

مدلسازی و ارائه روش جدید ارزیابی عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب با بهسازی داخلی غیرمستقیم جهت کاربرد در صنایع هوافضا

حمید هادی
حمید رادمنش*
میثم بیات

کارشناس ارشد، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران
استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

چکیده

پیل‌های سوختی در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در میان انواع پیل‌های سوختی، پیل‌های سوختی دما بالا به عنوان فناوری‌های با عملکرد مناسب شناخته شده‌اند، چرا که راندمان بالایی دارند، سازگار با سوخت‌های مختلف هستند و همچنین از دمای بالای آن‌ها می‌توان برای کاربردهای تولید همزمان استفاده نمود. از میان پیل‌های سوختی دما بالا، پیل سوختی کربنات مذاب دارای مزایای بسیاری است اما کمتر مورد توجه قرار گرفته است. استفاده به عنوان جداساز دی‌اکسید کربن و همچنین توانایی کاربرد به‌سازگر داخلی از جمله مزایای آن است. به‌سازگر داخلی نیاز به تجهیزات خارجی جهت بهسازی را از بین می‌برد و همچنین منجر به افزایش راندمان کلی سیستم می‌گردد. به منظور درک بهتر عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب، در این پژوهش مدل پیل سوختی کربنات مذاب با بهسازی داخلی غیرمستقیم، مرحله به مرحله توسعه داده شده است. مدل حاضر به گونه‌ای توسعه داده شده است که دارای سرعت پاسخگویی و دقت مناسبی باشد. همچنین به منظور ارزیابی پارامترهای مؤثر در عملکرد پیل سوختی، تأثیر پارامترهایی نظیر فشار، دمای ورودی پیل سوختی، نسبت بخار به سوخت، ضریب به‌کارگیری سوخت، هوا و دی‌اکسید کربن بر راندمان پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که استفاده از این فناوری تبدیل انرژی به‌ویژه در کشور ما در مراحل تکامل است، بررسی نحوه عملکرد این فناوری در شرایط مختلف می‌تواند به بلوغ بیشتر این فناوری کمک کند و جایگاه خود را در استفاده صنایع هوافضا به‌خصوص تولید انرژی الکتریکی در هواپیما اثبات نماید. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته، پارامترهای فشار، نسبت بخار به سوخت، دمای ورودی پیل سوختی و ضریب به‌کارگیری سوخت بیشترین تأثیر را روی راندمان پیل سوختی دارند. با افزایش فشار، راندمان از ۵۶٪ به ۴۲٪ افت می‌کند. همچنین افزایش نسبت بخار به سوخت، دمای ورودی پیل سوختی و ضریب به‌کارگیری سوخت، به ترتیب منجر به افزایش راندمان به میزان ۶.۲٪، ۷.۵٪ و ۱۴.۳٪ می‌شود. از سوی دیگر پارامترهای ضریب به‌کارگیری هوا و دی‌اکسید کربن کمترین اثر را روی راندمان پیل سوختی کربنات مذاب دارند.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی کربنات مذاب، بهسازی داخلی غیر مستقیم، سوخت‌های هیدروکربنی، مدلسازی، تحلیل حساسیت.

Modeling and providing a new method for evaluating performance of molten carbonate fuel cell with indirect internal Reforming for application in the aerospace industry

H. Hadi Faculty of Energy Systems Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
H. Radmanesh Electrical Engineering Department, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran
M. Bayat Electrical Engineering Department, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract

Fuel cells have attracted considerable interest during the recent years. Among the different types, high temperature fuel cells are very promising because of their high efficiency, fuel flexibility and high temperature of the exhaust heat which can be used for cogeneration. Among the high temperature fuel cells, Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) has several advantages but is studied less than others. CO₂ capturing and internal reforming are its benefits. Internal reforming eliminates the need for external reformers and increases the overall efficiency of the system. In order to better understand the performance of MCFC, in this study, the model of MCFC with indirect internal reforming is developed step by step. The model is developed in a way that has a proper response speed and accuracy. Given that MCFC is a developing technology particularly in our country, evaluating the performance of this technology under different condition could be useful in further progress of MCFC. In order to evaluate the parameters of molten carbonate fuel cell, the impact of parameters such as pressure, fuel cell inlet temperature, steam to carbon ratio, utilization factor of fuel and utilization factor of air and carbon dioxide on the efficiency of the fuel cell is examined. Given that MCFC is a developing technology, particularly in our country, evaluating the performance of this technology under different conditions could be useful in further progress of MCFC. According to the sensitivity analysis conducted, parameters such as pressure, steam to carbon ration, fuel cell inlet temperature and utilization factor of fuel have the most impact on the efficiency of MCFC. With increasing pressure, efficiency is reduced from 56% to 42%. Also, increasing steam to carbon ratio, fuel cell inlet temperature and utilization factor of fuel increases the efficiency by 6.2%, 7.5% and 14.3%, respectively. On the other hand, the utilization factor of air and carbon dioxide have the least impact on the efficiency of MCFC.

Keywords: Molten Carbonate Fuel Cell, Indirect Internal Reforming, Hydrocarbon Fuels, Modeling, Sensitivity Analysis.

تولید توان از سوخت‌های فسیلی می‌باشند. استفاده از این فناوری به

۱- مقدمه

پیل‌های سوختی یک جایگزین مناسب برای فناوری‌های رایج

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hamid.radmanesh@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۳/۲۱

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۲۰

دلیل آلاینده‌گی پایین و راندمان بالا، به‌ویژه در ابعاد کوچک و تولید پراکنده مناسب است [1]. پیل سوختی کربنات مذاب¹ همانند پیل سوختی اکسید جامد² از جمله پیل‌های سوخت دما بالا (بالای 600°C) می‌باشند. از جمله مزایای پیل سوختی کربنات مذاب، امکان کاربرد به عنوان جداساز دی‌اکسیدکربن³ جریان گازهای خروجی تجهیزاتی مانند توربین گازی و بویلر می‌باشد که این امر، کاربرد این فناوری را جذاب‌تر می‌کند [2]. همچنین دمای بالای عملکرد، امکان استفاده از بهسازگر داخلی⁴ را فراهم می‌کند، لذا می‌توان از سوخت‌های مختلف از جمله متان و گاززیستی⁵ در پیل سوختی استفاده نمود [3]. بهسازگر داخلی، نیاز به استفاده از تجهیزات بهسازی خارجی را از بین می‌برد و منجر به کاهش هزینه و افزایش راندمان سیستم می‌گردد [4]. سیستم‌های با بهسازگر داخلی به دو دسته مستقیم⁶ و غیرمستقیم⁷ تقسیم می‌شوند [5]. در واکنش بهسازی مستقیم، سوخت خام و بخار آب به آند پیل سوختی وارد می‌شوند که در آن سه واکنش بهسازی، شیفته⁸ و واکنش الکتروشیمیایی کلی پیل سوختی باهم صورت می‌گیرد. در این ساختار تلفیق ترمودینامیکی واکنش بهسازی و واکنش الکتروشیمیایی پیچیده است، چرا که واکنش بهسازی در یک سوم ابتدایی پیل سوختی و واکنش الکتروشیمیایی در کل امتداد پیل سوختی صورت می‌گیرد. لذا این امر منجر به توزیع نامتعادل دما، تنش‌های حرارتی، و فقدان هیدروژن در نزدیکی آند می‌گردد [6]. در سیستم‌های با بهسازی داخلی غیرمستقیم، بر خلاف ساختار قبل، ابتدا سوخت و بخار آب قبل از ورود به آند، در یک محفظه جداگانه با هم واکنش می‌دهند و از طریق واکنش‌های بهسازی و شیفته، هیدروژن تولید می‌گردد. سپس این هیدروژن به آند پیل سوختی وارد می‌شود. از مهمترین ویژگی سیستم با بهسازگر داخلی غیرمستقیم، ساختار تفکیک شده و تعادل گرمایی بین واکنش‌های گرماده داخل پیل سوختی و واکنش گرماگیر بهسازی است. این ساختار، خنک‌کاری لازم برای کاتالیست پیل سوختی را به حداقل می‌رساند و کاتالیست از اثرات مسموم‌کننده بخار الکتروولت در امان می‌ماند [7]. با در نظر گرفتن مزایای ذکر شده، پیل سوختی مورد استفاده در این پژوهش، دارای بهسازگر داخلی از نوع غیر مستقیم می‌باشد.

در مقایسه با پیل سوختی اکسید جامد، مطالعات کمتری در زمینه پیل سوختی کربنات مذاب صورت گرفته است و فناوری پیل سوختی کربنات مذاب در حال حاضر در مراحل تکامل می‌باشد و از لحاظ تجاری شدن توانایی رقابت با فناوری‌های رایج تولید توان را ندارد [8]. هزینه بالای ساخت پیل سوختی و آسیب‌های احتمالی در حین آزمایشات پیل سوختی (مانند افزایش شدید دما و فقدان هیدروژن)، انگیزه توسعه مدل‌های مختلف جهت بررسی عملکرد پیل سوختی را فراهم می‌کند. به منظور افزایش قابلیت رقابت و رشد سریع‌تر فناوری پیل سوختی کربنات مذاب، توسعه مدل پیل سوختی به همراه روش

مناسب بهسازی، و همچنین تحلیل جامع پارامترهای مؤثر بر عملکرد پیل سوختی از جمله اقدامات راه‌گشا می‌باشند.

مطالعات مختلفی در زمینه مدل‌سازی پیل سوختی کربنات مذاب صورت گرفته است. طیف پیچیدگی این مدل‌ها از مدل‌های ساده و مختصر شده تا مدل‌های سه بعدی پیل سوختی است [9]. در مطالعه [10] یک مدل صفر بعدی با هدف کاهش پارامترهای مورد نیاز پیل سوختی کربنات مذاب، توسعه داده شده است. در مطالعات [11] و [12] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و محاسبه توزیع سه بعدی پارامترهای اصلی، عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مطالعه [13]، عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب با بهسازی داخلی مستقیم با یک ساختار جدید کاتالیست، بررسی شده است. در مطالعات [14] و [15] مدل‌سازی جهت ارزیابی توزیع دما در پیل سوختی کربنات مذاب انجام شده است. در مطالعه [3] یک مدل ریاضی گذرا برای تک سلول با جریان متقاطع توسعه داده شده است که در آن از بهسازی داخلی مستقیم استفاده شده است. همچنین در مطالعات مختلفی از پیل سوختی کربنات مذاب برای تولید توان، تولید همزمان و جداسازی دی‌اکسیدکربن استفاده شده است. در مطالعه [16] از پیل سوختی برای جداسازی دی‌اکسیدکربن در یک چرخه ترکیبی توربین گازی، توربین بخار و پیل سوختی کربنات مذاب استفاده شده است. با توجه به این مطالعه، مقدار انرژی مصرفی برای جداسازی دی‌اکسیدکربن توسط پیل سوختی، ۴ برابر کمتر از روش‌های معمول جداسازی پس از احتراق است. در مطالعه‌ای دیگر [17]، ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی و همچنین بهینه سازی برای یک سیستم ترکیبی توربین گازی-پیل سوختی کربنات مذاب با بهسازی خارجی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه، راندمان انرژی در حالت بهینه ۵۱/۷٪ بدست آمده است. در مطالعه [18]، یک مدل سه بعدی برای پیل سوختی کربنات مذاب توسعه داده شده است که با بکارگیری بهسازی خارجی، با توربین گازی ترکیب شده است. همچنین تأثیر تغییرات فشار و کاربرد سوخت‌های مختلف بر سیستم ارزیابی شده است. در مطالعه [19]، پیل سوختی کربنات مذاب با بهسازی خارجی به همراه میکروتوربین جهت تولید همزمان برق و حرارت مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعه نشان می‌دهد که سیستم توانایی دستیابی به راندمان الکتریکی ۶۰٪ و راندمان کلی ۷۰٪ را دارد. در مطالعات [20] و [21] از پیل سوختی کربنات مذاب برای تولید توان، حرارت و هیدروژن استفاده شده است. در هر دو مطالعه، بهسازگر داخلی مستقیم بکار گرفته شده است. در مطالعه [22]، سیستم ترکیبی پیل سوختی کربنات مذاب و ORC⁹ به همراه بهسازگر خارجی مورد ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی قرار گرفته است. با بهینه سازی سیستم، راندمان انرژی ۵۴/۹٪ برای کل سیستم بدست آمده است. در مطالعه [23]، از یک پیل سوختی کربنات مذاب با بهسازی داخلی مستقیم به منظور تولید همزمان برق و حرارت برای کاربرد خانگی استفاده شده است. در این مطالعه عملکرد سیستم برای گاز شهری و گاز پروپان ارزیابی شده است. با توجه به ارزیابی انجام شده، سایز بهینه پیل سوختی برای کار با گاز شهری ۳kW و برای کار با پروپان ۶kW

⁹ Organic Rankine Cycle

¹ Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

² Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

³ CO₂ Capturing

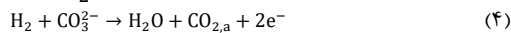
⁴ Internal Reformer

⁵ Biogas

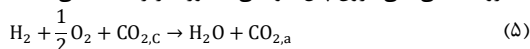
⁶ Direct Internal Reforming (DIR)

⁷ Indirect Internal Reforming (IIR)

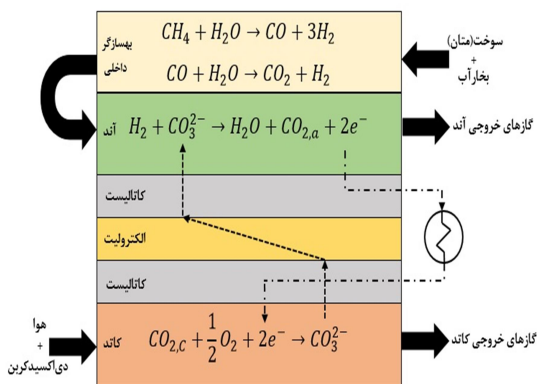
⁸ Water-Gas Shift Reaction



در شکل ۱، طرحواره عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب و واکنش‌های پیل سوختی نشان داده شده است. در قطب کاتد، دی‌اکسیدکربن با اکسیژن ترکیب می‌شود و یون کربنات تولید می‌شود که منجر به حفظ غلظت الکترولیت می‌گردد. یون کربنات از طریق الکترولیت از کاتد به آند منتقل می‌شود. در قطب آند، هیدروژن تولید شده در واکنش‌های بهسازی و شیف‌ت با یون کربنات ترکیب می‌شود و آب، دی‌اکسیدکربن و الکترون تشکیل می‌شود. الکترون با عبور از کاتالیست‌ها، توسط یک مدار خارجی از آند به کاتد منتقل شده و الکتریسیته تولید می‌شود. با تلفیق نیم واکنش‌های آند و کاتد، واکنش الکتروشیمیایی کلی درون پیل سوختی به صورت زیر بدست می‌آید:



واکنش (۵) در واقع واکنش احتراق هیدروژن است که با انتقال دی‌اکسید کربن از کاتد به آند همراه است [28]. این واکنش گرماده است و از گرمای حاصل از آن می‌توان برای تأمین گرمای مورد نیاز واکنش (۱) استفاده نمود.



شکل ۱- طرحواره عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب با بهسازی گر داخلی غیرمستقیم

۳- مدلسازی ترمودینامیکی

نمودار مربوط به مراحل مدلسازی پیل سوختی کربنات مذاب در شکل ۲ آمده است. بدست آوردن دمای کارکرد پیل سوختی، یکی از چالش‌های مدلسازی پیل سوختی کربنات مذاب است. برای این کار ابتدا یک دمای فرضی برای خروجی پیل سوختی در نظر گرفته می‌شود و مراحل مدلسازی پیل سوختی تا بدست آوردن توان پیل سوختی ادامه می‌یابد. بعد از آن با استفاده از موازنه انرژی حول پیل سوختی، دمای خروجی ثانویه پیل سوختی بدست می‌آید. با مقایسه این دما با دمای فرضی اولیه و حداقل سازی خطا در یک حلقه تکرار، دمای صحیح عملکرد پیل سوختی بدست می‌آید. در ادامه هر یک از مراحل مدلسازی توضیح داده شده است.

بدست آمده است. استفاده از این سیستم با گاز شهری برای خانه‌های معمولی مناسب می‌باشد و استفاده با پروپان برای آپارتمان مناسب می‌باشد. در مطالعه [24]، سیستم ترکیبی پیل سوختی کربنات مذاب و میکروتوربین گازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه، ترکیب گاز شهری و گازبستی به عنوان سوخت سیستم به کار گرفته شده است، همچنین از بهسازی گر خارجی جهت بهسازی سوخت استفاده شده است. این مطالعه نشان می‌دهد افزایش مقدار گازبستی موجب کاهش راندمان سیستم به میزان ۳٪ می‌گردد.

مدل‌های مختصر شده تخمینی از عملکرد پیل سوختی بدست می‌آورند که دقت متوسطی دارند و مدل‌های پیچیده حلقه‌های محاسباتی تکرار شونده زیادی دارند که زمان انجام محاسبات را طولانی می‌کنند [25]. لذا توسعه یک مدل با دقت و سرعت پاسخ‌دهی مناسب که نتایج مطلوب و قابل اطمینانی داشته باشد، از جمله اهداف این پژوهش می‌باشد. از سوی دیگر، با توجه به اینکه در اغلب مطالعات انجام شده، از بهسازی خارجی و یا بهسازی داخلی مستقیم به همراه پیل سوختی کربنات مذاب در چرخه‌های مختلف استفاده شده است، و همچنین در کمتر مطالعه‌ای کلیه پارامترهای مؤثر بر عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب مورد ارزیابی قرار گرفته است، توسعه یک مدل با سرعت پاسخگویی و دقت مناسب جهت ارزیابی عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب با بهسازی داخلی غیر مستقیم در شرایط مختلف ضروری می‌باشد. لذا در این پژوهش، مدل پیل سوختی با بهسازی گر داخلی غیر مستقیم بصورت مرحله به مرحله توسعه داده شده است و همچنین با استفاده از تحلیل حساسیت، تأثیر کلیه پارامترهای مؤثر بر عملکرد پیل سوختی بررسی شده است.

۲- اصول کارکرد پیل سوختی کربنات مذاب

نحوه عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب به این صورت است که هیدروژن به قطب آند و هوا و دی‌اکسید کربن به قطب کاتد اعمال می‌شوند تا واکنش‌های شیمیایی داخل پیل سوختی صورت گرفته و الکتریسیته و حرارت تولید شود. با توجه به بالا بودن دمای عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب، می‌توان از سوخت‌های هیدروکربنی مختلفی نظیر متان، اتان، پروپان و... در پیل سوختی کربنات مذاب استفاده کرد. قبل از ورود سوخت‌های هیدروکربنی به آند، می‌توان از بهسازی گر داخلی استفاده نمود و با استفاده از بخار آب، سوخت را به هیدروژن تبدیل نمود. با توجه به گرماگیر بودن واکنش بهسازی، گرمای مورد نیاز این واکنش از طریق واکنش‌های الکتروشیمیایی داخل پیل سوختی که گرماده می‌باشند، تأمین می‌گردد. با در نظر گرفتن متان به عنوان سوخت ورودی، واکنش‌های اصلی که در بهسازی گر اتفاق می‌افتد، واکنش بهسازی و واکنش شیف‌ت به ترتیب به صورت زیر می‌باشند [26]:



واکنش بهسازی به شدت گرماگیر و واکنش شیف‌ت گرماده است. واکنش‌های دیگر پیل سوختی، نیم واکنش‌های کاتد و آند به ترتیب به صورت زیر می‌باشند [27]:

با در نظر گرفتن ثابت تعادل واکنش‌های بهسازی و شیفت، مقدار تبدیل متان و مونواکسیدکربن به هیدروژن بدست می‌آید. با توجه به واکنش‌های (۱) و (۲)، ثابت تعادل واکنش‌های بهسازی و شیفت که تابعی از فشارهای جزئی گاز می‌باشند، به ترتیب به صورت زیر است:

$$K_{P,r} = \frac{P_{CO} P_{H_2}^3}{P_{CH_4} P_{H_2O}} \quad (6)$$

$$K_{P,s} = \frac{P_{CO_2} P_{H_2}}{P_{CO} P_{H_2O}} \quad (7)$$

از سوی دیگر، ثابت‌های تعادل از طریق رابطه زیر که وابسته به دما است بدست می‌آید [30]:

$$\text{Log}(K_p) = AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT + E \quad (8)$$

ضرایب A, B, C, D, E برای واکنش‌های بهسازی و شیفت، در جدول ۱ آمده است [30]:

جدول ۱- ضرایب ثابت تعادل واکنش‌های بهسازی و شیفت

واکنش بهسازی	واکنش شیفت	ضرایب
-11×10^{-11}	-12×10^{-12}	A
$1/24065 \times 10^{-7}$	$-2/57479 \times 10^{-8}$	B
$-2/25232 \times 10^{-4}$	$4/63742 \times 10^{-5}$	C
$1/95028 \times 10^{-1}$	$-3/91500 \times 10^{-2}$	D
$-6/61395 \times 10^{-6}$	$1/32097 \times 10^{-1}$	E

با داشتن دمای عملکرد پیل سوختی برحسب کلین و تساوی رابطه (۸) با روابط (۶) و (۷)، می‌توان ترکیب گازهای خروجی از پیل سوختی را بدست آورد. با در نظر گرفتن x, y و z به ترتیب برابر با دبی مولی تبدیل متان به هیدروژن در رابطه (۱)، دبی مولی تبدیل مونواکسیدکربن به هیدروژن در رابطه (۲) و دبی مصرفی هیدروژن در رابطه (۵)، داریم:

$$K_{P,r} = \frac{(x-y)(3x+y)^3 \times P_{MCFC}^2}{(\dot{n}_{CH_4}^0 - x)(\dot{n}_{H_2O}^0 - x - y)(\dot{n}_{CH_4}^0 + \dot{n}_{H_2O}^0 + 2x)^2} \quad (9)$$

$$K_{P,s} = \frac{y(3x+y)}{(x-y)(\dot{n}_{H_2O}^0 - x - y)} \quad (10)$$

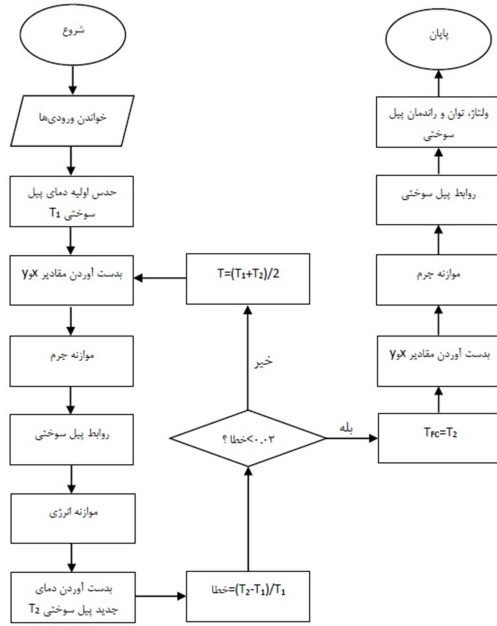
$$z = U_f(3x+y) \quad (11)$$

در روابط بالا U_f ، $\dot{n}_{CH_4}^0$ و P_{MCFC} به ترتیب ضریب بکارگیری هیدروژن، دبی مولی سوخت ورودی و فشار پیل سوختی می‌باشند. $\dot{n}_{H_2O}^0$ دبی مولی بخار آب ورودی به بهسازگر است که از طریق نسبت بخار به سوخت بصورت زیر بدست می‌آید:

$$S/C = \frac{\dot{n}_{H_2O}^0}{\dot{n}_{CH_4}^0} \quad (12)$$

با حل همزمان روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱)، ترکیب گازهای خروجی آند و به تبع آن فشارهای جزئی هر یک از گازها بدست می‌آید. نسبت مول تعادلی $(\frac{n_i}{n_{tot}})$ هر یک از گازها به صورت زیر می‌باشد:

$$X_{eq}^{CH_4} = \frac{\dot{n}_{CH_4}^0 - x}{\dot{n}_{out,a}} \quad (13)$$



شکل ۲- نمودار مراحل مدلسازی پیل سوختی کربنات مذاب

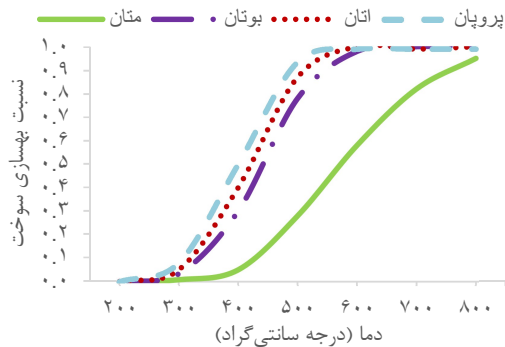
۳-۱- فرض‌های مدل

فرض‌های بکار گرفته شده در توسعه مدل پیل سوختی کربنات مذاب، به شرح زیر است:

- رفتار همه گازها به صورت گاز ایده آل است.
- همه واکنش‌ها در تعادل هستند.
- افت فشار در پیل سوختی در نظر گرفته نمی‌شود.
- میانگین دمای ورودی و خروجی پیل سوختی به عنوان دمای عملکرد پیل سوختی در نظر گرفته شده است.
- شرایط کارکرد پیل سوختی پایا است.
- گاز متان به عنوان سوخت ورودی در نظر گرفته شده است.

۳-۲- معادلات بهسازی

با توجه به شکل ۳، سوخت‌های هیدروکربنی مانند اتان، پروپان و بوتان در دمای کاری پیل سوختی کربنات مذاب (بالای ۶۰۰ درجه سلسیوس)، بطور کامل بهسازی می‌شوند اما متان بطور کامل به هیدروژن تبدیل نمی‌گردد [29].



شکل ۳- تأثیر دما روی بهسازی سوخت‌های هیدروکربنی [29]

$$E_{\text{Nernst}} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{\text{H}_2,a} \times (P_{\text{O}_2,c})^{0.5} \times P_{\text{CO}_2,c}}{P_{\text{H}_2\text{O},a} \times P_{\text{CO}_2,a}} \right] \quad (27)$$

$$\Delta G = 242000 - 45.8 \times T \quad (28)$$

$$R_a = 2.27 \times 10^{-9} \times \exp\left(\frac{E_{\text{act},a}}{RT}\right) \times P_{\text{H}_2}^{-0.42} \times P_{\text{CO}_2}^{-0.17} \times P_{\text{H}_2\text{O}}^{-1} \quad (29)$$

$$R_c = 7.505 \times 10^{-10} \times \exp\left(\frac{E_{\text{act},c}}{RT}\right) \times P_{\text{O}_2}^{-0.43} \times P_{\text{CO}_2}^{-0.09} \quad (30)$$

$$R_{\text{ohm}} = 0.5 \times 10^{-4} \times \exp\left[3016\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{923}\right)\right] \quad (31)$$

که در روابط بالا:

- فشار جزئی گازها در آند و کاتد است.
- ΔG تابع انرژی آزاد گیبس بر حسب $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ می باشد که به خواص ترمودینامیکی گازها وابسته است.
- $E_{\text{act},a}$ انرژی فعال سازی آند و به مقدار 53500 J mol^{-1} می باشد.
- $E_{\text{act},c}$ انرژی فعال سازی کاتد و به مقدار 77229 J mol^{-1} می باشد.
- T دمای سلول بر حسب درجه کلوین است که مقدار متوسط دمای ورودی و خروجی در نظر گرفته می شود.
- R ثابت جهانی گازها با مقدار $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ است.

با محاسبه مقاومت ها و ولتاژ پیل سوختی، توان تولیدی و راندمان پیل سوختی به صورت زیر بدست می آید:

$$\dot{W}_{\text{FC,DC}} = I \times V_{\text{cell}} \quad (32)$$

$$\dot{W}_{\text{FC,AC}} = \eta_{\text{inv}} \times \dot{W}_{\text{FC,DC}} \quad (33)$$

$$\eta_{\text{FC}} = \frac{\dot{W}_{\text{FC,AC}}}{\dot{n}_{\text{CH}_4} \times \text{LHV}} \quad (34)$$

که در روابط بالا η_{inv} و LHV به ترتیب راندمان تبدیل جریان مستقیم به متناوب و ارزش حرارتی پایین سوخت می باشد.

برای موازنه انرژی، پیل سوختی و بهسازگر داخلی را به عنوان حجم کنترل در حالت پایا در نظر می گیریم. با استفاده از قانون اول ترمودینامیک، بین جریان های ورود و خروج انرژی، حرارت و توان تولید شده، موازنه انرژی برقرار می گردد. رابطه زیر، موازنه انرژی حول پیل سوختی را نشان می دهد:

$$\sum_i C_{p,i} \dot{n}_{\text{out},i} T_{\text{out}} - \sum_i C_{p,i} \dot{n}_{\text{in},i} T_{\text{in}} = \dot{Q}_{\text{net}} - \dot{W}_{\text{FC,DC}} \quad (35)$$

در رابطه (35)، \dot{Q}_{net} در واقع مجموع حرارت های مورد نیاز و تولید شده در پیل سوختی بواسطه واکنش های بهسازی، شیف و واکنش های الکتروشیمیایی داخل پیل سوختی است که به ترتیب در زیر آمده اند [32]:

$$\dot{Q}_r = x(\bar{h}_{\text{CO}} + 3\bar{h}_{\text{H}_2} - \bar{h}_{\text{CH}_4} - \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (36)$$

$$\dot{Q}_{\text{sh}} = y(\bar{h}_{\text{CO}_2} + \bar{h}_{\text{H}_2} - \bar{h}_{\text{CO}} - \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (37)$$

$$\dot{Q}_{\text{elec}} = z(\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} - \bar{h}_{\text{H}_2} - 0.5\bar{h}_{\text{O}_2}) \quad (38)$$

$$\dot{Q}_{\text{net}} = |\dot{Q}_{\text{elec}}| + |\dot{Q}_{\text{sh}}| - \dot{Q}_r \quad (39)$$

$$X_{\text{eq}}^{\text{H}_2} = \frac{3x + y - z}{\dot{n}_{\text{out},a}} \quad (14)$$

$$X_{\text{eq}}^{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}^0 - x - y + z}{\dot{n}_{\text{out},a}} \quad (15)$$

$$X_{\text{eq}}^{\text{CO}} = \frac{x - y}{\dot{n}_{\text{out},a}} \quad (16)$$

$$X_{\text{eq}}^{\text{CO}_2,a} = \frac{y + z}{\dot{n}_{\text{out},a}} \quad (17)$$

که در روابط بالا $\dot{n}_{\text{out},a}$ دبی مولی جریان خروجی آند به صورت زیر می باشد:

$$\dot{n}_{\text{out},a} = \dot{n}_{\text{CH}_4}^0 + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 2x + z \quad (18)$$

فشار جزئی گازها از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_i = X_{\text{eq}}^i \times P_{\text{MCFC}} \quad (19)$$

همچنین نسبت مول تعادلی هر یک از گازهای خروجی کاتد به صورت زیر بدست می آید:

$$X_{\text{eq}}^{\text{O}_2} = \frac{\left(\frac{z}{2U_{\text{O}_2}} - \frac{z}{2}\right)}{\dot{n}_{\text{out},c}} \quad (20)$$

$$X_{\text{eq}}^{\text{N}_2} = \frac{\left(\frac{z}{2U_{\text{O}_2}} \times \frac{0.79}{0.21}\right)}{\dot{n}_{\text{out},c}} \quad (21)$$

$$X_{\text{eq}}^{\text{CO}_2} = \frac{\left(\frac{z}{U_{\text{CO}_2}} - z\right)}{\dot{n}_{\text{out},c}} \quad (22)$$

که در روابط بالا U_{O_2} و U_{CO_2} به ترتیب ضریب به کارگیری اکسیدان های اکسیژن و دی اکسید کربن می باشند و $\dot{n}_{\text{out},c}$ دبی مولی جریان خروجی کاتد به صورت زیر می باشد:

$$\dot{n}_{\text{out},c} = z\left(\frac{4.76}{2U_{\text{O}_2}} + \frac{1}{U_{\text{CO}_2}} - 1.5\right) \quad (23)$$

۳-۳- معادلات ولتاژ و توان پیل سوختی

با بدست آمدن مقدار z ، جریان پیل سوختی به صورت زیر بدست می آید [16]:

$$I = 2Fz \quad (24)$$

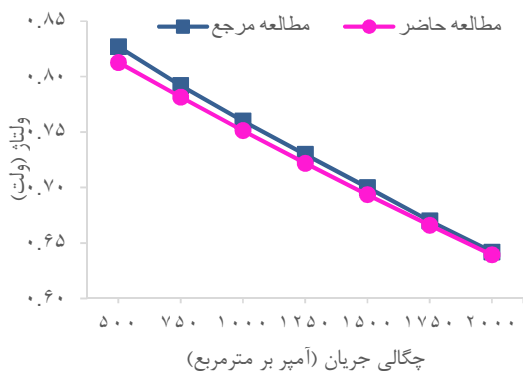
$$I = iA \quad (25)$$

در رابطه (24)، F ثابت فارادی با مقدار 96487 کولن بر مول است. در رابطه (25)، i چگالی جریان بر حسب آمپر بر متر مربع و A سطح فعال پیل سوختی بر حسب مترمربع است. با استفاده از منحنی قطبش پیل سوختی، می توان چگالی جریان مشخصی را انتخاب نمود و برای آن چگالی جریان، سطح فعال پیل سوختی با استفاده از روابط (24) و (25) بدست می آید. ولتاژ کاری پیل سوختی بر حسب ولت از طریق رابطه زیر بدست می آید [31]:

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{Nernst}} - (R_a + R_c + R_{\text{ohm}}) \times i \quad (26)$$

در رابطه (26)، E_{Nernst} بیشینه ولتاژ قابل دستیابی بازگشت پذیر در پیل سوختی کربنات مذاب است. مقاومت های آند، کاتد و اهمی باعث کاهش ولتاژ برگشت پذیر نرنست می شوند. روابط مربوط به ولتاژ برگشت پذیر نرنست بر حسب ولت و مقاومت های آند، کاتد و اهمی بر حسب اهم بر مترمربع در زیر آمده است [31]:

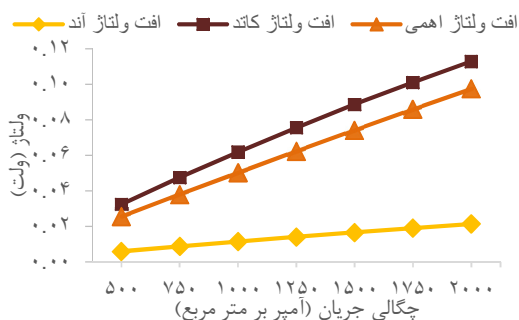
مطالعه مرجع و مطالعه حاضر به صورت زیر است:



شکل ۴- نمودار قطبش مطالعه مرجع و مطالعه حاضر

با توجه به نتایج جدول ۴، درصد خطای پابینی بین خروجی‌های مطالعه مرجع و مدل حاضر وجود دارد. از سوی دیگر با توجه به شکل ۴، تطابق مناسبی بین نمودار قطبش مطالعه حاضر و مطالعه مرجع وجود دارد.

همچنین در شکل زیر، نمودارهای افت ولتاژ پیل سوختی کربنات مذاب در مدل توسعه داده شده نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۵ مشخص است، تغییرات این ولتاژها با چگالی جریان پیل سوختی رابطه مستقیم دارند و بیشترین افت ولتاژ مربوط به مقاومت کاتد و کمترین افت مربوط به مقاومت آنند است.



شکل ۵- نمودارهای افت ولتاژ در پیل سوختی کربنات مذاب

۴- نتایج

به منظور ارزیابی عملکرد پیل سوختی در شرایط مختلف، تحلیل حساسیت روی پارامترهای مختلفی صورت گرفته است. عملکرد پیل سوختی با تغییر پارامترهایی نظیر فشار، دمای ورودی پیل سوختی، نسبت بخار آب به سوخت، ضریب به کارگیری سوخت و اکسیدانت مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، یک شرایط اولیه به عنوان شرایط پایه برای پیل سوختی انتخاب گردید و تغییرات پارامترها با توجه به حالت پایه، مقایسه شده است. شرایط اولیه برای حالت پایه در جدول ۵ آمده است:

جدول ۵- فرضیات حالت پایه عملکرد پیل سوختی

مقدار	پارامترهای حالت پایه
٪۸۵	U_F
٪۷۵	U_{CO_2}

۳-۴- اعتبار سنجی مدل

به منظور اعتبار سنجی مدل پیل سوختی کربنات مذاب، مطالعه کامپیوتری و همکاران [16] به عنوان مرجع قرار گرفت و نتایج حاصل از این مدل با مطالعه مرجع مقایسه شد. برای این منظور، مدل پیل سوختی تحت فرضیات مطالعه مرجع بررسی گردید. فرضیات و مشخصات سوخت ورودی مطالعه مرجع به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲- فرضیات مطالعه مرجع

مقدار	فرضیات (ورودی سیستم پیل سوختی)
٪۷۵	U_F
٪۷۵	U_{CO_2}
٪۱۱	U_{O_2}
۳/۵	نسبت بخار آب به سوخت
۱۵۰۰	چگالی جریان (A/m^2)
۶۳۶/۲	دمای ورودی پیل سوختی ($^{\circ}C$)
٪۱	درصد اتلاف حرارت
٪۹۴	راندمان مبدل DC-AC
۱/۱۳	فشار (bar)

جدول ۳- مشخصات سوخت مطالعه مرجع

ترکیب سوخت	دبی مولی ورودی آند (mol/s)	درصد موجود در سوخت (%)
CH_4	۱۹۹/۰۲	۸۹
C_2H_6	۱۵/۶۲۲	۷
C_3H_8	۲/۲۲۵۶	۱
C_4H_{10}	۰/۲۲۲۵۶	۰/۱
CO_2	۴/۲۸	۱/۹
N_2	۲/۱۴	۰/۹۵

با استفاده از داده‌های جدول ۲ و جدول ۳ به عنوان ورودی مدل، پارامترهای ولتاژ، توان، دما و سطح فعال پیل سوختی به عنوان خروجی مدل بدست آمد و با مطالعه مرجع مقایسه شد. نتایج این مقایسه در جدول ۴ نشان داده شده است:

جدول ۴- نتایج خروجی مدل حاضر و مطالعه مرجع

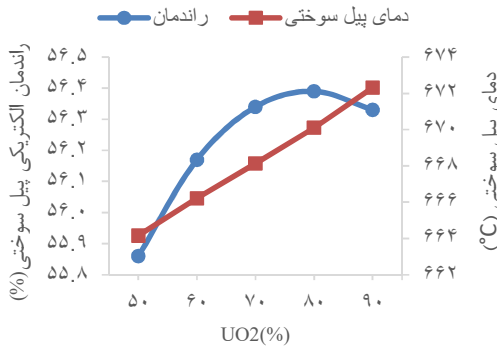
پارامترها	مطالعه مرجع	مدل حاضر	خطا (%)
$V (v)$	۰/۶۹۹	۰/۶۹۳۶	-۰/۷۷
$\dot{W}_{FC,AC} (kw)$	۸۸۰۰۰	۸۷۸۲۰	-۰/۲
$T_{FC} (^{\circ}C)$	۶۴۲/۲	۶۵۳/۰۵	۱/۶۸
$A_{FC} (m^2)$	۸۹۸۹۰	۸۹۷۹۰	-۰/۱۱

همچنین، با توجه به ورودی‌های مطالعه مرجع، نمودار قطبش

نصف دی‌اکسید کربن است. به‌منظور اطمینان از تکمیل فرآیند و جبران تلفات غلظت، اکسیژن ورودی کاتد بیشتر از مقدار مصرفی پیل سوختی وارد می‌شود که با استفاده از ضریب بکارگیری اکسیژن به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$O_{2,in,c} = \frac{(z/2)}{U_{O_2}} \quad (41)$$

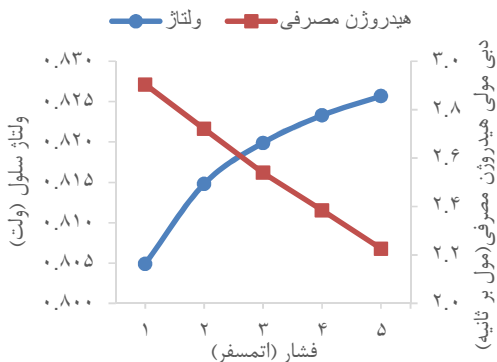
با توجه به شکل ۷، با افزایش U_{O_2} ، دبی ورودی به پیل سوختی کاهش می‌یابد و لذا دمای جریان افزایش می‌یابد که منجر به افزایش دمای پیل سوختی می‌شود. از سوی دیگر با افزایش U_{O_2} ، فشار جزئی اکسیژن کاهش می‌یابد. در اندازه‌گیری ولتاژ پیل سوختی، فشار جزئی اکسیژن بر ولتاژ نرنست و افت ولتاژ مربوط به مقاومت کاتد تأثیر می‌گذارد. افزایش U_{O_2} تا ۸۰٪، بر روی برهمکنش ولتاژ نرنست و مقاومت کاتد، تأثیر فزاینده دارد و بعد از ۸۰٪ تأثیر کاهشدهنده دارد و منجر به کاهش ولتاژ و در نتیجه توان پیل سوختی می‌شود.



شکل ۷- تأثیر ضریب به‌کارگیری اکسیژن روی راندمان و دمای پیل سوختی

۴-۳- تأثیر فشار بر عملکرد پیل سوختی

در شکل ۸ تغییرات ولتاژ و دبی مولی هیدروژن مصرفی (z) در پیل سوختی نشان داده شده است. هر دو پارامتر در تعیین توان پیل سوختی تأثیر دارند. با توجه به این نمودارها، با افزایش فشار پیل سوختی، دبی مولی هیدروژن مصرفی در پیل سوختی کاهش می‌یابد و ولتاژ پیل سوختی افزایش می‌یابد. شکل ۹، تأثیر برهم کنش این پارامترها بر راندمان الکتریکی پیل سوختی را نشان می‌دهد.



شکل ۸- تأثیر فشار بر دبی مولی هیدروژن مصرفی و ولتاژ پیل سوختی

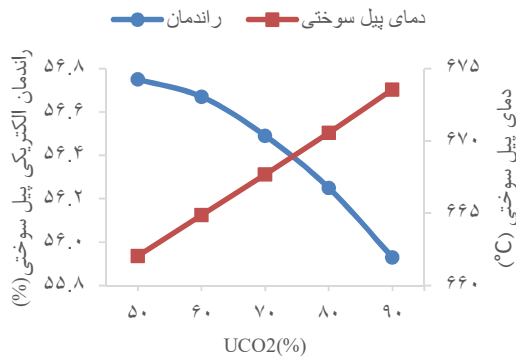
U _{O₂}	
۷۵٪	LHV (kJ/mol)
۸۰۰	نسبت بخار آب به سوخت
۳/۵	چگالی جریان (A/m ²)
۱۵۰۰	دمای ورودی پیل سوختی (°C)
۶۳۰	درصد اتلاف حرارت
٪۱	راندمان مبدل DC-AC
٪۹۴	P _{MFC} (bar)
۱/۰۱۳	دبی مولی سوخت متان (mol/s)
۱	توان خروجی پیل سوختی (kw)
۴۵۱/۰۵	دمای عملکرد پیل سوختی (°C)
۶۶۹/۱	ولتاژ پیل سوختی (V)
۰/۸۰۴۹	راندمان پیل سوختی (%)
۵۶/۳۸	سطح فعال پیل سوختی (m ²)
۳۶۹/۵۳	

۴-۱- تأثیر U_{CO₂} بر عملکرد پیل سوختی

به‌منظور تولید یون کربنات، یک جریان دی‌اکسید کربن باید به کاتد پیل سوختی کربنات مذاب اعمال شود. این جریان به دلیل وجود تلفات غلظت، معمولاً بیشتر از مقدار لازم در واکنش‌های پیل سوختی وارد می‌شود که این مقدار اضافه با استفاده از ضریب به‌کارگیری دی‌اکسید کربن به‌صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$CO_{2,in,c} = \frac{z}{U_{CO_2}} \quad (40)$$

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، با افزایش U_{CO_2} ، راندمان پیل سوختی با شیب کمی کاهش می‌یابد. افزایش U_{CO_2} موجب کاهش دی‌اکسید کربن ورودی به کاتد می‌شود. این امر منجر به کاهش فشار جزئی دی‌اکسید کربن در کاتد می‌شود و باعث کاهش ولتاژ و در نتیجه توان پیل سوختی می‌گردد. با توجه به شکل ۶، با افزایش U_{CO_2} از ۵۰٪ به ۹۰٪، راندمان الکتریکی پیل سوختی به میزان ۱٪ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش U_{CO_2} ، دبی جریان ورودی به کاتد کاهش می‌یابد و لذا دمای جریان بالاتر می‌رود و منجر به افزایش دمای پیل سوختی با شیب کند می‌شود.

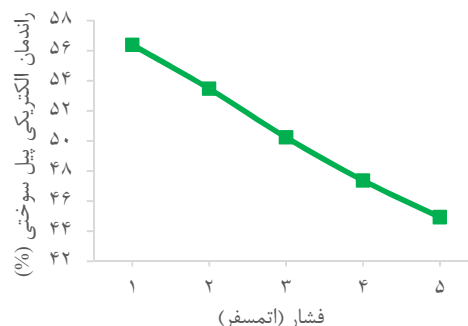


شکل ۶- تأثیر ضریب به‌کارگیری دی‌اکسید کربن روی راندمان و دمای پیل سوختی

۴-۲- تأثیر U_{O₂} بر عملکرد پیل سوختی

با توجه به رابطه (۳)، مقدار مصرف اکسیژن در کاتد پیل سوختی،

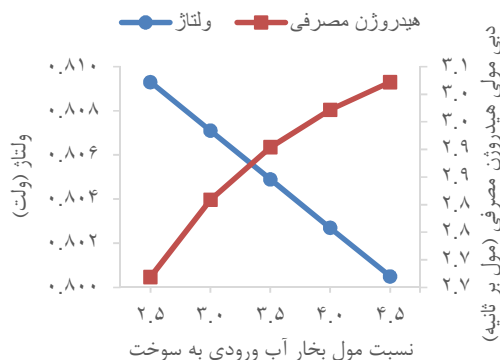
با توجه به شکل ۹، رفتار راندمان الکتریکی مشابه بار فتار مصرف هیدروژن در شکل ۸ است و با افزایش فشار، راندمان الکتریکی پیل سوختی کاهش می‌یابد. در نتیجه با تغییر فشار پیل سوختی، تأثیر هیدروژن مصرفی در تولید توان، بیشتر از تأثیر ولتاژ است.



شکل ۹- تأثیر فشار پیل سوختی روی راندمان الکتریکی

۴-۴- تأثیر نسبت بخار آب به سوخت بر پیل سوختی

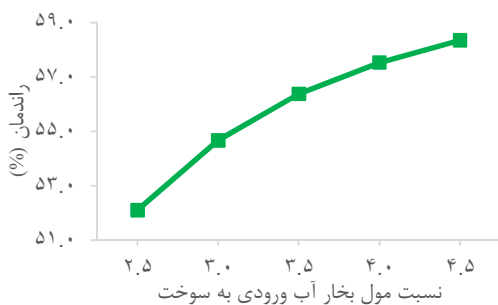
با توجه به شکل ۱۰، با افزایش نسبت مول بخار آب به سوخت ورودی، مقدار مول آب بیشتری برای واکنش‌های بهسازی و شیف‌ت در اختیار است و لذا مقدار مول تولیدی هیدروژن و به تبع آن دبی مولی هیدروژن مصرفی در پیل سوختی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش نسبت بخار آب به سوخت، فشار جزئی بخار آب در آند افزایش می‌یابد. در محاسبه ولتاژ پیل سوختی، فشار جزئی بخار آب بر ولتاژ نرنست و افت ولتاژ مربوط به آند تأثیر می‌گذارد. با توجه به شکل ۱۰، فشار جزئی بخار آب روی ولتاژ نرنست و افت ولتاژ آند، اثر کاهنده دارد و منجر به کاهش ولتاژ پیل سوختی می‌گردد. در شکل ۱۱ تأثیر تغییرات نسبت بخار آب به سوخت بر راندمان الکتریکی پیل سوختی، نشان داده شده است.



شکل ۱۰- تأثیر نسبت مول بخار آب به سوخت بر ولتاژ و هیدروژن مصرفی پیل سوختی

با توجه به شکل ۱۱، رفتار تغییرات راندمان پیل سوختی با نسبت بخار به سوخت، مانند رفتار هیدروژن مصرفی در شکل ۱۰ است و با افزایش نسبت بخار به سوخت، راندمان با شیب تندی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۱، پارامتر نسبت بخار به سوخت، تأثیر زیادی در

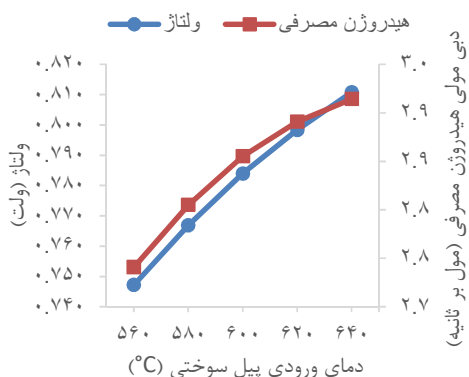
افزایش راندمان پیل سوختی دارد.



شکل ۱۱- تأثیر نسبت بخار آب به سوخت بر راندمان الکتریکی

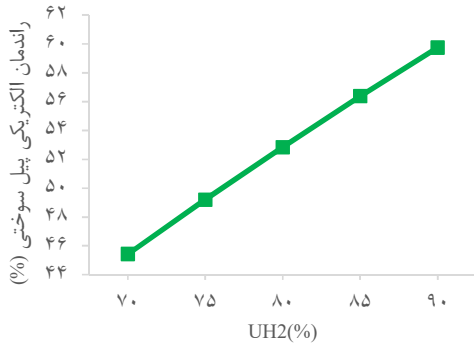
۴-۵- تأثیر دمای ورودی پیل سوختی بر عملکرد آن

در این پژوهش، دمای کارکرد پیل سوختی به صورت میانگین دمای ورودی و خروجی پیل سوختی در نظر گرفته شده است. دمای کارکرد پیل سوختی بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس است. از این رو یک تحلیل حساسیت روی دمای ورودی پیل سوختی صورت گرفته شده است. شکل ۱۲ تأثیر دمای ورودی پیل سوختی بر هیدروژن مصرفی پیل سوختی و ولتاژ را نشان می‌دهد. با افزایش دمای ورودی پیل سوختی، واکنش بهسازی در دمای بالاتری صورت می‌گیرد و لذا هیدروژن بیشتری نیز تولید می‌گردد. از سوی دیگر، با توجه به روابط (۲۷) تا (۳۱)، دمای کارکرد پیل سوختی بر ولتاژ نرنست و افت ولتاژها تأثیر می‌گذارد. با توجه به شکل ۱۲، افزایش دمای ورودی پیل سوختی منجر به افزایش ولتاژ پیل سوختی می‌گردد.



شکل ۱۲- تأثیر دمای ورودی پیل سوختی بر ولتاژ و هیدروژن مصرفی پیل سوختی

با توجه به اینکه ولتاژ و هیدروژن مصرفی پیل سوختی، پارامترهای تأثیرگذار در تولید توان پیل سوختی می‌باشند، با افزایش دمای ورودی پیل سوختی، توان تولیدی پیل سوختی نیز افزایش می‌یابد. شکل ۱۳ تأثیر دمای ورودی پیل سوختی بر راندمان الکتریکی را نشان می‌دهد که با افزایش دمای ورودی، راندمان الکتریکی بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد. لذا دمای ورودی پیل سوختی از پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب است.



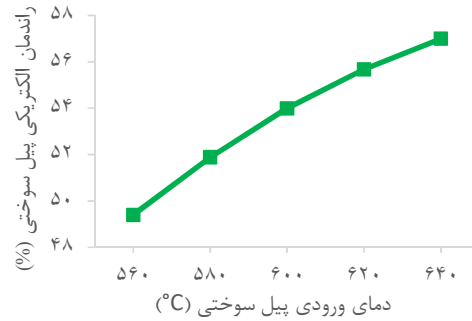
شکل ۱۵- تأثیر ضریب به کارگیری هیدروژن روی راندمان الکتریکی

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، مدل پیل سوختی کربنات مذاب با بهسازی داخلی غیرمستقیم در حالت پایا توسعه داده شد. استفاده از بهسازی داخلی غیرمستقیم منجر به تعادل گرمایی بین واکنش‌های گرماده داخل پیل سوختی و واکنش گرماگیر بهسازی می‌شود. از سوی دیگر خنک‌کاری لازم برای کاتالیست پیل سوختی را به حداقل می‌رساند و کاتالیست از اثرات مسموم‌کننده بخار الکترولیت در امان می‌ماند. به‌منظور ارزیابی عملکرد پیل سوختی، تأثیر پارامترهایی نظیر ضریب به کارگیری اکسیدانت‌ها، فشار، نسبت بخار به سوخت، دمای ورودی و ضریب به کارگیری هیدروژن بر روی راندمان الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفت. با تحلیل حساسیت صورت گرفته، افزایش پارامترهای نسبت بخار به سوخت، دمای ورودی و ضریب به کارگیری هیدروژن منجر به افزایش راندمان با شیب تند می‌شود. از سوی دیگر افزایش فشار منجر به کاهش شدید راندمان می‌گردد. با ارزیابی تأثیر ضریب به کارگیری اکسیدانت‌ها، ضریب به کارگیری اکسیرن و دی‌اکسید کربن کمترین تأثیر را نسبت به سایر پارامترها روی راندمان الکتریکی پیل سوختی دارند.

۶- مراجع

- [1] Hengeveld D. W. and Revankar S. T., Economic analysis of a combined heat and power molten carbonate fuel cell system, *Journal of Power Sources*, Vol. 165, pp. 300-306, 2007.
- [2] Campanari S., Manzolini G. and Chiesa P., Using MCFC for high efficiency CO2 capture for natural gas combined cycles: Comparison of internal and external reforming, *Applied Energy*, Vol. 112, pp. 772-783, 2013.
- [3] Heidebrecht P. and Sundmacher S., Molten carbonate fuel cell (MCFC) with internal reforming: model-based analysis of cell dynamics, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 58, pp. 1029-1036, 2003.
- [4] Lukas M. D., Lee K. Y. and Ghezal-Ayagh H., Development of a stack simulation model for control study on direct reforming molten carbonate fuel cell power plant, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, pp. 1651-1657, 1999.
- [5] Ohtuski J., Kusunoki A., Murahashi T., Tanaka T. and Nishiyama E., in *Proc Int. Fuel Cell Conf*, Makuhan, Japan, Feb 3-6, 1992, pp 251-254.
- [6] J. M. Munoz de Escalona, D. Sanchez, R. Chacartegui and T. Sanchez, A step-by-step methodology to construct a model of performance of molten carbonate fuel cells with internal

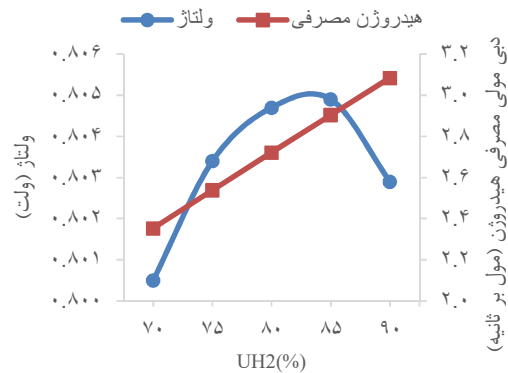


شکل ۱۳- تأثیر دمای ورودی پیل سوختی بر راندمان الکتریکی

۴-۶- تأثیر ضریب به کارگیری هیدروژن بر پیل سوختی

در این قسمت با تغییر ضریب به کارگیری هیدروژن تولید شده از ۷۰٪ تا ۹۰٪، تأثیر آن روی عملکرد پیل سوختی ارزیابی می‌گردد. همانطور که در شکل ۱۴ مشخص است، با افزایش ضریب به کارگیری هیدروژن، مقدار هیدروژن مصرفی در پیل سوختی نیز افزایش می‌یابد. در رابطه با ولتاژ، با توجه به تأثیر فشار جزئی هیدروژن در ولتاژ نرنست و مقاومت آند، با افزایش این ضریب، مقدار ولتاژ ابتدا با شیب کند افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

مجموع برهم کنش اثر ولتاژ و هیدروژن مصرفی بر راندمان الکتریکی در شکل ۱۵ آمده است که نشان می‌دهد



شکل ۱۴- تأثیر ضریب به کارگیری هیدروژن روی ولتاژ و هیدروژن مصرفی پیل سوختی

با افزایش ضریب به کارگیری هیدروژن، راندمان سیستم بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد، لذا این پارامتر تأثیر به‌سزایی در عملکرد پیل سوختی دارد. از سوی دیگر به‌منظور جلوگیری از پدیده پخش^۱ هیدروژن بطور کامل نباید در پیل سوختی مصرف گردد [33].

¹ Diffusion Phenomena

- [24] Huang H., Li J., He Z., Zeng T., Kobayashi N. and Kubota M., Performance analysis of a MCFC/MGT hybrid power system bi-fueled by city gas and biogas, *Energies*, Vol. 8, pp. 5661-5677, 2015.
- [25] Liu A. and Weng Y., Modeling of molten carbonate fuel cell based on the volume-resistance characteristics and experimental analysis, *Journal of Power Sources*, Vol. 195, pp. 1872-1879, 2010.
- [26] Jarosch K., El Solh T. and de Lasa H., Modelling the catalytic steam reforming of methane: discrimination between kinetic expressions using sequentially designed experiments, *Chemical Engineering Science*, Vol. 57, pp. 3439-3451, 2002.
- [27] Appleby A., Blomen L. and Mugerwa M., in *Fuel Cell Systems*, New York, Plenum Press, 1993, pp. 157-197.
- [28] M. Fermeglia, A. Cudicio, G. DeSimon, G. Longo and S. Priol, Process Simulation for Molten Carbonate Fuel Cells, *Fuel Cells*, Vol. 5, no. 1, 2005.
- [29] Schadel B., Duisberg M. and Deutschmann O., Steam reforming of methane, ethane, Propane, butane and natural gas over a rhodium-based catalyst., *Catal Today*, Vol. 142, pp. 42-51, 2009.
- [30] Duan L., He B. and Yang Y., Parameter optimization study on SOFC-MGT hybrid power system, *International Journal of Energy Research*, Vol. 35, pp. 721-732, 2011.
- [31] Hao H., Zhang H., Weng S. and Su M., Dynamic numerical simulation of a molten carbonate fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 161, pp. 849-855, 2006.
- [32] Shirazi A., Aminyavari M., Najafi B., Rinaldi F. and Razaghi M., Thermal-economic-environmental analysis and multi objective optimization of an internal-reforming solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 19111-19124, 2012.
- [33] Simon G., Parodi F., Fermeglia M. and Taccani R., Simulation of process for electrical energy production based on molten carbonate fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 115, pp. 210-218, 2003.
- reforming, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 15739-15751, 2011.
- [7] Okada T., Ide H., Miyazaki M. and Tanaka T., in *Proc 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf*, Reno, NV, USA, Aug 12-17, 1990, Vol 3 pp 207-212.
- [8] Kordesch K. and Simader G., Fuel cells and their applications, *VCH, New York*, pp. 111-113, 1996.
- [9] Pfafferoth M., Heidebrecht P. and Sundmacher K., Stack modelling of a Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC), *Fuel Cells*, Vol. 10, no. 4, pp. 619-635, 2010.
- [10] Milewski J., Wolowicz M., Miller A. and Bernat R., A reduced order model of molten carbonate fuel cell: A proposal, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp. 11565-11575, 2013.
- [11] He W. and Chen Q., Three-dimensional simulation of a molten carbonate fuel cell stack using computational fluid dynamics technique, *Journal of Power Sources*, Vol. 55, no. 1, pp. 25-32, 1995.
- [12] Yoshiba F., Ono N., Izaki Y., Watanabe T. and Abe T., Numerical analyses of the internal conditions of a molten carbonate fuel cell stack: comparison of stack performances for various gas flow types, *Journal of Power Sources*, Vol. 71, No. 1, pp. 328-336, 1998.
- [13] Wang P., Zhou L., Li G., Lin H., Shao Z., Zhang X. and Yi B., Direct internal reforming molten carbonate fuel cell with core-shell catalyst, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, pp. 2588-2595, 2012.
- [14] Koh J. H., Kang B. S. and Lim H. C., Analysis of temperature and pressure fields in molten carbonate fuel cell stacks, *AIChE Journal*, Vol. 47, pp. 1941-1956, 2001.
- [15] Koh J. H., Kang B. S. and Lim H. C., Effect of various stack parameters on temperature rise in molten carbonate fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 91, No. 2, pp. 161-171, 2000.
- [16] Campanari S., Chiesa P. and Manzolini G., CO₂ capture from combined cycle integrated with Molten Carbonate Fuel Cells, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 4, pp. 441-451, 2010.
- [17] Haghghat Mamaghani A., Najafi B., Shirazi A. and Rinaldi F., Exergetic, economic and environmental evaluations and multi-objective optimization of a combined molten carbonate fuel cell-gas turbine system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 77, pp. 1-11, 2015.
- [18] Iora P. and Campanari S., Development of a three dimensional molten carbonate fuel cell and application to hybrid cycle simulations, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 4, pp. 501-510, 2007.
- [19] Leto L., Dispenza C., Moreno A. and Calabro A., Simulation model of a molten carbonate fuel cell-microturbine hybrid system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 1263-1271, 2011.
- [20] Hamad T. A., Agll A. A., Hamad Y. M., Bapat S., Thomas M., Martin K. B. and Sheffield J. W., Study of a molten carbonate fuel cell combined heat, hydrogen and power system, *Energy*, Vol. 75, pp. 579-588, 2014.
- [21] Li X., Ogden J. and Yang C., Analysis of the design and economics of molten carbonate fuel cell tri-generation systems providing heat and power for commercial buildings and H₂ for FC vehicles, *Journal of Power Sources*, Vol. 241, pp. 668-679, 2013.
- [22] Haghghat Mamaghani A., Najafi B., Shirazi A. and Rinaldi F., 4E analysis and multi-objective optimization of an integrated MCFC (molten carbonate fuel cell) and ORC (organic Rankine cycle) system, *Energy*, Vol. 82, pp. 650-663, 2015.
- [23] Sugiura K. and Naruse I., Feasibility study of the co-generation system with direct internal reforming-molten carbonate fuel cell (DIR-MCFC) for residential use, *Journal of Power Sources*, Vol. 106, pp. 51-59, 2002.