

**Optimal Design of a Hybrid Solar–Wind–Battery System Using the Grasshopper Optimization Algorithm for Minimization of the Loss of Power Supply Probability****Ronak Jahanshahi Bavandpour<sup>1</sup>, M.Sc, Hamid Ghadiri<sup>2</sup>, Assistant Professor, Hamed Khodadadi<sup>3</sup>, Assistant Professor**<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering- Darolfonoon University, Qazvin, Iran<sup>2</sup> Faculty of Electrical, Biomedical and Mechatronics Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran<sup>3</sup>Department of Electrical Engineering- Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran  
lili66630@gmail.com, h.ghadiri@qiau.ac.ir, khodadadi@iaukhsh.ac.ir**Abstract**

Renewable energy has been developed in recent years due to the limited sources of fossil fuels, their possibility of depletion, and related environmental issues. The main challenge of these types of systems is reaching the optimum size in order to have an affordable system based on storing solar and wind energy. In this paper, optimization of a solar-wind hybrid system is presented with a saving battery system for supplying a specific hourly load annually to minimize annual system expenses and the probability of loss of power supply probability (LPSP). Annual expenses of the system include initial investment, maintenance, and replacement costs. The purpose of optimization is to determine the numbers of solar panels, wind turbines, batteries, the height of the wind tower, and the angle of the solar panel toward solar radiation. For this issue, a new method named grasshopper optimization algorithm (GOA) is employed. Also, the effects of changes in inverter efficiency, load demand, and maximum probability of LPSP on system designing are evaluated. Simulation results show that the efficiency reduction, load increase, and increasing the load and maximum reliability in the system in the form of reducing of LPSP lead to an increase in annual energy costs of systems. Furthermore, the results indicate the superiority of the GOA method toward particle swarm optimization (PSO) in reaching better target function and less cost.

**Keywords:** grasshopper optimization algorithm, optimization, loss of power supply probability, particle swarm optimization, solar-wind hybrid system**Received:** 1 August 2021**Revised:** 8 October 2021**Accepted:** 28 October 2021**Corresponding Author:** Dr. Hamid Ghadiri**Citation:** R. Jahanshahi Bavandpour, H. Ghadiri, H. Khodadadi, "Optimal design of a hybrid solar–wind–battery system using the grasshopper optimization algorithm for minimization of the loss of power supply probability", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 13, no. 51, pp. 137-154, December 2022 (in Persian).

## بهینه‌سازی سیستم هیبرید بادی - خورشیدی - باتری جدا از شبکه با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ

روناک جهانشاهی باوندپور<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد، حمید قدیری<sup>۲</sup>، استادیار، حامد خدادادی<sup>۳</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - موسسه آموزش عالی دارالفنون، قزوین، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکاترونیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان، ایران

lili66630@gmail.com, h.ghadiri@qiau.ac.ir, khodadadi@iaukhsh.ac.ir

**چکیده:** انرژی‌های تجدیدپذیر در سال‌های اخیر به دلیل محدودیت و احتمال اتمام منابع سوخت‌های فسیلی و مسائل زیست محیطی مرتبط به شدت توسعه یافته است. مهمترین چالش در این نوع سیستم‌ها، دستیابی به اندازه بهینه برای داشتن یک سیستم مقرون به صرفه بر اساس ذخیره انرژی خورشیدی و بادی است. در این مقاله بهینه‌سازی سیستم هیبرید بادی-خورشیدی با سیستم ذخیره باتری برای تامین یک بار مشخص ساعتی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های سالیانه سیستم و احتمال تلفات عرضه توان مورد توجه قرار گرفته است. هزینه‌های سالیانه سیستم شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه نگهداری و هزینه تعویض تجهیزات است. هدف بهینه‌سازی، تعیین بهینه تعداد پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، تعداد باتری‌ها، ارتفاع برج بادی و زاویه پنل خورشیدی نسبت به تابش خورشید است. به این منظور الگوریتم جدید بهینه‌سازی ملخ مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین در این مطالعه، اثر تغییرات راندمان اینورتر، تغییرات تقاضای بار و اثر تغییرات ماکزیمم احتمال تلفات عرضه توان بر طراحی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کاهش راندمان، افزایش بار و حداکثر قابلیت اطمینان در سیستم در قالب کاهش احتمال تلفات عرضه توان موجب افزایش هزینه‌های سالیانه انرژی سیستم می‌گردد. به علاوه، نتایج حاصله نشان دهنده برتری روش بهینه‌سازی ملخ نسبت به روش اجتماع ذرات در دستیابی به تابع هدف بهتر و هزینه کمتر است.

**کلمات کلیدی:** احتمال عدم تامین بار، باتری، بهینه‌سازی، توربین بادی، الگوریتم بهینه‌سازی ملخ

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۵/۱۰

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۷/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حمید قدیری

نشانی نویسنده‌ی مسئول: قزوین - دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین - دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکاترونیک

## ۱- مقدمه

انرژی از ضروری‌های زندگی هر فرد در هر مکان و زمان است. این مطلب، به‌ویژه در قرن جدید صادق‌تر است، قرن‌هاست که مردم دنبال سطح بالایی از کیفیت زندگی می‌گردند. در میان انواع مختلف انرژی، انرژی الکتریکی یکی از مهم‌ترین انرژی‌هایی است که مردم هر روز به آن نیاز دارند. تمرکز مولدهای الکتریکی از زمانی امکان‌پذیر شد که با رشد علم، امکان تغییر ولتاژ الکتریکی متناوب و در نتیجه افزایش آن در طول خطوط انتقال انرژی و کاهش آن در انتهای خطوط به‌وسیله ترانسفورماتورها فراهم شد [۱]. امروزه همراه با پیشرفت‌های گوناگون صنعت برق به‌خصوص در کشورهای صنعتی، صحبت از تحول عظیم در سیستم‌های تولید و انتقال انرژی به‌میان آمده که باعث شده اصطلاح تولید پراکنده<sup>۱</sup> مکرراً به‌گوش برسد [۲-۵]. تولید پراکنده به استفاده از واحدهای تولیدی کوچک، در نقاط استراتژیک سیستم قدرت در نزدیکی مراکز بار مربوط می‌شود. نیروگاه‌های تولید پراکنده به نیروگاه‌های با ظرفیت تولیدی کم (از چند کیلووات تا ۱۰ مگاوات) گفته می‌شود که جهت تولید انرژی الکتریکی در نقاط نزدیک به مصرف‌کننده‌ها نصب می‌گردد. از جمله این نیروگاه‌ها می‌توان به نیروگاه‌های بادی، میکروتوربین‌ها، پیل‌های سوختی، سلول‌های خورشیدی، ژنراتورهای دیزلی، سیستم‌های ذخیره انرژی در ابررساناها، سیستم‌های ذخیره انرژی در باتری و ... اشاره نمود. به این نوع نیروگاه‌ها، نیروگاه‌های محلی یا نامتمرکز نیز گفته می‌شود و در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۶]. در سیستم‌های هیبرید، با ترکیب کردن دو یا چند منبع، قابلیت پیش‌بینی تولید افزایش می‌یابد. در واقع این منابع کمبودهای یکدیگر را تا حدودی پوشش می‌دهند. در این نوع سیستم‌ها نوسانات توان تولیدی برخی از منابع انرژی توسط سیستم‌های ذخیره‌سازی کنترل می‌گردد و به این صورت قابلیت اطمینان تامین بار بهبود می‌یابد. بنابراین، جهت دستیابی به انرژی مطمئن سیستم‌های هیبرید انرژی و همچنین تعادل میان تولید و مصرف انرژی، تعیین ظرفیت بهینه آنها ضروری به‌نظر می‌رسد [۷، ۸].

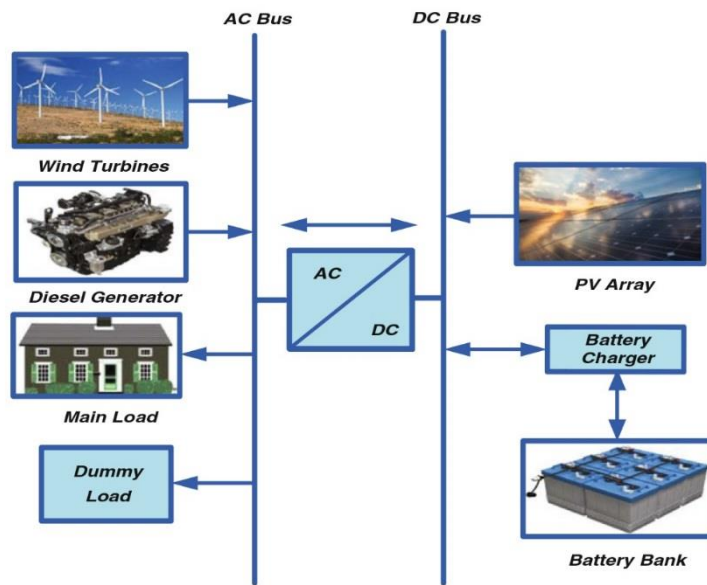
در زمینه طراحی سیستم‌های هیبرید مطالعه‌های زیادی صورت گرفته است. در مرجع [۹]، مدل‌های مختلفی برای تعیین اندازه بهینه اجزای سیستم با اهداف گوناگونی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۰] یک چارچوب مدل‌سازی مبتنی بر نظریه بازی، همراه با استراتژی راه حل مناسب برای بهینه‌سازی طراحی سیستم چند انرژی و منابع تجدیدپذیر ارائه شده است. یک فرمول جدید برای ترکیب فناوری توربین در طراحی سیستم تجدیدپذیر بهینه ترکیبی باد/فتوولتائیک در مرجع [۱۱] پیشنهاد گردید. نویسنده‌ها در مرجع [۱۲] یک روش کارآمد و موثر برای بهینه‌سازی اندازه یک سیستم ترکیبی متشکل از پانل‌های فتوولتائیک، ژنراتورهای دیزلی و پیل‌های سوختی ارائه داده است. در چارچوب اندازه‌گیری، کل هزینه فعلی خالص با توجه به دو محدودیت اصلی (از دست دادن احتمال منبع تغذیه و سهم انرژی تجدیدپذیر) به حداقل رسیده است. در مرجع [۱۳] کاربرد پانل‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی و ژنراتورهای دیزلی در یک سیستم تولید برق ترکیبی مستقل برای برق رسانی روستایی در سه روستای خارج از شبکه در کلمبیا با ویژگی‌های مختلف آب و هوایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در مرجع [۱۴] روش جستجوی فاخته برای اندازه بهینه سه طرح مختلف سیستم: فتوولتائیک-باتری، باد-باتری و فتوولتائیک-باد-باتری قابل اجرا در مناطق دور افتاده در هند، در حالی که هزینه سیستم را به حداقل می‌رساند و تغییرات فصلی بار را در نظر می‌گیرد، به‌کار گرفته شده است. در مرجع [۱۵] یک سیستم ترکیبی مستقل خارج از شبکه (فتوولتائیک-باد-دیزل با ذخیره‌سازی باتری) با کمک یک روش جدید تصادفی-ابتکاری برای به حداقل رساندن کل هزینه فعلی خالص و حداکثر سازی شاخص توسعه انسانی و اشتغال ارائه شده است. در مرجع [۱۶] یک روش حذف سیستم با استفاده از شبیه‌سازی عددی برای اعتبارسنجی و بهینه‌سازی نتایج، بیان شده است که مزایای سیستم‌های قدرت ترکیبی فتوولتائیک-دیزل-باتری را برای مراکز تجاری، با در نظر گرفتن ابوجا در نیجریه به عنوان مطالعه موردی، نشان می‌دهد. همچنین، در مرجع [۱۷] ارزش سیستم‌های ترکیبی شامل فتوولتائیک خورشیدی و ذخیره باتری را در طول زمان مورد بررسی قرار گرفته است و خود مصرفی انرژی فتوولتائیک مسکونی در مرجع [۱۸] بررسی شده و عدم قطعیت‌های پیش‌بینی شده تولید کمی‌سازی شده است.

در این مقاله بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید انرژی بادی-خورشیدی-باتری با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های سالیانه سیستم و در نظر گرفتن قید احتمال تلفات عرضه توان<sup>۲</sup> (LPSP) با استفاده از الگوریتم جدید بهینه‌سازی ملخ<sup>۳</sup> (GOA) ارائه شده است. این الگوریتم که در سال ۲۰۱۷ در مرجع [۱۹] پیشنهاد شده است، از مدل‌های ریاضی و تقلید رفتار ذرات ملخ در

طبیعت برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌کند. همانند سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، هدف این روش یافتن جواب بهینه در میان چندین پاسخ است. همان‌طور که از اسم این روش مشخص است، این الگوریتم با الهام از حرکت‌های واقعی ملخ ابداع شده است. الگوریتم بهینه‌سازی ملخ از جمله جدیدترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی به حساب می‌آید. ایرادها و نقاط ضعف روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۴</sup> (PSO) نظیر گیر افتادن در نقاط کمینه محلی (جواب‌های محلی) در مسائل بهینه‌سازی با ابعاد بزرگ [۲۰، ۲۱]، عدم قطعیت انتخاب پارامترها و سرعت همگرایی کند [۲۲]، دست‌یابی مشکل به راه‌حل بهینه در برخی از توابع معیار با وجود جستجوی مناسب در تکرارهای اولیه [۲۰] با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ قابل حل است. بنابراین، الگوریتم بهینه‌سازی ملخ در مقایسه با روش ازدحام ذرات احتمال همگرایی بالاتری برای جمعیت اولیه کمتر دارد [۲۳] و زمان همگرایی و مقدار تابع هزینه بدست آمده از روش بهینه‌سازی ملخ کمتر از روش ازدحام ذرات است. در این مطالعه بهینه‌سازی چندهدفه سیستم با استفاده از روش ضرایب وزنی انجام شده است. سناریوهای مختلفی برای شبیه‌سازی سیستم هیبرید بادی-خورشیدی در نظر گرفته شده و عملکرد سیستم به صورت چندهدفه بهینه خواهد شد. در سناریوی اول مساله بهینه‌سازی به‌ازای پارامترهای نامی سیستم صورت خواهد پذیرفت و نتایج با روش ازدحام ذرات مقایسه می‌گردد. سپس با فرض وجود تغییرات بر روی راندمان اینورتر، مجدداً مساله بهینه‌سازی حل می‌شود. در سناریو دوم نتایج بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید به‌ازای تغییرات راندمان اینورتر با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ ارائه شده است. در سناریوی سوم تغییرات بار مدنظر قرار خواهد گرفت و مساله بهینه‌سازی با استفاده از روش بهینه‌سازی ملخ انجام می‌گیرد. نهایتاً، تغییرات احتمال تلفات عرضه توان در نظر گرفته شده و تابع هدف سیستم هیبرید حداقل خواهد شد. همچنین در سناریو چهارم به‌ازای تغییرات احتمال تلفات عرضه توان با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید ارائه شده است. بنابراین، مهمترین نوآوری این مطالعه را می‌توان بهینه‌سازی سیستم هیبرید انرژی بادی-خورشیدی-باتری با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های سالیانه سیستم و احتمال تلفات عرضه توان براساس بهینه‌سازی چندهدفه ضرایب وزنی به روش بهینه‌سازی ملخ در نظر گرفت. لحاظ نمودن عوامل مختلفی نظیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، نگهداری و تعویض تجهیزات در هزینه‌های سالیانه و متغیرهای متنوع تصمیم‌گیری شامل تعداد پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، تعداد باتری‌ها، ارتفاع برج بادی و زاویه پنل خورشیدی نسبت به تابش خورشید مساله بهینه‌سازی را با چالش روبرو ساخته است. همچنین، اثر برخی از عوامل موثر شامل راندمان اینورتر، تغییرات تقاضای بار و همچنین اثر تغییرات احتمال تلفات عرضه توان ماکزیمم بر طراحی سیستم مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. در ادامه، پس از مقدمه مطرح شده در این قسمت، معرفی سیستم هیبرید به‌کار گرفته شده و قسمت‌های مختلف آن شامل پنل خورشیدی، توربین بادی و باتری انجام شده و مدل دینامیکی این المان‌ها در بخش دوم انجام می‌شود. در بخش سوم، مساله بهینه‌سازی تعریف خواهد شد و روش بهینه‌سازی ملخ و مراحل مختلف آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی به‌ازای چهار سناریوی مختلف شامل بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید به‌ازای پارامترهای نامی، تغییرات راندمان اینورتر، تغییرات بار و تغییرات احتمال تلفات عرضه توان در بخش چهارم طرح می‌شود. نهایتاً، در بخش آخر نتیجه‌گیری مورد بحث قرار می‌گیرد.

## ۲- مدل سازی سیستم مورد مطالعه

سیستم به‌کار گرفته شده در این مطالعه، مشابه مرجع‌های [۲۴] و [۲۵] یک سیستم بادی-خورشیدی با ذخیره باتری است که در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیستم شامل توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی و بانک باتری است. در این سیستم منابع اصلی تامین کننده توان، توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی هستند و بانک باتری به‌عنوان سیستم ذخیره در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): سیستم هیبرید بادی-خورشیدی-دیزلی با ذخیره باتری [۲۵]

Figure (1): Wind-solar-diesel hybrid system with battery storage

## ۲-۱- مدل‌سازی پنل خورشیدی

در صفحه‌های خورشیدی، کل تابش خورشیدی روی سطح مورب برابر مجموع مولفه‌های تابشی پرتو  $\gamma$ ، پراکنده و انعکاس یافته روی سطح مورب است. بخش‌های پراکنده و انعکاس یافته در این بررسی نادیده گرفته می‌شوند، چون تنها بخش کوچکی از کل تابش را تشکیل می‌دهند [۲۴]. تابش لحظه‌ای روی یک صفحه مورب می‌تواند از طریق معادلات زیر بیان شود. رابطه (۱) به منظور محاسبه انحراف خورشیدی ( $\delta$ ) از طریق انحراف زمین نسبت به دوران آن  $\theta$  (برابر  $23/44$  درجه) به کار می‌رود [۲۴].

$$\delta = \theta \times \sin\left(360^\circ \times \frac{284+n}{365}\right) \quad (1)$$

در رابطه فوق  $n$  تعداد روزهای یک سال است. زاویه ارتفاع خورشیدی ( $h$ ) که زاویه بین مسیر خورشید و افق است را می‌توان با کمک روابط (۲) و (۳) تخمین زد [۲۴].

$$\sinh = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau \quad (2)$$

$$\tau = \frac{360}{24} (12 - It) \quad (3)$$

در روابط فوق،  $\varphi$  عرض جغرافیایی،  $\tau$  زاویه ساعت و  $It$  زمان محلی بین صفر تا  $23$  است. تابش لحظه‌ای روی سطح مورب ( $S_t$ ) را می‌توان بر اساس مولفه افقی تابش خورشیدی ( $S$ ) به صورت رابطه‌های (۴) و (۵) محاسبه کرد [۱۳].

$$S_t = \frac{S}{\sinh} \quad (4)$$

$$S_p = S_t \sin(h + \beta) \quad (5)$$

که  $S_p$  مولفه موثر تابش خورشیدی عمود بر صفحه مورب است. با استفاده از  $S_p$  محاسبه شده، حداکثر توان خروجی صفحه‌های PV در گام زمانی  $t$  با در نظر گرفتن اثر دمای محیط به صورت رابطه‌های زیر تعیین می‌شود [۲۴].

$$T_c(t) = T_A(t) + \frac{NCOT - 20}{800} S_p(t, \beta) \quad (6)$$

$$I_{SC}(t) = [I_{SC,STC} + K_1(T_c(t) - 25)] \frac{S_p(t, \beta)}{1000} \quad (7)$$

$$V_{OC}(t) = V_{OC,STC} - K_V T_c(t) \quad (8)$$

$$P_{PV}(t, \beta) = N_S \cdot N_P \cdot V_{OC}(t) \cdot I_{SC}(t, \beta) \cdot FF(t) \quad (9)$$

در روابط فوق  $T_e(t)$  دمای سلول خورشیدی بر حسب درجه سانتیگراد در زمان  $t$ ،  $T_A(t)$  دمای محیط بر حسب درجه سانتیگراد در زمان  $t$ ،  $NCOT$  دمای نامی بهره‌برداری سلول،  $S_p(t, \beta)$  مولفه موثر تابش خورشیدی عمود بر صفحه مورب،  $I_{sc}$  جریان اتصال کوتاه سلول در زمان  $t$ ،  $I_{sc,STC}$  جریان اتصال کوتاه سلول در شرایط استاندارد تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع،  $K_I$  ضریب حرارتی جریان اتصال کوتاه،  $V_{oc}(t)$  ولتاژ مدار باز سلول در زمان  $t$ ،  $V_{oc,STC}$  ولتاژ مدار باز سلول در شرایط استاندارد تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع،  $K_V$  ضریب حرارتی ولتاژ مدار باز،  $P_{pv}(t, \beta)$  توان خروجی آرایه خورشیدی و نهایتاً  $N_s$  و  $N_p$  به ترتیب تعداد سلول‌های سری و موازی خورشیدی است.

## ۲-۲- مدل سازی توربین بادی

منحنی توان خروجی یک توربین بادی، یک منحنی غیرخطی است. بنابراین توان  $P_{WG}$ ، توان تولیدی توربین بادی را می‌توان به صورت رابطه (۱۰) محاسبه کرد [۲۵، ۲۴].

$$P_{WG}(v, t) = \begin{cases} 0, & v < V_C \\ \frac{1}{2} C_p \rho A_{WG} v^3, & V_C < v < V_r \\ P_{WGR}, & V_r < v < V_f \\ 0, & v \geq V_f \end{cases} \quad (10)$$

در رابطه فوق،  $v$  سرعت باد در هر دوره زمانی است،  $C_p$  ضریب عملکرد بوده که به صورت نسبت توان خروجی توربین بادی به حداکثر توان بادی تعریف می‌شود،  $\rho$  چگالی هوا و  $A_{WG}$  مساحتی است که توسط روتور جاروب می‌شود،  $P_{WGR}$  بیانگر توان نامی توربین بادی است. همچنین،  $V_C$  سرعت قطع پایین و برابر ۴ متر بر ثانیه، سرعت نامی باد یعنی  $V_r$  برابر ۱۴ متر بر ثانیه و  $V_f$  سرعت قطع بالای باد برابر ۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شوند. تغییرات سرعت باد با توجه به ارتفاع برج باید در طراحی توربین‌های بادی مد نظر قرار گیرد. در این مطالعه، از قانون توان برای انتقال داده‌های بادسنج در ارتفاع مشخص به مرکز فعالیت مورد انتظار استفاده می‌شود. رابطه این مدل به صورت زیر است [۲۴]:

$$v = v_r \left( \frac{H_{wg}}{H_r} \right)^\gamma \quad (11)$$

در رابطه فوق  $v$  سرعت باد در ارتفاع  $H_{wg}$  برج،  $v_r$  سرعت اندازه‌گیری شده باد در ارتفاع مرجع  $H_r$ ،  $\gamma$  ضریب قانون توان سرعت باد است که برای سطح‌های نسبتاً هموار معمولاً برابر یک هفتم فرض می‌شود [۲۴].

## ۲-۳- توان تولیدی واحدهای تجدیدپذیر

توان کل تولیدی توسط واحدهای تجدیدپذیر  $P_r^n(t)$  شامل پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی با توجه به تعداد  $N_{PV}$  پنل و  $N_{WG}$  توربین با فرض سالم بودن همه واحدها به صورت (۱۲) تعریف می‌شود.

$$P_r^n(t) = N_{PV} \cdot P_{PV} + N_{WG} \cdot P_{WG} \quad (12)$$

## ۲-۴- مدل سازی باتری

در اکثر مطالعات سیستم‌های هیبرید با ذخیره باتری، در مدل سازی باتری، وضعیت شارژ باتری  $^5$  (SOC) را در نظر می‌گیرند. در این مطالعه، از رابطه زیر برای محاسبه وضعیت شارژ بانک باتری در هر گام زمانی شبیه‌سازی استفاده شده است. این رابطه بر اساس تولید انرژی منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی و تقاضای توان بار تعریف شده است [۲۴].

$$SOC(t+1) = SOC(t) + \frac{(P_{bat} / V_{bus}) \cdot \Delta t \cdot \eta_{bat}}{C_n} \quad (13)$$

در رابطه فوق،  $P_{bat}$  توان ورودی/ خروجی باتری (برای حالات شارژ، مثبت و برای حالات دشارژ، منفی) است،  $V_{bus}$  ولتاژ باس dc و  $\Delta t$  گام زمانی شبیه‌سازی و برابر ۱ ساعت است.  $\eta_{bat}$  راندمان باتری است که در طی شارژ برابر ۸۰ درصد و در حالت تخلیه ۱۰۰ درصد در نظر گرفته می‌شود.  $C_n$  (آمپر ساعت) کل ظرفیت نامی بانک باتری است که توسط کل تعداد باتری‌ها  $N_{bat}$  تعیین می‌شود، تعداد باتری‌های متصل به هر باتری  $C_{bat}$  (آمپر ساعت) توسط رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) بیان می‌شود [۱۳]. همچنین، در این مطالعه  $SOC_{min}$  برابر ۲۰ درصد و  $SOC_{max}$  برابر ۱۰۰ درصد اختیار شده است.

$$C_n = \frac{N_{bat}}{n_{bs}} C_{bat} \quad (14)$$

$$n_{bs} = \frac{V_{bus}}{V_{bat}} \quad (15)$$

در رابطه فوق  $V_{bat}$ ،  $C_{bat}$  و  $n_{bs}$  به ترتیب ولتاژ نامی (ولت)، ظرفیت نامی (آمپر ساعت) هر باتری و تعداد باتری‌های متصل شده به صورت سری است.

### ۳- بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید خورشیدی-بادی با ذخیره باتری سالانه

هدف از این مطالعه، بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید خورشیدی-بادی با ذخیره باتری سالانه به منظور کمینه‌سازی هزینه سالانه سیستم<sup>۶</sup> (ACS) با احتمال تلفات عرضه توان با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ است. روش‌های بهینه‌سازی هوشمند و فرا ابتکاری در سیستم‌های قدرت بسیار پر کاربرد هستند [۲۶،۲۷]. متغیرهای تصمیم‌گیری شامل  $N_{pv}$  یعنی تعداد صفحه PV،  $N_{wg}$  تعداد توربین بادی و  $N_{bat}$  تعداد باتری است. همچنین، زاویه شیب صفحه PV یعنی  $\beta$  و ارتفاع برجک توربین بادی یعنی  $H_{wg}$  که می‌توانند تاثیر زیادی روی نتایج نهایی شبیه‌سازی داشته باشند، مدنظر قرار گرفته‌اند. هزینه سالانه سیستم شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه تعویض و هزینه تعمیر و نگهداری است. تنها هزینه سه تجهیز اصلی سیستم هیبرید یعنی صفحه PV، توربین بادی و باتری در نظر گرفته شده و از دیگر تجهیزات کمکی صرف نظر شده است. لازم به ذکر است در این تحقیق، مساله بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از روش ضرایب وزنی [۲۸،۲۹] حل شده است که در ادامه تشریح شده است.

با استفاده از روش وزن‌دهی، مساله چند هدفه به یک مساله تبدیل می‌شود. به این صورت که برای هر یک از توابع هدف یک وزن در نظر گرفته می‌شود و تابع هدف جدید از حاصل جمع توابع هدف در مقادیر وزن متناظر با هر یک حاصل می‌شود. روش وزن‌دهی را می‌توان با رابطه‌های (۱۶) و (۱۷) بیان کرد. لازم به ذکر است که نرمالیزه کردن هر یک از توابع هدف به دلیل متفاوت بودن مقیاس هر یک از آنها ضروری است [۲۸،۲۹].

$$\text{fitness} = \min \left\{ \sum_{i=1}^k w_i \frac{f_i(x)}{f_i^{\max}} \right\}, w_i \geq 0, \sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (16)$$

$$\text{s.t.} \quad \min g_i(x) \geq 0, \quad i=1,2,\dots,m \quad (17)$$

مساله بهینه‌سازی چندهدفه انتخاب شده در این تحقیق، کمینه‌سازی توابع هزینه سالیانه سیستم و احتمال تلفات عرضه توان به عنوان معیارهای تابع هدف است [۸،۲۴].

$$\text{Min } F_{obj} = (\text{ACS}, \text{LPSP}) \quad (18)$$

جایی که  $F_{obj}$  تابع هدف است. هزینه سالیانه سیستم از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$\text{ACS} = C_{ainv} (\text{PV} + \text{WG} + \text{Tower} + \text{Bat}) + C_{aom} (\text{PV} + \text{WG} + \text{Tower} + \text{Bat}) + C_{arep} (\text{Bat}) \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)،  $C_{ainv}$  هزینه سالیانه سرمایه‌گذاری اولیه،  $C_{aom}$  هزینه سالیانه بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری و  $C_{arep}$  هزینه سالیانه تعویض است. لازم به ذکر است که در این مطالعه تنها برای باتری هزینه تعویض در نظر گرفته شده است. طول عمر پروژه برابر ۲۵ سال در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور سنجش میزان قابلیت اطمینان سیستم هیبرید تحت مطالعه، مفهوم احتمال تلفات عرضه توان به کار گرفته شده است. این مفهوم، به صورت احتمال تلفات عرضه توان توسط سیستم تعریف می‌شود و مقدار آن در محدوده [۰ و ۱] است. مقدار صفر آن به این معناست که بار همواره به طور کامل پوشش داده می‌شود. بنابراین هر چه

احتمال تلفات عرضه توان کمتر باشد به معنای این است که سیستم در تامین بار موفق تر بوده و دارای قابلیت بالایی است. تابع هدف مربوطه را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد [۱۳، ۱۴]:

$$LPSP = \frac{\sum_{t=0}^T T(P_{available}(t) < P_{load}(t))}{T} \quad (20)$$

در رابطه فوق،  $T$  تعداد ساعت‌های مطالعه برابر ۸۷۶۰ در یک سال در نظر گرفته شده است،  $P_{available}(t)$  و  $P_{load}(t)$  به ترتیب میزان توان تامین شده و میزان تقاضای بار در هر گام زمانی  $t$  است. در این مطالعه تابع هدف مساله بهینه‌سازی باید در معرض قیود (۲۱) الی (۲۳) بهینه گردد:

$$(N_{PV}, N_{wg}, N_{Bat}) > 0 \quad (21)$$

$$H_{low} \leq H_{wg} \leq H_{high} \quad (22)$$

$$0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ \quad (23)$$

در رابطه‌های فوق،  $H_{low}$  و  $H_{high}$  به ترتیب حد پایین و بالای ارتفاع برج توربین بادی (برحسب متر) که برابر ۵ و ۴۰ متر انتخاب شده است. همچنین، حداکثر مقدار برای  $N_{pv}$ ،  $N_{wg}$  و  $N_{bat}$  به ترتیب برابر ۳۵، ۱۵ و ۳۵ در نظر گرفته شده است.

#### ۴- الگوریتم بهینه‌سازی ملخ

ملخ‌ها، حشره هستند. آن‌ها به دلیل آسیبی که به محصولات کشاورزی می‌زنند، آفت محسوب می‌شوند. اگرچه ملخ‌ها معمولاً به صورت تکی در طبیعت دیده می‌شوند، اما آن‌ها متعلق به بزرگترین گروه از حیوانات هستند. اندازه گروه ملخ‌ها می‌تواند در مقیاس یک قاره بوده و برای کشاورزان کابوس باشد. جنبه منحصر به فرد دسته ملخ‌ها این است که رفتار گروهی هم در بچگی و هم در بزرگسالی آن‌ها دیده می‌شود. میلیون‌ها بچه ملخ مانند لوله‌های غلطان می‌پرند و حرکت می‌کنند. در مسیرشان تقریباً هر سبزیجاتی را می‌خورند. بعد از این رفتار، وقتی بزرگ می‌شوند، در هوا تشکیل گروه می‌دهند. به این صورت ملخ‌ها فاصله‌های زیادی را برای مهاجرت طی می‌کنند [۱۹]. ویژگی اصلی گروه ملخ‌ها در مرحله لارو، حرکت آهسته و گام‌های کوچک آن‌هاست. در مقایسه، حرکت زیاد و ناگهانی اصلی‌ترین ویژگی ملخ‌های بزرگ‌تر است. جستجو برای غذا، دیگر خصیصه مهم گروه ملخ‌هاست. همان‌طور که در مقدمه توضیح داده شد، الگوریتم‌های مبتنی بر الهام‌های طبیعی به‌طور منطقی روند تحقیق را به دو دسته تقسیم می‌کند: کشف و بهره‌برداری. در کشف، عوامل تحقیق آن‌ها را تشویق به حرکت ناگهانی می‌کند، در حالی که آنها در مرحله بهره‌برداری تمایل به حرکت محلی دارند. این دو عملکرد، علاوه بر جستجو برای هدف، توسط ملخ‌ها به‌طور طبیعی انجام می‌شوند. بنابراین، اگر ما راهی پیدا کنیم تا این رفتار را به صورت ریاضی مدل‌سازی کنیم، می‌توانیم الگوریتم جدیدی که از طبیعت الهام گرفته شده را طراحی کنیم. مدل ریاضی به کار گرفته شده برای شبیه‌سازی رفتار گروهی ملخ‌ها به صورت زیر است [۱۹]:

$$X_i = S_i + G_i + A_i \quad (24)$$

که در آن  $X_i$  جایگاه نام ملخ  $S_i$  تعامل اجتماعی  $G_i$  نیروی جاذبه در ملخ نام و  $A_i$  حرکت افقی باد است. توجه داشته باشید که برای ایجاد رفتار تصادفی، معادله می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$X_i = r_1 S_i + r_2 G_i + r_3 A_i \quad (25)$$

که در آن  $r_1$ ،  $r_2$  و  $r_3$  اعداد تصادفی در بازه  $[0, 1]$  است [۱۹].

$$S_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N s(d_{ij}) \hat{d}_{ij} \quad (26)$$

که در این رابطه،  $d_{ij}$  فاصله بین ملخ نام و نام است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d_{ij} = |X_j - X_i| \quad (27)$$

$s$  تابعی است برای تعریف قدرت نیروهای اجتماعی نشان داده می‌شود و یک بردار واحد از ملخ نام به ملخ نام به صورت زیر قابل تعریف است:



$$\hat{d}_{ij} = \frac{x_j - x_i}{d_{ij}} \quad (28)$$

تابع  $s$  که نیروهای اجتماعی را تعریف می‌کند به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$s(r) = fe^{\frac{r}{1}} - e^{-r} \quad (29)$$

که در آن  $f$  نشان دهنده شدت جذب،  $rem$  باقی مانده تقسیم  $d_{ij}$  بر ۲ و ۱ مقیاس طولی جذب است. مقدار  $r$  برابر است با:

$$r = d_{ij}^* = 2 + rem(d_{ij}, 2) \quad (30)$$

بررسی رابطه (۲۹) نشان می‌دهد دافعه در بازه ۰ تا ۲/۰۷۹ رخ می‌دهد. زمانی که یک ملخ ۲/۰۷۹ واحد دورتر از ملخ دیگر است نه جاذبه‌ای هست و نه دافعه‌ای. به این بازه، منطقه راحت یا فاصله راحت می‌گویند. جاذبه از ۲/۰۷۹ واحد فاصله به حدود ۴ می‌رسد و سپس به تدریج کم می‌شود. تغییر پارامترهای  $f$  و  $l$  در معادله (۲۵) باعث رفتارهای متفاوت اجتماعی در ملخ‌های مصنوعی می‌شود. از بین این مقادیر  $l$  برابر ۱/۵ و  $f$  برابر ۰/۵ انتخاب شده است [۱۹]. اجزای موجود در معادله (۲۴) به صورت زیر محاسبه می‌شوند. برای عامل  $G_i$  داریم:

$$G_i = -g\hat{e}_g \quad (31)$$

که در آن  $g$  ثابت گرانش و  $\hat{e}_g$  نشان دهنده یک بردار واحد به سمت مرکز زمین است. عامل  $A_i$  به فرم رابطه (۳۲) تعریف می‌شود.

$$A_i = u\hat{e}_w \quad (32)$$

که در آن  $u$  ثابت جسم شناور و  $\hat{e}_w$  بردار واحد در مسیر باد است. ملخ‌های نوزاد هیچ بالی ندارند از این رو حرکت آن‌ها به شدت وابسته به مسیر باد است. با جای‌گذاری رابطه‌های (۲۶) الی (۳۲) در معادله (۲۴)، این معادله می‌تواند به صورت زیر گسترده شود [۱۹]:

$$X_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N s(|x_j - x_i|) \frac{x_j - x_i}{d_{ij}} - g\hat{e}_g + u\hat{e}_w \quad (33)$$

که در آن  $N$  تعداد ملخ‌ها هستند. به هر حال، این مدل ریاضی نمی‌تواند مستقیماً برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده شود، زیرا ملخ‌ها به سرعت به منطقه راحت می‌رسند و گروه یک نقطه مشخص را تحت پوشش قرار نمی‌دهد. نسخه اصلاح شده این معادله به صورت زیر ارائه شده است تا مسئله بهینه‌سازی را حل کند [۱۹]:

$$X_i^d = c_1 \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N c_2 \frac{ub_d - lb_d}{2} s(|x_j^d - x_i^d|) \frac{x_j - x_i}{d_{ij}} \right) + \hat{T}_d \quad (34)$$

که در آن  $ub_d$  محدوده بالا در بُعد  $d$ ،  $lb_d$  محدوده پایین در بُعد  $d$ ،  $\hat{T}_d$  و معادله (۲۹) مقدار بعد  $d$  در هدف (بهترین راه حل به دست آمده)،  $c_1$ ،  $c_2$  ضرایب کاهش برای کوچک کردن مناطق راحت، دافعه و جاذبه است. توجه داشته باشید که  $s$  بسیار شبیه به عامل  $S$  در معادله (۲۴) است. معادله (۳۴) نشان می‌دهد که جای بعدی یک ملخ بر اساس جای فعلی، جای هدف، و جای دیگر ملخ‌ها تعریف می‌شود. توجه کنید که اولین عامل در این معادله، مکان فعلی ملخ با توجه به دیگر ملخ‌هاست. در واقع، باید توجه داشت که شرایط تمام ملخ‌ها برای تعیین مکان عوامل جستجو حول هدف در نظر گرفته شود. این روش با روش ازدحام ذرات فرق دارد. در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای هر ذره دو بردار مکان و سرعت وجود دارد [۲۶]. به هر حال، تنها یک بردار مکان برای هر عامل جستجو در الگوریتم بهینه‌سازی ملخ وجود دارد. تفاوت اصلی دیگر بین این دو الگوریتم این است که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مکان ذره را با توجه به مکان فعلی، بهترین فردی و بهترین کلی به روزرسانی می‌کند. با این وجود، الگوریتم بهینه‌سازی ملخ مکان عامل جستجو را بر اساس مکان فعلی، بهترین جهانی و مکان دیگر عوامل تحقیق به روزرسانی می‌کند. این بدین معناست که در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات هیچ یک از ذرات دیگر که برای به روزرسانی مکان ذره همکاری دارند وجود ندارد، در حالی که الگوریتم بهینه‌سازی ملخ نیاز به تمام عوامل جستجو دارد تا در تعیین مکان بعدی هر عامل تحقیق دخیل باشد. شایان ذکر است که پارامتر انطباقی  $c$  به دلایل زیر دوبار در معادله (۳۴) آمده است [۱۹]:

$c_1$  - بسیار شبیه به وزن ساکن ( $w$ ) در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات است و حرکت‌های ملخ‌ها را به دور هدف کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، این پارامتر کشف و بهره‌برداری کل گروه را به دور هدف متعادل می‌کند.

-  $c_2$  مناطق جاذبه، راحتی و دافعه را بین ملخ‌ها کاهش می‌دهد. با در نظر گرفتن عامل زیر در معادله (۲۶)، به‌طور خطی فضایی را که ملخ باید کشف و مورد بهره‌برداری قرار دهد را کاهش می‌دهد.

$$c_2 \frac{ub_d - lb_d}{2} \quad (35)$$

در معادله (۲۶)، به‌طور خطی فضایی را که ملخ باید کشف و مورد بهره‌برداری قرار دهد را کاهش می‌دهد. عامل زیر نشان می‌دهد که شاید ملخ باید از یک هدف دور (کشف) یا به آن جذب (بهره‌برداری) شود:

$$s(|x_j - x_i|) \quad (36)$$

باید در نظر داشت که  $c_2$  مربوط به کاهش نیروهای دافعه/جاذبه بین ملخ‌ها نسبت به تعداد تکرار است، در حالی که  $c_1$  وقتی تعداد تکرار بالا می‌رود، پوشش جستجو را در اطراف هدف کاهش می‌دهد. به‌طور خلاصه، اولین عبارت از معادله (۳۴)، مکان دیگر ملخ‌ها را در نظر می‌گیرد و تعامل ملخ‌ها در طبیعت را انجام می‌دهد. عبارت دوم،  $\hat{T}_d$ ، تمایل آنها برای حرکت به سمت منبع غذا را شبیه‌سازی می‌کند. برای ایجاد رفتار تصادفی بیشتر، و به‌عنوان جایگزین، هر دو عبارت در معادله (۳۴) می‌تواند در مقادیر تصادفی ضرب شوند. همچنین، عبارات تکی می‌توانند در مقادیر تصادفی ضرب شوند تا رفتار تصادفی در تعامل ملخ‌ها و یا حرکت به سمت منبع غذا را تولید کنند. برای تعادل کشف و بهره‌برداری، لازم است پارامتر  $c_1$  متناسب با میزان تکرار کاهش یابد. این پارامتر مکانیسم بهره‌برداری را با افزایش میزان تکرار افزایش می‌دهد. ضریب  $c_1$  که مقدار منطقه راحتی را نسبت به تعداد تکرار کاهش می‌دهد به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$c_1 = c_{\max} - 1 \frac{c_{\max} - c_{\min}}{L} \quad (37)$$

که در آن  $c_{\max}$  حداکثر،  $c_{\min}$  حداقل مقدار،  $L$  نشان‌دهنده تکرار فعلی و  $L$  حداکثر تعداد تکرار است. در این تحقیق، از ۱ و ۰/۰۰۰۱ به ترتیب برای  $c_{\max}$  و  $c_{\min}$  استفاده شده است. در شکل (۲)، روندنا الگوریتم بهینه‌سازی ملخ آمده است.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید مورد مطالعه با استفاده از روش بهینه‌سازی ملخ ارائه می‌شود. همچنین، جهت بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، مساله بهینه‌سازی با روش ازدحام ذرات نیز انجام و نتایج مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در این مطالعه، چهار سناریوی مختلف شامل سیستم نامی، اثر تغییرات راندمان اینورتر، تغییرات تقاضای بار و همچنین تغییرات احتمال تلفات عرضه توان ماکزیمم بر روی سیستم هیبرید شبیه‌سازی می‌شود.

### ۵-۱- داده‌های سیستم

در شکل (۳) تا (۶) به ترتیب منحنی ساعتی شدت تابش خورشید، دمای محیط، منحنی تغییرات سرعت وزش باد و منحنی تغییرات بار در طول یک سال در ارتفاع ۱۰ متر نشان داده شده است که از داده‌های مرجع [۳۰] استفاده شده است. اطلاعات مربوط به پنل خورشیدی، توربین بادی و باتری نیز به ترتیب در جدول‌های (۱) الی (۳) ارائه شده است. اطلاعات مربوط به هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، نگهداری و جایگزینی تجهیزات سیستم به همراه طول عمر مفید آنها در جدول (۴) آمده است.

### ۵-۲- استراتژی شبیه‌سازی

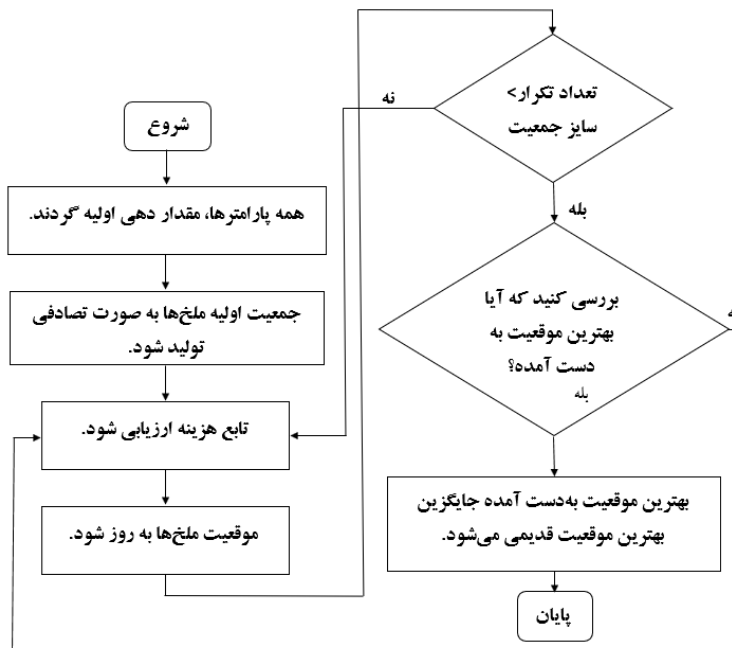
همان‌گونه که ذکر شد، مساله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ملخ و ازدحام ذرات در چهار حالت مختلف به‌صورت زیر انجام شده است:

سناریوی اول: بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید به‌ازای پارامترهای نامی (مطالعه پایه)

سناریوی دوم: بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید به‌ازای تغییرات راندمان اینورتر

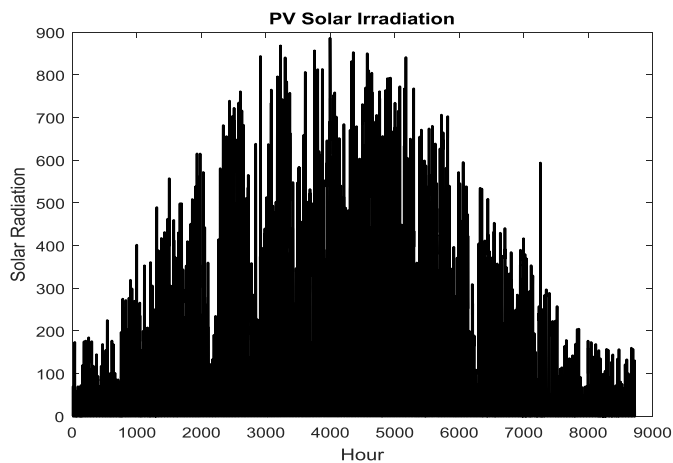
سناریوی سوم: بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید به‌ازای تغییرات بار

سناریوی چهارم: بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید به‌ازای تغییرات احتمال تلفات عرضه توان



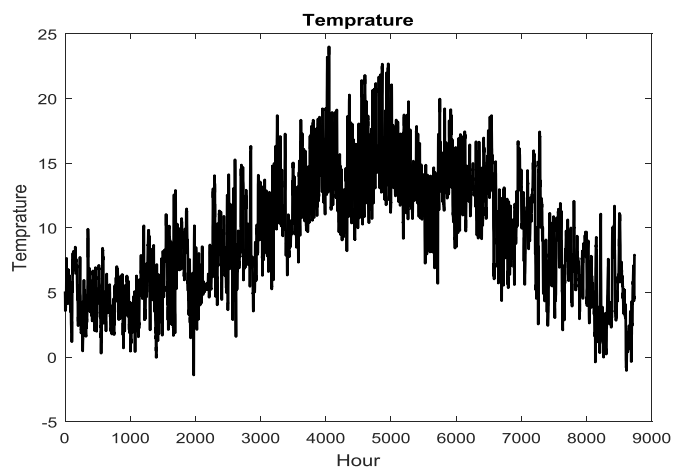
شکل (۲): روندنما الگوریتم بهینه‌سازی ملخ

Figure (2): Flowchart of the grasshopper optimization algorithm



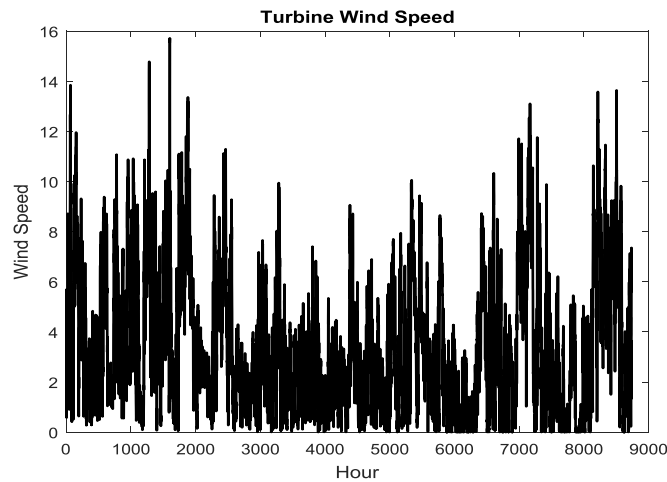
شکل (۳): منحنی شدت تابش خورشید در طول یک سال [۳۰]

Figure (3): Solar radiation during a year [30]



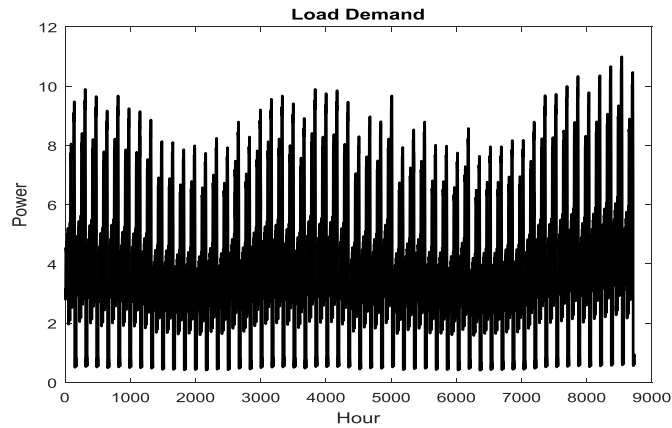
شکل (۴): منحنی دمای محیط در طول یک سال [۳۰]

Figure (4): Ambient temperature during a year [30]



شکل (۵): منحنی سرعت وزش باد در طول یک سال [۳۰]

Figure (5): Wind speed during a year [30]



شکل (۶): منحنی تقاضای بار در طول یک سال [۳۰]

Figure (6): Load demand during a year [30]

Table (1): PV panel information [13]

جدول (۱): اطلاعات پنل خورشیدی [۱۳]

$P_{max}$ (W)	$I_{max}$ (A)	$V_{max}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	$VOC$ (V)	پارامتر
۱۱۰	۶/۴۷	۱۷	۷/۲۲	۲۱	مقدار
$A_{pv}$	$K_v$	$K_i$	$\phi$	NCOT	پارامتر
۱	۰/۳۵	۰/۰۵	۴۱/۶۵	۴۳	مقدار

Table (2): Turbine wind information [24]

جدول (۲): اطلاعات توربین بادی [۲۴]

$A_{WG}$	$\gamma$	$H_r$	$P_{WGR}$	$V_f$	$V_r$	$V_c$	پارامتر
۱	۰/۱۴۳	۱۰	۱۰	۲۰	۱۴	۴	مقدار

Table (3): Battery information [24]

جدول (۳): اطلاعات باتری [۲۴]

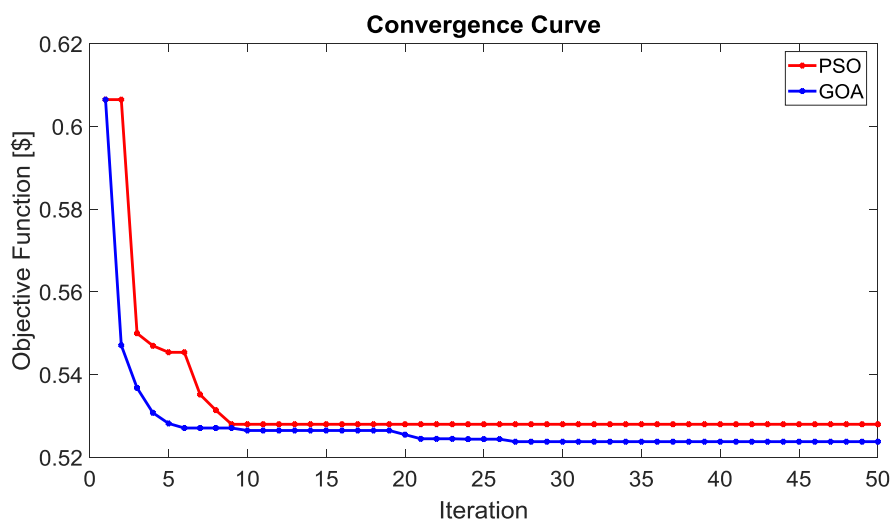
$\eta_{bat,disch}$	$\eta_{bat,ch}$	$SOC_{min}$	$C_{bat}$	$V_{bat}$	پارامتر
۱	۰/۸	۲۰٪ ظرفیت	۱۰۰	۱۲	مقدار

Table (4): Information on equipment costs and system life [24]  
جدول (۴): اطلاعات هزینه‌های تجهیزات و عمر مفید سیستم [۲۴]

تجهیز	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	هزینه نگهداری	هزینه جایگزینی سالیانه	عمر مفید (سال)
پنل خورشیدی	۳۰۰۰ دلار	۳۰ دلار	--	۲۵
توربین بادی	۳۰۱۳ دلار	۵۰ دلار	--	۲۵
برج بادی	۲۵۰ دلار به متر	۲/۵ دلار به متر	--	۲۵
باتری	۱۲۶ دلار	۱/۲۶ دلار	۱۲۶ دلار	۵

### ۵-۲-۱- نتایج شبیه‌سازی به‌ازای پارامترهای نامی (سناریوی اول - مطالعه پایه)

در این بخش نتایج حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید به‌ازای پارامترهای نامی سیستم ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوی اول شامل  $N_{pv}$ ,  $N_{wg}$ ,  $N_{bat}$  و  $H_{wg}$  و  $\beta$  که به ترتیب بیان‌گر تعداد پنل‌های خورشیدی، تعداد توربین‌های بادی، تعداد باتری‌ها، ارتفاع برج بادی و زاویه پنل خورشیدی است با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ملخ و ازدحام ذرات در جدول (۵) ارائه شده است. لازم به ذکر است که تعداد جمعیت الگوریتم‌ها ۳۰ و حداکثر تعداد تکرار هر الگوریتم برابر ۵۰ در نظر گرفته شده است. پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات به صورت  $W_{min}$  و  $W_{max}$  به ترتیب برابر ۰/۹ و ۰/۴ و  $C_1$  و  $C_2$  نیز برابر ۲ فرض شده‌اند. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ملخ بصورت  $C_{min}$  و  $C_{max}$  به ترتیب برابر ۱ و ۰/۰۴ و  $l$  و  $f$  نیز برابر ۱/۵ و ۰/۵ لحاظ شده است. همچنین، تنظیم پارامتر الگوریتم‌ها به صورت سعی و خطا صورت گرفته است. منحنی همگرایی بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از روش ضرایب وزنی و الگوریتم بهینه‌سازی ملخ و ازدحام ذرات در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقدار تابع هدف و هزینه سالیانه کمتری در روش بهینه‌سازی ملخ نسبت به ازدحام ذرات حاصل شده است. مقدار تابع هدف بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از بهینه‌سازی ملخ برابر ۰/۵۲۳۳ و توسط روش ازدحام ذرات برابر ۰/۵۲۳۹ است. بنابراین، نتیجه بدست آمده نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی است. در جدول (۵) نتایج مربوط به متغیرهای مساله با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ملخ و ازدحام ذرات ارائه شده است.



شکل (۷): منحنی همگرایی بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم بهینه‌سازی ملخ و ازدحام ذرات (سناریوی اول)

Figure (7): Multi-objective optimization convergence curve of GOA and PSO algorithm (Scenario 1)

Table (5): Simulation results (Scenario 1)

جدول (۵): نتایج شبیه‌سازی (سناریوی اول)

پارامتر	$N_{pv}$	$N_{wg}$	bat	$H_{wg}$	$\beta$	LPSP (%)	ACS (\$)	تابع هدف
بهینه‌سازی ملخ	۹	۱۳	۳۵	۴۰	۶۹	۰	۱۳۰۸۳	۰/۵۲۳۸
ازدحام ذرات	۱۲	۱۴	۳۵	۳۴	۶۲	۰	۱۳۱۰۱	۰/۵۲۸۰

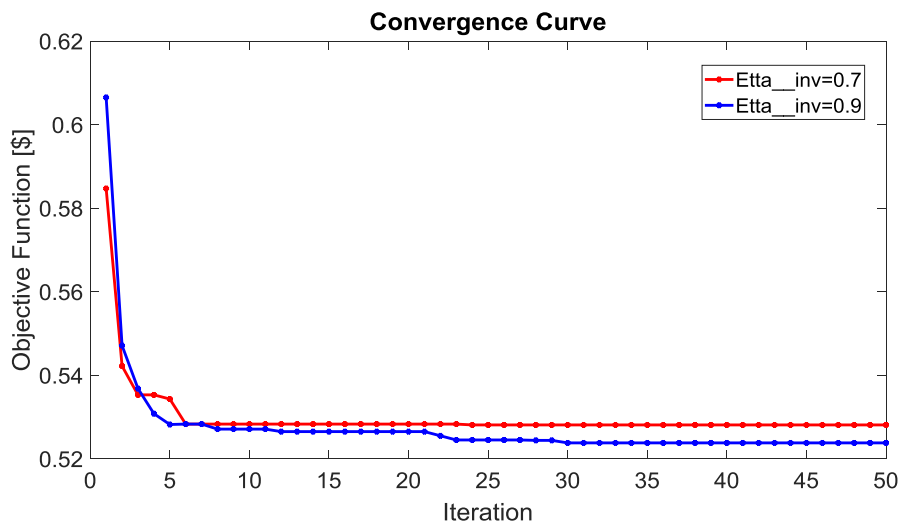
با توجه به این جدول، در حالت پایه تعداد پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و باتری در روش بهینه‌سازی ملخ به‌ترتیب برابر ۹، ۱۳ و ۳۵ به‌دست آمده است. همچنین ارتفاع برج بادی برابر ۴۰ متر و زاویه پنل‌های خورشیدی برابر ۶۹ درجه حاصل شده است. میزان احتمال تلفات عرضه توان نیز برابر صفر به‌دست آمده که به این معناست که کل بار توسط سیستم هیبرید تامین شده است. با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت که روش پیشنهادی کل بار را با هزینه کمتر نسبت به روش ازدحام ذرات تامین نموده است.

### ۵-۲-۲- نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن تغییرات راندمان اینورتر (سناریوی دوم)

در این سناریو نتایج بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید به‌ازای تغییرات راندمان اینورتر با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ ارائه شده است. در مطالعه پایه راندمان اینورتر برابر ۹۰ درصد فرض شده بود. منحنی همگرایی حاصل از این تغییرات برای راندمان‌های ۷۰ و ۹۰ درصد در شکل (۸) رسم شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این بخش در جدول (۶)، ارائه شده است. مطابق جدول (۶) مشاهده می‌شود که کاهش راندمان اینورتر موجب استفاده بیشتری از تعداد واحدهای خورشیدی و بادی و در نتیجه افزایش هزینه سالیانه سیستم و حتی افزایش احتمال تلفات عرضه توان می‌گردد. بنابراین استفاده از اینورتر با راندمان بالا موجب بهبود تامین بار و کاهش هزینه‌های تولید و تامین بار می‌گردد. همچنین در مقایسه با روش ازدحام ذرات مقدار تابع هدف بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از بهینه‌سازی ملخ برای راندمان ۹۰ درصد برابر ۰/۵۲۳۳ و توسط روش ازدحام ذرات برابر ۰/۵۳۳۱ [شکل (۹)] و برای راندمان ۷۰ درصد برابر ۰/۵۲۷۰ و توسط روش ازدحام ذرات برابر ۰/۵۳۰۲ [شکل (۱۰)] است. بنابراین، نتیجه بدست آمده نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی است.

### ۵-۲-۳- نتایج ارزیابی اثر تغییرات تقاضای بار بر بهینه‌سازی (سناریوی سوم)

در این سناریو نتایج بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید به‌ازای تغییرات ۱۰ درصدی تقاضای بار با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در جدول (۷) ارائه شده است.



شکل (۸): منحنی همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی ملخ در سناریوی دوم

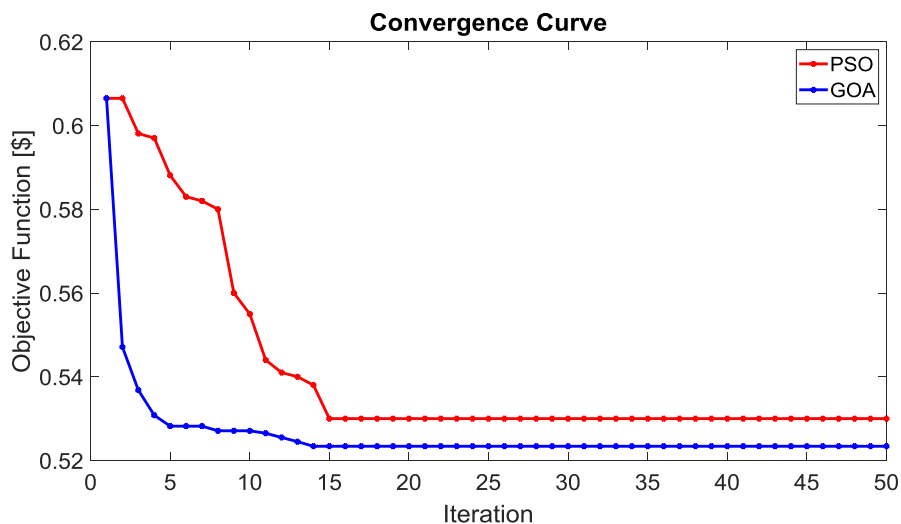
Figure (8): Convergence curve of GOA in Scenario 2

Table (6): Simulation results by considering inverter efficiency changes using GOA

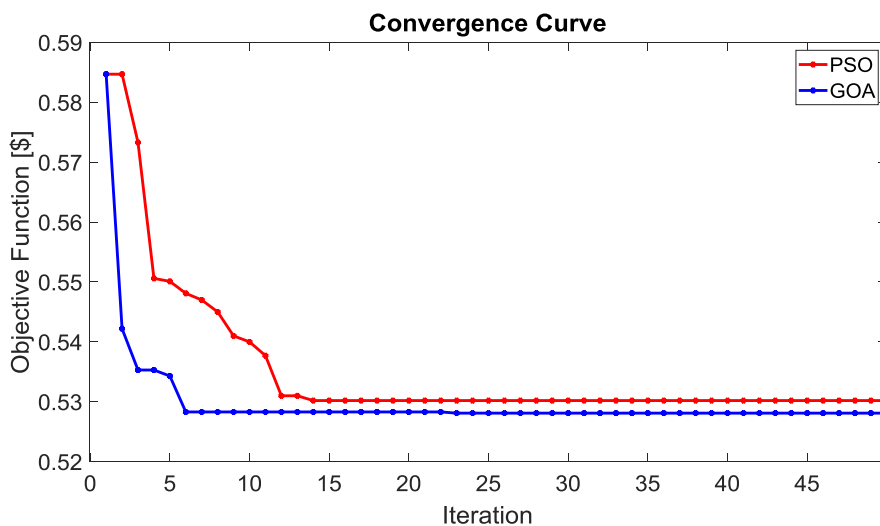
جدول (۶): نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن تغییرات راندمان اینورتر با استفاده از بهینه‌سازی ملخ

تابع هدف	ACS (\$) (\$)	LPSP (%) (%)	$\beta$	$H_{wg}$	$N_{bat}$	$N_{wg}$	$N_{pv}$	پارامتر
۰/۵۲۳۸	۱۳۰۸۳	۰	۶۹	۴۰	۳۵	۱۳	۹	مطالعه پایه (۹۰ درصد)
۰/۵۲۸۱	۱۳۱۰۵	۰/۰۰۰۷۷	۷۵	۳۱	۳۵	۱۴	۱۳	راندمان ۷۰ درصد

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۷)، می‌توان گفت که با افزایش تقاضای بار، تعداد واحدهای خورشیدی و بادی جهت تولید توان بیشتر، افزایش یافته و در نتیجه هزینه‌های سیستم نیز افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل افزایش بار نسبت به مقدار نامی آن و با در نظر گرفتن افزایش تعداد واحدها، مشاهده می‌شود که مقدار احتمال تلفات عرضه توان افزایش یافته است. همچنین، منحنی همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی ملخ در سناریوی سوم در شکل (۱۱) ترسیم شده است.



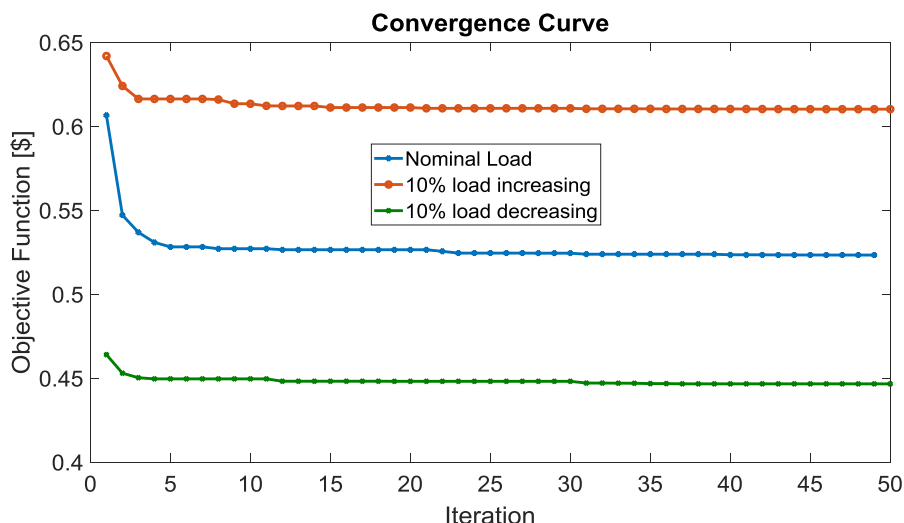
شکل (۹): منحنی همگرایی بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم بهینه‌سازی ملخ و ازدحام ذرات برای راندمان ۹۰ (سناریوی دوم)  
Figure (9): Multi-objective optimization convergence curve of GOA and PSO algorithm for efficiency 90 (Scenario 2)



شکل (۱۰): منحنی همگرایی بهینه‌سازی چندهدفه الگوریتم بهینه‌سازی ملخ و ازدحام ذرات برای راندمان ۷۰ (سناریوی دوم)  
Figure (10): Multi-objective optimization convergence curve of GOA and PSO algorithm for efficiency 70 (Scenario 2)

Table (7): Optimal system design taking with load changes  
جدول (۷): طراحی بهینه سیستم با در نظر گرفتن تغییرات بار

تابع هدف	ACS (\$)	LPSP (%)	$\beta$	$H_{wg}$	$N_{bat}$	$N_{wg}$	$N_{pv}$	پارامتر
۰/۴۴۶۵	۱۱۱۶۴	۰/۰۰۵۷	۶۰	۲۹	۳۵	۱۴	۰	۱۰ درصد کاهش بار
۰/۵۲۲۳	۱۳۰۸۳	۰	۶۹	۴۰	۳۵	۱۳	۹	مطالعه پایه
۰/۶۱۰۲	۱۴۴۳۳	۰/۴۱۱۴	۶۳	۳۳	۳۵	۲۰	۱۵	۱۰ درصد افزایش بار

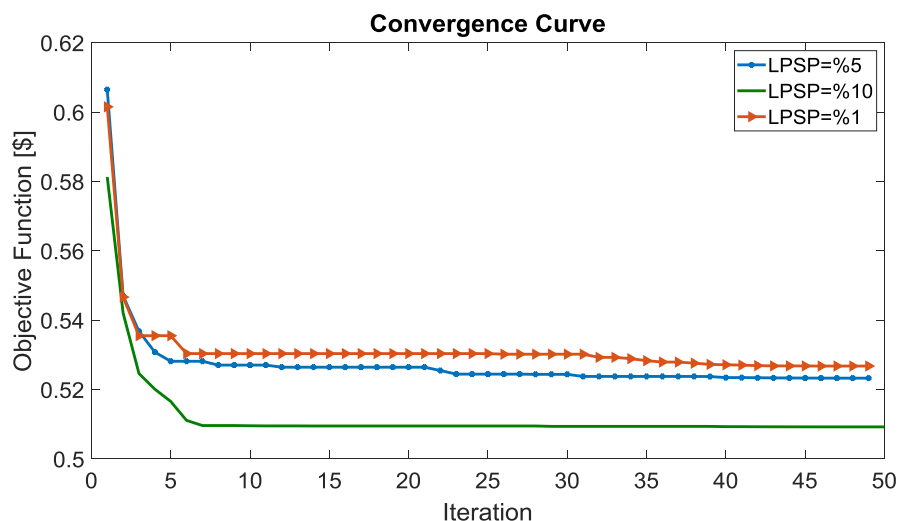


شکل (۱۱): منحنی همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی ملخ در سناریوی سوم

Figure (11): Convergence curve of GOA in Scenario 3

### ۵-۲-۳- نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن تغییرات احتمال تلفات عرضه توان (سناریوی چهارم)

در این بخش نتایج بهینه‌سازی چندهدفه سیستم هیبرید به‌ازای تغییرات احتمال تلفات عرضه توان با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ ارائه شده است. در مطالعه پایه احتمال تلفات عرضه توان برابر ۵ درصد در نظر گرفته شده بود. در این بخش اثر احتمال تلفات عرضه توان‌های ۱ و ۱۰ درصد نیز بر روی بهینه‌سازی سیستم ارزیابی شده است. منحنی همگرایی روش بهینه‌سازی ملخ حاصل از احتمال تلفات عرضه توان‌های مختلف در شکل (۱۲) ارائه شده که بیانگر افزایش مقدار تابع هدف با کاهش این احتمال است. نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن تغییرات احتمال تلفات عرضه توان در سناریوی چهارم در جدول (۸) ارائه شده است. همان‌طور که از جدول (۸) و شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، با کاهش احتمال تلفات عرضه توان و در شرایط تامین بیشتر بار سیستم، هزینه‌های سیستم افزایش می‌یابد که این مساله به دلیل تولید بیشتر توسط تعداد بیشتری از واحدهای تولیدی است.



شکل (۱۲): منحنی همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی ملخ در سناریوی چهارم

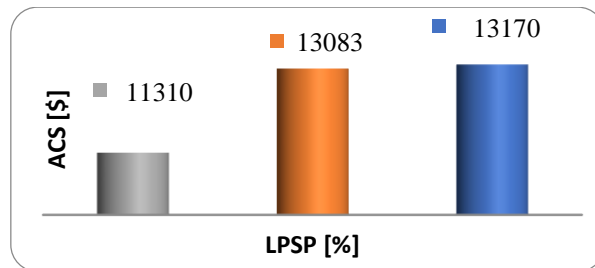
Figure (12): Convergence curve of GOA in Scenario 4



Table (8): Optimal system design with LPSP changes

جدول (۸): طراحی بهینه سیستم با در نظر گرفتن تغییرات احتمال تلفات عرضه توان

پارامتر	$N_{pv}$	$N_{wg}$	$N_{bat}$	$H_{wg}$	$\beta$	LPSP (%)	ACS (\$)	تابع هدف
LPSP=%1	۱۰	۱۳	۳۵	۳۸	۲۹	۰/۰۰۵۷	۱۳۱۷۰	۰/۵۲۶۸
LPSP=%5	۹	۱۳	۳۵	۴۰	۶۹	۰	۱۳۰۸۳	۰/۵۲۳۳
LPSP=%10	۰	۱۵	۳۴	۲۹	۳۶	۱/۴۲۱۴	۱۱۳۱۰	۰/۵۰۹۲۶



شکل (۱۳): هزینه سالیانه سیستم در سناریوی چهارم در احتمال تلفات عرضه توان‌های مختلف

Figure (13): Annual cost of the system in scenario 4 in the probability of loss of supply of different capacities

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله بهینه‌سازی سیستم هیبرید انرژی بادی-خورشیدی-باتری با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های سالیانه سیستم و احتمال تلفات عرضه توان براساس بهینه‌سازی چندهدفه ضرایب وزنی به کمک الگوریتم جدید بهینه‌سازی، بهینه‌سازی ملخ ارائه گردید. در این مطالعه، هزینه‌های سالیانه سیستم شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه نگهداری و هزینه تعویض تجهیزات در نظر گرفته شد. متغیرهای تصمیم‌گیری شامل تعداد پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، تعداد باتری‌ها، ارتفاع برج بادی و زاویه پنل خورشیدی نسبت به تابش خورشید در نظر گرفته شد که این متغیرهای تصمیم‌گیری باید با استفاده از روش بهینه‌سازی پیشنهادی به صورت بهینه تعیین شوند به گونه‌ای که هزینه‌های سالیانه سیستم کمینه و بار با احتمال تلفات عرضه توان ۵ درصد تامین گردد. در این مطالعه اثر برخی از عوامل موثر شامل راندمان اینورتر، تغییرات تقاضای بار و همچنین اثر تغییرات احتمال تلفات عرضه توان ماکزیمم بر طراحی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نتایج نشان داد که روش بهینه‌سازی ملخ قابلیت بهتری در بهینه‌سازی در مقایسه با روش ازدحام ذرات دارد و مقدار تابع هدف بهتر، در نتیجه هزینه کمتری را نتیجه داده است. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از اینورتر با راندمان بالا موجب بهبود تامین بار و کاهش هزینه‌های تولید و تامین بار می‌گردد. همچنین مشاهده شد که با افزایش تقاضای بار، تعداد واحدهای خورشیدی و بادی جهت تولید توان بیشتر، افزایش یافته و در نتیجه هزینه‌های سیستم نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این نتایج نشان داد که با کاهش میزان احتمال عدم تامین بار، هزینه‌های سیستم افزایش می‌یابد که این مساله به دلیل تولید بیشتر توسط تعداد بیشتری از واحدهای تولیدی است.

## References

### مراجع

- [1] M.A. Kashem, A.D. Le, M. Negnevitsky, G. Ledwich, "Distributed generation for minimization of power losses in distribution systems", Proceeding of the IEEE/PES, pp. 1-8, Montreal, QC, Canada, June 2006 (doi: 10.1109/PES.2006.1709179).
- [2] P. Buduma, S. J. Pinto, G. Panda, "Loss of utility detection and seamless operation of distributed generation system", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 56, no. 3, pp. 3149-3158, May/June 2020 (doi: 10.1109/TIA.2020.2976800).
- [3] N. Dkhili, J. Eynard, S. Thil, S. Grieu, "A survey of modelling and smart management tools for power grids with prolific distributed generation", Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 21, Article Number: 100284, March 2020 (doi: 10.1016/j.segan.2019.100284).
- [4] M. Salari, F. Haghghatdar-Fesharaki, "Optimal placement and sizing of distributed generations and capacitors for reliability improvement and power loss minimization in distribution networks", Journal of Intelligent

- Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 43, pp. 83-94, Dec. 2020 (doi: 20.1001.1.23223871.1399.1-1.43.6.9) (in Persian).
- [5] R. Borjali-Navesi, D. Nazarpour-Akbari, R. Ghanizadeh, P. Alemi, "Switchable capacitor bank coordination and dynamic network reconfiguration for improving operation of distribution network integrated with renewable energy resources", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 12, no. 48, pp. 43-59, March 2022 (doi: 20.1001.1.23223871.1400.12.48.2.2) (in Persian).
- [6] O. Ekren, B. Y. Ekren, "Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing", *Applied Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 592-598, Feb. 2010 (doi: 10.1016/j.apenergy.2009.05.022).
- [7] A. Hepbasli, "A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 3, pp. 593-661, April 2008 (doi: 10.1016/j.rser.2006.10.001).
- [8] H. Ghadiri, "Real-time stability assessment of power system using ANN without requiring expert experience", *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 43-49, June 2020.
- [9] M.H. Jahangir, R. Cheraghi, "Economic and environmental assessment of solar-wind-biomass hybrid renewable energy system supplying rural settlement load", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 42, Article Number: 100895, Dec. 2020 (doi: 10.1016/j.seta.2020.100895).
- [10] Z. Liu, S. Wang, M. Lim, M. Kraft, X. Wang, "Game theory-based renewable multi-energy system design and subsidy strategy optimization", *Advances in Applied Energy*, vol. 2, Article Number: 100024, May 2021 (doi: 10.1016/j.adapen.2021.100024).
- [11] H. Mehrjerdi, "Modeling, integration, and optimal selection of the turbine technology in the hybrid wind-photovoltaic renewable energy system design", *Energy Conversion Management*, vol. 205, Article Number: 112350, Feb. 2020 (doi: 10.1016/j.enconman.2019.112350).
- [12] A. Ghaffari, A. Askarzadeh, "Design optimization of a hybrid system subject to reliability level and renewable energy penetration", *Energy*, vol. 193, p. 116754, Feb. 2020 (doi: 10.1016/j.energy.2019.116754).
- [13] A.H. Mamaghani, S.A.A. Escandon, B. Najafi, A. Shirazi, F. Rinaldi, "Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia", *Renewable Energy*, vol. 97, pp. 293-305, Nov. 2016 (doi: 10.1016/j.renene.2016.05.086).
- [14] S. Sanajaoba, E. Fernandez, "Maiden application of cuckoo search algorithm for optimal sizing of a remote hybrid renewable energy System", *Renewable Energy*, vol. 96, pp. 1-10, Oct. 2016 (doi: 10.1016/j.renene.2016.04.069).
- [15] R.D. Lopez, I.R.C. Monreal, J. Yusta, "Stochastic-heuristic methodology for the optimisation of components and control variables of PV-wind-diesel-battery stand-alone systems", *Renewable Energy*, vol. 99, pp. 919-935, Dec. 2016 (doi: 10.1016/j.renene.2016.07.069).
- [16] S. Olówoşejéjé, P. Leahy, A.P. Morrison, "Optimising photovoltaic-centric hybrid power systems for energy autonomy", *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1943-1953, Nov. 2021 (doi: 10.1016/j.egy.2021.03.039).
- [17] A.H. Schleifer, C.A. Murphy, W.J. Cole, P.L. Denholm, "The evolving energy and capacity values of utility-scale PV-plus-battery hybrid system architectures", *Advances in Applied Energy*, vol. 2, Article Number: 100015, May 2021 (doi: 10.1016/j.adapen.2021.100015).
- [18] L. Amabile, D.B. Pietri, G.E. Hajje, S. Labbé, N. Petit, "Optimizing the self-consumption of residential photovoltaic energy and quantification of the impact of production forecast uncertainties", *Advances in Applied Energy*, vol. 2, Article Number: 100020, May 2021 (doi: 10.1016/j.adapen.2021.100020).
- [19] S. Saremi, S. Mirjalili, A. Lewis, "Grasshopper optimisation algorithm: Theory and application", *Advances in Engineering Software*, vol. 105, pp. 30-47, March 2017 (doi: 10.1016/j.advengsoft.2017.01.004).
- [20] M. Mohammadhosseini, H. Ghadiri, "A Combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for power systems planning subject to energy storage", *Journal of Computer and Robotics*, vol. 12, no. 1, pp. 65-76, Jan, 2019 (doi: 10.1016/j.ijepes.2011.08.023).
- [21] D.P. Rini, S.M. Shamsuddin, S.S. Yuhani. "Particle swarm optimization: technique, system and challenges", *International Journal of Computer Applications*, vol. 14, no. 1, pp. 19-26, Jan. 2011 (doi: :10.5120/ijais-3651).
- [22] H. B. Novin, H. Ghadiri, "Particle swarm optimization base explicit model predictive controller for limiting shaft torque", *Proceeding of the IEEE/CFIS*, pp. 35-40, Qazvin, Iran, March 2017 (doi: 10.1109/CFIS.2017.8003593).
- [23] M. Steczek, W. Jefimowski, A. Szeląg. "Application of grasshopper optimization algorithm for selective harmonics elimination in low-frequency voltage source inverter", *Energies*, vol. 13, no. 23, p. 6426, Dec. 2020 (doi: 10.3390/en13236426).
- [24] Z. Shi, R. Wang, T. Zhang, "Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using preference-inspired coevolutionary approach", *Solar Energy*, vol. 118, pp. 96-106, Aug. 2015 (doi: 10.1016/j.solener.2015.03.052).

- [25] M.A. Mohamed, A.M. Eltamaly, "Modeling of hybrid renewable energy system", In Modeling and Simulation of Smart Grid Integrated with Hybrid Renewable Energy Systems, New York, Springer, 2018.
- [26] R. Samani, H. Khodadadi, "A particle swarm optimization approach for sliding mode control of electromechanical valve actuator in camless internal combustion engines", Proceeding of the IEEE/EEEIC, pp. 1-4, Milan, Italy, June 2017 (doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977560).
- [27] M.R. Ahmadpour, H. Ghadiri, S.R. Hajian, "Model predictive control optimisation using the metaheuristic optimisation for blood pressure control", IET Systems Biology, vol. 15, no. 2, pp. 41-52, Feb. 2021 (doi: 10.1049/syb2.12012).
- [28] R.T. Marler, J.S. Arora, "The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights", Structural and multidisciplinary optimization, vol. 41, no. 6, pp. 853-862, Dec. 2010 (doi: 10.1007/s00158-009-0460-7).
- [29] H. Borhanazad, S. Mekhilef, V.G. Ganapathy, M. Modiri-Delshad, A. Mirtaheri, "Optimization of micro-grid system using MOPSO", Renewable Energy, vol. 71, pp. 295-306, Nov. 2014 (doi: 10.1016/j.renene.2014.05.006).
- [30] S. Diaf, D. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, A. Louche, "A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system", Energy policy, vol. 35, no. 11, pp. 5708-5718, Nov. 2007 (doi: 10.1016/j.enpol.2007.06.020).

زیر نویس ها

---

1. Distributed generation (DG)
2. Loss of power supply probability (LPSP)
3. Grasshopper optimization algorithm (GOA)
4. Particle swarm optimization (PSO)
5. State of charge (SOC)
6. Annual cost of system (ACS)