

تحلیل ترمودینامیکی سیستم تولید توان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد مجهز به بهساز خارجی

محرم جعفری*، محسن صادقی، سید محمد سید محمودی، مرتضی یاری

دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۰۴
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۴-۱۸
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۳۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۷-۰۹

کلمات کلیدی:
سیستم تولید توان
پیل سوختی اکسید جامد
بهباز خارجی
هیدروژن
تحلیل ترمودینامیکی

خلاصه: فرآیند بهسازی سه گانه، از نقطه نظر قابلیت استفاده مستقیم از گازهای خروجی سیستم‌های تولید توان در فرآیند بهسازی و تولید گاز سنتز با نسبت هیدروژن به مونواکسید کربن بالا بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در تحقیق حاضر، یک سیستم تولید توان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد و مجهز به بهساز خارجی پیشنهاد شده و از نظر ترمودینامیکی مطالعه شده است. به منظور انجام فرآیند بهسازی خارجی متان، گازهای خروجی سیستم در بهساز بازخورانی شده و از بخار آب، دی‌اکسید کربن و اکسیژن موجود در گازهای خروجی سیستم به عنوان عوامل بهسازی استفاده شده است. تاثیر پارامترهای مهم سیستم از قبیل چگالی جریان و دمای کاری پیل سوختی اکسید جامد بر روی شاخصه‌های عملکردی سیستم از قبیل انواع ولتاژ و افت ولتاژها، دبی جرمی سوخت و آب و هوای ورودی به سیستم، توان تولیدی پیل سوختی، بازده انرژی و اگزرژی سیستم بررسی شده است. نتایج حاصل از مطالعه پارامتریک نشان می‌دهد که به ازای مقادیر پایین چگالی جریان (۱۰۰۰ امپر بر مترمربع) و دماهای کاری بالای پیل سوختی اکسید جامد (۹۰۰ درجه سلسیوس)، دبی جرمی سوخت مصرفی کاهش پیدا کرده و در نتیجه بازده انرژی و اگزرژی سیستم تا بیشینه مقدار ۵۵/۰۴ و ۵۳/۱۱ درصد به ترتیب افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

پیل سوختی اکسید جامد، قابلیت عملکرد آن در دماهای بالا است. این ویژگی سبب می‌شود که پیل سوختی اکسید جامد را بتوان با انواع فرآیندهای بهسازی^۲ کوپل نمود که امکان استفاده از سوخت‌های متنوع را به ارمغان می‌آورد [۲]. از این رو مطالعات متعددی به منظور بررسی تاثیر انواع فرآیندهای بهسازی، گازسازی^۳ و بازخورانی گازهای خروجی^۴ بر روی عملکرد سیستم‌های تولید توان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد انجام شده است. دیتریچ و همکاران [۳] در یک تحقیق تجربی، تاثیر بازخورانی گازهای خروجی آند و استفاده از آن در فرآیند بهسازی سوخت را بر روی عملکرد یک سیستم تولید توان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد با سوخت پروپان، بررسی نمودند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که بازده انرژی سیستم

افزایش نگرانی‌ها در مورد کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و همچنین آلودگی محیط زیست، علاقه‌مندی به روش‌های تولید پر بازده انرژی را افزایش داده است. انتشار گازهای حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی در سیستم‌های تولید توان از منابع اصلی افزایش گازهای گلخانه‌ای در محیط زیست می‌باشد، به طوری که سالانه، ۴۷ درصد از کل دی‌اکسید کربن منتشر شده در جهان، متاثر از این عامل است [۱]. در همین راستا، در سال‌های اخیر، تحقیقات در زمینه سیستم‌های تولید توان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد، گسترش یافته است. پیل سوختی اکسید جامد به‌طور مستقیم انرژی شیمیایی سوخت را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. یکی از مزایای

2 Reforming
3 Gasification
4 Exhausted Gas Recycling

1 Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

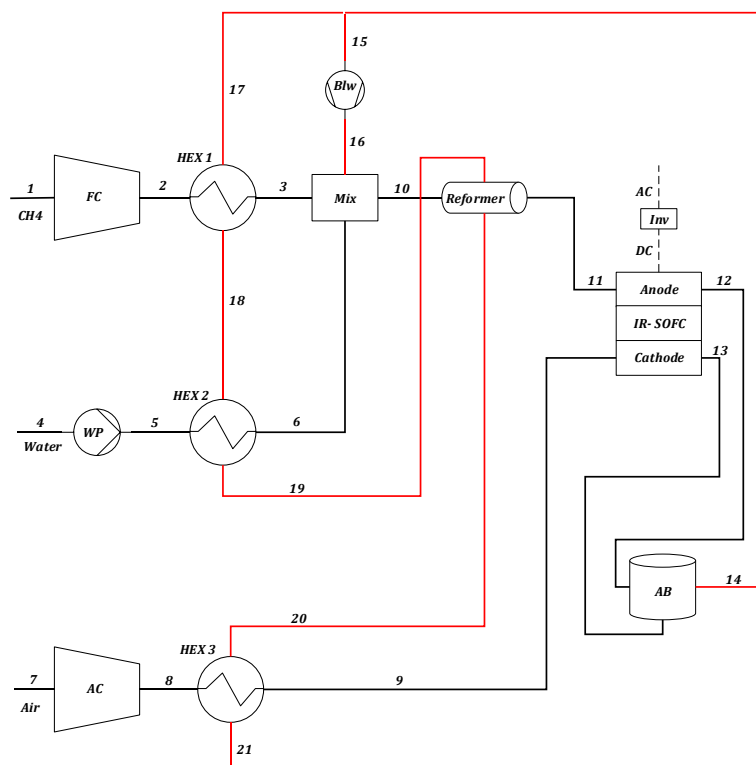
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mjafari@tabrizu.ac.ir



تولید گاز سنتز و بازده بهسازی حاصل می‌گردد. رکنی [۹] سیستم پیل سوختی اکسید جامد کوپل شده با موتور استرلینگ، مجهز به گازساز^۴ و تغذیه شده توسط گازهای حاصل از زباله‌های شهری را مورد مطالعه قرار داد. ایشان به این نتیجه رسید که بازده الکتریکی سیستم پیشنهادی تا ۵۰ درصد می‌رسد. مدل‌سازی ترمودینامیکی سیستم تولید توان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد با ظرفیت ۱۰ کیلووات و مجهز به بازخورانی گازهای خروجی آند، توسط وال و همکاران [۱۰] انجام شد. نتایج حاصل از کار ایشان نشان داد که بازخورانی گازهای خروجی آند به میزان ۶۵ درصد، موجب افزایش بازده الکتریکی سیستم به بیشینه مقدار ۵۷ درصد می‌شود. مانندی و همکاران [۱۱] سیستم تولید توان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد کوپل شده با فرآیند بهسازی سه‌گانه بایوگاز را از دیدگاه انرژی مورد مطالعه قرار دادند. ایشان از آب و هوا برای بهسازی بایو گلز استفاده کردند. ویرانرونکورن و آتایام [۱۲]، به منظور تولید هیدروژن از روغن زیستی، فرآیند بهسازی بخار آب و بهسازی سه‌گانه را باهم کوپل کردند و از دیدگاه انرژی مورد مطالعه قرار دادند. ایشان گزارش نمودند که افزایش دمای بهسازی و نسبت بخار به کربن در فرآیند بهسازی تاثیر مثبت دارد و با ازای دمای بهسازی بخار برابر با ۶۵۰ درجه سلسیوس و دمای بهسازی سه‌گانه برابر با ۵۸۰ درجه سلسیوس و نسبت بخار به سوخت برابر با ۶، سیستم در شرایط بهینه کار می‌کند. بارللی و همکاران [۱۳]، یک سیستم جدید تولید توان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد کوپل شده با فرآیند بهسازی خشک را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از تحلیل انرژی نشان داد که ترکیبات با غلظت بالا، تاثیر چندانی در افزایش دمای سلول پیل سوختی ندارد. صابری مهر و همکاران [۱۴]، یک سیستم تولید همزمان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد با سوخت بایوگاز حاصل از پسماند فاضلاب شهری را پیشنهاد داده و از دیدگاه ترمودینامیکی و اقتصادی مطالعه کردند. ایشان به منظور تامین بخشی از گرمای مورد نیاز هاضم از انرژی خورشیدی استفاده نمودند. ایشان به این نتیجه دست یافتند که استفاده از انرژی خورشیدی هم از نظر انرژی و هم از نظر اقتصادی باعث بهبود سیستم می‌شود. همچنین ایشان گزارش نمودند که هزینه انرژی الکتریکی تولید توسط این سیستم با هزینه برق شبکه قابل رقابت است. مطالعه جامع در مورد بازخورانی گازهای

پیل سوختی با بازخورانی گازهای خروجی آند بیشتر از بازده انرژی سیستم پیل سوختی با احتراق جزئی است. عملکرد یک سیستم تولید توان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد کوپل شده با فرآیند گازسازی سوخت زیست توده، توسط وانگ چاناپای و همکاران [۴]، تحلیل شد. نتایج حاصل از کار ایشان نشان داد که به ازای نسبت بازخورانی گازهای خروجی آند برابر با ۰/۶، بازده انرژی و انرژی سیستم بیشینه می‌شود. ساعبا و همکاران [۵]، سیستم پیل سوختی کوپل شده با فرآیند بهسازی خارجی اتانول و مجهز به بازخورانی گازهای خروجی آند را تحلیل نمودند. ایشان گزارش کردند که تحت شرایط یکسان، بازخورانی گازهای خروجی آند موجب بهبود بازده الکتریکی و حرارتی سیستم می‌شود. همچنین، به ازای مقادیر بالای نسبت بازخورانی و نسبت مصرفی سوخت، مقدار تشکیل کربن روی کاتالیزگر^۱ کاهش پیدا می‌کند. تاثیر بازخورانی گازهای خروجی آند روی شاخص‌های ایمنی از جمله تشکیل کربن و اکسید نیکل در پیل سوختی اکسید جامد و همچنین روی عملکرد سیستم تولید توان بر مبنای پیل سوختی تغذیه شده توسط گازهای حاصل از سوخت زیست توده توسط لیو و همکاران [۶] مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از این بود که تحت شرایط یکسان کاری، بازده الکتریکی سیستم پیل سوختی اکسید جامد تغذیه شده از گاز طبیعی ۱۵ درصد بیشتر از بازده انرژی پیل سوختی تغذیه شده از گازهای زیست توده است. همچنین، بازخورانی گازهای خروجی آند موجب کاهش بازده الکتریکی سیستم می‌شود. لو فارو و همکاران [۷]، عملکرد پیل سوختی اکسید جامد کوپل شده با فرآیند بهسازی سه‌گانه^۲ بایوگاز را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان بیان کردند که عملکرد پیل سوختی شدیداً تحت تاثیر ترکیب خوراک بهسازی شده است که این امر متاثر از عملکرد کاتالیزگر فرآیند بهسازی سه‌گانه می‌باشد. نتایج حاصل از تحقیقات ایشان نشان می‌دهد که ترکیب پیل سوختی با فرآیند خارجی بهسازی سه‌گانه بایوگاز برای سیستم‌های تولید توان ثابت در مقیاس کوچک و متوسط مناسب است. والوک و همکاران [۸]، تاثیر اتوترمال^۳ بهسازی را روی سیستم‌های پیل سوختی با بازخورانی گازهای خروجی آند مطالعه کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که به ازای ۴۵ درصد بازخورانی گازهای خروجی آند، بیشینه مقدار

1 Catalyst
2 Tri-Reforming
3 Auto-Thermal



شکل ۱. طرحواره سیستم تولید توان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد مجهز به بهساز خارجی

Fig. 1. Schematic of the proposed power generation system based on the solid oxide fuel cell coupled to the external reforming

اجمالی ادبیات فن نشان می‌دهد که تا اکنون تمام کارهای تحقیقاتی انجام یافته در زمینه کوپل سیستم پیل سوختی اکسید جامد با بهساز^۱ خارجی^۲ به بازخورانی گازهای خروجی از آند و یا کاتد پیل سوختی محدود می‌شود و هیچ مطالعه‌ای در مورد بازخورانی گازهای خروجی از پس‌سوز^۳ سیستم تولید توان پیل سوختی اکسید جامد و استفاده از آن در فرآیند بهسازی صورت نگرفته است. از این‌رو، کار حاضر در راستای تکمیل این بخش از ادبیات فن می‌باشد. شایان ذکر است، با توجه به این‌که گازهای خروجی سیستم تولید توان شامل بخار آب، دی‌اکسید کربن و اکسیژن می‌باشد، بنابراین بهساز خارجی مورد استفاده در سیستم بر مبنای فرآیند بهسازی سه‌گانه خواهد بود.

۲- توصیف سیستم و فرضیات

طرحواره^۴ سیستم پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. سوخت و هوا وارد سیستم شده و توسط دمنده‌های^۵ مربوطه تا فشار

خروجی آند در سیستم‌های پیل سوختی اکسید جامد با سوخت‌های متنوع توسط رکنی [۱۵] صورت گرفت. ایشان به این نتیجه رسیدند که مقدار بازخورانی گازهای خروجی آند به شدت به نوع سوخت استفاده شده در سیستم بستگی دارد و حتی در بعضی موارد هیچ نیازی به بازخورانی گازهای خروجی آند نیست. سیستم‌های پیل سوختی با سوخت گاز سنتز تحت انواع فرآیندهای بهسازی داخلی و خارجی توسط چاتراوانت و همکاران [۱۶]، مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاصل از تحلیل انرژی نشان داد که بازده الکتریکی سیستم با بهسازی داخلی نسبت به سیستم مجهز به فرآیند بهسازی خارجی بیشتر است. چیت‌ساز و همکاران [۱۷]، عملکرد یک سیستم تولید همزمان با بهسازی داخلی و خارجی را از نظر انرژی و زیست محیطی مطالعه و مقایسه نمودند. نتایج حاصل از کار ایشان نشان داد که در شرایط بهینه کاری، بازده انرژی سیستم با فرآیند بهسازی داخلی ۹/۶ درصد بیشتر از بازده سیستم مجهز به فرآیند بهسازی خارجی است. همچنین ایشان گزارش کردند که میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن در سیستم با فرآیند بهسازی داخلی تقریباً ۱/۴ درصد کمتر از سیستم مجهز به فرآیند بهسازی خارجی است. بررسی

- 1 Reformer
- 2 External Reforming
- 3 After Burner
- 4 Schematic
- 5 Compressor

کاری پیل سوختی فشرده می‌شوند و سپس با استفاده از حرارت گازهای خروجی پس‌سوز، پیش‌گرم می‌شوند. همچنین آب، بعد از افزایش فشار توسط پمپ^۱، از مبادله‌کن حرارتی مربوطه عبور کرده و بخار مافوق گرم تولید می‌شود. سوخت و هوای پیش‌گرم شده و بخار مافوق گرم با بخشی از گازهای خروجی پس‌سوز که بازخورانی و در واقع بازیافت می‌شوند، مخلوط شده و سپس جریان خروجی از مخلوط کن وارد بهساز می‌شوند. بسته به شرایط عملکردی سیستم، در صورت نیاز انرژی حرارتی لازم برای فرآیند بهسازی سه‌گانه در راکتور^۲، توسط گرمای گازهای خروجی پس‌سوز تامین می‌شود. گاز سنتز تولیدی و خروجی از بهساز وارد آند شده و همچنین هوای پیش‌گرم شده وارد کاتد پیل سوختی اکسید جامد می‌شود. در داخل پیل سوختی، یک‌بار دیگر گاز سنتز فرآیند بهسازی را تجربه می‌کند و محصولات تولیدی با غلظت بالای هیدروژن در واکنش‌های الکتروشیمیایی شرکت می‌کنند. واکنش‌های الکتروشیمیایی موجب تولید جریان مستقیم الکتریسیته می‌شوند. پس از پایان واکنش‌های الکتروشیمیایی و تولید برق، سوخت واکنش نداده و هوای اضافی به ترتیب از آند و کاتد پیل سوختی اکسید جامد خارج شده و وارد پس‌سوز می‌شوند. این دو جریان در پس‌سوز، کاملاً محترق شده و موجب تولید گازهای داغ خروجی متشکل از بخار آب، دی‌اکسید کربن، اکسیژن و نیتروژن می‌شوند. در نهایت، گازهای خروجی بازیافت می‌شوند، بخشی از آن‌ها جدا شده و بازخورانی شده و در فرآیند بهسازی سه‌گانه شرکت می‌کند و در واقع یک چرخه بسته را همیشه طی می‌کند؛ و مابقی حرارت مورد نیاز برای مبادله‌کن‌های حرارتی سوخت، هوا و آب و همچنین راکتور را تامین کرده و سپس از سیستم خارج می‌شود.

به منظور شبیه‌سازی سیستم‌های پیشنهادی که در نرم‌افزارهای حلگر معادلات مهندسی^۳ و آزمایشگاه ماتریس^۴ انجام شده است، فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

* سیستم پیشنهادی در شرایط پایا کار می‌کند

* از تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی صرف‌نظر شده است.

* تمامی مبادله‌کن‌های حرارتی، راکتور و پیل سوختی، اجزایی

عایق گرما^۵ می‌باشند.

* تمامی گونه‌های موجود در مخلوط گازی، گاز ایده‌آل در نظر گرفته شده‌اند.

* ترکیب پیل سیستم تولید توان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد به ازای ۱ درصد بازخورانی گازهای خروجی پس‌سوز تحقق یافته است.

* راکتور مورد نظر، از نوع یک‌بعدی جریان پایا است.

* کاتالیزگر در راکتور غیرفعال نمی‌شود.

* مقاومت تماسی در الکتروده‌های پیل سوختی وجود ندارد.

* از افت فشار در لوله‌ها چشم‌پوشی شده است.

۳- مدل‌سازی سیستم

۳-۱- مدل‌سازی فرآیند بهسازی

با توجه به این‌که گازهای خروجی از سیستم بازخورانی شده و وارد راکتور می‌شوند، بنابراین بخار آب، دی‌اکسید کربن و اکسیژن در بهسازی سوخت متان شرکت می‌کنند که بهسازی سه‌گانه نامیده می‌شود. در بهسازی سه‌گانه، بهسازی بخار مطابق با رابطه (۱)، بهسازی خشک مطابق با رابطه (۲) و احتراق جزئی متان مطابق با واکنش آورده شده در رابطه (۳) با هم ترکیب می‌شوند [۱۸]. به منظور تحلیل فرآیند بهسازی سه‌گانه و تعیین دما و ترکیب گاز سنتز خروجی از راکتور از تعادل شیمیایی و روش لاگرانژ استفاده شده است [۱۹].



این روش این مزیت را دارد که لازم نیست تمامی واکنش‌هایی که در حال وقوع هستند شناخته شده باشند. همچنین، بهینه‌سازی فرآیند از نظر کامپیوتری چالش برانگیز نبوده و حتی اگر مخلوط واکنش‌گر شامل تعداد گونه‌هایی زیادی بوده و تعداد درجات آزادی

1 Pump
2 Reactor
3 Engineering Equation Solver (EES)
4 Matrix Laboratory

5 Adiabatic
6 Couple

با λ_j نشان داده می‌شود و به مشتق کلی G افزوده می‌شود. با توجه به این‌که مشتق کلی هر معادله برابر با صفر است، اضافه کردن مشتق کلی هر معادله به مشتق G ، با ضرب کردن یا بدون ضرب کردن آن در مقادیرش، نبایستی مقدار مشتق G را عوض کند:

$$dG + \sum_{j=1}^E \lambda_j d\psi_j = 0 \quad (9)$$

با ترکیب معادلات فوق خواهیم داشت:

$$dG = \sum_{i=1}^C \mu_i dn_i + \sum_{j=1}^E \lambda_j \sum_{i=1}^C \left(\frac{\partial \psi_j}{\partial n_i} \right)_{n_j, j \neq i} dn_i = 0 \quad (10)$$

معادله فوق را می‌توان به صورت زیر مرتب نمود:

$$dG = \sum_{i=1}^C \left[\mu_i + \sum_{j=1}^E \lambda_j \left(\frac{\partial \psi_j}{\partial n_i} \right)_{n_j, j \neq i} \right] dn_i = 0 \quad (11)$$

تنها راه اطمینان از این‌که مشتق کل، dG همیشه صفر است، این است که عبارات داخل پرانتز برای هر ترم در شبیه‌سازی برابر با صفر باشد:

$$\mu_i + \sum_{j=1}^E \lambda_j \left(\frac{\partial \psi_j}{\partial n_i} \right)_{n_j, j \neq i} = 0 \quad \text{for } i=1 \dots C \quad (12)$$

بنابراین می‌توان به نتیجه نهایی زیر رسید:

$$\mu_i + \sum_{j=1}^E \lambda_j e_{i,j} = 0 \quad \text{for } i=1 \dots C \quad (13)$$

بسته به این‌که تعداد مول‌های هر ماده چه تعداد باشد، روند کار با تعداد C مجهول شروع می‌شود. در روش لاگرانژ، تعداد E مجهول نیز به دلیل ضرایب نامعین لاگرانژ λ_j اضافه می‌شود. بنابراین در کل به تعداد $C + E$ مجهول وجود خواهد داشت. همچنین تعداد معادلات نیز به تعداد $C + E$ موجود است. در رابطه فوق، λ_j ضرایب لاگرانژ بوده و $e_{i,j}$ نشان‌دهنده شماره j امین اتم در i امین گونه است. همچنین رابطه (۱۴)، بالانس انرژی برای راکتور را نشان می‌دهد.

$$\sum_{j=1}^5 n_{10} \bar{h}_{10} = \sum_{j=1}^6 n_{11} \bar{h}_{11} \quad (14)$$

برای مسئله بهینه‌سازی افزایش یابد، معمولاً این روش همگرا می‌شود. این روش برای حل مسائل تعادل شیمیایی بسیار کاربردی است. انرژی آزاد گیپس^۱ یک سیستم شیمیایی واکنش‌گر در دما و فشار مشخص به صورت تابعی از تعداد مول‌های هر ماده n_i می‌باشد:

$$G = \sum_{i=1}^C n_i \mu_i \quad (4)$$

هدف تعیین تعداد مول‌هایی از هر ماده است که مینیمم مقدار انرژی آزاد گیپس را نتیجه می‌دهند. بنابراین، مشتق G در دما و فشار داده شده و در حالت تعادل باید صفر شود:

$$dG = \sum_{i=1}^C \mu_i dn_i = 0 \quad (5)$$

اگر هیچ‌گونه محدودیت و قیدی وجود نداشته باشد، می‌توان مینیمم مقدار G را با صفر قرار دادن پتانسیل شیمیایی هر ماده، تعیین نمود. با این وجود، تعداد مول‌های هر ماده، n_i متغیرهای مستقل نیستند، زیرا تعداد مول‌های هر المان (اتم) بایستی ثابت باقی بماند. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\psi_i = \sum_{i=1}^C n_i e_{i,j} - E_{0,j} = 0 \quad \text{for } j=1 \dots E \quad (6)$$

که در آن $E_{0,j}$ تعداد مول‌های هر المان است که ابتدا در مخلوط وجود دارد. تابع ψ_i فقط به تعداد مول‌های هر ماده بستگی دارد؛ بنابراین مشتق کلی تابع ψ_i به صورت زیر خواهد بود:

$$d\psi_j = \sum_{i=1}^C \left(\frac{\partial \psi_j}{\partial n_i} \right)_{n_j, j \neq i} dn_i = 0 \quad \text{for } j=1 \dots E \quad (7)$$

که در آن، مشتق جزئی ψ_j نسبت به n_i بایستی برابر با $e_{i,j}$ یعنی تعداد مول‌های المان (اتم) j در ماده i باشد:

$$\left(\frac{\partial \psi_j}{\partial n_i} \right)_{n_j, j \neq i} = e_{i,j} \quad (8)$$

در روش لاگرانژ، مشتق کلی هر معادله، ضریب نامعینی است که

1 Gibbs

جدول ۱. معادلات حاکم بر بالانس مولی برای پیل سوختی

Table 1. The governing equations on the molar balance of the SOFC

خروجی کاند		خروجی آند	
(۲۴)	$\dot{n}_{O_2,13} = \dot{n}_{O_2,9} - o_r / 2$	(۱۸)	$\dot{n}_{CH_4,12} = \dot{n}_{CH_4,11} - r_r$
(۲۵)	$\dot{n}_{N_2,13} = \dot{n}_{N_2,9}$	(۱۹)	$\dot{n}_{H_2O,12} = \dot{n}_{H_2O,11} - r_r - s_r + o_r$
		(۲۰)	$\dot{n}_{CO_2,12} = \dot{n}_{CO_2,11} + s_r$
		(۲۱)	$\dot{n}_{CO,12} = \dot{n}_{CO,11} + r_r - s_r$
		(۲۲)	$\dot{n}_{H_2,12} = \dot{n}_{H_2,11} + 3r_r + s_r - o_r$
		(۲۳)	$\dot{n}_{N_2,12} = \dot{n}_{N_2,11}$

۱-۲-۳- مدل سازی پیل سوختی

که در آن (U_p) ضریب مصرف سوخت است. ضریب مصرف هوا

(U_{air}) نیز به صورت زیر تعریف می گردد:

$$U_a = \frac{(Air)_{consumed}}{(Air)_{supplied}} = \frac{o_r}{2\dot{n}_{O_2,9}} \quad (27)$$

ثابت های تعادلی نیز برای واکنش های بهسازی و شیفتینگ به صورت زیر بیان می شوند [۲۱]:

$$K_r = \exp\left(\frac{y_{CO,12} y_{H_2,12}}{y_{CH_4,12} y_{H_2O,12}} \left(\frac{P_{12}}{P_0}\right)^2\right) \quad (28)$$

که در آن K_r ثابت تعادلی مربوط به واکنش بهسازی است که از طرفی داریم:

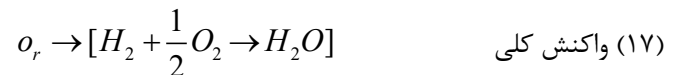
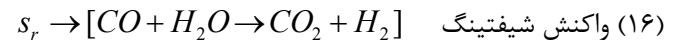
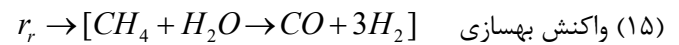
$$k_r = \exp\left(-\frac{\Delta \bar{g}_r^0}{RT_{12}}\right) \quad (29)$$

که در آن، T_{12} دمای خروجی آند و کاتد پیل سوختی بوده و $\Delta \bar{g}_r^0$ تغییرات انرژی آزاد گیبس^۴ واکنش بهسازی است که به شکل زیر تعریف می گردد:

$$\Delta \bar{g}_r^0 = \bar{g}_{CO,12}^0 + 3\bar{g}_{H_2,12}^0 - \bar{g}_{CH_4,12}^0 - \bar{g}_{H_2O,12}^0 \quad (30)$$

همچنین ثابت تعادلی برای واکنش شیفتینگ به ترتیب روابط (۳۱) و (۳۲) تعریف می گردد:

گاز سنتز ورودی به پیل سوختی با طی واکنش های بهسازی و شیفتینگ^۱ (روابط (۱۵) و (۱۶)) تبدیل به به گاز سنتز غنی شده با هیدروژن^۲ می شود. همچنین، به واسطه واکنش های الکتروشیمیایی، هیدروژن تولید شده در آند و یون اکسیژن تبادلی از طریق الکترولیت که از کاتد به آند می رود، واکنش کلی^۳ (رابطه (۱۷)) پیل سوختی رخ می دهد [۲۰]:



در معادلات فوق r_r ، s_r و o_r به ترتیب نرخ تبدیل مولی واکنش های بهسازی، شیفتینگ و کلی هستند. با در نظر گرفتن پیل سوختی به عنوان حجم کنترل و به کار بردن معادلات بقای جرم برای واکنش های (۱۵) الی (۱۷)، معادلات بالانس مولی برای پیل سوختی استخراج می شوند، که در جدول ۱ آورده شده است. هیدروژن مصرف شده در پیل سوختی به صورت زیر می تواند تعریف شود:

$$U_f = \frac{(Fuel)_{consumed}}{(Fuel)_{supplied}} = \frac{o_r}{\dot{n}_{H_2,11} + 3r_r + s_r} \quad (26)$$

- 1 Shifting
- 2 Hydrogen Rich Syngas
- 3 Overall

4 Gibbs Free Energy

$$\rho_a = \left[\frac{9.5 \times 10^7}{T_{12}} \exp\left(\frac{-1150}{T_{12}}\right) \right]^{-1}, L_a = 0.0005 \quad (37)$$

$$\rho_c = \left[\frac{4.2 \times 10^7}{T_{12}} \exp\left(\frac{-1200}{T_{12}}\right) \right]^{-1}, L_c = 0.00005 \quad (38)$$

$$\rho_e = \left[33400 \exp\left(\frac{-10300}{T_{12}}\right) \right]^{-1}, L_e = 0.00001 \quad (39)$$

$$\rho_{int} = \left[\frac{9.3 \times 10^6}{T_{12}} \exp\left(\frac{-1100}{T_{12}}\right) \right]^{-1}, L_{int} = 0.003 \quad (40)$$

در روابط فوق ρ و L به ترتیب نشان دهنده مقاومت الکتریکی و ضخامت اجزای مختلف سلول می‌باشند. J نیز چگالی جریان است. همچنین اندیس‌های a و c و e و int نشانگر آند و کاتد و الکترولیت^۷ و اتصالات آن‌ها با هم^۸ است.

۳-۲-۴- افت ولتاژ فعال سازی^۹

افت ولتاژ فعال سازی در فصل مشترک الکترودها (کاتد و آند) و الکترولیت اتفاق می‌افتد که توسط معادلات زیر بیان می‌شود [۲۴]:

$$V_{act} = V_{act,a} + V_{act,c} \quad (41)$$

$$V_{act,a} = \bar{R} \frac{T_{12}}{F} \text{Arc sin}\left(\frac{j}{2j_{oa}}\right), j_{oa} = 0.65 \times 10^4 \quad (42)$$

$$V_{act,c} = \bar{R} \frac{T_{12}}{F} \text{Arc sin}\left(\frac{j}{2j_{oc}}\right), j_{oc} = 0.25 \times 10^4 \quad (43)$$

۳-۲-۵- افت ولتاژ غلظتی^{۱۰}

زمانی که جریان در پیل سوختی برقرار می‌شود، اختلاف غلظت گونه‌ها در سه ناحیه آند، کاتد و الکترولیت افزایش می‌یابد و موجب ایجاد افت ولتاژ غلظتی می‌شود که توسط روابط (۴۴) تا (۴۸) تعریف می‌گردد [۲۵]:

$$k_s = \exp\left(\frac{y_{CO_2,12} y_{H_2,12}}{y_{CO,12} y_{H_2O,12}}\right) \quad (31)$$

$$k_s = \exp\left(-\frac{\Delta \bar{g}_s^0}{RT_{12}}\right) \quad (32)$$

که در آن، $\Delta \bar{g}_s^0$ تغییرات انرژی آزاد گیبس واکنش بهسازی است که به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$\Delta \bar{g}_s^0 = \bar{g}_{CO_2,12}^0 + \bar{g}_{H_2,12}^0 - \bar{g}_{CO,12}^0 - \bar{g}_{H_2O,12}^0 \quad (33)$$

۳-۲-۲- ولتاژ سلول^۱

ولتاژ نرنست^۲ (رابطه (۳۴))، بیشترین ولتاژ قابل حصول از پیل سوختی است زمانی که هیچ جریان الکتریکی در آن برقرار نباشد. پس، به دلیل وجود انواع افت ولتاژ^۳، مقدار واقعی ولتاژ سلول کمتر از ولتاژ مدار باز آن است که به صورت رابطه (۳۵) بیان می‌شود [۲۲]:

$$V_n = -\frac{\Delta \bar{g}^0}{2F} + \bar{R} \frac{T_{12}}{2F} \ln\left(\left(\frac{P_{H_2,12}}{P_0}\right) \frac{(P_{O_2,13}/P_0)^{0.5}}{P_{H_2O,12}/P_0}\right) \quad (34)$$

$$V_c = V_n - V_{loss} = V_n - (V_{ohm} + V_{act} + V_{con}) \quad (35)$$

در رابطه (۳۴)، $\Delta \bar{g}^0$ ، R ، F و T_{12} به ترتیب اختلاف انرژی آزاد گیبس، ثابت فارادی^۴، ثابت جهانی گازها^۵ و دمای خروجی پیل سوختی است.

۳-۲-۳- افت ولتاژ اهمیک^۶

افت ولتاژ اهمیک یکی از مهمترین پارامترها در انواع پیل‌های سوختی است که توسط روابط (۳۶) تا (۴۰) بیان می‌شود [۲۳]:

$$V_{ohm} = (\rho_a L_a + \rho_c L_c + \rho_e L_e + \rho_{int} L_{int}) \cdot J \quad (36)$$

7 Electrolyte
8 Interconnect
9 Activation Polarization
10 Concentration Polarization

1 Cell Voltage
2 Nernst
3 Polarization
4 Faraday Constant
5 Gas Universal Constant
6 Ohmic Polarization

است که به ترتیب برابر با ۹۸ درصد و ۱۱۰۰ در نظر گرفته شده‌اند. I نیز بیانگر جریان الکتریکی عبوری از پیل سوختی است که مطابق رابطه (۵۲) تعریف می‌شود:

$$I = j \times A_c \quad (۵۲-الف)$$

$$j = 2Fo_r / N_c A_c \quad (۵۲-ب)$$

که در آن، A_c مساحت سطح مقطع هر سلول پیل سوختی است.

۴-۲- تحلیل انرژی

انرژی به صورت بیشینه کار قابل حصول از تعامل یک سیستم و محیط تعریف می‌شود، به طوری که سیستم مورد نظر از یک حالت مشخص ترمودینامیکی به حالت مرده برسد و در طی آن با محیط اطراف خود فقط تبادل گرما داشته باشد [۲۷]. موازنه آهنگ انرژی برای یک حجم کنترل به صورت زیر بیان می‌شود [۲۸ و ۲۹]:

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{cv} - p_0 \frac{dV_{cv}}{dt} \right) + \sum_i \dot{E}X_i - \sum_e \dot{E}X_e - \dot{I}_{D,K} \quad (۵۳)$$

معادلات بالانس انرژی و انرژی به کار رفته برای تحلیل ترمودینامیکی سیستم در جدول ۲ آورده شده‌اند. بازده انرژی سیستم مورد مطالعه نیز به صورت رابطه (۵۴) تعریف می‌شود.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{AC,inv} - \dot{W}_{FC} - \dot{W}_{WP} - \dot{W}_{AC} - \dot{W}_{Blw}}{\dot{m}_{fuel} ex_{ch, fuel}} \times 100 \quad (۵۴)$$

۵- اعتباردهی نتایج حاصل از مدل سازی پیل سوختی اکسید جامد

برای اعتباردهی نتایج حاصل از مدل سازی پیل سوختی اکسید جامد، از داده‌های آزمایشگاهی تاو و همکاران [۳۰] استفاده شده است که در جدول ۳ آورده شده است.

۶- نتایج و بحث

در این بخش، تاثیر پارامترهای مهم طراحی از قبیل چگالی جریان و دمای کاری پیل سوختی، به ازای ۱ درصد بازخوانی

$$V_{conc} = V_{conc,a} + V_{conc,c} \quad (۴۴)$$

$$V_{conc,a} = \bar{R} \frac{T_{12}}{2F} \left(-\ln\left(1 - \frac{j}{j_{as}}\right) + \ln\left(1 + \frac{P_{H_2,12} j}{P_{H_2O,12} j_{as}}\right) \right) \quad (۴۵)$$

$$V_{conc,c} = -\frac{\bar{R} T_{12}}{4F} \ln\left(1 - \frac{j}{j_{cs}}\right) \quad (۴۶)$$

$$j_{as} = \frac{2FP_{H_2,12} D_{aeff} 100000}{\bar{R} T_{12} L_a}, \quad D_{aeff} = 0.2 \times 10^{-4} \quad (۴۷)$$

$$j_{cs} = \frac{4FP_{O_2,13} D_{ceff} 100000}{\left(\frac{P_{13} - P_{O_2,13}}{P_{13}}\right) \bar{R} T_{12} L_c}, \quad D_{ceff} = 0.05 \times 10^{-4} \quad (۴۸)$$

در روابط فوق، D_{aeff} و D_{ceff} به ترتیب ضریب نفوذ گازی موثر^۱ در آند و کاتد را نشان می‌دهند.

۴- تحلیل ترمودینامیکی

۴-۱- تحلیل انرژی

معادله بالانس انرژی برای هر یک از اجزای سیستم پیشنهادی بر اساس رابطه (۴۹) بیان می‌شود [۲۶]:

$$\dot{Q}_{cv} + \sum \dot{H}_i = \dot{W}_{cv} + \sum \dot{H}_e \quad (۴۹)$$

$$\dot{H}_k = \dot{m}_k h_k$$

در معادله فوق، \dot{Q}_{cv} و \dot{W}_{cv} به ترتیب نشانگر انتقال حرارت و کار از حجم کنترل مورد مطالعه هستند. بازده انرژی سیستم مورد مطالعه نیز مطابق رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$\eta_{en} = \frac{\dot{W}_{AC,inv} - \dot{W}_{FC} - \dot{W}_{WP} - \dot{W}_{AC} - \dot{W}_{Blw}}{\dot{m}_{fuel} LHV_{fuel}} \times 100 \quad (۵۰)$$

در رابطه فوق، LHV_{fuel} ارزش حرارتی پایین سوخت متان است. همچنین $\dot{W}_{AC,inv}$ کار تولیدی خالص توسط پیل سوختی است، که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{W}_{AC,inv} = \eta_{inv} \times N_c \times V_c \times I \quad (۵۱)$$

که در آن، η_{inv} ، بازده مبدل و N_c تعداد سلول پیل سوختی

جدول ۲. معادلات بالانس انرژی و انرژری برای اجزای مختلف چرخه

Table 2. The energy and exergy balance equations for the system components

معادله بالانس انرژی	معادله بالانس انرژری	جزء
$\dot{H}_1 + \dot{W}_{FC} = \dot{H}_2$	$\dot{E}x_1 + \dot{W}_{FC} = \dot{E}x_2 + \dot{I}_{FC}$	دمنده سوخت
$\dot{H}_4 + \dot{W}_{WP} = \dot{H}_5$	$\dot{E}x_4 + \dot{W}_{WP} = \dot{E}x_5 + \dot{I}_{WP}$	پمپ آب
$\dot{H}_7 + \dot{W}_{AC} = \dot{H}_8$	$\dot{E}x_7 + \dot{W}_{AC} = \dot{E}x_8 + \dot{I}_{AC}$	دمنده هوا
$\dot{H}_{15} + \dot{W}_{Blw} = \dot{H}_{16}$	$\dot{E}x_{15} + \dot{W}_{Blw} = \dot{E}x_{16} + \dot{I}_{Blw}$	دمنده
$\dot{H}_2 + \dot{H}_{17} = \dot{H}_3 + \dot{H}_{18}$	$\dot{E}x_2 + \dot{E}x_{17} = \dot{E}x_3 + \dot{E}x_{18} + \dot{I}_{HEX1}$	مبادله کن حرارتی ۱
$\dot{H}_5 + \dot{H}_{18} = \dot{H}_6 + \dot{H}_{19}$	$\dot{E}x_5 + \dot{E}x_{18} = \dot{E}x_6 + \dot{E}x_{19} + \dot{I}_{HEX2}$	مبادله کن حرارتی ۲
$\dot{H}_8 + \dot{H}_{20} = \dot{H}_9 + \dot{H}_{21}$	$\dot{E}x_8 + \dot{E}x_{20} = \dot{E}x_9 + \dot{E}x_{21} + \dot{I}_{HEX3}$	مبادله کن حرارتی ۳
$\dot{H}_3 + \dot{H}_6 + \dot{H}_{16} = \dot{H}_{10}$	$\dot{E}x_3 + \dot{E}x_6 + \dot{E}x_{16} = \dot{E}x_{10} + \dot{I}_{Mix}$	مخلوط کن
$\dot{H}_{19} = \dot{H}_{20}$	$\dot{E}x_{19} = \dot{E}x_{20} + \dot{I}_{Ref}$	بهساز
$\dot{H}_9 + \dot{H}_{11} = \dot{H}_{12} + \dot{H}_{13} + \dot{W}_{stack}$	$\dot{E}x_9 + \dot{E}x_{11} = \dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{13} + \dot{I}_{SOFCStack}$	پیل سوختی
$\dot{H}_{12} + \dot{H}_{13} = \dot{H}_{14}$	$\dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{13} = \dot{E}x_{14} + \dot{I}_{Ref}$	پس سوز

جدول ۳. اعتباردهی نتایج حاصل از مدل سازی پیل سوختی اکسید جامدبا استفاده از داده های آزمایشگاهی تاو و همکاران [۳۰]

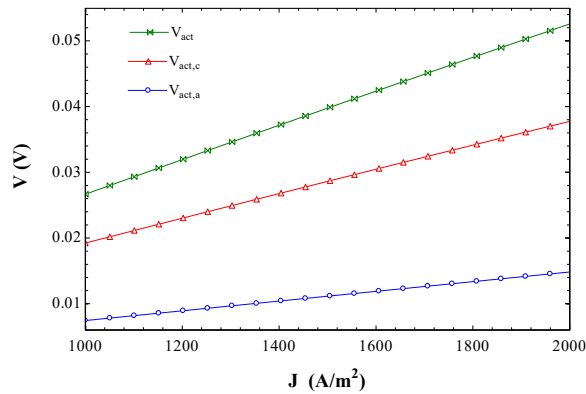
Table 3. Validation of the results regarding the SOFC modeling using the experimental data reported by Tao et al. [30]

توان بر حسب کیلووات بر مترمربع (تاو و همکاران)	چگالی توان بر حسب کیلووات بر مترمربع (کار حاضر)	ولتاژ سلول بر حسب ولت (تاو و همکاران)	ولتاژ سلول بر حسب ولت (کار حاضر)	چگالی جریان (آمپر بر سانتی متر مربع)
۰/۱۵	۰/۱۵۸	۰/۷۶	۰/۷۹	۰/۲
۰/۲۱	۰/۲۱۶	۰/۶۸	۰/۷۱۱	۰/۳
۰/۲۶	۰/۲۵۳	۰/۶۲	۰/۶۴۴	۰/۴
۰/۲۹۵	۰/۲۸۸	۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۵
۰/۳۱۵	۰/۳	۰/۵۲	۰/۵۱	۰/۶

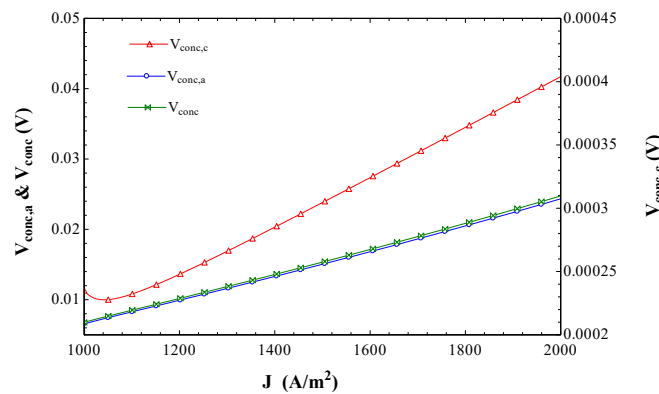
۱-۶- مطالعه پارامتریک تاثیر چگالی جریان

شکل ۲، تاثیر چگالی جریان را روی افت ولتاژ فعال سازی پیل سوختی اکسید جامد، به ازای دمای کاری پیل برابر با ۸۵۰ درجه سلسیوس، ضریب مصرف سوخت ۰/۸۵ و نسبت بخار به کربن برابر با

گازهای خروجی سیستم، روی شاخصه های عملکردی سیستم شامل انواع ولتاژ و افت ولتاژ داخل پیل سوختی، دبی جرمی سوخت، آب و هوای ورودی به سیستم، توان تولیدی سیستم و بازده انرژری و انرژری سیستم بررسی شده است.



شکل ۲. تاثیر چگالی جریان روی افت ولتاژ فعال سازی پیل سوختی اکسید جامد، به ازای دمای کاری پیل برابر با ۸۵۰ درجه سلسیوس
 Fig. 2. Current density effects on the activation voltage losses at the SOFC operating temperature of 850 °C



شکل ۳. تاثیر چگالی جریان روی افت ولتاژ غلظتی پیل سوختی اکسید جامد، به ازای دمای کاری پیل برابر با ۸۵۰ درجه سلسیوس
 Fig. 3. The current density effects on the concentration voltage losses at the SOFC operating temperature of 850 °C

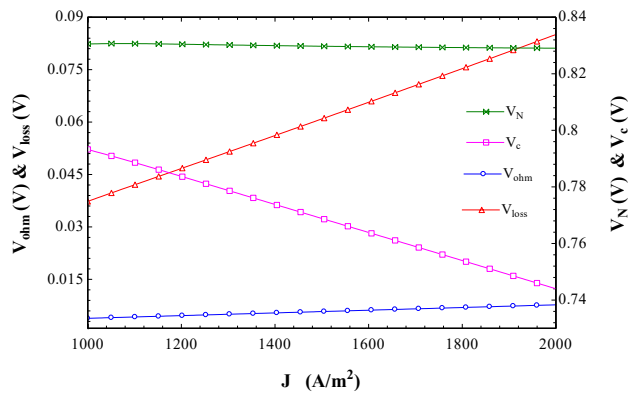
همچنین ولتاژهای نرنست و سلول به ازای دمای کاری پیل برابر با ۸۵۰ درجه سلسیوس، ضریب مصرف سوخت ۰/۸۵ و نسبت بخار به کربن برابر با ۲ نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، با افزایش ولتاژ چگالی جریان، افت ولتاژ اهمیتیک بیشتر می‌شود، که این امر با توجه به رابطه (۳۶) کاملاً قابل توجیه است. از طرفی، افت ولتاژ کل نیز به دلیل افزایش هر سه نوع افت ولتاژ، زیاد می‌شود. افزایش افت ولتاژ کل از یک طرف و کاهش ولتاژ نرنست از طرف دیگر، موجب کاهش ولتاژ سلول می‌شود که در شکل ۴ نشان داده شده است.

با افزایش چگالی جریان، دبی جرمی سوخت، آب و هوای ورودی به ازای شرایط ثابت ترمودینامیکی دمای پیل سوختی برابر با ۸۵۰ درجه سلسیوس، ضریب مصرف سوخت ۰/۸۵ و نسبت بخار به کربن برابر با ۲، بیشتر می‌شود، که در شکل ۵ نشان داده شده است. دلیل این روند این است که، با مراجعه به رابطه (۵۲-ب) با افزایش چگالی جریان، نرخ تبدیل مولی واکنش کلی (O_r) بیشتر می‌شود که این امر

۲ نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، با افزایش چگالی جریان، ولتاژ فعال سازی آند، کاتد و کل افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که، با مراجعه به روابط (۴۲) و (۴۳)، افت ولتاژ اکتویشن کاتد و آند با چگالی جریان نسبت مستقیم دارد.

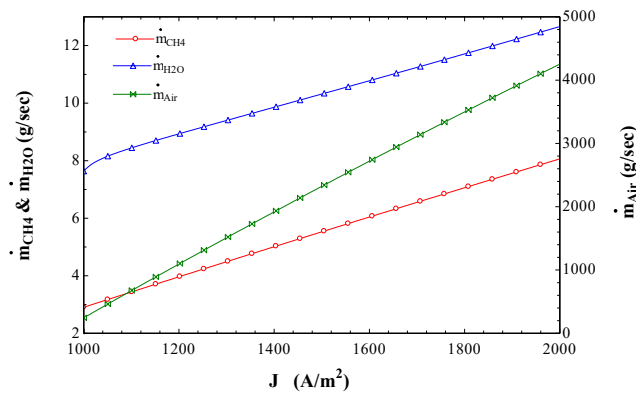
تغییرات افت ولتاژ غلظتی آند، کاتد و کل نیز بر حسب چگالی جریان به ازای دمای کاری پیل برابر با ۸۵۰ درجه سلسیوس، ضریب مصرف سوخت ۰/۸۵ و نسبت بخار به کربن برابر با ۲، در شکل ۳ نشان داده شده است. با مراجعه به شکل ۳، مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی جریان، افت ولتاژ غلظتی بیشتر می‌شود. این رفتار را به این صورت می‌توان توجیه نمود که با افزایش چگالی جریان، اختلاف غلظت گونه‌های در سه ناحیه آند، کاتد و اکتورلیت شدیدتر می‌شود، که همین امر باعث افزایش هرچه بیشتر افت ولتاژ فعال سازی می‌گردد.

شکل ۴، تاثیر چگالی جریان را روی افت ولتاژ اهمیتیک و کل و



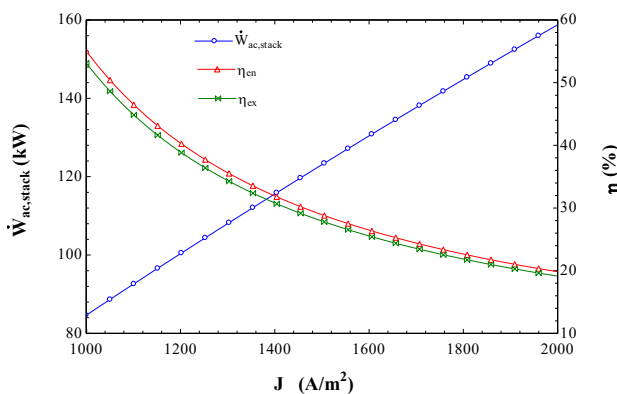
شکل ۴. تاثیر چگالی جریان روی افت ولتاژ اهمیک و کل و ولتاژ های نرنست و سلول پیل سوختی اکسید جامد، به ازای دمای کاری پیل برابر با ۸۵۰ درجه سلسیوس

Fig. 4. The current density effects on the ohmic and total voltage losses as well as the Nernst and cell voltages at the SOFC operating temperature of 850 °C



شکل ۵. تاثیر چگالی جریان روی دبی جرمی سوخت، آب و هوای ورودی به سیستم، به ازای دمای کاری پیل برابر با ۸۵۰ درجه سلسیوس

Fig. 5. The current density effects on the fuel, steam and air mass flow rates at the SOFC operating temperature of 850 °C

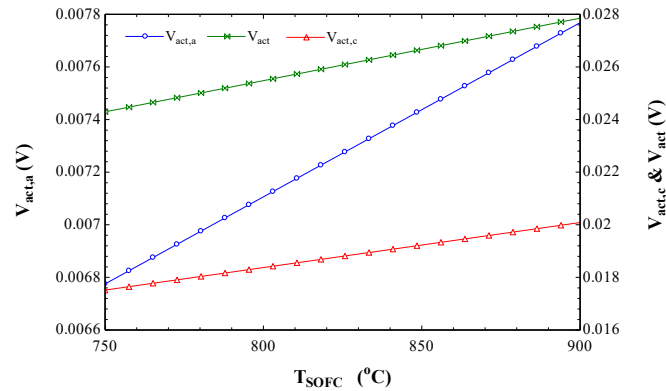


شکل ۶. تاثیر چگالی جریان روی توان تولیدی پیل سوختی، بازده انرژی و اگزرژی سیستم، به ازای دمای کاری پیل برابر با ۸۵۰ درجه سلسیوس

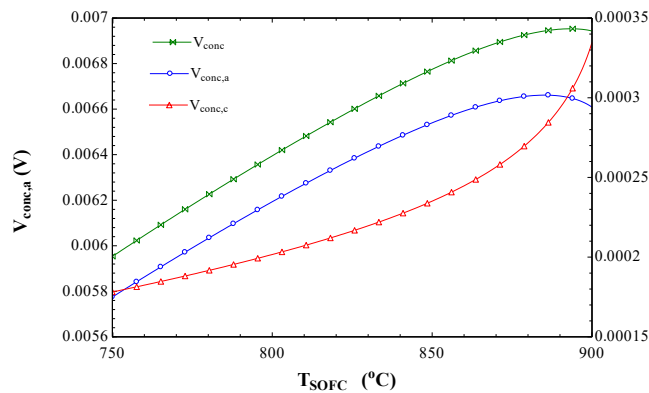
Fig. 6. The current density effects on the power production and the system energy as well as the exergy efficiencies at the SOFC operating temperature of 850 °C

بخار به کربن، دبی جرمی هوا و آب نیز به ترتیب بیشتر می‌شود. شکل ۶، نمودار تغییرات توان تولیدی پیل سوختی، بازده انرژی و اگزرژی سیستم را بر حسب چگالی جریان به ازای دمای کاری

با در نظر گرفتن مقدار ثابت برای ضریب مصرف سوخت طبق رابطه (۲۶)، افزایش دبی جرمی سوخت را به دنبال دارد. با افزایش دبی جرمی سوخت، با توجه به مقادیر ثابت ضریب مصرف هوا و نسبت



شکل ۷. تاثیر دمای کاری پیل سوختی روی افت ولتاژ فعال‌سازی پیل سوختی اکسید جامد، به ازای چگالی جریان برابر با ۱۰۰۰ آمپر بر مترمربع
 Fig. 7. The SOFC operating temperature effects on the activation voltage losses at the current density value of 1000 A/m²



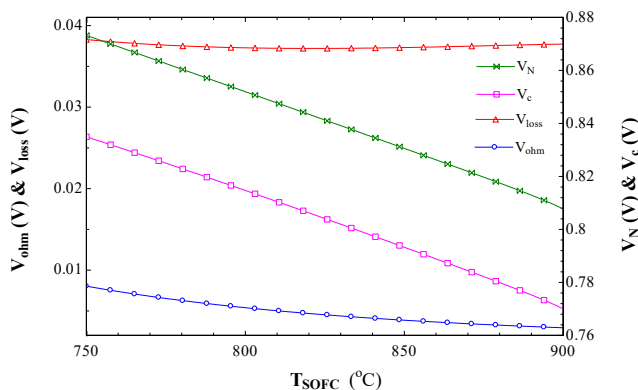
شکل ۸. تاثیر دمای کاری پیل سوختی روی افت ولتاژ غلظتی پیل سوختی اکسید جامد، به ازای چگالی جریان برابر با ۱۰۰۰ آمپر بر مترمربع
 Fig. 8. The SOFC operating temperature effects on the concentration voltage losses at the current density value of 1000 A/m²

۲-۶- مطالعه پارامتریک تاثیر دمای کار پیل سوختی

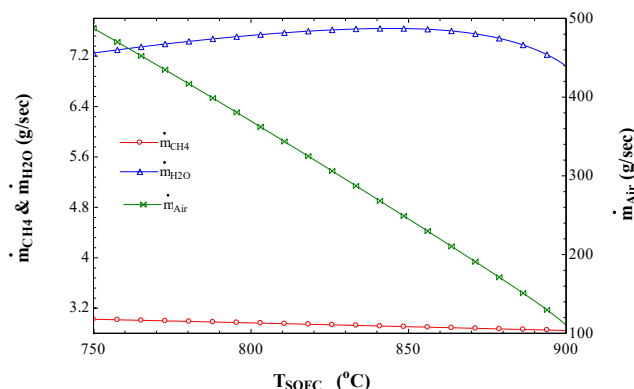
شکل ۷، نمودار تغییرات افت ولتاژ فعال‌سازی آند، کاتد و کل را بر حسب دمای کاری پیل سوختی اکسید جامد نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، با افزایش دمای کاری پیل سوختی، افت ولتاژ فعال‌سازی افزایش پیدا می‌کند، چرا که با توجه به روابط (۴۲) و (۴۳) افت ولتاژ فعال‌سازی با دمای پیل سوختی رابطه مستقیم دارد. همچنین، با توجه به روابط (۴۵) و (۴۶) و به همین دلیل، با افزایش چگالی جریان، افت ولتاژ غلظتی نیز افزایش پیدا می‌کند، که در شکل ۸ نشان داده شده است.

تاثیر دمای کاری پیل سوختی روی افت ولتاژ اهمیک و کل و همچنین ولتاژ نرنست و سلول به ازای به ازای چگالی جریان برابر با ۱۰۰۰ آمپر بر مترمربع، ضریب مصرف سوخت ۰/۸۵ و نسبت بخار به کربن برابر با ۲ در شکل ۹ نمایش داده شده است. با توجه به این

پیل برابر با ۸۵۰ درجه سلسیوس، ضریب مصرف سوخت ۰/۸۵ و نسبت بخار به کربن برابر با ۲، نشان می‌دهد. با مراجعه به این نمودار، با افزایش چگالی جریان، توان تولیدی پیل سوختی افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که، اگر چه با افزایش چگالی جریان همانطوری که در شکل ۴ نشان داده شد، ولتاژ تولیدی سلول کاهش می‌یابد، اما افزایش چگالی جریان به کاهش ولتاژ پیل غلبه کرده و در نتیجه توان تولید مطابق رابطه (۵۱) بیشتر می‌شود. از طرفی، همانطوری که از شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی جریان، علی‌رغم افزایش توان تولیدی پیل سوختی، بازده انرژی و انرژی سیستم کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار، غلبه افزایش دبی جرمی سوخت مصرفی نشان داده شده در شکل ۵ به توان تولیدی است، در نتیجه مطابق روابط (۵۰) و (۵۴) به ترتیب بازده انرژی و انرژی سیستم کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۹. تاثیر دمای کاری پیل سوختی روی افت ولتاژ اهمیک و کل و همچنین ولتاژ نرنست و سلول، به ازای چگالی جریان برابر با ۱۰۰۰ آمپر بر مترمربع
 Fig. 9. The SOFC operating temperature effects on the ohmic and total voltage losses as well as the Nernst and cell voltages at the current density value of 1000 A/m²



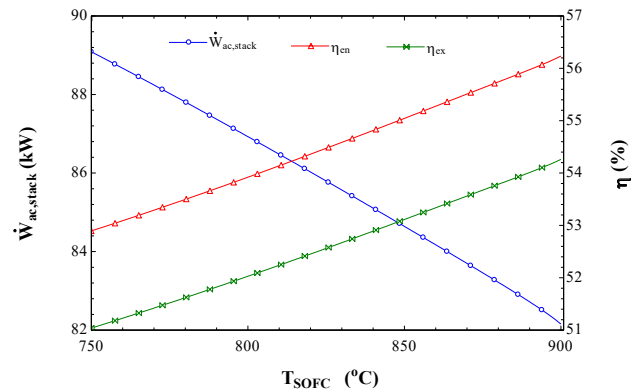
شکل ۱۰. تاثیر دمای کاری پیل سوختی روی دبی جرمی سوخت، آب و هوای ورودی به سیستم، به ازای چگالی جریان برابر با ۱۰۰۰ آمپر بر مترمربع
 Fig. 10. The SOFC operating temperature effects on fuel, steam and air mass flow rates at the current density value of 1000 A/m²

روند این است که با افزایش دما، آنتالپی جریان‌های ورودی و خروجی آند و کاتد پیل بیشتر می‌شود، که با توجه به رابطه (۶۶-الف) بیان شده برای بالانس انرژی پیل، موجب کاهش دبی جرمی سوخت و هوا می‌گردد. همچنین، نمودار تغییرات توان تولیدی پیل سوختی، بازده انرژی و بازده انرژی سیستم پیشنهادی را بر حسب افزایش دمای کاری پیل به ازای چگالی جریان برابر با ۱۰۰۰ آمپر بر مترمربع، ضریب مصرف سوخت ۰/۸۵ و نسبت بخار به کربن برابر با ۲، در شکل ۱۱ آورده شده است.

با توجه به این نمودار، با افزایش دمای کاری پیل سوختی، توان تولیدی آن کاهش پیدا می‌کند که دلیل آن افت ولتاژ سلول با بالا رفتن دمای کاری پیل است که در شکل ۹ نشان داده شد. همچنین، شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش دمای کاری پیل سوختی اکسید جامد، علی‌رغم کاهش توان تولیدی پیل سوختی، بازده انرژی و

نمودار، با افزایش دمای کاری پیل سوختی، افت ولتاژ اهمیک کاهش پیدا می‌کند، که به دلیل ارتباط مستقیم دما با مقاوت‌های الکتریکی اجزای مختلف پیل سوختی است (مراجعه شود به روابط (۳۶) تا (۳۹)). با توجه به رفتار متفاوت انواع افت ولتاژهای فعال‌سازی و غلظتی که به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است، با رفتار افت ولتاژ اهمیک، افت ولتاژ کل تقریباً ثابت می‌ماند که در شکل ۹ مشاهده می‌شود. از طرفی با افزایش دمای کاری پیل سوختی، ولتاژ نرنست کاهش می‌یابد، که به توجه به ثابت ماندن افت ولتاژ کل، کاهش ولتاژ سلول را به دنبال دارد که در شکل ۹ نشان داده شده است.

شکل ۱۰، تغییرات دبی جرمی سوخت، آب و هوای ورودی به سیستم را بر حسب افزایش دمای کاری پیل سوختی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، با بالا رفتن دمای کاری پیل سوختی، دبی جرمی سوخت مصرفی و هوا ورودی به سیستم کاهش پیدا می‌کند. دلیل این



شکل ۱۱. تاثیر دمای کاری پیل سوختی روی توان تولیدی پیل سوختی، بازده انرژی و آگزرژی سیستم، به ازای چگالی جریان برابر با ۱۰۰۰ آمپر بر مترمربع
 Fig. 11. The SOFC operating temperature effects on the power production and the system energy as well as the exergy efficiencies at the current density value of 1000 A/m²

جدول ۴. نتایج حاصل از بهینه‌سازی سیستم تولید توان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد کوپل شده با فرآیند بهسازی سه‌گانه
 Table 4. The optimization results of the proposed SOFC system integrated with the external reforming

پارامتر	بهینه‌سازی تک‌هدفه بر مبنای بیشینه کردن بازده انرژی و یا بازده آگزرژی
چگالی جریان (آمپر بر مترمربع)	۱۰۰۰
دمای کاری پیل سوختی (درجه سلسیوس)	۹۰۰
ضریب مصرف سوخت	۰/۸۵
چگالی توان تولیدی (کیلووات بر مترمربع)	۸۴/۶۴
دبی جرمی سوخت مصرفی (گرم بر ثانیه)	۲/۹۰۶
دبی جرمی آب ورودی به سیستم (گرم بر ثانیه)	۷/۶۳۸
دبی جرمی هوای ورودی به سیستم (گرم بر ثانیه)	۲۴۵/۲
بازده انرژی (درصد)	۵۵/۰۴
بازده آگزرژی (درصد)	۵۳/۱۱
دمای بیشینه چرخه (درجه سلسیوس)	۹۴۹/۳
دمای ورودی پیل سوختی (درجه سلسیوس)	۶۷۹/۶
دمای ورودی بهسازی (درجه سلسیوس)	۶۷۹/۶
دمای گازهای خروجی از سیستم (درجه سلسیوس)	۱۸۶/۴
دبی جرمی گازهای خروجی از سیستم (گرم بر ثانیه)	۲۵۵/۸
میزان برگشت‌ناپذیری در دمنده سوخت	۰/۰۱۳۱۸ (۰/۰۲۴ درصد)
میزان برگشت‌ناپذیری در دمنده هوا	۰/۲۸۲۸ (۰/۵۳ درصد)
میزان برگشت‌ناپذیری در پمپ آب	۰/۰۰۰۰۲۳۶۸ (۰/۰۰۰۰۴ درصد)
میزان برگشت‌ناپذیری در مبادله‌کن حرارتی شماره ۱	۱/۷۳۹ (۳/۲۴ درصد)
میزان برگشت‌ناپذیری در مبادله‌کن حرارتی شماره ۲	۱۲/۴ (۲۳/۱۵ درصد)
میزان برگشت‌ناپذیری در مبادله‌کن حرارتی شماره ۳	۱۱/۶۸ (۲۱/۸ درصد)
میزان برگشت‌ناپذیری در پیل سوختی	۶/۴۸۴ (۱۲/۷۸ درصد)
میزان برگشت‌ناپذیری در بهسازی	۳/۸۱۳ (۷/۱۱ درصد)
میزان برگشت‌ناپذیری در پس‌سوز	۱۰/۰۲ (۱۸/۷ درصد)
میزان برگشت‌ناپذیری در دمنده	۰/۰۰۵۲۰۲ (۰/۰۰۹۷ درصد)
میزان برگشت‌ناپذیری مخلوط‌کن	۴/۵۹ (۸/۵۶ درصد)
میزان برگشت‌ناپذیری در مبدل جریان الکتریکی	۲/۵۴۱ (۴/۷۴ درصد)

فهرست علائم اختصاری

مساحت	A
فشار جزئی	a
پس‌سوز	AB
دمنده هوا	AC
مساحت سطح هر سلول پیل سوختی	A_c
بلوئر	Blw
دمنده	$Comp$
تعداد مول‌های اولیه هر المان	E
نرخ جریان انرژی	$\dot{E}x$
ثابت فارادی	F
کمپرسور سوخت	FC
تابع گیبس	G, g
آنتالپی	h
مبادله‌کن حرارتی	HEX
اینورتر	inv
چگالی جریان	J
ارزش حرارتی بالای سوخت	LHV
دبی جرمی	\dot{m}
تعداد سلول پیل سوختی	N_c
دبی مولی	\dot{n}
نرخ تبدیل مولی واکنش کلی	or
فشار	P
ثابت جهانی گازها	\bar{R}
نرخ تبدیل مولی واکنش بهسازی	rr
بهسازی	ref
آنتروپی	s
نرخ تبدیل مولی واکنش شیفیتینگ	sr
دما	T
توربین	$Turb$
ضریب مصرف هوا	U_a
ضریب مصرف سوخت	U_F
افت ولتاژ فعال‌سازی	V_{act}
افت ولتاژ غلظتی	V_{conc}

انرژی سیستم افزایش می‌یابد. این امر را به این صورت می‌توان توجیه نمود که کاهش دبی جرمی سوخت مصرفی با افزایش دمای کاری پیل سوختی (مراجعه شود به شکل ۱۰) بر کاهش توان تولیدی آن غلبه پیدا می‌کند و باعث بهبود بازده سیستم می‌شود.

۳-۶- بهینه‌سازی سیستم

در این بخش نتایج حاصل از بهینه‌سازی سیستم بر مبنای بیشینه کردن بازده انرژی سیستم ارائه می‌شود. نتایج حاصل از بهینه‌سازی سیستم نشان می‌دهد که در شرایط بهینه، بازده انرژی و بازده انرژی همزمان به بیشینه مقدار خود می‌رسند مقادیر پارامترهای طراحی و همچنین شاخصه‌های عملکردی سیستم در نقطه طراحی بهینه به ترتیب در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

نتیجه‌گیری

یک سیستم تولید توان بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد کوپل شده با فرآیند بهسازی خارجی سه‌گانه از طریق بازخورای گازهای خروجی سیستم، پیشنهاد شده و از دیدگاه ترمودینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. تاثیر پارامترهای مهم سیستم شامل چگالی جریان، دمای کاری پیل سوختی و ضریب مصرف سوخت روی عملکرد سیستم از دیدگاه الکتروشیمیایی، انرژی و انرژی مطالعه گردید. مهمترین نتایج حاصل از این کار به قرار زیر می‌باشد:

• به ازای شرایط ثابت ترمودینامیکی و درصد مشخصی از بازخورانی گازهای خروجی سیستم، با افزایش چگالی جریان، علی‌رغم افزایش توان تولیدی سیستم، بازده انرژی و انرژی سیستم کاهش پیدا می‌کند.

• به ازای مقادیر ثابت چگالی جریان، ضریب مصرف سوخت و درصد بازخورانی گازهای خروجی احتراق، با افزایش دمای کارکردی پیل سوختی، کاهش دبی جرمی سوخت مصرفی به کاهش توان تولیدی سیستم غلبه کرده؛ که بهبود عملکرد سیستم از دیدگاه انرژی و انرژی را به دنبال دارد.

• با افزایش ضریب مصرف سوخت، دبی جرمی متان ورودی به سیستم کاهش می‌یابد و علی‌رغم کاهش توان تولیدی سیستم، سبب افزایش بازده ترمودینامیکی آن می‌شود.

Analysis of an ethanol-fuelled solid oxide fuel cell system using partial anode exhaust gas recirculation, *Journal of Power Sources*, 208 (2012) 120–130.

- [6] M. Liu, A. Lanzini, W. Halliop, V. R. M. Cobas, A. H. M. Verkooyen, and P. V. Aravind, Anode recirculation behavior of a solid oxide fuel cell system: A safety analysis and a performance optimization, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (6) (2013) 2868–2883.
- [7] M. Lo Faro, A. Vita, L. Pino, and A. S. Aricò, Performance evaluation of a solid oxide fuel cell coupled to an external biogas tri-reforming process, *Fuel Processing Technology*, 115 (2013) 238–245.
- [8] M. R. Walluk, J. Lin, M. G. Waller, D. F. Smith, and T. A. Trabold, Diesel auto-thermal reforming for solid oxide fuel cell systems: Anode off-gas recycle simulation, *Applied Energy*, 130 (2014) 94–102.
- [9] M. Rokni, Thermodynamic analyses of municipal solid waste gasification plant integrated with solid oxide fuel cell and Stirling hybrid system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (24) (2015) 7855–7869.
- [10] Wahl, Stefanie, Ana Gallet Segarra, Peter Horstmann, Maxime Carre, Wolfgang G. Bessler, François Lapique, and K. Andreas Friedrich. "Modeling of a thermally integrated 10 kWe planar solid oxide fuel cell system with anode offgas recycling and internal reforming by discretization in flow direction." *Journal of Power Sources* 279 (2015): 656-666.
- [11] Manenti, Flavio, Renato Pelosato, Paolo Vallevi, Andres Ricardo Leon-Garzon, Giovanni Dotelli, Antonio Vita, Massimiliano Lo Faro, Gaetano Maggio, Lidia Pino, and Antonino S. Aricò. "Biogas-fed solid oxide fuel cell (SOFC) coupled to tri-reforming process: Modelling and simulation." *international journal of hydrogen energy* 40, no. 42 (2015): 14640-14650.
- [12] K. Wiranarongkorn and S. Authayanun, ScienceDirect Analysis of thermally coupling steam and tri-reforming processes for the production of hydrogen from bio-oil, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(41) (2016) 18370–18379.
- [13] L. Barelli, G. Bidini, G. Cinti, F. Gallorini, and M. Pini, *Journal of Power Sources*, 208 (2012) 120–130.

ولتاژ نرنست	V_n
افت ولتاژ اهمیک	V_{ohm}
توان	\dot{W}
کسر مولی	y
Subscripts	
اگزورژی فیزیکی	ph
اگزورژی شیمیایی	ch
انرژی	en
اگزورژی	ex
آیزوتروپیک	is
Greek symbols	
بازده	η
پتانسیل شیمیایی	μ
چگالی	ρ

مراجع

- [1] M. Halmann and A. Steinfeld, Fuel saving, carbon dioxide emission avoidance, and syngas production by tri-reforming of flue gases from coal- and gas-fired power stations, and by the carbothermic reduction of iron oxide, *Energy*, 31(15) (2006) 3171–3185.
- [2] M. Sadeghi, A. Chitsaz, S. M. S. Mahmoudi, and M. A. Rosen, Thermoeconomic optimization using an evolutionary algorithm of a trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell, *Energy*, 89 (2015) 191–204.
- [3] R. Dietrich, J. Oelze, A. Lindermeir, C. Spitta, M. Steffen, T. Küster, S. Chen, C. Schlitzberger, and R. Leithner, Efficiency gain of solid oxide fuel cell systems by using anode offgas recycle - Results for a small scale propane driven unit, *Journal of Power Sources*, 196 (17) (2011) 7152–7160.
- [4] S. Wongchanapai, H. Iwai, M. Saito, and H. Yoshida, Performance evaluation of an integrated small-scale SOFC-biomass gasification power generation system, *Journal of Power Sources*, 216 (2012) 314–322.
- [5] D. Saebea, Y. Patcharavorachot, and A. Arpornwichanop,

- integrated with a Stirling engine, *Energy Conversion and Management*, 143 (2017) 448–458.
- [23] S. M. S. Mahmoudi and L. Khani, Thermodynamic and exergoeconomic assessments of a new solid oxide fuel cell-gas turbine cogeneration system, *Energy Conversion and Management*, 123 (2016) 324–337.
- [24] C. O. Colpan, I. Dincer, and F. Hamdullahpur, Thermodynamic modeling of direct internal reforming solid oxide fuel cells operating with syngas, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 (7) (2007) 787–795.
- [25] S. H. Chan, C. F. Low, and O. L. Ding, Energy and exergy analysis of simple solid-oxide fuel-cell power systems, *Journal of Power Sources*, 103 (2) (2002) 188–200.
- [26] M. Sadeghi, S. M. S. Mahmoudi, and R. Khoshbakhti Saray, Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of an ejector refrigeration cycle powered by an internal combustion (HCCI) engine, *Energy Conversion and Management*, 96 (2015) 403–417.
- [27] M. Sadeghi, M. Yari, S. M. S. Mahmoudi, and M. Jafari, Thermodynamic analysis and optimization of a novel combined power and ejector refrigeration cycle – Desalination system, *Applied Energy*, 208 (2017) 239–251.
- [28] A. Nemati, M. Sadeghi, and M. Yari, Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a marine engine waste heat driven RO desalination system integrated with an organic Rankine cycle using zeotropic working fluid, *Desalination*, 422 (2017) 113–123.
- [29] M. Sadeghi, A. Nemati, A. ghavimi, and M. Yari, Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of various ORC (organic Rankine cycle) configurations using zeotropic mixtures, *Energy*, 109 (2016) 791–802.
- [30] Tao G, Armstrong T, Virkar A, Intermediate temperature solid oxide fuel cell (IT-SOFC) research and development activities at MSRI, *Ninet. Annu. ACERC&ICES Conf. Utah*, (2005).
- SOFC stack coupled with dry reforming, *Applied Energy*, 192 (2017) 498–507.
- [14] A. S. Mehr et al, Solar-assisted integrated biogas solid oxide fuel cell (SOFC) installation in wastewater treatment plant: Energy and economic analysis, *Applied Energy*, 191 (2017) 620–638.
- [15] M. Rokni, Addressing fuel recycling in solid oxide fuel cell systems fed by alternative fuels, *Energy*, 137 (2017) 1013–1025.
- [16] N. Chatrattanawet, D. Saebea, S. Authayanun, A. Arpornwichanop, and Y. Patcharavorachot, Performance and environmental study of a biogas-fuelled solid oxide fuel cell with different reforming approaches, *Energy*, 146 (2018) 131–140.
- [17] A. Chitsaz, M. Sadeghi, M. Sadeghi, and E. Ghanbarloo, Exergoenvironmental comparison of internal reforming against external reforming in a cogeneration system based on solid oxide fuel cell using an evolutionary algorithm, *Energy*, 144 (2018) 420–431.
- [18] M. Sadeghi, M. Jafari, M. Yari, and S. M. S. Mahmoudi, Exergoeconomic assessment and optimization of a syngas production system with a desired H₂/CO ratio based on methane tri-reforming process, *Journal of CO₂ Utilization.*, 25 (2018) 283–301.
- [19] Sanford, Klein, Thermodynamics/S. Klein, G. Nellis.” *New York: Cambridge*, (2012).
- [20] F. Ranjbar, A. Chitsaz, S. M. S. Mahmoudi, S. Khalilarya, and M. A. Rosen, Energy and exergy assessments of a novel trigeneration system based on a solid oxide fuel cell, *Energy Conversion and Management*, 87 (2014) 318–327.
- [21] M. Sadeghi, A. S. Mehr, M. Zar, and M. Santarelli, Multi-objective optimization of a novel syngas fed SOFC power plant using a downdraft gasifier, *Energy*, 148 (2018) 16–31.
- [22] J. Hosseinpour, M. Sadeghi, A. Chitsaz, F. Ranjbar, and M. A. Rosen, Exergy assessment and optimization of a cogeneration system based on a solid oxide fuel cell

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Jafari, M. Sadeghi, S.M.S Mahmoudi, M. Yari, Thermodynamic Analysis of Power Generation System Based on Solid Oxide Fuel Cell With External Reforming, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(Special Issue 1) (2021) 605-622.

DOI: 10.22060/mej.2019.16125.6279



