

بهینه‌سازی چند هدفه سیستم هیبرید میکروتوربین و پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از الگوریتم ژنتیک

سپهر صنایع^۱، آرش کاتبی^۲

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
^۲ کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

بهینه‌سازی فنی، اقتصادی و زیست محیطی سیستم هیبرید پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گاز در بار کامل به منظور تولید توزیع شده انرژی الکتریکی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از یک روش بهینه‌سازی چند هدفه بر مبنای الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. سیستم هیبرید توسط یک کد کامپیوتری مدلسازی حرارتی شده و نتایج مدلسازی عملکرد سیستم با استفاده از داده های موجود در مراجع مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. در فرآیند بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای تصمیم‌گیری با توجه به قیود سیستم محاسبه شده‌اند تا یک معیار بهینه برای توابع هدف هزینه و بازده انرژی را برآورده سازند. در همین حال هزینه‌های جریمه تخریب محیط زیست به هزینه‌های کل سیستم افزوده شده است. اثر تغییرات قیمت سوخت، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و اندازه‌ی توان خروجی سیستم بر نتایج بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. از نتایج بدست آمده به روشنی ملاحظه می‌گردد که حساس‌ترین و مهم‌ترین پارامتر طراحی سیستم، چگالی جریان پیل سوختی می‌باشد که انتخاب دقیق مقدار آن سهم مهمی در توازن میان کارایی و هزینه سیستم دارد.

کلمات کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد؛ میکروتوربین؛ انرژی؛ بهینه‌سازی فنی اقتصادی؛ تحلیل زیست محیطی - اقتصادی.

۱- مقدمه

با افزایش مصرف انرژی و نمایان شدن هر چه بیشتر اثرات سوء زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های تولید توان متداول، نگرش به سوی مولد های انرژی پاک و با راندمان بالا بسیار پررنگ تر شده است. یکی از سیستم های تولید انرژی الکتریکی که به‌ویژه در دهه‌های اخیر توجه محققان بسیاری در زمینه تحلیل سیستم های انرژی را به خود جلب کرده است، پیل‌های سوختی می‌باشند. پیل‌های سوختی انرژی سوخت را به‌طور مستقیم به الکتریسیته تبدیل می‌کنند و از این رو از اثرات ناشی از احتراق در آنها اجتناب خواهد شد. همچنین پیل‌های سوختی به دلیل بازده بالا، سازگاری با سوخت‌های متنوع و به‌ویژه تولید انرژی پاک، از مولدهای قابل اعتماد برای تولید انرژی الکتریکی در عصر حاضر و آینده می‌باشند [۱]. از میان انواع پیل‌های سوختی، نوع اکسید جامد دارای مزایای متعدد بوده و به دلیل دمای کارکرد بالا، امکان تولید بیشتر توان و افزایش بازده با استفاده از انرژی گازهای خروجی را فراهم می‌آورد. بنابراین با ترکیب پیل‌های سوختی اکسید جامد با یک سیکل پایین دست، مانند توربین گاز می‌توان در یک سیستم ترکیبی (هیبرید) به مقادیر بازده الکتریکی در

محدوده ۶۰ درصد و بالاتر دست یافت [۲]. سیستم‌های هیبرید مورد بررسی در مقالات، معمولاً در محدوده‌ی ۲۰۰ الی ۱۵۰۰ کیلو وات توان الکتریکی تولیدی قرار دارند که به لحاظ انرژی، انرژی و در مواردی اندک از لحاظ اقتصادی تحلیل و یا بهینه سازی شده‌اند. با این حال سیستم‌های در مقیاس بزرگ‌تر نیز در مواردی مورد توجه قرار گرفته‌اند. لوبلی^۱ و ماساردو^۲ [۳] در تحقیق جامع خود چیدمان های مختلفی از سیکل‌های ترکیبی پیل سوختی و توربین گاز را بررسی کرده و مدلی برای شبیه‌سازی آنها ارائه کرده‌اند. کامپاناری^۳ [۴] و کاستامگنا^۴ [۵] سیستم‌هایی متشکل از یک میکروتوربین و پیل سوختی اکسید جامد را در حالت‌های بار کامل و جزئی مدلسازی و کارایی آنها را مطالعه کرده‌اند. چان^۵ و همکارانش [۶ - ۱۰] در سلسله مقالات خود مدل دقیقی برای شبیه‌سازی رفتار الکتروشیمیایی پیل سوختی ارائه کرده و سیستم های تولید توان ساده یا ترکیبی را از لحاظ اثر پارامترهای مختلف بررسی کرده‌اند. ماساردو و

¹ Lubelli

² Massardo

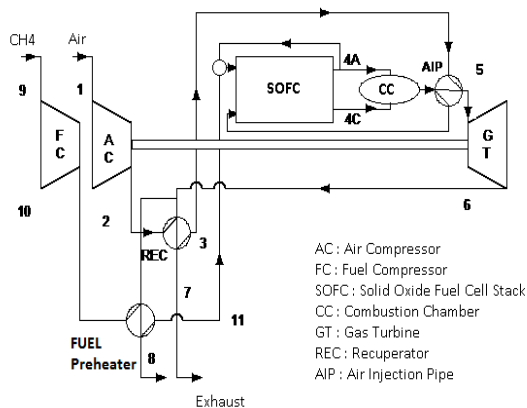
³ Campanari

⁴ Costamagna

⁵ Chan

۲- معرفی سیستم

طرح ترسیمی سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است. چیدمان تمامی سیستم‌های پیشنهاد شده در مراجع، دارای ارکان اصلی مشابه و یکسانی هستند. این شماتیک یک طرح ساده شده و با هدف در نظر گرفتن مهمترین فرآیندهای حرارتی در سیستم متداول و عملی ترکیبی بر اساس پیل سوختی اکسید جامد لوله-ای با ریفورمر داخلی طراحی شده است. طرز عملکرد سیستم به این شرح است: هوا (نقطه ۱) و سوخت (نقطه ۹) در شرایط محیطی استاندارد توسط کمپرسورها فشرده شده و سپس با عبور از ریکوپراتور و پیش گرم کن، به میزان کافی پیش گرم می شوند.



شکل ۱- طرح ترسیمی سیستم هیبرید تولید توان میکروتوربین و پیل سوختی اکسید جامد

از آنجا که تنها هیدروژن می تواند در واکنش الکتروشیمیایی پیل سوختی شرکت کند، گاز متان باید در واکنش ریفورمینگ با استفاده از بخار آب در دما و فشار بالا به هیدروژن تبدیل گردد. ساختار پیل‌های سوختی اکسید جامد با ریفورمر داخلی به گونه-ای می باشد که واکنش‌های مورد نیاز می تواند در دما و فشار درون محفظه‌ی پیل سوختی انجام شود. بنابراین حرارت مورد نیاز این واکنش‌ها از حرارت تولید شده توسط واکنش الکتروشیمیایی پیل سوختی تامین خواهد شد. همچنین لازم است درصدی از تبدیل متان به هیدروژن پیش از ورود به آند پیل سوختی در یک پیش ریفورمر صورت گیرد. بخار آب مورد نیاز واکنش ریفورمینگ با برگشت دادن محصولات و بخار آب حاصل از واکنش الکتروشیمیایی، تامین می گردد.

این روش نیاز به یک مبدل مستقل تولید بخار را بر طرف می‌سازد. پس به منظور انجام واکنش ریفورمینگ، محصولات برگشت داده شده، با متان ورودی (نقطه ۱۰) پیش ریفورمر کننده شده و بخشی از آن مخلوط را به هیدروژن تبدیل می‌کنند و سپس وارد قسمت آند پیل سوختی می‌گردند. از سوی دیگر اکسیژن هوا (نقطه ۳) به قسمت کاتد وارد شده و واکنش

ماگیستری^۱ [۱۱] در ادامه تحقیقات خود سیستم را از لحاظ انرژی و نیز با ارائه مدل اقتصادی از نظر فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار داده اند. باورساد [۱۲] در تحقیق خود اثر پارامترهای مختلف بر انهدام انرژی اجزا سیستم ترکیبی را بررسی نموده‌اند. کالیس^۲ و همکارانش [۱۳-۱۶] در سلسله مقالاتی سیستم هیبرید را از لحاظ انرژی و انرژی شیبه‌سازی و بررسی نموده و در تکمیل تحقیقات خود با ارائه یک مدل هزینه، نمونه‌ای از سیستم را از لحاظ فنی و اقتصادی بهینه سازی نمودند. آتیسیر^۳ و همکارانش [۱۷] سیستم را از نظر اقتصادی مطالعه کرده و با استفاده از یک روش بهینه‌سازی، مناسب ترین طرح را برای نیازهای مصرف کننده پیشنهاد نموده‌اند. همچنین دوان^۴ و همکاران [۱۸] سیستم هیبرید میکروتوربین پیل سوختی را بهینه‌سازی پارامتریک نموده‌اند. با این حال هیچ یک از تحقیقات تصویر روشنی از سیستم در حالت بهینه ارائه نداده‌اند. همچنین بیشتر آنها از بازده قانون اول در بررسی معیار فنی سیستم استفاده کرده اند. توجه به اثرات زیست محیطی، و بهینه‌سازی زیست محیطی و اقتصادی سیستم‌های انرژی، حجم کوچکی از تحقیقات انجام شده را به خود اختصاص می‌دهد. هدف از این تحقیق بهینه سازی یک سیستم هیبرید میکروتوربین-پیل سوختی اکسید جامد می‌باشد. در این تحقیق پس از مدل‌سازی حرارتی سیستم، دو تابع هدف بازده انرژی و هزینه سیستم در نظر گرفته شده است. همچنین هزینه تحمیل شده ناشی از انتشار گاز دی‌اکسیدکربن از سیستم به عنوان جریمه تخریب محیط زیست به تابع هدف اقتصادی افزوده شده است و از یک الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای یافتن پارامترهای بهینه طراحی برای این مورد خاص سیستم هیبرید استفاده شده است. نتایج بهینه سازی ارائه و بررسی شده است و در نهایت به منظور مطالعه بیشتر، حساسیت سنجی مقادیر جواب های بهینه سیستم نسبت به افزایش توان خروجی (اندازه) سیستم، قیمت سوخت و هزینه‌های سرمایه‌گذاری انجام شده است.

نوآوری‌های ارائه شده در این تحقیق عبارتند از:

- انجام بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم تکاملی برای سیستم هیبرید میکروتوربین و پیل سوختی
- انتخاب پارامترهای طراحی و قیود جدید در بهینه‌سازی و ارائه نتایج بهینه‌سازی و اثر آن بر عملکرد سیستم
- در نظر گرفتن اثرات زیست محیطی در بهینه‌سازی
- حساسیت سنجی نتایج از تغییرات قیمت سوخت، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تغییرات اندازه توان خروجی

^۶ Magistri

^۷ Calise

^۸ Autissier

^۹ Duan

۳-۱- کمپرسور و توربین

برای کمپرسورهای سوخت و هوا از یک سو و توربین گاز از سوی دیگر، بر اساس بازده آیزنتروپیک، نسبت فشار و دمای ورودی معین، طبق روابط زیر دمای خروجی گازها محاسبه می‌گردد [۱۲]. در این روابط بر اساس یک روش تکرار و تصحیح، دمای خروجی حدس زده می‌شود و پس از انتگرال‌گیری، اصلاح شده تا به مقدار صحیح همگرا گردد.

$$\int_{T_1}^{T_2} \bar{C}_{p,air} \frac{dT}{T} = \frac{R}{\eta_{AC}} \ln(ACPR) \quad (1)$$

$$\int_{T_{14}}^{T_{15}} \bar{C}_{p,fuel} \frac{dT}{T} = \frac{R}{\eta_{FC}} \ln(FCPR) \quad (2)$$

نسبت فشار توربین بر اساس فشار کارکرد و مقادیر افت فشار معلوم در خطوط سیستم، محاسبه می‌شود. برای گرمای ویژه گازهای عبوری از توربین، از مقدار میانگین بین دماهای ورودی و خروجی استفاده شده است.

$$\int_{T_5}^{T_6} \bar{C}_{p,gas} \frac{dT}{T} = R\eta_T \ln(TPR) \quad (3)$$

$$\bar{C}_{p,gas,avg} \ln\left(\frac{T_6}{T_5}\right) = R\eta_T \ln(TPR) \quad (4)$$

۳-۲- مبدل‌های حرارتی

ریکوپراتور از نوع صفحه‌ای پره‌دار در نظر گرفته شده است و برای مدل‌سازی ریکوپراتورها و مبدل‌های حرارتی از روش ε -NTU استفاده می‌گردد. ظرفیت‌های گرمایی به صورت مقادیر میانگین بکار رفته‌اند. بر اساس مقدار معین فرض شده‌ی ضریب کارایی، دمای خروجی از ریکوپراتورها با استفاده از معادلات مربوط محاسبه می‌شود.

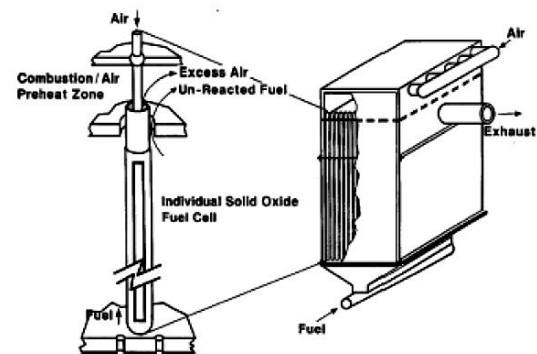
$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{h1}-T_{h2})}{C_{min}(T_{h1}-T_{c1})} \text{ OR } \frac{C_c(T_{c2}-T_{c1})}{C_{min}(T_{h1}-T_{c1})} \quad (5)$$

برای محاسبه سطح انتقال حرارت ریکوپراتورها، بر اساس تعریف تعداد واحدهای انتقال حرارت (NTU) و روابط مربوط به آن (برای مبدل‌های با جریان‌مقاطع بدون اختلاط جریان‌ها) عمل می‌گردد [۱۹]. برای محاسبه ضریب کلی انتقال حرارت از روابط و اطلاعات موجود در مرجع [۲۰] استفاده شده است. مبدلی که برای مدل‌سازی لوله‌های تزریق هوا در پیل سوختی لوله‌ای استفاده شده است به عنوانی جزئی از ساختار داخلی پیل سوختی در نظر گرفته می‌شود (که بر اساس روابطی مشابه روابط فوق، برای مبدل‌های با جریان مخالف جهت مدل‌سازی خواهد شد).

۳-۳- پیل سوختی با ریفرورمینگ داخلی

پیل سوختی اکسید جامد در نظر گرفته شده در این تحقیق، از نوع لوله‌ای با ریفرورمر داخلی می‌باشد که کلیه ابعاد و مشخصات عملکرد آن بر اساس مراجع [۵-۱۳] در نظر گرفته شده است. مدل پیل سوختی در این بررسی شامل سه قسمت می‌باشد. واکنش‌های شیمیایی داخلی پیل سوختی با استفاده از مدل تعادل (بخش ۳-۳-۱) بررسی شده است و شرایط تعادل، و نرخ و ترکیب مولی هر یک از گازها در مخلوط خروجی از پیل سوختی معین

الکتروشیمیایی روی سطوح سه فازی الکترودها انجام می‌گردد که مقدار زیادی حرارت و انرژی الکتریکی آزاد می‌شود. در این نوع پیل سوختی، هوا پیش از ورود به کاتد در لوله‌ی تزریق هوا مجدداً با استفاده از حرارت گازهای حاصل از احتراق گرم می‌شود تا به دمای عملکرد پیل سوختی نزدیک‌تر گردد. به همین دلیل این مکانیزم با یک مبدل مجازی مدل‌سازی شده است. شماتیک ساختار پیل سوختی لوله‌ای ذکر شده در شکل ۲ نشان داده شده است. هوای خروجی به همراه ترکیبات قابل احتراق و سوخت مصرف نشده (نقاط ۴) در یک بخش احتراق اکسید شده و انرژی بیشتری آزاد می‌کنند. گازهای داغ و پرفشار خروجی از بخش احتراق (نقطه ۵) به منظور تولید توان در توربین گاز انبساط می‌یابد. بعد از انبساط (نقطه ۶) نیز این گازها دارای مقادیر بالای انرژی می‌باشند که بخش اعظم آن‌ها با عبور از ریکوپراتور برای پیش‌گرم کردن هوا مقدار قابل توجهی از انرژی آن‌ها در سیستم بازیابی می‌شود. حدود ۵ درصد گاز خروجی از توربین برای پیش‌گرم کردن سوخت استفاده می‌گردد. حتی گازهای تخلیه شونده به محیط (نقطه ۸) نیز دارای مقادیری انرژی کم کیفیت قابل استفاده برای مصارف حرارتی می‌باشند که در این بررسی مورد توجه قرار نگرفته است.



شکل ۲- ساختار پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای [۵]

۳-۳- مدل‌سازی ترمودینامیکی

یک مدل حالت پایا برای مدل‌سازی حرارتی سیستم در بار کامل در نظر گرفته شده است، که بر مبنای مقادیر متوسط پارامترهای ترمودینامیکی در هر جز تکامل یافته است. از گرادینان‌ها و توزیع دما و فشار در پیل سوختی و سایر اجزا صرف‌نظر شده و تنها دمای تعادل خروجی به عنوان دمای عملکرد پیل سوختی در نظر گرفته شده است. کلیه گازها به صورت ایده‌آل در نظر گرفته می‌شوند و برای مشخصات ترموفیزیکی سیال عامل، گرمای ویژه وابسته به درجه حرارت می‌باشد که به صورت یک چند جمله‌ای با ضرایب معین فرض شده است.

همچنین جریان الکتریکی تولیدی پیل سوختی بر اساس رابطه زیر بر اساس سرعت واکنش الکتروشیمیایی تعیین می شود. در این رابطه F ثابت فارادی را نشان می دهد.

$$I = 2FZ \quad (10)$$

۳-۳-۲- مدل الکتروشیمیایی

محاسبه‌ی ولتاژ خروجی پیل سوختی در مدل الکتروشیمیایی آن، با در نظر گرفتن کلیه افت‌های قابل توجه ولتاژ، انجام می شود. ولتاژ ایده‌آل یا برگشت پذیر (مدار باز) سیستم، بر اساس رابطه نرنست (۱۱) در دما و فشار کارکرد سیستم محاسبه شده است که در آن $\Delta \bar{g}_f^0$ برابر تغییر تابع گیبس تشکیل واکنش الکتروشیمیایی در شرایط استاندارد می باشد:

$$V_{rev} = -\frac{\Delta \bar{g}_f^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^2}{P_{H_2O}} \quad (11)$$

ولتاژ واقعی، سپس با کسر افت‌های ولتاژ مربوط به تلفات اهمی (η_{ohm})، افت فعال سازی (η_{act}) و تلفات غلظتی (η_{conc}) بر اساس پارامترهای کاری پیل سوختی (چگالی جریان، فشار اجزا، دما، مشخصات هندسی و خواص فیزیکی مواد بکار رفته در آن)، بدست خواهد آمد. بنابراین ولتاژ واقعی پیل سوختی در این مدل سازی با کسر مجموع افت‌های محاسبه شده از ولتاژ ایده‌آل یا برگشت پذیر با استفاده از مرجع [۶] به شرح زیر بدست می آید.

$$V = V_{rev} - \eta_{ohm} - (\eta_{act,An} + \eta_{act,Ca}) \eta_{conc} \quad (12)$$

۳-۳-۳- بالانس انرژی

بالانس انرژی برای محفظه پیل سوختی، بر اساس روابط زیر، به منظور محاسبه نرخ آنتالپی جریان خروجی بر حسب مقادیر معلوم آنتالپی جریان‌های ورودی به آند و کاتد، کار تولید شده و نیز مجموع حرارت خالص ایجاد شده توسط واکنش‌های شیمیایی داخلی، بیان شده است. (در روابط زیر Δh برابر نرخ تغییر آنتالپی خالص هر یک از واکنش‌های شیمیایی می باشد).

$$H_{in} + H_{react} = W + H_{out} \quad (13-1)$$

$$H_{react} = -(z\Delta h_{el} + y\Delta h_{Shift} + x\Delta h_{Ref}) \quad (13-2)$$

$$H_{in} = \sum n_{j,in} \int_{T_0}^T \bar{c}_{p,j} dT \quad (13-3)$$

$$H_{out} = \sum n_{j,out} \int_{T_0}^T \bar{c}_{p,j} dT \quad (13-4)$$

$$W = VI \quad (13-5)$$

۳-۴- بخش احتراق

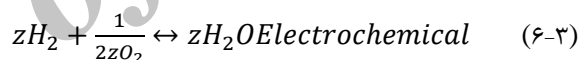
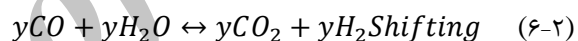
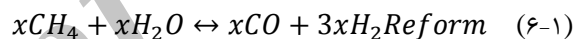
فرض می شود که واکنش‌های زیر به طور کامل پس از خروج از پیل سوختی رخ می دهد و به واسطه آن‌ها، اجزا قابل احتراق و سوخت مصرف نشده در واکنش، با اکسیژن اضافی موجود در

می گردد. با استفاده از مدل الکتروشیمیایی، ولتاژ پیل سوختی بر اساس شرایط عملکرد آن (با در نظر گرفتن ولتاژ ایده‌آل و تمام افت‌های مربوط) محاسبه می شود.

سرانجام بر اساس بالانس انرژی در محفظه پیل سوختی، با داشتن خواص جریان‌های ورودی و توان الکتریکی تولید شده، دما و مشخصات ترمودینامیکی گازهای خروجی از محفظه پیل سوختی، محاسبه می گردد.

۳-۳-۱- مدل تعادل

فرض می شود تنها واکنش‌های زیر در محفظه پیل سوختی جریان دارند که از میان آنها واکنش‌های ریفرمینگ و شیفت در تعادل شیمیایی در نظر گرفته می شوند. x ، y و z به ترتیب برابر نرخ مولی انجام واکنش‌های ریفرمینگ متان، شیفت منواکسید کربن و الکتروشیمیایی می باشند که برای محاسبه ترکیب گازهای خروجی از پیل سوختی باید محاسبه گردند. با این حال به دلیل مقدار بسیار بالای ثابت تعادل واکنش ریفرم و سرعت بالای آن در جهت رفت، می توان آن را یک طرفه و تا مرز کامل شدن فرض کرد. این فرض از بروز دستگاه معادلات شدیداً غیر خطی، جلوگیری خواهد کرد [۱۳].



مقادیر ثوابت تعادل بر اساس غلظت واکنش دهنده‌ها و محصولات، برای واکنش‌های ریفرم و شیفت برابر روابط زیر می باشند.

$$K_{P,R} = \frac{P_{CO} P_{H_2}^3}{P_{CH_4} P_{H_2O}}, \quad K_{P,S} = \frac{P_{CO_2} P_{H_2}}{P_{CO} P_{H_2O}} \quad (7)$$

برای محاسبه ثابت تعادل واکنش‌های ریفرم و شیفت، می توان آنها را بر اساس معادلات تجربی به صورت چند جمله‌ای‌های تابع درجه حرارت (و یا با حداقل سازی مقدار تابع گیبس واکنش) محاسبه نمود. در این بررسی از روش اول استفاده شده است که ثوابت چند جمله‌ای از مرجع [۷] استخراج شده اند.

$$\log(K_P) = AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT + E \quad (8)$$

با داشتن مقدار ثابت تعادل و نوشتن روابط سینتیک بر حسب غلظت‌های مولی و نیز مشخص بودن فاکتور مصرف سوخت در واکنش الکتروشیمیایی، دستگاهی از سه معادله سینتیک زیر تشکیل خواهد شد که با حل هم‌زمان آن‌ها، نرخ انجام هریک از واکنش‌ها معلوم خواهد گردید.

$$x = n_{CH_4,in} \quad (9-1)$$

$$K_{P,S} = \frac{(n_{H_2,in} + 3x + y - z)(n_{CO_2,in} + y)}{(n_{H_2O,in} - x - y + z)(n_{CO,in} + x - y)} \quad (9-2)$$

$$Z = U_f(3x + y) \quad (9-3)$$

بدین ترتیب ترکیب مولی گازهای خروجی از آند و کاتد طبق سرعت‌های بدست آمده برای واکنش‌ها محاسبه می گردد.

روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. قانون دوم ترمودینامیک در ترکیب با تحلیل اقتصادی یک ابزار قدرتمند و سیستماتیک برای بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی در اختیار ما قرار می‌دهد. این ترکیب، ساختار روشی نسبتاً جدید در تحلیل‌های فنی اقتصادی به نام انرژی-اقتصادی را برقرار می‌سازد. بر اساس یک مدل هزینه، می‌بایست تمام هزینه‌های خرید اجزا سیستم، هزینه‌های نگهداری و نیز هزینه سوخت مصرفی برای آن محاسبه گردد. هزینه‌های سرمایه‌گذاری اجزا می‌بایست بر اساس پارامترهای طراحی هر جز ارائه گردد تا به واسطه آن بتوان بهینه‌سازی فنی اقتصادی را به انجام رسانید. مدل بکار رفته برای هزینه سرمایه‌گذاری اجزا سیستم هیبرید میکروتوربین و پیل سوختی با استفاده از روابط موجود در مرجع [۱۵] محاسبه شده است. برای تبدیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری به نرخ هزینه در واحد زمان، از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\dot{Z}_K = \frac{C_K \times CRF \times \phi}{N \times 3600} \quad (15)$$

که در آن C_K هزینه سرمایه‌گذاری یا خرید جز k ام سیستم، CRF ضریب بازگشت سرمایه که بر اساس سود سالانه و زمان بازپرداخت محاسبه می‌شود، ϕ ضریب تعمیر و نگهداری و N تعداد ساعات کارکرد سیستم در سال می‌باشد [۲۱].

۴-۲- قیمت‌گذاری انرژی

در تحلیل انرژی، بر اساس روابط انرژی فیزیکی و شیمیایی، نرخ انرژی در کلیه خطوط سیستم محاسبه می‌شود. روش قیمت‌گذاری انرژی مبتنی بر در نظر گرفتن ارزش اقتصادی انرژی در اجزا سیستم است و برقرار کردن معادلات بالانس هزینه بر اساس بالانس انرژی، برای هر یک از اجزا می‌باشد [۲۱]. در معادله بالانس هزینه برای یک حجم کنترل (تجهیز یا جزء)، مجموع نرخ هزینه‌های تمام جریان‌های انرژی ورودی و خروجی، هم‌چنین انرژی کار و حرارت، به انضمام نرخ هزینه سرمایه‌گذاری و نگهداری آن جز، در نظر گرفته می‌شود.

$$\sum \dot{C}_{in} + \dot{C}_{q,in} + \dot{Z}_K = \dot{C}_{w,out} + \sum \dot{C}_{out} \quad (16)$$

با در نظر گرفتن جریان‌های انرژی سوخت و محصول برای هر جز داریم:

$$\dot{C}_{F,k} + \dot{Z}_K = \dot{C}_{P,k} \quad (17)$$

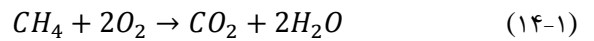
هم‌چنین با در نظر گرفتن قیمت واحد انرژی:

$$C_F \dot{E}_{F,k} + \dot{Z}_{K,tot} = C_P \dot{E}_{P,k} \quad (18)$$

با در نظر گرفتن جریان‌های انرژی سوخت و محصول و با استفاده از معادلات کمکی، مجموع معادلات بالانس هزینه برای تمام اجزا سیستم، دستگاهی خطی را تشکیل می‌دهد که با حل آن، قیمت واحد انرژی در تمام خطوط سیستم محاسبه خواهد گردید. این هزینه‌ها اطلاعات ارزشمندی در مورد عملکرد سیستم را برای ما روشن خواهد ساخت. هزینه نهان تحمیل شده بر سیستم یا هزینه‌ی انهدام انرژی، عبارت است از هزینه‌ای که

جریان خروجی از کاتد، ترکیب و کاملاً اکسید شده و انرژی حرارتی بیشتری آزاد می‌کنند.

ترکیب گاز خروجی از این مرحله به واسطه معادلات واکنش، به سادگی تعیین می‌شود. به منظور محاسبه دمای خروجی، یک بالانس انرژی متداول برای مجموعه این واکنش‌ها و جریان‌های ورودی و خروجی محفظه احتراق آدیباتیک نوشته شده است.



$$\sum_r n_j \left(\bar{h}_{f,j}^0 + \int_{T_0}^{T_{in}} \bar{c}_{p,j} dT \right) \times \varepsilon_C = \sum_p n_j \left(\bar{h}_{f,j}^0 + \int_{T_0}^{T_{out}} \bar{c}_{p,j} dT \right) \quad (14-4)$$

در رابطه فوق ε_C بازدهی احتراق را نشان می‌دهد.

۳-۵- روند حل مسئله

با استفاده از روابط و اطلاعات فوق، کدی در نرم افزار MATLAB برای مدل‌سازی عملکرد سیستم بر اساس پارامترهای طراحی معلوم، توسعه یافته است. از آنجا که وابستگی و ارتباط پیچیده‌ای بین اجزا مختلف سیکل وجود دارد، محاسبه مستقیم پارامترها ممکن نبوده و چون برخی از مقادیر مانند دمای ورودی به میدل‌ها در ابتدا مشخص نمی‌باشد، این مقادیر ابتدا حدس زده شده و در تکرارهای متوالی حل سیکل، اصلاح گردیده است.

بدین منظور به عنوان استراتژی کلی حل سیستم، ابتدا دمای خروجی پیل سوختی حدس زده شد و سپس بر طبق مدل سازی ارائه شده، مشخصات ترمودینامیکی تمام نقاط سیکل بر اساس این دما بدست آمده است. از جمله این مقادیر دمای جریان‌های ورودی به پیل سوختی است.

بر اساس آنتالپی ورودی و توان تولیدی پیل سوختی، دمای خروجی در رابطه بالانس انرژی، اصلاح شده و محاسبات با مقدار جدید دما تکرار گردیده تا به مقدار نهایی همگرا شود. به دلیل حجم بالای محاسبات در روش تکرار، حل این سیستم فرآیندی بسیار زمان‌بر داشت و تلاش فراوانی برای کاهش زمان محاسباتی مورد نیاز در برنامه‌ی توسعه داده شده بکار رفته است. از جمله آن می‌توان به بکار بردن ضرایب وزنی عددی در سریع‌تر کردن روند اصلاح جواب در هر تکرار اشاره نمود.

۴- تحلیل انرژی-اقتصادی

۴-۱- مدل‌سازی اقتصادی

بدون در نظر گرفتن عوامل اقتصادی نمی‌توان یک سیستم انرژی را بهینه‌سازی کرد، زیرا هزینه‌ها عامل بسیار مهمی در انتخاب و طراحی سیستم‌های انرژی هستند. بهینه‌سازی یک سیستم تنها از لحاظ اقتصادی و یا فنی نمی‌تواند به تنهایی راهگشا باشد، زیرا به عنوان یک قانون کلی، این دو هدف با یکدیگر در تضاد می‌باشند. به منظور مطالعه فنی، اقتصادی سیستم‌های انرژی،

تابع هدف هزینه کل، بر وزن معیار فنی در مقابل معیار اقتصادی در بهینه‌سازی سیستم می‌افزاید.

$$\text{Obj. Func. II} = \dot{C}_f + \sum \dot{C}_{\text{Cap,O\&M}} + \dot{C}_{\text{env}} \quad (21)$$

که در آن نرخ هزینه سوخت بر واحد زمان بر اساس قیمت سوخت بر واحد انرژی تعیین می‌شود. در این جا معادل $0.04/\$MJ$ فرض شده است. همچنین هزینه ناشی از جریمه زیست محیطی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد که در آن C_{CO_2} برابر $0.24\$/kgCO_2$ در نظر گرفته شده است [۲۴].

$$\dot{C}_{\text{env}} = C_{CO_2} m_{CO_2} \quad (22)$$

۵-۲- پارامترهای تصمیم‌گیری و قیدها

پارامترهای تصمیم‌گیری در این مسئله بهینه‌سازی عبارتند از: نسبت فشار کمپرسور هوا، بازده کمپرسور هوا، بازده توربین گاز، نرخ جرمی هوای ورودی، فاکتور مصرف سوخت پیل سوختی، چگالی جریان پیل سوختی، ضریب کارایی ریکوپراتور و نسبت بخار به کربن در ریفرمر. به منظور دستیابی به نتایج عملی و قابل قبول از بهینه‌سازی یک مسئله با مدل فیزیکی واقعی، می‌بایست قیدهای فیزیکی مسئله در مدل ریاضی لحاظ شوند.

این قیدها عمدتاً ناشی از محدودیت‌های فیزیکی، تکنولوژی، اقتصادی و میزان دسترسی در بازار تجاری می‌باشند. در نتیجه هر پارامتر تصمیم‌گیری می‌بایست در محدوده مشخصی قرار گیرد. قیدهای اعمال شده برای مسئله بهینه‌سازی سیستم مورد بررسی در جدول ۱ ذکر شده‌اند.

۵-۳- روش بهینه‌سازی

به دلیل طبیعت شدیداً غیر خطی، پیچیدگی مدل و تعداد بالای متغیرهای تصمیم‌گیری و نیز چندهدفه بودن بهینه‌سازی، الگوریتم تکاملی ژنتیک به عنوان مناسب‌ترین گزینه استفاده شده است در حالیکه روش‌های نیازمند به محاسبه مشتقات بسیار زمان بر می‌باشند. روش الگوریتم ژنتیک بر خلاف روش‌های مبتنی بر گرادیان نمی‌تواند یک نقطه‌ی خاص را به عنوان جواب بهینه معرفی کند، بلکه با تکرارهای متوالی، مقادیر تابع هدف کوچک‌تر شده تا بر اساس یک معیار همگرایی مناسب جواب نزدیک به بهینه برای پارامترهای تصمیم‌گیری بدست آید [۱۵]. الگوریتم‌های ژنتیک نوعی از روش‌های نیمه‌تصادفی هستند که بر اساس تقلید از قواعد تکامل طبیعی داروین شکل گرفته‌اند. در الگوریتم ژنتیک پس از تشکیل یک جمعیت اولیه، هر عضو از یک جمعیت با عضو دیگر که به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد از لحاظ برتری صفات رقابت کرده و تنها خواص برتر به عضو فرزند در نسل بعدی انتقال می‌یابد. با تکرار این روند در طی نسل‌های متوالی، حاصل به جواب‌های بهینه برای توابع هدف نزدیک می‌گردد. انواع مختلفی از الگوریتم‌های ژنتیک توسعه یافته‌اند که نوع NSGA-II، که توسط دب^۱ و همکارانش توسعه یافته

باید برای ناکارآمدی‌های ترمودینامیکی پرداخته شود. مجموع \dot{Z}_K و $\dot{C}_{D,K}$ نشان دهنده هزینه مصرفی در یک جرمی باشد.

$$\dot{C}_{D,K} = C_f \dot{E}_{D,K} \quad (19)$$

۴-۳- ملاحظات زیست محیطی

امروزه یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها در مورد سیستم‌های انرژی، اثرات زیست محیطی ناشی از کارکرد آن‌ها است. با این وجود در تحقیقات و مقالات بسیار پژوهشگران، درباره‌ی بهینه‌سازی و ارتقا سیستم‌های انرژی توجه چندانی به اثرات زیست محیطی نشده است. بدین منظور در این بررسی جنبه‌زیست محیطی سیستم هیبرید میکروتوربین و پیل سوختی نیز در نظر گرفته شده است. به عنوان یک اصل کلی، افزایش بازده حرارتی نیروگاه‌ها منجر به مصرف سوخت کمتر و در نتیجه، کاهش اثرات سوء زیست محیطی آنها (از قبیل انتشار دی‌اکسید کربن) خواهد بود. سیستم‌های پیل سوختی در مقابل دیگر سیستم‌های مبتنی بر احتراق، به دلیل بازده بالا و اجتناب از احتراق مستقیم سوخت، از لحاظ زیست محیطی بسیار برتر هستند. با وجود بخش کوچک احتراق در سیستم هیبرید میکروتوربین و پیل سوختی اکسید جامد، میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن به کمتر از 1 ppmv می‌رسد [۲۲]. هم‌چنین به دلیل حساس بودن بخش پیل سوختی، سوخت ورودی باید پیش از ورود، از ترکیبات گوگرد دار تصفیه گردد. از این رو از انتشار اسیدسولفوریک و اکسیدهای گوگرد در گازهای خروجی اجتناب خواهد گردید. در سیستم مورد بررسی در این مقاله نرخ دی‌اکسیدکربن منتشر شده، بر اساس معادلات واکنش‌های شیمیایی داخلی پیل سوختی و احتراق محاسبه گردیده است.

۵- بهینه‌سازی

۵-۱- توابع هدف

به منظور رسیدن به حالت بهینه پارامترهای تصمیم‌گیری سیستم و ایجاد مصالحه میان کارایی ترمودینامیکی از یک سو و صرفه‌جویی اقتصادی و زیست محیطی از سوی دیگر، در این مقاله از بهینه‌سازی چند هدفه استفاده می‌گردد. بنابراین تابع هدف اول بهینه‌سازی که باید ماکزیمم گردد بازده انرژی سیستم می‌باشد.

$$\text{Obj. Func. I} = \eta_{\text{ex,Plant}} = \frac{W_{\text{net,out}}}{m_{CH_4,in} e_{CH_4}} \quad (20)$$

تابع هدف دوم مجموع نرخ هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری سیستم، نرخ هزینه‌های بهره‌برداری (سوخت) به علاوه‌ی نرخ هزینه‌ی خارجی ناشی از انتشار گاز دی‌اکسیدکربن می‌باشد (که با ضرب هزینه جریمه واحد انتشار CO_2 در نرخ جرمی خروجی آن بدست می‌آید). میزان انتشار دی‌اکسید کربن با بازده سیستم ارتباط مستقیمی دارد و از این رو در نظر گرفتن این جمله در

جدول ۳- مقایسه نتایج مدلسازی

پارامتر	مقدار مدل	مرجع [۴]	درصد اختلاف
ولتاژ سلول (V)	۰/۷	۰/۷	۰
دمای عملکرد پیل سوختی (°C)	۹۹۳	۹۹۰	۰/۳
دمای ورودی توربین (°C)	۸۹۸	۹۰۰	۰/۲
توان خالص خروجی میکروتوربین (kW)	۴۶/۶۸	۵۳/۵	۱۴
توان خالص خروجی پیل سوختی (kW)	۲۲۶/۸۸	۲۰۹	۸
بازده حرارتی (%)	۶۲/۷	۶۴/۹	۳/۵

۷- نتایج و بحث

۷-۱- اعتبار سنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی، نتایج حاصل از مدلسازی این مقاله با نتایج سیستم هیبرید پیشنهادی در مرجع [۴] مقایسه و کالیبره گردید. نتایج حاصل از مدل ارائه شده در این تحقیق برای پارامتر های ورودی های یکسان، بسیار نزدیک به نتایج گزارش شده توسط مرجع [۴] می باشد چنانچه در جدول ۳ ملاحظه می گردد. اختلاف در توان خروجی میکروتوربین می تواند به دلیل در نظر گرفتن کار مصرفی کمپرسور سوخت در مدل باشد.

۷-۲- نتایج بهینه سازی

همانگونه که در بخش معرفی توابع هدف گفته شد، مسئله بهینه سازی در این تحقیق، بهینه سازی دو هدفه با هدف هم زمان بیشینه کردن بازده اگزرژی و کمینه کردن هزینه کل سیستم است. از آنجاکه این دو هدف با یکدیگر متضاد هستند و در خلاف جهت یکدیگر حرکت می کنند، مسئله دارای دسته ای از جواب های نزدیک به بهینه به ازای مقادیر مختلف متناظر هزینه و کارایی ترمودینامیکی می باشد. بدیهی است که با کاهش هر چه بیشتر نرخ انهدام اگزرژی، کارایی ترمودینامیکی و هزینه سرمایه گذاری سیستم، افزایش می یابد. مجموعه ای جواب های بهینه بدست آمده (نمودار پارتو) در شکل ۳ ملاحظه می گردد. در این شکل تغییر نرخ بازده اگزرژی (معیار فنی) در مقابل نرخ هزینه (معیار اقتصادی) سیستم، در قالب دلار بر ساعت ملاحظه می گردد.

باید گفت که تمام نقاط بدست آمده روی نمودار پارتو، نشان دهنده جواب های بهینه ای برای سیستم می باشند و انتخاب هریک از آنها، بستگی به میزان اهمیت اهداف هزینه و کارایی ترمودینامیکی برای طراح سیستم دارد. در این مقاله برای انتخاب یک نقطه ای مناسب از مجموعه ای جواب های نمودار پارتو، از روش نقطه تعادل استفاده شده است. این نقطه ای فرضی محل تقاطع حد بهینه هر یک از دو هدف را نشان می دهد [۲۵].

است، در قالب جعبه ابزار بهینه سازی نرم افزار MATLAB مورد استفاده قرار گرفته است [۲۰]. برای استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی، تعداد اعضای جمعیت ۱۵ برابر تعداد متغیرهای تصمیم گیری و معیار توقف، حداکثر نسل های متوالی در نظر گرفته شد. مقادیر پارامترهای انتخاب شده برای استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۱- قیدهای بهینه سازی [۱۵ - ۱۸]

توضیح	قید
محدودیت دمای ورودی به توربین در میکروتوربین ها	$T(\delta) < 1203 \text{ K}$
حداکثر دمای کارکرد پیل سوختی	$T_{cell} < 1500 \text{ K}$
حداکثر نسبت فشار برای کمپرسور سانتریفوژ تک مرحله ای	$CPR < 6$
حداقل نسبت کربن به بخار در ریفرمر	$S/C > 2$

۶- بررسی موردی

به منظور انجام بهینه سازی بر یک مورد خاص از سیستم هیبرید، طرح ارائه شده در مرجع [۴] مورد استفاده قرار گرفته است. در مرجع بیان شده این سیستم در بارهای کامل و جزئی مدلسازی و ارزیابی شده ولی بهینه نشده است. پارامترهای طراحی و اجزای این سیستم مشابه اولین طرح عملی ساخته شده از سیستم هیبرید توربین گاز- پیل سوختی می باشد [۲-۲۳]. این سیستم دارای توان خروجی ۲۶۰ کیلووات می باشد. به منظور انجام بهینه سازی یک مورد پایه، این سیستم هیبرید با توان خروجی ثابت در نظر گرفته می شود. در سیستم مورد بررسی مقدار نرخ جرمی جریان هوای ورودی معادل ۰/۵ کیلوگرم بر ثانیه، و نسبت فشار کمپرسور معادل ۳/۸ بوده است. مقدار چگالی جریان پیل سوختی برابر ۳۵۰۰ آمپر بر متر مربع و درصد مصرف سوخت برابر ۰/۸۰، همچنین نسبت کربن به بخار برابر ۱/۸ فرض می-گردد. سایر پارامترها در حالت پایه مشابه با مرجع ذکر شده در نظر گرفته شده اند. همچنین $CRF=18\%$ ، $\phi=1/0.8$ و $N=8000$ قرار داده شد.

جدول ۲- پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامتر	جدول ۲- پارامترهای الگوریتم ژنتیک
تعداد اعضای جمعیت	۱۲۰
حداکثر تعداد نسل های متوالی	۱۰۰
P_c احتمال تولید مثل	۰/۸
P_m احتمال جهش	۰/۰۱
روش انتخاب	Tournament

۷-۳- مقایسه اثر بهینه‌سازی بر عملکرد سیستم

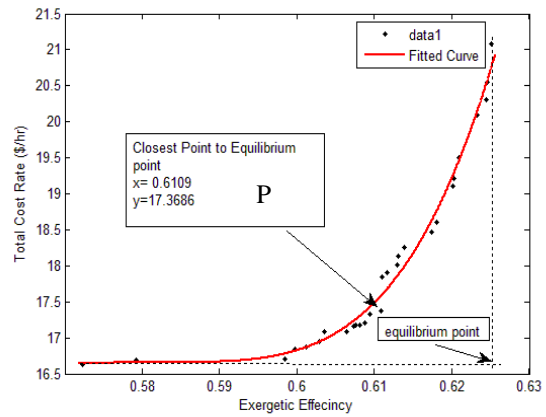
جدول ۴ مقادیر پارامترهای وابسته سیستم، شامل بازده انرژی، بازده قانون اول، نرخ هزینه کل سیستم و دی اکسید کربن تولیدی را برای حالت اولیه سیستم، و نتایج بدست آمده از بهینه سازی چند هدفه را مقایسه می‌کند.

جدول ۴- مقایسه حالت بهینه سیستم با حالت اولیه

پارامتر	حالت اولیه	حالت بهینه	درصد اختلاف
بازده انرژی (%)	۵۸/۰۵	۶۱/۰۹	۴/۹
بازده حرارتی (%)	۶۱/۵	۶۴	۳/۹
نرخ هزینه کل (\$/hr)	۱۷/۶۵	۱۷/۳۶	۱/۶
C_{env} (\$/hr)	۱/۹۷	۱/۹۲	۲/۵
T_{cell} (K)	۱۲۶۶	۱۲۱۹	۳/۷
TIT (K)	۱۱۷۱	۱۱۱۳	۵

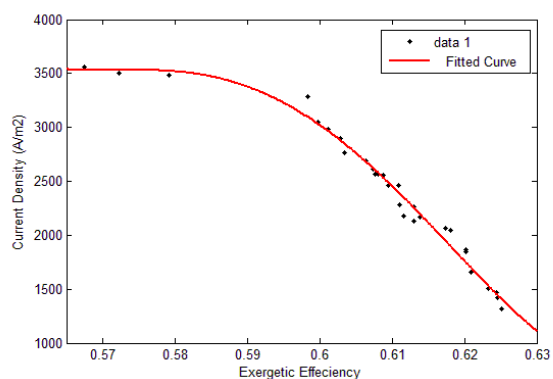
نتایج نشان داده شده در این جدول بر اساس نقطه P در شکل ۳ انتخاب شده‌اند که در بخش قبل معرفی گردید. همان‌گونه که از مقادیر جدول ملاحظه می‌گردد، بهینه‌سازی منجر به افزایش بازده انرژی به میزان ۴/۹ درصد و کاهش نرخ هزینه جریمه زیست محیطی به اندازه‌ی ۲/۵ درصد شده است. در حالیکه نرخ هزینه کل به میزان ۱/۶ درصد کاهش یافته است. بنابراین مشاهده می‌شود که حالت اولیه سیستم که در مرجع [۴] پیشنهاد شده است، نزدیک به حالت بهینه سیستم می‌باشد. در جدول ۵ مقادیر پارامترهای طراحی برای دو حالت اولیه و بهینه سیستم نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود بیشترین تغییرات در افزایش نسبت فشار، کاهش نرخ جرمی هوای ورودی و کاهش چگالی جریان پیل سوختی می‌باشد. از صورت معادله‌ی نرنست مشاهده می‌شود، افزایش فشار سیستم با کاهش بازگشت ناپذیری‌ها و افزایش بازده انرژی پیل سوختی ارتباط مستقیم دارد.

هم‌چنین افزایش نسبت فشار کمپرسور منجر به افزایش نسبت فشار توربین و کاهش دمای گازهای خروجی آن می‌گردد. در نتیجه کاهش دمای گازهای گرم ورودی به ریکوپراتور، دمای هوای ورودی به پیل سوختی، کاهش یافته و در نتیجه نیاز به هوای اضافه خنک‌کننده در پیل سوختی کاهش می‌یابد. مقدار بهینه چگالی جریان برای نقطه P انتخاب شده از مجموعه جواب‌ها در جدول مشاهده می‌شود. هم‌چنین مقدار نسبت کربن به بخار برای ریسیرکولاسیون آند (مقدار نسبت مولی بخار در جریان خروجی آند برگشت داده شده به نسبت کربن در سوخت) به ۲/۶۸ افزایش یافته است. برخی از پارامترهای مهم انرژی-اقتصادی سیستم در جدول ۶ آورده شده‌اند. همان‌گونه که از مقادیر این جدول ملاحظه می‌گردد به دلیل مقدار بالای چگالی



شکل ۳- نمودار توزیع جواب‌های بهینه‌سازی دو هدفه

نزدیک ترین نقطه روی نمودار پرتو به نقطه تعادل به عنوان بهینه‌ترین جواب انتخاب می‌گردد. که در شکل به عنوان نقطه P نشان داده شده است. در بررسی توزیع مقادیر پارامترهای طراحی در محدوده جواب‌های بدست آمده نمودار پرتو، ملاحظه می‌گردد که مقدار چگالی جریان پیل سوختی، بر میزان سهم هر یک از اهداف فنی و اقتصادی در جواب حکم می‌کند. سایر پارامترها با افزایش بازده، تقریباً در حد بهینه خود ثابت می‌باشند. این رفتار به دلیل آن است که هزینه پیل سوختی عمده‌ترین هزینه سیستم را تشکیل می‌دهد و این هزینه بر اساس سطح فعال سلول‌ها، که چگالی جریان تعیین کننده آن است، تعیین می‌گردد. از سوی دیگر می‌دانیم انهدام انرژی در پیل سوختی به طور مستقیم با چگالی جریان در ارتباط است. هم‌چنین بیشترین نرخ تبدیل انرژی در پیل سوختی رخ می‌دهد و با افزایش چگالی جریان، میزان انهدام انرژی و بازگشت ناپذیری سیستم افزایش می‌یابد. [۱۲]



شکل ۴- توزیع چگالی جریان در محدوده جواب‌های بدست آمده از نمودار پرتو

از این رو چگالی جریان پیل سوختی را می‌توان مهمترین پارامتر طراحی در این سیستم دانست که انتخاب مقدار بهینه آن در توازن بین هزینه و کارایی سیستم بسیار موثر خواهد بود. محدوده بهینه چگالی جریان در شکل ۴ در حدود ۳۵۰۰ - ۱۰۰۰ آمپر بر متر مربع ملاحظه می‌گردد.

حساسیت جواب‌ها به تغییرات قیمت سوخت، با حرکت به سمت راست نمودار، کاهش می‌یابد. در بازه های کم به دلیل سهم بیشتر تابع هدف اقتصادی نسبت به تابع هدف بازده انرژی، حساسیت به تغییرات قیمت سوخت واضح تر می باشد. همچنین قابل ذکر است که میزان مصرف سوخت با افزایش هزینه سرمایه گذاری و بازده سیستم، کاهش می‌یابد. همان گونه که در بخش نتایج بهینه سازی بیان گردید، در تغییرات تعادل میان تاثیر توابع هدف اقتصادی و بازده، چگالی جریان دستخوش بیشترین تغییر می‌گردد تا تعادل میان دو هدف فوق را به شکل بهتری حفظ نماید. بنابراین می‌توان گفت سایر پارامترها نسبت به تغییرات قیمت سوخت، دارای حساسیت واضحی نمی‌باشند. تغییرات نمودار پرتو با افزایش و کاهش هزینه‌های سرمایه گذاری و خرید اجزا در شکل ۵ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با تغییر زیاد هزینه‌های سرمایه گذاری، هزینه کل سیستم دچار تغییرات قابل توجهی می‌گردد.

با این حال برای بررسی حساسیت مقادیر بهینه پارامترهای طراحی به هزینه‌های سرمایه گذاری، تغییرات این پارامترها برای سه نقطه انتخاب شده از مجموعه جواب‌ها (نقاط A و B و C در شکل ۶) که دارای بازده انرژی تقریباً یکسان و نزدیک به نقطه تعادل هستند، در جدول ۶ بررسی شده است. ملاحظه می‌شود که اکثر پارامترهای طراحی به جز چگالی جریان پیل سوختی، با افزایش هزینه‌های سرمایه گذاری دچار تغییرات زیادی نمی‌شوند. چگالی جریان در میزان اثرگذاری توابع هدف، مهمترین پارامتر است. این پارامتر با افزایش هزینه سرمایه گذاری (افزایش تابع هدف اقتصادی) کاهش می‌یابد. بدین معنی که طراحی بهینه باید به سوی کارآمدی ترمودینامیکی بهتر تغییر یابد تا هزینه سوخت مصرفی کمتری هزینه گردد.

۷-۵- تغییر توان خروجی یا اندازه سیستم

به منظور بررسی اثر تغییرات اندازه یا توان تولیدی خروجی سیستم، بهینه سازی به طور مشابه برای سیستم‌هایی با توان تولیدی در محدوده ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلووات تکرار گردید. از هر مجموعه جواب‌های پرتو برای هر سایز سیستم، نقطه‌ی تعادل انتخاب گردید و نرخ هزینه کل بر حسب انهدام انرژی برای آن نقاط در شکل ۷ نشان داده شده است.

جریان حالت اولیه، بیشترین مقدار انهدام انرژی در پیل سوختی رخ می‌دهد.

پس از آن ناکارآمدترین جز سیستم، بخش احتراق است که به دلیل واکنش بازگشت‌ناپذیر در آن و همچنین ضریب کارایی پایین لوله‌های تزریق هوا در پیل سوختی، بیشترین سهم انهدام انرژی را در سیستم دارد. با کاهش چگالی جریان به میزان پیشنهاد شده در بهینه سازی، مقدار انهدام انرژی در پیل سوختی نیز کاهش پیدا کرده است. ضریب انرژی اقتصادی f ، پارامتر ترمودینامیکی مهمی است که نسبت سهم هزینه سرمایه گذاری کل به هزینه مصرفی در یک جز سیستم را نشان می‌دهد. مقادیر کم این متغیر در یک جز، نشان‌دهنده بالا بودن نرخ انهدام انرژی و لزوم توجه به کارایی ترمودینامیکی در آن جز می‌باشد. در مقابل بزرگ بودن این متغیر در یک جز، نشان‌دهنده بالا بودن سهم هزینه سرمایه گذاری، در کل هزینه‌های آن جز است. بدیهی است که محدوده‌ی قابل قبول برای ضریب انرژی اقتصادی f ، به شرایط و دیدگاه طراح بستگی دارد. همانگونه که از مقادیر جدول ملاحظه می‌گردد مقدار ضریب f برای بخش احتراق در هر دو حالت اولیه و بهینه بسیار کوچک است و این نشان‌دهنده بیشترین انهدام انرژی در این اجزا است. ضریب انرژی اقتصادی کل سیستم (f) با انجام بهینه سازی، به میزان ۱۳ درصد بهبود یافته است.

۷-۴- آنالیز حساسیت

به منظور داشتن دیدی جامع در بررسی مسئله حاضر، انجام حساسیت‌سنجی نتایج با تغییر برخی ثوابت و پارامترها، لازم می‌باشد. در اینجا آنالیز حساسیت نتایج نمودار پرتو با تغییر قیمت سوخت و نیز هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه انجام شده است. در شکل ۵، تغییرات نمودار پرتو با افزایش و کاهش قیمت واحد سوخت نشان داده شده است. بهینه سازی در حالت پایه قیمت واحد سوخت با $C_f = 0.04 \$/Mj$ و سپس با قیمت‌های واحد معادل $0.03 \$/Mj$ و $0.05 \$/Mj$ تکرار شده است. دیده می‌شود که با افزایش قیمت سوخت، محدوده جواب‌های بهینه سیستم به سوی کارآمدی ترمودینامیکی بهتر (افزایش بازده انرژی) رفته‌اند. این امر ناشی از افزایش تاثیر قیمت سوخت در تابع هدف و هزینه‌ی کل است. هم چنین دیده می‌شود که

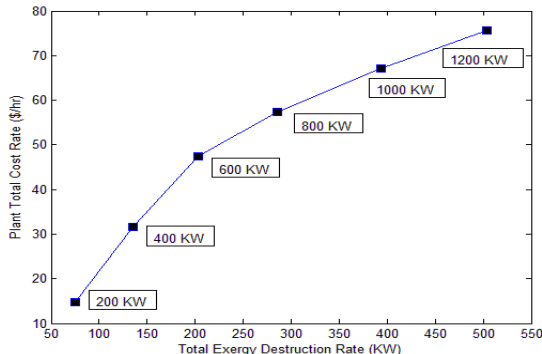
جدول ۵- پارامترهای انرژی - اقتصادی در حالت‌های بهینه و اولیه

$f=Z/(Z+C_D)$		$C_D (\$/hr)$		$E_D/E_{D, tot}(\%)$		$E_D (kW)$		Component
Opt	Initial	Opt	Initial	Opt	Initial	Opt	Initial	
0.72	0.67	0.26	0.36	10	13	11/1	16	AC
0.92	0.93	0.20	0.19	8/2	7/2	8/74	8/85	GT
0.92	0.89	0.45	0.50	35	42/6	36/72	51/23	SOFC
0.10	0.06	5/0	6/22	42/5	33	44/8	41/15	CC+AIP
0.43	0.45	0.09	0.11	3/7	4/2	3/97	5/22	REC
0.61	0.53	6/0	7/38	100	100	105/33	122/45	Total

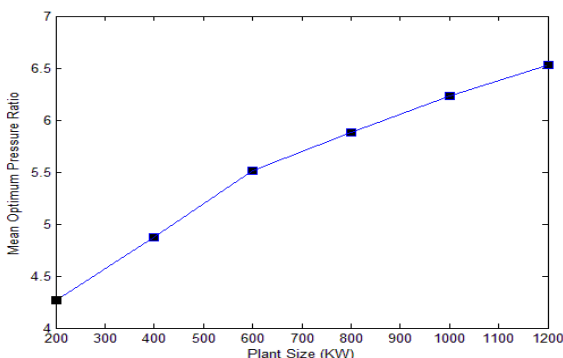
شد و نتایج بهینه‌سازی، شامل نقاطی با مقادیر متناظر بازده اگزرژی و هزینه کل سیستم بود. از بررسی نتایج بدست آمده دیده شد که از بین پارامترهای طراحی، چگالی جریان پیل سوختی دارای اهمیت ویژه‌ای بوده و در توازن میان هر یک از اهداف فنی و اقتصادی نقش مهمی ایفا می‌کند. همچنین این پارامتر نسبت به تغییرات هزینه‌های سوخت و سرمایه‌گذاری، حساس است. در صورتی که سایر پارامترها دچار تغییرات چندانی نمی‌شوند. در بررسی اندازه‌های مختلف توان خروجی سیستم، مشخص شد که نسبت فشار و نرخ جرمی هوای ورودی با افزایش سایز سیستم افزایش می‌یابند در حالی که سایر پارامترها، در مقادیر بهینه خود تقریباً ثابت می‌مانند.

جدول ۶- تغییرات پارامترهای طراحی در مقابل هزینه‌های سرمایه‌گذاری

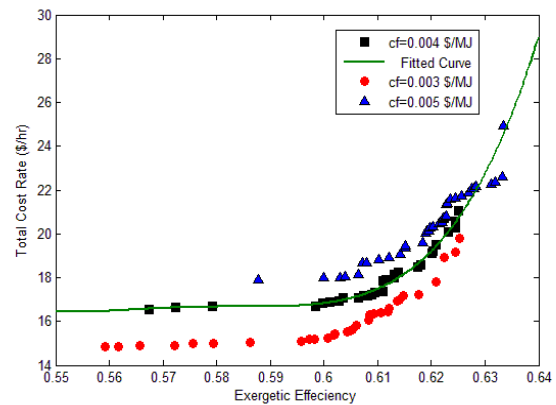
پارامتر	نقطه A	نقطه B	نقطه C
ACPR	۴/۵۵	۴/۵۵	۴/۴۶
η_{AC}	۰/۸۱	۰/۸۴	۰/۸۴
$m_{air,in}$ (kg/s)	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۳۷
η_{GT}	۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۷۹
S/C	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۸۰
ϵ_{rec}	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۸۴
$i(A/m^2)$	۲۷۹۲	۲۴۶۵	۱۹۹۶
U_f	۲/۴۲	۲/۸	۲/۷



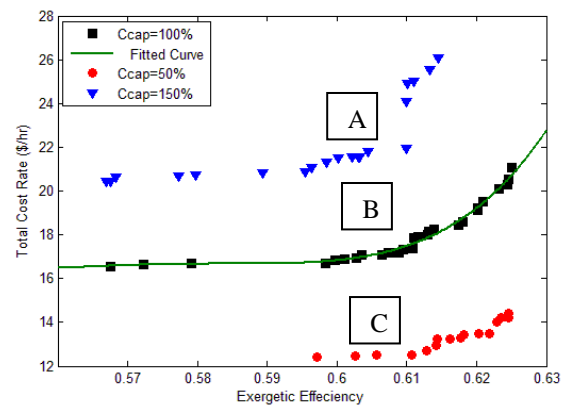
شکل ۷- تغییر مقادیر بهینه توابع هدف (نرخ هزینه کل و انهدام اگزرژی) با توان خروجی سیستم



شکل ۸- تغییر مقادیر بهینه نسبت فشار با توان خروجی سیستم



شکل ۵- نتایج حساسیت سنجی نسبت به تغییرات قیمت واحد سوخت



شکل ۶- نتایج حساسیت سنجی نسبت به تغییرات هزینه‌های سرمایه‌گذاری

ملاحظه می‌شود که با افزایش توان خروجی سیستم، نرخ افزایش قیمت به ازای هر کیلووات برق تولیدی کاهش می‌یابد. در مورد تغییرات پارامترهای طراحی با افزایش اندازه‌ی سیستم، ملاحظه گردید که اکثر آنها دارای تغییر نمی‌باشند و از این رو مقدار بهینه پارامترهای طراحی، به تغییر توان خروجی سیستم، حساس نیست. در مورد نرخ جرمی هوای ورودی با افزایش سایز سیستم، بدیهی است که نیاز به هوای خنک‌کننده و طبیعتاً اکسیژن، با افزایش سوخت ورودی، افزایش می‌یابد. همچنین حد بهینه نسبت فشار کمپرسور به دلیل افزایش نرخ جرمی جریان در میکروتوربین افزایش خواهد یافت. تغییرات مقادیر بهینه پارامترهای طراحی در نمودارهای شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است.

۸- نتیجه‌گیری

در این بررسی سیستم هیبرید میکروتوربین-پیل سوختی اکسید جامد شبیه‌سازی شد. و برای سیستم نمونه‌ای با توان‌های خروجی متفاوت با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه الگوریتم ژنتیک، مقادیر بهینه پارامترهای طراحی بدست آمد. دو تابع هدف، شامل بازده اگزرژی و هزینه کل سیستم بودند. همچنین هزینه ناشی از تخریب محیط زیست نیز به هزینه سیستم افزوده

[5] Costamagna P, Magistri L, Massardo AF (2001) Design and Part-Load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro gas turbine. *J Power Sources*. 96: 352-368.

[6] Chan SH, Khor KA, Xia ZT (2001) A complete polarization model if a solid oxide fuel cell and it's sensitivity to the change of cell component thickness. *J Power Sources*. 93:130-140.

[7] Chan SH, Ho HK, Tian Y (2002) Modelling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant. *J Power Sources*. 109: 111-120.

[8] Chan SH, Low CF, Ding OL (2002) Energy and exergy analysis of simple solid-oxide fuel-cell power systems. *J Power Sources*. 103: 188-200.

[9] Chan SH, Ho HK, Tian Y (2003) Multi-level modeling of SOFC-gas turbine hybrid system. *Int J Hydrogen Energy*. 28: 889-900.

[10] Chan S.H, Ho H.K, Tian Y (2003) Modeling for part-load operation of solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid power plant. *J Power Sources*. 114: 213-227.

[11] Massardo A.F, Magistri L, Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Combined Cycles (IRSOFC-GT): Part II-Exergy and Thermo-economic Analysis. *ASME 2001-GT-380*.

[12] Bavarsad PG (2007) Energy and exergy analysis of internal reforming solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system. *Int J Hydrogen Energy*. 32: 4591-4599.

[13] Calise F, Dentice d'Accadia M, Palombo A, Vanoli L (2006) Simulation and exergy analysis of a hybrid Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)-Gas Turbine System. *Energy*, 31: 3278-3299.

[14] Calise F, Palombo A, Vanoli L (2006) Design and partial load exergy analysis of hybrid SOFC-GT power plant. *J Power Sources*, 156: 225-244.

[15] Calise F, Dentice d'Accadia M, Palombo A, Vanoli L, von Spakovsky MR (2006) Single-level optimization of a hybrid SOFC-GT power plant. *J of Power Sources*. 159: 1169-1185.

[16] Calise F, Dentice d'Accadia M, Palombo A, Vanoli L, von Spakovsky MR (2007) Full load synthesis/design optimization of a hybrid SOFC-GT power plant. *Energy*, 32: 446-458.

[17] Autissier N, Palazzi F, Marechal F, Van Herle J, Favrat D (2007) Thermo-Economic Optimization of a Solid Oxide Fuel Cell. *Gas Turbine Hybrid System*, *ASME J. of Fuel cell science and technology*. 4: 123-129.

[18] Duan L, He B, Yang Y (2011) Parameter optimization study on SOFC-MGT hybrid power system. *Int J Energy Res*, Volume 35, Issue 8: 721-732.

[19] Holman J.P (2001) *Heat Transfe.9thed*, McGraw-Hill, New York.

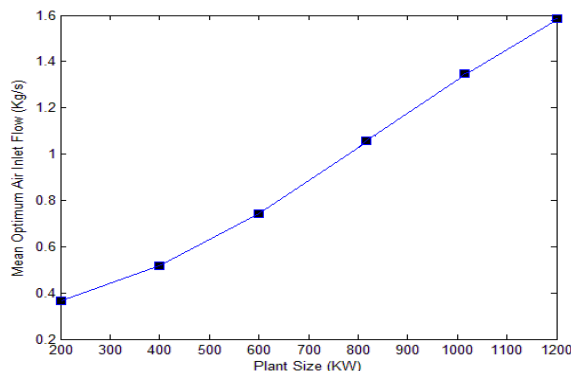
[20] Sanaye S, Hajabdollahi H (2010) Thermal-economic multi-objective optimization of plate fin heat exchanger using genetic algorithm. *Applied Energy*. 87:1893-1902.

[21] Sanaye S, Ghazinejad M (2007) Thermo-economic Optimization of Gas Turbine Combined Heat and Power System In a Paper Mill. *ASME GT-2007-27206*.

[22] Siemens-Westinghouse Power Corporation(2000) *Pressurized Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Power System*, Final Report, for US department of energy, February.

[23] Sanaye S, Dehghandokht M (2010) Modeling and multi-objective optimization of parallel flow condenser using evolutionary algorithm. *Appl Energy*, 88:1568-1577.

[24] Lazzaretto A, Toffolo A(2004) Energy, economy and environment as objectives in multi-criterion



شکل ۹- تغییر مقادیر بهینه نرخ جرمی هوای ورودی با افزایش توان خروجی سیستم

۹- فهرست علائم

\dot{C}	نرخ هزینه، (\$/s)
CPR	نسبت فشار کمپرسور
E	نرخ انرژی، (kW)
F	ثابت فاراده، (C/Kmol)
H	نرخ حرارتی، (kJ/s)
h	آنتالپی، (kJ/kg)
I	جریان، (A)
i	چگالی جریان، (A/m^2)
K_p	ثابت تعادل شیمیایی
m	دبی جرمی، (kg/s)
n	دبی مولی، (kmol/s)
P	فشار، (bar)
R	ثابت جهانی گازها، (kJ/ kmol K)
S/C	نسبت کربن به بخار
T	دما، (K)
TPR	نسبت فشار توربین
U_f	درصد مصرف سوخت
V	ولتاژ، (Volt)
W	توان، (kW)
ε	ضریب کارایی
η	راندمان آیزنتروپیک، تلفات الکتریکی

۱۰- مراجع

[1] Larminie J, Dicks A (2004) *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley, New York.

[2] Massardo AF, McDonald CF, Korakianitis T, Microturbine/Fuel-Cell Coupling For High-Efficiency Electrical Power Generation. *ASME 00-GT-175*.

[3] Massardo AF, Lubelli F Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Combined Cycles (IRSOFC-GT): Part A-Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis. *ASME 98-GT-577*.

[4] Campanari S, Full Load and Part-Load Performance Prediction for Integrated SOFC and Microturbine Systems. *ASME 99-GT-65*.

- optimization of thermal systems design. Energy, 29: 1139–1157.
- [25] BarzegarAvval H, Ahmadi P, Ghaffarizadeh AR, Saidi MH (2011) Thermo-economic-environmental multi-objective optimization of a gas turbine power plant with preheater using evolutionary algorithm, Int J Energ Res, Volume 35, Issue 5:389–403.

Archive of SID