

تحلیل ترمودینامیکی چرخه ترکیبی جدید پیل سوختی اکسید جامد با سوخت هیدروژن - تبرید جذبی GAX

لیلا خانی

کارشناس ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

سیدمحمد سیدمحمودی*

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در این مقاله چرخه ترکیبی جدیدی برای تولید هم‌زمان توان و برودت پیشنهاد می‌شود. این چرخه ترکیبی از چرخه‌های پیل سوختی اکسید جامد با سوخت هیدروژن و تبرید جذبی GAX با سیال عامل آب- آمونیاک است. مدل‌سازی از طریق حل هم‌زمان معادلات الکتروشیمیایی و ترمودینامیکی اجزا با نرم افزار EES صورت می‌گیرد. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که در شرایط یکسان، بازده انرژی و انرژی چگالی جریان موجب افزایش هم‌زمان توان خالص خروجی و برودت تولیدی و بیشتر از چرخه پیل سوختی است. مطالعات پارامتریکی نشان می‌دهد که افزایش چگالی جریان موجب افزایش هم‌زمان توان خالص خروجی و برودت تولیدی و نیز دبی سوخت ورودی می‌گردد، به طوری که بازده انرژی افزایش یافته و بازده انرژی کاهش می‌یابد. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که در نسبت فشار و دمای عملکردی پیل سوختی مشخصی توان الکتریکی خالص خروجی و بازده انرژی بیشینه می‌شود. با محاسبه درصد بازگشت ناپذیری هرکدام از اجزا، معلوم می‌شود که مبادله‌کن گرمایی هوا بیشترین سهم را در برگشت ناپذیری چرخه به خود اختصاص می‌دهد. **واژه‌های کلیدی:** پیل سوختی اکسید جامد، چرخه تبرید جذبی گس، تولید هم‌زمان توان و برودت، انرژی.

Thermodynamic Analysis of a Novel Combined Hydrogen Fed Solid Oxide Fuel Cell - GAX Absorption Refrigeration Cycle

L. Khani

Faculty of Chemistry Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

S. M. S. Mahmoudi

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

A new combined cogeneration cycle producing power and cooling is proposed and analyzed in detail. The cycle is a combination of hydrogen fed solid oxide fuel cell (SOFC) and an ammonia water generator- absorber- heat exchanger (GAX) absorption refrigeration system. Using the Engineering Equation Solver (EES), the solution to the electrochemical and thermodynamic equations simulates the cycle performance. The results show that for the same condition, the energy and exergy efficiencies of the proposed cycle is 68.2% and 5.88% higher than those of the stand-alone fuel cell, respectively. The net produced power and cooling as well as the input hydrogen mass flow rate increase with rising the current density, so that the energy efficiency increases and the exergy efficiency decreases. Optimization is also performed for the proposed cycle and it is observed that both the net produced power and exergy efficiency are maximized at some pressure ratio and fuel cell operating temperature. The results indicate that the air pre- heater contributes the most in the cycle irreversibility.

Keywords: Solid Oxide Fuel Cell, GAX Absorption Refrigeration Cycle, Combined Cooling and Power Production, Exergy.

۱- مقدمه

کاربردهای تولید غیر متمرکز انرژی اشاره کرد [۱-۲]. در میان انواع مختلف پیل‌های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد به دلیل دمای عملکردی بالا و تنوع در سوخت مصرفی، بیشترین پتانسیل را برای دست یابی به بازده بالا در هر دو حالت سامانه‌های تولید توان بزرگ و کوچک دارد [۱-۳]. هم چنین با توجه به دمای بالای جریان خروجی پیل سوختی اکسید جامد می‌توان آن را در ترکیب با چرخه‌های پایین دستی برای تولید توان بیشتر به کار برد. نیروگاه‌های تولید توان پیل سوختی اکسید جامد پتانسیل دست یابی به بازده کلی ۷۰٪ را دارند [۳].

رکنی [۴] یک سامانه ترکیبی پیل سوختی و استرلینگ بر مبنای سوخت زیست توده را مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که کاهش تعداد پیل‌های سوختی باعث کاهش هزینه برق تولیدی و بازده انرژی سامانه می‌گردد. تپپاوان و همکارانش [۵] عملکرد یک سامانه

فناپذیری و تجدیدنپذیری سوخت‌های فسیلی، تنوع بخشی به منابع انرژی، توسعه پایدار، ایجاد امنیت انرژی و مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف انرژی فسیلی باعث توجه جدی جهانیان به توسعه و گسترش استفاده از روش‌های جدید تأمین انرژی و افزایش سهم آنها در سبد انرژی جهانی شده است. یکی از روش‌های نوین که فناوری آن در دهه‌های اخیر به سرعت توسعه یافته است، استفاده از پیل سوختی جهت تولید هم‌زمان الکتریسیته و گرما به روش الکتروشیمیایی می‌باشد [۱]. پیل سوختی انرژی شیمیایی سوخت را مستقیماً و بدون احتراق به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. از مزایای پیل سوختی می‌توان به کارایی بالای تبدیل انرژی، تخریب کمتر انرژی در مقایسه با احتراق حرارتی سوخت، تولید الکتریسیته با کمترین آلودگی زیست محیطی و صوتی و امکان استفاده در

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: s_mahmoudi@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۷/۰۶

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۹

تولید سه گانه پیل سوختی و تبرید جذبی دو اثره را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که این سامانه پیشنهادی به دلیل بازیابی بهتر گرمای جریان خروجی و بازده بیشتر انرژی می‌تواند جایگزین مناسبی برای سامانه‌های تولید سه گانه معمول باشد. ال سلیمان و همکارانش [۶] سه سامانه تولید سه گانه بر اساس پیل سوختی، زیست توده و خورشیدی را مورد مقایسه قرار دادند و گزارش کردند که سامانه پیل سوختی بالاترین بازده را دارد. چیت ساز و همکارانش [۷-۹] یک چرخه تولید سه گانه با پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که بازده انرژی و انرژی این سامانه به ترتیب ۳۳٪ و ۴۶٪ بیشتر از چرخه تولید توان ساده پیل سوختی است. بیشترین تخریب انرژی در مبادله کن هوا و پیل سوختی رخ می‌دهد. چن و همکارانش [۱۰] یک سامانه تولید دوگانه/ سه گانه متشکل از پیل سوختی اکسید جامد و چرخه تبرید جذبی را برای استفاده مسکونی در هنگ کنگ طراحی و پیشنهاد کردند.

با توجه به این که در چرخه تبرید جذبی GAX می‌توان از منابع انرژی دما پایین استفاده کرد، به نظر می‌رسد که ترکیب این چرخه با پیل سوختی در بهبود کارایی تبدیل انرژی مؤثر باشد. با این حال امکان ترکیب چرخه تبرید جذبی GAX با انواع مختلف پیل سوختی اکسید جامد بر پایه سوخت هیدروژن و بهینه سازی آنها چندان مورد بررسی قرار نگرفته است.

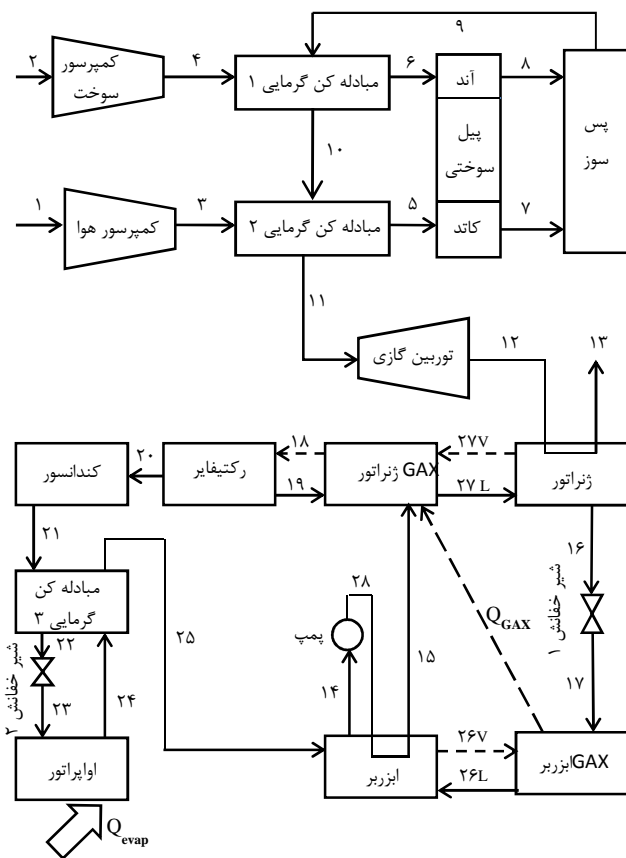
هدف در کار حاضر بررسی عملکرد یک سامانه ترکیبی تولید همزمان توان و برودت پیل سوختی اکسید جامد- توربین گازی- تبرید جذبی GAX از دیدگاه قانون اول و دوم ترمودینامیک است. با توجه به اهمیت نحوه عملکرد پیل سوختی، تحلیل الکتروشیمیایی مجزا و کاملی برای این جزء ارائه شده است. در ادامه تأثیر تغییر چگالی جریان و دمای کارکردی پیل سوختی در نسبت فشارهای مختلف بر عملکرد انرژی و انرژی چرخه ترکیبی معرفی شده مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت با بهینه سازی چرخه ترکیبی در نرم افزار EES مقادیر بهینه نسبت فشار و دمای عملکردی پیل سوختی برای بهینه مقادیر توان خالص خروجی و بازده انرژی تعیین می‌شوند.

۲- توصیف چرخه ترکیبی پیشنهادی

چرخه ترکیبی پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. اصلی ترین قسمت این سامانه، پیل سوختی است که با انجام فرآیندهای الکتروشیمیایی در آن، گرما و توان الکتریکی تولید می‌شود. هوا و سوخت توسط کمپرسورهای مربوطه تا فشار کاری پیل سوختی متراکم می‌شوند. به دلیل آن که دمای آن هوا و سوخت خروجی کمپرسورها جهت انجام واکنش الکتروشیمیایی به حد کافی بالا نیست، از دو مبادله کن گرمایی برای پیش گرم کردن آنها استفاده می‌شود. با انجام واکنش اکسیداسیون هیدروژن در پیل سوختی، جریان الکتریکی مستقیم تولید می‌شود که توسط میبد مناسبی به جریان متناوب تبدیل می‌گردد. گرمای تولیدی واکنش الکتروشیمیایی صرف افزایش دمای جریان‌های خروجی آند و کاتد پیل سوختی می‌شود. همواره در خروجی پیل سوختی مقداری گاز قابل اشتعال مانند هیدروژن وجود دارد که ناشی از وجود ضریب مصرف سوخت است. برای استفاده از انرژی این گازهای قابل اشتعال، آنها را به سوی یک محفظه احتراق

کوچک به نام پس سوز هدایت می‌کنند تا هیدروژن باقی مانده در واکنش شیمیایی با اکسیژن اضافی خروجی از کاتد پیل سوختی شرکت کرده و انرژی خود را آزاد کند [۲]. جریان خروجی پس سوز بعد از عبور از مبادله کن‌های گرمایی هوا و سوخت، به منظور تولید توان بیشتر وارد توربین می‌شود. با وجود کاهش دما و فشار در توربین، دمای جریان خروجی توربین به قدری بالاست که می‌توان از آن به عنوان منبع دما بالا برای تأمین گرمای لازم ژنراتور چرخه GAX استفاده کرد.

در چرخه GAX محلول ضعیف آب- آمونیاک (با غلظت بالای آمونیاک) توسط پمپ به بخش GAX ژنراتور پمپاژ می‌شود. محلول با دریافت گرما در ژنراتور جوشیده و بخار غلیظ آمونیاک تولید می‌شود. محلول قوی توسط شیر خفانش ۱، وارد ابزربر و قسمت GAX جذب کننده شده و با از دست دادن حرارت در اثر فرآیند جذب غلیظ تر گشته و وارد پمپ می‌شود. بخار خارج شده از ژنراتور با گذشتن از GAX ژنراتور وارد رکتیفایر می‌شود. سپس محلول با غلظت بسیار بالا وارد چگالنده گشته و با از دست دادن گرما چگالیده شده و به صورت مایع اشباع وارد مبادله کن گرما می‌گردد. محلول در مبادله کن گرما خنک تر شده و بعد از عبور از شیر خفانش ۲، با فشار پایین وارد اواپراتور می‌شود. محلول با دریافت حرارت در اواپراتور گرم تر گشته و با گذشتن از مبادله کن گرما، وارد جذب کننده می‌شود [۱۱].



شکل ۱- چرخه ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد- تبرید جذبی GAX

۳- مبانی و روش‌ها

ابتدا هر کدام از چرخه‌های پیل سوختی اکسید جامد (با توربین

ρ_k مقاومت ویژه اجزای پیل سوختی (کاتد، آند، الکترولیت و ...)، δ_k ضخامت شار جریان، r_k مقاومت اهمی هر کدام از اجزاء، a_k و b_k هم مربوط به ماده تشکیل دهنده اجزاست. این مقادیر پارامترهای ثابتی بوده که بسته به نوع و هندسه پیل سوختی به دست می‌آیند. این مقادیر در مورد پیل سوختی مورد مطالعه در جدول ۱ ذکر شده‌اند.

افت ولتاژ فعال‌سازی ناشی از برگشت ناپذیری‌های ایجاد شده در راه اندازی پیل و هم چنین غلبه بر انرژی فعال‌سازی واکنش‌های الکتروشیمیایی است و به طور مستقیم با سرعت واکنش‌های الکتروشیمیایی مرتبط می‌باشد. مقدار این افت ولتاژ توسط معادله نیمه تجربی باتلر-ولمر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$i = i_0 \left\{ \exp\left(\frac{\alpha V_{act} n_e F}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-(1-\alpha)V_{act} n_e F}{RT}\right) \right\} \quad (5)$$

مقدار ضریب انتقال بار (α) اغلب ۰٫۵ فرض می‌شود. این فرمول در مورد هر دو نیم واکنش آند و کاتد قابل استفاده است و افت ولتاژهای مربوط به هر کدام را برآورد می‌کند. بنابراین افت ولتاژ فعال‌سازی کل مجموع هر دو افت ولتاژ آند و کاتد است. چگالی جریان تبدیلی برای الکترودهای آند و کاتد متفاوت بوده و به صورت تابعی از قانون آرنیوس و ترکیب گازهای واکنش دهنده تعریف می‌شود و برای یک پیل سوختی اکسید جامد از روابط نیمه تجربی ذیل به دست می‌آید [۱۶]:

$$i_0^a = \gamma_a \left(\frac{P_{H_2}}{P_0}\right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_0}\right) \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

$$i_0^c = \gamma_c \left(\frac{P_{O_2}}{P_0}\right)^{0.25} \exp\left(\frac{-E_c}{RT}\right) \quad (7)$$

در این روابط E انرژی فعال‌سازی واکنش‌های آند و کاتد و γ ضریبی است که به جنس کاتد و آند بستگی دارد. مقادیر این پارامترها برای پیل سوختی مورد نظر در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- ثابت‌های افت ولتاژ مقاومتی [۱۳ و ۱۴]

اجزاء	a [$\Omega \cdot m$]	b [K]	δ [m]
کاتد	۰٫۰۰۰۰۸۱۱	۶۰۰	۰٫۰۰۲۲
آند	۰٫۰۰۰۰۲۹۸	-۱۳۹۲	۰٫۰۰۰۱
الکترولیت	۰٫۰۰۰۰۲۹۴	۱۰۳۵۰	۰٫۰۰۰۰۴
جدا کننده‌ها	۰٫۰۰۱۲	۴۶۹۰	۰٫۰۰۰۰۸۵

جدول ۲- ثابت‌های افت ولتاژ فعال‌سازی [۱۲ و ۱۹]

اجزاء	E [$\frac{kJ}{kmol}$]	γ [$\frac{A}{m^2}$]
آند	۱۱۰۰۰۰	$\gamma \times 10^9$
کاتد	۱۵۵۰۰۰	$\gamma \times 10^9$

در شرایط مدار باز غلظت اجزا در سطح الکترولیت (محل انجام واکنش) برابر با غلظت متناظر آنها در جریان توده گاز است. در صورت برقراری جریان و انجام واکنش الکتروشیمیایی، گرادیان غلظت در الکترودها وجود می‌آید، به طوری که باعث افت ولتاژ غلظتی می‌شود. این پدیده در چگالی جریان‌های بالا حائز اهمیت است، زیرا در این حالت تأمین واکنش دهنده‌ها به میزان کافی برای انجام سریع واکنش مشکل است. افت ولتاژ غلظتی کل پیل سوختی، مجموع افت ولتاژهای

گازی و GAX به طور جداگانه با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک در محیط نرم افزار EES شبیه‌سازی می‌شوند. نتایج حاصل از این مدل سازی‌ها با داده‌های موجود در مراجع مربوطه مورد اعتباردهی قرار می‌گیرد. فرضیات مورد استفاده در تحلیل چرخه‌ها عبارتند از [۲ و ۱۱]:

- سامانه در شرایط حالت پایا کار می‌کند.
- محیط در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ بار قرار دارد.
- از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر می‌شود.
- هیچ یک از اجزای چرخه پیل سوختی با محیط تبادل گرمایی ندارند.
- همه گازها در چرخه پیل سوختی رفتار گاز ایده آل را دارند.
- دمای جریان‌های خروجی آند و کاتد با هم برابر است.
- دما و فشار هوا و سوخت ورودی برابر با دما و فشار محیط است.
- مبرد خروجی از چگالنده و اواپراتور به حالت اشباع است.
- از افت فشار ناشی از اصطکاک در چرخه GAX صرف نظر می‌شود.
- محلول خروجی از جاذب و ژنراتور در حالت تعادل بوده و در دمای معادل دمای اجزا قرار دارند.
- گرمای دفع شده از چگالنده و جاذب به آب خنک کننده منتقل می‌شود.

۳-۱- مدل‌سازی پیل سوختی

حل کلی معادلات جرم و انرژی چرخه ترکیبی پیشنهادی نیاز به محاسبه ولتاژ و توان تولیدی پیل سوختی دارد. هدف از مدل‌سازی پیل سوختی پیش بینی عملکرد ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی آن تحت شرایط مختلف است. یعنی خواصی مانند دما و فشار چگونه بر کارایی پیل سوختی تأثیر می‌گذارند، به طوری که بتوان رابطه پیل سوختی با اجزای دیگر چرخه را به درستی تخمین زد.

پیل سوختی مورد استفاده در این مقاله، پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای ساخت شرکت زیمنس وستینگهاوس به طول ۱۵۰ سانتی‌متر و قطر فعال ۲٫۲ سانتی‌متر است که واکنش الکتروشیمیایی $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ در آن اتفاق می‌افتد [۳]. ولتاژ ایده‌آل پیل سوختی با استفاده از معادله نرنست محاسبه می‌شود [۱]:

$$V_{Nernst} = \frac{-\Delta G_f^0}{n_e F} + \frac{RT}{n_e F} \ln\left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}}\right) \quad (1)$$

با توجه به این که فشار جزئی اجزای مخلوط گازی تابع غلظت آنهاست و غلظت هیدروژن، اکسیژن و بخار آب در ورودی و خروجی پیل سوختی متفاوت است، بنابراین باید ولتاژ نرنست را هم در ورودی و هم در خروجی محاسبه کرده و میانگین آنها را به دست آورد [۱۲].

در عملکرد یک پیل سوختی ولتاژ واقعی کمتر از ولتاژ نرنست خواهد بود. این امر از سه برگشت ناپذیری مهم مقاومتی، فعال‌سازی و غلظتی ناشی می‌شود. افت ولتاژ مقاومتی به دلیل وجود مقاومت در برابر جریان یون در الکترولیت و جریان الکترون در الکترودها و مدار خارجی اتفاق می‌افتد و از قانون اهم تبعیت می‌کند [۱۳]:

$$V_{ohm} = i \sum_k r_k \quad (2)$$

$$r_k = \rho_k \delta_k \quad (3)$$

$$\rho_k = a_k \exp\left(\frac{b_k}{T}\right) \quad (4)$$

غلظتی آند و کاتد می‌باشد [۱۷]:

$$V_{con} = V_{con}^a + V_{con}^c \quad (۸)$$

$$V_{con}^a = \frac{RT}{n_e F} \ln \left(\frac{1 - i_{i, H_2}}{1 + i_{i, H_2 O}} \right) \quad (۹)$$

$$V_{con}^c = \frac{RT}{n_e F} \ln \left(\frac{1}{1 - i_{i, O_2}} \right) \quad (۱۰)$$

در روابط فوق $i_{i, k}$ چگالی جریان حدی برای نفوذ جزء متناظر در الکتروند مربوطه است و از معادله ذیل قابل محاسبه می‌باشد [۱۸]:

$$i_{i, k} = \frac{n_e F D_{eff, k} p_k}{RT \delta_k} \quad (۱۱)$$

در رابطه (۱۱)، δ_a و δ_c به ترتیب ضخامت الکترودهای مربوطه و D_{eff} ضریب پخش مؤثر گاز می‌باشد. این ضریب برای محاسبه مسیر غیرمستقیم مولکول‌ها در الکترودهای متخلخل به کار برده می‌شود و نحوه محاسبه آن در مرجع [۱۵] توضیح داده شده است.

پس از محاسبه ولتاژ ایده‌آل و نیز افت ولتاژهای درون پیل سوختی، ولتاژ واقعی آن از طریق رابطه ذیل محاسبه می‌گردد:

$$V_{cell} = V_{Nernst} - (V_{ohm} + V_{act} + V_{con}) \quad (۱۲)$$

آهنگ مصرف هیدروژن در واکنش الکتروشیمیایی به طور مستقیم با چگالی جریان ارتباط دارد و توسط قانون فارادی به دست می‌آید:

$$\dot{z} = \frac{i A N}{n_e F} \quad (۱۳)$$

با استفاده از ضریب مصرف سوخت، مقدار هیدروژن ورودی به چرخه پیل سوختی نیز مشخص می‌شود:

$$\dot{n}_{i, H_2} = \frac{\dot{z}}{u_f} \quad (۱۴)$$

مقدار اکسیژن ورودی به کاتد پیل سوختی به مقدار مصرف سوخت وابسته است و در حالت استوکیومتری برابر نصف میزان مصرف هیدروژن می‌باشد. ولی در عمل برای خنک سازی مجموعه پیل سوختی همیشه باید هوای بیشتری وارد شود. بدین منظور ضریبی به نام ضریب بهره برداری هوا تعریف می‌شود. مقدار اکسیژن ورودی به کاتد برابر است با:

$$\dot{n}_{i, O_2} = \frac{\dot{z}}{2u_a} \quad (۱۵)$$

موازنه جرمی بین ورودی و خروجی پیل سوختی به صورت ذیل است:

$$\dot{n}_{e, H_2} = \dot{n}_{i, H_2} - \dot{z} \quad (۱۶)$$

$$\dot{n}_{e, H_2 O} = \dot{n}_{i, H_2 O} + \dot{z} \quad (۱۷)$$

$$\dot{n}_{e, O_2} = \dot{n}_{i, O_2} - \frac{\dot{z}}{2} \quad (۱۸)$$

$$\dot{n}_{e, N_2} = \dot{n}_{i, N_2} \quad (۱۹)$$

توان تولیدی پیل سوختی به صورت حاصل ضرب میزان جریان تولیدی در ولتاژ پیل به دست می‌آید:

$$\dot{W}_{FC} = i A N V_{cell} \quad (۲۰)$$

با داشتن دبی مولی جریان‌های ورودی و خروجی، با نوشتن قانون اول ترمودینامیک برای استک پیل سوختی، دمای جریان خروجی تعیین می‌شود:

$$\dot{W}_{FC} = \dot{n}_5 \bar{h}_5 + \dot{n}_6 \bar{h}_6 - \dot{n}_7 \bar{h}_7 - \dot{n}_8 \bar{h}_8 \quad (۲۱)$$

۳-۲- تحلیل ترمودینامیکی سامانه

تحت شرایط حالت پایا و با صرف نظر کردن از تغییرات انرژی

پتانسیل و جنبشی، موازنه انرژی و انرژی برای جزء k ام، به عنوان یک حجم کنترل، به ترتیب به صورت ذیل نوشته می‌شود:

$$\dot{Q}_k - \dot{W}_k = \sum_i \dot{n}_i \bar{h}_i - \sum_e \dot{n}_e \bar{h}_e \quad (۲۲)$$

$$\dot{E}_{D, k} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{E}_i - \sum_e \dot{E}_e \quad (۲۳)$$

\dot{E}_i و \dot{E}_e نیز به ترتیب بیانگر آهنگ انتقال انرژی جریان‌های ورودی و خروجی سامانه است. انرژی کل یک جریان مجموع انرژی شیمیایی (\dot{E}_{ch}) و فیزیکی (\dot{E}_{ph}) آن است:

$$\dot{E} = \dot{E}_{ph} + \dot{E}_{ch} \quad (۲۴)$$

$$\dot{E}_{ph} = \dot{n} \left[(\bar{h} - \bar{h}_0) - T_0 (\bar{s} - \bar{s}_0) \right] \quad (۲۵)$$

$$\dot{E}_{ch} = \dot{n} \left[\sum_i y_i \bar{e}_{ch, i} + \bar{R} T_0 \sum_i y_i \ln(y_i) \right] \quad (۲۶)$$

۳-۳- معیارهای عملکردی سامانه

مقدار توان خالص خروجی و بازده انرژی چرخه برابر است با:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{FC} + \dot{W}_{GT} - \dot{W}_{AC} - \dot{W}_{FCOM} - \dot{W}_P \quad (۲۷)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{evap}}{\dot{n}_f LHV} \quad (۲۸)$$

در رابطه (۲۷) \dot{W}_{FC} و \dot{W}_{GT} به ترتیب توان تولیدی پیل سوختی و توربین گازی است. \dot{W}_{AC} ، \dot{W}_{FCOM} و \dot{W}_P نیز به ترتیب مربوط به توان مصرفی کمپرسور هوا، کمپرسور سوخت و پمپ است. در رابطه (۲۸) \dot{Q}_{evap} ، \dot{n}_f و LHV مقدار برودت تولیدی چرخه در اواپراتور، دبی سوخت ورودی به چرخه و ارزش حرارتی هیدروژن است.

بازده انرژی نسبت انرژی مفید خروجی به انرژی شیمیایی سوخت ورودی تعریف می‌شود:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{evap} \left(1 - \frac{T_0}{T_b} \right)}{\dot{n}_f e_f} \quad (۲۹)$$

که در آن T_b متوسط دمای دریافت گرما و e_f انرژی شیمیایی هیدروژن است. بازگشت ناپذیری کل چرخه ترکیبی مجموع بازگشت ناپذیری اجزا و انرژی اتلافی ناشی از جریان خروجی چرخه است.

۳-۴- اعتباردهی

برای ارزیابی میزان دقت مدل‌سازی الکتروشیمیایی پیل سوختی در این مقاله، نمودار ولتاژ-چگالی جریان رسم شده توسط این برنامه با نتایج آزمایش‌های تجربی مربوط به پیل سوختی اکسید جامد توسط زیمنس وستینگهاوس [۳ و ۲۰] مقایسه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، نتایج حاصل از مدل‌سازی در این مقاله تطابق خوبی را با داده‌های تجربی نشان می‌دهد و حداکثر خطا ۲.۶۷٪ می‌باشد.

همچنین مقادیر توان خالص، بازده انرژی و بازگشت ناپذیری چرخه پیل سوختی اکسید جامد با سوخت هیدروژن به دست آمده در کار حاضر با مقادیر متناظر گزارش شده در مرجع [۲] در جدول ۳ مقایسه می‌شود. نتایج در جدول ۳ حاکی از آن است که مدل‌سازی چرخه پیل سوختی اکسید جامد با سوخت هیدروژن، با حداکثر خطای ۳٪ نتایج مطلوبی را ارائه می‌دهد.

نتایج عملکرد چرخه تبرید جذبی گکس با نتایج ارائه شده توسط

که با استفاده از گرمای اتلافی گازهای خروجی چرخه پیل سوختی اکسید جامد به عنوان منبع دمابالای چرخه GAX، مقداری از انرژی دور ریخته شده مفید واقع می‌شود.

مرجع [۱۱] مورد مقایسه قرار گرفت. همان طور که در شکل ۳ مشخص است، نتایج تطابق خوبی را نشان می‌دهند.

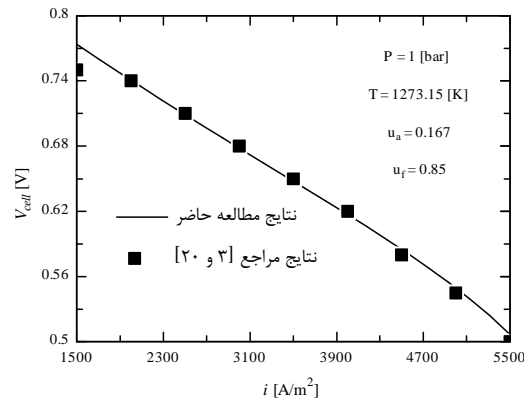
جدول ۴- داده‌های مورد استفاده در مدل سازی چرخه [۲، ۳، ۱۱ و ۲۰]

پارامتر	مقدار
دمای عملکردی پیل سوختی (کلوین)	۱۲۷۳
چگالی جریان (آمپر بر متر مربع)	۲۰۰۰
غلظت هیدروژن ورودی (%)	۸۹
غلظت بخار آب ورودی (%)	۱۱
ضریب مصرف سوخت (%)	۸۰
ضریب بهره‌برداری هوا (%)	۱۷
نسبت فشار	۲٫۵
سطح فعال هر پیل سوختی (متر مربع)	۰٫۸۳۴
تعداد پیل سوختی	۱۷۹۸
راندمان کمپرسورها و توربین (%)	۸۵
راندمان پس سوز (%)	۹۸
کارایی مبادله‌کن‌های گرمایی (%)	۸۵
افت فشار مبادله‌کن‌ها و پیل سوختی (%)	۲
افت فشار پس سوز (%)	۳

جدول ۵- نتایج مدل سازی چرخه

پارامتر	چرخه پیل سوختی اکسید جامد با سوخت هیدروژن	چرخه پیل سوختی اکسید جامد با سوخت هیدروژن-گس
بازده قانون اول (%)	۵۰٫۲	۸۴٫۴۴
بازده قانون دوم (%)	۵۱٫۰۱	۵۴٫۰۱
توان خالص خروجی (کیلووات)	۲۳۴	۲۳۲٫۳
برودت اواپراتور (کیلووات)	-	۱۶۰٫۳
ولتاژ پیل سوختی (ولت)	۰٫۸۳۵۳	۰٫۸۳۵۳
کل نابودی انرژی (کیلووات)	۲۲۱٫۸	۲۱۴٫۸

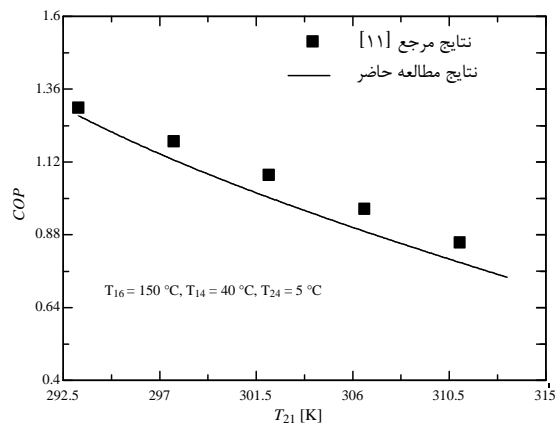
شکل ۴ توزیع درصد برگشت ناپذیری را، که نمادی از نابودی انرژی است، در اجزای مختلف چرخه نشان می‌دهد. مطابق این شکل بیشترین برگشت ناپذیری در مبادله‌کن گرمایی هوا رخ می‌دهد که به دلیل تفاوت دمایی زیاد جریان گرم و سرد و دبی بیشتر هوا نسبت به سوخت ورودی، است. با وجود این که در پس سوز فقط درصد بسیار



شکل ۲- اعتبارسنجی پیل سوختی

جدول ۳- اعتبارسنجی چرخه پیل سوختی اکسید جامد با سوخت هیدروژن

پارامتر	نتایج مطالعه حاضر	نتایج مرجع [۲]
توان خالص چرخه (کیلووات)	۱۹۳٫۷	۱۸۸
بازده انرژی (%)	۴۱٫۵۶	۴۲
بازگشت ناپذیری چرخه (کیلووات)	۲۵۲	۲۵۷

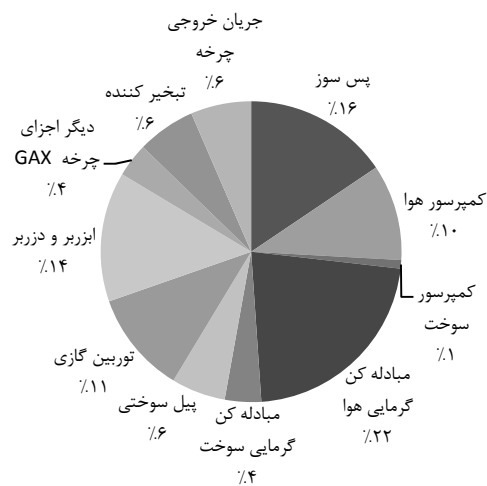


شکل ۳- اعتبارسنجی چرخه تبرید جذبی GAX

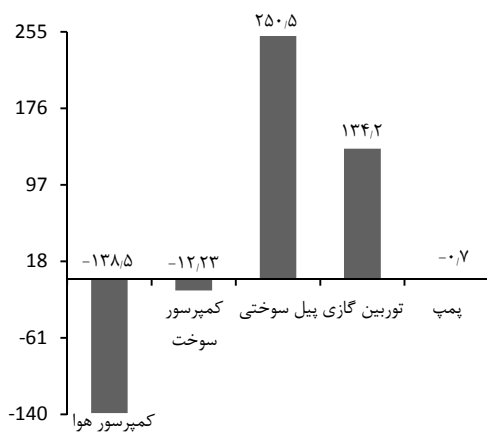
۴- نتایج

داده‌های مورد نیاز برای مدل سازی چرخه ترکیبی پیشنهادی در جدول ۴ لیست شده است [۲، ۳، ۱۱ و ۲۰]. نتایج حاصل از تحلیل ترمودینامیکی این چرخه ترکیبی و مقایسه آن با چرخه ساده پیل سوختی اکسید جامد در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به جدول ۵ ملاحظه می‌شود که بازده‌های انرژی و انرژی چرخه ترکیبی پیشنهادی به ترتیب ۶۸٫۲٪ و ۵۸٫۸٪ بیشتر از چرخه ساده پیل سوختی اکسید جامد است. چرا که چرخه GAX با مصرف مقدار ناچیزی توان در پمپ تولید سرمایه‌ش می‌کند که این خود بر کارایی سامانه ترکیبی می‌افزاید. کاهش بازگشت ناپذیری را بدین صورت می‌توان توجیه کرد

توجه به این که انرژی خروجی از اواپراتور کسر کوچکی از برودت تولیدی در این جزء است (رابطه (۲۴))، افزایش انرژی خروجی مفید چرخه از افزایش انرژی ورودی آن کمتر می‌شود، به طوری که بازده قانون دوم با افزایش چگالی جریان کاهش می‌یابد. همان گونه که در این دو شکل واضح است، با افزایش نسبت فشار، بازده انرژی کاهش می‌یابد، زیرا تغییرات توان تولیدی الکتریکی خالص چرخه و برودت تولیدی در اواپراتور به گونه‌ای است که مجموع آنها با افزایش نسبت فشار کم می‌شود و دبی سوخت ورودی به چرخه تغییر نمی‌کند. ولی با توجه به این که بازده قانون دوم بیشتر تابع تغییرات توان الکتریکی خالص چرخه است، این بازده روند صعودی-نزولی را طی می‌کند.



شکل ۴- درصد برگشت ناپذیری در اجزای مختلف چرخه



شکل ۵- میزان تولید/ مصرف توان در اجزای مختلف چرخه

کمی از سوخت ورودی به چرخه، که به دلیل وجود ضریب مصرف سوخت در پیل سوختی واکنش نداده‌اند، سوزانده می‌شود، ولی مقدار قابل توجهی از تخریب انرژی در آن رخ می‌دهد. به هر حال، با انجام واکنش الکتروشیمیایی در پیل سوختی، هم ناپذیری انرژی بسیار زیاد پس سوز حذف می‌شود و هم با تولید توان الکتریکی بازده چرخه افزایش می‌یابد. نکته جالب توجه دیگر این است که افزودن چرخه GAX به عنوان چرخه پایین دست، به چرخه پیل سوختی، میزان بازگشت ناپذیری را در حدود ۳٫۱۶٪ کاهش می‌دهد.

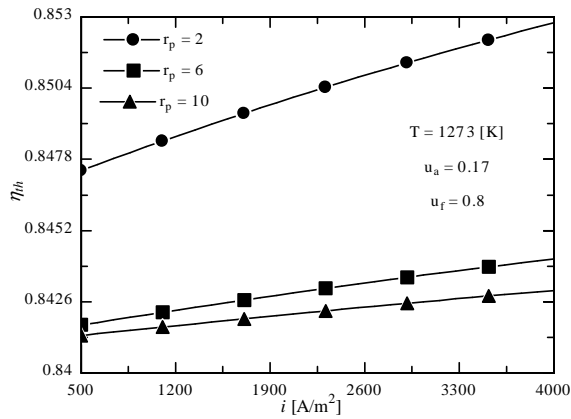
شکل ۵ میزان تولید و مصرف توان را در اجزای مختلف چرخه پیشنهادی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ مشخص می‌گردد که پیل سوختی بیشترین سهم را در تولید توان دارد، زیرا حدود ۶۵٫۱۱٪ کل توان تولیدی چرخه ترکیبی به این جزء مربوط می‌شود. از سوی دیگر بالاترین مقدار مصرف توان در کمپرسور هوا روی می‌دهد. سهم پمپ چرخه GAX در مقدار توان مصرفی چرخه بسیار کم و قابل صرف نظر کردن است.

چگالی جریان آهنگ انتقال الکترون در واحد سطح فعال پیل سوختی است و مقدار آن بر عملکرد ترمودینامیکی سامانه بسیار تأثیر گذار می‌باشد. نحوه تغییر ولتاژ پیل سوختی با چگالی جریان در نسبت فشارهای مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. افزایش چگالی جریان باعث افزایش همه افت ولتاژهای درون پیل سوختی و کاهش ولتاژ واقعی آن طبق شکل ۶ می‌شود. شکل ۶ هم چنین نشان می‌دهد که با افزایش نسبت فشار در چگالی جریان ثابت ولتاژ افزایش می‌یابد، چرا که افزایش فشار عملکردی پیل سوختی موجب افزایش ولتاژ نرنست و کاهش افت ولتاژهای غلظتی و فعال‌سازی می‌شود و بنابراین ولتاژ خروجی افزایش می‌یابد.

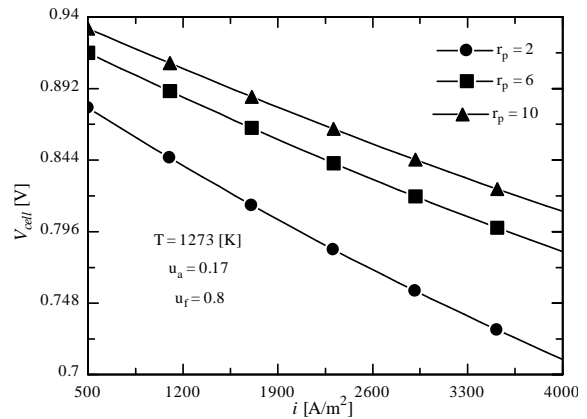
در شکل ۷ تأثیر چگالی جریان بر توان خالص خروجی چرخه نمایش داده شده است. دیده می‌شود که با افزایش چگالی جریان توان تولیدی پیل سوختی، علی‌رغم کاهش ولتاژ، به دلیل تأثیر بیشتر چگالی جریان افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش چگالی جریان، میزان سوخت مصرفی در پیل سوختی بیشتر می‌شود و در نتیجه دبی سوخت و هوای ورودی به چرخه و توان مصرفی کمپرسورها و نیز توان تولیدی توربین گازی افزایش می‌یابد. در نهایت با توجه به شکل ۷ توان خالص خروجی چرخه زیاد می‌شود.

در شکل ۸ تأثیر چگالی جریان بر برودت تولیدی چرخه GAX نشان داده شده است. به دلیل افزایش دما و دبی جریان خروجی توربین، گرمای ژنراتور افزایش یافته و باعث بالا رفتن میزان سرمایه‌گذاری تولیدی در اواپراتور می‌شود. هم چنین با توجه به این شکل مشخص می‌شود که با افزایش نسبت فشار کمپرسور، سرمای تولیدی اواپراتور ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

تغییرات بازده انرژی و انرژی با چگالی جریان به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشهود است. مطابق شکل ۹، با افزایش چگالی جریان بازده قانون اول زیاد می‌شود. در حقیقت، افزایش چگالی جریان باعث افزایش انرژی خروجی مفید چرخه (مجموع توان الکتریکی خالص خروجی و سرمای تولیدی اواپراتور) و نیز افزایش دبی سوخت ورودی و به تبع آن انرژی ورودی به چرخه می‌شود. به هر حال افزایش انرژی خروجی مفید چرخه بر افزایش انرژی ورودی به چرخه غلبه کرده و موجب افزایش بازده قانون اول با افزایش چگالی جریان می‌گردد. با



شکل ۹- تأثیر چگالی جریان بر بازده انرژی

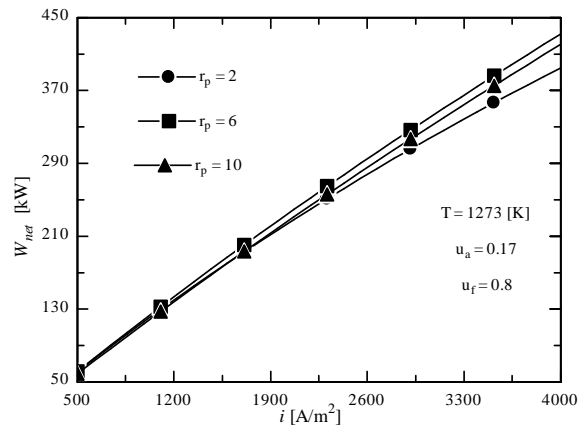


شکل ۶- تأثیر چگالی جریان بر ولتاژ پیل سوختی

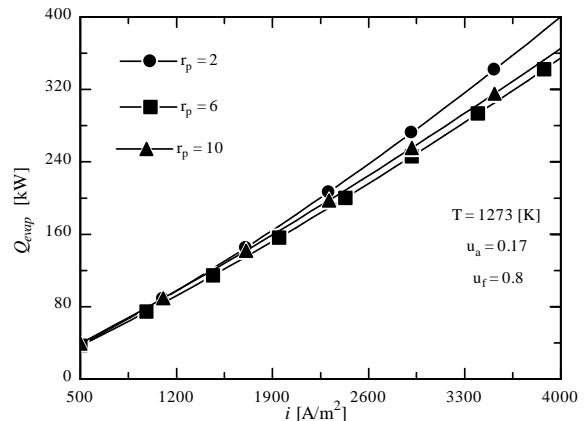
روند تغییر بازگشت ناپذیری کل چرخه با چگالی جریان، نیز در شکل ۱۱ ترسیم شده است. افزایش چگالی جریان باعث افزایش بازگشت ناپذیری در همه اجزای چرخه ترکیبی می‌شود. هم چنین بازگشت ناپذیری کل چرخه با افزایش نسبت فشار ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

دمای عملکردی پیل سوختی یکی از پارامترهای مهم در طراحی و تحلیل چرخه‌های پیل سوختی است. تغییر ولتاژ پیل سوختی با دمای آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، در دمای مشخصی ولتاژ پیل سوختی بیشینه می‌شود. در حقیقت، افزایش دمای پیل سوختی باعث کاهش هم‌زمان افت ولتاژها و انرژی آزاد گیبس واکنش الکتروشیمیایی (ولتاژ نرنست) می‌گردد. در ابتدا اثر کاهش افت ولتاژها غالب بوده و بنابراین ولتاژ واقعی پیل سوختی افزایش می‌یابد و سپس با افزایش بیشتر دما، کاهش ولتاژ نرنست تأثیر بیشتری داشته و باعث کاهش ولتاژ پیل سوختی می‌شود.

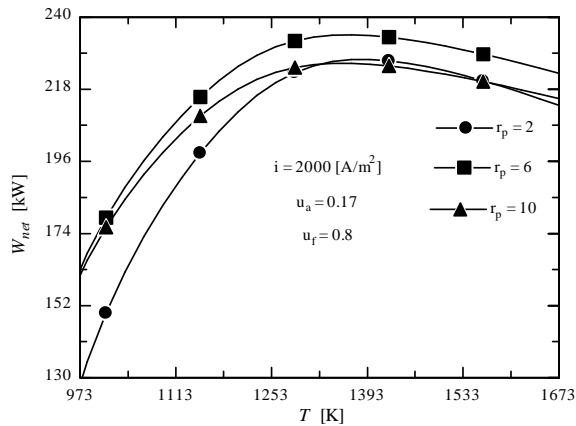
روند تغییرات توان الکتریکی خالص خروجی چرخه با دمای پیل سوختی در شکل ۱۳ رسم شده است. با توجه به این که در این شکل چگالی جریان ثابت فرض شده است، تغییرات توان تولیدی پیل سوختی فقط تابع ولتاژ بوده و مانند آن ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه (۲۱) تغییر توان تولیدی پیل سوختی بر آنتالپی جریان‌های خروجی آن و توان تولیدی توربین گازی اثرگذار است، به طوری که مقادیر این پارامترها با افزایش دمای عملکردی پیل سوختی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابند. ولی توان مصرفی کمپرسورهای سوخت و هوا ثابت باقی می‌ماند. تغییرات توان تولیدی توربین گازی و پیل سوختی به گونه‌ای است که توان خالص خروجی چرخه ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همان گونه که در شکل ۱۴ مشخص است و با توجه به توضیحات فوق با افزایش دمای عملکردی پیل سوختی، مقدار برودت ایجاد شده توسط اواپراتور روند نزولی- صعودی دارد.



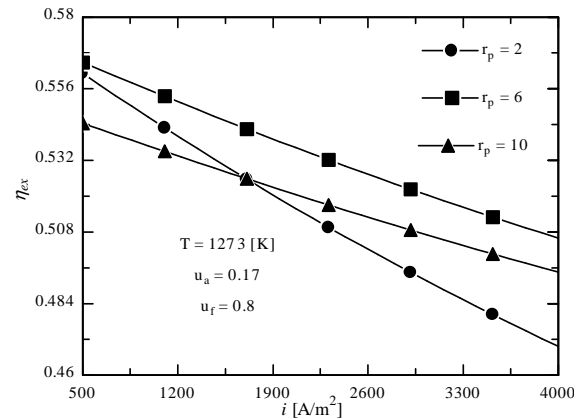
شکل ۷- تأثیر چگالی جریان بر توان خالص خروجی چرخه



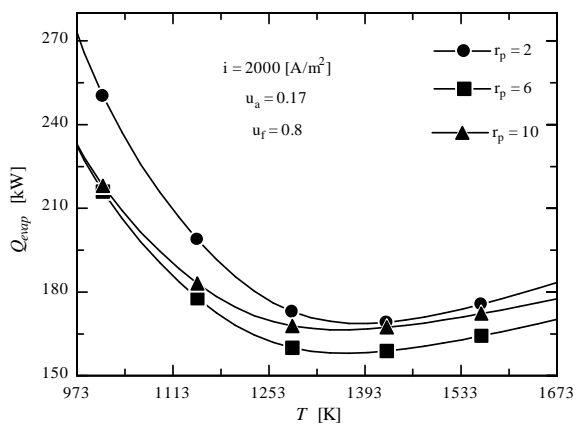
شکل ۸- تأثیر چگالی جریان بر گرمای اواپراتور



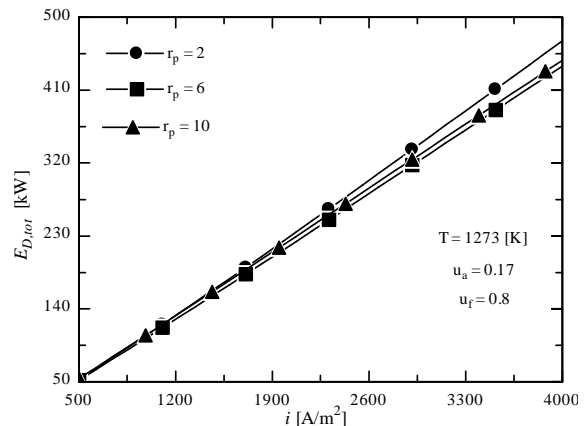
شکل ۱۳- تأثیر دمای عملکردی پیل سوختی بر توان خالص خروجی چرخه



شکل ۱۰- تأثیر چگالی جریان بر بازده انرژی چرخه



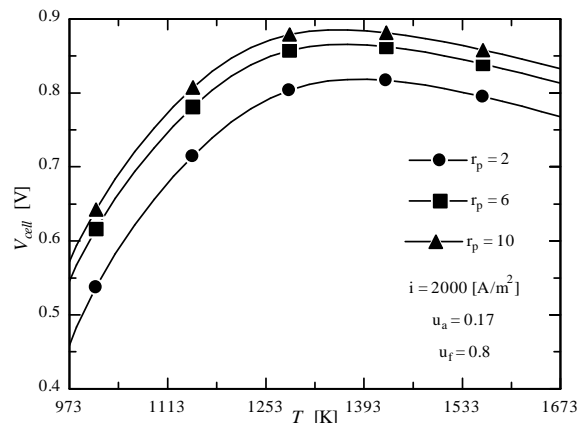
شکل ۱۴- تأثیر دمای عملکردی پیل سوختی بر گرمای اواپراتور



شکل ۱۱- تأثیر چگالی جریان بر بازگشت ناپذیری چرخه

تغییرات بازده‌های انرژی و انرژی با دمای پیل سوختی به ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمایش داده شده است. در مورد بازده انرژی، تغییرات برودت تولیدی اواپراتور بر تغییرات توان خالص خروجی چرخه غلبه کرده و این بازده مطابق شکل ۱۵، ابتدا کاهش و سپس افزایش پیدا می‌کند. در مورد بازده انرژی، روند تغییرات توان خالص خروجی تأثیر بیشتری دارد چرا که انرژی مفید خروجی از اواپراتور بخش کوچکی از برودت تولیدی در این جزء است و این بازده مطابق شکل ۱۶ ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که تغییر دمای عملکردی پیل سوختی تأثیری بر دبی سوخت ورودی به چرخه ندارد.

شکل ۱۷ نشانگر نحوه تغییر بازگشت ناپذیری چرخه با افزایش دمای پیل سوختی است. مطابق این شکل، با افزایش دمای پیل سوختی، بازگشت ناپذیری چرخه ترکیبی ابتدا کاهش و سپس افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱۲- تأثیر دمای عملکردی پیل سوختی بر ولتاژ پیل سوختی

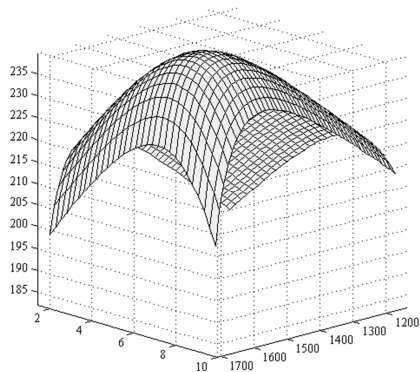
الکتریکی خروجی و بازده انرژی چرخه به ترتیب در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است. مطابق این شکل‌ها مقادیر بهینه‌ای برای نسبت فشار و دمای عملکردی پیل سوختی وجود دارد که به ازای آن‌ها توان الکتریکی خالص خروجی و بازده انرژی بیشتری می‌شوند. با افزایش نسبت فشار، توان تولیدی پیل سوختی و توربین گازی افزایش می‌یابد. ولی مقدار مصرف توان در کمپرسورهای هوا و سوخت نیز روند صعودی دارد، به طوری که تا یک نسبت فشار معین میزان افزایش تولید توان چرخه از مصرف آن بیشتر بوده و توان خالص خروجی چرخه افزایش می‌یابد و بعد از این نسبت فشار، به دلیل غلبه افزایش مقدار مصرف توان در کمپرسورها توان خالص خروجی کاهش پیدا می‌کند. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، بازده انرژی بیشتر تحت تأثیر توان الکتریکی خالص خروجی قرار دارد و به تبع آن ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در نرم افزار EES و در نظر گرفتن محدودیت‌های (۲۵) تا (۲۸)، مقدار بهینه نسبت فشار و دمای عملکردی پیل سوختی برای بهینه‌سازی توان خالص خروجی به ترتیب ۴٫۱۲۴ و ۱۳۷۱ کلوین و برای بهینه‌سازی بازده قانون دوم به ترتیب ۴٫۰۷۴ و ۱۳۷۲ کلوین به دست می‌آید.

$$\eta_{ex} \rightarrow \text{maximize}(T, r_p) \quad (30)$$

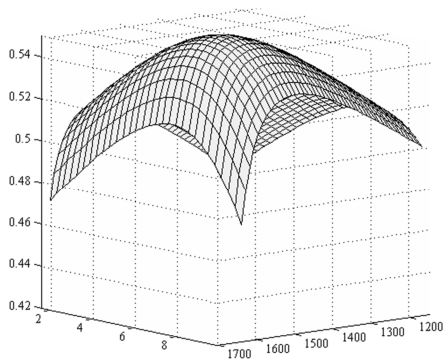
$$\dot{W}_{net} \rightarrow \text{maximize}(T, r_p) \quad (31)$$

$$1173 \leq T \leq 1673 \quad (32)$$

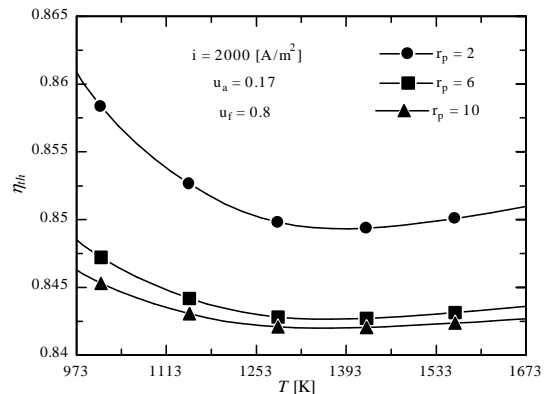
$$1.4 \leq r_p \leq 10 \quad (33)$$



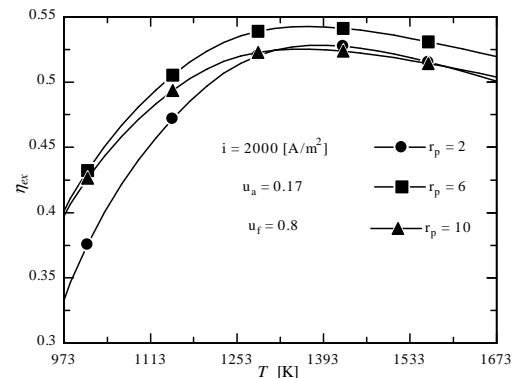
شکل ۱۸- تغییرات توان خالص خروجی بر حسب نسبت فشار و دمای عملکردی پیل سوختی



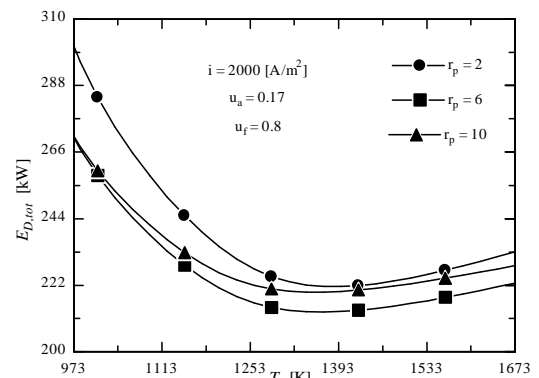
شکل ۱۹- نقطه بهینه بازده انرژی بر حسب نسبت فشار و دمای عملکردی پیل سوختی



شکل ۱۵- تأثیر دمای عملکردی پیل سوختی بر بازده انرژی



شکل ۱۶- تأثیر دمای عملکردی پیل سوختی بر بازده انرژی



شکل ۱۷- تأثیر دمای عملکردی پیل سوختی بر بازگشت ناپذیری چرخه

آنچه که در تمام نمودارهای رسم شده این چرخه ترکیبی قابل توجه است، رفتار متفاوت بازده‌های انرژی و انرژی می‌باشد، چون هر کدام مفهوم ترمودینامیکی متفاوتی را بیان می‌کنند. بازده انرژی اطلاعات لازم درباره میزان سوخت مصرفی لازم برای تأمین مقدار مشخصی توان را تعیین می‌کند، ولی در بازده انرژی، نسبت انرژی مفید خروجی چرخه به انرژی ورودی آن مد نظر است. با توجه به این‌که انرژی مفید خروجی چرخه GAX به عنوان بخش اندکی از برودت تولیدی در اواپراتور، در تعیین انرژی مفید خروجی چرخه مؤثر می‌باشد، تغییرات بازده انرژی بیشتر به توان خالص خروجی چرخه وابسته است.

۵- بهینه‌سازی

تأثیر هم‌زمان نسبت فشار و دمای عملکردی پیل سوختی بر توان

۶- نتیجه گیری

در این مقاله چرخه تولید هم‌زمان توان- برودت که از گرمای جریان خروجی چرخه پیل سوختی اکسید جامد به عنوان منبع دما بالای چرخه تبرید جذبی GAX استفاده می‌کند، مورد مطالعه قرار گرفت. برای به دست آوردن مدلی دقیق، معادلات الکتروشیمیایی و ترمودینامیکی اجزای چرخه به طور هم‌زمان در نرم افزار EES حل شدند. پس از بررسی نتایج به دست آمده می‌توان موارد ذیل را به عنوان جمع بندی بحث ارائه نمود:

- افزودن چرخه تبرید جذبی GAX به چرخه پیل سوختی اکسید جامد موجب تولید برودت با استفاده از گرمای گاز-های خروجی و بنابراین افزایش بازده انرژی و انرژی چرخه پیل سوختی می‌شود.
- با افزایش چگالی جریان، توان خالص خروجی و برودت تولیدی در اواپراتور افزایش می‌یابند. ولی به طور هم‌زمان دبی سوخت ورودی نیز بیشتر می‌شود. این تغییرات باعث افزایش بازده انرژی و کاهش بازده انرژی با افزایش چگالی جریان می‌گردد.
- افزایش دمای عملکردی پیل سوختی باعث می‌شود که بازده انرژی ابتدا کاهش و سپس افزایش یابد، در حالی که بازده انرژی روند صعودی- نزولی دارد. تغییرات در بازده انرژی بمراتب کمتر از تغییرات در بازده انرژی است.
- با افزایش نسبت فشار، ولتاژ واقعی پیل سوختی و بازده انرژی افزایش یافته و بازده انرژی و روند صعودی- نزولی پیدا می‌کند.
- با توجه به این که بازده‌های انرژی و انرژی مفاهیم ترمودینامیکی جداگانه‌ای را مطرح می‌کنند، روند تغییرات این دو متفاوت از هم است.
- بیشترین میزان بازگشت ناپذیری در چرخه به ترتیب مربوط به مبادله‌کن گرمایی هوا و پس سوز می‌باشد.
- با استفاده از بهینه سازی در محیط نرم افزار EES، مقادیر بهینه نسبت فشار و دمای عملکردی پیل سوختی برای بیشینه مقادیر توان خالص خروجی و بازده انرژی تعیین شدند.

۷- نمادها

A	سطح فعال پیل سوختی (m^2)
$\Delta \bar{g}_f^0$	انرژی آزاد گیبس واکنش الکتروشیمیایی در دمای واکنش و فشار استاندارد ($kJkmol^{-1}$)
F	ثابت فارادی
N	تعداد پیل سوختی
\dot{z}	دبی سوخت مصرفی ($kmols^{-1}$)

زیرنویس‌ها

e	خروجی
i	ورودی

۸- مراجع

- [1] Larminie J., Dicks A., Fuel cell system explaining, John Wiley & Sons Inc., New York, 2004.
- [2] Akkaya A. V., Shahin B., Erdem H. H., Exergetic performance coefficient analysis of a simple fuel cell system, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 32, pp. 4600-4609, 2007.
- [3] EG&G Technical Services Inc., Fuel Cell Handbook, U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, 2004.
- [4] Rokni M., Thermodynamic and thermo-economic analysis of a system with biomass gasification, solid oxide fuel cell (SOFC) and Stirling engine, Energy, vol. 76, pp. 19-31, 2014.
- [5] Tippawan P., Arpornwichanop A., Dincer I., Energy and exergy analyses of an ethanol-fueled solid oxide fuel cell for a trigeneration system, Energy, vol. 87, pp. 228-239, 2015.
- [6] Al-Sulaiman F.A., Hamdullahpur E., Dincer I., Performance comparison of three trigeneration systems using organic rankine cycles, Energy, vol. 36(9), pp. 5741-54, 2011.
- [7] Ranjbar F., Chitsaz A., Mahmoudi S.M.S., Khalilarya Sh., Rosen Marc A., Energy and exergy assessments of a novel trigeneration system based on a solid oxide fuel cell, Energy Conversion and Management, vol. 87, pp. 318-327, 2014.
- [8] Chitsaz A., Mahmoudi S.M.S., Rosen Marc A., Greenhouse gas emission and exergy analyses of an integrated trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell, Applied Thermal Engineering, vol. 86, pp. 81-90, 2015.
- [9] Chitsaz A., Mehr A.S., Mahmoudi S.M.S., Exergoeconomic analysis of a trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell, Energy Conversion and Management, vol. 106, pp. 921-931, 2015.
- [10] Chen JMP, Ni M., Economic analysis of a solid oxide fuel cell cogeneration/trigeneration system for hotels in Hong Kong. Energy Build, vol. 75, pp. 160-169, 2014.
- [11] Ramesh Kumar A., Udaya Kumar M., Studies of compressor pressure ratio effect on GAX absorption compression cooler, Applied Energy, vol. 85, no. 12, pp. 1163-1172, 2008.
- [11] Akkaya A. V., Electrochemical model for performance analysis of a tubular SOFC, International Journal of Energy Research, vol. 31, pp. 79-98, 2007.
- [12] Bessette II N. F., Wepfer W. J., Winnick J., A mathematical model of a solid oxide fuel cell, Journal of Electrochemical Society, vol. 142, pp. 3792-3800, 1995.
- [13] Singhal S. C., Advances in solid oxide fuel cell technology, Proceedings of the 1998 Fuel Cell Seminar, Courtesy Associates, 1998.
- [14] Chan S. H., Khor K. A., Xia Z. T., A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness, Journal of Power Sources, vol. 93, pp. 130-140, 2001.
- [15] Costamagna P., Honegger K., Modeling of solid oxide heat exchanger integrated stacks and simulation at high fuel utilization, Journal of Electrochemical Society, vol. 145, no. 11, pp. 3995-4007, 1998.
- [16] Chan S. H., Ho H. K., Tian Y., Multi-level modeling of SOFC-gas turbine hybrid system, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 28, pp. 889-900, 2003.
- [17] Singhal S. C., Kendal K., High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamental, Design and Applications, Elsevier, Amsterdam, 2004.
- [18] Campanari S., Iora P., Definition and sensitivity analysis of a finite volume SOFC model for a tubular cell geometry, Journal of Power Sources, vol. 132, pp. 113-126, 2004.
- [19] Singhal S. C., Advances in solid oxide fuel cell, Journal of Solid State Ion, vol. 135, pp. 305-313, 2000.