

بررسی اثرات تغییر نسبت فشار کمپرسور بر روی عملکرد یک چرخه ترکیبی توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد

یعقوب ایرا^{۱*}، مجید قاسمی^۲، جاماسب پیرکندی^۳، کیانوش دولتی اصل^۴

تهران - دانشکده مکانیک - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(* نویسنده مخاطب yira@mail.kntu.ac.ir)

چکیده

هدف از ارائه این مقاله بررسی اثرات نسبت فشار کمپرسور بر روی پارامترهای عملکردی یک چرخه ترکیبی توربین گاز با پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای با بهسازی داخلی مستقیم می‌باشد. در این تحقیق از مدل صفر بعدی برای تحلیل عملکرد شیمیایی، ترمودینامیکی و حرارتی در پیل سوختی استفاده شده است. در این مقاله کلیه واکنش‌های الکتروشیمیایی و گرمایی در پیل سوختی اکسید جامد بررسی شده و سپس با نرم افزار مطلب به صورت همزمان حل گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که هر چه نسبت فشار کمپرسور بالا رود، دمای خروجی پیل سوختی کاهش یافته و ولتاژ خروجی از آن افزایش می‌یابد. از سوی دیگر افزایش نسبت فشار سبب می‌شود که کار خروجی در ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا کند. در پایان این تحقیق نسبت فشار بهینه کمپرسور برای ماکزیمم کار خالص و بازده حداکثری به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر بازده این چرخه حدود ۶۳ درصد می‌باشد، این در حالی است که بازده سیکل‌های توربین گاز ساده بدون بازیاب عموماً در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد و با بازیاب حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد-توربین گازی-سیکل ترکیبی-بازده

۱- مقدمه

با توجه به بحران انرژی در جهان و پایان پذیر بودن منابع انرژی سوخت‌های فسیلی و همچنین نیاز بشر به انرژی‌های پاک تحقیق و به کارگیری سیستم‌هایی که علاوه بر راندمان بالا، آلاینده‌گی کمتری نیز داشته باشد، ضرورت دارد. یکی از سیستم‌های نوین جهت تولید انرژی پیل‌های سوختی می‌باشند که آلاینده‌گی بسیار ناچیز و راندمان نسبتاً بالایی دارند. پیل سوختی دستگاهی الکتروشیمیایی می‌باشد که انرژی شیمیایی حاصل از یک واکنش شیمیایی را به انرژی الکتریکی مفید تبدیل می‌کند. تبدیل انرژی در پیل سوختی تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی است. امروزه به منظور دستیابی به راندمان بالاتر و تولید انرژی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

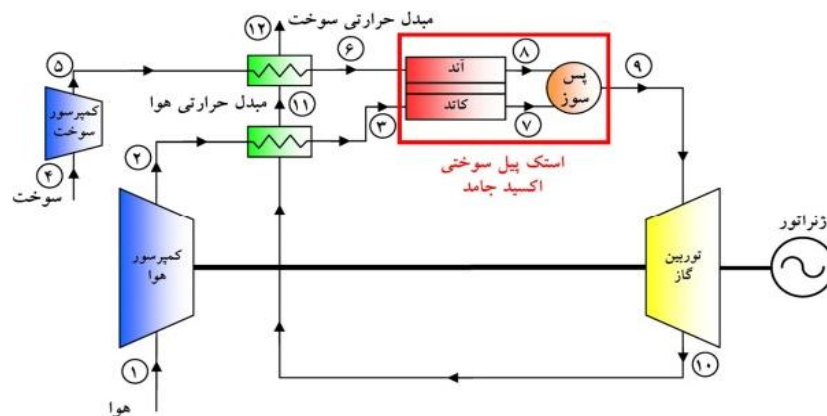
بیشتر، پیل‌های سوختی را با سیستم‌های تولید انرژی سنتی از قبیل سیکل توربین گاز، سیکل توربین بخار، سیکل توربین‌های بادی و همچنین با سیستم‌های فتوولتائیک ترکیب می‌کنند [۱]. از بین انواع پیل‌های موجود پیل سوختی اکسید جامد دارای اجزا جامد می‌باشد و به همین دلیل دمای عملکردی نسبتاً بالا و در حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد دارد. همچنین در این نوع پیل سوختی انواع مختلفی از سوخت قابل استفاده می‌باشد، زیرا با وجود دمای عملکرد بالا نیازی به مبدل سوخت نبوده و تمامی واکنش‌ها در خود پیل سوختی قابل انجام می‌باشد. این ویژگی‌های پیل سوختی اکسید جامد آن را برای ترکیب با سیکل توربین گاز مناسب می‌کند.

در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ پالسون و سلیموویچبا استفاده از نرم افزار اسپن یک سیستم ترکیبی ۵۰۰ کیلوواتی را بررسی کرده و تاثیر فشار بر کارایی سیکل و پیل سوختی را بررسی کردند [۲ و ۱]. در سال ۲۰۰۱ چان و همکاران یک نیروگاه ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز را از نظر تاثیر دبی سوخت و فشار بر روی عملکرد چرخه بررسی کردند [۳]. حاصلی و همکاران در سال ۲۰۰۸ یک سیکل توربین گاز که با پیل سوختی اکسید جامد ترکیب شده بود را به صورت صفر بعدی و از نظر ترمودینامیکی تحلیل کردند [۴]. تحقیقات مشابهی توسط کلایس و همکاران [۵]، ماساردوولویبی [۶]، شیرازی و همکاران [۷]، لای و همکاران [۸]، اوچی و همکاران [۹] و کوماتسو و همکاران [۱۰] صورت گرفته است. پیرکندی و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک سیستم تولید همزمان هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد را از نظر تاثیر دما و فشار کاری پیل بر روی عملکرد سیستم بررسی کردند [۱].

هدف از ارائه این مقاله بررسی اثر تغییرات نسبت فشار کمپرسور بر پارامترهای عملکردی یک چرخه ترکیبی توربین گاز با پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای با بهسازی داخلی مستقیم می‌باشد. در این سیستم کلیه واکنش‌های الکتروشیمیایی، حرارتی و ترمودینامیکی با استفاده از نرم مطلب شبیه سازی شده است. در این مقاله با تغییر نسبت فشار کمپرسور تغییرات دمای خروجی پیل سوختی، کار خروجی توربین و پیل سوختی، کار مصرفی کمپرسورهای هوا و سوخت و همچنین بازده سیکل بررسی شده و نسبت فشار بهینه کمپرسور به دست خواهد آمد.

۲- پیکربندی سیستم

سیستم بررسی شده در این مقاله در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیکل دارای کمپرسور هوا، کمپرسور سوخت، دو بازیاب حرارتی، توربین گاز، استک پیل سوختی اکسید جامد با فرمینگ داخلی مستقیم و یک پس سوز می‌باشد.



شکل ۱- شماتیک چرخه مدل شده [۱]

در این سیکل هوا و سوخت از دو کمپرسور جداگانه وارد سیکل خواهند شد و پس از عبور از بازیاب‌ها به ترتیب وارد کاتد و آند پیل سوختی شده و پس از انجام فعل و انفعالات شیمیایی و تولید گرما و کار وارد پس‌سوز می‌گردند. در محفظه پس‌سوز گازهای خروجی با انجام عمل احتراق و با دمای بالا وارد توربین گاز می‌شوند. پس از تولید کار در توربین قدرت گازهای خروجی از آن به دلیل بالا بودن انرژی در ادامه مسیر برای پیش‌گرم کردن هوا و سوخت ورودی به پیل وارد دو بازیاب حرارتی دیگر خواهند شد.

۳- فرضیات

در این سیکل هوا و سوخت ورودی به صورت گازهای کامل با ظرفیت گرمایی ویژه ثابت فرض شده‌اند. همچنین از اتلافات گرمایی در کمپرسور، توربین، بازیاب‌ها و همچنین پس‌سوز صرف نظر شده است. از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در کلیه ماشین‌های دوار صرف نظر شده است. سوخت ورودی به سیکل دارای متان خواهد بود و واکنش‌های بهسازی و دگرگونی به صورت تعادلی انجام می‌شود. دمای خروجی آند و کاتد یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین واکنش احتراق در پس‌سوز به صورت احتراق کامل فرض می‌شود.

۴- روابط حاکم بر مساله

در این مقاله کلیه روابط ذکر شده در این قسمت توسط نرم‌افزار مطلب کد نویسی شده و حل گردیده است. کلیه واکنش‌های الکتروشیمیایی، ترمودینامیکی و حرارتی در پیل سوختی به صورت هم‌زمان توسط این نرم‌افزار حل شده است.

۱-۴- مدل سازی کمپرسور

هوا و سوخت در دما و فشار معین به ترتیب وارد کمپرسور هوا و سوخت می‌شوند. دمای خروجی از کمپرسور هوا با توجه به شکل (۱) از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{2s} = T_1 (r_p)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1)$$

$$y_c = \frac{T_1 - T_{2s}}{T_1 - T_2} \quad (2)$$

در روابط بالا r_p نسبت فشار کمپرسور، γ نسبت ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت به حجم ثابت، y_c بازده آیزنتروپیک کمپرسور و زیر نویس s نشانگر آنتروپی ثابت می‌باشد. کار مصرفی کمپرسور از رابطه (۳) حاصل می‌شود:

$$W_{c,air} = \dot{n} C_p (T_2 - T_1) \quad (3)$$

در رابطه فوق \dot{n} دبی مولی هوا، C_p ظرفیت گرمایی ویژه هوا در فشار ثابت و $W_{c,air}$ کار مصرفی کمپرسور هوا می‌باشد. روابط بالا برای بدست آوردن کار مصرفی کمپرسور سوخت نیز صادق می‌باشد.

۲-۴- مدل سازی بازیاب‌های حرارتی

بازیاب‌های حرارتی در این مقاله همانند یک مبدل حرارتی با جریان‌های ناهمسو مدل سازی شده‌اند. ضریب تاثیر این بازیاب‌ها با توجه به شکل (۲) به صورت زیر می‌باشد [۱۱].



شکل ۲- آرایش جریان در بازتاب

$$V = \frac{T_y - T_x}{T_z - T_x} \quad (4)$$

با تعادل حرارتی سیال گرم و سرد، T_w نیز به دست می آید.

$$n_x C_{px} (T_y - T_x) = n_w C_{pw} (T_z - T_w) \quad (5)$$

۳-۴- مدل سازی پیل سوختی اکسید جامد

مدل سازی پیل سوختی اکسید جامد در سه بخش بقای جرم، مدل سازی الکتروشیمیایی و حرارتی انجام می شود.

۱-۳-۴- بقای جرم

سوخت ورودی به سیکل دارای مخلوطی از گازها با نسبت مختلف می باشد. با توجه به دمای کاری بالای پیل سوختی اکسید جامد از یک بهبود دهنده داخلی مستقیم جهت تبدیل سوخت های هیدروکربنی به هیدروژن استفاده شده است. واکنش های زیر در پیل سوختی صورت می گیرد:



جهت بدست آوردن درصد هر کدام از اجزا سوخت و هوا در خروجی پیل از ثابت تعادل با فرمول زیر استفاده شده است [۳].

$$\log K_p = AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT + E \quad (9)$$

در رابطه فوق K_p ثابت تعادل و T دمای گازهای خروجی از پیل می باشد. مقادیر ثابت های A تا E از مرجع [۳] بدست آمده است.

در واکنش های بالا x, y, z مقدار نرخ پیشرفت واکنش های بهسازی، دگرگونی و کلی پیل می باشند. با موازنه جرمی واکنش های (۶) تا (۸) در خروجی پیل سوختی مقدار نرخ مولی هر جز طبق رابطه زیر حاصل می شود:

$$\begin{aligned}
 [\dot{n}_{CH_4}]_{out} &= [\dot{n}_{CH_4}]_{in} - x \\
 [\dot{n}_{H_2O}]_{out} &= [\dot{n}_{H_2O}]_{in} - x - y + z \\
 [\dot{n}_{H_2}]_{out} &= [\dot{n}_{H_2}]_{in} + 3x + y - z \\
 [\dot{n}_{CO}]_{out} &= [\dot{n}_{CO}]_{in} + x - y \\
 [\dot{n}_{CO_2}]_{out} &= [\dot{n}_{CO_2}]_{in} + y \\
 [\dot{n}_{O_2}]_{out} &= [\dot{n}_{O_2}]_{in} - \frac{z}{2} \\
 [\dot{n}_{tot}]_{out} &= [\dot{n}_{tot}]_{in} + 2x
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

که \dot{n}_{tot} مجموع مول‌های سوخت و زیر نویس in و out نشانه ورودی و خروجی به پیل سوختی می‌باشد. از طرفی برای هر واکنش تعادلی $aA + bB \Leftrightarrow cC + dD$ رابطه زیر برقرار می‌باشد [۱۲]:

$$K_p = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \left(\frac{P}{N_{tot}} \right)^{c+d-a-b}
 \tag{11}$$

در رابطه بالا P فشار واکنش و N_{tot} مجموع تعداد مول‌های اجزا می‌باشد. بنابراین برای واکنش‌های بهسازی و دگرگونی ثابت تعادل با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود [۳]:

$$K_{p,r} = \frac{[\dot{n}_{H_2}]_{out} \cdot [\dot{n}_{CO}]_{out}}{[\dot{n}_{CH_4}]_{out} \cdot [\dot{n}_{H_2O}]_{out}} \left(\frac{P_{cell}}{[\dot{n}_{tot}]_{out}} \right)^2
 \tag{12}$$

$$K_{p,s} = \frac{[\dot{n}_{CO_2}]_{out} \cdot [\dot{n}_{H_2}]_{out}}{[\dot{n}_{CO}]_{out} \cdot [\dot{n}_{H_2O}]_{in}}
 \tag{13}$$

همچنین با توجه به مرجع [۳] رابطه زیر برقرار می‌باشد.

$$z = U_f \times (3x + y)
 \tag{14}$$

U_f ضریب مصرف سوخت می‌باشد. با استفاده از روابط (۹) تا (۱۴) مقادیر هر جز در خروجی پیل سوختی محاسبه می‌شود.

۲-۳-۴- مدل سازی الکتروشیمیایی

در هر پیل سوختی ولتاژ ایده‌آل از رابطه نرنست بدست می‌آید [۱۳]:

$$V_n = \frac{-\Delta \bar{G}_f^o}{2F} + \frac{\bar{R}T}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right)
 \tag{15}$$

در رابطه بالا \bar{G}_f^o انرژی آزاد گیبس تشکیل واکنش در حالت فشار استاندارد، \bar{R} ثابت جهانی گازها، P فشار هر جز، T دمای استک پیل سوختی و F ثابت فارادی می‌باشد.

اما پیل سوختی در حالت واقعی دارای افت ولتاژهایی جهت فعال‌سازی کاتد و آند V_{act} ، مقاومت ناشی از حرکت الکترون‌ها V_{ohmic} و همچنین افت ناشی از غلظت در چگالی اجزا V_{conc} می‌باشد [۱۳]. مقدار این افت‌ها توسط روابط جامع تجربی ارائه شده در مراجع [۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶] محاسبه می‌شوند. پس ولتاژ پیل سوختی طبق رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$V_{cell} = V_n - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc}
 \tag{16}$$

جریان کلی پیل I و کار خروجی آن W_{FC} از روابط زیر به دست می‌آید [۱۳].

$$I = 2Fz \quad (۱۷)$$

$$W_{FC} = IV_{cell} \quad (۱۸)$$

۳-۳-۴-مدل سازی حرارتی

انرژی گرمایی که توسط استک پیل سوختی تولید می‌شود، ناشی از برگشت ناپذیری‌های موجود در پیل، افت ولتاژها و گرمای تولیدی ناشی از واکنش دگرگونی می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید [۷].

$$\dot{Q}_{gen} = IV_{loss} + T\Delta s + \dot{Q}_s \quad (۱۹)$$

$$V_{loss} = V_{act} + V_{ohmic} + V_{conc} \quad (۲۰)$$

$$\Delta s = (s_{H_2O}^o - s_{H_2}^o - 0.5s_{O_2}^o) + \bar{R} \ln\left(\frac{P_{H_2}P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right) \quad (۲۱)$$

$$\dot{Q}_s = y(\bar{h}_{CO_2} + \bar{h}_{H_2} - \bar{h}_{CO} - \bar{h}_{H_2O}) \quad (۲۲)$$

در روابط بالا s نشانه آنترپی در شرایط استاندارد، \bar{h} نشانه آنتالپی و \dot{Q}_s گرمای آزاد شده در واکنش دگرگونی می‌باشد. گرمای مصرفی جهت انجام واکنش بهسازی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\dot{Q}_r = y(\bar{h}_{CO} + 3\bar{h}_{H_2} - \bar{h}_{CH_4} - \bar{h}_{H_2O}) \quad (۲۳)$$

بخشی از گرمای تولید شده در پیل سوختی صرف انجام واکنش بهسازی شده و بخشی نیز صرف افزایش دمای گازها در ورودی و خروجی پیل خواهد شد. مقدار گرمای مصرفی جهت افزایش دمای گازها از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳].

$$\dot{Q} = \Delta h_{c1} + \Delta h_{c2} + \Delta h_{a1} + \Delta h_{a2} \quad (۲۴)$$

در رابطه بالا Δh_{c1} و Δh_{c2} تغییرات آنتالپی گازها در ورودی و خروجی کاتد و Δh_{a1} و Δh_{a2} تغییرات آنتالپی گازها در ورودی و خروجی آنند می‌باشد. از آنجایی که در این مقاله فرض شده است که اتلاف گرمایی از پیل سوختی وجود ندارد لذا با استفاده از تعادل گرمایی می‌بایست گرمای تولیدی و مصرفی پیل برابر باشند. با استفاده از سعی و خطا دمای خروجی پیل آنقدر عوض می‌شود تا مقدار گرمای تولیدی و مصرفی برابر گردد. به این صورت دمای خروجی کاتد و آنند که طبق فرض یکسان در نظر گرفته شده است، محاسبه خواهد شد.

۴-۴-مدل سازی پس سوز

هوای اضافی و سوخت خروجی از پیل سوختی وارد یک محفظه احتراق شده و در آنجا به صورت آدیاباتیک واکنش می‌دهند. ترکیب اجزا خروجی پیل در قسمت مدل سازی اجزا بدست آمده است. در این بخش احتراق به صورت کامل فرض می‌شود و برای محاسبه دمای خروجی محفظه احتراق آنتالپی واکنش دهنده‌ها و محصولات برابر قرار داده می‌شوند.

۵-۴- مدل سازی توربین

محصولات ناشی از احتراق در پس سوز با دمای بسیار بالا وارد توربین می شوند و در آنجا با به حرکت در آوردن پره های توربین سبب تولید کار خواهند شد. با فرض بازده آیزنتروپیک توربین مقدار دما و فشار خروجی و کار تولیدی با توجه به شماره گذاری شکل (۱) از روابط زیر محاسبه خواهد شد [۱۲]. در روابط زیر y_t بازده آیزنتروپیک توربین گاز، x_g نسبت ظرفیت گرمایی ویژه گاز ورودی توربین در فشار ثابت به حجم ثابت، $C_{p,g}$ ظرفیت گرمایی ویژه گازهای ورودی به توربین و W_t کار تولیدی توربین گاز می باشد.

$$y_t = \frac{T_9 - T_{10}}{T_9 - T_{10s}} \quad (25)$$

$$T_{10s} = T_9 \left(\frac{P_{10}}{P_9} \right)^{\frac{x_g - 1}{x_g}} \quad (26)$$

$$W_t = \dot{n}_9 C_{p,g} (T_9 - T_{10}) \quad (27)$$

۶-۴- مدل سازی سیکل

کار خالص تولیدی سیکل برابر مجموع کار تولیدی توربین و پیل سوختی می باشد. با توجه به اینکه کمپرسورهای هوا و سوخت بخشی از کار تولیدی را مصرف خواهند نمود، بنابراین کار خالص خروجی پیل و بازده آن از روابط زیر محاسبه می شوند. در روابط آورده شده W_{net} کار خالص خروجی چرخه، $W_{c,fuel}$ کار مصرفی کمپرسور سوخت، LHV ارزش حرارتی پایین سوخت و y بازده الکتریکی چرخه می باشد.

$$W_{net} = W_{FC} + W_t - W_{c,air} - W_{c,fuel} \quad (28)$$

$$y = \frac{W_{net}}{\dot{m}_{fuel} \cdot LHV} \quad (29)$$

۵- مطالعه نمونه

برای مدل سازی یک سیکل توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد پارامترهای عملکردی جدول (۱) در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای ورودی

۲	درصد افت فشار پیل سوختی	۰.۸۵	بازده آیزنتروپیک کمپرسور
۶۰۰۰۰	تعداد پیل سوختی در استک	۰.۸	ضریب تاثیر بازیاب
۳۰۰	دمای ورودی هوا (کلوین)	۱	درصد افت فشار در بازیاب
۱	فشار ورودی هوا (بار)	۰.۸۵	بازده آیزنتروپیک توربین
۳۰۰	دمای ورودی سوخت (کلوین)	۵۰	طول پیل سوختی اکسید جامد (سانتی متر)
۱	فشار ورودی سوخت (بار)	۲۷۰	مساحت سطح پیل سوختی (سانتی متر مربع)
۷۰۰۰۰۰	ارزش حرارتی پایین سوخت (کیلوژول بر کیلو مول)	۳۵۰	چگالی جریان حدی (میلی آمپر بر سانتی متر مربع)

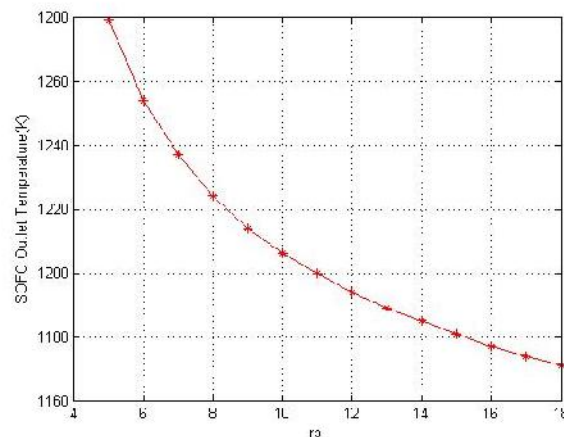
ترکیب هوا و سوخت ورودی به سیستم نیز مطابق جدول (۲) در نظر گرفته شده است. نسبت فشار هر دو کمپرسور برابر و دبی سوخت و هوای ورودی به سیستم به ترتیب برابر ۱۷۰ و ۱۵ کیلو مول بر ساعت و ضریب مصرف سوخت ۰.۸ فرض شده است.

جدول ۲- ترکیب هوا و سوخت ورودی به چرخه

اجزا (درصد)	نیتروژن	اکسیژن	متان	کربن دی اکسید
هوا	۷۹	۲۱	-	-
سوخت	۱.۵	-	۹۷	۱.۵

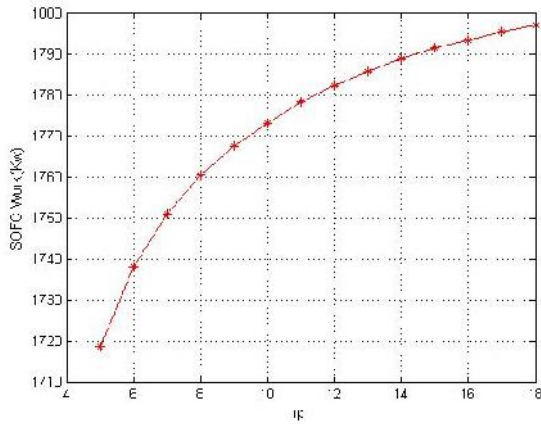
۶- نتایج

در این تحقیق نسبت فشار کاری کمپرسور به عنوان یک پارامتر مهم در تحلیل سیستم در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، ملاحظه می‌گردد که با افزایش نسبت فشار کمپرسور دمای خروجی پیل سوختی کاهش می‌یابد. این نتیجه به دلیل کاهش فشار گازهای خروجی از توربین بوده و این مساله به نوبه خود سبب کاهش دمای گازهای خروجی از آن نیز می‌گردد. کاهش دمای گازهای خروجی از توربین در ادامه سبب کاهش دمای کاری پیل می‌گردد. این مساله در شکل (۳) به وضوح دیده می‌شود.

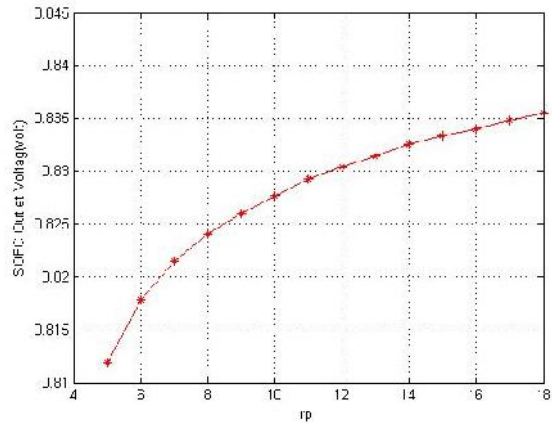


شکل ۳- نسبت فشار کمپرسور بر حسب دمای خروجی پیل سوختی

در شکل (۴) ملاحظه می‌شود که ولتاژ تولیدی پیل سوختی با افزایش نسبت فشار کمپرسور افزایش می‌یابد. در شکل (۳) مشاهده شد که دمای پیل با افزایش فشار کاهش می‌یابد، اما از آن جایی که ولتاژ نرنست با کاهش دما افزایش می‌یابد [۱۳] پس ولتاژ V_n افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با کاهش دمای پیل سوختی ولتاژ تلف شده نیز افزایش می‌یابد، اما نتایج نشان می‌دهد که در این مدل، میزان افزایش ولتاژ ایده آل نرنست با کاهش دمای پیل بیشتر از افزایش ولتاژهای اتلافی است. بنابراین مطابق رابطه ۱۶ ولتاژ سل افزایش یافته است و به تبع آن مطابق رابطه ۱۸ کار تولیدی پیل افزایش می‌یابد. افزایش کار تولیدی پیل سوختی در شکل (۵) نشان داده شده است.

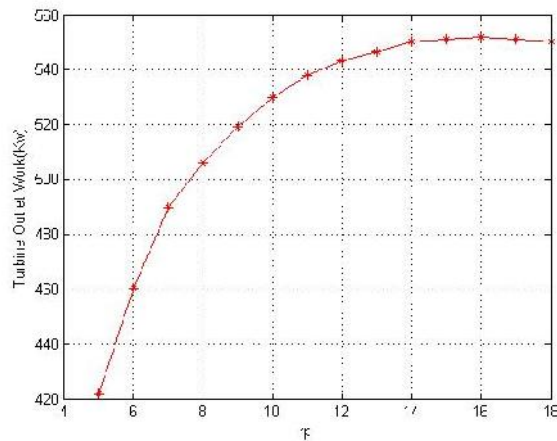


شکل ۵- نسبت فشار کمپرسور بر حسب کار تولیدی پیل



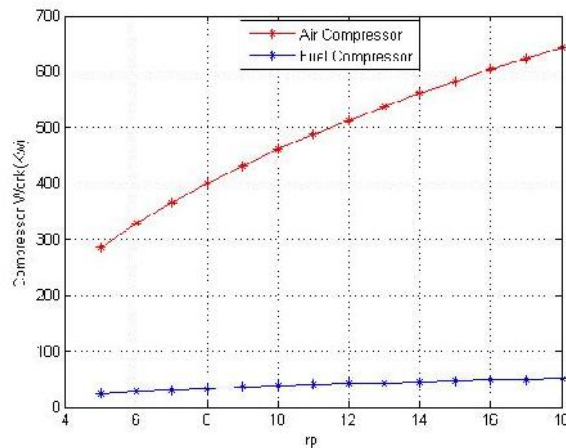
شکل ۴- نسبت فشار کمپرسور بر حسب ولتاژ خروجی پیل

در شکل (۶) میزان تغییرات کار تولیدی توربین نسبت به نسبت فشار کمپرسور نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۳) ملاحظه شد، با افزایش نسبت فشار کمپرسور دمای خروجی پیل سوختی کاهش می یابد. دلیل این مساله همانطور که گفته شد کاهش دمای گازهای خروجی از توربین می باشد. با توجه به این مساله و کاهش دمای کاری پیل، گازهای ورودی به توربین نیز با افزایش نسبت فشار دمای پایین تری را خواهند داشت. از سوی دیگر دمای خروجی توربین گاز نیز مطابق رابطه (۲۶) به نسبت فشار و دمای ورودی توربین بستگی دارد، از آن جایی که فشار خروجی توربین P_{10} نزدیک به فشار اتمسفر می باشد و محدوده تغییرات کمی دارد، ترم $(\frac{P_{10}}{P_9})$ با افزایش فشار P_9 شیب نزولی خود را از دست داده و اختلاف دمای ورودی و خروجی توربین طبق رابطه (۲۶) کاهش خواهد یافت و در نتیجه کار تولیدی توربین کاهش می یابد. در این مدل این اتفاق در نسبت فشار حدود ۱۶ رخ داده است.



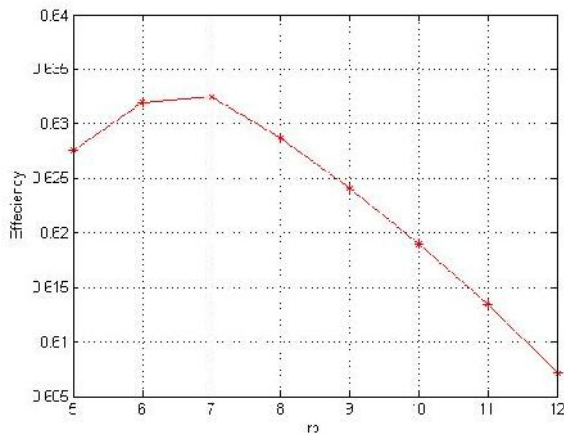
شکل ۶- نسبت فشار کمپرسور بر حسب کار تولیدی توربین گاز

در حالی که کار تولیدی پیل سوختی و توربین با فشار افزایش یافته است، اما همزمان کار مصرفی کمپرسورها همانطور که در شکل (۷) ملاحظه می شود نیز افزایش می یابد.

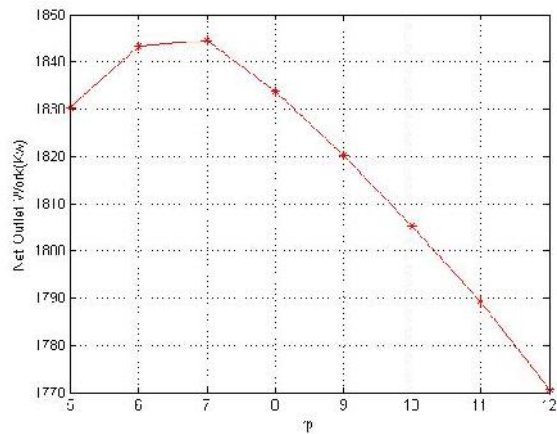


شکل ۷- نسبت فشار کمپرسور بر حسب کار مصرفی کمپرسورهای هوا و سوخت

پس در یک نسبت فشار باید کار خالص خروجی ماکزیمم وجود داشته باشد. شکل (۸) نشان می دهد که سیکل در نسبت فشار ۷ دارای حداکثر کار خالص خروجی می باشد. تغییرات بازده با فشار نیز مانند شکل (۹) می باشد. ملاحظه می گردد که حداکثر بازده سیکل حدود ۶۳ درصد می باشد، این در حالی است که بازده سیکل های توربین گاز ساده بدون بازیاب عموماً در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد می باشد.



شکل ۹- نسبت فشار کمپرسور بر حسب بازده چرخه



شکل ۸- نسبت فشار کمپرسور بر حسب کار خالص خروجی چرخه

در نسبت فشار بهینه هفت، نتایج مربوط به عملکرد سیستم مطابق جدول (۳) می باشد.

جدول ۳- خروجی مدل در نسبت فشار بهینه ۷

۰.۸۲۱۶	ولتاژ خروجی پیل سوختی (ولت)
۱۸۴۴.۶	کار خالص خروجی چرخه (کیلو وات)
۱۲۷۳	دمای خروجی استک پیل سوختی (کلوین)
۱۵۸۳	دمای ورودی توربین گاز (کلوین)
۰.۶۳۲۴	بازده چرخه (بازده)

۷- نتیجه گیری

با مدل سازی صورت گرفته در این مقاله نشان داده شد که:

- با تعویض محفظه احتراق با یک پیل سوختی اکسید جامد با بهسازی داخلی بازده سیکل حدود ۳۰ درصد افزایش می یابد.
- با افزایش نسبت فشار کمپرسور دمای خروجی پیل سوختی و به تبع آن دمای ورودی به توربین گاز کاهش می یابد.
- با توجه به تغییرات کار تولیدی پیل سوختی و توربین گاز و کار مصرفی کمپرسور این نتیجه گرفته شد، که سیکل ترکیبی توربین گاز و پیل سوختی در یک نسبت فشار خاص دارای بالاترین کار خروجی و بازده می باشد.
- کار خالص خروجی این سیکل نسبت به کار خروجی سیکل توربین گاز به اندازه کار تولیدی پیل سوختی بیشتر خواهد بود.
- در این چرخه حدود ۷۸ درصد از کار تولیدی مربوط به پیل سوختی و ۲۲ درصد مربوط به توربین گاز می باشد.

مراجع

- پیرکندی، ج.، قاسمی، م.، و حامدی، م.ح.، تحلیل عملکرد ترمودینامیکی یک چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی در یک سیستم تولید همزمان، نشریه علمی-پژوهشی سوخت و احتراق، سال چهارم، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۰.
- 2- A. Selimovic, "Modeling of Solid Oxide Fuel Cells Applied to the Analysis of Integrated Systems with Gas Turbines," Ph.D. Thesis, Department of Heat and Power Engineering, Lund University of Sweden, 2002.
- 3- S. H. Chan, H. K. Ho and Y. Tian, "Modelling of Simple Hybrid Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Power Plant," Journal of Power Sources, 109, No. 1, pp. 111-120, 2002.
- 4- Y. Haseli, I. Dincer and G. F. Naterer, "Thermodynamic Modeling of a Gas Turbine Cycle Combined with a Solid Oxide Fuel Cell," Journal of Hydrogen energy, 33, 2008, pp. 5811-5822.
- 5- F. Calise, et al., "Simulation and exergy analysis of a hybrid solid oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine system," Journal of energy, 31, 2006, pp. 3278-3299.
- 6- A. F. Massardo and F. Lubelli, "Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Combined Cycles (IRSOFC-GT): Part I-Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 122, 2000, pp. 27-35
- 7- A. Shirazi et al., "Thermaleconomic environmental analysis and multi-objective optimization of an internal-reforming solid oxide fuel cell gas turbine hybrid system," Journal of Hydrogen energy, 33, 2012, pp. 5811-5822.
- 8- W. H. Lai and et al., "Experimental Simulation on the Integration of Solid Oxide Fuel Cell and Micro-Turbine Generation System," Journal of Power Sources, 171, 2007, pp. 130-139.
- 9- H. Uechi, S. Kimijima and N. Kasagi, "Cycle Analysis of Gas Turbine-Fuel Cell Cycle Hybrid micro Generation System," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 126, 2004, pp. 755-762.
- 10- Y. Komatsu and S. Kimijima, "Performance Analysis for the Part-Load Operation of a Solid Oxide Fuel Cell-Micro Gas Turbine Hybrid System," Journal of energy, 35, 2010, pp. 982-988.
- 11- Ramesh K. Shah, Dušan P. Sekuli, *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, John Wiley & Sons, 2003
- 12- Yunus. A. Cengel, Michael. A. Boles, *Thermodynamics An Engineering Approach*, Fifth Edition, McGraw Hill, 2005.
- 13- M. C. Williams, *Fuel cell handbook*, EG&G Technical Services, Inc., West Virginia, 2004.
- 14- S.H Chan, C.F Low, O.L Ding. "Energy and exergy analysis of simple solid-oxide fuel-cell power systems," Journal Power Sources, 103, pp. 188-200, 2002.



پنجمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - بهمن ماه ۱۳۹۲



15- S.H Chan, K.A Khor, Z.T Xia. "A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness," Journal of Power Sources, 93,pp,130-140, 2001.

16- M. Ni, D.Y.C Leung, M.K.H Leung, "Electrochemical modeling and parametric study of methane fed solid oxide fuel cells," Energy Convers Manage, 50, pp, 268-278, 2009.