Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 4 – Winter 2026
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Optimal Design of Photovoltaic Power Plant Structure Aimed at Reducing Lost Load and Operational Costs Using an Improved Bat Algorithm

Mahdi Makvandi[1], *Master's student*, Ebrahim Aghajari[* 2], *Assistant Professor*

[1] Department of Electrical Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, mhdmakvandi@gmail.com
[* 2] Department of Electrical Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, eaghajari88@iau.ac.ir

Abstract:
Solar energy stands as the world's most unique renewable energy source and is the primary origin of all energy on Earth. It can be directly and indirectly converted into other forms of energy, making its utilization highly cost-effective. On the other hand, the increasing demand and load today have led to the expansion of distribution systems and their dimensions. This expansion, in turn, causes increased voltage drops, higher losses, and consequently, reduced stability, lower nodal voltages, and load imbalance. Therefore, the global adoption of distributed renewable generation sources has increased significantly. Installing such sources mitigates the need for establishing new transmission and distribution lines and altering power system topology to meet demand, leading to economic savings. Furthermore, integrating these devices into distribution systems results in reduced network losses, improved network performance, deferred capital investments, enhanced reliability, peak shaving, decreased electricity costs, and better voltage profiles. The optimal placement within the distribution system and the generated power capacity of these sources significantly influence the improvement of the aforementioned characteristics. Quantifying and optimizing the structure of these resources constitutes a nonlinear optimization problem with equality and inequality constraints, which can be solved using either classical or metaheuristic methods. Metaheuristic methods have proven effective in solving optimization problems of any complexity. The application of novel metaheuristic approaches helps prevent the optimization problem from getting trapped in local minima.Consequently, this thesis aims to conduct a macroscopic, long-term technical and economic feasibility study for installing a grid-independent solar power plant, supported by batteries, to supply a portion of Baghdad city's electricity in Iraq. The proposed plan utilizes the metaheuristic methods of Fractional Lévy Flight Bat Algorithm (FLFBA) and Enhanced Imperialist Competitive Algorithm (EICA) for the optimal planning of the solar power plant's development and construction. The objective function for this problem considers the lost load factor, installation cost, and maintenance cost of the power plant.

Keywords: renewable productions, photovoltaic power plant, microgrid, island, heuristic algorithm.

Received: 23 Dec. 2025
Revised: 19 Feb. 2026
Accepted:25 Feb. 2026

*** Corresponding Author:** Dr. Ebrahim Aghajari

Citation: Mahdi Makvandi, Ebrahim Aghajari, "Optimal Design of Photovoltaic Power Plant Structure Aimed at Reducing Lost Load and Operational Costs Using an Improved Bat Algorithm", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 4, pp. 109-130, March 2026 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]

مقاله پژوهشی

طراحی بهینه‌ی ساختار نیروگاه فتوولتائیک با هدف کاهش بار ازدست‌رفته و هزینه‌های عملیاتی با استفاده از الگوریتم خفاش بهبودیافته

مهدی مکوندی[۱]، دانشجوی کارشناسی ارشد، ابراهیم آقاجری* [۲]، استادیار

۱- گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، mhdmakvandi@gmail.com

* ۲- گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، eaghajari88@iau.ac.ir

چکیده: انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر برجسته و اقتصادی در سطح جهان، قابلیت تبدیل به اشکال مختلف انرژی را داراست. در این مقاله، هدف اصلی بررسی امکان‌سنجی فنی و اقتصادی احداث یک واحد نیروگاه خورشیدی مستقل از شبکه با تکیه‌بر سیستم ذخیره‌سازی باتری به‌منظور تأمین بخشی از برق موردنیاز یک شبکه عملی در یک بازه زمانی بلندمدت است. مسئله موردبررسی در این پژوهش شامل هزینه‌های مرتبط با نصب، تعمیر و نگهداری پنل‌های خورشیدی، باتری‌ها و اینورترها می‌شود. این هزینه‌ها با استفاده از روش‌های فراابتکاری EICA و FLBA و با در نظر گرفتن نرخ بهره مشخص در یک چشم‌انداز ۲۰ ساله محاسبه می‌شوند. همچنین، محدودیت‌های مربوط به میزان بار ازدست‌رفته و حد مجاز شارژ و دشارژ باتری‌ها نیز به‌عنوان قیود اصلی مسئله در نظر گرفته می‌شوند. یکی از ویژگی‌های برجسته این مقاله، تمرکز آن بر روی یک مورد عملی است که آن را از سایر مقالات مشابه متمایز می‌کند. علاوه بر این، بررسی پتانسیل سود حاصل از فروش برق به شبکه بالادست و استفاده از الگوریتم جدید FLBA نیز ازجمله ویژگی‌ها و نوآوری‌های این پژوهش محسوب می‌شوند. این الگوریتم با بهره‌گیری از یک فرآیند جستجوی مبتنی بر پرواز لِوی، قادر است محدودیت‌های مسئله را به‌خوبی رعایت کند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهند که روش‌های پیشنهادی، به‌ویژه روش FLBA، منجر به کاهش چشمگیر بار ازدست‌رفته، کاهش هزینه‌های تعمیر، نگهداری و نصب می‌شوند و درنهایت عملکرد کلی سیستم را بهبود می‌بخشند.

کلمات کلیدی: فتوولتائیک، بهینه‌سازی، الگوریتم FLBA، اینورتر، ذخیره‌سازها.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۶

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر ابراهیم آقاجری
نشانی نویسنده مسئول: اهواز، فرهنگ شهر، دانشگاه آزاد اسلامی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

۱- مقدمه

انرژی خورشیدی به‌عنوان بزرگ‌ترین منبع انرژی در کره زمین، پتانسیل بالایی برای تأمین نیازهای انرژی جهانی دارد. تولید برق از انرژی خورشیدی به دو روش مستقیم (فوتوولتائیک) و غیرمستقیم (نیروگاه‌های خورشیدی حرارتی) امکان‌پذیر است. توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر و توافق‌نامه‌های بین‌المللی مانند توافق پاریس، نقش مهمی در گسترش استفاده از انرژی خورشیدی داشته‌اند. بسیاری از کشورها، ازجمله آلمان، برنامه‌های خود را به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده‌اند و قصد دارند سهم انرژی‌های تجدیدپذیر را در سبد انرژی خود افزایش دهند [۱ و ۲]. طراحی بهینه ساختار نیروگاه خورشیدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده است که بیشتر آنها بر جنبه‌های اقتصادی مانند هزینه نصب و راه‌اندازی تمرکز داشته‌اند. بااین‌حال، هزینه‌های جاری مانند تعمیر و نگهداری نیز باید در نظر گرفته شوند [۳].

یکی از چالش‌های مهم در طراحی نیروگاه‌های خورشیدی، تعیین ظرفیت منابع به‌گونه‌ای است که با استفاده از سیستم ذخیره‌سازی باتری، بتوانند بخش قابل‌توجهی از بار مصرف‌کننده را به‌طور مستقل از شبکه اصلی تأمین کنند. این موضوع در بسیاری از پژوهش‌ها کمتر موردتوجه قرار گرفته است. در این مقاله، بهینه‌سازی ساختار یک نیروگاه خورشیدی مستقل از شبکه برای مصرف خانگی شبکه عملی با هدف کاهش هزینه‌های نصب، تعمیر و نگهداری و کاهش بار ازدست‌رفته، با استفاده از الگوریتم‌های EICA و FLBA انجام می‌شود. در ادامه، مطالعات اخیر در این زمینه بررسی می‌شوند. روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی ساختار نیروگاه‌های خورشیدی در مقالات مختلف موردبررسی قرار گرفته‌اند. برخی از این روش‌ها مبتنی بر گرادیان و برخی دیگر از روش‌های فرابتکاری هستند. روش‌های فراابتکاری متنوعی برای بهینه‌سازی ساختار نیروگاه‌های خورشیدی و سیستم‌های انرژی ارائه شده است. به‌عنوان‌مثال، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و روش شبیه‌سازی تبرید برای یافتن ظرفیت و مکان مناسب برای نیروگاه ترکیبی شامل منابع فتوولتائیک و باتری مورداستفاده قرار گرفته‌اند [۴].

در برخی از پژوهش‌ها، سیستم‌های انرژی هیبریدی شامل ماژول فتوولتائیک، توربین بادی، ژنراتور بیوگاز و باتری برای تأمین برق پایدار جزایر دورافتاده بررسی شده‌اند و از الگوریتم‌های ژنتیک برای بهینه‌سازی چند هدفه به‌منظور کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، آلاینده‌های زیست‌محیطی و بهبود قابلیت اطمینان سیستم استفاده شده است [۵]. همچنین، الگوریتم‌های دیگری مانند الگوریتم پروانه سلطنتی [۶]، جستجوی هارمونی [۷]، کپک مخاطی [۸]، جستجوی عقاب [۹]، جستجوی بازی‌های گرسنگی [۱۰] و الگوریتم شاهین هریس بهبودیافته [۱۱] برای بهینه‌سازی ساختار نیروگاه‌ها و تخمین پارامترهای سلول‌های خورشیدی مورداستفاده قرار گرفته‌اند. درنهایت، الگوریتم‌های جدیدی مانند الگوریتم شکار مستعمرات [۱۲] برای بهینه‌سازی ساختار نیروگاه‌های خورشیدی و الگوریتم جستجوی تابو [۱۳] برای تعیین اندازه بهینه سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی با استفاده از باتری در ریزشبکه‌ها پیشنهاد شده‌اند.

در پژوهش‌های دیگر، مدل‌های دو هدفه برای تعیین اندازه بهینه طرح‌های نیروگاهی ترکیبی فتوولتائیک/بادی/باتری [۱۴]، الگوریتم شکارچیان دریایی برای بهینه‌سازی ساختار نیروگاه‌های شامل منابع فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و باتری [۱۵] و الگوریتم‌های بهینه‌سازی گرگ خاکستری و ژنتیک برای یافتن اندازه‌های بهینه نیروگاهی شامل منابع فتوولتائیک، بادی و باتری برای مناطق دورافتاده [۱۶ - ۱۹] مورداستفاده قرار گرفته‌اند. همچنین، طراحی بهینه نیروگاه‌های ترکیبی فتوولتائیک و باتری با صفحات خورشیدی و باتری‌های مختلف تحت سناریوهای گوناگون بررسی شده است [۲۰] و الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی توان تولیدشده توسط نیروگاه تجدیدپذیر هیبریدی شامل منابع بادی، خورشیدی و باتری به‌منظور برآوردن نیازهای انرژی مناطق دورافتاده پیشنهاد شده است [۲۱].

مرجع [۲۲] با هدف حل چالش‌های ناشی از نوسانات منابع تجدیدپذیر، یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی برای برنامه‌ریزی هم‌زمانِ تولیدات پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی پیشنهاد می‌دهد. در سطح بالا، مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه و در سطح پایین، مدیریت بهره‌برداری و کاهش تلفات شبکه صورت می‌گیرد. نوآوری اصلی این مطالعه در بهبود الگوریتم خفاش با استفاده از تکنیک‌های «نگاشت آشوب و «پرواز لوی» است که باعث افزایش سرعت همگرایی و جلوگیری از گرفتار شدن در بهینه‌های محلی شده است. مزیت بارز این روش، دستیابی به نرخ بهره‌برداری بسیار بالا از منابع خورشیدی (۹۰٫۲۷٪) و بادی (۹۲٫۱۸٪) در شبکه نمونه IEEE 33-node است. با این حال، محدودیت

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

این رویکرد را می‌توان در وابستگی محاسباتی به ساختار دوسطحی دانست که در سیستم‌های بسیار بزرگ ممکن است با چالش پیچیدگی زمانی مواجه شود.

مرجع [۲۳] به مسئله «دیسپاچ اقتصادی» در شبکه‌های متصل به سیستم‌های مدیریت انرژی خورشیدی می‌پردازد و یک مدل هم‌زمان برای حداقل‌سازی هزینه‌های عملیاتی با رعایت محدودیت‌های شبکه پیشنهاد می‌دهد. این مطالعه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و اصلاح ضرایب شتاب، به همراه مدل‌سازی ریاضی هزینه‌های تولید به صورت توابع درجه دوم قطعه‌بندی شده، تلاش کرده است تا عدم قطعیت‌های تولیدات خورشیدی را مدیریت کند. از مزایای این کار، کاهش قابل‌توجه هزینه‌های سالانه و ارائه راهکاری برای مدیریت ذخایر چرخشی است. با این وجود، عیب این رویکرد آن است که به دلیل تمرکز بر سطح انتقال، ممکن است جزئیات مربوط به پایداری ولتاژ در سطح توزیع یا رفتارهای دینامیکی لحظه‌ای (نوسانات کمتر از ۳۰ ثانیه) به طور کامل در مدل‌سازی‌های پیچیده لحاظ نشده باشد که این امر دقت عملیاتی در مقیاس‌های بسیار کوچک را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مرجع [۲۴] یک راهکار دومرحله‌ای برای تخصیص و تعیین اندازه بهینه باتری در شبکه‌های توزیع ارائه می‌کند. در مرحله اول از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مکان‌یابی اولیه و در مرحله دوم از «الگوریتم بهینه‌سازی غزال کوهی» برای تضمین پایداری فنی (مانند تنظیم ولتاژ و کاهش تلفات) استفاده شده است. مزیت شاخص این پژوهش، عملکرد برتر الگوریتم MGO در مقایسه با روش‌های کلاسیک مانندGWO ، WOAو CSA از نظر سرعت همگرایی و میزان کاهش تلفات (۸,۴۷۳٪) است. از سوی دیگر، عیب یا محدودیت این مطالعه در پیچیدگی اجرایی ناشی از ترکیب دو روش متفاوت (MILPوMGO) است که ممکن است فرآیند پیاده‌سازی را برای سیستم‌های واقعی با داده‌های پویا دشوارتر کند و همچنین نیاز به تنظیم دقیق پارامترها در مرحله دوم دارد.

[۲۵] بر بهینه‌سازی ظرفیت سیستم‌های فتوولتائیک و ذخیره‌ساز انرژی در جوامع انرژی همتابه‌همتا (P2P) تمرکز دارد و نوآوری آن در استفاده از باتری‌های بازیافتی برای کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری است. این پژوهش از مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای همسان‌سازی رفتار شارژ/دشارژ باتری و تجارت انرژی بین اعضای جامعه استفاده می‌کند. مزیت کلیدی این روش، فراهم کردن یک راهکار اقتصادی برای کاهش هزینه‌های کل (CAPEXوOPEX) از طریق مدل‌سازی دقیق P2P است. با این حال، از جمله نقاط ضعف یا چالش‌های این رویکرد، پیچیدگی در مدیریت مدل‌سازیِ فرسودگی باتری‌های بازیافتی و عدم قطعیت‌های مرتبط با در دسترس بودن این باتری‌ها است که می‌تواند پایداری درازمدت سیستم را در مقایسه با باتری‌های نو تحت تأثیر قرار دهد.

مرجع [۲۶] یک چارچوب احتمالی برای سایزبندی بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در ریزشبکه‌ها با لحاظ کردن پاسخگویی بار ارائه می‌دهد. برخلاف روش‌های قطعی، این مطالعه از روش تخمین دونقطه‌ای (PEM) برای مدیریت عدم قطعیت‌های تابش خورشید و قیمت‌های بازار انرژی استفاده می‌کند. مزیت بارز این کار، افزایش دقت در محاسبات قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های عملیاتی به واسطه مدیریت هوشمند سمت تقاضا است. عیب احتمالی این مقاله این است که به دلیل ماهیت احتمالی و نیاز به تحلیل سناریوهای مختلف، بار محاسباتی آن نسبت به مدل‌های بهینه‌سازیِ قطعی افزایش می‌یابد که ممکن است اجرای آن را در ریزشبکه‌های بسیار بزرگ و در لحظه (Real-time) با چالش‌های فنی روبرو سازد.

همان‌طور که در بخش قبل آورده شده دانشمندان مختلف مسئله طراحی بهینه ساختار نیروگاه‌های تجدیدپذیر را از زوایای مختلف موردبررسی قرار داده‌اند، اما در این میان به برخی مسائل پرداخته نشده که به‌صورت خلاصه در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود. در متن قبلی به برخی از مقالات و پژوهش‌های مرتبط با بهینه‌سازی ساختار نیروگاه‌های خورشیدی اشاره شده بود.

در زیر به‌صورت کلی به برخی از نواقص و محدودیت‌های موجود در این مراجع اشاره می‌شود:

- **تمرکز بر جنبه‌های اقتصادی:** بسیاری از پژوهش‌ها بیشتر بر جنبه‌های اقتصادی مانند هزینه نصب و راه‌اندازی نیروگاه‌های خورشیدی تمرکز داشته‌اند و کمتر به هزینه‌های جاری مانند تعمیر و نگهداری پرداخته‌اند.
- **عدم توجه به سیستم ذخیره‌سازی باتری:** در بسیاری از مطالعات، بهینه‌سازی ظرفیت منابع و استفاده از سیستم ذخیره‌سازی باتری برای تأمین مستقل بار مصرف‌کننده از شبکه اصلی کمتر موردتوجه قرار گرفته است.
- **استفاده از روش‌های بهینه‌سازی محدود:** برخی از مقالات از روش‌های بهینه‌سازی خاصی مانند الگوریتم‌های ژنتیک یا الگوریتم‌های فراابتکاری محدود استفاده کرده‌اند و ممکن است نتایج بهینه کلی را تضمین نکنند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

- **عدم بررسی تأثیر شرایط محیطی:** در برخی از پژوهش‌ها، تأثیر شرایط محیطی مانند میزان تابش خورشید، دما بر عملکرد نیروگاه‌های خورشیدی و سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری به‌طور کامل بررسی نشده است.
- **عدم مقایسه با سایر روش‌ها:** در برخی از مقالات، نتایج به‌دست‌آمده با سایر روش‌های بهینه‌سازی مقایسه نشده است که این امر می‌تواند منجر به عدم ارزیابی دقیق عملکرد روش پیشنهادی شود.

در سال‌های اخیر، طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک با هدف کاهش تلفات توان و هزینه‌های عملیاتی، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. مطالعات پیشین عمدتاً بر استفاده از الگوریتم‌های کلاسیک و روش‌های متعارف متمرکز بوده‌اند. برای نمونه، برخی از محققان از روش‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک، PSO و یا مدل‌سازی با نرم‌افزار HOMER برای تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی خورشیدی استفاده کرده‌اند. هرچند این روش‌ها تا حدی موفق بوده‌اند، اما معمولاً با چالش‌هایی از قبیل همگرایی زودهنگام، دقت پایین در مسائل پیچیده و عدم تعادل مناسب بین جستجوی سراسری و محلی مواجه بوده‌اند. برای رفع این کاستی‌ها، برخی مطالعات به سراغ الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته‌تر و الهام‌گرفته از طبیعت رفته‌اند. در این راستا، الگوریتم خفاش (Bat Algorithm) به دلیل سادگی و کارایی مناسب مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، این الگوریتم نیز در برخی موارد به‌ویژه در مسائل چندهدفه و دارای ابعاد بالا با محدودیت‌هایی در فرار از بهینه‌های محلی و سرعت همگرایی روبرو است. برای بهبود عملکرد آن، پیشنهادهای مختلفی شده که یکی از آن‌ها ادغام مکانیسم «پرواز لِوی» (Lévy Flight) است. این مکانیسم با ایجاد گام‌های تصادفی، امکان جستجوی کارآمدتر فضای مسئله و خروج از نقاط بهینه محلی را فراهم می‌کند.

در این پژوهش، از «الگوریتم خفاش بهبودیافته با پرواز لوی» برای طراحی بهینه ساختار نیروگاه فتوولتائیک استفاده شده است. هدف اصلی، کمینه‌سازی همزمان تلفات توان (بار ازدست‌رفته) و هزینه‌های عملیاتی سیستم است. این الگوریتم با تلفیق مزایای الگوریتم خفاش از جمله استفاده از فرکانس و loudness برای کنترل جستجو و ویژگی‌های پرواز لوی، به دنبال دستیابی به پیکربندی بهینه‌ی آرایه‌های فتوولتائیک، انتخاب تجهیزات و مدیریت بهره‌برداری است. مقایسه‌های انجام‌شده با روش‌های دیگر از جمله الگوریتم PSO و EICA نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی از کارایی و دقت بالاتری در کاهش تلفات و هزینه‌ها برخوردار است. به‌صورت خلاصه نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر هستند:

- مطالعه امکان‌سنجی نصب نیروگاه خورشیدی برای تأمین بخشی از برق موردنیاز شبکه
- بررسی و محاسبه سود احتمالی حاصل از فروش برق به شبکه بالادست
- بررسی و محاسبه هزینه‌های جاری و اولیه در چشم‌انداز بلندمدت
- استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری EICA و FLBA برای بهینه‌سازی ساختار نیروگاه

لذا ساختار مقاله مذکور به شرح ذیل میباشد.

در بخش ۲ به بیان روابط و روش‌های حل مسئله طراحی بهینه نیروگاه خورشیدی خواهیم پرداخت، در بخش ۳ نتایج را موردبررسی قرار داده و نهایتاً در بخش ۴ نتیجه‌گیری کلی بیان خواهد شد.

۲- روابط و روش‌های حل مسئله طراحی بهینه نیروگاه خورشیدی

۲-۱- مدل صفحه خورشیدی

معمولاً توان خروجی یک صفحه خورشیدی در ساعت t از رابطه (۱) و (۲) پیروی می‌کند.

$$\rho_{PV}(t) = P_{R,PV} \times \frac{SR}{SR_{ref}} \times [1 + N_T (T_C - T_{ref})] \quad (۱)$$

$$T_C = T_{air} + [\frac{T_{NO}-20}{800} \times SR] \quad (۲)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

که در آن $P_{R,PV}$ توان نامی صفحه خورشیدی، SR شدت تابش خورشید در ساعت t، SR_{ref} شدت تابش مرجع (۱۰۰۰ وات بر مترمربع)، N_T ضریب حرارتی صفحه، T_C دمای صفحه، T_{ref} دمای مرجع، T_{air} دمای هوا در ساعت t، T_{NO} دمای کاری عملکرد بهینه هستند که توان تولیدی کل پنل‌ها برابر با رابطه (۳) خواهد بود و N_{PV} تعداد کل پنل‌های خورشیدی است [۲۷ و ۲۸].

$$P_{PV}(t) = \rho_{PV}(t) \times N_{PV} \quad (۳)$$

۲-۲- مدل باتری

نحوه عملکرد باتری‌ها در زمان شارژ و دشارژ معمولاً از رابطه‌های (۴) و (۵) پیروی می‌کنند.

$$ESL_{Ch}(t) = ESL(t-1) \times (1-\sigma) + [(P_{PV}(t) \times \eta_{INV}) - \frac{P_{Load}(t)}{\eta_{INV}} \times \eta_{BCh}] \quad (۴)$$

$$ESL_{DCh}(t) = ESL(t-1) \times (1-\sigma) + (\frac{P_{Load}(t)}{\eta_{INV}} - [(P_{PV}(t) \times \eta_{INV})]) \div \eta_{BDCh} \quad (۵)$$

که در این روابط $P_{Load}(t)$ توان بار در ساعت t، η_{INV} بازدهی مبدل AC/DC متصل به باتری، η_{BCh} بازدهی شارژ باتری، η_{BDCh} بازدهی دشارژ باتری، σ نرخ دشارژ خودی، ESL سطح انرژی باتری و $P_{Load}(t)$ توان بار در زمان t هستند [۲۹].

۲-۳- توابع هدف

یکی از مهم‌ترین بخش‌های مطالعات نیروگاه‌های خورشیدی بحث مطالعات اقتصادی و مسائل مربوط به سود و زیان‌های اقتصادی است که برای طرح‌های این‌چنینی ضروری بوده و برای توجیه اقتصادی طرح حتماً باید انجام شود. در این طرح، مطالعات با هدف کاهش هزینه‌های نصب و بهره‌برداری در چشم‌انداز بلندمدت و برای یک مورد مستقل از شبکه انجام می‌شود چراکه هزینه اینورترهای متصل به شبکه در این سطح برای کارفرما مقرون‌به‌صرفه نیست که توابع و قیود آن به شرح زیر خواهد بود.
تابع هدف در این طرح کاهش هزینه بهره‌برداری و نصب و تعمیر و نگهداری است که به‌صورت توابع (۶) تا (۱۱) بیان می‌شود.

$$\min.\text{Total Cost} = \sum C\&R + O\&M \quad (۶)$$

$$C\&R = CRF \times [N_{PV}.C\&R_{PV} + N_{BATT}.C\&R_{BATT} + N_{INV}.C\&R_{INV}] \quad (۷)$$

$$O\&M = N_{PV} \times O\&M_{PV} + N_{BATT} \times O\&M_{BATT} + N_{INV} \times O\&M_{INV} \quad (۸)$$

$$CRF = \frac{\mathbf{i} \times (\mathbf{1+i})^{\mathbf{n}}}{(\mathbf{1+i})^{\mathbf{n}} - \mathbf{1}} \quad (۹)$$

$$C\&R_{BATT} = Price_{BATT} \times [1 + \frac{1}{(1+i)^5} + \frac{1}{(1+i)^{10}} + \frac{1}{(1+i)^{15}}] \quad (۱۰)$$

$$C\&R_{INV} = Price_{INV} \times [1 + \frac{1}{(1+i)^{10}}] \quad (۱۱)$$

که در این روابط:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

C&R: هزینه نصب و تعویض تجهیزات در چشم‌انداز بلندمدت

O&M: هزینه تعمیر و نگهداری و بهره‌برداری سالانه

CRF[1]: ضریب بازگشت سرمایه

$C\&R_{PV}$: هزینه نصب هر واحد صفحه خورشیدی به همراه متعلقات

$C\&R_{BATT}$: هزینه نصب و تعویض هر واحد باتری به همراه متعلقات در سه بازه ۵، ۱۰ و ۱۵ سال

$C\&R_{INV}$: هزینه نصب و تعویض هر واحد اینورتر به همراه متعلقات در بازه ۱۰ سال

$O\&M_{PV}$: هزینه تعمیر نگهداری سالانه هر واحد صفحه خورشیدی

$O\&M_{BATT}$: هزینه تعمیر نگهداری سالانه هر واحد باتری

$O\&M_{INV}$: هزینه تعمیر نگهداری سالانه هر واحد اینورتر

n: طول عمر کل سیستم

i: نرخ بهره

$Price_{BATT}$: قیمت هر واحد باتری

$Price_{INV}$: قیمت هر دستگاه اینورتر

N_{PV}: تعداد صفحات مورداستفاده

N_{BATT}: تعداد باتری‌ها

N_{INV}: تعداد اینورترها

۲-۴- شاخص قابلیت اطمینان بار تأمین نشده

در سیستم خورشیدی چون انرژی خورشیدی در تمام ساعات شبانه‌روز در دسترس نبود و همچنین چون ظرفیت باتری‌های موجود محدود است، لذا ناخواسته در ساعاتی بسته به ابعاد نیروگاه درصدی از بار سیستم قابل تأمین نیست. ازاین‌رو، مقداری از بار سیستم باید از شبکه بالادست تغذیه شود که هرچه ظرفیت نیروگاه بیشتر باشد این میزان کمتر است. اصطلاحاً آن را شاخص بار تأمین نشده (LLS)[2] می‌نامند که در روابط (۱۲) و (۱۳) به معرفی آن پرداخته‌ایم.

$$LLSP = \frac{\sum_{t=1}^{T} LLS(t)}{\sum_{t=1}^{T} P_{Load}(t)} \ , \ \max\left(0 \ , P_{Load}(t) - P_{Gen}(t)\right) \qquad (۱۲)$$

$$LLS(t) = P_{Load}(t) - P_{Gen}(t) \qquad (۱۳)$$

که در این روابط $LLS(t)$ بار تأمین نشده در ساعت t است و از تفاضل توان بار $P_{Load}(t)$ در ساعت t و توان تولیدی $P_{Gen}(t)$ در زمان t به دست می‌آید. همچنین LLS فقط مقدار مثبت به خود می‌گیرد اگر توان تولیدی بزرگ‌تر از مقدار بار بود $LLS(t)$ صفر خواهد بود و مازاد تولید در باتری‌ها ذخیره می‌شود.

۲-۵- قیود طراحی

یکی دیگر از مسائلی که در طرح‌های بهینه باید موردتوجه قرار گیرد محدودیت‌های فنی و اقتصادی است در این طرح محدودیت سطح بار تأمین نشده، تعداد باتری‌ها، اینورترها و صفحات خورشیدی ازجمله مهم‌ترین قیودی هستند که باید در نظر گرفته

1 Capital recovery factor

2 Loss Load Supply

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

شوند. همچنین سطح شارژ و دشارژ باتری‌ها نیز ازجمله این قیود هستند که باید برای افزایش طول عمر باتری‌ها و کل سیستم موردتوجه قرار گیرد که در روابط (۱۴) تا (۱۸) به شرح آن‌ها پرداخته‌ایم [۳۰].

$$LLSP \leq Rl \quad (۱۴)$$

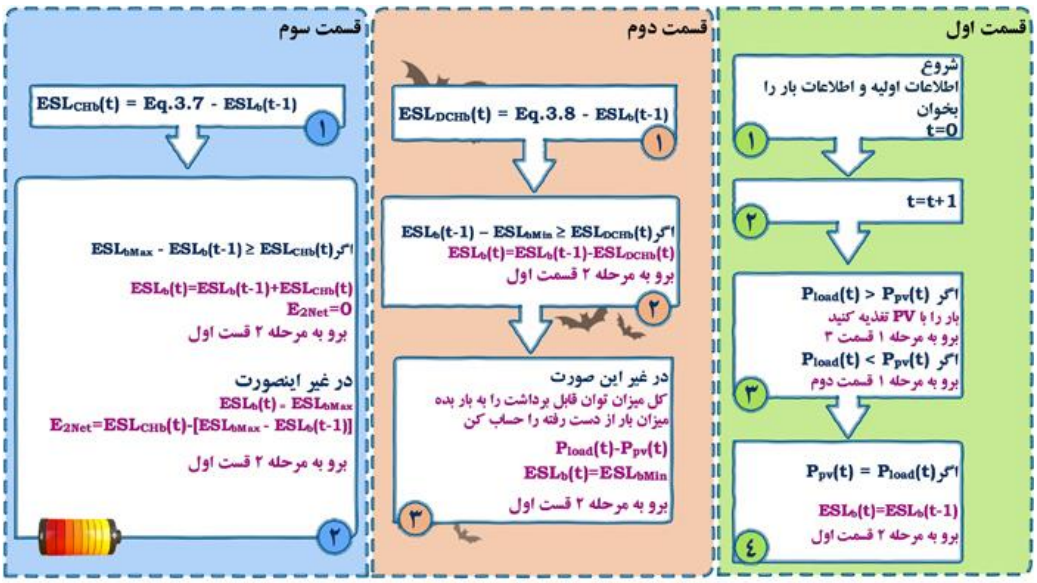
$$0 \leq N_{pv} \leq N_{PV\text{-}Max} \quad (۱۵)$$

$$0 \leq N_{BATT} \leq N_{BATT\text{-}Max} \quad (۱۶)$$

$$ESL_{Min} \leq ESL \leq ESL_{Max} \quad (۱۷)$$

$$ESL_{Min} = (1 - DOD) \times S_{BATT} \quad (۱۸)$$

که در روابط بالا RI[1] مقدار حداکثر بار ازدست‌رفته به‌عنوان شاخص قابلیت اطمینان، $N_{PV\text{-}Max}$ و $N_{BATT\text{-}Max}$ حداکثر تعداد صفحه خورشیدی و حداکثر تعداد باتری مورداستفاده، ESL_{Min} و ESL_{Max} حداقل و حداکثر انرژی ذخیره‌شده در باتری، DOD[2] عمق سطح دشارژ باتری‌ها و S_{BATT} ظرفیت نامی بانک باتری هستند. درنهایت ساختار طرح پیشنهادی برای باتری به‌صورت کلی می‌تواند به‌صورت روندنمای شکل (۱) تبیین گردد.



شکل (۱): ساختار طرح پیشنهادی

Figure (1): Structure of the proposed scheme

۶-۲- روش بهینه‌سازی

[1] *Reliability Index*

[2] *Deep Of Discharge*

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

۱-۶-۲- الگوریتم EICA

در EICA، یک مرحله پیاده‌سازی جدید به ICA استاندارد اضافه می‌شود. از طریق این پیاده‌سازی، یک کشور (همسایه) به‌طور تصادفی برای هر مستعمره در هر امپراتوری انتخاب می‌شود و اگر همسایه بهتر باشد، مستعمره در همان امپراتوری به همسایه منتقل می‌شود و اگر همسایه ضعیف‌تر باشد، مستعمره از همسایه دور می‌شود. علاوه بر این، مستعمره تازه ایجادشده در صورت بهتر بودن نسبت به مستعمره فعلی جایگزین آن می‌شود؛ بنابراین انتظار می‌رود که کارایی الگوریتم بهبود یابد. چنین جایگزینی فرایند جستجو را برای موقعیت‌های بهتر تقویت می‌کند و کارایی الگوریتم را بهبود می‌بخشد. مراحل اجرای این الگوریتم به شرح زیر است [۳۱].

مرحله ۱. مقداردهی اولیه: به تعداد کشور با موقعیت تصادفی ایجاد کرده و آن‌ها را از طریق $N_{imp}=N_{pop}/5$ توزیع کنید. شایستگی[1] همه کشورها را ارزیابی کرده و شایسته‌ترین امپراتوری را به‌عنوان امپریالیست آن شناسایی کنید.

مرحله ۲. برای هر امپراتوری، مرحله ۳ را انجام دهید.

مرحله ۳. برای هر مستعمره در امپراتوری فعلی، مراحل ۴ تا ۶ را تکرار کنید.

مرحله ۴. مرحله ۱ راه‌رفتن:

هر مستعمره را به‌جز امپریالیست توسط معادله (۱۹) حرکت دهید:

$$X_{c,new} = X_c + (4 \times rand - 1) + (X_{imp} - X_c) \quad (۱۹)$$

مقدار $X_{C,new}$ را ارزیابی کنید و اگر بهتر از X_c باشد جایگزین آن کنید.

مرحله ۵. مرحله ۲ راه‌رفتن:

یک کلونی همسایه X_{Nb} را به‌صورت تصادفی انتخاب کنید؛

اگر X_{Nb} شایستگی بیشتری نسبت به X_c دارد آنگاه $s=+1$ قرار دهید؛ در غیر این صورت $s=1$. نامزد $X_{c,new}$ را با کمک معادله (۲۰) تولید کنید.

$$X_{c,new} = X_c + rand \times s + (X_{Nb} - X_c) \quad (۲۰)$$

$X_{c,new}$ را ارزیابی کنید. آنگاه اگر بهتر از X_c باشد جایگزین آن کنید.

مرحله ۶. اگر یک کلونی با هزینه کمتر نسبت به امپریالیست وجود داشته باشد (سازگارتر یا شایسته‌تر باشد) آنگاه موقعیت آن را درون امپراتوری مربوط به آن مبادله کنید.

مرحله ۷. توان کل T_{imp}، توان کل نرمال شده NT_{imp} و احتمال آن P_{imp} را برای تمام امپراتوری‌ها با معادلات (۲۱) تا (۲۳) به دست آورید (k عددی بین صفر و یک است معمولاً ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود):

$$T_{imp} = fitness(X_{imp}) + k \times \frac{\sum_{i=1}^{N_c} fitness(X_c)}{2N_c} \quad (۲۱)$$

$$NT_{imp} = T_{imp} - \max(T_{imp}) \quad (۲۲)$$

[1] *Fitness*

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

$$P_{imp} = \left| \frac{NT_{imp}}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} NT_i} \right| \quad (۲۳)$$

مرحله ۸. بدترین کلونی را از ضعیف‌ترین امپراتوری به امپراتوری‌ای که بالاترین احتمال را بر اساس P_{imp} دارد انتقال دهید.
مرحله ۹. امپراتوری‌های بدون قدرت را حذف کنید (منظور امپراتوری که قدرتش با مقدار تابع تناسب امپریالیستش برابر است).
مرحله ۱۰. مرحله ۲ را تا وقتی تکرار کنید که معیار خاتمه برآورد شده باشد یعنی به تعداد مشخصی از تکرارها یعنی Max_{Iter} رسیده باشیم.

۲-۶-۲- الگوریتم خفاش با پرواز لِوی FLBA

خلاصهٔ مراحل الگوریتم خفاش به ترتیب زیر می‌باشد [۳۲]:

مرحله ۱- شروع

مرحله ۲- یک جمعیت اولیهٔ Pتایی خفاش‌ها (xi) را مطابق با حدود متغیرها بین حداقل و حداکثر (xmin, xmax) مقدار مشخص‌شده به‌صورت تصادفی تولید کن.

مرحله ۳- برای تمام مقادیر جمعیت اولیهٔ (xi) مقدار تابع هدف f(xi) را محاسبه کن و به هر خفاش (xi) یک سرعت اولیه (vi) اختصاص بده. در اینجا سرعت اولیه صفر در نظر گرفته شده است.

مرحله ۴- مقادیر f(xi) را از کم به زیاد مرتب کن و کوچک‌ترین مقدار f(xi) و xi متناظر با آن را به‌عنوان بهترین جواب x* انتخاب و ذخیره کن.

مرحله ۵- برای کل جمعیت P مراحل زیر را انجام بده.

۵-۱. مطابق با روابط (۲۴)، (۲۵) و (۲۶) به ترتیب برای هر خفاش (xi)، یک فرکانس (fi)، نرخ انتشار (r1i) و یک بلندی صدا (A1i) تعریف کن.

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (۲۴)$$

اگر در تکرار اول قرار داریم، مطابق روابط (۲۵) و (۲۶) r و A تعیین شوند؛ در غیر این صورت، مطابق روابط (۳۴) و (۳۵)

$$r_i^1 = r_0.ones(P,1) \quad (۲۵)$$

$$A_i^1 = A_0.ones(P,1) \quad (۲۶)$$

روابط (۲۵) و (۲۶) فقط برای تکرار اول صادق است و در ادامه تغییر خواهند کرد. در رابطهٔ (۲۴)، $\boldsymbol{\beta} \in [0, 1]$ یک بردار تصادفی است که دارای توزیع یکنواخت است. همچنین r_0 و A_0 به ترتیب نرخ انتشار و بلندی صدای اولیه هستند که مقادیر آن‌ها برابر ۰/۵ و ۰/۹ در نظر گرفته شده است. همچنین f_{min} و f_{max} به ترتیب ۰ و ۲ در نظر گرفته شده‌اند.

برای کل جمعیت P مراحل زیر را انجام بده:

۵-۲. سرعت و موقعیت خفاش‌ها را مطابق با روابط (۲۷) و (۳۲) محاسبه و به‌روز کن.

$$V_i^t = \omega_{iter} V_i^{t-1} + (X_i^{t-1} - X^*).f_i \quad (۲۷)$$

$$\omega_{iter} = \omega_{max} - \text{atan}\frac{4t}{Max_{iter}}(\omega_{max} - \omega_{min}) \quad (۲۸)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

$$X_i^t = \text{Lévy}.\ X_i^{t-1} + V_i^t.\ C_i\ (t) \quad (۲۹)$$

$$\text{Lévy} = 0.01\ \frac{r_1}{|r_2|^{\frac{1}{\varphi}}} \times \left(\frac{\Gamma(1+\varphi).\sin\frac{\pi\varphi}{2}}{\Gamma\left(\frac{1+\varphi}{2}\right).\varphi.2^{\frac{\varphi-1}{2}}}\right)^{\frac{1}{\varphi}} \quad (۳۰)$$

$$\Gamma(1+\varphi) = \int_0^{\infty} X^{\varphi}.e^{-x}dx \quad (۳۱)$$

$$C_i(t) = \theta^P.\ e^{\left(\frac{-t}{\text{Maxitr}}\right)} \quad (۳۲)$$

رابطهٔ (۳۱)، همان ضریب وزنی کاهشی است؛ اما این بار به‌صورت مثلثاتی حرکت خود را دنبال می‌کند. همچنین برای به‌روزرسانی موقعیت خفاش‌ها از سازوکار پرواز لِوی استفاده شده است. در (۳۰)، r1 و r2 دو عدد تصادفی با توزیع نرمال در بازهٔ بین ۰ تا ۱ هستند. همچنین مقدار φ برابر با ۱/۵ در نظر گرفته شده است. تعریف تابع گاما (Γ) مطابق با رابطهٔ (۳۱) است. رابطهٔ (۳۲)، ضریب تنظیم سرعت است که به شکل نمایی تغییر می‌کند. θ عددی بین ۰ تا ۱ است و در اینجا مقدار ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است و هم تعداد کل جمعیت اولیه است [۳۲].

۳-۵. اگر: عدد تصادفی rand، $\text{rand} \in [0,1]$ بزرگ‌تر از r_i بود،

آنگاه: یک جواب محلی جدید، اطراف بهترین جواب کل جمعیت (x_{new}) مطابق با رابطهٔ (۳۳) تولید کن.

$$X_{new} = X^* + \sigma.\text{randN}(0,1)_{1*nvar}.A^t \quad (۳۳)$$

$$A^t = \frac{\sum_{i=1}^{P} A_i^t}{P}$$

در رابطهٔ (۳۳) σ به‌عنوان انحراف معیار عملکرد خفاش در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن برابر با ۰/۱ است. همچنین $\text{randN}(0,1)$ عددی تصادفی با توزیع نرمال در بازهٔ بین صفر تا یک است که ابعاد آن به‌اندازهٔ متغیرهای مسئله، مورد حل (nvar) است. همچنین A^t میانگین بلندی صدای همهٔ خفاش‌ها در تکرار tام است.

۴-۵. اگر: عدد تصادفی rand، $(\text{rand} \in [0,1])$ کوچک‌تر از A_i و همچنین $f(x^{new}_i)<f(x^{old}_i)$ بود،

آنگاه: مقادیر بلندی صدا (A) و نرخ انتشار (r) را مطابق روابط (۳۴) و (۳۵) به‌روز کن و مقدار $f(x^{old}_i)=f(x^{new}_i)$ را قرار بده.

$$A_i^{t+1} = \boldsymbol{\alpha} A_i^t \quad (۳۴)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0\mathbf{[1 - exp(-\gamma t)]} \quad (۳۵)$$

در روابط (۵۳-۳) و (۵۴-۳) α، فاکتور کاهش A و γ، فاکتور کاهش r هستند که به ترتیب برابر با ۰/۹۷ و ۰/۱ در نظر گرفته می‌شوند. همچنین t شمارهٔ تکرار و i شمارندهٔ جمعیت هستند.

۵-۵. اگر:

$$\mathbf{f(x^{new}_i) < f(x^*)}$$

آنگاه:

$$\mathbf{x^* = x^{new}_i}$$

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

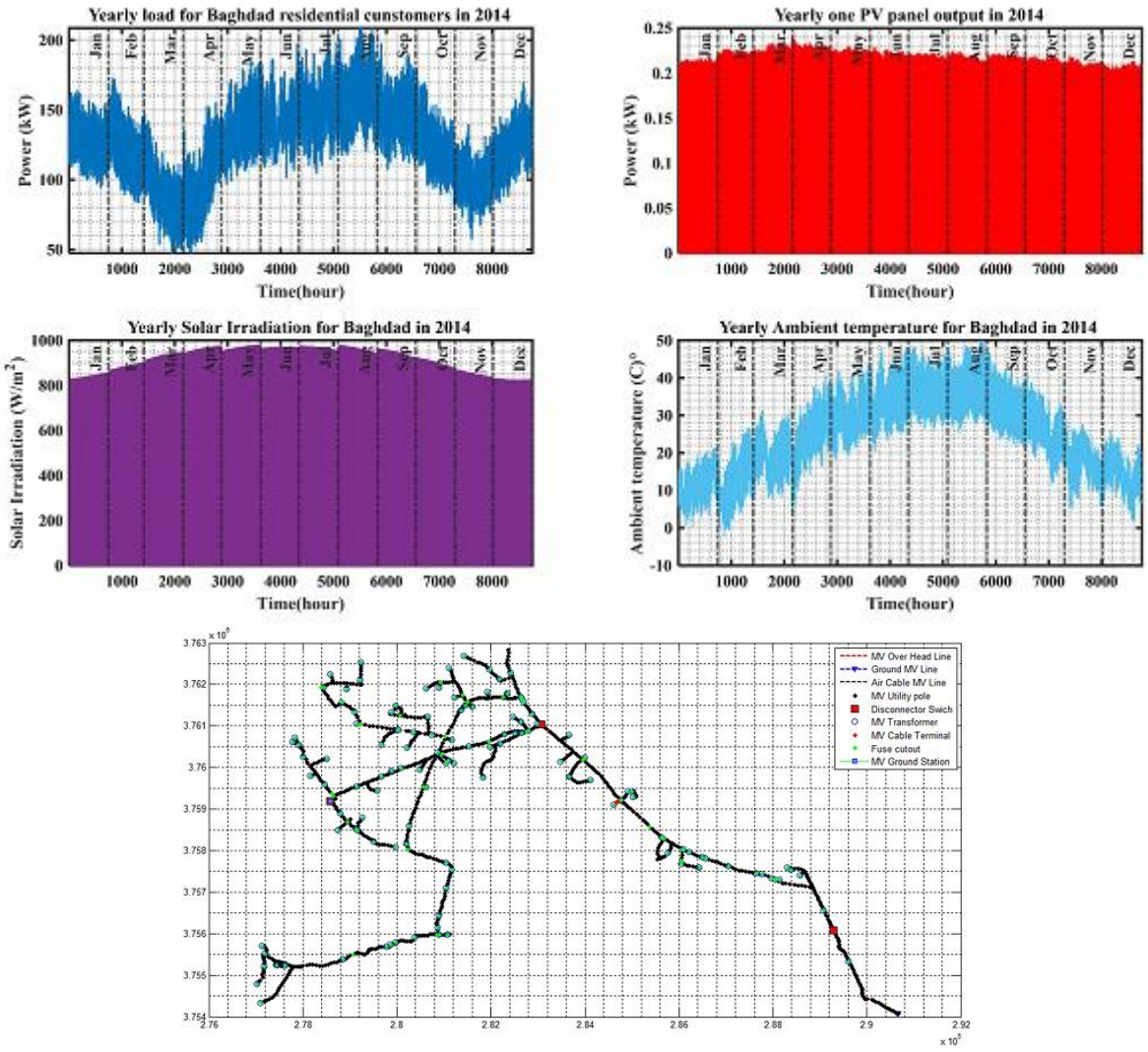
$$f(x^{new}_i)=f(x^*)$$

مرحله ۶- آیا تکرارها به پایان رسیده است؟ اگر بله برو به مرحلهٔ ۷، اگر خیر برو به مرحلهٔ ۵

مرحله ۷- پایان

۳- نتایج سیستم موردمطالعه

مطالعات بهینه‌سازی ساختار نیروگاه خورشیدی در این پژوهش، بر روی شبکه الکتریکی شهر بغداد در کشور عراق انجام شده است. به‌منظور انجام این محاسبات، بخشی از داده‌های بار سالیانه شبکه بغداد برای سال ۲۰۱۴ میلادی مورداستفاده قرار گرفت. این میزان بار، معادل ۰،۰۰۰۰۸ از کل بار شبکه است؛ زیرا تأمین کل بار توسط نیروگاه خورشیدی با توجه به محدودیت‌های مالی فعلی و همچنین سطح پایین قابلیت اطمینان آن، در عمل امکان‌پذیر نیست. شکل (۲) تغییرات دما، میزان تابش، بار مصرفی و توان تولیدی یک سلول خورشیدی و نیز شمای تک‌خطی سیستم تحت بررسی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): بار، دما، تابش و توان خورشیدی و دیاگرام تک‌خطی برای شهر بغداد

Figure (2): Load, temperature, irradiation, solar power, and single-line diagram for Baghdad city

این شبیه‌سازی در سه سناریو برای درصدهای مختلف بار تأمین نشده (LLS) و توسط دو الگوریتم فرا ابتکاری EICA و FLBA انجام شده است. در اینجا شاخص LLS به‌عنوان شاخص قابلیت اطمینان (RI) در نظر گرفته شده است. در جدول (۱) شرح این سناریوها آورده شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

Table (1): Introduction of scenarios
جدول (۱): معرفی سناریوها

روش / سناریو	PSO	ALPSO
(RI=1%)	✓	✓
(RI=3%)	✓	✓
(RI=5%)	✓	✓

همچنین مشخصات باتری‌ها و صفحات خورشیدی مورداستفاده برای بهینه یابی ساختار نیروگاه خورشیدی در جدول (۲) آورده شده است. شایان‌ذکر است که چشم‌انداز مطالعه در اینجا ۲۰ ساله بوده و اطلاعات مطابق مراجع [۴ و ۲۳] است. جدول (۳) نتایج همگرایی برای دو الگوریتم موردنظر را نمایش می‌دهد، همان‌طور که از نتایج این جدول مشخص است بهترین و کمترین هزینه را برای طراحی ساختار نیروگاه خورشیدی الگوریتم EICA با اختلاف خیلی کمی به دست آورده است. این الگوریتم موفق شده است تا با هزینه‌ای بین ۱۸۴۹۱۵ دلار تا ۲۱۰۱۵۵ دلار ساختار بهینه‌ای با درصد مشخص LLS ارائه دهد؛ اما کمترین انحراف معیار (SD) پاسخ نیز مربوط به الگوریتم FLFBA بوده که این خود نشان‌دهنده‌ی قدرت الگوریتم FLFBA نسبت به الگوریتم EICA در یافتن پاسخ بهینه است. همچنین به لحاظ زمان شبیه‌سازی الگوریتم FLFBA توانسته تا در اکثر موارد سرعت بهتری را در محاسبه جواب داشته باشد. البته این تنها معیار برتری پاسخ در این مسئله نبوده و باید سایر شاخص‌ها نیز موردبررسی قرار گیرند که در ادامه به آن‌ها خواهیم پرداخت.

Table (2): System specifications
جدول (۲): مشخصات سیستم

صفحه خورشیدی		باتری		مبدل	
توان نامی (وات)	۲۶۰	ظرفیت نامی (کیلووات ساعت)	۲/۱	حداکثر توان نامی (کیلووات)	۲۶۰
قیمت هر صفحه (دلار)	۲۰۰	بازدهی شارژ (درصد)	۸۵	بازدهی (درصد)	۹۵
هزینه تعمیر و نگهداری (دلار بر سال)	۱۲	بازدهی دشارژ (درصد)	۱۰۰	قیمت هر مبدل (دلار)	۷۲۵۰
مساحت صفحه (مترمربع)	۱/۶۴	قیمت هر باتری (دلار)	۳۱۰	هزینه تعمیر و نگهداری (دلار بر سال)	۱۵
بازدهی (درصد)	۱۵/۸	هزینه تعمیر و نگهداری (دلار بر سال)	۱۰		
تابش مرجع (وات بر مترمربع)	۱۰۰۰	عمق دشارژ DOD	۰/۸	طول عمر (سال)	۱۰
دمای مرجع (°C)	۲۵				
دمای طبیعی (°C)	۳۳				
ضریب حرارتی صفحه (۱/°C)	$-۳/۷\times۱۰^{-۳}$	خود دشارژی ساعتی (درصد)	۰/۰۲		
طول عمر (سال)	۲۰	طول عمر (سال)	۵		
مشخصات کل سیستم					
نرخ بهره کل (درصد)	۱۰	طول عمر سیستم (سال)	۲۰	قیمت فروش برق به شبکه (دلار)	۰/۱۳۲

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

Table (3): Convergence results of algorithms in three scenarios

جدول (۳): نتایج همگرایی الگوریتم‌ها در سه سناریو

RI (%)	Method	Mean ($)	Best ($)	Worst ($)	SD ($)	Simulation Time (Sec)
1	**FLFBA**	210780.1846	210155.3851	223684.6537	21076.01469	31.87309325
	EICA	210238.6322	210155.3851	210238.6322	9.98944E-06	10.93950363
3	**FLFBA**	194022.3412	195139.78	217081.0129	19638.70997	15.6943549
	EICA	2.52403E+61	195210.7639	9.74126E+61	2.86973E+61	258.6967979
5	**FLFBA**	184975.4959	184950.7217	193481.459	13153.42537	21.33379953
	EICA	3.92541E+61	184915.2298	1.53648E+62	5.19404E+61	258.4740444

همچنین جدول (۴) ساختارهای بهینه هر الگوریتم را به‌خوبی توصیف می‌کند. در این جدول همان‌طور که مشخص است بازهم الگوریتم‌های EICA و FLFBA توانسته‌اند کمینه مقدار هزینه‌های سرمایه‌گذاری (TNAC) که شامل هزینه نصب تجهیزات در چشم‌انداز ۲۰ ساله (CR) و هزینه تعمیر و نگهداری (OM) سالانه است را به دست آورد. اختلاف نتایج به‌دست‌آمده در هر دو الگوریتم خیلی کم و نزدیک است. نزدیک‌ترین نتایج به EICA مربوط به FLFBA است در RI=۱٪ مقدار بهینه برای هر دو الگوریتم برابر با ۲۱۰۱۵۵/۳۸۵۱ دلار است و به ترتیب برای RIهای ۳ و ۵ درصد الگوریتم FLFBA مقادیر بهینه‌ی ۱۹۵۱۳۹/۷۸ و ۱۸۴۹۵۰/۲۷۱۷ دلار را ارائه می‌دهد، همچنین الگوریتم EICA مقادیر ۱۹۵۲۱۰/۷۶۳۹ و ۱۸۴۹۱۵/۲۲۹۸ دلار را به دست آورده است.

Table (4): Structure and final cost for the algorithms

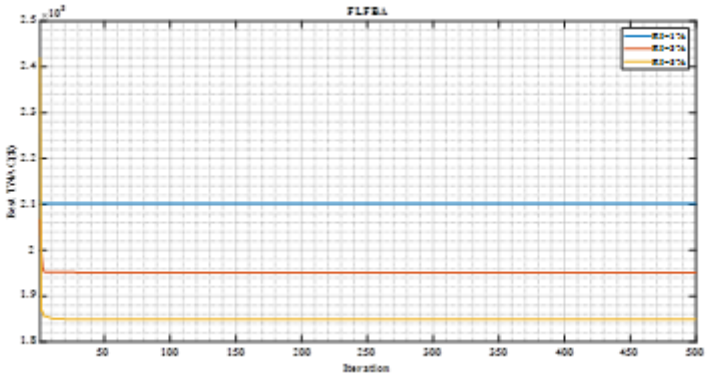
جدول (۴): ساختار و هزینه نهایی برای الگوریتم‌ها

RI (%)	Method	LLSP	N_PV	N_BATT	N_INV	TNAC ($)	CR ($)	($) OM	Sell to Net ($)
1	**FLFBA**	0.010083212	2787	1173	3	210155.3851	164936.3851	45219	28052.19491
	EICA	0.010083212	2787	1173	3	210155.3851	164936.3851	45219	28052.19491
3	**FLFBA**	0.030157789	2607	1079	3	195139.78	153020.78	42119	20127.49071
	EICA	0.030036694	2609	1079	3	195210.7639	153067.7639	42143	20233.06378
5	**FLFBA**	0.050042881	2488	1014	3	184950.7217	144909.7217	40041	15946.02556
	EICA	0.05012378	2487	1014	3	184915.2298	144886.2298	40029	15896.73696

شکل (۳) و (۴) مربوط به الگوریتم FLFBA و EICA است همان‌طور نشان داده‌شده این دو الگوریتم در هر سه سطح RI در کمتر از ۱۰ تکرار جواب بهینه خود را به دست آورده‌اند. همان‌طور که در شکل (۳)، نشان داده‌شده الگوریتم FLFBA در هر سه حالت مقادیر بهینه‌ای تقریباً برابر با الگوریتم دیگر به دست آورده است اما میزان LLS و سودآوری آن برای شبکه در حالت RI برابر با ۵ درصد از الگوریتم EICA بهتر است. شکل (۵) مقایسه خوبی از بهترین جواب هر دو الگوریتم در هر سه سطح RI در اختیار شما قرار می‌دهد.

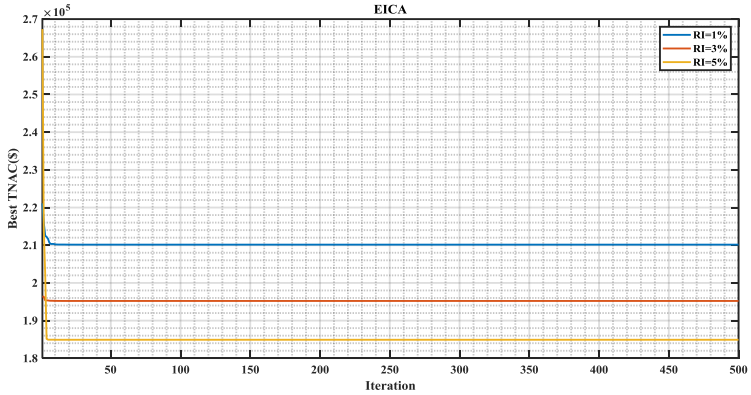
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026



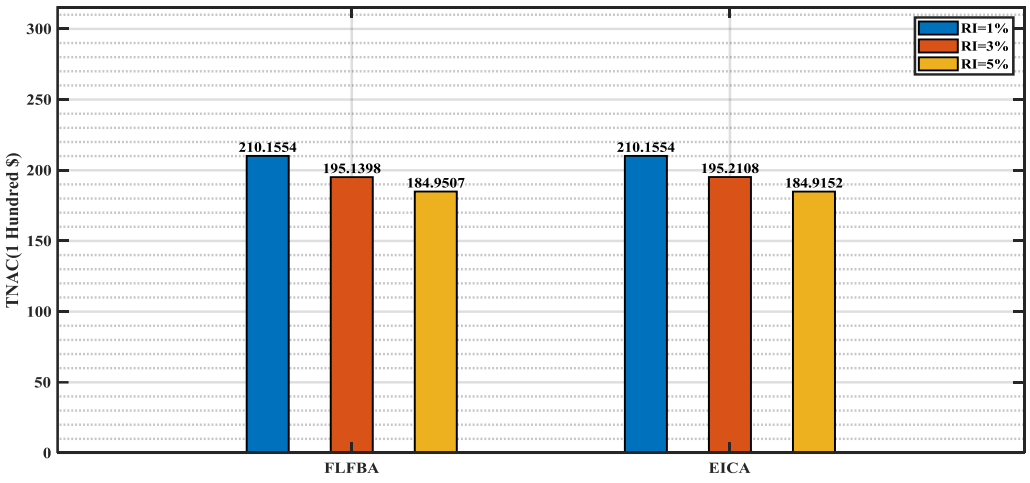
شکل (۳): منحنی همگرایی الگوریتم FLBA در هر سه سطح RI

Figure (3): Convergence curve of the FLBA algorithm at all three RI levels



شکل (۴): منحنی همگرایی الگوریتم EICA در هر سه سطح RI

Figure (4): Convergence curve of the EICA algorithm at all three RI levels



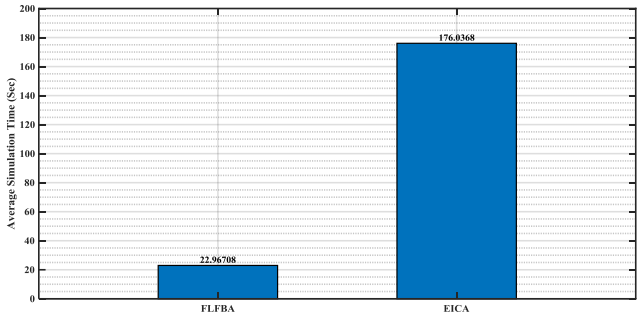
شکل (۵): مقایسه نهایی بهترین جواب هر دو الگوریتم در سه سطح RI

Figure (5): Final comparison of the best solution of both algorithms at three RI levels

همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد الگوریتم‌های EICA و FLFBA نتایج مشابهی را نسبت به هم به دست آورده‌اند که این نشان از قدرت هر دو الگوریتم در یافتن بهینه سراسری دارد. دو الگوریتم EICA و FLFBA برای RI=1% هر دو ۲۱۰/۱۵۵۴ هزار دلار هزینه برای طراحی سیستم پیشنهاد کرده‌اند اما الگوریتم FLFBA در RI برابر ۳ درصد مقدار کمتری را یعنی ۱۹۵/۱۳۹۶

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

هزار دلار پیشنهاد کرده است که نسبت به الگوریتم EICA که ۱۹۵/۲۱۰۶ است دارای اختلاف ۰/۰۷۱ هزار دلار برای اجرای طرح است که تا حدودی به‌صرفه‌تر و اقتصادی‌تر بوده است. همچنین سرعت دستیابی الگوریتم EICA به جواب‌ها بالاتر است. یکی از مسائلی که در الگوریتم‌های فرا ابتکاری مهم است مسئله سرعت اجرای الگوریتم است که در ادامه شکل (۶) این فاکتور را برای هر دو الگوریتم مقایسه کرده است.

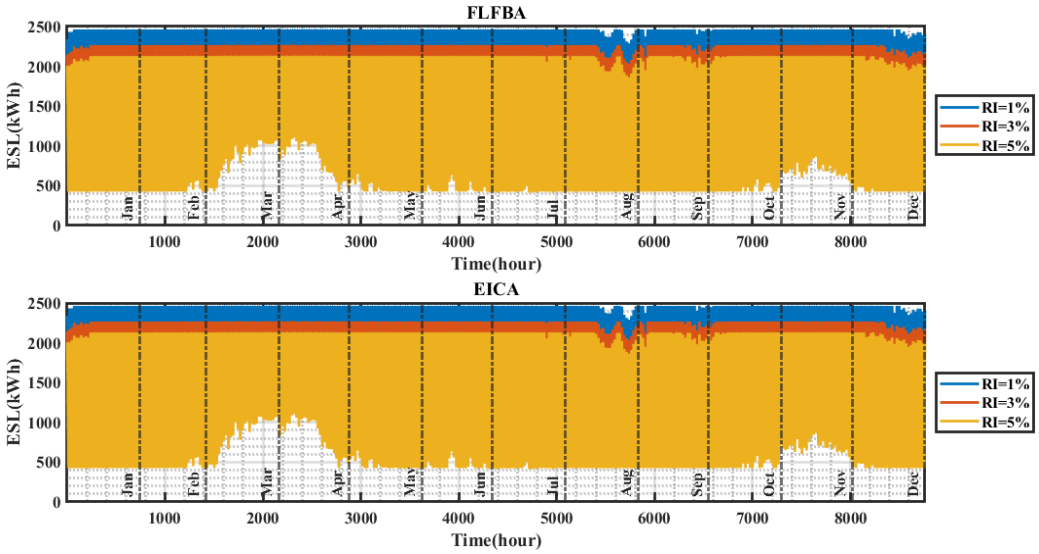


شکل (۶): مقایسه نهایی بهترین سرعت هر دو الگوریتم

Figure (6): Final comparison of the best speed of both algorithms

در شکل (۶) همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم FFBA با میانگین زمان ۲۲/۹۶۷۰۸ ثانیه دارای سریع‌ترین زمان دستیابی به جواب بهینه است، بعدازآن الگوریتم EICA با میانگین ۱۷۶/۰۳۶۸ ثانیه که سرعت آن از الگوریتم FFBA که نسخه بهبودیافته الگوریتم خفاش است حدود ۱۵۳/۰۶۹۷۲ ثانیه بیشتر است. البته این سرعت فقط به الگوریتم مرتبط نبوده بلکه مشخصات پردازنده، حافظه رام و شرایط کاری سیستم نیز در آن دخیل است. این سرعت‌ها میانگین ده بار اجرا برای الگوریتم‌های موردنظر است.

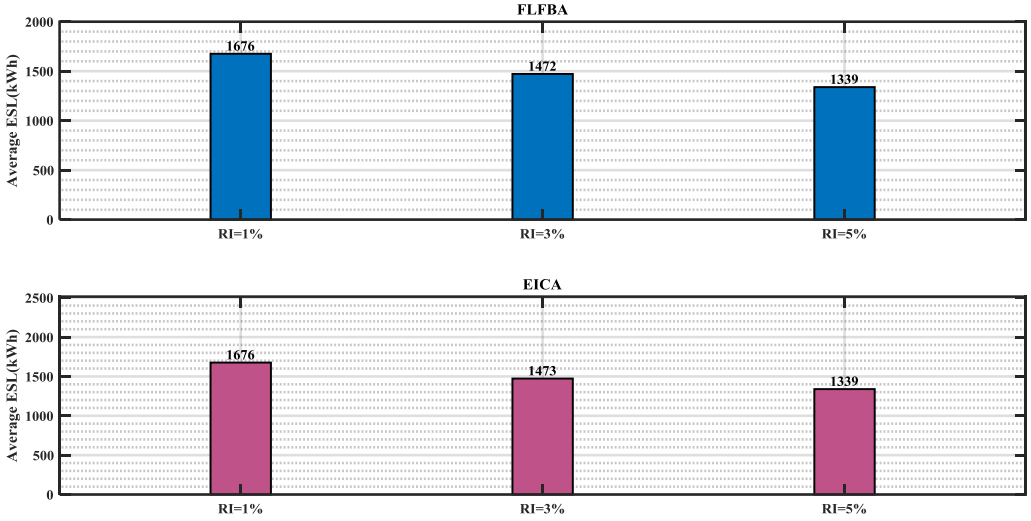
از شاخصه‌ای اقتصادی که بگذریم نوبت به شاخصه‌ای فنی می‌رسد که البته با شاخص قابلیت اطمینان و فاکتورهای اقتصادی ارتباط نزدیک دارد. لذا در شکل‌های (۷) تا (۱۰) به ترتیب ابتدا سطح شارژ و سپس سطح انرژی تولیدی صفحات خورشیدی با توجه به تغییر الگوریتم‌ها و سطح RI موردبررسی قرار می‌گیرد.



شکل (۷): سطح شارژ سالانه برای دو الگوریتم در سه سطح RI

Figure (7): Annual state of charge for two algorithms at three RI levels

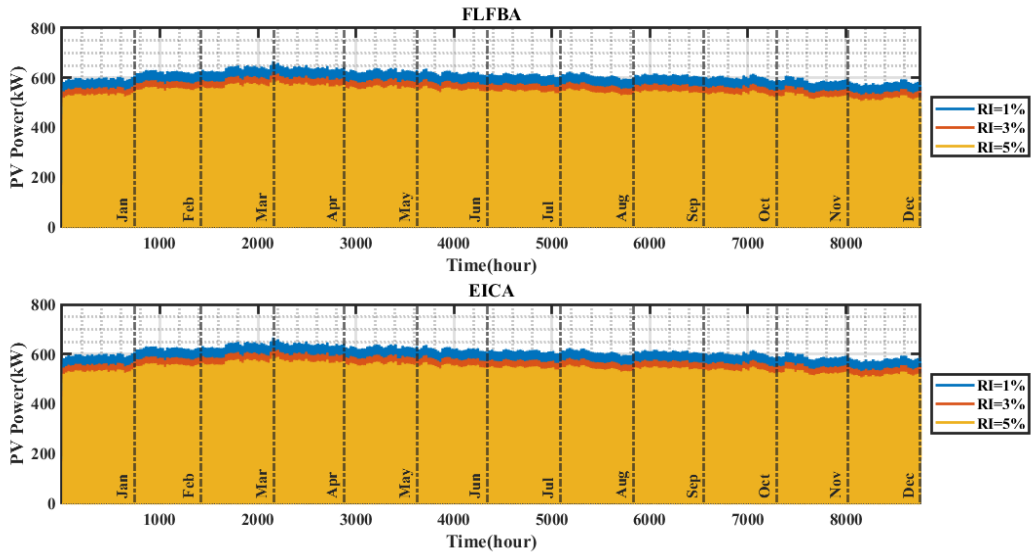
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026



شکل (۸): متوسط سطح شارژ سالانه برای دو الگوریتم در سه سطح RI

Figure (8): Average annual state of charge for two algorithms at three RI levels

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌کنید با افزایش سطح RI میزان سطح شارژ باتری‌ها نیز افزایش می‌یابد چراکه برای دستیابی به سطح قابلیت اطمینان بالاتر و تأمین بیشتر بار بهره‌بردار باید تعداد بیشتری باتری را در شبکه نصب‌کرده که این خود هزینه‌ی اجرای طرح را بالا می‌برد. از طرفی شکل (۸) متوسط سطح انرژی باتری را نشان می‌دهد، همان‌طور که مشاهده می‌کنید در هر سه سطح بیشترین سطح انرژی شارژ شده در باتری‌ها در هر دو الگوریتم مشابه است. این الگوریتم در سه سطح RI، ۱، ۳ و ۵ درصد به ترتیب متوسط مقادیر ۱۶۷۶، ۱۴۷۳ و ۱۳۳۹ کیلووات ساعت انرژی شارژ کرده است. همچنین در ادامه مشابه همین مقایسه در شکل (۹) برای صفحات خورشیدی انجام شده است.



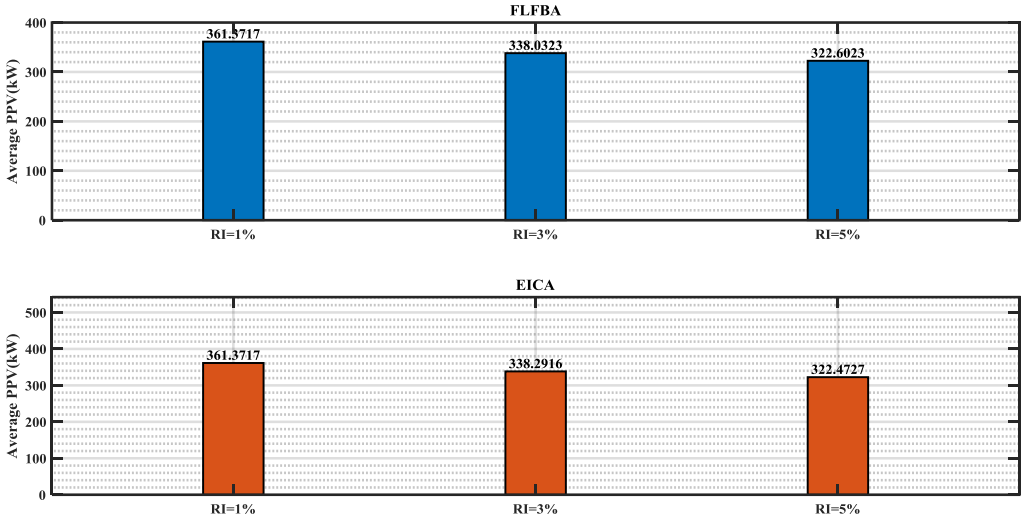
شکل (۹): سطح توان خورشیدی سالانه برای دو الگوریتم در سه سطح RI

Figure (9): Annual solar power level for two algorithms at three RI levels

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود مانند شکل (۷) با افزایش سطح RI بهره‌بردار مجبور به افزایش هزینه سرمایه‌گذاری برای افزایش میزان توان خورشیدی دریافتی است لذا باید به‌منظور کاهش سطح LLS تعداد صفحات خورشیدی را افزایش دهد.

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

ازآنجاکه برای مقایسه بهتر در این شکل جزئیات زیاد مشخص نیست لذا مقدار متوسط توان خورشیدی سالانه را هم محاسبه و در شکل (۱۰) آماده کرده‌ایم.

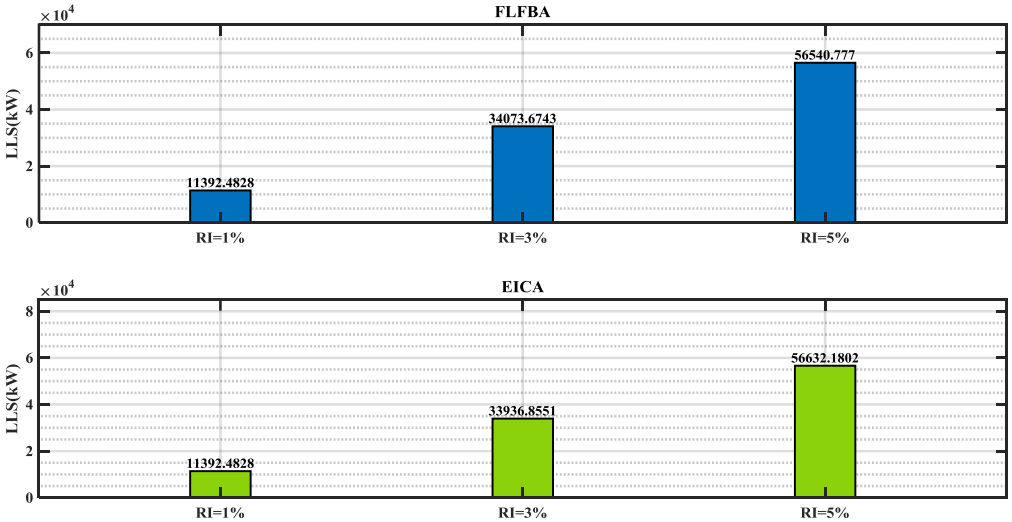


شکل (۱۰): متوسط سطح توان خورشیدی سالانه برای دو الگوریتم در سه سطح RI

Figure (10): Average annual solar power level for two algorithms at three RI levels

با توجه به شکل (۱۰) درمی‌یابیم که باز هم متوسط توان خورشیدی سالانه‌ای که طراحی بهینه توسط الگوریتم EICA در RI برابر با ۳ درصد ارائه می‌شود بیشتر از الگوریتم FLFBA است. همچنین در RI برابر با ۵ درصد بیشترین مقدار مربوط به الگوریتم FLFBA است که مقدار آن ۳۲۲/۶۰۲۳ کیلووات است.

با توجه به نتایج می‌توان به‌خوبی دریافت که با افزایش نفوذ توان خورشیدی و تعداد باتری در شبکه به ازای سطوح مختلف RI میزان بار تأمین نشده شبکه به‌شدت کاهش‌یافته و قابلیت اطمینان تغذیه بار توسط سیستم خورشیدی و باتری افزایش می‌یابد؛ اما اینکه کدام الگوریتم در این زمینه موفق‌تر عمل می‌کند را نمی‌توان به‌خوبی تشخیص داد ازاین‌رو شکل (۱۱) این مقایسه را بهتر نمایش می‌دهد.



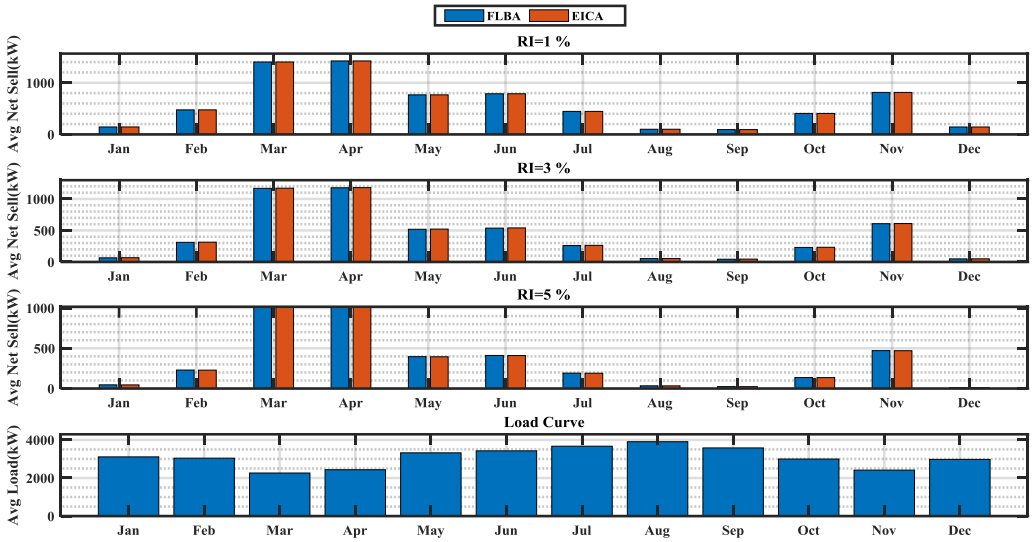
شکل (۱۱): سطح بار تأمین نشده سالانه برای هر چهار الگوریتم در سه سطح RI

Figure (11): Annual loss of load supply level for all four algorithms at three RI levels

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

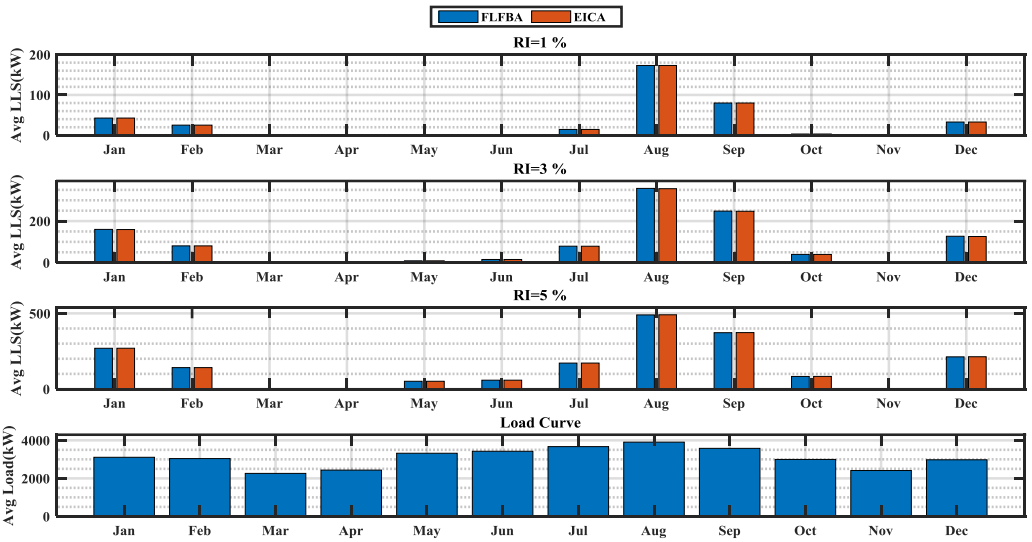
همان‌طور که از شکل (۱۱) مشخص است الگوریتم FLFBA به ترتیب برای RIهای ۱، ۳ و ۵ درصد میزان بار تأمین نشده‌ی ۱۱۳۹۲/۴۸۲۸، ۳۴۰۷۳/۶۷۴۳ و ۵۶۵۴۰/۷۷۷ کیلووات را ارائه کرده حال‌آنکه الگوریتم‌های EICA مقادیر ۱۱۳۹۲/۴۸۲۸، ۳۳۹۳۶/۸۵۵۱ و ۵۶۶۳۲/۱۸۰۲ کیلووات را ارائه کرده است. این خود نشان می‌دهد که الگوریتم‌های EICA و FLFBA طرح‌های اقتصادی و طرحی با قابلیت اطمینان بالایی را برای بهره‌بردار سیستم ارائه می‌دهد.

در ادامه برای مقایسه بهتر مقادیر میانگین ماهانه LLS و توان قابل‌فروش به شبکه شکل‌های (۱۲) و (۱۳) آورده شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود در ماه‌های مارس و آوریل مقدار میانگین توان قابل‌فروش به شبکه حداکثر شده است اما در این میان حداکثر میزان توان قابل‌فروش در RI برابر ۳ درصد مربوط به الگوریتم EICA است اما در RI برابر ۵ درصد الگوریتم FLFBA حداکثر توان قابل‌فروش را به شبکه ارائه می‌کنند و نتایج برای سایر ماه‌ها مشابه است.



شکل (۱۲): توان قابل‌فروش به شبکه سالانه برای هر دو الگوریتم در سه سطح RI

Figure (12): Annual power saleable to the grid for both algorithms at three RI levels



شکل (۱۳): سطح بار تأمین نشده سالانه برای هر دو الگوریتم در سه سطح RI

Figure (13): Annual loss of load supply level for both algorithms at three RI levels

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

با توجه به شکل (۱۳) می‌توان گفت که بیشترین توان ازدست‌رفته مربوط به ماه‌های Aug و Sep است در این ماه‌ها حداکثر بار شبکه اتفاق افتاده ازاین‌رو طبیعی است که باید میزان بار ازدست‌رفته شبکه حداکثر باشد. همچنین مطابق با شکل (۱۲) در این دو ماه میانگین توان قابل‌فروش به شبکه هم حداقل است و در مقابل در ماه‌های مارس و آوریل که بار شبکه حداقل است مقدار توان قابل‌فروش حداکثر است. همچنین در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که بازهم میزان بار ازدست‌رفته برای روش EICA در RI برابر با ۳ درصد حداقل بوده و فقط در RI برابر با ۵ درصد الگوریتم FLFBA نتایج بهتری را به دست آورده‌اند.

همچنین در جدول (۵) سعی شده تا نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله با موارد مشابه در سایر مقالات مقایسه شود تا بتوان اعتبارسنجی مناسبی را روی کار انجام داد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، الگوریتم‌های FLFBA و EICA توانستند تا نتایج بهتری را ازنظر کاهش هزینه نصب و اجرا برای نیروگاه نسبت به الگوریتم‌های PSO، SA و IHS در RIهای برابر ۱، ۳ و ۵ درصد به دست آورند. به‌جز دو مورد در RI برابر ۵ درصد مربوط به الگوریتم‌های IHS و SA که البته مقایسه آن‌ها به‌صورت کیفی بوده است چون مورد مطالعاتی مشابه برای آن پیدا نشده است.

Table (5): Comparison of final cost for the algorithms with other references

جدول (۵): مقایسه هزینه نهایی برای الگوریتم‌ها با سایر مراجع

RI (%)	Method	LLSP	TNAC ($)	CR ($)	($) OM	Sell to Net ($)
1	FLFBA	0.010083212	210155.3851	164936.3851	45219	28052.19491
	EICA	0.010083212	210155.3851	164936.3851	45219	28052.19491
	IHS [27]	0.009117	277070	NA	NA	NA
	SA [28]	0.009484	252921	224610	28311	NA
3	FLFBA	0.030157789	195139.78	153020.78	42119	20127.49071
	EICA	0.030036694	195210.7639	153067.7639	42143	20233.06378
	IHS [27]	0.028617	204190	NA	NA	NA
	SA [28]	0.020081	235341	208978	26363	NA
5	FLFBA	0.050042881	184950.7217	144909.7217	40041	15946.02556
	EICA	0.05012378	184915.2298	144886.2298	40029	15896.73696
	IHS [27]	0.048803	134960	NA	NA	NA
	SA [28]	0.049559	114660	101487	13173	NA

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله هدف تعیین ساختار بهینه منابع تولید پراکنده از نوع صفحات خورشیدی در سیستم توزیع بود که سعی شده تا این مسئله با در نظر گرفتن قیود فنی شبکه و توابع هدف هزینه نصب، هزینه بهره‌برداری و تعمیرات و قید سطح بار ازدست‌رفته LLS در سناریوهای مختلف توسط روش‌های خفاش با پرواز لِوی (FLFBA) رقابت استعماری پیشرفته (EICA) حل شود. نتایج به‌دست‌آمده در چند مورد با روش‌های موردنظر مقایسه شده که با بررسی و آنالیز نتایج به‌دست‌آمده در کل می‌توان دریافت که:

- ✓ روش‌های پیشنهادی بر روی سیستم‌های توزیع عملی به‌خوبی عمل می‌کند اما نیازمند داده‌های جغرافیایی دقیق است.
- ✓ روش‌های پیشنهادی باعث کاهش قابل‌توجه بار ازدست‌رفته، کاهش هزینه بهره‌برداری، تعمیر نگهداری و نصب می‌شوند و در کل باعث بهبود عملکرد سیستم می‌شوند.
- ✓ سرعت بالا و عملکرد مناسب، انعطاف‌پذیری الگوریتم‌ها و نتایج حاصل از آن حاکی از این امر است که می‌توان از این الگوریتم‌ها به‌عنوان یک نرم‌افزار در زمینه طراحی بهینه ساختار نیروگاه خورشیدی در شبکه‌های توزیع واقعی و حل سایر مسائل بهینه‌سازی سیستم توزیع بهره گرفت. حتی می‌توان آن را در قالب GUI در محیط متلب برای استفاده تجاری شرکت‌ها توزیع ارائه نمود.
- ✓ همچنین نتایج نشان داده شد حاکی از آن بود که الگوریتم خفاش مبتنی بر پرواز لِوی (FLFBA) برای حل چنین مسائلی می‌تواند سرعت بهینه‌تری نسبت به الگوریتم EICA داشته باشد.
- ✓ الگوریتم‌های EICA و FLFBA می‌توانند عملکرد اقتصادی بهینه‌ای داشته باشند و طراح و بهره‌بردار بین گزینه‌های مختلف آزادی عمل و حق انتخاب دارند. همچنین افزایش تعداد صفحات خورشیدی می‌توان باعث افزایش میزان بار قابل‌فروش به شبکه اصلی گردد حال‌آنکه افزایش تعداد باتری‌ها در بهبود و کاهش میزان بار ازدست‌رفته (LLS) در ماه‌های مختلف مؤثر است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

روش‌های پیشنهادی در بعضی از موارد نسبت به سایر روش‌ها برای حل این مسئله خاص عملکرد مطلوبی نداشته است که این اتفاق برای الگوریتم‌های فرا ابتکاری امری عادی است و به‌صورت کلی جواب‌های الگوریتم‌های فرا ابتکاری متناسب با شرایط مسئله قابل‌تغییر است.

References
مراجع

[1] Y. Abou Jieb, E. Hossain, "Photovoltaic Systems: Fundamentals and Applications," Berlin/Heidelberg,Germany: Springer Cham, 2022.

[2] O. A.Al-Shahria, F. B.Ismaila, M. Hannanb, M. HossainLipuc, Q.Al-ShetwideAli, R. Begumf, F.O.Al-MuhsengNizar, E. Soujerih, "Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review," Journal of Cleaner Production, vol. 284, no. 125465, 2021.

[3] H. H. Istepanian, "Iraq solar energy: from dawn to dusk, Jordan: Friedrich-Ebert-Stiftung Jordan et Iraq," 2020.

[4] Yu. Xiaomo, W. Li, A. Maleki, M. A.Rosen, A. Komeili Birjandi, L. Tang, "Selection of optimal location and design of a stand-alone photovoltaic scheme using a modified hybrid methodology," Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 45, no. 101071, 2021.

[5] B. K. Das, R. Hassan, M. Shahed, H. K. Tushar, Zaman. Forhad, M. Hasan, P. Das, "Techno-economic and environmental assessment of a hybrid renewable energy system using multi-objective genetic algorithm: A case study for remote Island in Bangladesh," Energy Conversion and Management, vol. 230, no. 113823, 2021.

[6] Y. Feng, S. Deb, G. G. Wang, A. H. Alavi, "Monarch butterfly optimization: A comprehensive review," Expert Systems with Applications, vol. 168, no. 114418, 2021.

[7] H. Liu, B. Wu, A. Maleki, F. Pourfayaz, R. Ghasempour, "Effects of reliability index on optimal configuration of hybrid solar/battery energy system by optimization approach: a case study," International Journal of Photoenergy, no. Performance Enhancement of Solar Energy Systems, 2021.

[8] Y. Liu, A. Heidari, X. Ye, G. Liang, H. Chen, C. He, "Boosting slime mould algorithm for parameter identification of photovoltaic models," Energy, vol. 234, no. 121164, 2021.

[9] S. A. Ferahtia, H. Rezk, M. A. Abdelkareem, A. G. Olabi, "Optimal techno-economic energy management strategy for building's microgrids based bald eagle search optimization algorithm," Applied Energy, Vols. 306, Part B, no. 118069, 2022.

[10] S. Yu, A. A. Heidari, C. Z. Cai, M. M. Althobaiti, R. F.Mansour, G. Liang, H. Chen, "Parameter estimation of static solar photovoltaic models using Laplacian Nelder-Mead hunger games search," Solar Energy, vol. 242, no. August, pp. 79-104, 2022.

[11] S. Song, P. Wang, A. A. Heidari, X. Zhao, H. Chen, "Adaptive Harris hawks optimization with persistent trigonometric differences for photovoltaic model parameter extraction," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 109, no. March, 2022.

[12] B. A. Xu, S. Zhang, H. Chen, Q. Shao, "Extremal Nelder–Mead colony predation algorithm for parameter estimation of solar photovoltaic models," Energy Science & Engineering, 2022.

[13] Y. Xu, S. Huang, Z. Wang, Y. Ren, Z. Xie, J. Guo, Z. Zhu, "Optimization based on tabu search algorithm for optimal sizing of hybrid PV/energy storage system: Effects of tabu search parameters," Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vols. 53, Part C, no. October, 2022.

[14] M. Belouda, M. Hajjaji, H. Sliti, A. Mami, "Bi-objective optimization of a standalone hybrid PV–Wind–battery system generation in a remote area in Tunisia," Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 16, no. December , pp. 315-326, 2018.

[15] G. Yu, Z. Meng, H. Ma, L. Liu, "An adaptive Marine Predators Algorithm for optimizing a hybrid PV/DG/Battery System for a remote area in China," Energy Reports, vol. 7, no. November , pp. 398-412, 2021.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

[16] A. F. Altun, M. Kilic, "Design and performance evaluation based on economics and environmental impact of a PV-wind-diesel and battery standalone power system for various climates in Turkey," Renewable Energy, vol. 157, no. September , pp. 424-443, 2020.
[17] H. A. El-Sattar, H. M.Sultan, S. Kamel, T. Khurshaid, C. Rahmann, "Optimal design of stand-alone hybrid PV/wind/biomass/battery energy storage system in Abu-Monqar, Egypt," Journal of Energy Storage, Vols. 44, Part A, no. December , p. 103336, 2021.
[18] K. Anoune, M. Ghazi, M. Bouya, A. Laknizi, M. Ghazouani, A. Ben Abdellah, A. Astito, "Optimization and techno-economic analysis of photovoltaic-wind-battery based hybrid system," Journal of Energy Storage, vol. 32, no. December, p. 101878, 2020.
[19] D. Emad, M. El-Hameed, A. A. El-Fergany, "Optimal techno-economic design of hybrid PV/wind system comprising battery energy storage: Case study for a remote area," Energy Conversion and Management, vol. 249, no. 1 December, p. 114847, 2021.
[20] Y. Jiang, L. Kang, Y. Liu, "The coordinated optimal design of a PV-battery system with multiple types of PV arrays and batteries: A case study of power smoothing," Journal of Cleaner Production, vol. 310, no. 10 August, p. 127436, 2021.
[21] M. Hazem, Y. Amirat, M. Benbouzid, "Particle swarm optimization of a hybrid wind/tidal/PV/battery energy system. Application to a remote area in Bretagne, France," Energy Procedia, vol. 162, no. April, pp. 87-96, 2019.
[23] M. Jiang et al., "A Coordinated Wind–Solar–Storage Planning Method Based on an Improved Bat Algorithm," Processes, vol. 13, no. 8, 2025, doi: 10.3390/pr13082601.
[24] O. T. Adenuga and S. Krishnamurthy, "Economic Power Dispatch of a Grid-Tied Photovoltaic-Based Energy Management System: Co-Optimization Approach," Mathematics, vol. 11, no. 15, 2023, doi: 10.3390/math11153266.
[25] U. Mumtahina, S. Alahakoon, and P. Wolfs, "Optimal Allocation and Sizing of Battery Energy Storage System in Distribution Network Using Mountain Gazelle Optimization Algorithm," Energies (Basel)., vol. 18, no. 2, 2025, doi: 10.3390/en18020379.
[26] M. A. Omar, "Power-Based Dynamic Programming for Cost-Optimal Battery Scheduling in Grid-Connected PV Microgrids Considering Time-of-Use Tariffs and Battery Degradation," Applied Sciences, vol. 16, no. 11, p. 5693, Jun. 2026, doi: 10.3390/app16115693.
[27] N. Alamir, S. Kamel, T. F. Megahed, M. Hori, and S. M. Abdelkader, "A probabilistic framework for effective battery energy storage sizing in microgrids with demand response," Sci. Rep., vol. 16, no. 1, p. 9094, Mar. 2026, doi: 10.1038/s41598-026-35145-w.
[28] S. M. Mahmoudi, A. Maleki, D. Rezaei Ochbelagh, "Optimization of a hybrid energy system with/without considering back-up system by a new technique based on fuzzy logic controller," Energy Conversion and Management, vol. 229, 2021.
[29] M. Ismail, M. Moghavvemi, T. Mahlia, "Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid power system for remote houses in a tropical climate," Energy Conversion and Management, vol. 69, pp. 163-173, 2013.
[30] A. L. Bukar, C. W. Tan, K. Y. Lau, "Optimal sizing of an autonomous photovoltaic/wind/battery/diesel generator microgrid using grasshopper optimization algorithm," Solar Energy, vol. 188, pp. 685-696, 2019.
[31] M. Shahrouzi, S. Alireza, "Enhanced imperialist competitive algorithm for optimal structural design," Scientia Iranica, vol. 28, no. 4, pp. 1973-1993, 2021.
[32] Y. Li, X. Li, J. Liu, X. Ruan, "An improved bat algorithm based on lévy flights and adjustment factors," Symmetry, vol. 11, no. 7, 925, 2019.
[33] Maleki, Akbar, Mohammad Alhuyi Nazari, Fathollah Pourfayaz, "Harmony search optimization for optimum sizing of hybrid solar schemes based on battery storage unit." Energy Reports 6 (2020): 102-111.
[34] H. Liu, B. Wu, A. Maleki, F. Pourfayaz, R. Ghasempour, "Effects of reliability index on optimal configuration of hybrid solar/battery energy system by optimization approach: a case study," International Journal of Photoenergy, no. Performance Enhancement of Solar Energy Systems, 2021.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: 10.82362/jeps.2026.w.546]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026