



تحلیل ترمودینامیکی یک میکرو چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گاز

مسعود ابراهیمی^{۱*}، ایرج مرادپور^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کردستان، سنندج
 ۲- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه کردستان، سنندج
 *سنندج، ۱۵۱۷۵-۶۶۱۷۷ Ma.ebrahimi@uok.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک چرخه هیبریدی از ترکیب دو فناوری مدرن پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی به منظور تولید توان در مقیاس میکرو پیشنهاد شده است. پیل سوختی مورد نظر از یک بهساز خارجی جهت تبدیل گاز متان به هیدروژن استفاده می‌کند. گازهای خروجی از پیل سوختی که دارای کیفیت بالایی هستند در میکروتوربین گازی استفاده می‌شوند، تا ظرفیت تولید توان چرخه افزایش یابد. جهت تحلیل رفتار چرخه، مدل ترمودینامیکی چرخه ارائه و حل شده است. جهت اطمینان از عملکرد پیل سوختی، مقدار ولتاژ یک واحد پیل سوختی بر حسب چگالی جریان محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی سایر پژوهشگران مقایسه شده است. مقایسه صورت گرفته سازگاری خوبی را بین نتایج محاسباتی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. جهت بررسی رفتار چرخه تاثیر پارامترهای مختلفی از جمله چگالی جریان، فشار کاری پیل سوختی و دمای عملکرد بهساز را بر مقدار توان تولیدی پیل سوختی، توان تولیدی میکروتوربین گازی، بازدهی الکتریکی چرخه، بازدهی الکتریکی پیل، دمای عملکرد پیل و غیره بررسی شده است. همچنین حساسیت افت ولتاژهای مختلف پیل سوختی به پارامترهای عملکردی چرخه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در تولید برق در مقیاس میکرو صرفه‌جویی در مصرف سوخت حدود ۴۵٪ قابل دستیابی است. و بازدهی کلی در تولید برق نیز می‌تواند به بالای ۶۰٪ برسد.

کلیدواژه‌گان: پیل سوختی اکسید جامد، میکرو توربین گازی، چرخه هیبریدی، مقیاس میکرو

Thermodynamic analyses of a micro scale hybrid cycle of solid oxide fuel cell and micro-gas turbine

Masood Ebrahimi^{۱*}, Iraj Moradpoor^۲

^۱- Assistant Prof. Engineering department, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
^۲- Mechanical engineering student, Engineering department, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
 * P.O.B. ۶۶۱۷۷-۱۵۱۷۵ Kurdistan, Iran, ma.ebrahimi@uok.ac.ir
 Received: ۱۵ December ۲۰۱۵ Accepted: ۳۰ January ۲۰۱۶

Abstract

In the present paper, a hybrid cycle combining two novel technology of solid oxide fuel cell (SOFC) and micro gas turbine (MGT) to produce power in micro scale. The SOFC utilizes an external steam reformer to convert methane to hydrogen which is consumed as the SOFC main fuel. The fuel cell stack gas with high quality is used in a MGT to increase the cycle capability to produce more power. To analyze the cycle behavior a thermodynamic model is proposed and solved. In addition to make sure about the SOFC operation the cell voltage of the SOFC is calculated versus the current density and the calculated data is compared with experimental data presented by other researchers. The comparison shows a good agreement. To evaluate the cycle operation the impact of different parameters such as current density, cell working pressure and reforming temperature on the cycle performance criteria such as power generation by the SOFC, power generation by the MGT, cycle electrical efficiency, SOFC electrical efficiency, and SOFC working temperature are investigated. The results show that the fuel saving ratio of ۴۵% in power production and overall electrical efficiency of ۶۰% are achievable.

Keywords: solid oxide fuel cell, micro gas turbine, hybrid cycle, micro scale

۱- مقدمه

پیل‌های سوختی سیستم‌هایی جمع و جور، تمیز، با بازدهی بالا، آرام و بدون ارتعاش برای تولید برق از مقیاس میکرو تا مگاوات می‌باشند. در یک پیل سوختی سوخت نمی‌سوزد بلکه در یک واکنش الکتروشیمیایی، جریان مستقیم الکتروسیسته (DC) با تبادل یون‌ها بین آند و کاتد از طریق الکترولیت تولید می‌شود.

یکی دیگر از محصولات جانبی مهم در پیل سوختی گازهای خروجی با کیفیت‌های مختلف در پیل‌های سوختی متفاوت است. پیل‌های سوختی در انواع مختلفی در دسترس قرار دارند که از جمله آنها پیل سوختی آلکالین (AFC) غشاء تبادل پروتون (PEMFC)، متانول مستقیم (DMFC)، اسید فسفریک (PAFC)، کربنات مذاب (MCFC) و اکسید جامد (SOFC) [۱] قابل ذکر می‌باشند. از میان پیل‌های سوختی ذکر شده توسعه SOFC قبل از سایر پیل‌ها و از سال ۱۹۵۰ آغاز شده است در نتیجه فناوری آن بالغ‌تر است. SOFC مزایای ویژه‌ای نسبت به سایر پیل‌ها دارد که آن را برای کاربردهای تولید همزمان در مقیاس‌های مختلف بسیار مناسب کرده است. SOFC می‌تواند متان، هیدروژن و حتی مونو اکسید کربن را به عنوان سوخت استفاده کند. این پیل می‌تواند از هر دو روش بهسازی^۱ داخلی و خارجی برای تولید هیدروژن از سوخت‌های هیدروکربنی استفاده کند. دمای کاری این پیل در محدوده ۵۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است و در اندازه‌های ۲ کیلووات تا چند مگاوات در دسترس است [۲].

هزینه مواد مورد نیاز جهت ساخت SOFC در مقایسه با سایر پیل‌ها در حد متوسط است زیرا الکترولیت این پیل جامد است و ریخته‌گری به شکل‌های مختلف مانند لوله، صفحه‌ای و یا یکپارچه امکانپذیر است.

علاوه بر این ساختار سرامیک جامد SOFC مشکلات خوردگی را کاهش میدهد و باعث افزایش تحمل سلول در دماهای بالا شده است. همچنین سیلان^۲ الکترولیت که در الکترولیت‌های مایع یک مشکل اساسی می‌باشد در مورد SOFC دیگر مطرح نیست [۳].

SOFC برای مقاصد و کاربردهای مختلف بکاربرده می‌شود. این پیل علاوه بر تولید الکتروسیسته برای تولید توان در سیستم‌های هیبریدی، تولید همزمان حرارت و توان (CHP) و یا برای تولید همزمان سرمایه‌گذاری، گرمایش و توان (CCHP) نیز بکار برده می‌شود. منبع [۴] چهار چرخه سیکل هیبریدی متشکل از SOFC با بهسازی داخلی و توربین گاز را مورد بررسی قرار داده است. در این تحقیق همچنین تحلیل ترمودینامیکی برای ارزیابی تاثیر پارامترهای از قبیل دمای هوای ورودی کاتد و سوخت ورودی آند، دبی جرمی، فشار کاری پیل، ترکیب سوخت و اکسیدکننده بر معیارهای ارزیابی چرخه ارائه شده است [۴].

منبع [۵] آنالیز انرژی و اکسرژی یک چرخه هیبرید شامل یک پیل سوختی SOFC یک میکروتوربین گازی را ارائه نمود. راندمان انرژی MGT زمانی که با SOFC ترکیب شده است، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. بازده کلی الکتریکی چرخه حدود ۶۳٪ بدست آمده است. علاوه بر این راندمان حرارتی SOFC-MGT زمانی که به عنوان CHP مورد استفاده قرار گرفته است، ۸۶٪ است که در مقایسه با سیستم‌های مرسوم به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. علاوه بر این عملکرد چرخه در حالت‌های بار جزئی و بار کامل بررسی شده است.

یک تحلیل ترمودینامیکی دیگر که شامل تحلیل‌های انرژی و اکسرژی است برای چرخه هیبریدی دیگری شامل SOFC و توربین گازی توسط [۶] ارائه شده است. در چرخه پیشنهاد شده به محض این که هوا کمپرسور را ترک می‌کند یک بازیاب آن را قبل از ورود به SOFC پیش‌گرم می‌کند سپس محصولات SOFC قبل از ورود به توربین گازی برای سوزاندن سوخت باقیمانده وارد محفظه احتراق می‌شوند. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که بازده کلی انرژی و اکسرژی به ترتیب ۶۰/۶٪ و ۵۷/۹٪ است. تحقیقات و تجزیه و تحلیل‌های مشابه را می‌توان همچنین در [۷، ۸، ۹] یافت.

مطالعه پارامتری و تجزیه و تحلیل یک SOFC-GT در [۱۰] نشان میدهد که افزایش فشار کاری، بازدهی و کار خالص چرخه را افزایش میدهد اما افزایش دمای کاری پیل، کار خالص را کاهش داده در حالی که باعث افزایش بازدهی سیکل می‌شود.

یکی دیگر از سیستم‌های هیبریدی پیشنهاد شده solar-SOFC است که در آن سیستم‌های فتوولتائیک برای تولید برق خورشیدی استفاده میشوند در حالیکه کلکتورهای سهموی برای گرم کردن آب استفاده میشوند [۱۱]. در این چرخه گاز متان به عنوان منبع اصلی سوخت SOFC استفاده می‌شود و بازدهی کلی آن حدود ۸۷٪ بدست آمده است. یکی دیگر از تکنولوژی‌هایی که قابلیت ترکیب با SOFC را دارد موتور استرلینگ است. تعدادی از پژوهشگران به بررسی چنین چرخه‌ای از جنبه‌های ترمودینامیکی و اقتصادی پرداخته‌اند [۱۲]. اجزای مهم این چرخه عبارتند از سیستم تولید بایو گاز، SOFC و موتور استرلینگ که از حرارت خروجی SOFC استفاده میکند.

در این پژوهش SOFC با MGT به منظور تبدیل انرژی سوخت به الکتروسیسته و گرما تا حد امکان، ترکیب شده است. سوخت اصلی مورد استفاده متان می‌باشد. این چرخه قرار است که گرما و الکتروسیسته را در مقیاس میکرو تولید کند، و از برق نیز در صورت نیاز برای تولید سرمایه‌گذاری استفاده شود. از آنجا که SOFC قلب چرخه است مدل ریاضی آن را با داده‌های تجربی موجود در منابع معتبر مقایسه کرده و صحت اعتبار آن نیز بررسی شده است.

مدل ترمودینامیکی چرخه در نرم افزار EES (Engineering Equation Solver) حل شده است و تاثیر پارامترهای طراحی بر روی مشخصه‌های عملکردی چرخه گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب SOFC و MGT بازدهی الکتریکی و بازدهی کلی چرخه را افزایش میدهد و صرفه جویی قابل توجهی در مصرف سوخت بدست آمده است.

۲- توصیف چرخه SOFC-MGT:

چرخه پیشنهاد شده در این مقاله در شکل ۱ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که هوا و سوخت قبل از ورود به بهساز در کمپرسور فشرده می‌شوند. سپس هوای فشرده شده درست قبل از ورود به پیل پیش‌گرم می‌شود. در حالی که متان که به عنوان سوخت اصلی در نظر گرفته می‌شود با بخار در یک مخلوط‌کننده قبل از ورود به اصلاح‌کننده مخلوط می‌شود. متان در واکنش بهسازی برای تولید هیدروژن و مونواکسیدکربن شرکت می‌کند. مونواکسید کربن زمانی که در واکنش دگرگونی با بخار آب شرکت می‌کند به دی-اکسیدکربن تبدیل شود. در این نوع پیل یون‌های اکسیژن حامل بار هستند و پس از این که آب با هیدروژن ترکیب می‌شود از کاتد به آند جریان می‌یابد. در برگشت الکترون‌ها از آند به کاتد و از طریق یک مدار خارجی برای تولید جریان الکتریکی جریان می‌یابند.

محصول جانبی دیگر پیل اکسید جامد گازهای داغ خروجی از پیل است. مقدار انرژی موجود در گازهای خروجی این پیل ابتدا وارد محفظه احتراق

^۱ Reformer^۲ Flooding

$$K_{p,sh} = e^{\left(\frac{\Delta g_{sh}}{R_u T_7}\right)} \quad (5)$$

$$\Delta g_{sh} = \Delta h_{sh} - T_7 \Delta s_{sh}$$

که در آن $h = h_{formation} + h_{@T_7} - h_{@T_0}$ و $s = s_{@(T_7, P_{cell})}$ می‌باشد. همچنین h و g و s بترتیب آنتالپی، تابع گیبس و آنترپوی هر جزء می‌باشد. وقتی که نرخ جریان مولی هر جزء در خروجی آند و کاتد محاسبه شد. فشار جزئی هر جزء در خروجی آند و کاتد از معادله زیر قابل محاسبه است

$$P_i = \frac{\dot{n}_i}{\dot{n}_{tot}} P_{cell} \quad (6)$$

ولتاژ مدار باز برگشت‌پذیر با استفاده از معادله نرنست قابل محاسبه خواهد بود:

$$V_{rev} = \frac{-\Delta G^0}{n_e F} + \frac{R_u T_7}{n_e F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad (7)$$

که در آن ΔG^0 تغییر انرژی آزاد تابع گیبس در حالت استاندارد برای بخار آب می‌باشد که به دلیل اکسیداسیون هیدروژن موجود می‌آید. n_e تعداد الکترون‌های آزاد در واکنش و $F=96485$ ثابت فارادی است.

ولتاژ مدار باز برگشت پذیر بخاطر برگشت‌ناپذیری‌های مربوط به فعالسازی و غلظت و اهمیت دست‌یافتنی نیست. بنابراین به منظور محاسبه ولتاژ مفید و نهایی باید افت ولتاژ ناشی از این برگشت‌ناپذیری‌ها نیز محاسبه شوند.

افت ولتاژ فعالسازی ζ_{act} ناشی از سرعت کم واکنش در سطح الکتروود می‌باشد. به عنوان یک نتیجه بخشی از ولتاژ برای در جریان نگاه‌داشتن واکنش الکتروشیمیایی و انتقال به (یا از) الکتروودها از دست می‌رود. [۱]

این افت ولتاژ از طریق معادله بالتر-ولمر قابل محاسبه است [۱۳ و ۱۵]

$$\zeta_{act,an} = \frac{2R_u T_7}{N_e F} \arcsin h \left(\frac{i}{2i_{0,an}} \right)$$

$$\zeta_{act,ca} = \frac{2R_u T_7}{N_e F} \arcsin h \left(\frac{i}{2i_{0,ca}} \right) \quad (8)$$

$$\zeta_{act} = \zeta_{act,an} + \zeta_{act,ca}$$

که در آن $i_{L,an}$ و $i_{L,ca}$ بترتیب چگالی جریان حدی کاتد و آند می‌باشند.

افت ولتاژ اهمی ζ_{ohm} ناشی از مقاومت الکتروودها، الکتrolیت، و ارتباط دهنده‌ها در مسیر جریان الکترون‌ها و یون‌ها می‌باشد که از روابط زیر قابل محاسبه‌اند [۴]:

$$\zeta_{ohm} = I(r_{an} + r_{ca} + r_{el} + r_{int})$$

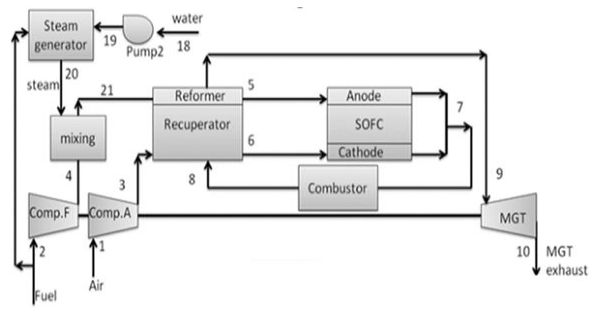
$$r = \delta \rho, \rho = A \exp \left(\frac{B}{T_7} \right) \quad (9)$$

$I = n_e F z$ که در آن I جریان الکتریکی کلی، و r مقاومت مربوط به آند، کاتد، الکتrolیت و ارتباط دهنده‌ها می‌باشد. همچنین ρ مقاومت ویژه مواد مربوطه است. همچنین δ و A و B ثابت هستند که به اجزای مواد بستگی داشته و که در جدول ۱ فهرست شده‌اند.

افت ولتاژ غلظت ζ_{con} فقدان ولتاژ ناشی از محدودیت انتقال جرم گازها در عبور از الکتروودهای متخلخل است [۳].

شده تا سوخت باقی‌مانده را در خروجی پشته بسوزاند. سپس خروجی محفظه احتراق به منظور فراهم کردن گرما برای پیش‌گرم کردن گازهای ورودی آند و کاتد استفاده می‌شود.

میکروتوربین‌گازی درست بعد از به‌ساز قرار دارد. این میکرو توربین به منظور تولید مجدد الکتریسیته از گازهای پیل و هم‌چنین فراهم کردن کار لازم برای کمپرسورهای هوا و سوخت استفاده شده‌است. در میکروتوربین-گازی انرژی پشته گرفته می‌شود تا زمانی که فشار آن به حدود فشار اتمسفر می‌رسد.



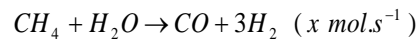
شکل ۱ طرح کلی چرخه پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین

۳- مدلسازی:

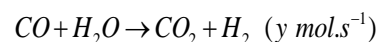
۳-۱- مدلسازی پیل سوختی:

در پیل سوختی اکسید جامد گرما و الکتریسیته طی یک واکنش الکتروشیمیایی که در داخل پیل اتفاق می‌افتد تولید می‌شوند. برای رسیدن به واکنش الکتروشیمیایی، دو واکنش تعادلی میانی از جمله به‌سازی و ارتقا باید به شرح زیر کامل شوند:

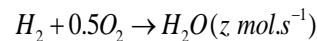
واکنش به‌سازی بصورت زیر می‌باشد:



همچنین واکنش ارتقا بصورت زیر می‌باشد:



و واکنش کلی پیل بصورت زیر قابل بیان است:



که در آن x ، y و z می‌توانند مطابق سه معادله زیر که این پارامترها را با ثابت تعادل (K) و ضریب مصرف سوخت مرتبط می‌سازند به دست آیند:

$$K_{p,ref} = \frac{\dot{n}_{H_2,out}^3 \times \dot{n}_{CO,out}}{\dot{n}_{CH_4,out} \times \dot{n}_{H_2O,out}} \left(\frac{P_{cell}}{\dot{n}_{total,out}} \right)^2 \quad (1)$$

$$K_{p,sh} = \frac{\dot{n}_{CO_2,out} \times \dot{n}_{H_2,out}}{\dot{n}_{CO,out} \times \dot{n}_{H_2O,out}} \quad (2)$$

$$U_{fuel} = \frac{z}{\dot{n}_{H_2,in} + \dot{n}_{CO,in} + 3x + y} \quad (3)$$

که در آن زیرنویس‌های ref و sh به ترتیب معرف واکنش‌های به‌سازی و ارتقاء می‌باشند. همچنین ثابت تعادل می‌تواند از رابطه زیر محاسبه شود:

$$K_{p,ref} = e^{\left(\frac{\Delta g_{ref}}{R_u T_7}\right)} \quad (4)$$

$$\Delta g_{ref} = \Delta h_{ref} - T_7 \Delta s_{ref}$$

بازیافتنی از توده SOFC را کاهش میدهد. باردهی پیل اکسید جامد می‌تواند از رابطه زیر قابل محاسبه باشد:

$$\eta_{SOFC} = \frac{E_{SOFC,AC}}{F_{SOFC}} \quad (18)$$

$$F_{SOFC} = \dot{m}_{fuel} LHV_{CH_4} \quad (19)$$

۲-۳- مدلسازی سایر تجهیزات چرخه:

سایر اجزای چرخه شامل محفظه احتراق پس سوز، کمپرسورهای سوخت و هوا، بهساز، پیش گرمکن، محفظه اختلاط، و میکرو توربین می باشد که معادلات حاکم بر آنها در ادامه بصورت فشرده آورده شده اند:

دمای خروجی از کمپرسور، و کار مصرفی هر کمپرسور بصورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\frac{T_{out,s}}{T_{in}} = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \quad (20)$$

$$\eta_{comp} = \frac{T_{out,s} - T_{in}}{T_{out,r} - T_{in}}$$

$$W_{comp, fuel} = \dot{n}_2 \bar{C}_{p,2-4} (T_4 - T_2)$$

$$W_{comp, air} = \dot{n}_1 \bar{C}_{p,1-3} (T_3 - T_1) \quad (21)$$

$$W_{comp} = W_{comp, air} + W_{comp, fuel}$$

بعد از کمپرسور سوخت یک محفظه اختلاط برای مخلوط کردن بخار آب اشباع و سوخت قبل از بهساز استفاده می‌شود. فشار بخار آب همان فشار خروجی از کمپرسور است.

شایان ذکر است که در برخی تحقیقات بخار لازم برای اصلاح کننده را از محصولات خروجی آند تامین کرده‌اند. بهر حال بخار لازم را می‌توان به طور مستقیم همانطور که در این تحقیق انجام شده است فراهم کرد. بدیهی است که سیستم بخار مستقیم نیاز به یک سیستم پمپاژ و یک مولد بخار دارد. معادلات مربوط به سیستم پمپاژ و مولد بخار به شرح زیر هستند:

$$F_{steam} = \dot{n}_{20} (h_{20} - h_{19}) / \eta_{boiler} \quad (22)$$

$$\eta_{pump} (h_{18} - h_{19,r}) = (h_{18} - h_{19,s}) \quad (23)$$

$$W_{pump2} = \dot{n}_{18} (h_{19,r} - h_{18})$$

در محفظه اختلاط نیز می‌توان نوشت:

$$\dot{n}_{20} C_{p,20} T_{20} + \dot{n}_4 C_{p,4} T_4 = \dot{n}_{21} C_{p,21} T_{21} \quad (24)$$

گرمای مورد نیاز در فرآیند بهسازی و پیش گرمکنی نیز بصورت زیر محاسبه خواهند شد:

$$Q_{fuel,ref} = Q_{ref} + Q_{sh}$$

$$Q_{air,rec} = \dot{n}_6 \bar{C}_{p,6-3} (T_6 - T_3) \quad (25)$$

$$Q_{rec} = Q_{fuel,ref} + Q_{air,rec}$$

$$Q_{rec} = \epsilon_{rec} \dot{n}_7 \bar{C}_{p,9-8} (T_8 - T_9)$$

گازهای خروجی از پیل ممکن است حاوی هیدروژن و متان باشند که می‌توانند به عنوان یک سوخت در محفظه احتراق پس سوز سوزانده شوند. محفظه احتراق نیز می‌تواند به شکل زیر مدلسازی شود:

$$\dot{n}_8 C_{p,8} T_8 - \dot{n}_7 C_{p,7} T_7 =$$

$$(\dot{n}_{H_2,out} M_{H_2} LHV_{H_2} + \dot{n}_{CH_4,out} M_{CH_4} LHV_{CH_4}) \eta_{comb} \quad (26)$$

$$\zeta_{con,an} = \frac{R_u T_7}{N_e F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_{L,an}} \right)$$

$$\zeta_{con,ca} = \frac{R_u T_7}{N_e F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_{L,ca}} \right) \quad (10)$$

$$\zeta_{con} = \zeta_{con,an} + \zeta_{con,ca}$$

که در آن $i_{L,an}$ و $i_{L,ca}$ بترتیب چگالی جریان حدی کاتد و آند می‌باشند.

جدول ۱ پارامترهای ثابت مربوط به افت ولتاژ اهمی [۵]

پارامتر	A	B	δ
کاتد	۰/۰۰۰۰۸۱۱	۶۰۰	۰/۰۰۲۲
آند	۰/۰۰۰۰۲۹۸	-۱۳۹۲	۰/۰۰۰۱
الکترولیت	۰/۰۰۰۰۲۹۴	۱۰۳۵۰	۰/۰۰۰۰۴
ارتباط دهنده‌ها	۰/۰۰۱۲	۴۶۹۰	۰/۰۰۰۰۸۵

وقتیکه افت ولتاژها محاسبه شدند ولتاژ خالص افت توان، جریان مستقیم، توان، و توان متناوب باید محاسبه شوند.

$$V_{net} = V_{rev} - \zeta_{act} - \zeta_{con} - \zeta_{ohm} \quad (11)$$

$$E_{SOFC,DC} = IV_{net}$$

$$E_{loss} = I(\zeta_{act} + \zeta_{con} + \zeta_{ohm}) \quad (12)$$

$$E_{SOFC,AC} = \eta_{inv} E_{SOFC,DC}$$

که در آن E و η_{inv} به ترتیب الکتریسیته و بازده تبدیل جریان مستقیم به متناوب است.

دمای کاری پیل سوختی T_V که در همه محاسبات قبلی استفاده شده است هنوز مجهول است. به منظور محاسبه T_V جدید معادله تعادل انرژی پیل سوختی و یک روش آزمون و خطا باید استفاده شود. حل معادلات تا زمانی ادامه می‌یابد که اختلاف T_V فرض شده با T_V جدید بسیار کم شود مثلاً به اندازه یک درجه سلسیوس اختلاف داشته باشند. انرژی الکتروشیمیایی در اکسیداسیون هیدروژن آزاد شده و تبدیل به توان الکتریکی و حرارت می‌شود. تغییر آنتالپی مربوط به واکنش الکتروشیمیایی؛ حرارت مصرف شده برای بهسازی، و حرارت آزاد شده در فرآیند ارتقاء در زیر محاسبه شده‌اند:

$$\Delta H_{elec} = z(h_{H_2O} - h_{H_2} - 0.5h_{O_2}) \quad (13)$$

$$Q_{ref} = x(h_{CO} + 3h_{H_2} - h_{CH_4} - h_{H_2O}) \quad (14)$$

$$Q_{sh} = y(h_{CO_2} + h_{H_2} - h_{CO} - h_{H_2O})$$

$$Q_{elec} = \Delta H_{elec} - Q_{air,rec} + Q_{surr} + E_{SOFC,DC} \quad (15)$$

$$Q_{elec} = zT_{7,new} \Delta s + E_{loss} \quad (16)$$

$$\Delta s = (s_{H_2O} - s_{H_2} - 0.5s_{O_2})$$

$$+ \frac{R_u}{2} \ln \left(\frac{P_{O_2} P_{H_2}^2}{P_{H_2O}^2} \right) \quad (17)$$

فرآیند بهسازی یک فرآیند گرماگیر است ($Q_{ref} > 0$) بنابراین مقداری از انرژی داخلی صرف بهسازی می‌شود. در مقابل فرآیند دگرگونی و فرآیند الکتروشیمیایی گرمازا بوده ($Q_{sh} < 0$ and ΔH_{elec}) از اینرو مقداری از انرژی داخلی را تولید می‌کنند. علاوه بر این اتلاف گرما با محیط ($Q_{surr} > 0$) حرارت

	۵		
$(\%) \eta_{boiler}$	۰,۸	$LHV_{CH_4} (kJ.kg^{-1})$	5×10^4
	۵		
$(\%) \eta_{inv}$	۰,۹	$LHV_{H_2} (kJ.kg^{-1})$	12×10^4
	۲		

۴- نتایج:

از آنجایی که SOFC قلب چرخه پیشنهاد شده می‌باشد، به منظور کسب اطمینان درباره نتایج باید یک اعتبارسنجی درباره عملکرد SOFC انجام شود. در این مطالعه با استفاده از مدل ارائه شده در این پژوهش و داده‌های تجربی جدول داده شده در منبع [۱۶]، ولتاژ خالص نسبت به چگالی جریان محاسبه شده است. مقایسه بین نتایج این شبیه‌سازی و داده‌های تجربی در شکل ۲ رسم شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج مدل به داده‌های تجربی نزدیک هستند. همچنین به منظور نشان دادن توافق نتایج دیاگرام $\pm 5\%$ خطا نسبت به داده‌های تجربی رسم شده است. میتوان ملاحظه کرد که در اکثر چگالی جریان‌ها ولتاژ خالص با در نظر گرفتن خطای کمتر از 5% محاسبه شده است. به منظور درک رفتار چرخه یک مطالعه پارامتری برای بررسی اثر ۳ پارامتر بحرانی بر روی عملکرد چرخه انجام شده است. پارامترهای طراحی شامل چگالی جریان، فشار کاری پیل (P_{cell}) و دمای ورودی پیل ($T_{in,FC} = T_{sc} = T_{\tau}$) می‌باشند. تاثیر این ۳ پارامتر بر مشخصه‌های اصلی چرخه شامل ولتاژ خالص (V_{net})، افت ولتاژ (ΔV)، الکتروسیته تولیدی (E)، بازدهی پیل (η_{FC})، بازدهی الکتریکی چرخه کلی (η_{ele}) و نرخ ذخیره انرژی پیل (FESR) بررسی شده است.

شکل ۳ نشان میدهد که افزایش چگالی جریان افت ولتاژ را افزایش میدهد. تاثیر چگالی جریان بر روی افت ولتاژهای ناشی از غلظت و فعالسازی قابل توجه است. به عنوان یک نتیجه وقتی که چگالی جریان افزایش یابد، ولتاژ خالص پیل سوختی کاهش می‌یابد. کاهش ولتاژ خالص باعث کاهش الکتروسیته تولیدی پیل سوختی و همچنین کاهش بازدهی پیل سوختی می‌شود. این موضوع در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است. همانطور که از این نتایج دیده می‌شود مجموع الکتروسیته تولیدی (E_{cycle}) زیر ۲۰ kW است که می‌توان این چرخه را به عنوان یک سیستم تولید برق در مقیاس میکرو در نظر گرفت.

نتایج همچنین نشان میدهند که با افزایش P_{cell} ولتاژ خالص در ابتدا افزایش می‌یابد تا در P_{cell} برابر با ۸ bar به حداکثر مقدار برسد و سپس کاهش می‌یابد (شکل ۶). دلیل این رفتار این است زمانیکه فشار پیل افزایش می‌یابد افت ولتاژهای ناشی از غلظت و فعالسازی کاهش می‌یابند درحالیکه افت ولتاژ اهمی افزایش می‌یابد. اگرچه الکتروسیته تولیدی پیل سوختی در ۹ bar به حداکثر مقدار خود میرسد اما مجموع الکتروسیته تولیدی توسط چرخه در فشار ۴ بار به حداکثر مقدار خود میرسد (شکل ۸). این نشان میدهد که ترکیب SOFC و MGT باعث می‌شود که یک کمپرسور کوچکتر استفاده شود.

افزایش دمای بهسازی در ابتدا ولتاژ خالص را افزایش میدهد. سپس به مقدار ماکزیمم خود میرسد و در همان مقدار از دمای ۹۳۴K تا ۹۶۲K ثابت می‌ماند و سپس کاهش می‌یابد (شکل ۹). دمای بهسازی در این مورد پیشنهاد می‌شود که بالاتر از ۱۰۴۵K باشد (شکل ۱۰). مقدار صرفه‌جویی در

که در آن η_{comb} بازده محفظه احتراق است و LHV ارزش حرارتی پایین سوخت است. از حل معادله بالا T_{sc} محاسبه خواهد شد. بازدهی MGT مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{MGT} = \frac{W_{MGT} - W_{com,air} - W_{com,fuel}}{\dot{n}_9 C_{p,9} T_9 - \dot{n}_3 C_{p,3} T_3 - \dot{n}_4 C_{p,4} T_4} \quad (27)$$

بعد از محاسبه W_{MGT} از معادله بالا، دمای خروجی MGT میتواند با استفاده از معادله تعادل انرژی میکرو توربین مطابق زیر محاسبه شود.

$$W_{MGT} = \dot{n}_9 C_{p,9} T_9 - \dot{n}_{10} C_{p,10} T_{10} \quad (28)$$

$$E_{MGT} = (W_{MGT} - W_{comp,air} - W_{comp,fuel}) \eta_{gen}$$

که در آن η_{gen} بازدهی ژنراتور می‌باشد. لازم به ذکر است از آنجا که $C_{p,10}$ فقط تابع دماست یک روش آزمون و خطای ساده برای محاسبه آن استفاده می‌شود.

بازده الکتریکی چرخه با توجه به برق تولید شده توسط چرخه SOFC-MGT تعیین می‌شود.

$$\eta_{ele} = \frac{E_{tot}}{F_{SOFC}} = \frac{(E_{SOFC,AC} + E_{MGT})}{F_{SOFC}} \quad (29)$$

همچنین نسبت صرفه‌جویی انرژی سوخت (FESR) با توجه به سیستم های مرسوم تولید برق مطابق زیر به دست می‌آید.

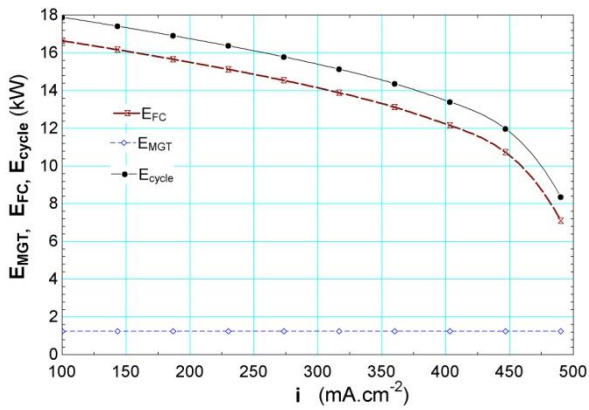
$$FESR = \frac{F_{conv} - F_{SOFC}}{F_{conv}} \quad (30)$$

$$F_{conv} = E_{tot} / (\eta_{pp} \eta_{grd})$$

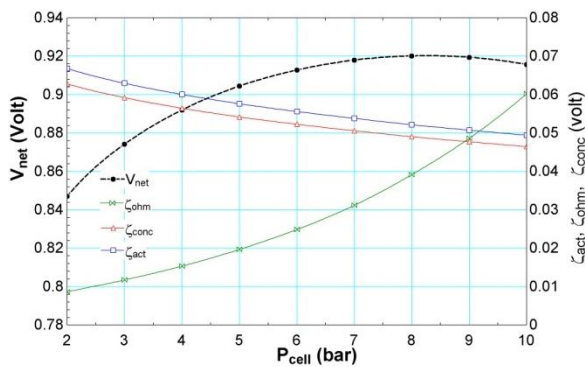
مقادیر پارمترهای ثابت استفاده شده در مدلسازی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱): پارامترهای ثابت و داده های فنی استفاده شده در شبیه سازی [۱۳ و ۱۴]

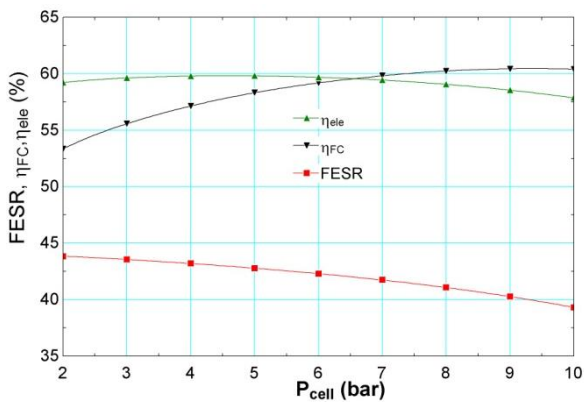
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۲	N_e	۰,۸	$U_{fuel} (\%)$
۵۰۰	$i_{L,ca} (mA.cm^{-2})$	۵	$R_u (kJ.mole^{-1}.K^{-1})$
۵۰۰	$i_{L,ca} (mA.cm^{-2})$	۰,۹	$\eta_{comb} (\%)$
۶۵۰	$i_{0,an} (mA.cm^{-2})$	۷	$\mathcal{E}_{rec} (\%)$
۲۶۰	$i_{0,ca} (mA.cm^{-2})$	۵	$\eta_{comp} (\%)$
۲۵	$T_{amb} (^{\circ}C)$	۰,۳	$\eta_{pp} (\%)$
۱	$P_{amb} (bar)$	۰,۸	$\eta_{grd} (\%)$
۰,۱۵	$A_{cell} (m^2)$	۶	$\eta_{MGT} (\%)$
2.2×10^{-3}	$t_{ca} (m)$	۷	$\eta_{HRSRG} (\%)$
0.1×10^{-3}	$t_{an} (m)$	۵	$\eta_{pump} (\%)$
۰,۹۷	$\eta_{gen} (\%)$	۰,۸	$\eta_{cond} (\%)$



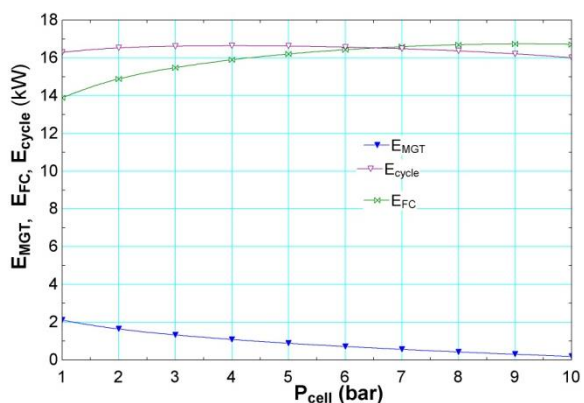
شکل ۵ اثر چگالی جریان بر برق تولیدی پیل، میکرو توربین و چرخه



شکل ۶ اثر فشار عملکرد پیل بر ولتاژ خالص و افت ولتاژها

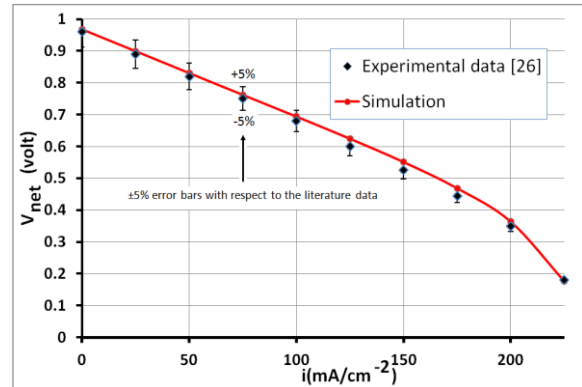


شکل ۷ اثر فشار کاری پیل بر بازدهی و کاهش مصرف سوخت

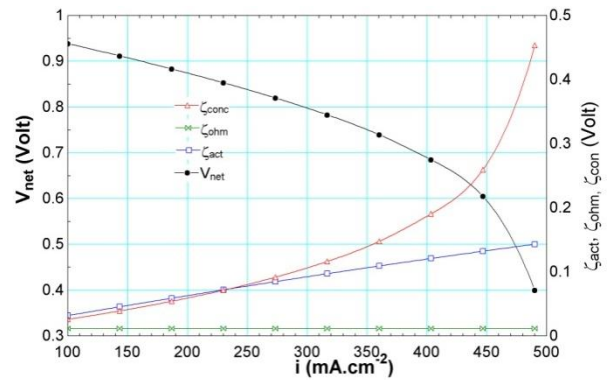


شکل ۸ اثر فشار کاری پیل بر برق تولیدی پیل، میکرو توربین و چرخه

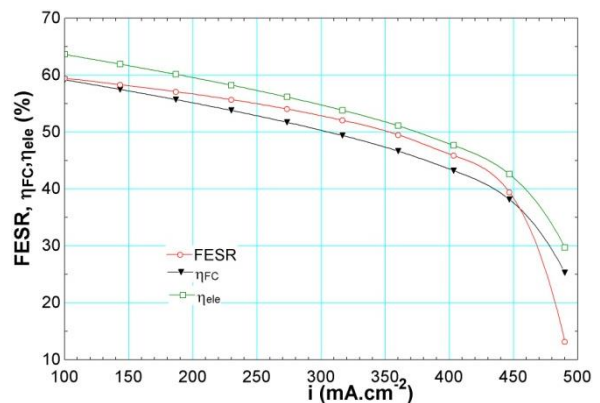
مصرف سوخت در ۱۰۴۵K حداکثر می شود و بازدهی کلی با افزایش دمای بهسازی افزایش می یابد، عملکرد پیل سوختی نسبت به عملکرد کل چرخه متفاوت است. بازدهی الکتریکی SOFC در ۹۳۴K حداکثر می شود. و بازدهی الکتریکی چرخه در ۹۶۱K حداکثر می شود و تقریباً در همان مقدار باقی می ماند.



شکل ۹ مقایسه ولتاژ خالص محاسبه شده و نتایج تجربی [۱۶]

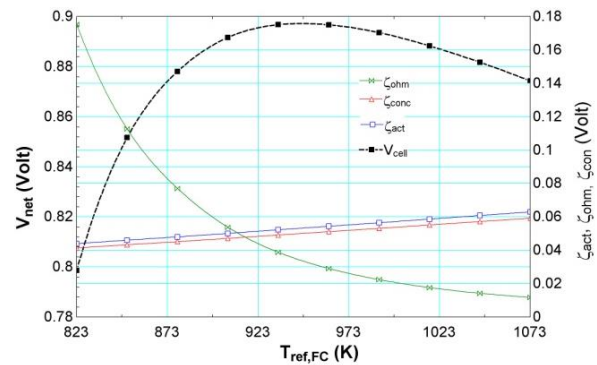


شکل ۱۰ اثر چگالی جریان بر ولتاژ خالص و افت ولتاژها

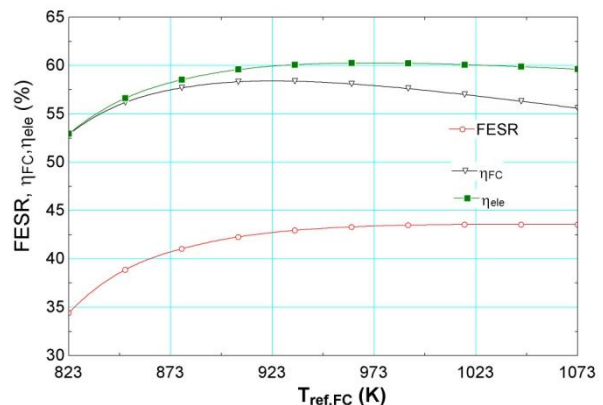


شکل ۱۱ اثر چگالی جریان بر بازدهی و کاهش مصرف سوخت

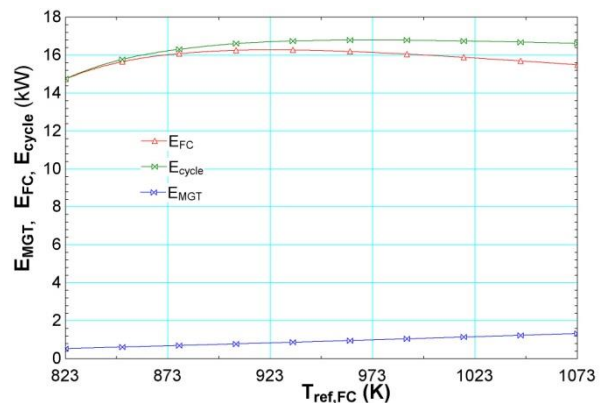
- [۳] EG&G Technical Services, Inc, Fuel Cell Handbook, ۷th Ed., U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, ۲۰۰۴
- [۴] A. F. Massardo, F. Lubelli, Internal reforming solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycles (IRSOFC-GT): part a— cell model and cycle and thermodynamic analysis, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, JANUARY ۲۰۰۰ Vol. ۱۲۲ / ۲۷
- [۵] S. Campanari, Full load and part-load performance prediction for integrated SOFC and microturbine systems, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, APRIL ۲۰۰۰, Vol. ۱۲۲ / ۲۳۹
- [۶] Y. Haseli, I. Dincer, G.F. Naterer, Thermodynamic analysis of a combined gas turbine power system with a solid oxide fuel cell through exergy, *Thermochimica Acta* ۴۸۰ (۲۰۰۸) ۱-۹
- [۷] T. Suther, A. S. Fung, M. Koksall and F. Zabihian, Effects of operating and design parameters on the performance of a solid oxide fuel cell-gas turbine system, *International Journal of Energy Research*. ۲۰۱۱; ۳۵:۶۱۶-۶۳۲
- [۸] B. Tarroja, F. Mueller, J. Maclay, J. Brouwer, Parametric thermodynamic analysis of a solid oxide fuel cell gas turbine system design space, JULY ۲۰۱۰, Vol. ۱۳۲ / ۰۷۲۳۰۱۰
- [۹] P. Chinda, P. Brault, The hybrid solid oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine (GT) systems steady state modeling, *international journal of hydrogen energy* ۳۷ (۲۰۱۲) ۹۲۳۷-۹۲۴۸
- [۱۰] F. Zabihian, A. S. Fung, Thermodynamic sensitivity analysis of hybrid system based on solid oxide fuel cell, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* ۶ (۲۰۱۴) ۵۱-۵۹
- [۱۱] R.K. Akikur, R. Saidur, H.W. Ping, K.R. Ullah Performance analysis of a co-generation system using solar energy and SOFC technology, *Energy Conversion and Management* ۷۹ (۲۰۱۴) ۴۱۵-۴۳۰
- [۱۲] M. Rokni, Thermodynamic and thermoeconomic analysis of a system with biomass gasification, solid oxide fuel cell (SOFC) and Stirling engine, *Energy* ۷۶ (۲۰۱۴) ۱۹-۳۱
- [۱۳] W. Yang, Y. Zhao, V. Liso, N. Brandon, Optimal design and operation of a syngas-fuelled SOFC micro-CHP system for residential applications in different climate zones in China, *Energy and Buildings* ۸۰ (۲۰۱۴) ۶۱۳-۶۲۲
- [۱۴] T. Elmer, M. Worall, S. Wu, S. B. Riffat, Fuel cell technology for domestic built environment applications: State of-the-art review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ۴۲ (۲۰۱۵) ۹۱۳-۹۳۱
- [۱۵] A. Volkan Akkaya, "Electrochemical Model for Performance Analysis of a Tubular SOFC," *International Journal of Energy Research*, ۳۱, (۲۰۰۷) ۷۹-۹۸.
- [۱۶] Kang I, Kang Y, Yoon S, Bae G, Bae J. The operating characteristics of solid fuel cells driven by diesel auto thermal reformate. *International journal of hydrogen energy* ۲۰۰۸; ۳۳:۶۲۹۸-۳۰۷



شکل ۹ اثر دمای عملکرد بهسازی بر ولتاژ خالص و افت ولتاژها



شکل ۱۰ اثر دمای عملکرد بهسازی بر بازدهی و کاهش مصرف سوخت



شکل ۱۱ اثر دمای عملکرد بهسازی بر برق تولیدی پیل، میکرو توربین و چرخه

۵- تقدیر و تشکر:

نویسندگان مقاله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه کردستان بخاطر حمایت مالی این تحقیق از طریق قرار داد شماره ۴/۵۹۹۹ مورخ ۱۳۹۴/۲/۹ کمال تشکر و قدردانی را دارد.

۶- مراجع

- [۱] J. Larminie, A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, ۲nd ed., John Wiley & Sons Ltd, ۲۰۰۳
- [۲] M. Ebrahimi, A. Keshavarz, *Combined Cooling, Heating and Power, Decision-making, Design and Optimization*, Elsevier, ۲۰۱۴