

مطالعه پارامتری سیکل‌های ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای با توربین گازی

ناصر شوکتی*
سیدفرامرز رنجبر
فرزاد محمدخانی

دانشجوی دکتری، دانشگاه تبریز، دانشکده فنی مهندسی مکانیک
استادیار، دانشگاه تبریز، دانشکده فنی مهندسی مکانیک
دانشجوی دکتری، دانشگاه تبریز، دانشکده فنی مهندسی مکانیک

چکیده

در این مقاله سیکل‌های ترکیبی یک مرحله‌ای و دومرحله‌ای پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای (SOFC) و توربین گازی از نظر انرژی و انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرند. رفتار پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای مدل‌سازی شده در این تحقیق، با نتایج تجربی شرکت زیمنس - وستینگهاوس مقایسه و اعتبارسنجی شده است. نتایج شبیه‌سازی سیکل‌های ترکیبی مورد بررسی نشان می‌دهد که سیکل ترکیبی دو مرحله‌ای پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی علاوه بر تولید توان بیشتر نسبت به سیکل ترکیبی یک مرحله‌ای SOFC-GT دارای راندمانی به میزان ۳ درصد بیشتر است. با توجه به تحلیل پارامتری، بیشترین مقدار بازده قانون اول سیکل ترکیبی دو مرحله‌ای SOFC-GT وقتی رخ می‌دهد که دمای عملکردی مجموعه‌های اول و دوم پیل سوختی به ترتیب برابر ۱۱۸۰ و ۱۲۵۰ درجه سلسیوس باشد ولی بیشترین توان تولیدی در دماهای بالاتر مجموعه دوم پیل سوختی اتفاق می‌افتد. در چگالی جریان‌های ثابت، افزایش ضریب مصرف سوخت پیل سوختی موجب کاهش افت‌های ولتاژی پیل سوختی شده و این امر موجب کاهش اتلافات انرژی مربوط به سیکل‌های ترکیبی خواهد شد. همچنین در دمای عملکردی ثابت مجموعه پیل سوختی در سیکل یک مرحله‌ای SOFC-GT، بازده ترمودینامیکی با افزایش ضریب مصرف سوخت پیل سوختی افزایش می‌یابد با وجود اینکه توان خروجی و تخریب انرژی در سیکل ترکیبی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای، توربین گاز، تخریب انرژی، ضریب عملکرد انرژی، مطالعه پارامتری.

Parametric Study of Combining Single and Double stages Solid Oxide Fuel Cell with Gas Turbine

N. Shokati
S. F. Ranjbar
F. Mohammadkhani

Ph. D. Student, University of Tabriz, Faculty of Mechanical Engineering
Assistant Professor, University of Tabriz, Faculty of Mechanical Engineering
Ph. D. Student, University of Tabriz, Faculty of Mechanical Engineering

Abstract

In this paper, a parametric study is done to reveal the effects on the performance of the single and double stages solid oxide fuel cell/ gas turbine combined systems of such significant parameters as fuel cell operating temperature, fuel utilization factor and current density. The behavior of tubular solid oxide fuel cell modeled in this study is validated with the experimental test data of tubular SOFC developed by Siemens Westinghouse. According to parametric study, the high value of first law efficiency of the double stage SOFC-GT combined cycle occurs when the operating temperature of the first and second fuel cell stacks is 1180 and 1250 °C, respectively; but the highest value of net output power occurs in higher temperatures of the second fuel cell stack. In the constant current density of the fuel cell, increasing the fuel utilization factor of the fuel cell decreases the voltage losses of the fuel cell and causes to decrease of the exergy destruction of the combined cycle.

Keywords: Tubular solid oxide fuel cell, gas turbine, exergy destruction, exergetic performance coefficient, parametric study.

۱- مقدمه

انتظار می‌رود که سوخت هیدروژن در سال‌های آتی یکی از اصلی‌ترین منابع تولید انرژی در جهان شود. پیل سوختی یک دستگاه الکتروشیمیایی است که در آن طی واکنش هیدروژن با اکسیژن، با بازده بسیار بالایی انرژی الکتریکی تولید می‌شود. بنابراین پیل سوختی یکی از منابع تولید توان و انرژی در آینده خواهد بود [۱]. در حال حاضر پیل سوختی اکسید جامد گزینه اصلی در نیروگاه‌ها بشمار می‌رود زیرا علاوه بر مزایای کلی پیل‌های سوختی، مزایای خاص پیل سوختی اکسید جامد از جمله راندمان بیشتر نسبت به پیل‌های سوختی دیگر، امکان بهسازی سوخت ورودی در داخل انباره پیل سوختی، نیاز نداشتن به کاتالیست‌های گران قیمت و کم بودن مشکل خوردگی آن بدلیل استفاده از الکترولیت جامد در ساختار آن باعث افزایش کاربرد این نوع پیل سوختی نسبت به سایر انواع پیل سوختی شده است. ایده ترکیب چرخه‌های مختلف به منظور بهینه‌سازی و کاهش اتلافات انرژی از سال‌ها پیش مورد توجه قرار گرفته است. پیل سوختی اکسید جامد به دلیل دمای عملکردی بالا این امکان را فراهم می‌کند که از انرژی محصولات خروجی از این پیل سوختی به عنوان یک منبع انرژی برای چرخه‌های دیگر استفاده کرد. یکی از این اقدامات ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با سیکل توربین گازی است. مفهوم استفاده از SOFC توسط ایده و پوشیدا مطرح شد [۲]. در سیکل توربینی گازی بیشترین اتلافات مربوط به محفظه احتراق است. اگر ما بتوانیم از تماس مستقیم هوا و سوخت در محفظه احتراق جلوگیری کنیم می‌توانیم اتلافات کلی در سیکل را به میزان قابل توجهی کاهش داده و در نتیجه بازده بالاتری داشته باشیم. پس با بکارگیری پیل سوختی در یک نیروگاه گازی هم می‌توان نیروگاهی با آلاینده‌گی کمتر داشت و هم بازده نیروگاه را افزایش داد. تحقیقات و کارهای متعددی در زمینه پیل سوختی SOFC و سیکل ترکیبی SOFC با توربین گازی انجام شده است. یکی از اولین اقدامات در این زمینه، ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با یک توربین گاز بسیار کوچک توسط شرکت زیمنس و وستینگهاوس پیترزبورگ بود [۲۳]. کوستاماگنا [۳] طرح یک سیستم هیبریدی شامل کوپل بین یک میکروتوربین گازی با یک پیل سوختی دما بالا را مورد بررسی قرار داد و عملکرد پیل سوختی در آن مورد بحث قرار گرفت. کارهای دیگری نیز توسط پارک [۴]، کالیس [۵] و رانو [۶] انجام شده که بیشتر این کارها

به صورت مدلسازی عددی پیل سوختی بوده است. چان و همکاران [۷] تحلیل کاملی از افت‌های ولتاژ درون پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای و حساسیت ولتاژ نسبت به ضخامت اجزای پیل ارائه دادند. اویی و هلوانی [۸] به بررسی تحلیلی افت ولتاژ در SOFC و همچنین تأثیر کربن مونواکسید در بهبود عملکرد الکتروشیمیایی آن پرداختند. پالسون [۹] سیستم ترکیبی شامل یک پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای با یک میکروتوربین را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک مدل گرمایی به موازات یک مدل الکتروشیمیایی برای تحلیل ترمودینامیکی این سیستم ترکیبی ارائه دادند. یونکسی جیا و همکاران [۱۰] به بررسی اثر برگشت گازهای خروجی از آند و کاتد پیل سوختی SOFC پرداختند و به این نتیجه رسیدند که برگشت گازهای خروجی از کاتد و آند باعث افزایش بازده سیکل ترکیبی و عملکرد بهتر آن می‌شوند. ولکان آکایا [۱۱] نیز در مقاله خود یک مدل الکتروشیمیایی برای پیل سوختی اکسید جامد ارائه می‌دهد که مشخصه‌های عملکردی یک SOFC لوله‌ای را تعیین می‌کند. همچنین روی اتلافات پیل سوختی بحث کرده و اثر پارامترهای موثر بر عملکرد پیل را بر روی آن بطور کامل بررسی کرده است. قنبری باورسد [۱۲] چرخه هیبریدی از پیل سوختی SOFC و توربین گازی را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق برای واکنش ریفرم کردن متان ورودی به چرخه هیبرید از منبع آب خارجی استفاده گردید. حاصلی و همکاران [۱۳] چرخه ساده توربین گازی و پیل سوختی اکسید جامد را از نظر جرمی مورد تحلیل قرار دادند. در این تحقیق به مطالعه اثر پارامترهای مختلف پیل سوختی بر عملکرد چرخه پرداخته شد. آکایا، شاهین و همکاران [۱۴] چرخه هیبریدی پیل سوختی با توربین گازی و همچنین یک سیستم HRSG را مورد تحلیل ترمودینامیکی قرار دادند. آنها سیستم HRSG را برای استفاده از گرمای گازهای خروجی از توربین گازی مورد استفاده قرار دادند. رنجبر و همکاران [۱۵] سیکل تولید سه‌گانه شامل پیل سوختی اکسید جامد یک مرحله‌ای، سیستم HRSG و سیکل تبرید GAX را از دید انرژی و انرژی‌مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که بازده این سیکل تولید سه‌گانه حداقل ۳۳ درصد بیشتر از سیکل ساده پیل سوختی اکسید جامد- توربین گازی است. گوگوی و همکاران [۱۶] سیکل ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد- توربین گاز و توربین بخار را از نظر ترمودینامیکی مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. در این تحقیق اثر پارامترهای

نهایت تحلیل پارامتریکی به صورت گسترده روی سیکل‌های ترکیبی صورت گرفته و تأثیر پارامترهای عملکردی مختلف سیکل‌ها به صورت همزمان بر عملکرد انرژی و انرژی این سیکل‌های ترکیبی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و نقاط بهینه برای پارامترهای عملکردی سیکل‌ها به دست آمده است.

۲- شرح سیستم

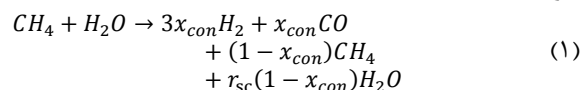
طرح کلی سیکل‌ها در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است. در سیکل اول که سیکل ترکیبی یک مرحله‌ای SOFC با توربین گازی است سوخت متان ابتدا در کمپرسور سوخت فشرده شده و دما و فشارش بالا می‌رود سپس با گازهای خروجی از آند پیل سوختی مخلوط شده و طی واکنش‌هایی در ریفورمر اولیه و ریفورمر داخلی پیل سوختی به هیدروژن تبدیل شده و وارد الکتروند آند پیل سوختی می‌شود. هوا هم که در کمپرسور هوا دما و فشارش افزایش یافته است بعد از عبور از مبادله‌کن‌های اول و دوم وارد کاند پیل سوختی شده و با هیدروژن واکنش می‌دهد. گازهای خروجی از آند پیل سوختی دارای درصد کمی هیدروژن هستند بنابراین این درصد کم هیدروژن با استفاده از هوای خروجی از کاند پیل سوختی در Afterburner سوزانده می‌شود. گازهای خروجی از Afterburner بعد از عبور از مبادله‌کن اول وارد توربین گازی شده و منبسط شده و سپس از مبادله‌کن گرمایی دوم عبور کرده و از سیکل خارج می‌شود. در سیکل دوم که سیکل ترکیبی دو مرحله‌ای SOFC با توربین گازی است سوخت متان بعد از عبور از کمپرسور سوخت با توجه به نسبت چگالی جریان‌های مجموعه پیل سوختی اول و دوم به دو قسمت تقسیم شده و بعد از عبور از میکسرها و ریفورمرهای مربوط به هر مجموعه وارد آند آن مجموعه پیل سوختی می‌شود. اما هوای ورودی به سیکل ترکیبی بعد از عبور از مبادله‌کن‌های گرمایی اول و دوم ابتدا وارد کاند مجموعه اول پیل سوختی شده و سپس خروجی هوای ورودی از کاند مجموعه اول که دمای آن نیز افزایش یافته وارد ورودی کاند مجموعه دوم پیل سوختی می‌شود. خروجی‌های آند مجموعه‌های اول و دوم با هم ترکیب شده و با هوای خروجی از کاند مجموعه دوم پیل سوختی در Afterburner می‌سوزند. سپس این گازهای خروجی از Afterburner بعد از عبور از مبادله‌کن گرمایی اول وارد توربین گازی می‌شوند.

سیکل ترکیبی شامل نسبت فشار کمپرسور، دبی سوخت و هوای ورودی به سیکل و فشار و دمای سیال ورودی به توربین بخار بر عملکرد ترمودینامیکی سیکل ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. لی و همکاران [۱۷] سیکل تولید همزمان توان و گرما بر پایه پیل سوختی اکسید جامد و سیستم HRSR را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. در این تحقیق برای ریفورم کردن متان ورودی به پیل سوختی از منبع آب خارجی بهره گرفته شده است. همچنین این سیکل از دید اکونومیکی هم مورد بررسی قرار گرفته است و هزینه مرتبط با جریان‌های مختلف به دست آمده است. نجفی و همکاران [۱۸] سیکل ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد یک مرحله‌ای و توربین گازی را مورد تحلیل قرار دادند. از گازهای خروجی از توربین گاز برای نمک زدایی آب استفاده شد. در این تحقیق بیشینه مقدار بازده انرژی ۴۶٪ به دست آمده است و مدت زمان لازم برای بازگشت هزینه صرف شده برای طراحی و راه اندازی این سیکل ترکیبی ۹ سال محاسبه گردیده است. رکنی [۱۹] سیکل ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ را مورد تحلیل و بررسی قرار داده است که توان خالص ۱۲۰ کیلووات تولید می‌کند. نتایج نشان داده است که تولید توان پیل سوختی و موتور استرلینگ به ترتیب ۹۸٫۸ و ۲۶٫۹ کیلووات و توان مصرفی کمپرسورها ۵٫۸ کیلووات است. همچنین بازده ترمودینامیکی سیکل ترکیبی ۴۲٫۴٪ به دست آمد.

در کار حاضر پیل سوختی اکسید جامد بطور کامل شبیه سازی شده و نتایج به دست آمده با نتایج تجربی شرکت زمینس- وستینگهاوس اعتبارسنجی شده است. سپس پیل سوختی مدلسازی شده به صورت یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای با توربین گازی ترکیب شده است و کل سیکل‌های ترکیبی از دیدگاه انرژی و انرژی بطور کامل تحلیل و بررسی شده و با هم مقایسه گردیده‌اند. تخریب انرژی در همه اجزای سیکل‌های ترکیبی به صورت مجزا بررسی شده و نقش و سهم هرکدام از اجزا در تخریب انرژی کل سیکل مورد تحلیل قرار گرفته است. در بیشتر کارهای صورت گرفته در گذشته و در ادبیات فن، معمولاً پیل سوختی اکسید جامد به صورت یک مرحله‌ای با توربین گازی و یا سیکل‌های دیگر ترکیب شده و مورد تحلیل قرار گرفته است و تحقیقی که در آن پیل سوختی اکسید جامد به صورت چند مرحله‌ای با توربین گازی ترکیب شده باشد و از دیدگاه انرژی به طور کامل تحلیل شده باشد مشاهده نمی‌شود. در

۱-۲- فرمول بندی و شرح توده پیل سوختی

متان برای این‌که به هیدروژن تبدیل شود باید ابتدا با بخار آب واکنش دهد. به همین دلیل با گازهای خروجی از آند پیل سوختی که دارای درصد بالایی بخار آب است مخلوط می‌شود. ابتدا در ریفرمر اولیه طی واکنش زیر درصدی از متان به هیدروژن تبدیل می‌شود. این کار بدین دلیل است که از ایجاد گرادیان‌های شدید دمایی در ورودی آند پیل سوختی جلوگیری شود [۱۲].

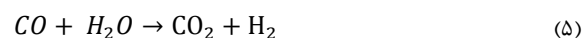
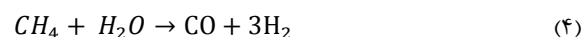


$$x_{con} = \left(1 - \frac{\dot{n}_{8,CH_4}}{\dot{n}_{7,CH_4}}\right) \quad (2)$$

$$r_{sc} = \frac{\dot{n}_{10,H_2O}}{\dot{n}_{7,CH_4} + \dot{n}_{7,CO}} \quad (3)$$

که درصد تبدیل متان به هیدروژن، r_{sc} نسبت بخار به کربن و \dot{n} مقدار مول مصرفی اجزا در نقاط مختلف سیکل است. سپس متان باقی‌مانده ابتدا طی واکنش ریفرمینگ به H_2 و CO تبدیل می‌شود. سپس در واکنش موسوم به شیفتینگ CO هم به

H_2 و CO_2 تبدیل می‌شود [۱۴]. این واکنش‌ها به صورت زیر هستند:

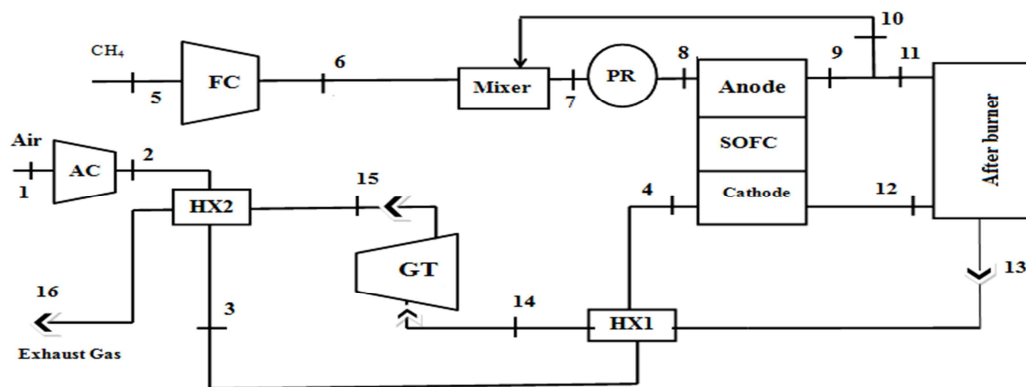


اگر \dot{x} و \dot{y} و \dot{z} به ترتیب مقدار مول مصرفی CH_4 و CO و H_2 باشند طبق واکنش‌های تعادلی داریم:

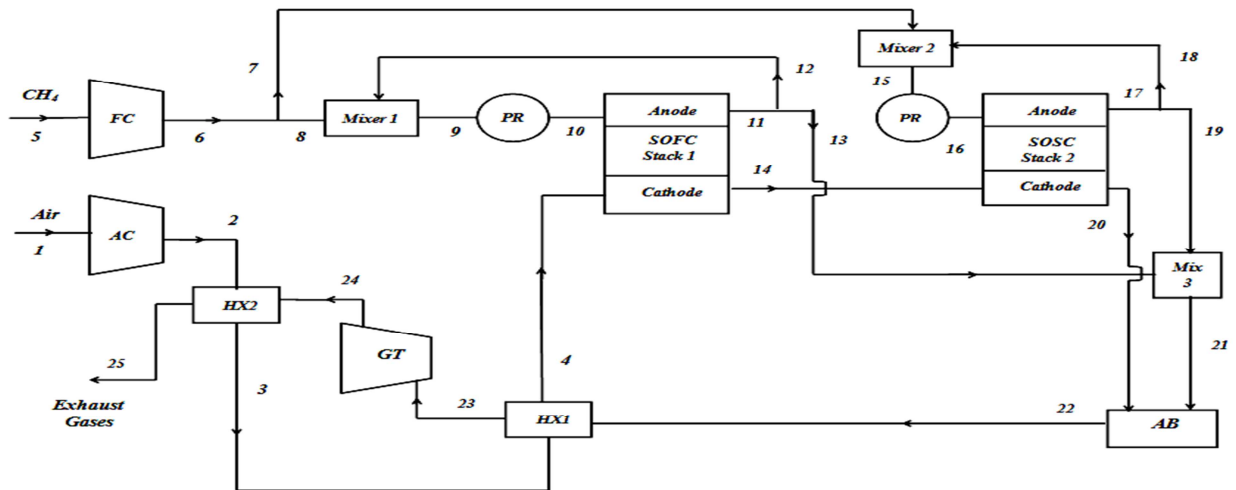
$$K_r = \left[\frac{(\dot{n}_{8,H_2} + 3\dot{x} + \dot{y} - \dot{z}) \cdot (\dot{n}_{8,CO} + \dot{x} - \dot{y})}{(\dot{n}_{8,CH_4} - \dot{x}) \cdot (\dot{n}_{8,H_2O} - \dot{x} - \dot{y} + \dot{z}) \cdot (\dot{n}_{8,tot} + 2\dot{x})} \right] P_{cell}^2 \quad (6)$$

$$K_s = \left[\frac{(\dot{n}_{8,H_2} + 3\dot{x} + \dot{y} - \dot{z}) \cdot (\dot{n}_{8,CO_2} + \dot{y})}{(\dot{n}_{8,CO} + \dot{x} - \dot{y}) \cdot (\dot{n}_{8,H_2O} - \dot{x} - \dot{y} + \dot{z})} \right] \quad (7)$$

که مقادیر \dot{x} ، \dot{y} و \dot{z} بر اساس ضرایب تعادل K_r و K_s که به ترتیب ثابت‌های تعادل برای واکنش‌های ریفرمینگ و شیفتینگ هستند به دست می‌آید. ثابت‌های تعادل با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید:



شکل ۱- طرح کلی سیکل ترکیبی یک مرحله‌ای پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی



شکل ۲- طرح کلی سیکل ترکیبی دو مرحله‌ای پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی

است. ولتاژ مدارباز پیل سوختی توسط معادله نرنست به دست می‌آید [۲۰]:

$$V_{Nernst} = -\frac{\Delta G_f^0}{n_e F} + \frac{RT_c}{n_e F} \ln\left(\frac{P_{H_2} \cdot \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}}\right) \quad (11)$$

اما با برقراری جریان در پیل سوختی اکسید جامد، افت ولتاژهایی را در مجموعه پیل سوختی خواهیم داشت. این افت ولتاژها را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

افت ولتاژ مقاومتی: افت ولتاژ مقاومتی به دلیل مقاومت الکترودها در برابر جریان الکترون ها و مقاومت الکترولیت در برابر جریان یون‌ها ایجاد می‌شود. این افت ولتاژها متناسب با چگالی جریان بوده و خطی است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{ohm} = I \sum_k r_k \quad (12)$$

$$r_k = \sum_k \frac{\rho_k \cdot \delta_k}{A_k} \quad (13)$$

$$\rho_k = a \cdot \exp(b/T_c) \quad (14)$$

r_k مقاومت اهمی اجزای پیل سوختی (کاتد، آند، الکترولیت و...)، δ_k ضخامت شار جریان، ρ_k مقاومت ویژه هر کدام از اجزا و A سطح مقطع هر کدام از اجزا است. a و b هم ثابت‌هایی هستند که مقدار آن‌ها در ادبیات فن برای اجزای تشکیل دهنده پیل سوختی موجود است [۲۱].

افت ولتاژ فعال‌سازی: برای انجام هر واکنش شیمیایی لازم است که انرژی هر کدام از اجزای تشکیل دهنده واکنش به یک حد لازم برسد که به این انرژی، انرژی فعال‌سازی گفته می‌شود. برای بیان این افت ولتاژ از معادله باتلر ولمر استفاده می‌کنیم [۱۲]:

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

ثابت‌های A تا E در معادله (۸) از جدول ۱ به دست می‌آید [۱۰].

همه هیدروژن تولید شده در پیل سوختی مصرف نمی‌شود و مقدار مصرف آن (\dot{z}) بستگی به ضریب مصرف سوخت (u_f) دارد:

جدول ۱- ثابت‌های تعادل برای واکنشهای ریفورمینگ و شیفتینگ

	Reforming	shifting
A	-2.63121×10^{-11}	5.47301×10^{-12}
B	1.24065×10^{-7}	-2.57479×10^{-8}
C	-2.25232×10^{-4}	4.63742×10^{-5}
D	1.95028×10^{-1}	-3.91500×10^{-2}
E	-6.61395×10^1	1.32097×10^1

$$\dot{z} = u_f (3\dot{x} + \dot{y} + \dot{n}_{8,H_2}) \quad (9)$$

از طرفی دیگر چگالی جریان پیل سوختی و مقدار مول مصرفی هیدروژن رابطه زیر را با هم دارند:

$$\dot{z} = \frac{i \cdot A \cdot N}{n_e \cdot F} \quad (10)$$

که F ثابت فارادی بوده و مقدار n_e برای واکنش هیدروژن ۲ است. همچنین N تعداد پیل سوختی در هر مجموعه، i چگالی جریان پیل سوختی و A سطح فعال هر پیل سوختی

L_k ضخامت الکترو، $D_{eff,j}$ ضریب نفوذ موثر گاز است و p_j فشار جزئی اجزای واکنش دهنده و فرآورده در واکنش هیدروژن با اکسیژن است. پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی پیل سوختی در جداول ۲ و ۳ آورده شده‌اند.

جدول ۲- پارامترهای ورودی پیل سوختی

component	a(Ω. m)	b(K)	δ(m)
cathode	0.0000811	600	0.0022
anode	0.0000298	-1392	0.0001
electrolyte	0.0000294	10350	0.00004
interconnection	0.0012	4690	0.000085

جدول ۳- پارامترهای ورودی پیل سوختی

انرژی فعالسازي در آند (kJ/mol)	110
انرژی فعالسازي در کاتد (kJ/mol)	155
γ_a (A/m ²)	7×10^9
γ_c (A/m ²)	7×10^9

افت ولتاژ کلی پیل سوختی شامل مجموع افت ولتاژهای ذکر شده است. ولتاژ واقعی پیل سوختی برابر اختلاف بین ولتاژ نرنست و مجموع افت ولتاژهای پیل سوختی است. توان خروجی پیل سوختی توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{W}_{SOFC} = V \cdot I \cdot \eta_{inv} \quad (22)$$

I جریان کلی پیل سوختی است. اگر بخواهیم توان الکتریکی تولیدی پیل سوختی را بر حسب چگالی جریان که پارامتر بسیار مهم در طراحی‌ها است، بنویسیم خواهیم داشت:

$$\dot{W}_{SOFC} = V \cdot i \cdot A \cdot N \cdot \eta_{inv} \quad (23)$$

مقدار توان خالص تولید شده در چرخه ترکیبی برابرست با:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{SOFC} + \dot{W}_{GT} - \dot{W}_{AC} - \dot{W}_{FC} \quad (23)$$

و راندمان کلی چرخه برابرست با:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{n}_f \cdot LHV} \quad (25)$$

که LHV ارزش گرمایی پایین متان و \dot{n}_f مقدارمول مصرفی متان بر ثانیه است. اگرژی در هر نقطه از مجموع انرژی‌های فیزیکی و شیمیایی در آن نقطه به دست می‌آید:

$$\dot{Ex}_{ph} = \sum_i \dot{m}_i (h_i - h_{0,i}) - T_0 (s_i - s_{0,i}) \quad (26)$$

$$i = i_0 \left[\exp\left(\frac{\beta n_e F V_{act}}{RT_c}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\beta)n_e F V_{act}}{RT_c}\right) \right] \quad (15)$$

که β ضریب انتقال و قسمتی از افت فعال‌سازی است که بر آهنگ انجام واکنش الکتروشیمیایی تأثیر می‌گذارد. مقدار β در پیل سوختی عموماً ۰٫۵ در نظر گرفته می‌شود. i_0 چگالی جریان تبادل (exchange current density) نام دارد و مقدارش برای آند و کاتد متفاوت است و از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$i_{0,a} = \gamma_a \left(\frac{P_{H_2}}{P_0}\right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_0}\right) \exp\left(-\frac{E_a}{RT_c}\right) \quad (16)$$

$$i_{0,c} = \gamma_c \left(\frac{P_{O_2}}{P_0}\right)^{0.25} \exp\left(-\frac{E_c}{RT_c}\right) \quad (17)$$

در فرمول‌های بالا، γ ضریبی است بر حسب آمپر بر متر مربع که به جنس کاتد و آند بستگی دارد. E انرژی فعال‌سازی واکنش در کاتد و آند است. افت ولتاژ فعال‌سازی برابر مجموع افت‌ها در آند و کاتد است.

افت ولتاژ غلظتی: واکنش الکتروشیمیایی در نتیجه مصرف هیدروژن در سطح مشترک الکترو-الکترولیت انجام می‌شود. غلظت (فشار جزئی) هیدروژن وقتی که سوخت تازه به طور مرتب جایگزین نشود، کم می‌شود. این افت فشار جزئی بر ولتاژ نرنست اثر گذاشته و آن را کاهش می‌دهد. همین پدیده در کاتد و در مصرف اکسیژن هم اتفاق می‌افتد. این افت ولتاژ را می‌توان توسط معادله فیک (Fick) بیان کرد [۲۲]:

$$V_{con} = V_{con,a} + V_{con,c} \quad (18)$$

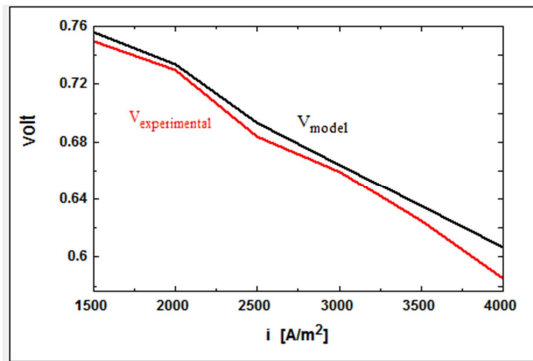
$$V_{con,a} = \frac{RT_c}{n_e F} \ln\left(\frac{1 - i/i_{L,H_2}}{1 + i/i_{L,H_2O}}\right) \quad (19)$$

$$V_{con,c} = \frac{RT_c}{n_e F} \ln\left(\frac{1}{1 - i/i_{L,O_2}}\right) \quad (20)$$

$i_{L,j}$ بیشترین مقدار چگالی سطحی جریان قابل انتظار در الکتروود مورد نظر است. چون پیل سوختی SOFC در شرایط عملکردی مختلفی کار می‌کند، بنابراین i_L ها متفاوت خواهند بود. بنابراین $i_{L,j}$ را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$i_{L,j} = \frac{n_e \cdot F \cdot D_{eff,j}}{R \cdot T_c \cdot L_k} p_j \quad (21)$$

۸ ۳۱۶/۶ به ۶۶۲/۶ کیلووات، بازده ترمودینامیکی قانون اول هم از ۶۰/۶۹ به ۶۳/۹۳ درصد افزایش یافته است.



شکل ۳- نتایج مدلسازی پیل سوختی و نتایج تجربی

جدول ۴- پارامترهای عملکردی سیکل ترکیبی SOFC-GT

پارامتر	مقدار	واحد
چگالی جریان	2800	A/m ²
دمای عملکردی پیل سوختی	1000	°C
ضریب مصرف سوخت هر مجموعه	0.8	-
ضریب مصرف هوا	0.2	-
نسبت فشار	4	-
سطح فعال هر پیل سوختی	0.0834	m ²
تعداد پیل سوختی هر مجموعه	1798	-
نسبت بخار به کربن	2	-
راندمان آیزنتروپیک کمپرسور	0.8	%
راندمان آیزنتروپیک توربین	0.85	%
راندمان محفظه احتراق (afterburner)	0.98	%
ضریب تأثیر مبادله‌کن گرمایی اول	0.7	%
ضریب تأثیر مبادله‌کن گرمایی دوم	0.7	%
افت فشار درمجموعه پیل سوختی	2	%
افت فشار در مبادله‌کن	2	%
افت فشار در after burner	3	%
ارزش گرمایی پایین متان	808000	J/mol
ضریب تبدیل جریان مستقیم به متناوب	0.96	-

$$\dot{E}x_{ch} = \sum_i \dot{n}_i \sum_j (x_i ex_i^{ch} + RT_0 x_i \ln(x_i)) \quad (27)$$

که ex_i^{ch} انرژی اگزرژی مخصوص شیمیایی هر جز و x_i کسر مولی هر کدام از اجزای تشکیل دهنده‌ی گاز است. مقدار تخریب اگزرژی در هر جز سیکل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{E}x_{D,i} = \sum_j \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) - \dot{W} + \sum_i (\dot{E}x_i)_{in} - \sum_i (\dot{E}x_i)_{out} \quad (28)$$

و تخریب اگزرژی در کل سیکل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{E}x_{D,tot} = \sum_i \dot{E}x_{D,i} + \dot{E}x_{exhaust} \quad (29)$$

که $\dot{E}x_{exhaust}$ انرژی اگزرژی مربوط به گازهای خروجی از سیکل است. ضریب عملکرد اگزرژی را به صورت نسبت توان تولیدی در کل سیکل ترکیبی به اتلافات کلی سیکل ترکیبی تعریف می‌کنیم:

$$EPC = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}x_{D,tot}} \quad (30)$$

۳- اعتبارسنجی عملکرد پیل

برای بررسی دقت عملکردی پیل سوختی مدلسازی شده، نمودار ولتاژ جریان پیل سوختی مدلسازی شده با نمودار ولتاژ-جریان حالت تجربی پیل سوختی SOFC که Siemens westinghouse [۲۳] منتشر کرده است، مقایسه می‌شود. با توجه به شکل ۳ می‌بینیم که این دو نمودار دارای مطابقت خوبی با هم هستند و حداکثر خطا به ۳٪ می‌رسد.

۴- نتایج و بحث

همه محاسبات شبیه‌سازی ترمودینامیکی و قسمت اگزرژی سیکل‌ها بوسیله نرم افزار EES انجام شده است. پارامترهای عملکردی اولیه سیکل در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر دما، فشار، دبی و جرمی و ترکیب شیمیایی جریان در نقاط مختلف دو سیکل در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است. مقادیر مختلف به دست آمده از شبیه‌سازی ترمودینامیکی سیکل‌های ترکیبی یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای SOFC-GT در جدول ۸ نمایش داده شده است. همانطوری که ملاحظه می‌شود با دو مرحله‌ای کردن کوپل بین پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی علاوه بر افزایش تولید توان از

جدول ۵- شرایط و ترکیب مخلوط در نقاط مختلف سیکل ترکیبی یک مرحله‌ای SOFC-GT

نقاط	دما (°C)	فشار (KPa)	دبی جرمی (Kg/s)	نسبت مولی CH ₄	نسبت مولی CO ₂	نسبت مولی CO	نسبت مولی H ₂	نسبت مولی H ₂ O	نسبت مولی O ₂	نسبت مولی N ₂
1	25	101.3	0.7467	-	-	-	-	-	0.21	0.79
2	205.7	405.2	0.7467	-	-	-	-	-	0.21	0.79
3	353.7	397.1	0.7467	-	-	-	-	-	0.21	0.79
4	895.6	389.2	0.7467	-	-	-	-	-	0.21	0.79
5	25	101.3	0.01034	1	-	-	-	-	-	-
6	162.7	405.2	0.01034	1	-	-	-	-	-	-
7	804.2	397.1	0.08672	0.1669	0.2111	0.0665	0.0884	0.467	-	-
8	804.2	389.2	0.08672	0.1669	0.2111	0.0665	0.0884	0.467	-	-
9	977.6	381.4	0.1215	0.0027	0.2527	0.0796	0.1059	0.5589	-	-
10	977.6	381.4	0.07631	-	0.253	0.0799	0.1062	0.56	-	-
11	977.6	381.4	0.04487	-	0.253	0.0798	0.106	0.56	-	-
12	977.6	381.4	0.7111	-	-	-	-	-	0.175	0.825
13	1076	369.9	0.756	-	0.0238	-	-	0.0484	0.1567	0.7711
14	577.1	362.5	0.756	-	0.0238	-	-	0.0484	0.1567	0.7711
15	403	109.9	0.756	-	0.0238	-	-	0.0484	0.1567	0.7711
16	263.1	107.7	0.756	-	0.0238	-	-	0.0484	0.1567	0.7711

کمی از سوخت وارد شده به سیکل که در پیل سوختی به دلیل وجود ضریب مصرف سوخت پیل سوختی واکنش نداد است. در یک محفظه احتراق کوچک (afterburner) با هوای خارج شده از کاتد پیل سوختی سوزانده می شود ولی با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که که اتلافات انرژی مجموعه پیل سوختی و محفظه احتراق کوچک (afterburner) تقریباً هم اندازه هستند. بنابراین می بینیم که وجود محفظه احتراق چقدر در اتلافات انرژی کلی سیکل تأثیرگذار خواهد بود.

همچنین مشاهده می‌شود که ضریب عملکرد انرژی از مقدار ۱/۴۰۵ برای سیکل یک مرحله‌ای، به مقدار ۱/۷۲۵ برای سیکل دو مرحله‌ای افزایش یافته است. یعنی به ازای توان خروجی معین برای سیکل‌های ترکیبی یک و دومرحله‌ای، مقدار تخریب انرژی کل در سیکل یک مرحله‌ای SOFC-GT بیشتر از مقدار تخریب انرژی کل در سیکل دو مرحله‌ای SOFC-GT است. مقدار تخریب انرژی به تفکیک اجزای سیکل‌های ترکیبی یک مرحله‌ای و دومرحله‌ای SOFC-GT در جدول ۷ نشان داده شده است. از آنجایی که فقط درصد بسیار

جدول ۶- شرایط و ترکیب مخلوط در نقاط مختلف سیکل ترکیبی دو مرحله‌ای SOFC-GT

نقاط	دما (°C)	فشار (KPa)	دبی جرمی (Kg/s)	نسبت مولی CH ₄	نسبت مولی CO ₂	نسبت مولی CO	نسبت مولی H ₂	نسبت مولی H ₂ O	نسبت مولی O ₂	نسبت مولی N ₂
1	25	101.3	0.829	-	-	-	-	-	0.21	0.79
2	195.2	405.2	0.829	-	-	-	-	-	0.21	0.79
3	439.6	397.1	0.829	-	-	-	-	-	0.21	0.79
4	899.3	389.2	0.829	-	-	-	-	-	0.21	0.79
5	25	101.3	0.0205	1	-	-	-	-	-	-
6	155.3	405.2	0.0205	1	-	-	-	-	-	-
7	155.3	405.2	0.0103	1	-	-	-	-	-	-
8	155.3	405.2	0.0103	1	-	-	-	-	-	-
9	790	397.1	0.095	0.155	0.23	0.073	0.087	0.456	-	-
10	572.7	389.2	0.093	0.14	0.23	0.088	0.133	0.41	-	-
11	945.8	381.4	0.127	0.002	0.27	0.086	0.103	0.54	-	-
12	945.8	381.4	0.085	-	0.27	0.086	0.103	0.539	-	-
13	945.8	381.4	0.043	-	0.27	0.086	0.103	0.54	-	-
14	945.8	381.4	0.7949	-	-	-	-	-	0.179	0.821
15	829.4	397.1	0.095	0.155	0.23	0.073	0.087	0.456	-	-
16	615.9	389.2	0.093	0.14	0.23	0.088	0.133	0.41	-	-
17	995.7	381.4	0.127	0.002	0.27	0.086	0.103	0.54	-	-
18	995.7	381.4	0.085	-	0.27	0.086	0.103	0.539	-	-
19	995.7	381.4	0.043	-	0.27	0.086	0.103	0.54	-	-
20	995.7	373.7	0.76	-	-	-	-	-	0.145	0.855
21	970.8	381.4	0.085	-	0.27	0.0861	0.103	0.54	-	-
22	1147	362.5	0.844	-	0.04	-	-	0.07	0.119	0.765
23	736.6	355.3	0.844	-	0.04	-	-	0.07	0.119	0.765
24	544.4	118.4	0.844	-	0.04	-	-	0.07	0.119	0.765
25	321.4	116.1	0.844	-	0.04	-	-	0.07	0.119	0.765

جدول ۷- اتلافات انرژی سیکل های ترکیبی یک و دو مرحله ای SOFC-GT به تفکیک اجزا

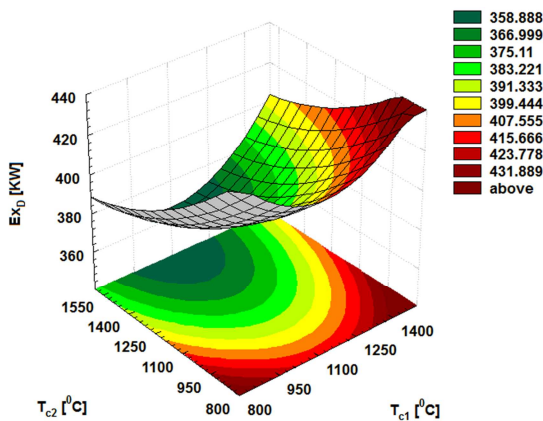
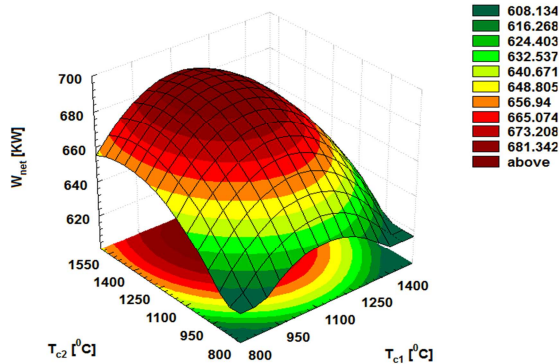
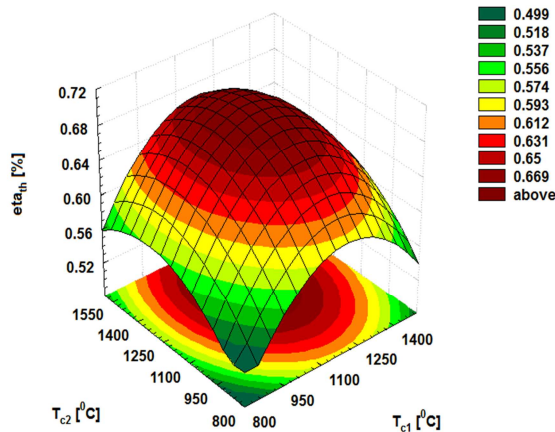
اجزای سیکل	تخریب انرژی (kW)		درصد تخریب انرژی (%)	
	سیکل یک مرحله ای	سیکل دو مرحله ای	سیکل یک مرحله ای	سیکل دو مرحله ای
مجموعه پیل سوختی اول	31.08	33.45	13.78	8.7
مجموعه پیل سوختی دوم	-----	32.56	-----	8.47
کمپرسور هوا	18.5	20.55	8.2	5.35
کمپرسور سوخت	0.6203	1.232	0.275	0.32
میکسر اول	7.69	7.631	3.41	1.986
میکسر دوم	-----	7.908	-----	2.059
میکسر سوم	-----	0.009	-----	0.002
ریفرمر خارجی اول	14.26	25.96	6.32	6.75
ریفرمر خارجی دوم	-----	26.61	-----	6.92
محفظه احتراق کوچک	30.52	49.1	13.54	12.78
مبادله کن گرمایی اول	32.71	36.58	14.51	9.52
مبادله کن گرمایی دوم	8.239	18.91	3.65	4.92
توربین گاز	19.79	19.16	8.78	4.99
اتلاف انرژی ناشی از گازهای خروجی از چرخه ترکیبی	62.02	104.4	27.5	27.18
کل اتلاف انرژی	225.43	384.1	--	-

جدول ۸- نتایج شبیه سازی ترمودینامیکی سیکل ها

	سیکل ترکیبی یک مرحله ای SOFC-GT	سیکل ترکیبی دو مرحله ای SOFC-GT
بازده قانون اول (%)	60.69	63.93
بازده قانون دوم (%)	58.96	62.11
توان خالص تولیدی (kW)	316.8	662.6
تخریب انرژی کل (kW)	225.43	384.1
ضریب عملکرد انرژی	1.405	1.725

با توجه به شکل ۴، اگر T_{C1} و T_{C2} به ترتیب دمای عملکردی مجموعه پیل سوختی اول و دوم باشند، مشاهده می شود که در دمای عملکردی ثابت مجموعه پیل سوختی دوم، با افزایش دمای عملکردی مجموعه پیل سوختی اول ابتدا توان تولیدی سیکل ترکیبی و بازده ترمودینامیکی افزایش می یابد و به یک مقدار بیشینه رسیده، سپس کاهش می یابند. دلیل این امر هم آن است که ابتدا با افزایش دمای عملکردی مجموعه پیل سوختی اول، افت های ولتاژ پیل سوختی کاهش پیدا می کند. در نتیجه باعث افزایش مقدار در پارامترهای ذکر شده می شود. با افزایش بیشتر دمای عملکردی پیل سوختی انرژی آزاد گیبس به شدت کاهش یافته در نتیجه باعث کاهش ولتاژ نرنست (مدار باز) پیل سوختی و متعاقباً کاهش توان تولیدی چرخه شده و با توجه به ثابت بودن چگالی جریان پیل سوختی مقدار سوخت ورودی تقریباً ثابت بوده در نتیجه بازده ترمودینامیکی هم کاهش می یابد. از طرفی دیگر همانطوری که گفته شد ابتدا با افزایش دمای عملکردی مجموعه پیل سوختی اول، افت های ولتاژ پیل سوختی کاهش

حال برای تحلیل ترمودینامیکی بهتر سیکل ها، مطالعه پارامتریکی را روی سیکل های ترکیبی یک مرحله ای و دوم مرحله ای SOFC-GT انجام می دهیم.

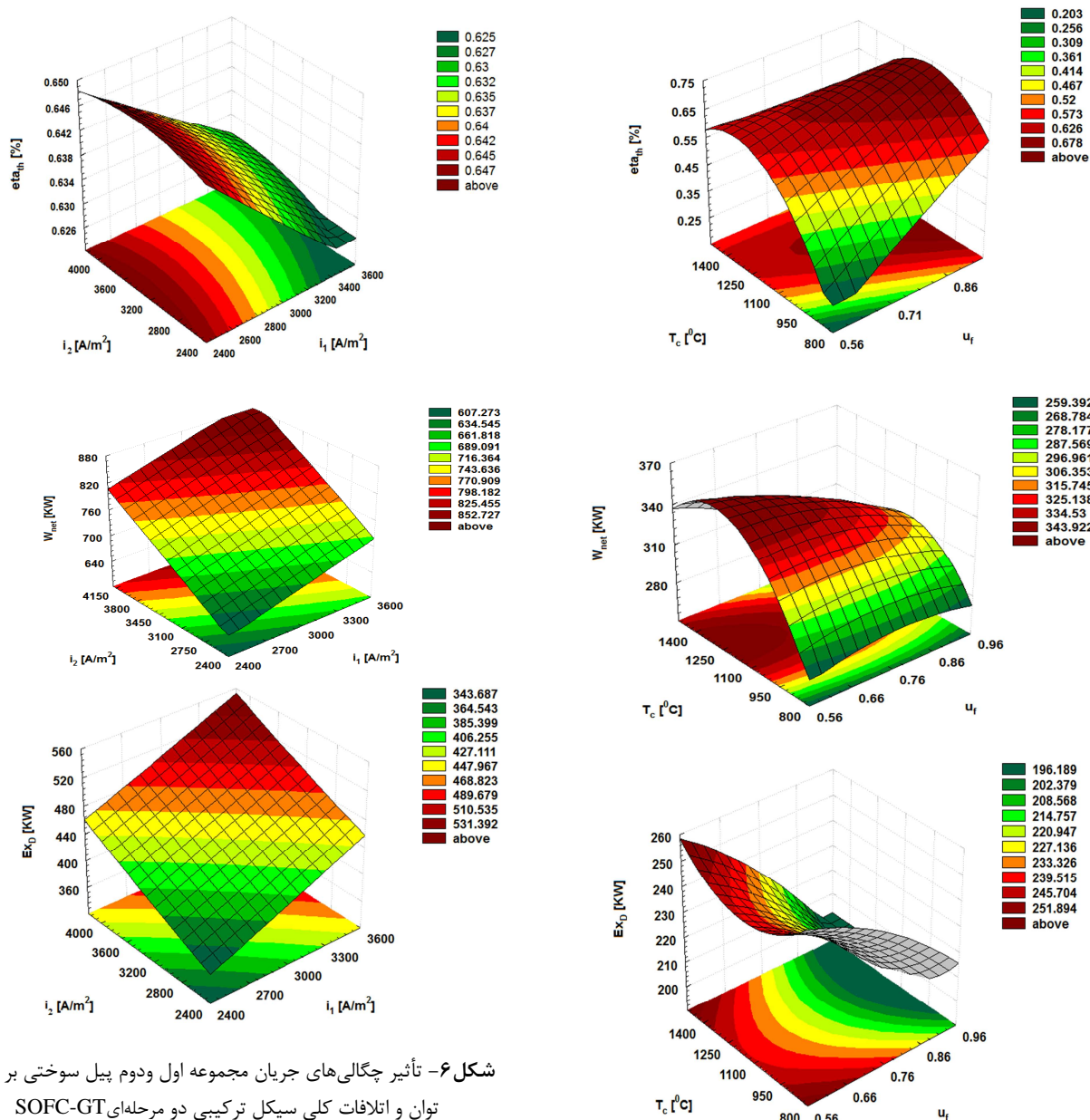


شکل ۴- تأثیر دمای عملکردی مجموعه اول و دوم پیل سوختی بر بازده، توان و اتلافات کلی سیکل ترکیبی دو مرحله‌ای SOFC-GT

با توجه به شکل ۶، اگر i_1 و i_2 به ترتیب چگالی‌های جریان پیل‌های سوختی مجموعه‌های پیل سوختی اول و دوم باشند، در چگالی جریان ثابت مجموعه دوم، هر چه چگالی جریان مجموعه اول افزایش پیدا می‌کند توان تولیدی چرخه ترکیبی هم افزایش می‌یابد. با افزایش چگالی جریان مجموعه اول همین روند در رفتار توان تولیدی چرخه ترکیبی هم دوباره تکرار می‌شود.

یافته در نتیجه مشاهده می‌شود که تخریب اگزرژی سیکل ترکیبی ابتدا کاهش یافته تا به مقدار کمینه رسیده ولی سپس با افزایش بیشتر دمای عملکردی و متعاقب آن کاهش انرژی آزاد گیسیس، تخریب اگزرژی شروع به افزایش می‌کند. با ثابت گرفتن دمای عملکردی مجموعه پیل سوختی اول و افزایش دمای عملکردی مجموعه پیل سوختی دوم همین روند دوباره تکرار می‌شود. بنابراین مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار بازده قانون اول سیکل ترکیبی دو مرحله‌ای SOFC-GT وقتی رخ می‌دهد که دمای عملکردی مجموعه‌های اول و دوم پیل سوختی به ترتیب برابر ۱۱۸۰ و ۱۲۵۰ درجه سلسیوس باشد ولی بیشترین توان تولیدی در دماهای بالاتر مجموعه دوم پیل سوختی اتفاق می‌افتد.

با توجه به شکل ۵، مشاهده می‌شود که در دمای عملکردی ثابت مجموعه پیل سوختی در سیکل یک مرحله‌ای SOFC-GT و با افزایش ضریب مصرف سوخت پیل سوختی، فشار جزئی هیدروژن در ورودی پیل کاهش می‌یابد در نتیجه ولتاژ نرنست یا ولتاژ مدار باز پیل سوختی که بستگی به فشار جزئی هیدروژن ورودی به پیل سوختی دارد کاهش می‌یابد. این موضوع با توجه به تعریف توان تولیدی پیل سوختی باعث کاهش توان تولیدی مجموعه پیل سوختی و در نتیجه کاهش توان تولیدی سیکل ترکیبی می‌گردد. از طرفی دیگر با افزایش ضریب مصرف سوخت پیل سوختی، مقدار ورودی سوخت به سیکل به ازای چگالی جریان ثابت، کاهش می‌یابد در نتیجه بازده ترمودینامیکی سیکل کلی با افزایش ضریب مصرف سوخت پیل سوختی افزایش می‌یابد و وجود اینکه توان خروجی سیکل کاهش یافته بود، ولی در دماهای بالای پیل سوختی، شیب کاهش توان خروجی سیکل بر شیب کاهش مقدار سوخت ورودی به سیکل غلبه کرده و در نتیجه مشاهده می‌شود که در دماهای بالای پیل سوختی با افزایش ضریب مصرف سوخت پیل سوختی بازده ترمودینامیکی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش ضریب مصرف سوخت پیل سوختی منجر به کاهش تخریب اگزرژی در سیکل ترکیبی می‌شود. ضریب عملکرد اگزرژی هم رفتاری شبیه به بازده قانون اول را خواهد داشت و با افزایش ضریب مصرف سوخت پیل سوختی افزایش می‌یابد. حال اگر ضریب مصرف سوخت پیل سوختی را ثابت نگه داشته و دمای عملکردی پیل سوختی را افزایش دهیم با توجه به دلایل ذکر شده در شکل ۴ می‌بینیم که هم بازده قانون اول و هم توان تولیدی سیکل ترکیبی تا مقدار بیشینه‌ای افزایش یافته ولی سپس بدلیل افت شدید انرژی آزاد گیسیس این پارامترها کاهش خواهند یافت. عکس این مطلب هم در شکل تخریب اگزرژی به صورت واضح نمایان است.



شکل ۶- تأثیر چگالی‌های جریان مجموعه اول و دوم پیل سوختی بر بازده، توان و اتلافات کلی سیکل ترکیبی دو مرحله‌ای SOFC-GT

در نتیجه شیب افزایش توان تولیدی نسبت به شیب افزایش سوخت ورودی به پیل سوختی کمتر خواهد بود و ممکن است در چگالی جریان‌های بالای پیل سوختی شیب افزایش سوخت ورودی به سیکل ترکیبی بر شیب افزایش توان تولیدی مجموعه پیل سوختی بسیار غالب شده و منجر به کاهش شدید بازده در چگالی جریان بالا برای مجموعه‌های پیل سوختی اول و دوم شود. البته رفتار ضریب عملکرد اگزوزی هم به دلیل رفتار توان تولیدی و تخریب اگزوزی پیل سوختی بسیار مشابه با رفتار بازده قانون اول خواهد بود. با توجه به شکل ۷، مشاهده می‌شود که در چگالی جریان ثابت پیل سوختی اکسید جامد، با افزایش ضریب مصرف سوخت پیل سوختی بازده ترمودینامیکی سیکل ترکیبی

شکل ۵- تأثیر دمای عملکردی و ضریب مصرف سوخت بر بازده، توان و اتلافات کلی سیکل ترکیبی SOFC-GT

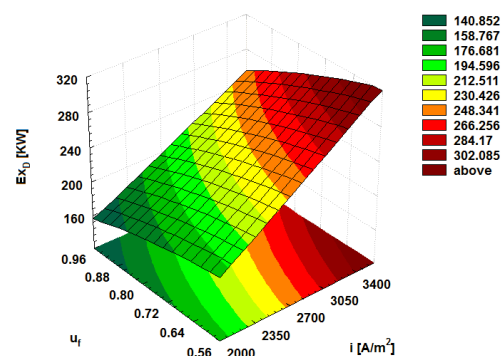
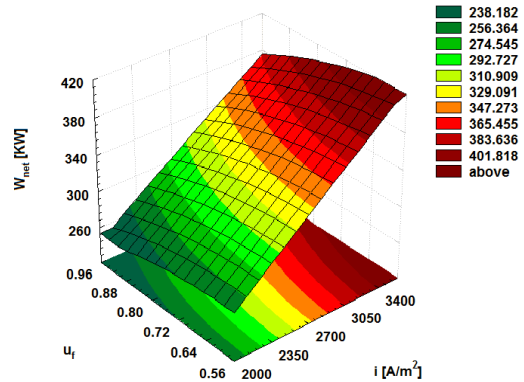
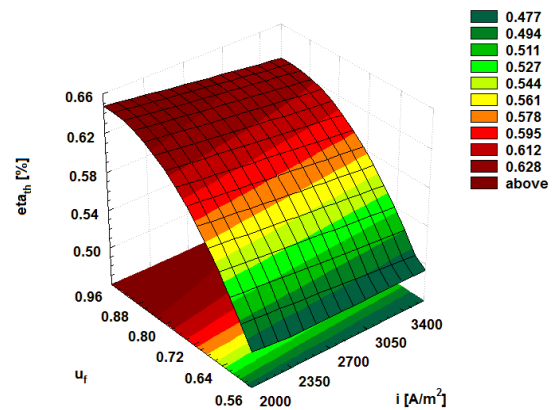
البته با افزایش چگالی جریان، افت ولتاژهای پیل سوختی هم افزایش یافته و در نتیجه تخریب اگزوزی سیکل ترکیبی در صورت افزایش چگالی جریان هم مجموعه اول و هم مجموعه دوم پیل سوختی افزایش می‌یابد. ولی از طرفی دیگر با افزایش چگالی جریان مجموعه‌های پیل سوختی اول و دوم توان تولیدی پیل سوختی افزایش می‌یابد ولی مقدار سوخت ورودی به سیکل ترکیبی هم افزایش پیدا می‌کند.

کاهش می یابد در نتیجه بازده ترمودینامیکی افزایش پیدا می کند. البته اثر کاهش توان تولیدی پیل سوختی و کاهش سوخت ورودی به سیکل ترکیبی در متغیر بازده به صورت عکس هم رفتار می کنند. بنابراین ممکن است در ضرایب مصرف سوخت بسیار بالای پیل سوختی SOFC اثر کاهش توان تولیدی پیل بر اثر کاهش سوخت ورودی به سیکل غلبه کرده و موجب کاهش بازده ترمودینامیکی پیل سوختی شود. البته عملاً ضرایب سوخت بالای ۰/۸۵ برای پیل سوختی متداول نیست. در ضریب مصرف سوخت ثابت پیل سوختی، با افزایش چگالی جریان پیل، توان تولیدی پیل هم افزایش یافته ولی چون سوخت ورودی به سیکل ترکیبی هم افزایش می یابد و در کل اثر این افزایش مقدار سوخت ورودی اثر غالب بوده و موجب کاهش بازده قانون اول سیکل ترکیبی خواهد شد. همچنین با توجه به شکل ۷، افزایش ضریب مصرف سوخت پیل سوختی موجب کاهش افت های ولتاژی پیل سوختی شده و این امر موجب کاهش اتلافات انرژی مربوط به سیکل ترکیبی خواهد شد. افزایش چگالی جریان نیز موجب افزایش افت های ولتاژ شده و در نهایت افزایش اتلافات انرژی را در پی خواهد داشت.

۵- نتیجه گیری

با توجه به تحلیل انرژی و انرژی سیکل ها مشاهده شد که با دو مرحله ای کردن کوپل بین پیل سوختی اکسید جامد لوله ای و توربین گازی علاوه بر تولید توان بیشتر، بازده سیکل ترکیبی هم نسبت به بازده سیکل ترکیبی یک مرحله ای SOFC-GT افزایش پیدا کرد. همچنین ضریب عملکرد انرژی هم در سیکل ترکیبی دو مرحله ای SOFC-GT دارای مقدار بیشتری نسبت به سیکل ترکیبی یک مرحله ای SOFC-GT است. همچنین مشاهده شد که اتلافات انرژی مجموع پیل سوختی با محفظه احتراق کوچکی که بعد از پیل سوختی قرار می گیرد تقریباً برابر هستند در حالی که فقط درصد بسیار کمی از سوخت در محفظه احتراق سوزانده می شود و این خود تأثیر بودن پیل سوختی در یک سیکل برای افزایش راندمان ترمودینامیکی سیکل را به خوبی نمایان می سازد. همچنین اثر پارامترهای طراحی پیل سوختی بر بازده ترمودینامیکی، توان تولیدی، اتلافات کلی و ضریب عملکرد انرژی سیکل های ترکیبی یک و دو مرحله ای SOFC-GT مورد تحلیل قرار گرفت و اثر افزایش و کاهش این پارامترها بر این سیکل ها با ذکر دلایل بررسی شد.

یک مرحله ای SOFC-GT افزایش و توان تولیدی پیل سوختی و در کل توان تولیدی سیکل ترکیبی کاهش پیدا می کند.



شکل ۷- تأثیر چگالی جریان و ضریب مصرف سوخت پیل سوختی بر بازده، توان و اتلافات کلی سیکل ترکیبی SOFC-GT

همانطوری که گفته شد با افزایش ضریب مصرف سوخت پیل سوختی از یک طرف فشار جزئی هیدروژن در ورودی آن پیل سوختی کم شده و این امر باعث کاهش ولتاژ پیل سوختی شده و در نهایت موجب کاهش توان تولیدی پیل سوختی می شود و از طرفی دیگر افزایش ضریب مصرف سوخت پیل سوختی، مقدار سوخت ورودی به سیکل ترکیبی به ازای چگالی جریان ثابت،

مقاومت اهمی اجزای پیل سوختی	r_k
نسبت بخار به کربن	r_{sc}
آنتروپی	s

مراجع

- [1] Vielstich, W., Lamm, EG&G Technical Services, Inc. "Fuel Cell Handbook", 7th edition, U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, 2004.
- [2] Costamagna P., Magistri L., Massardo A., "Design and part-load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro gas turbine", Power Sources, vol. 96, pp. 352-368, 2001.
- [3] Park S. K., Oh, K. S., Kim T. S., "Analysis of the design of a pressurized SOFC hybrid system using a fixed gas turbine design", Power Sources, vol. 170, pp. 130 – 139, 2007.
- [4] Calise F., Palombo A., Vanoli L., "Design and Partial load exergy analysis of hybrid SOFC–GT power plant", Power Sources, vol. 158, pp. 225–244, 2006.
- [5] Rao A.D., Samuelsen G.S., "A thermodynamic analysis of tubular solid oxide fuel cell based hybrid systems", transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 125, pp. 59–66, 2003.
- [6] Chan S.H., Kho 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", Power Source, vol. 93, pp. 130-140, 2001.
- [7] Aloui T., Halouani K., "Analytical modeling of polarization in a solid oxide fuel cell using biomass gas product as fuel", Applied Thermal Engineering, vol. 27, pp. 731-737, 2007.
- [8] Palsson J., "Thermodynamic modeling and performance of combined cycle and gas turbine system", Department of Heat Power Engineering, Lund university of Sweden, 2002.
- [9] Jia J., Li Q., Luo M., Wei L., Abudula A., "Effects of gas recycle on performance of solid oxide fuel cell power systems", Energy, vol. 36, pp. 1068-1075, 2011.
- [10] Akkaya A.V., "Electrochemical model for performance analysis of a tubular SOFC", International Journal of Energy Research, vol. 31, pp. 79-98, 2007.
- [11] Bavarsad P.G., "Energy and exergy analysis of internal reforming solid oxide fuel cell–gas turbine hybrid system", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 32, pp. 4591 – 4599, 2007.
- [12] Haseli Y., Dincer I., Naterer G.F., "Thermodynamic analysis of a combined gas turbine power system with a solid oxide fuel cell

	علائم
	T
ضریب مصرف سوخت پیل سوختی	u_f
افت ولتاژ فعال سازی	V_{act}
افت ولتاژ غلظتی	V_{con}
افت ولتاژ مقاومتی	V_{ohm}
توان	W
نسبت تبدیل متان به هیدروژن	x_{con}
کسر مولی	x
	علائم یونانی
ضخامت شار جریان	δ_k
مقاومت ویژه اجزا	ρ_k
بازده	η
ضریب تبدیل جریان مستقیم به متناوب	η_{inv}
ضریب انتقال در افت فعال سازی	β
	اختصارات
کمپرسور هوا	AC
کمپرسور سوخت	FC
توربین گاز	GT
پیل سوختی اکسید جامد	$SOFC$
ارزش گرمایی پایین سوخت	LHV
سطح فعال پیل سوختی	A
انرژی فعال سازی واکنش در آند	E_a
انرژی فعال سازی واکنش در کاتد	E_c
اگرزری فیزیکی	$\dot{E}x_{ph}$
اگرزری شیمیایی	$\dot{E}x_{ch}$
تخریب اگرزری	$\dot{E}x_D$
ضریب عملکرد اگرزری	EPC
ضریب نفوذ موثر گاز	D_{eff}
آنتالپی	h
چگالی جریان	i
بیشترین مقدار چگالی سطحی جریان	i_L
ثابت تعادل واکنش ریفرمینگ	K_r
ثابت تعادل واکنش شیفتینگ	K_s
دبی جرمی	\dot{m}
مقدار مول مصرفی	\dot{n}
تعداد پیل سوختی	N
تعداد الکترون آزاد شده به ازای واکنش	n_e
یک مولکول هیدروژن با اکسیژن	P
فشار	P
ثابت جهانی گاز	R

- through exergy", *ThermochimicaActa*, vol. 480, pp. 1–9, 2008.
- [13] Akkaya A.V., Shahin B., Erdem H.H., "An analysis of SOFC/GT CHP system based on exergetic performance criteria", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 2566 – 2577, 2008.
- [14] Ranjbar F., Chitsaz A., Mahmoudi S. M.S., Khalilarya S., Rosen M. 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.
- [15] Gogoi T.K., Sarmah P., Nath D. D., "Energy and exergy based performance analyses of a solid oxide fuel cell integrated combined cycle power plant", *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 507-519, 2014.
- [16] Lee Y.D., Ahn K.Y., Morosuk T., Tsatsaronis G., "Exergetic and exergoeconomic evaluation of a solid-oxide fuel-cell-based combined heat and power generation system", *Energy Conversion and Management*, vol. 85, pp. 154-164, 2014.
- [17] Najafi B., Shirazi A., Aminyavari M., Rinaldi F., Taylor R. A., "Exergetic, economic and environmental analyses and multi-objective optimization of an SOFC-gas turbine hybrid cycle coupled with an MSF desalination system", *Desalination*, vol. 334, pp. 46-59, 2014.
- [18] Rokni M., "Thermodynamic and thermoeconomic analysis of a system with biomass gasification, solid oxide fuel cell (SOFC) and Stirling engine", *Energy*, vol. 76, pp. 19-31, 2014.
- [19] Larminie J., Dicks A., "Fuel Cell Systems Explained", second edition, Wiley Publishing, New York, 2003.
- [20] 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.
- [21] Milewski J., Swirski K., Santarelli M., Leone P., "Advanced methods of solid oxide fuel cell modeling" , Springer-Verlag, New York, 2011.
- [22] Singhal SC., "Advances in solid oxide fuel cell technology", *Solid State Ion*, vol.135, pp.305–313, 2000.