مدل‌سازی ترمودینامیکی اصلاح مستقیم سلول‌های سوختی اکسید جامد با استفاده از گاز سنتز (syngas)

C. Ozgur Colpana, Ibrahim Dincerb,∗, Feridun Hamdullahpur

### چکیده

در این مقاله یک سلول سوختی اکسید جامد اصلاح داخلی مستقیم (‏DIR - SOFC)‏به صورت ترمودینامیکی از نقطه‌نظر انرژی مدل‌سازی شده‌است. سنتز تولید شده از فرآیند گازی سازی به عنوان سوخت برای پیل سوختی اکسید جامد انتخاب شده‌است. این مدل‌سازی شامل چندین مرحله است. ابتدا، ترکیب گاز تعادلی در خروجی کانال سوخت از لحاظ نرخ جریان جرمی ورودی سوخت، نسبت استفاده از سوخت، نسبت چرخش و میزان اصلاح بخار و واکنش انتقال آب - گاز بدست می‌آید. دوم، نسبت استفاده از هوا با توجه به ضرورت خنک سازی سلول تعیین می‌شود. در نهایت، ولتاژ ترمینال، خروجی توان و بازده الکتریکی سلول محاسبه می‌شوند. سپس، این مدل با داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از ادبیات موضوع، اعتبار سنجی می‌شود. روش پیشنهادی برای دمای متوسط، پیل سوختی اکسید جامد مسطح با پشتیبانی آند که با یک گاز معمولی تولید شده از فرآیند پیرولیز کار می‌کند، بکار گرفته شده‌است. برای تجزیه و تحلیل پارامتری، اثرات نسبت گردش مجدد و نسبت استفاده از سوخت مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت گردش مجدد اثر قابل‌توجهی برای شرایط چگالی جریان کم ندارد. در چگالی‌های جریان بالاتر، افزایش نسبت گردش مجدد، بازده توان و بازده الکتریکی سلول را کاهش می‌دهد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که انتخاب نسبت استفاده از سوخت بسیار حیاتی است. شرایط نسبت مصرف سوخت بالا منجر به توان خروجی پایین و نسبت مصرف هوا می‌شود اما راندمان الکتریکی بالاتر سلول را نتیجه می‌دهد.

واژگان کلیدی: هیدروژن؛ پیل سوختی اکسید جامد؛ اصلاحات داخلی؛ سنتز، ترمودینامیک، نمونه

### ۱. مقدمه

پیل سوختی اکسید جامد (‏SOFC)‏یک دستگاه تبدیل انرژی حالت جامد است که شامل یک الکترولیت اکسید با هدایت یونی ساخته‌شده از یک ماده سرامیکی است و در دماهای ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد کار می‌کند. که در اواخر قرن نوزدهم توسط نرنست و همکارانش مطرح شد. تاریخچه دقیق پیل سوختی اکسید جامد ممکن است در [‏ ۱ ]‏ یافت شود.

پیل سوختی اکسید جامد ممکن است با توجه به سطح دمایی، طراحی پیل و انبارش و نوع اصلاح طبقه‌بندی شود. که در جدول ۱ نشان‌داده شده‌است. برخی توضیحات دقیق از این انواع مختلف پیل سوختی اکسید جامد، مزایا و معایب هر نوع نسبت به نوع دیگر و غیره ممکن است در مقالات یافت شود [‏ ۱ - ۴ ]‏. برخلاف پیل‌های سوختی با دمای پایین‌تر، به دلیل نداشتن مشکل مسمومیت با مونواکسید کربن و توانایی اصلاح سوخت در داخل پیل سوختی اکسید جامد، طیف وسیع‌تری از سوخت ممکن است در پیل سوختی اکسید جامد مورد استفاده قرار گیرد. گزینه‌های زیادی برای انتخاب سوخت پیل سوختی اکسید جامد وجود دارد. در میان این گزینه‌های سوخت، H2 و CO به طور الکتروشیمیایی در آند اکسیده می‌شوند. بقیه در H2 و / یا CO اصلاح می‌شوند و سپس به صورت الکتروشیمیایی واکنش می‌دهند. متان، هیدروکربن‌های بالاتر، متانول، اتانول، گاز محل دفن زباله، زیست توده تولید شده گاز، آمونیاک، سولفید هیدروژن و غیره ممکن است گزینه‌های سوختی برای پیل سوختی اکسید جامد باشند. بسیاری از مطالعات، به طور عمده بررسی امکان‌سنجی ترمودینامیکی این سوخت‌ها برای استفاده در پیل سوختی اکسید جامد، ممکن است در منابع [‏ ۵ - ۱۱ ]‏ یافت شود. پیل سوختی اکسید جامد دماهای کاری بالایی دارد که ادغام حرارتی موفق با چرخه‌های پایین را ممکن می‌سازد. اکثر مطالعات در این زمینه به بررسی فرصت‌های یکپارچه‌سازی پیل سوختی اکسید جامد با چرخه‌های توربین گاز پرداخته‌اند. یکپارچه‌سازی پیل سوختی اکسید جامد با چرخه‌های گازی سازی یکی دیگر از گزینه‌های امیدوار کننده است. مطالعات کمی در جستجوی ادغام سیستم‌های تجدید پذیر با پیل سوختی اکسید جامد وجود دارد. به عنوان مثال، Ntziachrios و همکارانش [‏ ۱۸ ]‏ ادغام توربین باد با پیل سوختی اکسید جامد (‏یا PEM)‏را مورد مطالعه قرار داده‌اند. اخیرا حسین و همکارانش ]‏ ۲۱ - ۱۹ [‏ برخی از مطالعات مهم در مورد مدل‌سازی چند جزئی و چند بعدی پیل سوختی اکسید جامد را انجام داده‌اند. دو نکته کلیدی برای مدل‌سازی ترمودینامیکی پیل سوختی اکسید جامد تعیین ترکیب گاز خروجی و مدیریت حرارتی است. روش‌های مختلفی برای محاسبه ترکیب گاز خروجی از قسمت آند پیل سوختی اکسید جامد در مقالات وجود دارد. یک روش ساده برای محاسبه ترکیب خروجی پیل سوختی اکسید جامد برای یک پیل سوختی اکسید جامد که با ۱۰۰ % متان کار می‌کند داده شده‌است که فرض می‌شود به طور کامل در کتابچه راهنمای پیل سوختی توسط EGG اصلاح شود. رطوبت مورد نیاز برای اصلاح با چرخش داخلی تامین می‌شود. در رویکرد آن‌ها، ابتدا، یک راه‌حل میانی با در نظر گرفتن واکنش ترکیبی سلول سوختی و اصلاح بخار برای بخشی از سوختی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، و واکنش اصلاح بخار برای بخشی از سوختی که مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، یافت می‌شود. سپس، ترکیب گاز خروجی واقعی با در نظر گرفتن اثر تعادل انتقال آب - گاز تعیین می‌شود. با توجه به رویکرد آچباخ و رینش [‏ ۲۳ ]‏، اصلاح بخار واکنش متان از نظر سینتیکی کنترل می‌شود. یک معادله برای سینتیک اصلاح به شکل استقلال نوع Arrhenius از فشار جزئی H2O و متناسب با فشار جزئی CH۴ پیشنهاد شده‌است. از سوی دیگر، در بسیاری از مطالعات [‏ ۷، ۲۴، ۲۵ ]‏، واکنش‌های اصلاح بخار و تغییر آب - گاز در تعادل در نظر گرفته می‌شوند، و با توجه به نوع اصلاح، واکنش الکتروشیمیایی ممکن است به طور همزمان با این واکنش‌ها رخ دهد یا ندهد. در بیشتر این مطالعات، در نظر گرفته شده‌است که هیدروژن گازی است که به طور الکتروشیمیایی اکسید می‌شود زیرا سرعت اکسیداسیون CO بسیار کم‌تر از هیدروژن است و CO با واکنش انتقال آب - گاز به H2 تبدیل می‌شود.

مدیریت حرارتی پیل سوختی اکسید جامد به دلیل عملکرد ایمن پیل سوختی و از نظر ترمودینامیکی و اقتصادی کارآمدتر مهم است. در یک پیل سوختی اکسید جامد که با یک مخلوط گازی حاوی هیدروکربن کار می‌کند، گرما در داخل پیل سوختی اکسید جامد به دلیل واکنش الکتروشیمیایی، پلاریزاسیون و واکنش انتقال آب - گاز تولید می‌شود. برخی از گرمای تولید شده توسط واکنش اصلاح بخار استفاده می‌شود. استفاده از گرمای باقی مانده ممکن است به چند روش مورد استفاده قرار گیرد: یوشیدا و ایوای [‏ ۲۶ ]‏ یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد با دمای ورودی و خروجی یک‌سان را در نظر گرفته‌اند. در این سیستم، گرمای اضافی توسط یک محفظه احتراق که در تماس گرمایی نزدیک با پیل سوختی اکسید جامد قرار دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین ممکن است که پیل سوختی اکسید جامد در محدوده دمایی مشخصی عمل کند. با این حال، گرادیان‌های دمای بالا در پیل سوختی اکسید جامد مطلوب نیستند. بنابراین اختلاف دمای بیشینه بین ورودی پیل سوختی و خروجی به یک معیار طراحی تبدیل می‌شود. خنک سازی پیل سوختی با استفاده از هوای اضافی در ورودی کاتد فراهم می‌شود. از سوی دیگر، حفظ یک گرادیان دمایی یکنواخت در طول سلول در به حداقل رساندن تنش‌ها در اجزای سلول نیز مهم است [‏ ۱ ]‏. از آنجایی که تنش‌ها به دلیل عدم تطابق در ضرایب انبساط حرارتی هنگامی که اختلاف دمایی بین سلول سوختی و محیط وجود دارد، توسعه می‌یابند، سیستم باید عایق شود.

هدف اصلی این مطالعه توسعه مدلی برای اصلاح داخلی مستقیم پیل سوختی اکسید جامد (‏DIR - SOFC)‏با در نظر گرفتن اثر نسبت گردش مجدد گاز خروجی آند است که به خصوص برای تامین آب برای راه‌اندازی واکنش‌های شیمیایی و جلوگیری از رسوب کربن مهم است. علاوه بر این، روشی برای محاسبه نسبت استفاده از هوا توسعه داده شده‌است.

۲. مدل ترمودینامیکی

۲.۱ اصل عملیات

یک سلول واحد در شکل ۱ نشان‌داده شده‌است. گاز سنتز با مخلوط گاز چرخشی مخلوط می‌شود و وارد کانال سوخت می‌شود. اصلاح بخار متان، انتقال آب - گاز و واکنش‌های الکتروشیمیایی به طور همزمان در آند رخ می‌دهد. مخلوط گازی که از کانال سوخت خارج می‌شود، به طور کلی محتوای آب بالایی دارد. بنابراین بخشی از آن ممکن است دوباره فعال شود چون واکنش‌های شیمیایی به آب به عنوان واکنش دهنده نیاز دارند. اکسیدکننده که در این مطالعه به عنوان هوا در نظر گرفته می‌شود، از کانال هوا وارد می‌شود. مولکول‌های اکسیژن در هوا با الکترون‌ها واکنش می‌دهند که در آند تولید می‌شوند و از طریق بار چرخه می‌یابند. یون‌های اکسید در کاتد تولید می‌شوند و از طریق الکترولیت به آند پخش می‌شوند. مخلوط گازی که محتوای اکسیژن کمتری نسبت به هوای ورودی دارد، از کانال هوا خارج می‌شود. جریان الکتریکی توسط جریان الکترون‌ها تولید می‌شود و کار بر روی بار را انجام می‌دهد.

۲.۲. فرضیات

فرضیات زیر در تجزیه و تحلیل ارائه شده‌اند:

Syngas از گونه های گاز زیر تشکیل شده است ، i = {CH4 ، CO2 ، CO ، H2O ، H2 ، N2}

هوا از 79٪ N2 و 21٪ O2 تشکیل شده است ، j = {O2، N2}

پیل سوختی در حالت پایدار کار می کند

مخلوط گاز در خروجی کانال سوخت در ترازوی شیمیایی است

افت فشار در امتداد سلول سوخت غفلت می شود.

دما در ورودی کانال یکسان است (Ty = Tf3 = Ta1).

همچنین ، دما در کانال خروجی یکسان است (Tz = Tf4 = Ta2).

دمای ساختار جامد در میانه راه بین دمای ورودی و خروج است [27].

سلول سوختی عایق بندی شده است و این بدان معنی است که با محیط هیچگونه جذب حرارتی وجود ندارد.

فقط هیدروژن واکنش الکتروشیمیایی نشان می دهد.

CO با واکنش تغییر آب و گاز به CO2 و H2 تبدیل می شود.

مقاومت های تماس نادیده گرفته می شوند.

انتقال تابش بین ساختار جامد و کانال های گاز نادیده گرفته می شود.

۲.۳. داده‌های ورودی

ترکیب گاز حجمی در حالت "f1" به عنوان یک ترکیب معمول به‌دست‌آمده از فرآیند پیرولیز انتخاب شده‌است.

به صورت خشک ، ترکیب به شرح زیر است [28]: 21٪ CH4، 40٪ H2، 20٪ CO، 18٪ CO2، 1٪ N2.

در میان آن‌ها، چگالی جریان تبادل به دما و ماده بستگی دارد. برای دمای مورد استفاده در این مطالعه و مواد مشترک پیل سوختی اکسید جامد، این مقادیر از مقالات به دست آمده‌اند [‏ ۲۹ ]‏. نفوذ موثر از طریق آند و کاتد به ضخامت و دمای ماده بستگی دارد. در این مطالعه، فرض بر این است که سلول یک سلول با پشتیبانی آند است و مقادیر مناسب با توجه به داده‌های ارائه‌شده توسط سینگال و کندال انتخاب می‌شوند [‏ ۱ ]‏. نسبت مصرف سوخت، نسبت گردش مجدد و چگالی جریان به عنوان پارامترهای ورودی متغیر انتخاب شده‌اند. چگالی جریان در محدوده‌ای از ۰.۱ تا یک مقدار نزدیک به مقدار ماکزیمم آن در نظر گرفته می‌شود. نسبت بازگردش به صورت ۰.۱، ۰.۲ و ۰.۳ در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که اثر استفاده از سوخت مورد بررسی قرار می‌گیرد، در ۰.۲ ثابت می‌شود. نسبت مصرف سوخت 0.65 , 0.75 و 0.85 در نظر گرفته شده‌است. هنگامی که اثر نسبت گردش مجدد مورد بررسی قرار می‌گیرد، در ۰.۸۵ تثبیت می‌شود.

۲.۴ محاسبه ترکیب مخلوط گاز تعادلی در خروجی کانال سوخت

در اینجا، اولین گام محاسبه ترکیب گاز تعادلی در خروجی کانال سوخت است. ما معادلات را بر حسب مجموع مولی یا دبی جرمی گونه‌های گاز در حالت "f1" بدست می‌آوریم. از آنجا که تنظیم نرخ جریان جرمی برای یک اپراتور سیستم راحت‌تر است؛ این معادلات بر حسب دبی جرمی حالت "f1" بیان می‌شوند. در این رابطه، نرخ جریان مولی گونه‌های گاز در حالت "f1" ممکن است از نظر نرخ جریان جرمی به صورت زیر داده شود:

1

در اینجا، حالت‌های "f2"، "f4”" و "f5" ترکیبات مولی یکسانی دارند. ترکیب گونه‌های گازی در این حالت‌ها توسط X نشان‌داده شده‌است. سپس نرخ جریان مولی گونه‌های گاز در حالت "f3" تبدیل می‌شود.

2

واکنش اصلاح بخار برای متان، واکنش انتقال آب - گاز و واکنش‌های الکتروشیمیایی، که به ترتیب در معادلات (‏۳)‏- (‏۵)‏نشان‌داده شده‌اند، به صورت همزمان در سلول به صورت زیر رخ می‌دهند:

5

اجازه دهید دامنه(مقدار) واکنش‌های نشان‌داده‌شده در معادلات (‏۳)‏- (‏۵)‏به ترتیب a، b و c باشد. سرعت(نرخ) جریان مولی حالت "f4" به صورت زیر داده شده‌است:

6.6

در اینجا c نیز نرخ جریان مولی هیدروژن به کار رفته در پیل سوختی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

7

معادله زیر را با جمع نرخ جریان مولی گونه‌های گاز در حالت "f4" با استفاده از معادلات (‏۶)‏- (‏۶.۶)‏و ترکیب با معادله ۲ به دست می‌آوریم.

8

نرخ جریان مولی کل حالت "f3" به صورت زیر داده می‌شود:

9 ترکیب معادلات (‏۶)‏- (‏۶.۶)‏، (‏۸)‏و (‏۹)‏، ترکیب گاز مولر تعادل در خروجی کانال سوخت منجر به موارد زیر می‌شود:

10

سرعت جریان مولی هیدروژن مورد استفاده، c، با ترکیب معادلات (‏۶.۵)‏و (‏۷)‏- (‏۱۰)‏به صورت زیر تعریف می‌شود:

11

از این رو، با استفاده از معادلات (‏۶)‏- (‏۶.۶)‏، (‏۱۰)‏و (‏۱۱)‏، ترکیب گاز تعادلی در خروجی کانال سوخت به صورت زیر یافت می‌شود:

17

در اینجا، مقادیر جریان مولی، b، a گونه‌های گاز در حالت "f1" که تابعی از mf1 هستند ناشناخته هستند. بنابراین، ما به سه معادله نیاز داریم که به طور همزمان حل شوند تا a، b و mf1 را پیدا کنیم. اینها معادلات تعادل شیمیایی مربوط به واکنش‌های اصلاح بخار و انتقال آب - گاز و رابطه بین جریان الکتریکی و سرعت جریان مولی هیدروژن به کار رفته هستند که به ترتیب در معادلات (‏۱۸)‏- (‏۲۰)‏نشان‌داده شده‌اند.

20

ثابت تعادل وابسته به دما با روش کلاسیک حل می‌شود که در آن تغییر در انرژی آزاد گیبس واکنش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، ثابت‌های تعادل برای اصلاح بخار و واکنش‌های انتقال آب - گاز را می توان با استفاده از یک رابطه ساده و ضرایب ثابت تعادل یافت [‏ ۳۰ ]‏. از سوی دیگر، به جای انجام محاسبات مبتنی بر ثابت تعادل، یک روش مستقیم‌تر که مبتنی بر حداقل سازی انرژی آزاد گیبس کل است، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در این روش، دانستن واکنش‌های شیمیایی ضروری نیست. تنها گونه‌های گازی که در سیستم وجود دارند، مول‌های گونه‌ها در حالت اولیه واکنش نداده، دما و فشار باید برای محاسبه ترکیب تعادلی شناخته شوند. راه‌حل با استفاده از ضرب‌کننده‌های لاگرانژ پیدا می‌شود. اطلاعات بیشتر در این زمینه را می توان در پری و گرین یافت [‏ ۳۱ ]‏.

۲.۵. محاسبه مصرف هوا، ولتاژ ترمینال، خروجی توان و بازده سلول

سلول تحلیل‌شده در این مطالعه عایق فرض می‌شود و گرمای تولید شده در سلول با ارسال هوای اضافی حمل می‌شود. همچنین، حداکثر اختلاف دما به صورت ۱۰۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود تا به عنوان یک پارامتر ورودی برای تنظیم نرخ جریان جرمی هوای ورودی به کانال هوا تعیین شود. از این رو، نسبت استفاده از هوا با توجه به ضرورت خنک سازی پیل سوختی محاسبه می‌شود.

نرخ جریان مولی گونه‌های گاز در ورودی و خروجی کانال هوا به صورت زیر تعریف می‌شود:

24

ترکیب گاز در خروجی کانال هوا با استفاده از موارد زیر محاسبه می‌شود:

26

در اینجا، ولتاژ نرنست به صورت زیر محاسبه می‌شود:

27

در اینجا، سه نوع پلاریزاسیون، به عنوان مثال، اهمی، فعال‌سازی و غلظت، در نظر گرفته‌شده و از طریق معادلات (‏۲۸)‏- (‏۳۲)‏محاسبه می‌شوند. قطبش اهمی توسط مقاومت در برابر جریان یون‌های اکسید از طریق الکترولیت و مقاومت در برابر جریان الکترون‌ها ایجاد می‌شود. قطبش فعال‌سازی افت ولتاژ ناشی از کندی واکنش‌های رخ داده در سطح مشترک الکترود - الکترولیت است [‏ ۱ ]‏.اگر فرض کنیم ضریب انتقال بار برای آند و کاتد 0.5 باشد و این مقدار را در معادله باتلر-ولمر جایگزین کنید ، این معادله به شکلی نشان داده می شود که در تساوی (29) نشان داده شده است [29]. قطبش غلظت ناشی از مقاومت در برابر انتقال جرم از طریق الکترودها و فصل مشترک است [‏ ۳۲ ]‏.

32

مقاومت الکتریکی اجزای سلول، معکوس رسانایی الکتریکی است. فرمول‌هایی برای هدایت الکتریکی اجزای سلول، به عنوان تابعی از دمای ساختار جامد، برای مواد مشترک پیل سوختی اکسید جامد توسط بوسل ارائه شده‌است [‏ ۳۰ ]‏. ولتاژ ترمینال و خروجی توان سلول توسط معادله زیر مشخص میشود:

24

در اینجا، سرعت جریان آنتالپی حالت "f1" با استفاده از تعادل انرژی حول حجم کنترلی که نقطه اتصال را با معادله (‏۳۵)‏محصور می‌کند، محاسبه می‌شود. سپس دمای این حالت با تکرار پیدا می‌شود:

35

برای پیل سوختی عایق، موازنه انرژی حول حجم کنترلی که پیل سوختی را در بر می‌گیرد به صورت زیر نوشته می‌شود:

36

در اینجا، استفاده از هوا از طریق یک روش حل تکراری با استفاده از معادله (‏۳۶)‏محاسبه می‌شود. پس از به دست آوردن بهره‌برداری هوا با تکرار، ولتاژ ترمینال و خروجی توان سلول با استفاده از معادلات (‏۳۳)‏و (‏۳۴)‏یافت می‌شود.

در نهایت، بازده الکتریکی سلول به صورت زیر محاسبه می‌شود:

37

فلوچارت برنامه MathCAD مورد استفاده برای مدل در شکل ۲ نشان‌داده شده‌است.

۲.۶. اعتبار سنجی مدل

ارائه تجربی برای DIR - پیل سوختی اکسید جامد از نظر استفاده از سوخت‌های مختلف و اطلاعات در مورد پارامترهای ورودی مورد استفاده برای آزمایش، در منابع علمی وجود ندارد. در مدل حاضر، گرفتن ورودی کانال و دماهای خروجی متفاوت، عایق کردن سلول سوختی و استفاده از گاز سنتز، یافتن داده برای مقایسه هدف از مقالات را دشوار می‌سازد. با این حال، داده‌های تجربی با متان به عنوان سوخت ارائه‌شده توسط Tao و سایرین [‏ ۳۳ ]‏ برای مقایسه با نتایج مدل همانطور که در جدول ۳ نشان‌داده شده‌است، استفاده شده‌است. مشاهده می‌شود که تفاوت در محدوده ۱۲ % برای ولتاژ و ۸ % برای خروجی توان است که به نوعی مدل را تایید می‌کند. این تفاوت عمدتا به دلیل فرضیات در نظر گرفته‌شده در مدل و مقایسه است.

۳. نتایج و بحث

مدل توسعه‌یافته در این مطالعه را می توان به صورت زیر خلاصه کرد: در بخش اول مدل با استفاده از اصول ترمودینامیک، دستکاری‌های ریاضی و تعاریف برخی پارامترهای مربوط به پیل سوختی مانند نسبت استفاده از سوخت، ترکیب گاز تعادلی کانال سوخت از نظر میزان واکنش‌های شیمیایی و نرخ جریان مولی گونه‌های گاز در ورودی کانال سوخت بدست‌آمده است. سپس با استفاده از معادلات تعادل شیمیایی و رابطه بین جریان الکتریکی و نرخ جریان مولی هیدروژن مورد استفاده، ترکیب گاز خروجی از کانال سوخت پیدا می‌شود. در بخش دوم مدل، نسبت استفاده از هوا که مقدار هوای اضافی که باید به کانال هوا فرستاده شود تا گرمای استفاده‌نشده در سلول سوختی را حمل کند، برای یک سلول سوختی عایق و یک ورودی سوخت کنترل‌شده و دمای گاز خروجی محاسبه می‌شود. بنابراین ورودی کانال هوا و ترکیب گاز خروجی، ولتاژ نرنست، پولاریزاسیون و خروجی کار سلول سوختی از نظر نسبت بهره‌برداری هوا به دست می‌آیند. با استفاده از قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترلی که پیل سوختی را احاطه می‌کند، این نسبت محاسبه می‌شود. پس از یافتن این نسبت، پارامترهای خروجی سلول سوختی؛ از جمله این عوامل می توان به ولتاژ سلول، بازده کاری سلول و بازده الکتریکی آن اشاره کرد. این روش برای هر چگالی جریان، نسبت گردش مجدد و نسبت استفاده از سوخت تکرار می‌شود.

در این مطالعه، فرمول‌هایی برای یافتن ترکیب گاز خروجی از بخش آند برای یک مخلوط گازی شامل بخار آب به عنوان سوخت به دست آمده‌است. اگر مقدار کافی بخار آب در مخلوط اولیه گاز وجود داشته باشد، ممکن است لازم نباشد که جریان گاز خروجی آند دوباره به جریان انداخته شود. با این حال، اگر یک مورد عمومی‌تر را در نظر بگیریم که در آن، برای مثال، یک مخلوط گاز خشک به عنوان سوخت استفاده می‌شود، چرخش مجدد برای یک DIR - SOFC برای شروع اصلاح بخار و واکنش‌های انتقال آب - گاز ضروری است. هیدروژن تولید شده توسط این واکنش‌ها به طور همزمان توسط واکنش الکتروشیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، و مقدار بیشتری از بخار آب نسبت به مقدار لازم برای شروع واکنش‌ها تولید می‌شود. این مطالعه با در نظر گرفتن سلول به عنوان یک کل که ممکن است به عنوان یک روش مدلسازی صفر بعدی در نظر گرفته شود، ساده شده‌است. با توجه به این واقعیت، ردیابی تغییر ترکیب گاز در طول سلول ممکن نیست. یک روش بهبود یافته ممکن است تقسیم سلول به چند بخش برای تجزیه و تحلیل تغییر ترکیب گاز در طول سلول باشد. اگر چنین روشی اعمال شود، اثر مقدار اولیه بخار آب ممکن است واضح‌تر دیده شود.

در مقالات ممکن است دیده شود که پارامترهای ورودی و خروجی مختلف در مدل‌های ترمودینامیکی مختلف پیل سوختی اکسید جامد استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، استفاده از سوخت می‌تواند به عنوان یک پارامتر ورودی در یک مطالعه و یک پارامتر خروجی در مطالعه دیگر در نظر گرفته شود. در این مطالعه، پارامترهای ورودی با توجه به چرخش مجدد و ملاحظات مدیریت حرارتی تعیین می‌شوند. به همین دلیل، دبی جرمی و دمای سوخت ورودی به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شوند. این پارامترها ممکن است بر این اساس توسط اپراتور سیستم تنظیم شوند.

نسبت گردش مجدد، نسبت بخار به کربن ورودی به بخش آند را تنظیم می‌کند. در بسیاری از مطالعات انجام‌شده، مشاهده شده‌است که مساله رسوب کربن با این نسبت در ارتباط است. با این حال، این مشکل در این مطالعه در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این، تاثیر آن بر عملکرد سیستم نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. نسبت‌های گردش مجدد بالا پیچیدگی سیستم را افزایش می‌دهد که عموما نامطلوب است. تاثیر این نسبت بر پارامترهای خروجی در شکل 3 نشان‌داده شده‌است. ممکن است از شکل‌ها مشاهده شود که اثر آن برای چگالی‌های جریان کم چندان قابل‌توجه نیست. برای چگالی‌های جریان بالا، همانطور که نسبت گردش مجدد افزایش می‌یابد، دبی جرمی سوخت، نسبت استفاده از هوا، ولتاژ ترمینال، خروجی توان و بازده الکتریکی سلول کاهش می‌یابد. داشتن نسبت بهره‌برداری کم‌تر از هوا به معنی نرخ جریان جرمی بالاتر هوای ورودی از بخش‌های کاتد است. که به نوبه خود هزینه سیستم را افزایش می‌دهد. با این حال، دبی جرمی سوخت در این شرایط کاهش می‌یابد که هزینه عملیات را کاهش می‌دهد.

مشخص شده‌است که همیشه مقداری هیدروژن استفاده‌نشده وجود دارد و میزان استفاده از هیدروژن با نسبت استفاده از سوخت تعیین می‌شود. شکل ۴ تاثیر نسبت مصرف سوخت بر پارامترهای خروجی را نشان می‌دهد. برخلاف نسبت گردش مجدد، اثر آن چشمگیرتر است. می توان از شکل‌ها مشاهده کرد که دامنه وسیع تری از چگالی جریان را می توان برای نسبت‌های مصرف سوخت کم‌تر انتخاب کرد. با افزایش نسبت مصرف سوخت، دبی جرمی سوخت، نسبت مصرف هوا، ولتاژ ترمینال و توان خروجی سلول کاهش می‌یابد؛ در حالی که بازده الکتریکی سلول افزایش می‌یابد. ممکن است داشتن خروجی توان پایین و بازده الکتریکی بالا به طور همزمان بحث‌برانگیز باشد. این امر به دلیل این واقعیت است که نرخ جریان جرمی سوخت کمتری برای نسبت‌های مصرف سوخت بالاتر مورد نیاز است. از این رو، مشاهده می‌شود که افزایش این نسبت، سیستم را از نظر ترمودینامیکی بهبود می‌بخشد و هزینه سوخت را کاهش می‌دهد؛ اما هزینه ورود جریان هوا به بخش کاتد را نیز افزایش می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک DIR - SOFC که با گاز سنتز کار می‌کند از نظر ترمودینامیکی مدل‌سازی شده‌است. گردش مجدد جریان گاز خروجی آند در مدل برای به دست آوردن یک فرمول معتبر برای مخلوط‌های گازی حاوی ترکیبات گازی مختلف در نظر گرفته شده‌است. اثر نسبت گردش مجدد و نسبت استفاده از سوخت نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. شرایطی که از نظر ترمودینامیکی موثر و از نظر اقتصادی موثر هستند، شناسایی و مورد بحث قرار می‌گیرند. مطالعات آینده بر روی بهینه‌سازی ترمو - اقتصادی DIR - SOFC و بهبود مدل کنونی شامل رسوب کربن با استفاده از روش حجم کنترل محدود تمرکز خواهد کرد.

2