Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 73-85

Vol. 10 / No. 4/ Winter 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

Design of hybrid energy systems using bat search optimization algorithm

Ali Goldoust[1],* Mehrdad Hojjat [2], Saeed Seyyedmahdavi[3]

1-Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran
Aligoldoust@iau-shahrood.ac.ir
2-Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran
Mehrdad.hojat@iau-shahrood.ac.ir
2-Department of Electrical Engineering, Bojnourd Branch, Islamic Azad University, Bojnourd, Iran
seyyedmahdavi@bojnourdiau.ac.ir

Abstract

This paper presents a framework for the optimal design of hybrid energy systems with a bat search optimization algorithm. Wind turbines, solar panels, and combined heat and power (CHP) systems are considered power generators. The proposed framework can exchange power with the upstream network, taking into account the limitations of power exchange, the cost of installing wind turbines, solar panels, CHP systems, battery storage, and converters in the form of investment costs plus maintenance costs, CHP system fuel costs, expected load removal costs, and power exchange costs as target functions. Also, a complete set of constraints related to the hybrid energy system is included in the problem framework. Uncertainties related to the production capacity of wind turbines and solar panels along with the uncertainty of consumer power demand using the two-point estimation method are also considered in the proposed framework. The bat search algorithm is used to find the optimal solution to the optimization problem. The results of the proposed framework in the form of different scenarios are compared with the results obtained by the genetic algorithm and particle swarm, which indicates its efficiency and optimal performance in designing hybrid energy systems.

Keywords: Bat search algorithm, solar panels, two-point estimation, wind turbine, battery storage, hybrid energy system, Combined heat and power (CHP) system.

Received:2020/12/29
Accepted:2021/04/09

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص 85-73

Vol. 10 / No. 4/ Winter 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

طراحی سیستم‌های انرژی ترکیبی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی خفاش

نوع مطالعه: پژوهشی

علی گلدوست[۱]، دانشجوی دکتری مهندسی برق، مهرداد حجت[۲]، استادیار، سعید سیدمهدوی[۳]، استادیار

۱- گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.
Aligoldoust@iau-shahrood.ac.ir
۲- گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.
mehrdad.hojat@iau-shahrood.ac.ir
۳- گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد بجنورد، دانشگاه آزاد اسلامی، بجنورد ایران.
seyyedmahdavi@bojnourdiau.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک چارچوب برای طراحی بهینه سیستم‌های انرژی ترکیبی با الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی خفاش ارائه شده است. توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی و سیستم‌های ترکیبی توان و حرارت به‌عنوان تولیدکننده‌های توان در نظر گرفته شده‌اند. چارچوب پیشنهادی قابلیت تبادل توان با شبکه بالادست را با در نظر گرفتن محدودیت‌های تبادل توان دارا است. هزینه نصب توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی، سیستمهای ترکیبی توان و حرارت، ذخیره‌سازهای باتری و مبدل‌ها در قالب هزینه سرمایه‌گذاری به همراه هزینه تعمیرات و نگهداری، هزینه سوخت سیستم ترکیبی توان و حرارت، هزینه حذف بار موردانتظار و هزینه تبادلات توان به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است. همچنین، یک مجموعه کامل از محدودیت‌های مرتبط با سیستم انرژی ترکیبی در چارچوب مسئله گنجانده شده است. عدم‌قطعیت مرتبط با توان تولیدی توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی به‌همراه عدم‌قطعیت تقاضای توان مصرف‌کننده‌ها با استفاده از روش تخمین دونقطه‌ای در چارچوب پیشنهادی نیز در نظر گرفته شده است. الگوریتم جستجوی خفاش به‌منظور یافتن جواب بهینه مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. نتایج حاصل از چارچوب پیشنهادی در قالب سناریوهای مختلف با نتایج بدست آمده ناشی از بکارگیری الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات مقایسه شده که بیانگر کارآمدی و عملکرد مطلوب آن در زمینه طراحی سیستم‌های انرژی ترکیبی است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جستجوی خفاش، پنل‌های خورشیدی، تخمین دونقطه‌ای، توربین بادی، ذخیره‌سازهای باتری، سیستم انرژی ترکیبی، سیستم ترکیبی توان و حرارت.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله : -/۱۴۰۰/۰۶

نام نویسنده‌ی مسئول: مهرداد حجت

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – شاهرود - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی شاهرود - دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]

۱- مقدمه

۱-۱- سابقه و انگیزه

بحران انرژی جهان و مشکلات مربوط به آن انگیزه و محرک لازم برای استفاده بهینه از سیستم‌های انرژی را بوجود آورده است. در سال‌های اخیر، با ارائه مفهوم سیستم‌های انرژی ترکیبی، دریچه‌ای جدید در بهینه‌سازی انرژی گشوده شده است (Jamalzadeh, Hajiseyed Mirzahosseini, Faghihi, & Panahi, 2020). این سیستم‌ها قادر هستند طیف وسیعی از بارها شامل بارهای الکتریکی جریان متناوب و جریان مستقیم و همچنین بارهای حرارتی را تغذیه کنند. این نگرش جامع به انرژی، محققان را ترغیب کرده تا سیستم‌های انرژی آینده را بر اساس این ایده طراحی کنند. در مفهوم سیستم‌های انرژی ترکیبی، تکنولوژی‌های مختلفی مانند انرژی باد، انرژی خورشیدی، ذخیره‌سازها، سیستم‌های ترکیبی توان و حرارت[1] مورد استفاده قرار می‌گیرند (Theo, Lim, Ho, Hashim, & Lee, 2017). مساله اصلی در فرآیند طراحی سیستم‌های انرژی ترکیبی از یک سو مدل‌سازی و چینش دقیق و بهینه اجزای مختلف مانند توربین‌های بادی[2]، پنل‌های خورشیدی[3]، ذخیره‌سازهای باتری[4]، مبدل‌ها[5]، CHP و سایر موارد دیگر بوده و از سوی دیگر بکارگیری روش‌های بهینه‌سازی قدرتمند که با وجود متغیرهای تصمیم‌گیری غیرخطی، نامحدب و گسسته در مساله به نقطه بهینه برسند، است (Roustai, Rayati, Sheikhi, & Ranjbar, 2018). از این رو، لازم است که تا حد امکان به موارد فوق در فرآیند طراحی سیستم‌های انرژی ترکیبی پرداخته شود. در مرجع (Vahid-Pakdel, Nojavan, Mohammadi-ivatloo, & Zare, 2017)، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی برای بهره‌برداری بهینه سیستم‌های انرژی غیرقطعی با در نظر گرفتن بازار انرژی و برنامه‌های پاسخگویی بار مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل پیشنهادی این مرجع، عدم‌قطعیت‌های مرتبط با تقاضای توان، سرعت باد و قیمت بازار برق در نظر گرفته شده است. در مراجع (Salimi, Ghasemi, Adelpour, & Vaez-Zadeh, 2015; Zhang, Che, Shahidehpour, Alabdulwahab, & Abusorrah, 2017)، مدل‌های برنامه‌ریزی بهینه مبتنی بر قابلیت اطمینان برای اتصال سیستم‌های انرژی چندگانه متشکل از الکتریسیته و گاز طبیعی ارائه شده است. این مطالعات به‌دنبال مشخص نمودن نوع تجهیز و ظرفیت تجهیز در فرآیند برنامه‌ریزی سیستم انرژی ترکیبی است. در این مطالعات، محدودیت‌های فیزیکی در شبکه گاز طبیعی و شبکه توان الکتریکی درنظر گرفته شده است. در مرجع (Schulze, Friedrich, & Gautschi, 2008)، با در نظر گرفتن منابع مختلف تجدیدپذیر در یک ناحیه با بارهای ترکیبی، طراحی یک سیستم انرژی ترکیبی انجام شده است. گزینه‌های طراحی در این سیستم انرژی ترکیبی که در حالت مستقل از شبکه بالادست طراحی شده، شامل توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی و دیزل ژنراتور است. در مرجع (Barmayoon, Fotuhi-Firuzabad, Rajabi-Ghahnavieh, & Moeini-Aghtaie, 2016)، امکان استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز برای بهبود عملکرد مالی و فنی سیستم‌های انرژی ترکیبی مستقل مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر بررسی شده است. در این روش، مساله پخش بار اقتصادی برای سیستم‌های ذخیره‌ساز توان و حرارت مدل‌سازی شده است. تابع هدف مطالعه فوق کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری از سیستم انرژی ترکیبی مستقل است. در مرجع (Ju et al., 2016)، برای کاهش تاثیر عدم‌قطعیت توربین بادی و پنل خورشیدی در یک نیروگاه مجازی متشکل از توربین بادی، پنل خورشیدی، سیستم‌های ذخیره ساز انرژی و توربین گازی سنتی یک مدل بهره‌برداری تصادفی دو سطحی ارائه شده که به‌دنبال کمینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری است. همچنین مدل ارائه شده بر روی یک مورد مطالعه‌ای واقعی در کشور چین ارزیابی شده است. در مرجع (Aziz, Tajuddin, Adzman, Azmi, & Ramli, 2019)، یک سیستم تامین انرژی ترکیبی برای تامین انرژی مورد نیاز یک منطقه روستایی در کشور عراق طراحی و مورد ارزیابی فنی، اقتصادی و محیطی قرار گرفته شده است. طراحی‌های مذکور برای سیستم‌های انرژی ترکیبی همگی بصورت جدا از شبکه مورد بررسی قرار گرفته‌اند و از منابع انرژی مختلفی اعم از پنل خورشیدی و دیزل ژنراتور بهره برده‌اند. همچنین آنالیز حساسیت برای بازده باتری‌ها، ظرفیت پنل‌های خورشیدی و کمترین بار تولیدی بررسی شده است. در مرجع (Campana, Wästhage, Nookuea, Tan, & Yan, 2019)، یک شبیه‌سازی دینامیکی فنی-اقتصادی و مدل بهینه‌سازی برای چندین سیستم انرژی تجدیدپذیر متشکل از پنل خورشیدی و توربین بادی در دو صورت متصل و جدا از شبکه بالادست توسعه داده شده و مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. در مرجع (Rajbongshi, Borgohain, & Mahapatra, 2017)، یک سیستم انرژی ترکیبی با تمرکز بر دیزل ژنراتور، پنل خورشیدی و انرژی زیست توده توسعه داده شده است. سیستم فوق برای سطوح مختلف بار اجرا شده است. همچنین هزینه انرژی برای بار پیک و سطوح مختلف بار محاسبه شده است. علاوه برآن، یک مقایسه جامع هزینه انرژی بین سیستم انرژی ترکیبی متصل و جدا از شبکه بالادست صورت گرفته است. در مرجع (Lu et al., 2020)، با درنظر گرفتن یک روش بهینه‌سازی موثر برای طراحی یک سیستم انرژی ترکیبی مستقل متشکل از CHP، پنل خورشیدی، توربین باد، ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی و همچنین خودروهای برقی استفاده شده است. تابع هدف مدل پیشنهادی این مرجع کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و هزینه انتشار آلاینده‌های زیست محیطی است. در مرجع (Dolatabadi & Mohammadi-Ivatloo, 2017)، مساله عدم‌قطعیت در دسترسی به انرژی‌های تجدیدپذیر مانند پنل خورشیدی و توربین بادی و مدل‌سازی آن‌ها در سیستم‌های انرژی ترکیبی مستقل بررسی و مرتفع شده است. برای این منظور از روش‌های مونت کارلو و آنالیز حساسیت استفاده شده است. در مرجع (Ramli, Bouchekara, & Alghamdi, 2018)، الگوریتم تکاملی دیفرانسیل برای یافتن اندازه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]

بهینه یک سیستم انرژی ترکیبی مستقل متشکل از توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی و دیزل ژنراتور استفاده‌شده است.

مطالعات فوق نشان می‌دهد که برخی نقاط ضعف در جبهه مدل‌سازی از قبیل استفاده از توابع هدف ناکارآمد و ناکافی، در نظر نگرفتن قیود فنی و اقتصادی و در جبهه تکنیک‌های بهینه‌سازی تکاملی از قبیل دقت ناکافی، همگرایی زودرس و عدم انعطاف‌پذیری وجود دارد. ازاین‌رو، در این مقاله، یک چارچوب برای طراحی بهینه سیستم‌های انرژی ترکیبی با الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی خفاش ارائه شده است. المان‌های چارچوب پیشنهادی شامل توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی، CHP و ذخیره‌سازهای باتری است. ارتباط سیستم انرژی ترکیبی پیشنهادی با با شبکه بالادست را با در نظر گرفتن محدودیت‌های تبادل توان نیز در نظر گرفته شده است. هزینه نصب المان‌ها در قالب هزینه سرمایه‌گذاری به همراه هزینه تعمیرات و نگهداری، هزینه سوخت CHP، هزینه حذف بار موردانتظار و هزینه تبادلات توان به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است. همچنین، یک مجموعه کامل از محدودیت‌های مرتبط با سیستم انرژی ترکیبی در چارچوب گنجانده شده است. عدم‌قطعیت مرتبط با توان تولیدی توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی به‌همراه عدم‌قطعیت تقاضای توان مصرف‌کننده‌ها با استفاده از روش تخمین دونقطه‌ای[۶] در نظر گرفته شده است. الگوریتم جستجوی خفاش[۷] به‌منظور یافتن جواب بهینه مسئله استفاده شده است و نتایج آن با الگوریتم‌های ازدحام ذرات[۸] و ژنتیک[۹] مقایسه شده است. نوآوری‌ها و سهم مشارکت مطالعه فوق در زمینه طراحی سیستم انرژی ترکیبی به شرح زیر بیان می‌شود.

۱) در نظر گرفتن یک طیف نسبتا کامل از توابع هدف و محدودیت‌های فنی و اقتصادی در چارچوب پیشنهادی.

۲) در نظر گرفتن عدم‌قطعیت مرتبط با توان تولیدی توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی به‌همراه عدم‌قطعیت تقاضای توان مصرف‌کننده‌ها.

۳) بکارگیری رویکرد تخمین دونقطه‌ای به‌منظور غلبه بر ماهیت تصادفی چارچوب پیشنهادی.

۴) بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی خفاش برای غلبه بر مشکلات ماهیت غیرمحدب، غیرخطی و آمیخته با اعداد صحیح چارچوب پیشنهادی و مقایسه نتایج با الگوریتم‌های مرسوم.

ادامه این مقاله در پنج بخش سازماندهی‌شده است. بخش ۲ مدل‌سازی سیستم انرژی ترکیبی را توصیف می‌کند. الگوریتم حل پیشنهادی در بخش ۳ گزارش‌شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۴ ارائه‌شده است. در نهایت، بخش ۵ به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

۲- مدل‌سازی سیستم انرژی ترکیبی

سیستم انرژی ترکیبی در این مقاله شامل توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی، CHP، ذخیره‌سازهای باتری‌های، و بارهای AC، DC و حرارتی است. لازم به ذکر است که شماتیک سیستم انرژی ترکیبی مستقل موردمطالعه در این مقاله در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است. جهت بهینه سازی این سیستم لازم است که مدل تجهیزات مورد استفاده در این سیستم به صورت کامل توسعه داده شوند.

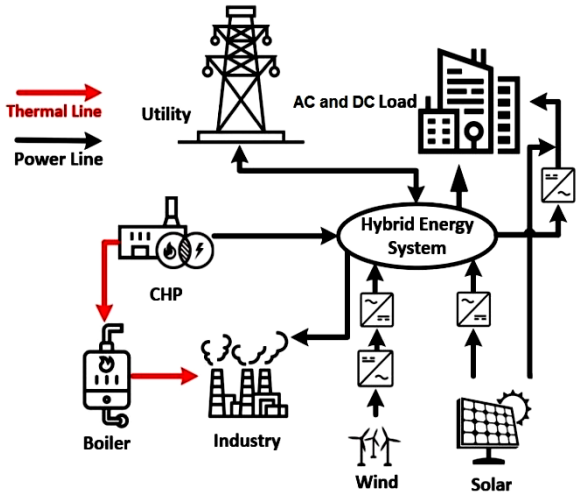
۲-۱- مدل‌سازی تجهیزات

پنل‌های خورشیدی:

توان خروجی پنل‌های خورشیدی به شرایط آب و هوایی، سطح تابش و دمای پنل‌ها بستگی دارد. توان خروجی پنل‌های خورشیدی با استفاده از روابط (۱) و (۲) مدل شده است (Aziz et al., 2019; Campana et al., 2019; Dolatabadi & Mohammadi-Ivatloo, 2017; Ju et al., 2016; Lu et al., 2020; Rajbongshi et al., 2017; Schulze et al., 2008).

$$P_{sp}(t) = N_{sp}.\left\{\tilde{p}_{sp}.\left(\upsilon/\upsilon_{ref}\right).\left[1+\vartheta.\left(T_c - T_{ref}\right)\right]\right\}; \quad \forall t \in T \tag{۱}$$

$$T_c = T_{air} + \left[\left(\left(T_{norm} - 20\right)/800\right).\upsilon\right] \tag{۲}$$



شکل (۱): سیستم انرژی ترکیبی

در روابط فوق، N_{sp} تعداد پنل‌های خورشیدی، $\tilde{p}_{sp}$ توان نامی پنل خورشیدی [KW]، υ تابش خورشید [W/m²]، تابش در شرایط تست استاندارد [W/m²]، ϑ ضریب دمای پنل خورشیدی [1/C]، T_{ref} دمای سلول پنل خورشیدی [C]، T_{air} دمای هوا [C] و T_{norm} دمای بهره‌برداری پنل خورشیدی [C] هستند.

توربین‌های بادی:

توربین‌های بادی دارای چهار ناحیه عملکردی بوده که باتوجه به سرعت وزش باد تعیین می‌شوند. در ناحیه اول و ناحیه چهارم توان تولیدی توربین بادی صفر است. در ناحیه دوم عملکردی توان خروجی توربین به صورت تابع توان سوم از سرعت وزش باد می‌باشد. توان خروجی توربین باد در ناحیه سوم که به عنوان ناحیه توان ثابت یاد می‌شود ثابت و برابر مقدار نامی است (Barmayoon et al., 2016; Campana et al., 2019; Dolatabadi & Mohammadi-Ivatloo, 2017; Ju et al., 2016; Lu et al., 2020; Schulze et al., 2008). توان خروجی توربین‌های بادی با استفاده از روابط (۳) و (۴) مدل شده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]

$$P_{\text{wt}}(t) = N_{\text{wt}}.\begin{cases} 0 & ;\forall v(t) \le v_{\text{cut-in}} \\ a \times v(t)^3 + b \times \tilde{p}_{\text{wt}} & ;\forall v_{\text{cut-in}} < v(t) < \tilde{v} \\ \tilde{p}_{\text{wt}} & ;\forall \tilde{v} < v(t) < v_{\text{cut-out}} \\ 0 & ;\forall v(t) \ge v_{\text{cut-out}} \end{cases} ;\forall t \in \text{T} \quad (۳)$$

$$a = \frac{\tilde{p}_{\text{wt}}}{\tilde{v}^3 - v_{\text{cut-in}}^3}, b = \frac{v_{\text{cut-in}}^3}{\tilde{v}^3 - v_{\text{cut-in}}^3} \quad (۴)$$

در این روابط، N_{wt} تعداد توربین‌های بادی، $\tilde{p}_{\text{wt}}$ توان نامی توربین بادی [kW]، $v(t)$ سرعت توربین بادی $[m/s]$، $v_{\text{cut-in}}$ سرعت قطع پایین توربین بادی $[m/s]$، $v_{\text{cut-out}}$ سرعت قطع بالای توربین بادی $[m/s]$، $\tilde{v}$ سرعت نامی توربین بادی $[m/s]$ هستند.

سیستم ترکیبی توان و حرارت:

سیستم CHP با مصرف گاز طبیعی، توان الکتریکی و حرارت تولید می‌کند. انرژی گرمایی تولیدشده توسط شبکه گرمایشی برای تغذیه بارهای حرارتی ارسال می‌گردد و همچنین توان الکتریکی تولیدشده نیز برای تامین بارهای الکتریکی سیستم انرژی ترکیبی استفاده می‌شود. سیستم CHP با استفاده از رابطه (۵) مدل می‌گردد (Jia et al., 2016; Lu et al., 2020).

$$P_{\text{chp}}(t) = \alpha_{\text{chp}}.H_{\text{chp}} + \beta_{\text{chp}}.T_{\text{chp}} + \gamma_{\text{chp}} \quad (۵)$$

همچنین، میزان گاز مصرفی سیستم CHP با استفاده از معادله (۶) بیان می‌گردد.

$$f_{\text{chp}}(t) = \frac{3.412}{\text{GHV}}\left(\frac{P_{\text{chp}}(t) + H_{\text{chp}}(t)}{\eta_{\text{chp}}}\right) \quad (۶)$$

در این روابط، $P_{\text{chp}}(t)$ و H_{chp} به‌ترتیب توان الکتریکی و توان حرارتی تولیدی سیستم CHP [KW]، T_{chp} و GHV به‌ترتیب دمای خروجی و ارزش حرارتی ناخالص سیستم CHP [C]، η_{chp} راندمان سیستم CHP [٪] و α_{chp} و β_{chp} و γ_{chp} ضرایب منحنی مصرف سوخت سیستم CHP هستند.

ذخیره‌سازهای باتری:

ذخیره‌سازها به‌عنوان پشتیبان در سیستم انرژی ترکیبی مستقل عمل می‌کنند. در صورت برابری توان تولیدی توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی، CHP و توان مبادله‌شده با شبکه بالادستی درحضور محدودیت‌های انتقال توان با توان موردنیاز مصرف‌کننده‌ها، ظرفیت ذخیره باتری‌ها تغییر نمی‌کند. اما، در صورتی که توان تولیدی این تجهیزات و توان مبادله‌شده با شبکه بالادستی درحضور محدودیت‌های انتقال توان بیشتر از توان موردنیاز مصرف‌کننده‌ها باشد، توان مازاد صرف شارژ باتری‌ها می‌شود. فرآیند شارژ باتری‌ها با استفاده از رابطه (۷) الی رابطه (۹) مدل می‌شود (Aziz et al., 2019; Lu et al., 2020).

$$E_{\text{bs}}(t) = E_{\text{bs}}(t-1).(1-\tau) + P_{\text{ch-bs}}(t).\eta_{\text{ch-bs}}; \forall t \in \text{T} \quad (۷)$$

$$P_{\text{ch-bs}}(t) = \begin{cases} dP_{\text{ch-bs}}(t) & dP_{\text{ch-bs}}(t) \le N_{\text{c-bs}}.\tilde{P}_{\text{c}} \\ N_{\text{c-bs}}.\tilde{P}_{\text{c}} & dP_{\text{ch-bs}}(t) > N_{\text{c-bs}}.\tilde{P}_{\text{c}} \end{cases}; \forall t \in \text{T} \quad (۸)$$

$$dP_{\text{ch-bs}}(t) = \Big[p_{\text{chp}}(t) + p_{\text{buy}}(t) + P_{\text{sp}}(t).\eta_{\text{inv}} + \ldots \ldots P_{\text{wt}}(t).\eta_{\text{con}}^2\Big] - \big(P_{\text{load}}(t) + P_{\text{sell}}(t)\big); \forall t \in \text{T} \quad (۹)$$

در این روابط، $E_{\text{bs}}(t)$ مقدار شارژ ذخیره‌ساز باتری در زمان t [kWh]، τ نرخ خود دشارژی ساعتی ذخیره‌ساز باتری، $P_{\text{ch-bs}}(t)$ توان شارژ ذخیره‌ساز باتری در زمان t [kW]، $\eta_{\text{ch-bs}}$ راندمان شارژ ذخیره‌ساز باتری [٪]، $dP_{\text{ch-bs}}(t)$ توان شارژ ذخیره‌ساز باتری در زمان t [kW]، η_{con} راندمان مبدل [٪]، $p_{\text{buy}}(t)$ توان خریداری‌شده از شبکه بالادست [kW]، $P_{\text{sell}}(t)$ توان فروخته‌شده به شبکه بالادست [kW]، $P_{\text{load}}(t)$ تقاضای توان مصرف‌کنندگان [kW]، $\tilde{P}_{\text{c}}$ توان نامی مبدل [kW]، $N_{\text{c-bs}}$ تعداد مبدل‌های سیستم ذخیره‌ساز باتری هستند.

در صورتی که توان تولیدی این تجهیزات و توان مبادله‌شده با شبکه بالادستی درحضور محدودیت‌های انتقال توان کمتر از توان موردنیاز مصرف‌کننده‌ها باشد، کمبود توان مازاد توسط باتری‌ها تامین می‌شود. فرآیند دشارژ باتری‌ها با استفاده از رابطه (۱۰) الی رابطه (۱۲) مدل می‌شود (Aziz et al., 2019; Lu et al., 2020).

$$E_{\text{bs}}(t) = E_{\text{bs}}(t-1).(1-\tau) - P_{\text{dch-bs}}(t).\eta_{\text{dch-bs}}; \forall t \in \text{T} \quad (۱۰)$$

$$P_{\text{dch-bs}}(t) = \begin{cases} dP_{\text{dch-bs}}(t) & dP_{\text{dch-bs}}(t) \le N_{\text{c-bs}}.\tilde{P}_{\text{c}} \\ N_{\text{c-bs}}.\tilde{P}_{\text{c}} & dP_{\text{dch-bs}}(t) > N_{\text{c-bs}}.\tilde{P}_{\text{c}} \end{cases}; \forall t \in \text{T} \quad (۱۱)$$

$$dP_{\text{dch-bs}}(t) = \big(P_{\text{load}}(t) + P_{\text{sell}}(t)\big) - \Big[p_{\text{chp}}(t) + \ldots \ldots P_{\text{buy}}(t) + P_{\text{sp}}(t).\eta_{\text{con}} + P_{\text{wt}}(t).\eta_{\text{con}}^2\Big]; \forall t \in \text{T} \quad (۱۲)$$

در روابط فوق، $\eta_{\text{dch-bs}}$ راندمان دشارژ ذخیره‌ساز باتری [٪] و $dP_{\text{ch-bs}}(t)$ توان دشارژ ذخیره‌ساز باتری در زمان t [kW] هستند.

۲-۲- مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی

چارچوب پیشنهادی برای طراحی بهینه سیستم‌های انرژی ترکیبی یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی، نامحدب، آمیخته با اعدادصحیح و اندازه بزرگ است که به یک مجموعه کامل از محدودیت‌های فنی، امنیتی، اقتصادی و منطقی محدود شده است.

توابع هدف:

هدف اصلی از طراحی سیستم انرژی ترکیبی یافتن تعداد و ظرفیت بهینه تجهیزات است به گونه‌ای که سیستم فوق با کمترین هزینه قادر به

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]

پاسخگویی به بار باشد. در مسئله بهینه‌سازی مرتبط با طراحی سیستم انرژی ترکیبی، هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه تعمیرونگهداری، هزینه سوخت و هزینه حذف بار موردانتظار مطابق با رابطه (۱۳) به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند.

$$\text{Min } C_{\mathrm{T}} = \mathrm{W_I}.C_{\mathrm{I}} + \mathrm{W_M}.C_{\mathrm{M}} + \mathrm{W_F}.C_{\mathrm{F}} + \mathrm{W_L}.C_{\mathrm{L}} + \mathrm{W_C}.C_{\mathrm{C}} \quad (۱۳)$$

در رابطه فوق، $\mathrm{W_I}$، $\mathrm{W_M}$، $\mathrm{W_F}$، $\mathrm{W_L}$ و $\mathrm{W_C}$ به‌ترتیب ضرایب وزن‌دهی مرتبط با هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه تعمیرونگهداری، هزینه سوخت، هزینه حذف بار و هزینه تبادلات توان با شبکه بالادست هستند. همچنین، C_{I}، C_{M}، C_{F}، C_{L} و C_{C} به‌ترتیب هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه تعمیرونگهداری، هزینه سوخت، هزینه حذف بار و هزینه تبادلات توان با شبکه بالادست هستند. همچنین، ضرایب وزن‌دهی برای توابع هدف مختلف می‌توانند دارای مقداری بین صفر تا یک باشند. در این پژوهش، ضریب وزن‌دهی مرتبط با هزینه سرمایه‌گذاری ، $\mathrm{W_I}$، برابر یک در نظر گرفته‌شده است. این ضرایب برای توابع هدف دیگر برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. دلیل این امر ناشی از اهمیت هزینه سرمایه‌گذاری در مقایسه با توابع هدف دیگر است.

هزینه سرمایه‌گذاری مرتبط با تجهیزات سیستم انرژی ترکیبی مستقل با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌گردد (Lu et al., 2020; Schulze et al., 2008).

$$C_{\mathrm{I}} = \mathrm{CRC}.\left[N_{\mathrm{sp}}.C_{\mathrm{I,sp}} + N_{\mathrm{wt}}.C_{\mathrm{I,wt}} + N_{\mathrm{bs}}.C_{\mathrm{I,bs}} \ldots + N_{\mathrm{con}}.C_{\mathrm{I,con}} + C_{\mathrm{I,chp}}\right] \quad (۱۴)$$

$$\mathrm{CRC} = m.(1+m)^k \Big/ \left[(1+m)^k - 1\right] \quad (۱۵)$$

در روابط فوق، CRC ضریب بازگشت سرمایه، m نرخ بهره، k طول عمر سیستم انرژی ترکیبی، $C_{\mathrm{I,sp}}$، $C_{\mathrm{I,wt}}$، $C_{\mathrm{I,bs}}$، $C_{\mathrm{I,con}}$ و $C_{\mathrm{I,chp}}$ به‌ترتیب هزینه سرمایه‌گذاری مرتبط با پنل خورشیدی، توربین بادی، ذخیره‌ساز باتری، مبدل و سیستم CHP هستند.

با توجه به اینکه افق طراحی سیستم انرژی ترکیبی، طول عمر باتری‌ها و مبدل‌ها به‌ترتیب برابر ۲۰، ۵ و ۱۰ سال در نظر گرفته شده است، لازم است که این تجهیزات به ترتیب ۳ و ۱ بار در افق طراحی تعویض گردند. در نتیجه، هزینه سرمایه‌گذاری مرتبط با این تجهیزات با استفاده از روابط (۱۶) و (۱۷) بازنویسی می‌گردند (Lu et al., 2020; Schulze et al., 2008).

$$C_{\mathrm{I,bs}} = C'_{\mathrm{I,bs}}.\left[1+\frac{1}{(1+m)^5}.\left(1+\frac{1}{(1+m)^5}.\left(1+\frac{1}{(1+m)^5}\right)\right)\right] \quad (۱۶)$$

$$C_{\mathrm{I,con}} = C'_{\mathrm{I,con}}.\left(1+\frac{1}{(1+m)^{10}}\right) \quad (۱۷)$$

هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم انرژی ترکیبی با استفاده از رابطه (۱۸) تعیین می‌شود (Aziz et al., 2019; Barmayoon et al., 2016; Campana et al., 2019; Ju et al., 2016; Rajbongshi et al., 2017; Salimi et al., 2015; Vahid-Pakdel et al., 2017; Zhang et al., 2017).

$$C_{\mathrm{M}} = N_{\mathrm{sp}}.C_{\mathrm{M,sp}} + N_{\mathrm{wt}}.C_{\mathrm{M,wt}} + \ldots \ldots C_{\mathrm{M,chp}}.\left(\sum_{t=1}^{\mathrm{T}} \chi_{\mathrm{chp}}(t).P_{\mathrm{chp}}(t)\right); \forall t \in \mathrm{T} \quad (۱۸)$$

در رابطه فوق، $\chi_{\mathrm{chp}}(t)$ متغیر باینری که در صورت در مدار بودن سیستم CHP برابر ۱ و در غیر اینصورت برابر صف است. همچنین، $C_{\mathrm{M,sp}}$، $C_{\mathrm{M,wt}}$ و $C_{\mathrm{M,chp}}$ به‌ترتیب هزینه تعمیرونگهداری پنل خورشیدی، توربین بادی و سیستم CHP هستند.

هزینه سوخت CHP نیز با استفاده از رابطه (۱۹) بدست می‌آید (Jia et al., 2016; Lu et al., 2020).

$$\sum_{t=1}^{\mathrm{T}} \upsilon_{\mathrm{gas}}(t).f_{\mathrm{chp}}(t); \forall t \in \mathrm{T} \quad (۱۹)$$

در رابطه فوق، $\upsilon_{\mathrm{gas}}(t)$ هزینه سوخت سیستم CHP در زمان t $[\$/m^3]$ است

قابلیت اطمینان در طراحی سیستم‌های انرژی ترکیبی معمولا به‌صورت یک محدودیت مدل می‌گردد. این محدودیت نمی‌تواند یک نمایش واقع‌بینانه از شدت کمبود ظرفیت ناشی از حذف بار نشان دهد. در این مقاله، یک معیار قابلیت اطمینان ارزش محور برای تخمین واقع‌بینانه از هزینه حذف بار موردانتظار مبتنی بر روابط (۲۰) و (۲۱) توسعه داده شده است (Dolatabadi & Mohammadi-Ivatloo, 2017).

$$C_{\mathrm{L}} = \mathrm{ECOST.ENS} \quad (۲۰)$$

$$\mathrm{ENS} = \sum_{t=1}^{\mathrm{T}} P_{\text{load-sh}}(t); \forall t \in \mathrm{T} \quad (۲۱)$$

در روابط فوق، ECOST هزینه انرژی [\$/kWh]، ENS انرژی تامین نشده [kWh] و $P_{\text{load-sh}}(t)$ توان بار حذف‌شده هستند.

هزینه تبادلات توان با شبکه بالادست نیز با استفاده از رابطه (۲۲) مدل شده است (Lu et al., 2020).

$$C_{\mathrm{C}} = \sum_{t=1}^{\mathrm{T}} (P_{\mathrm{buy}}(t).\pi_{\mathrm{buy}}(t) - P_{\mathrm{sell}}(t).\pi_{\mathrm{sell}}(t)); \forall t \in \mathrm{T} \quad (۲۲)$$

در رابطه فوق، $\pi_{\mathrm{buy}}(t)$ و $\pi_{\mathrm{sell}}(t)$ به‌ترتیب هزینه خرید و فروش توان از شبکه بالادست [\$/kW] هستند.

محدودیت‌ها:

محدودیت‌های مرتبط با مسئله طراحی بهینه سیستم انرژی ترکیبی با روابط (۲۳) الی (۳۵) مدل می‌شوند (Aziz et al., 2019; Barmayoon et al., 2016; Campana et al., 2019; Dolatabadi & Mohammadi-Ivatloo, 2017; Ju et al., 2016; Lu et al., 2020; Rajbongshi et al., 2017; Salimi et al., 2015; Schulze et al., 2008; Vahid-Pakdel et al., 2017; Zhang et al., 2017).

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]

$$P_{sp}(t)+P_{wt}(t)+P_{chp}(t)+P_{buy}(t)= P_{sell}(t)+P_{load}(t);\forall t\in T \quad (۲۳)$$

$$0\le P_{buy}(t)\le P_{buy}^{max};\forall t\in T \quad (۲۴)$$

$$0\le P_{sell}(t)\le P_{sell}^{max};\forall t\in T \quad (۲۵)$$

$$N_{sp}=\text{Integer};0\le N_{sp}\le N_{sp}^{max} \quad (۲۶)$$

$$N_{wt}=\text{Integer};0\le N_{wt}\le N_{wt}^{max} \quad (۲۶)$$

$$N_{bs}=\text{Integer};0\le N_{bs}\le N_{bs}^{max} \quad (۲۸)$$

$$N_{con}=\varphi\left(\frac{\max(P_{load})}{P_{dc/ac\text{-}con}}\right)+\varphi\left(\frac{N_{wt}.\tilde{p}_{wt}}{P_{ac/dc\text{-}con}}\right)+N_{CI-B}+\ldots \ldots\varphi\left(\frac{\max(P_{sp})}{P_{dc/dc\text{-}con}}\right)+\varphi\left(\frac{\tilde{p}_{wt}}{P_{ac/dc\text{-}con}}\right) \quad (۲۹)$$

$$0\le p_{chp}(t)\le p_{chp}^{max};\forall t\in T \quad (۳۰)$$

$$-rp_{chp}^{min}\le p_{chp}(t)-p_{chp}(t-1)\le rp_{chp}^{max};\forall t\in T \quad (۳۱)$$

$$dP_{ch\text{-}bs}(t)=\left[p_{chp}(t)+p_{buy}(t)+P_{sp}(t).\eta_{inv}+\ldots \ldots P_{wt}(t).\eta_{inv}^2\right]-\left(P_{load}(t)+P_{sell}(t)\right);\forall t\in T \quad (۳۲)$$

$$dP_{dch\text{-}bs}(t)=\left(P_{load}(t)+P_{sell}(t)\right)-\left[p_{chp}(t)+\ldots \ldots P_{buy}(t)+P_{sp}(t).\eta_{inv}+P_{wt}(t).\eta_{inv}^2\right];\forall t\in T \quad (۳۳)$$

$$E_{bs}^{min}\le E_{bs}(t)\le E_{bs}^{max};\forall t\in T \quad (۳۴)$$

$$E_{bs}^{min}=(1-\Psi_{bs}).\Phi_{bs} \quad (۳۵)$$

رابطه (۲۳) بیان‌کننده توازن توان در سیستم انرژی ترکیبی است. روابط (۲۴) و (۲۵) به‌ترتیب بیان‌کننده محدودیت‌های تبادل توان در زمینه خرید و فروش با شبکه بالادست است. رابطه (۲۶) الی رابطه (۲۸) به‌ترتیب بیانگر حداکثر تعداد مجاز پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و ذخیره‌سازهای باتری در سیستم انرژی مستقل ترکیبی هستند. رابطه (۲۹) بیانگر تعداد مجاز مبدل‌ها در سیستم انرژی مستقل ترکیبی است. در این رابطه، عملگر φ مقدار بدست آمده را به نزدیک‌ترین عدد صحیح بزرگتر تبدیل می‌کند. رابطه (۳۰) محدوده مجاز تولید توان توسط سیستم CHP را بیان می‌کند. رابطه (۳۱) بیان‌کننده این است که افزایش یا کاهش توان خروجی سیستم CHP در هر گام زمانی بهره‌برداری بایستی در محدوده مجاز تعیین‌شده باشد. روابط (۳۲) و (۳۳) به‌ترتیب نرخ شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای باتری را نشان می‌دهند. رابطه (۳۴) نیز محدوده مجاز شارژ ذخیره‌ساز باتری را نشان می‌دهد. رابطه (۳۵) بیانگرحداقل مقدار شارژ باتری است که مبتنی بر عمق شارژ محاسبه می‌شود. در روابط فوق، P_{buy}^{max} و P_{sell}^{max} به‌ترتیب حداکثر و حداقل توان قابل خرید و فروش هستند [kW]. همچنین، N_{sp}^{max}، N_{wt}^{max} و N_{bs}^{max} به‌ترتیب حداکثر تعداد پنل خورشیدی، توربین بادی و ذخیره‌ساز باتری قابل‌نصب در سیستم انرژی ترکیبی است. همچنین، p_{chp}^{max}، rp_{chp}^{min} و rp_{chp}^{max} به‌ترتیب حداکثر توان سیستم CHP و نرخ کاهش و افزایش توان سیستم CHP در هر گام زمانی است. علاوه بر این، E_{bs}^{min} و E_{bs}^{max} به‌ترتیب حداقل و حداکثر مقدار مجاز شارژ ذخیره‌ساز باتری [kWh]، Ψ_{bs} و Φ_{bs} حداکثر عمق دشارژ ذخیره‌ساز باتری [٪] و ظرفیت نامی سیستم ذخیره‌ساز باتری [kWh] هستند.

۳- الگوریتم حل مسئله

۳-۱- الگوریتم جستجوی خفاش

هوش جمعی یکی از قوی‌ترین تکنیک‌های بهینه‌سازی است که برمبنای رفتارهای گروهی است. الگوریتم BS یک الگوریتم الهام‌گرفته از رفتار جمعی خفاش‌ها در محیط طبیعی است که در سال ۲۰۱۰ توسط Yang ارائه شد (Yang & He, 2013; Yılmaz & Küçüksille, 2015). این الگوریتم بر مبنای استفاده از خاصیت انعکاس صدا توسط خفاش‌ها است. در این الگوریتم، I خفاش در هنگام پرواز فرکانس، بلندی و موقعیت یک صدا را به روز می‌کنند. در این الگوریتم در ابتدا مقادیر اولیه موقعیت و سرعت به‌ترتیب با استفاده از روابط (۳۶) و (۳۷) تخمین زده می‌شود (Yang & He, 2013; Yılmaz & Küçüksille, 2015).

$$x_i^n=x_i^{min}+\text{rand}.(x_i^{max}-x_i^{min});\forall i\in I,\forall n\in N \quad (۳۶)$$

$$v_i^n=v_i^{min}+\text{rand}.(x_i^{max}-x_i^{min});\forall i\in I,\forall n\in N \quad (۳۷)$$

در روابط فوق، x_i^{min} و x_i^{max} به‌ترتیب حدود پایین و بالای مرتبط با موقعیت خفاش i هستند. همچنین، v_i^{min} حد پایین مرتبط با سرعت خفاش i هستند. الگوریتم به دو بخش اصلی تقسیم‌بندی می‌شود: ۱) به‌روزکردن جهانی و ۲) به‌روزکردن محلی. به‌روز کردن جهانی با استفاده از معادلات (۳۸) الی (۴۰) صورت می‌پذیرد.

$$f_i=f_i^{min}+\text{rand}.(f_i^{max}-f_i^{min});\forall i\in I \quad (۳۸)$$

$$v_i^n=v_i^{n-1}+f_i.(x_i^n-x_{best});\forall i\in I,\forall n\in N \quad (۳۹)$$

$$x_i^n=x_i^{n-1}+v_i^n;\forall i\in I,\forall n\in N \quad (۴۰)$$

در روابط فوق، f_i، f_i^{min} و f_i^{max} به‌ترتیب فرکانس پالس، حداقل مقدار مجاز فرکانس پالس و حداکثر مقدار مجاز فرکانس پالس مرتبط با خفاش i هستند. همچنین، x_{best} بهترین پاسخ است.

پس از آنکه موقعیت‌های اولیه به‌صورت تصادفی انتخاب و به‌روز شدند، بخش به‌روزکردن محلی شروع به کار می‌کند. در ابتدای این بخش، نرخ پالس کمترین مقدار و بلندی صدا بیشترین مقدار را دارا خواهد بود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]

سپس به تدریج با یافتن شکار، نرخ ارسال پالس افزایش می‌یابد و بلندی صداهای منتشر شده کم می‌شود. در هر تکرار بلندی صدا و نرخ انتشار موج به‌ترتیب با استفاده از روابط (۴۱) و (۴۲) اصلاح می‌گردد.

$$A_i^{n+1} = \alpha.A_i^n; \forall i \in \mathrm{I}, \forall n \in \mathrm{N} \quad (۴۱)$$

$$r_i^{n+1} = r^0.(1-\exp(-\gamma.n)); \forall i \in \mathrm{I}, \forall n \in \mathrm{N} \quad (۴۲)$$

در روابط فوق، A_i^n دامنه صدای خفاش i در تکرار n، α ضریب ثابت بین صفر و یک، r^0 سرعت انتشار موج خفاش i در تکرار اولیه و γ یک ضریب ثابت هستند.

برای بهبود الگوریتم مکان‌یابی محلی، یک پرش تصادفی حول موقعیت فعلی با استفاده از رابطه زیر انجام می‌پذیرد.

$$x_{i,\mathrm{new}} = x_{i,\mathrm{old}} + \varepsilon.A_i^n; \forall i \in \mathrm{I}, \forall n \in \mathrm{N} \quad (۴۳)$$

۲-۳- الگوریتم جستجوی خفاش گسسته

جهت استفاده از الگوریتم BS برای طراحی بهینه سیستم‌های انرژی ترکیبی نیاز است تا این الگوریتم به صورت گسسته طراحی و مدل گردد. برای این منظور و در جهت داشتن حداکثر تغییر در ساختار الگوریتم اصلی، روابط به صورت روابط (۴۴) الی (۵۰) تغییر داده می‌شود (Yang & He, 2013; Yılmaz & Küçüksille, 2015).

$$x_i^n = x_i^{\min} + \psi(\mathrm{rand}.(x_i^{\max} - x_i^{\min})); \forall i \in \mathrm{I}, \forall n \in \mathrm{N} \quad (۴۴)$$

$$v_i^n = v_i^{\min} + \psi(\mathrm{rand}.(x_i^{\max} - x_i^{\min})); \forall i \in \mathrm{I}, \forall n \in \mathrm{N} \quad (۴۵)$$

$$f_i = f_i^{\min} + \mathrm{rand}.(f_i^{\max} - f_i^{\min}); \forall i \in \mathrm{I} \quad (۴۶)$$

$$v_i^n = v_i^{n-1} + \psi\left[f_i(x_i^n - x_{\mathrm{best}} + \zeta)\right]; \forall i \in \mathrm{I}, \forall n \in \mathrm{N} \quad (۴۷)$$

$$\zeta = 2.\mathrm{rand} - 1; -1 \le \zeta \le 1 \quad (۴۸)$$

$$x_i^n = x_i^{n-1} + v_i^n; \forall i \in \mathrm{I}, \forall n \in \mathrm{N} \quad (۴۹)$$

$$x_{i,\mathrm{new}} = x_{i,\mathrm{old}} + \psi(\varepsilon.A_i^n); \forall i \in \mathrm{I}, \forall n \in \mathrm{N} \quad (۵۰)$$

در این روابط، عملگر ψ نتیجه را به نزدیکترین عدد صحیح تخمین می‌زند. در کنار این گسسته سازی، در جهت افزایش احتمال رسیدن به جواب بهینه جهانی یک پرش تصادفی کوچک با استفاده از پارامتر ζ در الگوریتم قرار داده شده است که باعث می‌شود در صورت گیرکردن الگوریتم در نقطه بهینه محلی از آن خارج گردد.

۳-۳- رویکرد تخمین دونقطه‌ای

رویکرد تخمین دونقطه‌ای یک روش محاسباتی بوده که برای یافتن راه‌حل‌های تقریبی برای مسائلی که با عدم‌قطعیت‌ها درگیر هستند مورد استفاده قرار می‌گیرند (Hong, 1998). اساسا روش 2-PEM از مفاهیم اصلی روش تخمین نقطه‌ای[۱۰] الهام گرفته شده است. روش PEM برای تعیین لحظه‌های آماری یک متغیر تصادفی که می‌تواند تابعی از یک یا چند پارامتر دارای عدم‌قطعیت باشد معرفی شده است. در روش 2-PEM هر پارامتر دارای عدم‌قطعیت تنها با دو نقطه قطعی واقع‌شده در دو سمت مقدار میانگین جایگزین می‌گردد که به امکان بهره‌گیری از رویکردهای قطعی را فراهم می‌آورد. در این مقاله، توان تولیدی توربین‌های بادی، توان تولیدی پنل‌های خورشیدی و تقاضای توان مصرف‌کننده‌ها پارامترهای دارای عدم‌قطعیت بوده که مبتنی بر رابطه (۵۱) نمایش داده می‌شوند.

$$\mathrm{X} = \left[P_{\mathrm{sp}}(t), P_{\mathrm{wt}}(t), P_{\mathrm{load}}(t)\right]; \forall t \in \mathrm{T} \quad (۵۱)$$

بنابراین، چارچوب پیشنهادی مبتنی بر رابطه (۵۲) یک تابع غیرخطی چندمتغیره از پارامترهای ورودی دارای عدم‌قطعیت است.

$$\mathrm{Y} = f(\mathrm{X}) \quad (۵۲)$$

خروجی چارچوب پیشنهادی که بیانگر هزینه طراحی سیستم انرژی ترکیبی است و مستقیما تحت‌تاثیر پارامترهای ورودی دارای عدم‌قطعیت است، با استفاده از رابطه (۵۳) بیان می‌گردد.

$$\mathrm{Y} = \left[C_{\mathrm{T}}\right] \quad (۵۳)$$

فرآیند گام‌به‌گام اعمال روش 2-PEM به‌صورت زیر تشریح می‌گردد.

۱) تعداد پارامترهای دارای عدم‌قطعیت را برابر M قرار دهید.

۲) $\mathrm{E}(\mathrm{Y}) = 0$ و $\mathrm{E}(\mathrm{Y}^2) = 0$.

۳) شمارنده پارامترهای ورودی دارای عدم‌قطعیت را برابر $m = 1$ قرار دهید.

۴) مکان و احتمال دو جمع‌شدگی را به‌ترتیب به‌صورت روابط (۵۴) الی (۵۷) محاسبه کنید.

$$\varpi_{m,1} = \left[\varsigma_{m,3}/2\right] + \sqrt{\mathrm{M} + (\varsigma_{m,3}/2)^2} \quad (۵۴)$$

$$\varpi_{m,2} = \left[\varsigma_{m,3}/2\right] - \sqrt{\mathrm{M} + (\varsigma_{m,3}/2)^2} \quad (۵۵)$$

$$\xi_{m,1} = -\chi_{m,2} \Big/ \left[2\mathrm{M}.\sqrt{\mathrm{M} + (\vartheta_{m,3}/2)^2}\right] \quad (۵۶)$$

$$\xi_{m,2} = -\chi_{m,1} \Big/ \left[2\mathrm{M}.\sqrt{\mathrm{M} + (\vartheta_{m,3}/2)^2}\right] \quad (۵۷)$$

۵) دو جمع‌شدگی را مبتنی بر روابط (۵۸) و (۵۹) محاسبه کنید.

$$x_{m,1} = \mu_{\mathrm{X},m} + \lambda_{m,1}.\sigma_{\mathrm{X},m} \quad (۵۸)$$

$$x_{m,2} = \mu_{\mathrm{X},m} + \lambda_{m,2}.\sigma_{\mathrm{X},m} \quad (۵۹)$$

۶) چارچوب پیشنهادی را برای دو جمع‌شدگی باتوجه به بردار X ارائه‌شده در رابطه (۶۰) اجرا کنید.

$$\mathrm{X} = \left[\mu_{\mathrm{X},1} \quad \mu_{\mathrm{X},2} \quad \cdots \quad x_{m,i} \quad \cdots \quad \mu_{\mathrm{X,M}}\right] \quad (۶۰)$$

۷) مقادیر $\mathrm{E}(\mathrm{Y}) = 0$ و $\mathrm{E}(\mathrm{Y}^2) = 0$ را باتوجه به روابط (۶۱) و (۶۲) بروزرسانی کنید.

$$\mathrm{E}(\mathrm{Y}) \cong \sum_{m=1}^{\mathrm{M}} \sum_{i=1}^{\mathrm{I}} \xi_{m,i}.f(\mathrm{X}); \forall i \in \mathrm{I} \quad (۶۱)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]

$$E(Y^2) \cong \sum_{m=1}^{M}\sum_{i=1}^{I} \xi_{m,i} \cdot f^2(X); \forall i \in I \quad (۶۲)$$

۸) مقدار موردانتظار و انحراف معیار تابع Y را به‌ترتیب مبتنی بر روابط (۶۳) و (۶۴) محاسبه کنید.

$$\mu_Y = E(Y) \quad (۶۳)$$

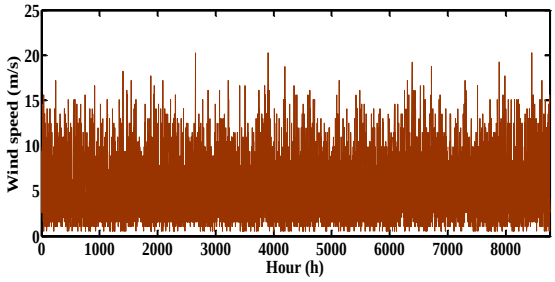
$$\sigma_Y = \sqrt{E(Y^2) - \mu_Y^2} \quad (۶۴)$$

۹) قرار دهید $m = m+1$، در صورتی که $m < M$ به مرحله ۴ بروید، در غیر اینصورت به مرحله بعد بروید.

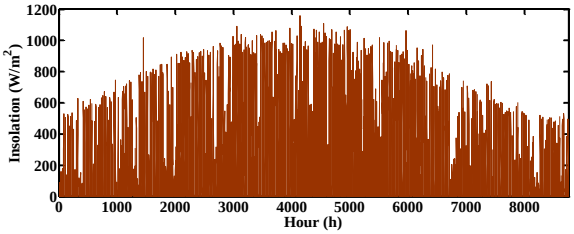
۱۰) توقف.

۴- شبیه‌سازی

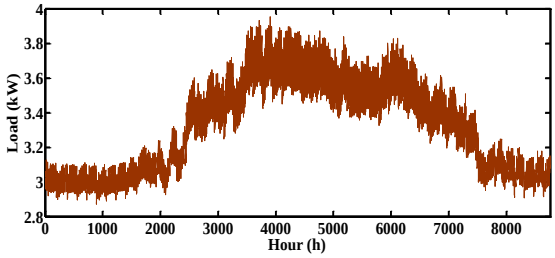
اطلاعات اندازه‌گیری‌شده مرتبط با سرعت باد و تابش خورشید در طول یک سال به‌ترتیب در شکل (۲) و شکل (۳) به تصویر کشیده شده است. همچنین، منحنی بار سالانه در شکل (۴) به تصویر کشیده شده است.



شکل (۲): سرعت باد

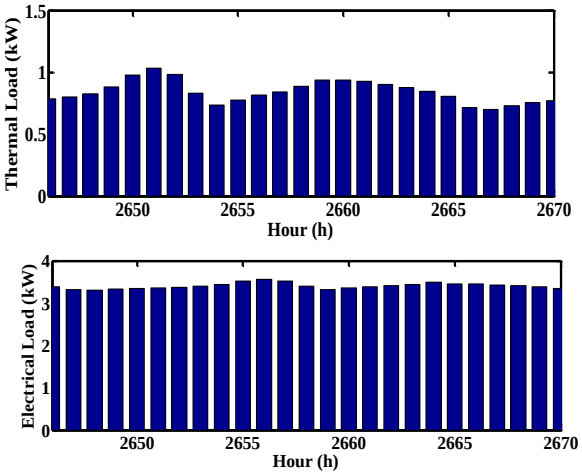


شکل (۳): تابش خورشید



شکل (۴): منحنی بار سالانه

لازم به ذکر است که منحنی بار الکتریکی و منحنی بار حرارتی برای یک بازه زمانی ۲۴ ساعته نمونه در شکل (۵) ارائه شده است و همانطور که مشخص است در تمام این ساعات، تقاضای توان الکتریکی و حرارتی وجود دارد (Aziz et al., 2019; Rajbongshi et al., 2017).



شکل (۵): منحنی بار الکتریکی/حرارتی برای یک بازه زمانی ۲۴ ساعته

همچنین، اطلاعات فنی و اقتصادی مرتبط با تجهیزات سیستم انرژی ترکیبی به همراه پارامترهای تنظیمی الگوریتم‌های BS، PSO و GA در پیوست ارائه شده است.

چارچوب پیشنهادی برای طراحی سیستم انرژی ترکیبی در سه سناریو مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است. جزئیات سناریوهای در نظر گرفته‌شده عبارت است از:

- سناریو ۱: سیستم انرژی ترکیبی تنها شامل پنل‌های خورشیدی، ذخیره‌سازهای باتری و CHP است.
- سناریو ۲: سیستم انرژی ترکیبی تنها شامل توربین‌های بادی، ذخیره‌سازهای باتری و CHP است.
- سناریو ۳: سیستم انرژی ترکیبی شامل پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، ذخیره‌سازهای باتری و CHP است.

ذکر این نکته ضروری است که برخلاف بسیاری از مطالعات که شاخص مرتبط با قابلیت اطمینان سیستم انرژی را به‌صورت یک قید مدل می‌کنند، در این مطالعه، شاخص هزینه حذف بار موردانتظار به صورت یک تابع هدف در نظر گرفته شده است؛ از این رو، الگوریتم بهینه‌سازی نه تنها در تلاش برای کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیرونگهداری، تبادلات توان با شبکه بالادست و سوخت سیستم CHP بوده بلکه کاهش هزینه حذف بار موردانتظار (معادل کاهش ENS) را نیز در نظر دارد. بنابراین، در سناریو سوم در مقایسه با سناریو اول و دوم مقدار کمتری برای شاخص ENS و متعاقبا هزینه حذف بار موردانتظار به‌دست‌آمده است. با این حال، زمان اجرا در سناریو سوم در مقایسه با سناریو دوم و اول به‌ترتیب ۱۱/۰۹ درصد و ۲۲/۴۵ درصد بیشتر بوده که به‌دلیل افزایش تعداد گزینه‌های طراحی است. علاوه بر این، از نتایج ارائه‌شده در جداول (۴) و (۵) مشخص است که الگوریتم BS در هر سه سناریو تحت‌مطالعه به نتایج مطلوب‌تری در مقایسه با الگوریتم‌های PSO و GA دست یافته است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]

مقادیر بهینه به‌دست‌آمده برای تابع هدف مسئله طراحی سیستم انرژی ترکیبی (مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیرونگهداری، تبادلات توان با شبکه بالادست، انرژی تامین شده و سوخت سیستم CHP) با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف و تحت سناریوهای متفاوت در جدول (۳) ارائه شده است.

از نتایج ارائه‌شده در جدول (۳) مشخص است که هزینه طراحی سیستم انرژی ترکیبی در سناریوی سوم با الگوریتم BS به دلیل در نظر گرفتن ترکیب بهتری از تجهیزات در مقایسه با سناریوهای اول و دوم که نتایج بهینه مرتبط با طراحی آن‌ها در جداول (۴) و (۵) ارائه شده، به‌ترتیب ۱۶/۴۰ درصد و ۱۱/۶ درصد است. دلیل این امر این است که در سناریو سوم گزینه‌های طراحی بیشتر بوده و الگوریتم بهینه‌سازی از آزادی عمل و انعطاف‌پذیری بیشتری در انتخاب این گزینه‌ها برخوردار است. از این رو یک ترکیب مقرون‌به‌صرفه‌تر از تجهیزات برای طراحی سیستم انرژی ترکیبی در این سناریو در مقایسه با سناریو اول و دوم در نظر می‌گیرد. همچنین، هزینه طراحی سیستم انرژی ترکیبی در سناریو دوم به میزان ۶/۴۹ درصد کمتر از هزینه متناظر در سناریو اول است.

به‌منظور روئیت‌پذیر نمودن وضعیت سیستم انرژی ترکیبی، وضعیت المان‌ها در این سیستم در طی ۲۴ ساعت میان‌باری در شکل (۶) به تصویر کشیده شده است. از شکل (۶) مشخص است که:

- وضعیت شارژ سیستم ذخیره‌ساز باتری در تمام ساعات شبانه‌روز در وضعیت مطلوبی قرار داشته که در مواقع موردنیاز می‌توانند به‌عنوان سیستم پشتیبان بخشی از تقاضای توان را برآورده نمایند.
- سیستم CHP در تمام ساعت شبانه‌روز در مدار بوده و به کل تقاضای بار حرارتی و بخشی از بار الکتریکی موردنیاز در سیستم انرژی ترکیبی را تغذیه می‌کند.
- در ۱۵ ساعات از شبانه روز، سیستم انرژی ترکیبی فروشنده توان به شبکه بالادست، در ۷ ساعت از شبانه روز خریدار توان از شبکه بالادست و در ۲ ساعت هیچگونه تبادل توانی با شبکه بالادست ندارد.
- توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی به‌ترتیب تقریبا در اکثر ساعات شبانه‌روز و نیمی از ساعات شبانه‌روز در مدار هستند.
- توان اضافه سیستم انرژی ترکیبی، توانی است که به‌دلیل وجود محدودیت خط انتقال امکان تبادل آن با شبکه بالادست وجود ندارد.

جدول (۳): مقادیر بهینه به‌دست‌آمده برای تابع هدف مسئله طراحی سیستم انرژی ترکیبی تحت سناریوهای مختلف

سناریو	شاخص	الگوریتم بهینه‌سازی		
		BS	PSO	GA
سناریو ۱	بهترین مقدار تابع هدف	۲۱۱۱۲/۴۳	۲۳۴۱۵/۱۲	۲۳۸۷۸/۸۸
	بدترین مقدار تابع هدف	۲۱۸۹۴/۴۷	۲۳۹۷۶/۵۵	۲۴۷۴۱/۶۹
	میانگین مقدار تابع هدف	۲۱۴۴۱/۲۰	۲۳۷۴۸/۶۳	۲۴۴۵۶/۳۳
	رتبه الگوریتم	۱	۲	۳
سناریو ۲	بهترین مقدار تابع هدف	۱۹۷۴۲/۳۱	۲۲۱۷۸/۷۷	۲۲۷۵۱/۱۱
	بدترین مقدار تابع هدف	۲۰۷۵۱/۶۶	۲۲۸۴۱/۲۶	۲۳۵۶۳/۱۷
	میانگین مقدار تابع هدف	۲۰۲۵۷/۱۵	۲۲۵۶۲/۱۴	۲۳۳۶۲/۴۸
	رتبه الگوریتم	۱	۲	۳
سناریو ۳	بهترین مقدار تابع هدف	۱۷۶۵۱/۱۴	۱۹۴۷۸/۲۸	۱۹۸۷۴/۸۸
	بدترین مقدار تابع هدف	۱۸۲۱۴/۷۸	۱۹۹۱۴/۱۷	۲۰۳۲۵/۸۷
	میانگین مقدار تابع هدف	۱۷۹۷۴/۵۴	۱۹۷۸۰/۱۶	۲۰۰۷۸/۱۹
	رتبه الگوریتم براساس بهترین مقدار تابع هدف	۱	۲	۳

جدول (۴): نتایج بهینه مرتبط با تعداد تجهیزات تحت سناریوهای مختلف در طراحی سیستم انرژی ترکیبی

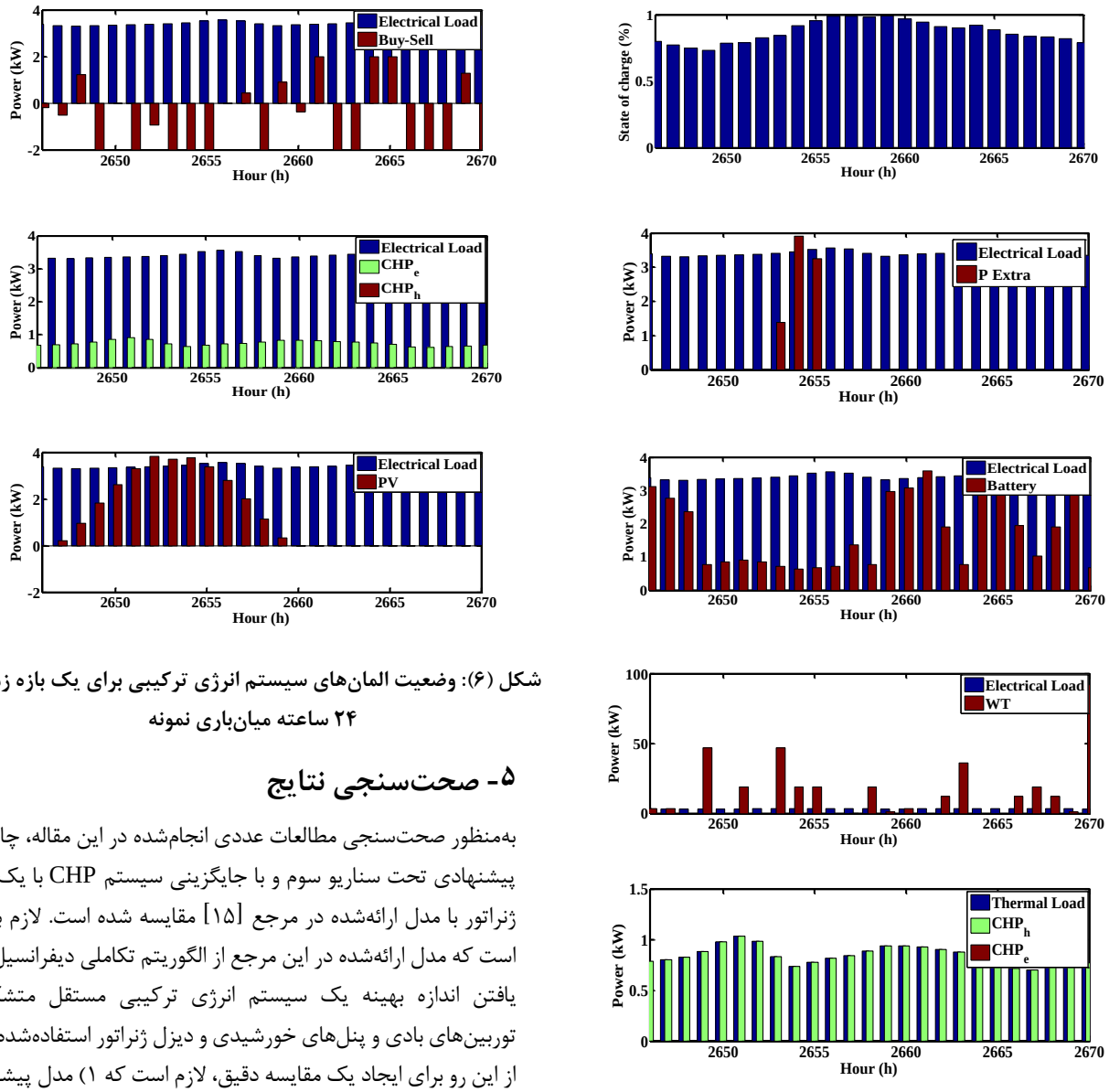
سناریو	الگوریتم بهینه‌سازی	تعداد پنل‌های خورشیدی		تعداد توربین‌های بادی		تعداد ذخیره‌سازهای باتری		تعداد مبدل‌ها	
		میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
سناریو ۱	BS	۷۴	۹/۲۵۴	۰	۰	۲۳	۱۱/۱۴۷	۱۸	۱۰/۷۸۴
	PSO	۸۱	۱۲/۱۵۷	۰	۰	۲۵	۱۲/۶۵۸	۲۱	۱۲/۸۵۴
	GA	۸۷	۱۳/۲۶۸	۰	۰	۲۷	۱۲/۸۴۷	۲۳	۱۲/۸۷۱
سناریو ۲	BS	۰	۰	۱۶	۹/۱۲۱	۲۲	۱۰/۸۹۵	۱۲	۱۰/۱۴۷
	PSO	۰	۰	۱۸	۱۰/۲۵۸	۲۶	۱۱/۴۵۷	۱۴	۱۱/۲۶۵
	GA	۰	۰	۱۹	۱۰/۷۸۰	۲۷	۱۱/۶۵۸	۱۵	۱۱/۶۵۲
سناریو ۳	BS	۳۷	۹/۵۶۲	۱۰	۹/۴۵۸	۱۸	۹/۵۷۴	۹	۱۰/۱۴۶
	PSO	۴۱	۱۰/۸۷۴	۱۲	۱۰/۶۵۴	۲۱	۱۰/۱۱۴	۱۱	۱۱/۱۱۵
	GA	۴۳	۱۱/۱۱۲	۱۳	۱۰/۸۵۵	۲۳	۱۰/۱۵۴	۱۲	۱۱/۲۱۵

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]

جدول (۵): نتایج بهینه مرتبط با ENS، زمان اجرا و هزینه کل در طراحی سیستم انرژی ترکیبی

سناریو	الگوریتم بهینه‌سازی	ENS (kWh)		زمان اجرا (ثانیه)		هزینه کل ($)	
		میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
سناریو ۱	BS	۰/۲۱۵	۱۲/۱۵۴	۱۰۷/۱۵	۹/۱۴۵	۲۱۴۴۱/۲۰	۱۰/۵۵۴
	PSO	۰/۴۱۷	۱۴/۶۲۵	۱۲۷/۱۲	۱۰/۰۲۵	۲۳۷۴۸/۶۳	۱۱/۸۴۷
	GA	۰/۵۱۱	۱۵/۲۵۱	۱۳۹/۸۵	۱۰/۳۲۵	۲۴۴۵۶/۳۳	۱۱/۸۸۷
سناریو ۲	BS	۰/۱۱۷	۱۱/۶۵۲	۱۱۸/۱۱	۹/۳۶۲	۲۰۲۵۷/۱۵	۱۰/۱۲۵
	PSO	۰/۲۷۸	۱۳/۳۲۵	۱۴۱/۸۴	۱۰/۱۲۴	۲۲۵۶۲/۱۴	۱۱/۳۲۵
	GA	۰/۲۹۸	۱۴/۴۴۷	۱۵۲/۶۲	۱۰/۶۲۵	۲۳۳۶۲/۴۸	۱۱/۴۱۵
سناریو ۳	BS	۰/۰۶۴	۱۰/۶۴۱	۱۳۱/۲۱	۹/۱۲۵	۱۷۹۷۴/۵۴	۹/۲۱۵
	PSO	۰/۱۱۴	۱۳/۳۶۲	۱۵۸/۶۵	۱۰/۲۳۶	۱۹۷۸۰/۱۶	۱۰/۱۲۸
	GA	۰/۱۲۱	۱۳/۶۴۱	۱۶۴/۴۵	۱۰/۴۲۶	۲۰۰۷۸/۱۹	۱۰/۱۴۸



شکل (۶): وضعیت المان‌های سیستم انرژی ترکیبی برای یک بازه زمانی ۲۴ ساعته میان‌باری نمونه

۵- صحت‌سنجی نتایج

به‌منظور صحت‌سنجی مطالعات عددی انجام‌شده در این مقاله، چارچوب پیشنهادی تحت سناریو سوم و با جایگزینی سیستم CHP با یک دیزل ژنراتور با مدل ارائه‌شده در مرجع [۱۵] مقایسه شده است. لازم به ذکر است که مدل ارائه‌شده در این مرجع از الگوریتم تکاملی دیفرانسیل برای یافتن اندازه بهینه یک سیستم انرژی ترکیبی مستقل متشکل از توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی و دیزل ژنراتور استفاده‌شده است. از این رو برای ایجاد یک مقایسه دقیق، لازم است که ۱) مدل پیشنهادی در این مقاله نیز تحت حالت منفصل از شبکه موردبررسی قرار گیرد، ۲)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]

CHP با یک دیزل ژنراتور جایگزین گردد و ۳) چارچوب پیشنهادی در این مقاله و مدل ارائه‌شده در مرجع [۱۵] به‌ازای مقادیر ورودی مشابه برای تجهیزات مختلف پیاده‌سازی و اجرا گردند. نتایج بهینه بدست‌آمده برای چارچوب پیشنهادی و مدل ارائه‌شده در مرجع [۱۵] تحت فرضیات فوق در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول (۶): نتایج چارچوب پیشنهادی تحت سناریو سوم با مدل ارائه-شده در مرجع [۱۵]

شاخص	سناریو ۳	
	چارچوب پیشنهادی	مرجع [۱۵]
تعداد پنل‌های خورشیدی	۴۳	۴۷
تعداد توربین‌های بادی	۱۴	۱۵
تعداد ذخیره‌سازهای باتری	۲۱	۲۲
تعداد مبدل‌ها	۱۰	۱۳
هزینه کل ($)	۱۳۵۴۰/۱۸	۱۴۷۷۴/۱۷

از نتایج ارائه‌شده در جدول (۶) مشخص است که چارچوب پیشنهادی در این مقاله به تعداد کم‌تری برای تجهیزات سیستم انرژی ترکیبی مستقل در مقایسه با مدل ارائه‌شده در مرجع [۱۵] دست یافته است. در نتیجه، چارچوب پیشنهادی در این مقاله در مقایسه با روش‌های ارائه‌شده دیگر به نتایج مطلوب‌تری دست یافته و یک رویکرد مطلوب برای طراحی بهینه سیستم‌های انرژی ترکیبی است. همچنین، نتایج بدست آمده از پیاده‌سازی چارچوب پیشنهادی تحت سناریو سوم (سیستم انرژی ترکیبی شامل پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، ذخیره‌سازهای باتری و CHP) با استفاده از رویکرد 2-PEM و شبیه‌سازی مونت کارلو[11] در جدول (۷) ارائه شده است. همانطور که از نتایج ارائه‌شده در جدول (۷) مشخص است که با پیاده‌سازی چارچوب پیشنهادی تحت سناریو سوم و رویکرد 2-PEM در مقایسه با پیاده‌سازی چارچوب پیشنهادی تحت سناریو سوم و رویکرد MCS تعداد کمتری تجهیزات بدست آمده است که متعاقبا منجر به کاهش هزینه سرمایه‌گذری در این رویکرد در مقایسه با رویکرد MCS شده است.

جدول (۷): نتایج بدست چارچوب پیشنهادی تحت سناریو سوم با استفاده از رویکرد 2-PEM و شبیه‌سازی مونت کارلو

شاخص	رویکرد مدل‌سازی عدم‌قطعیت	
	2-PEM	MCS
تعداد پنل‌های خورشیدی	۳۷	۴۱
تعداد توربین‌های بادی	۱۰	۱۱
تعداد ذخیره‌سازهای باتری	۱۸	۱۹
تعداد مبدل‌ها	۹	۱۲
هزینه کل ($)	۱۷۶۵۱/۱۴	۱۸۹۶۵/۲۵

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک چارچوب جدید مبتنی بر الگوریتم BS برای طراحی سیستم‌های انرژی ترکیبی متصل به شبکه بالادست و متشکل از توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی، CHP، ذخیره‌سازهای باتری، بارهای الکتریکی AC و DC و بارهای حرارتی ارائه گردید. هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه تعمیرونگهداری، هزینه تبادلات توان با شبکه بالادست، هزینه انرژی تامین‌نشده و هزینه سوخت سیستم CHP به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته‌شده‌اند. همچنین، طیف وسیعی از محدودیت‌های فنی، امنیتی، منطقی و اقتصادی نیز به‌عنوان قیود مسئله مدل شده‌اند. روش تخمین دونقطه‌ای نیز برای پرداختن به عدم‌قطعیت توان تولیدی توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی و همچنین تقاضای توان به‌کار گرفته شد. چارچوب پیشنهادی تحت سناریوهای مختلف از منظر نوع المان‌های مجاز در فرآیند طراحی اجرا و پیاده‌سازی گردید. طبق نتایج به‌دست‌آمده مشاهده گردید که چارچوب پیشنهادی تحت سناریو سوم (درنظرگرفتن تمام المان‌ها) به نتایج به‌مراتب مطلوب‌تری در مقایسه با سناریو اول (درنظرگرفتن تمام المان‌ها به‌جز توربین‌های بادی) و سناریو اول (درنظرگرفتن تمام المان‌ها به‌جز پنل‌های خورشیدی) دست یافته است. همچنین، نتایج در سناریو دوم در مقایسه با سناریو اول مطلوب‌تر بوده‌اند. همچنین، مشخص گردید که الگوریتم BS در هر سه سناریو تحت‌مطالعه به نتایج بهینه‌تری در مقایسه با الگوریتم‌های PSO و GA دست یافته است. برای صحت‌سنجی یک مقایسه بین چارچوب پیشنهادی در این مقاله و رویکرد ارائه‌شده در مرجع [۱۵] ارائه گردید، که بیانگر نتایج مطلوب‌تر چارچوب پیشنهادی در مقایسه با مدل ارائه‌شده در مرجع [۱۵] در زمینه طراحی سیستم انرژی ترکیبی مستقل است. راه‌های مختلفی برای دنبال‌کردن و بهبود چارچوب پیشنهادی وجود دارد از قبیل ادغام المان‌های دیگر در فرآیند طراحی و/یا استفاده از رویکردهای نوین در زمینه مدل‌سازی عدم-قطعیت‌ها که تحت توسعه و پیاده‌سازی توسط نویسندگان قرار دارد.

پیوست:

جدول (۱): اطلاعات فنی و اقتصادی تجهیزات

پارامتر	مقدار
توربین بادی	
توان نامی	۱ kW
هزینه سرمایه‌گذاری	۱۸۰۴ $
هزینه تعمیر و نگهداری	۱۰۰ $/year
سرعت مرتبط با توان نامی	۹ m/s
سرعت قطع پایین	۳ m/s
سرعت قطع بالا	۲۰ m/s
حداکثر تعداد توربین	۲۰
طول عمر	۲۰ سال
پنل خورشیدی	
توان نامی	۰/۱۲۰ kW
هزینه سرمایه‌گذاری	۲۱۶ $
هزینه تعمیر و نگهداری	۱۰ $/year
تابش خورشید	۱۰۰۰ W/m^2
دمای پنل خورشیدی	۲۵ سانتی‌گراد
ضریب دما	-۳/۷*۱۰$^{-۷}$
دمای بهره‌برداری نرمال	۴۴ سانتی‌گراد

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]

حداکثر تعداد پنل خورشیدی	۱۰۰
طول عمر	۲۰ سال
ذخیره‌ساز باتری	
ظرفیت انرژی نامی	۲/۱ kWh
هزینه سرمایه‌گذاری	۳۱۰ $
حداکثر شارژ	۱۰۰٪
حداقل شارژ	۲۰٪
راندمان شارژ	۸۵٪
راندمان دشارژ	۱۰۰٪
نرخ خود-دشارژی ساعتی	۰/۰۲٪
حداکثر تعداد باتری	۳۰
طول عمر	۵ سال
سیستم ترکیبی توان و حرارت	
توان نامی	۱/۷ kW
حداقل توان	۰/۶ kW
هزینه سرمایه‌گذاری	۴۱۰۰ $
هزینه تعمیر و نگهداری	۰/۳۳ $/kWh
هزینه سوخت	۱/۲۴ $/m^3
ضرایب منحنی مصرف سوخت	۰/۰۸۴۵، ۰/۲۴۶، ۰/۴۱۲
مبدل	
توان نامی	۳ kW
هزینه سرمایه‌گذاری	۱۵۸۳ $
راندمان	۹۵٪
حداکثر تعداد مبدل	۲۰
طول عمر	۱۰
اطلاعات دیگر	
نرخ بهره	۵٪
افق طراحی	۲۰ سال
قیمت خرید توان	۰/۳۳ $/kWh
قیمت فروش توان	۰/۳۳ $/kWh

جدول (۲): پارامترهای الگوریتم‌ها

پارامتر	مقدار
BS	
جمعیت	۱۲۰
حداکثر تکرار	۶۰۰
حداکثر مقدار قابل‌قبول فرکانس پالس خفاش i	۲
حداقل مقدار قابل‌قبول فرکانس پالس خفاش i	۰
نرخ انتشار موج خفاش i در تکرار اولیه	۰/۵۵
ضرایب ثابت α و γ	۰/۹ و ۰/۹۵
PSO	
جمعیت	۱۲۰
حداکثر تکرار	۶۰۰
وزن اینرسی	۰/۷۵
پارامتر اجتماعی	۲/۱
پارامتر شناختی	۲/۰۵
GA	
جمعیت	۱۲۰
نسل	۶۰۰
نوع تقاطع	تقاطع دونقطه‌ای
نرخ تقاطع	۰/۷۵
نوع جهش	وارونگی بیت
نرخ جهش	۰/۰۳

مراجع

Aziz, A. S., Tajuddin, M. F. N., Adzman, M. R., Azmi, A., & Ramli, M. A. M. (2019). Optimization and sensitivity analysis of standalone hybrid energy systems for rural electrification: A case study of Iraq. *Renewable Energy*, *138*, 775-792. doi: 10.1016/j.renene.2019.02.004

Barmayoon, M. H., Fotuhi-Firuzabad, M., Rajabi-Ghahnavieh, A., & Moeini-Aghtaie, M. (2016). Energy storage in renewable-based residential energy hubs. *IET Generation, Transmission & Distribution*, *10*(13), 3127-3134. doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0957

Campana, P. E., Wästhage, L., Nookuea, W., Tan, Y., & Yan, J. (2019). Optimization and assessment of floating and floating-tracking PV systems integrated in on- and off-grid hybrid energy systems. *Solar Energy*, *177*, 782-795. doi: 10.1016/j.solener.2018.11.045

Dolatabadi, A., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2017). Stochastic risk-constrained scheduling of smart energy hub in the presence of wind power and demand response. *Applied Thermal Engineering*, *123*, 40-49. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.069

Hong, H. P. (1998). An efficient point estimate method for probabilistic analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, *59*(3), 261-267. doi: 10.1016/s0951-8320(97)00071-9

Jamalzadeh, F., Hajiseyed Mirzahosseini, A., Faghihi, F., & Panahi, M. (2020). Optimal operation of energy hub system using hybrid stochastic-interval optimization approach. *Sustainable Cities and Society*, *54*, 101998. doi: 10.1016/j.scs.2019.101998

Jia, Z., Yu, H., Li, Y., Tan, Y., Cao, Y., & Huang, C. (2016). CHP-based DG allocation considering the operation constraints of heating and gas systems. 301-305. doi: 10.1109/icsai.2016.7810972

Ju, L., Tan, Z., Yuan, J., Tan, Q., Li, H., & Dong, F. (2016). A bi-level stochastic scheduling optimization model for a virtual power plant connected to a wind–photovoltaic–energy storage system considering the uncertainty and demand response. *Applied Energy*, *171*, 184-199. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.03.020

Lu, X., Liu, Z., Ma, L., Wang, L., Zhou, K., & Feng, N. (2020). A robust optimization approach for optimal load dispatch of community energy hub. *Applied Energy*, *259*, 114195. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114195

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]

Rajbongshi, R., Borgohain, D., & Mahapatra, S. (2017). Optimization of PV-biomass-diesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER. *Energy, 126*, 461-474. doi: 10.1016/j.energy.2017.03.056

Ramli, M. A. M., Bouchekara, H. R. E. H., & Alghamdi, A. S. (2018). Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm. *Renewable Energy, 121*, 400-411. doi: 10.1016/j.renene.2018.01.058

Roustai, M., Rayati, M., Sheikhi, A., & Ranjbar, A. (2018). A scenario-based optimization of Smart Energy Hub operation in a stochastic environment using conditional-value-at-risk. *Sustainable Cities and Society, 39*, 309-316. doi: 10.1016/j.scs.2018.01.045

Salimi, M., Ghasemi, H., Adelpour, M., & Vaez-Zadeh, S. (2015). Optimal planning of energy hubs in interconnected energy systems: a case study for natural gas and electricity. *IET Generation, Transmission & Distribution, 9*(8), 695-707. doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0607

Schulze, M., Friedrich, L., & Gautschi, M. (2008). Modeling and optimization of renewables: applying the Energy Hub approach. 83-88. doi: 10.1109/icset.2008.4746977

Theo, W. L., Lim, J. S., Ho, W. S., Hashim, H., & Lee, C. T. (2017). Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67*, 531-573. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.063

Vahid-Pakdel, M. J., Nojavan, S., Mohammadi-ivatloo, B., & Zare, K. (2017). Stochastic optimization of energy hub operation with consideration of thermal energy market and demand response. *Energy Conversion and Management, 145*, 117-128. doi: 10.1016/j.enconman.2017.04.074

Yang, X. S., & He, X. (2013). Bat algorithm: literature review and applications. *International Journal of Bio-Inspired Computation, 5*(3), 141. doi: 10.1504/ijbic.2013.055093

Yılmaz, S., & Küçüksille, E. U. (2015). A new modification approach on bat algorithm for solving optimization problems. *Applied Soft Computing, 28*, 259-275. doi: 10.1016/j.asoc.2014.11.029

Zhang, X., Che, L., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A. S., & Abusorrah, A. (2017). Reliability-Based Optimal Planning of Electricity and Natural Gas Interconnections for Multiple Energy Hubs. *IEEE Transactions on Smart Grid, 8*(4), 1658-1667. doi: 10.1109/tsg.2015.2498166

زیرنویس‌ها

[1] Combined heat and power (CHP)
[2] Wind Turbine (WT)
[3] Solar Panel (SP)
[4] Battery Storage (BS)
[5] Converter
[6] Two-Point Estimate Method (2-PEM)
[7] Bat Search (BS)
[8] Particle Swarm Optimization (PSO)
[9] Genetic Algorithm (GA)
[10] Point Estimate Method (PEM)
[11] Monte Carlo Simulation (MCS)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.4.2.3]