

برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی شامل منابع و ذخیره‌سازها بر پایه انرژی‌های الکتریکی و حرارتی

رضا سپهوند^۱

۱- استادیار- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی و پرواز - دانشگاه امام علی (ع) - تهران - ایران
reza_sepahvand@yahoo.com

چکیده: مصرف همزمان انرژی‌های الکتریکی و حرارتی در مناطق مصرف، و وجود مزیت‌های اقتصادی و فنی در صورت تغذیه مصرف‌کننده‌گان توسط تولیدکننده‌گان در نقطه مصرف منجر شده است که برنامه‌ریزی سیستم چند حاملی انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. بنابراین در این مقاله برنامه‌ریزی یک سیستم ترکیبی جزیره‌ای دارای منابع تجدیدپذیر، سیستم ترکیبی برق و حرارت، بویلر، ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی جهت تأمین انرژی پاک برای مصرف‌کننده‌های الکتریکی و حرارتی ارائه می‌شود. طرح مذکور کمینه‌سازی مجموع وزندهار هزینه بهره‌برداری سالیانه و سطح آلاینده‌گی این سیستم را بر عهده دارد. آن نیز مقید به مدل برنامه‌ریزی- بهره‌برداری منابع و ذخیره‌سازهای یاد شده است. این مسأله در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح است، که در ادامه جهت دسترسی به راه‌حل بهینه با انحراف معیار پایین در پاسخ‌دهی نهایی از حل‌کننده بهینه‌ساز گرگ خاکستری استفاده می‌شود. نوآوری‌های این طرح شامل استخراج سیستم ترکیبی جزیره‌ای دارای منابع / ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی، و تأمین انرژی پاک برای مصرف‌کننده‌گان الکتریکی و حرارتی می‌باشد. در نهایت با اجرای طرح پیشنهادی بر روی داده‌های شهر رفسنجان در ایران و استخراج نتایج عددی، قابلیت طرح مذکور در استخراج ساختار بهینه ترکیبی منابع و ذخیره‌سازها جهت تغذیه مصرف‌کننده‌های الکتریکی و حرارتی از دیدگاه اقتصادی و زیست محیطی مورد تأیید است.

واژه‌های کلیدی: بویلر، انرژی پاک، سیستم ترکیبی برق و حرارت، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و الکتریکی، سیستم ترکیبی جزیره‌ای، منابع انرژی تجدیدپذیر

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaee.20.4.2583

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۳۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳

نام نویسنده‌ی مسئول: رضا سپهوند

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

۱- مقدمه

یک راه‌حل برای تأمین انرژی مصرفی در نقاطی دور از دسترس سیستم قدرت، استفاده از سیستم ترکیبی جزیره‌ای^۱ (IHS) می‌باشد [۱]. در این سیستم مصرف‌کننده‌گان توسط تولیدکننده‌های محلی تغذیه می‌شود. به منظور دستیابی به تأمین انرژی پاک، عموماً منابع انرژی تجدیدپذیر^۲ (RESها) در IHS برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شوند [۲]. اما این منابع در برخی ساعات قادر نیستند که توان اکتیو مصرفی را تأمین کنند. به عنوان مثال، فتوولتائیک‌ها^۳ (PVها) در حوالی ساعات ۱۱:۰۰ الی ۱۳:۰۰ انرژی بالایی را تولید می‌کنند، اما در ساعات ۲۰:۰۰ الی ۵:۰۰ روز بعد عموماً خاموش هستند. بنابراین RESها به تنهایی قادر به تأمین انرژی مصرفی نیستند [۲]. برای جبران این موضوع، ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی^۴ (EESها) در کنار RESها استفاده می‌شوند [۳]. EES در ساعاتی که انرژی تولیدی RESها بیش از انرژی مصرفی است، EESها در مد شارژ فعالیت می‌کنند و مازاد این دو انرژی را در خود ذخیره می‌کند. اما آنها در ساعاتی که انرژی مصرفی بیش از انرژی تولیدی RESها باشد، در مد دشارژ کار می‌کند [۳]. در برخی مواقع به منظور افزایش ضریب اطمینان در تأمین انرژی در IHS، یک منبع انرژی تجدیدناپذیر^۵ (NRES) مانند دیزل ژنراتور در IHS استفاده می‌شود، تا در صورت عدم توانایی EESها و RESها در تأمین انرژی، آنها انرژی مصرفی باقی‌مانده را تأمین کنند [۴]. اما توجه شود که در نقاط مصرف، علاوه بر مصرف انرژی الکتریکی، مصرف انرژی حرارتی نیز وجود دارد. بنابراین در IHS نیاز به نصب منابع و ذخیره‌سازهای حرارتی است [۵]. یکی از راه‌کارها برای این موضوع در کنار افزایش بازدهی انرژی، حضور سیستم ترکیبی برق و حرارت^۶ (CHP) در کنار RESها و EESها است. CHPها همزمان قادر به تولید انرژی الکتریکی و حرارتی هستند. همچنین توان حرارتی CHP وابسته به توان اکتیو خودش است. از اینرو توان‌های اکتیو و حرارتی CHP براساس بار حرارتی تعیین می‌شوند، لذا قابلیت کنترل پذیری برای CHP حذف می‌شود [۵]. پیش‌بینی می‌شود که این موضوع منجر به کاهش ظرفیت منابع دوستدار محیط زیست مانند RESها در IHS شود. برای جبران این موضوع، ذخیره‌ساز انرژی حرارتی^۷ (TES) یا بویلر می‌تواند در کنار CHP استفاده شود.

در زمینه برنامه‌ریزی (طراحی ساختار بهینه) IHS کارها و تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. در [۶] برنامه‌ریزی IHS جهت تأمین انرژی الکتریکی پاک توسط منابع تجدیدپذیر، دیزل ژنراتور، باتری‌ها، پارکینگ خودروهای الکتریکی^۸ (EVها) انجام شده است. در ادامه از بهینه‌سازی استوار مبنی بر عدم قطعیت کراندار برای مدل-سازی عدم قطعیت‌ها استفاده شده است. چنین طرحی در [۷] نیز بیان شده است، ولی آن از بهینه‌سازی استوار تطبیقی مبنی بر الگوریتم تکاملی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها استفاده کرده است. در

[۶-۷] دیده شده است که برنامه‌ریزی IHS با در نظر گرفتن مدل عدم قطعیت‌ها قادر است تا حدود ۲۰٪ در برابر خطای پیش‌بینی عدم قطعیت‌های بار، توان تجدیدپذیر و انرژی مصرفی EVها دارای راه‌حل مقاوم باشد. در زمینه برنامه‌ریزی IHS تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. در [۸] نویسندگان اندازه بهینه‌ای برای IHS شامل توربین بادی^۹ (WT)، فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و باتری با توجه به کمینه‌سازی هزینه‌های نصب، تعمیر و بهره‌برداری آنها بدست آورده‌اند. مدل ارائه شده به‌صورت برنامه‌ریزی قطعی غیرخطی است، که برای حل آن از الگوریتم جستجوی هارمونی^{۱۰} (HSA) استفاده شده است. طرحی همانند [۶] نیز در [۷] در نظر گرفته شده است، با این تفاوت آن دارای WT نمی‌باشد و همچنین شاخص از دست رفتن تغذیه توان^{۱۱} (LNS) به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان IHS را هم در نظر گرفته است. در [۸] نیز یک ساختار بهینه IHS شامل PV، باتری و دیزل ژنراتور با در نظر گرفته کمینه‌سازی هزینه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری منابع و ذخیره‌سازهای مذکور در کنار کمینه‌سازی آلاینده‌های زیست محیطی پیشنهادی شده است، که آن نیز برای دستیابی به راه-حل بهینه از الگوریتم بهینه‌سازی گله فیل‌ها^{۱۲} (EHO) استفاده کرده است. در [۹] جهت تأمین بار AC یک منطقه مشخص از سیستم ترکیبی PV، دیزل ژنراتور، پیل سوختی، باتری و یا ذخیره‌ساز ابرخازنی با توجه به کمینه‌سازی هزینه برنامه‌ریزی و آلودگی استفاده شده است. همچنین امکان سنجی احداث سیستم ترکیبی PV/دیزل ژنراتور/باتری در مناطق مسکونی مستقر در نواحی بسیار سرد در [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. قابل توجه است که در [۶-۱۰] به منظور کمینه‌سازی آلودگی زیست محیطی الویت تأمین انرژی با RESها و ESSها است، و NRESها مانند پیل سوختی به عنوان 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 NRES تأمین می‌شود. بنابراین عملکرد منابع و ذخیره‌سازها با توجه به مازاد 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 [۱۱] طرح کلیدزنی اتوماتیک این عناصر با توجه به بار مصرفی و توان تولیدی RESها در ساعات مختلف بهره-برداری IHS مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۲] نیز قابلیت IHS شامل NRES، IHS شامل NRES و PV، و IHS شامل NRES، PV و باتری بررسی شده است. براساس [۱۲] مشاهده می‌شود که در مورد سوم توان دریافتی از NRES نسبت به دو مورد دیگر کمتر است، که نتیجه در کاهش آلودگی در مورد سوم است. علاوه بر این توجه شود که عموماً مدل‌سازی ریاضی که برای برنامه‌ریزی IHS شامل منابع و ذخیره‌سازهای مختلف ارائه شده است دارای قالب برنامه‌ریزی

غیرخطی^{۱۳} (NLP) و یا NLP عدد صحیح^{۱۴} (MINLP) است [۱۳].
که عموماً الگوریتم‌های تکاملی برای حل آن استفاده می‌شود.

بر اساس پیشینه تحقیق و جدول (۱)، شکاف‌های تحقیقاتی عمده زیر در زمینه برنامه‌ریزی IHS وجود دارد:

- در عموم تحقیقات مانند [۶-۱۵]، برنامه‌ریزی IHS متناسب با تأمین انرژی الکتریکی بوده است. ولی بایستی گفت که در نقاط مصرف مانند یک کارگاه صنعتی یا منطقه مسکونی دور از دسترس عموماً علاوه بر مصرف انرژی الکتریکی، مصرف انرژی حرارتی نیز وجود دارد. لذا برای داشتن برنامه‌ریزی مطمئن و دقیق IHS متناسب با شرایط واقعی نیاز است که در IHS تولیدکننده‌های الکتریکی و حرارتی به توانند همزمان مصرف-کننده‌های الکتریکی و حرارتی را تغذیه نمایند.

- در اکثر تحقیقات مانند [۶-۱۵]، مدل داری فرمول‌بندی منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازهای الکتریکی مانند باتری‌ها است. این عناصر تنها در تأمین انرژی الکتریکی نقش دارند. اما پیرو شکاف تحقیقاتی اول نیاز به تأمین انرژی حرارتی در IHS نیز است. یکی از منابعی که قادر به تولید انرژی حرارتی در کنار تولید انرژی الکتریکی با بازدهی بالا دارد، CHP می‌باشد. در صورت حضور تکی CHP در IHS، انتظار می‌رود که آن توانایی در کنترل توان اکتیو و حرارتی خود نداشته باشد. اما مدیریت انرژی مطلوب برای یک سیستم از دیدگاه اقتصادی، فنی و زیست محیطی در صورت کنترل‌پذیری عناصر آن سیستم قابل استخراج است. پیرو این موضوع، TES و بویلر می‌توانند در کنار CHP قرار گیرند، که در این شرایط منابع و ذخیره‌سازهای حرارتی دارای قابلیت کنترل‌پذیری توان خود هستند. ولی توجه شود که مدل-سازی منابع و ذخیره‌سازهای حرارتی در IHS در کمتر تحقیقاتی وجود دارد.

در این مقاله به منظور حذف شکاف‌های تحقیقاتی اول و دوم، برنامه‌ریزی IHS دوستدار محیط زیست متناسب با تأمین همزمان انرژی‌های الکتریکی و حرارتی دارای CHP، RES، EES، TES و بویلر ارائه می‌شود. طرح پیشنهادی در قالب بهینه‌سازی دو هدفه بیان می‌شود که تابع هدف آن برابر با کمینه‌سازی مجموع وزنده هزینه برنامه‌ریزی سالیانه و سطح آلاینده‌گی سالیانه IHS مذکور است. قیود مسئله شامل مدل برنامه‌ریزی-بهره‌برداری منابع و ذخیره‌سازهای مختلف متناسب با رعایت الویت‌بندی‌های متفاوت در تأمین انرژی توسط عناصر مذکور است. به‌طوری که الویت تأمین انرژی الکتریکی بر عهده RESها به علت دارا بودن سطح آلاینده‌گی پایین آنها است. همچنین الویت تأمین انرژی حرارتی با CHP به علت دارا بودن از بازدهی انرژی بالا است. عملکرد EES، TES و بویلر نیز جهت پرشدگی خلاء بین پروفیل توان مصرفی و پروفیل توان تولیدی توسط RESها و CHP است. در ادامه برای دستیابی به راه‌حل مصالحه ما بین اهداف اقتصادی و زیست محیطی، تکنیک تصمیم‌گیری فازی

استفاده می‌شود. همچنین در این مقاله از بهینه‌ساز گرگ خاکستری^{۱۵} (GWO) برای حل مسأله استفاده می‌شود. در نهایت نوآوری‌های طرح پیشنهادی به صورت زیر خلاصه‌بندی می‌شوند:

- برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی جزیره‌ای جهت تأمین همزمان انرژی‌های الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی و زیست محیطی،
- مدل‌سازی CHP در کنار منابع و ذخیره‌سازهای حرارتی علاوه بر فرمول‌بندی عملکرد RESها و EESها در IHS به منظور تأمین همزمان انرژی‌های الکتریکی و حرارتی با در نظر گرفتن افزایش بازدهی انرژی و افزایش قابلیت کنترل‌پذیری این عناصر در IHS. این مقاله بدین صورت سازمان‌دهی می‌شود: در بخش دوم عملکرد بهینه و فرمول‌بندی برنامه‌ریزی IHS ارائه می‌شود. در بخش سوم روند حل مسأله متناسب با الگوریتم GWO بیان می‌شود. نتایج عددی و نتیجه‌گیری‌ها در بخش‌های چهارم و پنجم ذکر می‌شوند.

۲- برنامه‌ریزی بهینه IHS

۲-۱- عملکرد بهینه IHS

در این بخش، بهره‌برداری بهینه IHS شامل انرژی الکتریکی و حرارتی مدل‌سازی می‌شود. ساختار طرح سیستم مذکور در شکل (۱) ترسیم شده است. بر اساس آن، IHS دارای یک باس الکتریکی AC و یک گره حرارتی است. سیستم بادی^{۱۶} (WS) و CHP مستقیماً به باس AC متصل هستند، و باتری (EES) و فتوولتائیک‌ها (PVها) از طریق اینورتر به این باس متصل می‌شوند. مجموع این منابع و ذخیره‌سازها در هر ساعت بهره‌برداری ملزم به تأمین بار AC هستند. در گره حرارتی، CHP، بویلر و TES جهت تغذیه بار حرارتی استفاده می‌شوند. قابل توجه است که در تحقیقات پیشین در زمینه IHS مانند [۶-۱۵] که فقط بهره‌برداری انرژی الکتریکی مد نظر بوده است، جهت تأمین انرژی پاک، الویت تغذیه بار بر عهده RESها بوده است. سپس EES و منبع انرژی تجدیدناپذیر (NRES) به عنوان پشتیبان در کنار RES قرار می‌گرفتند. اما توجه شود که در این طرح علاوه بر الکتریکی، بار حرارتی نیز وجود دارد. از آنجا که CHP به منظور بهبود راندمان تولید انرژی دارای دو خروجی الکتریکی و حرارتی است [۵]، لذا در این طرح، الویت تأمین بار حرارتی با CHP است. بنابراین در بخش الکتریکی، CHP و RESها وظیفه تغذیه بار AC را دارند. اما از آنجا که میزان توان تولیدی RESها وابسته شرایط آب و هوایی است، و میزان توان اکتیو تولید CHP نیز وابسته به بار حرارتی است، لذا این امکان وجود دارد که منحنی روزانه توان اکتیو مجموع این منابع همانند پروفیل روزانه بار AC نباشد [۵]. برای جبران این موضوع، باتری در این طرح استفاده می‌شود. به‌طوری که در ساعاتی که تولید انرژی مجموع RESها و CHP بیش از میزان انرژی مصرفی بار AC باشد، باتری مازاد انرژی را در خود ذخیره می‌کند. همچنین در ساعاتی که انرژی تولیدی منابع مذکور کمتر از انرژی بار AC باشد، باتری در

هدف آن شامل کمینه‌سازی هزینه برنامه‌ریزی و سطح آلاینده‌گی است، و این مسأله مقید به مدل منابع و ذخیره‌سازهای مختلف با رعایت شروط ۱-۵ است.

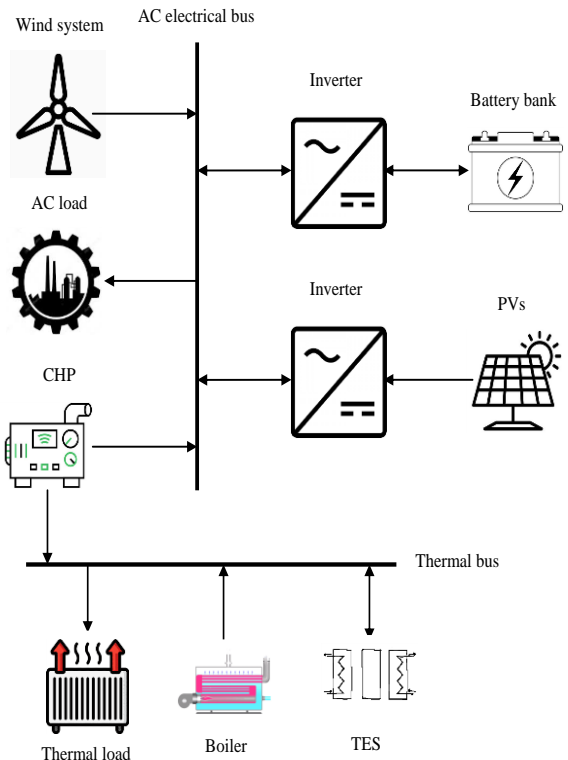
الف) توابع هدف: در طرح پیشنهادی هدف دستیابی به یک IHS دارای هزینه برنامه‌ریزی پایین و انرژی پاک است. لذا مسأله مذکور دارای تابع هدفی (F) همانند رابطه (۱) به صورت کمینه‌سازی مجموع وزندار هزینه برنامه‌ریزی سالیانه منابع و ذخیره‌سازها در قالب IHS ($PlanCo$) بر حسب $[\$/year]$ ، و سطح آلاینده‌گی سالیانه IHS (PoL) بر حسب کیلو گرم (kg) [۱۷] است. پارامترهای ω_{PlanCo} و ω_{PoL} معرف ضرایب وزنی هستند که مجموع آنها بایستی برابر ۱ باشد [۱۸]. در رابطه (۲) فرمول‌بندی $PlanCo$ بیان شده است. آن برابر با مجموع هزینه احداث (سطر اول رابطه ۲)، تعمیر و نگهداری (سطر دوم رابطه ۲)، و بهره‌برداری (سطر سوم رابطه ۲) عناصر یاد شده است [۷]. به‌طوری که پارامترهای $InvC_{pv}$ (MaC_{pv})، $InvC_w$ (MaC_w)، $InvC_{inv}$ (MaC_{inv})، $InvC_{bat}$ (MaC_{bat})، $InvC_{tes}$ (MaC_{tes}) به ترتیب معرف هزینه احداث (تعمیر و نگهداری) سالیانه PV، WS، باتری، اینورتر و TES هستند، که بر حسب $\$/year$ می‌باشند. همچنین $InvC_{chp}$ (MaC_{chp}) و $InvC_{bo}$ (MaC_{bo}) معرف هزینه احداث (تعمیر و نگهداری) سالیانه CHP و بویلر هستند، که بر حسب $\$/kW/year$ بیان می‌شوند. متغیرهای N_{inv} ، N_{bat} ، N_w ، N_{pv} ، N_{tes} ، H_{bo}^{max} ، P_{chp}^{max} ، $OprC_{bo}$ و $OprC_{chp}$ به ترتیب معرف تعداد PVها، تعداد WSها، تعداد باتری‌ها، تعداد اینورترها، تعداد TESها، اندازه (ظرفیت) CHP، ظرفیت بویلر، هزینه بهره‌برداری سالیانه CHP و بویلر هستند. H_{bo}^{max} و P_{chp}^{max} بر حسب kW هستند، و $OprC_{bo}$ بر حسب $\$/year$ می‌باشند. علاوه بر این، فرمول‌بندی سطح آلاینده‌گی سالیانه IHS (PoL) به عنوان تابع هدف دوم در رابطه (۳) ارائه شده است [۱۷]. در طرح پیشنهادی، CHP و بویلر مصرف‌کننده سوخت فسیلی هستند، از اینرو این منابع تولید کننده آلاینده‌گی در IHS خواهند بود [۱۷]. آنها قادر به تولید آلاینده‌گی‌های SO_2 ، NO_x و CO_2 هستند [۱۷]. لذا در رابطه (۳) کمینه‌سازی آلاینده‌گی‌های مذکور حاصل از CHP و بویلر لحاظ شده است. در این رابطه γ_{bo} و γ_{chp} معرف ضریب آلاینده‌گی CHP و بویلر هستند، که بر حسب kg/kW بیان می‌شوند. ضریب γ برابر مجموع ضرایب آلودگی حاصل از NO_x ، SO_2 و CO_2 است. پارامتر CF معرف ضریب همزمانی است، و متغیرهای H_{bo} و P_{chp} به ترتیب معرف توان اکتیو CHP و توان حرارتی بویلر هستند. اندیس h نیز معرف ساعت بهره‌برداری است. از آنجا که بهره‌برداری برای یک شبانه روز در این مقاله مفروض است، لذا h بین ۱ الی ۲۴ قابل تغییر است.

$$\min F = \omega_{PlanCo} PlanCo + \omega_{PoL} PoL \quad (1)$$

که:

مد دشارژ قرار می‌گیرد و کمبود انرژی را جبران می‌کند. در بخش حرارتی، الویت تأمین بار بر عهده CHP است. ولی CHP دارای آلاینده‌گی زیست محیطی و هزینه سوخت (بهره‌برداری) است. برای کاهش این موارد می‌توان از TES در کنار CHP استفاده کرد. در نهایت برای افزایش قابلیت اطمینان و ضریب اعتماد سیستم، استفاده از بویلر به عنوان یک منبع پشتیبان در بخش حرارتی نیز بسیار کمک کننده خواهد بود. بنابراین شروط عملکرد منابع و ذخیره‌سازها در طرح پیشنهادی جهت دستیابی به بهره‌برداری بهینه IHS به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- ۱- اگر توان حرارتی CHP بیش از بار حرارتی بود، مازاد توان در TES ذخیره می‌شود.
- ۲- اگر CHP توان کمتری از بار حرارتی را تولید کرد، TES در مد دشارژ کمبود توان را جبران می‌کند.
- ۳- چنانچه TES و CHP در شرط ۲ قادر به تغذیه کامل بار حرارتی نباشند، کمبود بار را بویلر تهیه می‌کند.
- ۴- در بخش الکتریکی، اگر مجموع توان اکتیو RESها و CHP بیش از میزان بار AC باشد، مازاد توان اکتیو در باتری ذخیره می‌شود.
- ۵- اگر مجموع توان اکتیو CHP و RESها کمتر از بار AC باشد، باتری کمبود توان را تهیه می‌کند.



شکل (۱): چارچوب پیشنهادی IHS

۲-۲- فرمول‌بندی برنامه‌ریزی IHS

به منظور دستیابی به اندازه بهینه برای منابع و ذخیره‌سازها در IHS، طرح پیشنهادی در قالب بهینه‌سازی دو هدفه مدل‌سازی می‌شود. توابع

توان تولیدی هر PV نیز برابر حاصل ضرب سطح PV (A_{pv}) بر حسب مترمربع (m^2)، راندمان PV (η_{pv}) و میزان تابش نور خورشید بر روی PV (R_{pv}) بر حسب (kW/m^2) است [۸].

$$P_{pv}(h) = N_{pv} \cdot A_{pv} \cdot \eta_{pv} \cdot R_{pv}(h) \quad (۶)$$

$$0 \leq N_{pv} \leq \bar{N}_{pv}, \quad N_{pv} : \text{Integer variable} \quad (۷)$$

ج) مدل WSها: مجموع توان اکتیو تولیدی WSهای مستقر در مزرعه بادی (P_w بر حسب kW) در ساعت h از رابطه (۸) محاسبه می‌شود [۹]. در این رابطه، متغیر عدد صحیح N_w معرف تعداد کل WSهای قابل نصب در IHS یا مزرعه بادی است. محدوده تغییرات آن در رابطه (۹) ارائه شده است، که پارامتر \bar{N}_w در این رابطه معرف حداکثر تعداد WS قابل احداث در IHS است. در رابطه (۸)، پارامترهای v ، v_{rate} ، v_{cut-in} و $v_{cut-out}$ به ترتیب معرف سرعت باد برخورد شده به پره‌های WS، سرعت بادی نامی، سرعت باد آستانه^{۲۱} و سرعت باد قطع^{۲۲} هستند، که بر حسب متر بر ثانیه (m/s) بیان می‌شوند. P_{rate} بیانگر توان نامی WS است و بر حسب kW بیان می‌شود.

$$P_w(h) = \begin{cases} 0 & v(h) \leq v_{cut-in} \ \& \ v(t) \geq v_{cut-out} \\ N_w P_{rate} \frac{v(h) - v_{cut-in}}{v_{rate} - v_{cut-in}} & v_{cut-in} \leq v(h) \leq v_{rate} \\ N_w P_{rate} & v_{rate} \leq v(h) \leq v_{cut-out} \end{cases} \quad (۸)$$

$$0 \leq N_w \leq \bar{N}_w, \quad N_w : \text{Integer variable} \quad (۹)$$

د) فرمول‌بندی CHP: همانطور که در بخش ۲-۱ بیان شد، الویت تأمین بار حرارتی بر عهده CHP است. اما از آنجا که آن دارای هزینه بهره‌برداری است و عاملی در تولید آلودگی است، لذا TES برای جبران این موضوع در کنار CHP قرار گرفت [۵]. پیرو این موضوع، توان اکتیو CHP (P_{chp} بر حسب kW) در ساعت h به عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شود، که تعیین میزان بهینه آن متناسب با توابع هدف و قیود توسط حل‌کننده مسئله برآورد می‌شود. بنابراین یک محدوده مجاز تغییرات همانند رابطه (۱۰) برای آن در نظر گرفته می‌شود. در CHP، توان حرارتی (H_{chp} بر حسب kW) همانند رابطه (۱۱) ضریبی از توان اکتیو CHP است. در این رابطه، η_{heat} و η_{loss} به ترتیب راندمان توربین، تلفات و بخش حرارتی در CHP هستند [۵]. علاوه بر این موضوع، CHP دارای دو خروجی الکتریکی و حرارتی است. پس محدودیت عملکرد در CHP شامل این دو بخش خواهد بود. محدودیت عملکرد الکتریکی آن در قید (۱۰) بیان شد، و محدودیت عملکرد آن در بخش حرارتی به صورت قید (۱۲) است. این قید نیز اشاره به محدوده مجاز تغییرات توان حرارتی CHP است، و ضریب χ_{chp} بیانگر نسبت ظرفیت بخش حرارتی به ظرفیت بخش الکتریکی در CHP است. در قید (۱۳) نیز هزینه سالیانه سوخت (بهره‌برداری) CHP بیان شده است. پارامتر $FuelC_{chp}$ معرف قیمت سوخت مصرفی CHP (بر حسب \$/kWh) است [۵]، و ضرایب α و

$$\begin{aligned} PlanCo = & InvC_{pv} N_{pv} + InvC_w N_w + InvC_{bat} N_{bat} \\ & + InvC_{inv} N_{inv} + InvC_{tes} N_{tes} + InvC_{chp} P_{chp}^{max} + \\ & InvC_{bo} H_{bo}^{max} + MaC_{pv} N_{pv} + MaC_w N_w + \\ & MaC_{bat} N_{bat} + MaC_{inv} N_{inv} + MaC_{tes} N_{tes} + \\ & MaC_{chp} P_{chp}^{max} + MaC_{bo} H_{bo}^{max} + OprC_{chp} + \\ & OprC_{bo} \end{aligned} \quad (۲)$$

$$PoL = 365 \times CF \times \sum_{h=1}^{24} (\gamma_{chp} P_{chp}(h) + \gamma_{bo} H_{bo}(h)) \quad (۳)$$

به ازای مقادیر مختلف ضرایب وزنی ω_{PlanCo} و ω_{PoL} (به‌طوری که مجموع آنها برابر ۱ باشد)، مقادیر متفاوتی برای $PlanCo$ و PoL بدست خواهد آمد. با رسم نقاط بدست آمد در یک مختصات دو بعدی، جبهه پارتو طرح پیشنهادی قابل نمایش است. در ادامه جهت دستیابی به یک نقطه بهینه تحت عنوان راه‌حل مصالحه مابین دو تابع هدف ذکر شده از تکنیک تصمیم‌گیری فازی^{۱۷} (FDT) استفاده می‌شود [۵]. در این روش، ابتدا تابع عضویت خطی (\hat{g}) همانند رابطه (۴) برای هر تابع هدف به ازای هر نقطه جبهه پارتو (m) محاسبه می‌شود. در این رابطه n_{ParFr} برابر تعداد کل نقاط جبهه پارتو است. پارامترهای \underline{g} و \bar{g} نیز معرف حداقل و حداکثر مقدار یک تابع هدف هستند. این مقادیر برای توابع هدف $PlanCo$ و PoL از دو مورد مطالعاتی با ضرایب وزنی $\omega_{PlanCo} = 1$ و $\omega_{PoL} = 1$ قابل محاسبه است. در قدم بعدی از FDT، کمینه مقدار \hat{g} بین توابع هدف مختلف به ازای هر نقطه جبهه پارتو یا m تعیین می‌گردد، که آن به صورت Λ نمایش داده می‌شود. راه مصالحه متناظر با نقطه‌ای از جبهه پارتو دارای بیشینه مقدار Λ است [۵].

$$\hat{g}_{i,m} = \begin{cases} 1 & g_{i,m} \leq \underline{g}_i \\ \frac{g_{i,q} - \bar{g}_i}{\underline{g}_i - \bar{g}_i} & \underline{g}_i \leq g_{i,q} \leq \bar{g}_i \\ \frac{g_{i,m} - \bar{g}_i}{\underline{g}_i - \bar{g}_i} & g_{i,m} \geq \bar{g}_i \\ 0 & \end{cases} \quad \forall i = PlanCo, PoL \quad m \in \{1, 2, \dots, n_{ParFr}\} \quad (۴)$$

هزینه احداث سالیانه یک منبع، ذخیره‌ساز یا اینورتر در رابطه (۲) متناسب با حاصل ضرب هزینه کل ظرفیت^{۱۸} (TCC) این عنصر و ضریب بازیابی ظرفیت^{۱۹} (CFR) خواهد بود. این مورد در رابطه (۵) فرمول‌بندی شده است. پارامترهای ρ و n در این رابطه بیانگر نرخ بهره^{۲۰} و عمر مفید عنصر است [۷].

$$InvC = \frac{\rho(1+\rho)^n}{(1+\rho)^n - 1} TCC \quad (۵)$$

ب) مدل PVها: توان اکتیو تولیدی مزرعه PV (P_{pv}) بر حسب kW) در ساعت h از رابطه (۶) قابل محاسبه است [۸]. در این رابطه، N_{pv} معرف تعداد PVهای قابل نصب در مزرعه مذکور است. آن همانند رابطه (۷) به صورت یک متغیر عدد صحیح است، که می‌تواند بین صفر و \bar{N}_{pv} (معرف حداکثر تعداد PVهای قابل نصب در IHS) تغییر کند.

$$0 \leq N_{tes} \leq \bar{N}_{tes}, \quad N_{tes} : \text{Integer variable} \quad (18)$$

و) بویلر: بویلر در IHS پیشنهادی به عنوان منبع پشتیبان در بخش حرارتی استفاده می‌شود، و عملکرد آن متناسب با شرط ۳ در بخش ۱-۲ است. براساس این شرط، چنانچه CHP و TESها در ساعت h قادر به تغذیه کامل بار حرارتی نباشند، یعنی $H_{chp}(h) + H_{dch}(h) \leq H_{load}(h)$ بویلر کمبود بار را تأمین می‌کند، در غیر این صورت آن خاموش است. بنابراین توان حرارتی آن (H_{bo}) بر حسب (kW) براساس رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود. در این رابطه H_{dch} (بر حسب kW) معرف توان حرارتی TESها در مد دشارژ است. آن در شرط ۲ برای ساعت h برابر $H_{load}(h) - H_{chp}(h)$ است. در شرط ۳، مقدار آن برابر $E_{tes}(h) - N_{tes} \bar{E}_{tes}$ است. زیرا که براساس قید (۱۷)، TESها نمی‌تواند انرژی کمتر از $N_{tes} \bar{E}_{tes}$ داشته باشد. پس اگر CHP و TESها قادر به تأمین کامل بار نباشند، یعنی که اینکه فاصله انرژی TESها در ساعت h نسبت به حداقل میزان آن، $E_{tes}(h) - N_{tes} \bar{E}_{tes}$ پایین است. لذا $H_{dch}(h)$ در شرط ۳ برابر $E_{tes}(h) - N_{tes} \bar{E}_{tes}$ خواهد بود. علاوه بر این موضوع در قید (۲۰) محدوده تغییرات توان حرارتی بویلر (محدودیت ظرفیت خروجی بویلر) مدل‌سازی شده است. در رابطه (۲۱)، هزینه سالیانه سوخت (بهره‌برداری) بویلر فرمول‌بندی شده است. در این رابطه، پارامتر $FuelC_{bo}$ برابر قیمت سوخت مصرفی بویلر است که بر حسب \$/kWh بیان می‌شود. ثابت‌های α_{bo} و β_{bo} بیانگر ضرایب منحنی سوخت مصرفی بویلر است. در نهایت محدودیت اندازه یا ظرفیت بویلر در رابطه (۲۲) مدل‌سازی شده است، که پارامتر \bar{H}_{bo} معرف حداکثر اندازه قابل نصب بویلر در IHS است.

$$H_{bo}(h) = H_{load}(h) - H_{chp}(h) - H_{dch}(h), \quad (19)$$

$$\text{if } H_{chp}(h) + H_{dch}(h) \leq H_{load}(h)$$

$$0 \leq H_{bo}(h) \leq H_{bo}^{\max} \quad (20)$$

$$OprC_{bo} = 365 \times CF \times \sum_{h=1}^{24} FuelC_{bo} \times \left(\alpha_{bo} H_{bo}^{\max} + \beta_{bo} H_{bo}(h) \right) \quad (21)$$

$$0 \leq H_{bo}^{\max} \leq \bar{H}_{bo} \quad (22)$$

ز) باتری: عملکرد باتری‌ها متناسب با شروط ۴ و ۵ در بخش ۲-۱ است. به طوری که اگر مجموع توان تولیدی RESها و CHP در ساعت h بیش از بار AC (P_{load} بر حسب kW) باشد، را در خود ذخیره می‌کنند. در این صورت، انرژی ذخیره شده در باتری‌ها برای ساعت h ($E_{bat}(h)$) نسبت به انرژی ذخیره شده در ساعت قبل ($E_{bat}(h-1)$) همانند رابطه (۲۳) به اندازه $\eta_{bat}^{CH} \times \eta_{inv} (P_{chp}(h) + P_w(h) + P_{pv}(h) - P_{load}(h))$ افزایش می‌یابد [۷]. در این رابطه، η_{inv}^{CH} و η_{bat}^{CH} به ترتیب معرف راندمان باتری در مد شارژ و راندمان اینورتر هستند. رابطه (۲۴) متناسب با شرط ۵ است. به عبارتی، اگر CHP و RES قادر به تأمین بار AC در ساعت h نباشند،

β_{chp} بیانگر ضرایب منحنی سوخت مصرفی CHP هستند. در نهایت محدودیت اندازه (ظرفیت) CHP در قید (۱۴) ارائه شده است، که \bar{P}_{chp} برابر حداکثر اندازه قابل نصب برای CHP (بر حسب kW) است.

$$0 \leq P_{chp}(h) \leq P_{chp}^{\max} \quad (10)$$

$$H_{chp}(h) = \frac{(1 - \eta_{to} - \eta_{loss}) \cdot \eta_{heat}}{\eta_{to}} \times P_{chp}(h) \quad (11)$$

$$0 \leq H_{chp}(h) \leq \chi_{chp} P_{chp}^{\max} \quad (12)$$

$$OprC_{chp} = 365 \times CF \times \sum_{h=1}^{24} FuelC_{chp} \times \left(\alpha_{chp} P_{chp}^{\max} + \beta_{chp} P_{chp}(h) \right) \quad (13)$$

$$0 \leq P_{chp}^{\max} \leq \bar{P}_{chp} \quad (14)$$

ه) فرمول‌بندی TESها: عملکرد TESها متناسب با شروط ۱ و ۲ در بخش ۱-۲ است. متناسب با شرط ۱، اگر توان حرارتی CHP در ساعت h بیش از بار حرارتی (H_{load} بر حسب kW) باشد، یعنی $H_{chp}(h) > H_{load}(h)$ شرایط، آنها مازاد توان، $H_{chp}(h) - H_{load}(h)$ را در خود ذخیره می‌کند. بنابراین انرژی ذخیره شده در TESها در ساعت h ($E_{tes}(h)$) بر حسب (kWh) نسبت به انرژی ذخیره شده در ساعت قبل ($E_{tes}(h-1)$) همانند رابطه (۱۵) به اندازه $\eta_{tes}^{CH} \times (H_{chp}(h) - H_{load}(h))$ افزایش می‌یابد، که η_{tes}^{CH} معرف راندمان TES در مد شارژ است [۵]. علاوه بر این، اگر CHP قادر به تأمین بار حرارتی نباشد، یعنی $H_{chp}(h) \leq H_{load}(h)$ TESها براساس شرط ۲ در مد دشارژ قرار می‌گیرد. لذا متناسب با رابطه (۱۶)، E_{tes} در ساعت h نسبت به ساعت قبل ($h-1$) به اندازه $\frac{1}{\eta_{tes}^{DCH}} \times (H_{load}(h) - H_{chp}(h))$ کاهش می‌یابد، که پارامتر η_{tes}^{DCH} معرف راندمان TES در مد دشارژ می‌باشد. در این روابط، پارامتر ξ معرف نرخ دشارژ ساعتی است. در ادامه محدودیت انرژی ذخیره شده در TES مبنی بر قید (۱۷) است [۵]. در این قید، پارامترهای \bar{E}_{tes} و E_{tes} به ترتیب معرف حداقل و حداکثر انرژی قابل ذخیره در یک TES است. در این رابطه، متغیر عدد صحیح N_{tes} بیانگر تعداد TESهای نصب شده در IHS است، که محدودیت آن در قید (۱۸) ارائه شده است. حداکثر تعداد TESهای قابل نصب در IHS با \bar{N}_{tes} در رابطه (۱۸) نمایش داده شده است.

$$E_{tes}(h) = (1 - \xi) \times E_{tes}(h-1) + \eta_{tes}^{CH} \times (H_{chp}(h) - H_{load}(h)), \quad (15)$$

$$\text{if } H_{chp}(h) > H_{load}(h)$$

$$E_{tes}(h) = (1 - \xi) \times E_{tes}(h-1) - \frac{1}{\eta_{tes}^{DCH}} \times (H_{load}(h) - H_{chp}(h)), \quad (16)$$

$$\text{if } H_{chp}(h) \leq H_{load}(h)$$

$$N_{tes} \bar{E}_{tes} \leq E_{tes}(h) \leq N_{tes} \bar{E}_{tes} \quad (17)$$

$$N_{inv-bat} = \left\lceil \frac{\max(P_{bat})}{P_{up}} \right\rceil + 1, \quad \forall P_{bat}(h) = E_{bat}(h) - E_{bat}(h-1) \quad (29)$$

۳- روند حل

فرمول‌بندی ارائه شده در بخش ۲-۲ یک مسأله مهندسی پیچیده دارای قالب برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح (MINLP) است. در این بخش جهت حل آن از GWO [۱۸] استفاده می‌شود. براساس [۱۸]، این الگوریتم دارای قابلیت مناسبی در دستیابی به راه‌حل بهینه دقیق در زمان محاسباتی پایین برای مسأله پیچیده مهندسی است. در ادامه برای حل مسأله پیشنهادی، (۱)-(۳) و (۵)-(۲۶)، به ازای یک مقدار مشخص ضرایب وزنی و $OpPlanCo$ و $OpPoL$ ، ابتدا N (معرف اندازه جمعیت) مقدار تصادفی برای متغیرهای تصمیم‌گیری براساس محدوده تغییرات آنها تولید می‌شود. در طرح پیشنهادی، N_{pv} ، N_w ، N_{bat} ، N_{tes} ، P_{chp}^{max} ، H_{bo}^{max} و P_{chp} به عنوان متغیر تصمیم‌گیری شناخته می‌شوند که محدوده تغییرات آنها به ترتیب در قیود (۷)، (۹)، (۲۶)، (۱۸)، (۱۴)، (۲۲) و (۱۰) بیان شده است. سپس میزان متغیرهای وابسته از قبیل $PlanCo$ ، PoL ، P_{pv} ، P_w ، H_{chp} ، $OpPrC_{chp}$ ، E_{tes} ، H_{dch} ، H_{bo} ، E_{tes} ، $OpPrC_{bo}$ ، E_{bat} ، N_{inv} ، N_{inv-pv} و $N_{inv-bat}$ با توجه به قیود (۲)-(۳)، (۶)، (۸)، (۱۱)، (۱۳)، (۱۵)-(۱۶)، (۱۹)، (۲۱)، (۲۳)-(۲۴) و (۲۷)-(۲۹) براساس مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری محاسبه می‌شود. در ادامه جهت رعایت محدودیت‌های توان حرارتی خروجی CHP و بویلر، (۱۲) و (۲۰)، و محدودیت‌های انرژی ذخیره شده در TESها و باتری-ها، (۱۷) و (۲۵)، از روش تابع جریمه استفاده می‌شود [۷]. در این روش، تابع برازندگی FF (۳۳) همانند رابطه (۳۰) برابر مجموع تابع هدف F و مجموع توابع جریمه PeF (۳۴) حاصل از قیود (۱۲)، (۱۷)، (۲۰) و (۲۵) است. تابع جریمه نیز برای محدودیت $x \leq y$ به صورت $\mu \cdot \max(0, x - y)$ بیان می‌شود. متغیر $\mu \geq 0$ به عنوان ضریب لاگرانژ شناخته می‌شود که آن نیز به عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری شناخته می‌شود [۶]. پس برای آن نیز N مقدار تصادفی در این مرحله تولید می‌شود. در نهایت PeF براساس رابطه (۳۱) قابل محاسبه است.

$$FF = F + PeF \quad (30)$$

$$PeF = \sum_{h=1}^{24} \left(\bar{\mu}_{chp}(h) \cdot \max(0, H_{chp}(h) - \chi_{chp} P_{chp}^{max}) + \underline{\mu}_{chp}(h) \cdot \max(0, -H_{chp}(h)) \right) + \sum_{h=1}^{24} \left(\bar{\mu}_{bo}(h) \cdot \max(0, H_{bo}(h) - H_{bo}^{max}) + \underline{\mu}_{bo}(h) \cdot \max(0, -H_{bo}(h)) \right) + \sum_{h=1}^{24} \left(\bar{\mu}_{tes}(h) \cdot \max(0, E_{tes}(h) - N_{tes} \bar{E}_{tes}) + \underline{\mu}_{tes}(h) \cdot \max(0, N_{tes} E_{tes} - E_{tes}(h)) \right) + \sum_{h=1}^{24} \left(\bar{\mu}_{bat}(h) \cdot \max(0, E_{bat}(h) - N_{bat} \bar{E}_{bat}) + \underline{\mu}_{bat}(h) \cdot \max(0, N_{bat} \underline{E}_{bat} - E_{bat}(h)) \right) \quad (31)$$

باتری‌های در مد دشارژ قرار می‌گیرند و کمبود بار را جبران می‌کنند. در این صورت E_{bat} در ساعت h نسبت به ساعت قبل $(h-1)$ به اندازه $\frac{1}{\eta_{bat}^{DCH} \times \eta_{inv}} \times (P_{load}(h) - P_{chp}(h) - P_w(h) - P_{pv}(h))$ می‌یابد [۸]. بیانگر راندمان باتری در مد دشارژ است. توان RES، CHPها و بار AC از طریق اینورتر همانند شکل (۱) به‌از باتری‌ها داده/دریافت می‌شوند. لذا در روابط (۲۳) و (۲۴)، عبارت η_{inv} ظاهر خواهد شد. در ادامه محدودیت انرژی ذخیره شده در باتری‌ها متناسب با قید (۲۵) است. در این قید، پارامترهای \bar{E}_{bat} و \underline{E}_{bat} به ترتیب معرف حداقل و حداکثر انرژی قابل ذخیره در یک باتری است. در این رابطه، متغیر عدد صحیح N_{bat} برابر تعداد باتری‌های نصب شده در IHS است که دارای محدودیتی همانند قید (۲۶) است. ثابت \bar{N}_{bat} در این قید بیانگر حداکثر تعداد باتری قابل نصب در IHS است.

$$E_{bat}(h) = (1 - \xi) \times E_{bat}(h-1) + \eta_{bat}^{CH} \times \eta_{inv} (P_{chp}(h) + P_w(h) + P_{pv}(h) - P_{load}(h)), \quad \text{if } P_{chp}(h) + P_w(h) + P_{pv}(h) > P_{load}(h) \quad (23)$$

$$E_{bat}(h) = (1 - \xi) \times E_{bat}(h-1) - \frac{1}{\eta_{bat}^{DCH} \times \eta_{inv}} \times (P_{load}(h) - P_{chp}(h) - P_w(h) - P_{pv}(h)), \quad \text{if } P_{chp}(h) + P_w(h) + P_{pv}(h) \leq P_{load}(h) \quad (24)$$

$$N_{bat} \underline{E}_{bat} \leq E_{bat}(h) \leq N_{bat} \bar{E}_{bat} \quad (25)$$

$$0 \leq N_{bat} \leq \bar{N}_{bat}, \quad N_{bat} : \text{Integer variable} \quad (26)$$

ر اینورتر: براساس شکل (۱)، PVها و باتری‌های توسط اینورتر به باس AC متصل می‌شوند. بنابراین تعداد کل اینورترها (N_{inv}) همانند رابطه (۲۷) برابر تعداد اینورترهای لازم برای PVها (N_{inv-pv}) و تعداد اینورترهای لازم برای باتری‌ها ($N_{inv-bat}$) است. قابل توجه است که مجموع اینورترهای استفاده شده برای یک عنصر بایستی بتواند حداکثر توان عبوری از آن عنصر را تحمل کند. به عنوان مثال، مجموع اینورترهای مزرعه PV بایستی بتوانند حداکثر مقدار P_{pv} را از خود عبور دهند. لذا با فرض اینکه توان مجاز (قابل تحمل) یک اینورتر برابر P_{up} است، پس تعداد اینورترهای لازم برای مزرعه PV و بانک باتری به ترتیب از روابط (۲۸) و (۲۹) قابل محاسبه هستند [۸]. در این روابط، عبارت $[f]$ معرف مقدار برکت عدد f است، که برابر کوچکترین عدد صحیح نزدیک به عدد f است. در رابطه (۲۹)، $N_{inv-bat}$ براساس حداکثر توان بانک باتری تعیین می‌شود. توان باتری در ساعت h ($P_{bat}(h)$) نیز برابر متفاوت انرژی ذخیره شده باتری‌های در ساعات h و ما قبل آن $(h-1)$ است.

$$N_{inv} = N_{inv-pv} + N_{inv-bat} \quad (27)$$

$$N_{inv-pv} = \left\lceil \frac{\max(P_{pv})}{P_{up}} \right\rceil + 1 \quad (28)$$

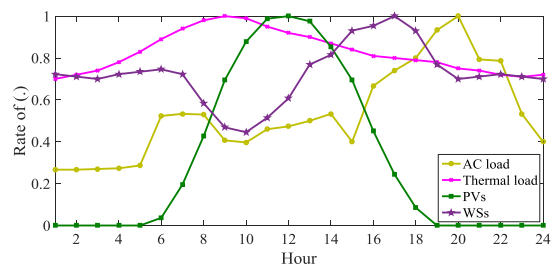
η_{pv} (%)	۱۲
\bar{N}_{pv}	۱۵
TCC_{pv} (\$)	۶۱۴
MaC_{pv} (\$/year)	۰
عمر مفید (سال)	۲۰
داده باتری	
\bar{E}_{bat} (kWh)	۱۳۵
\bar{E}_{bat} (kWh)	۰/۱۵
$\eta_{bat}^{CH} / \eta_{bat}^{DCH}$ (%)	۹۰
ξ	۰/۰۰۰۲
\bar{N}_{bat}	۲۵
TCC_{bat} (\$)	۱۳۰
MaC_{bat} (\$/year)	۰
عمر مفید (سال)	۵
داده WS	
P_{rate} (kW)	۱
v_{cut-in} (m/s)	۲/۵
v_{rate} (m/s)	۱۰
$v_{cut-out}$ (m/s)	۱۳
حداکثر سرعت (m/s)	۸/۷
\bar{N}_w	۱۵
TCC_w (\$)	۳۲۰۰
MaC_w (\$/year)	۵
عمر مفید (سال)	۲۰
داده CHP	
η_{no} (%)	۳۸
η_{loss} (%)	۵
η_{heat} (%)	۳۸
χ_{chp}	۰/۵۷
$FuelC_{chp}$ (\$/l)	۱/۲۴
α_{chp} (l/kWh)	۰/۲۴۶
β_{chp} (l/kWh)	۰/۰۸۴۵
γ_{chp} (kg/kW)	۳/۲۵
\bar{P}_{chp} (kW)	۸
TCC_{chp} (\$/kW)	۹۰/۱۶۵
MaC_{chp} (\$/kW/year)	۴
عمر مفید (سال)	۲۰
داده بویلر:	
$FuelC_{bo}$ (\$/l)	۱/۸۷
α_{bo} (l/kWh)	۰/۳۱۶
β_{bo} (l/kWh)	۰/۰۹۷۴
γ_{bo} (kg/kW)	۵/۸۲
\bar{H}_{bo} (kW)	۰/۵
TCC_{bo} (\$/kW)	۷۲۳/۱۲
MaC_{bo} (\$/kW/year)	۲/۷
عمر مفید (سال)	۲۰
داده TES	
\bar{E}_{tes} (kWh)	۱/۵

قدم بعدی تعیین بهینه‌ترین مقدار تابع برازندگی است که آن براساس رابطه (۱) برابر با کمینه‌ترین مقدار FF در بین N مقدار محاسبه شده است. قابل توجه است که تا این بخش (تولید مقدار تصادفی برای متغیرهای تصمیم‌گیری تا محاسبه کمینه مقدار FF) به عنوان مرحله اولیه شناخته می‌شود. در مراحل بعد، بهنگام‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری توسط الگوریتم GWO اجراء می‌شود. ابتدا میزان متغیرهای تصمیم‌گیری براساس بهینه‌ترین مقدار FF در مرحله پیشین توسط GWO بهنگام‌سازی می‌شود. سپس جدیدترین میزان متغیرهای وابسته و کمینه‌ترین مقدار تابع برازندگی همانند مرحله اولیه محاسبه می‌شوند. این روند بهنگام‌سازی تا همگرایی مسأله ادامه می‌یابد. در این بخش فرض بر این است که همگرایی بعد از حداکثر تکرار بهنگام‌سازی $Iter_{max}$ قابل استخراج است.

۴- نتایج عددی

۴-۱- مورد مطالعاتی

مسأله پیشنهادی بر روی IHS به صورت شکل (۱) متناظر با داده‌های شهر رفسنجان، ایران اعمال می‌گردد. این سیستم دارای پیک بار AC و حرارتی به ترتیب برابر با ۱۵ kW و ۴ kW است. میزان بارهای مذکور در ساعات مختلف برابر با حاصل ضرب پیک بار و منحنی روزانه ضریب بار است. این منحنی برای بارهای حرارتی و الکتریکی در شکل (۲) نمایان شده است. این منطقه دارای حداکثر سرعت باد (تابش نور خورشید بر روی پنل PV یا R_{pv}) برابر با ۸/۷ m/s ($0/82 \text{ kW/m}^2$) است. میزان سرعت باد و تابش نور خورشید در هر ساعت برابر با پیک این پارامترها و منحنی روزانه نرخ آنها است. منحنی روزانه نرخ سرعت باد WS و نرخ تابش نور خورشید بر روی PV در شکل (۲) رسم شده است. مشخصات IHS از قبیل داده‌های برنامه‌ریزی و بهره‌برداری WS، PV، باتری، TES، CHP و بویلر در جدول (۱) ارائه شده است.



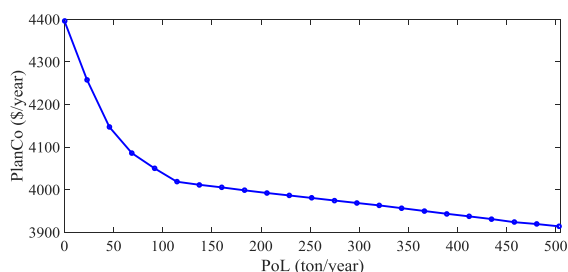
شکل (۲): منحنی روزانه ضریب بار الکتریکی و حرارتی، نرخ سرعت

باد، نرخ تابش نور خورشید [۸]

جدول (۱): داده‌های منابع و ذخیره‌سازها [۶-۹]

نرخ بهره (p) بر حسب %	۱۰
پیک بار الکتریکی (kW)	۱۵
پیک بار حرارتی (kW)	۴
ضریب همزمانی (CF) بر حسب %	۷۰
داده PV (شامل حداکثر توان ۱۲۰ وات)	
حداکثر R_{pv} (kW/m^2)	۰/۸۲
A_{pv} (m^2)	۱/۰۷

انتخاب شده است. همچنین برای محاسبه انحراف معیار σ (StD) پاسخ‌دهی نهایی (نقطه بهینه حاصل شده در تکرار ۴۰۰۰)، هر حل-کننده مسأله پیشنهادی را ۲۰ بار حل می‌کند. براساس نتایج گزارش شده در جدول (۲) می‌توان بیان کرد که الگوریتم GWO نسبت به دیگر الگوریتم‌ها توانسته است که بهینه‌ترین راه‌حل (دارای کمینه‌ترین مقدار PlanCo و PoL) را در کمترین تکرار همگرایی (تکرار ۸۶۷) متناظر با زمان محاسباتی پایین‌تر (۲۱۴/۳ ثانیه) بدست آورد. همچنین StD آن نسبت به دیگر الگوریتم‌های یاد شده کمترین مقدار یعنی ۰/۹۶٪ را دارد. بنابراین الگوریتم GWO دقیق‌ترین پاسخ (راه‌حل دارای وضعیت بهینه‌تر و StD پایین‌تر) را با سرعت همگرایی بالایی (کمترین تکرار و زمان همگرایی) نسبت به دیگر حل‌کننده‌ها بدست می‌آورد. علاوه بر این، در نقطه مصالحه، توابع PlanCo و PoL از کمینه‌ترین مقدار خود فاصله پایینی دارند. PlanCo در حدود ۰/۲۰٪ (۴۸۰) ÷ (۳۹۲۰ - ۴۰۱۸/۶) از نقطه کمینه خود فاصله دارد. آن برای PoL در حدود ۰/۲۲٪ است.



شکل (۳): جبهه پارتو طرح پیشنهادی

(ب) ارزیابی وضعیت اقتصادی و زیست محیطی در برنامه-ریزی بهینه IHS: در این بخش جهت بررسی قابلیت طرح پیشنهادی، چهار مورد مطالعاتی به شرح زیر اجراء می‌شود:

- مورد مطالعاتی I: شامل PV، WS و باتری
- مورد مطالعاتی II: شامل PV، WS، باتری و CHP
- مورد مطالعاتی III: شامل PV، WS، باتری، CHP و TES
- مورد مطالعاتی IV: شامل PV، WS، باتری، CHP، TES و بویلر

مورد I همانند طرح پیشنهاد شده در بسیاری از تحقیقات در زمینه IHS مانند [۶-۱۵] است، که تنها تأمین انرژی الکتریکی را در نظر می‌گیرد. اما در موارد II الی IV، تأمین همزمان انرژی‌های الکتریکی و حرارتی مد نظر است. نتایج برنامه‌ریزی منابع و ذخیره-سازهای مختلف در قالب IHS در جدول (۳) ارائه شده است. براساس این جدول، در مورد I، تعداد WSها و PVها بیشترین است، زیرا که آنها تنها وظیفه تأمین انرژی الکتریکی را دارند. در این شرایط تعداد EESها یا باتری‌ها برابر ۱۹ است. اما با اضافه شدن منابع و ذخیره-سازهای حرارتی به مورد I، موارد II الی IV، تعداد منابع تجدیدپذیر کاهش می‌یابد. زیرا که CHP مجبور به تأمین بخشی از بار حرارتی است، و از آنجا که توان اکتیو و حرارتی CHP با یکدیگر رابطه مستقیمی دارند، پس CHP نیز در موارد II الی IV در تأمین بار

E_{tes} (kWh)	۰/۱۵
η_{tes}^{DCH} (%) / η_{tes}^{CH}	۷۸
ξ	۰/۰۰۰۲
\bar{N}_{tes}	۵
TCC_{tes} (\$)	۲۱۰
MaC_{tes} (\$/year)	۱/۶
عمر مفید (سال)	۱۰
داده اینورتر	
P_{up} (kW)	۳
η_{inv} (%)	۹۵
TCC_{inv} (\$)	۲۰۰۰
MaC_{inv} (\$/year)	۰
عمر مفید (سال)	۱۰

۴-۲- نتایج

طرح پیشنهادی متناسب با داده‌های ارائه شده در بخش پیشین همراه با الگوریتم حل در محیط نرم افزار MATLAB کدنویسی و شبیه-سازی شده است. در ادامه نتایج عددی حاصل از موارد مطالعاتی مختلف ارائه می‌شود.

(الف) تعیین راه‌حل مصالحه بین اهداف اقتصادی و زیست محیطی IHS: جبهه پارتو برای طرح پیشنهادی، (۱)-(۲۹)، در شکل (۳) نمایان شده است. با حرکت از سمت چپ به سمت راست این شکل، ω_{PlanCo} از ۱ (صفر) با گام ۰/۰۵ کاهش (افزایش) می-یابد. براساس این شکل مشاهده می‌شود که PlanCo دارای حداقل و حداکثر مقدار به ترتیب در حدود \$/year ۳۹۲۰ و \$/year ۴۴۰۰ است. این مقادیر برای PoL به ترتیب در حوالی صفر و ۵۰۶ ton/year می‌باشد. بنابراین دامنه تغییرات (ماتفاوت حداکثر و حداقل) برای PlanCo و PoL به ترتیب برابر \$/year ۴۸۰ و ۵۰۶ ton/year می-باشد. علاوه بر این روند تغییرات از نظر کاهش یا افزایش برای دو تابع هدف مذکور در یک راستا نیست. به عبارتی کاهش هزینه برنامه‌ریزی IHS متناسب با افزایش آلودگی IHS است. زیرا که براساس جدول (۲)، هزینه احداث ۱ kW برای منابع تجدیدناپذیر مانند CHP نسبت به منبع تجدیدپذیر مانند WS و PV کمتر است. لذا به منظور کمینه-سازی PlanCo انتظار می‌رود که ظرفیت احداث شده منابع تجدیدپذیر بالا باشد، و از آنجا منبع تولید آلودگی هستند، در این شرایط سطح آلودگی بالا خواهد بود. در ادامه با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری فازی راه‌حل مصالحه بین PlanCo و PoL قابل استخراج است، که نتایج عددی آن حاصل شده از الگوریتم‌های حل مختلف در جدول (۲) گزارش شده است. برای حل مسأله در این بخش از حل-کننده‌های GWO، بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۲۵} (PSO) [۱۹]، بهینه-سازی مبنی بر آموزش و یادگیری^{۲۶} (TLBO) [۲۰]، و الگوریتم جستجوی کلاغ‌ها^{۲۷} (CSA) [۲۱] استفاده می‌شود. اندازه جمعیت و حداکثر تکرار همگرایی برای این حل‌کننده‌ها به ترتیب برابر ۸۰ و ۴۰۰۰ انتخاب شده است. پارامترهای تنظیم آنها نیز براساس [۱۸-۲۱]

شود. در کلیه موارد، یک اینورتر برای PVها و ۳ اینورتر برای باتری‌ها نیاز است. در مجموع ۴ اینورتر در IHS نصب می‌شود. پیرو نتایج برنامه‌ریزی گزارش شده در جدول (۳)، وضعیت اقتصادی و زیست محیطی IHS به ازای موارد مطالعاتی I الی IV همانند جدول‌های (۴) و (۵) خواهد بود. براساس جدول (۴)، مورد I دارای بیشترین هزینه احداث و تعمیر و نگهداری هستند. زیرا که براساس جدول (۳)، در این مورد تعداد بالایی PV و WS نسبت به موارد دیگر نصب می‌شود. همچنین هزینه احداث آنها و هزینه تعمیر و نگهداری WSها براساس جدول (۱) نسبت به دیگر عناصر بیشترین است.

الکتریکی نقش دارد. از اینرو تعداد RESها در این موارد مطالعاتی نسبت به مورد I کاهش می‌یابد. اما تعداد باتری‌ها در این شرایط نسبت به مورد I افزایش می‌یابد، که این مورد ناشی از نحوه عملکرد CHP (منحنی روزانه توان اکتیو CHP) در تأمین انرژی الکتریکی دارد. علاوه بر این، در مورد II بیشترین اندازه برای CHP وجود دارد، زیرا که آن تنها وظیفه تأمین بار حرارتی را در این مورد مطالعاتی دارد. اما با اضافه شدن ۴ تا TES به مورد II، مورد III، اندازه CHP به ۶ kW تنزیل می‌یابد. همچنین در این شرایط تعداد باتری‌های ۴ تا نسبت به مورد II کاهش یافته است. در نهایت با اضافه شدن بویلر به IHS، مورد IV، اندازه CHP به ۵/۶ kW تنزیل می‌یابد، تعداد ۲ تا TES برای نصب در IHS لازم است، و یک باتری نسبت به مورد III اضافه می‌-

جدول (۲): نقطه مصالحه بدست آمده از الگوریتم‌های حل مختلف

حل کننده	نقطه مصالحه $(\omega_{PlanCo}, \omega_{PoL})$	PlanCo (\$/year)	PoL (ton/year)	تکرار همگرایی	زمان محاسباتی (ثانیه)	Std (%)
PSO	(۰/۲۵، ۰/۷۵)	۴۰۹۵/۸	۱۱۵/۸۶	۱۱۹۸	۲۲۹/۵	۱/۴۹
TLBO	(۰/۲۵، ۰/۷۵)	۴۰۶۱/۱	۱۱۵/۳۷	۱۰۵۶	۲۲۳/۱	۱/۲۱
KHO	(۰/۲۵، ۰/۷۵)	۴۰۵۶/۴	۱۱۵/۰۲	۹۸۳	۲۲۱/۶	۱/۰۸
GWO	(۰/۲۵، ۰/۷۵)	۴۰۱۸/۶	۱۱۴/۳۹	۸۶۷	۲۱۴/۳	۰/۹۶

جدول (۳): اندازه منابع و ذخیره‌سازهای مختلف در IHS

مورد مطالعاتی	تعداد کل				اندازه (kW)		
	PV	WS	باتری	اینورتر (PV+باتری)	TES	CHP	Boiler
I	۱۳	۱۵	۱۹	۴ = (۳+۱)	-	-	-
II	۶	۴	۲۴	۴ = (۳+۱)	-	۷/۱	-
III	۶	۴	۲۰	۴ = (۳+۱)	۴	۶	-
IV	۷	۴	۲۱	۴ = (۳+۱)	۲	۵/۶	۰/۳

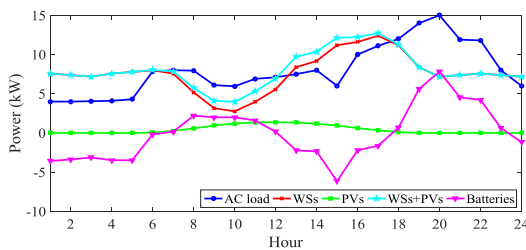
جدول (۴): هزینه برنامه‌ریزی سالیانه و آلاینده‌گی منابع و ذخیره‌سازها در IHS

مورد مطالعاتی	هزینه احداث سالیانه (\$/year)							کل (\$/year)
	PV	WS	باتری	اینورتر	TES	CHP	Boiler	
I	۳۹۹/۱	۲۴۰۰	۴۹۴	۸۰۰	-	-	-	۴۰۹۳/۱
II	۱۸۴/۲	۶۴۰	۶۲۴	۸۰۰	-	۳۲۰/۱	-	۲۵۶۸/۳
III	۱۸۴/۲	۶۴۰	۵۲۰	۸۰۰	۸۴	۲۷۰/۵	-	۲۴۹۸/۷
IV	۲۱۴/۹	۶۴۰	۵۴۶	۸۰۰	۴۲	۲۵۲/۵	۱۰/۸	۲۵۰۶/۲
مورد مطالعاتی	هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه (\$/year)							کل (\$/year)
	PV	WS	باتری	اینورتر	TES	CHP	Boiler	
I	۰	۷۵	۰	۰	-	-	-	۷۵
II	۰	۲۰	۰	۰	-	۲۸/۴	-	۴۸/۴
III	۰	۲۰	۰	۰	۶/۴	۲۴	-	۵۰/۴
IV	۰	۲۰	۰	۰	۳/۲	۲۲/۴	۰/۸	۴۶/۴
مورد مطالعاتی	هزینه بهره‌برداری سالیانه (\$/year)							کل (\$/year)
	PV	WS	باتری	اینورتر	TES	CHP	Boiler	
I	هزینه بهره‌برداری وجود ندارد							۰
II								۱۶۸۵/۹
III								۱۴۸۸/۹
IV								۱۴۶۶
مورد مطالعاتی	آلاینده‌گی سالیانه (kg/year)							کل (ton/year)
	PV	WS	باتری	اینورتر	TES	CHP	Boiler	
I	آلاینده‌گی وجود ندارد							۰

II	۱۱۵/۷۸	-	۱۱۵/۷۸
III	۱۱۵/۳۵	-	۱۱۵/۳۵
IV	۱۱۰/۷۸	۳/۶۱	۱۱۴/۳۹

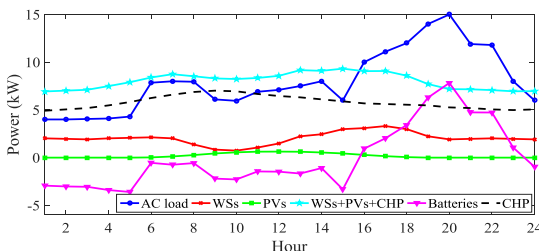
ج) بررسی عملکرد بهینه منابع و ذخیره‌سازها در IHS:

منحنی روزانه توان اکتیو و حرارتی منابع و ذخیره‌سازهای مختلف به ازای موارد مطالعاتی I الی IV در شکل‌های (۴)-(۷) نمایش داده شده است. در کلیه شکل‌ها، توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، WSها و PVها، دارای منحنی روزانه همانند نرخ توان تولیدی آنها همانند شکل (۲) است. ولی مقدار توان تولیدی آنها وابسته به تعداد آنها در IHS است. به طوری که آنها در مورد I براساس شکل (۴) بیشترین توان را در کلیه ساعات شبیه‌سازی نسبت به موارد II-IV براساس شکل‌های (۵-الف)، (۶-الف) و (۷-الف) به IHS تزریق می‌کنند. براساس شکل (۵-ب)، CHP در مورد II دارای منحنی روزانه توان حرارتی همانند بار حرارتی هستند، زیرا که در مورد II، CHP تنها وظیفه تأمین بار حرارتی را دارد. لذا به علت وابستگی توان اکتیو CHP به توان حرارتی آن براساس رابطه (۱۱)، منحنی روزانه توان اکتیو CHP براساس شکل (۵-ب) در مورد II دارای روند تغییراتی همانند منحنی روزانه ضریب بار حرارتی در شکل (۲) دارد.

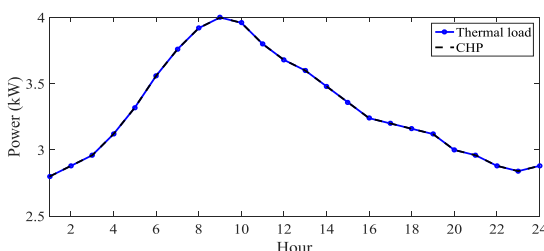


شکل (۴): منحنی روزانه توان منابع و ذخیره‌سازهای IHS در مورد

مطالعاتی I



(الف)



(ب)

شکل (۵): منحنی روزانه توان منابع و ذخیره‌سازهای IHS در مورد

مطالعاتی II، الف) بخش الکتریکی، ب) بخش حرارتی

براساس جدول‌های (۳) و (۴) مورد I در برگزیده هزینه احداث و تعمیر و نگهداری بالایی خواهد بود. ولی منابع تجدیدپذیر و باتری‌ها دارای هزینه سوخت و آلودگی نیستند، پس مورد I دارای هزینه بهره‌برداری و سطح آلودگی صفر خواهد بود. اما با اضافه شدن CHP به مورد I، مورد II، هزینه احداث و تعمیر و نگهداری نسبت به مورد I به ترتیب به $2568/3$ \$/year و $48/4$ \$/year تنزیل می‌یابند. زیرا که براساس جدول (۳)، تعداد قابل توجهی از منابع تجدیدپذیر در این مورد نسبت به مورد I حذف شده‌اند. اما به علت وجود هزینه سوخت برای CHP متناسب با رابطه (۱۳)، و آلودگی‌های NO_x ، SO_2 و CO_2 برای آن متناسب با رابطه (۳)، هزینه بهره‌برداری و سطح آلودگی در مورد II نسبت به مورد I افزایش می‌یابد. با اضافه شدن ۴ تا TES به مورد II، مورد III، هزینه‌های احداث و بهره‌برداری IHS و سطح آلودگی آن نسبت به مورد II کاهش می‌یابد، اما هزینه تعمیر و نگهداری آن افزایش می‌یابد. این مورد ناشی از این است که اندازه CHP به مقدار $1/1$ kW در مورد III نسبت به مورد II کاهش می‌یابد. پس براساس جدول (۱)، هزینه تعمیر و نگهداری CHP در مورد III به مقدار $4/4$ \$/year نسبت به مورد II کاهش می‌یابد. ولی این هزینه برای یک TES براساس جدول (۱) برابر $1/6$ \$/year است، لذا با حضور ۴ تا TES در مورد III، هزینه مذکور برای این مجموع TES برابر $6/4$ \$/year خواهد بود. بنابراین هزینه تعمیر و نگهداری برای IHS در مورد III به مقدار 2 \$/year نسبت به مورد II بیشتر خواهد بود. در نهایت با اضافه شدن بویلر به مورد III، مورد IV، هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری، و سطح آلودگی نسبت به مورد III کاهش می‌یابند. ولی هزینه احداث در این مورد نسبت به مورد III افزایش می‌یابد. زیرا در این مورد هزینه احداث افزایش اندازه بویلر و تعداد باتری‌ها نسبت به هزینه احداث کاهش اندازه CHP و تعداد TESها براساس جدول‌های (۳) و (۴) نسبت به مورد III بیشتر است. در نهایت با توجه به جدول (۵) مشاهده می‌گردد که هزینه برنامه‌ریزی IHS در مورد IV نسبت به موارد دیگر کمینه‌تر است. سطح آلودگی آن نسبت به موارد II و IV پایین‌تر است، ولی نسبت به مورد I بیشینه است. اما بایستی گفت که مورد I قادر به تأمین انرژی حرارتی نیست.

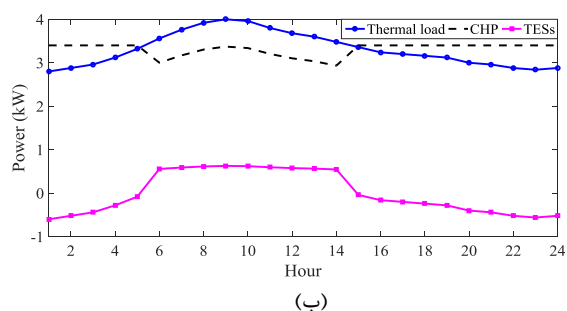
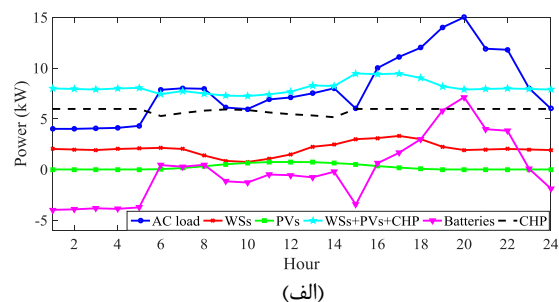
جدول (۵): وضعیت اقتصادی و زیست محیطی IHS

مورد مطالعاتی	PlanCo (\$/year)	PoL (ton/year)
I	۴۱۶۸/۱	.
II	۴۳۰۲/۶	۱۱۵/۷۸
III	۴۰۳۸	۱۱۵/۳۵
IV	۴۰۱۸/۶	۱۱۴/۳۹

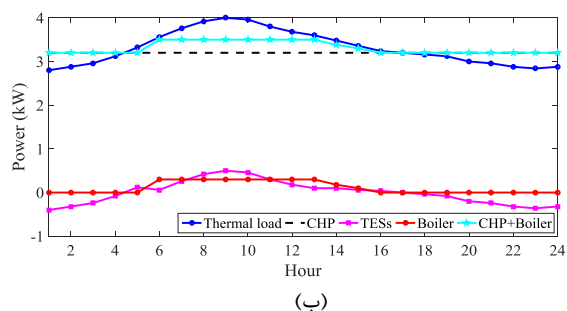
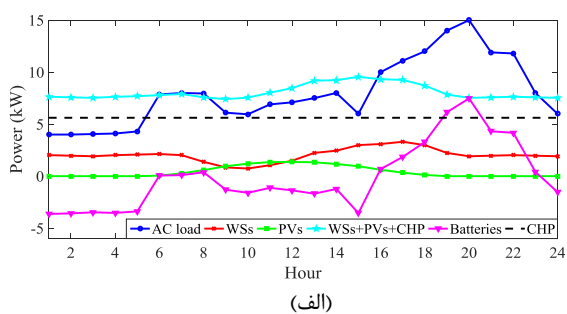
۳/۴ در شکل (۶-ب) می‌شود. براساس شکل (۷-ب)، CHPها قادرند که در کلیه ساعات شبیه‌سازی توان حرارتی ثابتی برابر با ۳/۲ kW به IHS تزریق کنند. با این شرایط CHP می‌تواند TESها را در ساعات ۱:۰۰-۴:۰۰ و ۱۷:۰۰-۲۴:۰۰ شارژ کند. اما با این شرایط CHP و TESها قادر نیستند که در ساعات ۶:۰۰ الی ۱۶:۰۰ بار حرارتی را تغذیه کنند، که بویلر در این ساعات مازاد مصرف نسبت به توان تولیدی CHP و TESها را تغذیه می‌کند. متناسب با این عملکرد CHP در شکل (۷-ب)، آن توان اکتیوی برابر با ۵/۶ kW در کلیه ساعات شبیه‌سازی به IHS در مورد IV تزریق می‌کند. در نهایت براساس شکل‌های (۴)-(۷) دیده می‌شود که توان اکتیو باتری‌ها برابر با ماتفاوت توان مصرفی بار AC و مجموع توان اکتیو تولیدی RESها و CHP است. به طوری که در ساعاتی که مجموع توان اکتیو تولیدی WSها، PVها و CHP بیشتر (کمتر) از بار AC است، باتری‌ها در مد شارژ (دشارژ) کار می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی جزیره‌ای جهت تأمین انرژی الکتریکی و حرارتی پاک ارائه شد. طرح مذکور کمینه‌سازی مجموع وزندهار هزینه سالیانه برنامه‌ریزی و سطح آلاینده‌ی سالیانه این سیستم را بر عهده داشت. قیود آن نیز شامل مدل برنامه‌ریزی بهره‌برداری منابع تجدیدپذیر، ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی، بویلر و سیستم ترکیبی برق و حرارت بود. در مدل‌سازی این طرح، الویت تأمین انرژی با منابع تجدیدپذیر و سیستم ترکیبی برق و حرارت بود، ذخیره‌سازها جهت پرشدگی خلاء بین پروفیل توان تولیدی منابع مذکور و پروفیل بار است. بویلر نیز به عنوان منبع پشتیبان در تأمین بار حرارتی نقش داشت. در ادامه تکنیک تصمیم‌گیری فازی جهت تعیین راه‌حل مصالحه بین اهداف اقتصادی و زیست محیطی استفاده گردید، و الگوریتم GWO جهت حل مسأله استفاده شد. براساس نتایج عددی بدست آمده مشاهده شد که الگوریتم مذکور قادر به دستیابی راه‌حل بهینه‌تر اقتصادی و زیست محیطی با سرعت همگرایی بالاتر نسبت به الگوریتم‌های تکاملی دیگر برای برنامه‌ریزی سیستم ترکیبی جزیره‌ای است. همچنین آن دارای شرایط تقریبی پاسخ‌دهی یکتا است. به طوری که انحراف معیار پاسخ‌دهی نهایی آن در حدود ۰/۹۶٪ است. علاوه بر این، هزینه برنامه‌ریزی و سطح آلاینده‌ی برای سیستم یاد شد در نقطه مصالحه در حدود ۲۰٪ الی ۲۳٪ نسبت به نقطه کمینه خود فاصله دارند. با برنامه‌ریزی منابع و ذخیره‌سازهای مختلف در سیستم مذکور مشاهده شد که هزینه برنامه‌ریزی سیستم پیشنهادی نسبت به سیستمی که تنها انرژی الکتریکی را تأمین می‌کند، پایین‌تر است. ولی سطح آلاینده‌ی آن بالاتر خواهد بود. اما مزیت سیستم پیشنهادی در این مقاله علاوه بر هزینه برنامه‌ریزی پایین‌تر، قابلیت تغذیه همزمان دو انرژی الکتریکی و حرارتی است.



شکل (۶): منحنی روزانه توان منابع و ذخیره‌سازهای IHS در مورد مطالعاتی III، الف) بخش الکتریکی، ب) بخش حرارتی



شکل (۷): منحنی روزانه توان منابع و ذخیره‌سازهای IHS در مورد مطالعاتی IV، الف) بخش الکتریکی، ب) بخش حرارتی

در مورد III، با حضور TES، توان حرارتی CHP براساس شکل (۶-ب) در ساعات کم‌باری حرارتی (۱:۰۰-۵:۰۰ و ۱۶:۰۰-۲۴:۰۰) در حوالی ۳/۴ kW است، که آن برای تأمین بار حرارتی و تأمین انرژی ذخیره شده TESها در مد شارژ برای این ساعات است. ولی در ساعات پرباری به علت عملکرد TESها در وضعیت دشارژ، توان حرارتی CHP به کمتر از ۳/۴ kW است، و میزان آن همواره از بار حرارتی در این ساعات کمتر است. چنین وضعیت عملکرد برای توان اکتیو CHP در شکل (۶-الف) وجود دارد، با این تفاوت که عدد ۶ kW جایگزین kW

مراجع

- Systems,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 3, pp. 2637-2645, May-June 2018.
- [15] 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, 2019.
- [16] 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, 2017.
- [17] W. Jakob, C. Blume, “Pareto Optimization or Cascaded Weighted Sum: A Comparison of Concepts,” Algorithms, vol. 7, pp. 166-185, 2014.
- [18] A. Saxena, R. Kumar, S.A. Mirjalili, “A harmonic estimator design with evolutionary operators equipped grey wolf optimizer,” Expert Systems with Applications, vol. 145, pp. 113125, 2020.
- [19] W.K.A. Najy, H.H. Zeineldin and W.L. Woon, “Optimal protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capability,” IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 60, no. 4, pp. 1668-77, 2013.
- [20] R. Rao, V. Savsani, and D. Vakharia, “Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems,” Comput.-Aided Des. Vol. 43, pp. 303-2011.
- [21] A. Askarzadeh, “A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm,” Computers & Structures, vol. 169, pp. 1-12, 2016.
- [22] Esmaeili Z, Namavar Zeini Vandi M R, Anani E, Ehsan M. A Review on Energy Storage Systems Planning in Active Distribution Networks and its Applications. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2022; 19 (4) :255-275.
- [23] Khan Ahmadi A, Soleimani M M, Ghaffarpour R, Zamanian S. Optimal planning of renewable energy systems with considering uncertainty and LPSP concept: A case study. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2022; 19 (1) :97-110.
- [1] R. Kaur, V. Krishnasamy, N.K. Kandasamy and 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.
- [2] A. Dini, and et al., “A flexible-reliable operation optimization model of the networked energy hubs with distributed generations, energy storage systems and demand response,” Energy, vol. 239, pp. 121923, 2022.
- [3] A. Rezaee Jordehi, V. Sohrabi Tabar, S.A. Mansouri, M. Nasir, S.M. Hakimi, S. Pirouzi, “A risk-averse two-stage stochastic model for planning retailers including self-generation and storage system,” Journal of Energy Storage, vol. 51, pp. 104380, 2022.
- [4] M. Shahzad Javed, and et al., “Performance comparison of heuristic algorithms for optimization of hybrid off-grid renewable energy systems,” Energy, vol. 210, pp. 118599, 2020.
- [5] 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 & Distribution, vol. 15, no. 9, pp. 1451-1462, 2021.
- [6] خلیفیان، فرشاد، «برنامه‌ریزی استوار سیستم ترکیبی جزیره‌ای شامل منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و ذخیره‌سازهای ساکن و سیار»، روش‌های هوشمند در صنعت برق، دوره ۱۴، شماره ۵۳، صفحه ۱۵-۳۲، ۱۴۰۰.
- [7] Z. Yang, and et al., “Robust multi-objective optimal design of islanded hybrid system with renewable and diesel sources/stationary and mobile energy storage systems,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 148, pp. 111295, 2021.
- [8] 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, 2014.
- [9] 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, 2017.
- [10] M. Aqeel-Ashraf, Z. Liu, A. Alizadeh, S. Nojavan, K. Jermisittiparsert, 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, pp. 122467, 2020.
- [11] T. Salameh, and et al., “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, pp. 6014-6027, 2021.
- [12] C. Li, D.Zhou, H.i 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.
- [13] B. Soudan, A. Darya, “Autonomous smart switching control for off-grid hybrid PV/battery/diesel power system,” Energy, vol. 211, pp. 118567, 2020.
- [14] C.D. Rodríguez-Gallegos, and et al., “A Siting and Sizing Optimization Approach for PV-Battery-Diesel Hybrid

زیر نویس ها

- ¹ Islated hybrid system (IHS)
- ² Renewable energy sources (RESs)
- ³ Photovoltaices (PVs)
- ⁴ Electrical energy storages (EESs)
- ⁵ Non-renewable energy source (NRES)
- ⁶ Combined heat and power (CHP)
- ⁷ Thermal energy storage (TES)
- ⁸ Electric vehicles (EVs)
- ⁹ Wind turbine (WT)
- ¹⁰ Harmony search algorithm (HSA)
- ¹¹ Load not supplied (LNS)
- ¹² Elephant herding optimization (EHO)
- ¹³ Non-linear programming (NLP)
- ¹⁴ Mixed integer non-linear programming (MINLP)
- ¹⁵ Grey wolf optimizer (GWO)
- ¹⁶ Wind system (WS)
- ¹⁷ Fuzzy decision making technique (FDT)
- ¹⁸ Total capacity cost (TCC)
- ¹⁹ Capital recovery factor (CRF)
- ²⁰ Interest rate
- ²¹ Cut-in wind speed
- ²² Cut-out wind speed
- ²³ Fitness function
- ²⁴ Penalty function
- ²⁵ Particle swarm optimization (PSO)
- ²⁶ Teaching-learning-based optimization (TLBO)
- ²⁷ Crow search algorithm (CSA)
- ²⁸ Standard deviation (StD)

