

بررسی اقتصادی نیروگاه‌های تولید هم‌زمان بر اساس بهینه‌سازی ظرفیت و استراتژی عملکرد

محمدحسن مرادی و مهدی حاجی‌نظری

تولید هم‌زمان می‌تواند بر اساس استفاده از توربین‌های گاز، توربین‌های بخار یا موتورهای احتراقی بنا نهاده شود و منبع تولید انرژی اولیه نیز شامل دامنه وسیعی است که می‌تواند سوخت‌های فسیلی، زیست توده، زمین گرمایی یا انرژی خورشیدی باشد. تولید هم‌زمان برق و حرارت نوعی تولید پراکنده با بازده انرژی بالا می‌باشد که به دلیل زمان کم طراحی و نصب و پایین بودن هزینه بهره‌برداری و نگهداری، در بازار رقابتی کنونی بسیار مورد توجه قرار گرفته است و اخیراً در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه طرفداران خود را یافته و استفاده از آن شتاب گرفته است [۴]. وجود روش‌های نوین در تأمین انرژی مصرف‌کنندگان که از نظر عملکرد فنی، اقتصادی و یا زیست‌محیطی با یکدیگر متفاوت می‌باشند، نیاز رو به رشدی را در به‌کارگیری مدل‌های متنوع بهینه‌سازی در این سیستم‌ها به‌وجود آورده است. تحقیقات انجام‌گرفته در زمینه بهینه‌سازی واحدهای تولید هم‌زمان در ترم‌هایی مختلفی همچون ارزش خالص فعلی [۵]، صرفه‌جویی انرژی اولیه [۶]، هزینه کلی سالیانه [۷]، مینیمم هزینه انرژی [۸]، هزینه انتشار دی‌اکسید کربن [۹] و همچنین بررسی هم‌زمان کاهش انرژی اولیه، هزینه کلی سالیانه و دی‌اکسید کربن در کنار هم [۱۰] انجام گرفته که به‌صورت تابع هدف در بهره‌برداری از سیستم‌های تولید هم‌زمان ارائه شده‌اند. از سوی دیگر برای مدل‌سازی این ملاک‌ها با توجه به مدل عملکرد نیروگاه اغلب از برنامه‌ریزی خطی [۱۱] که یکی از مدل‌های کلاسیک و پرکاربرد در جهت کاهش هزینه‌های ناشی از تأمین تقاضا در سیستم‌های تولید هم‌زمان می‌باشد، استفاده شده است. در مواردی که مدل عملکرد غیر خطی به‌دلیل قیود سیستم یا شرایط مسئله به‌وجود می‌آید، برنامه‌ریزی غیر خطی مختلط اعداد صحیح می‌تواند برای حل مسئله به‌کار گرفته شود. از روش‌های حل دیگر برای سیستم تولید هم‌زمان می‌توان به آزادسازی لاگرانژ [۱۲]، برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح [۱۱] و الگوریتم ژنتیک [۱۳] اشاره نمود. نکته اساسی در قبال اجرای طرح‌های تولید توان به کمک نیروگاه‌های تولید هم‌زمان، میزان درآمد خالص از اجرای طرح در سال‌های آتی با مد نظر قرار دادن هزینه‌های اولیه و بهره‌برداری نیروگاه می‌باشد که کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد. از این رو این مقاله با ارائه دو تابع هدف: یکی یافتن ظرفیت بهینه نیروگاه و بویلر کمکی برای دستیابی به ماکزیمم سود خالص حاصله از نصب واحد CHP و دیگری محاسبه هم‌زمان مینیمم هزینه بهره‌برداری از نیروگاه در هر ساعت و جانشینی آن در تابع هدف اصلی به بررسی امکان‌پذیری اجرای طرح در مناطق با مصرف انرژی بالا می‌پردازد. بر این اساس، یک مدل جریان انرژی با توجه به مدل عملکرد هم‌زمان سیستم CHP و بویلر برای تأمین تقاضای انرژی ارائه می‌شود که با مینیمم کردن هزینه بهره‌برداری و در کنار آن کاهش انتشار آلودگی زیست‌محیطی و تعیین استراتژی عملکرد، ملاک ارزیابی اقتصادی را که بر اساس معیار اقتصادی NPV شکل گرفته، پیشینه می‌کند. به‌منظور حل مسئله از برنامه‌ریزی خطی برای کاهش هزینه‌های مربوط به تأمین

چکیده: تولید هم‌زمان برق و حرارت^۱ (CHP) با استفاده از یک نوع سوخت ورودی، صرفه‌جویی انرژی قابل توجهی را ممکن ساخته و در بسیاری از موارد با توجه به بازده انرژی بالا، کاهش انتشار آلودگی و افزایش قابلیت اطمینان، جایگزینی کلیدی برای تولید مجزای انرژی حرارتی و الکتریکی شناخته می‌شود. با این حال وجود یک ارزیابی صحیح در جهت بررسی توجیه‌پذیری اقتصادی سرمایه‌گذاری در این نیروگاه‌ها با توجه به شرایط مختلف از جمله نوع و حجم تقاضای انرژی محل مصرف و همچنین مشخصات پارامترهای بهره‌برداری ضروری به نظر می‌رسد. از این رو در این مطالعه یک چهارچوب بهینه‌سازی اقتصادی به‌منظور ارزیابی سرمایه‌گذاری در احداث واحد تولید هم‌زمان ارائه می‌گردد که در آن یک استراتژی بهینه با توجه به مدل عملکرد نیروگاه برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و همچنین کاهش انتشار آلودگی زیست‌محیطی پیشنهاد می‌گردد. برای کاهش هزینه‌های مربوط به تأمین تقاضای انرژی در هر ساعت (تعیین استراتژی عملکرد) از برنامه‌ریزی خطی استفاده می‌گردد و در ادامه، استراتژی مورد نظر به کمک الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع پرندگان^۲ (PSO)، برای تعیین ظرفیت بهینه CHP و بویلر کمکی، تا دستیابی به ماکزیمم مقدار ارزش خالص فعلی^۳ (NPV) از مقادیر مورد انتظار سرمایه‌گذاری به‌کار می‌رود. در نهایت کارایی روش پیشنهادی با آنالیز تصمیم احداث یک نیروگاه CHP برای یک بیمارستان نمونه ارائه می‌گردد.

کلیدواژه: تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP)، ارزش خالص فعلی (NPV)، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع پرندگان (PSO).

۱- مقدمه

تقاضای رو به رشد انرژی در سطح جهانی و از سوی دیگر ناکارآمد بودن سیستم‌های مرسوم تولید برق برای تأمین آن موجب شده تا دست اندر کاران امر به سمت استفاده از تکنولوژی‌های مطمئن و کارآمدتر تولید به‌منظور کاهش تلفات و کنترل مصرف انرژی پیش بروند. در این میان استفاده از سیستم‌های پراکنده تولید برق و به‌خصوص تولید هم‌زمان (CHP, CO₂ and Tri-Generation) که نسبت به سیستم‌های مرسوم مزایایی همچون بازدهی بالاتر از سوخت مصرفی (به‌دلیل استفاده از ظرفیت انرژی حرارتی مازاد نیروگاه)، کاهش گازهای گلخانه‌ای و استقلال نسبی از شبکه قدرت را دارند، رشد چشم‌گیر داشته است [۱] تا [۳]. فرآیند

این مقاله در تاریخ ۲۸ بهمن ماه ۱۳۸۹ دریافت و در تاریخ ۱ اسفند ماه ۱۳۹۰ بازنگری شد.

محمدحسن مرادی، دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، همدان، (email: mh_moradi@yahoo.co.uk).

مهدی حاجی‌نظری، دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، همدان، (email: mehdihajinazari@yahoo.com).

1. Combined Heat and Power
2. Particle Swarm Optimization
3. Net Present Value

$N = 20$: طول مدت سرمایه‌گذاری

در این مطالعه فرمول پیشرفته‌تری از این معیار که در آن اختلاف درآمدها و هزینه‌های جاری سالانه در سالیان متوالی یکسان نباشد، ارائه می‌گردد که در آن با ضرب درآمد خالص هر سال در نرخ برابری و مجموع آن برای طول عمر پروژه و در نهایت اختلاف آن با سرمایه‌گذاری ثابت، می‌توان مقدار ارزش خالص فعلی را طبق رابطه زیر به‌دست آورد

$$NPV = \left[\frac{1}{1+p} \times \sum_{n=1}^N \alpha^n \times I_n \right] - IC \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{ii - p}{1+p}} \quad (4)$$

که α ضریب برابری می‌باشد. در این روش پروژه‌هایی که مقدار NPV در بازه اجرای آنها مثبت باشد (که این بازه زمانی، دوره بازگشت سرمایه را نشان می‌دهد)، می‌تواند با توجه به دوره بازگشت سرمایه پذیرفته گردد و در مقابل در صورتی که منفی باشد، رد می‌گردد. از این رو در تصمیم‌گیری بین دو طرح اقتصادی ممکن، آن که مقدار ارزش خالص فعلی بیشتری دارد لزوماً انتخاب می‌گردد.

۲-۲ الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (PSO)

الگوریتم اجتماع پرندگان با گروهی از ذرات کار می‌کند و برای یافتن جواب بهینه در فضای مسئله با به‌روز کردن مکان ذرات به جستجو می‌پردازد. هر ذره با دو مقدار v_{id} و x_{id} مشخص می‌شود که x_{id} معرف موقعیت مکانی و v_{id} سرعت بعد d ام از i امین ذره می‌باشند. در هر مرحله از حرکت جمعیت، مکان هر ذره با دو مقدار بهترین به‌روز می‌شود. اولین مقدار، بهترین جواب از لحاظ برازندگی است که p_best نام دارد و دیگری، بهترین مقداری است که تاکنون توسط تمام ذرات در میان کل جمعیت به‌دست آمده است که این مقدار g_best نام دارد. به‌روز رسانی و مقدارگیری در PSO با استفاده از روابط زیر صورت می‌گیرد

$$x_{id}^{(t+1)} = x_{id}^{(t)} + v_{id}^{(t+1)} \quad (5)$$

$$v_{id}^{(t+1)} = w.v_{id}^{(t)} + c_1 \cdot \text{rand}(p_best_{id} - x_{id}^{(t)}) + c_2 \cdot \text{rand}(g_best_{id} - x_{id}^{(t)}) \quad (6)$$

که w وزن اینرسی برای سرعت‌گیری ذرات می‌باشد. در رابطه دوم نیز c_1 و c_2 ضرایب یادگیری ذرات است که در بازه $[1, 2]$ می‌باشد. rand نیز عددی تصادفی در بازه $[0, 1]$ است. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم، مقدار نهایی سرعت هر ذره را برای هر بعد در بازه $V_{id} \in [-v_{max}, +v_{max}]$ محدود می‌کنیم.

حال به بررسی خصوصیات الگوریتم PSO به‌کار رفته می‌پردازیم. در آزمایشات بسیاری توسط PSO محدوده دینامیکی متغیرها در هر بعد، اغلب در مقدار v_{max} تنظیم می‌شود. بنابراین ثابت‌های c_1 و c_2 اغلب مطابق با تجربیات گذشته، به مقدار ۲ تنظیم می‌شود. انتخاب مناسب وزن اینرسی w یک تعادل بین شناسایی محلی و کلی را فراهم می‌کند. بنابراین در این مقاله برای توسعه، w را به‌طور خطی از مقدار ۰.۹ در طول اجرا کاهش می‌دهیم تا در زمان لازم سرعت بگیرد و در نزدیکی جواب بهینه به کندی مسیر را ادامه دهد. وزن اینرسی w مطابق معادله زیر بیان می‌شود

$$W = 0.9^{iter} \quad (7)$$

که $iter$ مقدار تکرار را نشان می‌دهد.

تقاضای انرژی در هر ساعت استفاده می‌گردد و در ادامه استراتژی مورد نظر به کمک الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع پرندگان (PSO)، برای تعیین ظرفیت بهینه CHP و بویلر کمکی، تا دست‌یابی به ماکزیمم مقدار ارزش خالص فعلی (NPV) از مقادیر مورد انتظار سرمایه‌گذاری به‌کار می‌رود. علاوه بر مدل‌سازی و حل مسئله، در سطح واحدهای تولید، تصمیم‌گیرنده‌ها، اغلب با مسایل تصمیم پیچیده‌ای که به‌دلیل تغییرات ممکن در بعضی از پارامترهای مؤثر حوزه انرژی همچون قیمت حامل‌های انرژی به‌وجود می‌آیند، روبه‌رو می‌شوند که در این تحقیق سناریوهای ممکن مختلفی برای بررسی اثرات این تغییرات در سیستم مورد مطالعه ارائه می‌گردد. به‌طوری که هدف، تعیین ظرفیت بهینه برای نیروگاه و بویلر کمکی با توجه به بازده اقتصادی طرح و ملاحظات زیست‌محیطی می‌باشد. بخش‌های مختلف این مطالعه در ادامه به‌صورت زیر می‌باشند: مفروضات مورد نیاز مسئله در بخش دوم معرفی می‌شوند. در بخش سوم فرمول‌بندی کلی مسئله و پارامترهای مختلف برای سناریوی مورد نظر تبیین می‌شوند. روش حل و نحوه استفاده از این ابزار متناسب با نوع مسئله در بخش چهارم و در نهایت در بخش پنجم نتایج به‌کارگیری روش برای یک بیمارستان نمونه مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- مفروضات

در این بخش مفروضات ارائه‌شده شامل ارزش خالص فعلی و الگوریتم اجتماع پرندگان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲ ارزش خالص فعلی

معیار ارزش خالص فعلی (NPV) که به‌صورت مقدار درآمد خالص سرمایه‌گذاری در یک پروژه معرفی می‌گردد به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ملاک‌ها در تعیین سودآوری یک طرح مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش NPV در مقایسه با دیگر روش‌های ارزیابی، در مورد سرمایه‌گذاری‌های بزرگ اقتصادی، عموماً فضای تصمیم بهتری را برای سرمایه‌گذار فراهم می‌کند و به همین دلیل جزء متداول‌ترین ملاک‌های ارزیابی در زمینه سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های CHP می‌باشد [۱۴] و [۱۵]. همچون سایر ملاک‌های مؤثر ارزیابی، معیار NPV بر اساس اختلاف درآمدها و هزینه‌های سالیانه و همچنین هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای کل دوره پروژه در حضور یک ضریب تبدیل برای هم‌زمانی تقارن دو هزینه مقدار اولیه و سالیانه شکل می‌گیرد. یک مدل ساده ریاضی برای ملاک NPV در (۱) بیان شده است که در آن اختلاف درآمدها و هزینه‌های سالانه یکسان می‌باشد. در این حالت، مقدار ارزش خالص فعلی با ضرب درآمد خالص سالانه پروژه در ضریب تنزیل و اختلاف آن با سرمایه‌گذاری ثابت به‌دست می‌آید

$$NPV = [I_n] \times Df - IC \quad (1)$$

$$Df = \frac{1 - \left[\frac{ii - p}{1+p} \right]^N}{ii - p} \quad (2)$$

که در آن:

IC : هزینه سرمایه‌گذاری اولیه

Df : ضریب تنزیل

α : ضریب برابری

I_n : اختلاف درآمدها و هزینه‌های جاری در سال n ام

$p = 15\%$: نرخ تورم

$ii = 20\%$: نرخ بهره

۳-۱-۱ مدل استراتژی عملکرد f_1

در واقع هدف این استراتژی مینیمم کردن هزینه تأمین تقاضای انرژی در هر ساعت (برق مبادله‌شده با شبکه و سوخت خریداری‌شده برای CHP و بویلر) بر مبنای عبور انرژی در سیستم و قیود بازده انرژی برای تجهیزات می‌باشد. در شکل ۱ نحوه توزیع انرژی متناسب با نوع تقاضای انرژی (حرارتی و الکتریکی) و بازدهی تجهیزات به تصویر کشیده شده است که در آن X_{ij} ها در جهت مینیمم کردن هزینه در هر ساعت (f_1) باید بهینه گردند

$$f_1 = \min \sum_{j=1}^N \frac{\alpha^j}{1+p} [\sum_{i=1}^{NPF} (f_{vij})] = \min \sum_{j=1}^N \frac{\alpha^j}{1+p} \quad (10)$$

$$\times [\sum_{i=1}^{NPF} [c_{vij}x_{ij} + c_{vij}x_{vij} + c_{vij}x_{vij} - c_{vij}x_{vij} - mohit]]$$

که در آن:

$C_{vij} = 169$: قیمت گاز ورودی به CHP Rial/kwh

$C_{vij} = 169$: قیمت گاز ورودی به بویلر Rial/kwh

C_{vij} : قیمت فروش برق به شبکه Rial/kwh

x_{vij} : انرژی معادل گاز ورودی به CHP kwh

x_{vij} : انرژی معادل گاز ورودی به بویلر kwh

x_{vij} : انرژی الکتریکی خریداری‌شده از شبکه kwh

x_{vij} : انرژی الکتریکی فروخته‌شده به شبکه kwh

$mohit$: درآمد کاهش انتشار آلاینده‌ها

همچنین باید یادآور شویم که در تابع هدف اصلی (۹)، بار الکتریکی قابل فروش را کل بار در نظر گرفتیم، در صورتی که به دلیل هزینه انرژی امکان دارد که در ساعاتی برق مصرفی از شبکه دریافت شود و CHP آن را تأمین نکند، در این حالت با توجه به قراردادن تابع استراتژی عملکرد در تابع هدف اصلی، مقادیر اضافه انرژی الکتریکی قابل فروش از طریق جمله سوم تابع عملکرد از هم کاسته شده و مقدار حقیقی در نهایت حاصل می‌گردد. مقدار انرژی حرارتی قابل فروش را هم کل بار حرارتی قرار دادیم به دلیل این که مبنای کار تأمین بار حرارتی بوده است.

۳-۱-۲ سرمایه‌گذاری اولیه f_2

هزینه سرمایه‌گذاری اولیه متناسب با ظرفیت CHP و بویلر به صورت خطی افزایش می‌یابد

$$f_2 = cm \times c_{chp} + cp \times c_{boiler} \quad (11)$$

که در آن:

$C_m = 1260000$: هزینه سرمایه‌گذاری ثابت نیروگاه Rial/kw

$C_p = 560000$: هزینه سرمایه‌گذاری ثابت بویلر Rial/kw

C_{CHP} : ظرفیت الکتریکی نیروگاه kw

C_{boiler} : ظرفیت گرمایی بویلر kw

۳-۱-۳ هزینه تعمیر و نگهداری f_3

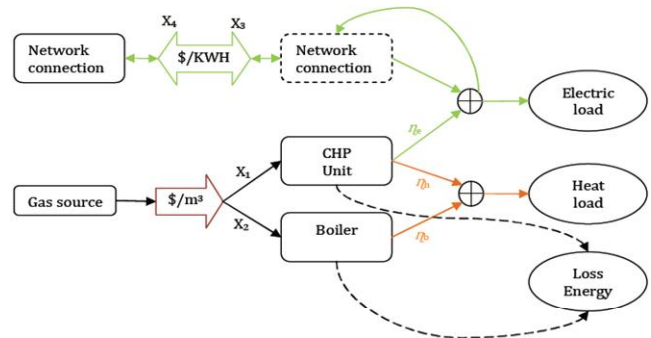
هزینه تعمیر و نگهداری به صورت درصدی از ظرفیت CHP و بویلر بوده و برای هر سال در نظر گرفته می‌شود

$$f_3 = om \times c_{chp} \times cm + op \times c_{boiler} \times cp \quad (12)$$

که در آن:

$Om = 7$: هزینه تعمیر و نگهداری سالانه CHP %

$Op = 3$: هزینه تعمیر و نگهداری سالانه بویلر %



شکل ۱: نحوه توزیع انرژی برای تأمین تقاضای انرژی.

با توجه به این که در این مقاله متغیر همان ظرفیت نیروگاه می‌باشد، بنابراین نیاز به یک بعد برای متغیر $swarm$ داریم

$$swarm([index_pop(i)], \dots, [x(i), v(i), p_best(i), valvue_best], \dots, [zchp]) \quad (8)$$

وجه اول، ذرات جمعیت را نشان می‌دهد (ذره i ام) که به تعداد جمعیت به کار گرفته شده عضو دارد.

وجه دوم از ۴ عضو تشکیل شده که به ترتیب بیانگر (۱) مکان ذره i ام، (۲) بردار سرعت ذره i ام، (۳) بهترین موقعیت برای ذره i ام و (۴) بیشترین برانندگی بین کل ذرات می‌باشند.

وجه سوم نیز بعد مسئله است. در این مقاله تعداد متغیرها ۱۰ و تعداد تکرار ۲۰ در نظر گرفته شده است.

۳- فرمول‌بندی مسئله

۳-۱-۱ تابع هدف

ماکزیمم کردن ارزش خالص فعلی سرمایه‌گذاری در طول مدت پروژه به‌عنوان هدف بوده که به صورت زیر فرمول‌بندی شده است

$$NPV = \max \left(\sum_{j=1}^N \frac{\alpha^j}{1+p} [\sum_{i=1}^{NPF} c_{vij} e_{ij} + ch \sum_{i=1}^{NPF} h_{ij} - f_2] - f_1 - f_3 \right) \quad (9)$$

که در آن:

i : دوره یک‌ساعته

z : سال بهره‌برداری از پروژه

$C_h = 420000$: قیمت فروش حرارت Rial/Mwh

h_{ij} : تقاضای انرژی حرارتی kwh

e_{ij} : تقاضای انرژی الکتریکی kwh

C_{vij} : قیمت خرید برق در ساعت i ام و سال j ام $\$/kwh$

همچنین سیگمای اول همان ضرب نرخ برابری در درآمد خالص سالانه می‌باشد که به دلیل رشد خطی بار به وجود می‌آید. سیگمای دوم و سوم به ترتیب نشان‌دهنده درآمد فروش برق و حرارت است. قیمت فروش حرارت، معادل با هزینه تولید یک کیلووات ساعت حرارت تولیدی یک بویلر با راندمان معمول در نظر گرفته شده است. f_1 مدل استراتژی عملکرد نیروگاه، f_2 هزینه تعمیرات و نگهداری و f_3 هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را نشان می‌دهد که در ادامه بیان می‌گردد. در این حالت قیمت فروش برق به مصرف‌کننده برابر قیمت خرید برق از شبکه در نظر گرفته شده است (در صورت عدم وجود نیروگاه تولید هم‌زمان، مصرف‌کننده باید برق را از شبکه دریافت کند).

در (۱۵) جمله دوم مقدار تولید گلخانه‌ای CHP و بویلر برای تأمین بار حرارتی و ارزش آن نسبت به تولید همین مقدار حرارت با بویلر، یعنی جمله اول را نشان می‌دهد. در نهایت کاهش انتشار کلی برابر است با مجموع کاهش دو نوع آلودگی در حضور یک ضریب قیمتی برای هر تن CO_2

$$mohit = cco_2 \times (v_{11} + v_{12}) \quad (16)$$

۳-۲ قیود بهینه‌سازی

قیود مسئله در برنامه‌ریزی خطی به صورت زیر است:

مجموع بار بویلر و ظرفیت حرارتی CHP باید بار حرارتی را تأمین کند

$$\eta_h x_{h,ij} + \eta_b x_{b,ij} \geq h_{ij} \quad (17)$$

که در این روابط η_h ، η_e و η_b به ترتیب بازده حرارتی نیروگاه CHP، بازده الکتریکی نیروگاه CHP و بازده بویلر هستند.

مجموع ظرفیت الکتریکی CHP و برق خرید شده از شبکه و فروخته شده به آن باید با بار الکتریکی برابر باشد

$$\eta_e x_{e,ij} + x_{r,ij} - x_{s,ij} = e_{ij} \quad (18)$$

برق تولیدی نیروگاه باید کمتر از ظرفیت برق ارائه شده از بهینه‌سازی PSO باشد.

در تابع بهینه‌سازی هزینه انرژی (f_{ij})، ظرفیت CHP باید کمتر از ظرفیت ارائه شده توسط تابع بهینه‌ساز PSO در هر گام باشد

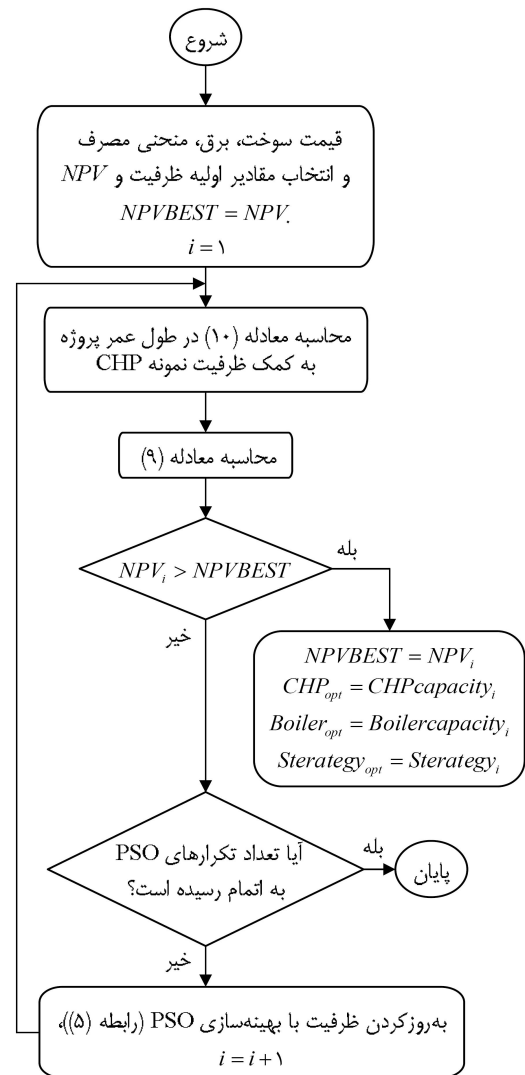
$$\eta_e x_{e,ij} \leq C_{chp} \quad (19)$$

۴- روش حل تابع هدف

برای حل تابع هدف موجود که همان NPV می‌باشد از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع پرندگان استفاده کرده‌ایم که متغیر موجود در مسئله ظرفیت بهینه نیروگاه تولید هم‌زمان می‌باشد. از طرفی نیروگاه‌های تولید هم‌زمان معمولاً به یک روش بهینه صحیح در عملکرد سیستم در جهت کاهش هزینه و افزایش راندمان نیاز دارند. بنابراین یک الگوریتم توزیع انرژی به منظور عملکرد بهینه اقتصادی تجهیزات با استفاده از برنامه‌ریزی خطی ارائه شد که هدف آن مینیمم کردن هزینه انرژی در هر ساعت می‌باشد. در این مقاله به منظور حل مسئله بهینه‌سازی، در ابتدا به کمک یک ظرفیت نمونه برای CHP و بویلر کمکی و با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی، استراتژی عملکرد ساعتی در طول مدت پروژه استخراج شده که این هزینه بر اساس به روز رسانی ظرفیت نمونه به کمک الگوریتم PSO در جهت افزایش مقدار درآمد مورد انتظار سرمایه‌گذاری قابل تغییر بوده و در نهایت ظرفیت نمونه متناسب با ماکزیمم ارزش خالص فعلی به عنوان ظرفیت بهینه مسئله انتخاب می‌گردد. شکل ۲ روندنمای حل مسئله را نشان می‌دهد.

۵- سیستم مورد مطالعه

در این مقاله یک بیمارستان نمونه مطابق با استانداردهای لازم به عنوان کاندیدای نصب تولید هم‌زمان در نظر گرفته شده است. در شرایط فعلی نیاز انرژی توسط دریافت انرژی الکتریکی از شبکه برق و بویلرهای گرمایش هوا و تقاضای سرمایشی تنها به کمک واحدهای گازی (اسپلیت) تأمین می‌گردد. تکنولوژی مورد نظر شامل یک واحد تولید هم‌زمان برای تولید حرارت و توان به علاوه یک واحد بزرگ بویلر به دلیل فرسوده شدن بویلرهای کوچک قدیمی می‌باشد. در میان تکنولوژی‌های مختلف تولید



شکل ۲: روندنمای روش حل.

۳-۱-۴ کاهش آلودگی هوا = mohit

مقدار آلودگی انتشار یافته توسط یک مصرف کننده با استفاده از فاکتور تبدیل انتشار به صورت زیر به دست می‌آید [۱۶] و [۱۷]

$$mohit = \mu_{CO_2,g} \times elec + \mu_{CO_2,f} \times f \quad (13)$$

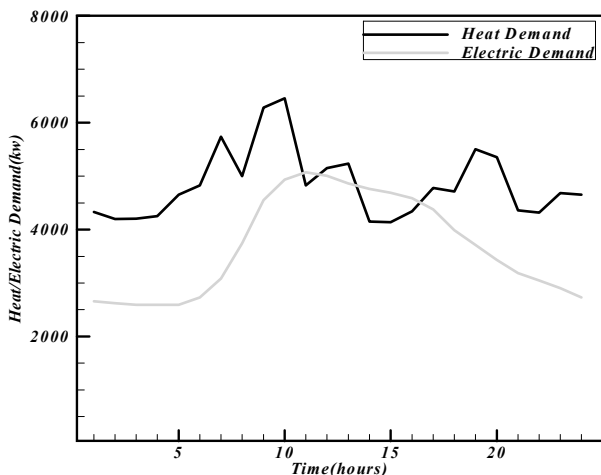
که در آن $\mu_{CO_2,g}$ و $\mu_{CO_2,f}$ به ترتیب فاکتورهای تبدیل انتشار برای دریافت برق از شبکه و گاز طبیعی می‌باشد. $elec$ و f نیز به ترتیب اشاره به میزان برق دریافتی از شبکه و کیلووات گاز مصرفی دارد. بنابراین کاهش انتشار آلودگی دی‌اکسید کربن برای یک CHP در کنار یک مصرف کننده به دو طریق امکان پذیر است:

۱) مقدار توان الکتریکی تولید شده در سیستم CHP باعث کاهش همان مقدار انرژی الکتریکی از شبکه توزیع می‌شود، بنابراین کاهش گلخانه‌ای ناشی از کاهش تلفات الکتریکی شبکه برابر است با

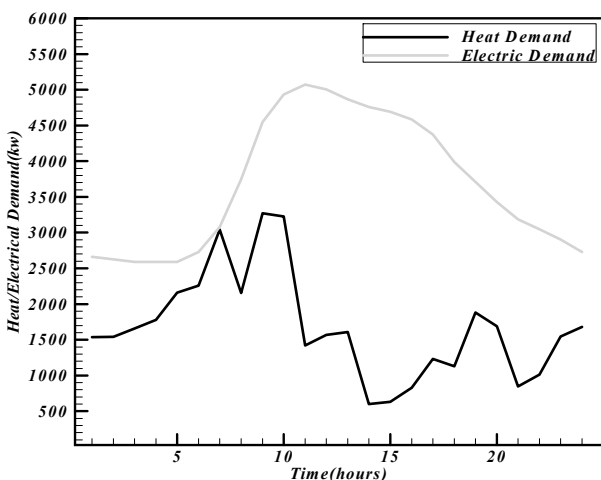
$$v_{11} = \mu_{CO_2,g} \times \eta_e \times x_{h,ij} \quad (14)$$

۲) همچنین اختلاف گاز طبیعی مصرفی برای تأمین بار حرارتی بین مجموع CHP-بویلر و حالت تنها بویلر نیز به عنوان کاهش انتشار گلخانه‌ای ناشی از کاهش گاز طبیعی می‌باشد، بنابراین داریم

$$v_{12} = \mu_{CO_2,f} \left(\frac{h_{ij}}{\eta_b} - (x_{h,ij} + x_{r,ij}) \right) \quad (15)$$



شکل ۴: بار حرارتی و الکتریکی برای یک روز کاری در زمستان.



شکل ۵: بار حرارتی و الکتریکی برای یک روز کاری در تابستان.

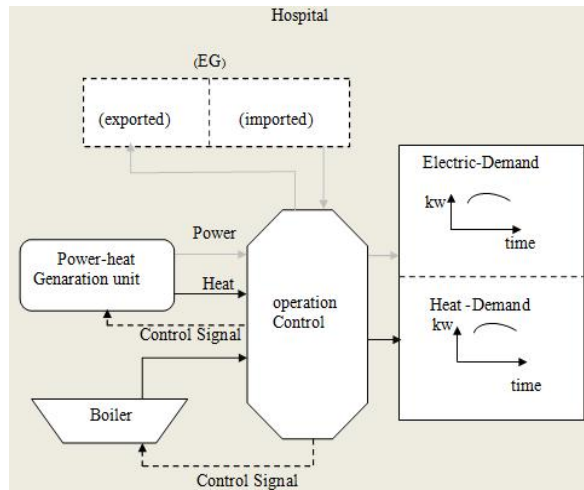
به‌دست آورد [۲۰]. همچنین این نرم‌افزار قادر است برای تعیین میزان سایر مصارف از جمله ساختمان‌های تجاری، دانشگاه‌ها و هتل‌ها که طبق استانداردهای جهانی ساخته شده‌اند و قابلیت به‌کارگیری نیروگاه‌های CHP را دارند، مورد استفاده قرار بگیرد.

منحنی بار حرارتی و الکتریکی برای دو روز از سال برای این بیمارستان در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده است. شبیه‌سازی برای عمر مفید پروژه، ۲۰ سال و با فاصله زمانی یک ساعت انجام شده است. همچنین به‌منظور نزدیکی به واقعیت، بار الکتریکی و حرارتی با یک رشد خطی سالانه در نظر گرفته شده‌اند. رشد خطی بار الکتریکی و حرارتی برای سال j زام به‌ترتیب در (۲۰) و (۲۱) نشان داده شده است که در آنها e_N و h_N بار الکتریکی و حرارتی در آخرین سال پروژه و e و h بار الکتریکی و حرارتی در اولین سال شروع پروژه می‌باشد. مقدار افزایش کلی برای بار حرارتی و الکتریکی در مدت سرمایه‌گذاری پروژه به‌ترتیب ۱۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است

$$e_j = \frac{e_N - e}{N_j} + e \tag{20}$$

$$h_j = \frac{h_N - h}{N_j} + h \tag{21}$$

متوسط قیمت خرید و فروش انرژی الکتریکی با توجه به نرخ ارائه‌شده در سال ۹۰ برای مصارف عمومی (بیمارستان‌ها، مراکز درمانی و ...) در جدول ۱ ارائه شده است که به سه ناحیه قیمتی در طول روز، برای



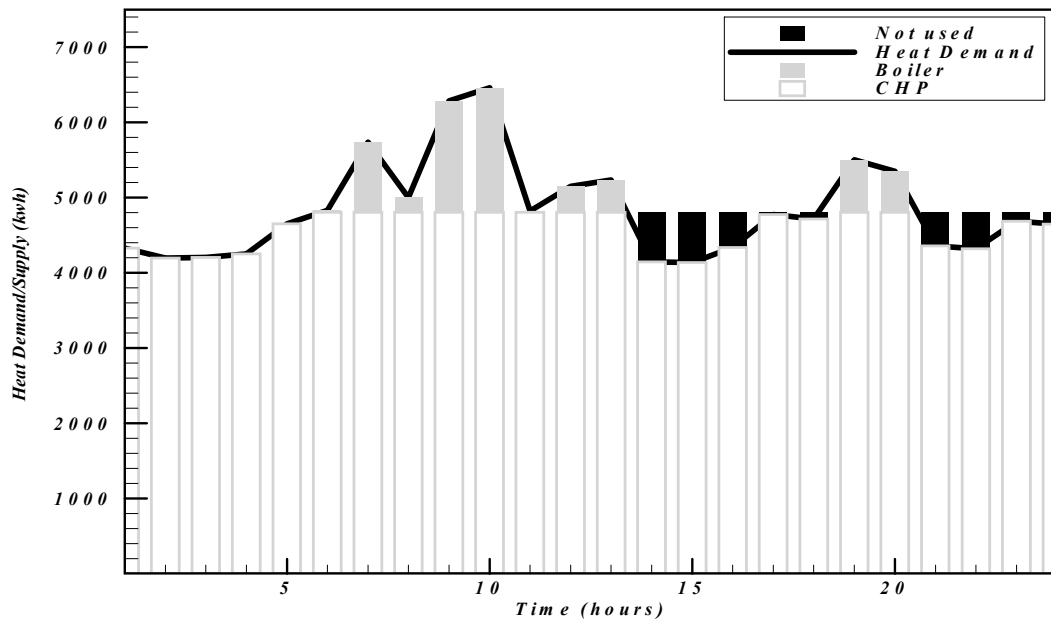
شکل ۳: دیاگرام یک سیستم CHP معمولی.

جدول ۱: قیمت خرید و فروش انرژی الکتریکی.

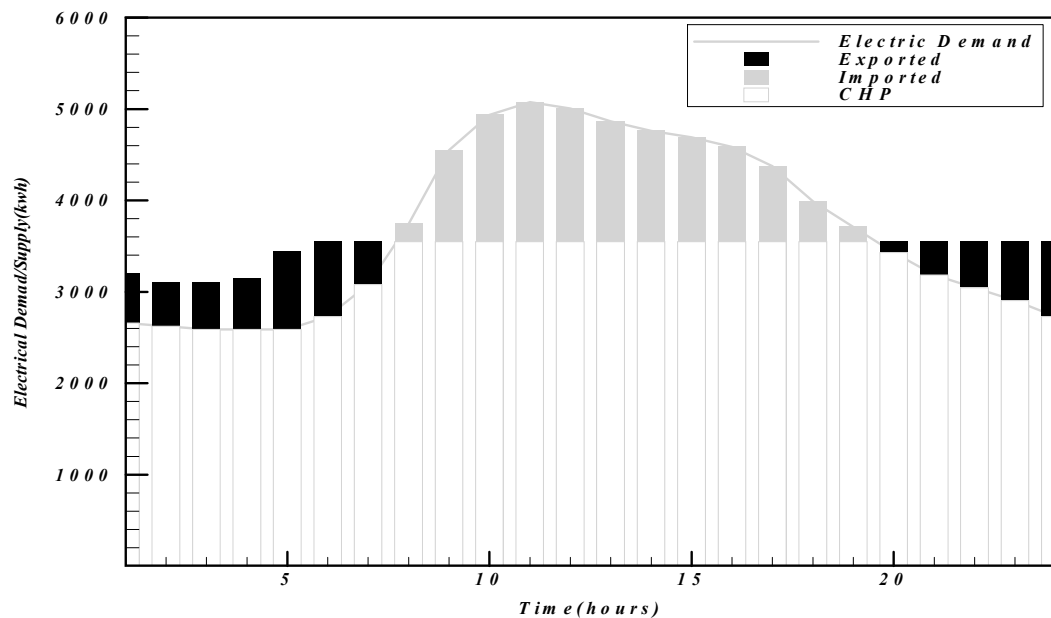
نوع روز	از $j=1$ تا $j=20$	قیمت برق فروخته‌شده از شبکه، c_{ij} (Rials/kWh)	قیمت برق فروخته‌شده به شبکه، c_{ij} (Rials/kWh)
روز عادی	$0 \leq i \leq 7$	۲۲۰	۱۱۳
	$8 \leq i \leq 17$	۴۴۰	۲۲۵
	$18 \leq i \leq 24$	۸۸۰	۴۵۰
آخر هفته	$0 \leq i \leq 7$	۱۵۴	۷۹
	$8 \leq i \leq 17$	۳۰۸	۱۷۶
	$18 \leq i \leq 24$	۶۱۶	۳۱۵

CHP، موتورهای رفت و برگشتی و میکروتوربین‌ها عموماً برای تأمین بار پیک در حدود ۱ تا ۲ مگاوات در نظر گرفته می‌شوند در حالی که در مشترکین با تقاضای پیک بالاتر تمایل بیشتری به استفاده از توربین گاز در تأمین مصارف آنها وجود دارد [۱۸]. از این رو تکنولوژی پیشنهادی برای به‌کارگیری در این مطالعه یک واحد توربین گاز تجاری در دسترس با ماکزیمم ظرفیت نامی الکتریکی ۱۰ مگاوات می‌باشد [۱۹]. در سیکل معمول، سیستم CHP، انرژی الکتریکی را تولید کرده و انرژی گرمایی که در گذشته به‌صورت حرارت تلف می‌شد به‌عنوان محصول جانبی از بخار یا گاز سیستم، بازیابی می‌شود. اگر CHP نتواند برق مورد نیاز را تأمین کند اختلاف می‌تواند از شبکه برق دریافت شود و اگر برق تولیدی اضافه بود می‌تواند به شبکه قدرت فروخته شود. حرارت بازیابی‌شده توسط سیستم CHP به انرژی حرارتی یا برودتی برای ساختمان تبدیل می‌گردد که اگر سیستم CHP نتواند انرژی حرارتی کافی را تأمین کند، باقی توسط وسیله حرارتی جایگزین (بویلر) تأمین می‌گردد. در این مقاله معیار اول سیستم CHP و بویلر کمکی بر مبنای تأمین کامل بار حرارتی می‌باشد. واحد تولید توان توسط گاز طبیعی به‌کار می‌افتد و برق و حرارت را تولید می‌کند. شکل ۳ دیاگرام یک سیستم CHP را نشان می‌دهد که توسط یک کنترل‌کننده که وظیفه تعادل انرژی در سیستم را بر عهده دارد، کنترل می‌شود. این کنترل‌کننده با ارسال سیگنال‌های کنترلی به تجهیزات، تعادل انرژی که برای سیستم CHP بهینه باشد را بر عهده دارد.

در این تحقیق متوسط تقاضای انرژی الکتریکی، حرارتی و آب گرم سالانه با توجه به مورد مطالعه، تقریباً معادل با ۳۵۰۰، ۲۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. با جمع‌آوری مقادیر لازم و ارجاع آن به نرم‌افزار CHP Size، می‌توان تقاضای انرژی الکتریکی و حرارتی را به‌صورت ساعتی و برای روز کاری و روز تعطیل هر ماه بر حسب کیلووات



شکل ۶: تعیین استراتژی عملکرد برای بار حرارتی در بازه زمانی ۲۴ ساعت.



شکل ۷: تعیین استراتژی عملکرد برای بار الکتریکی در بازه زمانی ۲۴ ساعت.

۶- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت در ابتدا توزیع انرژی بهینه شامل انرژی الکتریکی وارد شده از شبکه، انرژی الکتریکی فروخته شده، توان الکتریکی و حرارتی خروجی CHP و توان حرارتی خروجی بویلر در روزهای کاری و تعطیل با ظرفیت بهینه به دست آمده نشان داده می‌شود و در ادامه ظرفیت بهینه نیروگاه تولید هم‌زمان و بویلر کمکی، ارزش خالص فعلی، مدت بازگشت سرمایه و ملاحظات زیست‌محیطی برای سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

استراتژی عملکرد بهینه مجموعه CHP، بویلر و شبکه برق برای تأمین بار حرارتی و الکتریکی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بین ساعات آخر شب تا ساعات اولیه صبح ظرفیت نیروگاه CHP به دلیل پایین بودن قیمت برق در این ساعات تنها به میزان تأمین بار حرارتی وارد مدار می‌گردد و با توجه به پایین بودن تقاضای

زمان‌های کم‌باری، میان‌باری و اوج بار تقسیم شده است. قیمت فروش برق برای نیروگاه‌های تولید پراکنده در کشور بر حسب ریال تقریباً مطابق با رابطه زیر تعیین می‌گردد

$$C_{fij} = 360 + 180 \times \lambda \quad (22)$$

که در آن λ ضریب افزایش راندمان در صورت استفاده از ظرفیت حرارتی برای نیروگاه‌های تولید هم‌زمان می‌باشد. از این رو در این مطالعه متوسط قیمت برای فروش برق تقریباً معادل ۴۵۰ ریال بر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است. قیمت خرید و فروش برق از شبکه با توجه به ضرایب ساعات مختلف شبانه‌روز نسبت به نرخ زمان میان‌باری (ضریب ۲ برای زمان‌های اوج بار، ضریب ۰/۵ برای کم‌باری و ضریب ۰/۷ برای روزهای تعطیل) محاسبه گردیده که در روزهای تعطیل در مقایسه با همان ساعت در روزهای عادی اندکی کمتر است. متوسط قیمت گاز طبیعی مطابق با تعرفه ارائه شده معادل ۱۷۵۰ ریال بر متر مکعب لحاظ گردیده که معادل ۱۶۹ ریال بر کیلووات ساعت می‌باشد.

جدول ۲: نتایج سناریوهای قیمتی مختلف بر روی ظرفیت بهینه، ارزش خالص فعلی و کاهش انتشار آلودگی.

مورد مطالعه	NPV $\times 10^9$ (Rial)	بازگشت سرمایه (سال)	کاهش CO ₂ نسبت به حالت پایه (%)	ظرفیت CHP (kw)	ظرفیت بویلر (kw)
حالت نرمال	۸۴,۶۴۶	۵	۲۵	۳۵۵۰	۳۱۰۵
+۱۰۰٪ قیمت گاز	۲۲	۱۰	۸,۳	۲۲۵۰	۴۸۶۴
-۱۰۰٪ قیمت گاز	۱۳۵	۴	۳۳,۵	۴۴۵۰	۱۸۸۷
+۱۰۰٪ قیمت برق خرید شده	۲۶۰	۲	۳۳	۴۵۰۰	۱۸۲۰
-۱۰۰٪ قیمت برق خرید شده	۱۹,۱۳۶	۱۱	۸,۳	۲۲۵۰	۴۸۶۴
+۵۰٪ قیمت برق فروخته شده	۸۶	۵	۲۶	۳۷۰۰	۲۹۰۲
-۵۰٪ قیمت برق فروخته شده	۸۴	۵	۲۵	۳۵۰۰	۳۱۷۴
-۱۰۰٪ قیمت برق خرید شده و -۱۰۰٪ قیمت گاز	۵۲,۲۲	۷	۲۴	۳۵۰۰	۳۱۷۳
+۱۰۰٪ قیمت برق خرید شده و +۱۰۰٪ قیمت گاز	۱۶۳,۸۵۶	۳	۲۶	۳۷۰۰	۲۹۰۲

البته باید توجه کرد که این سناریو که در آن قیمت گاز با کاهش همراه است عملاً به دلیل بالا رفتن قیمت گاز طبیعی در طی دوره‌های متمادی امکان‌پذیر نمی‌باشد. مطابق با جدول ۲، تغییرات قیمت برق دریافتی از شبکه در مقایسه با تغییرات قیمت گاز، تأثیر بیشتری بر حجم درآمدهای سرمایه‌گذاری خواهد داشت چرا که با افزایش و کاهش یکسان دو تغییر قیمتی یادشده، میزان تغییرات ارزش خالص فعلی پروژه ناشی از تغییرات قیمت برق بیشتر خواهد بود، بنابراین تغییرات این پارامتر کلیدی اهمیت بیشتری در مقایسه با تغییرات سایر پارامترها بر روی حجم سرمایه‌گذاری انجام‌شده خواهد داشت که باید آن را مورد توجه قرار داد. به دلیل پایین بودن حجم فروش برق به شبکه و محدود بودن تغییرات قیمت آن در مقایسه با حجم برق تولیدی در جهت تأمین نیاز مصرف‌کننده و قیمت برق خریداری‌شده از شبکه، افزایش و یا کاهش قیمت برق فروخته‌شده به شبکه در سیستم مورد مطالعه، تفاوت قابل محسوسی در مقدار ارزش نهایی پروژه ایجاد نمی‌کند و در نهایت محتمل‌ترین سناریوی ممکن که همان افزایش هم‌زمان قیمت خرید برق از شبکه و گاز طبیعی می‌باشد در سطر دهم مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج اگرچه افزایش قیمت گاز طبیعی سبب کاهش سودآوری می‌گردد، در مقابل به دلیل تأثیر بیشتر تغییرات قیمت برق بر روی ارزش خالص فعلی در کل افزایش هم‌زمان قیمت، سبب افزایش سودآوری در مقایسه با حالت نرمال می‌شود. در نهایت متوسط دوره بازگشت سرمایه بر اساس محتمل‌ترین سناریوهای قیمتی (تمام سناریوها به استثنای سطرها سوم، ششم و نهم که دوره بازگشت سرمایه در آن به دلیل تغییر پارامترها در جهت منفی افزایش قابل توجهی داشته است) حدوداً ۴ سال می‌باشد که نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری سرمایه‌گذاری در این نیروگاه‌ها در کنار تغییرات ممکن در قیمت‌های اولیه می‌باشد. متوسط کاهش انتشار دی‌اکسید کربن تقریباً معادل ۲۵٪ نسبت به حالت پایه است که بیان‌کننده اثرات محیطی مثبت حضور سیستم CHP در مورد کاهش آلودگی هوا و همچنین کاهش نگرانی‌های مربوط به افزایش دمای زمین می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک چهارچوب برنامه‌ریزی ریاضی برای تعیین ظرفیت و نحوه بهره‌برداری بهینه یک مجموعه تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی با معیار تصمیم سرمایه‌گذاری در یک بیمارستان نمونه ارائه گردید. به علاوه روش مورد نظر شامل توزیع انرژی بهینه در هر ساعت می‌باشد که در آن سیگنال‌های عملکردی با توجه به مینیمم هزینه انرژی برای سناریوی تحت بررسی تولید می‌گردد. برای دستیابی به ظرفیت بهینه از

الکتریکی، بیمارستان مازاد تولید الکتریکی خود را به شبکه می‌فروشد. در بقیه ساعات به تدریج با افزایش قیمت برق، نیروگاه CHP تا آنجا که ظرفیت آن اجازه می‌دهد، تلاش می‌کند تا بار الکتریکی و حرارتی را تأمین کند و کمبود بار الکتریکی و حرارتی را به تدریج از طریق بویلر و شبکه جبران می‌کند. البته در طی ساعاتی نیز شاهد تولید حرارت مازاد هستیم که در آن، نیروگاه، به دلیل بالا رفتن قیمت برق با ظرفیت کامل وارد مدار شده تا بتواند فروش برق بیشتری به شبکه داشته باشد که در نتیجه از تولید حرارتی خود به‌طور کامل استفاده نمی‌کند. همچنین نحوه عملکرد نیروگاه CHP با توجه به ماکزیمم ظرفیت آن برای تأمین تقاضای انرژی حرارتی و الکتریکی به‌نحوی است که کمتر شاهد حضور بویلر و شبکه بوده‌ایم که این خود نشان‌دهنده برتری ذاتی تولید هم‌زمان نسبت به تولید مجزا به دلیل امکان تولید و فروش هم‌زمان برق و حرارت، بازدهی بالا و کاهش هزینه بهره‌برداری می‌باشد. در ادامه برای بررسی اثرات تغییر قیمت‌های خرید و فروش برق و گاز نسبت به قیمت‌های اولیه بر روی مقادیر ارزش مالی پروژه، ظرفیت بهینه و حجم انتشار آلودگی، سناریوهای مختلفی برای سیستم مورد مطالعه مطابق با جدول ۲ انجام گرفته است. در این مورد، حالت نرمال شرایط اولیه قیمت‌های ارائه‌شده در مقاله و حالت پایه نیز حالت تأمین مجزای بار الکتریکی و حرارتی به ترتیب از طریق شبکه و بویلر می‌باشد. در ابتدا لازم است این نکته ذکر گردد که حالت نرمال برای متوسط قیمت بهای انرژی در کشور صورت گرفته و تمام سناریوهای قیمتی شامل افزایش یا کاهش به میزان سناریوهای فوق با توجه به تعرفه انرژی در کشور وجود دارد. در جدول ۲ متناسب با افزایش ۱۰۰ درصدی در قیمت گاز (سطر سوم در جدول ۲)، ارزش خالص فعلی و ظرفیت نیروگاه به شدت کاهش و در نتیجه عدم تمایل به سمت سرمایه‌گذاری در این نیروگاه‌ها را در این سناریو نشان می‌دهد. از سویی دیگر، کاهش ۱۰۰ درصدی قیمت گاز (سطر چهارم) سبب شده تا مقدار NPV نسبت به حالت نرمال دو برابر و ظرفیت آن نیز کمی افزایش یابد که این موضوع سبب افزایش رقابت در جهت به‌کارگیری از این نیروگاه‌ها می‌گردد.

به‌علاوه، افزایش قیمت انرژی الکتریکی خرید شده از شبکه (سطر پنجم) سبب افزایش سودآوری و ظرفیت و در نتیجه افزایش تمایل به سمت سرمایه‌گذاری در سیستم‌های تولید هم‌زمان شده و در طرف مقابل کاهش قیمت آن (سطر ششم) باعث کاهش NPV و ظرفیت نیروگاه و در نتیجه کاهش توجه به سمت استفاده از این نیروگاه‌ها می‌گردد. با توجه به بحث انتظار داریم که بهترین گزینه از لحاظ سرمایه‌گذاری و سودآوری مربوط به افزایش قیمت برق از شبکه و کاهش قیمت گاز طبیعی باشد،

- [10] A. Rong, H. Hakonen, and R. Lahdelma, "An efficient linear model and optimisation algorithm for multi - site combined heat and power production," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 168, no. 2, pp. 612-632, Jan. 2006.
- [11] E. Thorin, H. Brand, and C. Weber, "Long - term optimization of cogeneration systems in a competitive market environment," *Appl. Energy*, vol. 81, no. 2, pp. 152-169, Jun. 2005.
- [12] A. Rong, R. Lahdelma, P. B. Luh, "Lagrangian relaxation based algorithm for trigeneration planning with storages," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 188, no. 1, pp. 240-257, Jul. 2008.
- [13] M. Sakawa, K. Kato, and S. Ushiro, "Operational planning of district heating and cooling plants through genetic algorithms for mixed 0-1 linear programming," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 137, no. 3, pp. 677-687, Mar. 2002.
- [14] M. V. Biezma and J. R. SanCristobal, "Investment criteria for the selection of cogeneration plants - a state of the art review," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 5-6, pp. 583-588, Apr. 2006.
- [15] G. Celli, E. Ghiani, S. Mocchi, and F. Pilo, "A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 750-757, May 2005.
- [16] E. Cardona and A. Piacentino, "A methodology for sizing a trigeneration plant in mediterranean areas," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 13, pp. 1665-1680, Sep. 2003.
- [17] G. Chicco and P. Mancarella, "Assessment of the greenhouse gas emissions from cogeneration and trigeneration systems, part I: models and indicators," *Energy*, vol. 33, no. 3, pp. 410-417, Mar. 2008.
- [18] Report by Energy and Environmental Analysis, *Technology Characterization: Gas Turbines*, Dec. 2008.
- [19] K. M. Maribu, R. M. Firestone, C. Marnay, and A. S. Siddiqui, "Distributed energy resources market diffusion model," *Energy Policy*, vol. 35, no. 9, pp. 4471-4484, Sep. 2007.
- [20] Action Energy, *CHP Sizer Version 2*, The Carbon Trust: London, UK; 2004.

محمد حسن مرادی در سال ۱۳۶۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شریف و در سال ۱۳۷۲ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. از سال ۱۳۷۲ نامبرده در دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا در همدان مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. دکتر مرادی در سال ۱۳۷۷ به دوره دکترای مهندسی برق در دانشگاه استراسکالاید در گلاسکو اسکاتلند وارد گردید و در سال ۱۳۸۱ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند مدل‌سازی، شبیه‌سازی و کنترل نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، ریز شبکه و فرایندهای صنعتی، انرژی‌های نو، کیفیت توان و اتوماسیون می‌باشد.

مهدی حاجی نظری در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه بوعلی همدان دریافت نمود. از سال ۱۳۹۰ نامبرده در دانشگاه‌ها و مراکز عالی مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان سیستم‌های تولید پراکنده و نیروگاه‌های تولید همزمان، روش‌های بهینه‌سازی هوشمند و کنترل صنعتی می‌باشد.

الگوریتم اجتماع پرندگان و برای مینیمم کردن هزینه انرژی در هر ساعت از برنامه‌ریزی خطی بر مبنای مدل شبکه سیستم CHP بهره گرفته شده است. نتایج استراتژی عملکرد شامل نحوه تولید CHP، بویلر کمکی و تبادل انرژی با شبکه برق برای تأمین بار حرارتی و الکتریکی در یک روز نمونه مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت مدل برای سناریوهای قیمتی مختلف در محدوده تعرفه قیمتی حامل‌های انرژی اجرا، و نتایج برای بررسی اثر تغییرات پارامترها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاهش قیمت گاز و افزایش قیمت برق خرید شده از شبکه باعث افزایش NPV و افزایش میل به سرمایه‌گذاری نیروگاه می‌شود که در این میان تأثیرات قیمت برق خرید شده بر روی حجم سرمایه‌گذاری بیشتر است. نتایج این مطالعه موردی نشان می‌دهد که استفاده از سیستم تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی در شرایط مقادیر معمول در پارامترها، از لحاظ اقتصادی، راهکار بهینه‌ای برای کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در انرژی می‌باشد و برای تغییرات در پارامترهای حساس انرژی مثل قیمت‌ها، مزیت سرمایه‌گذاری در این سیستم برای درصد تغییرات پارامترها تغییر خواهد کرد، به طوری که با تغییر ساختار اقتصادی کشور به سوی بازار آزاد و افزایش بهای انرژی تحویلی به مصرف‌کنندگان، سرمایه‌گذاری در این نیروگاه‌ها مطمئن‌تر و با بهره‌وری بالاتری همراه خواهد بود.

مراجع

- [1] D. W. Wu and R. Z. Wang, "Combined cooling, heating, and power: a review," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 32, no. 5-6, pp. 459-495, Sep./Nov. 2006.
- [2] G. Chicco and P. Mancarella, "Distributed multi - generation: a comprehensive view," *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 13, no. 3, pp. 535-551, Apr. 2009.
- [3] H. S. Joel and S. C. Augusto, "Trigeneration: an alternative for energy savings," *Appl. Energy*, vol. 76, no. 1-3, pp. 219-227, Sep./Nov. 2003.
- [4] M. Rabinowitz, "Power system of future," *IEEE Power Engineering Review*, pt 4, vol. 4, no. 8, pp. 4-9, Aug. 2000.
- [5] A. A. Rentizelas and I. P. Tatsiopoulos, "Locating a bioenergy facility using a hybrid optimization method," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 123, no. 1, pp. 196-209, Jan. 2010.
- [6] A. Piacentino and F. Cardona, "On thermoeconomics of energy systems at variable load conditions: integrated optimization of plant design and operation," *Energy Convers. Manage.*, vol. 48, no. 8, pp. 2341-2355, Aug. 2007.
- [7] B. Zhang and W. Long, "An optimal sizing method for cogeneration plants," *Energy Build.*, vol. 38, no. 3, pp. 189-195, Mar. 2006.
- [8] X. Q. Kong, R. Z. Wang, and X. H. Huang, "Energy optimization model for a CCHP system with available gas turbines," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 25, no. 2-3, pp. 377-391, Feb. 2005.
- [9] A. Rong and R. Lahdelma, "An efficient linear programming model and optimization algorithm for trigeneration," *Appl. Energy*, vol. 82, no. 1, pp. 40-63, Sep. 2005.