

بازیابی گرمای اتلافی پیل سوختی همراه با شعله با استفاده از چرخه برایتون فوق بحرانی کربن دی اکسید

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران - شرکت بهره برداری و تعمیرات نیروگاه صبا، ایران، bagher.amiri@gmail.com

محمدباقر امیری

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، myari@tabrizu.ac.ir

مرتضی یاری*

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، s.ranjbar@tabrizu.ac.ir

فرامرز رنجبر

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی خوی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، f.mohammadkhani@urmia.ac.ir

فرزاد محمدخانی*

چکیده

پیل سوختی همراه با شعله نوع جدیدی از پیل سوختی اکسید جامد است که با شعله سوخت غنی برای تولید توان ادغام شده است. در این مقاله از پیل سوختی اکسید جامد همراه با شعله برای تولید توان استفاده شده و مدل سازی این پیل در نرم افزار EES انجام گرفته است. مدل شامل معادلات بقای جرم، انرژی و واکنشهای شیمیایی و الکتروشیمیایی است. تحلیل پارامتری پیل سوختی نشان می دهد که با افزایش نسبت هم آرزوی از ۱/۲ تا ۲/۸، بازده پیل سوختی از ۴/۲۱ تا ۱۸/۲۳ درصد تغییر می کند. در این مطالعه از چرخه برایتون فوق بحرانی کربن دی اکسید تراکم مجدد برای بازیابی گرمای خروجی پیل بهره برده شده است. برای بهینه سازی این چرخه گرمایی از پارامترهای نسبت فشار کمپرسور و کسر تقسیم جریان استفاده شده است که در نسبت فشار بهینه، بازدهها برای دماهای ورودی توربین ۵۸۳/۱۵، ۸۲۳/۱۵ و ۹۲۳/۱۵ کلوین به ترتیب ۳۱/۵۶، ۴۷/۹۵ و ۵۲/۶۹ درصد بدست آمده است. نتایج نشان می دهد که بازده چرخه ترکیبی بهبود یافته و برای $\Phi = 2/8$ بازده از ۱۸/۲۳٪ به ۲۶/۹۵٪ رسیده است.

واژه های کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد، پیل سوختی همراه با شعله، متان، کربن دی اکسید فوق بحرانی، چرخه برایتون، بازیابی گرمای اتلافی.

Waste heat recovery of a flame-assisted fuel cell using carbon dioxide supercritical Brayton cycle

M. B. Amiri

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran- Saba Power Plant Operation and Maintenance Company

M. Yari

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

F. Ranjbar

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

F. Mohammadkhani

Engineering Faculty of Khoy, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

Abstract

The flame fuel cell is a new type of solid oxide fuel cell in which the solid oxide fuel cell is integrated with a rich fuel flame to generate power. In this paper, a flame-assisted solid oxide fuel cell is employed to generate power, and the cell is simulated in EES. The model includes the equations of mass, energy, and chemical and electrochemical reactions. Parametric analysis of the fuel cell shows that by increasing the equivalence ratio from 1.2 to 2.8, the fuel cell efficiency changes from 4.21% to 18.23%. In this study, the supercritical Brayton carbon dioxide cycle is used to recover the waste heat of the cell. To optimize this thermal cycle, the compressor pressure ratio and flow split fraction have been considered. In the optimal pressure ratio, efficiencies for turbine inlet temperatures of 583.15 K, 823.15 K and 923.15 K have been obtained as 31.56%, 47.95% and 52.69% for the pressure ratio parameter, respectively. The results reveal that the efficiency of the integrated cycle is improved and reached from 18.23% to 26.95% for $\Phi = 2.8$.

Keywords: Solid oxide fuel cell, Flame-assisted fuel cell, Methane, Supercritical carbon dioxide, Brayton cycle, Waste heat recovery.

زیست و تغییرات اقلیمی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و پایدار برای تولید برق ضروری به نظر می رسد.

پیل های سوختی سالهاست که بعنوان ابزاری جایگزین برای تولید انرژی با راندمان بالا و آلودگی کم مورد بررسی قرار گرفته اند که بوسیله واکنش شیمیایی برق تولید می کنند. ساختار فیزیکی اصلی آنها شامل یک لایه الکترولیت و آند و کاتد متخلخل در طرفین الکترولیت که در تماس با آن می باشند، است. ویژگی های اصلی و مهم پیل های سوختی، انعطاف پذیری ابعاد، عملکرد بی صدا و آلاینده ای نزدیک به صفر است. چندین نوع پیل سوختی با استفاده از تحقیقات گسترده توسعه پیدا

۱- مقدمه

در سالهای اخیر، انرژی به یکی از مهمترین و چالش برانگیزترین جنبه های زندگی انسان تبدیل شده است. تلاشهای بسیاری برای توسعه روشهای جدید و بهبود یافته تبدیل انرژی صورت گرفته است. تولید انرژی الکتریکی به دلیل کاربردهای گسترده از اهمیت بالایی برخوردار است. منابع مختلف برای تولید برق اعم از سوخت های فسیلی و منابع انرژی تجدیدپذیر بکار گرفته شده اند. به خاطر افزایش جمعیت جهان و کمبود منابع سوخت های فسیلی و افزایش آلودگی محیط

* نویسنده گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: myari@tabrizu.ac.ir (مرتضی یاری)، f.mohammadkhani@uut.ac.ir (فرزاد محمدخانی)

کرده‌اند اما تنها دو نوع از آنها تجاری‌سازی شده است که عبارتند از پیل سوختی غشاء الکترولیت پلیمری^۱ و پیل سوختی اکسید جامد^۲ [۱]. از میان پیل‌های مختلف پیل سوختی اکسید جامد به دلیل مزایای بیشتر نسبت به پیل‌های دیگر مورد استقبال واقع شده است. از مزایای این پیل سوختی، انعطاف پذیری در سوخت، استفاده از کاتالیزورهای فلزی ارزان، استفاده از گرمای اضافی کیفیت بالا برای کاربری‌های تولید همزمان و چگالی توان نسبتاً بالا است. پیل‌های سوختی اکسید جامد رایج، در یک پیکربندی دو محفظه‌ای عمل می‌کنند، محفظه آندی با سوخت تأمین می‌شود و محفظه کاتدی با هوا. این پیل‌ها در کاربردهایی که نیاز به روشن و خاموش کردن سریع می‌باشد به دلیل تنش زیاد داخلی در طی فرآیندهای گرمایش و خنک‌کاری ناشی از عدم تطابق انبساط گرمایی بین اجزای پیل و آب‌بند، گزینه مناسبی برای کاربردهای عملی طولانی مدت نیستند [۲، ۳]. پیکربندی دیگر، پیل سوختی اکسید جامد تک محفظه‌ای است این پیکربندی بدون آب‌بند است که هر دو الکترود در معرض مخلوط سوخت و هوای پیش آمیخته^۳ یکسان است. با انتخاب مناسب کاتالیزور مختلف آند و کاتد نسبت به مخلوط سوخت و اکسیدکننده، پیل عملکرد بهتری خواهد داشت. بنابراین، مواد آند و کاتد باید با دقت طراحی شوند که نیاز به کاتالیزورهای گران قیمت می‌باشد [۴، ۵]. برای غلبه بر محدودیتهای پیکربندی تک محفظه‌ای و دو محفظه‌ای، پیل سوختی اکسید جامد همراه با شعله^۴ معرفی شد که از ادغام پیل سوختی اکسید جامد با شعله سوخت غنی حاصل می‌شد. این پیکربندی علاوه بر اصلاح و تأمین سوخت مورد نیاز پیل سوختی، گرمای مورد نیاز برای راه‌اندازی پیل را نیز فراهم می‌کند که باعث استارت سریع پیل سوختی می‌شود. در مقایسه با پیل‌های سوختی اکسید جامد دو محفظه‌ای و تک محفظه‌ای رایج، پیل‌های سوختی اکسید جامد همراه با شعله چندین مزایای برجسته از جمله، انعطاف‌پذیری سوخت بالا، مجموعه ساده و روشن و خاموش شدن سریع را از خود نشان داده‌اند [۶]. تحقیقات زیادی بر روی پیل‌های سوختی همراه با شعله برای تعیین پتانسیل و کاربرد آنها در تولید برق انجام گرفته است. هوریوچی و همکاران [۷] برای نخستین بار عملکرد پیل سوختی اکسید جامد را که با شعله گازها، مایعات و جامدات قابل احتراق، سوخت رسانی می‌شد، مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که هر گونه ماده قابل احتراق می‌تواند منبع تولید برق باشد حتی اگر جامد باشد مانند موم پارافین و چوب و همچنین به این نتیجه رسیدند که نسبت سوخت به هوا به وضوح بر چگالی توان تأثیر می‌گذارد. بیشترین چگالی توان را، 75 mW/cm^2 ، برای بوتان نرمال بدست آوردند. کانگ وانگ [۸] در سال ۲۰۱۴ مطالعه‌ای را انجام داد که اهداف اصلی این مطالعه عبارت بودند از: (۱) ایجاد یک کاتد کامپوزیتی و یک لایه کاتالیزور به منظور بهبود توان خروجی و مقاومت در برابر رسوب کربن در پیل‌های سوختی همراه با شعله؛ (۲) بررسی تأثیر شرایط عملیاتی بر عملکرد پیل‌های سوختی همراه با شعله و (۳) توسعه پیل‌های سوختی با خروجی

توان بالا و مقاومت شوک گرمایی بالا. در این مطالعه چگالی توان تقریبی 791 mW/cm^2 و حداکثر چگالی جریان تقریبی 2300 mA/cm^2 حاصل شده بود، که با عملکرد پیل‌های سوختی اکسید جامد دو محفظه‌ای و پیل‌های سوختی اکسید جامد تک محفظه‌ای قابل مقایسه بودند.

علیرغم مزایای پیل‌های سوختی همراه با شعله، چالشهایی مانند بازده الکتریکی پایین و مصرف سوخت پایین را نیز دارند [۹]. برای حل این چالشها می‌توان از سیستم‌های ترکیبی استفاده کرد. سیستم‌های ترکیبی، شامل فناوری‌های مختلف، جایگزینی است تا مشکلات مربوط به انرژی مانند کمبود انرژی، امنیت تأمین انرژی، کنترل انتشار آلاینده‌ها، اقتصاد و صرفه جویی در انرژی و غیره را برطرف کند. گرما و توان ترکیبی یا تولید همزمان، یک کاربرد مناسب برای پیل‌های سوختی دما بالا است. دمای بالای پیل‌های سوختی اکسید جامد ($600-1000$) [۱۰] باعث شده تا برای استفاده از گرمای اتلافی پیل سوختی و افزایش بازده انرژی، سیستم پیل سوختی اکسید جامد همراه با شعله با اجزاء یا چرخه‌های دیگر ادغام شود. مطالعات زیادی برای ترکیب این پیکربندی با سیستم‌های دیگر برای تولید همزمان گرمایش، سرمایش و توان صورت گرفته است. ویجینگ وانگ و همکاران [۱۱] یک سیستم میکرو تولید سه گانه جدید که شامل یک پیل سوختی شعله مستقیم، یک دیگ بخار و یک چیلر جذبی دو اثره بود را ترکیب و برای کاربردهای مسکونی پیشنهاد و تحلیل کردند. در کار دیگر، ویجینگ وانگ و همکاران [۱۲] واحد پیل سوختی شعله با پیکربندی چند پیل را برای تأمین همزمان گرما و توان سیستم‌های میکرو ترکیبی گرما و توان بدون منبع انرژی خارجی استفاده کردند. زنگ و همکاران [۱۳] واحد پیل سوختی همراه با شعله با سوخت بایوگاز را برای سیستم گرما و توان میکرو ترکیبی با استفاده از منبع انرژی طبیعی پیشنهاد کردند. گوتکار و میلکارک [۱۴] عملکرد یک چرخه توربین گاز با و بدون FFC را باهم مقایسه و ارائه دادند. ترکیب محصولات خروجی تعادلی احتراق سوخت غنی سوخت جت-A را برای تولید گاز سنتزی شبیه سازی کردند و تأثیر تغییرات نسبت هم‌ارزی بر بازده کلی را مورد مطالعه قرار داده و یک مدل مناسب برای استفاده در سیستم هواپیماهای تجاری شرح دادند. در همین راستا، در این مطالعه پیل سوختی اکسید جامد همراه با شعله با یک چرخه برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید با هدف دستیابی به بازده بیشتر با هزینه کمتر در مقایسه با ترکیب با یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد سنتی پیشنهاد شده است.

کاهش هزینه تولید برق با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر یا گرمای خروجی آگروز، گامی مهم در جهت ذخیره‌سازی انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده است و بهبود بازده انرژی راه حل دیگری برای حل مشکل فعلی است، بنابراین، جستجوی چرخه انرژی با راندمان بالاتر در حالی که منبع انرژی کمتری را مصرف می‌کند ضروری است. برای چرخه‌های انرژی بخار معمولی، سیستم دارای تجهیزات کمکی زیاد با ژنراتور بخار و چگالنده بزرگ برای بازیابی گرماست. بنابراین، کاهش اندازه سیستم بخار دشوار است. چرخه برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید که از دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی به عنوان سیال کاری استفاده می‌کند، هم از نظر اندازه و هم از نظر کارایی مزایای قابل توجهی دارد، از جمله: به دلیل کار تراکم کمتر،

¹ Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)

² Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

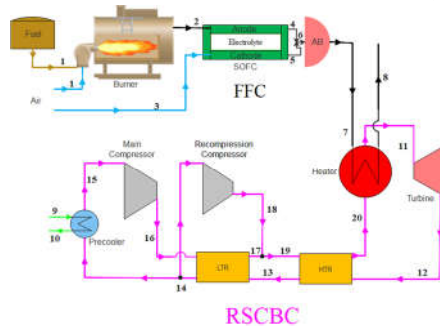
³ Premix

⁴ Flame-assisted Fuel Cell (FFC)

منبع گرمایی چرخه توان برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید می‌تواند باعث ذخیره منابع انرژی و کمک به محیط زیست باشد. استفاده از چرخه برایتون فوق بحرانی به عنوان چرخه پایین دست پیل سوختی به علت مزایای زیادی که ذکر شد گزینه مناسبی خواهد بود. برای پر کردن خلاء استفاده از گرمای اتلافی پیل سوختی در چرخه توان برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید و بالا بردن بازده پیل سوختی، در این تحقیق پیل سوختی اکسید جامد همراه با شعله با چرخه برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید تراکم مجدد ادغام شده و از دیدگاه انرژی مطالعه گردیده و به لحاظ پارامتری تأثیر پارامترهای مهم نیز بررسی شده است. مدلسازی و تحلیل این سیستم ترکیبی در نرم‌افزار^۱ EES انجام شده است.

۲- سیستم پیشنهادی

شکل ۱ طرحواره سیستم پیشنهادی ترکیب پیل سوختی همراه با شعله و چرخه برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید تراکم مجدد را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرحواره ترکیب پیل سوختی همراه با شعله و چرخه برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید تراکم مجدد

در این سیستم پیشنهادی هوا و سوخت پس از احتراق سوخت غنی در محفظه احتراق، تولید گاز سنتزی ($H_2 + CO$) می‌نمایند که سوخت مورد نیاز پیل سوختی است. سوخت سنتزی وارد الکترود آند شده (حالت ۲) و از طرف دیگر هوای اتمسفریک وارد الکترود کاتد می‌شود (حالت ۳) پس از انجام واکنش الکتروشیمیایی در پیل سوختی و تولید توان الکتریکی، گازهای حاصل از احتراق غنی و باقیمانده سوخت سنتزی همراه با هوای خروجی از الکترود کاتد وارد محفظه احتراق سوخت فقیر (AB^2) می‌شود (حالت ۶) و پس از احتراق سوخت‌های باقیمانده، محصولات احتراق دما بالا به سمت گرمکن چرخه برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید هدایت می‌شوند (حالت ۷). انتقال گرما از گازهای خروجی به سیال عامل دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی صورت می‌گیرد، این سیال وارد توربین شده (حالت ۱۱) و پس از انجام کار و تولید توان، با انتقال گرما به دی‌اکسیدکربن فشار بالا در بازیاب دما بالا (حالت ۱۲) وارد بازیاب دما پایین می‌شود (حالت ۱۳). انتقال گرما مجدد در این بازیاب انجام می‌گیرد و سیال کاری در حالت ۱۴ به دو جریان تقسیم می‌شود که یکی از جریانها پس از

سیستم چرخه برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید وقتی که در دماهای متوسط عمل می‌کند راندمان گرمایی بالایی را نشان می‌دهد، فشار بحرانی یک سوم آب است که به آن اجازه می‌دهد تحت فشار نسبتاً کم کار کند، چگالی بالای سیال دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی امکان اندازه کوچکتر تجهیزات، مانند توربوماشین‌های نسبتاً فشرده را فراهم می‌کند، نسبت فشار پایین باعث کاهش تعداد مراحل در توربین می‌شود و دمای بحرانی (۳۰۹/۸ درجه سلسیوس) اجازه می‌دهد تا از هوا به جای آب به عنوان چاه گرمایی با دمای پایین در طول فرآیند دفع گرما استفاده شود و در نتیجه تأثیر آن بر محیط را کاهش می‌دهد [۱۵].

سرکار [۱۶] تحلیل‌های انرژی و بهینه‌سازی چرخه برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید تراکم مجدد را برای مطالعه تأثیر پارامترهای عملکردی، برای بدست آوردن نسبت فشار بهینه، بازده‌های انرژی و انرژی و برگشت‌ناپذیری‌های اجزاء انجام داد. او از راکتور به عنوان منبع گرما استفاده کرد. نتایج نشان داد که برگشت‌ناپذیری مبدل‌های گرمایی در مقایسه با توربوماشین‌ها بسیار بیشتر است. همچنین با توجه به تغییر زیاد ظرفیت گرمایی ویژه در نزدیکی نقطه بحرانی، تأثیر حداقل دمای کارکرد بر نسبت فشار کمپرسور بهینه و بازده چرخه بیشتر از حداکثر دمای کارکرد است.

سرکار و بهاتاچاریا [۱۷] نسبت فشار کمپرسور و فشار میانی بین توربین‌های فشار بالا و فشار پایین را برای بدست آوردن بازده گرمایی ماکزیمم برای یک چرخه برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید تراکم مجدد با گرمایش مجدد و با منبع گرمایی راکتورهای هسته‌ای بهینه‌سازی کردند. همچنین اثرات شرایط عملکردی گوناگون و کارکرد اجزاء در مقادیر بهینه و بازده چرخه را مورد مطالعه قرار دادند. در نهایت، مقایسه‌ای بین چرخه‌های برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید تراکم مجدد با و بدون پیش گرمایش انجام دادند که بازده بیشینه با استفاده از پیش گرمایش ۳/۵ درصد در شرایط بهینه بهبود یافته بود.

یاری و سیروس‌آذر [۱۸]، عملکرد چرخه برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید تراکم مجدد که منبع گرمای آن نیروگاه هسته‌ای بود را با استفاده از انرژی پیش سرمایه‌گذاری مورد بررسی قرار دادند که آن را با چرخه دی‌اکسیدکربن انتقالی بحرانی برای افزایش عملکرد ترکیب کرده بود.

اکبری و محمودی [۱۹] تحلیل انرژی اقتصادی و عملکرد چرخه برایتون تراکم مجدد دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی را مدل‌سازی کردند که گرمای اتلافی آن را برای یک چرخه رانکین آلی به عنوان چرخه پایین دستی استفاده کردند. چندین سیال کاری را برای چرخه رانکین آلی مقایسه کردند و اثرات پارامترهای سیستم را بر عملکرد ترمودینامیکی و اقتصادی مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که چرخه ترکیبی نسبت به چرخه تراکم مجدد برایتون چرخه دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی، بهبود کارایی انرژی تا ۱۱/۷ درصد را دارد و هزینه تولید به ازاء هر واحد هنگام استفاده از ایزوپنتان به عنوان سیال کاری چرخه رانکین آلی کمتر از بقیه سیالات کاری بود.

با توجه به مطالعات انجام شده، خلاء بازیابی گرمای اتلافی پیل سوختی توسط چرخه برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید در اینجا احساس می‌شود که به علت مشکلات کمبود انرژی و مسائل زیست محیطی، استفاده از گرمای اتلافی پیل سوختی همراه با شعله به عنوان

¹ Engineering Equation Solver (EES)

² After Burner

انتقال گرما در پیش‌سردکن^۱ با شرایط نزدیک به شرایط بحرانی وارد کمپرسور اصلی می‌شود (حالت ۱۵). شاخه دیگر جریان وارد کمپرسور تراکم‌مجدد^۲ می‌شود و پس از افزایش فشار در حالت ۱۷ با جریان خروجی کمپرسور اصلی مخلوط می‌شود. مخلوط دوجریان پس از انتقال گرما در بازیاب دما بالا وارد گرمکن می‌شود (حالت ۲۰) و پس از جذب حرارت گازهای خروجی پیل سوختی، وارد توربین شده و چرخه تکرار می‌شود. برای مدلسازی سیستم پیشنهادی فرض شده است که:

- سیستم در حالت پایا کار می‌کند.
- از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر می‌گردد.
- افت فشار در تمام اجزاء سیستم نادیده گرفته شده است.
- هیچ یک از اجزای سیستم با بیرون تبادل گرمایی ندارد.
- جریانهای خروجی آند و کاتد هم‌دما و برابر دمای کارکرد پیل فرض شده است.
- از نشتی گاز داخل سیستم به بیرون صرف‌نظر شده است.
- رفتار تمام گازهای موجود در پیل به صورت گاز ایده‌ال فرض شده است.
- همه اجزاء، انبساط گرمایی مشابهی دارند.
- ترکیب هوای بکار رفته در پیل سوختی ۲۱ درصد اکسیژن و ۷۹ درصد نیتروژن است.

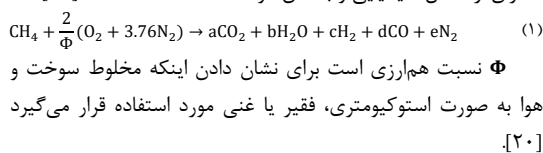
۳- مدل ریاضی

۳-۱- پیل سوختی اکسید جامد همراه با شعله

پیل سوختی واحدی است که بوسیله واکنش شیمیایی برق تولید می‌کند. هر پیل سوختی دو عدد الکتروود دارد که یکی مثبت و دیگری منفی می‌باشد که بطور عام کاتد و آند نامیده می‌شوند. واکنشهایی که تولید الکتریسیته می‌کنند در الکتروودها اتفاق می‌افتد. همچنین هر پیل سوختی یک الکتروولیت دارد که یونها را از یک الکتروود به الکتروود دیگر منتقل می‌کند و یک کاتالیست که انجام واکنش در الکتروودها را تسریع می‌کند. از بین پیل‌های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد از آنجا که الکتروولیت جامد است، می‌تواند به شکل‌های مختلفی از جمله لوله‌ای، مسطح یا یکپارچه طراحی گردد. ساخت سرامیک جامد پیل واحد باعث کاهش مشکلات خوردگی در پیل می‌شود. علت انتخاب پیل سوختی اکسید جامد به عنوان پیل سوختی برای این مطالعه، انعطاف پذیری در سوخت، استفاده از کاتالیزورهای فلزی ارزان، استفاده از گرمای اضافی کیفیت بالا برای کاربری‌های تولید هم‌زمان و چگالی توان نسبتاً بالا است.

برای مدلسازی پیل سوختی اکسید جامد، لازم است سوخت مورد نیاز پیل تأمین شود که در این مقاله از احتراق سوخت غنی متان با هوا برای تأمین سوخت پیل سوختی استفاده می‌شود. معادله احتراق غنی سوخت متان به صورت معادله احتراقی (۱) نوشته می‌شود. سوخت و هوا در فشار در شرایط استاندارد $P_1 = 100 \text{ kPa}$ و دمای 0°C

$T_1 = 25$ وارد محفظه احتراق می‌شوند. برای تعیین ضرایب محصولات احتراق از تعادل شیمیایی و بالانس گونه‌ها استفاده شده است [۲۰].



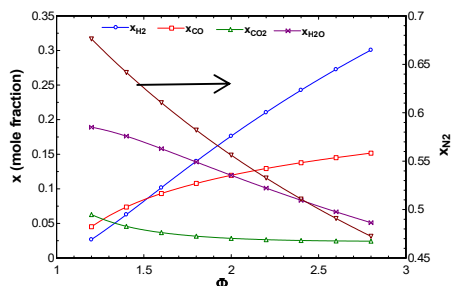
برای تعیین ۵ ضریب مجهول محصولات احتراق ۵ معادله مورد نیاز است که چهار معادله به صورت بالانس گونه‌ها و یک معادله نیز از طریق معادله تعادل شیمیایی با فرض گاز ایده‌آل بودن واکنش دهنده‌ها و محصولات تعیین می‌شود [۲۰].

دمای محصولات احتراق T_2 ، با فرض آدیاباتیک بودن احتراق تعیین می‌گردد [۲۰].

شکل ۲ نشان دهنده تغییر کسر مولی محصولات احتراق با نسبت هم‌ارزی (Φ) است. همانطور که مشاهده می‌شود، کسر مولی CO و H_2 که سوخت مورد نیاز پیل سوختی می‌باشند، با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد.

محصولات احتراق در خروجی احتراق سوخت غنی به طرف آند پیل سوختی رانده می‌شوند. فرض می‌شود تنها گونه شرکت کننده در واکنش الکتروشیمیایی، هیدروژن می‌باشد زیرا اکسیداسیون هیدروژن ۱۰ مرتبه سریعتر از اکسیداسیون مونواکسید کربن انجام می‌شود. همچنین فرض می‌شود، مونو اکسید کربن موجود در خروجی احتراق غنی با استفاده از واکنش تغییر آب-گاز به هیدروژن تبدیل می‌شود.

معادله الکتروشیمیایی هیدروژن بصورت روابط (۲) و (۳) نوشته می‌شود که یونهاى اکسیژن با کاهش اکسیژن در کاتد تشکیل می‌شوند و از طریق الکتروولیت به طرف آند برای واکنش با هیدروژن حرکت می‌کنند.



شکل ۲- کسر مولی محصولات احتراق



واکنش کلی هیدروژن به صورت رابطه (۴) نوشته می‌شود.



واکنش تغییر آب-گاز^۳ نیز به صورت معادله (۵) بیان می‌گردد [۲۰].



همانطور که شکل ۳ بیان می‌دارد، محصولات احتراق سوخت غنی

³ gas-water shifting

¹ Precooler

² Recompression compressor

است که با کاتد تقویت شده و محصول شرکت زیمنس ویستینگهاوس با طول 150 cm و قطر فعال 22 cm است. مشخصات آن در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- مشخصات پیل سوختی اکسید جامد

پارامتر	واحد	مقدار
سطح فعال پیل سوختی	مترمربع	۰/۰۸۴
ضخامت آند	میکرومتر	۱۰۰
ضخامت کاتد	میکرومتر	۲۲۰۰
ضخامت الکترولیت	میکرومتر	۴۰
ضخامت اتصال میانی	میکرومتر	۸۵
تعداد پیل	-	۱۱۰۰
ضریب مصرف سوخت	درصد	۸۵

حل کلی معادلات بقای جرم و انرژی پیل سوختی نیاز به ارزیابی ولتاژ و جریان تولید شده در پیل دارد. وقتی پیل سوختی به هیچ بار خارجی وصل نیست، هیچ جریان الکتریکی به خارج از پیل جریان نمی‌یابد و ولتاژ عملکرد پیل برابر ولتاژمدار باز است که به آن ولتاژ ایده‌آل گفته می‌شود و با استفاده از معادله نرنست^۱ برای واکنش کلی پیل سوختی یعنی رابطه (۱۲) بدست می‌آید.

$$V_{\text{Nernst}} = -\frac{\Delta G_{\text{FC}}}{n_e F} - \frac{RT_{\text{Cell}}}{n_e F} \ln \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{Ano}}}{P_{\text{H}_2}^{\text{Ano}} \sqrt{\frac{P_{\text{CO}_2}}{P_0}}}$$
 (۱۲)

که در آن، P^0 فشار استاندارد، برابر 1 bar است. T_{Cell} دمای عملکرد پیل سوختی، n_e تعداد الکترونهای انتقال یافته در واکنش الکتروشیمیایی به ازای تشکیل هر ملکول آب است که در این معادله برابر ۲ است. R ثابت جهانی گازها برابر $8.314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol.K}}$ ثابت فارادی برابر $96485 \times 10^3 \text{ Coulomb/kmol}$ تغییر انرژی آزاد گیبس مولی در واکنش کلی پیل سوختی است.

به علت تلفات برگشت ناپذیری‌ها، ولتاژ واقعی از ولتاژ مدار باز کمتر می‌باشد. پدیده‌های متعدد منجر به تلفات برگشت ناپذیر در یک پیل سوختی واقعی می‌شوند. این تلفات، پلاریزاسیون یا اضافه ولتاژ نامیده می‌شوند که با η نشان داده شده است. در پیل سوختی اکسید جامد این تلفات ناشی از سه عامل اصلی هستند:

- ۱- پلاریزاسیون^۱ فعالسازی
- ۲- پلاریزاسیون^۲ اهمی

۳- پلاریزاسیون غلظتی

افت ولتاژ فعالسازی شامل افت‌های مربوط به فعالسازی پیل از جمله انتقال بارها بین هادی‌های الکترونی و یونی و همچنین غلبه بر کلیه واکنشهای الکتروشیمیایی می‌باشد [۲۲].

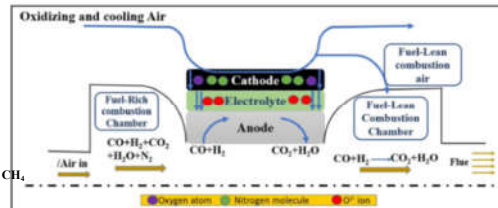
پلاریزاسیون فعالسازی را می‌توان از معادله باتلر-ولمر^۳ [۲۲] بدست آورد که برابر مجموع افت ولتاژ فعالسازی آند و کاتد می‌باشد. افت ولتاژ اهمی ناشی از مقاومت در برابر حرکت الکترونها و یونها

وارد آند پیل سوختی می‌شود. کاتد هوای مورد نیاز خود را بطور مستقیم از اتمسفر دریافت می‌کند و با استفاده از روابط (۶) و (۷) [۲۱] مقدار اکسیژن و نیتروژن وارد شده به کاتد محاسبه می‌شود.

$$\dot{n}_{\text{O}_2}^{\text{Cal}} + \dot{n}_{\text{N}_2}^{\text{Cal}} = \frac{1}{2} \lambda (\dot{n}_{\text{tot}}^{\text{An}} / 0.21)$$
 (۶)

$$\dot{n}_{\text{N}_2}^{\text{Cal}} = \frac{79}{21} \dot{n}_{\text{O}_2}^{\text{Cal}}$$
 (۷)

که در آن λ مقدار هوای اضافی است.



شکل ۳- طرحواره پیل سوختی همراه با شعله با نواحی احتراق و واکنش‌ها

مدلسازی واکنش‌های انجام گرفته در پیل سوختی اکسید جامد به صورت زیر انجام می‌شود.

مکانیزم واکنش الکتروشیمیایی و واکنش تغییر آب-گاز در پیل سوختی طبق معادلات (۸) و (۹) می‌باشد.



در روابط فوق x و z به ترتیب نرخ مصرف مولی واکنش تغییر آب-گاز و واکنش الکتروشیمیایی هیدروژن می‌باشد.

نرخ مولی گازهای خروجی از پیل سوختی به صورت رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{n}_{\text{CO}_2}^{\text{Ano}} &= a + x \\ \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{Ano}} &= b - x + z \\ \dot{n}_{\text{H}_2}^{\text{Ano}} &= c + x - z \\ \dot{n}_{\text{CO}}^{\text{Ano}} &= d - x \\ \dot{n}_{\text{N}_2}^{\text{Ano}} &= e \\ \dot{n}_{\text{tot}}^{\text{An}} &= a + b + c + d + e \\ \dot{n}_{\text{O}_2}^{\text{Cal}} &= \dot{n}_{\text{O}_2}^{\text{Cal}} - \frac{z}{2} \\ \dot{n}_{\text{N}_2}^{\text{Cal}} &= \dot{n}_{\text{N}_2}^{\text{Cal}} \\ \dot{n}_{\text{tot}}^{\text{Cal}} &= \dot{n}_{\text{O}_2}^{\text{Cal}} - \frac{z}{2} + \dot{n}_{\text{N}_2}^{\text{Cal}} \end{aligned}$$
 (۱۰)

با توجه به معادلات مذکور، فشار جزئی گازهای خروجی از آند و کاتد با استفاده از رابطه (۱۱) حاصل خواهد شد:

$$P_i = \frac{\dot{n}_i}{\dot{n}_{\text{tot}}} P_{\text{tot}}$$
 (۱۱)

برای بدست آوردن دو پارامتر x و z نیاز به دو معادله دیگر می‌باشد. یکی از معادلات از نوشتن معادله تعادل واکنش گاز-آب حاصل می‌شود [۲۰].

معادله دیگر برای حل دستگاه معادلات (۱۰)، تعریف ضریب مصرف سوخت در پیل سوختی است که به صورت نسبت هیدروژن مصرف شده در آند به هیدروژن ورودی به آن تعریف می‌شود و طبق رابطه (۱۱) بدست می‌آید.

$$U_f = \frac{z}{\dot{n}_{\text{H}_2}^{\text{An}} + x}$$
 (۱۱)

در این مدل، از پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای استفاده شده

¹ Nernst

² Polarization

³ Butler-Volmer

در الکترودها، الکترولیت و اتصال‌های میانی در طول سطح مشترک هر ماده می‌باشد.

افت ولتاژ اهمی برابر مجموع افت ولتاژ در الکترودها، الکترولیت و اتصال‌های میانی است [۲۲].

افت ناشی از کاهش غلظت گاز واکنش دهنده‌ها که باعث کاهش فشارهای جزئی گازهای واکنش‌دهنده خواهد شد که پلاریزاسیون غلظتی یا انتقال جرم است [۲۲] و [۲۳].

بعد از محاسبه افت‌های ولتاژ فعالسازی، اهمی و غلظتی، ولتاژ واقعی پیل سوختی با رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$V_{Cell} = V_{Nernst} - (\eta_{act} + \eta_{ohmic} + \eta_{conc}) \quad (13)$$

توان تولید شده و چگالی توان نیز به ترتیب با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) به دست می‌آید.

$$W_{FC} = N_{Cell} V_{Cell} i \quad (14)$$

$$\dot{W}_{Density} = V_{Cell} i \quad (15)$$

i جریان الکتریکی تولید شده در پیل سوختی است و j چگالی جریان الکتریکی با رابطه (۱۶) مرتبط است.

$$j = \frac{i}{A_{Cell}} \quad (16)$$

که A_{Cell} مساحت فعال پیل سوختی است.

بازده پیل سوختی اکسید جامد همراه با شعله به صورت معادله (۱۷) بیان می‌شود.

$$\eta_{FFC} = \frac{W_{FC}}{\dot{m}_{CH_4} LHV_{CH_4}} \quad (17)$$

در خروجی پیل سوختی اکسید جامد مقداری سوخت به صورت نسوخته باقی می‌ماند که برای استفاده بهینه از سوخت و ایجاد گرمای اضافی، یک محفظه احتراق مطابق شکل (۱) در خروجی پیل قرارداده می‌شود که احتراق به صورت فقیر برای ایجاد گرما اتفاق می‌افتد.

۲-۳- چرخه برایتون فوق بحرانی کربن دی‌اکسید

برای مدیریت گرمای خروجی از پیل سوختی اکسید جامد همراه با شعله از ترکیب آن با چرخه برایتون فوق بحرانی کربن دی‌اکسید تراکم مجدد استفاده شده است.

برای مدل‌سازی ترمودینامیکی چرخه برایتون فوق بحرانی کربن دی‌اکسید تراکم مجدد که با پیل سوختی اکسید جامد همراه با شعله ادغام شده، از نرم‌افزار EES استفاده شده است. اجزای اصلی این چرخه عبارتند از: کمپرسور اصلی، کمپرسور تراکم مجدد، توربین، بازیاب دما پایین^۱، بازیاب دما بالا^۲، پیش‌خنک‌کننده^۳ و گرمکن.

فرضیاتی که برای مدل‌سازی چرخه برایتون دی‌اکسید کربن فوق بحرانی تراکم مجدد در نظر گرفته شده است عبارتند از: سیستم در شرایط حالت پایدار کار می‌کند، فرایند های تراکم و انبساط آدیاباتیک هستند، بازده آیزنتروپیک مناسب برای توربین و کمپرسور بکار رفته است، از ضریب اثر بخشی برای تحلیل مبادله‌کن‌های گرمایی استفاده شده است و افت فشار در همه مبادله‌کن‌ها و خطوط لوله نادیده گرفته

شده است.

گرمای خروجی از پیل سوختی در یک مبادله‌کن گرمایی با دی‌اکسید کربن تبادل گرما می‌کند برای تحلیل این مبدل گرمایی از ضریب اثر بخشی استفاده شده است. ضریب اثر بخشی ۸۰ درصد برای این مبدل لحاظ گردیده است. روابط (۱۸) تا (۲۰) برای مدل‌سازی این مبادله‌کن گرمایی نوشته شده است.

$$\epsilon_{Heater} = \frac{T_{in,FFC} - T_{out,FFC}}{T_{in,FFC} - T_{in,CO_2}} \quad (18)$$

$$\dot{m}_{FFC}(h_{in,FFC} - h_{out,FFC}) = \dot{m}_{sCO_2}(h_{in,sCO_2} - h_{out,sCO_2}) \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{Heater} = \dot{m}_{sCO_2}(h_{in,sCO_2} - h_{out,sCO_2}) \quad (20)$$

دی‌اکسید کربن پس از دریافت گرما از گازهای خروجی پیل سوختی، با دمای مشخص که در این مقاله برای سه دمای ورودی توربین^۴ $923/15 K$ ، $823/15 K$ و $583/15 K$ تحلیل انجام شده، وارد توربین می‌شود. بازده آیزنتروپیک توربین ۹۲ درصد در نظر گرفته شده است. معادلات (۲۱) و (۲۲) مربوط به تحلیل توربین به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\eta_{turb} = \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{in} - h_{outs}} \quad (21)$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{sCO_2}(h_{in} - h_{out}) \quad (22)$$

برای بازیابی گرما، از دو بازیاب دما بالا و دما پایین استفاده شده است برای این مبادله‌کن‌های گرمایی نیز از ضریب اثر بخشی استفاده شده است و مقدار این ضریب برابر ۹۵ درصد فرض شده است. برای تحلیل این بازیاب‌ها از روابط (۲۳) و (۲۴) استفاده شده است.

بازیاب دما بالا و دما پایین:

$$\epsilon_{HTR,LTR} = \frac{T_{in,LP} - T_{out,LP}}{T_{in,LP} - T_{in,HP}} \quad (23)$$

$$h_{in,LP} - h_{out,LP} = h_{out,HP} - h_{in,HP} \quad (24)$$

جریان فشار پایین دی‌اکسید کربن بعد از بازیاب دما پایین برای بالا بردن بازده چرخه به دو جریان تقسیم می‌شود. یک شاخه از جریان وارد کمپرسور تراکم مجدد و شاخه دیگر بعد از عبور از پیش‌خنک کننده وارد کمپرسور اصلی می‌شود.

شرایط ورودی کمپرسور اصلی $305/15 K$ و $T = 76/9 bar$ و در نظر گرفته شده است که شرایط نزدیک به نقطه بحرانی گاز دی‌اکسید کربن است. کار کمپرسور تحت این شرایط به کمینه مقدار خود می‌رسد. فشار خروجی کمپرسور با نسبت فشار، کنترل و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بازده آیزنتروپیک کمپرسور ۸۵ درصد در نظر گرفته شده و روابط مربوط به این جزء از چرخه به صورت روابط (۲۵) و (۲۶) نوشته می‌شود.

$$\eta_{comp} = \frac{h_{outs} - h_{in}}{h_{out} - h_{in}} \quad (25)$$

$$\dot{W}_{comp} = (1 - x_{sCO_2}) \dot{m}_{sCO_2} (h_{out} - h_{in}) \quad (26)$$

که x_{sCO_2} کسر تقسیم جریان می‌باشد.

برای کمپرسور تراکم مجدد مشابه کمپرسور اصلی، بازده

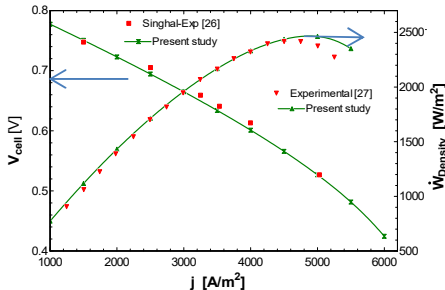
¹ Low-Temperature Recuperator (LTR)

² High-Temperature Recuperator (HTR)

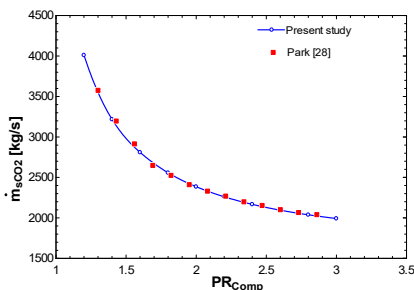
³ Precooler

⁴ Turbine Inlet Temperature (TIT)

مشاهده است. با افزایش نسبت فشار دبی جرمی می‌باید. تغییر دبی جرمی جریان با کار انجام شده توسط هر جزء مرتبط است که کار انجام شده نیز با نسبت فشار کمپرسور مرتبط است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین کار حاضر و کار انجام شده توسط پارک و همکاران وجود دارد.



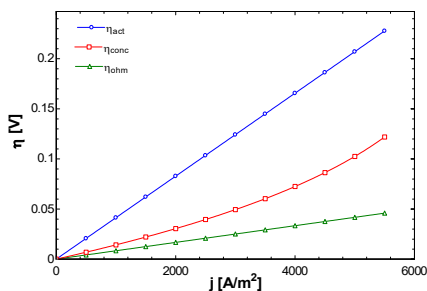
شکل ۵- صحت سنجی مدل‌سازی پیل سوختی اکسید جامد



شکل ۶- نتایج کار حاضر و کار انجام شده

۴-۲- عملکرد پیل سوختی همراه با شعله

عملکرد پیل سوختی با ولتاژ و چگالی توان نسبت به چگالی جریان بیان می‌گردد. برای محاسبه ولتاژ ابتدا باید افت ولتاژهای ایجاد شده در پیل سوختی محاسبه گردد. برای مشاهده سهم هر یک از پلاریزاسیون‌ها در ولتاژ پیل سوختی، تغییرات اضافه ولتاژهای فعالسازی، اهمی و غلظتی نسبت به چگالی جریان در شکل ۷ رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش چگالی جریان هر سه افت ولتاژ افزایش می‌یابند و پلاریزاسیون غلظتی با نزدیک شدن چگالی جریان به چگالی جریان حدی، افت با شیب بیشتری زیاد می‌شود.



شکل ۷- تغییرات افت‌های ولتاژ نسبت به چگالی جریان

پس از اعمال تلفات ولتاژ، ولتاژ و چگالی توان پیل سوختی برای نسبت‌های هم‌ارزی ۱/۲ تا ۲/۸ در احتراق سوخت غنی و دمایی

آیزنتروپیک ۸۵ درصد فرض شده است و روابط مربوط به این کمپرسور با روابط (۲۷) و (۲۸) مشخص شده است.

$$\eta_{Rcomp} = \frac{h_{outs} - h_{in}}{h_{out} - h_{in}} \quad (27)$$

$$\dot{W}_{Rcomp} = x_{sCO_2} \dot{m}_{sCO_2} (h_{out} - h_{in}) \quad (28)$$

تحلیل پارامتری چرخه دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی تراکم مجدد با تغییر نسبت فشار کمپرسور، کسر تقسیم جریان و دمایی ورودی توربین صورت گرفته است.

بازده گرمایی چرخه دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی تراکم مجدد با رابطه (۲۹) تعریف می‌شود.

$$\eta_{th,sCO_2} = \frac{\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{comp} - \dot{W}_{Rcomp}}{\dot{Q}_{Heater}} \quad (29)$$

بازده چرخه ترکیبی به صورت معادله (۳۰) نوشته می‌شود.

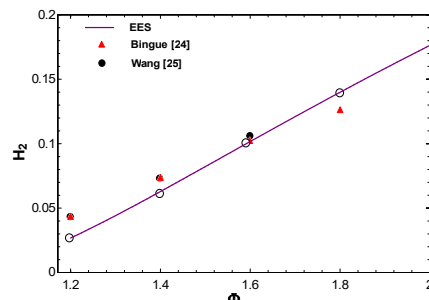
$$\eta_{FFC} = \frac{\dot{W}_{FC} + \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{comp} - \dot{W}_{Rcomp}}{LHV_{CHA}} \quad (30)$$

۴- نتایج و بحث

در این بخش اعتبارسنجی کدهای نوشته شده برای هر سیستم و نتایج حاصل از تحلیل پارامتری آورده شده است.

۴-۱- اعتبار سنجی

جهت اعتبار سنجی برنامه نوشته شده برای احتراق سوخت غنی متان لازم است کد نوشته شده با نتایج تجربی دیگر مقایسه شود. صحت سنجی مدل‌سازی احتراق غنی سوخت متان با کسر مولی هیدروژن در شکل ۴ قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش Φ کسر مولی هیدروژن افزایش می‌یابد و تطابق خوبی با نتایج تجربی بینگو [۲۴] و وانگ [۲۵] دارد.

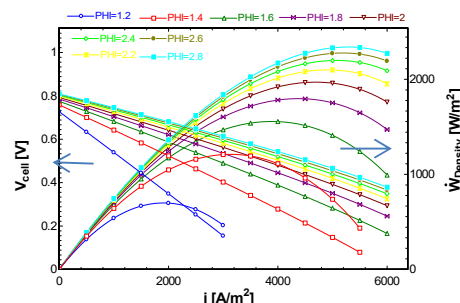


شکل ۴- صحت سنجی احتراق سوخت غنی متان

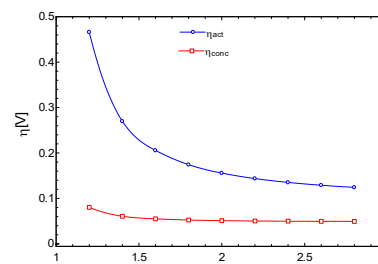
برای اعتبار سنجی مدل پیل سوختی اکسید جامد، ولتاژ و چگالی توان پیل سوختی نسبت به چگالی جریان پیل با نتایج تجربی بدست آمده توسط سینگال [۲۶] و [۲۷] مقایسه شده است (شکل ۵). با افزایش چگالی جریان به علت افزایش افت‌های ولتاژ، ولتاژ پیل سوختی کاهش می‌یابد و چگالی توان تا نزدیکی چگالی جریان حدی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج تجربی و مدل وجود دارد.

برای اطمینان از صحت برنامه نوشته شده برای چرخه برایتون فوق بحرانی کربن‌دی‌اکسید تراکم مجدد نتایج مدل در دبی جرمی کربن‌دی‌اکسید نسبت به ضریب فشار کمپرسور، با کار انجام شده توسط پارک و همکاران [۲۸] مقایسه شده است که در شکل ۶ قابل

عملکردی ۱۲۷۳ کلوین پیل سوختی، محاسبه و در شکل ۸ رسم گردیده است. با توجه به شکل با افزایش نسبت هم‌ارزی چون کسر مولی هیدروژن و مونواکسیدکربن افزایش می‌یابد، ولتاژ و چگالی توان نیز با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد و با افزایش چگالی جریان به علت افزایش غلظت گازهای غیر واکنشی و کاهش غلظت گازهای سنتزی، افت ولتاژها همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده، افزایش می‌یابد که منجر به افت ولتاژ پیل و کاهش چگالی توان می‌شود. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هم‌ارزی در چگالی جریان ثابت، افت ولتاژها کم (شکل ۹) و تغییرات نمودارهای ولتاژ و چگالی توان نسبت به هم کمتر می‌شوند.



شکل ۸- تغییرات ولتاژ و چگالی توان با نسبت هم‌ارزی و چگالی جریان



شکل ۹- تغییرات افت ولتاژها در برابر نسبت هم‌ارزی

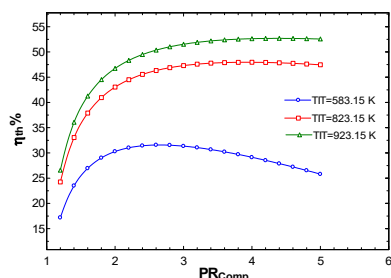
بازده پیل سوختی اکسید جامد همراه با شعله با افزایش نسبت هم‌ارزی همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، افزایش می‌یابد که علت آن افزایش کسر مولی گازهای هیدروژن و مونواکسیدکربن با افزایش نسبت هم‌ارزی است.

۳-۴- تحلیل پارامتری چرخه برایتون فوق‌بحرانی کربن دی‌اکسید تراکم مجدد با منبع گرمایی پیل سوختی همراه با شعله

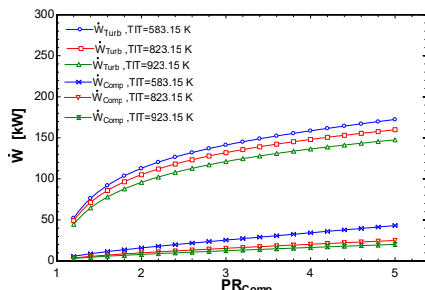
مدلسازی سیستم پیشنهادی نشان می‌دهد که نسبت فشار کمپرسور تأثیر زیادی روی بازده چرخه دارد. بنابراین برای دستیابی به بیشترین بازده، بهینه‌سازی در چرخه کربن‌دی‌اکسید فوق‌بحرانی انجام شده و بازده‌های بیشینه در دماهای مختلف ورودی توربین نسبت به نسبت فشار کمپرسور محاسبه شده است. کسر تقسیم جریان^۱ برابر ۰/۳۶ فرض شده است.

^۱ Flow Split Fraction (FSF)

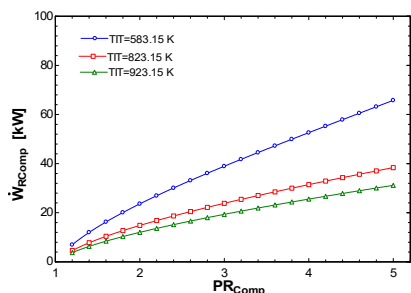
همانطور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است بازده گرمایی چرخه با افزایش نسبت فشار کمپرسور در دماهای مختلف ورودی توربین ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد که بازده ماکزیمم و نسبت فشار بهینه برای $TIT = 583/15 K$ به ترتیب $\eta_{th,CO_2} = 31/56\%$ و $PR_{comp} = 2/6$ برای $TIT = 823/15 K$ برای $PR_{comp} = 3/8$ و $\eta_{th,CO_2} = 47/95$ برای $TIT = 923/15 K$ به ترتیب $\eta_{th,CO_2} = 52/69\%$ و $PR_{comp} = 4/4$ است. البته با توجه به محدودیت ساخت کمپرسورها، امکان افزایش فشار کمپرسور تا $220 bar$ ($PR_{comp} = 2/86$) وجود دارد [۲۸]. در نسبت فشار بالاتر از نسبت فشار بهینه به علت افزایش شیب توان مصرفی کمپرسورها و کاهش شیب توان تولیدی توربین بازده کاهش می‌یابد. توان تولیدی توربین و توان مصرفی کمپرسور اصلی نسبت به نسبت فشار کمپرسور در شکل ۱۱ و توان مصرفی کمپرسور تراکم مجدد نسبت به نسبت فشار کمپرسور در شکل ۱۲ نشان داده شده است. بازده گرمایی همچنین با افزایش دمای ورودی توربین افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۳ با افزایش دمای ورودی توربین کار مصرفی هر دو کمپرسور کاهش و کار تولیدی توربین تا دمای $TIT = 640 K$ افزایش و از آن به بعد کاهش می‌یابد که شکل ۱۱ نیز این را تایید می‌کند.



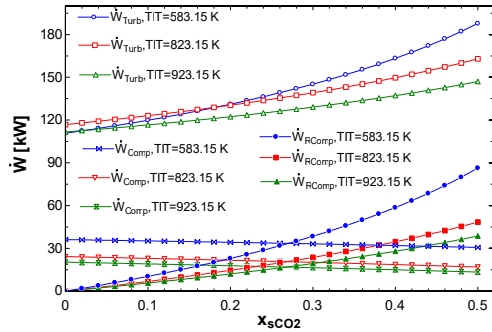
شکل ۱۰- بازده چرخه گرمایی بر حسب نسبت فشار کمپرسور



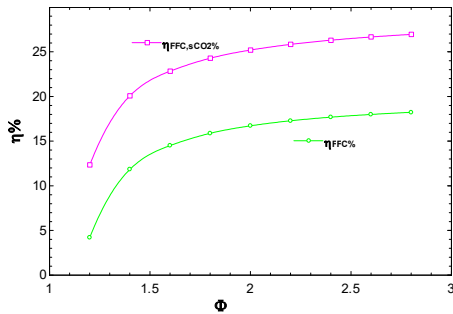
شکل ۱۱- توان تولیدی توربین و توان مصرفی کمپرسور اصلی نسبت به نسبت فشار کمپرسور



شکل ۱۲- توان مصرفی کمپرسور تراکم مجدد نسبت به نسبت فشار کمپرسور



شکل ۱۵- تغییر توان تولیدی توربین و توان مصرفی کمپرسور اصلی و کمپرسور تراکم مجدد با کسر تقسیم جریان



شکل ۱۶- بازده FFC با بازده سیستم ترکیبی FFC و CO₂

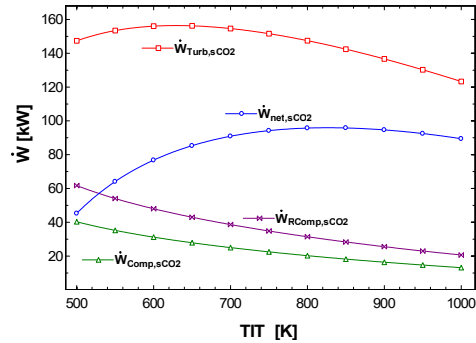
۵- نتیجه گیری

در این مقاله برای بازیابی گرمای گازهای خروجی پیل سوختی اکسید جامد همراه با شعله و بالا بردن بازده از چرخه برایتون فوق بحرانی کربن دی اکسید تراکم مجدد استفاده شده است. تحلیل ترمودینامیکی و پارامتری پیل سوختی و چرخه برایتون تراکم مجدد انجام شده و مدل ریاضی برای بهینه سازی چرخه ارائه شده است.

با مدلسازی پیل سوختی همراه با شعله که برای $\Phi = 2/8 - 1/2$ انجام شد و با افزایش Φ به علت افزایش کسر مولی سوخت مورد نیاز پیل، چگالی توان بیشینه و ولتاژ افزایش یافت. چگالی توان بیشینه، 2185 kW/m^2 ، برای پیل سوختی در $\Phi = 2/8$ ، $z = 500 \text{ A/m}^2$ و ولتاژ کاری 0.44 V بدست آمد. همچنین با افزایش Φ بازده پیل افزایش پیدا کرد.

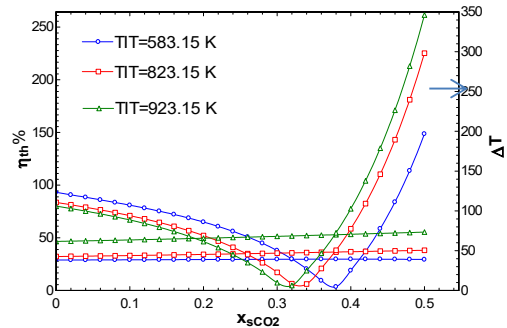
تحلیل پارامتری و بهینه سازی چرخه برایتون فوق بحرانی کربن دی اکسید تراکم مجدد برای پارامترهای نسبت فشار کمپرسور و کسر تقسیم جریان در دماهای ورودی توربین $823/15 \text{ K}$ ، $583/15 \text{ K}$ و $923/15 \text{ K}$ انجام شد که به ترتیب در $4/4$ ، $3/8$ و $2/6$ PR_{comp} بازده ماکزیمم $31/56\%$ ، $47/95\%$ و $52/69\%$ حاصل شد که با افزایش دمای ورودی توربین بازده چرخه افزایش و همچنین در بازده بیشینه نسبت فشار بهینه بدست آمد. برای پارامتر کسر تقسیم جریان 0.38 ، 0.32 و 0.34 در اختلاف دمای نقطه اختلاط جریان 6 K و 8 K و 5 K $\Delta T = 29/71\%$ ، $47/59\%$ و $51/75\%$ بدست آمد.

در نهایت، به علت مزایای زیاد چرخه CO₂ نسبت به چرخه های توان رایج، این چرخه توان با پیل سوختی اکسید جامد همراه با شعله ادغام گردید و با ترکیب این پیل سوختی با چرخه برایتون فوق بحرانی



شکل ۱۳- تغییر توان تولیدی و مصرفی چرخه برایتون فوق بحرانی با دمای ورودی توربین

کسر تقسیم جریان به صورت دبی جرمی کمپرسور تراکم مجدد تقسیم بر دبی جرمی کل تعریف می شود که روی بازده گرمایی چرخه تأثیر دارد. برای بهینه سازی کسر تقسیم جریان ابتدا بازده گرمایی چرخه و سپس اختلاف دما در نقطه اختلاط جریان در نظر گرفته می شود. در دراز مدت، اختلاف دما در نقطه اختلاط می تواند باعث جدایش گرمایی و آسیب به مواد سازنده شود. بنابراین، اختلاف دما هنگام بهینه سازی کسر تقسیم جریان باید در نظر گرفته شود [۲۷]. نسبت فشار کمپرسور در این حالت $3/8$ فرض شده است. شکل ۱۴ تغییر بازده گرمایی چرخه و اختلاف دما در نقطه اختلاط جریان را با تغییر x_{sCO2} نشان می دهد که بیانگر افزایش بازده در TIT مشخص به دلیل بالا بودن شیب تولید توان در توربین نسبت به شیب توان مصرفی در کمپرسور تراکم مجدد و اینکه توان مصرفی کمپرسور اصلی با افزایش کسر تقسیم جریان کاهش می یابد (شکل ۱۵). اگر فقط بازده چرخه را در نظر بگیریم چون با افزایش کسر تقسیم جریان بازده افزایش می یابد، بهترین انتخاب برای کسر تقسیم جریان بالاترین آن می باشد اما با در نظر گرفتن اختلاف دما در نقطه اختلاط جریان، این اختلاف دما تا کسر تقسیم جریان 0.38 ، 0.34 و 0.32 به ترتیب برای دماهای ورودی توربین $583/15 \text{ K}$ ، $823/15 \text{ K}$ و $923/15 \text{ K}$ کاهش و سپس تا کسر تقسیم جریان 0.5 به سرعت افزایش می یابد. پس از ترکیب پیل سوختی اکسید جامد همراه با شعله با چرخه برایتون فوق بحرانی کربن دی اکسید تراکم مجدد همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده، بازده افزایش می یابد.



شکل ۱۴- تغییر بازده چرخه گرمایی و اختلاف دما در نقطه اختلاط جریان اختلاط با کسر تقسیم جریان

International Journal of Hydrogen Energy, 2014. 39(11): p. 5996-6005.

- [12] Wang, Y., et al., Start-up and operation characteristics of a flame fuel cell unit. *Applied Energy*, 2016. 178: p. 415-421.
- [13] Zeng, H., et al., Biogas-fueled flame fuel cell for micro-combined heat and power system. *Energy Conversion and Management*, 2017. 148: p. 701-707.
- [14] Ghotkar, R. and R.J. Milcarek. Integration of Flame-Assisted Fuel Cells With a Gas Turbine Running Jet-A As Fuel. in *ASME Power Conference*. 2019. American Society of Mechanical Engineers.
- [15] Liu, Y., Y. Wang, and D. Huang, Supercritical CO2 Brayton cycle: A state-of-the-art review. *Energy*, 2019. 189: p. 115900.
- [16] Sarkar, J., Second law analysis of supercritical CO2 recompression Brayton cycle. *Energy*, 2009. 34(9): p. 1172-1178.
- [17] Sarkar, J. and S. Bhattacharyya, Optimization of recompression S-CO2 power cycle with reheating. *Energy Conversion and Management*, 2009. 50(8): p. 1939-1945.
- [18] Yari, M. and M. Sirousazar, A novel recompression S-CO2 Brayton cycle with pre-cooler exergy utilization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2010. 224(7): p. 931-946.
- [19] Akbari, A.D. and S.M. Mahmoudi, Thermoeconomic analysis & optimization of the combined supercritical CO2 (carbon dioxide) recompression Brayton/organic Rankine cycle. *Energy*, 2014. 78: p. 501-512.
- [20] Turns, S., *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications 3rd Edition ISBN-13: 978-0073380193. ISBN-10. 73380199.*
- [21] Kendall, K. and M. Kendall, *High-temperature solid oxide fuel cells for the 21st century: fundamentals, design and applications*. 2015: Elsevier.
- [22] Akkaya, A.V., Electrochemical model for performance analysis of a tubular SOFC. *International Journal of Energy Research*, 2007. 31(1): p. 79-98.
- [23] Poling, B.E., J.M. Prausnitz, and J.P. O'connell, *Properties of gases and liquids*. 2001: McGraw-Hill Education.
- [24] Bingue, J.P., et al., Hydrogen production in ultra-rich filtration combustion of methane and hydrogen sulfide. *International journal of hydrogen energy*, 2002. 27(6): p. 643-649.
- [25] Wang, Y., et al., Dynamic analysis of a micro CHP system based on flame fuel cells. *Energy Conversion and Management*, 2018. 163: p. 268-277.
- [26] Singhal, S.C., *Advances in solid oxide fuel cell technology*. Solid state ionics, 2000. 135(1-4): p. 305-313.
- [27] Singhal SC. Solid oxide fuel cells for power generation. *WIREs Energy Environ* 2014;3:179-94.
- [28] Park, J.H., et al., Optimization and thermodynamic analysis of supercritical CO2 Brayton recompression cycle for various small modular reactors. *Energy*, 2018. 160: p.520-535.

تراکم مجدد بازده در $\Phi = 2/8$ از $18/23\%$ در پیل سوختی همراه با شعله به $26/95\%$ در چرخه ترکیبی بهبود یافت.

۶- نمادها

An	آند
Ca	کاتد
CaI	ورودی کاتد
CaO	خروجی کاتد
AnO	خروجی آند
tot	کلی
FC	پیل سوختی
in	ورودی
out	خروجی
FFC	پیل سوختی همراه با شعله
sCO ₂	کربن دی‌اکسید فوق بحرانی
LHV	ارزش گرمایی پایین
HP	فشار بالا
LP	فشار پایین
RSCBC	سیکل برایتون فوق بحرانی کربن دی‌اکسید تراکم مجدد

۷- مراجع

- [1] Zhu, B., R. Raza, and L. Fan, *Solid Oxide Fuel Cells*. 2021.
- [2] Wang, K., et al., A high-performance no-chamber fuel cell operated on ethanol flame. *Journal of power sources*, 2008. 177(1): p. 33-39.
- [3] Milcarek, R.J., et al., Performance investigation of a micro-tubular flame-assisted fuel cell stack with 3,000 rapid thermal cycles. *Journal of Power Sources*, 2018. 394: p. 86-93.
- [4] Stefan, I.C., et al., Single chamber fuel cells: Flow geometry, rate, and composition considerations. *Electrochemical and Solid State Letters*, 2004. 7(7): p. A198.
- [5] Suzuki, T., et al., Anode supported single chamber solid oxide fuel cell in CH 4-air mixture. *Journal of the Electrochemical Society*, 2004. 151(9): p. A1473.
- [6] Wang, K., et al., Flame-assisted fuel cells running methane. *international journal of hydrogen energy*, 2015. 40(13): p. 4659-4665.
- [7] Horiuchi, M., S. Sugauma, and M. Watanabe, Electrochemical power generation directly from combustion flame of gases, liquids, and solids. *Journal of The Electrochemical Society*, 2004. 151(9): p. A1402-A1405.
- [8] Wang, K., *An experimental study of flame-assisted fuel cells*. PHD. Thesis, Syracuse University, 2014.
- [9] Milcarek, R.J., et al., Investigation of microcombustion reforming of ethane/air and micro-Tubular Solid Oxide Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, 2020. 450: p. 227606.
- [10] O'hayre, R., et al., *Fuel cell fundamentals*. 2016: John Wiley & Sons.
- [11] Wang, Y., et al., A micro tri-generation system based on direct flame fuel cells for residential applications.