

Economic Design of Renewable Hybrid System Based on Hydrogen and Thermal Storages Considering Electrical and Thermal Energy Management**Reza Sepahvand¹, Assistant Professor, Akbar Asgharzadeh-Bonab², Assistant Professor**¹Faculty of Aviation and Engineering- Imam Ali University, Tehran, Iran²Department of science and technology studies- AJA Command and Staff University, Tehran, Iran
sepahvand@iamu.ac.ir, akbar.asgharzadeh@casu.ac.ir**Abstract**

This paper presents the optimal planning of renewable hybrid systems including wind turbines and bio-waste energy units according to hydrogen and thermal storages considering feeding of electrical and thermal energies. Bio-waste unit is based on the operation of the combined power and heat system, which produces electrical and thermal energy at the same time. Hydrogen storage is hybrid of an electrolyze, hydrogen tank, and fuel cell. The proposed scheme minimizes the total annual investment and maintenance costs. It is subject to the operation model of the mentioned elements. In the operation model of sources and storage, renewable sources supply loads of energy, then storage uses to cover the gap between the load and renewable power profiles. This paper uses the hybrid solver of the Gray wolf optimizer and the sine-cosine algorithm to obtain a reliable optimal solution with a low standard deviation in the final response. Finally, based on numerical results according to Espoo in Finland data, the proposed scheme's capability is confirmed in the Economic extraction of a 100% renewable island hybrid system suitable for simultaneous supply of electrical and thermal energy.

Keywords: bio-waste energy unit, energy management, hydrogen storage, renewable hybrid system, thermal storage, wind turbine**Received:** 30 October 2022**Revised:** 21 December 2022**Accepted:** 11 February 2023**Corresponding Author:** Dr. Reza Sepahvand

<https://dorl.net/dor/20.1001.....>

مقاله پژوهشی

برنامه‌ریزی بهینه سیستم ترکیبی تجدیدپذیر مبنی بر ذخیره‌سازهای هیدروژنی و حرارتی با در نظر گرفتن مدیریت انرژی الکتریکی و حرارتی

رضا سپهوند^۱، استادیار، اکبر اصغرزاده بناب^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی و پرواز- دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران
۲- گروه مطالعات علم و فناوری- دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران
sepahvand@iamu.ac.ir, akbar.asgharzadeh@casu.ac.ir

چکیده: در این مقاله برنامه‌ریزی بهینه سیستم ترکیبی تجدیدپذیر دارای توربین بادی و واحد انرژی بیوماس مبنی بر ذخیره‌ساز هیدروژنی با در نظر گرفتن تغذیه هم‌زمان انرژی‌های الکتریکی و حرارتی ارائه می‌شود. واحد بیوماس مبنی بر عملکرد سیستم ترکیبی برق و حرارت است که هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی تولید می‌کند. ذخیره‌ساز هیدروژنی ترکیبی از الکترولیزر، هیدروژن تانک و پیل سوختی است. طرح پیشنهادی مجموع هزینه‌های سالانه احداث، تعمیر و نگهداری منابع و ذخیره‌سازها را کمینه‌سازی می‌کند که مقید به مدل بهره‌برداری عناصر یاد شده است. در مدل بهره‌برداری منابع و ذخیره‌سازها، ابتدا تأمین انرژی بر عهده منابع تجدیدپذیر است، سپس ذخیره‌سازها جهت پوشش فاصله بین پروفیل بار و توان تجدیدپذیر استفاده می‌شوند. در این مقاله، حل‌کننده ترکیبی شامل بهینه‌ساز گرگ خاکستری و الگوریتم سینوس-کسینوس برای استخراج راه‌حل بهینه مطمئن دارای انحراف معیار پایین در پاسخ‌دهی نهایی استفاده می‌شود. در نهایت با استخراج نتایج عددی متناسب با داده‌های شهر اسپو در فنلاند، قابلیت طرح پیشنهادی در استخراج اقتصادی سیستم ترکیبی جزیره‌ای ۱۰۰ درصد تجدیدپذیر متناسب با تأمین هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی تأیید می‌شود.

کلمات کلیدی: توربین بادی، ذخیره‌ساز هیدروژنی، ذخیره‌سازی حرارتی، سیستم ترکیبی تجدیدپذیر، مدیریت انرژی، واحد انرژی بیوماس

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۸/۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر رضا سپهوند

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران- خیابان امام خمینی (ره)- دانشگاه امام علی (ع)- دانشکده مهندسی و پرواز

۱- مقدمه

برخی از مصرف‌کننده‌ها به علت عدم دسترسی به شبکه توزیع انرژی در قالب سیستم جزیره‌ای توسط منابع و ذخیره‌سازها مختلف تغذیه می‌شوند [۱]. این سیستم به‌منظور دسترسی به شرایط تغذیه انرژی پاک از منابع انرژی تجدیدپذیر^۱ (RESها) استفاده می‌کنند [۲]. واحدهای بیوماس^۲ از تبدیل زباله‌های زیست‌محیطی به گاز متان و سپس تبدیل آن به انرژی، انرژی مصرفی مصرف‌کننده‌ها را تأمین می‌کنند [۳]. RESها به علت عدم وابستگی به سوخت فسیلی، دارای آلاینده‌گی پایینی هستند. واحدهای بیوماس به علت حذف یا مصرف زباله‌های زیست‌محیطی در کاهش آلودگی زیست‌محیطی نقش مؤثری دارند. پس استفاده از منابع مذکور در سیستم جزیره‌ای قابل توجه است. در ادامه، پروفیل توان مصرفی مصرف‌کننده با پروفیل توان تولیدی RESها متفاوت است؛ لذا جهت پرشدگی فاصله بین پروفیل بار و تولید نیاز به استفاده از ذخیره‌ساز انرژی در کنار RESها است [۱]. پروفیل بار (تولید) اشاره به منحنی توان بار (تولیدکننده) برحسب زمان دارد. ذخیره‌ساز در ساعاتی که انرژی تولیدی بیش از انرژی مصرفی است، در مد شارژ کار می‌کند و مازاد انرژی تولیدی را در خود ذخیره می‌کند. آن سپس در ساعاتی که انرژی مصرفی بیش از انرژی تولیدی است، در مد دشارژ فعالیت می‌کند و کمبود انرژی مصرفی را تأمین می‌کند [۱]. به‌عنوان موضوع دیگر، در مناطق مصرف عموماً احتمال استفاده از انرژی‌های الکتریکی و حرارتی بالا است، لذا سیستم مذکور باید قادر به تأمین هم‌زمان این انرژی‌های باشد. در این شرایط و جهت بهبود راندمان انرژی، واحدهای ترکیب برق و حرارت^۳ (CHP) نقش مؤثری را قادر هستند که ایفا کنند [۴]. البته استخراج این واحد توسط RESها امکان‌پذیر است. به‌عنوان مثال، واحد بیوماس زباله زیست‌محیطی را به گاز متان تبدیل می‌کند. سپس یک CHP می‌تواند این گاز را به انرژی الکتریکی و حرارتی تبدیل کند؛ بنابراین می‌توان با استفاده از منابع ۱۰۰ درصد تجدیدپذیر هم‌زمان انرژی‌های الکتریکی و حرارتی را در سیستم جزیره‌ای تأمین کرد. همچنین برای این که بتوان یک ساختار بهینه برای سیستم جزیره‌ای استخراج کرد، نیاز به یک مسئله برنامه‌ریزی بهینه است. در این مسئله تعداد و اندازه بهینه منابع و ذخیره‌سازها مشخص می‌شود [۵]. در زمینه برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی جزیره‌ای^۴ مطالعه‌ها و تحقیق‌های مختلفی انجام شده است. در مرجع [۶] برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی خورشیدی/دیزل ژنراتور-باتری باهدف کمینه‌سازی هزینه برنامه‌ریزی، کمینه‌سازی سطح آلاینده‌گی و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است. در مرجع [۷] مشابه مرجع [۶]، اهداف اقتصادی، قابلیت اطمینان و زیست‌محیطی لحاظ شده است. ولی برنامه‌ریزی را بر روی سیستم ترکیبی خورشیدی/بیوماس/ذخیره‌ساز هیدروژنی جهت تأمین انرژی الکتریکی ارائه می‌دهد. ذخیره‌سازی هیدروژنی دارای الکترولیز، تانک هیدروژنی و پیل سوختی است. در مرجع [۸] برنامه‌ریزی بهینه سیستم دارای فتوولتائیک، توربین بادی و باتری با در نظر گرفتن کمینه‌سازی هزینه‌های احداث، تعمیر و نگهداری و قابلیت اطمینان به‌عنوان تابع هدف فرمول‌بندی شده است. برای قابلیت اطمینان، از شاخص احتمال انرژی از دست‌رفته^۵ (LOEP) استفاده کرده است. در مرجع [۹] اندازه بهینه‌های برای سیستم ترکیبی شامل توربین بادی^۶ (WT)، فتوولتائیک^۷ (PV)، دیزل ژنراتور و باتری با توجه به کمینه‌سازی هزینه‌های نصب، تعمیر و بهره‌برداری آن‌ها به‌دست آمده است. مدل ارائه شده به‌صورت برنامه‌ریزی قطعی غیرخطی است که برای حل آن از الگوریتم جستجوی هارمونی^۸ (HSA) استفاده شده است. طرحی مشابه مرجع [۹] نیز در مرجع [۱۰] در نظر گرفته شده است، با این تفاوت که آن دارای WT نیست و همچنین شاخص از دست‌رفتن تغذیه توان^۹ (LPS) به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم ترکیبی را هم در نظر گرفته است. در مرجع [۱۱] جهت تأمین بار AC یک منطقه مشخص از سیستم ترکیبی PV، دیزل ژنراتور، پیل سوختی، باتری و ذخیره‌ساز ابرخازنی با توجه به کمینه‌سازی هزینه برنامه‌ریزی و آلودگی استفاده شده است. همچنین امکان‌سنجی احداث سیستم ترکیبی PV/دیزل ژنراتور/باتری در مناطق مسکونی مستقر در نواحی بسیار سرد در مرجع [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع‌های [۱۱] و [۱۲] به‌منظور کمینه‌سازی آلودگی زیست‌محیطی اولویت تأمین انرژی با منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها است و منبع تجدیدناپذیر مانند دیزل ژنراتور به‌عنوان منبع پشتیبان در نظر گرفته شده‌اند. به‌طوری که اگر منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها در تغذیه انرژی مصرفی موفق نباشند، منبع تجدیدناپذیر کمبود انرژی مصرفی را تأمین می‌کند. در مرجع [۱۳] برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی دارای باتری لحاظ شده است به‌طوری که کاهش عمر مفید باتری در اثر سیکل کاری شارژ/دشارژ آن‌ها در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۴] نیز برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی جزیره‌ای با در نظر گرفتن کمینه‌سازی هزینه و سطح آلاینده‌گی فرمول‌بندی شده و در نهایت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۱۰} (PSO) برای

حل مسئله استفاده شده است. در مرجع [۱۵]، برنامه‌ریزی بهینه سیستم ۱۰۰ درصد تجدیدپذیر دارای WT و PV و ذخیره‌سازی هیدروژنی ارائه شده که جهت تأمین انرژی الکتریکی است و هدف آن دستیابی به کمینه هزینه برنامه‌ریزی است. در مرجع [۱۶] از سیستم ترکیبی برق و حرارت (CHP) برای کنترل و بهبود پروفیل ولتاژ یک ریز شبکه استفاده شده که در آن CHP با کنترل توان مانند توان اکتیو قادر به ارتقای ولتاژ باس‌های ریز شبکه بوده است. در نهایت خلاصه تعدادی از مطالعه‌های انجام شده در پیشینه تحقیق در جدول (۱) آمده است. توجه شود که در مناطق مصرف عموماً انرژی الکتریکی و حرارتی به صورت هم‌زمان مصرف می‌شوند. ولی بر اساس جدول (۱) در اکثر تحقیق‌ها مانند مرجع‌های [۶] الی [۱۵]، طراحی ساختار سیستم جزیره‌ای مبنی بر تأمین انرژی الکتریکی بوده و تأمین هم‌زمان انرژی‌های مختلف در سیستم مذکور کمتر مورد توجه بوده است. واحد تولید توان بیوماس^{۱۱} (BPG) قادر به تولید هم‌زمان انرژی‌های الکتریکی و حرارتی توسط زباله‌های زیست‌محیطی است [۳]. از این‌رو حضور آن در سیستم جزیره‌ای می‌تواند در تأمین هم‌زمان انرژی‌های مذکور باهدف راندمان بالای انرژی مؤثر باشد. ولی حضور این نوع منبع تجدیدپذیر در سیستم مذکور در کمتر تحقیق‌هایی مانند مرجع [۷] لحاظ شده که آن هم تنها مدل تولید انرژی الکتریکی را برای BPG در نظر گرفته است. از آنجاکه مدل انرژی حرارتی در کمتر تحقیقاتی برای سیستم جزیره‌ای مورد بحث بوده است، لذا مدل عملکرد ذخیره‌ساز حرارتی نیز در این مسئله کمتر لحاظ شده است. اما پروفیل توان تولیدی BPG متفاوت از پروفیل بار حرارتی است، لذا حضور ذخیره‌ساز حرارتی در چنین شرایطی حتمی است. در این مقاله جهت جبران شکاف‌های تحقیقاتی مطرح شده، برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی جزیره‌ای دارای WT، BPG، ذخیره‌ساز هیدروژنی^{۱۲} (HS) و ذخیره‌ساز انرژی حرارتی^{۱۳} (TES) مانند شکل (۱) بیان می‌شود. سیستم HS ترکیبی از الکترولیزر^{۱۴} (EL)، تانک هیدروژنی^{۱۵} (HT) و پیل سوختی^{۱۶} (FC) است. در مد شارژ این ذخیره‌ساز، EL انرژی الکتریکی را با تبدیل به هیدروژن در HT ذخیره می‌کند. در مد دشارژ نیز FC هیدروژن ذخیره شده در HT را با تبدیل به انرژی الکتریکی به سیستم جزیره‌ای تحویل می‌دهد. طرح پیشنهادی کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های سالانه احداث، تعمیر و نگهداری منابع، ذخیره‌سازها و مبدل‌های الکترونیک قدرت را بر عهده دارد. مسئله مقید به مدل بهره‌برداری منابع، ذخیره‌سازها، و مبدل‌ها است. در مدل بهره‌برداری عناصر یاد شده، ابتدا اولویت تأمین انرژی حرارتی (الکتریکی) با BPG (WT و BPG) است. سپس در صورتی که انرژی تولیدی این منابع بیشتر (کمتر) از انرژی مصرفی باشد، ذخیره‌سازها هیدروژنی و حرارتی در مد شارژ (دشارژ) فعالیت می‌کنند. در ادامه از حل‌کننده ترکیبی مبنی بر ترکیب بهینه‌سازی گرگ خاکستری^{۱۷} (GWO) و الگوریتم سینوس-کسینوس^{۱۸} (SCA) برای استخراج راه‌حل بهینه مطمئن استفاده می‌شود. در نهایت با مقایسه طرح پیشنهادی و پیشینه تحقیق، نوآوری‌های زیر برای این طرح قابل بیان است:

- برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی جزیره‌ای ۱۰۰ درصد تجدیدپذیر به منظور تعیین اندازه و تعداد بهینه منابع و ذخیره‌سازها باهدف تأمین هم‌زمان انرژی‌های الکتریکی و حرارتی
- فرمول‌بندی عملکرد واحد تولید توان بیوماس با لحاظ کردن قابلیت آن در تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی
- مدل‌سازی عملکرد ذخیره‌ساز حرارتی در پوشش فاصله بین پروفیل بار حرارتی و توان تولیدی BPG
- در ادامه مقاله به این شرح سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم فرمول‌بندی برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی پیشنهادی بیان می‌شود. سپس در بخش سوم روند حل مسئله مبنی بر ترکیب GWO و SCA ارائه می‌شود. در بخش چهارم نتایج عددی حاصل از موارد مطالعاتی مختلف تحلیل می‌گردد. در نهایت نتیجه‌گیری در بخش پنجم ذکر شده است.

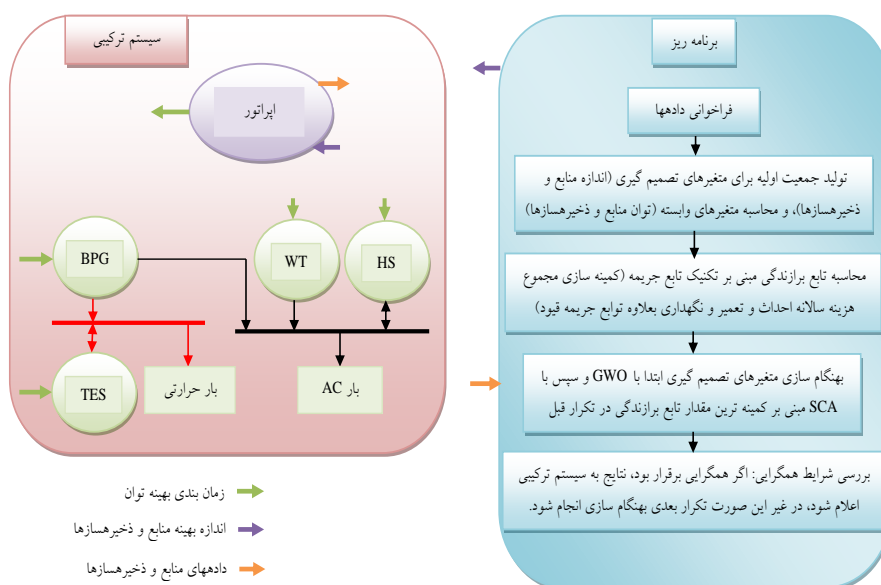
۲- برنامه‌ریزی سیستم جزیره‌ای

۲-۱- ساختار سیستم

در مناطق مصرف عموماً مصرف‌کننده‌ها دارای دو انرژی مصرفی الکتریکی و حرارتی هستند. همچنین با پیشرفت فناوری‌ها امکان تولید یک انرژی از مصرف انرژی دیگر قابل‌دسترس است. مانند CHP که انرژی گازی را به انرژی‌های الکتریکی و حرارتی تبدیل می‌کند؛ لذا برای این که بتوان در این شرایط از راندمان انرژی بالایی برخوردار بود، نیاز به بهینه‌سازی عملکرد منابع و ذخیره‌سازها در سیستم جزیره‌ای است.

Table (1): Summary of the works done in the background of the research
جدول (۱): خلاصه تعدادی از مطالعه‌های انجام شده در پیشینه تحقیق

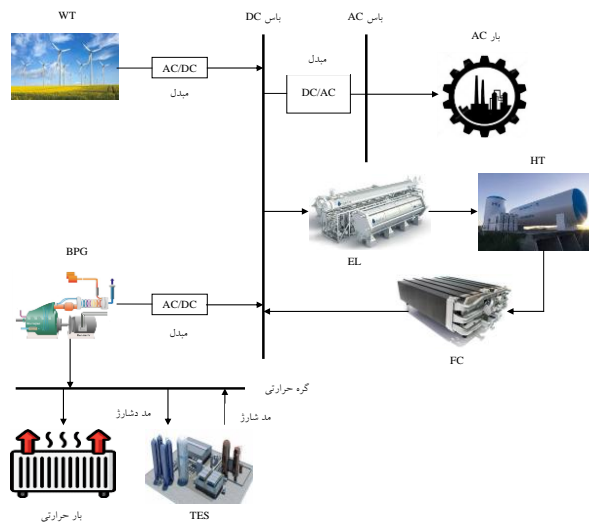
مرجع	مدیریت انرژی	بهره‌برداری واحد بیوماس	بهره‌برداری ذخیره‌ساز انرژی حرارتی
[۶]	الکتریکی	خیر	خیر
[۷]	الکتریکی	بله- تنها در نظر گرفتن مدل تولید انرژی الکتریکی	خیر
[۸]	الکتریکی	خیر	خیر
[۹]	الکتریکی	خیر	خیر
[۱۰]	الکتریکی	خیر	خیر
[۱۱]	الکتریکی	خیر	خیر
[۱۲]	الکتریکی	خیر	خیر
[۱۳]	الکتریکی	خیر	خیر
[۱۴]	الکتریکی	خیر	خیر
[۱۵]	الکتریکی	خیر	خیر
[۱۶]	الکتریکی و حرارتی	خیر	خیر
طرح پیشنهادی	الکتریکی و حرارتی	بله- مبنی بر مدل CHP	بله



شکل (۱): چارچوب برنامه‌ریزی سیستم جزیره‌ای تجدیدپذیر مبنی بر تغذیه انرژی الکتریکی و حرارتی

Figure (1): Renewable island system planning framework based on electric and thermal energy supply

این بهینه‌سازی علاوه بر ارتقای راندمان انرژی قادر است که اهداف اقتصادی، بهره‌برداری، زیست‌محیطی و قابلیت اطمینان مطلوبی را برای سیستم جزیره‌ای در برداشته باشد؛ لذا در ادامه روند بهینه‌سازی عملکرد منابع و ذخیره‌سازها در سیستم جزیره‌ای ارائه می‌شود. در شکل (۲) ساختار پیشنهادی برای سیستم ترکیبی جزیره‌ای نمایش داده شده است. در بخش الکتریکی، آن دارای دو باس AC و DC است. از آنجاکه ولتاژ خروجی WT و BPG به‌صورت موج AC فرکانس متغیر است [۷، ۸]، لذا برای ایجاد فرکانس ثابت متناسب با فرکانس کاری بار AC، ابتدا این منابع از طریق مبدل AC/DC به باس DC متصل می‌شوند. سپس این باس توسط مبدل DC/AC به باس AC متصل می‌گردد. این مبدل یک فرکانس ثابت در باس AC ایجاد می‌کند. در ذخیره‌ساز هیدروژنی، الکترولیزر برای تولید هیدروژن نیاز به برق DC دارد [۷]، لذا این ذخیره‌ساز از باس DC تغذیه می‌شود. البته توجه شود که در مد شارژ HS، تنها الکترولیزر فعال است و سپس هیدروژن تولیدی آن در تانک هیدروژنی ذخیره می‌شود. در مد دشارژ HS، پیل سوختی فعال می‌شود که آن هیدروژن در HT را به برق DC تبدیل می‌کند.



شکل (۲): ساختار پیشنهادی برای سیستم جزیره‌ای

Figure (2): Proposed structure for the island system

در بخش الکتریکی اولویت تأمین بار AC توسط منابع تجدیدپذیر WT و BPG است. سپس HS فاصله بین پروفیل‌های توان بار و منابع را پر می‌کنند. به عبارتی در ساعاتی که انرژی تولیدی WT و BPG بیش از انرژی مصرفی بار AC باشد، مازاد انرژی تولیدی در HS ذخیره می‌گردد. در ساعاتی که انرژی مصرفی بیش از انرژی تولید است، کمبود مصرف توسط ذخیره‌ساز مذکور تأمین می‌شود. در بخش حرارتی تنها یک گره حرارتی وجود دارد. در این گره BPG توان حرارتی تولید خود را برای تغذیه بار حرارتی می‌فرستد. سپس TES فاصله بین پروفیل‌های توان حرارتی تولیدی و مصرفی را پر می‌کند که عملکرد آن همانند HS است. در ادامه جهت دسترسی به عملکرد بهینه در سیستم ترکیبی جزیره‌ای پیشنهادی متناسب با کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، شرایط عملکرد منابع و ذخیره‌سازها به شرح زیر است:

- ۱- در بخش الکتریکی، اولویت تغذیه انرژی مصرفی بر عهده WT و BPG است.
- ۲- در بخش الکتریکی، چنانچه مجموع انرژی تولیدی WT و BPG بیش از انرژی مصرفی باشد، HS در مد شارژ کار می‌کنند، در غیر این صورت آن در مد دشارژ فعال هستند.
- ۳- در بخش حرارتی، اولویت تغذیه انرژی مصرفی بر عهده BPG است.
- ۴- در بخش حرارتی، اگر انرژی تولیدی BPG بیشتر از انرژی مصرفی باشد، TES در مد شارژ کار می‌کنند، در غیر این صورت آن در مد دشارژ فعال است.

۲-۲- فرمول‌بندی طرح پیشنهادی

در این بخش فرمول‌بندی برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی پیشنهادی متناسب با شکل (۲) بیان می‌شود. تابع هدف برابر با کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های سالانه احداث، و تعمیر و نگهداری است. قیود آن شامل مدل بهره‌برداری منابع، ذخیره‌سازها، و مبدل الکترونیک قدرت است. این طرح برای یک سیستم دور از دسترس سیستم قدرت الکتریکی و حرارتی در نظر گرفته شده است، به طوری برق‌رسانی برای این سیستم توسط شبکه قدرت مقدور نباشد و صرفه اقتصادی نداشته باشد. در ادامه جزئیات مسئله بیان می‌شود. الف- تابع هدف: در این طرح پیشنهادی هدف کمینه‌سازی هزینه سالانه برنامه‌ریزی (APC بر حسب دلار بر سال) منابع، مبدل‌های الکترونیک قدرت و ذخیره‌سازها در قالب سیستم ترکیبی مانند رابطه (۱) است. این هزینه نیز برابر مجموع هزینه‌های احداث، تعمیر و نگهداری برای عناصر مذکور است. فرمول‌بندی این دو هزینه به ترتیب در سطرهای ۱ و ۲ رابطه (۱) ارائه شده است [۸]. هزینه‌های مذکور بر حسب دلار هستند. در این رابطه، متغیرهای N^{WT} ، N^{BPG} ، N^{EL} ، N^{HT} ، N^{FC} ، N^T و N^I به ترتیب معرف تعداد WT، BPG، EL، HT، FC، TES و مبدل الکترونیک قدرت قابل نصب در سیستم ترکیبی است. پارامترهای C و M با اندیس‌های WT، BPG، EL، HT، FC، T و I معرف هزینه سالانه احداث، هزینه تعمیر و نگهداری برای HT، EL، BPG، WT،

TES، FC و مبدل الکترونیک قدرت هستند. این پارامترها برحسب دلار بیان می‌شوند. ضریب λ نیز برای تبدیل هزینه احداث به هزینه فعلی خالص^{۱۹} استفاده می‌شوند که فرمول‌بندی آن در رابطه (۲) بیان شده است [۹]. در این رابطه‌ها r معرف نرخ بهره برحسب درصد بیان می‌شود و n معرف تعداد سال برنامه‌ریزی در سیستم ترکیبی است.

$$\min_{\text{CNPC}} \text{APC} = \lambda \sqrt{\left(N^{\text{WT}} C^{\text{WT}} + N^{\text{BPG}} C^{\text{BPG}} + N^{\text{HT}} C^{\text{HT}} + N^{\text{EL}} C^{\text{EL}} + N^{\text{FC}} C^{\text{FC}} + N^{\text{T}} C^{\text{T}} + N^{\text{I}} C^{\text{I}} \right)} \quad (1)$$

$$+ \sqrt{\left(N^{\text{WT}} M^{\text{WT}} + N^{\text{BPG}} M^{\text{BPG}} + N^{\text{HT}} M^{\text{HT}} + N^{\text{EL}} M^{\text{EL}} + N^{\text{FC}} M^{\text{FC}} + N^{\text{T}} M^{\text{T}} + N^{\text{I}} M^{\text{I}} \right)}$$

به‌طوری که:

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

ب- قیود توربین‌های بادی [۱]: مجموع توان اکتیو تولیدی WTها در ساعت t (P_t^{WT}) برحسب کیلووات در سیستم ترکیبی پیشنهادی بر اساس رابطه (۳) قابل استخراج است. در این رابطه، چهار ناحیه کاری برای WT وجود دارد. چنانچه پارامتر سرعت باد (v برحسب متر بر ثانیه) کمتر از سرعت آستانه^{۲۰} (v^{ci} برحسب متر بر ثانیه) باشد، WT خاموش است. ولی چنانچه آن در بین v^{ci} و سرعت نامی^{۲۱} (v^{r} برحسب متر بر ثانیه) باشد، متغیر P^{WT} به‌صورت خطی با ضریب $N^{\text{WT}} p^{\text{r}}$ افزایش می‌یابد. پارامتر p^{r} معرف توان نامی^{۲۲} توربین بادی برحسب کیلووات است. در ناحیه سوم، چنانچه سرعت باد بین v^{r} و سرعت قطع^{۲۳} (v^{co}) برحسب متر بر ثانیه باشد، WT توان ثابتی برابر با $N^{\text{WT}} p^{\text{r}}$ را تولید می‌کند. در نهایت، چنانچه سرعت باد بیش از v^{co} باشد، WT خاموش است. تعداد قابل نصب WT در سیستم ترکیبی نیز مانند رابطه (۴) به‌صورت یک متغیر عدد صحیح است، که دارای حداکثر مقدار N^{WT} است.

$$P_t^{\text{WT}} = \begin{cases} 0 & v_t \leq v^{\text{ci}} \text{ and } v_t \geq v^{\text{co}} \\ N^{\text{WT}} p^{\text{r}} \frac{v_t - v^{\text{ci}}}{v^{\text{r}} - v^{\text{ci}}} & v^{\text{ci}} \leq v_t \leq v^{\text{r}} \\ N^{\text{WT}} p^{\text{r}} & v^{\text{r}} \leq v_t \leq v^{\text{co}} \end{cases} \quad \forall t \quad (3)$$

$$N^{\text{WT}} \in \{1, 2, \dots, \bar{N}^{\text{WT}}\} \quad (4)$$

ج- قیود بیوماس‌ها: مجموع توان اکتیو تولیدی BPGها در ساعت t (P_t^{BPG}) برحسب کیلووات بر اساس رابطه (۵) برابر حاصل ضرب تعداد BPGها، راندمان تبدیل الکتریکی (η^{BPG} برحسب درصد)، گاز عبوری در ساعت t (G_t^{BPG}) برحسب مترمکعب بر ساعت و میزان حد پایین حرارتی^{۲۴} (LHV^{BPG}) برحسب کیلووات-ساعت بر مترمکعب است [۷]. LHV^{BPG} بر اساس رابطه (۶) متناسب با درصد متان موجود در گاز (P^{CH_4}) و میزان حد پایین حرارتی متان (LHV^{CH_4}) برحسب کیلووات-ساعت بر متر مکعب است. مجموع توان حرارتی تولیدی BPGها در ساعت t (H_t^{BPG}) برحسب کیلووات ضریبی از توان اکتیو آن است، که این موضوع در رابطه (۷) بیان شده است [۴]. در این رابطه پارامترهای η^{BPG} و η^{hBPG} به ترتیب معرف راندمان تبدیل حرارتی و راندمان تلفاتی هستند که برحسب درصد بیان می‌شوند. در نهایت تعداد قابل نصب BPGها در سیستم ترکیبی دارای محدودیتی مانند رابطه (۸) دارد، که در این رابطه، پارامتر N^{BPG} نمایانگر حداکثر تعداد BPGها است.

$$P_t^{\text{BPG}} = N^{\text{BPG}} \eta^{\text{BPG}} G_t^{\text{BPG}} LHV^{\text{BPG}} \quad \forall t \quad (5)$$

$$LHV^{\text{BPG}} = \frac{\rho^{\text{CH}_4}}{100} LHV^{\text{CH}_4} \quad (6)$$

$$H_t^{\text{BPG}} = \frac{(1 - \eta^{\text{BPG}} - \eta^{\text{hBPG}}) \eta^{\text{hBPG}}}{\eta^{\text{BPG}}} P_t^{\text{BPG}} \quad \forall t \quad (7)$$

$$N^{\text{BPG}} \in \{1, 2, \dots, \bar{N}^{\text{BPG}}\} \quad (8)$$

د) قیدهای ذخیره‌ساز هیدروژنی: بر اساس شرط دوم در بخش دوم، چنانچه در بخش الکتریکی مجموع توان اکتیو تولیدی WTها و BPGها از دید باس DC در ساعت t ، یعنی (A) در رابطه شماره (۹)، بیش از میزان توان اکتیو بار AC (P^{L} برحسب kW) از

دید باس DC (B) باشد، EL توان اکتیو از باس DC دریافت می‌کند [۷]. در این صورت بر اساس رابطه (۹)، متغیر توان اکتیو EL (P_t^E) برحسب kW برابر ماتفاوت (A) و (B) خواهد بود. در این رابطه، η^I بیانگر راندمان مبدل الکترونیک قدرت برحسب درصد است. در این شرایط، متغیر توان اکتیو FC (P_t^F) برحسب kW برابر صفر است. اما در صورتی که مجموع توان اکتیو تولیدی منابع تجدید پذیر (A) کمتر از (B) باشد، بر اساس رابطه (۱۰)، P_t^F برابر ماتفاوت (B) و (A) خواهد بود. در این وضعیت، P_t^E برابر صفر است. در رابطه (۱۱)، انرژی ذخیره شده در تانک‌های هیدروژن برای ساعت t (E_t^{HT}) برحسب کیلووات-ساعت محاسبه می‌شود. آن وابسته به E_t^{HT} در ساعت قبل (E_{t-1}^{HT})، انرژی دریافت شده از ELها ($\eta^E P_t^E$)، و انرژی تحویل داده شده به سیستم توسط FCها (B) است. پارامترهای η^E و η^F نیز به ترتیب معرف راندمان EL و FC برحسب درصد هستند. در رابطه (۱۲)، محدودیت انرژی ذخیره شده در HTها لحاظ شده است، که \bar{E}^{HT} و \underline{E}^{HT} (برحسب کیلووات-ساعت) به ترتیب بیانگر حد پایین و بالای انرژی ذخیره شده در یک HT است. تعداد HT قابل نصب در سیستم ترکیبی (N^{HT}) بر اساس رابطه (۱۳) یک متغیر عدد صحیح است که دارای حداکثر مقدار \bar{N}^{HT} است. در رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب تعداد ELها (N^{EL}) و FCهای (N^{FC}) قابل نصب در سیستم ترکیبی محاسبه می‌شوند. N^{EL} و N^{FC} برابر نسبت حداکثر توان اکتیو ELها (P_t^E) و FCها (P_t^F) به توان نامی (FC) EL است. توان نامی EL و FC در رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب با پارامترهای \bar{P}^{EL} و \bar{P}^{FC} نمایان شده‌اند که برحسب کیلووات هستند.

$$\begin{cases} P_t^E = \left((P_t^{WT} + P_t^{BPG}) \eta^I - \frac{P_t^L}{\eta^I} \right) & \text{if } (P_t^{WT} + P_t^{BPG}) \eta^I \geq \frac{P_t^L}{\eta^I} \quad \forall t \\ P_t^F = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_t^F = \left(\frac{P_t^L}{\eta^I} - (P_t^{WT} + P_t^{BPG}) \eta^I \right) & \text{if } (P_t^{WT} + P_t^{BPG}) \eta^I < \frac{P_t^L}{\eta^I} \quad \forall t \\ P_t^E = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$E_t^{HT} = E_{t-1}^{HT} + \eta^E P_t^E - \frac{1}{\eta^F} P_t^F \quad \forall t \quad (11)$$

$$N^{HT} \underline{E}^{HT} \leq E_t^{HT} \leq N^{HT} \bar{E}^{HT} \quad \forall t \quad (12)$$

$$N^{HT} \in \{1, 2, \dots, \bar{N}^{HT}\} \quad (13)$$

$$N^{EL} = \frac{\max(P_t^E)}{\bar{P}^{EL}} \quad (14)$$

$$N^{FC} = \frac{\max(P_t^F)}{\bar{P}^{FC}} \quad (15)$$

ه) قیدهای ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی: بر اساس شرط چهارم در بخش دوم، چنانچه توان حرارتی تولیدی BPGها بیش از توان حرارتی مصرفی (H_t^L برحسب کیلووات-ساعت) باشد، یعنی $H_t^{BPG} \geq H_t^L$ ، لذا مازاد توان حرارتی تولیدی (A) در TESها ذخیره می‌شود. در این شرایط، بر اساس رابطه (۱۶)، انرژی ذخیره شده در TESها در ساعت t (E_t^T) برحسب kWh کیلووات-ساعت برابر مجموع E_t^T در ساعت قبل (E_{t-1}^T) و مازاد توان حرارتی تولیدی از دید TESها (A) خواهد بود. پارامتر $\eta^{c,T}$ (برحسب درصد) معرف راندمان شارژ TES است. ولی چنانچه بار حرارتی دارای مقدار بیشتری از توان حرارتی تولیدی BPGها باشد، یعنی $H_t^{BPG} \leq H_t^L$ ، TESها در مد دشارژ قرار دارند و کمبود انرژی مصرفی حرارتی را تأمین می‌کنند. در این شرایط بر اساس رابطه (۱۷)، E_t^T برابر ماتفاوت E_{t-1}^T و کمبود انرژی مصرفی از دید TESها (B) خواهد بود. پارامتر $\eta^{d,T}$ (برحسب درصد) معرف راندمان دشارژ TES است. در قید (۱۸)، محدودیت انرژی ذخیره شده در TESها فرمول‌بندی شده است. پارامترهای \bar{E}^T و \underline{E}^T (برحسب کیلووات-ساعت) به ترتیب معرف حداقل و حداکثر انرژی ذخیره شده در یک TES است. در نهایت محدودیت تعداد TESها در رابطه (۱۹) ارائه شده است، که پارامتر \bar{N}^T معرف حداکثر تعداد TESهای قابل نصب در سیستم ترکیبی است. پخش بار حرارتی همانند پخش بار الکتریکی در سیستم جزیره‌ای اشاره به تعادل تولید و مصرف در این سیستم دارد. به عبارتی باید مجموع توان حرارتی تولیدی منابع و ذخیره‌سازها (در مد دشارژ) برابر مجموع توان حرارتی مصرفی بار و ذخیره‌سازها (در مد شارژ) باشد. این

موضوع در رابطه‌های (۱۶) و (۱۷) در بخش عملکرد ذخیره‌سازهای حرارتی قابل شهود است. به طوری که اگر توان تولیدی حرارتی بیشتر از توان حرارتی مصرفی باشد. ذخیره‌ساز برای ایجاد تعادل توان حرارتی، مازاد توان تولیدی را در خود ذخیره می‌کند. همچنین اگر توان حرارتی تولیدی کمتر از توان حرارتی مصرفی باشد، ذخیره‌سازی برای برقراری تعادل تولید و مصرف در مد دشارژ قرار می‌گیرد و آن توان حرارتی به سیستم جزیره‌ای تزریق می‌کند.

$$E_t^T = E_{(t-1)}^T + \eta^{c,T} (H_t^{BPG} - H_t^L) \quad \text{if } H_t^{BPG} \geq H_t^L \quad \forall t \quad (16)$$

$$E_t^T = E_{(t-1)}^T - \frac{1}{\eta^{c,T}} (H_t^L - H_t^{BPG}) \quad \text{if } H_t^{BPG} < H_t^L \quad \forall t \quad (17)$$

$$N^T \underline{E}^T \leq E_t^T \leq N^T \bar{E}^T \quad \forall t \quad (18)$$

$$N^T \in \{1, 2, \dots, \bar{N}^T\} \quad (19)$$

(و) قیدهای مبدل‌های الکترونیک قدرت: بر اساس شکل (۲)، تعداد مبدل‌های الکترونیک قدرت (N^I) برابر مجموع تعداد مبدل‌ها در مسیر WTها (N^{I-W})، تعداد مبدل‌ها در مسیر BPGها (N^{I-B})، و تعداد مبدل‌ها در مسیر باس AC (N^{I-A}) است. این موضوع در رابطه (۲۰) ارائه شده است [۱]. N^{I-W} ، N^{I-B} و N^{I-A} بر اساس رابطه‌های (۲۱)–(۲۳) برابر نسبت حداکثر توان عبوری از مبدل‌ها به توان نامی مبدل (\bar{P}^I برحسب کیلووات-ساعت) هستند. در مبدل‌های موجود در مسیر WTها (BPGها)، حداکثر توان اکتیو WTها (BPGها) عبور می‌کند. در مبدل‌های موجود در مسیر باس AC، توان P^L/η^I عبور می‌کند.

$$N^I = N^{I-W} + N^{I-B} + N^{I-A} \quad (20)$$

$$N^{I-W} = \frac{\max(P_t^{WT})}{\bar{P}^I} \quad (21)$$

$$N^{I-B} = \frac{\max(P_t^{BPG})}{\bar{P}^I} \quad (22)$$

$$N^{I-A} = \frac{\max\left(\frac{1}{\eta^I} P_t^L\right)}{\bar{P}^I} \quad (23)$$

۳- روش حل

مسئله بیان شده در رابطه‌های (۱) الی (۲۳) در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح^{۲۵} (MINLP) است. در این بخش از الگوریتم ترکیبی GWO [۱۷] و SCA [۱۸] برای حل مسئله استفاده می‌شود. بر اساس مرجع‌های [۱۷] و [۱۸]، این دو الگوریتم قابلیت مطلوبی در استخراج راه‌حل بهینه در مسائل پیچیده مهندسی دارند. لذا ترکیب آن‌ها راه‌حل مطلوب‌تری را خواهد داشت. در این حل‌کننده، ابتدا به تعداد N (اندازه جمعیت) مقدار تصادفی برای متغیرهای تصمیم‌گیری شامل N^{HT} ، N^{BPG} ، N^{WT} و N^T بر اساس محدودیت مجازشان به ترتیب در رابطه‌های (۲۴) الی (۲۷) تولید می‌شود. سپس N میزان برای متغیرهای وابسته مانند N^{HT} ، N^{BPG} ، N^{WT} ، N^T ، N^{I-W} ، N^{I-B} ، N^{I-A} ، N^{FC} ، N^{EL} ، E^T ، E^{HT} ، P^E ، P^{BPG} ، P^{BPG} ، P^{WT} الی (۱۱)، (۱۴) الی (۱۷) و (۲۰) الی (۲۳) و مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری محاسبه می‌شود. در این بخش به منظور رعایت قیدهای (۱۲) و (۱۸) از تکنیک تابع جریمه استفاده می‌شود [۱۹]. در این تکنیک، تابع برازندگی (FF) برابر مجموع تابع هدف (۱) و توابع جریمه حاصل از قیدهای (۱۲) و (۱۸) است. تابع جریمه نیز برای قید $a \leq b$ به صورت $\mu \max(0, a-b)$ است. $\mu \geq 0$ معرف ضریب لاگرانژ است که مقدار آن همانند متغیرهای تصمیم‌گیری تعیین می‌شود. فرمول‌بندی تابع برازندگی مبنی بر تکنیک توابع جریمه در رابطه (۲۸) ارائه شده است. در ادامه بهنگام‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری بر اساس محدودیت مجازشان توسط GWO+SCA انجام می‌شود. در این بخش ابتدا GWO، مقدار جدید برای متغیرهای تصمیم‌گیری و μ بر اساس بهترین مقدار FF در مرحله قبل به دست می‌آورد. سپس N مقدار متغیرهای وابسته و FF بر اساس مقادیر جدید متغیرهای تصمیم‌گیری و μ محاسبه می‌شوند. در ادامه SCA عملیات بهنگام‌سازی را انجام می‌دهد. آن N مقدار جدید برای متغیرهای تصمیم‌گیری و μ را بر اساس بهترین مقدار FF مستخرج شده از GWO به دست می‌آورد. سپس میزان متغیرهای وابسته و تابع برازندگی محاسبه

می‌شوند. این فرایند تا دسترسی به نقطه همگرایی ادامه می‌یابد. در این بخش فرض بر این است که نقطه همگرایی بعد از حداکثر تکرار بهنگام‌سازی (I_{max}) قابل دسترس است.

$$N^{WT} \in \text{Eq.}(5) \quad (24)$$

$$N^{BPG} \in \text{Eq.}(9) \quad (25)$$

$$N^{HT} \in \text{Eq.}(13) \quad (26)$$

$$N^T \in \text{Eq.}(19) \quad (27)$$

$$FF = APC$$

$$\begin{aligned} & + \sum_t (\underline{\mu}_t^{HT} \max(0, E_t^{HT} - N^{HT} \bar{E}^{HT}) + \underline{\mu}_t^{HT} \max(0, N^{HT} \underline{E}^{HT} - E_t^{HT})) \\ & + \sum_t (\underline{\mu}_t^T \max(0, E_t^T - N^T \bar{E}^T) + \underline{\mu}_t^T \max(0, N^T \underline{E}^T - E_t^T)) \end{aligned} \quad (28)$$

۴- نتایج عددی

۴-۱- داده‌های مسئله

در این بخش طرح پیشنهادی بر روی سیستم شکل (۲) متناسب با داده‌های شهر اسپو در فنلاند اعمال می‌شود [۱۹]. پیک بار AC و حرارتی به ترتیب برابر ۲۱ کیلووات و ۱۰ کیلووات است. میزان بار ساعتی برابر حاصل ضرب پیک بار و منحنی روزانه ضریب بار است. این منحنی برای بار AC و حرارتی در شکل (۳) نمایان است [۱۹]. حداکثر سرعت بار برابر ۹/۳ متر بر ثانیه است و حداکثر گاز عبوری از BPG برابر ۰/۴ متر-مکعب است. سرعت باد (گاز عبوری) ساعتی برابر حاصل ضرب حداکثر این پارامتر و منحنی نرخ سرعت باد (گاز عبوری) است. این منحنی بر WT (BPG) در شکل (۳) ترسیم شده است^{۲۶}. مشخصات منابع، ذخیره‌سازها و مبدل‌های قدرت در جدول‌های (۲) الی (۷) ارائه شده است. قابل توجه است که طرح پیشنهادی محدودیتی برای اجرا بر روی داده‌های مختلف ندارد. قابل توجه است که در شکل (۳) محور عمودی مقدار نسبی^{۲۷} بار، سرعت باد و گاز عبوری از BPG را نمایش می‌دهد. مقدار نسبی یک پارامتر برابر نسبت مقدار واقعی آن با حداکثر مقدارش است.

۴-۲- نتایج

طرح پیشنهادی متناسب با داده‌های بخش قبل به همراه روند حل مسئله متناسب با بخش ۳ در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی و شبیه‌سازی شده است. در ادامه نتایج عددی حاصل از دو حالت مطالعه زیر ارائه می‌شود.

- حالت اول: برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی با در نظر گرفتن تنها تغذیه انرژی الکتریکی (در این حالت مدل حرارتی BPG و مدل بهره‌برداری TES حذف می‌شوند)، نزدیک به مطالعه انجام شده در مرجع‌های [۶] الی [۱۵].

- حالت دوم: برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی جهت تغذیه هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی (طرح پیشنهادی)

الف- ارزیابی وضعیت همگرایی حل مسئله برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی: در جدول (۸) وضعیت همگرایی حل مسئله پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های حل GWO، GWO+SCA، [۱۷] SCA، [۱۸] PSO، [۱۹] و الگوریتم ژنتیک^{۲۸} (GA) [۱۹] ارائه شده است.

Table (2): Wind turbine specifications [1]

جدول (۲): مشخصات توربین باد [۱]

مقدار	کمیت	پارامتر	مقدار	کمیت	پارامتر
۱۰ درصد	r	نرخ بهره	۱ کیلووات	p^f	توان خروجی
۲۰	N	تعداد سال	۲/۵ متر بر ثانیه	v^{ci}	سرعت آستانه
۱۰ متر بر ثانیه	v^f	سرعت نامی	۵۰	\bar{N}^{WT}	حداکثر تعداد توربین
۱۳ متر بر ثانیه	v^{co}	سرعت قطع	۳۲۰۰ دلار	C^{WT}	هزینه توربین
۲۰	عمر مفید	سال	۵ دلار بر سال	M^{WT}	هزینه تعمیر و نگهداری

Table (3): Specifications of biomass unit [7]

جدول (۳): مشخصات بیوماس [۷]

پارامتر	کمیت	مقدار
راندمان الکتریکی	η^{BPG}	۳۵ درصد
راندمان تلفات	η^{BPG}	۱۵
راندمان تبدیل حرارتی	η^{BPG}	۵۰ درصد
متان موجود در گاز	$\rho^{(CH_4)}$	۶۵ درصد
حد پایین حرارتی متان	$LHV^{(CH_4)}$	۱۰ کیلووات-ساعت بر مترمکعب
تعداد (طول عمر مفید برای عملکرد)	BPG	۲۰ سال
حداکثر تعداد واحد بیوماس	\bar{N}^{BPG}	۳۰
هزینه واحد بیوماس	C^{BPG}	۶۵۰۰ دلار
هزینه تعمیر و نگهداری	M^{BPG}	۱۶/۲۵ دلار بر سال

Table (4): Specifications of thermal energy storage

جدول (۴): مشخصات ذخیره ساز انرژی حرارتی

پارامتر	کمیت	مقدار
حداکثر انرژی ذخیره شده در یک TES	\bar{E}^T	۱/۳۵ کیلووات-ساعت
حداقل انرژی ذخیره شده در یک TES	\underline{E}^T	۰/۱ کیلووات-ساعت
راندمان شارژ	$\eta^{E,T}$	۸۰ درصد
تعداد (طول عمر مفید برای عملکرد)	TES	۲۰ سال
حداکثر تعداد TESهای قابل نصب	\bar{N}^T	۳۵
هزینه نصب	C^T	۲۰۰۰ دلار
هزینه تعمیر نگهداری	M^T	۱/۵ دلار بر سال

Table (5): Characteristics of electrolysis and hydrogen tank

جدول (۵): مشخصات الکترولیز و تانک هیدروژنی

پارامتر	کمیت	مقدار
حد بالای انرژی ذخیره شده در HT	\bar{E}^{HT}	۱/۳۵ کیلووات-ساعت
حد پایین انرژی ذخیره شده در HT	\underline{E}^{HT}	۰/۱۰ کیلووات-ساعت
تعداد (طول عمر مفید برای عملکرد)	EL, HT	۲۰ سال
تعداد (طول عمر مفید برای عملکرد)	FC	۵ سال
حداکثر تعداد HT	\bar{N}^{HT}	۲۰۰
هزینه نصب EL	C^{EL}	۲۰۰۰ دلار
هزینه تعمیر و نگهداری EL	M^{EL}	۱/۲۵ دلار بر سال
هزینه نصب HT	C^{HT}	۱۳۰۰ دلار
هزینه تعمیر و نگهداری HT	M^{HT}	۰/۸ دلار بر سال
هزینه نصب FC	C^{FC}	۳۰۰۰ دلار
هزینه تعمیر و نگهداری FC	M^{FC}	۸/۷۵ دلار بر سال

Table (6): Characteristics of hydrogen storage

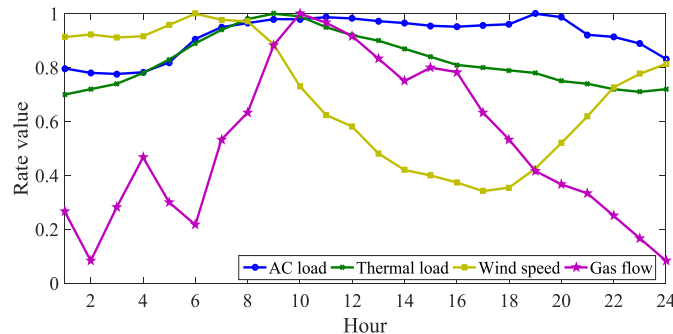
جدول (۶): مشخصات ذخیره ساز هیدروژنی

پارامتر	کمیت	مقدار
راندمان EL	η^E	۷۵ درصد
راندمان FC	η^F	۵۰ درصد
توان نامی EL	\bar{P}^{EL}	۱ کیلو وات - ساعت
توان نامی FC	\bar{P}^{FC}	۱ کیلو وات - ساعت

Table (7): Specifications of power converter

جدول (۷): مشخصات مبدل قدرت

مقدار	کمیت	پارامتر
۹۰ درصد	η^I	راندمان
۱ کیلو وات - ساعت	\bar{P}^I	توان نامی مبدل
۱۵ سال	EL(Y)	تعداد (طول عمر مفید)
۸۰۰ دلار	C^I	هزینه نصب
۰/۴ دلار بر سال	M^I	هزینه تعمیر و نگهداری



شکل (۳): منحنی روزانه ضریب بار، نرخ سرعت باد توربین بادی و نرخ گاز عبوری بیوماس

Figure (3): Daily curve of load factor, WT wind speed rate and BPG passing gas rate

الف- ارزیابی وضعیت همگرایی حل مسئله برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی: در جدول (۸) وضعیت همگرایی حل مسئله پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های حل GWO+SCA، GWO، SCA، PSO، GA و الگوریتم ژنتیک (GA) [۱۹] ارائه شده است. اندازه جمعیت برابر ۸۰ در نظر گرفته شده و حداکثر تکرار همگرایی برابر ۴۰۰۰ لحاظ شده است. دیگر پارامترهای تنظیم حل‌کننده‌ها متناسب با مرجع‌های [۱۷]، [۱۸] و [۱۹] انتخاب شده است. همچنین به منظور انجام محاسبات آماری مانند انحراف معیار پاسخ‌دهی نهایی، هر حل‌کننده مسئله مذکور را ۳۰ بار حل می‌کند. در ادامه بر اساس نتایج عددی گزارش شده در جدول (۸) مشاهده می‌شود که الگوریتم ترکیبی GWO+SCA نسبت به NHEA توانسته است کمینه‌ترین نقطه را به دست آورد. به طوری که در آن APC برابر ۳۳۴۴۶/۴ دلار است، ولی NHEA بیش از ۳۴۱۰۰ دلار برای APC به دست آورده‌اند. همچنین GWO+SCA بهینه‌ترین نقطه را در کمترین تکرار همگرایی و زمان محاسباتی نسبت به NHEA به دست آورده است، به عبارت دیگر این نقطه را در تکرار ۸۱۲ و زمان ۱۲۲ ثانیه به دست می‌آورد. در صورتی که زمان محاسباتی NHEA بیش از ۱۶۵ ثانیه است. به عنوان نکته دیگر، GWO+SCA کمترین انحراف معیار، یعنی ۰/۹۴ درصد را دارد. این به این معنی است که الگوریتم ترکیبی مذکور توانسته است پراکندگی بسیار پایینی را نسبت به NHEA برای مسئله پیشنهادی به دست آورد، یا قادر است تقریباً راه حل یکتاتری را به دست آورد. در جدول (۸) نتایج همگرایی حل مسئله به‌ازای دو الگوریتم ریاضی بارون^{۲۹} و بونمین^{۳۰} نیز بیان شده است. برای حل مسئله با این الگوریتم‌ها طرح پیشنهادی در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز شبیه‌سازی شد. بر اساس نتایج عددی گزارش شده در جدول (۸)، این الگوریتم‌ها با وجود این که دارای تکرار همگرایی پایینی نسبت به الگوریتم‌های تکاملی هستند، ولی زمان محاسباتی آن‌ها بسیار بالاتر از الگوریتم‌های تکاملی است، زیرا در الگوریتم‌های ریاضی هم‌زمان تمامی متغیرها محاسبه می‌شوند ولی در الگوریتم‌های تکاملی ابتدا به متغیرهای تصمیم‌گیری مقداردهی می‌شود و سپس میزان متغیرهای وابسته محاسبه می‌شوند. از این رو روند حل مسئله با الگوریتم‌های ریاضی پیچیده و سنگین است، ولی الگوریتم‌های تکاملی روند ساده‌تری در حل مسئله دارند. این موضوع منجر به کاهش زمان محاسباتی حل‌کننده‌های تکاملی نسبت به الگوریتم‌های ریاضی می‌شود. الگوریتم‌های ریاضی در هر تکرار حل مسئله یک راه‌حل را نمایش می‌دهند. به طوری که بر اساس جدول (۳)، میزان انحراف معیار پاسخ‌دهی نهایی آن‌ها برابر صفر است. علاوه بر این توجه شود که در حل مسائل غیرخطی، حل‌کننده‌ای مطلوب است که دارای راه‌حل بهینه‌تر باشد. زیرا که نقطه بهینه آن نزدیک‌تر به نقطه بهینه سراسری

خواهد بود. با توجه به این نکته الگوریتم ترکیبی GWO+SCA در بین الگوریتم‌های حل بیان‌شده دارای شرایط یاد شده است؛ بنابراین با توجه با نتایج مطرح شده، الگوریتم ترکیبی GWO+SCA توانسته است دقیق‌ترین راه‌حل را با سرعت همگرایی بالایی نسبت به NHEAها و الگوریتم‌های ریاضی استخراج کند. این موضوع اثبات‌کننده نوآوری آخر در بخش ۱ است.

ب- استخراج ساختار اقتصادی برای سیستم ترکیبی: در جدول‌های (۲) الی (۷) اندازه (تعداد) بهینه منابع، ذخیره‌سازها و مبدل‌های الکترونیک قدرت در سیستم ترکیبی شکل (۲) به ازای حالت‌های مختلف مطالعه ۱ و ۲ ارائه شده است. در حالت ۱ مدل انرژی مصرفی حرارتی مدنظر نیست؛ لذا در این حالت مطالعه ۵۰ عدد توربین بادی و ۸ عدد بیوماس در سیستم ترکیبی نصب می‌شوند. بر اساس جدول (۲)، هزینه احداث، تعمیر و نگهداری WT نسبت به BPG کمتر است، از این‌رو در حالت ۱ برای تأمین انرژی الکتریکی، حداکثر تعداد قابل‌نصب WT، بر اساس جدول (۱) برابر ۵۰ است، انتخاب می‌شود. در ادامه برای پوشش فاصله بین پروفیل توان اکتیو تولیدی منابع تجدیدپذیر مذکور و توان اکتیو بار AC، ذخیره‌ساز هیدروژن نیاز به ۲۲ تا الکترولیزر، ۱۵ تا پیل سوختی و ۱۳۲ تا تانک هیدروژنی دارد. برای عبور حداکثر توان اکتیو WTها از مبدل الکترونیک قدرت، نیاز است ۴۶ مبدل در مسیر WTها قرار گیرد. همچنین ۸ مبدل در مسیر BPGها قرار می‌گیرد تا اینکه حداکثر توان اکتیو BPGها را خود عبور دهند. برای عبور حداکثر توان اکتیو بار AC نیز نیاز به ۲۴ مبدل است؛ بنابراین حالت ۱ در مجموع نیاز به ۷۸ مبدل الکترونیک قدرت دارد. در حالت ۲ مدل انرژی مصرفی حرارتی علاوه برای انرژی مصرفی الکتریکی لحاظ شده است. اضافه شدن مدل بار حرارتی منجر به شده است که تعداد BPGها نسبت به حالت ۱، ۱۸ عدد افزایش یابد (تعداد آن‌ها در حالت ۲، ۲۶ عدد است)، تعداد مبدل‌های آن ۱۶ عدد افزایش می‌یابد (۲۴ عدد مبدل)، و ۳۲ عدد TES نیز برای پوشش فاصله بین پروفیل توان حرارتی تولید BPG و توان حرارتی مصرفی لازم است. ولی نسبت به حالت ۱، ۲۱ عدد WT کاهش یافته است، ۱۹ عدد مبدل مربوط به WTها کاهش یافته است، تعداد EL و FC به ترتیب به ۱۶ و ۱۰ عدد کاهش یافته‌اند و تعداد HTها به ۷۳ عدد کاهش یافته است. توجه شود که در طرح پیشنهادی تنها BPG تولیدکننده انرژی حرارتی است. از این‌رو برای تأمین بار حرارتی، تعداد آن‌ها نسبت به حالت ۱ افزایش یافت. اما از آنجا که انرژی مصرفی الکتریکی در حالت ۱ و ۲ یکسان است، لذا با افزایش تعداد BPGها، باید تعداد WTها کاهش یابد، که این موضوع در جدول (۹) قابل مشاهده است. در جدول‌های (۱۰) الی (۱۲)، هزینه‌های احداث سالیانه، تعمیر و نگهداری سالیانه برای منابع، ذخیره‌سازها و مبدل‌های الکترونیک قدرت با توجه به نتایج برنامه‌ریزی عناصر یاد شده بیان شده است. توجه شود که هزینه احداث سالانه برای یک عنصر بر اساس داده‌های جدول (۱) برابر حاصل تقسیم C و عمر مفید است. بر اساس جدول (۹) الی (۱۲) دیده می‌شود که کمترین هزینه احداث و تعمیر و نگهداری برای WTها، ELها، HTها، FCها و مبدل‌های قدرت در حالت ۲ وجود دارد، ولی آن برای BPGها و TESها در حالت ۱ وجود دارد. پس به‌طور کلی کمترین مقدار این هزینه‌ها برای HS در حالت ۲ وجود دارد. این نتایج متناظر با تعداد عناصر یاد شده در جدول (۱۰) است. در نهایت کمترین مقدار هزینه احداث (تعمیر و نگهداری) برای سیستم ترکیبی شکل (۲) در حالت ۲ (۱) حاصل شده است. البته توجه شود که در حالت ۲، مدل انرژی مصرفی حرارتی وجود دارد. بنابراین با مقایسه حالت‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود که طرح پیشنهادی (حالت ۲) با کاهش ۵ درصد (۳۴۳۴۰ / (۳۲۶۵۳۰ - ۳۴۳۴۰)) در هزینه سالیانه احداث و افزایش ۲۰/۱ درصد برای هزینه سالیانه تعمیر و نگهداری نسبت به حالت ۱ توانسته است بار حرارتی را با TESها و BPGها تغذیه کند. در جدول (۱۲) مقادیر APC برای سیستم ترکیبی در حالت‌های مطالعاتی مختلف بیان شده که برابر مجموع هزینه سالیانه احداث و هزینه سالیانه تعمیر و نگهداری است. این میزان برای حالت ۲ کمترین مقدار را دارد. پس با وجود اینکه در حالت ۲ بار حرارتی تغذیه می‌شود، در این حالت هزینه برنامه‌ریزی نسبت به حالت ۱ در حدود ۴/۵ درصد کاهش دارد.

ج- بررسی وضعیت عملکرد عناصر سیستم ترکیبی: در شکل‌های (۴) و (۵) منحنی روزانه توان اکتیو و حرارتی منابع و ذخیره-سازها به ازای حالت‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده است. شکل (۴) نتایج مربوط حالت ۱ را نمایش می‌دهد که در آن مدل انرژی حرارتی مدنظر نیست. بر اساس شکل (۴)، WTها متناسب با داده‌های سرعت باد در شکل (۳)، توان اکتیو بالایی را در ساعات ۱۱:۰۰-۱۰:۰۰ و ۲۱:۰۰ الی ۲۴:۰۰ تولید می‌کنند، ولی توان تولیدی آن‌ها در ساعات دیگر پایین است. همچنین BPGها بر اساس داده‌های گاز حاصل از بیوماس در شکل (۳)، در ساعات ۷:۰۰ الی ۲۰:۰۰ توان اکتیو بالایی را تولیدی می‌کنند، در صورتی سطح توان اکتیو تولیدی آن‌ها در ساعات دیگر پایین است.

Table (8): The state of convergence of the proposed design obtained from different solution algorithms for case 2

جدول (۸): وضعیت همگرایی طرح پیشنهادی به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های حل مختلف برای مورد ۲

تکرار همگرایی	زمان محاسباتی (ثانیه)	انحراف معیار (درصد)	هزینه سالیانه برنامه‌ریزی (دلار بر سال)	حل‌کننده
۸۱۲	۱۲۲	۰/۹۴	۳۳۴۴۶/۴	GWO+SCA
۱۲۶۴	۱۶۸	۱/۲۶	۳۴۱۱۴/۴	GWO
۱۲۷۹	۱۷۵	۱/۳۱	۳۴۵۲۵/۲	SCA
۲۴۸۱	۲۰۹	۲/۵۴	۳۵۹۶۷/۳	PSO
۳۰۸۵	۲۷۶	۳/۱۹	۳۶۵۴۸/۴	GA
۲۴۵	۶۷۱	۰	۳۴۳۲۱/۳	BARON
۱۹۴	۵۸۵	۰	۳۴۰۷۲/۱	BONMIN

Table (9): Number of energy sources

جدول (۹): تعداد منابع انرژی

حالت	تعداد								
	مبدل‌های در مسیر بار AC	مبدل‌های در مسیر بیوماس‌ها	مبدل‌های در مسیر توربین‌های بادی	پیل‌های سوختی	تانک‌های هیدروژنی	الکترولیزرها	ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی	بیوماس‌ها	توربین‌های بادی
۱	۲۴	۸	۴۶	۱۵	۱۳۲	۲۲	۰	۸	۵۰
۲	۲۴	۲۴	۲۷	۱۰	۷۳	۱۶	۳۲	۲۶	۲۹

Table (10): Annual construction cost (dollars per year)

جدول (۱۰): هزینه احداث سالیانه (دلار بر سال)

حالت	هزینه احداث سالانه (دلار بر سال)							
	کل مبدل‌های قدرت	پیل‌های سوختی	تانک‌های هیدروژنی	الکترولیزرها	ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی	بیوماس‌ها	توربین‌های بادی	کل
۱	۴۱۶۰	۹۰۰۰	۸۵۸۰	۲۲۰۰	۰	۲۶۰۰	۸۰۰۰	۳۴۳۴۰
۲	۴۰۰۰	۶۰۰۰	۴۷۴۵	۱۶۰۰	۳۲۰۰	۸۴۵۰	۴۶۴۰	۳۲۶۳۵

Table (11): Annual Maintenance Cost (Dollars Per Year)

جدول (۱۱): هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه (دلار بر سال)

حالت	هزینه تعمیر و نگهداری سالانه (دلار بر سال)							
	کل مبدل‌های قدرت	پیل‌های سوختی	تانک‌های هیدروژنی	الکترولیزرها	ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی	بیوماس‌ها	توربین‌های بادی	کل
۱	۳۱/۲	۱۳۱/۲۵	۱۰۵/۶	۲۷/۵	۰	۱۳۰	۲۵۰	۶۷۵/۵۵
۲	۳۰	۸۷/۵	۵۸/۴	۲۰	۴۸	۴۲۲/۵	۱۴۵	۸۱۱/۴

Table (12): Annual Planning Cost

جدول (۱۲): هزینه برنامه‌ریزی سالانه

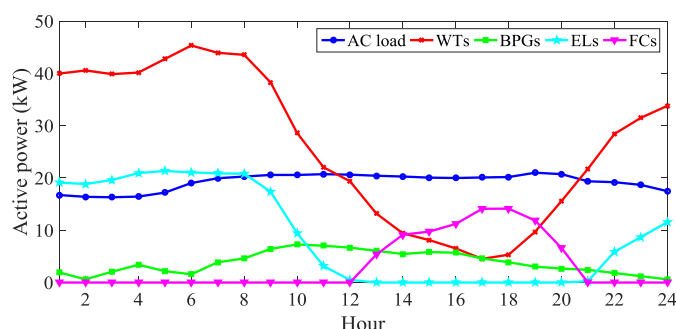
حالت	هزینه برنامه‌ریزی سالانه							
	کل مبدل‌های قدرت	پیل‌های سوختی	تانک‌های هیدروژنی	الکترولیزرها	ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی	بیوماس‌ها	توربین‌های بادی	کل
۱	۴۱۹۱/۲	۹۱۳۱/۲۵	۸۶۸۵/۶	۲۲۲۷/۵	۰	۲۷۳۰	۸۲۵۰	۳۵۰۱۵/۵۵
۲	۴۰۳۰	۶۰۸۷/۵	۴۸۰۳/۴	۱۶۲۰	۳۲۴۸	۸۸۷۲/۵	۴۷۸۵	۳۳۴۴۶/۴

در ادامه با توجه به عملکرد و تعداد منابع تجدیدپذیر متناظر با جدول (۴)، ELها در ساعات ۱:۰۰-۱۴:۰۰ و ۲۱:۰۰-۲۴:۰۰ در مورد ۱ فعال هستند و برق از منابع می‌گیرند و سپس هیدروژن در HT ذخیره می‌کنند. زیرا که در این ساعات توان اکتیو منابع

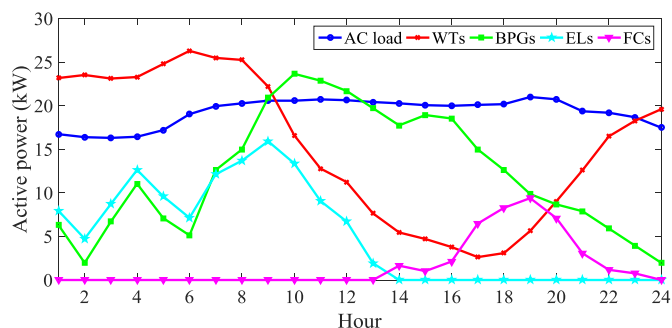
بیش از بار AC است. به عبارتی در این ساعات HS در مد شارژ قرار دارد. در ساعات دیگر، FC فعال است و آن هیدروژن از HT می‌گیرد و به صورت توان اکتیو به بار AC می‌دهد. به عبارتی در این شرایط، HS در مد دشارژ قرار داد.

منحنی روزانه عملکرد منابع و ذخیره‌سازها در حالت ۲ در شکل (۵) ترسیم شده است. نحوه عملکرد منابع و ذخیره‌سازها در بخش الکتریکی برای حالت ۲ بر اساس شکل (۵-الف) شبیه عملکرد آن‌ها در حالت ۱ است، با این تفاوت که مقادیر توان اکتیو آن‌ها متفاوت است.

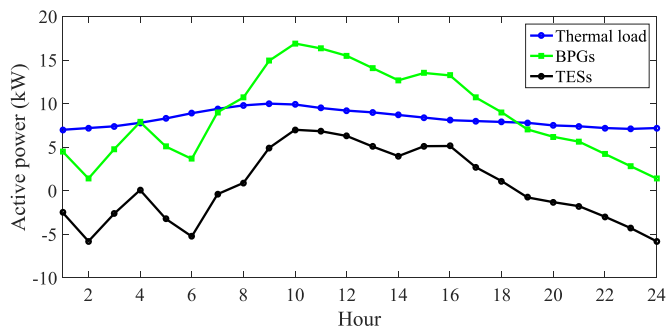
بر اساس شکل (۵-ب) مشاهده می‌شود که روند تغییرات توان حرارتی BPGها مثل توان اکتیو آن است که این موضوع در رابطه (۷) نیز قابل مشهود است. همچنین توان حرارتی BPGها در ساعات ۸:۰۰-۱۸:۰۰ بیش از بار حرارتی است و در ساعات دیگر عکس این موضوع وجود دارد؛ لذا TESها در ساعات ۸:۰۰-۱۸:۰۰ در مد شارژ قرار دارند (توان آن‌ها مثبت است) و در دیگر ساعات به صورت دشارژ کار می‌کنند (توان آن‌ها منفی است).



شکل (۴): منحنی روزانه توان اکتیو توربین‌های بادی، بیوماس‌ها، الکترولیزرها و پیل‌های سوختی در حالت اول
Figure (4): Daily active power curve of WT, BPG, EL, and FC in case 1



(الف) توان اکتیو توربین‌های بادی، بیوماس‌ها، الکترولیزرها و پیل‌های سوختی



(ب) توان حرارتی بیوماس‌ها و ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی

شکل (۵): منحنی روزانه در حالت دوم

Figure (5): Daily curve in case 2, a) Active power of WT, BPG, and FC, b) Thermal power of BPG and TES

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله برنامه‌ریزی بهینه سیستم ترکیبی ۱۰۰ درصد تجدیدپذیر دارای توربین بادی، واحد انرژی بیوماس، ذخیره‌ساز هیدروژنی و ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به منظور تأمین هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی ارائه شد. طرح پیشنهادی کمینه‌سازی مجموع هزینه سالیانه احداث، تعمیر و نگهداری منابع، ذخیره‌سازها و مبدل‌های الکترونیک قدرت را لحاظ کرده بود. آن مقید به مدل بهره‌برداری این عناصر بود. مدل بهره‌برداری این عناصر به این صورت که منابع تجدیدپذیر اولویت در تأمین انرژی مصرفی دارند، و سپس ذخیره‌سازها جهت پوشش فاصله بین پروفیل توان منابع و بار استفاده شدند. سپس الگوریتم ترکیبی GWO و SCA برای حل مسئله استفاده شد. بر اساس نتایج عددی مشاهده شد که الگوریتم مذکور نسبت به NHEA بهترین راه‌حل را با سرعت همگرایی بالاتری به دست آورد. همچنین آن دارای انحراف معیار پایین در حدود ۰/۹۴ درصد در پاسخ‌دهی نهایی است که این موضوع نمایانگر پراکندگی پایین پاسخ نهایی نسبت به NHEA است. سپس طرح پیشنهادی تعداد بهینه‌ای برای منابع، ذخیره‌سازها و مبدل‌های الکترونیک قدرت به دست آورد. به طوری در نظر گرفتن مدل بار حرارتی منجر به افزایش تعداد واحدهای بیوماس و ذخیره‌ساز حرارتی نسبت به سیستم ترکیبی بدون بار حرارتی می‌شود، ولی در قبال آن تعداد توربین‌های بادی، ذخیره‌ساز هیدروژنی و مبدل‌ها کاهش می‌یابد. این موردها باعث شده که هزینه برنامه‌ریزی سیستم دارای بارهای حرارتی و الکتریکی در حدود ۴/۵ درصد نسبت به سیستم دارای تنها بار الکتریکی کاهش یابد. بنابراین، نتایج بیان شده بیانگر ویژگی‌های طرح پیشنهادی حاصل از مدل‌سازی هم‌زمان مدیریت انرژی‌های الکتریکی و حرارتی، فرمول‌بندی عملکرد واحد بیوماس مبنی بر تکنولوژی CHP و مدل‌سازی ذخیره‌ساز حرارتی است.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی در دانشگاه افسری امام علی (ع) و دانشگاه فرماندهی ستاد آجا است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] 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 202e (doi: 20.1001.1.23223871.1402.14.53.2.6).
- [2] M. Sattar, M. Samiei Moghaddam, A. Azadfar, N. Salehi, M. Vahedi, "Joint optimization of integrated energy systems in the presence of renewable energy sources, power-to-gas systems and energy storage", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 15, no. 57, pp. 15-30, June 2024 (doi: 20.1001.1.23223871.1403.15.57.2.1).
- [3] M.A. Voelklein, D. Rusmanis, J.D. Murphy, "Biological methanation: Strategies for in-situ and ex-situ upgrading in anaerobic digestion", *Applied Energy*, vol. 235, pp. 1061-1072, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.apenergy.2018.11.006).
- [4] R. Homayoun, B. Bahmani-Firouzi, T. Niknam, "Multi-objective operation of distributed generations and thermal blocks in microgrids based on energy management system", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 15, no. 9, pp. 1451-1462, May 2022 (doi: 10.1049/gtd2.12112).
- [5] R. Homayoun, B. Bahmani-Firouzi, T. Niknam, "Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage", *Applied Energy*, vol. 88, pp. 4033-4041, Nov. 2011 (doi: 10.1016/j.apenergy.2011.04.019).
- [6] M.A. Ashraf, Z. Liu, A.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: 112467, Oct. 2020 (doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122467).
- [7] H. Sun, A.G. Ebadi, M. Toughani, S.A. Nowdeh, A. Naderipour, A. Abdullah, "Designing framework of hybrid photovoltaic-biowaste energy system with hydrogen storage considering economic and technical indices using whale optimization algorithm", *Energy*, vol. 238, Article Number: 121555, Jan. 2022 (doi: 10.1016/j.energy.2021.121555).

- [8] A. Naderipour, A.R. Ramtin, A. Abdullah, M. Hedayati Marzbali, S.A. Nowdeh, H. Kamyab, "Hybrid energy system optimization with battery storage for remote area application considering loss of energy probability and economic analysis", *Energy*, vol. 239, Article Number: 122303, Jan. 2022 (doi: 10.1016/j.energy.2021.1-22303).
- [9] 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).
- [10] A. Maleki, 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, Mar. 2017 (doi: 10.1016/j.energy.2017.01.105).
- [11] 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).
- [12] 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, Oct. 2019 (doi: 10.1016/j.energy.2019.07.079).
- [13] L.K. Gan, J.K. Shek, M.A. Mueller, "Analysis of tower shadow effects on battery lifetime in standalone hybrid wind-diesel-battery systems", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 8, pp. 6234-6244, Aug. 2017 (doi: 10.1109/TIE.2017.2682817).
- [14] P. Marocco, D. Ferrero, A. Lanzini, M. Santarelli, "The role of hydrogen in the optimal design of off-grid hybrid renewable energy systems", *Journal of Energy Storage*, vol. 46, Article Number: 103893, Feb. 2022 (doi: 10.1016/j.est.2021.103893).
- [15] T.R. Ayodele, T.C. Mosele, A.A. Yusuff, A.S.O. Ogunjuyigbe, "Off-grid hybrid renewable energy system with hydrogen storage for South African rural community health clinic", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 38, pp. 19871-19885, June 2021 (doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.03.140).
- [16] H. Rahbarimaghani, "Optimal control of micro-grid (MG) to improve voltage profile including combined heat and power system", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 9, no. 36, pp. 43-50, Jan. 2019 (doi: 10.1001/1.23223871.1397.9.36.5.0).
- [17] S.A. Mirjalili, S.M. Mirjalili, A. Lewis, "Grey wolf optimizer", *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, Mar. 2014 (doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007).
- [18] K. Sarwagya, P.K. Nayak, S. Ranjan, "Optimal coordination of directional overcurrent relays in complex distribution networks using sine cosine algorithm", *Electric Power Systems Research*, vol. 187, Article Number: 106435, pp. 106435, Oct. 2020 (doi: 10.1016/j.epr.2020.106435).
- [19] 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).

زیر نویس‌ها

1. Renewable energy sources (RESs)	16. Fuel cell (FC)
2. Bio-waste units	17. Gray wolf optimizer (GWO)
3. Combined heat and power (CHP)	18. Sine-cosine algorithm (SCA)
4. Islanded hybrid system	18. Net present cost
5. Loss of energy probability (LOEP)	20. Cut-in wind speed
6. Wind turbine (WT)	21. Rate wind speed
7. Photovoltaic (PV)	22. Rate power
8. Harmony search algorithm (HAS)	23. Cut-out wind speed
9. Loss of power supply (LPS)	24. Lower heating value
10. Particle swarm optimization (PSO)	25. Mixed integer non-linear programming (MINLP)
11. Bio-waste power generation (BPG)	26. https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/
12. Hydrogen storage (HS)	27. Rate value
13. Thermal energy storage (TES)	28. Genetic algorithm (GA)
14. Electrolyzer (EL)	29. Baron
15. Hydrogen tank (HT)	30. Bonmin