

تحلیل انرژی و انرژی سیستم تولید سه‌گانه بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد با سوخت مستقیم آمونیاک

محمد حسنی ربکانی

شهرام خلیل آریا

وحید زارع*

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

در این تحقیق یک سیستم تولید سه‌گانه بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد با سوخت مستقیم آمونیاک، پیشنهاد شده و مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی شامل مدل‌سازی ترمودینامیکی پیل سوختی به منظور تحلیل انرژی و انرژی اجزاء و در نهایت محاسبه بازده انرژی و انرژی سیستم تولید سه‌گانه است. در سیستم پیشنهادی از یک پیل سوختی اکسید جامد با الکترولیت هیدروژن-پروتونی، به عنوان مولد اصلی استفاده شده که بر اساس نتایج گزارش شده پیشین، بیشترین بازده را برای پیل‌های سوختی با سوخت آمونیاک دارا می‌باشد. در ادامه، تأثیر پارامترهای مهمی چون چگالی جریان، دما و فشار کاری سیستم و فاکتور بهره‌گیری از سوخت، روی عملکرد سیستم تولید سه‌گانه، مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج بدست آمده، با در نظر گرفتن دما و فشار کاری 1073 K و 505 kPa برای پیل سوختی، فاکتور بهره‌گیری از انرژی و بازده انرژی سیستم پیشنهادی، اعداد قابل توجه 108.9% و 75% بوده و با جایگزینی سیستم تولید سه‌گانه پیشنهادی به جای پیل سوختی تنها، فارغ از بار سرمایشی و گرمایشی تولید شده، توان تولیدی به میزان 633 kW افزایش می‌یابد. **واژه‌های کلیدی:** سیستم تولید سه‌گانه، پیل سوختی اکسید جامد، آمونیاک، تحلیل انرژی و انرژی.

Energy and Exergy Analysis of a Tri-Generation System based on Ammonia-Fed Solid Oxide Fuel Cell

M. Hassani Rikani

Sh. Khalil Aria

V. Zare

Faculty of Mechanical Engineering, Urmia university of Technology, Urmia, Iran

Department of Mechanical Engineering, Urmia university, Urmia, Iran

Faculty of Mechanical Engineering, Urmia university of Technology, Urmia, Iran

Abstract

In this research, a tri-generation system based on ammonia fed solid oxide fuel cell is proposed and investigated. This study involves thermodynamic modeling of the fuel cell to conduct energy and exergy analysis of the system components in order to evaluate the energy and exergy efficiencies of the tri-generation system. In the proposed system, a solid oxide fuel cell with hydrogen-proton conducting electrolyte is used as the prime mover, which has the best performance for ammonia-fed fuel cells based on the reported results in the literature. The effects of important parameters such as current density, operating temperature and pressure are investigated on the performance of the proposed tri-generation system. Based on the results, assuming 1073 K and 505 kPa for the fuel cell working conditions, the energy utilization factor and exergetic efficiency of the proposed system are calculated to be 108.9% and 75% , respectively and overall output power is increased 633 kW by using tri-generation system instead of fuel sell stack only, regardless of the cooling and heating load produced.

Keywords: Tri-Generation System, SOFC, Ammonia, Energy and Exergy Analysis.

۱- مقدمه

سوخت‌های فسیلی، بیش از پیش آشکار شده است. از جمله این سیستم‌ها می‌توان از چرخه‌های ترکیبی و به طور مثال، سیستم‌های تولید همزمان حرارت و توان نام برد که در اصطلاح به آن‌ها ^۱CHP می‌گویند. تولید سه‌گانه نیز معمولاً به معنی تولید همزمان سرمایش، گرمایش و توان بر مبنای یک نوع منبع انرژی است. تولید سه‌گانه همچنین به عنوان ^۲CCHP شناخته می‌شود [۲].

در یک نیروگاه تولید سه‌گانه انرژی اتلافی از واحد تولید، برای راندن سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی استفاده می‌شود. بنابراین استفاده از نیروگاه‌های تولید سه‌گانه باعث افزایش بازده حرارتی کل و کاهش آلودگی محیط می‌شود. در کشورهای G8 نظیر برزیل، چین،

یکی از موارد مهمی که بشر از ابتدا به عنوان یک چالش اساسی با آن مواجه بوده است، یافتن روش‌های نوین و پُر بازده برای تبدیل انرژی انواع سوخت‌ها، به انرژی قابل استفاده بوده است. امروزه بشر به فناوری جالب پیل سوختی به عنوان جایگزین بسیار مناسب برای موتورهای احتراق داخلی می‌اندیشد. از آنجایی که این وسیله به صورت مستقیم و به واسطه فرآیند الکتروشیمیایی، انرژی شیمیایی سوخت را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نماید، می‌تواند بازدهی بین 40% تا 75% داشته باشد [۱]. از طرفی، پیشرفت صنایع و پیدایش تکنولوژی‌های جدید، مضراتی همچون افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، افزایش بهای انرژی و آلودگی زیست محیطی را، به همراه داشته است. به همین دلیل ضرورت استفاده از سیستم‌های جایگزین ارزان قیمت و تمیز برای

¹ Combined Heating and Power

² Combined cooling, heating and power

هند، مکزیک و آفریقای جنوبی در سال ۲۰۰۸، ۱۱٪ کل الکتریسیته تولیدی، از نیروگاه‌های CHP فراهم می‌شد [۱]. در حالی که انتظار می‌رود این میزان تا سال ۲۰۳۰ به ۲۴٪ برسد. به عبارت دیگر پیش‌بینی می‌شود الکتریسیته تولیدی بوسیله نیروگاه‌های CHP تا سال ۲۰۳۰ به ۸۳۰ گیگا وات برسد [۲ و ۱].

یکی از شیوه‌های اساسی که تکنولوژی آن در دهه اخیر به سرعت توسعه یافته است، استفاده از پیل‌های سوختی جهت تأمین همزمان الکتریسیته و گرما می‌باشد. همچنین پیل‌های سوختی بازده بسیار بیشتری در تولید توان از یک سوخت خواهند داشت. برای افزایش هر چه بیشتر بازدهی سیستم می‌توان اتلاف گرما از بعضی از سلول‌های پیل سوختی را مهار کرد [۱]. پیل سوختی اکسید جامد نسبت به سایر انواع پیل‌های سوختی، دمای کارکرد بالایی داشته و انعطاف بیشتری نسبت به سوخت مورد استفاده دارد. این نوع پیل سوختی قادر است ترکیبات شیمیایی هیدروژن‌دار را بدون نیاز به ریفرمینگ خارجی در درون مجموعه یا استک پیل سوختی تجزیه کرده و هیدروژن مورد نیاز خود را بدین نحو تأمین کند. بدین ترتیب هزینه و تجهیزات مورد نیاز برای تأمین و تولید هیدروژن، به طور چشمگیری کاهش می‌یابد [۳].

وهر و همکارانش [۴] از پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) به عنوان محرک اصلی نیروگاه تولید سه‌گانه استفاده کردند. آنها تحلیل‌های هزینه و انتشار آلاینده‌ها را در یک سیستم تولید سه‌گانه در یک ساختمان اداری انجام دادند.

برای رهایی از مشکلات زیست محیطی و مسمومیت احتمالی پیل سوختی، می‌توان از سوخت‌های غیر هیدروکربنی و غیر فسفیلی بهره گرفت. آمونیاک (NH_3) یکی از این ترکیبات شیمیایی است که به دلیل فراوانی مصرف آن در صنایع گوناگون از جمله کشاورزی (ارزان بودن و در دسترس بودن) و ویژگی‌های ممتاز دیگر، می‌تواند به عنوان سوخت در پیل سوختی اکسید جامد مورد استفاده قرار گیرد [۵].

بر اساس تحقیقات اسحاق و همکاران [۶]، چگالی انرژی آمونیاک ۴۸٪ بیشتر از هیدروژن مایع بوده و ظرفیت‌های حجمی و گرانشی آن نیز در حد قابل قبول با توجه به استانداردهای وزارت نیروی ایالت متحده آمریکا می‌باشد. نی و همکارش لیونگ طی یک بررسی نشان دادند که می‌توان آمونیاک را به عنوان یک سوخت مستقیماً وارد استک پیل سوختی کرده و پس از تجزیه به هیدروژن و نیتروژن، در گام بعدی در آند اکسیده کرد و توان الکتریکی مورد نیاز را بدست آورد. در این تحقیق همچنین، عملکرد ترمودینامیکی یک پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از دو الکترولیت اکسیژن یونی (SOFC-O) و هیدروژن-پروتونی (SOFC-H)، مقایسه شده است [۷]. طی این تحقیق و تحقیقات دیگری که در زمینه تغییر الکترولیت مورد استفاده برای پیل سوختی اکسید جامد انجام گرفت، نتایج حکایت از برتری ساختار هیدروژن-پروتونی الکترولیت مورد استفاده داشتند، به طوری که بر اساس نتایج بدست آمده از این تحقیقات پیل سوختی SOFC-H بیشترین بازدهی و تولید توان را نسبت به دیگر ساختارهای پیل سوختی داشته است [۸].

بدین ترتیب با تمرکز بر پیل سوختی نوع SOFC-H اولین مدل مرتبه اولی^۱ برای نرخ جنبشی تجزیه آمونیاک در پیل سوختی، بر

اساس مطالعاتی که قبلاً توسط چلایا و همکاران [۹] انجام گرفته بود، ایجاد شد [۱۰]. این مدل جنبشی، با یک مدل گاز گرد و خاکی^۲ (DGM) ادغام شد تا کسر مولی آمونیاک در حال تجزیه در راستای ضخامت آند، تحت دماهای مختلف بدست آید.

بعدها اسحاق و همکاران [۶]، با بهینه‌سازی تحقیقات انجام شده قبلی طی تحقیقی که با نام تحلیل ترمودینامیکی پیل سوختی اکسید جامد با سوخت آمونیاک انجام دادند، قابلیت استفاده از آمونیاک را به عنوان سوخت حامل هیدروژن مورد نیاز برای پیل سوختی، مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق دیگری زَمفیرسکو و دینجر یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد کوپل شده با یک توربین گازی را برای استفاده در وسایل نقلیه، پیشنهاد کرده‌اند [۱۱]. در تحقیقی که اخیراً توسط اسحاق و دینجر ارائه شده است، ترکیب یک پیل سوختی اکسید جامد با سوخت مستقیم آمونیاک، کوپل شده با توربین گازی، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲].

همچنین سینتی و همکارانش با استفاده از یک پیل سوختی اکسید جامد با سوخت آمونیاک خالص و رقیق شده، یک چرخه تولید توان را مورد بررسی قرار داده و نتایج را با داده‌های تجربی، مقایسه کردند. نتیجه این تحقیق حصول توان الکتریکی بالا، در صورت استفاده از آمونیاک خالص بود [۱۳]. در تحقیق دیگری که اخیراً انجام شده، کالینچی و دینجر یک پیل سوختی اکسید جامد با الکترولیت هیدروژن پروتونی را مورد بررسی قرار داده و ضمن مدل‌سازی الکتروشیمیایی، نتایج را بر اساس استفاده از دو سوخت آمونیاک و هیدروژن خالص، مقایسه کرده‌اند [۱۴]. همچنین در تحقیقی که اخیراً توسط آسامه و همکارش انجام گرفته، ضمن بررسی کلی تحقیقات انجام گرفته پیشین در رابطه با پیل‌های سوختی با سوخت مستقیم آمونیاک، تأثیر انتخاب نوع الکترودها، الکترولیت، ضخامت آنها و دمای کاری پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵].

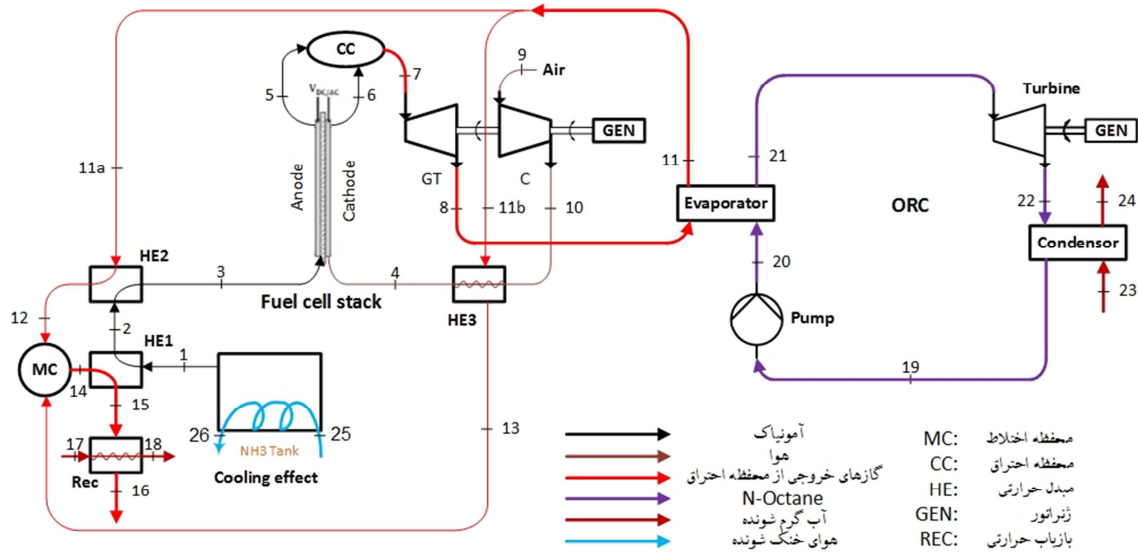
وی‌چون‌تان و همکارانش در تحقیق دیگری، تأثیر نسبت ابعادی اجزاء پیل سوختی را در روند تجزیه آمونیاک، بررسی کرده اند [۱۶]. شای و همکارانش نیز در جدیدترین تحقیق منتشر شده، تأثیر تغییرات دما و فشار کاری پیل سوختی با سوخت مستقیم آمونیاک را در چگالی جریان و توان دریافتی، بررسی کرده اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در دمای بالاتر از ۷۵۰ درجه سلسیوس آمونیاک کاملاً به عناصر تشکیل دهنده خود تجزیه می‌شود [۱۷]. علی‌رغم تحقیقات انجام گرفته قبلی، تا کنون تحقیقی در خصوص استفاده از زیرچرخه‌های بیشتر در کنار سیستم تولید توان متداول با به کارگیری پیل سوختی اکسید جامد با سوخت آمونیاک، انجام نگرفته است. از این رو در این تحقیق سعی می‌شود با استفاده از یک زیرچرخه ترمودینامیکی، تأثیر آن در توان تولیدی کلی سیستم و افزایش راندمان سیستم تولید سه‌گانه، مورد بررسی قرار گیرد.

۲- تشریح سیستم تولید سه گانه پیشنهادی

سیستم تولید سه‌گانه پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این سیستم از یک پیل سوختی اکسید جامد به عنوان مولد اصلی

² Dusty Gas Model

¹ First-order



شکل ۱- سیستم تولید سه گانه پیشنهادی

محفظه احتراق زمینه تکمیل واکنش‌های احتراقی را فراهم آورده و با دما و فشار بالا وارد توربین گازی می‌شوند (نقطه ۷). این گازها در خروجی از توربین گازی همچنان دمای قابل توجه دارند و می‌توانند به عنوان مولد گرمایی یک چرخه رانکین آرگانیک^۱ مورد استفاده قرار گیرند [۱۸]. پس از خروج از اواپراتور چرخه ORC، جریان این گازها دو شاخه شده و ۹۵٪ از جریان برای گرمایش هوای ورودی و مابقی برای گرمایش آمونیاک، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دو شاخه جریان در ادامه در محفظه اختلاط با یکدیگر ترکیب شده و پس از عبور از مبدل‌کن گرما HE1، برای گرمایش یک جریان آب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در چرخه ORC نیز که سیال مورد استفاده در آن N-Octane انتخاب شده است، به کمک گرمای دریافت شده در تبخیر کننده و بهره‌گیری از یک توربین و ژنراتور، توان الکتریکی تولید می‌شود. فرضیاتی که در این تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به قرار زیر می‌باشند:

- هر جزء سیستم در مدل‌سازی به عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفته می‌شود.
- هیچ یک از اجزای پیل سوختی با محیط تبادل گرمایی ندارند.
- از انرژی‌های جنبشی و پتانسیل در معادلات انرژی و انرژی صرف نظر می‌شود.
- مدل‌سازی چرخه پیل سوختی اکسید جامد و نیز چرخه ORC در شرایط پایا انجام خواهد شد.
- همه گازها در سیستم پیل سوختی و توربین گاز مانند گاز ایده‌آل رفتار می‌کنند.
- نشستی در سیستم پیل سوختی اکسید جامد وجود ندارد.
- دما و فشار محیط به ترتیب ۲۹۸ K و ۱۰۱ kPa در نظر

استفاده شده و در نهایت با استفاده از زیرچرخه‌ها و تجهیزات پیش-بینی شده برای آن، مجموعه‌ای از توان الکتریکی، انرژی گرمایی و سرمایی مورد نیاز، تأمین می‌شود.

در این سیستم یک مخزن حاوی آمونیاک اشباع تحت فشار ۵ bar برای تأمین سوخت پیل سوختی اکسید جامد، پیش‌بینی شده است. با شروع به کار سیستم و مصرف آمونیاک، فشار و دمای آن در داخل مخزن کاهش می‌یابد. برای جبران این کاهش در دما و فشار، با استفاده از یک مبدل‌کن گرما که در حقیقت به عنوان یک اواپراتور برای سیال دوم عمل می‌کند، بار گرمایی لازم برای رساندن آمونیاک به فشار و دمای اشباع، که در حقیقت معادل آنتالپی تبخیر آمونیاک در فشار مخزن می‌باشد، از هوای مد نظر برای خنک‌سازی دریافت می‌گردد. نقطه خروجی از مخزن آمونیاک به عنوان نقطه شماره یک در نظر گرفته می‌شود.

گاز آمونیاک پس از خروج از مخزن طی دو مرحله توسط جریان گازهای داغ خروجی از پیل سوختی به کمک مبدل‌کن‌های گرمایی نشان داده شده در شکل ۱، به دمای مد نظر برای کارکرد پیل سوختی در نقطه ۳، رسانده می‌شود. دما و فشار کاری معمول پیل سوختی اکسید جامد در این سیستم به ترتیب ۱۰۷۳ K و ۵۰۵ kPa می‌باشد. در کنار آمونیاک که به الکتروود آند پیل سوختی رسانده می‌شود، فشار و دمای هوای مصرفی نیز طی عبور از کمپرسوری که توسط توربین گازی به حرکت درمی‌آید و یک مبدل‌کن گرما، افزایش یافته و وارد الکتروود کاتد می‌گردد (نقطه ۴).

با توجه به دمای کار پیل سوختی اکسید جامد، آمونیاک بلافاصله به عناصر هیدروژن و نیتروژن تجزیه می‌شود. در ادامه، طی یک سلسله فرآیندهای شیمیایی، توان الکتریکی از پیل سوختی دریافت شده و ترکیبی از عناصر و ترکیبات با دمای بالا، از الکتروودهای آند و کاتد، خارج می‌گردند. الکترولیت انتخاب شده برای این پیل سوختی از نوع هیدروژن پروتونی بوده و بنابراین، بخار آب در سمت کاتد تشکیل خواهد شد [۶]. گازهای خروجی از پیل سوختی با ورود به یک

¹ Organic Rankin Cycle (ORC)

گرفته شده است.

- از افت فشار در اجزای سیستم تولید سه گانه صرف نظر شده است.

۳- معادلات حاکم

۳-۱- تعادل ترمودینامیکی واکنش تجزیه آمونیاک

در اثر گرمای کاری پیل سوختی، آمونیاک طی واکنش زیر به هیدروژن و نیتروژن تجزیه می شود [۵]:



واکنش فوق گرماگیر بوده و سیر تعادلی آن به فشار و دمای سیستم بستگی دارد. در این واکنش با افزایش دما واکنش به سمت راست و با ازدیاد فشار، واکنش به سمت چپ تمایل پیدا می کند که نتیجه آن کاهش تولید هیدروژن است. تعادل ترمودینامیکی برای آمونیاک را می توان از طریق به حداقل رساندن انرژی گیبس واکنش، بدست آورد [۵]:

$$(\Delta G_{\text{system}})_{T,p} = 0 \quad (2)$$

انرژی گیبس واکنش را می توان از مجموع حاصلضرب تعداد مول محصولات در انرژی گیبس مخصوص مولی آنها در دما و فشار واکنش، محاسبه کرد [۵]:

$$G_{\text{system},T,p} = \sum n_i \bar{g}_i \quad (3)$$

انرژی گیبس مخصوص نیز به صورت مجموع تابع تشکیل گیبس استاندارد و فعالیت شیمیایی جزء نام، بدست می آید. برای گازهای واقعی، فعالیت شیمیایی به صورت نسبت فوگاسیتی جزء نام در فشار و دمای واکنش به فوگاسیتی آن جزء در دما و فشار استاندارد، بدست می آید [۶]:

$$\bar{g}_i = \bar{g}_{fi}^0 + RT \ln \frac{f_i}{f_i^0} \quad (4)$$

با فرض گاز ایده آل برای گازهای شرکت کننده در واکنش، با استفاده از معادله حالت، فعالیت شیمیایی آنها را می توان به کمک نسبت فشارهای جزئی در سیستم، محاسبه کرد. برای اجزاء جامد و مایع (چگال شده) از اینرو انرژی گیبس کلی سیستم را می توان به صورت زیر محاسبه کرد [۶]:

$$\Delta G_{\text{system}} = \left(\sum n_i [\bar{g}_{fi}^0 + RT \ln(y_i p)] \right)_{\text{gas}} + \left(\sum n_i \bar{g}_{fi}^0 \right)_{\text{condensed}} \quad (5)$$

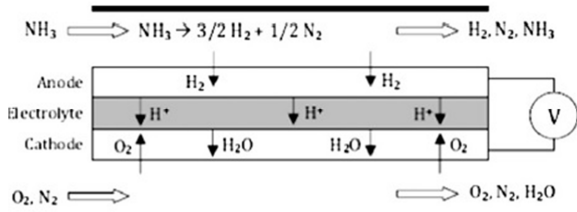
با بهره گیری از این رابطه دیگر نیازی به تعیین واکنش های شیمیایی نخواهد بود. به جای آن، استفاده از روش GEM^۲ (کمینه سازی انرژی گیبس) اطلاعات تابع گیبس تشکیل استاندارد را برای تمام اجزاء شیمیایی که انتظار می رود در واکنش تعادلی شرکت داشته باشند، نیاز خواهد داشت. فرآیند تجزیه آمونیاک و واکنش های شیمیایی موجود در مجموعه پیل سوختی، در شکل ۲ نشان داده شده است.

از آنجاکه برای جلوگیری از اثرات احتمالی نشتی در داخل سیستم پیل سوختی و اثرات ناخواسته دیگر، واکنش دهنده ها با

مقادیری بیشتر از مقدار لازم برای واکنش استوکیومتری، وارد واکنش می شوند، میزان مصرف سوخت و اکسید کننده در واکنش، پارامتر تأثیرگذاری خواهند بود. این پارامترها به صورت زیر تعریف می شوند [۱۲]:

$$U_f = \frac{\text{Fuel}_{(\text{consumed})}}{\text{Fuel}_{(\text{supplied})}} = \frac{\text{H}_2_{(\text{consumed})}}{\text{H}_2_{(\text{supplied})}} \quad (6)$$

$$U_o = \frac{\text{Air}_{(\text{consumed})}}{\text{Air}_{(\text{supplied})}} = \frac{\text{O}_2_{(\text{consumed})}}{\text{O}_2_{(\text{supplied})}} \quad (7)$$



شکل ۲- طرحواره پیل سوختی اکسید جامد پیشنهادی با الکترولیت هیدروژن پروتونی [۱۱]

۳-۲- مدل سازی پیل سوختی

ولتاژ خروجی از پیل سوختی تابعی از فشارهای جزئی ذرات شیمیایی شرکت کننده در واکنش شیمیایی است. به طوری که در حالت مدار باز^۳ (بدون در نظر گرفتن تلفات)، به روش زیر محاسبه می گردد [۶]:

$$E = \frac{-\Delta G}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{p_{\text{H}_2} (p_{\text{O}_2})^{1/2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} \right] \quad (8)$$

در عمل، ولتاژ کاری پیل سوختی در اثر مجموعه ای از افت ولتاژهای فعال سازی، مقاومتی و غلظتی از ولتاژ حالت مدار باز کمتر بوده و ولتاژ مدار بسته^۴ یا ولتاژ کاری پیل سوختی نامیده می شود. این ولتاژ از رابطه زیر بدست می آید [۶]:

$$V_c = E - V_{\text{act,an}} - V_{\text{act,ca}} - V_{\Omega} - V_{\text{con,an}} - V_{\text{can,ca}} \quad (9)$$

افت ولتاژهای فعال سازی، مقاومتی و غلظتی، به ترتیب از روابط زیر بدست می آیند [۱۲]:

$$V_{\text{act},\gamma} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{j}{zF j_{0,\gamma}} \right), \gamma = \text{anode, cathode} \quad (10)$$

$$V_{\Omega} = j \delta R_{\Omega} \quad (11)$$

$$V_{\text{con,an}} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2}^{\text{TPB}}} \right] \quad (12)$$

$$V_{\text{can,ca}} = \frac{RT}{2F} \ln \left[\left(\frac{p_{\text{O}_2}}{p_{\text{O}_2}^{\text{TPB}}} \right)^{1/2} \left(\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{TPB}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \right] \quad (13)$$

افت ولتاژ غلظتی تابع پارامترهای متعددی از جمله خصوصیات فیزیکی و شیمیایی الکترولیت، ضریب نفوذ مؤثر^۵ و فشارهای جزئی عناصر و ترکیبات شرکت کننده واکنش شیمیایی در ناحیه سه فازی (TPB)^۶ است که از روابط (۱۴-۱۶) بدست می آیند [۱۲]:

$$p_{\text{H}_2}^{\text{TPB}} = p - (p - p_{\text{H}_2}) \exp \left(\frac{jRT}{2FD_{\text{a}}^{\text{eff}}} \right) \quad (14)$$

³ Open-circuit

⁴ Closed-Circuit

⁵ Effective Diffusion

⁶ Triple Phase Boundary

¹ Condensed

² Gibbs energy minimization

$$\psi_e = \frac{\dot{W}_{Net}}{\dot{n} \bar{e}x_{ch}^0} \quad (28)$$

همچنین فاکتور بهره گیری از انرژی (EUF) برای سیستم تولید سه گانه از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\eta_{tri} = \frac{\dot{W}_{Net} + \dot{Q}_{REQ} + \dot{Q}_{Cooling}}{\dot{n} LHV} \quad (29)$$

بازده انرژی کل نیز به صورت زیر بدست می آید:

$$\psi_{tri} = \frac{\dot{W}_{Net} + \dot{E}x_{QREQ} + \dot{E}x_{QCooling}}{\dot{n} \bar{e}x_{ch}^0} \quad (30)$$

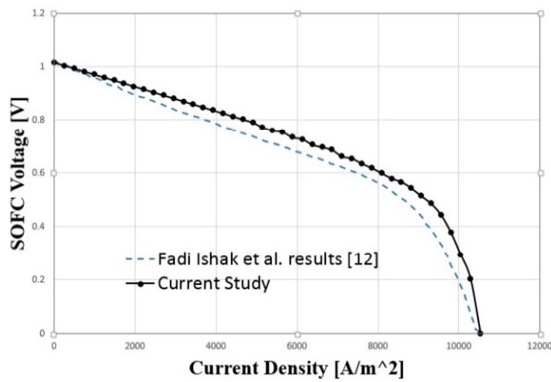
در نهایت بازده قانون اول و دوم پیل سوختی، از طریق روابط زیر محاسبه می شوند:

$$\eta_{FC} = \frac{\dot{W}_{FC,AC} - \dot{W}_C}{\dot{n} LHV} \quad (31)$$

$$\psi_{FC} = \frac{\dot{W}_{FC,AC} - \dot{W}_C}{\dot{n} \bar{e}x_{ch}^0} \quad (32)$$

۴- اعتبارسنجی نتایج مدل سازی

نتایج حاصل از شبیه سازی پیل سوختی اکسید جامد با سوخت مستقیم آمونیاک، بر اساس روابط ارائه شده در بخش قبل از طریق کد نوشته شده در نرم افزار EES²، با نتایج ارائه شده توسط اسحاق و همکارش مقایسه شده و نتایج دقت قابل قبولی را ارائه می دهند. شکل ۳ نتایج مقایسه شبیه سازی پیل سوختی اکسید جامد برای این تحقیق و نتایج ارائه شده توسط اسحاق و همکارانش [۱۲] را نشان می دهد.



شکل ۳- اعتبارسنجی مدل سازی پیل سوختی

پیل سوختی مورد استفاده در سیستم تولید سه گانه ی پیشنهادی، از نوع اکسید جامد با الکترولیت هیدروژن-پروتونی بوده و برای مجموعه الکترودها و الکترولیت آن، از ترکیب Ni-YSZ/YSZ/LSM-YSZ استفاده شده است. کلیه پارامترهای ورودی و فرضیات مورد استفاده برای آن شامل سطح مقطع صفحات، دما و فشار کاری و دیگر مشخصات فیزیکی مورد نیاز، در جدول ۱، آورده شده اند [۱۲].

$$P_{O_2}^{TPB} = P_{O_2} - \frac{JRT_c}{2FD_c^{eff}} \quad (15)$$

$$P_{H_2O}^{TPB} = P_{H_2O} + \frac{JRT_c}{4FD_c^{eff}} \quad (16)$$

چگالی توان خروجی از پیل سوختی به روش زیر بدست می آید [۱۲]:

$$P = JV_c \quad (17)$$

توان جریان متناوب پیل سوختی نیز از طریق معادله (۱۸) محاسبه می گردد:

$$\dot{W}_{FC,AC} = PA\eta_{INV} \quad (18)$$

با تعریف کارخالص برای سیستم تولید سه گانه، می توان روابط مربوط به بازده های قانون اول و دوم را بیان کرد:

$$\dot{W}_{Net} = \dot{W}_{FC,AC} - \dot{W}_C + \dot{W}_{GT} + \dot{W}_T - \dot{W}_p \quad (19)$$

۳-۳- تحلیل انرژی و انرژی سیستم

در شرایط پایا، موازنه انرژی برای یک مجموعه یا هر یک از اجزای آن از رابطه زیر بدست می آید:

$$\dot{Q} + \dot{W} + \sum_i (\dot{n}_i \bar{h}_i)_{in} - \sum_i (\dot{n}_i \bar{h}_i)_{out} = 0 \quad (20)$$

انرژی کلی نیز که مجموع انرژی فیزیکی (مکانیکی) و شیمیایی است، به صورت زیر بدست می آید:

$$\dot{E}x = \dot{E}x_{ph} + \dot{E}x_{ch} \quad (21)$$

که در رابطه فوق، انرژی فیزیکی و شیمیایی به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\dot{E}x_{ph} = \sum_i \dot{n}_i [(\bar{h}_i - \bar{h}_o) - T_0(\bar{s}_i - \bar{s}_o)] \quad (22)$$

$$\dot{E}x_{ch} = \dot{n} \left[\sum_i y_i \bar{e}x_{ch,i}^0 + \bar{R}T_0 \sum_i y_i \ln y_i \right] \quad (23)$$

در معادلات فوق از تغییرات انرژی و انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده است. انرژی ناشی از انتقال گرما نیز، همان طور که در زیر آورده شده، از رابطه حاکم بر بازده کارنو، پیروی می کند:

$$\dot{E}x_Q = \dot{Q}_j \left[1 - \frac{T_0}{T} \right] \quad (24)$$

در این تحقیق، انرژی بر اساس اختلاف دمای ۲۹۸ K و فشار ۱۰۱ kPa، سنجیده می شود. میزان تخریب انرژی^۱ در اثر برگشت-ناپذیری های ترمودینامیکی در هر یک از اجزاء نیز، به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\dot{E}x_{D,comp} = \sum_j \dot{Q}_j \left[1 - \frac{T_0}{T} \right] - \dot{W} + \sum_i (\dot{E}x_i)_{in} \quad (25)$$

$$- \sum_i (\dot{E}x_i)_{out}$$

تخریب انرژی کلی نیز برای سیستم تولید سه گانه از رابطه (۲۶) قابل محاسبه است:

$$\dot{E}x_{D,total} = \sum \dot{E}x_{D,comp} \quad (26)$$

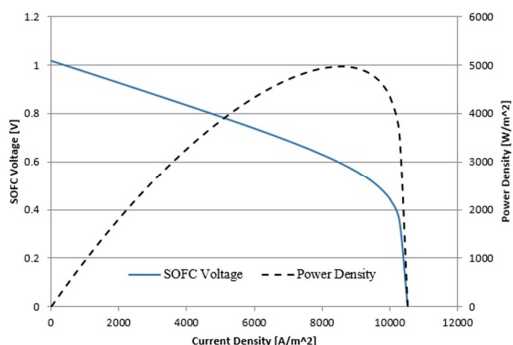
بازده انرژی الکتریکی سیستم تولید سه گانه نیز به ارزش حرارتی پایین سوخت (آمونیاک)، وابسته است:

$$\eta_e = \frac{\dot{W}_{Net}}{\dot{n} LHV} \quad (27)$$

بازده انرژی انرژی الکتریکی از طریق رابطه (۲۸) بدست می آید:

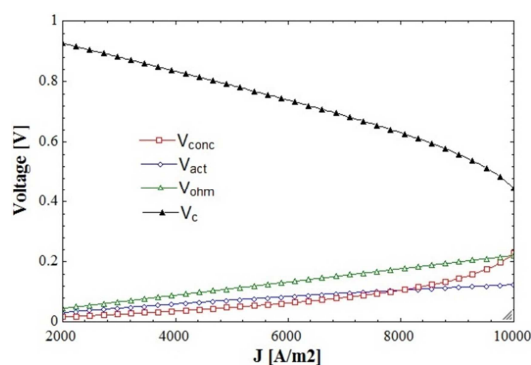
² Engineering Equation Solver

¹ Exergy destruction



شکل ۴- منحنی قطبش پیل سوختی

همانطور که در بخش قبلی اشاره شد، ولتاژ مدار بسته یا ولتاژ کاری پیل سوختی، فارغ از نسبت فشارهای جزئی به افت ولتاژهای ناشی از فعال سازی، مقاومتی و غطتی، وابسته است. در شکل ۵، روند تغییر این پارامترها بر اساس چگالی جریان را نشان می دهد. همانطور که در شکل دیده می شود، با افزایش چگالی جریان، میزان افت ولتاژهای مذکور افزایش یافته و در نتیجه، ولتاژ کاری پیل سوختی، کاهش می یابد.



شکل ۵- تأثیر افزایش چگالی جریان بر ولتاژ کاری پیل سوختی

از آنجاکه پیل سوختی به عنوان مولد انرژی سیستم تولید سه-گانه محسوب می شود، تغییر در ولتاژ کاری آن در اثر تغییر چگالی جریان، اثرات خود را بر روی عملکرد سیستم سه گانه خواهد داشت. شکل ۶ تأثیر تغییرات چگالی جریان بر فاکتور بهره گیری از انرژی و بازده انرژی، که در بخش قبلی معرفی شده اند را، نشان می دهد. همانطور که در شکل دیده می شود، با افزایش چگالی جریان، رفته رفته راندمان پیل سوختی کاهش یافته و با اثر گذاری مستقیم بر عملکرد سیستم تولید سه گانه، منجر به کاهش کارایی سیستم می گردد. به طوری که بازده انرژی سیستم تولید سه گانه که در چگالی جریان $7060 \text{ [A/m}^2]$ ، نزدیک ۷۵٪ می باشد با افزایش چگالی جریان تا $10000 \text{ [A/m}^2]$ ، به کمتر از ۶۰٪ خواهد رسید.

جدول ۱- پارامترهای ورودی و فرضیات مورد استفاده در این تحقیق

پارامتر	مقدار
مشخصات عملکردی پیل سوختی اکسید جامد	
T [K]	۱۰۷۳
p [kPa]	۵۰۵
U_f	۰٫۸۵
U_o	۰٫۲۵
نسبت فشار (pr)	۵
A [m ²]	۲۵۰
J [Am ⁻²]	۷۰۶۰
$J_{o,a} \text{ [Am}^{-2}]$	$7 \times 10^9 \left(\frac{p_{H_2}}{p_0}\right) \left(\frac{p_{H_2O}}{p_0}\right) \exp\left(-\frac{10^5}{RT}\right)$
$J_{o,c} \text{ [Am}^{-2}]$	$7 \times 10^9 \left(\frac{p_{O_2}}{p_0}\right)^{0.25} \exp\left(-\frac{130000}{RT}\right)$
τ_a [μm]	۵۰۰
τ_c [μm]	۱۰
δ [μm]	۳۰
R_Ω [Ωm]	۰٫۷۳۵
$D_a^{eff} \text{ [m}^2 \text{ s}^{-1}]$	۰٫۰۰۰۰۱۵۳۷
$D_c^{eff} \text{ [m}^2 \text{ s}^{-1}]$	۰٫۰۰۰۰۰۱۵
مشخصات عملکردی تجهیزات به کار رفته در سیستم تولید سه گانه	
η_c [%]	۸۵
η_T [%]	۹۰
η_{HE} [%]	۹۰
η_G [%]	۹۵
η_{INV} [%]	۹۸
η_P [%]	۸۰
فرضیات به کار رفته برای هوا در سیستم تولید سه گانه	
T_0 [K]	۲۹۸
p_0 [kPa]	۱۰۱٫۳
γ_{O_2} [%]	۲۱٪
γ_{N_2} [%]	۷۹٪

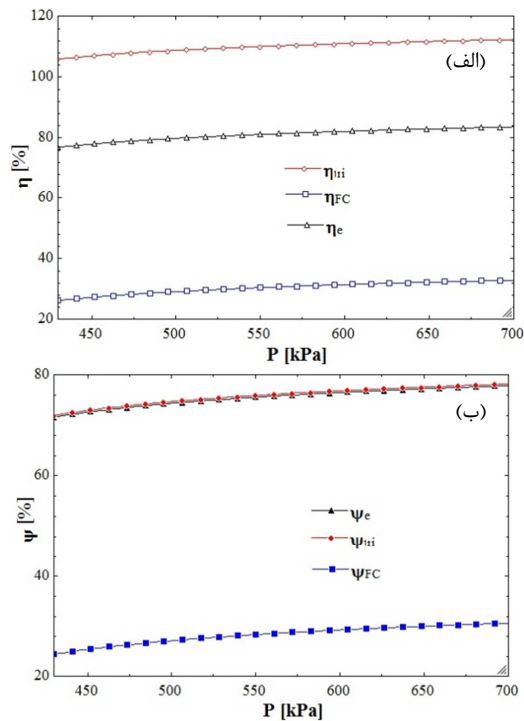
۵- نتایج و بحث

شکل ۴ نحوه رفتار پیل سوختی بر اساس چگالی جریان را نشان می دهد. نتایج ارائه شده در این شکل که به منحنی قطبش^۱ معروف است، نشان از تفاوت در رفتار ولتاژ کاری پیل سوختی و توان خروجی از آن در اثر تغییرات چگالی جریان دارد. همانطور که در شکل دیده می شود، با افزایش چگالی جریان با وجود کاهش در ولتاژ کاری، توان خروجی پیل سوختی افزایش می یابد. با استناد به مقدار 7060 Am^{-2} برای چگالی جریان پیل سوختی در سیستم پیشنهادی و در نظر داشتن مساحت ارائه شده در جدول ۱ برای صفحات استفاده شده در پیل سوختی، توان خروجی آن $10^3 \text{ kW} \times 1,183$ خواهد بود.

¹ Polarization Curve

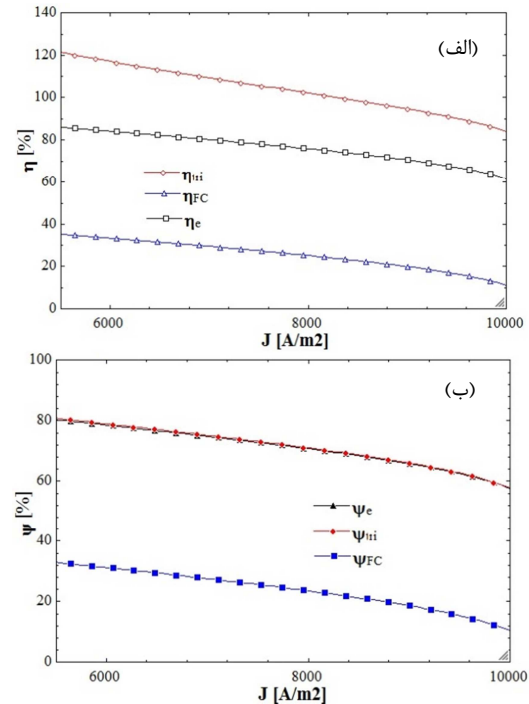
نتیجه سیستم تولید سه‌گانه، دمای کاری پیل سوختی است. با افزایش دمای کاری پیل سوختی، فارغ از تأثیر مثبتی که بر روند تجزیه آمونیاک دارد، گازهای خروجی از پیل سوختی آنتالپی و انرژی بیشتری داشته و در نتیجه سهم بیشتری در تولید توان و افزایش کارایی سیستم تولید سه‌گانه خواهند داشت. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، با افزایش دمای کاری پیل سوختی، تأثیر مثبتی در فاکتور بهره‌گیری از انرژی و بازده انرژی کلی سیستم دیده می‌شود. این تأثیر به حدی است که در صورت کاهش دمای کاری پیل سوختی تا ۹۰۰ K، راندمان انرژی سیستم تولید سه‌گانه، به حدود ۵۶٪ کاهش می‌یابد.

از طرفی حد پایین دمای کاری پیل سوختی پیشنهادی ۸۶۰ K است، چرا که در دمای پایین‌تر از آن، فرآیند تجزیه آمونیاک مختل شده و در این صورت نیاز به ریفرمینگ خارجی برای تجزیه آمونیاک پیش از ورود به پیل سوختی خواهد بود [۱۱]. علی‌رغم مزایای افزایش دمای کاری پیل سوختی، در عمل به دلیل محدودیت‌های موجود در جنس مواد به کار رفته در پیل سوختی و همچنین قیمت تمام شده آن، دمای کاری این نوع پیل‌های سوختی تا کنون به ۱۱۰۰ K محدود بوده است [۱۱۶].

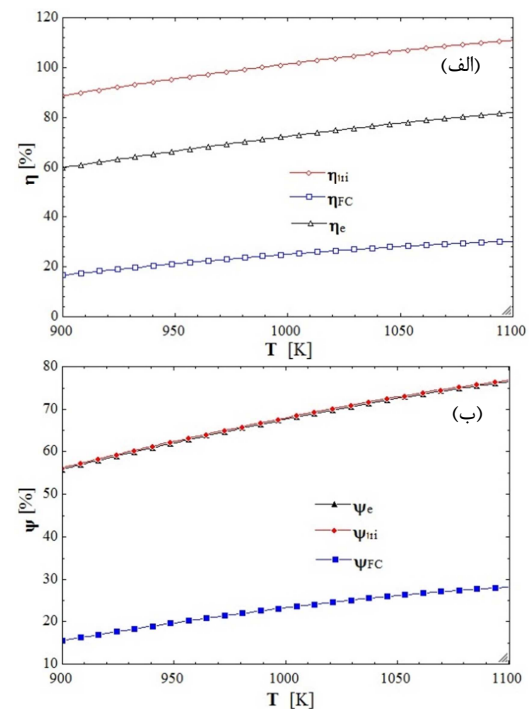


شکل ۸- تغییرات فاکتور بهره‌گیری از انرژی و بازده انرژی در اثر تغییر در فشار کاری پیل سوختی
(الف) فاکتور بهره‌گیری از انرژی (ب) بازده انرژی

همچنین نتایج نشان از تأثیر مثبت اندک افزایش فشار کاری پیل سوختی بر فاکتور بهره‌گیری از انرژی و راندمان انرژی دارد. به طوری که با افزایش فشار کاری پیل سوختی تا ۷۰۰ kPa، بازده انرژی سیستم تولید سه‌گانه تا با سه درصد افزایش به ۷۸٪ خواهد



شکل ۶- تغییرات فاکتور بهره‌گیری از انرژی و بازده انرژی در اثر تغییر چگالی جریان
(الف) فاکتور بهره‌گیری از انرژی (ب) بازده انرژی



شکل ۷- تغییرات فاکتور بهره‌گیری از انرژی و بازده انرژی در اثر تغییر در دمای کاری پیل سوختی
(الف) فاکتور بهره‌گیری از انرژی (ب) بازده انرژی

از جمله پارامترهای تأثیرگذار دیگر در عملکرد پیل سوختی و در

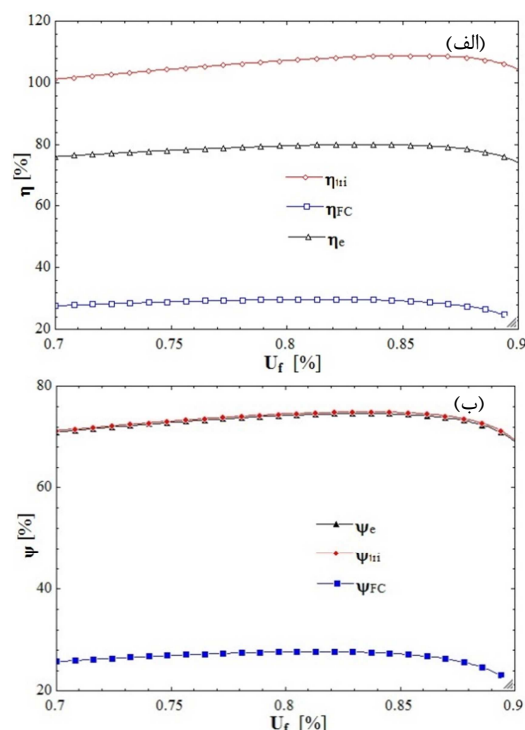
انرژی و انرژی، آورده شده است. جدول ۳ نیز، مقادیر توان، گرمایش و سرمایش تولیدی در سیستم تولید سه گانه به همراه میزان فاکتور بهره گیری از انرژی و بازده انرژی را بر اساس داده های جدول ۱، نشان می دهد. بر اساس نتایج ذکر شده در جدول ۳، با استفاده از سیستم تولید سه گانه، فارغ از بار سرمایشی و گرمایشی تولید شده، توان تولیدی به میزان ۶۳۳ kW نسبت به توان تولیدی پیل سوختی، افزایش می یابد.

جدول ۲- خواص ترمودینامیکی نقاط مشخص شده در سیستم تولید سه گانه

سیستم	نقطه	p [kPa]	T [K]	\dot{n} [mol/s]	\dot{E} [kW]
سیستم تولید سه گانه اصلی شامل واحدهای تولید توان، گرمایش و سرمایش	۱	۵۰۵	۲۷۷٫۶	۷٫۱۷۵	۲۴۶۸
	۲	۵۰۵	۵۰۹٫۱	۷٫۱۷۵	۲۴۸۳
	۳	۵۰۵	۶۴۷٫۳	۷٫۱۷۵	۲۵۰۴
	۴	۵۰۵	۷۸۱٫۲	۸۷٫۱۱	۸۷۰
	۵	۵۰۵	۱۰۷۳	۵۲٫۰۲	۴۴۶٫۵۹
	۶	۵۰۵	۱۰۷۳	۹۱٫۶۸	۱۵۵۲
	۷	۵۰۵	۱۱۹۳	۹۶٫۰۸	۱۹۳۰
	۸	۱۰۱	۸۴۳	۹۶٫۰۸	۷۴۰٫۷۲
	۹	۱۰۱	۲۹۸	۸۷٫۱۱	۱۱٫۲۴۹
	۱۰	۵۰۵	۵۰۰	۸۷٫۱۱	۴۸۱٫۸۲
	۱۱	۱۰۱	۸۳۱٫۶	۹۶٫۰۸	۶۹۸٫۰۳۴
	۱۲	۱۰۱	۵۴۰٫۴	۴۸٫۰۴	۱۱٫۰۵
	۱۳	۱۰۱	۵۶۰٫۹	۹۱٫۲۷۶	۲۳۶۴۵۵
	۱۴	۱۰۱	۵۵۹٫۹	۹۶٫۰۸	۲۴۷٫۴۸
۱۵	۱۰۱	۵۳۸٫۳	۹۶٫۰۸	۲۱۸٫۲۸۶	
۱۶	۱۰۱	۳۶۴٫۲	۹۶٫۰۸	۵۰٫۶۶۴	
۱۷	۱۰۱	۳۹۸٫۲	۱۰۰۰	۹۵۰۰	
۱۸	۱۰۱	۳۱۳٫۲	۱۰۰۰	۹۵۱۳	
۲۵	۱۰۱	۱۱۳٫۲	۳۴۸٫۷	۴۸٫۸۶	
۲۶	۱۰۱	۲۹۸٫۲	۳۴۸٫۷	۴۵۰٫۲۷	
نقطه رانکن آرگانیک	۱۹	۳۵٫۷۷	۳۶۵	۰٫۸۷۵۴	۴۷۵۸
	۲۰	۲۰۰۰	۳۶۵٫۶	۰٫۸۷۵۴	۴۷۶۰
	۲۱	۲۰۰۰	۵۵۳	۰٫۸۷۵۴	۴۷۸۵
	۲۲	۳۵٫۷۷	۴۷۹٫۲	۰٫۸۷۵۴	۴۷۷۳
	۲۳	۱۰۱	۳۱۳٫۲	۵۰٫۹۹	۴۸۵٫۸
	۲۴	۱۰۱	۳۲۸٫۲	۵۰٫۹۹	۴۸۹٫۸۵

بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل انرژی سیستم تولید سه گانه پیشنهادی، بیشترین تخریب انرژی در داخل پیل سوختی اکسید جامد رخ می دهد. این امر به دلیل مجموعه واکنش های شیمیایی انجام گرفته در پیل سوختی و تأثیرات برگشت ناپذیری ناشی از آن هاست. در رتبه بعدی بیشترین تخریب انرژی، واحد تولید گرما یا Rec قرار دارد که دلیل آن نیز اختلاف دمای زیاد سیال گرم کننده و آب گرم شونده است. شکل ۱۰، میزان تخریب انرژی در تجهیزات در سیستم تولید سه گانه پیشنهادی را نشان می دهد.

رسید. این امر در شکل ۸ نشان داده شده است. از طرف دیگر، لازمه افزایش فشار کاری سیستم، افزایش فشار هوا و سوخت ورودی به پیل سوختی است. از آنجاکه هر گونه افزایش در دما و فشار کاری پیل سوختی، صرف هزینه بیشتر جهت تأمین سخت افزارهای لازم برای سیستم تولید سه گانه را در پی خواهد داشت، لذا دما و فشار کاری باید بر اساس محاسبات ترمو-اقتصادی به صورت بهینه انتخاب شوند. نتایج ارائه شده در شکل ۹ نشان می دهد که محدوده ۸۰٪ تا ۸۵٪ در فاکتور بهره گیری از سوخت، بهترین نتایج را در کارایی کلی سیستم و بازده انرژی آن خواهد داشت. به عبارت دیگر برای عملکرد مناسب پیل سوختی و کارایی بهتر سیستم تولید سه گانه پیشنهادی، باید ۸۰ تا ۸۵ درصد از هیدروژن آزاد شده از تجزیه آمونیاک، در واکنش شیمیایی تولید آب شرکت کند.



شکل ۹- تغییرات فاکتور بهره گیری از انرژی و بازده انرژی در اثر تغییر در فاکتور بهره گیری از سوخت (الف) فاکتور بهره گیری از انرژی (ب) بازده انرژی

فارغ از دما و فشار کاری پیل سوختی، جنس مواد به کار رفته در ساخت الکترودها و الکترولیت پیل سوختی اکسید جامد، تأثیر بسیاری در فاکتور بهره گیری از سوخت دارد. همان طور که در بخش قبلی گفته شد، در تحقیق حاضر برای الکتروکاتد، الکترولیت و الکتروکاتد، به ترتیب از Ni-YSZ، LSM-YSZ و YSZ استفاده شده است [۱۲]. با توجه به شکل ۹، با کاهش ضریب بهره گیری از سوخت تا ۷۰٪ یا افزایش آن تا ۹۰٪، راندمان انرژی پیل سوختی تا ۲۶٪ و راندمان انرژی سیستم تولید سه گانه تا ۷۲٪ کاهش می یابد. در جدول ۲ خواص ترمودینامیکی تمامی نقاط مشخص شده در سیستم تولید سه گانه پیشنهادی بر اساس نتایج حاصل از تحلیل

واحد تولید حرارت بوده و پس از آن‌ها محفظه احتراق در جایگاه بعدی قرار می‌گیرد. با توجه به تازگی بحث استفاده از آمونیاک به عنوان سوخت مستقیم مصرفی در پیل‌های سوختی اکسید جامد، می‌توان با افزودن زیرچرخه‌های ترمودینامیکی دیگر و انجام بررسی‌های ترمو-اقتصادی در تحقیقات آتی، ضمن کاهش عوامل مؤثر در تخریب اگزروزی، بازده کلی این سیستم‌ها را افزایش داد.

همچنین با استناد به نتایج بدست آمده از تحلیل انرژی و اگزروزی سیستم تولید سه‌گانه پیشنهادی، می‌توان نتیجه گرفت فارغ از تأثیرات مثبت و اثبات شده استفاده از پیل‌های سوختی اکسید جامد به عنوان مولد اصلی انرژی در این سیستم‌ها، می‌توان از ترکیبات هیدروژن‌دار غیرمتداولی نظیر آمونیاک به عنوان سوخت اصلی استفاده کرده و ضمن کاهش اثرات نامطلوب نظیر آلودگی کربن تولید شده در طی فرآیندهای شیمیایی، از مسائل نامطلوبی چون مسمومیت پیل‌های سوختی در اثر نشت کربن، جلوگیری کرد.

۷- نمادها

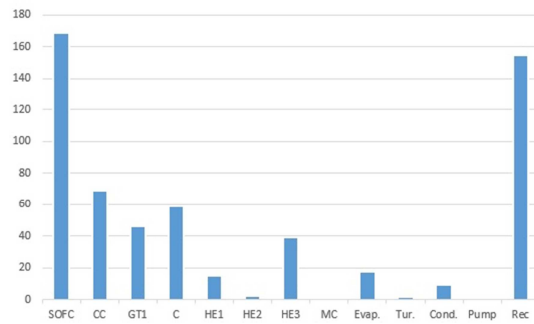
A	مساحت پیل سوختی [m ²]
D _a ^{eff}	ضریب نفوذ آند [m ² s ⁻¹]
D _c ^{eff}	ضریب نفوذ کاتد [m ² s ⁻¹]
\bar{e}_x	اگزروزی مخصوص مولی [J mol ⁻¹]
\dot{E}_x	نرخ اگزروزی [W]
$\dot{E}_{x,D}$	نرخ تخریب اگزروزی [W]
E	ولتاژ مدار باز [V]
F	عدد فارادی
f	فواگسیته اجزاء شیمیایی داخل سیستم
f ⁰	فواگسیته اجزاء شیمیایی در شرایط استاندارد
\bar{g}	انرژی گیبس مولی مخصوص [J mol ⁻¹]
G	انرژی گیبس [J]
\bar{g}^0	انرژی گیبس مولی مخصوص در شرایط استاندارد [J mol ⁻¹]
\bar{h}	آنآلیبی مخصوص مولی [J mol ⁻¹]
J	چگالی جریان [Am ⁻²]
J ₀	چگالی جریان تبادل [Am ⁻²]
n	تعداد مول [mol]
\dot{n}	نرخ جریان مول [mol s ⁻¹]
P	چگالی توان خروجی از پیل سوختی [Wm ⁻²]
p	فشار جزئی [kPa]
p _i ^{TPB}	فشار جزئی جزء آم در ناحیه سه فازی [kPa]
Q	حرارت [J]
\dot{Q}	آهنگ انتقال گرما [W]
\bar{R}	ثابت جهانی گازها [J mol ⁻¹ K ⁻¹]
R _Ω	مقاومت الکترولیت [Ωm]
\bar{s}	آنترپی مخصوص مولی [J mol ⁻¹ K ⁻¹]
S	آنترپی [J K ⁻¹]
T	دما [K]
U _f	ضریب مصرف سوخت
U ₀	ضریب مصرف هوا

جدول ۳- مقادیر پارامترهای عملکردی سیستم تولید سه‌گانه بر

اساس داده‌های جدول ۱

\dot{W}_{Net} [kW]	$1,816 \times 10^3$
$\dot{Q}_{Cooling}$ [kW]	۱۵۲,۳
\dot{Q}_{REQ} [kW]	۵۰۵,۳
\dot{W}_{FC} [kW]	$1,183 \times 10^3$
η_{tri} [%]	۱۰۸,۹
Ψ_{tri} [%]	۷۴,۸۱
η_{FC} [%]	۲۹,۲
Ψ_{FC} [%]	۲۷,۲
η_e [%]	۷۹,۹۲
Ψ_e [%]	۷۴,۴۶

تخریب اگزروزی [kW]



شکل ۱۰- میزان تخریب اگزروزی در تجهیزات سیستم تولید سه‌گانه پیشنهادی

۶- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از تحلیل انرژی و اگزروزی سیستم تولید سه‌گانه پیشنهادی نشان می‌دهد که تحت شرایط کاری ۱۰۷۳ K و ۱۰۷۳ kPa و ۵۰۵ و با لحاظ Am^2 به عنوان چگالی جریان پیل سوختی، سیستم قادر است مقادیر قابل توجه ۱۰۸,۹٪ به عنوان فاکتور بهره‌گیری از انرژی و ۷۴,۸۱٪ به عنوان بازده کلی اگزروزی را ارائه دهد. نتایج نشان می‌دهد در این شرایط عملکردی، با تبدیل پیل سوختی به سیستم تولید سه‌گانه پیشنهادی، مقدار ۱۵۲,۳ kW بار سرمایشی و ۵۰۵,۳ kW بار گرمایشی اضافی تولید شده و توان تولیدی سیستم نیز به میزان ۶۳۳ kW (حدود ۵۳٪) نسبت به توان تولیدی پیل سوختی، افزایش می‌یابد.

همچنین نتایج حکایت از تأثیر مثبت افزایش دما و فشار کاری پیل سوختی، بر افزایش کارایی کلی سیستم و بازده اگزروزی آن دارد. افزایش چگالی جریان پیل سوختی نیز نتیجه عکس داشته و سبب کاهش کارایی کلی سیستم خواهد شد. بر اساس نتایج بدست آمده، با لحاظ ۸۵٪ به عنوان فاکتور بهره‌گیری از سوخت برای پیل سوختی، نتایج بهتری برای توان پیل سوختی و در نتیجه توان کلی سیستم پیشنهادی، بدست خواهد آمد.

بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل اگزروزی سیستم، مطابق پیش‌بینی بیشترین تخریب اگزروزی مربوط به مجموعه پیل سوختی و

- temperatures. *Journal of Power Sources*, Vol. 185, No. 1, pp. 233-240, 2008.
- [11] Dincer I. and Zamfirescu C., Thermodynamic performance analysis and optimization of a SOFC-H+ system. *Thermochimica Acta*, Vol. 486, No. 1-2, pp. 32-40, 2009.
- [12] Dincer I. and Ishak F., Energy and Exergy analyses of direct ammonia solid oxide fuel cell integrated with gas turbine power cycle. *Journal of Power Sources*, Vol. 212, pp. 73-85, 2012.
- [13] Cinti G, et al., SOFC operating with ammonia: Stack test and system analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, pp. 13583-13590, 2016.
- [14] Kalinci Y. and Dincer I., Analysis and performance assessment of NH₃ and H₂ fed SOFC with proton-conducting electrolyte. *International Journal of Hydrogen Energy*, in Press, corrected Proof, 2017.
- [15] Siddiqui O. and Dincer I., A review and comparative assessment of direct ammonia fuel cells. *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 5, pp. 568-578, 2018.
- [16] Tan W.Ch., Iwai H., Kishimoto M., Bruz G., S. Szmyd J. and Yoshida H., Numerical analysis on effect of aspect ratio of planar solid oxide fuel cell fueled with decomposed ammonia. *Journal of Power Sources*, Vol. 384, pp. 367-378, 2018.
- [17] Shy S.S., Hsieh S.C., Chang H.Y., A pressurized ammonia-fueled anode-supported solid oxide fuel cell: Power performance and electrochemical impedance measurements. *Journal of Power Sources*, Vol. 396, pp. 80-87, 2018.
- [18] Fahad A. Al-Sulaiman, *Thermodynamic Modeling and Thermo-economic Optimization of Integrated Trigenation Plants Using Organic Rankine Cycles*. PhD thesis, Waterloo, Ontario, Canada, 2010.

افت ولتاژ فعال سازی [V]	V_{act}
افت ولتاژ مقاومتی [V]	V_{Ω}
افت ولتاژ غلطی [V]	V_{con}
کار [J]	W
توان [W]	\dot{W}
کسر مولی اجزاء شیمیایی	y
بازده	η
بازده انرژی	ψ
ضخامت آند [m]	τ_a
ضخامت کاتد [m]	τ_c
ضخامت الکترولیت [m]	δ
شیمیایی	ch
کمپرسور	C
محفظه احتراق	CC
جزء	cmp
الکتریکی	e
پیل سوختی	FC
ژنراتور	G
مبادله کن گرما	HE
محفظه اختلاط	MC
توربین گازی	GT
فیزیکی (مکانیکی)	ph

۸- مراجع

- [1] Combined heat and power: evaluating the benefits of greater global investment. *International Energy Agency*, Paris, France, 2008.
- [2] International Energy Outlook 2009. *Energy Information Administration*, USA, 2009.
- [3] U.S. Department of Energy, Fuel cell handbook, seventh edition, EG, Inc. G Technical Services, and U.S. Department of Energy, USA, November 2004.
- [4] Weber C., Koyama M. and Kraines S., Co₂-emissions reduction potential and costs of a decentralized energy system for providing electricity, cooling and heating in an office-building in Tokyo. *Energy*, Vol. 31, No. 14, pp. 2705 – 2725, 2006.
- [5] Fuerte A. et al, Ammonia as efficient fuel for SOFC. *Journal of Power Sources*, Vol. 192, pp. 170-174, 2009.
- [6] Ishak F., Dincer I. and Zamfirescu C., Thermodynamic Analysis of Ammonia-fed Solid Oxide Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 202, pp. 157-165, 2012.
- [7] Meng Ni, Dennis Y.C. Leung and Michael K.H. Leung Thermodynamic analysis of ammonia fed solid oxide fuel cells: Comparison between proton-conducting electrolyte and oxygen ion-conducting electrolyte. *Journal of Power Sources*, Vol. 183, No. 2, pp. 682-686, 2008.
- [8] Anatoly Demin P. T., Thermodynamic analysis of a hydrogen fed solid oxide fuel cell based on a proton conductor. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 26, No. 10, pp. 1103-1108, 2001.
- [9] Chellappa A.S., Fischer C.M., Thomson W.J., Ammonia decomposition kinetics over Ni-Pt/Al₂O₃ for PEM fuel cell applications. *Applied Catalysis A: General*, Vol. 227, No. 1-2, pp. 231-240, 2002.
- [10] Meng Ni, Dennis Y.C. Leung and Michael K.H. Leung, An improved electrochemical model for the NH₃ fed proton conducting solid oxide fuel cells at intermediate