منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری کل در مقایسه با دو مقاله مذکور شده است. همچنین می‌توان دید که در مرجع [۲۲] که از روش غیرمتمرکز استفاده شده، اختلاف هزینه بهره‌برداری در ریزشکده‌ها بسیار متفاوت بوده است. به‌طوری‌که، هزینه برخی از ریزشکده‌ها کمتر شده و هزینه برخی به مقدار قابل توجهی بیشتر شده است. لازم به ذکر است که دلیل هزینه‌های پایین‌تر در این مقاله، قیمت تسویه بازار کمتر و همچنین استفاده از یک روش مشارکتی برای برنامه‌ریزی ریزشکده‌ها است.

Table (9): Comparison of the results of this article with the proposed methods in two other articles

جدول (۹): مقایسه نتایج این مقاله با روش‌های پیشنهادی در دو مقاله دیگر

هزینه (دلار)					روش مورد استفاده
ریزشکده ۵	ریزشکده ۴	ریزشکده ۳	ریزشکده ۲	ریزشکده ۱	
۱۵۰۲۹/۶۵	۱۲۳۵۵/۳۵	۱۲۸۸۱/۴۹	۱۱۳۴۵/۴۶	۲۴۲۹/۰۲	هزینه بهره‌برداری
۵۴۰۴۰/۹۷					مجموع
۱۵۱۴۹/۴۵	۱۲۴۷۹/۵۲	۱۲۹۷۵/۱۱	۱۱۷۵۸/۱۲	۲۴۶۲/۳۵	هزینه بهره‌برداری
۵۴۸۵۱/۵۵					مجموع
۱۴۷۸۶/۱۷	۱۲۲۹۸/۰۸	۱۳۳۸۸/۶۶	۱۱۹۹۵/۰۴	۲۴۸۸/۲۱	هزینه بهره‌برداری
۵۴۹۵۶/۱۶					مجموع

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله تعیین استراتژی و همچنین برنامه‌ریزی کوتاه مدت ریزشکه‌های قرار گرفته در یک سیستم توزیع ۱۱۸ شینه، به‌طور کامل بررسی شد. به این منظور یک چارچوب سه مرحله‌ای ارائه گردید که در آن عدم قطعیت‌های ناشی از تولید و مصرف در نظر گرفته شدند. در مدل پیشنهادی مسئله برنامه‌ریزی ریزشکه‌ها توسط یک روش تئوری بازی مشارکتی و با در نظر گرفتن برنامه شارژ/دشارژ EVها، سیستم‌های ذخیره‌ساز و یک برنامه DR مبتنی بر تشویق حل شد. لازم به ذکر است که مدل مذکور به‌صورت MILP فرموله شد و توسط حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار گمز حل گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که ساختار دینامیک منجر به استفاده بیشتر از ظرفیت تولید منابع تولید پراکنده شده و از این طریق مجموع هزینه بهره‌برداری سیستم را حدود ۱۰ درصد کاهش داد. همچنین نتایج نشان دادند که در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها منجر به افزایش قیمت حاشیه‌ای ریزشکه‌ها و همچنین قیمت تسویه بازار شد. نتایج عددی بخش مذکور نشان دادند که در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها منجر به افزایش حدود ۷ درصد هزینه بهره‌برداری کل شد. علاوه بر این، تأثیر حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز و همچنین مشارکت EVها در برنامه‌ریزی بررسی شد و نتایج نشان دادند که حضور آن‌ها منجر به کاهش قیمت تسویه بازار و در نتیجه کاهش هزینه‌های بهره‌برداری سیستم شد. در نهایت نتایج نشان دادند که اجرای یک برنامه DR مبتنی بر تشویق نه تنها منجر به اصلاح الگوی تقاضا شد بلکه هزینه بهره‌برداری کل را حدود ۴ درصد کاهش داد.

سپاسگزاری

این مقاله از پایان‌نامه دوره کارشناسی‌ارشد در دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) استخراج شده 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] S.A. Mansouri, M.S. Javadi, "A robust optimisation framework in composite generation and transmission expansion planning considering inherent uncertainties", *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 29, no. 4, pp. 717–730, 2017 (doi: 10.1080/0952813X.2016.1259262).
- [2] M. Uddin, M.F. Romlie, M.F. Abdullah, S. Abd Halim, A.H.A. Bakar, T.C. Kwang, "A review on peak load shaving strategies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3323–3332, Feb. 2018 (doi: 10.1016/j.rser.2017.10.056).
- [3] S. Cai, Y. Xie, Q. Wu, Z. Xiang, "Robust MPC-based microgrid scheduling for resilience enhancement of distribution system", *International Journal Electrical Power and Energy Systems*, vol. 121, Article Number: 106068, Oct. 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106068).
- [4] S.A. Mansouri, A. Ahmarinejad, M.S. Javadi, A.E. Nezhad, M. Shafie-Khah, J.P.S. Catalão, "Chapter 9- Demand response role for enhancing the flexibility of local energy systems", *Distributed Energy Resources in Local Integrated Energy Systems*, pp. 279–313, 2021 (doi: 10.1016/B978-0-12-823899-8.00011-X).
- [5] E.A. Javadi, M. Joorabian, H. Barati, "A sustainable framework for resilience enhancement of integrated energy systems in the presence of energy storage systems and fast-acting flexible loads", *Journal Energy Storage*, vol. 49, Article Number: 104099, May 2022, (doi: 10.1016/j.est.2022.104099).
- [6] A. Sahoo, P.K. Hota, "Impact of energy storage system and distributed energy resources on bidding strategy of micro-grid in deregulated environment", *Journal Energy Storage*, vol. 43, Article Number: 103230, Nov. 2021, (doi: 10.1016/j.est.2021.103230).
- [7] M. Shafiekhani, A. Ahmadi, O. Homaei, M. Shafie-khah, J.P.S. Catalão, "Optimal bidding strategy of a renewable-based virtual power plant including wind and solar units and dispatchable loads", *Energy*, vol. 239, Article Number: 122379, Jan. 2022 (doi: 10.1016/j.energy.2021.122379).
- [8] L. Wang, Y. Zhang, W. Song, Q. Li, "Stochastic cooperative bidding strategy for multiple microgrids with peer-to-peer energy trading", *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 3, pp. 1447–1457, March 2022 (doi: 10.1109/TII.2021.3094274).
- [9] H. Mehrjerdi, "Multilevel home energy management integrated with renewable energies and storage technologies considering contingency operation", *Journal Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 2, Article Number: 25101, Mar. 2019 (doi: 10.1063/1.5085496).

- [10] S. Aslam, A. Khalid, N. Javaid, "Towards efficient energy management in smart grids considering microgrids with day-ahead energy forecasting", *Electric Power Systems Research*, vol. 182, no. 3, Article Number: 106232, May 2020 (doi: 10.1016/j.jobte.2019.100976).
- [11] H.J. Kim, M.K. Kim, "Risk-based hybrid energy management with developing bidding strategy and advanced demand response of grid-connected microgrid based on stochastic/information gap decision theory", *International Journal Electrical Power and Energy Systems*, vol. 131, Article Number: 107046, Oct. 2021, (doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107046).
- [12] M. Alizadeh Bidgoli, A. Ahmadian, "Multi-stage optimal scheduling of multi-microgrids using deep-learning artificial neural network and cooperative game approach", *Energy*, vol. 239, Article Number: 122036, Jan. 2022 (doi: 10.1016/j.energy.2021.122036).
- [13] X. Ding, Q. Guo, T. Qiannan, and K. Jermstittiparsert, "Economic and environmental assessment of multi-energy microgrids under a hybrid optimization technique", *Sustainable Cities and Society*, vol. 65, Article Number: 102630, Feb. 2021, (doi: 10.1016/j.scs.2020.102630).
- [14] K. Hamed, S. Sadeghi, S. Esfandi, M. Azimian, H. Golmohamadi, "Eco-emission analysis of multi-carrier microgrid integrated with compressed air and power-to-gas energy storage technologies", *Sustainability*, vol. 13, no. 9, Article Number: 4681, April 2021 (doi: 10.3390/su13094681).
- [15] S.A. Mansouri, A. Ahmarinejad, E. Nematbakhsh, M.S. Javadi, A.R. Jordehi, J.P.S. Catalão, "Energy management in microgrids including smart homes: A multi-objective approach", *Sustainable Cities and Society*, vol. 69, Article Number: 102852, June 2021, (doi: 10.1016/j.scs.2021.102852).
- [16] B. Javanmard, M. Tabrizian, M. Ansarian, A. Ahmarinejad, "Energy management of multi-microgrids based on game theory approach in the presence of demand response programs, energy storage systems and renewable energy resources", *Journal of Energy Storage*, vol. 42, Article Number: 102971, Oct. 2021 (doi: 10.1016/j.est.2021.102971).
- [17] F. Sheidaei, A. Ahmarinejad, M. Tabrizian, M. Babaei, "A stochastic multi-objective optimization framework for distribution feeder reconfiguration in the presence of renewable energy sources and energy storages", *Journal of Energy Storage*, vol. 40, Article Number: 102775, Aug. 2021 (doi: 10.1016/j.est.2021.102775).
- [18] M.A. Hormozi, B. Bahmani-Firoozi, T. Niknam, "Bi-Level energy management optimization in multi-area smart grids", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 11, no. 42, pp. 29-40, Aug. 2020 (doi: 10.1016/j.jpet.2020.102775).
- [19] S. Gorji, S. Zamanian, M. Moazzami, "Techno-economic and environmental base approach for optimal energy management of microgrids using crow search algorithm", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 11, no. 43, pp. 49-68, Oct. 2020 (doi: 10.1016/j.jpet.2020.102775).
- [20] G.R. Aghajani, H.A. Shayanfar, H. Shayeghi, "Demand side management in a smart micro-grid in the presence of renewable generation and demand response", *Energy*, vol. 126, pp. 622-637, May 2017 (doi: 10.1016/j.energy.2017.03.051).
- [21] S.A. Mansouri, A. Ahmarinejad, E. Nematbakhsh, M.S. Javadi, A. Esmaeel-Nezhad, J.P.S. Catalão, "A sustainable framework for multi-microgrids energy management in automated distribution network by considering smart homes and high penetration of renewable energy resources", *Energy*, vol. 245, Article Number: 123228, April 2022 (doi: 10.1016/j.energy.2022.123228).
- [22] S.A. Mansouri, A. Ahmarinejad, E. Nematbakhsh, M.S. Javadi, A.R. Jordehi, J.P. Catalão, "Energy management in microgrids including smart homes: A multi-objective approach", *Sustainable Cities and Society*, vol. 69, Article Number: 102852, June 2021 (doi: 10.1016/j.scs.2021.102852).

ضمیمه

الف - مجموعه‌ها

مجموعه‌ها	
شاخص زمانی	t
شاخص ژنراتور	g
شاخص ریزش‌بکه‌ها	mg
شاخص تکرار	iter
شاخص پیشنهادات خرید	i
شاخص پیشنهادات فروش	j
شاخص شین	m,n
شاخص سناریو	s
شاخص خط	l

ب- اسکالرها

اسکالرها	
مرحله زمانی برحسب ساعت	dt
راندمان شارژ/ دشارژ (%)	η^{ch} / η^{dch}
راندمان پنل خورشیدی (%)	η^{pv}
حداکثر تعداد تکرار	$iter^{max}$
هزینه ENS برحسب دلار بر کیلووات ساعت	π^{ens}
توان پایه برحسب کیلوولت آمپر	S^{base}
مقدار ولتاژ حداقل/ حداکثر برحسب پریونیت	V^{min} / V^{max}
زاویه ولتاژ حداقل/ حداکثر برحسب رادیان	$\theta^{min} / \theta^{max}$
تابش استاندارد برحسب وات بر مترمربع	G_{std}

ج- پارامترها

پارامترها	
ضرایب تابع هزینه برحسب دلار بر ساعت/ دلار بر کیلووات ساعت/ دلار بر کیلووات ساعت	$a_g / b_g / c_g$
احتمال سناریو (%)	ρ_s
جهت جریان	$k_{l,k}$
ضریب توان نقاط بار	$\tan_n^{load}$
حداقل/ حداکثر مشارکت DR (%)	$\delta_n^{min} / \delta_n^{max}$
کنداکتانس/ سوسپتانس خطوط (s)	G_1/B_1
تابش برحسب وات بر مترمربع	$G_{g,t,s}$
افزایش/ کاهش توان توربین‌های گازی برحسب کیلووات ساعت	RU_g/RD_g
شارژ EES اولیه برحسب کیلووات ساعت	$E_e^{initial}$
حداقل/ حداکثر ظرفیت EES برحسب کیلووات ساعت	E_e^{min} / E_e^{max}
سرعت‌های برش/ مجاز/ قطع برحسب متر بر ثانیه	$v_g^{ci} / v_g^r / v_g^{co}$
سرعت باد برحسب متر بر ثانیه	$V_{g,t,s}$
مقدار ولتاژ برحسب پریونیت	$V_{n,t,s}$
زاویه ولتاژ برحسب رادیان	$\theta_{n,t,s}$
حداقل/ حداکثر ظرفیت تولید توربین‌های گازی برحسب کیلووات	$p_{g,t,s}^{gt,min} / p_{g,t,s}^{gt,max}$
تقاضا DisCo/ها/ برحسب کیلووات	$p_{k,t,s}^{load}$
حداقل/ حداکثر مقدار تبادل توان برحسب کیلووات	$p_k^{market,min} / p_k^{market,max}$
تقاضای توان اکتیو/ راکتیو برحسب کیلووات- کیلووار	$p_{n,t,s}^{load,base} / Q_{n,t,s}^{load,base}$
حداکثر توان شارژ/ دشارژ برحسب کیلووات	$p_e^{ch,max} / p_e^{dch,max}$
توان مجاز تولیدات تجدیدپذیر برحسب کیلووات	p_g^r
قیمت پیشنهادات خرید برحسب دلار بر کیلووات ساعت	$\pi_{k,i,t,s}^{buy}$
قیمت پیشنهادات فروش برحسب دلار بر کیلووات ساعت	$\pi_{k,i,t,s}^{sell}$
قیمت تولید تجدیدپذیر برحسب دلار بر کیلووات ساعت	π_g^{ren}
قیمت EES برحسب دلار بر کیلووات ساعت	π_e^{ees}
قیمت بازار برحسب دلار بر کیلووات ساعت	π_t^{mp}
ظرفیت خط برحسب کیلووار	S_l^{max}

د- متغیرهای پیوسته

متغیرهای پیوسته	
انحراف از نقطه بهینه (%)	η_s
هزینه بهره‌برداری از توربین گازی برحسب دلار	$C_{g,t,s}^{gt}$
هزینه بهره‌برداری واحدهای تجدیدپذیر برحسب دلار	$C_{g,t,s}^{ren}$
هزینه بهره‌برداری EES برحسب دلار	$C_{e,t,s}^{ees}$
انرژی ذخیره شده در ESS برحسب کیلووات-ساعت	$E_{e,t,s}$
تقاضا اکتیو/ راکتیو برحسب کیلووات-ساعت/ کیلووار-ساعت	$P_{n,t,s}^{load} / Q_{n,t,s}^{load}$
توان ارائه نشده در هر باس برحسب کیلووات	$P_{n,t,s}^{load,ens}$
توان تولید شده توسط توربین گازی برحسب کیلووات	$P_{g,t,s}^{gt}$
توان تولید شده توسط توربین بادی برحسب کیلووات	$P_{g,t,s}^w$
توان تولید شده توسط پنل خورشیدی برحسب کیلووات	$P_{g,t,s}^{pv}$
توان شارژ/ دشارژ برحسب کیلووات	$P_{e,t,s}^{dch} / P_{es,t,s}^{ch}$
توان مبادله شده با بازار برحسب کیلووات	$P_{k,t,s}^{market}$
پخش توان اکتیو/ راکتیو برحسب کیلووات / کیلووار	$P_{l,t,s}^{line} / Q_{l,t,s}^{line}$
تلفات توان برحسب کیلووات	$P_{l,t,s}^{loss}$
توان مبادله شده بین DisCo و شبکه اصلی برحسب کیلووات	$P_{n,t,s}^{sub}$
توان مشارکت DR برحسب کیلووات	$P_{n,t,s}^{load,dr-} / P_{n,t,s}^{load,dr+}$

ه- متغیرهای باینری

متغیرهای باینری	
وضعیت توربین گازی	$I_{g,t,s}$
وضعیت پیشنهادات فروش	$I_{k,j,t,s}^{sell}$
وضعیت پیشنهادات خرید	$I_{k,i,t,s}^{buy}$
وضعیت خطوط	$I_{l,t,s}^{line}$
وضعیت شین اصلی	$I_{n,m,t,s}^{parent}$
کاهش/ افزایش در برنامه DR	$I_{n,t,s}^{dr-} / I_{n,t,s}^{dr+}$
وضعیت شارژ/ دشارژ	$I_{e,t,s}^{ch} / I_{e,t,s}^{dch}$

زیر نویس‌ها

1. Distributed energy resources
2. Islanding
3. Virtual power plant
4. Information gap decision theory
5. Point-to-Point trading
6. Stochastic
7. Quadratic
8. Diagonal quadratic approximation
9. Smart homes
10. Deep-learning artificial neural network
11. Multi-carrier microgrids
12. Power-to-Gas technology
13. Fuzzy approach
14. Centralized
15. Epsilon-constrained
16. Karush-Kuhn-Tucker
17. Mixed-integer linear programming
18. Wholesale market

19. Independent system operator
20. Marginal cost
21. Social welfare
22. Distribution company
23. Normalize
24. Relax
25. Ramp-up
26. Ramp-down
27. Mobility coefficient
28. Dynamic
29. State of Charge