



تحلیل ترمودینامیکی چرخه ترکیبی تولید همزمان توان - برودت با استفاده از پیل سوختی اکسید جامد

لیلا خانی، سید محمد سید محمودی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۸ مرداد ۱۳۹۴
بازنگری: ۴ آذر ۱۳۹۴
پذیرش: ۴ بهمن ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۱۸ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

پیل سوختی اکسید جامد
تبرید جذبی
تولید همزمان

چکیده: در این مقاله امکان استفاده از چرخه ترکیبی جدیدی برای تولید همزمان توان الکتریکی و سرمایه‌های مورد بررسی قرار می‌گیرد. چرخه پیشنهادی، ترکیبی از سیستم پیل سوختی اکسید جامد - توربین گازی به‌عنوان چرخه مولد توان و چرخه تبرید جذبی گس به‌عنوان چرخه تولید برودت است. مدلسازی این چرخه از طریق حل همزمان معادلات بقای جرم و انرژی اجزای چرخه و محاسبه ولتاژ و توان الکتریکی تولیدی پیل سوختی در محیط نرم افزار ای‌ای‌اس صورت می‌گیرد. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل ترمودینامیکی این چرخه بیانگر آن است که بازده انرژی چرخه ترکیبی پیشنهادی ۳۷/۲۶٪ بیشتر از چرخه پیل سوختی - توربین گازی در شرایط مشابه است. هم چنین افزایش چگالی جریان موجب افزایش همزمان توان الکتریکی خالص و برودت تولیدی و نیز دبی سوخت ورودی می‌شود، به‌طوری که بازده انرژی افزایش می‌یابد. در حالی که افزایش دمای عملکردی پیل سوختی باعث می‌شود که بازده انرژی ابتدا کاهش و سپس افزایش یابد.

۱- مقدمه

بی‌تردید انرژی نقش بسزایی در پیشرفت و توسعه کشورها ایفا می‌کند. بعد از نیروی انسانی، چگونگی استفاده از منابع انرژی عمده‌ترین عامل توسعه اقتصادی جوامع بشمار می‌رود. در این میان فناوری پیل سوختی به‌دلیل مزایایی مانند بازده بالا، آلودگی محیطی و صوتی کم، قابلیت تولید غیرمتمرکز (توزیع پراکنده) انرژی و استفاده در نقاط دورافتاده توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده است [۱]. در میان انواع مختلف پیل سوختی، پیل سوختی اکسید جامد بیشترین دمای عملکردی را دارد. در نتیجه این نوع پیل سوختی در نیروگاه‌های بزرگ تولید برق و چرخه‌های ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترکیب این نوع پیل سوختی با یک توربین بازده کلی را به ۷۰٪ افزایش می‌دهد [۳-۱].

آکایا و همکارانش [۲] یک سیستم تولید توان پیل سوختی با سوخت هیدروژن را از دیدگاه قوانین اول و دوم ترمودینامیک مورد بررسی قرار دادند. آنها حداکثر بازده ترمودینامیکی را ۴۸٪ و بیشترین میزان توان تولیدی را ۳۳۰ کیلووات گزارش کردند. حاصلی و همکارانش [۴] چرخه ترکیبی توربین گازی و پیل سوختی اکسید جامد با سوخت متان را از دیدگاه انرژی تحلیل کرده و بازده آن را ۶۰/۶٪ گزارش کردند. کالیس و همکارانش [۵] یک چرخه ترکیبی ۱/۵ مگاواتی توربین گازی - پیل سوختی اکسید جامد را بررسی کردند که در آن برای ری‌فرم کردن گاز طبیعی از منبع آب خارجی استفاده شد. بازده این چرخه هیبریدی در حدود ۶۰٪ به‌دست آمد. تپاوان و همکارانش [۶] عملکرد یک سیستم تولید سه‌گانه پیل سوختی با سوخت

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s_mahmoudi@tabrizu.ac.ir

اتانول و خنک‌کن جذبی دو اثره آب-لیتیم برامید را از دیدگاه انرژی و انرژی بررسی کرده و نشان دادند که سیستم پیشنهادی آنها به‌دلیل بازیابی بهتر گرمای جریان خروجی و عملکرد انرژی بالاتر می‌تواند گزینه مناسبی به جای سیستم‌های تولید سه‌گانه متداول باشد. رکنی [۷] یک سیستم پیل سوختی-استرلینگ با امکان گازی‌سازی زیست‌توده را از نظر ترمودینامیکی و اقتصادی مورد مطالعه قرار داده و به این نتیجه رسید که کاهش تعداد پیل‌های سوختی باعث کاهش هزینه برق تولیدی و بازده انرژی سیستم می‌شود. السلیمان و همکاران [۸] سه سیستم تولید سه‌گانه بر اساس پیل سوختی، زیست‌توده و خورشیدی را از دیدگاه انرژی مورد مقایسه قرار داده و گزارش کردند که سیستم تولید سه‌گانه پیل سوختی بالاترین بازده الکتریکی را دارد. چیت‌ساز و همکارانش [۹-۱۲] یک چرخه تولید سه‌گانه با سیستم محرکه پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای را بررسی و بهینه‌سازی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که بازده انرژی و انرژی این سیستم به‌ترتیب ۳۳٪ و ۴۶٪ بیشتر از چرخه تولید توان ساده پیل سوختی است. بیشترین تخریب انرژی در مبادله کن هوا و پیل سوختی رخ می‌دهد. بیشترین هزینه تولید مربوط به برودت است و با بهینه‌سازی چندهدفه این سیستم می‌توان با بیشترین بازده انرژی ممکن، محصولات را با کمترین هزینه تولید کرد. با بررسی پژوهش‌های پیشین مشخص می‌شود که امکان ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با سیستم‌های تولید برودت به‌ویژه چرخه‌های تبرید جذبی امکان‌پذیر بوده، ولی چندان مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله یک سیستم ترکیبی جدید متشکل از پیل سوختی اکسید جامد و چرخه تبرید جذبی گس برای تولید همزمان توان و برودت معرفی و بررسی می‌شود. تحلیل

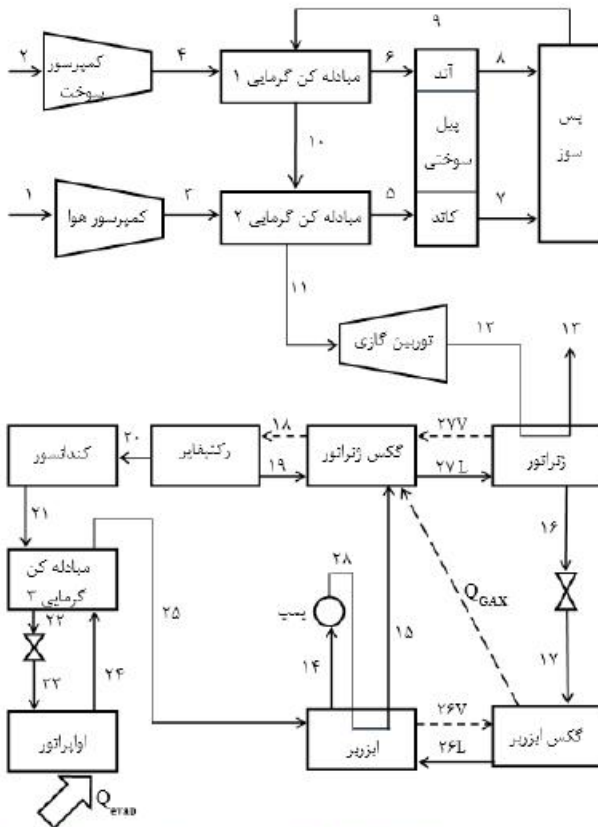


Fig. 1. Schematic diagram of SOFC-GT-GAX combined cycle

شکل ۱: چرخه ترکیبی پیل سوختی توربین گازی تبرید جذبی گسکس
محاسبه می شود [۱].

$$V_{Nernst} = \frac{-\Delta \bar{G}_f^0}{2F} + \frac{\bar{R}T_{cell}}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3)$$

در معادله فوق ولتاژ نرنست (ولت)، $\Delta \bar{G}_f^0$ انرژی آزاد گیبس واکنش الکتروشیمیایی در دمای واکنش و فشار استاندارد (کیلوژول بر کیلومول)، F ثابت فارادی، \bar{R} ثابت جهانی گازها (۸/۳۱۴ کیلوژول بر کیلومول بر کلوین)، T_{cell} دمای عملکردی پیل سوختی (کلوین) و در نهایت P_{H_2} ، P_{O_2} و P_{H_2O} به ترتیب فشار جزئی هیدروژن، اکسیژن و بخار آب هستند.

اما در عمل ولتاژ واقعی به دلیل وقوع برگشت ناپذیری‌ها کمتر از ولتاژ نرنست خواهد بود. افت ولتاژ مقاومتی به دلیل وجود مقاومت در برابر جریان یون‌ها و الکترون‌ها اتفاق می‌افتد و مقدار آن با استفاده از قانون اهم محاسبه می‌شود [۱۴].

$$V_{ohm} = i[1.7842 \times 10^{-7} \exp(600/T_{cell}) + 2.98 \times 10^{-9} \exp(-1392/T_{cell}) + 1.176 \times 10^{-9} \exp(10350/T_{cell}) + 1.02 \times 10^{-7} \exp(4690/T_{cell})] \quad (4)$$

V_{ohm} افت ولتاژ اهمی (ولت) و i چگالی جریان (آمپر بر مترمربع) است. مقداری از ولتاژ تولیدی برای غلبه بر سد انرژی فعالسازی و انجام واکنش در الکترودها مصرف می‌شود، که افت ولتاژ فعالسازی نامیده می‌شود. مقدار این افت ولتاژ توسط معادله نیمه تجربی باتلر - ولومر محاسبه می‌شود

الکتروشیمیایی مجزا و کاملی برای محاسبه ولتاژ و توان الکتریکی تولیدی پیل سوختی اکسیدجامد ارائه می‌شود. در ادامه تاثیر تغییر چگالی جریان و دمای کارکردی پیل سوختی بر عملکرد چرخه ترکیبی معرفی شده مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲- چرخه ترکیبی پیل سوختی اکسیدجامد - توربین گازی - تبرید جذبی گسکس

چرخه ترکیبی پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده می‌شود. با توجه به این شکل مهم‌ترین قسمت این سیستم، پیل سوختی اکسیدجامد است که با انجام واکنش الکتروشیمیایی در آن، گرما و توان الکتریکی تولید می‌شود. کمپرسورهای هوا و سوخت، مبادله‌کن‌های حرارتی و پس‌سوز برای فراهم کردن شرایط مناسب عملکرد پیل سوختی به چرخه اضافه شده‌اند. علی‌رغم کاهش دما و فشار در توربین، دمای جریان خروجی آن به قدری بالاست که توانایی تأمین انرژی لازم چرخه گسکس را دارد. فرضیات مورد استفاده عبارتند از [۲ و ۱۳]:

- سیستم در شرایط حالت پایا کار می‌کند.
- از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر می‌شود.
- هیچ یک از اجزای چرخه پیل سوختی - توربین گازی با محیط تبادل گرمایی ندارند.
- همه گازها در چرخه پیل سوختی رفتار گاز ایده‌آل را دارند.
- دمای جریان‌های خروجی آند و کاتد با هم برابر است.
- از افت فشار ناشی از اصطکاک در چرخه گسکس صرف‌نظر می‌شود.
- محلول‌های خروجی از چادب و ژنراتور در حالت تعادل بوده و در دمای جزء مربوطه خارج می‌شوند.

۳- مبانی و روش‌ها

به منظور بررسی عملکرد چرخه، با در نظر گرفتن هر جزء به‌عنوان یک حجم کنترل، معادلات بقای جرم و انرژی برای آن جزء نوشته شده است.

$$\sum_{i,k} \dot{m}_i - \sum_{e,k} \dot{m}_e = 0 \quad (1)$$

\dot{m}_i و \dot{m}_e به ترتیب دبی جرمی ورودی و خروجی (کیلوگرم بر ثانیه) هستند.

$$\dot{Q}_k - \dot{W}_k + \sum_{i,k} \dot{m}_i h_i - \sum_{e,k} \dot{m}_e h_e = 0 \quad (2)$$

\dot{Q}_k و \dot{W}_k به ترتیب گرما و کار تبدلی هر جزء با محیط (کیلووات) و h آنتالپی ویژه (کیلوژول بر کیلوگرم) می‌باشند.

۳-۱- مدل‌سازی پیل سوختی

مقدار نظری ولتاژ مدار باز پیل سوختی با استفاده از معادله نرنست

سوخت و ضریب بهره‌برداری هوا هستند.

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

$$\dot{W}_{SOFC} = i AN V_{cell} \quad (۱۴)$$

۳-۲- عملکرد ترمودینامیکی چرخه

مقدار توان خالص خروجی چرخه توان، برودت تولیدی چرخه گسکس و بازده انرژی چرخه به ترتیب برابر است با:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{SOFC} + \dot{W}_{GT} - \dot{W}_{AC} - \dot{W}_{FC} - \dot{W}_P \quad (۱۵)$$

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{23} (h_{24} - h_{23}) \quad (۱۶)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{evap}}{\dot{m}_f LHV} \quad (۱۷)$$

که در معادلات فوق:

\dot{W}_{net} : توان الکتریکی خالص چرخه (کیلووات)

\dot{W}_{GT} : توان الکتریکی تولیدی توربین گازی (کیلووات)

\dot{W}_{AC} : توان الکتریکی مصرفی کمپرسور هوا (کیلووات)

\dot{W}_{FC} : توان الکتریکی مصرفی کمپرسور سوخت (کیلووات)

\dot{W}_P : توان الکتریکی مصرفی پمپ (کیلووات)

\dot{Q}_{evap} : میزان سرمایش تولیدی در اولپراتور چرخه گسکس (کیلووات)

η_{th} : بازده انرژی

LHV : ارزش حرارتی پایین سوخت (کیلوژول بر کیلومول)

۳-۳- نرم افزار ای‌ای‌اس

نرم افزار ای‌ای‌اس با استفاده از خواص ترمودینامیکی مواد که در آن گنجانده شده است، حل همزمان معادلات بقای جرم و انرژی برای تک‌تک اجزای سیستم را امکان‌پذیر می‌کند.

۴- نتایج و بحث

نتایج مدل‌سازی الکتروشیمیایی پیل سوختی به دست آمده از کار حاضر با داده‌های تجربی موجود در مراجع [۳ و ۱۷] مقایسه شد که مطابق شکل ۲ تطابق بسیار خوبی بین آنها برقرار است و حداکثر اختلاف ۲/۶۷ درصد می‌باشد.

در مورد چرخه تبرید جذبی گسکس نتایج به دست آمده از مدل‌سازی با نتایج ارائه شده توسط مرجع [۱۳] مورد مقایسه قرار گرفت. همان طور که در شکل ۳ مشخص است، نتایج تطابق خوبی را نشان می‌دهند.

همچنین مقادیر توان خالص، بازده انرژی و بازگشت‌ناپذیری چرخه پیل سوختی اکسیدجامد با سوخت هیدروژن به دست آمده در کار حاضر با مقادیر متناظر گزارش شده در مرجع [۲] در جدول ۱ مقایسه می‌شود. نتایج در جدول

[۱۵]

$$V_{act} = \frac{\bar{R}T_{cell}}{F} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{i}{2i_0^a} \right) + \sinh^{-1} \left(\frac{i}{2i_0^c} \right) \right] \quad (۵)$$

$$i_0^a = 7 \times 10^9 \left(\frac{P_{H_2}}{P_0} \right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_0} \right) \exp \left(\frac{-110000}{\bar{R}T_{cell}} \right) \quad (۶)$$

$$i_0^c = 7 \times 10^9 \left(\frac{P_{O_2}}{P_0} \right)^{0.25} \exp \left(\frac{-155000}{\bar{R}T_{cell}} \right) \quad (۷)$$

در معادلات فوق V_{act} افت ولتاژ فعالسازی (ولت)، i_0^a و i_0^c به ترتیب چگالی جریان تبدیلی آند و کاتد (آمپر بر مترمربع) و P_0 فشار محیط استاندارد (بار) است.

در صورت برقراری جریان و انجام واکنش الکتروشیمیایی، گرادیان غلظت در الکترودها بوجود می‌آید، به طوری که باعث افت ولتاژ غلظتی می‌شود. افت ولتاژ غلظتی کل، مجموع افت ولتاژهای غلظتی آند و کاتد است [۱۶].

$$V_{con} = \frac{\bar{R}T_{cell}}{2F} \left[\ln \left(\frac{1 - i/i_{L,H_2}}{1 + i/i_{L,H_2O}} \right) + \ln \left(\frac{1}{1 - i/i_{L,O_2}} \right) \right] \quad (۸)$$

که در آن

$$i_{L,k} = \frac{2FD_{eff,k} P_k}{\bar{R}T_{cell} \delta_k} \quad (۹)$$

در دو معادله فوق V_{con} افت ولتاژ غلظتی (ولت)، i_L چگالی جریان حدی (آمپر بر مترمربع)، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر گاز (مترمربع بر ثانیه) (نحوه محاسبه این پارامتر در مرجع [۱۵] توضیح داده شده است) و δ_k ضخامت شار جریان (متر) است.

ولتاژ واقعی پیل سوختی با کم کردن مجموع افت ولتاژها از مقدار ولتاژ نظری (نرنست) به دست می‌آید:

$$V_{cell} = V_{Nernst} - (V_{ohm} + V_{act} + V_{con}) \quad (۱۰)$$

میزان مصرف هیدروژن در واکنش الکتروشیمیایی بستگی به میزان چگالی جریان داشته و با استفاده از قانون فارادی محاسبه می‌شود:

$$\dot{n} = \frac{iAN}{2F} \quad (۱۱)$$

که \dot{n} میزان مصرف هیدروژن در واکنش الکتروشیمیایی (کیلومول بر ثانیه)، A سطح فعال پیل سوختی (مترمربع) و N تعداد پیل سوختی است. با تعریف ضریب مصرف سوخت و بهره‌برداری هوا، به ترتیب مقادیر هیدروژن و اکسیژن ورودی به چرخه تعیین می‌شوند.

$$\dot{n}_{i,H_2} = \frac{iAN}{2u_f F} \quad (۱۲)$$

$$\dot{n}_{i,O_2} = \frac{iAN}{4u_a F} \quad (۱۳)$$

که در معادلات فوق \dot{n}_{i,O_2} و \dot{n}_{i,H_2} به ترتیب دبی مولی هیدروژن و اکسیژن ورودی به چرخه (کیلومول بر ثانیه) و u_f و u_a نیز به ترتیب ضریب مصرف

جدول ۲: نتایج مدل‌سازی چرخه ترکیبی و مقایسه آن با چرخه ساده پیل سوختی به ازای $r_p = 4$ ، $T_{cell} = 1073 \text{ K}$ ، $u_f = 0.8$ و $u_a = 0.15$

Table 2. Performance parameters for the SOFC-GT-GAX and the SOFC-GT systems ($I = 1000 \text{ A/m}^2$, $T_{cell} = 1073 \text{ K}$, $r_p = 4$, $u_f = 0.8$, $u_a = 0.15$)

پارامتر	با سوخت هیدروژن	با سوخت هیدروژن گکس
بازده انرژی (%)	۴۷/۳۳	۸۴/۵۹
توان خالص خروجی (کیلووات)	۱۱۰/۳	۱۰۹/۹
برودت تولیدی (کیلووات)	-	۸۷/۱۹
ولتاژ پیل سوختی (ولت)	۰/۷۸	۰/۷۸

در شکل ۴ تغییرات ولتاژ واقعی پیل سوختی با چگالی جریان نشان داده شده است. افزایش چگالی جریان به دلیل افزایش همه افت ولتاژهای درون پیل سوختی، باعث کاهش ولتاژ واقعی آن می‌شود.

شکل ۵ نشان‌دهنده تاثیر تغییر چگالی جریان بر توان خالص چرخه و برودت تولیدی چرخه گکس است. با افزایش چگالی جریان و علی‌رغم کاهش ولتاژ، توان تولیدی پیل سوختی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، میزان مصرف هیدروژن در پیل سوختی بیشتر شده 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 ۵، توان خالص خروجی چرخه زیاد می‌شود. به دلیل افزایش دما و دبی گازهای خروجی توربین، مقدار برودت تولیدی در اواپراتور بیشتر می‌شود.

تغییرات بازده انرژی چرخه پیشنهادی با چگالی جریان در شکل ۶ رسم شده است. مطابق این شکل، با افزایش چگالی جریان بازده چرخه

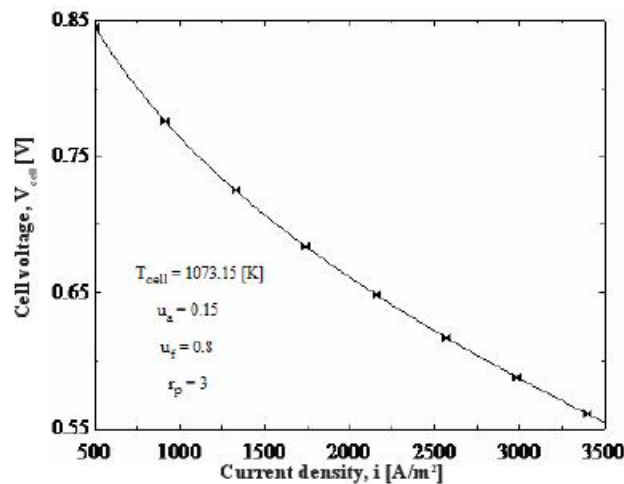


Fig. 4. Variations in the fuel cell voltage with current density

شکل ۴: تغییرات ولتاژ پیل سوختی با چگالی جریان

۱ حاکی از آن است که مدل‌سازی چرخه پیل سوختی اکسیدجامد با سوخت هیدروژن، با حداکثر خطای ۳٪ نتایج مطلوبی را ارائه می‌دهد.

نتایج مدل‌سازی چرخه ترکیبی با چرخه ساده پیل سوختی اکسیدجامد مطابق جدول ۲ مقایسه می‌شود. با توجه به این جدول ملاحظه می‌شود که بازده چرخه ترکیبی پیشنهادی به دلیل استفاده مفید از انرژی گازهای خروجی توربین گازی در ژنراتور چرخه گکس و تولید برودت، ۳۷/۲۶٪ بیشتر از چرخه پیل سوختی اکسیدجامد-توربین گازی است.

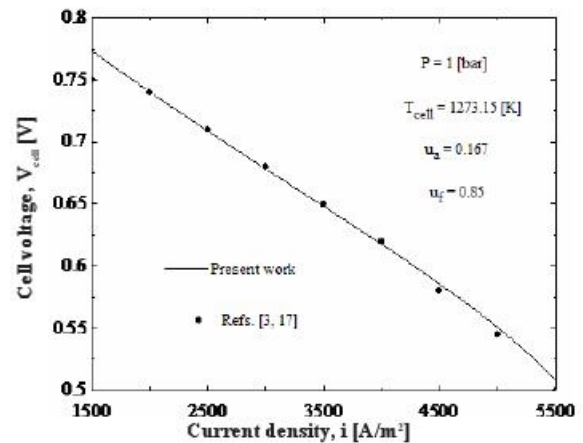


Fig. 2. Validation for fuel cell electrochemical model

شکل ۲: اعتباردهی مدل الکتروشیمیایی پیل سوختی

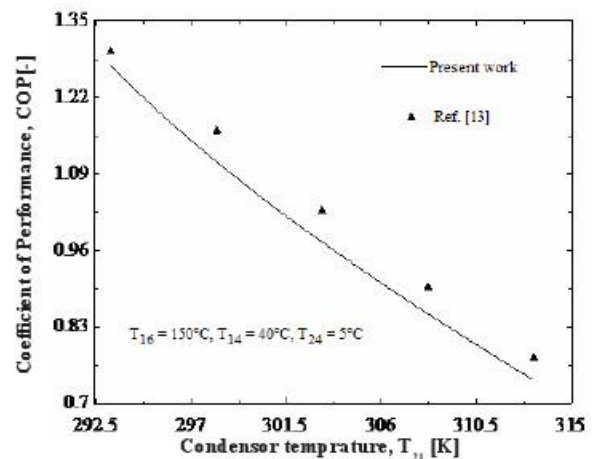


Fig. 3. Validation for GAX absorption refrigeration cycle

شکل ۳: اعتباردهی مدل الکتروشیمیایی پیل سوختی

جدول ۱: اعتبارسنجی چرخه پیل سوختی اکسیدجامد با سوخت هیدروژن

Table 1. Validation for hydrogen fed SOFC system

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

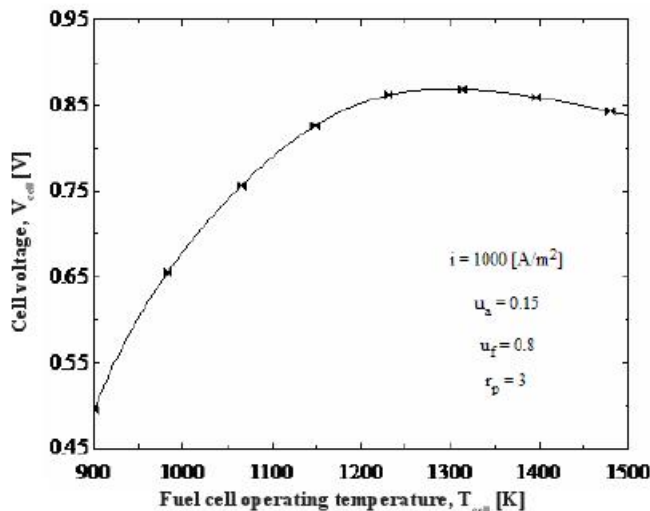


Fig. 7. Variations in the fuel cell voltage with its operating temperature

شکل ۷: تغییرات ولتاژ پیل سوختی با دمای عملکردی آن

و سپس کاهش می‌یابد. از طرفی تغییرات توان تولیدی توربین گازی و پیل سوختی به گونه‌ای است که توان خالص خروجی چرخه ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. با توجه به توضیحات فوق و مطابق شکل ۸ با افزایش دمای پیل سوختی، مقدار برودت تولیدی چرخه گسکس روند نزولی - صعودی دارد. تغییرات بازده چرخه با دمای پیل سوختی در شکل ۹ نمایش داده شده است. با توجه به این که تغییرات برودت تولیدی اولپراتور بر تغییرات توان خالص چرخه غلبه می‌کند، بازده چرخه ابتدا کاهش و سپس افزایش پیدا می‌کند. تغییر دمای عملکردی پیل سوختی تأثیری بر دبی سوخت ورودی به چرخه ندارد.

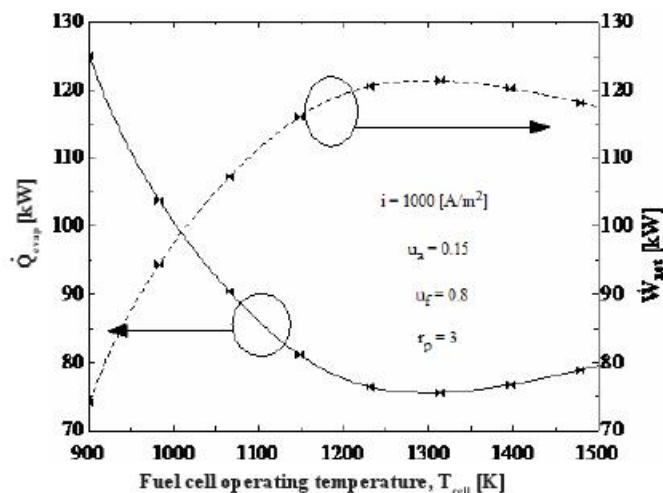


Fig. 8. Variations in the net electrical power and cooling capacity with fuel cell operating temperature

شکل ۸: تغییرات توان خالص خروجی چرخه و برودت تولیدی با دمای عملکردی پیل سوختی

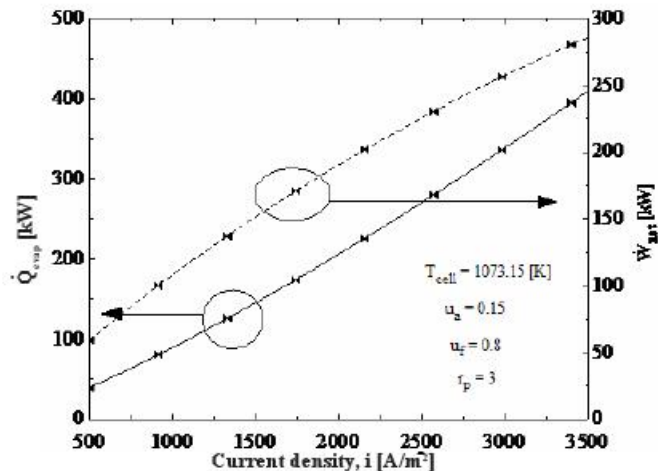


Fig. 5. Variations in the net electrical power and cooling capacity with current density

شکل ۵: تغییرات توان خالص خروجی و برودت تولیدی با چگالی جریان زیاد می‌شود. در حقیقت افزایش چگالی جریان باعث افزایش مجموع توان الکتریکی خالص و برودت تولیدی و نیز افزایش دبی سوخت ورودی می‌شود. به هر حال افزایش انرژی خروجی مفید چرخه بر افزایش انرژی ورودی آن غلبه کرده و موجب افزایش بازده با افزایش چگالی جریان می‌شود.

تغییر ولتاژ پیل سوختی بر اثر تغییر دمای عملکردی آن در شکل ۷ نشان داده شده است. افزایش دمای عملکردی پیل سوختی باعث کاهش همزمان افت ولتاژها و ولتاژ نرنست می‌شود. در دماهای پایین کاهش افت ولتاژها تأثیر بیشتری داشته و ولتاژ واقعی پیل سوختی افزایش می‌یابد. در صورتی که در دماهای بالاتر کاهش ولتاژ نرنست باعث کاهش ولتاژ پیل سوختی می‌شود.

در شکل ۸ تغییرات توان الکتریکی خالص خروجی چرخه و برودت تولیدی چرخه گسکس با دمای پیل سوختی رسم شده است. در چگالی جریان ثابت، توان تولیدی پیل سوختی فقط تابع ولتاژ بوده و در نتیجه ابتدا افزایش

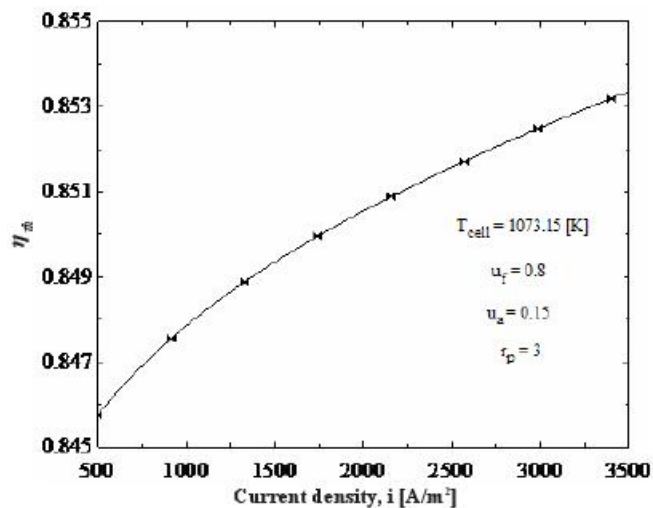


Fig. 6. Variations in the energy efficiency with current density

شکل ۶: تغییرات بازده انرژی با چگالی جریان

بر افزایش توان تولیدی غلبه کرده و سبب کاهش توان الکتریکی خالص خروجی چرخه می‌شود. همچنین افزایش دمای جریان‌های ورودی به پیل سوختی موجب افزایش دمای جریان خروجی از آن می‌شود. این افزایش دما افزایش گرمای داده شده به ژنراتور چرخه گکس و مقدار برودت تولیدی سیستم را سبب می‌شود.

شکل ۱۲ نشان‌دهنده تاثیر تغییر دمای محیط بر بازده انرژی چرخه است. مطابق این شکل با افزایش دمای محیط، بازده انرژی نیز به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند، که به دلیل غلبه افزایش برودت تولیدی بر کاهش توان الکتریکی خروجی است.

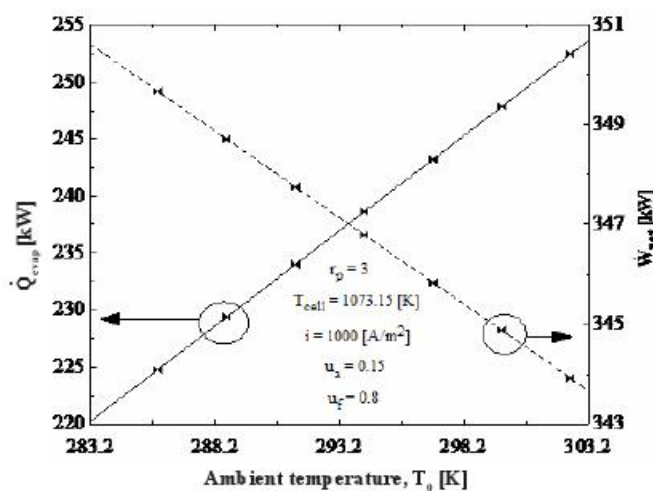


Fig. 11. Variations in the net electrical power and cooling capacity with ambient temperature

شکل ۱۱: تغییرات توان خالص خروجی و برودت تولیدی با دمای محیط

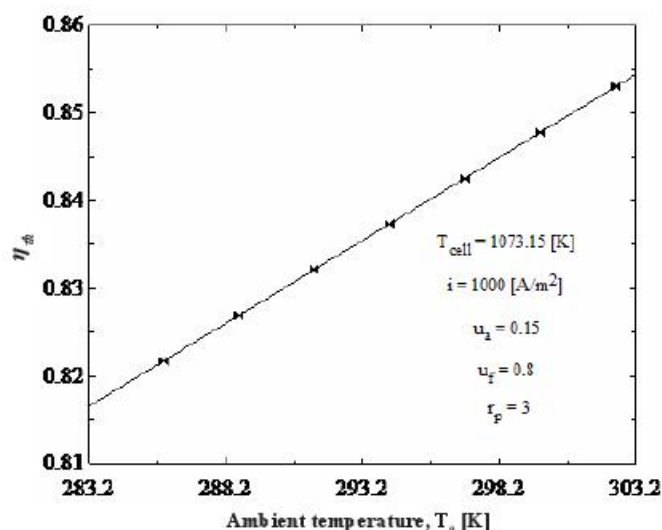


Fig. 12. Variations in the energy efficiency with ambient temperature

شکل ۱۲: تغییرات بازده انرژی با دمای محیط

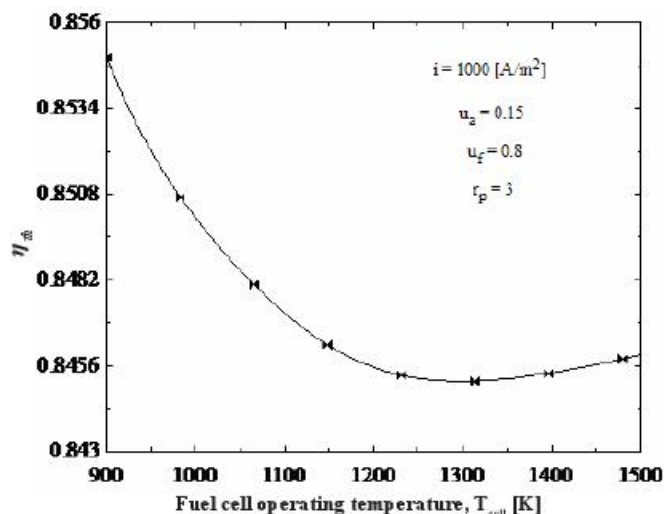


Fig. 9. Variations in the energy efficiency with fuel cell operating temperature

شکل ۹: تغییرات بازده انرژی با دمای عملکردی پیل سوختی

تاثیر تغییر دمای محیط بر عملکرد سیستم در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰ علی‌رغم افزایش دمای محیط از ۱۰ به ۳۰ درجه سانتیگراد، ولتاژ پیل سوختی ثابت می‌ماند. این مساله با توجه به فرمول‌های محاسبه ولتاژ نرنست و افت ولتاژها قابل توجیه است.

تغییرات برودت تولیدی و توان الکتریکی خالص خروجی سیستم با تغییر دمای محیط در شکل ۱۱ نشان داده شده است. به دلیل عدم تغییر ولتاژ پیل سوختی با دمای محیط و با توجه به این که چگالی جریان ثابت فرض شده است، توان تولیدی پیل سوختی تغییری نمی‌کند. با افزایش دمای محیط در حقیقت دمای سوخت و هوای ورودی به سیستم افزایش می‌یابد. این مساله باعث افزایش کار مصرفی کمپرسورهای سوخت و هوا و متعاقب آن افزایش کار تولیدی توربین گازی می‌شود. با این حال میزان افزایش توان مصرفی

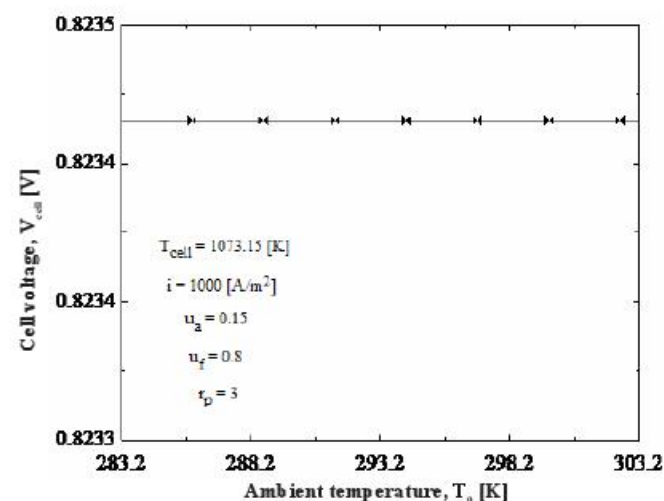


Fig. 10. Variations in the fuel cell voltage with ambient temperature

شکل ۱۰: تغییرات ولتاژ پیل سوختی با دمای محیط

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با ترکیب پیل سوختی اکسیدجامد با چرخه تبرید جذبی گکس چرخه ترکیبی جدیدی برای تولید همزمان توان الکتریکی-برودت معرفی شد. پس از بررسی نتایج حاصل از مدل سازی این چرخه می توان موارد ذیل را به عنوان جمع بندی کار ارائه نمود:

- با اضافه کردن چرخه گکس به سیستم پیل سوختی اکسیدجامد -توربین گازی، می توان از گرمای گازهای خروجی توربین گازی برای تولید برودت استفاده کرد. به طوری که بازده انرژی چرخه ترکیبی نسبت به چرخه ساده پیل سوختی افزایش قابل توجهی دارد.
- با افزایش چگالی جریان، به طور همزمان توان خالص چرخه، برودت تولیدی و دبی سوخت ورودی به چرخه افزایش می یابند به طوری که به دلیل بیشتر بودن میزان افزایش خروجی های مفید چرخه، بازده انرژی با افزایش چگالی جریان بیشتر می شود.
- افزایش دمای عملکردی پیل سوختی باعث می شود که بازده چرخه ابتدا کاهش و سپس افزایش یابد.
- با افزایش دمای محیط علی رغم کاهش توان تولیدی سیستم، بازده انرژی چرخه ترکیبی افزایش می یابد.

منابع

- cell for a trigeneration system", *Energy*, 87 (2015): 228-239.
- [7] Rokni M., "Thermodynamic and thermoeconomic analysis of a system with biomass gasification, solid oxide fuel cell (SOFC) and Stirling engine", *Energy*, 76 (2014): 19-31.
- [8] Al-Sulaiman F.A., F. Hamdullahpur and I. Dincer, "Performance comparison of three trigeneration systems using organic rankine cycles", *Energy*, 36(9) (2011): 5741-54.
- [9] Ranjbar F.; A. Chitsaz, S.M.S. Mahmoudi; Sh. Khalilarya and A. Rosen Marc, "Energy and exergy assessments of a novel trigeneration system based on a solid oxide fuel cell", *Energy Conversion and Management*, 87 (2014): 318-327.
- [10] Chitsaz A., S.M.S. Mahmoudi and A. Rosen Marc, "Greenhouse gas emission and exergy analyses of an integrated trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell", *Applied Thermal Engineering*, 86 (2015): 81-90.
- [11] Chitsaz A., A.S. Mehr and S.M.S. Mahmoudi, "Exergoeconomic analysis of a trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell", *Energy Conversion and Management*, 106 (2015): 921-931.
- [12] Sadeghi M.; A. Chitsaz; S.M.S. Mahmoudi and A. Rosen Marc, "Thermoeconomic optimization using an evolutionary algorithm of a trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell", *Energy*, 89 (2015): 191-204.
- [13] Ramesh Kumar A. and M. Udaya Kumar, "Studies of compressor pressure ratio effect on GAX absorption compression cooler", *Applied Energy*, 85.12 (2008): 1163-1172.
- [14] Bessette II N. F.; W. J. Wepfer and J. Winnick, "A mathematical model of a solid oxide fuel cell", *Journal of Electrochemical Society*, 142 (1995): 3792-3800.
- [15] Chan S. H.; K. A. Khor and 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 (2001): 130-140.
- [16] Chan S. H.; H. K. Ho and Y. Tian, "Multi level modeling of SOFC-gas turbine hybrid system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 28 (2003): 889-900.
- [17] Singhal S. C., "Advances in solid oxide fuel cell", *Journal of Solid State Ion*, 135 (2000): 305-313.
- [1] Larminie J. and A. Dicks, "*Fuel cell system explaining*", New York, John Wiley & Sons Inc., 2004.
- [2] Akkaya, B. Shahin and H. H. Erdem; "Exergetic performance coefficient analysis of a simple fuel cell system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 (2007): 4600-4609.
- [3] EG&G Technical Services Inc., "*Fuel Cell Handbook*", U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, 2004.
- [4] Haseli Y., I. Dincer and G. F. Naterer, "Thermodynamic analysis of a combined gas Turbine power system with a solid oxide fuel cell through exergy", *Thermochimica Acta*, 480 (2008): 1-9.
- [5] Calise F.; M. Dentice d'Accadia, A. Palombo and L. Vanoli; "Simulation and exergy analysis of a hybrid Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)-Gas Turbine System", *Journal of Energy*, 31 (2006): 3278-3299.
- [6] Tippawan P.; A. Arpornwichanop and I. Dincer, "Energy and exergy analyses of an ethanol-fueled solid oxide fuel

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

L. Khani and S. M. S. Mahmoudi, "A New Electrical Power and Cooling Cogeneration Cycle Based on a Solid Oxide Fuel Cell", *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(1) (2017) 231-237.

DOI: 10.22060/mej.2016.740



