

بهینه‌سازی اندازه، مکان و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت

بهداد آرندیان

دکتری برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر، arandian@aut.ac.ir

مرتضی محمدی اردهالی^۱

استاد دانشکده برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ardehali@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۲/۰۱

چکیده

استفاده از سیستم‌های تولید همزمان حرارتی و الکتریکی، به دلیل بازدهی بالای آن، رو به افزایش است. با توجه به این که حداکثر بازدهی سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت به پارامترهای گوناگونی وابسته است، هدف از این مطالعه بهینه‌سازی اندازه، مکان و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف سیستم‌های تولید همزمان در شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی به‌منظور افزایش سود بهره‌بردار شبکه، با در نظر گرفتن قیود فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشد. در مدل‌سازی مسئله، فروش انرژی‌های حرارتی و الکتریکی، کاهش تلفات شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی و کاهش هزینه به‌روزرسانی تجهیزات به‌عنوان درآمد بهره‌بردار و مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی به‌عنوان هزینه‌های بهره‌بردار در نظر گرفته شده است. همچنین جهت دستیابی به مناسب‌ترین پاسخ، الگوریتم هوشمند ترکیبی جدیدی بر مبنای الگوریتم‌های جهش قورباغه متحرک و اجتماع پرندگان ارائه گردیده است. نتایج شبیه‌سازی ضمن تأیید روش پیشنهادی، نشان می‌دهند استفاده ترکیبی از فناوری‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت باعث افزایش سود سالیانه بهره‌بردار شبکه به میزان ۱۳۴۹۳۷/۰۹ دلار می‌شود. همچنین لحاظ نمودن قیود زیست‌محیطی باعث می‌گردد سیستم تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری موتور احتراق داخلی در ترکیب بهینه فناوری‌ها نقشی نداشته باشد.

طبقه‌بندی JEL: Q30, Q20, L94, C61, Q51

کلیدواژه‌ها: آلاینده‌های زیست‌محیطی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی، تولید همزمان برق و حرارت، منابع انرژی تجدیدپذیر، منابع انرژی تجدیدناپذیر

۱- مقدمه

نگرانی‌های زیست‌محیطی و کاهش روزافزون سوخت‌های فسیلی باعث شده سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان انرژی با استفاده مؤثر از سیستم‌های تولید همزمان حرارتی و الکتریکی^۱ بازدهی بهره‌برداری را افزایش دهند (باوس^۲ (۲۰۱۰) و استرن^۳ (۲۰۱۴)). به‌منظور افزایش نفوذ سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت لازم است تمامی قیود فنی-اقتصادی و زیست‌محیطی جهت تخصیص و بهره‌برداری بهینه از این سیستم‌ها در شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی لحاظ گردند. (سین^۴ و همکاران (۲۰۱۱) و نیکنام^۵ و همکاران (۲۰۱۱)). مزایای فنی و اقتصادی ناشی از تخصیص و بهره‌برداری بهینه سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت به عوامل گوناگونی مانند فناوری مورد استفاده، مکان و اندازه سیستم‌های تولید همزمان حرارتی و الکتریکی، ساختار شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی و نسبت انرژی حرارتی به انرژی الکتریکی^۶ بستگی دارد.

بر اساس جدول (۱)، در حال حاضر پرکاربردترین فناوری‌های مورد استفاده در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت شامل فناوری تجدیدپذیر خورشیدی-حرارتی^۷ و فناوری‌های تجدیدناپذیر پیل سوختی^۸، موتور احتراق داخلی^۹ و میکروتوربین^{۱۰} می‌شود. انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی برای فناوری خورشیدی-حرارتی به‌عنوان یک فناوری تجدیدپذیر صفر می‌باشد، درحالی‌که فناوری‌های تجدیدناپذیر پیل سوختی، موتور احتراق داخلی و میکروتوربین به ازای هر کیلووات ساعت تولید به ترتیب ۰/۰۲، ۰/۷۹ و ۰/۱۵ کیلوگرم گاز دی‌اکسید کربن تولید می‌کنند. (آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا^{۱۱} (۲۰۱۴))

1. Combined heat and power
2. Bose
3. Stern
4. Singh, et al
5. Niknam
6. Heat to power ratio
7. Photovoltaic-thermal
8. Fuel cell
9. Internal combustion engine
10. Micro turbine
11. U.S. Environmental Protection Agency

جدول ۱. مروری بر پرکاربردترین فناوری‌های مورد استفاده در سیستم‌های تولید همزمان

برق و حرارت

دوره	روش بهره‌برداری	انتشار آلاینده زیست محیطی	شبکه انرژی		بهینه‌سازی		فناوری	مرجع
			الکتریکی	حرارتی	اندازه	مکان		
یک سال	اجتماع پرنندگان	-	✓	-	✓	-	میکروتوربین، توربین گاز، موتور احتراق داخلی	باسو (۲۰۱۰)
یک روز	اجتماع پرنندگان	-	✓	-	✓	-	میکروتوربین، توربین گاز، موتور رفت و برگشتی	تیچی (۲۰۱۰)
پنج سال	اجتماع پرنندگان	-	✓	-	✓	✓	میکروتوربین	علیشاهی (۲۰۱۲)
یک روز	اجتماع پرنندگان	✓	✓	-	✓	✓	پیل سوختی	فرجاه (۲۰۱۲)
یک سال	ژنتیک و اجتماع پرنندگان	✓	-	-	✓	✓	پیل سوختی	مرادی (۲۰۱۲)
یک روز	برنامه‌ریزی خطی گسسته	✓	-	✓	✓	-	پیل سوختی	آدام (۲۰۱۴)
یک سال	برنامه‌ریزی خطی گسسته	-	✓	✓	✓	-	پیل سوختی، موتور احتراق داخلی، میکروتوربین	بورو (۲۰۱۴)
یک سال	برنامه‌ریزی خطی گسسته	-	-	-	✓	-	حرارتی - خورشیدی	عرب کوهسار (۲۰۱۵)
-	آنالیز حساسیت	-	-	✓	✓	-	حرارتی - خورشیدی	فرشچی منفرد (۲۰۱۶)

منبع: یافته‌های تحقیق

باسو^۱ و همکاران (۲۰۱۰)، با در نظر گرفتن انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، اندازه بهینه سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری‌های موتور احتراق داخلی، میکروتوربین و توربین گازی^۲ را به‌منظور دستیابی به بیشترین نسبت سود-هزینه مشخص نموده و دریافته‌اند که دلیل انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی کمتر، بیشترین نسبت سود-هزینه با بهره‌گیری از فناوری میکروتوربین به‌دست خواهد آمد. بدون لحاظ نمودن مکان بهینه و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، تیچی^۳ و همکاران (۲۰۱۰) بهینه‌سازی سیستم تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری‌های میکروتوربین، توربین گازی و موتور رفت و برگشتی^۴ را انجام داده و دریافته‌اند بهره‌گیری از فناوری‌های مختلف سبب تغییرات قابل‌توجهی در مزایای اقتصادی ناشی از به‌کارگیری این سیستم می‌گردد.

علیشاهی^۵ و همکاران (۲۰۱۲)، بدون در نظر گرفتن شبکه انرژی حرارتی و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، اندازه بهینه سیستم تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری میکروتوربین را جهت دستیابی بهره‌بردار به بیشترین نسبت سود-هزینه مشخص نمودند. در این مطالعه، فروش انرژی‌های حرارتی و الکتریکی به‌عنوان درآمد و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری به‌عنوان هزینه‌های بهره‌بردار در نظر گرفته شده است و مشخص گردید طراحی بهینه این سیستم باعث افزایش نسبت سود-هزینه می‌گردد. فرجاه^۶ و همکاران (۲۰۱۲)، بدون در نظر گرفتن شبکه انرژی حرارتی، با تعیین مکان و اندازه بهینه سیستم تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری پیل سوختی در شبکه انرژی الکتریکی دریافته‌اند تعیین مکان و اندازه بهینه این سیستم باعث کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی این منابع تا ۶ درصد می‌گردد. مرادی^۷ و عابدینی^۸ (۲۰۱۲) بدون لحاظ نمودن شبکه انرژی حرارتی و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، مکان و اندازه بهینه سیستم تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر

1. Basu
2. Gas turbine
3. Tichi
4. Reciprocating engine
5. Alishahi
6. Farjah
7. Moradi
8. Abedini

فناوری پیل سوختی را در شبکه انرژی الکتریکی محاسبه و مشخص نمودند، با تعیین مکان و اندازه بهینه این سیستم، می‌توان هزینه‌های بهره‌بردار شبکه را جهت تأمین بار کاهش داد. آدام^۱ و همکاران (۲۰۱۴) بدون در نظر گرفتن شبکه انرژی الکتریکی، اندازه بهینه یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری پیل سوختی را در شبکه انرژی حرارتی محاسبه و دریافتند اندازه بهینه این سیستم وابسته به ساختار شبکه می‌باشد. بورو^۲ و همکاران (۲۰۱۴) بدون محاسبه مکان بهینه، اندازه بهینه سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری‌های موتور احتراق داخلی و میکروتوربین را در شبکه‌های انرژی برق و حرارت با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی محاسبه و دریافتند دستیابی به تمامی مزایای بالقوه سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت تنها با طراحی بهینه و یکپارچه تمامی سیستم امکان‌پذیر می‌باشد. عرب کوهسار^۳ و همکاران (۲۰۱۵) بدون در نظر گرفتن تعیین مکان بهینه، طراحی بهینه یک سیستم خورشیدی-حرارتی را در برزیل با در نظر گرفتن قیود حرارتی-اقتصادی انجام داده و دریافتند که طراحی بهینه سیستم باعث استفاده حداکثری از ظرفیت تولید و افزایش سود بهره‌بردار شبکه می‌گردد. فرشچی منفرد^۴ و همکاران (۲۰۱۶) بدون تعیین مکان بهینه، اندازه بهینه سیستم تولید همزمان مبتنی بر فناوری خورشیدی-حرارتی متصل به شبکه انرژی حرارتی را برای یک ساختمان محاسبه کرده و دریافتند اندازه بهینه این سیستم، وابسته به ساختار شبکه مذکور می‌باشد.

۲- طرح مسئله

همان‌طور که در جدول (۱) به صورت خلاصه نشان شده است، با بررسی مطالعات مطرح‌شده در زمینه سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت مشخص گردید عوامل گوناگونی مانند فناوری مورد استفاده، مکان و اندازه سیستم، ساختار شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی، انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و دوره بهره‌برداری در بهینه‌سازی

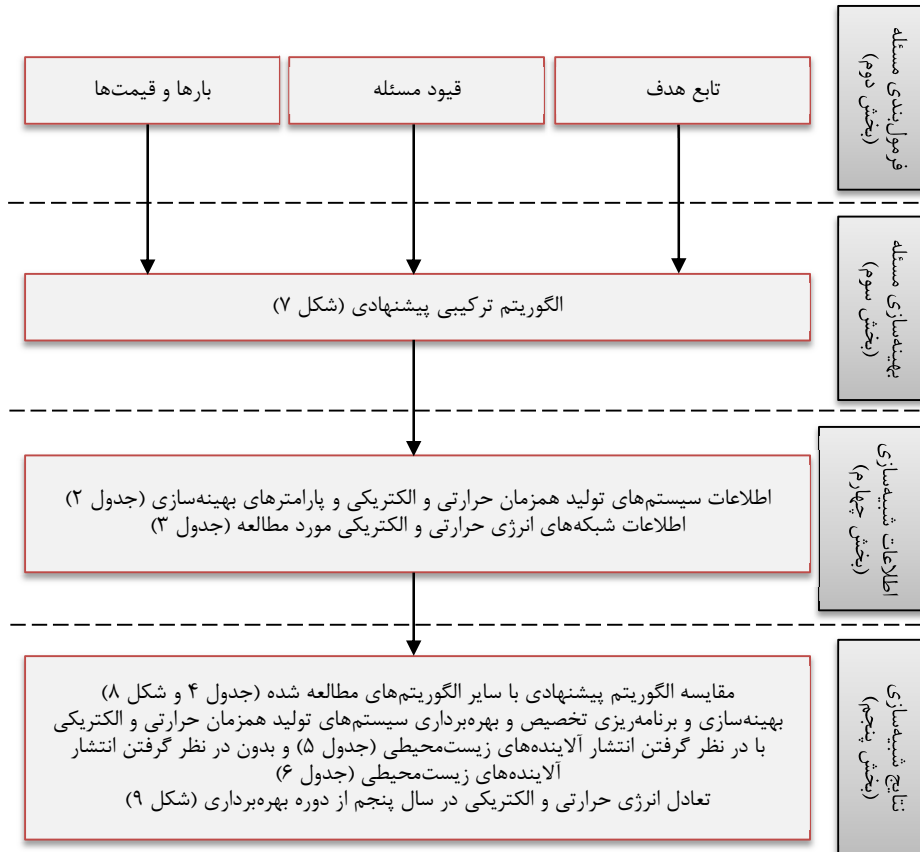
-
1. Adam
 2. Buoro
 3. Arabkoohsar
 4. Farshchimofared

و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت مؤثر می‌باشد که تاکنون به صورت جامع به آن‌ها توجه نشده است. این در حالی است که با توجه به دوره بهره‌برداری طولانی مدت سیستم‌های تولید همزمان حرارتی و الکتریکی، لازم است تغییرات بار و قیمت در طول دوره بهره‌برداری لحاظ گردد. همچنین با توجه به ابعاد مسئله و قیود متعدد فنی - اقتصادی و زیست‌محیطی، ارائه یک روش هوشمند جهت دستیابی به مقادیر بهینه سیستم، ضروری می‌باشد.

هدف از این مطالعه، بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف سیستم‌های تولید همزمان در شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی جهت افزایش سود بهره‌بردار شبکه با در نظر گرفتن قیود فنی - اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشد. همچنین پمپ‌های حرارتی - الکتریکی به عنوان حلقه اتصال شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی در نظر گرفته شده و مکان و اندازه بهینه آن‌ها در شبکه‌ها محاسبه گردیده است. در مدل‌سازی مسئله، فروش انرژی‌های حرارتی و الکتریکی، کاهش تلفات شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی و کاهش هزینه به‌روزرسانی تجهیزات به عنوان درآمد بهره‌بردار و مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، به عنوان هزینه‌های بهره‌بردار در نظر گرفته شده است.

این مطالعه در شش بخش سازماندهی شده است. در بخش دوم، فرمول‌بندی مسئله جهت بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت ارائه می‌گردد. بخش سوم، الگوریتم ترکیبی جدیدی بر مبنای الگوریتم‌های جهش قورباغه متحرک^۱ و بهینه‌سازی اجتماع پرندگان^۲ را جهت حل مسئله معرفی می‌نماید. در بخش چهارم با معرفی شبکه‌های مورد مطالعه، اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی و حل مسئله ارائه می‌گردد. در بخش پنجم، ضمن تأیید روش پیشنهادی جهت حل مسئله، بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف سیستم‌های تولید همزمان در شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی انجام و نتایج بررسی می‌شود و در بخش ششم، نتیجه‌گیری و پیشنهاد‌های ادامه کار ارائه خواهد شد.

1. Shuffled frog leaping algorithm
2. Particle swarm optimization



منبع: یافته‌های تحقیق

شکل ۱. فلوچارت ساختار مطالعه

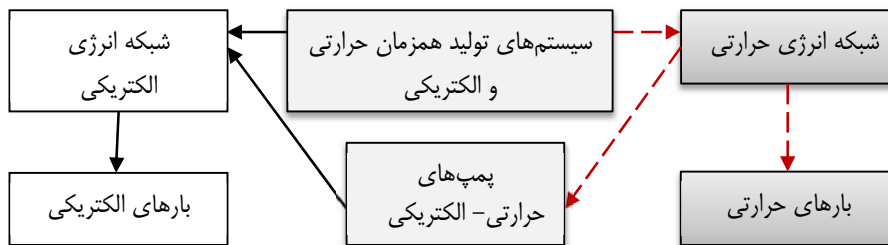
۳- فرمول‌بندی مسئله

در این بخش به‌منظور بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف سیستم‌های تولید همزمان در شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی، اختلاف درآمدها و هزینه‌ها به‌عنوان سود بهره‌بردار شبکه به‌عنوان تابع هدف مسئله مطابق رابطه (۱) در نظر گرفته می‌شود. نحوه محاسبه تابع هدف و قیود متناظر با آن نیز در این بخش ارائه گردیده است^۱.

۱. REV_1 درآمد بهره‌بردار شبکه از نصب و بهره‌برداری سیستم‌های تولید همزمان حرارتی و الکتریکی (\$)
 EXP_1 هزینه بهره‌بردار شبکه از نصب و بهره‌برداری سیستم‌های تولید همزمان حرارتی و الکتریکی (\$)

$$Max \left\{ P = \sum_i REV_i - \sum_j EXP_j \right\} \quad (1)$$

شماتیک سیستم مورد مطالعه در شکل (۲) نمایش داده شده است. در این شکل سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت از طریق شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی بارهای شبکه‌ها را تأمین می‌نمایند. همچنین پمپ‌های حرارتی-الکتریکی به‌عنوان حلقه اتصال، بین شبکه‌ها قرار دارند. در ادامه اجزای این سیستم و روابط آن‌ها جهت مدل‌سازی ارائه می‌گردد.



شکل ۲. شماتیک مدل سیستم شامل سیستم‌های تولید همزمان حرارتی و الکتریکی، پمپ‌های حرارتی-الکتریکی، بارها و شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی

منبع: یافته‌های تحقیق

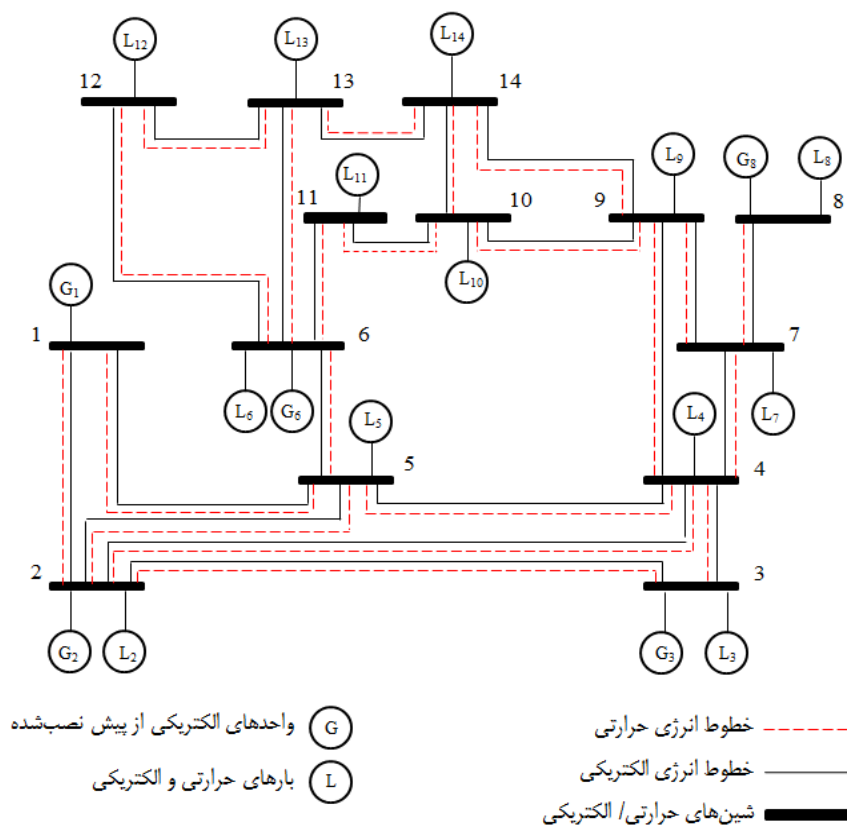
سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت

در این مطالعه، فناوری‌های مورد استفاده در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت شامل فناوری تجدیدپذیر حرارتی-خورشیدی و فناوری‌های تجدیدناپذیر پیل سوختی، موتور احتراق داخلی و میکروتوربین می‌باشد.

یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری حرارتی-خورشیدی به‌عنوان یک فناوری تجدیدپذیر از تعدادی ماژول تشکیل شد. که هر ماژول شامل سلول‌های خورشیدی، مبدل حرارتی و مبدل الکتریکی DC به AC (اینورتر) می‌باشد. انرژی روزانه حرارتی و الکتریکی این سیستم وابسته به میزان انرژی روزانه تابشی خورشید و نسبت انرژی حرارتی به الکتریکی می‌باشد (عرب کوهسار و همکاران - ۲۰۱۵). برای محاسبه سود بهره‌بردار شبکه براساس رابطه (۱)، درآمد و هزینه مرتبط با سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری حرارتی-خورشیدی شامل

درآمدهای فروش انرژی‌های حرارتی و الکتریکی و هزینه‌های نصب، تعمیر و نگهداری خواهد بود.

در یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری‌های تجدیدناپذیر، براساس رهیافت مدل‌سازی ورودی-خروجی، با مصرف سوخت به‌عنوان ورودی و انرژی‌های حرارتی و الکتریکی به‌عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. در یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری پیل سوختی، با مصرف سوخت (گاز طبیعی یا متان) انرژی‌های حرارتی و الکتریکی از طریق واکنش‌های الکتروشیمیایی تولید می‌شود. انرژی حرارتی تولید شده توسط مبدل حرارتی به شبکه انرژی حرارتی متصل می‌گردد و انرژی الکتریکی تولید شده توسط یک مبدل الکتریکی (اینورتر) DC به AC، به شبکه انرژی الکتریکی وصل می‌شود. بر اساس رهیافت مدل‌سازی ورودی-خروجی، با در نظر گرفتن سوخت به‌عنوان ورودی سیستم، انرژی برق و حرارت سیستم تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری پیل سوختی قابل محاسبه است (بندایکا^۱ و همکاران (۲۰۱۱)). درآمد و هزینه ناشی از نصب این سیستم‌ها مشابه فناوری حرارتی-خورشیدی است. بر اساس رهیافت مدل‌سازی ورودی-خروجی، با در نظر گرفتن گاز طبیعی به‌عنوان ورودی سیستم، روابط مرتبط با سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری‌های موتور احتراق داخلی و میکروتوربین مشابه فناوری پیل سوختی می‌باشد. تعداد بهینه مورد نیاز سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت براساس مجموع انرژی مورد نیاز این سیستم‌ها قابل محاسبه است.



شکل ۳. شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی مورد استفاده در این مطالعه

منبع: باسو و همکاران (۲۰۱۰)

شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی

مشابه شکل ۳، شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی دارای ساختار مشابه بوده و انرژی‌های حرارتی و الکتریکی با عبور از خطوط انرژی به محل مصرف منتقل می‌شود. شبکه‌های مورد مطالعه بر اساس شبکه استاندارد ۱۴ شینه در نظر گرفته شده که هریک از شین‌های حرارتی و الکتریکی دارای بارهای حرارتی و الکتریکی متفاوتی می‌باشند (باسو همکاران (۲۰۱۰)). اطلاعات شبکه‌های حرارتی و الکتریکی شامل پارامترهای خطوط، بارهای هر شین و واحدهای از پیش نصب شده در شبکه الکتریکی در بخش چهارم تشریح خواهد شد.

پمپ‌های حرارتی - الکتریکی

به منظور افزایش بهره‌وری فنی - اقتصادی بهره‌بردار شبکه، پمپ‌های حرارتی - الکتریکی به عنوان حلقه اتصال دو شبکه در نظر گرفته می‌شوند که می‌توانند انرژی الکتریکی موجود در شبکه را به انرژی حرارتی تبدیل نموده و از طریق شبکه انرژی حرارتی به محل مصرف منتقل نمایند. مقدار انرژی تبدیل شده توسط پمپ حرارتی - الکتریکی بر اساس ضریب عملکرد (COP) محاسبه می‌گردد (پزولا^۱ و همکاران - ۲۰۱۶).

درآمدها و هزینه‌های بهره‌بردار شبکه

برای محاسبه سود بهره‌بردار شبکه به عنوان تابع هدف، درآمدها و هزینه‌های ناشی از تخصیص و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف، سیستم‌های تولید همزمان در شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی در این بخش تشریح می‌گردد. اولین درآمد بهره‌بردار شبکه ناشی از فروش انرژی حرارتی و دومین درآمد ناشی از فروش انرژی الکتریکی می‌باشد. سومین درآمد ناشی از کاهش تلفات در شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی پس از نصب سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت می‌باشد. درآمد چهارم ناشی از کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری جهت به‌روزرسانی تجهیزات موجود در شبکه‌های حرارتی و الکتریکی است. بر این اساس به دلیل نصب سیستم‌های تولید همزمان حرارتی و الکتریکی، تلفات شبکه‌ها کاهش یافته و ظرفیت مربوط به خطوط انرژی در هر دو شبکه آزاد می‌گردد. لذا نیاز به سرمایه‌گذاری جهت به‌روزرسانی تجهیزات کاهش می‌یابد. مقدار این کاهش وابسته به ساختار شبکه‌های حرارتی و الکتریکی، مکان نصب سیستم‌های تولید همزمان و مقدار ظرفیت خطوط می‌باشد که به صورت یک عدد سالیانه وابسته به میزان نصب سیستم‌های تولید همزمان، تعیین می‌گردد (علیشاهی و همکاران (۲۰۱۲) و گیل^۲ و جوس^۳ (۲۰۰۸)).

هزینه‌های ناشی از تخصیص و بهره‌برداری سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت جهت استفاده در رابطه (۱) ارائه می‌گردد. اولین هزینه ناشی از هزینه سرمایه‌گذاری

1. Pezzola
2. Gil
3. Joos

جهت نصب سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت و پمپ‌های حرارتی - الکتریکی می‌باشد. هزینه ناشی از تعمیر و نگهداری در طول دوره بهره‌برداری به‌عنوان دومین هزینه بهره‌بردار شبکه لحاظ می‌گردد که در آن هزینه تعمیر و نگهداری به‌صورت تابعی خطی از انرژی حرارتی تولیدی بیان می‌شود که هزینه سوخت مصرفی برای فناوری‌های تجدیدناپذیر را شامل می‌گردد (ونگ و همکاران - ۲۰۱۵). سومین هزینه بهره‌بردار شبکه مرتبط با هزینه انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌باشد. با در نظر گرفتن گاز دی‌اکسید کربن به‌عنوان آلاینده زیست‌محیطی در مطالعه حاضر، این هزینه بر اساس تولید هر یک از سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر فناوری‌های تجدیدناپذیر محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی برای فناوری حرارتی - خورشیدی به‌عنوان یک فناوری تجدیدپذیر، صفر می‌باشد.

قیود

قیود مرتبط با بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف سیستم‌های تولید همزمان در شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی جهت بیشینه کردن سود بهره‌بردار شبکه بر اساس رابطه (۱)، در ادامه بیان می‌گردد:

- ۱- محدوده مجاز فشار هر یک از شین‌های حرارتی در شبکه انرژی حرارتی
- ۲- محدوده مجاز ولتاژ هر یک از شین‌های الکتریکی در شبکه انرژی الکتریکی
- ۳- محدوده مجاز شارش انرژی حرارتی در هر یک از خطوط شبکه انرژی حرارتی
- ۴- محدوده مجاز شارش انرژی الکتریکی در هر یک از خطوط شبکه انرژی

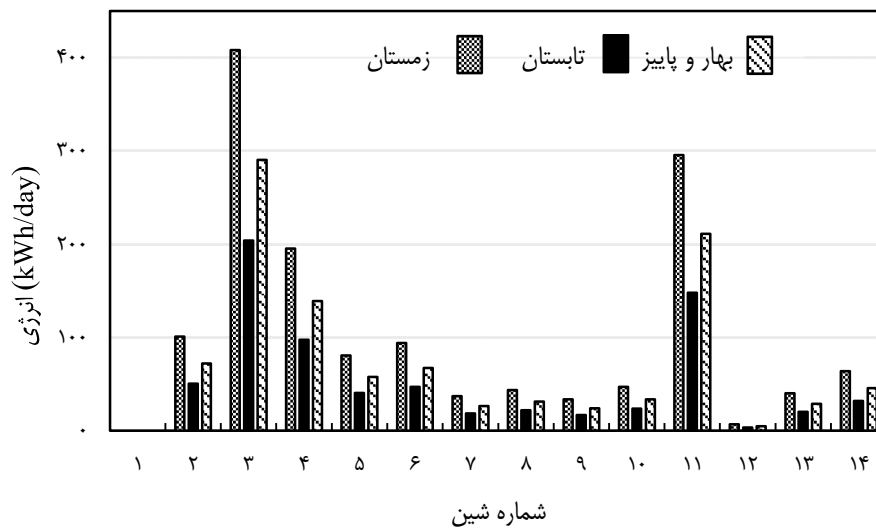
الکتریکی

- ۵- محدودیت تولید انرژی حرارتی و الکتریکی برای فناوری‌های تجدیدناپذیر
- ۶- الزام به تعادل تولید و مصرف در شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی
- ۷- نسبت انرژی حرارتی به الکتریکی برای هر یک از سیستم‌های تولید همزمان حرارتی و الکتریکی
- ۸- محدودیت اندازه پمپ‌های حرارتی - الکتریکی

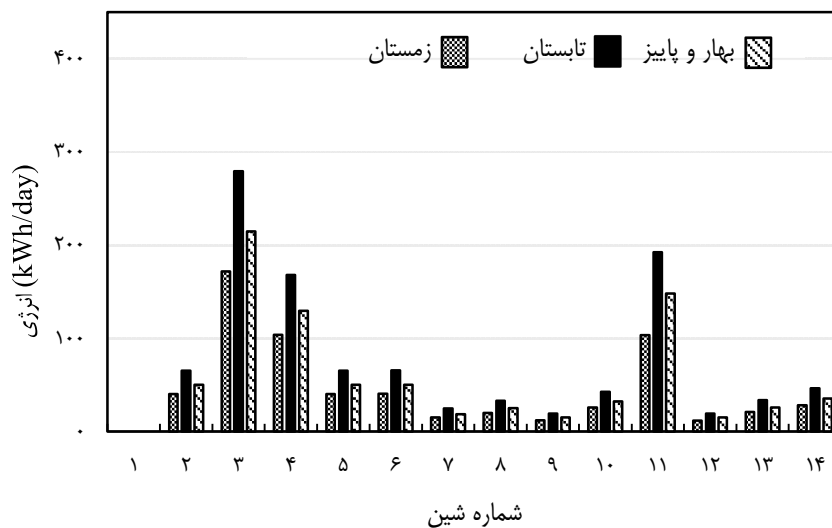
بارها و قیمت‌های حرارتی و الکتریکی

به منظور تخصیص و بهره‌برداری از سیستم‌های تولید همزمان در شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی لازم است تغییرات بار و قیمت در طول دوره بهره‌برداری لحاظ گردد. بدین منظور بارها و قیمت‌های حرارتی و الکتریکی در طول یک فصل ثابت و مشابه روز وسط هر فصل در نظر گرفته می‌شود. بارهای حرارتی و الکتریکی هر یک از شین‌ها در شکل (۴) و بارها و قیمت‌های حرارتی و الکتریکی در طول فصول دوره بهره‌برداری در شکل (۵) نمایش داده شده است (باسو و همکاران - ۲۰۱۰). بارها و قیمت‌های حرارتی و الکتریکی در هر یک از فصول با استفاده از ضرایبی محاسبه می‌گردند (آرندیان^۱ و همکاران - ۲۰۱۴). شایان ذکر است با در نظر گرفتن ضرایب یکسان برای فصول بهار و پاییز، مقادیر بارها و قیمت‌های حرارتی و الکتریکی در این دو فصل با یکدیگر برابر می‌شود. همچنین بارها و قیمت‌های حرارتی و الکتریکی دارای رشد سالیانه بوده که قابل محاسبه است (قاروی^۲ و همکاران - ۲۰۱۵).

الف) حرارتی



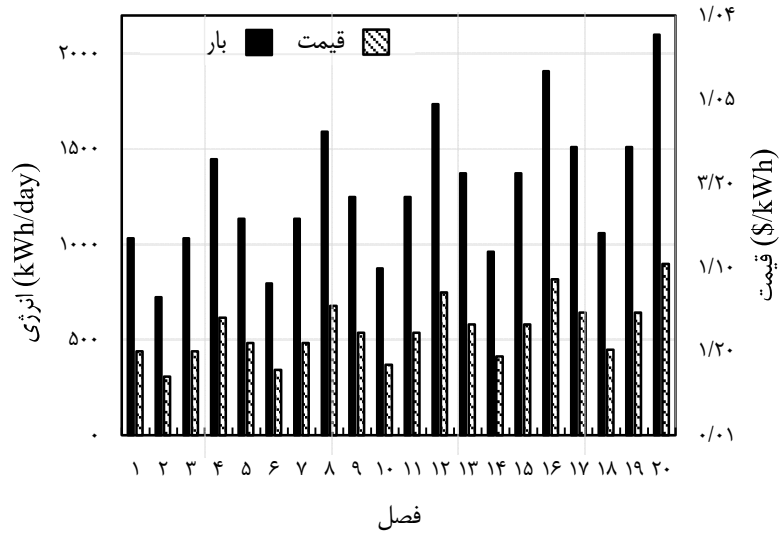
ب) الکتریکی



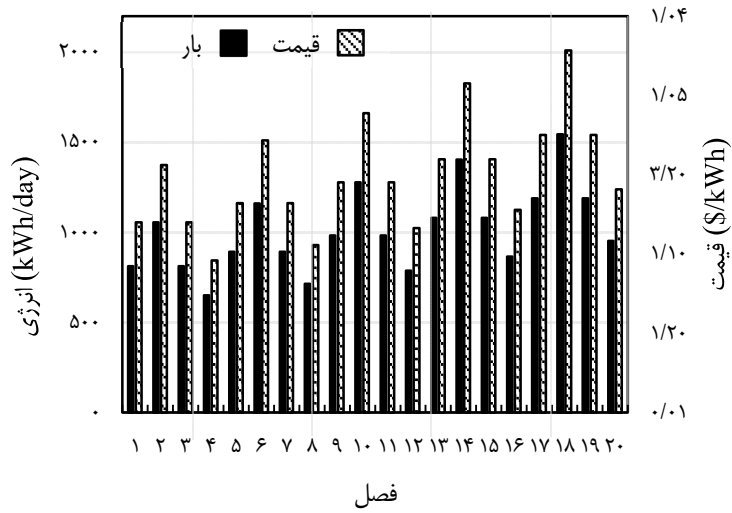
شکل ۴. انرژی‌های حرارتی و الکتریکی روزانه برای هر شین در سال اول از دوره بهره‌برداری پنج ساله

منبع: باسو و همکاران (۲۰۱۰)

الف) حرارتی



ب) الکتریکی



شکل ۵. انرژی‌های حرارتی و الکتریکی روزانه در طول بیست فصل از دوره بهره‌برداری پنج ساله

منبع: یافته‌های تحقیق

۴- روش بهینه‌سازی

به منظور بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف سیستم‌های تولید همزمان در شبکه‌های انرژی برق و حرارت برای حداکثرسازی سود بهره‌بردار شبکه، الگوریتم ترکیبی جدیدی بر مبنای الگوریتم‌های جهش قورباغه متحرک و اجتماع پرندگان^۱ در این بخش ارائه می‌گردد.

الگوریتم جهش قورباغه متحرک

الگوریتم جهش قورباغه متحرک، یک الگوریتم جدید در خانواده الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد. این الگوریتم از زندگی گروهی قورباغه‌ها زمانی که به دنبال غذا می‌گردند الهام گرفته شده است. این الگوریتم در سال ۲۰۰۶ به منظور حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی، بدون استفاده از روابط ریاضی ارائه گردید (یوسف^۲ و همکاران - ۲۰۰۶). در این الگوریتم جمعیت اولیه به چند گروه مجزا تقسیم می‌شود که تعداد قورباغه‌های موجود در همه گروه‌ها با یکدیگر برابر است. جهت اجرای این الگوریتم، ابتدا پارامترهای اولیه الگوریتم مقداردهی می‌شوند و سپس جمعیت اولیه‌ای با P عضو به صورت تصادفی تولید می‌شود. شایستگی هر عضو محاسبه و پس از مرتب نمودن جمعیت به صورت نزولی، کل جمعیت به m گروه تقسیم می‌شوند که هر کدام از این گروه‌ها شامل n عضو می‌باشند. این تقسیم‌بندی باید به گونه‌ای باشد که عضوهای با شایستگی بیشتر، در همه گروه‌ها قرار داشته باشند. سپس جستجوی محلی برای جهش قورباغه‌های با بدترین شایستگی به سمت قورباغه‌های با بهترین شایستگی صورت می‌پذیرد. این جهش مطابق روابط زیر می‌باشد^۳.

$$D = r(X_b - X_w) \quad (۲)$$

$$X_w(new) = X_w + D, \quad |D| < D_{max} \quad (۳)$$

پس از اعمال جهش فوق در صورتی که قورباغه جدید دارای پاسخ بهتری نسبت به بدترین قورباغه گروه باشد، جایگزین آن می‌گردد. در غیر این صورت با جایگزینی X_b با

1. Hybrid shuffled frog leaping algorithm
2. Eusuff

۳. D میزان جهش قورباغه

r عدد تصادفی در بازه $[0, 1]$

X_b موقعیت بهترین عضو گروه

X_w موقعیت بدترین عضو گروه

$X_w(new)$ موقعیت جدید بدترین عضو گروه

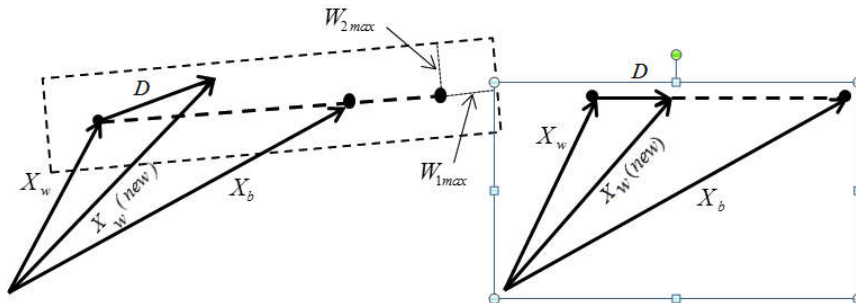
X_g جهش به سمت بهترین قورباغه جمعیت تکرار می‌گردد. اگر با اعمال جهش فوق پاسخ مناسب‌تری پیدا نشد، یک جواب به صورت تصادفی تولید و جایگزین بدترین عضو گروه می‌گردد. این روند برای تعداد تکرار مشخص شده ادامه می‌یابد تا در نهایت شرط توقف الگوریتم حاصل گردد.

جهت بهبودی در الگوریتم فوق، الگوریتم جهش قورباغه متحرک بهبودیافته ارائه گردیده است (آرندیان و همکاران - ۲۰۱۴). بهبود در الگوریتم جهش قورباغه در دو بخش ارائه می‌شود. بخش اول با تغییر در رابطه جهش، باعث بهبود سرعت الگوریتم و بخش دوم با تعریف زیرگروه‌ها، امکان توقف الگوریتم در بهینه‌های محلی را کاهش می‌دهد. بر این اساس می‌توان از روابط (۴) الی (۶) استفاده نمود که امکان جهش قورباغه در فضای وسیع‌تری را فراهم می‌نماید. شکل (۶) جهش قورباغه در هر دو الگوریتم را نشان می‌دهد.^۱

$$D = r C(X_b - X_w) + W \quad (4)$$

$$W = r_i W_{i\max} \quad (5)$$

$$X_w(\text{new}) = \begin{cases} X_w + D & \text{if } |D| < D_{\max} \\ X_w + \frac{D}{\sqrt{D^T D}} D_{\max} & \text{if } |D| > D_{\max} \end{cases} \quad (6)$$



الف) الگوریتم جهش قورباغه متحرک
ب) الگوریتم جهش قورباغه متحرک بهبودیافته
شکل ۶. جهش بدترین عضو گروه به سمت بهترین عضو گروه

منبع: آرندیان (۲۰۱۴)

۱. C عدد ثابت در بازه [۱ و ۲]

r_i عدد تصادفی در بازه [-۱ و ۱]

W میزان انحراف عضو گروه از راستای مستقیم

$X_{i\max}$ حداکثر میزان مجاز برای انحراف عضو گروه از راستای مستقیم در بعد i

با توجه به انتخاب بهترین عضو گروه در روند اجرای الگوریتم، ممکن است تمایل قورباغه‌ها حول قورباغه خاصی متمرکز گردد که این پاسخ، یک بهینه محلی است؛ بنابراین همواره استفاده از بهترین قورباغه گروه مطلوب نیست. بدین منظور مجموعه‌ای از گروه به‌عنوان زیرگروه در نظر گرفته می‌شود. استراتژی انتخاب این زیرگروه‌ها به این صورت است که به قورباغه‌هایی با شایستگی کمتر، ضرایب کوچک‌تر و به قورباغه‌هایی با شایستگی بیشتر، ضرایب بزرگ‌تری تخصیص داده می‌شود؛ بنابراین می‌توان جهت تعیین ضرایب از توزیع احتمال مثلثی استفاده نمود.

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع پرندگان

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع پرندگان نیز یک الگوریتم از خانواده الگوریتم‌های تکاملی است (ایبرهات^۱ و کندی^۲ - ۱۹۹۵). هر عضو از جمعیت اولیه به‌عنوان ذره شناخته شده و موقعیت هر یک از این ذرات به‌عنوان یک پاسخ احتمالی از مسئله در نظر گرفته می‌شود که از طریق روابط زیر با محاسبه سرعت ذره، موقعیت آن ذره بهبود می‌یابد.^۳

$$V_{new} = \omega V + C_1 r_1 (X_b - X) + C_2 r_2 (X_g - X) \quad (7)$$

$$X_{new} = X + V_{new} \quad (8)$$

الگوریتم ترکیبی جهش قورباغه متحرک و اجتماع پرندگان

جهت بهبود عملکرد هر یک از الگوریتم‌های ذکر شده، الگوریتم ترکیبی جدیدی ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی، جهش هر یک از قورباغه‌های گروه با استفاده از رابطه زیر صورت می‌پذیرد و رابطه (۹) جایگزین رابطه (۴) می‌گردد.

$$D = C(\omega V + C_1 r_1 (X_b - X_w) + C_2 r_2 (X_g - X_w)) + W \quad (9)$$

اولین بخش از رابطه فوق، ضریب لختی نامیده می‌شود که میزان تمایل قورباغه جهت باقی ماندن در مکان فعلی را نشان می‌دهد. بخش‌های دوم و سوم رابطه به‌عنوان

1. Eberhart
2. Kennedy

۳. V سرعت ذره

V_{new} سرعت جدید ذره

X موقعیت ذره

X_g موقعیت بهترین عضو جمعیت

X_{new} موقعیت جدید ذره

ω عدد ثابت در بازه [۰/۲ و ۱]

ضرایب اجتماعی، قورباغه را در راستای بهترین عضو گروه و جمعیت جهش می‌دهد. ضرایب C_1 و C_2 توانایی هر بخش در جذب قورباغه را مشخص می‌کند. بخش چهارم اجازه خروج قورباغه از فضای محدود بین بهترین عضو گروه و جمعیت را داده و باعث می‌گردد قورباغه از بهینه‌های محلی خارج گردد. به دلیل استفاده از هر دو الگوریتم، سرعت و دقت الگوریتم پیشنهادی در یافتن جواب بهینه افزایش می‌یابد.

پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی

به منظور پیاده‌سازی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی به منظور بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف سیستم‌های تولید همزمان در شبکه‌های انرژی برق و حرارت برای بیشینه نمودن سود بهره‌بردار شبکه، هر قورباغه جمعیت به عنوان یک عضو به صورت یک بردار تعریف شده که حاوی اطلاعاتی در زمینه اندازه و مکان سیستم‌های تولید همزمان و پمپ‌های حرارتی - الکتریکی مطابق رابطه زیر می‌باشد^۱.

$$X = [H_{PVT} \ H_{FC} \ H_{ICE} \ H_{MT} \ H_{EHP} \ loc_{PVT} \ loc_{FC} \ loc_{ICE} \ loc_{MT} \ loc_{EHP}]$$

سپس جمعیت اولیه به صورت تصادفی با P عضو ایجاد می‌شود. بارها و قیمت‌های انرژی‌های برق و حرارت در طول دوره بهره‌برداری محاسبه می‌گردد. سپس مقدار شایستگی هر عضو از جمعیت با محاسبه تابع هدف طبق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد. عضوها بر اساس شایستگی خود به صورت نزولی مرتب و گروه‌بندی می‌شوند. سپس جستجوی محلی بر اساس الگوریتم ترکیبی انجام و قیود بررسی می‌گردند. در صورت عدم برقراری قیود، مقدار تابع هدف برابر صفر در نظر گرفته می‌شود تا از فضای جستجوی غیر محدب مسئله اجتناب گردد. این روند تا برقراری شرط توقف الگوریتم ادامه می‌یابد. شایان ذکر است بخش اول رابطه (۱۰) به صورت اعداد پیوسته و بخش

۱. H_{PVT} اندازه حرارتی سیستم حرارتی - خورشیدی

H_{FC} اندازه حرارتی سیستم پیل سوختی

H_{ICE} اندازه حرارتی سیستم موتور احتراق داخلی

H_{MT} اندازه حرارتی سیستم میکروتوربین

H_{EHP} اندازه حرارتی پمپ‌های حرارتی الکتریکی

loc_{PVT} مکان سیستم حرارتی - خورشیدی

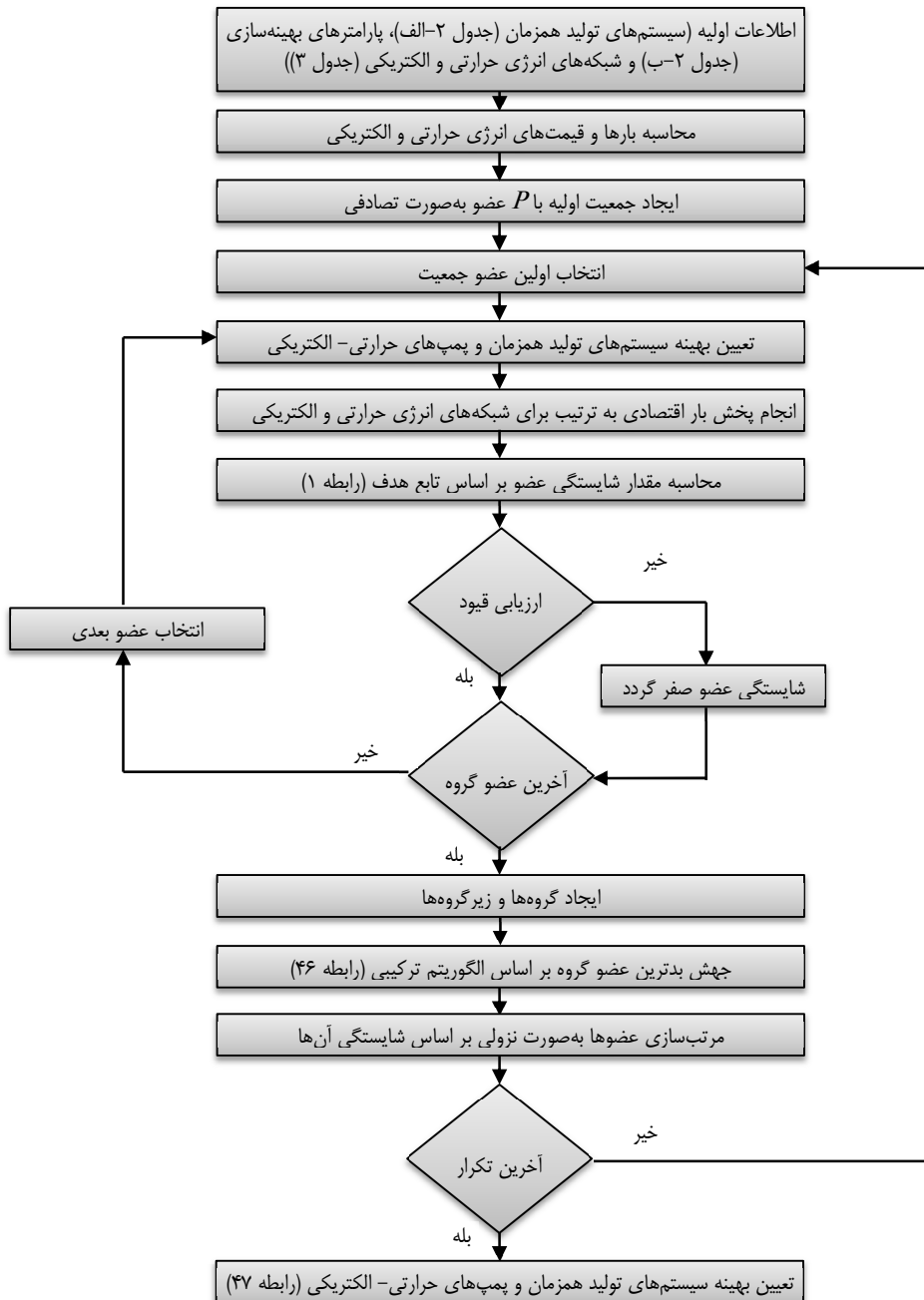
loc_{FC} مکان سیستم پیل سوختی

loc_{ICE} مکان سیستم موتور احتراق داخلی

loc_{MT} مکان سیستم میکروتوربین

loc_{EHP} مکان پمپ‌های حرارتی الکتریکی

دوم به صورت اعداد گسسته در محدوده شین های شبکه های انرژی حرارتی و الکتریکی می باشد. فلوچارت روش پیشنهادی در شکل (۷) ارائه شده است.



۵- اطلاعات مورد نیاز مسئله

در این بخش اطلاعات مورد نیاز برای بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف سیستم‌های تولید همزمان در شبکه‌های انرژی برق و حرارت به منظور بیشینه نمودن سود بهره‌بردار شبکه ارائه می‌گردد. اطلاعات مورد نیاز در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. در جدول (۲-الف) اطلاعات مربوط به سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت بر اساس فناوری‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر ارائه گردیده است. اطلاعات جغرافیایی شهر یزد جهت محاسبه انرژی‌های حرارتی و الکتریکی مربوط به فناوری حرارتی - خورشیدی در نظر گرفته شده است. براساس روابط ارائه شده در بخش دوم و با استفاده از اطلاعات مرکز اطلاعات علم هواشناسی^۱ (۲۰۱۶)، میزان انرژی تابشی خورشید در روز میانی هر فصل برای شهر یزد در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۵/۹۷، ۷/۰۲، ۴/۸۶ و ۳/۴۷ کیلووات ساعت به ازای هر مترمربع سطح می‌باشد. اطلاعات مربوط به پارامترهای الگوریتم، دوره بهره‌برداری، ضرایب بار و قیمت، نرخ‌های رشد بار و قیمت، محدودیت‌های شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی و اطلاعات مربوط به پمپ‌های حرارتی - الکتریکی در جدول (۲-ب) ارائه گردیده است. همچنین فرض شده است سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت و پمپ‌های حرارتی - الکتریکی در ابتدای دوره بهره‌برداری نصب می‌گردند. شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی مورد استفاده در این مطالعه بر اساس شبکه استاندارد ۱۴ شینه در نظر گرفته شده که دارای ساختار مشابه می‌باشند (باسو و همکاران - ۲۰۱۰). اطلاعات مربوط به شین‌های حرارتی و الکتریکی در جدول (۳-الف) ارائه شده است. انرژی حرارتی و الکتریکی از طریق خطوط انرژی مطابق جدول (۳-ب) در شبکه شارش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، شبکه الکتریکی دارای پنج واحد از پیش نصب شده است که وظیفه تأمین بار و تلفات شبکه الکتریکی در ابتدای دوره بهره‌برداری برعهده دارند. با اضافه شدن بارهای حرارتی (جدول ۳-الف)، سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت و پمپ‌های حرارتی - الکتریکی به گونه‌ای نصب می‌شوند تا به صورت بهینه بارهای حرارتی و تلفات شبکه انرژی حرارتی تأمین گردند. برق تولید شده توسط سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت باعث کاهش

تولید واحدهای الکتریکی از پیش نصب شده می‌گردد تا تعادل شبکه برق برقرار گردد. در هر سال از دوره بهره‌برداری، بارهای حرارتی و الکتریکی در طول فصول مختلف بر اساس ضرایب $Coef_{hi}$ و $Coef_{ei}$ تغییر نموده و از سیستم‌های تولید همزمان حرارتی و الکتریکی، پمپ‌های حرارتی الکتریکی و واحدهای الکتریکی از پیش نصب شده به‌گونه‌ای بهره‌برداری می‌گردد که تعادل شبکه‌های انرژی برق و حرارت برقرار شود. این تعادل باید در طول دوره بهره‌برداری با توجه به نرخ رشد بارها ($\alpha = 0.1$) و قیمت‌های ($\beta = 0.1$) برق و حرارت برقرار باشد (جدول ۲-ب).

جدول ۲. اطلاعات مورد نیاز جهت شبیه‌سازی

الف) سیستم‌های تولید همزمان حرارتی و الکتریکی

پارامتر	فناوری	کمیت (واحد)	پارامتر	فناوری	کمیت (واحد)
IC	حرارتی - خورشیدی	3800 (\$/kW)	MOC	حرارتی - خورشیدی	0.03 (\$/kWh)
	پیل سوختی	4500 (\$/kW)		پیل سوختی	0.04 (\$/kWh)
	میکروتوربین	2300 (\$/kW)		میکروتوربین	0.01 (\$/kWh)
	موتور احتراق داخلی	1190 (\$/kW)		موتور احتراق داخلی	0.07 (\$/kWh)
HPR	حرارتی - خورشیدی	3/2	ER	حرارتی - خورشیدی	0 (kg CO2/kWh)
	پیل سوختی	1/5		پیل سوختی	0.02 (kg CO2/kWh)
	میکروتوربین	0/6		میکروتوربین	0.15 (kg CO2/kWh)
	موتور احتراق داخلی	0/95		موتور احتراق داخلی	0.79 (kg CO2/kWh)
η	حرارتی - خورشیدی	0/12	H_{min}	پیل سوختی،	0.2 (p.u.)
	پیل سوختی	0/63	H_{max}	میکروتوربین و موتور	1 (p.u.)
	میکروتوربین	0/27	E_{min}	احتراق داخلی	0.2 (p.u.)
	موتور احتراق داخلی	0/45	E_{max}		1 (p.u.)
$K_{T,1}$	حرارتی - خورشیدی	0/58	G_{sc}	حرارتی - خورشیدی	1/367 (kW/m2)
			φ		31/89 (درجه)
			ω_1		-90 (درجه)
			ω_2		+90 (درجه)
$K_{T,2}$				(شهر یزد)	
$K_{T,3}$					
$K_{T,4}$					

منبع: آرنديان (۲۰۱۴)، پزولا (۲۰۱۶) و قاروی (۲۰۱۵)

ب) پارامترهای بهینه‌سازی

پارامتر	کمیت (واحد)	پارامتر	کمیت (واحد)	پارامتر	کمیت (واحد)
m	۱۲	$Coef_{h1}$	۱	Π_{min}	(p.u.) ۰/۹۵
n	۲۰	$Coef_{h2}$	۰/۷	Π_{max}	(p.u.) ۱/۰۵
Q	۷	$Coef_{h3}$	۱	f_{max}	(m3) ۳۰۰
D_{max}	۶	$Coef_{h4}$	۱/۴	V_{min}	(p.u.) ۰/۹
W_{max}	۰/۸۵	$Coef_{e1}$	۱	V_{max}	(p.u.) ۱/۰۵
C_1	۱/۷	$Coef_{e2}$	۱/۳	I_{max}	(A) ۲۵۰
C_2	۱/۹	$Coef_{e3}$	۱	UCR	(\$/kW) ۱۲۰
IT_{max}	۲۰	$Coef_{e4}$	۰/۸	IC_{EHP}	(\$/kW) ۳۲۵
N_{year}	۵ (سال)	α	۰/۱	MOC_{EHP}	(\$/kWh) ۰/۰۶
$\lambda_{h,1}$	۰/۰۵ (\$/kWh)	β	۰/۱	COP	۳/۸
$\lambda_{e,1}$	۰/۱۲ (\$/kWh)			$S_{EHP,max}$	(kWh) ۱۰۰

منبع: مرکز اطلاعات علم هواشناسی (۲۰۱۶)، فرسچی منفرد (۲۰۱۶) و سویدان (۲۰۱۶).

جدول ۳. اطلاعات شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی مورد استفاده در این مطالعه (p.u.)

الف) شبن‌های حرارتی و الکتریکی

شبکه انرژی برق								شبکه انرژی حرارتی			
تولید				بار				شماره شبن	بار		شماره شبن
حداکثر تولید	حداقل تولید	ولتاژ	تولید	نماد	توان راکتیو	توان اکتیو	نماد		کمیت	نماد	
۹/۹۰	-۹/۹۰	۱/۰۶	۲/۳۲	G ₁	-	-	-	۱	-	-	۱
۰/۵۰	-۰/۴۰	۱/۰۵	۰/۴۰	G ₂	۰/۰۶۵	۰/۲۰	L ₂	۲	۰/۳	L ₂	۲
۰/۴۰	۰	۱/۰۱	۰	G ₃	۰/۲۷۹	۰/۸۵	L ₃	۳	۱/۲۱	L ₃	۳
-	-	-	-	-	۰/۱۳۱	۰/۴۰	L ₄	۴	۰/۵۸	L ₄	۴
-	-	-	-	-	۰/۰۶۵	۰/۲۰	L ₅	۵	۰/۲۴	L ₅	۵
۰/۲۴	-۰/۰۶	۱/۰۷	۰	G ₆	۰/۰۶۵	۰/۲۰	L ₆	۶	۰/۲۸	L ₆	۶
-	-	-	-	-	۰/۰۱۶	۰/۰۷	L ₇	۷	۰/۱۱	L ₇	۷
۰/۲۴	-۰/۰۶	۱/۰۹	۰	G ₈	۰/۰۳۰	۰/۱۰	L ₈	۸	۰/۱۳	L ₈	۸
-	-	-	-	-	۰/۰۱۶	۰/۰۶	L ₉	۹	۰/۱۰	L ₉	۹
-	-	-	-	-	۰/۰۷۵	۰/۱۱	L ₁₀	۱۰	۰/۱۴	L ₁₀	۱۰
-	-	-	-	-	۰/۰۹۰	۰/۶۱	L ₁₁	۱۱	۰/۸۸	L ₁₁	۱۱
-	-	-	-	-	۰/۰۶۱	۰/۰۲	L ₁₂	۱۲	۰/۰۲	L ₁₂	۱۲
-	-	-	-	-	۰/۰۵۹	۰/۰۹	L ₁₃	۱۳	۰/۱۲	L ₁₃	۱۳
-	-	-	-	-	۰/۰۶۱	۰/۱۴	L ₁₄	۱۴	۰/۱۹	L ₁₄	۱۴

ب) خطوط انرژی حرارتی و الکتریکی

شبکه انرژی الکتریکی					شبکه انرژی حرارتی				
سوسپتانس	راکتانس	مقاومت	شین مقصد	شین مبدأ	شماره خط	ضریب تلفات	شین مقصد	شین مبدأ	شماره خط
۰/۰۲۶۴۰	۰/۰۵۹۱۷	۰/۰۱۹۳۸	۲	۱	۱	۰/۰۵	۲	۱	۱
۰/۰۲۱۹۰	۰/۲۲۳۰۴	۰/۰۵۴۰۳	۵	۱	۲	۰/۲۵	۵	۱	۲
۰/۰۱۸۷۰	۰/۱۹۷۹۷	۰/۰۴۶۹۹	۳	۲	۳	۰/۲۰	۳	۲	۳
۰/۰۲۴۶۰	۰/۱۷۶۳۲	۰/۰۵۸۱۱	۴	۲	۴	۰/۲۴	۴	۲	۴
۰/۰۱۷۰۰	۰/۱۷۳۸۸	۰/۰۵۶۹۵	۵	۲	۵	۰/۲۴	۵	۲	۵
۰/۰۱۷۳۰	۰/۱۷۱۰۳	۰/۰۱۳۳۵	۴	۳	۶	۰/۰۵	۴	۳	۶
۰/۰۰۶۴۰	۰/۰۴۲۱۱	۰/۰۱۶۷۰	۵	۴	۷	۰/۱۰	۵	۴	۷
۰	۰/۲۰۹۱۲	۰	۷	۴	۸	۰/۰۵	۷	۴	۸
۰	۰/۵۵۶۱۸	۰	۹	۴	۹	۰/۱۰	۹	۴	۹
۰	۰/۲۵۲۰۲	۰	۶	۵	۱۰	۰/۰۵	۶	۵	۱۰
۰	۰/۱۹۸۹۰	۰/۰۹۴۹۸	۱۱	۶	۱۱	۰/۰۵	۱۱	۶	۱۱
۰	۰/۲۵۵۸۱	۰/۱۲۲۹۱	۱۲	۶	۱۲	۰/۴۰	۱۲	۶	۱۲
۰	۰/۱۳۰۲۷	۰/۰۳۴۲۰	۱۳	۶	۱۳	۰/۲۰	۱۳	۶	۱۳
۰	۰/۱۷۶۱۵	۰	۸	۷	۱۴	۰/۰۵	۸	۷	۱۴
۰	۰/۱۱۰۰۱	۰	۹	۷	۱۵	۰/۰۵	۹	۷	۱۵
۰	۰/۰۸۴۵۰	۰/۰۳۱۸۱	۱۰	۹	۱۶	۰/۱۰	۱۰	۹	۱۶
۰	۰/۲۷۰۳۸	۰/۱۲۷۱۱	۱۴	۹	۱۷	۰/۴۰	۱۴	۹	۱۷
۰	۰/۱۹۲۰۷	۰/۰۸۲۰۵	۱۱	۱۰	۱۸	۰/۱۰	۱۱	۱۰	۱۸
۰	۰/۱۹۹۸۸	۰/۲۲۰۹۲	۱۳	۱۲	۱۹	۰/۲۵	۱۳	۱۲	۱۹
۰	۰/۳۴۸۰۲	۰/۱۷۰۹۳	۱۴	۱۳	۲۰	۰/۲۰	۱۴	۱۳	۲۰

منبع: باسو (۲۰۱۰)

۶- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از فناوری‌های مختلف سیستم‌های تولید همزمان در شبکه‌های انرژی برق و حرارت به‌منظور بیشینه نمودن سود بهره‌بردار شبکه ارائه می‌گردد. در ابتدا با هدف ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از سیستم تولید همزمان مبتنی بر

فناوری حرارتی - خورشیدی در شبکه‌های انرژی برق و حرارت انجام و نتایج آن با الگوریتم‌های ارائه شده در سایر مطالعات در جدول (۴) مقایسه گردیده است. بر اساس نتایج جدول (۴)، میزان سود سالیانه بهره‌بردار شبکه با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک^۱ (مرادی و عابدینی - ۲۰۱۰)، رقابت استعماری^۲ (قاروی و همکاران - ۲۰۱۵)، اجتماع پرندگان (ایبرهات و کندی - ۱۹۹۵)، جهش قورباغه متحرک (یوسف و همکاران - ۲۰۰۶)، جهش قورباغه متحرک بهبودیافته (آرندیان و همکاران - ۲۰۱۴) و اجتماع پرندگان بهبودیافته^۳ (اردکانی^۴ و اردهالی^۵ - ۲۰۱۴) به ترتیب ۲۸/۳۶، ۱۹/۹۶، ۱۷/۴۴، ۱۴/۷۳، ۱۱/۸۹ و ۸/۲۱ درصد بیشتر خواهد بود. منحنی همگرایی الگوریتم‌های ذکر شده در شکل (۸) ترسیم گردیده که نشان‌دهنده سرعت و دقت همگرایی الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها می‌باشد. به‌عنوان مثال، الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک و رقابت استعماری از سرعت همگرایی بیشتری به میزان ۸۴ و ۶۵ برخوردار می‌باشد.

پس از تأیید الگوریتم پیشنهادی، نتایج برای بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از سیستم‌های تولید همزمان مبتنی بر فناوری‌های مختلف (به‌صورت انفرادی و ترکیبی) در شبکه‌های انرژی برق و حرارت به‌منظور بیشینه نمودن سود بهره‌بردار شبکه در جدول (۵) ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد زمانی که قرار است تنها از یک نوع فناوری استفاده شود، فناوری حرارتی - خورشیدی مناسب‌ترین انتخاب می‌باشد که باعث می‌گردد سود سالیانه بهره‌بردار شبکه بیشینه گردد. در این حالت، استفاده از فناوری تجدیدپذیر حرارتی - خورشیدی باعث افزایش سود سالیانه بهره‌بردار به میزان ۶/۰۲، ۱۷/۷۹ و ۹/۴۴ درصد در مقایسه با فناوری‌های تجدیدناپذیر پیل سوختی، موتور احتراق داخلی و میکروتوربین می‌گردد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با استفاده ترکیبی از فناوری‌های مختلف، میزان سود سالیانه بهره‌بردار شبکه بیشینه (۱۳۴۹۳۷/۰۹ دلار) خواهد بود. در این ترکیب از فناوری موتور احتراق

1. Genetic algorithm
2. Imperial competitive algorithm
3. Improved particle swarm optimization
4. Ardakani
5. Ardehali

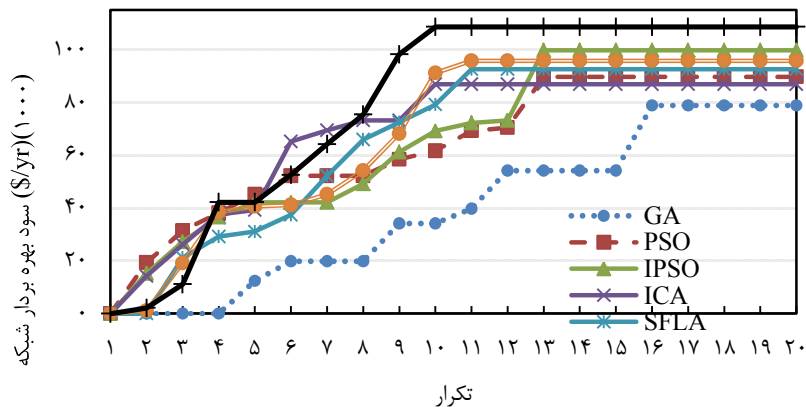
داخلی به دلیل انتشار بالای آلاینده‌های زیست‌محیطی استفاده نشده است (جدول ۵-)).

جدول ۴. مقایسه الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌های مطالعه شده جهت بیشینه نمودن سود سالیانه بهره‌بردار شبکه با استفاده از سیستم تولید همزمان مبتنی بر فناوری حرارتی-

خورشیدی

الگوریتم	سیستم تولید همزمان بهینه			افزایش سود اجرا (S)	زمان
	مکان (#)	اندازه حرارتی (kWh/day)	اندازه الکتریکی (kWh/day)		
ژنتیک	۱۳	۱۱۵۶/۰۸	۳۶۱/۲۰	۲۸/۳۶	۱۷۵
رقابت استعماری	۱۳	۱۰۹۴/۱۶	۳۴۷/۷۶	۱۹/۹۶	۸۱
اجتماع پرندگان	۱۵	۱۰۴۷/۸۴	۳۲۷/۳۶	۱۷/۴۴	۱۳۸
جهش قورباغه متحرک	۱۵	۱۲۲۲/۸۰	۳۸۲/۰۸	۱۴/۷۳	۵۱
جهش قورباغه متحرک بهبود یافته	۱۴	۱۴۷۴/۰۸	۴۶۰/۵۶	۱۱/۸۹	۳۴
اجتماع پرندگان بهبود یافته	۱۴	۱۲۹۹/۸۴	۴۰۶/۰۸	۸/۳۱	۴۸
ترکیبی پیشنهادی (این مطالعه)	۱۴	۱۳۳۸/۲۴	۴۱۸/۳۲	-	۲۸

منبع: یافته‌های تحقیق



شکل ۸- مقایسه همگرایی الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌های مطالعه شده جهت بیشینه نمودن سود سالیانه بهره‌بردار شبکه با استفاده از سیستم تولید همزمان مبتنی بر فناوری حرارتی- خورشیدی

منبع: یافته‌های تحقیق

نتایج نشان می‌دهد مکان بهینه برای نصب تعدادی از سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت عموماً نزدیک به شین‌های برق و حرارت دارای بارهای نسبتاً بزرگ (شین‌های ۳ و ۱۱) می‌باشد. نتایج برای سال پنجم دوره بهره‌برداری در شکل (۹) ترسیم گردیده است که در آن شبکه‌های انرژی برق و حرارت در تعادل تولید و مصرف قرار دارند. شکل (۹) نشان می‌دهد به دلیل مصرف بیشتر انرژی برق در فصل تابستان، میزان تبدیل انرژی در پمپ‌های حرارتی-الکتریکی در فصل تابستان صفر می‌باشد.

جدول ۵. بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت به صورت انفرادی و ترکیبی با در نظر گرفتن انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی (الف)

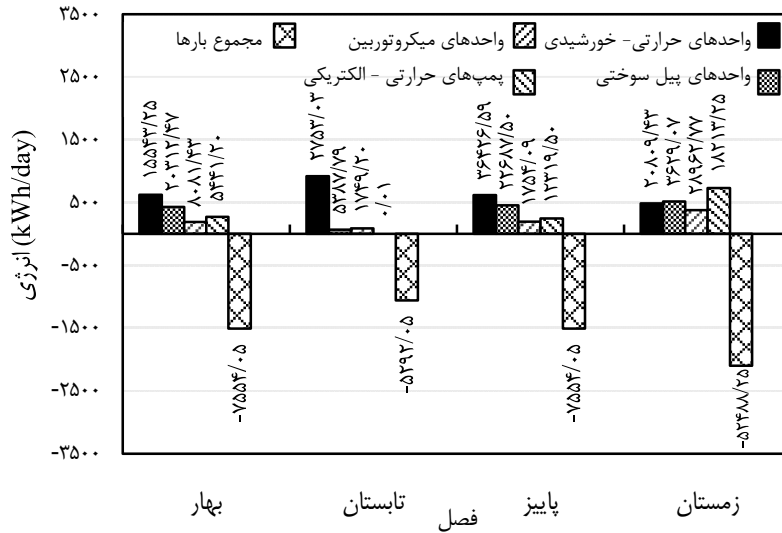
فناوری حرارتی - خورشیدی

سود بهره‌بردار شبکه (\$/yr)	انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی (kg/yr)	پمپ‌های حرارتی - الکتریکی بهینه		سیستم‌های تولید همزمان بهینه		
		اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)	اندازه الکتریکی (kWh/day)	اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)
۱۰۸۶۲۰/۱۹	۰	۶۹۴/۳۲	۷	۱۲۲/۴۰	۳۹۱/۶۸	۶
				۱۶۱/۰۳	۵۱۵/۲۸	۸
		۵۳۱/۵۶	۱۲	۹۴/۰۵	۳۰۰/۹۶	۱۳
				۱۲۱/۴۲	۳۸۸/۵۵	۱۴
ب) فناوری پیل سوختی						
سود بهره‌بردار شبکه (\$/yr)	انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی (kg/yr)	پمپ‌های حرارتی - الکتریکی بهینه		سیستم‌های تولید همزمان بهینه		
		اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)	اندازه الکتریکی (kWh/day)	اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)
۱۰۲۰۸۶/۹۴	۱/۰۸	۳۱۰/۲۹	۵	۴۱۲/۹۰	۶۱۹/۳۵	۴
				۲۰۷/۶۱	۳۱۱/۴۲	۸
		۴۳۸/۰۷	۱۲	۲۴۸/۵۲	۳۷۲/۷۸	۱۳
ج) فناوری موتور احتراق داخلی						
سود بهره‌بردار شبکه (\$/yr)	انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی (kg/yr)	پمپ‌های حرارتی - الکتریکی بهینه		سیستم‌های تولید همزمان بهینه		
		اندازه	مکان	اندازه	اندازه حرارتی	مکان

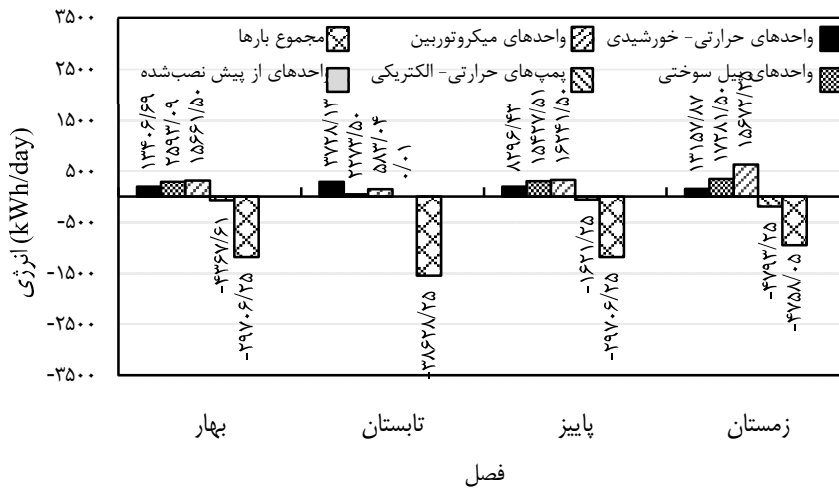
	(kg/yr)	حرارتی (kWh/day)	(#)	الکتریکی (kWh/day)	(kWh/day)	(#)
۸۹۳۰۱/۷۳	۳۷/۸۳	۲۷۹/۷۶	۷	۴۰۲/۶۷	۳۸۲/۵۴	۵
		۲۰۹/۹۳	۸	۴۳۹/۷۹	۴۱۷/۸۰	۸
		۳۱۹/۰۸	۱۲	۳۹۹/۵۱	۳۷۹/۵۳	۱۴
د) فناوری میکروتوربین						
سود بهره‌بردار شبکه (\$/yr)	انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی (kg/yr)	پمپ‌های حرارتی - الکتریکی بهینه		سیستم‌های تولید همزمان بهینه		
		اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)	اندازه الکتریکی (kWh/day)	اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)
۹۸۳۶۴/۴۹	۷/۵۴	۳۷۸/۳۱	۴	۶۲۷/۳۵	۳۷۶/۴۱	۵
		۲۹۸/۹۸	۷	۶۹۹/۶۳	۴۱۹/۷۸	۸
		۳۵۵/۰۳	۱۲	۶۸۲/۴۳	۴۰۹/۴۶	۱۳
ه) ترکیب فناوری‌های حرارتی - خورشیدی، پیل سوختی، موتور احتراق داخلی و میکروتوربین						
سود بهره‌بردار شبکه (\$/yr)	انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی (kg/yr)	پمپ‌های حرارتی - الکتریکی بهینه		سیستم‌های تولید همزمان بهینه		
		اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)	اندازه الکتریکی (kWh/day)	اندازه حرارتی (kWh/day)	فناوری مکان (#)
/۰۹ ۱۳۴۹۳۷	۲/۸۷	۲۰۶/۲۴	۵	۱۶۰/۷۳	۵۱۴/۳۲	۳ حرارتی - خورشیدی
		۳۱۹/۸۵	۷	۱۳۶/۹۰	۴۳۸/۰۹	۵ حرارتی - خورشیدی
				۲۷۶/۶۷	۴۱۵/۶۵	۸ پیل سوختی
		۱۸۸/۶۵	۱۲	۶۲۹/۰۵	۳۷۷/۴۳	۱۱ میکروتوربین
				۱۴۵/۵۹	۲۱۸/۳۹	۱۳ پیل سوختی

منبع: یافته‌های تحقیق

الف) حرارتی



ب) الکتریکی



شکل ۹. تعادل انرژی حرارتی و الکتریکی روزانه در شبکه‌های انرژی حرارتی و الکتریکی در سال پنجم از دوره بهره‌برداری پنج ساله

منبع: یافته‌های تحقیق

به منظور بررسی تأثیر لحاظ نمودن انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی در مسئله، بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از سیستم‌های تولید همزمان مبتنی بر فناوری‌های مختلف (به صورت انفرادی و ترکیبی) در شبکه‌های انرژی برق و حرارت به منظور بیشینه نمودن سود بهره‌بردار شبکه بدون لحاظ قیود زیست‌محیطی در جدول (۶) ارائه گردیده است.

جدول ۶. بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت به صورت انفرادی و ترکیبی بدون در نظر گرفتن انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی

الف) فناوری حرارتی - خورشیدی					
سود بهره‌بردار شبکه (\$/yr)	پمپ‌های حرارتی - الکتریکی بهینه		سیستم‌های تولید همزمان بهینه		
	اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)	اندازه الکتریکی (kWh/day)	اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)
۱۰۸۶۲۰/۱۹	۶۹۴/۳۲	۷	۱۲۲/۴۰	۳۹۱/۶۸	۶
			۱۶۱/۰۳	۵۱۵/۲۸	۸
	۵۳۱/۵۶	۱۲	۹۴/۰۵	۳۰۰/۹۶	۱۳
			۱۲۱/۴۲	۳۸۸/۵۵	۱۴
ب) فناوری پیل سوختی					
سود بهره‌بردار شبکه (\$/yr)	پمپ‌های حرارتی - الکتریکی بهینه		سیستم‌های تولید همزمان بهینه		
	اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)	اندازه الکتریکی (kWh/day)	اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)
۱۰۳۷۳۸/۱۹	۳۰۸/۹۳	۵	۴۱۲/۴۹	۶۱۸/۷۳	۴
	۱۱۸/۷۱	۷	۲۱۱/۶۰	۳۱۷/۴۰	۸
	۴۳۵/۷۶	۱۲	۲۴۹/۰۵	۳۷۳/۵۸	۱۳
ج) فناوری موتور احتراق داخلی					
سود بهره‌بردار شبکه (\$/yr)	پمپ‌های حرارتی - الکتریکی بهینه		سیستم‌های تولید همزمان بهینه		
	اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)	اندازه الکتریکی (kWh/day)	اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)
۱۲۳۶۸۳/۴۸	۲۱۶/۳۷	۶	۵۶۶/۱۵	۵۳۷/۸۴	۵
			۶۵۱/۴۱	۶۱۸/۸۴	۸
			۵۳۹/۰۱	۵۱۲/۰۵	۱۴
د) فناوری میکروتوربین					

سود بهره‌بردار شبکه (\$/yr)	پمپ‌های حرارتی - الکتریکی بهینه		سیستم‌های تولید همزمان بهینه			
	اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)	اندازه الکتریکی (kWh/day)	اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)	
۱۱۵۹۳۵/۹۴	۴۵۱/۲۹	۴	۶۴۹/۵۵	۳۸۹/۷۳	۵	
	۳۸۴/۹۴	۷	۷۸۸/۳۸	۴۷۳/۰۳	۸	
	۲۷۱/۸۳	۱۱	۶۹۳/۹۷	۴۱۶/۳۸	۱۳	
ه) ترکیب فناوری‌های حرارتی - خورشیدی، پیل سوختی، موتور احتراق داخلی و میکروتوربین						
سود بهره‌بردار شبکه (\$/yr)	پمپ‌های حرارتی - الکتریکی بهینه		سیستم‌های تولید همزمان بهینه			
	اندازه حرارتی (kWh/day)	مکان (#)	اندازه الکتریکی (kWh/day)	اندازه حرارتی (kWh/day)	فناوری	مکان (#)
۱۴۸۹۲۶	۱۱۹/۳۹	۲	۱۵۵/۸۹	۴۹۸/۸۴	حرارتی - خورشیدی	۳
			۴۱۵/۴۹	۳۹۴/۷۲	موتور احتراق داخلی	۶
	۱۵۸/۰۳	۷	۲۳۶/۱۹	۲۲۴/۳۸	موتور احتراق داخلی	۸
			۴۹۸/۲۳	۲۹۸/۹۴	میکروتوربین	۱۱
	۳۸۲/۴۶	۱۱	۲۹۶/۴۵	۲۸۱/۶۳	موتور احتراق داخلی	۱۳
			۱۹۵/۸۰	۱۱۷/۴۸	میکروتوربین	۱۴

منبع: یافته‌های تحقیق

نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد عدم لحاظ نمودن انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی باعث افزایش قابل پیش‌بینی سود سالانه بهره‌بردار شبکه به میزان ۹/۳۹ درصد (از ۱۳۴۹۳۷/۰۹ دلار به ۱۴۸۹۲۶/۸۵) در حالت ترکیب فناوری‌ها می‌گردد. همچنین با مقایسه نتایج جداول (۵) و (۶) مشخص می‌گردد ترکیب استفاده از فناوری‌های مختلف در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت متفاوت بوده و موتور احتراق داخلی در ترکیب فناوری‌های مختلف قرار می‌گیرد (جدول ۶-۵).

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از سیستم‌های تولید همزمان مبتنی بر فناوری‌های مختلف تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در شبکه‌های انرژی برق و حرارت به‌منظور بیشینه نمودن سود بهره‌بردار شبکه انجام شده است. به‌منظور

لحاظ نمودن تأثیرات دوره بهره‌برداری طولانی‌مدت، تغییرات بارها و قیمت‌های برق و حرارت در فصول مختلف سال و همچنین رشد سالیانه بارها و قیمت‌های حرارتی و الکتریکی در نظر گرفته شده است. به‌منظور بهینه‌سازی مسئله، الگوریتم ترکیبی جدیدی بر مبنای الگوریتم‌های جهش قورباغه متحرک و اجتماع پرندگان معرفی و ضمن مقایسه با الگوریتم‌هایی مانند ژنتیک، رقابت استعماری، اجتماع پرندگان، جهش قورباغه متحرک، جهش قورباغه متحرک بهبودیافته و اجتماع پرندگان بهبودیافته، سرعت و دقت همگرایی آن به پاسخ بهینه تأیید گردید. با اعمال الگوریتم پیشنهادی، مشخص گردید سود سالیانه بهره‌بردار شبکه وابسته به فناوری مورد استفاده در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت می‌باشد و استفاده ترکیبی از فناوری‌های مختلف تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر باعث افزایش سود بهره‌بردار شبکه می‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهد به دلیل انتشار بالای آلاینده‌های زیست‌محیطی توسط فناوری موتور احتراق داخلی، با لحاظ نمودن آلاینده‌های زیست‌محیطی در تابع هدف، امکان بهره‌برداری از این فناوری در ترکیب بهینه وجود ندارد.

جهت مطالعات آتی استفاده از ذخیره‌سازهای برق و حرارت در بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی تخصیص و بهره‌برداری از سیستم‌های تولید همزمان مبتنی بر فناوری‌های مختلف تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر پیشنهاد می‌گردد.

پیوست: روابط مورد نیاز در این مطالعه

(۱) نحوه محاسبه انرژی برق و حرارت سیستم حرارتی - خورشیدی

$$So = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} (1 + 0.033 \cos \frac{360nd}{365}) [\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \sin \delta]$$

که در آن

$$\delta = 23.45 \sin(\frac{360}{365}(nd + 284)) \quad (2)$$

$$H_{PVT} = E_{PVT} HPR_{PVT} \quad (3)$$

$$E_{PVT} = K_T So \eta_{PVT} \quad (4)$$

(۲) نحوه محاسبه درآمدها و هزینه‌های سیستم حرارتی - خورشیدی

$$REV_{PVT} = \sum_{k=1}^{N_{PVT}} \sum_{t=1}^{N_{year}} \sum_{i=1}^4 H_{k,ti} \lambda_{h,ti} + \sum_{k=1}^{N_{PVT}} \sum_{t=1}^{N_{year}} \sum_{i=1}^4 E_{k,ti} \lambda_{e,ti} \quad (5)$$

$$EXP_{PVT} = \sum_{k=1}^{N_{PVT}} IC_k + \sum_{k=1}^{N_{PVT}} \sum_{t=1}^{N_{year}} \sum_{i=1}^4 MOC_{k,ti} \quad (6)$$

(۳) نحوه محاسبه انرژی حرارتی و الکتریکی سیستم‌های تجدیدناپذیر مانند پیل

سوختی

$$H_{FC} = E_{FC} HPR_{FC} \quad (7)$$

$$E_{FC} = E_{FC,r} \eta_{FC} \quad (8)$$

(۴) مقدار انرژی تبدیل‌شده توسط پمپ حرارتی - الکتریکی

$$H_{EHP} = E_{EHP} COP \quad (9)$$

(۵) درآمدها و هزینه‌های بهره‌بردار شبکه

$$REV_1 = \sum_{t=1}^{N_{year}} \sum_{i=1}^4 \lambda_{h,ti} (\sum_{k=1}^{N_{PVT}} H_{k,ti} + \sum_{k=1}^{N_{FC}} H_{k,ti} + \sum_{k=1}^{N_{ICE}} H_{k,ti} + \sum_{k=1}^{N_{MT}} H_{k,ti})$$

$$REV_2 = \sum_{t=1}^{N_{year}} \sum_{i=1}^4 \lambda_{e,ti} (\sum_{k=1}^{N_{PVT}} E_{k,ti} + \sum_{k=1}^{N_{FC}} E_{k,ti} + \sum_{k=1}^{N_{ICE}} E_{k,ti} + \sum_{k=1}^{N_{MT}} E_{k,ti})$$

$$REV_3 = \sum_{t=1}^{N_{year}} \sum_{i=1}^4 [\lambda_{h,ti} (H_{loss,ti} - H_{loss,ti}^{CHP}) + \lambda_{e,ti} (E_{loss,ti} - E_{loss,ti}^{CHP})]$$

$$REV_4 = \sum_{t=1}^{N_{year}} UCR_t$$

$$\begin{aligned}
 EXP_1 &= \sum_{k=1}^{N_{PVT}} IC_k + \sum_{k=1}^{N_{FC}} IC_k + \sum_{k=1}^{N_{ICE}} IC_k + \sum_{k=1}^{N_{MT}} IC_k + \sum_{j=1}^{N_{EHP}} IC_j \\
 EXP_2 &= \sum_{t=1}^{N_{year}} \sum_{i=1}^4 \left(\sum_{k=1}^{N_{PVT}} MOC_{k,ti} + \sum_{k=1}^{N_{FC}} MOC_{k,ti} + \sum_{k=1}^{N_{ICE}} MOC_{k,ti} + \sum_{k=1}^{N_{MT}} MOC_{k,ti} + \sum_{j=1}^{N_{EHP}} MOC_{j,ti} \right) \\
 EXP_3 &= C_{CO_2} \left(\sum_{k=1}^{N_{FC}} \sum_{t=1}^{N_{year}} \sum_{i=1}^4 (E_{k,ti} ER_k) + \sum_{k=1}^{N_{ICE}} \sum_{t=1}^{N_{year}} \sum_{i=1}^4 (E_{k,ti} ER_k) + \sum_{k=1}^{N_{MT}} \sum_{t=1}^{N_{year}} \sum_{i=1}^4 (E_{k,ti} ER_k) \right)
 \end{aligned}$$

۶) قیود مسئله

$$\Pi_{i,\min} \leq \Pi_i \leq \Pi_{i,\max} \quad (17)$$

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (18)$$

$$|f_j| \leq f_{j,\max} \quad (19)$$

$$|I_j| \leq I_{j,\max} \quad (20)$$

$$H_{k,\min} \leq H_{k,ti} \leq H_{k,\max} \quad (21)$$

$$E_{k,\min} \leq E_{k,ti} \leq E_{k,\max} \quad (22)$$

$$\sum H_{k,ti} + \sum H_{EHP,ti} = \sum H_{load,ti} + \sum H_{loss,ti} \quad (23)$$

$$\sum E_{k,ti} = \sum E_{load,ti} + \sum E_{loss,ti} + \sum E_{EHP,ti} \quad (24)$$

$$HPR_i = \frac{H_i}{E_i} \quad (25)$$

$$S_{EHP} \leq S_{EHP,\max} \quad (26)$$

۷) بارها و قیمت‌های حرارتی و الکتریکی

$$H_{load,i} = Coef_{hi} H_{load} \quad (27)$$

$$E_{load,i} = Coef_{ei} E_{load} \quad (28)$$

$$\lambda_{h,i} = Coef_{hi} \lambda_h \quad (29)$$

$$\lambda_{e,i} = Coef_{ei} \lambda_e \quad (30)$$

$$H_{load,t} = H_{load}(1 + \alpha)^{t-1} \quad (31)$$

$$E_{load,t} = E_{load}(1 + \alpha)^{t-1} \quad (32)$$

$$\lambda_{h,t} = \lambda_{h,1}(1 + \beta)^{t-1} \quad (33)$$

$$\lambda_{e,t} = \lambda_{e,1}(1 + \beta)^{t-1} \quad (34)$$

منابع

- Adam A, Fraga ES, Brett DJL. (2014), "Options for residential building services design using fuel cell based micro-CHP and the potential for heat integration", *Applied Energy* 138, 685.
- Aghaei Meybodi M, Behnia M. (2011), "Impact of carbon tax on internal combustion engine size selection in a medium scale CHP system", *Applied Energy* 88, 5153.
- Alishahi S, Hosseini M, Maskani H, Shabani M. (2012), "Placement and sizing of combined heat and power systems considering cost/benefit analysis", *CIREC Workshop*, 1.
- Arabkoohsar A, Machado L, Farzaneh-Gord M, and Koury RNN. (2015), "Thermo-economic analysis and sizing of a PV plant equipped with a compressed air energy storage system", *Renewable Energy* 83, 491.
- Arandian B, Hooshmand RA, Gholipour E. (2014), "Decreasing activity cost of a distribution company by reconfiguration and power generation control of DGs based on shuffled frog leaping algorithm", *Electrical Power and Energy Systems* 61, 48 (2014).
- Ardakani FJ, Ardehali MM. (2014), "Long-term electrical energy consumption forecasting for developing and developed economies based on different optimized models and historical data types", *Energy* 65, 452.
- Atmospheric science data center, "Surface meteorology and solar energy", <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov> (accessed 02.07.2016).
- Basu AK, Chowdhury S, Chowdhury SP. (2010), "Impact of strategic deployment of CHP-based DERs on microgrid reliability", *IEEE Transactions on Power Delivery* 25, 1697.
- Bendaikha W, Larbi S, Bouziane M. (2011), "Feasibility study of hybrid fuel cell and geothermal heat pump used for air conditioning in Algeria", *International Journal Hydrogen Energy* 36, 4253.
- Bhatti J, Joshi P, Tiwari GN, and Al-helal IM. (2015), "Exergy analysis of photovoltaic thermal integrated biogas system", *Renewable Sustainable Energy* 7, 63105.
- Bose BK. (2010), "Global warming: energy, environmental pollution, and the impact of power electronics", *IEEE Industry Electronic Magazine* 4, 6.
- Buoro D, Pinamonti P, Reini M. (2014), "Optimization of a distributed cogeneration system with solar district heating", *Applied Energy* 124, 298.

Carpaneto E, Lazzeroni P, Repetto M. (2015), "Optimal integration of solar energy in a district heating network", *Renewable Energy* 75, 714.

Eberhart R, Kennedy J. (1995), "A new optimizer using particle swarm theory", 6th International Symposium in Micro Machine and Human Science, 39.

El-Sharkh MY, Tanrioven M, Rahman A, Alam MS. (2010), "Economics of hydrogen production and utilization strategies for the optimal operation of a grid parallel PEM fuel cell power plant", *International Journal Hydrogen Energy* 35, 8804.

Eusuff MM, Lansey K, and Pasha F. (2006), "Shuffled frog-leaping algorithm: a mimetic meta-heuristic for discrete optimization", *Engineering Optimization* 38, 129.

Farjah E, Bornapour M, Niknam T, Bahmanifirouzi B. (2012), "Placement of combined heat, power and hydrogen production fuel cell power plants in a distribution network", *Energies* 5, 790.

Farshchimonfared M, Bilbao JI, and Sproul AB. (2016), "Full optimisation and sensitivity analysis of a photovoltaic-thermal (PV/T) air system linked to a typical residential building", *Solar Energy* 136, 15.

Gharavi H, Ardehali MM, Tichi SG. (2015), "Imperial competitive algorithm optimization of fuzzy multi-objective design of a hybrid green power system with considerations for economics, reliability, and environmental emissions", *Renewable Energy* 78, 427.

Gil HA, Joos G. (2008), "Models for quantifying the economic profits of distributed generation", *IEEE Transactions Power System* 23, 327.

Moradi MH, Abedini M. (2012), "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems", *International Journal Electric Power Energy System* 34, 66.

Niknam T, Zeinoddini-Meymand H, Doagou-Mojarrad H, Aghaei J. (2011), "Multi-objective daily operation management of distribution network considering fuel cell power plants", *IET Renewable Power Generation* 5, 356.

Pezzola L, Dantia P, Magnani S. (2016), "Performance comparison among Gas Heat Pump, Electric Heat Pump and conventional thermal devices in tertiary sector applications", *Energy Procedia* 101, 416.

- Sharifi SM, Rowshanzamir S, Eikani MH. (2010), "Modelling and simulation of the steady-state and dynamic behavior of a PEM fuel cell", *Energy* 35, 1633.
- Singh M, Khadkikar V, Chandra A, Varma RK. (2011), "Grid interconnection of renewable energy sources at the distribution level with power-quality improvement features", *IEEE Transactions on Power Delivery* 26, 307.
- Stern J. (2014), "International gas pricing in Europe and Asia: a crisis of fundamentals", *Energy Policy* 64, 43.
- Swaidan A, Ghaddar N, and Ghali K. (2016), "Optimized design and operation of heat-pipe photovoltaic thermal system with phase change material for thermal storage", *Renewable Sustainable Energy* 8, 23501.
- Tichi SG, Ardehali MM, Nazari ME. (2010), "Examination of energy price policies in Iran for optimal configuration of CHP and CCHP systems based on particle swarm optimization algorithm", *Energy Policy* 38, 6240.
- Tookanlou MB, Ardehali MM, Nazari ME. (2015), "Combined cooling, heating, and power system optimal pricing for electricity and natural gas using particle swarm optimization based on bi-level programming approach: Case study of Canadian energy sector", *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 23, 417.
- U.S. Environmental Protection Agency (2014), "Catalogue of CHP Technologies", *Combined Heat and Power Partnership*, 1.
- Valentinas K, Kestutis B, Lina M. (2014), "Innovative method of RES integration into the regional energy development scenarios", *Energy Policy* 64, 324.
- Wang H, Yin W, Abdollahi E, Lahdelma R, Jiao W. (2015), "Modelling and optimization of CHP based district heating system with renewable energy production and energy storage", *Applied Energy* 159, 401.

Optimization of Location, Size and Operation of Various Combined Heat and Power Technologies in Heat and Electricity Distribution Networks

Behdad Arandian

PhD of electrical engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), arandian@aut.ac.ir

Morteza Mohhamadi Ardehali¹

Professor, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), ardehali@aut.ac.ir

Received: 2017/07/19 Accepted: 2018/04/21

Abstract

Due to favorable efficiencies, industry increasingly utilizes combined heat and power (CHP) units. This paper reviews options for optimal location, size and operation of various CHP technologies in heat and electricity distribution networks with given techno-economic-environmental constraints, which maximized the economic profit of CHP technologies. In our cost benefit model, heat and electricity sold to customers, loss reduction of heat and electricity distribution networks, and cost reduction in required equipment investment are considered as benefits for the utility company and, the sum of costs for capital equipment investment, operation and maintenance, and environmental emission are considered as costs. We obtain the optimal values through use of a newly developed hybrid algorithm based on shuffled frog leaping algorithm and particle swarm. The simulation results show that combination of renewable and non-renewable CHP technologies increase yearly utility company economic profit by \$ 134937.09. Internal combustion engines have no role in this combination due their high environmental emission costs.

JEL Classification: Q30,Q20,L94,C61,Q51

Keywords: environmental emission, heat and electricity distribution networks, non-renewable resources, optimization algorithm, renewable resources, prices, Iran

1. Corresponding Author