



Optimal Scheduling in Multiple Microgrids Based on Increasing the Resilience of Generated Power in the Presence of Solar-Wind Power Plants and Diesel Generators Using the HGAPSO Hybrid Optimization Algorithm

Mohamad Abedini^{1*} , Leila Golpaiegany² 

¹Correspondence: Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran. Email Address: m.abedini@abru.ac.ir

²Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran., Email Address: l.golpaiegany@abru.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 22 Desember 2025

Received in revised form: 14 February 2026

Accepted: 13 July 2026

Available online: 21 August 2026

Keywords:

Resilience

Renewable Energy

Reliability,

Self-Sufficiency

Multi-Objective Optimization

ABSTRACT

In recent decades, the increase in widespread outages caused by unexpected events such as floods and storms has doubled the importance of resilience studies in power distribution networks. Therefore, by timely identifying the location of the incident and isolating it, as well as designing MGs that are capable of providing their maximum load by planning the energy resources available under the incident conditions, the costs related to outages can be significantly reduced and the network resilience can be improved. In this paper, an optimization problem with three objective functions is introduced, the first term of which aims to reduce the cost of turning on/off the DGs available in each MG and also to reduce the costs related to battery charging/discharging in MGs. In the second term, to increase the self-sufficiency of MGs, an objective function has been introduced so that MGs can provide their required power as much as the energy buying and selling market between MGs and the upstream network allows, and increase their profits by charging and discharging batteries and turning on and off their DGs at different times of the day and night, as well as based on the proposed price of the upstream network. Finally, in the third term, the proposed objective function will seek to reduce the losses in the MGs under study. To solve the proposed objective function, a combined optimization method based on particle and genetic algorithms has been used. The results are implemented on a 33-bus test network and show that the proposed method outperforms conventional optimization methods. Also, the proposed optimal scheduling in MGs reduced losses and increased their profits.

Cite this article: M. Abedini and L. Golpaiegany, "Optimal Scheduling in Multiple Microgrids Based on Increasing the Resilience of Generated Power in the Presence of Solar-Wind Power Plants and Diesel Generators Using the HGAPSO Hybrid Optimization Algorithm," Journal of Passive Defence, vol. 17, no. 2, pp. 107-125, 2026.
DOI: <https://doi.org/10.47176/pd.2026.1612>



OPEN ACCESS

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University.

Introduction

In recent decades, the increase in widespread outages caused by unexpected events such as floods and storms has doubled the importance of resilience studies in power distribution networks. Therefore, by timely identifying the location of the incident and isolating it, as well as designing MGs that are capable of providing their maximum load by planning the energy resources available under the incident conditions, the costs related to outages can be significantly reduced and the network resilience can be improved. In this paper, an optimization problem with three objective functions is introduced, the first term of which aims to reduce the cost of turning on/off the DGs available in each MG and also to reduce the costs related to battery charging/discharging in MGs. In the second term, to increase the self-sufficiency of MGs, an objective function has been introduced so that MGs can provide their required power as much as the energy buying and selling market between MGs and the upstream network allows, and increase their profits by charging and discharging batteries and turning on and off their DGs at different times of the day and night, as well as based on the proposed price of the upstream network. Finally, in the third term, the proposed objective function will seek to reduce the losses in the MGs under study. To solve the proposed objective function, a combined optimization method based on particle and genetic algorithms has been used. In this study, in order to optimally plan the energy supply in several MGs, an optimization problem with three terms is introduced. The first term aims to reduce the cost of turning on/off the DGs in each MG and also to reduce the costs related to battery charging/discharging in the MGs. In the second term, an objective function is introduced to increase the self-sufficiency of the MGs so that the MGs can provide their required power as much as the energy buying and selling market between the MGs and the upstream network allows, and increase their profit by charging and discharging the battery and turning on and off their DGs at different times of the day and night, as well as based on the proposed price of the upstream network. Finally, in the third term, we seek to reduce the losses in the MGs of the system under study. Considering the variables raised in this optimization problem, which includes an economic load distribution problem and an energy trading problem between MGs, a hybrid optimization method based on a genetic algorithm and particle swarm optimization (HGAPSO) has been used. The variables of the scheduling problem of diesels and battery charging/discharging based on genetic algorithm and the energy trading problem in a competitive market, as well as the self-sufficiency of MGs while observing technical and environmental constraints, have been targeted using the particle swarm optimization method in this paper.

Results and Discussion

In this paper, the goal of the proposed optimization problem is to determine the time for DGs to be in the circuit in microgrids along with the amount of power generated in them. The charging and discharging status of the batteries will also be determined, and in proportion to the amount of excess power in the microgrids or its deficiency, the proposed optimization program based on HGAPSO will determine how much power will be transferred between MGs and the upstream network per hour. In this way, the profit of microgrids from power sales and through proper planning for turning on DGs will increase, and in island conditions, they will be able to maintain more load by exchanging power and managing batteries.

The objective function value of the proposed method is given in Figure (18), which is compared with the conventional PSO, GA and GWO methods, which shows that the proposed method has a high convergence speed compared to the other two methods and has reached its final value in iteration 10, while genetics has converged in iteration 30, particle swarm algorithm in iteration 14 and gray wolf algorithm in iteration 43. In addition, the proposed method has the lowest objective function value, while the particle swarm algorithm, although it converged earlier than genetics, has fallen into a local optimum. The GWO algorithm has not performed well compared to the other three methods. A summary of the convergence process and execution time is given in Table (6).

Conclusion

The solar-battery-diesel generator hybrid system, as an effective solution, is very crucial for managing energy supply guarantee and saving, especially in critical conditions of the power system. Therefore, in this paper, an attempt was made to investigate the optimal power distribution in three MGs using a hybrid optimization method and introducing a new optimization function. An economic load distribution problem and an energy purchase and sale problem between MGs were modeled, in which the variables of the problem were the scheduling of diesels in the circuit, as well as the charging/discharging of batteries and the sale of energy in a competitive market, as well as the self-sufficiency of MGs by observing technical and environmental constraints. The results showed that MG1 accounted for nearly 44.96 percent of the purchased power, MG2 accounted for 36.45 percent, and the third MG accounted for 18.59 percent, which indicated that MG3 was more self-sufficient in providing the load and, at the same time, the voltage of the MG buses was also in the standard range.

It should be noted that the results obtained by HGAPSO are different in different iterations, and the solution obtained will not necessarily be the global optimal. Also, increasing the number of MGs due to the increase in unknowns can make it difficult to find the optimal solution. Another limitation of the proposed method is the adjustment of the algorithm parameters, which will lead to a departure from the optimal point if not properly adjusted, and ultimately, the presence of sensitive loads can change the problem-solving conditions.

For future work, the following can be implemented in the optimization of power management in MGs:

- Considering the variability of the load, the objective functions can be modeled in a fuzzy form, and the fuzzy objective function can be optimized.
- In this paper, the microgrid area was identified, and these areas can also be modeled to increase their self-sufficiency and resilience in the event of a fault.
- Considering uncertainty in the production of renewable energy sources

برنامه‌ریزی بهینه در ریزشکه‌های چندگانه برپایه افزایش تاب‌آوری توان تولیدی در حضور

نیروگاه‌های تجدیدپذیر و دیزل ژنراتور با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی HGAPSO

محمد عابدینی^{۱*}، لیلا گلپایگانی^۲ 

^۱دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی، بروجرد، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: m.abedini@abru.ac.ir

^۲استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی، بروجرد، ایران. رایانامه: l.golpaiegany@abru.ac.ir

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۳۰

کلیدواژه‌ها:

تاب‌آوری

انرژی‌های تجدیدپذیر

قابلیت اطمینان

خودکفایی

بهینه‌سازی چندهدفه

چکیده

در چند دهه اخیر افزایش قطعی‌های گسترده ناشی از حوادث غیرمترقبه از جمله سیل و طوفان باعث دوچندان شدن اهمیت مطالعات تاب‌آوری در شبکه‌های توزیع برق گردیده است. از این رو با شناسایی به موقع محل بروز حادثه و جداسازی آن و نیز طراحی MGهای که قادر به تأمین حداکثر بار خود با برنامه‌ریزی منابع انرژی در دسترس در شرایط حادثه باشند می‌توان هزینه‌های مربوط به قطعی را به طور چشمگیری کاهش داد و تاب‌آوری شبکه را بهبود بخشید. در این مقاله یک مسئله بهینه‌سازی با سه تابع هدف معرفی می‌گردد، ترم اول آن هدف کاهش میزان هزینه روشن/خاموش شدن DGs موجود در هر MG و نیز کاهش هزینه‌های مربوط به شارژ/دشارژ باتری در MGها است. در ترم دوم به منظور افزایش خودکفایی MGها تابعی هدفی معرفی شده است تا MGها تا آنجا که بازار خریدوفروش انرژی میان MGها و نیز شبکه بالادست اجازه دهد توان موردنیاز خود را تأمین نمایند و به واسطه شارژ و دشارژ باتری و نیز روشن و خاموش شدن DGs خود در ساعات مختلف شبانه‌روز و نیز بر اساس قیمت پیشنهادی شبکه بالادست سود خود را نیز افزایش دهند. در نهایت در ترم سوم تابع هدف پیشنهادی، به دنبال کاهش تلفات موجود در MGهای مورد مطالعه خواهیم بود. به منظور حل تابع هدف پیشنهادی نیز از یک روش بهینه‌سازی ترکیبی بر اساس الگوریتم ذرات و ژنتیک استفاده شده است. نتایج بر روی شبکه تست ۳۳ باس پیاده‌سازی می‌شود و نشان داد که روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های بهینه‌سازی مرسوم عملکرد بهتری داشته است. همچنین برنامه‌ریزی بهینه پیشنهادی در MG سبب کاهش تلفات و افزایش سود آن‌ها گردید.

استناد: عابدینی، محمد، گلپایگانی، لیلا، "برنامه‌ریزی بهینه در ریزشکه‌های چندگانه برپایه افزایش تاب‌آوری توان تولیدی در حضور نیروگاه‌های تجدیدپذیر و دیزل ژنراتور با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی HGAPSO"، نشریه پدافند غیرعامل، دوره ۱۷، شماره ۲، صفحات ۱۲۵-۱۰۷، ۱۴۰۵. DOI: <https://doi.org/10.47176/pd.2026.1612>

© نویسنده (گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).

OPEN ACCESS

۱- مقدمه

با توجه به اینکه یکی از حیاتی‌ترین زیرساخت‌های اساسی صنعت برق است که سایر بخش‌های خدمات‌رسان از جمله مراکز بهداشتی درمانی، مراکز نظامی و امنیتی، منابع تأمین انرژی، حمل‌ونقل و اقتصاد به این صنعت وابسته است؛ بنابراین شایسته است که بحث پدافند غیرعامل جهت پایداری شبکه برق با برنامه‌ریزی دقیق و به طور جد پیگیری و اجر شود تا اختلالی در سایر بخش‌ها به وجود نیاید. در سال‌های اخیر، با کاهش منابع انرژی سنتی، انرژی باد و خورشید به عنوان انرژی پاک ایده‌آل به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند که آن‌ها نیز ماهیتی تصادفی دارند و نمی‌توانند منبع تغذیه پایداری باشند. با اضافه کردن سیستم ذخیره انرژی و دیزل ژنراتور، می‌توان ضعف نیروگاه‌های بادی و خورشیدی را متعادل کرد و خروجی توان پایداری را که قابلیت اطمینان سیستم را تضمین می‌کند، به دست آورد. برای تضمین اینکه سیستم بتواند از منبع باد - خورشیدی به طور کامل استفاده کند و در هزینه‌ها صرفه‌جویی کند، پیکربندی ظرفیت معقولی مورد نیاز است [۱ و ۲].^۱ MGها سیستم‌های توزیع برق در مقیاس کوچک هستند که از اجزای مختلفی تشکیل شده‌اند و ضمن افزایش انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت، استفاده کارآمد از انرژی‌های تجدیدپذیر را تسهیل می‌کنند و در نتیجه بهینه‌سازی ساختارهای انرژی و توسعه پایدار را ارتقا می‌دهند. MGها می‌توانند چندین منبع انرژی توزیع شده مانند میکروتوربین‌ها^۲ (MT)، توربین‌های بادی^۳ (WT)، باتری‌ها^۴ (BAT)، پیل‌های سوختی^۵ (FC)، سیستم‌های خورشیدی را شامل شوند [۳ و ۴]. دولت‌های سراسر جهان نیز از طریق سیاست‌هایی مانند استانداردهای سبد انرژی تجدیدپذیر، فرایندهای قیمت‌گذاری کربن و یارانه برای فناوری‌های MG ها، استقرار MGها را در اولویت قرار داده‌اند [۵].

در برنامه‌ریزی مدیریت انرژی در MGها موضوعات بسیار پیچیده‌ای از قبیل زمان روشن و خاموش شدن واحدهای انرژی که سوخت نیاز دارند، وضعیت شارژ و دشارژ باتری‌ها، عدم قطعیت و نیز مبادلات توان با شبکه بالادست باید مورد مطالعه قرار داده شوند از این رو مسائل بهینه‌سازی متنوعی در مقالات بر اساس نوع

تابع هدف بررسی شده از تک‌هدفه تا چندهدفه مطرح می‌شود [۶-۲۶]. الگوریتم بهینه‌سازی متنوعی برای یافتن بهترین راهبرد عملیاتی برای برنامه‌ریزی توان در MGها استفاده شده است که برخی برپایه روش‌های ریاضی همچون برنامه‌ریزی غیرخطی [۶] و برخی دیگر نیز برپایه روش‌های فراابتکاری [۷] می‌باشند که در ادامه برخی از این روش‌ها معرفی می‌شوند.

مراجع [۸،۹] تابع هدف دو مرحله‌ای بر اساس از دو روز کاری را پیاده‌سازی کرده‌اند. در مرحله روز اول، یک مدل برنامه‌ریزی هزینه بهینه می‌شود، در حالی که مرحله دوم از مدل پیش‌بینی برای کنترل اصلاحی جهت مدیریت عدم قطعیت‌ها در تولید انرژی تجدیدپذیر و پیش‌بینی بار استفاده می‌کند. این مدل از طریق بهینه‌سازی دو مرحله‌ای، پایداری سیستم و بهره‌وری اقتصادی را بهبود می‌بخشد.

مرجع [۱۰] یک مدل زمان‌بندی بهینه‌سازی متصل به MG را بر اساس الگوریتم ازدحام ذرات جهشی پیشنهاد داده است و تا برتری الگوریتم ازدحام ذرات^۶ بهینه‌شده اعمال شده بر مدل زمان‌بندی بهینه‌سازی MG را در دوره‌های زمانی مختلف بررسی کنند. در [۱۱] الگوریتم رقابت استعماری را با استفاده از جهش‌های گاوسی و کوشی بهبود بخشیدند و مدل زمان‌بندی بهینه‌سازی MG را با استفاده از آن حل کردند.

مرجع [۱۲] یک مدل پیکربندی بهینه دوسطحی برای چندین MG انرژی یکپارچه با در نظر گرفتن ذخیره‌سازی انرژی مشترک ایجاد کرد و مزایای اقتصادی ذخیره‌سازی انرژی مشترک چند MG را نسبت به ذخیره‌سازی انرژی ساخته شده به صورت جداگانه توسط هر MG ارزیابی نمود.

یک روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه در [۱۳] پیشنهاد شد که به مسئله بهینه‌سازی شامل کمینه‌سازی هزینه و تأمین بار برای یک MG می‌پردازد و بر روی سه ایستگاه منتخب در ایران آزمایش شده است. در [۱۴] یک مدل بهینه‌سازی باد - خورشید - باتری با تمرکز بر هزینه سالانه ارائه داده‌اند. در این مطالعه، یک الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری^۷ پیشنهاد و با الگوریتم ژنتیک^۸ و الگوریتم ازدحام ذرات مقایسه شد تا راه‌حل بهینه برای برنامه‌ریزی MG تعیین شود. در [۱۵] یک استراتژی

^۶ Particle swarm optimization (PSO)^۷ Grey wolf optimization (GWO)^۸ Genetic algorithm (GA)^۱ Microgrids (MGs)^۲ microturbines (MTs)^۳ Wind turbines (WTs)^۴ Batteries (BATs)^۵ Fuel cells (FCs)

سطح ولتاژ سیستم با توجه به تغییرات توان نیروگاه‌های تجدیدپذیر و در نهایت افزایش قابلیت اطمینان استفاده شده است. از روش فازی نیز جهت فازی کردن توابع هدف استفاده شده است. در [۲۳]، بهینه‌سازی چند MG برای برآورده کردن شرایط بار مسکونی روزانه خاص در مناطق دورافتاده توسعه داده شد. یک مدل توزیع بهینه دوسطحی برای MGها با یک حضور ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی در سناریوهای مختلف برنامه‌ریزی شده است [۲۴]. یک رویکرد مبتنی بر یادگیری ماشین در MGهای تجدیدپذیر بر اساس سوئیچینگ از راه دور اتصال و تقسیم‌بندی با در نظر گرفتن یک ساختار قابل پیکربندی مجدد پیشنهاد شد [۲۵]. در [۲۶] یک مدل پیکربندی ظرفیت سیستم انرژی یکپارچه مبتنی بر بیوگاز که از تخمیر بی‌هوازی زیست توده ایجاد می‌شود را معرفی کرده است که هزینه کل سالانه، انتشار کربن سالانه را به عنوان اهداف بهینه‌سازی مدل در نظر می‌گیرد. این مقاله از یک روش محدودیت ε تقویت‌شده برای بهینه‌سازی چندهدفه برای به‌دست‌آوردن منحنی پارتو استفاده می‌کند. پس از آن، با مقایسه و تجزیه و تحلیل مزایا و معایب طرح‌های مختلف، راه‌حل بهینه تعیین می‌شود. در [۲۹]، مزایای اجتماعی - اقتصادی و قابلیت اطمینان شبکه هوشمند را بررسی کرده است و بر طبقه‌بندی و تحلیل مطالعات اخیر که رویکردهای نظریه بازی را برای بهینه‌سازی مدیریت سمت تقاضا پیشنهاد می‌کنند، تمرکز دارد. در [۳۰]، یک روش نوآورانه با هدف بهبود برنامه‌ریزی سیستم قدرت در روز بعد با استفاده از فناوری‌های سازگار در چارچوب تعهد واحد با محدودیت امنیتی معرفی کرده است. در [۳۱]، یک چارچوب دو مرحله‌ای برای پیش‌بینی مصرف برق کوتاه مدت معرفی شده است. در [۳۲]، مدیریت توان سیستم‌های انرژی یکپارچه انعطاف‌پذیر - تجدیدپذیر با شبکه‌های توزیع هوشمند را با در نظر گرفتن جبران هارمونیک بار غیرخطی ارائه می‌دهد. یک مدل قطعی که برای سه هدف متمایز بهینه می‌شود، به عنوان پایه و اساس سیستم پیشنهادی عمل می‌کند. در [۳۳]، ارائه یک چارچوب مفهومی یکپارچه از مدل‌سازی عدم قطعیت، بهینه‌سازی توزیع‌شده و پیش‌بینی مبتنی بر یادگیری ماشین، و همچنین یک ترکیب مقایسه‌ای از مطالعات اخیر در ریزشبکه‌ها ارائه شده است.

در [۳۴]، یک روش بهینه‌سازی چندهدفه و جدید برای بازآرایی شبکه توزیع ارائه می‌دهد. هدف آن دستیابی به سه هدف

پاسخ به تقاضا^۱ را توصیف می‌کنند که مشوق‌ها و زمان را با هم ترکیب می‌کند و قیمت‌های انعطاف‌پذیر را در نظر می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که پیاده‌سازی روش پیشنهادی می‌تواند تقاضای بار را در ساعات اوج مصرف کاهش دهد و از طریق تبادل انرژی با شبکه اصلی، سود را برای مشتریان فراهم کند. درواقع، مقایسه مستقیمی بین MGهای مستقل و MGهای متصل از نظر هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، هزینه‌های زیست‌محیطی، نرخ اتلاف بار و استفاده از منابع تجدیدپذیر وجود ندارد. نویسندگان [۱۶] روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط فازی را برای مدل‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر و عدم قطعیت‌های مرتبط با بار در برنامه‌ریزی MG اتخاذ کردند. هنگامی که تابع چگالی احتمال دقیق پارامتر نامشخص ناشناخته است، این روش مزایای زیادی دارد. با این حال، برنامه‌ریزی فازی تحت تأثیر عوامل ذهنی تصمیم‌گیرندگان قرار دارد و فرآیند اجرای آن نیز ممکن است محدود باشد. در [۱۷] از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تخصیص ظرفیت در سیستم‌های بادی - خورشیدی - ذخیره‌سازی در MGهای هوشمند پیاده‌سازی کردند. با این حال، این فرآیند حل اغلب به بهینه محلی همگرا می‌شود.

در مطالعه‌ای دیگر از الگوریتم ژنتیک ترکیبی (GA) و کنترل مدل پیش‌بین برای اندازه‌گیری و بهینه‌سازی سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی با در نظر گرفتن محدودیت‌های خاصی در جریان برق و وضعیت شارژ باتری استفاده کردند [۱۸].

در [۱۹]، یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای توزیع بهینه انرژی با در نظر گرفتن مفهوم بازی مشارکتی MGها ارائه شده است که تصمیم‌گیری بازیگران بازار را متنوع‌تر می‌کند. در مرجع [۲۰]، یک سیستم ریزشبکه هیبریدی فتوولتائیک/باد/دیزل در مقیاس کوچک برای شهر ینبع، عربستان سعودی، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های منابع انرژی تجدیدپذیر و تخریب باتری، به صورت بهینه طراحی شده است. مسئله بهینه‌سازی به صورت یک مسئله چندهدفه با دو تابع هدف فرموله شده است [۲۱]، نویسندگان از انرژی توزیع‌شده در MGها به طور کامل استفاده کردند، مدل‌سازی خودروهای برقی را در نظر گرفتند و یک روش زمان‌بندی بهینه مشارکتی مبتنی بر مشارکت خودروهای برقی در MGها چندگانه و شبکه توزیع ارائه دادند. در [۲۲]، روش بهینه‌سازی چندهدفه برای کاهش هزینه‌های تولید انرژی، بهبود

¹ Demand response strategy (DRS)

۲-۱- مدل سیستم‌های خورشیدی^۲

این مدل باید توان خروجی سیستم خورشیدی را بر اساس داده‌های تابش نشان دهد که به صورت زیر معرفی می‌گردد [۲۲]:

$$P_{PV}(t) = y_{PV} f_{PV} \left(\frac{i_T(t)}{i_s} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_s)] \quad (1)$$

که در آن y_{PV} خروجی توان نامی ماژول PV (برحسب کیلووات) است.

f_{PV} به عنوان عامل کاهش در توان شناخته می‌شود (%). i_T شدت تابش خورشید بر روی پنل خورشیدی برحسب (kW/m^2) است. i_s شدت تابش، α_p ثابت دمایی از توان، T_c دمای سلول ماژول PV و T_s دمای سلول پنل PV در شرایط استاندارد (۲۵ درجه سانتی‌گراد) است. توان تولید شده توسط N تعداد ماژول‌های خورشیدی برابر خواهد بود با:

$$p_{PV}(t) = N_{PV} \times P_{PV}(t) \quad (2)$$

۲-۲- مدل شارژ و دشارژ باتری

وضعیت شارژ^۳ (SOC)، یک پارامتر حیاتی برای نشان دادن ظرفیت باقیمانده باتری، باید بین شروع و پایان هر چرخه ارسال، ثابت نگهداشته شود تا عملکرد مداوم تضمین شود. همچنین از آنجایی که MGها قابلیت خریدوفروش توان با شبکه بالادست و نیز یکدیگر دارند از این رو لازم است تا باتری‌های موجود در هر MG بر اساس شرایط موجود فنی و نیز اقتصادی در برنامه‌ریزی انرژی شارژ و دشارژ شوند؛ لذا باید قیود زیر برای باتری لحاظ شود [۲۷]:

$$P_{bat}(t) = P_{bat}^{charge}(t) + P_{bat}^{discharge}(t) \quad (3)$$

$$0 \leq P_{charge}(t) \leq P_{charge}^{max}(t) \quad (4)$$

$$SOC_{min}(t) < SOC(t) < SOC_{max}(t) \quad (5)$$

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{P_{bat}^{charge}(t-1)\alpha_{charge} - \frac{P_{bat}^{discharge}(t-1)}{\alpha_{discharge}}}{E_{bat}} \quad (6)$$

$$X_s^{charge}(t) + X_s^{discharge}(t) \leq 1 \quad (7)$$

کلیدی است: به حداقل رساندن تلفات انرژی، افزایش استفاده از تولید پراکنده و کاهش انرژی تأمین نشده. این روش از منطق فازی و نظریه بازی‌ها است.

در این مطالعه به‌منظور برنامه‌ریزی بهینه تأمین انرژی در چند MG، یک مسئله بهینه‌سازی دارای سه ترم معرفی می‌گردد، ترم اول آن هدف کاهش میزان هزینه روشن/خاموش شدن DGs موجود در هر MG و نیز کاهش هزینه‌های مربوط به شارژ/دشارژ باتری در MGها است. در ترم دوم به‌منظور افزایش خودکفایی MGها تابعی هدفی معرفی شده است تا MGها تا آنجا که بازار خریدوفروش انرژی میان MGها و نیز شبکه بالادست اجازه دهد توان موردنیاز خود را تأمین نمایند و به‌واسطه شارژ و دشارژ باتری و نیز روشن و خاموش شدن DGs خود در ساعات مختلف شبانه‌روز و نیز بر اساس قیمت پیشنهادی شبکه بالادست سود خود را نیز افزایش دهند. درنهایت در ترم سوم به دنبال کاهش تلفات موجود در MGهای سیستم مورد مطالعه هستیم. با توجه به متغیرهای مطرح‌شده در این مسئله بهینه‌سازی که خود شامل یک مسئله توزیع بار اقتصادی و نیز یک مسئله خریدوفروش انرژی بین MGها است از این رو از یک روش بهینه‌سازی ترکیبی بر اساس الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات^۱ (HGAPSO) استفاده شده است که متغیرهای مسئله برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن دیزل‌ها و نیز شارژ/دشارژ باتری‌ها بر اساس الگوریتم ژنتیک و مسئله خریدوفروش انرژی در یک بازار رقابتی و نیز خودکفایی MGها با رعایت قیود فنی و زیست‌محیطی با استفاده از روش ازدحام ذرات در این مقاله هدف‌گیری شده است.

ادامه مقاله عبارت‌اند از: در قسمت دوم مدل‌سازی توابع هدف آورده شده است. معرفی روش حل مسئله پیشنهاد شده بر پایه روش بهینه‌سازی HGAPSO در بخش سوم بیان می‌گردد و در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی بحث خواهد شد.

۲-۲- مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه

به منظور مدیریت انرژی در داخل چند MGs لازم است بخش‌های مختلف آن را که عمده‌تاً شامل منابع انرژی تجدیدپذیر، باتری و دیزل ژنراتور است به‌صورت دقیق مدل‌سازی شود تا بتوان برای آن تصمیم‌گیری جهت فروش یا خرید توان نمود از این رو در ادامه به معرفی مدل ریاضی این عناصر به صورت ریاضی خواهیم پرداخت.

^۲ Photovoltaic (PV)

^۳ State of charge (SOC)

^۱ Hybrid Genetic and Particle swarm optimization (HGAPSO)

بنابراین، هزینه نهایی برای مینیمم سازی توان تولیدی در MGها در کل بازه زمانی T به صورت زیر بیان می گردد:

$$C_{Tot}^{DG} = \sum_{i=1}^{N_{MG}} \sum_{k=1}^{N_{DG}} \sum_{t=1}^T (C_{DG_{i,k}}^{var}(t) + C_{DG_{i,k}}^{fix}(t)) \quad (13)$$

در روابط فوق $P_{DG}(t)$ توان تولیدی DGs در زمان t ، ضرایب b و a ضرایب تابع هزینه سوخت درجه دوم برای DGs است. ضرایب γ و μ ضریب نگهداری متغیر و ضریب هزینه انتشار آلاینده ها به ترتیب می باشند؛ ضرایب $\kappa_{O\&M}(t)$ هزینه نگهداری ثابت ساعتی و $\kappa_{start_up}(t)$ هزینه راه اندازی است.

۲-۴- مدل سازی توان مبادله ای شبکه توزیع و MGها

با توجه به امکان خرید و فروش میان MGها و نیز قیمت های خرید و فروش متفاوت شبکه بالادست و MGها به منظور جلوگیری از جابجایی توان به صورت دوطرفه در یک زمان خاص قیود زیر در این برنامه ریزی انرژی مدل سازی شده است:

$$P_{MG}^{sell}(t) \times P_{MG}^{buy}(t) = 0 \quad (14)$$

$$P_{utility_exh}^{sell}(t) \times P_{utility_exh}^{buy}(t) = 0 \quad (15)$$

$$C_{utility}^{exchange} < 0, C_{MG_i}^{exchange} < 0 \quad (16)$$

$$C_{utility}^{exchange} > 0, C_{MG_i}^{exchange} > 0 \quad (17)$$

$$P_{Utility}(t) = P_{Load}(t) + P_{Loss}(t) - P_{disel}(t) - P_{bat}(t) + P_{utility_exh}(t) \quad (18)$$

$$P_{MG}(t) = P_{MG}^{buy}(t) - P_{MG}^{sell}(t) \quad (19)$$

معادله (۱۴) بیان می کند که یک MG نمی تواند هم زمان از ریز شبکه دیگر بخرد و به آن بفروشد زیرا که باید در یک جهت مبادله توان را انجام دهد. در معادله (۱۵) نیز شرایط مشابه جهت مبادله توان با شبکه بالادست نمایش داده شده است. معادله (۱۶) نشان می دهد که توان خریداری شده از شبکه و یا MGها منفی هستند و در معادله (۱۷) نیز توان فروخته شده به شبکه و MGهای دیگر مثبت است. در معادله (۱۸)، $P_{Utility}(t)$ توان خالص تبادل با شبکه بالادست است. در معادله (۱۹) نیز توان مبادله شده بین MGها لازم به ذکر است که در هر دوره مورد مطالعه MG یا خرید کرده و یا فروخته است.

$$X_s^{charge}(t) \in \leq \{0.1\} \quad (8)$$

$$X_s^{discharge}(t) \in \leq \{0.1\} \quad (9)$$

$P_{bat}(t)$ ، توان باتری MG در زمان t ، ضرایب α_{charge} و $\alpha_{discharge}$ ، راندمان شارژ و دشارژ هستند.

$SOC(t)$ ، حالت شارژ باتری است که باید در هر لحظه بین حداقل و حداکثر مجاز باشد. این قید به عنوان یک جریمه در تابع هدف لحاظ می شود $X_s^{charge}(t)$ و $X_s^{discharge}(t)$ حالت شارژ و دشارژ باتری در بازه زمانی مورد مطالعه در هر MG است.

هزینه بهره برداری و نگهداری باتری نیز بر اساس کل انرژی شارژ و دشارژ شده محاسبه می شود.

$$C_{bat}(t) = (P_{bat}^{dis}(t) + P_{bat}^{ch}(t)) \cdot \gamma_{bat}(t) \quad (10)$$

که $\gamma_{bat}(t)$ هزینه بهره برداری و نگهداری باتری بر حسب (\$/kWh) است.

۲-۳- مدل منبع تولید پراکنده از نوع دیزل ژنراتور

ژنراتورهای تولید پراکنده (DG) به نیروگاه هایی اطلاق می شود که در آنها برق در محل مصرف یا نزدیک به آن تولید می شود. تولید پراکنده، نیروگاهی در مقیاس کوچک با حداکثر ظرفیت ۲۵ مگاوات است. تولید پراکنده به دلیل افت جریان و ولتاژ مشاهده شده در برخی مکان ها ایجاد شد. ژنراتورهای تولید پراکنده قابل اعتماد هستند و می توانند به طور مداوم با بارهای مختلف کار کنند و می توانند به سرعت در مواقعی که شبکه بالادست در دسترس نیست یا کمبود برق در شبکه وجود دارد، راه اندازی و به بهره برداری برسند. بنابراین، امروزه استفاده از منابع تولید پراکنده به طور قابل توجهی گسترش یافته است [۲۷ و ۲۸].

تابع هزینه دیزل ژنراتور از دو بخش متغیر و ثابت تشکیل شده است. هزینه های متغیر در واقع هزینه سوخت، نگهداری و نیز هزینه انتشار آلاینده است که به صورت زیر تعریف شده است:

$$C_{DG}^{var}(t) = (a P_{DG}^2(t) + b P_{DG}(t) + c) + (\mu + \gamma) P_{DG}(t) \quad (11)$$

و نیز هزینه های ثابت نیز شامل هزینه نگهداری ساعتی و راه اندازی دیزل ژنراتور است که به صورت زیر مدل شده اند:

$$C_{DG}^{fix}(t) = (\kappa_{O\&M}(t) + \kappa_{start_up}(t)) \quad (12)$$

۳- مدل‌سازی توابع هدف

در این مقاله، هدف ما به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی مربوط به تأمین بار در ریزشبه‌ها با حفظ محدودیت‌های توزیع بار است و از آنجایی که یک محیط رقابتی بین ریزشبه‌ها و شبکه بالادست شکل گرفته است، بنابراین هر یک به دنبال افزایش سودآوری خود خواهد بود. علاوه بر این، در حالت جزیره‌ای، هر ریزشبه باید بتواند حداکثر بار خود را تأمین کند؛ بنابراین، یافتن میزان تبادل توان بین ریزشبه‌ها و شبکه بالادست برای سودآوری کل سیستم حیاتی خواهد بود.

از این رو، با یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده مواجه خواهیم بود که دارای متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌های مختلفی است. در این مقاله، از یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی فراابتکاری برای حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی که دارای سه تابع هدف است، استفاده شده است که مبتنی بر روش ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات است. توابع هدف ارائه شده در این بخش عبارتند از: کمینه‌سازی هزینه‌های تولید برق توسط DGها، شارژ و دشارژ باتری، کمینه‌سازی توان خریداری شده از سایر MGها و شبکه بالادست به منظور افزایش تاب‌آوری هر MG در صورت بروز خطا در سایر MGها و شبکه توزیع بالادست و کاهش تلفات در MGهای موجود است.

۳-۱- تابع هدف مربوط به مدیریت واحدهای تولید توان

به‌منظور کاهش هزینه‌های تولید برق در ریزشبه‌ها که نیاز به تأمین بخشی از بار خود از طریق روشن کردن واحدهای تولید پراکنده (DG) در آنها وجود دارد، و همچنین تصمیم‌گیری در مورد زمان شارژ و دشارژ باتری‌ها بر اساس پروفیل بار شبکه و پروفیل تولید برق منابع انرژی تجدیدپذیر، تابع هدف (۲۰) برای کمینه‌سازی هزینه‌های تولید برق واحدهای تولید پراکنده و باتری‌ها معرفی شده است.

$$f_1 = \sum_{i=1}^{N_{MG}} \sum_{K=1}^{N_{DG}} \sum_{t=1}^T C_{Tot}^{DG}(t) + \sum_{i=1}^{N_{MG}} \sum_{K=1}^{N_{bat}} \sum_{t=1}^T C_{bat}(t) \quad (20)$$

تعداد باتری‌های N_{bat} ، N_{MG} تعداد MGها که در رابطه (۲۰)،

است. MGی استفاده شده در DGs تعداد N_{DG} ، N_{MG} موجود در تعداد دوره‌های مورد مطالعه است. T

۳-۲- تابع هدف توان مبادله‌ای میان MGها و شبکه بالادست

تابع هدف تبادل توان بین ریزشبه‌ها و شبکه بالادستی که در معادله (۲۱) معرفی شده است، به گونه‌ای است که ریزشبه‌ها می‌توانند در ساعاتی که هزینه تولید توان برای بارشان بالاست، از ریزشبه‌های همسایه و شبکه اصلی توان وارد کنند و به همین ترتیب در ساعاتی که مازاد تولید وجود دارد یا فروش انرژی سودشان را افزایش می‌دهد، توان صادر کنند. البته طبق محدودیت‌های تعریف شده، کل توان فروخته شده توسط ریزشبه‌ها باید برابر با کل توان خریداری شده در آنها باشد.

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N_{MG}} \sum_{t=1}^T \{ \psi_{utility}^{sell}(t) \times P_{utility_exh}^{sell}(t) - \psi_{utility}^{buy}(t) \times P_{utility_exh}^{buy}(t) \} + \{ \Psi_{MG}^{shed}(t) \times P_{MG}^{shed}(t) \} + \{ \Psi_{MG}^{buy}(t) \times P_{MG}^{buy}(t) - \Psi_{MG}^{sell}(t) \times P_{MG}^{sell}(t) \} \quad (21)$$

در معادله (۲۱)، $\psi_{utility}^{sell}$ قیمت فروش توان از شبکه به MGها در ساعت t است، $\psi_{utility}^{buy}$ قیمت خرید توان از MGها توسط شبکه بالادست است که سبب ایجاد سودآوری برای MG خواهد شد. $\Psi_{MG}^{buy}(t)$ قیمت خرید توان توسط MG از MG همسایه خواهد بود که هدف به حداقل رساندن آن است تا MG به سمت خودکفایی رفته و در صورت بروز خطا در سایر MGها تاب‌آوری آن افزایش داده شود. $\Psi_{MG}^{sell}(t)$ قیمت فروش توان توسط MG به سایر MGها خواهد بود که در تمامی موارد قیود فنی و عملیاتی شبکه باید برقرار باشند. $\Psi_{MG}^{shed}(t)$ قیمت قطع بار در داخل MGها در حالت عدم تأمین بار است.

۳-۳- تابع هدف تعیین تلفات شبکه توزیع

برای محاسبه تلفات سیستم از رابطه (۲۲) استفاده شده است:

$$f_3 = \sum_{i=1}^{N_{MG}} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{Bus}} (r_i \times \frac{P_i^2(t) + Q_i^2(t)}{V_i^2(t)} \times C_{Losses}(t)) \quad (22)$$

که P_i و Q_i عبارتند از:

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^{N_{Bus}} |V_j| (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad i=1, \dots, N_{Bus}$$

$$Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^{N_{Bus}} |V_j| (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad i=1, \dots, N_{Bus}$$

است با توجه به تعداد بالای متغیرها در این مقاله از روش بهینه‌سازی ترکیبی الگوریتم ژنتیک^۱ و روش بهینه‌سازی پرندگان^۲ استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک را می‌توان به طور ساده یک روش جستجوگر نامید که بر پایه‌ی مشاهدات خصوصیات فرزندان نسل‌ها متوالی و انتخاب فرزندان بر اساس اصل بقای بهترین پایه‌ریزی شده است. برخلاف روش ژنتیک و دیگر الگوریتم‌های تکاملی، روش PSO دارای یک انعطاف‌پذیری برای برقراری تعادل بین جواب‌های محلی و جواب‌های اصلی مسئله‌ی در شناسایی فضای جستجو دارد این ویژگی منحصربه‌فرد PSO مانع از همگرایی نابهنگام شده و توانایی جستجو را افزایش می‌دهد. مسئله بهینه‌سازی پیشنهاد داده شده را به دو قسمت تقسیم می‌کنیم. اول وضعیت روشن یا خاموش بودن DGs و شارژ یا دشارژ شدن باتری‌ها در هر MG توسط GA تعیین شده و در قسمت دوم میزان توان تولیدی دیزل‌ها، توان شارژ و دشارژ باتری‌ها و توان مبادله‌ای میان MGها و نیز توان مبادله‌ای با شبکه بالادست توسط PSO بهینه می‌گردد. در قسمت اول الگوریتم ژنتیک برای مسئله مدار قرار گرفتن واحدهای تولیدی بکار برده شده است در نقاط تعیین شده توسط ژنتیک الگوریتم PSO برای تعیین اندازه‌ی بهینه توان‌های مبادله‌ای و تولیدی به کار برده می‌شود زیرا که الگوریتم PSO دارای توانایی همگرایی سریع‌تری است.

ارتباط میان این دو روش را در شکل (۱) نشان داده شده است.

خلاصه مطالب گفته شده را به صورت زیر بیان می‌کنیم:

– **مرحله اول (مقداردهی اولیه):** شمارنده را در $t=0$ تنظیم می‌کنیم و n کروموزوم به صورت تصادفی تولید می‌کنیم. $[X_{j(0)}; j=1, \dots, n]$ که نشان‌دهنده‌ی جواب‌های کاندید شده اولیه برای وضعیت روشن یا خاموش بودن DGs و شارژ یا دشارژ شدن باتری‌ها در هر MG است.

– **مرحله دوم ارزیابی تابع هدف با PSO:** هر کروموزوم در جمعیت اولیه توسط تابع هدف J ارزیابی می‌شود. این کار با تعیین توان تولیدی دیزل‌ها، توان شارژ و دشارژ باتری‌ها و توان مبادله‌ای میان MGها و نیز توان مبادله‌ای با شبکه بالادست توسط PSO انجام می‌گیرد. برای هر ذره، $x_j^*(0) = x_j(0)$ تنظیم کرده و

$J_i^* = J_i$ قرار می‌دهیم (برای $j=1, \dots, n$) و بهترین مقدار تابع هدف را J_{BEST} قرار می‌دهیم. ذره‌ای متناسب با این مقدار تابع هدف را

در (۲۲) C_{Losses} نیز هزینه تلفات در ساعت t است، $|V_i|$ و $|V_j|$ به ترتیب ولتاژ باس فرستنده و گیرنده است که در آن n_{Bus} تعداد باس‌ها است، P_i و Q_i به ترتیب توان حقیقی و راکتیو در باس فرستنده هستند، G_{ij} و B_{ij} به ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی عنصر Y_{ij} در ماتریس ادمیتانس Y_{bus} هستند و δ_i و δ_j به ترتیب زاویه ولتاژ در باس‌های فرستنده و گیرنده هستند. از این رو تابع هدف نهایی مسئله مدیریت توان در MGها به صورت زیر خواهد بود:

$$f_T = f_1 + f_2 + f_3 \quad (23)$$

۳-۴- قیود پخش بار

در اینجا محدودیت‌های تابع هدف موجود که باید در معادلات پخش بار لحاظ گردد آورده شده است [۲۲]:

(۱) محدودیت ولتاژ باس‌ها

ولتاژ MGها باید در حضور انرژی‌های تجدیدپذیر و نیز DGs در محدوده مجاز قرار داشته باشد.

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, n_{Bus} \quad (24)$$

(۲) محدودیت توان شاخه‌ها

توان عبوری از خطوط موجود در MGها نباید از مقدار نامی آن افزایش یابد تا از حد حرارتی خط تجاوز نکند:

$$P_i^{line} \leq P_{\max}^{line} \quad i = 1, 2, \dots, n_{branch} \quad (25)$$

(۳) محدودیت‌های واحد دیزل ژنراتور

حداقل و حداکثر محدودیت‌های توان خروجی برای منبع انرژی توزیع‌شده‌ی باید به صورت زیر برقرار باشد.

$$P_{DG}^{\min}(t) \leq P_{DG}(t) \leq P_{DG}^{\max}(t) \quad (26)$$

$$Q_{DG}^{\min}(t) \leq Q_{DG}(t) \leq Q_{DG}^{\max}(t) \quad (27)$$

(۴) محدودیت افزایش توان در واحد دیزل ژنراتور

$$\Delta P_{DG}^{\min} \leq P_{DG}(t) - P_{DG}(t-1) \leq \Delta P_{DG}^{\max} \quad (28)$$

۴- روش حل مسئله بهینه‌سازی HGAPSO

متغیرهای بهینه‌سازی در مسئله برنامه‌ریزی بهینه برای MGهای مستقل شامل وضعیت روشن یا خاموش بودن DGs، شارژ یا دشارژ باتری‌ها، میزان توان تولیدی DGs، میزان توان شارژ و دشارژ باتری، میزان توان خرید و فروش میان MGها و شبکه بالادست

¹ Genetic Algorithm (GA)

² Particle swarm optimization (PSO)

- جهش: با یک احتمال که تعیین شده برخی از کروموزوم‌ها را تغییر می‌دهیم.
- انتخاب: کروموزوم والدین از جمعیت را مطابق با میزان شایستگی آن‌ها انتخاب می‌کنیم. از روش چرخ رولت برای انتخاب کروموزوم‌ها مطابق زیر استفاده شده است:

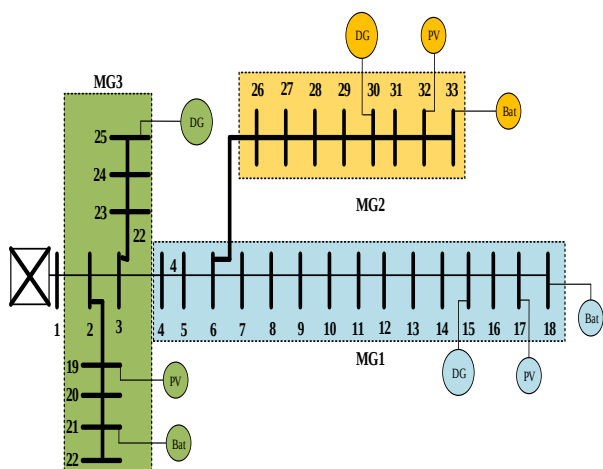
$$P_s(i) = \frac{j_i}{\sum_{j=1}^n j_j} \quad (31)$$

در رابطه فوق $P_s(i)$ احتمال انتخاب کروموزوم i است.

- **مرحله پنجم:** مرحله ۲ و ۳ را با جمعیت جدید برای کاندید تعیین اندازه‌ی بهینه توان‌های مبادله‌ای و تولیدی در MGها تکرار می‌کنیم.
- **مرحله ششم:** اگر تعداد تکرار به پایان رسید از برنامه خارج شده در غیر این صورت به مرحله ۴ می‌رویم.

۴- شبیه‌سازی و نتایج

در این قسمت به‌منظور نمایش دادن عملکرد روش پیشنهادی شبکه تست ۳۳ باس IEEE استفاده شده است. شکل (۲) شبکه ۳۳ باس را که شامل سه MG است را نمایش می‌دهد. نمودار مربوط به قیمت گره‌ای خریدوفروش از شبکه بالادست در شکل (۳) نمایش داده شده است. در شکل (۴) نیز قیمت خریدوفروش توان به MGها را نمایش می‌دهد. در جدول (۱) اطلاعات مربوط به DGs نمایش داده شده است. در جدول (۲) اطلاعات مربوط به باتری‌ها نمایش داده شده است.



شکل (۲): سیستم ۳۳-باس مورد مطالعه شامل MGs

(0) x^{**} می‌نامیم. مقدار اولیه وزن را نیز $\omega_0 = 0.98$ تنظیم می‌کنیم.

برای یافتن بهترین مقدار تابع هدف J_{BEST} جستجو را مطابق مراحل زیر انجام می‌دهیم:

- در هر تکرار وزن را تغییر می‌دهیم $\omega = \omega_0^t$
 - با استفاده از بهترین مقادیر ذرات محلی و سراسری بردار سرعت را با روش زیر تغییر می‌دهیم.
- $$v_{j,k}(t) = \omega(t)v_{j,k}(t-1) + c_1r_1(x_{j,k}^*(t-1) - x_{j,k}(t-1)) + c_2r_2(x_{best} - x_{j,k}(t-1)) \quad (29)$$

در رابطه بالا C_1 و C_2 ثابت‌های مثبت و r_1 و r_2 اعداد تصادفی بین $[0, 1]$ است که به صورت تصادفی تولید می‌شوند بردار سرعت را چک کرده تا در ناحیه‌ی معین شده خود قرار داشته باشد.

- (تغییر موقعیت ذرات): بر اساس بردار سرعت به دست آمده از مرحله قبل، هر ذره را مطابق با رابطه‌ی زیر تغییر می‌دهیم.

$$x_{j,k}(t) = x_{j,k}(t-1) + v_{j,k}(t) \quad (30)$$

اگر ذرات خارج از محدوده بود آن‌ها را مناسب با محدوده‌ی مشخص شده برای آن تنظیم می‌کنیم.

- هر ذره مطابق با تابع هدف ارزیابی می‌شود اگر $J_i < J_i^*$ بهترین مقدار ذره را متناسب با آن تابع هدف انتخاب می‌کنیم.
- $$x_j(t) = x_j^*(t) \text{ و } J_i < J_i^* \text{ به مرحله‌ی بعد می‌رویم.}$$

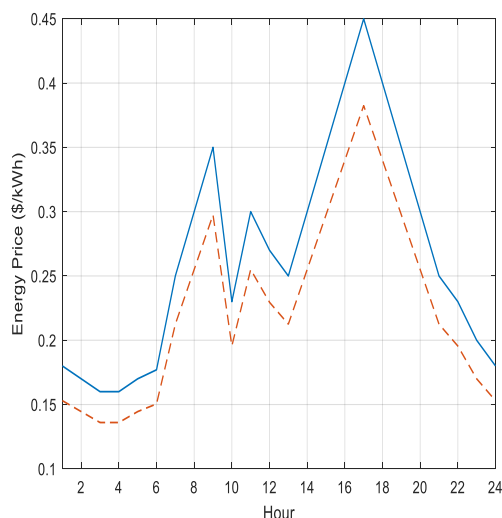
- حال برای پیدا کردن مینیمم مقدار تابع هدف جستجو را دنبال می‌کنیم اگر $J_{min} < J^{**}$ ، آنگاه مقدار بهترین ذره در کل فرآیند جستجو توسط PSO را برابر با $J^{**} = J_{min}$ و $x^{**} = x_{min}(t)$ تنظیم می‌کنیم و کروموزوم متناسب با J_{BEST} را به عنوان بهترین جواب نهایی بر می‌گزینیم.

- **مرحله سوم:** تکرار را افزایش می‌دهیم $t=t+1$

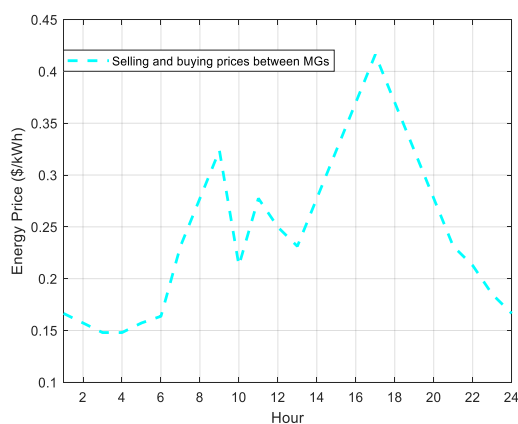
- **مرحله چهارم:** جمعیتی جدیدی را برای وضعیت روشن یا خاموش بودن DGs و شارژ یا دشارژ شدن باتری‌ها در هر MG با تکرار مراحل زیر تولید می‌کنیم:

- تقاطع: با به کار بردن تقاطع از والدین، فرزندان جدیدی را تولید می‌کنیم. تقاطع به کاررفته شده بر اساس تقاطع تک نقطه‌ای است.

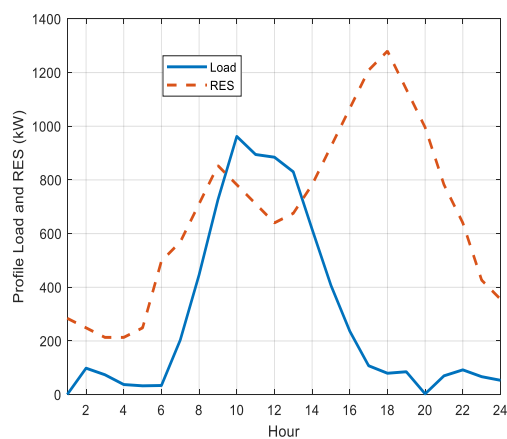
در شکل (۵) تقاضای هر MG به همراه مجموع میزان انرژی منابع تجدیدپذیر که برپایه نیروگاه خورشیدی است نمایش داده شده است.



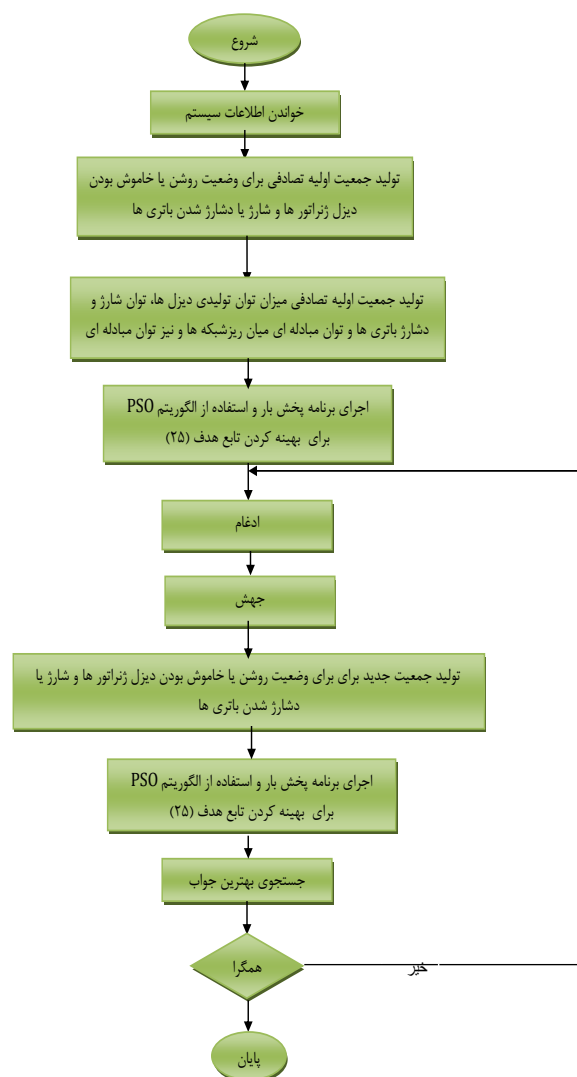
شکل (۳): نمودار مربوط به قیمت گره‌ای خریدوفروش از شبکه بالادست



شکل (۴): نمودار مربوط به قیمت خریدوفروش توان به MGها



(الف): پروفایل بار و منابع انرژی تجدیدپذیر در MG₁



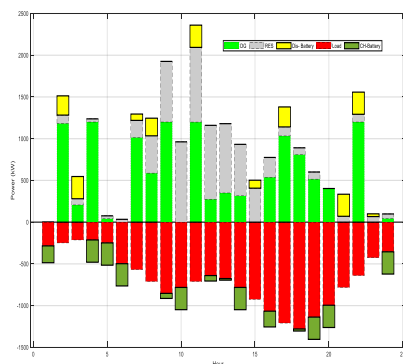
شکل (۱): ساختار الگوریتم پیشنهادی برای مدیریت توان در MGs

جدول (۱): اطلاعات مربوط به DGs

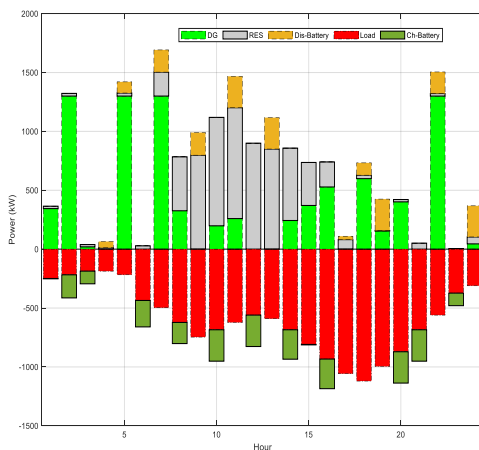
مقدار	متغیر
Mw ۱/۴	حداکثر توان نامی
\$ ۱۲۴۴/۴	هزینه راه اندازی
\$۵/۲۰	هزینه ثابت نگهداری
\$/kW/۰.۳	هزینه متغیر
\$/kW/۰.۲	هزینه آلاینده‌گی
۰/۰۰۰۲ - ۰/۰۰۰۱	a_i
۰/۱۳ - ۰/۱۵	b_i
۱ - ۰/۹	c_i
\$۱	قطع بار

سهام بار پیک در MG_1 از همه بیشتر است و دارای ۱۲۸۰ کیلووات، در MG_2 ۱۱۲۰ کیلووات و در MG_3 ۸۰۰ کیلووات است. میزان توان تولیدی حداکثر DGs در MG_1 ۱۲۰۰ کیلووات، در ریزشبه دوم ۱۳۰۰ کیلووات و در نهایت در MG_3 ۱۴۰۰ کیلووات است که نشان می‌دهد MG_3 دارای ظرفیت تولیدی بیشتری در مقایسه با دو ریزشبه دیگر است.

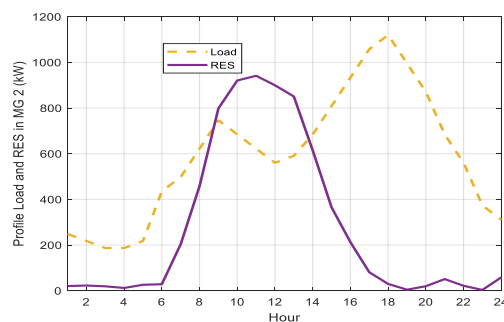
در این مقاله هدف مسئله بهینه‌سازی مطرح شده این است تا زمان در مدار قرارگرفتن DGs در ریزشبه‌ها را به همراه میزان توان تولیدی در آن‌ها تعیین کند همچنین وضعیت شارژ و دشارژ باتری‌ها نیز مشخص خواهد شد و متناسب با میزان توان مازاد در ریزشبه‌ها و یا کمبود آن برنامه بهینه‌سازی پیشنهادی براساس HGAPSO مشخص خواهد کرد که در هر ساعت چه میزان توان بین MGs و نیز شبکه بالادست جابه‌جا خواهد شد بدین‌وسیله سود ریزشبه‌ها از فروش توان و نیز از طریق برنامه‌ریزی مناسب برای روشن کردن DGs افزایش پیدا می‌کند و نیز در شرایط جزیره‌ای با تبادل توان و نیز مدیریت باتری‌ها قادر به حفظ بار بیشتری خواهند بود.



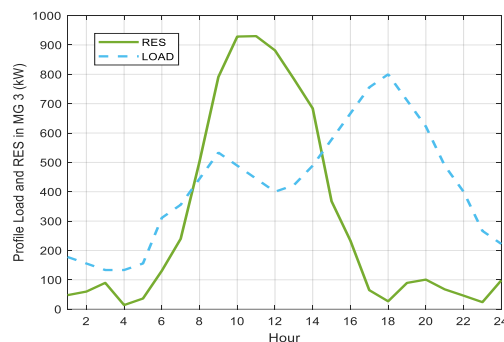
شکل (۶): تبادل توان در MG_1



شکل (۷): تبادل توان در MG_2



(ب): تقاضا و تولید منابع انرژی تجدیدپذیر در MG دوم



(ج): تقاضا و تولید منابع انرژی تجدیدپذیر در MG سوم

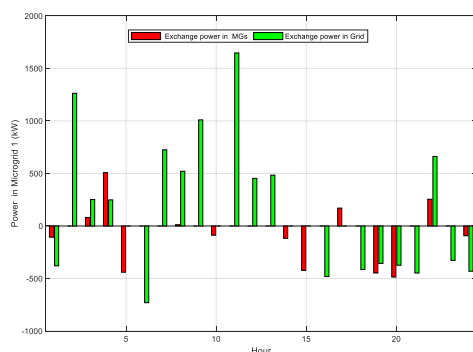
شکل (۵): نمودار مربوط به تولید و تقاضا در هر MG

جدول (۲): اطلاعات مربوط به باتری‌ها

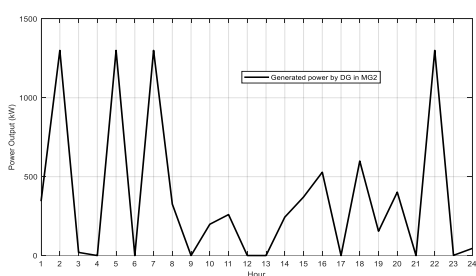
مقدار	متغیر
kWh ۵۳۵	ظرفیت انرژی نامی
kW ۲۶۸	حداکثر توان شارژ/دشارژ
٪۲۰	SOC_{min}
٪۷۵	SOC_{max}
٪۷۵	بازدهی شارژ
٪۷۶	بازدهی دشارژ
\$/ kW/۰.۴	هزینه نگهداری

جدول (۳): پارامترهای HGAPSO

مقدار	پارامترها
۲۰	جمعیت GA
۲۰	جمعیت PSO
۰/۹	نرخ جهش
۰/۸۵	نرخ تقاطع
۲	C_1
۱/۵	C_2
Rand (0,1)	r_1, r_2
۰/۹۸	ω_0
۵۰	تکرار

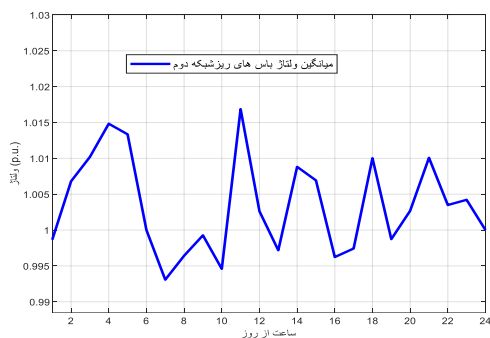


شکل (۱۱): تبادل توان در MG_1 با شبکه و MGs

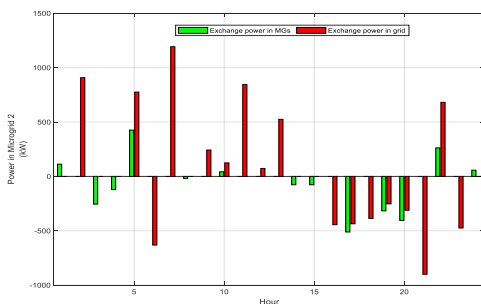


شکل (۱۲): توان تولیدی DG_2 در MG_2

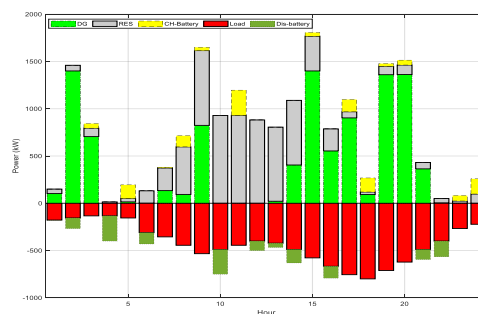
همچنین در شکل (۷) دیده می‌شود که MG_2 در زمان‌هایی که DG تولید نمی‌کرد یا توان کمتری به شبکه تزریق می‌کرد، برق دریافت می‌کرد؛ زیرا به دلیل هزینه بالای تولید در مقایسه با خرید از MGها، مالک آن واحد را روشن نمی‌کرد. با نگاهی به شکل (۱۴) می‌توان مشاهده کرد،



شکل (۱۳): نمودار میانگین ولتاژ باس‌ها در MG_2

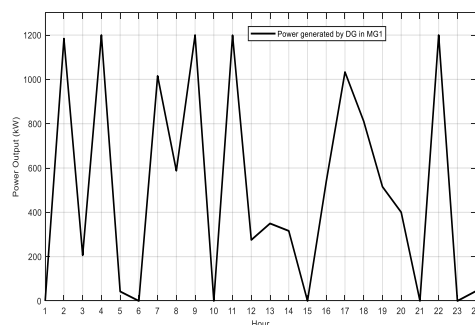


شکل (۱۴): تبادل توان در MG_2 با شبکه و MGs

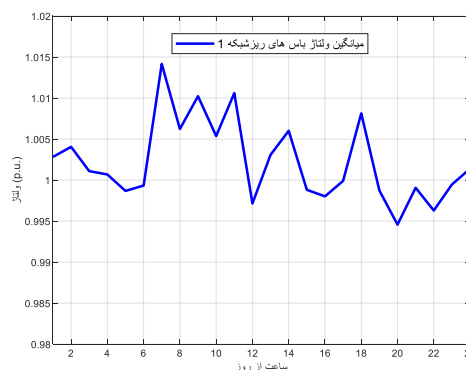


شکل (۸): تبادل توان در MG_3

در شکل (۶) دیده می‌شود که بار MG_1 در مقایسه با دو MG دیگر بسیار بیشتر است که تقریباً ۴۰ درصد بار کل شبکه است. واحد DG بیشترین تأثیر را در تأمین انرژی در آن دارد. واحدهای تجدیدپذیر نیز نقش بسزایی در تأمین بار MG_1 از ساعت ۹ صبح تا ۴ بعد از ظهر خواهند داشت. در ساعت مورد نیاز که بار MG_1 بیشترین مقدار را دارد، مانند ساعت ۵ بعد از ظهر، باتری در این زمان دشارژ می‌شود تا هزینه خرید کاهش یابد و همچنین بار تأمین شود. باتری همچنین در ساعاتی که تولید مازاد وجود دارد یا هزینه انرژی پایین است، شارژ می‌شود. در MG_1 ، در بیشتر ساعات، تولید بیشتر از مصرف بوده است که نشان می‌دهد انرژی به سایر MGها و شبکه بالادستی فروخته می‌شود تا هزینه‌های آن کاهش یابد و سودآوری لازم را داشته باشد.



شکل (۹): توان تولیدی DG_1 در MG_1



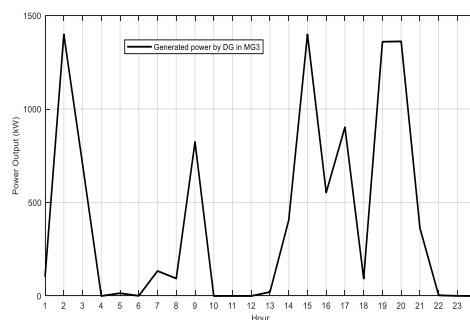
شکل (۱۰): میانگین ولتاژ باس‌ها در MG_1

طبق تابع هدف معرفی شده، باید هزینه‌های سوخت، تعمیرات و نگهداری را بپردازد. بنابراین، مشارکت در تولید و توزیع توان متناسب با ساعاتی که بر اساس تقاضای شبکه بالادست و همچنین ریزشبه‌های مجاور در مدار است، سود آن را افزایش خواهد داد. از شکل‌های (۹)، (۱۲) و (۱۵) نیز مشخص است که ژنراتور MG_2 در مقایسه با دو MG s دیگر کمتر توان تولید کرده است علت آن بالابودن هزینه‌های بهره‌برداری آن است.

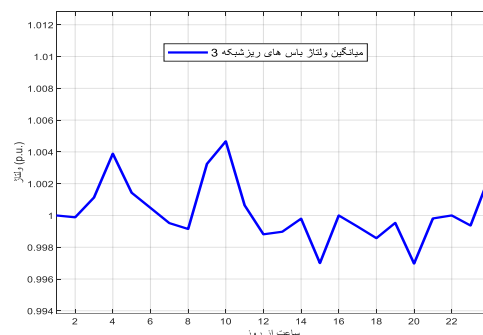
نمودار داده شده در شکل (۱۱) نیز مربوط به نحوه تعامل توان بین ریزشبه‌ها و نیز شبکه بالادست است که در ساعاتی ریزشبه توان خریداری و نیز در زمانی دیگر توان به همسایه‌های خود و شبکه بالادست فروخته است. با نگاهی به نمودار (۱۱) دیده می‌شود که MG_1 مقدار $7266/4$ کیلووات‌ساعت به شبکه بالادست و نیز $1026/8$ کیلووات‌ساعت به ریزشبه‌های دیگر فروخته است. همچنین این ریزشبه اقدام به خرید $3940/6$ کیلووات‌ساعت توان از شبکه بالادست و $220/1$ کیلووات‌ساعت توان از ریزشبه‌های همسایه کرده است.

در شکل (۱۴)، MG_2 در طول دوره مورد مطالعه $3839/7$ کیلووات‌ساعت توان از شبکه بالادست وارد کرده است. همچنین $1783/6$ کیلووات‌ساعت از دو MG s دیگر خریداری نموده است. این ریزشبه به طریق مشابه جهت افزایش سود خود به شبکه بالادست نیز مقدار $5365/5$ کیلووات‌ساعت و به MG های دیگر $900/49$ کیلووات‌ساعت توان فروخته است. در انتها، MG_3 بر اساس شکل (۱۷) میزان $1210/8$ کیلووات‌ساعت توان از شبکه بالادست و نیز $909/31$ کیلووات‌ساعت توان از ریزشبه‌های همسایه وارد کرده است، همچنین مقدار $2965/7$ کیلووات‌ساعت توان به دو MG دیگر و در نهایت $5742/6$ کیلووات‌ساعت توان به شبکه بالادست فروخته است.

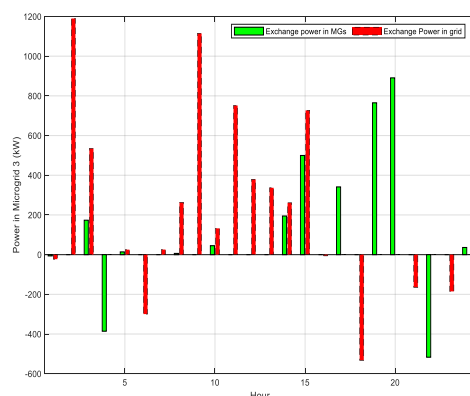
با نگاهی به وضعیت شارژ و دشارژ باتری در MG_2 در شکل‌های (۷) و (۱۴)، دیده می‌شود که باتری در ساعاتی همچون ۱۵ و ۱۶ به شبکه توان تزریق نکرده است و MG_2 ترجیح داده است توان را از شبکه بالادست و یا ریزشبه‌های مجاور دریافت نماید زیرا که مالک MG_2 برای فرآیند شارژ/دشارژ باتری باید $0/3$ دلار را هزینه کند و نیز باتوجه به بازده باتری این هزینه همچنین برای آن بیشتر تمام خواهد شد؛ اما هزینه لازم برای خرید توان از شبکه بالادست و ریزشبه‌های همسایه از این مقدار در برخی ساعات بسیار پایین‌تر خواهد بود البته در حالت جزیره‌ای ریزشبه



شکل (۱۵): توان تولیدی DG_3 در MG_3

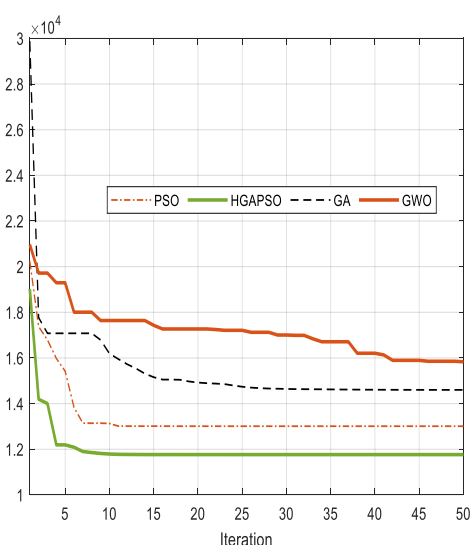


شکل (۱۶): نمودار میانگین ولتاژ باس‌ها در MG_3



شکل (۱۷): تبادل توان در MG_3 با شبکه و MG s

که ریزشبه MG_2 در ساعات ۱۶ تا ۲۱ از شبکه بالادست و همچنین از دو ریزشبه دیگر برق خریداری کرده است. در شکل (۷)، در برخی ساعات مانند ۲، ۷، ۱۱ و ۲۲ مازاد تولید دارد که آن را به شبکه یا سایر ریزشبه‌ها می‌فروشد. در شکل (۱۷) نیز مشاهده می‌شود که ریزشبه MG_3 عمدتاً فروشنده برق به سایر ریزشبه‌ها و شبکه بالادست است و در ساعات ۴، ۶، ۱۸، ۲۱ تا ۲۳ برق زیادی از سایر ریزشبه‌ها و شبکه بالادست خریداری کرده است. این ریزشبه توانسته است با خرید در ساعاتی که هزینه کمتری دارد، سود خود را افزایش دهد و در ساعات خاصی به طور مشابه به ریزشبه‌ها و شبکه بالادست برق فروخته است. لازم به ذکر است که وقتی ریزشبه ژنراتور خود را روشن می‌کند،



شکل (۱۸): مقدار تابع هدف پیشنهادی با استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی

جدول (۶): مقایسه میان زمان و تعداد تکرارها

ریزش شبکه	تعداد تکرار	زمان (ثانیه)
HGAPSO	۱۰	۱۴۳
GA	۳۰	۱۵۷
PSO	۱۴	۱۲۵
GWO [۱۴]	۴۳	۱۳۵

در جدول (۵) نیز نتایج مربوط به تلفات آورده شده است که نشان از بالابودن تلفات در MG_1 یک به علت بار سنگین در آن است. کل تلفات MG_1 ۳۷۲/۰۲ کیلووات ساعت است و هزینه این تلفات ۹۴/۸۶ دلار شده است.

مقدار تابع هدف روش پیشنهادی در شکل (۱۸) آورده شده است که با روش‌های مرسوم PSO، GA و GWO^1 برپایه داده‌های [۱۴] مقایسه شده است که دیده می‌شود روش پیشنهادی دارای سرعت بالایی در همگرایی در مقایسه با دو روش دیگر داشته است و در تکرار ۱۰ به مقدار نهایی خود رسیده است در حالی که ژنتیک در تکرار ۳۰، الگوریتم ازدحام ذرات در تکرار

مجبور خواهد شد اقدام به دشارژ باتری در صورت بالابودن جریمه قطع بار کند.

در جدول (۴) نیز مقایسه‌ای از میزان خرید و فروش توان در بازه ۲۴ ساعته بین سه ریزش شبکه را به دلار برای هر سه MG نمایش می‌دهد که نشان می‌دهد ریزش شبکه‌های اول و دوم بیشتر واردکننده توان بوده‌اند و در نتیجه در بازه ۲۴ ساعته سود نهایی این دو منفی شده است ولی MG_3 از فروش انرژی به ریزش شبکه‌های همسایه کسب درآمد نیز کرده‌اند.

MG_1 حدوداً ۱۶/۹۴ درصد از سود را به خود اختصاص داده است و MG_3 ۷۰/۴۰ درصد را داشته است و MG_2 ۱۲/۵۷ درصد از سهم بازار در فروش توان را داشته است. همچنین MG_1 از مقدار توان خریداری شده نزدیک به ۴۴/۹۶ درصد را به خود اختصاص داده است. MG_2 مقدار ۳۶/۴۵ درصد و MG_3 ۱۸/۵۹ درصد را شامل شده است؛ که نشان می‌دهد MG_3 در تأمین بار خودکفایی بیشتری را دارا است.

در شکل‌های (۱۰)، (۱۳) و (۱۶) میانگین ولتاژ باس‌ها در داخل هر MG در بازه طول دوره مورد مطالعه نمایش شده است که نشان می‌دهد از رنج مجاز شبکه تجاوز نکرده است.

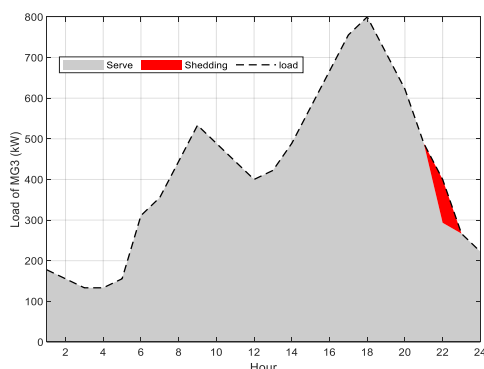
جدول (۴): سود و زیان مبادله توان بین MG ها در بازه ۲۴ ساعت

سود/زیان تبادل توان (\$)	هزینه (\$)	درآمد (\$)	MG
-۳۵۴/۳	۵۷۰/۰۶	۲۱۵/۷۷	۱
-۳۷۵/۳	۵۳۵/۳۸	۱۶۸/۰۸	۲
۷۲۹/۶	۱۶۸/۱۷	۸۹۷/۷۷	۳

جدول (۵): اطلاعات مربوط به تلفات MG ها

هزینه تلفات (\$)	تلفات (kWh)	MG
۹۴/۸۶	۳۷۲/۰۲	۱
۶۶/۷۳	۲۶۸/۸	۲
۴۷/۸	۱۹۲	۳

¹Grey wolf optimizer (GWO)



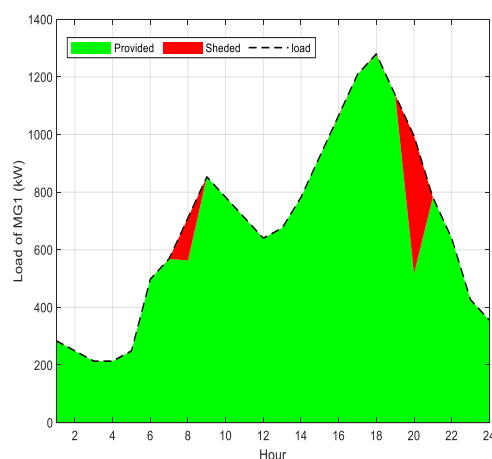
شکل (۲۱): پروفایل تأمین بار در MG₃

از شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) دیده می‌شود که در MG₁ ۶۳۵/۶۸ کیلووات بار را قطع کرده است، ۲۰۳۰/۸۷ کیلووات را به ریزشکله‌های دیگر فروخته است و ۴۲۴۶/۵۷ کیلووات توان را خریداری کرده است. در MG₂ میزان قطع بار به ۸۱۹/۴۶ کیلووات رسیده است و در مقابل ۱۰۴۴/۹۲ کیلووات توان را در ساعاتی به ریزشکله‌های همسایه صادر کرده است و ۳۴۷۲/۶۷ کیلووات توان را خریداری کرده است. در نهایت در MG₃ میزان ۱۰۶/۳۷ کیلووات بار را در ساعت ۲۲ قطع کرده است ولی این ریزشکله به علت هزینه پایین DG و نیز بار کم آن در طول ۲۴ ساعت اقدام به فروش ۵۵۴۱/۶۱ کیلووات توان به ریزشکله‌های مجاور کرده است و در برخی ساعات نیز در بازه‌ی مورد مطالعه ۹۰۱/۷۳ کیلووات توان خریداری کرده است که نشان می‌دهد ریزشکله سوم بیشترین خودکفایی را در تأمین بار خود داشته است.

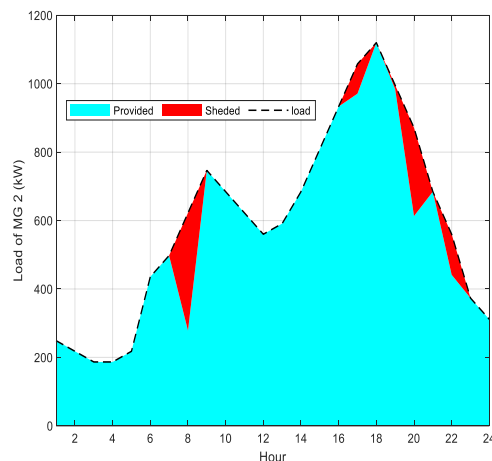
۵- نتیجه‌گیری

سیستم ترکیبی خورشیدی - باتری - دیزل ژنراتور، به عنوان یک راه‌حل مؤثر، برای مدیریت تضمین تأمین و صرفه‌جویی انرژی به‌ویژه در شرایط بحرانی سیستم برق‌رسانی بسیار حیاتی است. از این رو در این مقاله سعی شد تا با استفاده از یک روش بهینه‌سازی ترکیبی و معرفی یک تابع بهینه‌سازی جدید توزیع بهینه توان را در سه MG بررسی کنیم. یک مسئله توزیع بار اقتصادی و نیز یک مسئله خرید و فروش انرژی بین MGها مدل‌سازی شد که متغیرهای مسئله، برنامه‌ریزی در مدار قرارگرفتن دیزل‌ها و نیز شارژ / دشارژ باتری‌ها و فروش انرژی در یک بازار رقابتی و نیز خودکفایی MGها با رعایت قیود فنی و زیست‌محیطی بود. نتایج نشان داد که MG₁ از مقدار توان خریداری شده نزدیک به ۴۴/۹۶ درصد را به خود اختصاص داد و MG₂ ۳۶/۴۵ درصد و MG سوم

۱۴ و الگوریتم گرگ خاکستری در تکرار ۴۳ همگرا شده است. به‌علاوه روش پیشنهادی دارای کمترین مقدار تابع هدف است حال آنکه الگوریتم ازدحام ذرات اگرچه زودتر از ژنتیک همگرا شده است؛ اما در بهینه محلی افتاده است. الگوریتم GWO¹ در مقایسه با سه روش دیگر عملکرد مناسبی نداشته است. خلاصه‌ای از فرآیند همگرایی و زمان اجرا در جدول (۶) آورده شده است. در شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) فرض شده است که شبکه بالادست دچار مشکل شده و ریزشکله‌ها جزیره شده‌اند، در این حالت هر ریزشکله سعی می‌کند بار خود را تأمین کند و نیز در صورت نبود توان کافی و یا بالابودن هزینه روشن‌شدن DGها اقدام به قطع بار خواهد کرد. هزینه قطع بار ۱ Kw/\$ در نظر گرفته شده است، با توجه به ارزان‌بودن توان تولیدی در منابع تجدیدپذیر و نیز توان دشارژ باتری‌ها در این شرایط اولویت توان با این منابع خواهد بود.



شکل (۱۹): پروفایل تأمین بار در MG₁



شکل (۲۰): پروفایل تأمین بار در MG₂

- [7] F. Esmaeilion, A. Ahmadi and R. Dashti, "Exergy-economic-environment optimization of the waste-to-energy power plant using Multi-Objective Particle-Swarm Optimization (MOPSO)," *Scientia Iranica*, vol. no. 28, pp. 2733-2750, 2021. doi: 10.24200/sci.2021.55633.4323
- [8] Y. He, Z. Li, J. Zhang, G. Shi, W. Cao, "Day-ahead and intraday multi-time scale microgrid scheduling based on light robustness and MPC," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 144, 2023. doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108546.
- [9] J. Zhang et al., "Multi-Time Scale Economic Scheduling Method Based on Day-Ahead Robust Optimization and Intraday MPC Rolling Optimization for Microgrid," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 140315-140324, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3118716.
- [10] X. Zhang and S. Li, "Optimal Scheduling of Microgrid Based on Improved Particle Swarm Optimization," 2024 International Conference on Artificial Intelligence and Power Systems (AIPS), Chengdu, China, pp. 466-469, 2024. doi: 10.1109/AIPS64124.2024.00102.
- [11] X. Wu, Y. Shan, K. Fan, "A Modified Particle Swarm Algorithm for the Multi-target optimization of Wind/Photovoltaic/Diesel/Storage Microgrids", *Sustainability*, vol. 16, pp. 415-423, 2024. doi.org/10.3390/su16031065.
- [12] S. Wu, Q. Li, J. Liu, Q. Zhou, C. Wang, "Bi-level optimal configuration for combined cooling, heating, and power multi-microgrids based on energy storage station service," *Power Syst. Technol.*, vol. 45, pp. 3822-3829, 2021. doi.org/10.1016/j.gloei.2025.09.001.
- [13] H. Borhanazad, S. Mekhilef, G. Ganapathy, V. Modiri-Delshad, M. Mirtaheri, "Optimization of micro-grid system using MOPSO," *Renew. Energy*, vol. 71, no. 12, pp. 295-306, 2014. doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.006.
- [14] D. C. Huynh, H. M. Pham, L. D. Ho, H. V. Nguyen, M. W. Dunnigan, and C. Barbalata, "Optimal Configuration of a DC Microgrid Using a Grey Wolf Optimization Algorithm," 2024 7th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), Ho Chi Minh City, Vietnam, pp. 401-406, 2024. doi: 10.1109/GTSD62346.2024.10674805
- [15] M. H. Imani, M. J. Ghadi, S. Ghavidel, L. Li, "Demand Response Modeling in Microgrid Operation: A Review and Application for Incentive-Based and Time-Based Programs," *Renew. Sustain—Energy Rev.*, vol. 94, pp. 486-499, 2018. doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.017.
- [16] M. Rahmani-Andebili, "Grid-Connected and Off-Grid Operation of a Microgrid Applying Fuzzy Mixed-Integer Linear Programming," 2022 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), Champaign, IL, USA, 2022, pp. 1-5, 2022. doi: 10.1109/PECI54197.2022.9744047.
- [17] X. Ma, X. Fang, L. Lv, K. Ling, Y. Shi, "Optimal Allocation of Wind and Solar Storage Capacity in Smart Microgrid Based on Particle Swarm Optimization Algorithm," In *Proceedings of the 2024 International Conference on Smart City and Information System*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 93-98, 2024. doi.org/10.1145/3685088.3685107
- [18] M. Agoundedemba, C. K. Kim, H.-G. Kim, R. Nyenge, N. Musila, "Modelling and optimization of microgrid with combined genetic algorithm and model predictive control of PV/Wind/FC/battery energy systems," *Energy Rep.*, vol. 13, pp. 238-255, 2025. doi.org/10.1016/j.egyr.2024.12.008.
- [19] Ge. Riletu, Z. Lihui, Ch. Jianxue, "A two-level planning model for energy optimal dispatching of an active distribution network considering a microgrid group cooperative game," *Renewable Energy Resources*, no. 38, pp. 205-211, 2020. doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106959.

۱۸/۵۹ درصد را شامل گردید؛ که بیان گر این موضوع بود که MG_3 در تأمین بار خودکفایی بیشتری را دارا بود و در عین حال ولتاژ باس‌های MG نیز در رنج استاندارد قرار گرفت.

لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده توسط HGAPSO در تکرارهای مختلف متفاوت است و جواب به دست آمده الزاماً بهینه سراسری نخواهد بود. همچنین افزایش تعداد MGs به علت بالا رفتن مجهولات می‌تواند پیدا کردن جواب بهینه را سخت نماید. یکی دیگر از محدودیت‌های روش پیشنهادی تنظیم پارامترهای الگوریتم است که عدم تنظیم مناسب سبب دور شدن از نقطه بهینه خواهد شد و در نهایت حضور بارهای حساس می‌تواند شرایط حل مسئله را تغییر دهد.

برای توسعه کار در آینده می‌توان موارد زیر را در بهینه‌سازی مدیریت توان در MGs پیاده‌سازی نمود:

- با توجه به متغیر بودن بار می‌توان توابع هدف را به صورت فازی مدل‌سازی نمود و تابع هدف فازی را بهینه‌سازی کرد.
- در این مقاله ناحیه ریزشکها مشخص شده بود که می‌توان پیدا کردن این نواحی نیز جهت افزایش خودکفایی و مقاوم‌بودن آن‌ها در صورت بروز خطا مدل‌سازی شود.
- در نظر گرفتن عدم قطعیت در تولید منابع انرژی تجدیدپذیر

۶- مراجع

- [1] L. Ge, J. Liu, T. Du, C. Zhao, R. Pian, and W. Liu, "Size Optimization of Wind-PV-Diesel-Hydrogen-Ice System for Island Microgrid," 2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Denver, CO, USA, pp. 1-5, 2022. doi: 10.1109/PESGM48719.2022.9916871
- [2] A. M. Shaheen and R. A. El-Sehiemy, "A Multiobjective Salp Optimization Algorithm for Techno-Economic-Based Performance Enhancement of Distribution Networks," in *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 1458-1466, 2021. doi: 10.1109/JSYST.2020.2964743.
- [3] H. Yin, Y. Wang, G. Wu, Y. Liu, Y. Chen, J. Liu, "Distributed optimal operation of PV-storage-load micro-grid considering renewable and load uncertainties," *J. Energy Storage*, 2024. doi.org/10.1016/j.est.2024.111168.
- [4] J. Lu, W. Zheng, Z. Yu, Z. Xu, H. Jiang, and M. Zeng, "Optimizing Grid-Connected Multi-Microgrid Systems With Shared Energy Storage for Enhanced Local Energy Consumption," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 13663-13677, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3351855.
- [5] E. Rhodes, W. A. Scott, M. Jaccard, "Designing flexible regulations to mitigate climate change: A cross-country comparative policy analysis," *Energy Policy*, vol. 156, no. 112419, 2021. doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112419.
- [6] H. Qari, S. Khosrogorji, and H. Torkaman, "Optimal sizing of hybrid WT/PV/diesel generator/battery system using MINLP method for a region in Kerman," *Scientia Iranica*, vol. 27, no. 6, pp. 3066-3074, 2020. doi.10.24200/sci.2019.50176.1555.

- [27] K.M.R. Pothireddy, S. Vuddanti, "Novel demand-response-based stochastic optimization in a grid-connected microgrid considering outlier detection and imputation," *IJAE*, no. 46, 2024. doi.org/10.1080/01430750.2024.2442602.
- [28] A. Silani and M. J. Yazdanpanah, "Distributed Optimal Microgrid Energy Management With Considering Stochastic Load," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 729-737, 2019. doi: 10.1109/TSTE.2018.2846279.
- [29] S. Samadi Gharehveran, K. Shirini, M. Sarhangzadeh, and S. Gholinavaz, "A Review of Game Theory-based Approaches for Demand Side Management in Smart Energy Grids," *Power, Control, and Data Processing Systems*, 3 1 (2026): e730417, doi: 10.30511/pcdp.2025.2072667.1045.
- [30] S. Samadi Gharehveran, K. Shirini, S. Cheshmeh Khavar, A. Abdollahi, "Optimizing day-ahead power scheduling: A novel MIQCP approach for enhanced SCUC with renewable integration," *j.prime*, vol. 12, 2025, doi.org/10.1016/j.prime.2025.101022.
- [31] N. Saeedi, D. Baharvand, K. Shirini, et al. Prediction of electrical energy consumption using principal component analysis and independent component analysis. *J Supercomput*, vol. 81, 2025. doi.org/10.1007/s11227-025-07505-2.
- [32] K. Jin, H. Banizaman, S.S. Gharehveran, et al. Robust power management capabilities of integrated energy systems in the smart distribution network, including linear and non-linear loads. *Sci Rep*, vol. 15, 6615, 2025. doi.org/10.1038/s41598-025-89817-0.
- [33] S. Samadi Gharehveran, "A Review of Energy Management of Multi-microgrid Power Systems in the Presence of Uncertainty of Distributed Generation Resources," *Power, Control, and Data Processing Systems*, no.2, vol. 4, pp.46-58, 2025. doi: 10.30511/pcdp. 2025.2072671.1046.
- [34] M. Abedini, H. Moazami, "Reconfiguration of electricity distribution networks to increase resilience and reliability using fuzzy objective functions and game theory," *Passive Defense*, vol.15, no. 3, 27-38. 2024. 20.1001.1.20086849.1403.15.3.3.4.
- [20] Y.A. Sha'aban, M.S. Shahriar, S.M. Abdullah, M.A. Ramli, "Sizing of Hybrid PV/Battery/Wind/Diesel Microgrid System Using an Improved Decomposition Multi-Objective Evolutionary Algorithm Considering Uncertainties and Battery Degradation" *Sustainability*, no.15, 2023. doi.org/10.3390/su151411073.
- [21] W. Tang and H. Qin, "Multi-Microgrid Optimal Scheduling Considering Electric Vehicle Participation," 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Changsha, China, pp. 2026-2031, 2019. doi: 10.1109/EI247390.2019.9061789.
- [22] M. Abedini, "Power management in hybrid power generation systems based on solar-wind and diesel generators in distribution networks using fuzzy functions. *Fuzzy Systems and its Applications*, vol. 7, no.1, 53-77, 2024. 10.22034/jfsa.2024.456723.1205.
- [23] F. Akram, F. Asghar, M.A. Majeed, et al. "Techno-economic optimization analysis of stand-alone renewable energy system for remote areas", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 38, 2020. doi.org/10.1016/j.seta.2020.100673.
- [24] Y. Li, M. Han, Z. Yang, and G. Li, "Coordinating Flexible Demand Response and Renewable Uncertainties for Scheduling of Community Integrated Energy Systems With an Electric Vehicle Charging Station: A Bi-Level Approach," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 4, pp. 2321-2331, 2021. doi: 10.1109/TSTE.2021.3090463.
- [25] T. Lan, K. Jermisittiparsert, T.S. Alrashood, et al. "An advanced machine learning based energy management of renewable microgrids considering hybrid electric vehicles' charging demand", *Energies*, vol.14, no.3, pp. 569-576, 2021. doi.org/10.3390/en14030569.
- [26] X. Li, B. Sun, W. Ju, H. Zhang and R. Wang, "Capacity Configuration Model of Biogas-based Integrated Energy System," 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Wuhan, China, pp. 1-6, 2021. doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510359.