

Robust Planning of the Islanded Hybrid System Including Renewable and Non-Renewable Sources and Stationary and Mobile Storages**Farshad Khalafian, M.Sc**Ahwaz Pipe Mills-Karoun Industrial Zone, Ahwaz, Iran
farshad.khalafian@yahoo.com**Abstract**

In this paper, the robust planning of the islanded hybrid system (IHS) to create an integrated system with wind turbine, photovoltaic, diesel generator, stationary (battery) and mobile (electric vehicles) storages is presented. The proposed scheme minimizes the planning cost (including construction, maintenance, and operation) of the mentioned sources and storages, and environmental pollution level. This problem is constrained to operation and planning model of the different sources and storages, and power balance constraint in IHS. The proposed scheme is formulated in the Pareto optimization framework based on method of the summation of weighted functions. Also, the bounded uncertainty-based robust optimization (BURO) is used to model the uncertainties of load, renewable power, and energy of mobile storage. Then, the hybrid evolutionary algorithm according to composition of Krill Herd Optimization (KHO) and Grey Wolf Optimization (GWO) algorithms obtains an optimal solution including low standard deviation in the final response. Finally, it is seen that the proposed scheme has a suitable capability in the planning of the proposed system according to economic and environmental viewpoints based on obtained numerical results.

Keywords: hybrid evolutionary algorithm, islanded hybrid system, renewable sources, robust optimization, stationary and mobile storage

Received: 1 May 2021

Revised: 19 June 2021

Accepted: 24 August 2021

Corresponding Author: Farshad Khalafian

Citation: F. Khalafian, "Robust planning of the islanded hybrid system including renewable and non-renewable sources and stationary and mobile storages", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 53, pp. 15-32, June 2023 (in Persian).

برنامه‌ریزی استوار سیستم ترکیبی جزیره‌ای شامل منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و ذخیره‌سازهای ساکن و سیار

فرشاد خلفیان، دانش آموخته کارشناسی ارشد

شرکت لوله سازی اهواز- منطقه صنعتی کارون، اهواز، ایران

farshad.khalafian@yahoo.com

چکیده: در این مقاله برنامه‌ریزی استوار سیستم ترکیبی جزیره‌ای جهت ایجاد یک سیستم یک‌پارچه شامل توربین بادی، فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و ذخیره‌سازی ساکن (باتری) و سیار (خودروهای الکتریکی) ارائه می‌شود. طرح پیشنهادی کمینه-سازی مجموع هزینه برنامه‌ریزی (شامل احداث، تعمیر، نگهداری و بهره‌برداری) عناصر مذکور و سطح آلاینده‌گی زیست محیطی را بر عهده دارد. این مسأله نیز مقید به مدل بهره‌برداری و برنامه‌ریزی منابع و ذخیره‌سازهای مختلف و قید تعادل توان در سیستم ترکیبی جزیره‌ای است. طرح مذکور در قالب بهینه‌سازی پارتو مینی بر روش مجموع توابع وزن‌دار مدل‌سازی می‌شود. همچنین از بهینه‌سازی استوار مینی بر عدم قطعیت کران‌دار برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های بار، توان تجدیدپذیر و انرژی ذخیره‌سازهای سیار استفاده می‌شود. سپس از الگوریتم تکاملی ترکیبی مینی بر ترکیب بهینه‌سازی دسته میگوها و بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری جهت دستیابی به راه‌حل بهینه دارای انحراف معیار پایین در پاسخ‌دهی نهایی استفاده می‌گردد. در نهایت با استخراج نتایج عددی مشاهده می‌گردد که طرح پیشنهادی قابلیت مناسبی در برنامه‌ریزی سیستم یاد شده از نظر اقتصادی و زیست محیطی دارد.

کلمات کلیدی: الگوریتم تکاملی ترکیبی، بهینه‌سازی استوار، ذخیره‌سازهای ساکن و سیار، سیستم ترکیبی جزیره‌ای، منابع تجدیدپذیر

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۲/۱۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۳/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۶/۲

نام نویسنده‌ی مسئول: فرشاد خلفیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: شرکت لوله سازی اهواز- منطقه صنعتی کارون- اهواز- ایران

۱- مقدمه

برخی از مصرف‌کننده‌گان به علت عدم دسترسی به مسیر توزیع انرژی الکتریکی توسط سیستم قدرت از منابع مختلفی مانند دیزل ژنراتور^۱ (DiG) در محل خود برای تأمین انرژی مصرفی استفاده می‌کنند [۱]. علاوه بر این، امروزه منابع انرژی تجدیدپذیر^۲ (RES) مانند سیستم بادی و خورشیدی به علت هزینه بهره‌برداری و سطح آلاینده‌گی بسیار پایین استفاده قابل توجهی در سیستم‌های الکتریکی دارند. لذا انتظار می‌رود که مصرف‌کننده‌گان مذکور تمایلی به استفاده از RES داشته باشند. ولی از آنجا که این منابع در برخی ساعات قادر به تولید توان اکتیو بالایی نیستند، لذا این امکان وجود دارد که برای تأمین میزان مشخصی از بار نیاز به احداث تعداد بالایی از RESها باشد. برای جبران این موضوع استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی^۳ (ESS) در کنار RESها مؤثر خواهد بود، چرا که آن در ساعاتی که تولید RESها بیش از مصرف مصرف‌کننده‌گان باشد، انرژی مازاد تولیدی را در خود ذخیره می‌کند و در ساعات دیگر که تولید توان از مصرف کمتر است، بخشی از انرژی ذخیره شده را به سیستم تزریق می‌کنند [۲]. همچنین توجه شود که خودروهای الکتریکی^۴ (EV) به علت توانایی در کاهش مصرف سوخت فسیلی و آلاینده‌های زیست محیطی در سال‌های اخیر استفاده قابل توجهی در میان مشتریان خودرو داشته‌اند [۳]. از آنجا که EVها برای تأمین انرژی مورد نیاز مسافرت خود، باتری خود را به شبکه الکتریکی متصل می‌کنند، لذا تعداد قابل توجهی از آنها در یک مکان مانند پارکینگ قادرند که وظیفه ESSها را انجام دهند [۴]. این مورد باعث کاهش هزینه‌های نصب ESSهای ساکن مانند باتری در شبکه خواهد شد [۴]. در نهایت توجه شود که برای دسترسی به قابلیت‌های اشاره شده نیاز به اجرای سیستم ترکیبی جزیره‌ای^۵ (IHS) برای مصرف‌کننده‌گان دور از دسترس سیستم قدرت نیاز است [۵]. علاوه بر این، در این سیستم می‌توان از DiG به‌عنوان منبع پشتیبان استفاده کرد، به طوری که در ساعاتی که RESها و ESSها قادر به تأمین انرژی مصرف‌کننده نبوده، DiG تأمین انرژی مصرفی مازاد را بر عهده گیرد [۵]. به‌عنوان نکته دیگر، RESها و EVها دارای عدم قطعیت در تزریق یا مصرف توان اکتیو هستند، لذا برنامه‌ریزی IHS باید به گونه‌ای باشد که بتواند بر خطای پیش‌بینی پارامترهای عدم قطعیت غلبه کند. برای این منظور پیش‌بینی می‌شود که مدل‌سازی استوار عدم قطعیت‌ها چنین هدفی را در بر داشته باشد. زیرا که آن بدترین مورد سناریو حاصل از عدم قطعیت‌ها را در نظر می‌گیرد، بنابراین برنامه‌ریزی IHS در این شرایط مقاوم در برابر خطای پیش‌بینی عدم قطعیت‌ها خواهد بود.

در زمینه برنامه‌ریزی IHS تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. در مرجع [۶] نویسندگان اندازه بهینه‌ای برای IHS شامل توربین بادی^۶ (WT)، فتوولتائیک^۷ (PV)، DiG و باتری با توجه به کمینه‌سازی هزینه‌های نصب، تعمیر و بهره‌برداری آنها به دست آورده‌اند. مدل ارائه شده به صورت برنامه‌ریزی قطعی غیرخطی است، که برای حل آن از الگوریتم جستجوی هارمونی^۸ (HSA) استفاده شده است. طرحی همانند مرجع [۶] نیز در مرجع [۷] در نظر گرفته شده است، با این تفاوت که آن دارای WT نیست و همچنین شاخص از دست رفتن تغذیه توان^۹ (LPS) به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان IHS را هم در نظر گرفته است. در مرجع [۸] نیز یک ساختار بهینه IHS شامل PV، باتری و DiG با در نظر گرفته کمینه‌سازی هزینه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری منابع و ذخیره‌سازهای مذکور در کنار کمینه‌سازی آلاینده‌های زیست محیطی پیشنهاد شده است، که آن نیز برای دستیابی به راه‌حل بهینه از الگوریتم بهینه‌سازی گله‌فیل‌ها^{۱۰} (EHO) استفاده کرده است. در مرجع [۹] جهت تأمین بار AC یک منطقه مشخص از سیستم ترکیبی PV، DiG، پیل سوختی، باتری یا ذخیره‌ساز ابرخازنی با توجه به کمینه‌سازی هزینه برنامه‌ریزی و آلودگی استفاده شده است. همچنین امکان سنجی احداث سیستم ترکیبی DiG/PV/باتری در مناطق مسکونی مستقر در نواحی بسیار سرد در مرجع [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. قابل توجه است که در مراجع [۶] الی [۱۰] به منظور کمینه‌سازی آلودگی زیست محیطی الویت تأمین انرژی با RESها و ESSها است، و تولیدات پراکنده تجدیدناپذیر^{۱۱} (NRDG) مانند DiG و پیل سوختی به‌عنوان منبع پشتیبان در نظر گرفته شده‌اند. به عبارتی دیگر، در صورتی میزان مصرف کمتر از توان تولیدی RESها باشد، مازاد توان تولیدی در ESSها ذخیره می‌شود. ولی اگر RESها نتوانند توان مصرفی را تأمین کنند، ابتدا ESSها مازاد مصرف را تغذیه می‌کنند، اگر هم اکنون سیستم ترکیبی دارای مازاد مصرف باشد، آن توسط NRDG تأمین می‌شود. بنابراین عملکرد منابع و ذخیره‌سازها با توجه به مابه‌التفاوت بار مصرفی و توان تولیدی RESها در IHS در لحظات مختلف متفاوت است، لذا نیاز به کلیدزنی مناسب برای منابع و ESSها در شرایط مذکور است. از این‌رو در مرجع [۱۱]

طرح کلیدزنی اتوماتیک این عناصر با توجه به بار مصرفی و توان تولیدی RESها در ساعات مختلف بهره‌برداری IHS مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۲] نیز قابلیت IHS شامل NRDG، IHS شامل NRDG و PV و IHS شامل NRDG، PV و باتری بررسی شده است. براساس [۱۲] مشاهده می‌شود که در مورد سوم توان دریافتی از NRDG نسبت به دو مورد دیگر کمتر است، که نتیجه در کاهش آلودگی زیست محیطی در مورد سوم است. علاوه بر این توجه شود که عموماً مدل‌سازی ریاضی که برای برنامه‌ریزی IHS شامل منابع و ذخیره‌سازهای مختلف ارائه شده، دارای قالب برنامه‌ریزی غیرخطی^{۱۲} (NLP) و یا NLP عدد صحیح^{۱۳} (MINLP) است [۱۳]. از این‌رو عموماً تحقیقات مختلف از الگوریتم‌های تکاملی غیرترکیبی (NHEAها) مانند بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری^{۱۴} (GWO) [۱۴] و الگوریتم کرم شب تاب^{۱۵} (FFA) [۱۵] برای دستیابی به برنامه‌ریزی بهینه برای IHS استفاده می‌کنند.

با توجه به پیشینه تحقیق، مشاهده می‌شود که در بیشتر تحقیقات عموماً IHS دارای RES، ESS و DiG است. ولی توجه شود که براساس مراجع [۳] و [۴] پیش‌بینی می‌شود که تعداد EVها در سال آینده رشد بالایی داشته باشد. از این‌رو این امکان وجود دارد که مصرف‌کننده‌گان دور از دسترس سیستم قدرت دارای EV باشند. به‌عنوان مثال، برخی از واحدهای صنعتی از طریق IHS انرژی مصرفی خود را تأمین می‌کنند. از آنجا که این واحد نیاز به سیستم حمل و نقل دارد، پس این امکان وجود پارکینگ EVها در این واحد حتمی است. بنابراین با مدیریت بهینه شارژ/دشارژ EVها، می‌توان پارکینگ EVها را به‌صورت یک ESS در نظر گرفت که این موضوع نتیجه در کاهش هزینه‌های نصب ESSهای ساکن مانند باتری‌ها دارد. علاوه بر این موضوع، در بیشتر تحقیقات خطای پیش‌بینی ناشی از عدم قطعیت پارامترهای مختلف مانند بار مصرفی و توان تولیدی RESها در برنامه‌ریزی IHS در نظر گرفته نشده است. اما لازمه برنامه‌ریزی یک سیستم که دقت آن در سال‌های آینده با احداث سیستم مذکور قابل مشاهده است، پیش‌بینی دقیق بار و تولید RESها است. ولی از آنجا که پیش‌بینی یک پارامتر دارای خطا است، لذا برای پوشش این موضوع نیاز به استفاده از برنامه‌ریزی‌های تصادفی، احتمالاتی و یا استوار برای طرح پیشنهادی است که این موضوع بسیار کم در تحقیقات مختلف مطرح بوده است. در نهایت، برنامه‌ریزی IHS یک مسأله غیرخطی و یا NLP عدد صحیح (MINLP) است. لذا در بیشتر تحقیقات برای حل مسأله مذکور از الگوریتم‌های تکاملی غیرترکیبی^{۱۶} (NHEAها) استفاده کرده‌اند. اما این حل‌کننده‌ها در زمان محاسباتی بالایی، راه‌حل بهینه را به‌دست می‌آورند. علاوه بر این، در تکرارهای مختلف حل مسأله با الگوریتم‌های مذکور، نتایج مختلفی به‌دست می‌آید، به عبارتی پراکندگی پاسخی نهایی آنها بالا است و دارای شرایط پاسخ‌دهی یکتا نیستند. از این‌رو راه‌حل بهینه به‌دست آمده دارای ضریب اطمینان پایینی است. ولی توجه این مورد می‌تواند با بهنگام‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری در چندین فرآیند مختلف مرتفع شود و یا اینکه میزان پراکندگی پاسخی نهایی کاهش یابد. برای اثبات این موضوع می‌توان به مقایسه حل یک مسأله با الگوریتم ژنتیک^{۱۷} (GA) مرسوم و GA دارای مکانیزم جهش اشاره کرد [۱۶]. به‌طوری که استفاده از فرآیند جهش در GA باعث دستیابی به پاسخی نهایی بهینه‌تر و کاهش پراکندگی آن نسبت به GA مرسوم می‌شود.

به‌منظور جبران شکاف‌های تحقیقاتی مطرح شده، این مقاله طراحی بهینه IHS دارای WT، PV، ESS ساکن (باتری) و سیار (EVها) و DiG در قالب بهینه‌سازی چند هدفه را ارائه می‌دهد. در این طرح، کمیته‌سازی مجموع هزینه‌های احداث، تعمیر و بهره‌برداری منابع و ذخیره‌سازها در IHS و کمیته‌سازی سطح آلودگی زیست محیطی در این سیستم به‌عنوان تابع در نظر گرفته می‌شود. این تابع برپایه بهینه‌سازی پارتو مبنی بر روش مجموع توابع وزن‌دار فرمول‌بندی می‌شود. مسأله مذکور نیز مقید به مدل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری منابع و ذخیره‌سازهای مذکور و تعادل توان در IHS است. در این مقاله، بهترین راه‌حل مصالحه بین توابع هدف یاد شده براساس تکنیک تصمیم‌گیری فازی^{۱۸} (FDT) تعیین می‌شود. در طرح پیشنهادی، پارامترهایی از قبیل بار مصرفی، سرعت باد، تابش نور خورشید بر روی آرایه‌های PV و انرژی مصرفی EVها دارای عدم قطعیت است. لذا در ادامه به‌منظور مدل‌سازی این عدم قطعیت‌ها از بهینه‌سازی استوار مبنی بر عدم قطعیت کران‌دار^{۱۹} (BURO) استفاده می‌گردد. همچنین طرح مذکور دارای مدل MINLP است. از این‌رو به‌منظور دستیابی به راه‌حل بهینه با پراکندگی پایین در پاسخ‌دهی نهایی از الگوریتم تکاملی ترکیبی^{۲۰} (HEA) مبنی بر ترکیب بهینه‌سازی دسته میگوها^{۲۱} (KHO) و بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری (GWO) استفاده می‌شود. در نهایت با مقایسه طرح پیشنهادی و پیشینه تحقیق می‌توان بیان کرد که نوآوری‌های طرح مذکور به شرح زیر است:

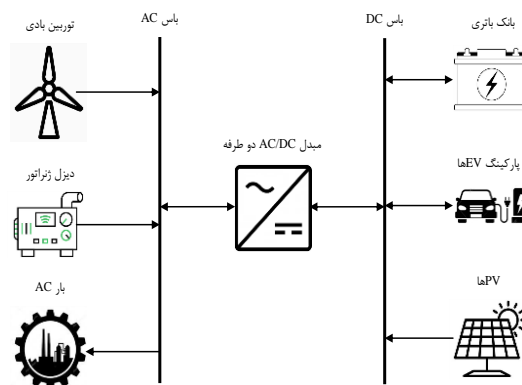
- استفاده از پارکینگ EVها در طرح سیستم ترکیبی جزیره‌ای به منظور کاهش هزینه‌های نصب ESSها ساکن
 - در نظر گرفتن خطای پیش‌بینی عدم قطعیت‌های بار، توان RESها و انرژی EVها جهت دستیابی به برنامه‌ریزی دقیق HIS
 - استفاده از الگوریتم ترکیبی KHO و GWO برای دستیابی به راه‌حل بهینه دارای پراکندگی پایین در پاسخ‌دهی نهایی
 در ادامه مقاله به این صورت سازمان‌دهی می‌شود: در بخش ۲ ساختار و مدل برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی جزیره‌ای بیان می‌شود. سپس مدل‌سازی استوار و روند حل مسأله در بخش ۳ ارائه می‌شود. در نهایت نتایج عددی و نتیجه‌گیری‌ها به ترتیب در بخش‌های ۴ و ۵ ذکر می‌شوند.

۲- ساختار و برنامه‌ریزی سیستم

در این بخش برنامه‌ریزی سیستم جزیره‌ای ترکیبی (IHS) شامل RESها مانند توربین بادی (WT)، فتوولتائیک (PV)، ESS (ساکن (باتری) و سیار (EVها) و دیزل ژنراتور (DiG) ارائه می‌شود. ساختار طرح پیشنهادی در شکل (۱) نمایان شده است، به طوری که سیستم مذکور دارای دو باس AC و DC است که از طریق یک مبدل AC/DC دوطرفه به یکدیگر متصل هستند. در باس AC، منابع WT و DiG به همراه بار AC قرار دارند، ولی ESSها و PV به باس DC متصل می‌شوند. در ارتباط با عملکرد سیستم، فرض بر این است که اولویت تأمین انرژی مصرف‌کننده‌گان بر عهده RESها است و DiG یک منبع پشتیبان است که در صورت عدم توانایی RESها و ESSها در تأمین انرژی، آنها وارد مدار می‌شوند [۶-۸]. از این‌رو عملکرد سیستم براساس ۴ شرط زیر خواهد بود:

شرط ۱- اگر توان تولیدی RESها بیش از مصرف بار AC باشد، مازاد تولید در ESSهای ساکن و سیار ذخیره می‌شود [۸].
 شرط ۲- در صورتی که میزان مصرف بار AC بیش از توان تولیدی RESها باشد، در ابتدا تأمین مازاد مصرف بر عهده ESSها است. سپس DiG مازاد مصرف نسبت به توان تولیدی RESها و ESSها را تغذیه می‌کند [۶].
 شرط ۳- عملکرد شارژ و دشارژ EVها در بازه افق بهره‌برداری به گونه‌ای است که میزان انرژی مورد نیاز آنها برای مسافرت در این بازه تأمین شود.

شرط ۴- ESSهای مختلف می‌توان انرژی خود را در دیگر ESSها ذخیره کنند، به طوری که در یک ساعت یک ESS می‌تواند در مد شارژ کار کند، ولی ESS دیگر در مد دشارژ فعالیت کند. اما مجموع توان ESSها متناسب با شروط ۱ و ۲ است، به طوری که مجموع توان ESS متناسب با شرط ۱ در مد جذب توان هستند، اما متناسب با شرط ۲ در مد تزریق توان هستند. در نهایت طرح پیشنهادی متناسب با تأمین انرژی مصرفی بار AC و EVها اندازه بهینه‌ای برای RESها، DiG و باتری تعیین می‌کند. همچنین بایستی توجه شود که عملیات شارژ EVها در دو مدل غیر هوشمند و هوشمند است [۳]. در طرح غیر هوشمند، EVها به محض اتصال به شبکه باتری خود را شارژ می‌کند و سپس بعد از مدت زمان شارژ مخصوص، باتری پر شده و EVها توانی از شبکه دریافت نمی‌کنند. ولی در طرح هوشمند، از زمان ورود EV به پارکینگ با فرض اینکه آن در این زمان به شبکه متصل می‌شود، تا زمانی که آن از شبکه قطع می‌شود، عملیات شارژ متناسب با اهداف اپراتور شبکه و تمایلات مالک آن انجام می‌شود. همچنین در این طرح، EVها قادر هستند که در مد دشارژ نیز فعالیت کنند [۳].



شکل (۱): ساختار سیستم پیشنهادی
 Figure (1): Proposed system structure

از آنجا که در طرح هوشمند قابلیت کنترل توان اکتیو EVها وجود دارد، لذا در مسأله پیشنهادی از این طرح متناسب با شروط ۴-۱ در راستای بهبود شرایط برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی یاد شده استفاده می‌شود. در ادامه، مسأله پیشنهادی به صورت یک بهینه‌سازی دو هدفه فرمول‌بندی می‌شود که کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های احداث، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری، و کمینه‌سازی سطح آلاینده‌گی در دو تابع هدف در نظر گرفته می‌شوند. قیود مسأله شامل مدل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری RES، ESSها و DiG متناسب با شروط ۴-۱ ارائه شده می‌باشد. جزئیات مدل طرح مذکور در ادامه ارائه می‌شود.

الف) توابع هدف: توابع هدف مسأله پیشنهادی متناسب با اهداف برنامه‌ریزی و شرایط زیست محیطی پاک در رابطه (۱) ارائه شده است، که دارای دو بخش است. در بخش اول، کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های سالیانه احداث و تعمیر RESها، DiG، باتری و مبدل AC/DC بعلاوه هزینه سالیانه بهره‌برداری DiG مد نظر است [۶،۸]. در این رابطه، هزینه احداث و تعمیر RESها و باتری متناسب با تعداد نصب شده آنها در سیستم ترکیبی شکل (۱) است، در صورتی که این هزینه‌ها برای DiG و مبدل AC/DC متناظر با اندازه و یا ظرفیت آنها است. در بخش دوم، کمینه‌سازی آلودگی‌های سالیانه NO_x ، CO_2 و SO_2 حاصل از عملکرد DiG در نظر گرفته شده است، که آن برابر با حاصل ضرب توان DiG و ضرایب آلودگی مذکور است [۱۷]. از این رو ضریب ϑ در بخش دوم رابطه (۱) بیانگر مجموع ضرایب حاصل از آلودگی‌های NO_x ، CO_2 و SO_2 است. در این رابطه N_T بیانگر افق بهره‌برداری و CP معرف ضریب همزمانی است. علاوه بر این، رابطه (۱) مبنی بر بهینه‌سازی پارتو برپایه روش مجموع توابع وزن‌دار نگارش شده است [۱۸]. لذا عبارت‌های ω_{Cost} و ω_{EM} معرف ضرایب وزنی استفاده شده در تابع هدف (۱) است، که به ترتیب برای توابع هزینه برنامه‌ریزی (Cost) و تابع سطح آلاینده‌گی (EM) استفاده می‌گردند. مقادیر مختلفی برای ضرایب مذکور می‌توان اتخاذ کرد، ولی براساس مرجع [۱۸]، باید مجموع آنها برابر ۱ باشد. بنابراین انتظار می‌رود که به‌ازای مقادیر مختلف این ضرایب مقادیر متفاوتی برای توابع هزینه و EM به دست آید، که رسم آنها در یک صفحه مختصات دو بعدی معرف جبهه پارتو برای طرح پیشنهادی خواهد بود [۱۹]. لذا در ادامه به منظور دست‌یابی به یک نقطه بهینه که برابر با بهترین راه‌حل مصالحه بهینه مابین توابع مذکور است، از تکنیک تصمیم‌گیری فازی در این مقاله استفاده می‌شود.

$$\min F = \omega_{Cost} \left\{ \begin{array}{l} N_{PV}CC_{PV} + N_{WT}CC_{WT} + N_BCC_B + P_D^{max}CC_D + P_{C-AC}^{max}CC_C + N_{PV}MC_{PV} + N_{WT}MC_{WT} \\ + N_BMC_B + P_D^{max}MC_D + P_{C-AC}^{max}MC_C + OC_D \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$+ \omega_{EM} \times 365 \cdot CP \cdot \sum_{t=1}^{N_T} \vartheta \cdot P_D(t)$$

در FDT، ابتدا یک میزان تابع عضویت خطی برای توابع هزینه و EM به‌ازای مقادیر مختلف ضرایب وزنی به دست می‌آید. میزان عضویت برای هر تابع دارای مقدار یک (صفر) است، اگر میزان هر تابع از حد پایین (بالای) خود کمتر (بیشتر) باشد [۱۹]. در غیر این صورت میزان عضویت یک تابع برابر با نسبت مابه‌التفاوت تابع مذکور نسبت به حد بالای خود و مابه‌التفاوت حد پایین با حد بالای این تابع خواهد بود. حد بالای و پایین توابع هزینه و EM نیز با توجه به دو مورد ω_{Cost} و ω_{EM} برابر با یک، قابل محاسبه است. سپس به‌ازای هر مقدار ضرایب وزنی، کمینه‌ترین مقدار مابین میزان عضویت توابع هزینه و EM تعیین می‌گردد، که در این مقاله این عدد با حرف α مشخص می‌شود. در نهایت نقطه متناظر با بهترین راه‌حل مصالحه مابین توابع مذکور برابر با بیشینه‌ترین مقدار α به ازای تمامی مقادیر انتخاب شده برای ضرایب وزنی است [۱۹]. در رابطه (۱)، هزینه احداث سالیانه هر عنصر با توجه به هزینه کل ظرفیت TCC آن براساس ضریب بازبایی ظرفیت CFR (۲) به صورت رابطه (۲) قابل محاسبه است. در این رابطه، r معرف نرخ بهره و n بیانگر عمر مفید عنصر است [۶].

$$CC = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \cdot TCC \quad (2)$$

ب) فتوولتائیک‌ها: توان تولیدی PVها (P_{PV}) در IHS با توجه با این موضوع که سطح تابش نور خورشید (I_{PV}) بر روی آنها یکسان است، به صورت رابطه (۳) در ساعت t محاسبه می‌شود. پارامترهای A و η_{PV} به ترتیب معرف سطح یک PV و راندمان این RES

است. عبارت N_{PV} برابر تعداد PVها در IHS است که آن یک متغیر عدد صحیح است و متناسب با رابطه (۴) میزان آن مشخص می‌شود. \bar{N}_{PV} نیز بیانگر حداکثر تعداد PVها قابل نصب در IHS است [۶].

$$P_{PV}(t) = N_{PV} \cdot A_{PV} \cdot \eta_{PV} \cdot I_{PV}(t) \quad (3)$$

$$N_{PV} \in \{0, 1, 2, \dots, \bar{N}_{PV}\} \quad (4)$$

ج) توربین‌های بادی: با فرض اینکه سرعت باد (v) در ساعت t برای کل WTها در IHS یکسان است، توان تولیدی مجموع WTها (P_{WT}) در این زمان به صورت رابطه (۵) قابل محاسبه است. در صورتی که سرعت باد کمتر از سرعت آستانه (v_{c-in}) و یا بیشتر از سرعت قطع (v_{c-out}) باشد، WTها قادر به تولید توان نیست. همچنین این RES به‌ازای افزایش سرعت باد از v_{c-in} الی سرعت نامی (v_r) به صورت خطی افزایش می‌یابد، که شیب خط وابسته به ظرفیت نامی WT (P_r) است. در نهایت به‌ازای سرعت باد مابین v_r و v_{c-out} ، WT همواره توانی برابر ظرفیت نامی خود را تولید می‌کند. در این رابطه، N_{WT} معرف تعداد WTهای نصب شده در IHS است، که یک متغیر عدد صحیح است. محدودیت این متغیر در رابطه (۶) بیان شده است [۸].

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & v(t) \leq v_{c-in} \text{ or } v(t) \geq v_{c-out} \\ N_{WT} P_r \frac{v(t) - v_{c-in}}{v_r - v_{c-in}} & v_{c-in} < v(t) < v_r \\ N_{WT} P_r & v_r \leq v(t) < v_{c-out} \end{cases} \quad (5)$$

$$N_{WT} \in \{0, 1, 2, \dots, \bar{N}_{WT}\} \quad (6)$$

د) ذخیره‌سازهای انرژی: همانند شکل (۱)، IHS دارای دو نوع ESS ساکن (باتری) و سیار (EVها) است، که انرژی مصرفی آنها در عملیات شارژ براساس شروط ۱-۴ ارائه شده تنها توسط RESها تأمین می‌شود [۹]. بنابراین توان مبدل AC/DC در بخش DC متناسب با مابه‌التفاوت توان تولیدی WTها (P_{WT}) و توان بار AC (P_L) خواهد بود. علاوه بر این، در صورتی که توان تولیدی WTها بیشتر از بار مصرفی AC باشد، پس جهت توان از سمت AC به سمت DC مبدل مذکور خواهد بود. بنابراین بخش DC در این شرایط به‌عنوان خروجی مبدل یاد شده است، و توان این بخش در این وضعیت همانند رابطه (۷) محاسبه می‌شود. در این رابطه بخش DC به‌عنوان خروجی این مبدل در نظر گرفته شود. عبارت η_c نیز بیانگر راندمان مبدل AC/DC است. علاوه بر این، اگر توان تولیدی WTها کمتر از بار AC باشد، توان در این مبدل از سمت DC به سمت AC حرکت می‌کند. پس بخش DC در این شرایط تحت عنوان ورودی مبدل خواهد بود. از این‌رو توان بخش DC که در وضعیت ورودی قرار دارد متناسب با رابطه (۸) قابل محاسبه است. در قیود (۹)–(۱۰) محدودیت ظرفیت بخش DC مبدل در دو وضعیت عملکرد ارائه شده فرمول‌بندی شده است. متغیر x بیانگر وضعیت عملکردی بخش DC در مد ورودی ($x=0$) و یا خروجی ($x=1$) است. در نهایت تعادل توان در باس DC متناسب با رابطه (۱۱) است [۲۰]، که توان شارژ و دشارژ ESSها از این رابطه محاسبه می‌شود. در ادامه، مدل بهره‌برداری و برنامه‌ریزی باتری‌ها در روابط (۱۲)–(۱۷) ارائه شده است [۷]. محدودیت نرخ شارژ و دشارژ مجموع باتری‌ها در IHS به ترتیب متناسب با قیود (۱۲) و (۱۳) است. انرژی قابل ذخیره در باتری‌ها (E_B) و انرژی اولیه این ESS [$E_B(0)$] به ترتیب از رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) قابل محاسبه هستند. در قیده‌های (۱۶) و (۱۷) نیز به ترتیب محدودیت انرژی قابل ذخیره در باتری‌ها و محدودیت تعداد آنها در IHS فرمول‌بندی شده است. براساس رابطه (۱۴)، انرژی ذخیره شده در باتری‌ها، $E_B(t)$ ، برای ساعت t در صورتی که باتری‌ها در مدل شارژ باشند، نسبت به انرژی ذخیره شده در ساعت $t-1$ ، $E_B(t-1)$ ، افزایش می‌یابند. ولی در مد دشارژ باتری‌ها، $E_B(t)$ نسبت به $E_B(t-1)$ کاهش می‌یابد. همچنین در لحظه t برابر ۱ ثانیه، انرژی اولیه باتری‌ها به جای $E_B(t-1)$ استفاده می‌شود. در این رابطه، γ معرف یک ضریب است که تنها در به‌ازای t برابر ۱ ثانیه دارای مقدار ۱ است و برای ساعت‌های دیگر دارای مقدار صفر است. متغیر γ_B معرف وضعیت عملکرد شارژ (برابر ۱) و دشارژ (برابر صفر) باتری است. متغیر عدد صحیح N_B نیز برابر تعداد باتری‌های قابل نصب در IHS است، که دارای حداکثر مقدار \bar{N}_B است [۷].

مدل بهره‌برداری EVها در قیود (۱۸)–(۲۱) ارائه شده است [۳،۴]. محدودیت نرخ شارژ و دشارژ مجموع EVها در IHS به ترتیب در رابطه‌های (۱۸) و (۱۹) بیان شده است. انرژی قابل ذخیره در باتری EVها (E_{EV}) متناسب با رابطه (۲۰) است، که

براساس رابطه (۲۱)، آن همواره باید دارای مقدار مثبت باشد. همانند باتری‌ها، انرژی ذخیره شده در EVها برای ساعت t ، $E_{EV}(t)$ نسبت به ساعت قبل خود ($t-1$) در صورت شارژ (دشارژ) باتری EVها افزایش (کاهش) می‌یابد. علاوه بر این در لحظه t این امکان وجود دارد که تعدادی EV به IHS متصل/قطع شوند. در این صورت انرژی اولیه آنها (E_{Att}) انرژی مصرفی مورد نیاز مسافرت آنها (E_{Dep}) در ساعت t به E_{EV} اضافه/کم می‌شود، که این مورد در رابطه (۲۰) نیز مدل‌سازی شده است.

$$P_{C-DC}^{out}(t) = \eta_c (P_{WT}(t) - P_L(t)) \times (t) \quad (7)$$

$$P_{C-DC}^{in}(t) = \frac{P_L(t) - P_{WT}(t)}{\eta_c} (1 - x(t)) \quad (8)$$

$$0 \leq P_{C-DC}^{out}(t) \leq P_{C-DC}^{max} \quad P_{C-DC}^{max} = \lambda \cdot P_{C-AC}^{max} \quad (9)$$

$$0 \leq P_{C-DC}^{in}(t) \leq P_{C-DC}^{max} \quad (10)$$

$$(P_{CH}^{EV}(t) - P_{DIS}^{EV}(t)) + (P_{CH}^B(t) - P_{DIS}^B(t)) = P_{PV}(t) + P_{C-DC}^{out}(t) - P_{C-DC}^{in}(t) \quad (11)$$

$$0 \leq P_{CH}^B(t) \leq \alpha_{CH} N_B E_B^{max} y_B(t) \quad (12)$$

$$0 \leq P_{DIS}^B(t) \leq \alpha_{DIS} N_B E_B^{max} (1 - y_B(t)) \quad (13)$$

$$E_B(t) = \gamma(t) E_B(0) + (1 - \gamma(t)) (1 - \sigma) E_B(t-1) + \eta_B P_{CH}^B(t) - P_{DIS}^B(t) \quad (14)$$

$$E_B(0) = \beta_{ini} N_B E_B^{max} \quad (15)$$

$$\beta_{min} N_B E_B^{max} \leq E_B(t) \leq N_B E_B^{max} \quad (16)$$

$$N_B \in \{0, 1, 2, \dots, \bar{N}_B\} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{CH}^{EV}(t) \leq P_{EV-CH}^{max}(t) y_{EV}(t) \quad (18)$$

$$0 \leq P_{DIS}^{EV}(t) \leq P_{EV-DIS}^{max}(t) (1 - y_{EV}(t)) \quad (19)$$

$$E_{EV}(t) = E_{Att}(t) + (1 - \gamma(t)) (1 - \sigma) E_{EV}(t-1) + \eta_{EV} P_{CH}^{EV}(t) - P_{DIS}^{EV}(t) - E_{Dep}(t) \quad (20)$$

$$E_{EV}(t) \geq 0 \quad (21)$$

شایان ذکر است که مقدار شارژ EVها به دشارژ EVها در ساعت t برابر مجموع نرخ شارژ (cr) به دشارژ (dr) کل EVهای متصل به IHS (N_p) است. همچنین E_{Dep} در لحظه t برابر مجموع انرژی مصرفی مورد نیاز مسافرت کل EVهای قطع شده از IHS در این ساعت است، که به صورت رابطه زیر قابل مطرح است:

$$\sum_{i=1}^{N_{quit}(t)} BC(i) \quad (22)$$

در این مقاله فرض بر این است که هر EV به صورت کامل شارژ می‌شود، از این رو انرژی مصرفی مورد نیاز مسافرت هر EV براساس مرجع [۳] برابر با ظرفیت باتری EV (BC) آن خواهد بود. در نهایت E_{Att} در ساعت t برابر با مجموع انرژی اولیه کل EVهای تازه متصل شده به IHS (N_{p-in}) است، که به صورت رابطه زیر قابل فرمول‌بندی است:

$$\sum_{i=1}^{N_{p-in}(t)} SOC(i) \cdot BC(i) \quad (23)$$

انرژی اولیه هر EV نیز برابر حاصل ضرب ظرفیت باتری EV و حالت شارژ^{۲۴} (SOC) اولیه EV (1-SOC) است. SOC همانند یک سوخت سنج در EV است که درصد انرژی باقی مانده در باتری EV را نمایش می‌دهد [۳].

ه) دیزل ژنراتور: براساس شرط ۲، DiG در صورتی روشن می‌شود که ESSها و RESها قادر به تأمین بار AC نباشند [۶]. این عملکرد با توجه به مابه التفاوت مجموع توان تولیدی WTها و توان بخش AC مبدل AC/DC نسبت به توان بار AC سنجیده می‌شود. بخش AC این مبدل در دو وضعیت ورودی و خروجی می‌تواند قرار بگیرد. در صورتی که در باس DC میزان توان تولیدی بیشتر از توان مصرفی باشد، پس بخش AC مبدل در وضعیت خروجی قرار دارد. در این صورت توان بخش AC مبدل در وضعیت عملکرد خروجی از رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود. همچنین اگر در باس DC، توان مصرفی نسبت به توان تولیدی بیشتر باشد، پس بخش AC مبدل در وضعیت ورودی قرار دارد. در این صورت توان بخش AC در وضعیت عملکرد ورودی به صورت رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود. در قیدهای (۲۶) و (۲۷) به ترتیب محدودیت عملکرد بخش AC مبدل AC/DC در

وضعیت عملکرد ورودی و خروجی ارائه شده است. همچنین محدودیت اندازه مبدل AC/DC در رابطه (۲۸) ارائه شده است. در نهایت توان تولیدی DiG در لحظه t برابر $P_D(t)$ براساس رابطه (۲۹) که برابر مابه‌التفاوت توان بار AC و مجموع توان تولیدی WT و توان ac خروجی مبدل است. باید گفت که زمانی که بخش AC مبدل AC/DC در وضعیت ورودی قرار دارد، این موضوع به این معنی است که توان بار AC کمتر از توان تولیدی WTها است. بنابراین در این شرایط DiG خاموش است، از این رو عبارت توان ac ورودی مبدل در رابطه (۲۹) ظاهر نمی‌شود. در ادامه، قید (۳۰) بیانگر محدوده عملکرد DiG است. در رابطه (۳۱) نیز هزینه بهره‌برداری سالیانه DiG فرمول‌بندی شده است، و در نهایت محدودیت اندازه DiG در قید (۳۲) مطرح شده است. در این رابطه‌ها، CP معرف ضریب همزمانی است، ρ_{fuel} اشاره به قیمت سوخت DiG دارد، A_D و B_D بیانگر ضرایب منحنی سوخت مصرفی DiG هستند.

$$P_{C-AC}^{out}(t) = \eta_C \left(\begin{matrix} P_{PV}(t) + P_{DIS}^B(t) + P_{DIS}^{EV}(t) \\ -P_{CH}^B(t) - P_{CH}^{EV}(t) \end{matrix} \right) z(t) \quad (24)$$

$$P_{C-AC}^{in}(t) = \frac{1}{\eta_C} \left(\begin{matrix} P_{CH}^B(t) + P_{CH}^{EV}(t) - P_{DIS}^B(t) \\ -P_{DIS}^{EV}(t) - P_{PV}(t) \end{matrix} \right) (1-z(t)) \quad (25)$$

$$0 \leq P_{C-AC}^{out}(t) \leq P_{C-AC}^{max} \quad (26)$$

$$0 \leq P_{C-AC}^{in}(t) \leq P_{C-AC}^{max} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{C-AC}^{max} \leq \bar{P}_{Con} \quad (28)$$

$$P_D(t) = P_L(t) - P_{WT}(t) - P_{C-AC}^{out}(t) \quad (29)$$

$$0 \leq P_D(t) \leq P_D^{max} \quad (30)$$

$$OC_D = \sum_{t=1}^N 365 \times CP \times \rho_{fuel} \times (B_D P_D^{max} + A_D P_D(t)) \quad (31)$$

$$0 \leq P_D^{max} \leq \bar{P}_D \quad (32)$$

۳- برنامه‌ریزی استوار IHS مبنی بر HEA

در طرح پیشنهادی، پارامترهایی از قبیل میزان تابش خورشید بر روی آرایه‌های PV، I_{PV} ، سرعت باد، v ، نرخ شارژ و دشارژ EVها، انرژی اولیه و عزیمت EVها، E_{Att} و E_{Dep} ، و بار AC، P_L ، به صورت عدم قطعیت هستند. از این رو در این مقاله به منظور دستیابی به برنامه‌ریزی مطمئن و مقاوم در بدترین شرایط از برنامه‌ریزی استوار استفاده می‌شود. شرایط مذکور برابر با بدترین مورد سناریو حاصل از عدم قطعیت‌های مذکور است [۲۱]. جهت دستیابی به این هدف از تکنیک بهینه‌سازی استوار مبنی بر عدم قطعیت کران‌دار (BURO) استفاده می‌شود [۲۱]. در این روش، میزان صحیح یک عدم قطعیت (u) مابین یک کران بالا ($(1+\kappa) \cdot \bar{u}$) و کران پایین ($(1-\kappa) \cdot \bar{u}$) قرار دارد، یعنی $\bar{u} \cdot (1+\kappa) \leq u \leq \bar{u} \cdot (1-\kappa)$. عبارت \bar{u} معرف میزان پیش‌بینی شده و یا نرمال یک پارامتر عدم قطعیت است. همچنین عبارت κ بیانگر خطای پیش‌بینی و یا سطح عدم قطعیت است. براساس تکنیک BURO، میزان صحیح پارامتر عدم قطعیت در بدترین مورد سناریو در حد بالا یا پایین خود قرار می‌گیرد. این شرایط بستگی به موقعیت قرارگیری پارامتر مذکور در مسأله بهینه‌سازی است، به طوری که فضای جواب مسأله نسبت به مدل قطعی کمتر شود، یا این که میزان تابع هدف نسبت به مدل قطعی دارای وضعیت بهینه‌تری نباشد [۲۱]. به عنوان مثال، اگر یک پارامتر عدم قطعیت با ضریب مثبت در تابع هدف با شرایط کمینه‌سازی باشد، پس میزان صحیح این پارامتر عدم قطعیت در بدترین مورد سناریو بر روی کران بالای خود قرار می‌گیرد. در این صورت میزان تابع هدف نسبت به مدل قطعی بیشتر خواهد بود که متناسب با اهداف مدل‌سازی استوار است. علاوه بر این، در طرح پیشنهادی به منظور این که فضای جواب در بدترین مورد سناریو نسبت به مدل قطعی، (۱) - (۳۳)، کمتر باشد، میزان صحیح عدم قطعیت P_L در حد بالای خود قرار می‌گیرد. در نهایت با توجه به این شرایط، مدل استوار طرح پیشنهادی به صورت زیر قابل بیان است:

$$\min F \quad (33)$$

به شرطی که:

$$P_{PV}(t) = N_{PV} \cdot A_{PV} \cdot \eta_{PV} \cdot (1-\kappa) \cdot I_{PV}(t) \quad (34)$$

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & v'(t) \leq v_{c-in} \text{ or } v'(t) \geq v_{c-out} \\ N_{WT} P_r \frac{v'(t) - v_{c-in}}{v_r - v_{c-in}} & v_{c-in} \leq v'(t) \leq v_r \\ N_{WT} P_r & v_r \leq v'(t) \leq v_{c-out} \end{cases} \quad (35)$$

$$v'(t) = (1 - \kappa) \cdot v(t)$$

$$P_{C-DC}^{out}(t) = \eta_C (P_{WT}(t) - (1 + \kappa) P_L(t)) x(t) \quad (36)$$

$$P_{C-DC}^{in}(t) = \frac{(1 - \kappa) \cdot P_L(t) - P_{WT}(t)}{\eta_C} (1 - x(t)) \quad (37)$$

$$0 \leq P_{CH}^{EV}(t) \leq (1 - \kappa) P_{EV-CH}^{max}(t) y_{EV}(t) \quad (38)$$

$$0 \leq P_{DIS}^{EV}(t) \leq (1 - \kappa) P_{EV-DIS}^{max}(t) (1 - y_{EV}(t)) \quad (39)$$

$$E_{EV}(t) = (1 - \kappa) \cdot E_{Arr}(t) + (1 - \gamma(t)) (1 - \sigma) E_{EV}(t-1) + \eta_{EV} P_{CH}^{EV}(t) - P_{DIS}^{EV}(t) - (1 + \kappa) \cdot E_{Dep}(t) \quad (40)$$

$$P_D(t) = (1 + \kappa) \cdot P_L(t) - P_{WT}(t) - P_{C-AC}^{out}(t) \quad (41)$$

$$\text{قیود (۴)، (۶)، (۹)–(۱۷)، (۲۱)–(۳۱)، (۳۱)–(۳۲)} \quad (42)$$

با توجه به مدل (۳۳)–(۴۲)، به منظور دستیابی به فضای جواب کمتر از مدل قطعی، (۱)–(۳۰)، در بدترین مورد سناریو حاصل از عدم قطعیت‌های یاد شده نیاز است که میزان صحیح عدم قطعیت پارامترهای بار AC، PL، و انرژی عزیمت EVها، EDep، بر روی کران بالای خود قرار گیرند. همچنین میزان صحیح عدم قطعیت‌ها دیگر در شرایط مذکور بر روی حد پایین خود قرار می‌گیرد. در ادامه توجه شود که مسأله (۳۳)–(۴۲) دارای چارچوب غیرخطی عدد صحیح (MINLP) است که در این مقاله به- منظور دستیابی به راه‌حل بهینه از HEA مبنی بر ترکیب الگوریتم‌های KHO [۲۲] و GWO [۲۳] استفاده می‌شود. از آنجا که در این حل‌کننده، بهنگام‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری در دو فرآیند KHO و GWO انجام می‌شود، لذا انتظار می‌رود که آن بتواند راه‌حل بهینه را در کمترین زمان محاسباتی دارای شرایط پاسخ‌دهی یکتا به‌دست آورد. قابلیت‌های این الگوریتم نسبت به حل‌کننده‌های دیگر در بخش ۴–۲–الف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ادامه توجه شود که در این مقاله از تکنیک تابع جریمه [۲۴] برای برآورد محدودیت‌های ظرفیت بخش DC و AC مبدل AC/DC، (۹)–(۱۰)، (۲۶)–(۲۷)، قید تعادل توان در باس DC، (۱۱)، محدودیت انرژی قابل ذخیره در ESSها، (۱۸) و (۲۱)، و محدودیت ظرفیت DiG، (۳۰) استفاده می‌شود. در این تکنیک، تابع هدف مسأله (تابع برازندگی) برابر مجموع تابع هدف (۳۳) و توابع جریمه است. تابع جریمه برای محدودیت $a \leq b$ و قید $a = b$ به ترتیب به صورت $\mu \cdot \max(0, a - b)$ و $\lambda \cdot (b - a)$ بیان می‌شود، که $\mu \geq 0$ و $\lambda \in (-\infty, +\infty)$ معرف ضرایب لاگرانژ هستند [۲۴]. در طرح پیشنهادی دو نوع متغیر تصمیم‌گیری و وابسته وجود دارد. متغیرهای تصمیم‌گیری مانند N_{WT} ، N_{PV} ، N_B ، y_{EV} ، μ ، λ و ... هستند، که مقدار آنها توسط الگوریتم ترکیبی KHO و GWO به ترتیب با توجه به روابط (۴)، (۶) و (۱۷)، مجموعه‌های $\{0, 1\}$ و $\{0, 1\}$ ، روابط (۱۲)، (۱۳)، (۱۸)، (۱۹)، (۲۸) و (۳۲)، بازه‌های $[0, +\infty)$ و $(-\infty, +\infty)$ تعیین می‌شوند. متغیرهای وابسته مانند P_{WT} ، P_{PV} ، x ، z ، E_B ، E_{EV} ، P_D ، OCD و ... هستند که میزان آنها با توجه به میزان متغیرهای تصمیم‌گیری و قیود (۳)، (۵)، (۷)، (۸)، (۱۴)، (۱۵)، (۲۰)، (۲۴)، (۲۵)، (۲۹) و (۳۲) محاسبه می‌شود. در این محاسبات، اگر میزان $P_W(t) - P_L(t)$ مثبت باشد، پس $x=1$ و میزان توان dc ورودی مبدل برابر صفر است، در غیر این‌صورت $x=0$ و توان dc خروجی مبدل برابر صفر است. همچنین اگر رابطه (۴۳) دارای مقدار مثبتی باشد، لذا $z=1$ و میزان توان ac ورودی مبدل برابر صفر است، در غیر این صورت $z=0$ و توان ac خروجی مبدل برابر صفر است.

$$PP(T) = P_{PV}(t) + P_{DIS}^B(t) + P_{DIS}^{EV}(t) - P_{CH}^B(t) - P_{CH}^{EV}(t) \quad (43)$$

در نهایت تابع برازندگی طرح پیشنهادی براساس رابطه (۴۳) و مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری و وابسته محاسبه می‌شود. در ادامه فرض می‌شود که الگوریتم مذکور قادر است که با تکرار مراحل بیان شده به تعداد I_{max} (معرف حداکثر تکرار)، نقطه همگرایی مسأله را به‌دست آورد. در نهایت جزئیات روند حل پیشنهادی به شرح زیر است:

- گام اول: تعداد N (اندازه جمعیت) مقدار تصادفی برای متغیرهای تصمیم‌گیری یاد شده براساس بازه مجاز خودشان
- گام دوم: محاسبه متغیرهای وابسته و تابع برازندگی به ازای N مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری
- گام سوم: تعیین بهینه‌ترین (کمینه‌ترین) مقدار تابع برازندگی
- کامل چهارم: بهنگام‌سازی میزان متغیرهای تصمیم‌گیری با توجه به مقدار بهینه تابع برازندگی در مرحله قبل، به-طوری که ابتدا KHO فرآیند بهنگام‌سازی متغیرهای مذکور را بر عهده دارد، و سپس GWO این فرآیند را انجام می‌دهد.
- گام پنجم: اجرای گام دوم و سوم
- گام ششم: بررسی وضعیت همگرایی مسأله، به‌طوری که اگر تکرار بهنگام‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری توسط الگوریتم ترکیبی KHO و GWO برابر I_{max} باشد، همگرایی مسأله به‌دست آمده است. در غیر این صورت گام چهارم اجرا شود.

۴- نتایج عددی

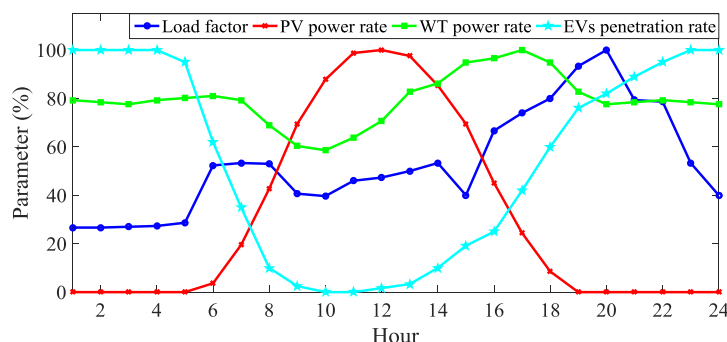
در این قسمت مورد مطالعاتی و طرح پیشنهادی به همراه حل‌کننده ترکیبی که در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی شده، آمده است.

۴-۱- مورد مطالعاتی

در این بخش، طرح پیشنهادی در یک سیستم مانند شکل (۱) متناسب با منطقه‌ای از شهر رفسنجان در ایران [۶]، اجراء می‌شود که دارای بار AC با مقدار پیک ۳۰ کیلووات و پارکینگ EVها دارای ظرفیت ۱۰ کیلووات است. پروفیل روزانه بار AC نیز برابر با حاصل ضرب پیک بار و منحنی روزانه ضریب بار است که این منحنی در شکل (۲) نشان داده شده است [۶]. علاوه بر این، فرض شده که EVها از استراتژی شارژ هوشمند پیروی می‌کنند، از این‌رو منحنی روزانه نرخ نفوذ آنها همانند شکل (۲) خواهد بود [۳]. براساس این شکل EVها عموماً از ساعت ۱۲:۰۰ به بعد به شبکه متصل می‌شوند و در ساعت‌های ۴:۰۰ الی ۹:۰۰ صبح از شبکه قطع می‌شوند و سپس از پارکینگ خارج می‌شوند. در ادامه، مشخصات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری RESها شامل PV و WT، ESS ساکن مانند باتری، و DiG در مراجع [۶] و [۸] ارائه شده است. در مورد EVها، نرخ شارژ و دشارژ هر EV برابر ۳ کیلووات مد نظر است، ظرفیت باتری هر EV برابر ۱۲ کیلووات-ساعت است، راندمان آن برابر ۹۰ درصد و SOC اولیه برابر ۲۰ درصد است [۳]. در مورد مبدل AC/DC، هزینه احداث و تعمیر و نگهداری آن به ترتیب برابر ۶۶۷ دلار بر کیلووات و صفر است. حداکثر ظرفیت قابل نصب آن برابر ۶۰ کیلووات و عمر مفید آن ۱۰ و دارای راندمانی برابر ۹۵ درصد است و همچنین نسبت بین ظرفیت بخش DC و AC آن (χ) برابر ۹۵ درصد است [۶]. علاوه بر این، نمایه روزانه تابش نور خورشید بر روی آرایه‌های PV (I_{PV}) برابر با حاصل ضرب حداکثر مقدار I_{PV} و منحنی روزانه نرخ تابش است. همچنین توان روزانه تولیدی WT برابر با حاصل ضرب ظرفیت WT (P_r) و منحنی روزانه نرخ توان WT است. این دو منحنی نیز در شکل (۲) رسم شده‌اند [۶]. نرخ بهره (r) برابر ۱۰ درصد است.

۴-۲- نتایج

طرح پیشنهادی به همراه حل‌کننده ترکیبی KHO+GWO در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی شده است. الف) تعیین بهترین راه‌حل مصالحه برای طرح پیشنهادی: جدول (۱) نتایج جبهه پارتو بین توابع هزینه (Cost) و سطح آلاینده‌گی زیست محیطی (EM) را به‌ازای سطح عدم قطعیت برابر با صفر یا مدل قطعی طرح پیشنهادی ارائه می‌دهد. براساس این جدول مشاهده می‌شود که کاهش سطح آلاینده‌گی (یعنی افزایش اهمیت آن در تابع هدف (۱) با افزایش ضریب (ω_{EM})) متناسب با افزایش مجموع هزینه احداث، تعمیر و بهره‌برداری است. زیرا که در طرح پیشنهادی براساس بخش دوم رابطه (۱)، تنها عامل تولید آلودگی DiG است. لذا به‌منظور کاهش آلودگی نیاز به افزایش تعداد RESها و باتری‌ها است، و از آنجا که هزینه تولید یک کیلووات توسط RESها براساس مرجع‌های [۶] و [۸] نسبت به DiG بیشتر است، این موضوع متناسب با افزایش تابع هزینه است.



شکل (۲): پروفیل روزانه ضریب بار، نرخ توان RES و ضریب نفوذ EVها
Figure (2): Daily profile of load coefficient, RES power rate and penetration coefficient of EVs

جدول (۱): جبهه پارتو طرح پیشنهادی در مدل‌سازی قطعی
Table (1): Parto front of the proposed design in definitive modeling

ω_{Cost}	ω_{EM}	Cost (\$)	EM (kg)
۱	۰	۲۶۹۰۵/۵	۵۶۲۱/۳
۰/۹	۰/۱	۲۷۰۱۰/۳	۴۸۵۴/۵
۰/۸	۰/۲	۲۷۱۳۵/۵	۴۰۸۸/۴
۰/۷	۰/۳	۲۷۲۵۹/۵	۳۳۲۱/۱
۰/۶	۰/۴	۲۷۳۴۰/۱	۲۵۵۵/۷
۰/۵	۰/۵	۲۷۴۲۳/۴	۲۰۴۴/۵
۰/۴	۰/۶	۲۷۵۱۱/۹	۱۵۳۳/۴
۰/۳	۰/۷	۲۷۷۷۸/۲	۱۰۲۲/۱
۰/۲	۰/۸	۲۸۴۴۱/۳	۵۱۱/۳
۰	۱	۳۰۱۴۹/۲	۰

در ادامه، بهترین راه‌حل مصالحه بین هزینه و EM براساس FDT در جدول (۲) به ازای مدل قطعی گزارش شده است. در جدول (۲)، نتایج چندین حل‌کننده مانند GWO, KHO, KHO+GWO، بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۲۵} (PSO) [۲۴] و GA [۱۶] مورد ارزیابی قرار گرفته است. اندازه جمعیت (N) و حداکثر تکرار همگرایی (I_{max}) برای این الگوریتم‌ها به ترتیب برابر ۵۰ و ۲۰۰۰ مفروض است، و اطلاعات دیگر پارامترهای تنظیم آن‌ها در مرجع [۱۶] و [۲۲] الی [۲۴] گزارش شده است. همچنین در این بخش به منظور بررسی شاخص‌های آماری مانند انحراف معیار پاسخ‌دهی نهایی، حل مسأله پیشنهادی توسط الگوریتم‌های مختلف یاد شده ۲۰ بار تکرار می‌شود. براساس جدول (۲) می‌توان بیان کرد که، الگوریتم ترکیبی KHO+GWO نسبت به NHEAهای مذکور توانسته است که در کمترین تکرار همگرایی، یعنی ۶۹۸، متناسب با زمان محاسباتی ۹۱/۳ ثانیه، کمینه‌ترین مقدار را برای توابع هزینه (۲۷۶۱۱/۳ دلار) و EM (۱۲۸۱/۶ kg) به دست آورد. در صورتی که NHEAها دارای تکرار همگرایی بیش از ۸۲۰ و زمان حل بیش از ۱۰۷ ثانیه هستند، و نقطه بهینه آن‌ها دارای مقدار هزینه و EM بالاتری نسبت به HEA مذکور است. علاوه بر این، الگوریتم KHO+GWO دارای انحراف معیار پایینی در پاسخ‌دهی نهایی نسبت به دیگر حل‌کننده‌های اشاره شده در جدول (۲) است، به طوری که آن دارای انحراف معیار پاسخ‌دهی نهایی ۰/۹۴ درصد است. این بدین معنی است که پراکندگی پاسخ‌دهی نهایی آن بسیار پایین است، و آن تقریباً دارای شرایط پاسخ‌دهی یکتا است. این موضوع تأیید کننده نوآوری آخر طرح مذکور گزارش شده در بخش ۱ است. در نهایت براساس جدول (۲) مشاهده می‌شود که در بهترین نقطه مصالحه، تابع هزینه و آلودگی برای مدل قطعی به ترتیب دارای مقادیر ۲۷۶۱۱/۳ دلار و ۱۲۸۱/۶ kg است. لذا با توجه به جدول‌های (۱) و (۲) می‌توان گفت که مقدار هر دو تابع در نقطه مصالحه به مقدار کمینه خود نزدیک است، به طوری که EM در نقطه مصالحه نسبت به مقدار کمینه خود (صفر کیلوگرم) در حدود ۲۲/۸ درصد $(\frac{0 - 1281/6}{0 - 5621/3})$ در مدل قطعی طرح پیشنهادی فاصله دارد. این عبارت برای تابع هزینه برابر ۲۱/۸ درصد است.

جدول (۲): بهترین راه حل مصالحه مسأله قطعی پیشنهادی

Table (2): The best way to resolve the proposed definitive issue

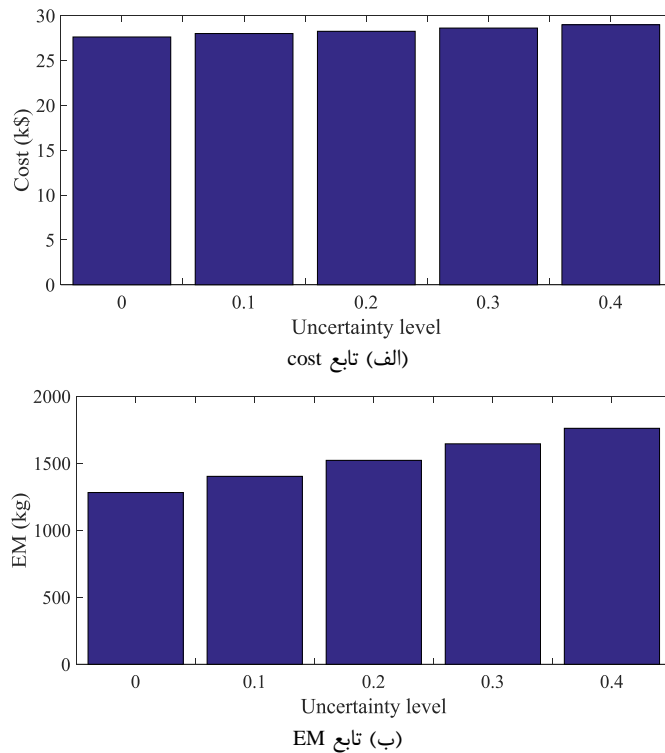
الگوریتم	Cost (\$)	EM (kg)	تکرار همگرایی	زمان حل (ثانیه)	انحراف معیار (%)
KHO+GWO	۲۷۶۱۱/۳	۱۲۸۱/۶	۶۹۸	۹۱/۳	۰/۹۴
KHO	۲۷۷۳۴/۶	۱۲۹۶/۲	۸۲۱	۱۰۷/۴	۱/۳۱
GWO	۲۷۷۵۱/۷	۱۳۰۱/۵	۸۸۲	۱۱۱/۳	۱/۶۳
PSO	۲۷۹۶۸/۴	۱۳۵۶/۱	۱۲۱۱	۱۷۲/۶	۲/۵۸
GA	۲۸۰۲۲/۱	۱۳۶۶/۸	۱۵۳۲	۲۰۹/۸	۳/۴۵

ب) ارزیابی وضعیت اقتصادی و زیست محیطی IHS پیشنهادی: شکل (۳) منحنی توابع هزینه و EM برحسب سطح عدم قطعیت (κ) ترسیم می‌کند. براساس این شکل، مقادیر هزینه و EM با افزایش κ افزایش می‌یابد، به طوری که شیب افزایش EM نسبت به شیب افزایش هزینه بیشتر است. این امر بدین دلیل است که براساس فرمول‌بندی (۳۱)-(۴۰)، افزایش κ در بدترین مورد سناریو موجب افزایش میزان بار AC و تقاضای انرژی مصرف EVها ($E_{Dep}-E_{Att}$) می‌شود. در صورتی که در این شرایط توان تولیدی سیستم بادی و خورشیدی کاهش می‌یابد. پس نسبت به مورد $\kappa=0$ DiG درصد بیشتری از بار AC را تغذیه می‌کند. در این شرایط هزینه بهره‌برداری آن براساس رابطه (۲۹) افزایش می‌یابد و موجب افزایش هزینه می‌شود. همچنین تنها DiG عامل تولیدکننده آلودگی در IHS است، لذا افزایش κ موجب افزایش EM می‌شود. توجه شود که به ازای افزایش سطح عدم قطعیت تا ۰/۴ براساس شکل (۳-الف) دیده می‌شود که هزینه برنامه‌ریزی افزایش ناچیزی دارد. این بدین معنی است که افزایش κ موجب تغییرات هزینه بهره‌برداری DiG می‌شود و تغییری در تعداد منابع و ذخیره‌سازی نصب شده ندارد. زیرا که انتظار می‌رود هزینه احداث یک عنصر بیش نرخ افزایش هزینه در شکل (۴-الف) باشد. این موضوع در بخش ۴-۲ ج مورد تأیید قرار می‌گیرد. بنابراین طرح پیشنهادی به ازای برنامه‌ریزی بهینه IHS همانند شکل (۱) متناسب با مدل (۳۳)-(۴۲) قادر است که به‌ازای خطای پیش‌بینی بالایی قابل اجرا باشد.

ج) بررسی نتایج برنامه‌ریزی و بهره‌برداری IHS: نتایج برنامه‌ریزی IHS پیشنهادی به ازای مدل قطعی ($\kappa=0$) و مدل استوار برای $\kappa>0$ در جدول (۳) ارائه شده است. در مدل استوار، نتایج برنامه‌ریزی به ازای سطح عدم قطعیت برابر ۰/۴ مورد بررسی قرار می‌گیرد. براساس جدول (۳) مشاهده می‌شود که تعداد RESها و باتری‌ها، اندازه DiG و اندازه مبدل AC/DC برای طرح پیشنهادی به ازای مدل قطعی و استوار دارای نتایج یکسانی است. بنابراین هزینه احداث و تعمیر عناصر مذکور در دو مدل استوار و قطعی یکسان خواهد بود. ولی براساس جدول (۳) مشاهده می‌شود که هزینه بهره‌برداری و میزان آلودگی در IHS برای مدل استوار نسبت به مدل قطعی افزایش می‌یابد. زیرا که در مدل استوار براساس مدل (۳۳)-(۴۲)، افزایش سطح عدم قطعیت موجب افزایش انرژی مصرفی IHS و کاهش تولید انرژی RESها می‌شود. از این رو میزان انرژی تولیدی DiG افزایش خواهد یافت که متناسب با افزایش هزینه بهره‌برداری و سطح آلودگی در IHS براساس رابطه‌های (۱) و (۳۱) است. همچنین مشاهده می‌شود که نتایج برنامه‌ریزی تا سطح عدم قطعیت ۰/۴ ثابت است، بنابراین می‌توان بیان کرد که طرح پیشنهادی ایمنی بالایی در ارتباط با خطای ناشی از عدم در نظر گرفتن خطای پیش‌بینی پارامترهای عدم قطعیت دارد. این موضوع تأیید کننده قابلیت نوآوری دوم در بخش ۱ است.

نتایج بهره‌برداری منابع و ESSها به ازای مدل قطعی و استوار (شامل سطح عدم قطعیت ۰/۲) در شکل (۴) نمایش داده شده است. براساس شکل (۴) مشاهده می‌شود که در ساعاتی که توان تولیدی RESها بیش از بار AC است، مازاد انرژی در باتری‌ها و EVها ذخیره می‌شود. همچنین ESSهای مذکور در ساعاتی که توان تولیدی RESها کمتر از بار AC است، در مد دشارژ فعالیت می‌کنند و توان اکتیو به IHS تزریق می‌کنند. DiGها نیز در ساعاتی که ESSها و RESها قادر به تأمین بار AC نیستند، توان تولید می‌کنند. در نهایت توجه شود که افزایش سطح عدم قطعیت نسبت به مدل قطعی باعث کاهش سطح توان تولیدی RESها شده است، زیرا که براساس مدل (۳۱)-(۴۰)، در این شرایط سرعت باد و میزان تابش بر روی آرایه‌های PV کاهش می‌یابد. همچنین افزایش κ موجب افزایش بار و تقاضای انرژی EVها براساس مدل (۳۳)-(۴۲) می‌شود. پیرو این

موضوع، سطح توان باتری‌ها براساس شکل (۴) در مدل استوار نسبت به مدل قطعی در افق بهره‌برداری کاهش می‌یابد، زیرا که در شرایط مذکور، توان RESها کاهش یافته و توان بار AC افزایش یافته است.



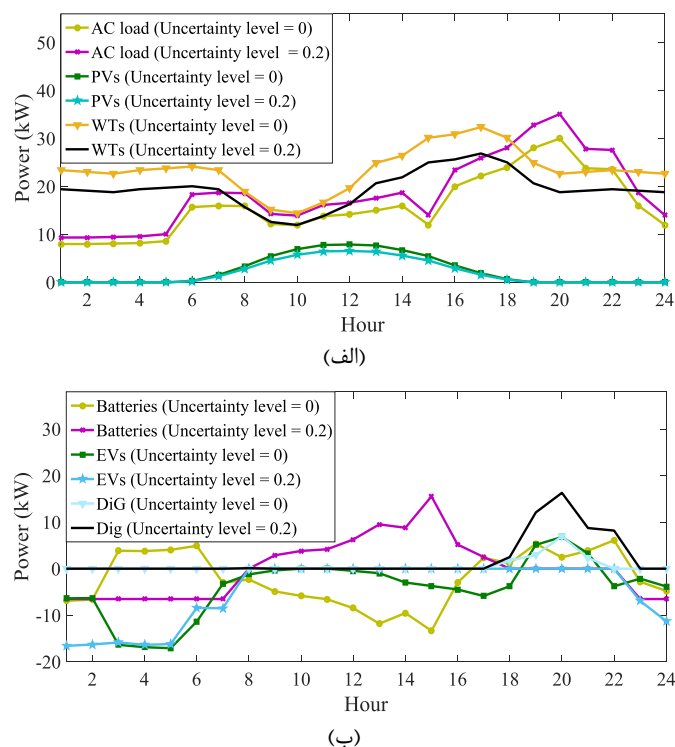
شکل (۳): میزان توابع در بهترین راه‌حل مصالحه به‌ازی مقادیر مختلف سطح عدم قطعیت (k)

Figure (3): The amount of functions, (a) Cost and (b) EM in the best compromise solution to optimize different values of the level of uncertainty (κ)

جدول (۳): نتایج برنامه‌ریزی IHS

Table (3): IHS programming results

$\kappa = 0.4$	$\kappa = 0$	پارامتر
۶۰	۶۰	تعداد فتوولتائیک‌های نصب شده
۳۰	۳۰	تعداد توربین‌های بادی نصب شده
۳۵	۳۵	تعداد باتری‌های نصب شده
۱۶/۳	۱۶/۳	ظرفیت نصب شده دیزل ژنراتور (kW)
۳۷	۳۷	ظرفیت نصب شده مبدل AC/DC (kW)
۵۷۰۵	۵۷۰۵	هزینه نصب سالیانه فتوولتائیک‌ها (\$)
۰	۰	هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه فتوولتائیک‌ها (\$)
۱۳۲۷۶/۱	۱۳۲۷۶/۱	هزینه نصب سالیانه سیستم‌های بادی (\$)
۱۵۰	۱۵۰	هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه سیستم‌های بادی (\$)
۱۸۶۳	۱۸۶۳	هزینه نصب سالیانه باتری‌ها (\$)
۰	۰	هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه باتری‌ها (\$)
۴۱۴۴/۹	۴۱۴۴/۹	هزینه نصب سالیانه مبدل AC/DC (\$)
۱۰/۵	۱۰/۵	هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه مبدل AC/DC (\$)
۱۱۳۴	۱۱۳۴	هزینه نصب سالیانه دیزل ژنراتور (\$)
۶۵/۲	۶۵/۲	هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه دیزل ژنراتور (\$)
۲۶۲۳/۴	۱۲۶۲/۶	هزینه بهره‌برداری سالیانه دیزل ژنراتور (\$)
۲۸۹۷۲/۱	۲۷۶۱۱/۳	هزینه کل سالیانه (\$)
۱۷۶۰/۸	۱۲۸۱/۶	سطح آلاینده‌گی زیست محیطی (kg)



شکل (۴): منحنی روزانه، (الف) بار AC و توان تولیدی RES، (ب) ذخیره‌سازهای سیار و ساکن برای مقادیر مختلف سطح عدم قطعیت
Figure (4): Daily curve, (a) AC load and RES output power, (b) Mobile and stationary storage for different values of uncertainty level

EVها به علت افزایش انرژی مصرفی مورد نیاز برای مسافرتشان در مدل استوار در بیشتر ساعات در مد شارژ عمل می‌کنند، و در ساعات کمی توان به IHS تزریق می‌کنند. در نهایت براساس شکل (۴)، DiG در مدل استوار نسبت به مدل قطعی ساعات بیشتری توان تولید می‌کند که توان تولیدی آن نیز در مدل استوار نسبت به مدل قطعی بیشتر است.

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله مسأله برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی جزیره‌ای شامل PV، WT، باتری، پارکینگ EVها و DiG را ارائه داده است. مسأله در قالب بهینه‌سازی دو هدفه دارای چارچوب تکنیک پارتو مبنی بر روش مجموع توابع وزن‌دار بیان شد. آنگاه کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های احداث، تعمیر و بهره‌برداری عناصر مذکور و کمینه‌سازی سطح آلاینده‌گی زیست محیطی سیستم مذکور در بخش‌های اول و دوم تابع هدف در نظر گرفته شد. طرح مذکور نیز مقید به مدل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری عناصر یاد شده و تعادل توان در IHS است.

در ادامه بهینه‌سازی استوار براساس روش BURO عدم قطعیت‌های RESها، EVها و بار AC را بر عهده گرفت. سپس HEA مبنی بر ترکیب الگوریتم‌های KHO و GWO جهت دستیابی به راه‌حل بهینه استفاده شد. در نهایت براساس نتایج عددی مشاهده شد که حل‌کننده KHO+GWO نسبت به NHEA قادر است که کمینه‌ترین هزینه و آلاینده‌گی زیست محیطی را در کمترین تکرار همگرایی و زمان محاسباتی به دست آورد. همچنین آن دارای انحراف معیاری در حدود ۰/۹۴ درصد است که به معنای توانایی الگوریتم مذکور در دستیابی به راه‌حل بهینه دارای شرایط تقریبی پاسخ‌دهی یکتا است. همچنین روش مجموع توابع وزن‌دار در بهینه‌سازی پارتو توانسته است که برای طرح پیشنهادی نقطه بهینه مصالح‌های بین توابع هزینه و آلودگی به-دست آورد به طوری که آنها از حداقل مقدار خود در حدود ۲۲ درصد فاصله دارند. علاوه بر این، افزایش سطح عدم قطعیت موجب افزایش انرژی مصرفی IHS ناشی از بار AC و EVها و کاهش تولید انرژی RESها در بدترین مورد سناریو نسبت به سناریو متناظر با مدل قطعی می‌شود. پیرو این موضوع هزینه و آلودگی در IHS در شرایط مذکور افزایش خواهد یافت. در نهایت استفاده از DiG در IHS در کنار معایب افزایش هزینه بهره‌برداری و آلودگی دارای مزیتی شامل افزایش ایمنی در

قبال در نظر گرفتن خطای پیش‌بینی است به‌طوری که برای IHS پیشنهادی، افزایش سطح عدم قطعیت تا ۴۰ درصد تغییری در برنامه‌ریزی منابع و ذخیره‌سازها در IHS ندارد.

ضمائم

پارامترها

نماد	پارامتر
P_{C-DC}^{out}	توان بخش dc مبدل
P_{CH}^B	توان شارژ باتری
P_{DIS}^B	توان دشارژ باتری
E_B^{max}	حداکثر ظرفیت یک باتری
\bar{N}_B	حداکثر تعداد باتری‌های قابل نصب در HIS
P_{EV-CH}^{max}	نرخ شارژ EV

اندیس

نماد	اندیس
t	ساعت بهره‌برداری

متغیرها

نماد	متغیر
Cost	مجموع هزینه سالیانه احداث، تعمیر و بهره‌برداری منابع و ذخیره‌سازها در IHS بر حسب دلار بر سال
E_B, E_{EV}	انرژی ذخیره شده در باتری و EVها بر حسب کیلووات ساعت
EM	آلاینده‌گی زیست محیطی بر حسب کیلوگرم
F	تابع هدف
N_{PV}, N_{WT}, N_B	تعداد PVها، WTها و باتری‌های نصب شده در IHS
OC_D	هزینه بهره‌برداری (سوخت) سالیانه DiG بر حسب دلار بر سال
P_{CH}^B, P_{DIS}^B	توان شارژ و دشارژ باتری بر حسب کیلووات ساعت
$P_{CH}^{EV}, P_{DIS}^{EV}$	توان شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی (EVها) بر حسب کیلووات
$P_{C-AC}^{in}, P_{C-AC}^{out}$	توان بخش AC مبدل AC/DC در مد ورودی و خروجی بر حسب کیلووات ساعت
$P_{C-AC}^{max}, P_{C-DC}^{max}$	ظرفیت بخش AC و DC مبدل AC/DC بر حسب کیلووات ساعت
$P_{C-DC}^{in}, P_{C-DC}^{out}$	توان بخش DC مبدل AC/DC در مد ورودی و خروجی بر حسب کیلووات ساعت
$P_{EV-CH}^{in}, P_{EV-DIS}^{in}$	متغیر عدم قطعیت مربوط به نرخ شارژ و دشارژ EVها بر حسب کیلووات ساعت
P_D^{max}	ظرفیت نصب شده DiG بر حسب کیلووات ساعت
P_{PV}, P_{WT}, P_D	توان تولیدی PV، WT و DiG بر حسب کیلووات ساعت
x, z	متغیر باینری وضعیت عملکرد بخش DC و AC مبدل AC/DC در مد ورودی یا خروجی
y_B, y_{EV}	متغیر باینری وضعیت عملکرد باتری و EVها در مد شارژ یا دشارژ

ثابت‌ها

نماد	ثابت
A_D, B_D	ضرایب تابع سوخت DiG
A_{PV}	سطح آرایه PV برحسب متر مربع
CC_C, CC_D	هزینه سالیانه احداث مبدل AC/DC و DiG برحسب دلار بر کیلووات بر ساعت
CP	ضریب همزمانی
CC_{PV}, CC_{WT}, CC_B	هزینه سالیانه احداث PV, WT و باتری برحسب دلار بر ساعت
E_{Afr}, E_{Dep}	انرژی اولیه و عزیمت EVها برحسب کیلووات ساعت
E_B^{max}	ظرفیت باتری برحسب کیلووات ساعت
I_{PV}	تابش نور خورشید بر روی PV برحسب کیلووات ساعت بر متر مربع
MC_C, MC_D	هزینه تعمیر سالیانه مبدل AC/DC و DiG برحسب دلار بر کیلووات بر ساعت
MC_{PV}, MC_{WT}, MC_B	هزینه تعمیر سالیانه PV, WT و باتری برحسب دلار بر سال
$\bar{N}_{PV}, \bar{N}_{WT}, \bar{N}_B$	حداکثر تعداد PV, WT و باتری قابل نصب در HIS
N_T	کلیه ساعات بهره‌برداری
$P_{EV-CH}^{max}, P_{EV-DIS}^{max}$	نرخ شارژ و دشارژ EVها برحسب کیلووات
\bar{P}_D, \bar{P}_{Con}	حداکثر ظرفیت قابل نصب DiG و مبدل AC/DC در IHS برحسب کیلووات
P_L	بار مصرفی برحسب کیلووات
P_f	ظرفیت یک WT برحسب کیلووات
$V, V_f, V_{c-in}, V_{c-out}$	سرعت باد، سرعت باد نامی، سرعت باد آستانه، و سرعت باد قطع برحسب کیلووات بر ثانیه
$\alpha_{CH}, \alpha_{DIS}$	ضریب نرخ شارژ و دشارژ باتری
η_{EV}	راندمان باتری EV
P_{EV-CH}^{max}	نرخ شارژ EVها مستقر در IHS
P_{EV-DIS}^{max}	نرخ دشارژ EVها مستقر در IHS
η_B	η_B و σ بیانگر راندمان باتری
σ	نرخ دشارژ ساعتی

References

مراجع

- [1] M. Setareh, H. Ghasemi, "Power management in balanced island microgrids considering small signal stability and dynamic response", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronic Engineering, vol. 12, no. 1, pp. 1-12, 2015 (in Persian).
- [2] S. Ghavidel, J. Aghaei, K.M. Muttaqi, A. Heidari, "Renewable energy management in a remote area using Modified Gravitational Search Algorithm", Energy, vol. 97, pp. 391-399, Feb. 2016 (doi: 10.1016/j.energy.2015.12.132).
- [3] S. Piroozi, J. Aghaei, "Active and reactive power management of intelligent distribution network using electric vehicles as a linear problem mixed with integers", Computational Intelligence in Electrical Engineering, vol. 8, no. 2, pp. 1-12, Summer 2017 (doi: 10.22108/isee.2017.21703) (in Persian).
- [4] S. Piroozi, "Active and reactive power management of intelligent distribution network with harmonic compensation of nonlinear loads using electric vehicles", Ph.D. Thesis, Shiraz University of Technology, 2017 (in Persian).
- [5] M. Das, M. Singh, A. Biswas, "Techno-economic optimization of an off-grid hybrid renewable energy system using meta-heuristic optimization approaches-case of a radio transmitter station in India", Energy Conversion and Management, vol. 185, pp. 339-352, April 2019 (doi: 10.1016/j.enconman.2019.01.107).
- [6] A. Maleki, A. Askarzadeh, "Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran", Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 7, pp. 147-153, Sept. 2014 (doi: 10.1016/j.seta.2014.04.005).

- [7] A. Askarzadeh, "Distribution generation by photovoltaic and diesel generator systems: Energy management and size optimization by a new approach for a stand-alone application", *Energy*, vol. 122, pp. 542-551, March 2017 (doi: 10.1016/j.energy.2017.01.105).
- [8] M.A. Ashraf, Z. Liu, A. Alizadeh, S. Nojavan, K. Jermsittiparsert, D. Zhang, "Designing an optimized configuration for a hybrid PV/diesel/battery energy system based on metaheuristics: A case study on gobi desert", *Journal of Cleaner Production*, vol. 270, Article Number: 122467, Oct. 2020 (doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122467).
- [9] T. Salameh, M. A. Abdelkareem, A.G. Olabi, E.T. Sayed, M. Al-Chaderchi, H. Rezk, "Integrated standalone hybrid solar PV, fuel cell and diesel generator power system for battery or supercapacitor storage systems in Khorfakkan, United Arab Emirates", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 8, pp. 6014-6027, Jan. 2021 (doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.153)
- [10] C. Li, D. Zhou, H. Wang, H. Cheng, D. Li, "Feasibility assessment of a hybrid PV/diesel/battery power system for a housing estate in the severe cold zone—A case study of Harbin, China", *Energy*, vol. 185, pp. 671-681, 2019 (doi: 10.1016/j.energy.2019.07.079).
- [11] B. Soudan, A. Darya, "Autonomous smart switching control for off-grid hybrid PV/battery/diesel power system", *Energy*, vol. 211, pp. 118567, 2020 (doi: 10.1016/j.energy.2020.118567).
- [12] Rodríguez-Gallegos, D. Carlos, et al., "A siting and sizing optimization approach for PV–battery–diesel hybrid systems", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 2637-2645, May-June 2018 (doi: 10.1109/TIA.2017.2787680)
- [13] S. Salisu, M.W. Mustafa, L. Olatomiwa, O.O. Mohammed, "Assessment of technical and economic feasibility for a hybrid PV-wind-diesel-battery energy system in a remote community of north central Nigeria", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 58, pp. 1103-1118, Dec. 2019 (doi: 10.1016/j.aej.2019.09.013).
- [14] R. Kaur, V. Krishnasamy, N.K. Kandasamy, S. Kumar, "Discrete multiobjective grey wolf algorithm based optimal sizing and sensitivity analysis of PV-wind-battery system for rural telecom towers", *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 729-737, March 2020 (doi: 10.1109/JSYST.2019.2912899).
- [15] M. Shahzad Javed, T. Ma, J. Jurasz, S. Ahmed, J. Mikulik, "Performance comparison of heuristic algorithms for optimization of hybrid off-grid renewable energy systems", *Energy*, vol. 210, Article Number: 118599, Aug. 2020 (doi: 10.1016/j.energy.2020.118599).
- [16] K.S. Tang, K.F. Man, S. Kwong, Q. He, "Genetic algorithms and their applications", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 13, pp. 22–37, Nov. 1996 (doi: 10.1109/79.543973).
- [17] M. Nazari-Heris, S. Abapour, B. Mohammadi-Ivatloo, "Optimal economic dispatch of FC-CHP based heat and power micro-grids", *Applied Thermal Engineering*, vol. 114, pp. 756-769, March 2017 (doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.016).
- [18] W. Jakob, C. Blume, "Pareto optimization or cascaded weighted sum: A comparison of concepts", *Algorithms*, vol. 7, no. 1, pp. 166-185, March 2014 (doi:10.3390/a7010166).
- [19] S.M. Mohseni-Bonab, A. Rabiee, B. Mohammadi-Ivatloo, "Voltage stability constrained multi-objective optimal reactive power dispatch under load and wind power uncertainties: A stochastic approach", *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 598-609, Jan. 2016 (doi: 10.1016/j.renene.2015.07.021).
- [20] S.A. Bozorgavari, J. Aghaei, S. Pirouzi, A. Nikoobakht, H. Farahmand, M. Korpås, "Robust planning of distributed battery energy storage systems in flexible smart distribution networks: A comprehensive study", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 123, Article Paper: 109739, May 2020 (doi: 10.1016/j.rser.2020.109739).
- [21] S. A. Bozorgavari, H. Farahmand, J. Aghaei, S. Pirouzi, S.A. Bozorgavari, V. Vahidinasab, "Two-stage hybrid stochastic/robust optimal coordination of distributed battery storage planning and flexible energy management in smart distribution network", *Journal of Energy Storage*, vol. 26, Article Number: 100970, April 2019 (doi:10.1016/j.est.2019.100970).
- [22] R.R. Rani, D. Ramyachitra, "Krill herd optimization algorithm for cancer feature selection and random forest technique for classification", *Proceeding of the IEEE/ICSESS*, pp. 109-113, Beijing, China, Nov. 2017 (doi: 10.1109/ICSESS.2017.8342875).
- [23] S.A. Mirjalili, S.M. Mirjalili, A. Lewis, "Grey wolf optimizer", *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, March 2014 (doi: 0.1016/j.advengsoft.2013.12.007).
- [24] W.K.A. Najy, H.H. Zeineldin, W.L. Woon, "Optimal protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capability", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1668-1677, April 2013 (doi: 10.1109/TIE.2012.2192893).

1. Diesel generators (DiG)
2. Renewable energy sources (RESs)
3. Energy storage systems (ESSs)
4. Electric vehicles (EVs)
5. Islanded hybrid system (IHS)
6. Wind turbine (WT)
7. Photovoltaic (PV)
8. Harmonic search algorithm (HSA)
9. Loss of power supply (LPS)
10. Elephant herd optimization (EHO)
11. Non-renewable distributed generations (NRDGs)
12. Nonlinear programming (NLP)
13. Mixed-integer nonlinear programming (MINLP)
14. Gray wolf optimization (GWO)
15. Firefly Algorithm (FFA)
16. Non-hybrid evolutionary algorithms (NHEAs)
17. Genetic algorithm
18. Fuzzy decision technique (FDT)
19. Bounded uncertainty-based robust optimization (BURO)
20. Hybrid evolutionary algorithm (HEA)
21. Krill herd optimization (KHO)
22. Total capacity cost (TCC)
23. Capacity Recovery Factor (CRF)
24. State of charge (SOC)
25. Particle swarm optimization (PSO)