

Techno-Economic and Environmental Base Approach for Optimal Energy Management of Microgrids Using Crow Search Algorithm

Sajad Gorji¹, M.Sc, Saeed Zamanian², M.Sc, Majid Moazzami^{3,4}, Assistant Professor

¹Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
sajad.gorji@sel.iaun.ac.ir

²Faculty and Research Center of Engineering and Passive Defense, Imam Hossein University, Tehran, Iran
saeidzamanian94@gmail.com

³Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

⁴Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
m_moazzami@pel.iaun.ac.ir

Abstract:

By incremental deployment of renewable energy sources on microgrid frameworks, new technical and economic issues have emerged in the power system industry. The optimal operation of microgrids in the presence of intermittent renewable sources has been counted as a new challenge within the last decade. Microgrids are off-grid or grid-connected power systems on a very small scale encompassing different types of distributed generation sources and local loads. Generally, in isolated microgrids, the demanded energy of consumers is maintained by hybrid models of internal energy sources. The principal purpose of hybrid systems is to supply the electrical power demanded by consumers instantaneously as well as storing surplus energy for critical conditions. In this paper, a techno-economic and environmental base approach for optimal energy management of microgrids using crow search algorithm is presented. Under study microgrid include renewable energy resources, battery and diesel generator as backup power generator. Annual cost and the released emission are considered as the objective function of the proposed method. The crow search algorithm calculates power dispatch scheduling among generation units. Simulation results of the proposed method show the appropriate configuration of the hybrid system that lead to decrease the annual cost of the system and the released emission.

Keywords: Crow search algorithm, microgrid optimization, reliability, energy management.

Received: 29 April 2020

Revised: 27 July 2020

Accepted: 10 September 2020

Corresponding Author: Saeed Zamanian

مدیریت انرژی بهینه ریزشبكة براساس معیارهای فنی، اقتصادی و زیست- محیطی با استفاده از الگوریتم جستجوی کلاغ

سجاد گرجی^۱، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، سعید زمانیان^۲، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، مجید معظمی^۳،
استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

sajad.gorji@sel.iaun.ac.ir

۲- دانشکده و پژوهشکده مهندسی و پدافند غیر عامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

saeidzamanian94@gmail.com

۳- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۴- مرکز تحقیقات ریزشبكة‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

m_moazzami@pel.iaun.ac.ir

چکیده: با افزایش محبوبیت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در قالب ریزشبكة‌ها در سیستم قدرت، مسائل فنی و اقتصادی جدیدی در این صنعت پا به عرصه ظهور گذاشته‌اند. بهره‌برداری بهینه از ریزشبكة‌ها در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر یکی از چالش‌های جدید این صنعت به شمار می‌رود. ریزشبكة‌ها شبکه‌های کوچکی مشتمل بر واحدهای تولید پراکنده و بارهای محلی هستند که به صورت مستقل یا متصل به شبکه‌های توزیع مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. معمولاً در ریزشبكة‌های منفصل از شبکه، انرژی مورد نیاز مصرف‌کنندگان از طریق سیستم‌های ترکیبی منابع انرژی تامین می‌گردد. هدف اصلی سیستم‌های ترکیبی، تامین بار در هر لحظه از زمان و ذخیره‌ی انرژی اضافی برای شرایط بحرانی است. در این مقاله یک روش مدیریت انرژی بهینه ریزشبكة براساس معیارهای فنی اقتصادی و زیست محیطی با استفاده از الگوریتم جستجوی کلاغ ارائه شده است. ریزشبكة مورد مطالعه شامل منابع انرژی تجدیدپذیر، باتری و ژنراتور به عنوان پشتیبان است. در روش پیشنهادی هزینه سالیانه و میزان انتشار آلودگی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. فرآیند تخصیص بهینه واحدهای تجدیدپذیر با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جستجوی کلاغ انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی نشان‌دهنده ترکیب‌بندی مناسبی از اجزاء سیستم بوده که منجر به کاهش انتشار آلاینده‌ها و هزینه احداث سیستم می‌شود.

کلمات کلیدی: الگوریتم جستجوی کلاغ، بهینه‌سازی ریزشبكة، قابلیت اعتماد، مدیریت انرژی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۴/۱۰

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۵/۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۶/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول: مهندس سعید زمانیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران- دانشکده و پژوهشکده مهندسی و پدافند غیر عامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع).

۱- مقدمه

بررسی منحنی‌های پیش‌بینی بار مربوط به چند سال اخیر، حاکی از رشد روزافزون تقاضا و مصرف انرژی الکتریکی است. پیش‌بینی می‌شود در آینده‌ای نزدیک این تقاضا چندین برابر گردد [۱]. تأمین این بار مصرفی به سرمایه‌گذاری کلانی نیازمند است. بدیهی است که تحت چنین شرایطی استفاده از مدیریت انرژی می‌تواند کمک شایانی به حل این معضل نماید. به‌طور کلی اهمیت مدیریت مصرف انرژی زمانی مشخص می‌شود که سودهای مالی و کاربردهای فراوانی را برای مصرف‌کنندگان و حتی خود شبکه فراهم می‌کند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به میزان خاموشی، کاهش هزینه‌های تولید، صاف و هموار شدن منحنی بار و کمک به ثبات قیمت‌ها در بازار اشاره کرد. علاوه بر سیستم‌های سنتی، در شبکه‌های ترکیبی، مدیریت مصرف انرژی می‌تواند به‌عنوان ذخیره‌ای به‌منظور پوشش عدم قطعیت‌های منابع انرژی تجدیدپذیر^۲ نیز به‌کار گرفته شود. این گفته به این معنی است که با تغییر غیرمنتظره‌ی انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده نسبت به مقدار پیش‌بینی شده آن، بهره‌بردار شبکه‌ی ترکیبی می‌تواند به‌جای کمک گرفتن از شبکه‌ی برق اصلی برای تأمین انرژی، انرژی مصرفی را کاهش دهد. بنابراین ایجاد یک شبکه‌ی ترکیبی و استفاده از مدیریت مصرف انرژی در آن، گزینه‌های بیشتری را برای برطرف‌سازی عدم تعادل توان و بهره‌وری هر چه مطلوب‌تر از منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه می‌کند. از این‌رو مقوله‌ی مدیریت مصرف انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است. سیستم‌های ترکیبی، سیستم‌هایی شامل منابع سوخت‌های فسیلی، منابع انرژی تجدیدپذیر، مشترکان نهایی و بارهای کنترل‌پذیر است. یک شبکه‌ی ترکیبی به استراتژی مدیریتی، مدیریت انرژی، تخصیص منابع توان اکتیو و راکتیو و حصول اطمینان از همکاری بین واحدهای کنترل‌پذیر برای رسیدن به بهره‌برداری اقتصادی و پایدار نیاز دارد. هدف از مدیریت انرژی در سیستم‌های ترکیبی این است که هزینه‌های بهره‌برداری از آن مانند هزینه سوخت و هزینه تعمیر و نگهداری کاهش یابد. در [۲] با استفاده از الگوریتم ملخ^۳ به بهینه‌سازی سیستم ترکیبی شامل منابع خورشیدی/بادی/دیزل ژنراتور و باتری پرداخته شده است. تابع هدف در این مقاله کمینه کردن هزینه انرژی و بالابردن قابلیت اطمینان است. در مرجع [۳] تلاش شده تا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش^۴، سیستم ترکیبی شامل منابع انرژی مختلف برای تأمین انرژی رو شنایی اتوبان‌های شهر تبریز را بهینه کند. در مرجع [۴] با استفاده از الگوریتم جستجوی ازدحام کلانگ پیشرفته^۵ به بهینه‌سازی سیستم پیشنهادی پرداخته شده است. مد نظر قرار ندادن شاخص‌های قابلیت اطمینان^۶ و در نظر نگرفتن مسائل زیست‌محیطی از نواقص این مطالعه است. در [۵] هدف، پیدا کردن اندازه بهینه سیستم ترکیبی خورشیدی/بادی/آبی/تلمبه‌ذخیره‌ای ضمن حداقل کردن هزینه سرمایه‌گذاری و بیشینه کردن قابلیت اطمینان است. در مرجع [۶] مروری تفصیلی بر سیستم‌های تولید توان شامل منابع بادی و فتوولتاییک با تمرکز بر بحران انرژی و پایداری آنها در آینده انجام شده است. در این مقاله به‌طور عمده بر مسائل ضروری این سیستم‌ها و منابع انرژی تجدیدپذیر تمرکز شده است. علاوه بر این ساختار مبدل‌های الکترونیک قدرت و کارایی آنها در سیستم‌های ترکیبی نیز به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد. مهم‌ترین هدفی که این مقاله دنبال می‌کند، طراحی سیستم مستقل از شبکه‌ی ترکیبی شامل فتوولتاییک، ژنراتور، بادی و سیستم ذخیره‌سازی انرژی شامل باتری است و سعی در بهینه‌نمودن آن و اعمال مدیریت مصرف بار و توان بر شبکه‌ی طراحی شده دارد. در [۷] تلاش شده تا با استفاده از چهار الگوریتم جدید شامل الگوریتم‌های شیر مورچه^۷، گرگ خاکستری^۸، گله‌ی کریل^۹ و الگوریتم JAYA بهترین پیکربندی برای سیستم مورد مطالعه ضمن حداقل شدن هزینه‌ی تولید انرژی ارائه شود. نتایج شبیه‌سازی نشان از برتری الگوریتم JAYA در برابر الگوریتم‌های دیگر دارد. در مرجع [۸]، بهینه‌سازی و ارزیابی ریزشکه‌ی ترکیبی متصل از شبکه برای نقاط مختلف در کشور سوئد در نظر گرفته شده تا پتانسیل نقاط مختلف برای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر بررسی گردد. در این مقاله، بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه^{۱۰} برای یافتن پیکربندی بهینه‌ی سیستم و ظرفیت بهینه‌ی مؤلفه‌های موجود به کار گرفته می‌شود تا بتوان بهره‌برداری از مؤلفه‌های مختلف سیستم مادامی که بار را تغذیه می‌کنند، مدیریت نمود. در مرجع [۹] تمرکز اصلی بر روی یک شماتیک کنترلی-نظارتی برای مدیریت توان و بهره‌برداری بهینه‌ی یک ریزشکه‌ی ترکیبی AC/DC ایزوله شامل یک ریزشکه‌ی DC و یک ریزشکه‌ی AC است. ریزشکه‌ی ترکیبی پیشنهادی شامل ژنراتورهای بادی و دیزلی و بارهای AC متصل شده به ریزشکه‌ی AC است. در مرجع [۱۰] اندازه بهینه سیستم هیبریدی PV / باد / دیزل با ذخیره‌سازی باتری با استفاده از الگوریتم MOSaDE^{۱۱} برای شهر یانبو در عربستان سعودی مورد بررسی قرار گرفته است. اجزای

بهینه سیستم شامل منابع بادی/خورشیدی/دیزل ژنراتور و باتری برای تأمین حداقل هزینه انرژی و قابلیت اطمینان بالا انتخاب شده‌اند. در مرجع [۱۱]، یک فرآیند محاسباتی برای انتخاب فرکانس‌های قطع در محدوده‌ی فرکانس پایین و متوسط برای تخصیص بهینه‌ی سیستم ذخیره‌ی انرژی ترکیبی پیشنهاد شده است. در این مقاله، یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای بر روی یک سیستم ایزوله‌ی واقعی در چین مهیا شده است و نتایج حاصل از آن، بر اثربخشی روش پیشنهادی دلالت دارد. در این مقاله شاخص‌های قابلیت اطمینان و کمینه‌سازی آلاینده‌ها در نظر گرفته نشده است. در مرجع [۱۲]، به منظور ظرفیت‌یابی بهینه و تحلیل کارایی یک سیستم ترکیبی مستقل از شبکه، روش بهینه‌سازی کلونی مورچه^{۱۲} استفاده شده است. در مرجع [۱۳] برای شبیه‌سازی، تحلیل‌های اقتصادی و بدست آوردن اندازه بهینه سیستم از نرم‌افزار HOMER استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که ترکیب‌بندی سیستم شامل اجزاء بادی/خورشیدی و باتری بهینه‌ترین پیکربندی پیشنهادی است. در مرجع [۱۴] منابع انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر ریز شبکه‌ی DC با ذخیره‌ساز انرژی ترکیبی (باتری و ابرخازن) مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع به منظور دستیابی به سطح نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر در یک شبکه، یک مکانیزم بهره‌برداری جدید و روش مدیریت انرژی مربوطه پیشنهاد شده است. در این مقاله به شاخص‌های قابلیت اطمینان و مسائل زیست محیطی اشاره‌ای نشده است. در مرجع [۱۵]، مسأله‌ی بهینه‌سازی تخصیص ظرفیت واحدهای سیستم ترکیبی به صورت چند هدفه با قیود اقتصادی، فنی و زیست محیطی فرمول‌بندی می‌شود و با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته^{۱۳} با در نظر گرفتن معیارهای قابلیت اطمینان حل می‌گردد. در این مقاله به جزئیات هزینه کلی مانند هزینه‌ی اینورترهای موجود اشاره‌ای نشده است. در مرجع [۱۶] نویسندگان سیستم ترکیبی شامل منابع تجدیدپذیر پیشنهاد داده و می‌خواهند با استفاده از نرم‌افزار HOMER هزینه‌ها را کمینه کنند. برای انجام این کار از الگوریتم جستجوی هارمونی^{۱۴} استفاده شده است. در مرجع [۱۷] یک سیستم متشکل از واحدهای بادی-فتوولتائیک-باتری و ژنراتور پیشنهاد شده است. در این مقاله بهینه‌سازی چندهدفه برای بهینه کردن هزینه برق^{۱۵} (COE)، احتمال از دست دادن منبع تغذیه^{۱۶} (LPSP) و فاکتور تجدیدپذیر^{۱۷} (RF) آورده شده است. در مرجع [۱۸]، بهینه‌سازی فنی-اقتصادی برای تعیین ظرفیت بهینه‌ی مولفه‌های یک سیستم ترکیبی فتوولتائیک و پمپ آب پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی با توجه به شاخص قابلیت اطمینان و هزینه توسعه پیدا کرده است. از جمله ضعف‌های این مقاله عدم در نظر گرفتن یک واحد پشتیبان مانند باتری یا دیزل ژنراتور است. در مرجع [۱۹]، نویسندگان به دنبال بهینه‌سازی سیستم بادی/خورشیدی برای تأمین برق مناطق دورافتاده هستند. از تکنیک بهینه‌سازی خطی^{۱۸} TORSCHÉ برای دست‌یابی به یک راه حل بهینه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیستم ترکیبی بادی/خورشیدی در کنار منابع ذخیره‌ساز از نظر اقتصادی بهینه‌تر است. در مرجع [۲۰]، روش نوینی به منظور ارزیابی ظرفیت بهینه‌ی سیستم‌های ذخیره‌ساز باتری با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی کلی توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات که مبتنی بر کنترل فرکانس است، برای یک ریز شبکه‌ی مستقل از شبکه ارائه شده است. تابع هدف در این مقاله هزینه‌ی کلی در نظر گرفته شده و به شاخص‌های آلاینده‌ی اشاره‌ای نشده است.

با مطالعاتی که بر روی مقالات انجام شده در زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های تجدیدپذیر ترکیبی انجام شد مشاهده می‌شود با توجه به اینکه از واحدهای دارای آلاینده‌های زیست‌محیطی استفاده کرده‌اند در اجرای بهینه‌سازی‌شان به میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی اشاره‌ای نشده است همچنین به طور همزمان شاخص‌های قابلیت اطمینان را مد نظر قرار نداده‌اند. در بعضی از مطالعات انجام شده در گذشته تأکید فقط بر روی استفاده از منابع تجدیدپذیر بوده و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از تعداد زیادی از تجهیزات و صرف هزینه‌های بسیار زیاد انجام شده و قیود فنی را در نظر قرار نداده‌اند. ولی امروزه با توجه به برخی سیاست‌ها در کشورهای مختلف برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، اهمیت قابلیت اعتماد شبکه برای تأمین بار، محدودیت‌ها در استفاده از تجهیزات و بهینه شدن هزینه‌ها مد نظر قرار دادن عوامل فوق بسیار حیاتی و مهم هستند.

در این مقاله یک روش مدیریت انرژی بهینه ریز شبکه بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و شاخص‌های قابلیت اطمینان با استفاده از الگوریتم جستجوی کلاغ^{۱۹} ارائه شده است. برای انجام شبیه‌سازی و طراحی بهینه سیستم از نرم‌افزار متلب کمک گرفته شده است. ریز شبکه مورد مطالعه شامل پنل‌های فتوولتائیک، واحدهای بادی، باتری‌ها و دیزل ژنراتورها به عنوان پشتیبان است. در روش پیشنهادی هزینه سالانه و میزان انتشار آلودگی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته

شده است. همچنین شاخص‌های تعداد قطعی متوسط سیستم و مدت زمان قطعی متوسط سیستم به عنوان شاخص‌های قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده‌اند. فرآیند تخصیص بهینه واحدهای تجدیدپذیر با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جستجوی کلاغ انجام شده و نتایج بهترین سناریو با الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی نشان‌دهنده ترکیب‌بندی مناسبی از اجزاء سیستم بوده که منجر به کاهش انتشار آلاینده‌ها و هزینه احداث سیستم می‌شود.

۲- فرمول‌بندی و مدل‌سازی مسئله

در مکانیزم پیشنهادی، واحد فتوولتاییک و توربین بادی به‌عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر، دیزل ژنراتور به‌عنوان پشتیبان تولید توان در مواقع اضطراری و باتری برای ذخیره‌سازی انرژی تولید شده مازاد توسط منابع تجدیدپذیر و بهبود قابلیت اطمینان سیستم در نظر گرفته شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، یک اینورتر قبل از بار مورد استفاده قرار گرفته شده است زیرا م صرف توان الکتریکی بصورت متناوب بوده و توان تولیدی به صورت DC است. در برخی سیستم‌ها، زمانی که توان تولیدی توسط منابع انرژی تجدیدپذیر (P_{re}) در زمان t برای تأمین توان بار (P_l) کافی نباشد، سیستم ذخیره ساز (بانک باتری) مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر تقاضای بار بالا باشد و سیستم ذخیره ساز انرژی قادر به تأمین این انرژی کلی نباشد، دیزل ژنراتور وارد عمل شده تا تقاضای بار اضافی را تأمین کند. این مکانیزم بر اساس سه‌گام زیر بیان می‌گردد:

۱. گام اول: اگر $P_{re}(t) < P_l(t)$ باشد، گام سوم انجام شود. در غیر این صورت گام دوم انجام شود.
۲. گام دوم: شارژ بانک باتری در $t=t+1$ تنظیم گردد و سپس گام اول انجام شود.
۳. گام سوم: اگر $SOC < SOC_{min}$ باشد، بانک باتری تخلیه گردد و دیزل ژنراتور شروع به کار کند، در غیر این صورت زمان به‌صورت $t=t+1$ تنظیم گردد و سپس گام اول انجام شود. لازم به ذکر است که SOC^{20} بیانگر حالت شارژ باتری است.

۲-۱- مدل‌سازی سیستم فتوولتاییک

سیستم‌های فتوولتاییک، عمل تولید برق را با استفاده از سلول‌های نیمه‌هادی که در معرض نور مستقیم خورشید قرار گرفته‌اند انجام می‌دهند. برای مدل‌سازی سیستم‌های فتوولتاییک بر سی داده‌های هوا شناسی مانند مدت زمان تابش خورشید، دما و رطوبت بسیار مهم است.

توان خروجی هر سیستم فتوولتاییک (P_{pv}) در لحظه t را می‌توان بر اساس رابطه‌ی زیر از تابش خورشید محاسبه کرد [۱۵]:

$$P_{pv} = I(t) \times A \times \eta_{pv} \quad (1)$$

در این رابطه I تابش خورشید، A سطح مقطع سیستم فتوولتاییک و η_{pv} بازده کلی پنل‌های سیستم فتوولتاییک و مبدل DC/DC است. فرض بر آن است که پنل‌های فتوولتاییک دارای سیستم ردیابی نقطه‌ی بیشینه‌ی توان است. اگر تعداد پنل‌های فتوولتاییک به‌صورت N_{pv} باشد، توان تولیدی کلی به‌صورت زیر خواهد بود که در آن اثر دما بر پنل‌های فتوولتاییک صرف‌نظر شده است.

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

۲-۲- مدل‌سازی توربین بادی

انرژی تولیدشده توسط توربین‌ها اساساً به‌سرعت باد و مساحت جارو شونده توسط پره‌های توربین وابستگی دارد. انرژی موجود در باد در واقع انرژی جنبشی آن است و انرژی جنبشی جرم هوای متحرک، برابر است با نصف جرم هوا (m) ضربدر سرعت آن.

برای یک توربین بادی، اگر سرعت باد داده شده از مقدار قطع پایین تجاوز کند، توربین بادی شروع به تولید خواهد کرد. اگر سرعت باد از مقدار نامی سرعت توربین بادی تجاوز کند، توربین شروع به تولید مقدار ثابت توان خروجی خواهد کرد. اگر سرعت باد از مقدار قطع بالا تجاوز کند، ژنراتور توربین بادی برای حفاظت توربین متوقف خواهد شد. توان خروجی هر توربین بادی (P_{WT}) در لحظه t به‌صورت زیر است [۱۵]:

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & \text{Other} \\ P_r \frac{V^2(t) - V_{cut-in}}{V_r - V_{cut-out}} & V_{cut-in} \leq V(t) \leq V_r \\ P_r & V_r < V(t) < V_{cut-out} \end{cases} \quad (3)$$

در این رابطه V سرعت باد، P_r توان نامی توربین بادی، V_{cut-in} سرعت قطع پایین توربین بادی، $V_{cut-out}$ سرعت قطع بالای توربین بادی و V_r سرعت نامی توربین بادی است. اگر تعداد توربین‌های بادی برابر با N_{wind} باشد، توان کلی تولید شده به صورت زیر خواهد بود:

$$P_{WT}(t) = N_{Wind} \times P_{WT}(t) \quad (4)$$

۲-۳- مدل‌سازی دیزل ژنراتور

مانند یک سیستم قدرت پشته‌یابان، زمانی که توان تولید شده به اندازه‌ی کافی نباشد و میزان توان ذخیره شده در سیستم ذخیره‌ساز کم باشد، دیزل ژنراتور شروع به کار خواهد کرد. در این حالت، دیزل ژنراتور شروع به کار کرده و کمبود توان را جبران می‌کند. مصرف سوخت دیزل ژنراتور که با $Cons_D(1/h)$ نشان داده می‌شود به توان خروجی بستگی دارد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Cons_D = B_D \times P_N^D + A_D \times P_D \quad (5)$$

در این رابطه P_N^D توان نامی، P_D توان خروجی دیزل ژنراتور و دو پارامتر A_D و B_D ضرایب منحنی سوخت هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A_D = 0.246(1/kwh)$$

$$B_D = 0.0845(1/kwh)$$

هزینه‌ی ساعتی مصرف سوخت را می‌توان به صورت زیر به دست آورد [۱۶]:

$$C_f = P_{fuel} \times Cons_D \quad (6)$$

۲-۴- مدل‌سازی باتری

به واسطه‌ی رفتار متغیر پنل‌های فتوولتاییک و توربین‌های بادی، ظرفیت بانک باتری به صورت پیوسته در سیستم ترکیبی تغییر می‌کند. در برخی سیستم‌ها، حالت شارژ باتری را می‌توان به صورت زیر به دست آورد: زمانی که توان خروجی پنل‌های فتوولتاییک و ژنراتورهای بادی بیش از انرژی بار باشد، بانک باتری در وضعیت شارژ قرار خواهد گرفت. مقدار شارژ بانک باتری در لحظه‌ی t نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$E_{Batt}(t) = E_{Batt}(t-1) \times (1 - \sigma) + \left[(E_{PV}(t) + E_{WT}(t)) - \frac{E_{load}(t)}{\eta_{Inv}} \right] \times \eta_{Batt} \quad (7)$$

$E_{Batt}(t)$ و $E_{Batt}(t-1)$ به ترتیب مقدار شارژ باتری در لحظه‌های t و $t-1$ ، σ نرخ خود تخلیه‌ی ساعتی، η_{Inv} بازده اینورتر، E_{Load} تقاضای بار و η_B بازده شارژ بانک باتری است. زمانی که توان خروجی پنل‌های فتوولتاییک و توربین بادی کمتر از تقاضای بار باشد، بانک باتری در حالت تخلیه قرار خواهد گرفت. در این مقاله، کارایی تخلیه‌ی بانک باتری در نظر گرفته شده است. بنابراین مقدار شارژ بانک باتری در لحظه‌ی t به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$E_{Batt}(t) = E_{Batt}(t-1) \times (1 - \sigma) + \left[\frac{E_{load}(t)}{\eta_{Inv}} - (E_{PV}(t) + E_{WT}(t)) \right] \quad (8)$$

۲-۵- تابع هدف مسئله

تابع هدف مسئله‌ی طراحی بهینه و کمینه‌سازی هزینه‌ی سالیانه‌ی کلی (C_T) است. هزینه‌ی سالیانه‌ی کلی شامل هزینه‌ی سرمایه‌ی سالیانه (C_{Cpt})، هزینه‌ی نگهداری سالیانه (C_{Mnt}) و کل هزینه‌ی سالیانه‌ی سوخت مصرفی دیزل ژنراتور (C_{Fuel}) است.

به منظور طراحی بهینه سیستم ترکیبی، مسئله بهینه سازی در قالب تابع هدف ارائه شده در رابطه (۹) باید به صورت بهینه حل گردد.

$$\text{Min } C_T = C_{Cpt} + C_{Mnt} + C_{Fuel} \quad (9)$$

به منظور تبدیل هزینه سرمایه اولیه به هزینه سرمایه سالانه، فاکتور بازگشت سرمایه (CFR) به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\text{CFR} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (10)$$

در این رابطه، i نرخ سود و n طول عمر سیستم است. در سیستم پیشنهادی، طول عمر هر باتری ۵ سال در نظر گرفته شده است. با استفاده از فاکتور ارزش فعلی سرمایه داریم:

$$C_{Batt} = P_{Batt} \times \left(1 + \frac{1}{(1+i)^5} + \frac{1}{(1+i)^{10}} + \frac{1}{(1+i)^{15}} \right) \quad (11)$$

در این رابطه C_{Batt} ارزش فعلی باتری و P_{Batt} نیز هزینه باتری است. به روش یکسان، طول عمر اینورتر-مبدل نیز ۱۰ سال فرض شده است که با به کارگیری فاکتور ارزش فعلی سرمایه داریم:

$$C_{Conc/Inv} = P_{Conc/Inv} \times \left(1 + \frac{1}{(1+i)^{10}} \right) \quad (12)$$

در این رابطه $C_{Conc/Inv}$ ارزش فعلی مؤلفه های اینورتر-مبدل و $P_{Conc/Inv}$ هزینه اینورتر-مبدل است. برای این سیستم، هزینه سرمایه گذاری سالانه به صورت زیر بیان می گردد:

$$C_{Cpt} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \left[\begin{array}{l} N_{Wind} \times C_{Wind} \\ + N_{PV} \times C_{PV} \\ + N_{Batt} \times C_{Batt} \\ + N_{Conc/Inv} \times C_{Conc/Inv} \\ + C_{Diesel} \end{array} \right] \quad (13)$$

در این رابطه N_{Wind} تعداد توربین های بادی، C_{Wind} هزینه واحد توربین بادی، C_{PV} هزینه واحد پنل فتوولتائیک، N_{Batt} تعداد باتری ها، C_{Diesel} هزینه واحد دیزل ژنراتور و $N_{Con/Inv}$ تعداد سیستم های اینورتر-مبدل است. برای این سیستم، هزینه نگهداری سالانه به صورت زیر بیان می گردد:

$$C_{Mnt} = N_{PV} \times C_{Mnt}^{PV} + N_{Wind} \times C_{Mnt}^{Wind} + C_{Mnt}^{Diesel} \quad (14)$$

در این رابطه C_{Mnt}^{Wind} و C_{Mnt}^{PV} به ترتیب هزینه نگهداری سالانه پنل فتوولتائیک و توربین بادی و C_{Mnt}^{Diesel} هزینه نگهداری ساعتی دیزل ژنراتور است. از هزینه های نگهداری باتری و سیستم اینورتر-مبدل نیز صرف نظر شده است.

۲-۶- قیود مسئله

برای سیستم ترکیبی مورد نظر قیود زیر باید ارضا شوند:

$$N_{Wind} = \text{integer}, 0 \leq N_{Wind} \leq N_{Wind}^{\max} \quad (15)$$

$$N_{PV} = \text{integer}, 0 \leq N_{PV} \leq N_{PV}^{\max} \quad (16)$$

$$N_{Batt} = \text{integer}, 0 \leq N_{Batt} \leq N_{Batt}^{\max} \quad (17)$$

در این روابط N_{Wind}^{\max} ، N_{PV}^{\max} و N_{Batt}^{\max} به ترتیب بیشترین تعداد پنل های فتوولتائیک، توربین بادی و باتری است. برای دیزل ژنراتور کمترین مقدار توان خروجی پیشنهادی توسط سازنده ۳۰ درصد توان نامی است. علاوه بر این، اگر دیزل ژنراتور به صورت پیوسته به تولید توان پردازد، توان تولیدی نمی تواند از ۹۰ درصد مقدار توان نامی اش تجاوز کند. همچنین در هر لحظه از زمان، مقدار شارژ بانک باتری باید قید زیر را ارضا می کند [۲۲]:

$$E_{Batt}^{\min} \leq E_{Batt}^t \leq E_{Batt}^{\max} \quad (18)$$

حداکثر مقدار شارژ بانک باتری E_{Batt}^{max} همان ظرفیت نامی بانک باتری (S_{Batt}) است. مقدار شارژ کمینه‌ی بانک باتری نیز با استفاده از عمق بیشینه‌ی تخلیه (DOD) از رابطه‌ی (۱۹) به دست می‌آید [۱۵]:

$$E_{Batt}^{min} = (1 - DOD) \times S_{Batt} \quad (۱۹)$$

۲-۷- شاخص‌های قابلیت اطمینان

برای محاسبه‌ی شاخص‌های تعداد قطعی متوسط سیستم $SAIFI$ (۲۱) و طول مدت قطعی متوسط سیستم $SAIDI$ (۲۲) یک سیستم قدرت از روابط (۲۰) و (۲۱) استفاده می‌شود، که دارای K مدار بوده که هر یکی از این مدارات دارای L_k نقطه‌ی بار است. هر نقطه‌ی بار خود دارای N_{kl} مصرف‌کننده است که نرخ قطعی هر یک از آن‌ها λ_{kl} بار در سال است. [۲۳]:

$$SAIFI = \frac{1}{N_{tot}} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} \sum_{j=1}^J \lambda_{jkl} N_{kl} \quad (۲۰)$$

$$SAIDI = \frac{1}{N_{tot}} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} \sum_{j=1}^J U_{jkl} N_{kl}, U_{jkl} = \lambda_{jkl} T_{jkl} \quad (۲۱)$$

در روابط فوق N_{tot} تعداد کل مصرف‌کننده‌ها و J نیز تعداد کل ساعات شبانه‌روز است. همچنین U_{jkl} شاخص دسترس‌ناپذیری سیستم و T_{jkl} نیز برابر با مقدار معکوس نرخ تعمیر مدار k ام در نقطه‌ی بار L ام برای ساعت J ام است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی کلاغ

روش جستجوی کلاغ یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری و مبتنی بر رفتار هوشمند کلاغ‌ها است. این روش مبتنی بر جمعیت بر این اساس است که کلاغ‌ها غذای اضافی خود را در مخفیگاه‌هایی پنهان می‌کنند و در صورت نیاز به آن مراجعه می‌کنند. اصول اولیه‌ی این الگوریتم به صورت زیر است [۲۴]:

- کلاغ‌ها به صورت دسته‌ای زندگی می‌کنند.
- کلاغ‌ها موقعیت مخفیگاه‌های خود را به حافظه می‌سپارند.
- کلاغ‌ها برای دزدی غذا یکدیگر را دنبال می‌کنند.
- کلاغ‌ها انبارهای خود را در برابر خرابکاری‌های احتمالی محافظت می‌کنند.

فرض بر این است که محیطی با d بعد شامل تعدادی کلاغ است. تعداد کلاغ‌ها (اندازه‌ی دسته) N و موقعیت کلاغ در هر تکرار (هر لحظه از زمان) i است که با بردار جستجوی $x^{i,iter} = [x_1^{i,iter}, x_2^{i,iter}, \dots, x_d^{i,iter}]$ که $\{i = 1, 2, \dots, N\}$ و $\{iter = 1, 2, \dots, iter_{max}\}$ نشان داده می‌شود. هر کلاغ دارای حافظه‌ای است که مکان پنهان نمودن غذا را به خاطر می‌آورد. هر تکرار موقعیت اختفای غذای کلاغ i با $m^{i,iter}$ مشخص می‌شود. این موقعیت، بهترین موقعیتی است که کلاغ می‌توانسته تاکنون پیدا کند.

علاوه بر این، در حافظه‌ی کلاغ تجربه‌ی بهترین موقعیتش نیز ثبت می‌شود. کلاغ‌ها در محیط اطراف به جستجوی منابع غذایی مطلوب‌تر می‌گردند. فرض بر این است که در یک تکرار به خصوص، کلاغ i می‌خواهد مکان پنهانش را ببیند. در این تکرار، کلاغ i تصمیم می‌گیرد که کلاغ i را دنبال کند تا به مکان مخفی آن دست پیدا کند. حال ممکن است که دو حالت پیش بیاید [۲۴]:

۱- کلاغ i زنده‌تر از کلاغ i او را دنبال می‌کند. در نتیجه کلاغ i از موقعیت غذاهای مخفی کلاغ i با خبر می‌شود. در این حالت موقعیت جدید کلاغ i به صورت زیر بروز می‌شود [۲۴]:

$$(۲۲)$$

$$x^{i,iter+1} = x^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m^{i,iter} - x^{i,iter})$$

در این رابطه r_i یک عدد تصادفی در بازه‌ی $[0,1]$ است و $fl^{i,iter}$ طول پرواز کلاغ i در تکرار $iter$ است.

۲- کلاغ i بداند که کلاغ i او را دنبال می‌کند. در این حالت کلاغ i برای محافظت از انبارهای غذایی خود، توجه کلاغ i را به موقعیت دیگری از فضای جستجو جلب می‌کند.

مجموع دو حالت معرفی شده را به صورت زیر می توان بیان نمود [۲۴]:

(۲۳)

$$x_{i,iter+1} = \begin{cases} x_{i,iter} + r_i \times fl_{i,iter} \times (m_{i,iter} - x_{i,iter}) & r_i \geq AP_{i,iter} \\ \text{a random position} & \text{otherwise} \end{cases}$$

در این رابطه r_i یک عدد تصادفی در بازه $[0,1]$ است و $AP_{i,iter}$ احتمال آگاهی کلاغ زد در تکرار i است. فرآیند پیاده سازی الگوریتم جستجوی کلاغ، مراحل زیر را طی می کند:

۱. تخصیص مقادیر اولیه مساله و پارامترهای قابل تنظیم

۲. تخصیص موقعیت اولیه و حافظه کلاغها

۳. ارزیابی مقدار تابع هدف

۴. تولید موقعیت های جدید

۵. بررسی امکان پذیری موقعیت های جدید

۶. ارزیابی مقدار تابع هدف در موقعیت های جدید

۷. به روز رسانی حافظه

۸. بررسی معیار پایان پذیری الگوریتم

از مزایای الگوریتم جستجوی کلاغ می توان به سهولت در پیاده سازی، درک آسان، اجتناب از بهینه های محلی و سرعت بالا در همگرایی اشاره کرد [۲۵]. روندنمای اجرای الگوریتم بهینه سازی برای مساله تخصیص بهینه در شکل (۱) نشان داده شده است.

۴- نتایج شبیه سازی

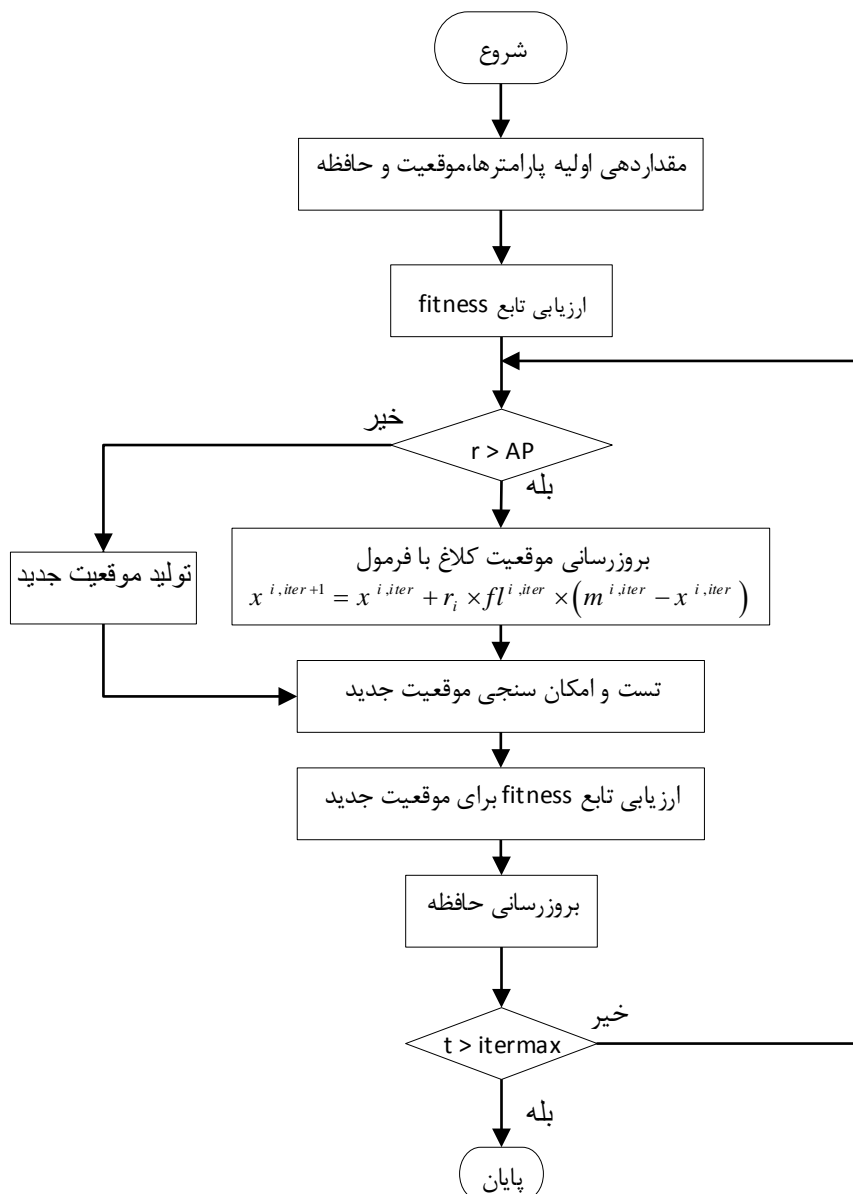
مدل مسئله پیشنهادی بر روی سیستم ارائه شده در شکل (۲) اعمال می شود که این سیستم دارای سیستم های دیزل، بادی و فتوولتاییک به همراه ذخیره ساز باتری است. این سیستم ها توسط مبدل های AC/DC و یا DC/DC به باس DC متصل شده اند. همچنین بار شبکه که به صورت AC است، لذا آن توسط مبدل DC/AC به باس DC متصل خواهد شد. شایان ذکر است که در مدل مسئله پیشنهادی، بار مصرفی بایستی تا حد امکان توسط سیستم های بادی و فتوولتاییک تأمین شود و همچنین مازاد انرژی تولیدی این سیستم ها برای شارژ ذخیره ساز استفاده می شود. حال اگر میزان بار از توان تولیدی سیستم های بادی و فتوولتاییک بیشتر باشد، مازاد توان بار بایستی توسط باتری تأمین شود. اما اگر باتری قادر به تأمین تقاضا نبود، سیستم دیزل میزان تقاضای باقیمانده را تأمین می کند. به عبارتی دیگر سیستم دیزل به عنوان سیستم پشتیبان برای طرح پیشنهادی عمل می کند و از این رو، دیزل ژنراتور زمانی وارد عمل می شود که سیستم های دیگر قادر به تأمین تقاضای مورد نیاز نباشند. میانگین داده های ساعتی برای یک شبانه روز به صورت شکل های (۳) تا (۵) است. این شکل ها به ترتیب میانگین منحنی روزانه بار مصرفی، تابش خورشید برای سلول های فتوولتاییک و سرعت باد برای یک واحد بادی را نمایش می دهد. همچنین کلیه پارامترهای طرح پیشنهادی در جدول (۱) ذکر شده است.

مسئله پیشنهادی توسط الگوریتم جستجوی کلاغ حل شده است. تعداد جمعیت در این الگوریتم برابر ۱۲۰ است و همچنین تعداد تکرار حل مسئله برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. پارامترهای تنظیم fl و AP نیز بر اساس مرجع [۲۴] به ترتیب برابر ۰/۱ و ۲ در نظر گرفته شده اند.

در این مقاله نتایج اقتصادی حاصل از مدل مسئله پیشنهادی در چهار مورد مطالعاتی بررسی می شود که به شرح زیر است:

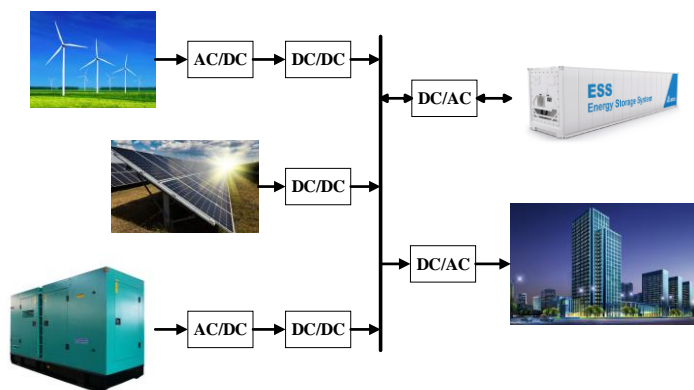
- مورد مطالعاتی اول: بررسی نتایج اقتصادی طرح پیشنهادی با در نظر گرفتن فقط سیستم دیزل ژنراتور
- مورد مطالعاتی دوم: بررسی نتایج اقتصادی طرح پیشنهادی با در نظر گرفتن سیستم های دیزل ژنراتور، بادی و باتری
- مورد مطالعاتی سوم: بررسی نتایج اقتصادی طرح پیشنهادی با در نظر گرفتن سیستم های دیزل ژنراتور، فتوولتاییک و باتری
- مورد مطالعاتی چهارم: بررسی نتایج اقتصادی طرح پیشنهادی با در نظر گرفتن سیستم های دیزل ژنراتور، بادی، فتوولتاییک و باتری.

نتایج این بخش در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است.



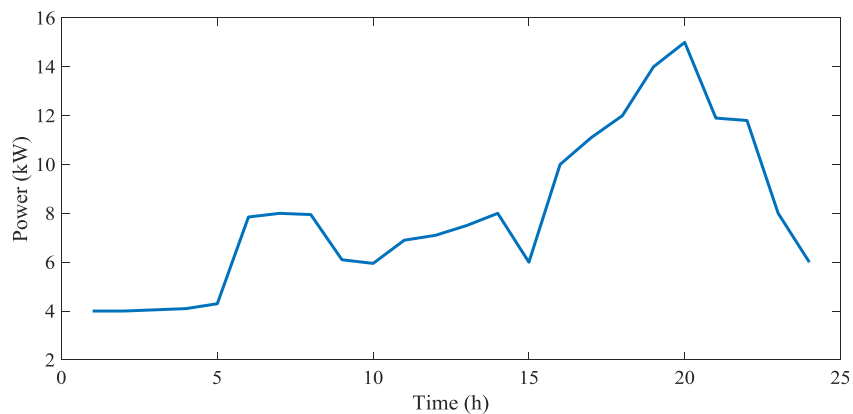
شکل (۱): روندنمای اجرای الگوریتم بهینه‌سازی جست و جوی کلاغ

Figure (1): The proposed Crow Search optimization algorithm flowchart

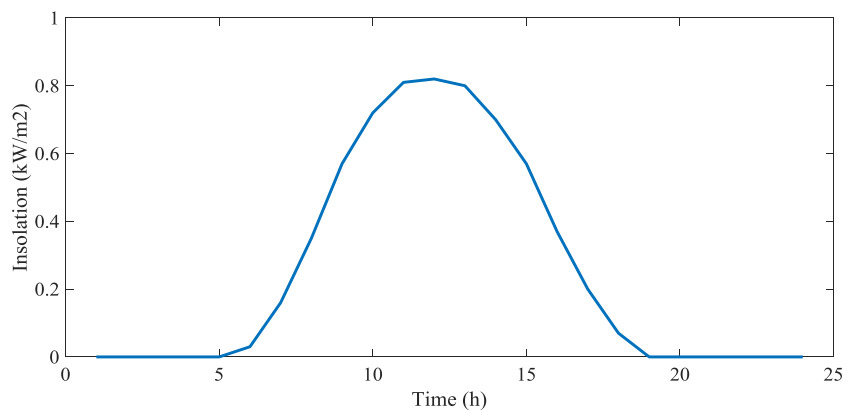


شکل (۲): ساختار سیستم مورد مطالعه

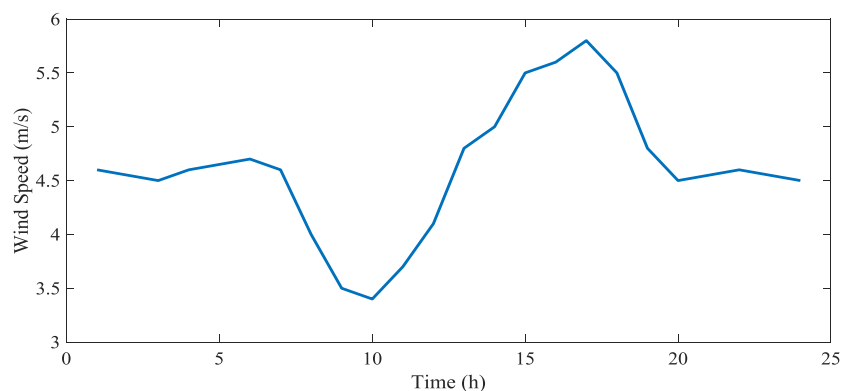
Figure (2): Under study test system



شکل (۳): میانگین سالیانه منحنی روزانه بار مصرفی
Figure (3): Average annual daily load curve



شکل (۴): میانگین سالیانه منحنی روزانه تابش خورشید
Figure (4): Average annual solar radiation curve



شکل (۵): میانگین سالیانه منحنی روزانه سرعت باد
Figure (5): Average annual daily wind speed curve

Table (1): The proposed problem parameters

جدول (۱): پارامترهای مسئله پیشنهادی

پارامتر	نماد	میزان
نرخ سود	i	۵ درصد
افق برنامه‌ریزی	n	۲۰ سال
مشخصات واحد بادی		
توان نامی	P_r	۱ کیلووات
سرعت آستانه	v_{cut-in}	۲/۵ متر بر ثانیه
سرعت قطع	$v_{cut-out}$	۱۳ متر بر ثانیه
سرعت نامی	v_r	۱۱ متر بر ثانیه
هزینه احداث	C_{wind}	۳۲۰۰ دلار
هزینه تعمیر و نگهداری	C_{mnt}^{wind}	۱۰۰ دلار
عمر مفید	-	۲۰ سال
مشخصات پنل فتوولتاییک		
توان نامی	P_r	۱۲۰ وات
هزینه احداث	C_{pv}	۶۱۴ دلار
هزینه تعمیر و نگهداری	C_{mnt}^{pv}	۰ دلار
سطح پنل	A	۱/۰۷ مترمربع
راندمان	η_{pv}	۱۲ درصد
عمر مفید	-	۲۰ سال
مشخصات دیزل ژنراتور		
توان نامی	P_N^D	۱/۹ کیلووات
هزینه احداث	C_{diesel}	۱۷۱۳/۱۵ دلار
هزینه تعمیر و نگهداری	C_{mnt}^{diesel}	۰/۲ دلار بر ساعت
عمر مفید	-	۸۷۶۰ ساعت
هزینه سوخت	P_{fuel}	۱/۲۴ دلار بر لیتر
مشخصات مبدل الکترونیک قدرت		
توان نامی	-	۳ کیلووات
راندمان	η_{inv}	۹۵ درصد
هزینه احداث	$C_{conv/inv}$	۲۰۰۰ دلار
عمر مفید	-	۱۰ سال
مشخصات باتری		
ولتاژ	-	۱۲ ولت
ظرفیت	S_{batt}	۱/۳۵ کیلووات بر ساعت
راندمان	η_{batt}	۸۵ درصد
هزینه احداث	C_{batt}	۱۳۰ دلار
حالت دشارژ	DOD	۰/۸
نرخ خود دشارژی	σ	۰/۰۰۰۲
عمر مفید	-	۵ سال

Table (2) Economic results of the proposed model for different case studies
جدول (۲): نتایج اقتصادی مدل پیشنهادی به ازای موارد مطالعاتی مختلف

مورد مطالعاتی	واحد	اول	دوم
تعداد پنل فتوولتاییک	-	-	-
تعداد واحد بادی	-	-	۳۵
تعداد باتری	-	-	۱۶
تعداد مبدل الکترونیکی قدرت	-	۱۸	۲۴
تعداد دیزل ژنراتور	-	۱۶	۱
هزینه فتوولتاییک	دلار	-	-
هزینه سیستم بادی	دلار	-	۹۲۶۸/۰۱۸۸
هزینه سیستم ذخیره‌ساز	دلار	-	۴۸۰/۴۲۷۶
هزینه سیستم دیزل ژنراتور	دلار	۴۷۱۸۶/۶۸۵۵	۲۹۴۹/۱۶۷۸
هزینه کلیه مبدل‌ها	دلار	۴۶۶۲/۱۶۴۷	۶۲۱۶/۲۱۹۶
هزینه سوخت دیزل ژنراتور	دلار	۷۹۰۱۶/۴۸۱۲	۳۸۷۹/۰۷۸۹
کل هزینه سیستم پیشنهادی	دلار	۱۳۰۹۰۰	۷۶۷۰۰

مورد مطالعاتی	واحد	سوم	چهار
تعداد پنل فتوولتاییک	-	۲۳۳	۸
تعداد واحد بادی	-	-	۳۴
تعداد باتری	-	۶۵	۱۸
تعداد مبدل الکترونیکی قدرت	-	۲۸	۲۳
تعداد دیزل ژنراتور	-	۸	۱
هزینه فتوولتاییک	دلار	۱۱۷۴۹/۶۶۵	۳۹۴/۱۵۱۶
هزینه سیستم بادی	دلار	-	۹۰۰۳/۲۱۸۳
هزینه سیستم ذخیره‌ساز	دلار	۱۹۵۱/۷۳۷	۵۴۰/۴۸۱
هزینه سیستم دیزل ژنراتور	دلار	۲۳۵۹۳/۳۴۲۷	۲۹۴۹/۱۶۷۸
هزینه کلیه مبدل‌ها	دلار	۷۲۵۲/۲۵۶۲	۵۹۵۷/۲۱۰۴
هزینه سوخت دیزل ژنراتور	دلار	۲۸۱۵۴/۰۲۸۸	۲۷۹۸/۷۹۴۶
کل هزینه سیستم پیشنهادی	دلار	۶۴۹۷۰	۱۴۹۶۰

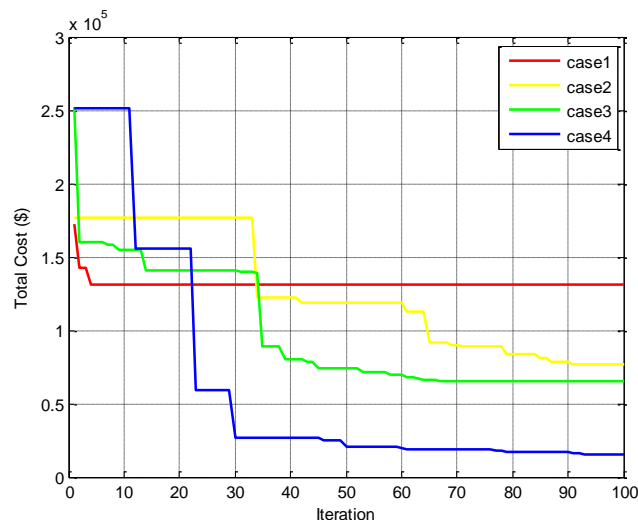
Table (3): Evaluation of the crow search algorithm response for the cost of each case study
جدول (۳): ارزیابی پاسخ الگوریتم جستجوی کلاغ برای هزینه هر مورد مطالعاتی

مورد مطالعاتی	شاخص	واحد	میزان
اول	انحراف معیار	-	۰
	بهترین	دلار	۱۳۰۹۰۰
دوم	انحراف معیار	-	۰
	بهترین	دلار	۷۶۷۰۰
سوم	انحراف معیار	-	۰
	بهترین	دلار	۶۴۹۷۰
چهارم	انحراف معیار	-	۰
	بهترین	دلار	۱۴۹۶۰

بر اساس جدول (۲) مشاهده می‌شود که بیشترین هزینه برای طرح پیشنهادی در مورد مطالعاتی اول استخراج شده و کمترین هزینه برای طرح پیشنهادی در مورد مطالعاتی چهارم ارزیابی شده است. علت بالا بودن هزینه در مورد مطالعاتی اول به این

شرح است که در این مورد مطالعاتی تنها سیستم دیزل ژنراتور تأمین‌کننده بار مصرفی است و همچنین این سیستم شامل سه هزینه احداث، تعمیر و نگهداری و هزینه سوخت است که در مجموع کل هزینه این سیستم نسبت به سیستم‌های پیشنهادی دیگر بالاتر است. در مورد مطالعاتی چهارم به علت اینکه سیستم‌های تولید توان مختلفی وجود دارند، لذا انتخاب این سیستم‌های به‌گونه‌ای است که هزینه مجموع طرح پیشنهادی نسبت به دیگر موارد مطالعاتی کمتر است. با توجه به این جدول، تعداد سیستم دیزل ژنراتور به علت وجود هزینه بالا در مورد مطالعاتی چهارم پایین است، ولی تعداد عناصر دیگر تولید توان بالا است. در جدول (۳) مقادیر انحراف استاندارد و بهترین هزینه موارد مطالعاتی مختلف ارائه شده است. برای ارزیابی نتایج این بخش، مسئله پیشنهادی برای ۲۰ بار تکرار شده است و سپس مقادیر مختلف جدول (۳) محاسبه شده است. این مقادیر جهت بررسی ویژگی‌های الگوریتم جستجوی کلاغ بیان شده است. همان‌طور که براساس نتایج این جدول مشاهده می‌شود، میزان انحراف استاندارد در کلیه موارد مطالعاتی پایین است لذا می‌توان بیان کرد که الگوریتم جستجوی کلاغ برای مسئله پیشنهادی دارای نتایج مطمئنی است.

شکل (۶) منحنی‌های همگرایی مربوط به سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. با دقت در شکل مشاهده می‌شود که سناریوی چهارم که تمامی مؤلفه‌ها را شامل می‌شود، دارای مقدار نهایی کمتر و در نتیجه حالت بهینه‌تری از لحاظ هزینه، انتشار آلودگی و قابلیت اطمینان است.



شکل (۶): منحنی همگرایی سناریوهای مورد مطالعه

Figure (6): Convergence curve of the under studied scenarios

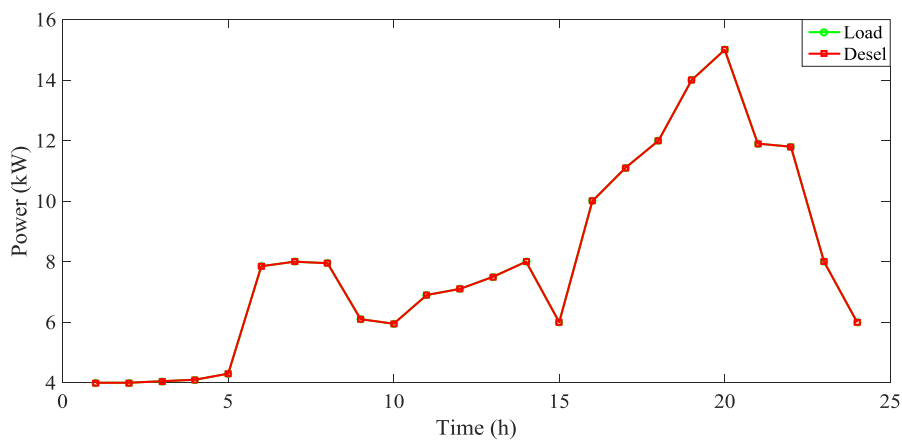
برای اثبات کارایی و اثربخشی روش پیشنهادی، سناریوی چهارم از موارد مطالعاتی را با الگوریتم ژنتیک حل و با جواب حاصل از الگوریتم جستجوی کلاغ در سناریوی مذکور مورد مقایسه قرار دادیم. نتایج این بخش در جدول (۴) ارائه شده است. همان‌طور که براساس این جدول مشاهده می‌شود، مقدار نهایی تابع هزینه به ازای الگوریتم جستجوی کلاغ کمتر از الگوریتم ژنتیک بوده و در نتیجه می‌توان گفت که کارایی بهتری دارد.

Table (4): Comparison of the results of genetic algorithms and crow search for the fourth case study

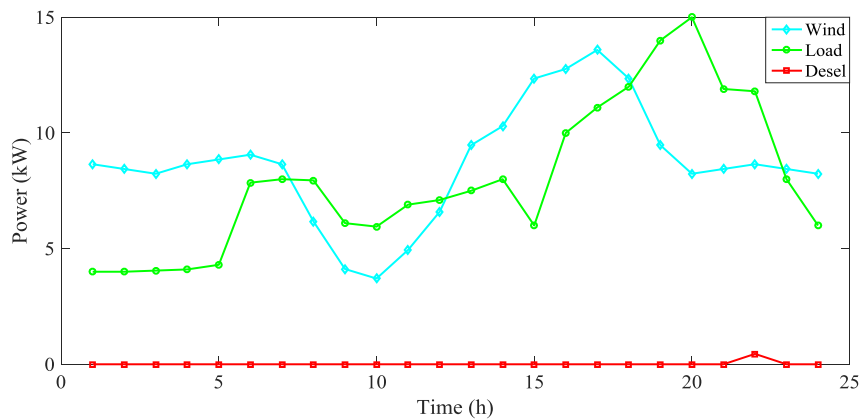
جدول (۴): مقایسه نتایج الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی کلاغ برای مورد مطالعاتی چهارم

الگوریتم		مورد	
CSA	GA		
۲۰	۶۰	جمعیت	
۱۰۰	۱۰۰	تعداد تکرار	
۳۳	۱۹	زمان محاسباتی (ثانیه)	
۱۴۹۶۰	۱۵۹۱۰	کل هزینه طرح پیشنهادی	بهترین

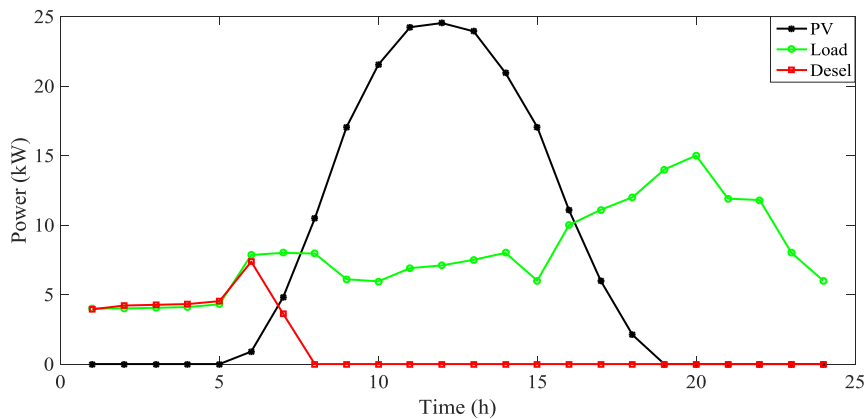
شکل (۷) نتایج مورد مطالعاتی اول را نشان می‌دهد که شامل منحنی روزانه توان تولیدی دیزل ژنراتور است. توجه شود که در مورد مطالعاتی اول تنها دیزل ژنراتور تأمین‌کننده بار مصرفی است، از این رو میزان بار مصرفی و خروجی دیزل ژنراتور برابر خواهد بود. منحنی روزانه توان تولیدی سیستم‌های بادی، فتوولتاییک و دیزل ژنراتور به ازای موارد مطالعاتی دوم الی چهارم در شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است. براساس این شکل‌ها مشاهده می‌شود که در برخی ساعات دیگر بالاتر است. در منابع انرژی تجدیدپذیر (واحدهای بادی و فتوولتاییک) نسبت به بار مصرفی کمتر و در برخی ساعات دیگر بالاتر است. در ساعاتی که میزان تولید منابع انرژی تجدیدپذیر بیشتر از بار مصرفی است، تولید مازاد در باتری ذخیره می‌شود. همچنین توجه شود در ساعاتی که میزان تولید منابع انرژی تجدیدپذیر کمتر از بار مصرفی است، ابتدا مازاد مصرف بایستی توسط باتری‌ها تغذیه شود و در غیر این صورت دیزل ژنراتور مازاد مصرف را تأمین می‌کند. به عبارتی دیزل ژنراتور در مرحله نهایی وارد عمل خواهد شد و به‌عنوان واحد پشتیبان عمل می‌کند.



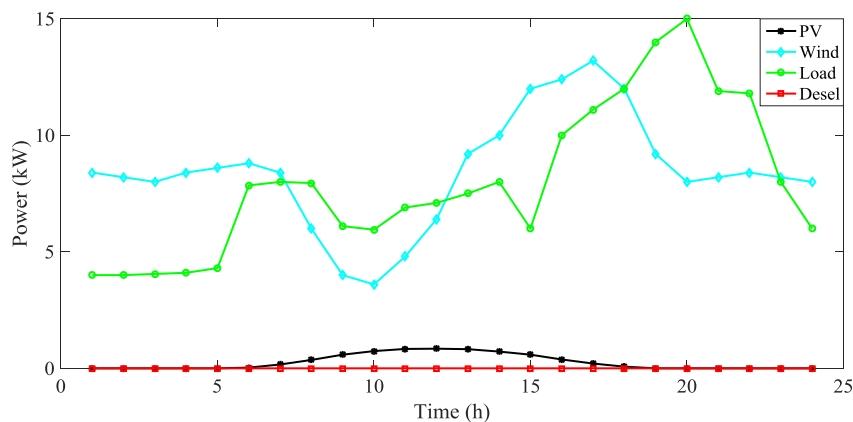
شکل (۷): منحنی روزانه توان تولیدی دیزل ژنراتور در مورد مطالعاتی اول
Figure (7): Daily power output curve of diesel generator for the first case study



شکل (۸): منحنی روزانه توان تولیدی دیزل ژنراتور، واحد بادی و فتوولتاییک در مورد مطالعاتی دوم
Figure (8): Daily power output curve of diesel generator, wind and photovoltaic units for the second case study



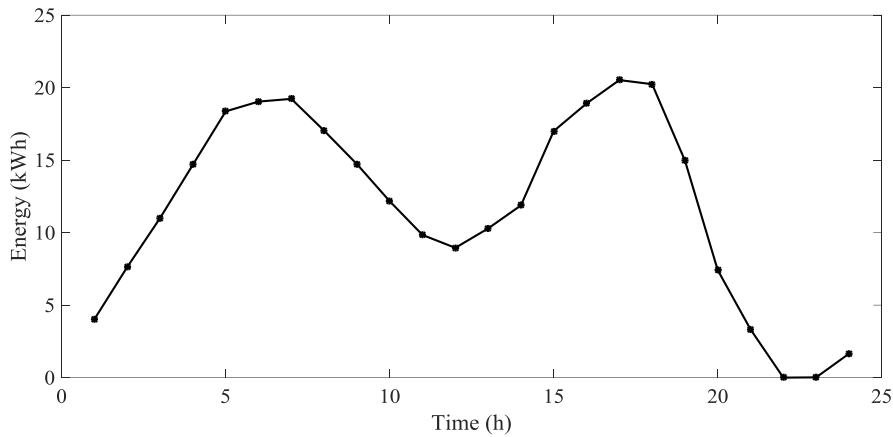
شکل (۹): منحنی روزانه توان تولیدی دیزل ژنراتور، واحد بادی و فتوولتاییک در مورد مطالعاتی سوم
Figure (9): Daily power generation curve of diesel generator, wind and photovoltaic unit for the third case study



شکل (۱۰): منحنی روزانه توان تولیدی دیزل ژنراتور، واحد بادی و فتوولتاییک در مورد مطالعاتی چهارم
Figure (10): Daily power output curve of diesel generator, wind and photovoltaic unit for the fourth case study

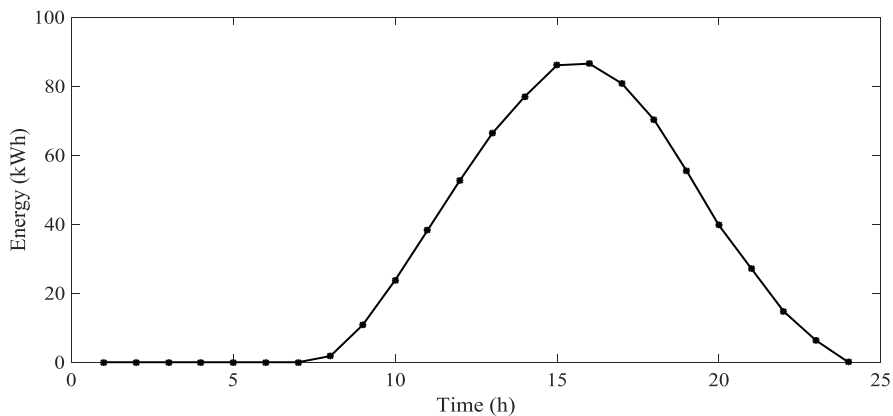
شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) منحنی روزانه انرژی ذخیره شده در باتری‌ها را به ازای موارد مطالعاتی دوم الی چهارم نمایش می‌دهند. شایان ذکر است که افزایش مقدار انرژی ذخیره شده در باتری‌ها در این شکل‌ها متناسب با شارژ آن‌ها است و کاهش مقدار انرژی ذخیره شده در باتری‌ها متناسب با حالت دشارژ آن‌ها است. در نهایت با مقایسه شکل‌های (۸) تا (۱۰) با شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) می‌توان دید که حالت شارژ باتری‌ها متناسب با مازاد تولید منابع انرژی تجدیدپذیر است و همچنین حالت دشارژ باتری‌ها متناسب با مازاد مصرف است. از این رو می‌توان بیان کرد که باتری‌ها به صورت یک منبع انعطاف‌پذیر برای منابع انرژی تجدیدپذیر عمل می‌کنند و موجب کاهش تغییرات توان خروجی آن‌ها می‌شوند. به عبارتی دیگر باتری در کنار منابع انرژی تجدیدپذیر موجب صاف‌تر شدن پروفیل خروجی سیستم خواهد شد.

نتایج مربوط به میزان آلودگی در جدول (۵) نشان داده شده است. براساس این جدول مشاهده می‌شود که بیشترین میزان سوخت مصرف شده در مورد مطالعاتی اول رخ می‌دهد. زیرا که در این مورد، تنها دیزل ژنراتور تأمین‌کننده بار مصرفی است. همچنین توجه شود که عامل اصلی ایجاد آلودگی (CO_2 ، SO_2 و NO_2) سوخت فسیلی است. از این رو بیشترین آلودگی در مورد مطالعاتی اول رخ داده است. ولی شایان ذکر است که در موارد مطالعاتی دیگر که منابع انرژی تجدیدپذیر وارد طرح پیشنهادی می‌شوند، میزان آلودگی و مصرف سوخت فسیلی شدیداً کاهش می‌یابد. زیرا که منابع انرژی تجدیدپذیر هیچ آلودگی ایجاد نمی‌کنند.



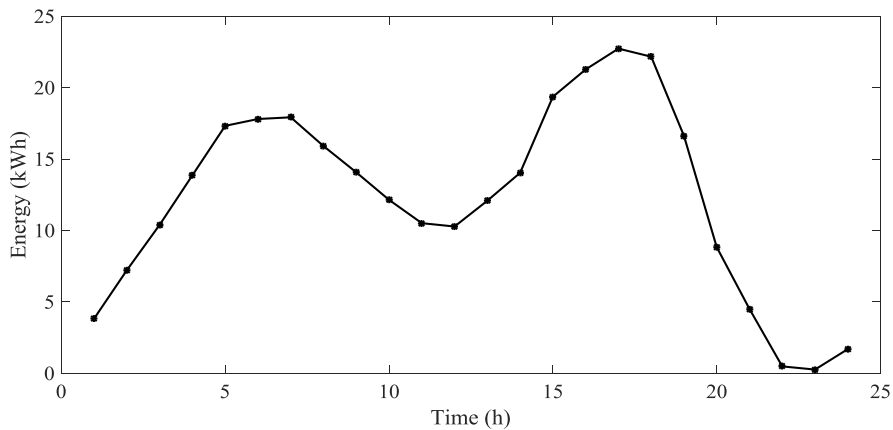
شکل (۱۱): منحنی روزانه انرژی ذخیره شده در باتری در مورد مطالعاتی دوم

Figure (11): The daily curve of the stored energy in the battery for the second case study



شکل (۱۲): منحنی روزانه انرژی ذخیره شده در باتری در مورد مطالعاتی سوم

Figure (12): The daily curve of the stored energy in the battery for the third case study



شکل (۱۳): منحنی روزانه انرژی ذخیره شده در باتری در مورد مطالعاتی چهارم

Figure (13): The daily curve of the stored energy in the battery for the fourth case study

قابلیت اطمینان یک مفهوم پایه در طراحی و برنامه ریزی هر سیستم است. در سیستم های قدرت این شاخص بر مبنای برابری عرضه و تقاضا استوار است. بالا بودن میزان شاخص های قابلیت اطمینان نشان دهنده ی عملکرد ایمن و مطمئن سیستم است. به صورت کلی می توان گفت که هر چقدر سیستم حساس تر و اهمیت آن بالاتر باشد در نظر گرفتن و محاسبه ی قابلیت اطمینان در تصمیم گیری و برنامه ریزی ها بیشتر مورد توجه قرار می گیرد.

Table (5): Economic results of the proposed model for different case studies

جدول (۵): نتایج اقتصادی مدل پیشنهادی به ازای موارد مطالعاتی مختلف

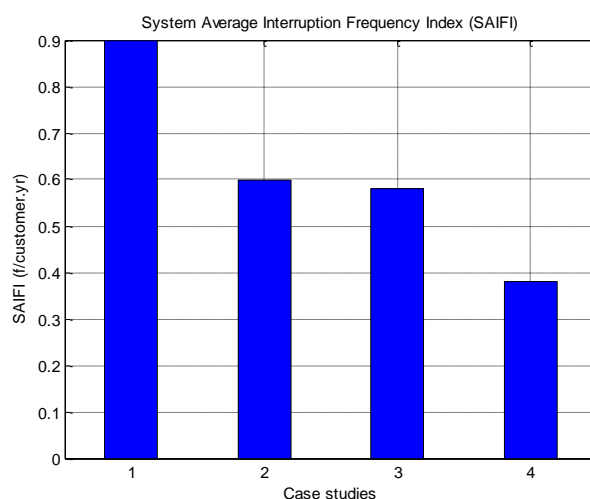
مورد مطالعاتی	واحد	اول	دوم
کل سوخت سال	لیتر	۳۹۷۰۶/۴۵۲	۱۴۴۶/۷۶۱۶
CO ₂	کیلوگرم	۱۲۵۰۷۵/۳۲۳۸	۴۵۵۷/۲۹۹
SO ₂	کیلوگرم	۱۵۸۸/۲۵۸۱	۵۷/۸۷۰۵
NO ₂	کیلوگرم	۲۳۸۲/۳۸۷۱	۸۶/۸۰۵۷

مورد مطالعاتی	واحد	سوم	چهارم
کل سوخت سال	لیتر	۱۴۱۴۷/۶۳۸۳	۱۴۰۶/۴۱۸
CO ₂	کیلوگرم	۴۴۵۶۵/۰۶۰۶	۴۴۳۰/۲۱۶۷
SO ₂	کیلوگرم	۵۶۵/۹۰۵۵	۵۶/۲۵۶۷
NO ₂	کیلوگرم	۸۴۸/۸۵۸۳	۸۴/۳۸۵۱

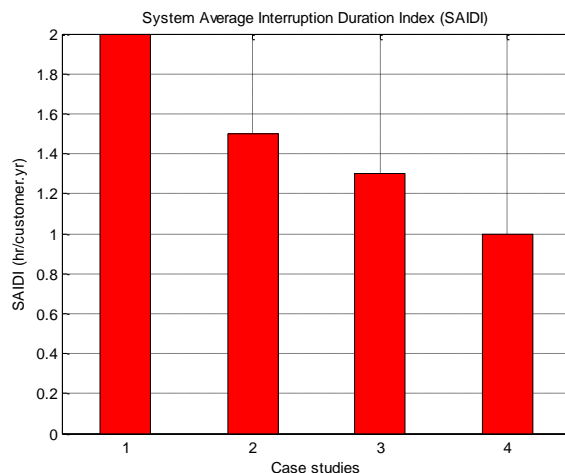
در این مقاله دو شاخص از شاخص‌های قابلیت اطمینان را مورد بررسی قرار داده‌ایم که در زیر آورده شده‌اند. شاخص‌های قابلیت اطمینان تعداد قطعی متوسط سیستم (SAIFI) و طول مدت قطعی متوسط سیستم (SAIDI) که به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) آورده شده است.

SAIFI (شاخص تعداد قطعی متوسط سیستم): این شاخص به صورت مجموع تعداد امان‌های قطع شده به تعداد کل امان‌های سیستم در سال تعریف می‌شود [۲۶]. با دقت در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که سناریوی ۴ دارای کمترین شاخص بوده و در نتیجه تعداد قطعی متوسط آن در افق برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده از بقیه کمتر است که در نتیجه قابلیت اطمینان بهتری را از خود نشان می‌دهد.

SAIDI (طول مدت قطعی متوسط سیستم): معیار است که تعداد ساعات خاموشی بلند مدت را به ازاء هر امان در طول یک سال نشان می‌دهد و کاهش آن نشانه بالاتر رفتن قابلیت اعتماد است [۲۶]. با دقت در این شاخص می‌فهمیم که چون سناریوی چهارم دارای کمترین مقدار است، بنابراین طول مدت خاموشی در این سناریو نیز نسبت به بقیه سناریوها کمتر بوده که در نتیجه قابلیت اطمینان سیستم را بهبود می‌بخشد.



شکل (۱۴): شاخص تعداد قطعی متوسط سیستم (SAIFI) برای سناریوهای مورد بررسی
Figure (14): System Average Interruption Frequency Index (SAIFI) for under study scenarios



شکل (۱۵): بررسی شاخص طول مدت قطعی متوسط سیستم (SAIDI) برای سناریوهای مورد بررسی
Figure (15): System Average Interruption Duration Index (SAIDI) for under study scenarios

۵- نتیجه گیری

در این مقاله مسئله مدیریت انرژی و تخصیص بهینه سیستم های دیزل، بادی و فتوولتائیک به همراه سیستم ذخیره ساز باتری برای برق رسانی به نقاط دورافتاده و خارج از شبکه مورد بحث قرار گرفته است. مسئله مذکور به صورت مسئله بهینه سازی است که تابع هدف آن برابر کمینه سازی هزینه های احداث و تعمیر و نگهداری منابع انرژی تجدیدپذیر، باتری ها و دیزل ژنراتورها بعلاوه کمینه سازی هزینه سوخت دیزل ژنراتورها است. همچنین قیود مسئله شامل محدودیت تعداد عناصر احداث شده، تعادل تولید و مصرف و مشخصات عناصر موجود در طرح پیشنهادی است. مسئله مذکور به صورت غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح^{۲۳} است که حل آن بر اساس قاعده ریاضی دشوار و زمان بر است. از این رو برای حل مسئله مذکور از الگوریتم جستجوی کلاغ استفاده شده است. در نهایت نتایج کلی زیر بر اساس نتایج عددی حاصل از موارد مطالعاتی مختلف استخراج شده است:

- تأمین بار مصرفی تنها توسط دیزل ژنراتور موجب افزایش هزینه طرح پیشنهادی، افزایش مصرف سوخت فسیلی و در نتیجه افزایش آلودگی خواهد شد.
- کل هزینه احداث سیستم برای سناریوی اول معادل ۱۳۰۹۰۰ دلار، سناریوی دوم ۷۶۷۰۰ دلار، سناریوی سوم ۶۴۹۷۰ دلار و برای سناریوی چهارم ۱۴۹۶۰ دلار است و این بیانگر وجود هزینه پایین برای طرح پیشنهادی در صورت وجود منابع انرژی تجدیدپذیر مختلف در طرح پیشنهادی است.
- مصرف سوخت فسیلی پایین در صورت وجود منابع انرژی تجدیدپذیر مختلف در طرح پیشنهادی. به صورتی که مصرف سوخت در سناریوی چهارم که سیستم ترکیبی بهینه پیشنهادی وجود دارد نسبت به سناریوی اول که فقط دیزل ژنراتور داشتیم ۳۸۳۰۰/۰۳۴ لیتر کاهش یافته است.
- انتشار پایین آلودگی در صورت وجود منابع انرژی تجدیدپذیر مختلف در طرح پیشنهادی که در سناریوی اول ۱۲۹۰۴۵/۹۶۹ کیلوگرم و در سناریوی چهارم ۴۵۷۰/۸۵۸۵ کیلوگرم گازهای گلخانه ای وارد جو زمین شد که انتشار گازهای گلخانه ای به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است.
- با توجه به پایین بودن مقدار عددی شاخص های تعداد قطعی متوسط و مدت زمان قطعی متوسط سیستم در سناریوی چهارم درمی یابیم که سیستم ترکیبی پیشنهادی در این سناریو از قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به بقیه سناریوها برخوردار است.
- ایجاد قابلیت انعطاف پذیری برای طرح پیشنهادی در صورت استفاده از باتری در کنار منابع انرژی تجدیدپذیر.
- قابلیت بالای پاسخ دهی مطمئن، باثبات و قوی برای مسئله پیشنهادی با استفاده از الگوریتم جستجوی کلاغ.
- قدم برداشتن در راستای سیاست های کشورهای در حال توسعه یا توسعه یافته در افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید توان.

References

مراجع

- [1] S. Ansari, S. Mohammad, "Determination of optimal battery capacity in economic operation of micro grid by cuckoo search algorithm", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 10, no. 38, pp. 51-64, Summer 2019 (in Persian).
- [2] 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. 183, no. 3, pp. 685-696, Agu. 2019 (doi: 10.1016/j.solener.2019.06.050).
- [3] M. Shane, H. Shahinzadeh, M. Moazzami, G. B. Gharehpetian, "Optimal sizing and management of hybrid renewable energy system for highways lighting", *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 8, no. 4, pp. 2336-2349, Dec. 2018
- [4] S. Moghaddam, M. Bigdeli, M. Moradlou, P. Slano, "Designing of stand-alone hybrid PV/wind/battery system using improved crow search algorithm considering reliability index", *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 429-449, Agu. 2019 (doi: 10.1007/s40095-019-00319-y).
- [5] X. Xu, W. Hu, D. Cao, Q. Huang, C. Chen, Z. Chen, "Optimized sizing of a standalone PV-wind hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system", *Rewable energy*, vol. 147, no. 1, pp. 1418-1431, Mar. 2019 (doi: 10.1016/j.renene.2019.09.099).
- [6] R. Logesh, "Resources, configurations, and soft computing techniques for power management and control of PV/wind hybrid system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 129-143, Mar. 2017 (doi: 10.1016/j.rser.2016.11.209)
- [7] K. Kaabeche, Y. Bakelli, "Renewable hybrid system size optimization considering various electrochemical energy storage technologies", *Energy Conversion And Managmnt*, vol. 193, no. 1, pp. 162-175, Agu. 2019 (doi: 10.1016/j.enconman.2019.04.064).
- [8] M. Azaza, F. Wallin, "Multi objective particle swarm optimization of hybrid micro-grid system: A case study in Sweden", *Energy*, vol. 123, pp. 108-118, Mar. 2017 (doi: 10.1016/j.energy.2017.01.149).
- [9] M. Hosseinzadeh, F. R-Salmasi, "Power management of an isolated hybrid AC/DC micro-grid with fuzzy control of battery banks", *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, pp. 484-493, July 2015 (doi: 10.1049/iet-rpg.2014.0271).
- [10] M. A-M-Ramli, H. R-E-H-Boichekara, A. S-Alghamdi, "Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm", *Renewable Energy*, vol. 121, pp. 400-411, June 2018 (doi: 10.1016/j.renene.2018.01.058).
- [11] Y. Liu, W. Du, L. Xiao, H. Wang, S. Bu, J. Cao, "Sizing a hybrid energy storage system for maintaining power balance of an isolated system with high penetration of wind generation", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 31, pp. 3267-3275, Jul. 2016 (doi: 10.1109/TPWRS.2015.2482983).
- [12] P. Suhane, S. Rangnekar, A. Mittal, A. Khare, "Sizing and performance analysis of standalone wind-photovoltaic based hybrid energy system using ant colony optimisation", *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, pp. 964-972, Feb. 2016 (doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0394).
- [13] E. A. Al-Ammar, H. Ur-Rahman-Habib, Kotb. M-Kotb, S. Wang, W. Ko, M. F-Elmorshedy, A. Waqar, "Residential community load management based on optimal design of standalone HRES with model predictive control", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12542-12572, Jun. 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.2965250).
- [14] B. Liu, F. Zhuo, Y. Zhu, H. Yi, "System operation and energy management of a renewable energy-based DC micro-grid for high penetration depth application", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 6, pp. 1147-1155, Dec. 2015 (doi: 10.1109/TSG.2014.2374163).
- [15] O. Nadjemi, T. Nacer, A. Hamidat, H. Salhi, "Optimal hybrid PV/wind energy system sizing: Application of cuckoo search algorithm for Algerian dairy farms", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 1352-1365, April 2017 (doi: 10.1016/j.rser.2016.12.038).
- [16] A. Maleki, F. Pourfayaz, "Sizing of stand-alone photovoltaic/wind/diesel system with battery and fuel cell storage devices by harmony search algorithm", *Journal of Energy Storage*, vol. 2, pp. 30-42, Aug. 2015 (doi: 10.1016/j.est.2015.05.006).
- [17] A. S-Omar, A. A-Mohamed, T. Senjyu, A. M-Hemeida, "Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid PV/wind/battery/diesel micro-grid", *Proceeding of the IEEE/CPERE*, , pp. 391-396, Aswan City, Egypt, Feb. 2019 (doi: 10.1109/CPERE45374.2019.8980178).
- [18] C. Olcan, "Multi-objective analytical model for optimal sizing of stand-alone photovoltaic water pumping systems", *Energy Conversion and Management*, vol. 100, pp. 358-369, Agu. 2015 (doi: 10.1016/j.enconman.2015.05.018).
- [19] A. M-Hemeida, M. H. El-Ahmar, A. M. El-Seyed, H. M-Hasanien, S. Alkhalaf, M. F. C-Esmail, T. Senjyu, "Optimum design of hybrid wind/PV energy system for remote area", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 11-23, Mar. 2020 (doi: 10.1016/j.asej.2019.08.005).

- [20] T. Kerdphol, K. Fuji, Y. Mitani, M. Watanabe, Y. Qudaih, "Optimization of a battery energy storage system using particle swarm optimization for stand-alone microgrids", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 81, pp. 32-39, Oct. 2016 (doi: 10.1016/j.ijepes.2016.02.006).
- [21] Z. Weiping, A. Maleki, M. A-Rosen, J. Liu, "Optimization with a simulated annealing algorithm of a hybrid system for renewable energy including battery and hydrogen storage", *Energy*, vol. 163, pp. 191-207, Nov. 2018 (doi: 10.1016/j.energy.2018.08.112).
- [22] H. Lotfi, R. Ghasi, M. B-Naghibi Sistani, "Providing a novel approach for dynamic feeder reconfiguration considering importance of reliability and grid's security", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 10, no. 40, pp. 13-22, winter 2019 (in Persian).
- [23] Z. Galias, "Tree-structure based deterministic algorithms for optimal switch placement in radial distribution networks", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 34, no. 6, pp. 4269-4278, Nov. 2019 (doi: 10.1109/TPWRS.-2019.2909836).
- [24] A. Askarzadeh, "A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: crow search algorithm", *Computers & Structures*, vol. 169, pp. 1-12, Jun. 2016 (doi: 10.1016/j.compstruc.2016.03.001).
- [25] A. Kaur, R. Kaur, S. Sondhi, "CSA based PID controller design technique for optimizing various integral errors", *Proceeding of the IEEE/ICCCDSE*, Noida, India, pp. 55-62, Jan. 2020 (doi: 10.1109/Confluence4-7617.2020.9057816).
- [26] S. Shahrezaei, A. A-Ghadimi, M. Gandomkar, M. Moazzami, S. Shaheidari, A. R-Afshari Moghadam, "Assessment and improving methods of reliability indices in bakhtar regional electricity company", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 4, no. 14, pp. 3-10, Summer 2013 (in Persian).

زیرنویس ها

1. Uncertainty
2. Renewable energy sources
3. Grasshopper algorithm
4. Bat optimization algorithm
5. Improved crow search algorithm
6. Reliability
7. Ant lion optimizer algorithm
8. Grey wolf optimizer algorithm
9. Krill herd algorithm
10. Multi objective particle swarm optimization
11. Multi-objective self-adaptive differential evolution
12. Ant optimizer algorithm
13. Cuckoo search algorithm
14. Harmony search algorithm
15. Cost of electricity
16. Loss of power supply probability
17. Renewable factor
18. Time optimization of resources SCHEDuling
19. Crow search algorithm
20. State of charge
21. System average interruption frequency index
22. System average interruption duration index
23. Mixed integer nonlinear programming