

مدل سازی انرژی و اقتصاد سیستم تولید همزمان به روش بهینه سازی تکمیلی

دکتر مرتضی محمدی اردهالی^۱ محمدعلی فتاحی اردکانی^۲
دکتر سید حمید فتحی^۳

چکیده

استفاده از سیستم های تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی از استراتژی های بسیار موثر در مدیریت تقاضا و مصرف انرژی تلقی می شود و می تواند در حفظ ظرفیت های فعلی نیروگاه های موجود در کشور موثر باشد. از آنجا که در این سیستم بهره برداری از یک منبع انرژی به صورت همزمان صورت می گیرد، انتظار می رود که اقتصاد عملکرد سیستم های تولید همزمان، نسبت به تامین نیازهای انرژی الکتریکی و حرارتی به صورت جداگانه مطلوب تر باشد. با توجه به نوسانات قابل توجهی که در بار انرژی الکتریکی و بار انرژی حرارتی در فصول مختلف سال وجود دارد، بررسی چگونگی تغییرات در عملکرد سیستم های تولید همزمان تحت شرایط مختلف ضروری به نظر می رسد. بررسی عملکرد سیستم های

۱. عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) ardehali@aut.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

۳. عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

تولید همزمان به روش بهینه‌سازی تکمیلی در مقایسه با سیستم تولید مجزا (مبتنی بر تولید انرژی حرارتی از طریق به کارگیری سیستم دیگ بخار و خریداری مستقیم انرژی الکتریکی از شبکه برق سراسری) هدف اصلی این مطالعه است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که هزینه‌های نهایی سیستم تولید همزمان در حدود ۳۰ درصد از هزینه‌های مربوط به سیستم تولید مجزا کمتر است.

واژه‌های کلیدی: انرژی، تولید همزمان، حرارتی، الکتریکی، مدیریت بار.

۱. مقدمه

تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌ها از کارآیی انرژی در حد ۳۵ درصد برخوردار است. از این رو مقدار قابل توجهی از انرژی سوخت فسیلی ورودی به نیروگاه بلا استفاده مانده و به محیط خارج از نیروگاه‌ها هدایت می‌شود [۱]. در حالی که انتقال انرژی حرارتی از نیروگاه به نقاط دور به مراتب هزینه بیشتری در مقایسه با انتقال انرژی الکتریکی در بر دارد، بهره‌برداری از انرژی حرارتی در مناطق مجاور به نیروگاه، منطقی و از نظر فنی و اقتصادی قابل قبول‌تر است. این موضوع موجب شده است که برای تامین توام نیازهای انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی نصب سیستم‌های تولید همزمان (Combined heat and Power: CHP) در محل مجتمع‌های صنعتی و مسکونی افزایش یابد. با استفاده از انرژی حرارتی در سیستم‌های تولید همزمان، دستیابی به بازده ۷۰ درصدی برای کل سیستم امکان‌پذیر می‌شود. این ویژگی و نیز قابلیت آن برای کاهش آلاینده‌های زیست محیطی سرمایه‌گذاری اولیه را به لحاظ اقتصادی توجیه می‌کند. اما دستیابی به پتانسیل‌های اقتصادی و زیست محیطی این سیستم‌ها مستلزم طراحی و بهره‌برداری خردمندانه از آنهاست. نوسانات بار در فصل‌های مختلف سال و ساعات شبانه‌روز نحوه بهره‌برداری از سیستم را دستخوش تغییر می‌کند. لذا ضروریست که با توجه به تقاضاهای مختلف انرژی حرارتی و الکتریکی، استراتژی‌ها به گونه‌ای تعیین شوند که با تامین کامل

نیازها، هزینه‌ها نیز به حداقل برسند. روش‌های مختلفی مانند برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی، توابع لاگرانژ و غیره برای رسیدن به این منظور ارائه شده است [۲، ۳، ۴، ۵]. برای مسایلی با فرمول‌های ریاضی پیچیده ممکن است تابع هدف گسسته و یا غیرتحلیلی شده و حل آن با الگوریتم‌های متعارف به آسانی امکان‌پذیر نباشد.

بررسی عملکرد سیستم‌های تولید همزمان به روش بهینه‌سازی تکمیلی در مقایسه با سیستم تولید مجزا (مبتنی بر تولید انرژی حرارتی از طریق به کارگیری سیستم دیگ بخار و خریداری مستقیم انرژی الکتریکی از شبکه برق سراسری) هدف اصلی این مطالعه است. در این مطالعه روشی برای تعیین نقطه کار بهینه سیستم‌های تولید همزمان تحت عنوان بهینه‌سازی تکمیلی [۶] ارائه شده است. این روش در حقیقت یک جست و جوی کلی در بازه دامنه تابع هدف و محاسبه مقادیر مختلف تابع هدف و مقایسه مقادیر با یکدیگر است. حسن این روش علاوه بر سهولت حل، این است که غیرتحلیلی و یا گسسته بودن تابع هدف، مشکلی در محاسبات ایجاد نمی‌کند. در بخش‌هایی مدل ارائه شده در این مطالعه، نتایج شبیه‌سازی یک سیستم نمونه آورده شده است.

۱-۱. ساختار سیستم

ساختار سیستم تولید همزمان مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. این سیستم جهت تامین توأم نیازهای الکتریکی و حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌طوری که نشان داده شده است، نیازهای الکتریکی از طریق شبکه سراسری و سیستم تولید همزمان تامین خواهد شد. بار حرارتی می‌تواند از طریق یک دیگ بخار و سیستم تولید همزمان تامین گردد. انرژی حرارتی تولیدی در یک مخزن به صورت آب گرم ذخیره می‌شود و در صورتی که دمای آب مخزن از حد مجاز ازپیش تعیین شده بالاتر رود، انرژی حرارتی مازاد بر نیاز از طریق یک رادیاتور به محیط خارج انتقال می‌یابد. یادآور می‌شود که چنانچه انرژی منتقل شده به محیط خارج به حداقل و یا به صفر برسد بهترین کارایی را می‌توان از سیستم انتظار داشت.

۲. بررسی تجهیزات سیستم

۲-۱. سیستم تولید همزمان

سیستم تولید همزمان واحد اصلی تامین انرژی مورد نیاز است. هدف اصلی در این مطالعه این است که با به کارگیری سیستم تولید همزمان، انرژی حرارتی و الکتریکی مورد نیاز با هزینه کمتری تامین گردد. برای مدل سازی سیستم تولید همزمان، تابع I/O سیستم تولید همزمان به صورت دو تابع درجه دو در نظر گرفته شده است. این توابع در رابطه (۱) و (۲) نشان داده شده اند. رابطه (۱) مقدار انرژی حرارتی مورد نیاز سیستم تولید همزمان (P_{in}) را بر حسب مقدار انرژی الکتریکی تولیدی سیستم (P_{ec}) بیان می کند. رابطه (۲) مقدار انرژی حرارتی تولیدی سیستم تولید همزمان (P_{Qc}) را بر حسب مقدار انرژی حرارتی ورودی به سیستم (P_{in}) بیان می کند. جهت به دست آوردن تابع I/O سیستم چون تعداد محدودی از نقاط کار سیستم شامل انرژی ورودی، انرژی الکتریکی خروجی و انرژی حرارتی خروجی در دست است از رگرسیون داده ها استفاده می شود. با استفاده از رگرسیون روابط I/O سیستم تولید همزمان به صورت یک تابع درجه دوم تخمین زده می شود.

$$P_{in} = a_1 P_{ec}^2 + a_2 P_{ec} + a_3 \quad (1)$$

$$P_{Qc} = b_1 P_{in}^2 + b_2 P_{in} + b_3 \quad (2)$$

دو رابطه فوق در محدوده عملکرد نرمال سیستم صادق خواهند بود. محدوده

عملکرد نرمال به صورت زیر در نظر گرفته می شود.

$$P_{in,MIN} \leq P_{in} \leq P_{in,MAX} \quad (3)$$

$$P_{ec,MIN} \leq P_{ec} \leq P_{ec,MAX} \quad (4)$$

$$P_{Qc,MIN} \leq P_{Qc} \leq P_{Qc,MAX} \quad (5)$$

۲-۲. برق شهر

مقدار توان خریداری شده از شبکه برق سراسری با P_{ep} نشان داده شده است. قیمت هر کیلووات برق خریداری شده براساس تعرفه های برق در ساعات مختلف به دست می آید.

۲-۳. دیگ بخار

دیگ بخار کمکی، جهت تامین کمبودهای حرارتی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. دیگ بخار می‌تواند به صورت مجزا مانند آنچه در شکل ۱ نشان داده شده است، مورد بهره‌برداری قرار گیرد و یا در صورتی که محرکه اولیه سیستم تولید همزمان توربین بخار باشد؛ کمبود انرژی حرارتی می‌تواند مستقیماً از دیگ بخار سیستم تولید همزمان، تامین گردد. در این مطالعه حالت اول که کلی‌تر است در نظر گرفته شده است. دیگ بخار کمکی، باید قادر باشد که به تنهایی تمام انرژی حرارتی مورد نیاز را تامین کند، تا در زمانی که سیستم تولید همزمان خارج از سرویس است و یا توان گرمایی ناچیزی تولید می‌کند سیستم قابلیت تامین کامل بار را داشته باشد. دیگ بخار به صورت خاموش و روشن کنترل می‌شود. پایین آمدن دمای آب مخزن از حد مجاز باعث روشن شدن مشعل و بالا رفتن دما از حد مشخصی باعث خاموش شدن مشعل می‌شود. مقدار سوخت ورودی به مشعل دیگ بخار به گونه‌ای تنظیم می‌شود که مشعل با توجه به توان حرارتی تولیدی در ماکزیمم بازده خود کار کند. بازده دیگ بخار با پارامتر η_b نشان داده خواهد شد.

۲-۴. مخزن

از مخزن جهت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی تولیدی استفاده می‌شود. جرم سیال موجود در مخزن M_I کیلوگرم است و فرض می‌شود که مقدار جرم سیال مخزن ثابت بماند. برای جلوگیری از جوش آمدن و بخار شدن سیال از ضد جوش استفاده می‌شود. دمای سیال مخزن می‌تواند بین محدوده مشخصی نوسان داشته باشد. دمای مخزن بر اساس روابط زیر تعیین می‌شود.

$$Q_{net} = Q_{IN} - Q_{OUT} \quad (6)$$

$$Q_{IN} = \int_0^t (P_b + P_{Qc} - P_{loss}) dt \quad (7)$$

$$Q_{OUT} = \int_0^t (P_Q) dt \quad (8)$$

$$Q_{net} = MC(T_2 - T_1) \quad (9)$$

$$T_{MIN} \leq T \leq T_{MAX} \quad (10)$$

۳. بررسی عملکرد کلی سیستم

تحت هر شرایطی باید انرژی حرارتی و الکتریکی مورد نیاز تامین شود. مجموع انرژی الکتریکی تامین شده توسط سیستم تولید همزمان و خریداری شده از شبکه سراسری باید برابر انرژی الکتریکی مصرفی باشد. انرژی حرارتی مورد نیاز؛ از سیستم تولید همزمان، دیگ بخار و نیز گرمای ذخیره شده در مخزن تامین خواهد شد. شرایط فوق را می توان با روابط زیر نشان داد.

$$P_e = P_{ep} + P_{ec} \quad (11)$$

$$P_b + P_{Qc} = P_Q + \Delta P_t + P_{loss} \quad (12)$$

ΔP_t تغییرات انرژی حرارتی ذخیره شده در مخزن است. به ازای مقدار مشخص P_{ec} می توان از رابطه (۱) انرژی ورودی به سیستم تولید همزمان P_{in} را به دست آورد. از رابطه (۱۱) نیز مقدار P_{ep} به دست می آید. با مشخص شدن P_{in} ، مقدار P_{Qc} از رابطه (۲) مشخص خواهد شد. از رابطه (۱۲) و وضعیت مخزن، میزان تولید دیگ بخار و مقدار تلفات P_{loss} تعیین می شود.

با توجه به دمای مخزن و مقدار انرژی تولیدی و انرژی مورد نیاز وضعیت هر قسمت سیستم مشخص می شود. حالات مختلف سیستم در روابط زیر خلاصه شده است.

$$\begin{cases} P_{Qc} > P_Q \\ t < t_{MAX} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_b = 0 \\ P_{loss} = 0 \\ P_{Qc} = P_Q + \Delta P_t \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_{Qc} > P_Q \\ t = t_{MAX} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_b = 0 \\ P_{Qc} = P_Q + P_{loss} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_{Qc} < P_Q \\ t_{MIN} < t \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_b = 0 \\ P_{loss} = 0 \\ P_{Qc} = P_Q + \Delta P_t \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} P_{Qc} < P_Q \\ t = t_{MIN} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{loss} = 0 \\ P_{Qc} + P_b = P_Q + \Delta P_t \end{cases} \quad (16)$$

کنترل مشعل بر اساس باند هیستریزس شکل ۲ صورت می گیرد. کاهش دمای

مخزن تا دمای T_{min} باعث روشن شدن مشعل می شود. مشعل تا رسیدن دمای مخزن به T_h روشن خواهد بود و سپس خاموش خواهد شد تا دما مجدداً به T_{min} برسد.

۳-۱. تابع هزینه

هزینه های جاری سیستم، مربوط به انرژی ورودی و هزینه های نگهداری است. هزینه نگهداری را می توان به صورت یک مقدار ثابت فرض کرد. برای مینیم کردن هزینه ها فقط لازمست هزینه انرژی ورودی به سیستم را مینیم کرد. توان ورودی مجموع توان ورودی به سیستم تولید همزمان، دیگ بخار و توان خریداری شده از شبکه سراسری برق شهر می باشد. توان ورودی به سیستم تولید همزمان از رابطه (۱) به دست می آید. توان ورودی به دیگ بخار از رابطه زیر حاصل می شود.

$$P_{in,b} = \frac{P_b}{\eta_b} \quad (17)$$

کل توان ورودی در هر لحظه برابر است با:

$$P_{in,T} = P_{in} + P_{in,b} + P_{ep} \quad (18)$$

اگر ارزش حرارتی هر کیلوگرم سوخت h (J/kg) باشد، برای تامین انرژی ورودی به دیگ بخار و سیستم تولید همزمان، سوخت مورد نیاز در هر ثانیه برابر است با:

$$M_f = (P_{in} + P_{in,b}) / h \quad (19)$$

اگر قیمت هر کیلوگرم سوخت C_f باشد، هزینه سوخت مصرفی در هر ثانیه برابر است با:

$$S = M_f \times C_f \quad (20)$$

لذا هزینه کل بهره برداری در طی زمان t برابر است با:

$$S_T = \int_0^t S dt \quad (21)$$

۳-۲. بهینه سازی

هدف، کمینه سازی هزینه های بهره برداری است. برای کمینه سازی و یا به حداقل رساندن هزینه کل بهره برداری، کفایت مقدار تابع S کمینه شود. برای پیدا کردن نقطه مینیم از برنامه ریزی تکمیلی استفاده شده است [۶]. این روش شامل چهار مرحله کلی زیر است

• انتخاب مقادیر اولیه

در این مرحله از بازه $[P_{ec,MIN}, P_{ec}]$ ، k نقطه تصادفی انتخاب می شود. اگر $P_{ec} > P_{ec,MAX}$ باشد به جای بازه فوق از بازه $[P_{ec,MIN}, P_{ec,MAX}]$ استفاده خواهد شد.

• جهش

$(k-1)$ نقطه دیگر بین هر دو نقطه مجاور که در مرحله قبل انتخاب شده بود انتخاب می شود به این ترتیب در مجموع $(2k-1)$ نقطه انتخاب خواهد شد.

• مقایسه

برای تمام نقاط بر اساس روابط (۱) تا (۲۱) هزینه کل محاسبه می شود. با محاسبه هزینه‌ها، این نقاط بر اساس هزینه، از کم به زیاد مرتب می شوند.

• انتخاب و تکرار

از بین نقاط مرحله قبل، k نقطه اول انتخاب می شوند. برای این k نقطه مجدداً این روش از مرحله دوم دوباره تکرار می شود. این تکرار تا موقعی که $\mathcal{E}_1 < \Delta P_{ec}$ ، $\mathcal{E}_2 < \Delta S$ برسد ادامه می یابد. زمانی که هر دو شرط مذکور برقرار گردید نقطه اول به عنوان نقطه کار بهینه در نظر گرفته می شود. جریان منطقی این روش در شکل ۳ نشان داده شده است.

۴. نتایج شبیه سازی

روش فوق برای به دست آوردن نقاط کار بهینه یک سیستم مورد استفاده قرار گرفته است این سیستم دارای یک مخزن ذخیره ۱۰۰۰ لیتری آب گرم است. حداکثر دمای آب 130°C و حداقل 90°C در نظر گرفته شده است. کاهش دما تا 90°C مشعل بویلر را روشن خواهد نمود. مشعل تا رسیدن دمای آب مخزن به 95°C روشن خواهد بود و پس از آن مشعل خاموش خواهد شد. بازده مشعل ۹۰ درصد و توان آن 800kW در نظر گرفته شده است.

محاسبه روابط I/O سیستم تولید همزمان بر اساس نقاط کار داده شده در جدول ۱ انجام می شود. این نقاط بر اساس اندازه گیری های عملی حاصل شده است. قیمت سوخت بر اساس تعرفه های شرکت ملی گاز ایران در نظر گرفته شده است که در جدول ۲ مشاهده می شود.

قیمت برق شبکه سراسری در ساعات مختلف شبانه‌روز مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده است. قیمت‌ها بر اساس تعرفه‌های برق منطقه‌ای تهران تنظیم شده است. بهینه‌سازی فقط بر اساس هزینه‌های بهره‌برداری صورت گرفته و هدف تامین کامل نیازها با حداقل هزینه است و پارامترهایی نظیر میزان آلودگی و بازده کلی سیستم تولید همزمان در نظر گرفته نشده است.

برای سیستم فوق نقاط کار در هر ساعت با استفاده از برنامه ریزی تکمیلی مورد محاسبه قرار گرفته است. در جدول ۴ مقادیر توان الکتریکی و حرارتی مورد نیاز به همراه نتایج بهینه‌سازی آورده شده است. اطلاعات این جدول به صورت گرافیکی در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

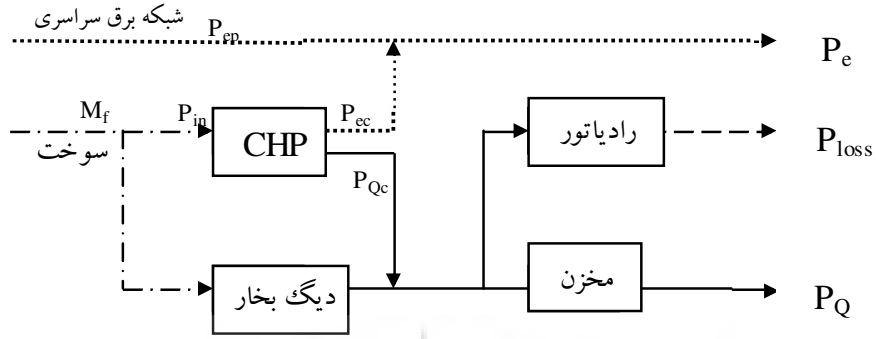
همان‌گونه که در شکل‌های ۴ و ۵ دیده می‌شود. در ساعات بی‌باری با توجه به تعرفه‌های پایین برق، همه انرژی الکتریکی از شبکه برق شهر تامین می‌شود. در این حالت انرژی حرارتی مورد نیاز از دیگ بخار تامین خواهد شد. در ساعات اولیه روز با افزایش تعرفه‌های برق سیستم تولید همزمان وارد مدار شده و کسری از انرژی الکتریکی مورد نیاز را تامین می‌کند. در این حالت تقریباً همه انرژی حرارتی مورد نیاز به وسیله سیستم تولید همزمان تامین می‌شود. در زمان اوج بار با افزایش قابل توجه تعرفه‌ها، سیستم تولید همزمان تمامی نیازهای الکتریکی را تامین می‌کند. در این حالت انرژی حرارتی تولیدی مازاد بر نیاز است. این انرژی در مخزن ذخیره می‌شود. با رسیدن دمای مخزن به مقدار ماکزیمم گرمای اضافی از طریق رادیاتور وارد محیط می‌شود. در این حالت سیستم تولید همزمان در راندمان پایین‌تری نسبت به حالت قبل کار می‌کند. چنانچه بتوان به نحوی مقدار انرژی حرارتی آزاد شده به محیط را به صفر رساند می‌توان حداکثر بازده را انتظار داشت. برای این منظور می‌توان با اعمال مدیریت بار الکتریکی مقدار بار الکتریکی در این ساعات را کاهش داد تا مقدار انرژی الکتریکی کمتری مورد نیاز باشد و در نتیجه انرژی حرارتی کمتری تولید شود و یا با انتقال فرایندهای گرما بر به زمان اوج بار از گرمای تولیدی استفاده کرد. همچنین می‌توان با بزرگ‌تر کردن مخزن ذخیره آب گرم، قابلیت ذخیره انرژی

گرمایی را افزایش داد تا گرمای اضافی جهت استفاده در ساعات بعدی ذخیره گردد. انجام هر کدام از این فعالیت‌ها مستلزم بررسی فنی و اقتصادی کل سیستم است تا در تامین نیازها خللی ایجاد نگردد و نیز از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد.

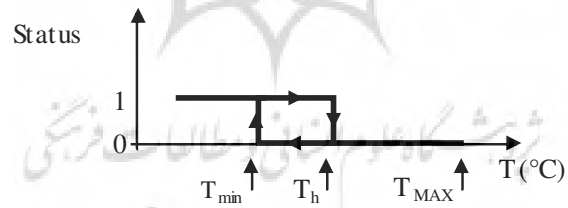
در شکل ۶ هزینه سیستم تولید همزمان، هزینه دیگ بخار و هزینه خرید برق شهر و نیز مجموع این هزینه‌ها در طول هر ساعت از شبانه روز نشان داده شده است. در شکل ۷ مجموع هزینه‌های سیستم تولید همزمان، مجموع هزینه خرید برق و مجموع هزینه سوخت دیگ بخار و همچنین مجموع کل هزینه‌ها در طول یک روز نشان داده شده است. در شکل ۸ هزینه‌های نهایی سیستم تولید همزمان و نیز سیستم تولید مجزا نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با استفاده از سیستم‌های تولید همزمان می‌توان در حدود ۳۰ درصد از هزینه‌های مربوط به انرژی را کاهش داد.

۵. مراجع

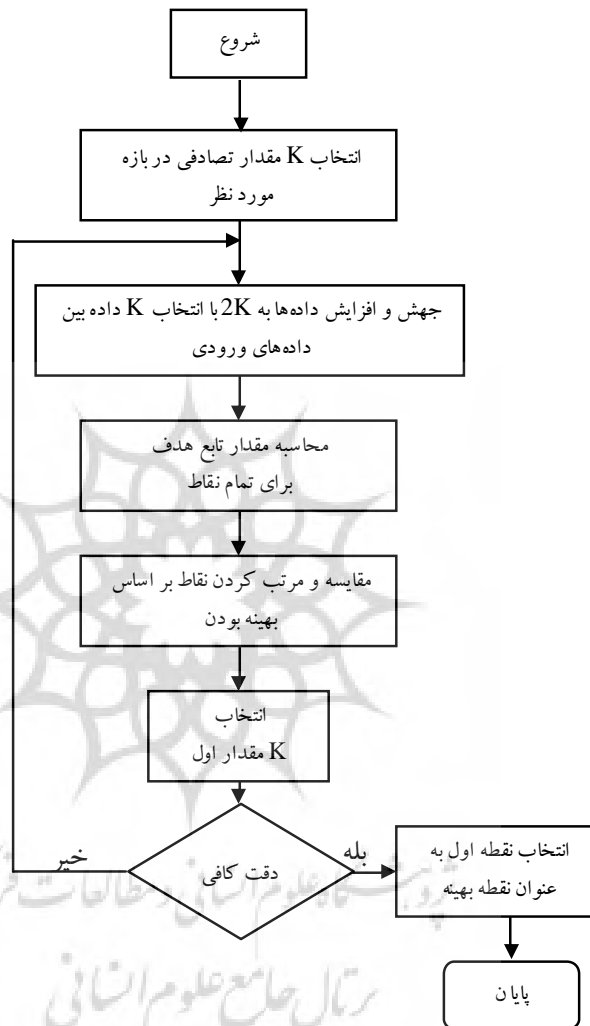
- [1] S. Gamou, R. Yokohama, k. Ito , 'Optimal unit of cogeneration in consideration of uncertain energy demands as continuous random variables' Energy Conversion and Management 43 (2002) pp 1349-1361.
- [2] B. Zaporowski, R. Szczerbowski, "Energy analysis of technological systems of natural gas fired combined heat-and-power plants", Applied Energy, Volume 75, Issues 1-2, May-June 2003, pp 43-50.
- [3] M. T. Tsay, W. M. Lin and J. L. Lee, "Interactive best-compromise approach for operation dispatch of cogeneration systems", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 148, No. 4, July 2001.
- [4] C. Maifredi, L. Puzzi and G.P. Beretta, "Optimal power production scheduling in a complex cogeneration system with heat storage" Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000. (IECEC) 35th Intersociety, IEEE Catalog Number: 00CH37022, AIAA-2000-2978, pp 1014-1012.
- [5] V. Hhavelky, "Energetic efficiency of cogeneration systems for combined heat, cold and power production", International Journal of Refrigeration 22 (1999) 479-485.
- [6] M.T. Tsay, W.M. Lin, "Application of evolutionary programming to optimal strategy cogeneration system under time-of-use rates", Electrical Power and Energy Systems 22(2000) pp 367-373.



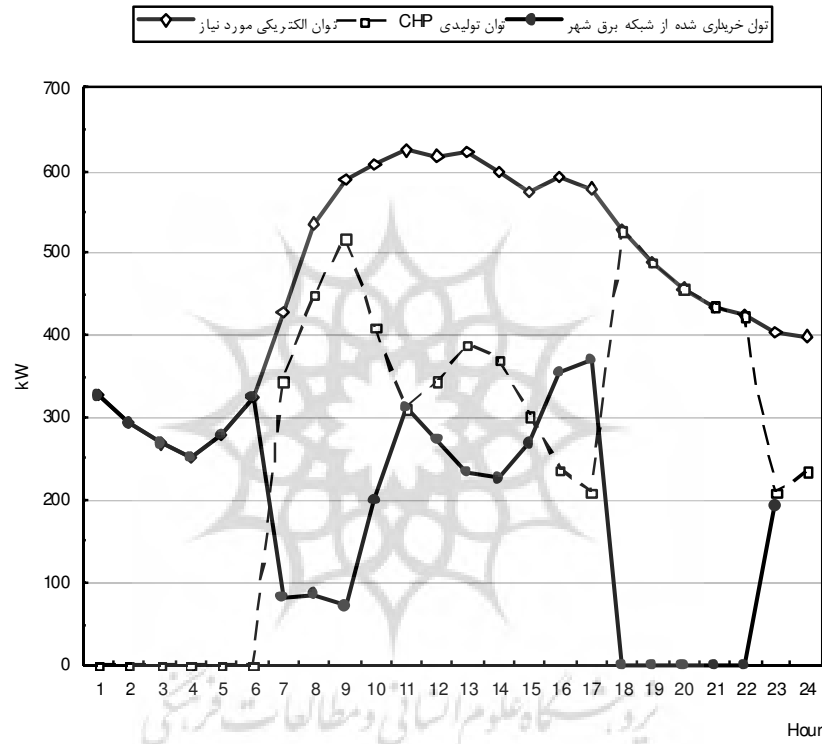
شکل ۱. شماتیک سیستم تولید همزمان



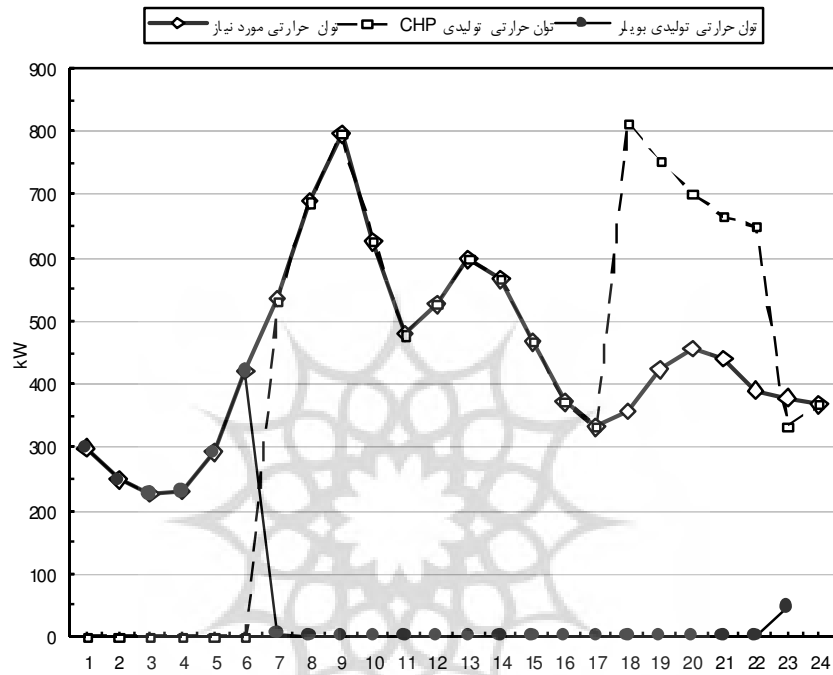
شکل ۲. دیاگرام هیستریزیس کنترل مشعل



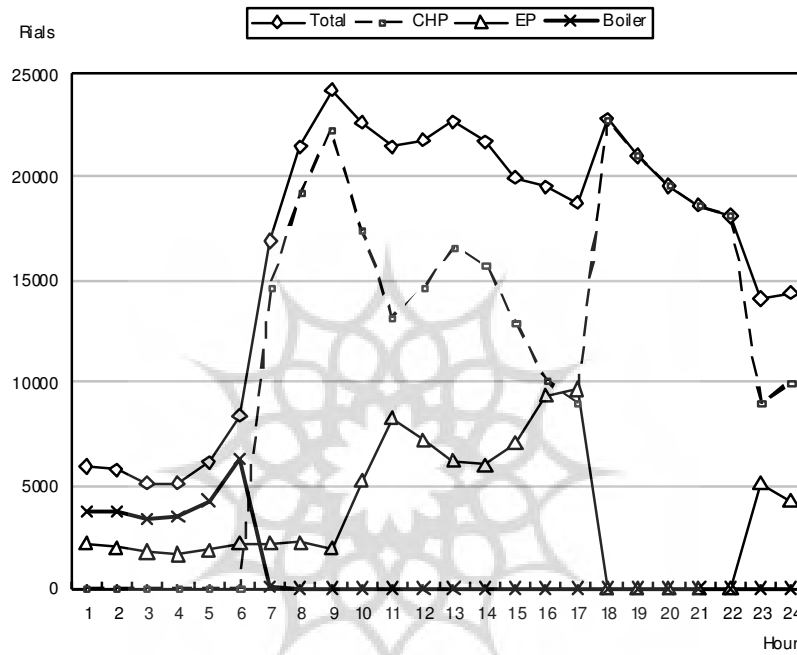
شکل ۳. جریان منطقی برنامه‌ریزی تکمیلی



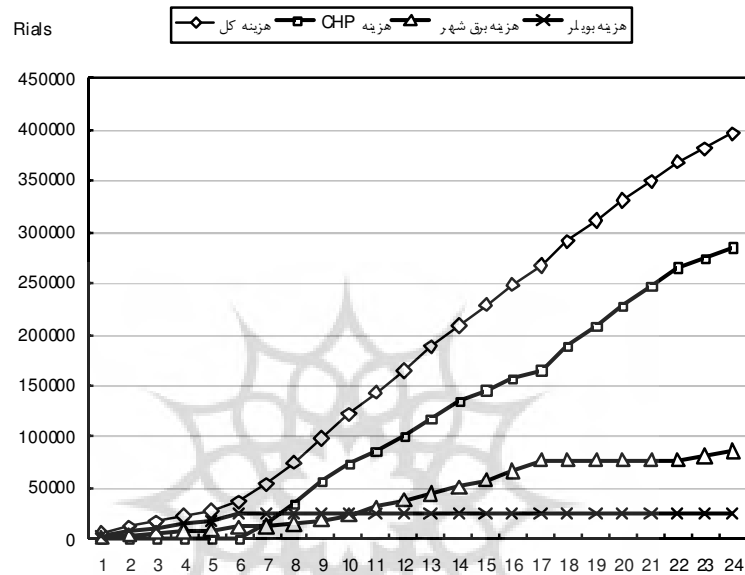
شکل ۴. توان الکتریکی مورد نیاز، توان تولیدی CHP و توان خریداری شده از شبکه برق شهر در طی ساعات مختلف یک شبانه روز



شکل ۵. توان حرارتی مورد نیاز، توان حرارتی تولیدی CHP و توان تولیدی بویلر طی ساعات مختلف شبانه روز

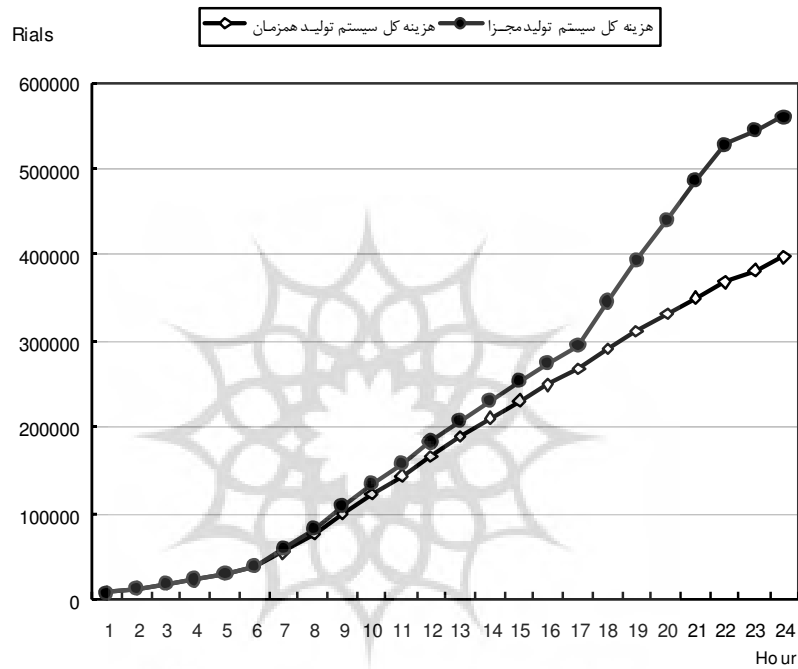


شکل ۶. منحنی‌های هزینه کل، هزینه سوخت CHP، هزینه خرید برق شهر و هزینه سوخت بویلر در طول هر ساعت شبانه‌روز (هزینه کل شامل هزینه‌های سوخت CHP، هزینه خرید برق شهر و هزینه سوخت بویلر است).



شکل ۷. منحنی های هزینه کل، هزینه سوخت CHP، هزینه خرید برق شهر و هزینه سوخت بویلر در طول یک شبانه روز (هزینه کل شامل هزینه های سوخت CHP، هزینه خرید برق شهر و هزینه سوخت بویلر است).

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
 رتال جامع علوم انسانی



شکل ۸. منحنی‌های هزینه کل سیستم تولید همزمان و سیستم تولید مجزا

جدول ۱. نقاط کار اندازه‌گیری شده سیستم

نقطه سه	نقطه دو	نقطه یک	
۱۹۶۶	۱۴۴۰	۴۹۸	توان ورودی (kW)
۶۰۰	۴۵۰	۱۵۰	توان الکتریکی تولیدی (kW)
۹۳۳	۶۹۰	۲۴۸	توان حرارتی تولیدی (kW)

جدول ۲. قیمت و ارزش حرارتی سوخت

۳۷۲۶۰	ارزش حرارتی سوخت (kJ/M^3)
۱۳۸/۵	قیمت سوخت (Rial/M^3)

جدول ۳. تعرفه برق در زمان‌های مختلف

ساعت	قیمت برق
۰-۱	۲۶/۳۸
۱-۶	۶/۶۵
۶-۱۸	۲۶/۳۸
۱۸-۲۲	۸۷/۳۸
۲۲-۲۴	۲۶/۳۸

جدول ۴. مقادیر انرژی الکتریکی و حرارتی مورد نیاز و نتایج بهینه‌سازی

ساعت	توان مورد نیاز (kW)	حرارت مورد نیاز (kW)	توان مصرفی CHP (kW)	الکتریسیته تولیدی CHP (kW)	حرارت تولیدی CHP (kW)	تعرفه برق (Rials/kWh)	دمای مخزن
۱	۳۲۸	۲۹۸	۰	۰	۰	۶/۶۵	۹۰/۴۸۷
۲	۲۹۴	۲۴۸	۰	۰	۰	۶/۶۵	۹۰/۶۰۱
۳	۲۶۹	۲۲۵	۰	۰	۰	۶/۶۵	۹۰/۰۹۹
۴	۲۵۲	۲۳۰	۰	۰	۰	۶/۶۵	۹۰/۷۱۴
۵	۲۷۹	۲۹۲	۰	۰	۰	۶/۶۵	۹۰/۱۲۳
۶	۳۲۵	۴۲۱	۰	۰	۰	۶/۶۵	۹۰/۷۰۶
۷	۴۲۸	۵۳۵	۱۰۹۶	۳۴۶	۵۳۰	۲۶/۳۸	۹۰/۴۴۹
۸	۵۳۵	۶۸۹	۱۴۳۷	۴۴۹	۶۸۹	۲۶/۳۸	۹۰/۲۲۸
۹	۵۸۹	۷۹۶	۱۶۶۹	۵۱۷	۷۹۶	۲۶/۳۸	۹۰/۴۹۱
۱۰	۶۰۷	۶۲۵	۱۳۰۰	۴۰۸	۶۲۵	۲۶/۳۸	۹۰/۶۳۶
۲۱	۶۲۵	۴۷۹	۹۸۶	۳۱۱	۴۷۸	۲۶/۳۸	۹۰/۰۲۷
۲۲	۶۱۷	۵۲۷	۱۰۹۰	۳۴۴	۵۲۷	۲۶/۳۸	۹۰/۱۸۸
۲۳	۶۲۳	۵۹۶	۱۲۳۸	۳۸۹	۵۹۶	۲۶/۳۸	۹۰/۱۶۷
۲۴	۵۹۸	۵۶۷	۱۱۷۶	۳۷۰	۵۶۷	۲۶/۳۸	۹۰/۱۶۲
۲۵	۵۷۳	۴۶۷	۹۶۲	۳۰۴	۴۶۷	۲۶/۳۸	۹۰/۲۵۵
۲۶	۵۹۲	۳۷۱	۷۵۷	۲۳۷	۳۷۱	۲۶/۳۸	۹۰/۰۵۰
۲۷	۵۷۸	۳۳۱	۶۷۳	۲۱۰	۳۳۱	۲۶/۳۸	۹۰/۲۴۸
۲۸	۵۲۷	۳۵۷	۱۷۰۵	۵۲۷	۸۱۳	۸۷/۰۹	۱۳۰
۲۹	۴۸۹	۴۲۳	۱۵۷۳	۴۸۹	۷۵۲	۸۷/۰۹	۱۳۰
۲۰	۴۵۷	۴۵۵	۱۴۶۴	۴۵۷	۷۰۱	۸۷/۰۹	۱۳۰
۲۱	۴۳۵	۴۴۱	۱۳۹۰	۴۳۵	۶۶۶	۸۷/۰۹	۱۳۰
۲۲	۴۲۴	۳۸۹	۱۳۵۲	۴۲۴	۶۴۹	۸۷/۰۹	۱۳۰
۲۳	۴۰۳	۳۷۸	۶۷۴	۲۱۰	۳۳۲	۲۶/۳۸	۹۰/۱۵۷
۲۴	۳۹۸	۳۶۷	۷۴۹	۲۳۵	۳۶۷	۲۶/۳۸	۹۰/۱۹۴

فهرست متغیرها

a_i	ضرایب تابع بازده الکتریکی CHP	—
b_i	ضرایب تابع بازده گرمایی CHP	—
C	ظرفیت گرمایی آب مخزن	J/ kg °C
C_p	قیمت انرژی الکتریکی	r/ kW h
C_{pi}	قیمت‌های برق در زمان‌های مختلف	r/ kW h
M	جرم آب مخزن	Kg
P_e	توان الکتریکی مورد نیاز	kW
P_{ec}	انرژی الکتریکی تولیدی CHP	kW
P_{in}	انرژی ورودی به CHP	kW
P_{IN}	گرمای ورودی به مخزن	kW
$P_{in,max}$	حداکثر گرمای ورودی به CHP	kW
$P_{in,min}$	حداقل گرمای ورودی به CHP	kW
P_{loss}	توان حرارتی تلف شده به وسیله رادیاتور	kW
P_{OUT}	گرمای خروجی از مخزن	kW
P_Q	توان حرارتی مورد نیاز	kW
P_{Qc}	گرمای تولیدی CHP	kW
$P_{Qc,max}$	حداکثر گرمای تولیدی CHP	kW
$P_{Qc,min}$	حداقل گرمای تولیدی CHP	kW
P_T	گرمای ذخیره شده در مخزن	kW
s	هزینه دو هر ثانیه	Rial/s
s_{tot}	هزینه کل	Rial
t_i	زمان‌های مربوط به تعرفه‌های قیمت برق	Hour
T	دمای آب مخزن	°C
T_h	دمای خاموش شدن مشعل	°C
T_{max}	حداکثر دمای آب مخزن	°C
T_{min}	حداقل دمای آب مخزن	°C