

تحلیل عملکرد ترمودینامیکی یک چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی در یک سیستم تولید همزمان

جاماسب پیرکندی ^{(*}، مجید قاسمی^{***} و محمدحسین حامدی^{*****} ۱- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه پیل سوختی ۲- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک (دریافت: ۱۳۸۹/۹/۱۲، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۰/۴/۲۸، پذیرش: ۹۰/۶/۵)

هدف از ارائه این مقاله تحلیل عملکرد ترمودینامیکی یک سیستم هیبریدی جهت تامین همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی است. در این مقاله، ابتدا یک سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی همراه با تجهیزات بانبی آن در نظر گرفته شده و سپس برای تمام اجزای چرخه مورد نظر یک تحلیل ترمودینامیکی و برای پیل سوختی به کار رفته در آن یک تحلیل الکتروشیمیایی مجزا انجام شده است. در ادامه، با مطالعه پارامتری سیستم هیبریدی اشاره شده، تاثیر دما و فشار کاری پیل و همچنین نسبت نرخ جریان هوا به سوخت ورودی به سیستم بر روی بازده، توان و آنتروپی تولیدی در سیستم هیبریدی بررسی شده و در نهایت یک حالت کارکرد بهینه برای آن ارائه شده است. نتایج به سوخت بهینه سیستم هیبریدی در اثر افزایش دما و فشار کاری پیل (تا حدود ۸۰ درصد) است. تعیین نسبت هوا به سوخت بهینه سیستم و همچنین محاسبات کامل روابط مربوط به پیل سوختی در سه بخش مجزا (بهسازی، الکتروشیمیایی، حرارتی) از دیگر موارد انجام شده در این تحقیق است.

كليدواژه: پيلسوختى اكسيد جامد، ميكروتوربين گازى، سيستم هيبريدى، توليد همزمان

مقدمه

با توجه به روند روبهرشد مصرف انرژی در جهان استفاده از روشها و سیستمهای جدید تولید انرژی با بازدهی بالا و آلایندگی پایینتر در اولویت قرار گرفته است. امروزه، با گسترش سیستمهای مختلف تولید انرژی، روشهای گوناگونی مانند استفاده از انرژی خورشیدی، انرژی باد، پیلهای سوختی، میکروتوربینها و دیزل ژنراتورها مورد توجه قرار گرفتهاند که هر کدام از این روشها دارای مزیتها و معایب مخصوص به خودند. داشتن یک سیستم تولید انرژی قابل اعتماد، کمهزینه و همیشه در دسترس استفاده از پیلهای سوختی را به عنوان یک کاندیدای مهم معرفی کرده است. پیلهای سوختی یک مبدل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی هستند که امروزه به عنوان یک فناوری جدید در تولید انرژی محسوب میشوند[۱]. در میان پیلهای سوختی، پیل سوختی اکسید جامد به دلیل دمای بالای گازهای خروجی (۲۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس) پتانسیل بسیار خوبی برای استفاده در سیستمهای تولید همزمان (ایس کانویای محسوب میشوند[۱]. در میان پیلهای سوختی، پیل سوختی اکسید جامد به دلیل دمای بالای گازهای خروجی (۲۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس) پتانسیل بسیار خوبی برای استفاده در سیستمهای تولید همزمان (ایس کانویای موده و قابلیت استفاده در سیستمهای هیبریدی را داراست. پیلهای سوختی به دلیل دمای بالا دارای کیفیت مطلوبی بوده و قابلیت استفاده در سیستمهای هیبریدی را داراست[۱]. یکی ز موارد پرکاربرد پیلهای سوختی اکسید جامد در سیستمهای تولید همزمان، ترکیب این نوع پلها با انواع مختلف

^{*} دانشجوی دکتری- نویسنده مخاطب (ایمیل:j_pirkandi@dena.kntu.ac.ir))

^{**} استاد (ایمیل:ghasemi@kntu.ac.ir)

^{***} استاد (ایمیل: hamedi@kntu.ac.ir)

میکروتوربینهای گازی است. میکروتوربینها مولدهای کوچک برقاند که سوخت گازی یا مایع را سوزانده و یک ژنراتور را با سرعت بالا به چرخش در میآورند. در اوایل سالهای ۱۹۸۰، بازدهی و قابلیت اطمینان میکروتوربینها به مقداری رسید که برای کاربرد در سیستمهای CHP صنعتی بزرگ مناسب شناخته شدند[۲]. ترکیب پیل سوختی اکسید جامد با میکروتوربین گازی سیستم هیبریدی جدیدی (SOFC-MGT) ⁽است که امروزه برای تامین مستقل انرژی در قالب سیستمهای تولید همزمان مورد توجه قرار گرفته است. این نوع از سیستمهای هیبریدی بهخاطر افزایش بازده، کنترل توان تولیدی، بازیابی حرارت و همچنین قابلیت تولید توان در ظرفیتهای مختلف مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است[۲]. بازده این نوع از سیستمهای هیبریدی بسیار بیشتر از بازده میکروتوربین گاز و یا پیل سوختی تنها بوده و نتایج تحقیقات اخیر نشان میدهد که با استفاده از این نوع سیستمها میتوان به بازده در حدود ۵۶ درصد دست یافت[۲].

مطالعه تحقیقات گذشته در مورد سیستمهای هیبریدی نشان میدهد که بررسیهای نظری بر روی این نوع از سیستمهای هیبریدی برای اولینبار در سال ۱۹۷۰ میلادی توسط شرکت زیمنس وستینگهاوس صورت گرفت[۲]. از نخستین تحقیقات انجامشده در این زمینه میتوان به تحقیقات هاروی و ریچتر [۳]، لی و سودهوف [۴]، چانی و همکاران [۵] و ماساردو و لوبلی [۶] اشاره کرد. در ادامه این تحقیقات، شرکت آمریکایی زیمنس وستینگهاوس در سال ۱۹۹۸ میلادی اولین نیروگاه ۱۰۰ کیلوواتی پیل سوختی را در وسترورت هلند راهاندازی کرد[۷]. در ژانویه سال ۲۰۰۰ همین شرکت با حمایت دولت ایالات متحده در مرکز ملی پژوهشهای پیل سوختی در دانشگاه کالیفرنیا، یک پیل سوختی اکسید جامد را که در فشار ۳ اتمسفر عمل میکرد با یک میکروتوربین گاز با توان ۵۰ کیلووات ترکیب کرد. سیستم ساخته شده دارای توان اسمی ۲۲۰ کیلووات بود که ۱۷۰ کیلووات آن از پیل سوختی و ۵۰ کیلووات آن از توربین گازی بهدست آمده بود. بازده این سیستم ۵۷ درصد محاسبه شده بود[۷]. در همان سال فناوری پیل سوختی اکسید جامد لولهای، ساخت شرکت زیمنس وستینگهاوس، توسط سینگال بررسی شد[۸]. در ادامه مدلهای ترمودینامیکی و ریاضی متفاوتی توسط گروههای تحقیقاتی متعددی توسعه و استخراج شد. به عنوان یکی از اولین تحقیقات، آیدی و همکاران[۹] و سپس کستامگنا و همکاران[۱۰] تحلیل و طراحی سیستمهای هیبریدی میکروتوربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد را انجام دادند. در بین سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ نیز پالسون[۱۱] و سلیموویچ[۱۲] تحقیقات بسیار خوبی در زمینه سیستمهای هیبریدی ارائه کردند. آنها در یکی دیگر از تحقیقات خود یک سیستم ترکیبی ۵۰۰ کیلوواتی را بررسی کردند[۱۳]. مدلسازی آنها با استفاده از نرمافزار آسپن (Aspen Plus) نشاندهنده تاثیر زیاد نسبت فشار در عملکرد سیستم بود. نتایج نشان میداد که در نسبت فشارهای پایین بازده الکتریکی سیستم بالای ۶۵ درصد بود. چان و همکاران[۱۴] در سال ۲۰۰۲، اوچی و همکارانش[۱۵] در سال ۲۰۰۴، راجاشکارا[۱۶] در سال ۲۰۰۵، مطهر و همکاران[۱۷] در سال ۲۰۰۷، سانگ و همکاران[۱۸]، لای و همکاران[۱۹]، حاصلی و همکاران[۲۰]. کوکو و همکاران [۲۱] و کوماتسو و همکاران [۲۲] از جمله کسانی بودهاند که در مورد مدلسازی عملکرد پیل سوختی اکسید جامد ترکیبی با میکروتوربین گاز و کاربرد آن در سیستمهای تولید همزمان تحقیقات بسیار خوبی انجام دادهاند.

هدف از ارائه این مقاله معرفی یک سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی جهت تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی با بازده بالاست. در این مقاله، ابتدا یک سیستم هیبریدی همراه با تجهیزات جانبی آن درنظر گرفته شده و سپس برای تمام اجزای چرخه مورد نظر یک تحلیل ترمودینامیکی و برای پیل سوختی به کاررفته در آن یک تحلیل شده و سپس برای تمام اجزای چرخه مورد نظر یک تحلیل ترمودینامیکی و برای پیل سوختی به کاررفته در آن یک تحلیل الکتروشیمیایی مجزا و کامل انجام میشود. برخلاف بیشتر تحقیقات انجام شده [۵۹ه/۱۰۰۵]، در این مقاله محاسبات پیل سوختی الکتروشیمیایی مجزا و کامل انجام می شود. برخلاف بیشتر تحقیقات انجام شده [۵۹ه/۱۰۰۵]، در این مقاله محاسبات پیل سوختی به صورت مجزا و در سه بخش متفاوت که شامل محاسبات بخش بهسازی (Reforming)، الکتروشیمیایی و حرارتی است تحلیل و بررسی شده است. در ادامه، با مطالعه پارامتری سیستم هیبریدی اشاره شده، تاثیر دما و فشار کاری پیل، نرخ جریان هوا و سوخت ورودی به سیستم بر روی بازده، توان و آنتروپی هوا و سوخت و همچنین نسبت نرخ جریان هوا به سوخت ورودی به سیستم بر روی بازده، توان و آنتروپی تحلیل و ایررسی شده در آن بررسی می می و همچنین نسبت نرخ جریان هوا به سوخت ورودی به سیستم بر روی بازده، توان و آنتروپی تولیدی و اگرزژی تخریب شده در آن بررسی می شود و در نهایت یک حالت کار کرد بهینه برای سیستم پیشنهادی ارائه می شود.

^{1.} Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine

ترکیببندی سیستم هیبریدی

طرحواره سیستم هیبریدی که در این تحقیق مطالعه شده در شکل (۱) نشان داده شده است. سیستم پیشنهادی شامل یک توده (Stack) پیل سوختی اکسید جامد با بهسازی داخلی، محفظه پسسوز، میکروتوربین، کمپرسور هوا، کمپرسور سوخت، پمپ آب و سه بازیاب است. سوخت بهکاررفته در سیستم گاز طبیعی با ترکیب ۹۷ درصد متان، ۱/۵ درصد دیاکسیدکربن و ۱/۵ درصد نیتروژن بوده و ترکیب هوای بهکاررفته نیز شامل ۲۱ درصد اکسیژن و ۷۹ درصد نیتروژن درنظر گرفته شده است.



شکل ۱– ترکیببندی سیستم هیبریدی شبیهسازی شده

هوا و گاز طبیعی به کاررفته در سیستم ابتدا به وسیله کمپرسورهایی متراکم شده و در ادامه مسیر، با عبور از دو بازیاب هوا و سوخت، گرم شده و وارد پیل میشوند. گاز طبیعی پس از ورود به پیل سوختی در بخش آند بهسازی شده و هیدروژن خالص از آن پدید میآید. هیدروژن به دستآمده از گاز طبیعی با اکسیژن موجود در هوا که از بازیاب دیگری گذشته و وارد پیل سوختی شده واکنش می دهد. با توجه به گرماز ابودن واکنش الکتروشیمیایی در پیل سوختی، مقداری از گرمای تولید شده از این واکنش برای بهسازی گاز طبیعی به کار رفته، مقداری از آن وارد محیط شده و مقدار باقی مانده نیز گازهای داخل و خروجی از پیل سوختی را گرم می کند. واکنش هیدروژن با اکسیژن در پیل سوختی که در واکنش بهسازی یا داخل و خروجی از بازده سیستم هیبریدی میشود. در ادامه گازهای خروجی از پیل سوختی که در واکنش بهسازی به کار نیامدند وارد محفظه پس سوز شده و با هم واکنش می دهند. سپس محصولات خروجی از محفظه پس سوز وارد میکروتوربین شده و در اثر انبساط کار مکانیکی تولید می کنند. گازهای داغ پس از خروج از میکروتوربین در ادامه مسیر خود وارد سه بازیاب میشوند. دو بازیاب اول

> **فرضیات** در مدلسازی و تحلیل سیستم هیبریدی، فرضیات زیر درنظر گرفته شده است: – از نشتی گاز داخل سیستم به بیرون صرفنظر شده است. – جریان سیال در کلیه اجزای چرخه پایدار درنظر گرفته شده است.

از تغییرات انرژی های جنبشی و پتانسیل صرفنظر شده است.
 رفتار تمامی گازهای موجود در چرخه به صورت گاز ایدئال فرض شده است.
 از توزیع دما، فشار و اجزای شیمیایی درون پیل صرفنظر شده است.
 دمای گازهای خروجی آند و کاتد یکسان و برابر دمای کاری پیل فرض شده است.
 ولتاژ در زیر تودههای پیل سوختی ثابت فرض شده است.
 فرض شده که سوخت درون پیل سوختی با بهسازی داخلی تبدیل به هیدروژن می شود.

روش حل و روابط حاکم بر مسئله

در این بخش، ابتدا با استفاده از روابط موجود، عملکرد تمامی اجزای بهکاررفته در سیستم هیبریدی معرفی شده و سپس، به صورت مجزا و تحت شرایط پایدار، سیستم فوق تحلیل و بررسی شده است. برای این کار، یک برنامه رایانهای در نرمافزار EES نوشته شده و سپس عملکرد ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی سیستم با تغییر چند پارامتر موثر مانند دما و فشار کاری پیل و همچنین نسبت نرخ هوا به سوخت ورودی به سیستم بررسی شده است.

مدلسازی پیل سوختی

با توجه به اینکه بخش بیشتری از انرژی تولیدشده در سیستمهای هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی مربوط به پیل است، برای رسیدن به نتایج دقیقتر محاسبات این بخش به طور کامل و در سه بخش مجزا صورت گرفته است.

محاسبات بهسازى

یک مشخصه مثبت برای پیلهای سوختی اکسید جامد توانایی استفاده همزمان از هیدروژن و مونوکسیدکربن به عنوان سوخت است. به دلیل دمای عملیاتی بالا در این نوع پیل، امکان تولید سوخت مورد نیاز پیل از هیدروکربنهایی مانند گاز طبیعی در داخل پیل وجود دارد. در این مقاله، از پیلسوختی با بهبوددهنده داخلی مستقیم استفاده شده است که در آن از حرارت آزادشده طی واکنش الکتروشیمیایی الکترودها جهت انجام واکنش گرماگیر بهسازی استفاده میشود. مزیت این روش نسبت به روشهای دیگر (بهبوددهنده خارجی و بهبوددهنده داخلی غیرمستقیم) کاهش سرمایهگذاری برای تهیه تجهیزات اضافی و افزایش اثرمندی انتقال حرارت در توده پیل است[۲۳]. واکنشهای انجام یافته در این فرایند به صورت زیر است[۲۴،۲۰

$$CH_4 + H_2 O \rightarrow CO + 3H_2 \quad (\text{symit}_2) \tag{1}$$

$$CO + H_2 O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (\text{s}\mathbb{Z}_2 \mathbb{Z}_{\text{e}_2}) \tag{2}$$

روابط (۱) و (۲) به ترتیب واکنش بهسازی بخار و دگرگونی (Shifting) آب و گاز نامیده می شود. طبق واکنش های بالا، گاز طبیعی متان در داخل پیل سوختی به هیدروژن تبدیل شده و سپس طبق رابطه زیر در واکنش الکتروشیمیایی پیل شرکت خواهد کرد[۴۹-۲۵]:

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \to H_2O \quad (e)$$

سازوکار واکنش بهسازی داخلی متان و دگرگونی آب و گاز در پیل سوختی طبق معادلات تعادلی زیر است[۲۳،۱۴و۲۴]:

$$x \rightarrow [CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2]$$
 (بهسازی) (۴)
 $y \rightarrow [CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2]$ (دگرگونی) (۵)

$$z \rightarrow [H_2 + 1/2O_2 \leftrightarrow H_2O]$$
 (e) (9)

در رابطههای بالا x و z به ترتیب نرخ مولی پیشرفت واکنشهای بهسازی، دگرگونی و واکنش کلی پیل است. با موازنه جرمی گازهای مختلف در تعادل، طبق روابط زیر نرخ مولی گازهای خروجی از پیل بهدست خواهد آمد: $[\dot{n}_{CH4}]^{out} = [\dot{n}_{CH4}]^{in} - x$

 $[\dot{n}_{H2O}]^{out} = [\dot{n}_{H2O}]^{in} - x - y + z$ $[\dot{n}_{H2}]^{out} = [\dot{n}_{H2}]^{in} + 3x + y - z$ $[\dot{n}_{CO}]^{out} = [\dot{n}_{CO}]^{in} + x - y$ $[\dot{n}_{CO2}]^{out} = [\dot{n}_{CO2}]^{in} + y$ $[\dot{n}_{tot}]^{out} = [\dot{n}_{tot}]^{in} + 2x$ (Y)

با توجه به معادلات بالا، فشار جزئي گازهاي خروجي از آند و كاتد با استفاده از رابطه زير حاصل خواهد شد:

$$P_i = \frac{\dot{n}_i}{\dot{n}_{tot}} P_{tot} \tag{(A)}$$

واکنشهای بهسازی و دگرگونی، واکنشهای تعادلی بوده و مقدار اجزای آنها بستگی به ترکیب اولیه و دمای نهایی واکنشها دارد. رابطه بین مقدار اجزای در تعادل، ترکیب تعادل و دمای نهایی آن توسط ثابت تعادل برقرار میشود. برای دو واکنش بهسازی و دگرگونی ثابتهای تعادل به صورت زیر تعریف میشوند:

$$Kp, r = \frac{P_{H2}^3 \times P_{CO}}{P_{CH4} \times P_{H2O}}$$

$$Kp, s = \frac{P_{CO2} \times P_{H2}}{P_{CO} \times P_{H2O}}$$

$$(1 \cdot)$$

ثابت تعادل برای یک مخلوط گاز ایدئال با توجه به رابطه بالا فقط تابعی از دماست. بنابراین برای واکنش بهسازی بخار و دگرگونی، Kp به صورت یک تابع چندجملهای و به صورت زیر بیان می شود: Log $Kp = AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT + E$

در رابطه بالا، A، A، C، B، A و A ثابتهای تجربیاند که مقادیر آنها در جدول ۱ آورده شده است [۱۴].

بهسازى	دگرگونی	
-T/STITI*I· ⁻¹¹	۵/۴۷۳۰۱*۱۰ ^{-۱۲}	А
۱/۲۴۰۶۵ _* ۱۰ ^{-۷}	-T/QNEN4*I·-^	В
-T/T&TTT*I • ⁻⁺	4/88742*1·-»	С
۱/۹۵۰۲۸*۱۰-۱	-٣/٩١Δ••*I• ^{-٢}	D
-8/81390*1· [`]	۱/٣٢٠٩٧»١٠ [°]	Е

جدول ۱- ثابتهای تجربی برای واکنشهای بهسازی و دگرگونی آب و گاز[۱۴]

با توجه به رابطههای (۷) تا (۱۱) و همچنین با توجه به واکنش الکتروشیمیایی پیل رابطههای ذیر حاصل خواهد شد:

$$Kp, r = \frac{\left(\left[\dot{n}_{H2}\right]^{in} + 3x + y - z\right)^{3} \times \left(\left[\dot{n}_{CO}\right]^{in} + x - y\right)}{\left(\left[\dot{n}_{CH4}\right]^{in} - x\right) \times \left(\left[\dot{n}_{H2O}\right]^{in} - x - y + z\right)} \times \frac{P_{cell}^{2}}{\left(\left[\dot{n}_{tot}\right]^{in} + 2x\right)^{2}}$$
(17)

جاماسب پیرکندی، مجید قاسمی و محمدحسین حامدی

$$Kp, s = \frac{\left(\left[\dot{n}_{CO2}\right]^{in} + y\right) \times \left(\left[\dot{n}_{H2}\right]^{in} + 3x + y - z\right)}{\left(\left[\dot{n}_{CO}\right]^{in} + x - y\right) \times \left(\left[\dot{n}_{H2O}\right]^{in} - x - y + z\right)}$$
(17)

$$U_f = \frac{z}{3x + y} \to z = U_f \times (3x + y) \tag{14}$$

در رابطه (۱۴)، U_f ضریب مصرف سوخت بوده و به صورت نسبت هیدروژن واکنشداده در آند به هیدروژن تولیدی در آن تعریف میشود[۱۴]. با محاسبه دستگاه معادلات غیرخطی متشکل از معادلات (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) میتوان مقدار و ترکیب گازهای خروجی از پیل را معین کرد.

محاسبات الكتروشيميايي

حل کلی معادلات بقای جرم و انرژی پیل سوختی نیاز به ارزیابی ولتاژ و جریان تولیدشده در آن دارد. ولتاژ برگشتپذیر پیل سوختی توسط معادله نرنست (Nernst) و به شکل زیر تعریف می شود[۱]:

$$E = E^{\circ} + \frac{R_{u}T}{n_{e}F} \ln\left(\frac{P_{H_{2}}P_{O_{2}}^{1/2}}{P_{H_{2}O}}\right)$$
(1Δ)

در رابطه بالا، E° ولتاژ پیل سوختی در شرایط استاندارد، R_u ثابت عمومی گازها، T دمای توده پیل، F ثابت فارادی و n_e تعداد الکترونهای جریانیافته در مدار به ازای تشکیل هر مولکول آب است. برای محاسبه ولتاژ واقعی پیل، باید افتهای مربوط به پیل (اضافه ولتاژ پیل) که شامل افت ولتاژ ناحیه فعالسازی (V_{act})، افت ولتاژ ناحیه اهمیک (V_{ohm}) و افت ولتاژ ناحیه غلاطت (V_{act})، افت ولتاژ زاحیه افت ولتاژ اندی و مقطت (V_{cot}) و افت ولتاژ ناحیه غلاطت (V_{act})، افت ولتاژ زاحیه افت ولتاژ افت ولتاژ انت و معنی پیل، باید افت های مربوط به پیل (ضافه ولتاژ پیل) که شامل افت ولتاژ ناحیه فعالسازی (V_{act})، افت ولتاژ ناحیه افت ولتاژ ناحیه غلاطت (V_{cot})، و افت ولتاژ ناحیه غلاطت (V_{cot}) هستند، محاسبه شده و در نهایت از رابطه زیر مقدار ولتاژ واقعی آن (V_{cot}) به دست آید[1]:

$$V_{cell} = E - \left(V_{act} + V_{ohm} + V_{conc}\right) = E - \Delta V_{Loss}$$
(19)

مقدار افت مربوط به فعالسازی شامل افتهای مربوط به راهاندازی پیل و همچنین غلبه بر واکنشهای الکتروشیمیایی است که به دلیل پایینبودن انرژی فعالسازی به کندی انجام میشوند. مقدار این افت برابر مجموع اضافه ولتاژ فعالسازی آند و کاتد پیل بوده و با سادهسازی رابطه باتلر ولمر (ButlereVolmer) طبق روابط زیر بهدست خواهد آمد [۲۴]:

$$V_{act} = V_{act,an} + V_{act,ca}$$
(1)

$$V_{act} = \frac{2R_u T}{n_e F} \sinh^{-1} \left(\frac{i}{2i_o}\right)$$
(1A)

در رابطه (۱۸)، i و _۵، به ترتیب برابر چگالی جریان و چگالی جریان تبادلیاند. محاسبه مقدار چگالی جریان تبادلی بسیار پیچیده بوده و برای آند و کاتد یک پیل سوختی اکسید جامد از دو رابطه نیمهتجربی زیر بهدست میآید[۲۴]:

$$i_{\circ,an} = \gamma_{an} \left(\frac{p_{H_2}}{p_{ref}} \right) \left(\frac{p_{H_2O}}{p_{ref}} \right) \exp \left(-\frac{E_{act,an}}{R_u T} \right)$$
(19)

$$i_{\circ,ca} = \gamma_{ca} \left(\frac{P_{O_2}}{p_{ref}}\right)^{0.25} \exp\left(-\frac{E_{act,ca}}{R_u T}\right)$$
(Y•)

در رابطههای بالا γ پارامتری است که مقدار آن به جنس الکترود آند و کاتد بستگی داشته و E مقدار انرژی فعالسازی است[۲۴]. مقادیر این پارامترها در جدول ۲ آورده شده است[۲۴].

11	$E_{act,an}$ (KJ/Kmol)
100	E _{act,ca} (KJ/Kmol)
۲ <i>«۱۰</i> ۹	$\gamma_{an}(A/m^2)$
۲*۱۰ ،	$\gamma_{ca}(\mathrm{A/m}^2)$

جدول ۲- پارامترهای مربوط به افت ولتاژ فعالسازی [۲۴]

مقاومتهای ناشی از حرکت الکترونها در آند، کاتد و متصلکننده داخلی و حرکت یونها در الکترولیت سبب ایجاد افت ولتاژ اهمی میشود. بر این اساس، افت یا اضافه ولتاژ اهمی برای آند، کاتد، متصلکنندههای داخلی و الکترولیت با استفاده از رابطههای زیر بهدست خواهند آمد[۲۴]:

$$V_{ohm} = V_{ohm,an} + V_{ohm,ca} + V_{ohm,el} + V_{ohm,in}$$

$$(\Upsilon 1)$$

$$V_{ohm} = ir \tag{(\Upsilon\Upsilon)}$$

$$r = \delta \rho \tag{(YT)}$$

$$\rho = A \, \exp\left(\frac{B}{T}\right) \tag{14}$$

مقادیر A، B و S پارامترهای ثابتیاند که بسته به نوع و هندسه پیل بهدست میآیند. در این تحقیق، از مقادیر جدول ۳ استفاده شده است[۲۴].

$\delta(m)$	B(K)	$A(\Omega-m)$	اجزا
•/••٢٢	۶۰۰	•/••••	کاتد
•/••• ١	-1392	٠/٠٠٠٢٩٨	آند
•/••••۴	۱۰۳۵۰	•/••••٢٩۴	الكتروليت
٠/٠٠٠٨۵	489.	•/••17	جداكنندهها

جدول ۳ - پارامترهای مربوط به افت ولتاژ اهمی [۲۴]

وقتی که شدت جریان بالایی از پیل گرفته شود، نرخ تولید جریان با تقاضا تطابق نداشته و باعث افت ولتاژ شدید در پیل میشود. افت مربوط به غلظت در چگالی جریانهای بالا اهمیت پیدا میکند. مقدار این افت با استفاده از رابطههای زیر بهدست خواهد آمد[۲۴]:

$$V_{conc} = V_{conc}^{an} + V_{conc}^{ca}$$
(Ya)

$$V_{conc}^{an} = \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left(\frac{1 - i / i_{L,H_2}}{1 + i / i_{L,H_2O}} \right)$$

$$(\Upsilon \mathcal{P})$$

$$V_{conc}^{ca} = \frac{R_u T}{n_e F} \ln\left(\frac{1}{1 - i/i_{L,O_2}}\right)$$
(YY)

در رابطههای بالا، *i_L* چگالی جریان حدی است. عموماً باید سعی شود که عملکرد پیل هیچگاه به این منطقه نزدیک نشود. مقدار این پارامتر در شرایط مختلف کاری پیل متفاوت است. در بیشتر تحقیقات، این پارامتر ثابت فرض شده است که این عمل تحلیل عملکرد پیل را در محدودههای کاری مختلف دشوار میسازد. چگالی جریان حدی برای هیدروژن، آب و اکسیژن طبق رابطههای ذیر حاصل خواهد شد[۲۴]:

$$i_{L,H_2} = \frac{n_e F D_{eff,H_2}}{R_u T \delta_{an}} p_{H_2} \tag{(\Upsilon A)}$$

$$i_{L,H_2O} = \frac{n_e F D_{eff,H_2O}}{R_u T \delta_{an}} p_{H_2O}$$
(19)

$$i_{L,O_2} = \frac{n_e F D_{eff,O_2}}{R_u T \delta_{ca}} p_{O_2}$$
("``)

در رابطههای بالا، δ_{ca} و δ_{ca} به ترتیب ضخامت آند و کاتد و D_{eff} ضریب پخش موثر گاز است. ضریب پخش موثر برای محاسبه مسیر غیرمستقیم مولکولها در الکترودهای متخلخل به کار برده می شود. ضرایب پخش موثر به کاررفته در روابط (۲۸) تا (۳۰) می تواند به وسیله ضریب پخش نادسن (Knudsen) و ضریب پخش دوگانه محاسبه شود[۲۴]. به طور مثال ضریب پخش موثر هیدروژن طبق رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$\frac{1}{D_{eff,H_2}} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left(\frac{1}{D_{H_2,k}} + \frac{1}{D_{H_2,H_2O}} \right)$$
(٣))

و au به ترتیب ضریب تخلخل و انحنای الکترود [۲۴]، D_{H_2,H_2O} ضریب پخش دوگانه و $D_{H_2,k}$ ضریب پخش نادسن است. مقدار ضریب پخش دوگانه طبق رابطه زیر بهدست خواهد آمد:

$$D_{H_2,H_2O} = \frac{0.00143 \ T^{1.75}}{M_{H_2,H_2O}^{1/2} (v_{H_2}^{1/3} + v_{H_2O}^{1/3})^2 P}$$
(°Y)

(Fuller) در رابطه بالا P و T بیانگر فشار و دمای کاری پیل و v_i نیز بیانگر ضریب پخش حجمی مخصوص فولر (Fuller) است[۲۴]. مقدار پارامتر M_{H_2,H_2O} در رابطه (۳۲) طبق معادله زیر بهدست میآید:

$$M_{H_2,H_2O} = \frac{2}{(1/M_{H_2}) + (1/M_{H_2O})}$$
(٣٣)

 M_i در رابطه بالا بیانگر وزن مولکولی هر جزء است. ضریب پخش نادسن در رابطه (۳۱) متوسط شعاع منافذ و میانگین مسیر آزاد مولکولهای گازهاست. با فرض اینکه منافذ دارای شکل استوانهایاند، ضریب نادسن با استفاده از رابطه زیر بهدست خواهد آمد:

$$D_{H_2,k} = 97r_{por}\sqrt{\frac{T}{M_{H_2}}}$$
(Tf)

در این رابطه، r_{por} شعاع متوسط منافذ است[۲۴]. ضرایب پخش موثر آب و اکسیژن نیز مشابه روابط (۳۱) تا (۳۴) بهدست می آید. پارامترهای به کاررفته در محاسبات افت ولتاژ غلظتی در جدول ۴ آورده شده است.

18/8	ν_{O_2}	۱ • ^{-۶}	$r_{por}(m)$
۱۲/V	v_{H_2O}	۳.	$\mathcal{E}(\%)$
¥/•¥	v_{H_2}	٣	τ
۱۷/۹	ν_{N_2}		

جدول ۴- پارامترهای مربوط به افت ولتاژ غلظتی [۲۴]

پس از محاسبه افت ولتاژهای اشارهشده مقدار ولتاژ واقعی سلول طبق رابطه (۱۶) بهدست خواهد آمد. با مشخصبودن رابطه بین چگالی جریان و سطح سلول مقدار جریان و توان هر سلول نیز بهدست خواهد آمد. مقدار مساحت هر سلول در این مقاله ۱۰۳۶/۲ سانتیمتر مربع درنظر گرفته شده است.

$$I_{cell} = iA_{cell} \tag{4}$$

$$Power_{DC-cell} = V_{cell} \times I_{cell}$$
(**\varphi**)

با مشخصشدن مقدار جریان و توان در هر سلول، با استفاده از روابط زیر مقادیر جریان و توان کلی در توده پیل و همچنین تعداد سلولهای به کاررفته در هر توده نیز مشخص خواهند شد.

$$I_{tot} = 2Fz \tag{(YY)}$$

$$Power_{DC-tot} = V_{cell}I_{tot}$$
(TA)

$$Power_{AC-tot} = Power_{DC-tot} \times \eta_{in,FC}$$
(٣٩)

 $n = Power_{DC-tot} / Power_{DC-cell}$ (*•)

در روابط بالا،
$$\eta_{inv,FC}$$
 ضریب تبدیل جریان مستقیم به متناوب و n تعداد سلولهای به کاررفته در توده است.

محاسبات حرارتی دمای گازهای خروجی از پیل میتواند با موازنه انرژی و همچنین استفاده از روش تکرار، محاسبه شود. با توجه به اینکه واکنش بهسازی گرماگیر بوده و واکنشهای دگرگونی و الکتروشیمیایی پیل گرمازایند، لذا کل انتقال حرارت خالص پیل سوختی اکسید جامد از اختلاف مقادیر گرمایی سه واکنش بالا بهدست خواهد آمد. مقدار گرمای حاصل از واکنشهای بهسازی و دگرگونی طبق روابط ذیر بهدست میآیند[۲۴،۱۴].

$$\dot{Q}_r = x \left(\bar{h}_{CO} + 3\bar{h}_{H2} - \bar{h}_{CH4} - \bar{h}_{H2O} \right) \tag{(f1)}$$

$$\dot{Q}_{sh} = y \left(\overline{h}_{CO2} + \overline{h}_{H2} - \overline{h}_{CO} - \overline{h}_{H2O} \right) \tag{ft}$$

$$\begin{split} \tilde{Q}_{elec} &= z.T.\Delta S - I.\Delta V_{Loss} \\ \Delta S &= \left(S_{H2O}^{\circ} - S_{H2}^{\circ} - \frac{1}{2}S_{O2}^{\circ}\right) + \frac{R_u}{2} \ln \left(\frac{p_{H2}^2 \times p_{O2}}{p_{H2}^2 + p_{O2}}\right) \end{split}$$
(۴۳)

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{elec} + \dot{Q}_{sh} - \dot{Q}_r \tag{(ff)}$$

همانطور که در رابطه (۴۵) نیز نشان داده شده، مقداری از این گرمای خالص باقیمانده صرف افزایش دمای گازهای داخل و خروجی پیل شده (qُ) و بخش دیگری نیز به محیط (j_{surr}) وارد میشود.

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}' + \dot{Q}_{surr} \tag{4}$$

$$\dot{Q}_{net} = \Delta h_{c1} + \Delta h_{c2} + \Delta h_{a1} + \Delta h_{a2} + \dot{Q}_{surr} \tag{(f7)}$$

$$\left(\dot{n}_{3}\overline{h}_{3}+\dot{n}_{6}\overline{h}_{6}\right)=\dot{Q}_{surr}+\dot{W}_{out}+\left(\dot{n}_{7}\overline{h}_{7}+\dot{n}_{8}\overline{h}_{8}\right)$$
(FY)

با توجه به رابطه (۴۶)، دمای گازهای خروجی از پیل که تقریباً برابر دمای کاری پیل است بهدست میآید. در رابطه (۴۶)، Δh_{a1} مقدار تغییرات آنتالپی واکنشدهندهها در آند و کاتد و Δh_{c2} مقدار تغییرات آنتالپی محصولات در آند و کاتد خواهند بود. مقدار تلفات حرارتی پیل به محیط نیز از رابطه (۴۷) حاصل میشود. میزان نرخ تولید آنتروپی، اگزرژی تخریبشده و بازده اگزرژی نیز از روابط زیر حاصل خواهد شد:

$$\dot{s}_{gen,sofc} = \left(\dot{n}_7 \bar{s}_7 + \dot{n}_8 \bar{s}_8\right) - \left(\dot{n}_3 \bar{s}_3 + \dot{n}_6 \bar{s}_6\right) + \frac{\dot{Q}_{surr}}{T_{surr}} \tag{FA}$$

$$\dot{E}_{D,sofc} = \dot{E}_3 + \dot{E}_6 - \dot{E}_7 - \dot{E}_8 - \dot{E}_Q - \dot{W}_{SOFC}$$
(f9)

$$\psi_{sofc} = \frac{\dot{W}_{SOFC}}{\dot{E}_3 + \dot{E}_6 - \dot{E}_7 - \dot{E}_8} \tag{(\Delta \cdot)}$$

مدلسازی کمپرسورهای هوا و سوخت

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، هوای محیط در یک فشار و دمای معین (T_1, P_1) وارد کمپرسور هوا شده و پس از تراکم در فشار و دمای بالاتری (T_2, P_2) آن را ترک میکند. با فرض بی دررو (Adiabatic) بودن فرایند تراکم و با مشخص بودن نسبت فشار (PR) و بازده کمپرسور (η_c) و نسبت گرمای ویژه هوا (k_a) می توان دمای گازهای خروجی از کمپرسور (T_2) و همچنین کار واقعی مورد نیاز آن (w_c) را از روابط زیر به دست آورد:

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k_a - 1}{k_a}} = \left(pr\right)^{\frac{k_a - 1}{k_a}}$$
(\Delta\)

$$\eta_{ca} = \frac{w_{ca,s}}{w_{ca}} = \frac{\overline{h}_{2s} - \overline{h}_{1}}{\overline{h}_{2} - \overline{h}_{1}} = \frac{T_{2s} - T_{1}}{T_{2} - T_{1}}$$
($\Delta \Upsilon$)

$$\dot{W}_{ca} = \dot{H}_{a} \cdot \left(\overline{h}_{2} - \overline{h}_{1} \right) \tag{\DeltaT}$$

مقدار نرخ آنتروپی تولیدشده، اگزرژی تخریب شده و بازده اگزرژی در طی فرایند تراکم نیز طبق روابط زیر حاصل خواهد شد: $\dot{S} = n \, \left(\overline{s} - \overline{s} \right)$

$$S_{gen,ca} = n_a \cdot (s_2 - s_1) \tag{\Delta4}$$

$$\dot{E}_{D,ca} = \dot{W}_{ca} - \dot{n}_{a} \cdot \left(e_{2} - e_{1}\right) \tag{\Delta\Delta}$$

$$\Psi_{ca} = \frac{\dot{n}_a \cdot (e_2 - e_1)}{\dot{W}_{ca}} \tag{(\Delta F)}$$

محاسبات مربوط به کمپرسور سوخت نیز مشابه کمپرسور هواست. در این پژوهش دمای هوا و سوخت ورودی به سیستم یکسان در نظر گرفته شده و نسبت فشار کمپرسورها طوری درنظر گرفته شدهاند که فشار کاری پیل را تامین کنند. ذکر این نکته ضروری است در بررسی اثرات نسبت فشار کمپرسور، به جای بازده ایزونتروپیک بازده پلیتروپیک مدنظر بوده است.

مدلسازى محفظه پسسوز

با توجه به اینکه تنها قسمتی از سوخت و هوای ورودی به سیستم در پیل سوختی مصرف میشوند، وجود یک محفظه پسسوز برای چرخه لازم است. گازهای خروجی از پیل سوختی که شامل بخار آب، دیاکسیدکربن، هیدروژن، متان و مونوکسیدکربن در بخش آند و اکسیژن و نیتروژن مصرف نشده در کاتدند، طبق روابط زیر در محفظه پس سوز با هم واکنش میدهند:

$$CO + \frac{1}{2}O_2 \to CO_2$$
, $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \to H_2O$, $CH_4 + 2O_2 \to CO_2 + 2H_2O$ (ΔY)

مجموع واکنشهای بالا گرماده بوده و دمای گازهای خروجی از محفظه پسسوز را بالا میبرند. با نوشتن معادله بقای انرژی و با درنظر گرفتن بازده محفظه، میتوان طبق روابط زیر دمای گازهای خروجی را محاسبه کرد[۲۰]:

$$\dot{n}_{7}\overline{h}_{7} + \dot{n}_{8}\overline{h}_{8} - \dot{n}_{9}\overline{h}_{9} - \dot{Q}_{Loss,ab} = 0 \tag{(\Delta\lambda)}$$

در رابطه بالا $\dot{Q}_{Loss,ab}$ تلفات حرارتی محفظه پس سوز بوده و مقدار آن به بازده محفظه (η_{ab})، ضریب مصرف سوخت در پیل سوختی (U_f) و ارزش حرارتی سوخت (LHV) بستگی دارد[۲۰]. $\dot{Q}_{Loss,ab} = n_4 \times (1 - U_f) \times (1 - \eta_{ab}) \times LHV$ (۵۹)

مقدار نرخ آنتروپی تولیدی، اگزرژی تخریب شده و بازده اگزرژی در این محفظه طبق روابط زیر بهدست می آید:

$$\dot{S}_{gen,ab} = \dot{n}_9 \overline{s}_9 - \dot{n}_7 \overline{s}_7 - \dot{n}_8 \overline{s}_8 + \frac{\dot{Q}_{loss,ab}}{T_{surr}}$$
(7.)

$$\dot{E}_{ab} = \dot{E}_{7} + \dot{E}_{8} - \dot{E}_{9} - \dot{E}_{Q,ab}$$

$$\dot{E}$$
(F1)

$$\psi_{ab} = \frac{E_9}{\dot{E}_7 + \dot{E}_8} \tag{FT}$$

مدلسازي ميكروتوربين

گازهای داغ خروجی از محفظه پسسوز در ادامه وارد میکروتوربین شده و در آن جریان الکتریکی تولید میکند. بخشی از توان الکتریکی تولیدشده توان مصرفی کمپرسورهای سوخت و هوا را تامین کرده و مقدار توان باقیمانده نیز به عنوان توان خالص خروجی از میکروتوربین مورد استفاده قرار میگیرد. گرمای لازم برای پیش گرم کردن هوا و سوخت ورودی به پیل از طریق گازهای داغ خروجی از میکروتوربین و از طریق بازیابهای اول و دوم تامین میشود. با محاسبه کار ایدئال و در نظر گرفتن بازده ایزونتروپیک میکروتوربین میتوان مقادیر کار و دمای خروجی از آن را محاسبه کرد[۲۰]:

$$\eta_{mgt} = \frac{W_{mgt,a}}{W_{mgt,s}} = \frac{\overline{h_9} - \overline{h_{10}}}{\overline{h_9} - \overline{h_{10s}}} = \frac{T_9 - T_{10}}{T_9 - T_{10s}}$$
(FT)

جهت تعیین دمای هوای خروجی از میکروتوربین و کار تولیدشده توسط آن میتوان از روابط ذیل استفاده کرد:

$$P_{10} = P_9 \left(\frac{T_{10S}}{T_9} \right)^{\frac{\kappa_s}{k_g - 1}}$$
(54)

$$\dot{W}_{mgt} = \dot{n}_9 \left(\bar{h}_9 - \bar{h}_{10} \right) \tag{$P\Delta$}$$

نرخ تولید آنتروپی، اگزرژی تخریبشده و بازده اگزرژی در فرایند انبساط انجام شده در میکروتوربین، مطابق روابط زیر حاصل می شود:

$$\dot{S}_{gen,mgt} = \dot{n}_9 \left(\overline{s}_{10} - \overline{s}_9 \right) \tag{59}$$

$$\dot{E}_{D,mgt} = \dot{n}_9 \cdot (e_9 - e_{10}) - \dot{W}_{mgt}$$
(FY)

$$\psi_{mgt} = \frac{\dot{W}_{mgt}}{\dot{n}_9.(e_9 - e_{10})} \tag{\hbar}$$

مدلسازی بازیابها

در این تحقیق جهت افزایش دمای هوا و سوخت ورودی به پیل و همچنین تامین آب گرم مورد نیاز، از سه بازیاب خارجی که توسط گازهای داغ خروجی از میکروتوربین تغذیه میشوند، استفاده شده است. همانطور که اشاره شد بخشی از انرژی حرارتی موجود در گازهای خروجی جهت گرمکردن هوا و سوخت ورودی به پیل استفاده شده و بخشی دیگری نیز جهت تامین بار گرمایشی وارد یک بازیاب دیگر میشود. دمای گازهای خروجی از بازیاب اول و دوم بر اساس بازده یا ضریب کارایی و طبق روابط (۶۸) و (۶۹) محاسبه میشود.

$$\varepsilon_{reg,1} = \frac{T_3 - T_2}{T_{10} - T_2} \tag{99}$$

$$\mathcal{E}_{reg,2} = \frac{T_6 - T_5}{T_{11} - T_5} \tag{(Y \cdot)}$$

برای محاسبه بار حرارتی مفید در بازیاب سوم، با درنظر گرفتن بازده این بازیاب، از روابط زیر استفاده شده است.

$$Q_{reg,3} = \varepsilon_{reg,3} \dot{h}_{12} (\bar{h}_{12} - \bar{h}_{13})$$
(Y1)

$$Q_{reg,3} = \dot{n}_{water} \overline{C}_p (T_{16} - T_{15}) \tag{YY}$$

با استفاده از رابطه (۷۲) میتوان مقدار آب گرم مورد نیاز برای سیستمهای گرمایشی را بهدست آورد. از مقدار بار گرمایشی بهدست آمده در بازیاب سوم، جهت محاسبه بازده حرارتی کل سیستم هیبریدی استفاده خواهد شد. مقدار نرخ آنتروپی تولیدی، اگزرژی تخریبشده و بازده اگزرژی در بازیاب اول طبق روابط زیر بهدست خواهد آمد:

$$\dot{S}_{gen,reg,1} = \dot{n}_2(\bar{s}_3 - \bar{s}_2) - \dot{n}_{10}(\bar{s}_{10} - \bar{s}_{11}) \tag{YT}$$

$$\dot{E}_{D,reg,1} = \dot{n}_{10} (e_{10} - e_{11}) - \dot{n}_2 (e_3 - e_2) \tag{YF}$$

$$\psi_{reg,1} = \frac{\dot{n}_2(e_3 - e_2)}{\dot{n}_{10}(e_7 - e_8)} \tag{Va}$$

برای سایر بازیابها نیز از روابط مشابه استفاده شده است.

مدلسازی پمپ

جهت تامین فشار آب در بازیاب سوم از یک پمپ استفاده شده است. پمپ طوری در نظر گرفته شده که بتواند فشار مورد نیاز سیستم گرمایشی را تامین کند. مقدار کار مورد نیاز پمپ بر اساس رابطه زیر بهدست خواهد آمد:

$$\dot{W}_{wp} = \dot{n}_{water} v_{14} (P_{15} - P_{14})$$
 (VF)

مقدار نرخ آنتروپی تولیدی، اگزرژی تخریبشده و بازده اگزرژی در پمپ نیز طبق روابط زیر بهدست میآید:

$$\dot{S}_{gen,wp} = \dot{n}_w \cdot \left(\bar{s}_{15} - \bar{s}_{14}\right) \tag{YY}$$

$$\dot{E}_{D,wp} = \dot{W}_{wp} - \dot{n}_{w} (e_{15} - e_{14})$$
(YA)

$$\psi_{wp} = \frac{\dot{n}_{w} \cdot (e_{15} - e_{14})}{\dot{W}_{wp}} \tag{Y9}$$

مدلسازی سیستم

در این بخش، با درنظر گرفتن کل سیستم هیبریدی به عنوان یک حجم کنترل، بازدههای الکتریکی، حرارتی، کل و اگزرژی آن با استفاده از روابط زیر بهدست خواهند آمد:

$$\eta_{ele} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{n}_f \times LHV} \tag{($ \cdot $)}$$

نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق، سال چهارم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۰

$$\eta_{th} = \frac{\hat{Q}_{reg,3}}{\hat{n}_f \times LHV} \tag{A1}$$

$$\eta_{tot} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{reg,3}}{\dot{n}_f \times LHV} \tag{AT}$$

$$\psi_{sys} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}_{16}}{\dot{E}_1 + \dot{E}_4 + \dot{E}_{14}} \tag{AT}$$

در روابط بالا مقدار توان خالص خروجی از سیستم برابر مجموع توان خالص خروجی از پیل سوختی و میکروتوربین بوده و مقدار انرژی ورودی به سیستم نیز برابر انرژی آزادشده ناشی از مصرف سوخت در پیل و محفظه پس سوز است.

$$\dot{W}_{net} = (Power_{AC-tot})_{Fuel Cell} + (\dot{W}_{AC-net})_{Micro Gas Turbine} \tag{A4}$$

$$(\dot{W}_{AC-net})_{Micro\,Gas\,Turbine} = (\dot{W}_{DC-net})_{Micro\,Gas\,Turbine} \times \eta_{inv,gen} \tag{A\Delta}$$

$$\left(\dot{W}_{DC-net}\right)_{Micro\,Gas\,Turbine} = \dot{W}_{mgt} - \dot{W}_{wp} - \dot{W}_{ca} - \dot{W}_{cf} \tag{A9}$$

در رابطه (۸۴) مریب تبدیل جریان مستقیم به متناوب در ژنراتور میکروتوربین است. نرخ تولید آنتروپی و اگزرژی تخریبشده در کل سیستم از روابط زیر حاصل خواهد شد:

$$S_{gen}^{cyc} = \sum_{i} S_{gen,i}$$
(AY)

$$\dot{E}_{D,sys} = \dot{E}_1 + \dot{E}_4 + \dot{E}_{14} - \dot{E}_{13} - \dot{W}_{net} - \dot{E}_{16} \tag{AA}$$

روش حل

با توجه به معادلات ذکرشده در بخشهای قبلی، جهت تحلیل مسئله یک برنامه رایانهای نوشته شده است که روند آن مطابق فلوچارتهای زیر است (شکل ۲ و ۳). در بخش اول این کد رایانهای، معادلات غیرخطی بهسازی و الکتروشیمیایی به همراه معادلات حرارتی پیل به طور همزمان حل شده و نتایج مطلوب شامل محاسبه ترکیبات اجزای شیمیایی خروجی، دما، افت ولتاژ، ولتاژ واقعی، جریان، توان، بازده و سایر خواص پیل سوختی حاصل می شود. در بخش دوم نیز کل سیستم هیبریدی مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

اعتبارسنجى

جهت اعتبارسنجی کد تهیهشده، لازم است برای یک نمونه معین نتایج حاصل از این کد تهیهشده با نتایج آزمونهای آزمایشگاهی موجود مقایسه شود. با توجه به کمبود نتایج تجربی در زمینه پیلهای سوختی اکسید جامد، در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته توسط سینگال[۸] به اعتبارسنجی کد تهیهشده در این پژوهش پرداخته شده است. نتایج آزمایشگاهی بر مبنای سوختی بهدست آمده بود که از ۸۹ درصد هیدروژن و ۱۱ درصد آب تشکیل شده بود. همان طور که در منحنی قطبش (Polarization) شکل ۴ مشاهده میشود، همخوانی نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از این تحقیق صحت کد تهیهشده را نشان میدهد. در این آزمایش، دما و فشار کاری پیل به ترتیب در حدود ۱۰۰۰ درجه سلسیوس و ۱ بار درنظر گرفته شده است. جاماسب پیرکندی، مجید قاسمی و محمدحسین حامدی



شکل ۴- مقایسه منحنی قطبش نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی حاصل از کد تهیهشده

جهت اعتبارسنجی مجدد کد تهیهشده در این پژوهش، سیستم معرفیشده توسط چان و همکاران[۱۴] مدلسازی شده و نتایج حاصل از کد حاضر در جدول ۵ با نتایج تحقیقات آنها مقایسه شده است. همخوانی نزدیک بین این نتایج، بار دیگر صحت روش حاضر و کد تهیه شده را تایید میکند.

نتايج با كد تهيەشدە	نتایج چان و همکاران[۱۴]	پارامترهای بررسیشده
8./22	87/7	بازده الكتريكي سيستم
λ٠/۶۲	۸۳/۸	بازدہ کلی سیستم
۲۲۲/۳	۷۳۱	حرارت بازيافتشده (كيلووات)
۳۷۴/۴۵	۳۸۱	توان خروجی از سیستم (کیلووات)
• /Y 1	۰ /۷۳۸	ولتاژ سلول (ولت)
1418	1418	چگالی جریان (آمپر بر مترمربع)
1188	1188	دمای کاری پیل (کلوین)

جدول ۵ - مقایسه نتایج حاصل از کد حاضر با نتایج عددی موجود در مرجع [۱۴]

نتايج

در این تحقیق، دما و فشار کاری پیل به همراه نسبت نرخ جریان هوا به سوخت ورودی به سیستم به عنوان سه پارامتر تاثیرگذار بر عملکرد سیستم هیبریدی در نظر گرفته شدهاند. هدف این تحقیق بررسی تاثیر این پارامترها بر روی بازده، توان و همچنین میزان آنتروپی تولیدی در این سیستم است. همانطور که در بخشهای قبلی نیز بیان شد، در این پژوهش جهت تحلیل دقیق مسئله محاسبات کامل الکتروشیمیایی و حرارتی پیل سوختی انجام شده است. بدین منظور ابتدا عملکرد یک تک سلول به کاررفته در پیل سوختی پیشنهادی، تحت دما و فشارهای کاری مختلف، بررسی شده و در ادامه سیستم هیبریدی مورد نظر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

منحنی قطبیت پیل سوختی در یک سلول از روابط (۱۵) و (۱۶) بهدست میآید. به این نمودار که بیان کننده ولتاژ سلول بر حسب چگالی جریان گرفته شده از آن است، منحنی قطبیت گفته می شود. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود، در این نمودارها که در دماهای کاری مختلفی از پیل رسم شدهاند، سه ناحیه افت ولتاژ مشاهده می شود. در بخش اول مقدار افت ولتاژ ناچیز بوده به گونهای که مقدار ولتاژ در حالت مدار باز تقریباً برابر با مقدار تئوریک آن می شود. در بخش دوم نیز شاهد یک افت ولتاژ ناچیز بوده به گونهای که مقدار ولتاژ در حالت مدار باز تقریباً برابر با مقدار تئوریک آن می شود. در بخش دوم نیز شاهد یک افت ولتاژ خطی با سرعت کم هستیم. با افزایش چگالی جریان، در بخش سوم ولتاژ به شدت افت می کند. با توجه به اینکه با افزایش دما افتهای ولتاژ فعالسازی، اهمی و غلظتی کاهش می ابد، انتظار می رود که افزایش دما سبب کاهش افت ولتاژ سلول شود.

با توجه به موارد بالا، همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود، افزایش دمای کاری پیل سبب بالارفتن نرخ فعل وانفعال شیمیایی در آن شده و در نتیجه این کار سبب افزایش ولتاژ خروجی و بهبود عملکرد پیل خواهد شد. از سوی دیگر افزایش فشار کاری پیل سبب بالارفتن مقدار ولتاژ تئوریک در آن خواهد شد. در هر سه ناحیه مربوط به افتها با افزایش فشار نرخ فعل وانفعال بالا رفته و ولتاژ تولیدی در پیل بیشتر خواهد بود.

در شکل ۶ نیز نمودار تغییرات ولتاژ پیل نسبت به چگالی جریان در فشارهای کاری مختلف پیل نشان داده شده است. شکل مورد نظر نشان میدهد که با افزایش فشار ولتاژ خروجی از پیل افزایش پیدا خواهد کرد. نتایج این بخش نشان میدهد که فشار پیل در مقایسه با دمای آن تاثیر کمتری در تغییرات ولتاژ سلول دارد.



شکل ۵- تغییرات ولتاژ پیل نسبت به چگالی جریان در فشار کاری شکل ۶- تغییرات ولتاژ پیل نسبت به چگالی جریان در دمای کاری ۱ بار و دماهای متفاوت

در شکلهای ۷ و ۸، نیز تغییرات عملکرد کارایی یک سلول نسبت به چگالی جریان در دو حالت متفاوت بررسی شده است. در شکل ۷، با ثابت نگهداشتن فشار کاری سلول عملکرد آن در دماهای متفاوت کاری بررسی شده و در شکل ۸ نیز با ثابت نگهداشتن دما، کارکرد آن در فشارهای مختلف کاری بهدست آورده شده است. در شکل ۷، مشاهده میشود که با افزایش چگالی جریان در سلول، توان خروجی از آن به ماکزیمم مقدار خود رسیده و در ادامه با افزایش بیشتر این پارامتر توان بهشدت افت می کند. اگرچه به نظر می سد مقدار بهینه طراحی در نقطه بیشینه نمودارهای فوق رخ می دهد ولی نزدیک بودن آن به ناحیه افتهای ناشی از غلظت برای پیل به شدت خطرناک است. شکل ۸ نیز نشان می دهد که با افزایش فشار کاری سلول عملکرد آن بهتر شده و افت ولتاژ غلظتی در چگالهای جریان بالاتر تاثیر خود را نشان می دهد. نکته بسیار مهمی که باید در طراحی پیل منظور شود این است که چگالی شدت جریان گرفته شده از پیل در نقطه طراحی باید در ناحیه افتهای ناشی از مقاومت و به دور از ناحیه غلظت برای پیل به شدت جریان گرفته شده از پیل در نقطه طراحی باید در ناحیه افتهای ناشی از موارحی پیل منظور شود این است که چگالی شدت جریان گرفته شده از پیل در نقطه طراحی باید در ناحیه افتهای ناشی از موارحی پیل منظور شود این است که چگالی شدت جریان گرفته شده از پیل در نقطه طراحی باید در ناحیه افتهای ناشی از مواومت و به دور از ناحیه غلظت باد تا سیستم بتواند توان الکتریکی خود را به صورت پایدار تولید نماید. افزایش چگالی مواهد شد. از نتایج دیگر در این بخش میتوان به تاثیر کمتر فشار (در مقایسه با دما) بر روی افت ولتاژ غلظتی و چگالی جریان حدی در پیل اشاره کرد. همان طور که در شکل ۸ نیز مشاهده می شود، بر خلاف افزایش دما، افزایش فشار کمترین



دمای کاری ۱۲۷۳ کلوین و فشارهای متفاوت





پس از بررسی عملکرد یک سلول، در ادامه نتایج مربوط به تحلیل کل سیستم هیبریدی در شرایط متفاوت کاری ارائه میشود. جهت تحلیل عملکرد سیستم هیبریدی، تغییرات توان الکتریکی تولیدشده در پیل سوختی، توربین گاز و کل سیستم به همراه بازدههای الکتریکی، حرارتی و کل آن در فشارها و دماهای متفاوت کاری پیل به دست آورده شده است. همان طور که در تحلیل روابط مربوط به فرایند الکتروشیمیایی پیل بیان شد، دمای کاری پیل یکی از عوامل موثر در تغییر عملکرد آن است. است. با افزایش دمای کاری پیل، بازده الکتریکی، حرارتی و کلی سیستم افزایش خواهد یافت. همان طور که مشاهده میشود، با است. با افزایش دمای کاری پیل، بازده الکتریکی، حرارتی و کلی سیستم افزایش خواهد یافت. همان طور که مشاهده میشود، با افزایش دمای کاری پیل تا ۱۲۷۳ کلوین، بازده کلی آن تا حدود ۲۷ درصد افزایش یافته است. در شکل ۱۰ نیز مشاهده میشود که با افزایش دمای کاری پیل، توان الکتریکی تولیدی در این سیستم افزایش پیدا می کند. همان طور که مشاهده میشود، با میشود که با افزایش دمای کاری پیل، توان الکتریکی تولیدی در این سیستم افزایش بیدا می کند. همان طور که در بخش افزایش دای کار سبب افزایش دمای کاری پیل، توان الکتریکی تولیدی در این سیستم افزایش یافته است. در شکل ۱۰ نیز مشاهده مربوط به نتایج تک سلول ارائه شد، افزایش دمای کاری پیل سبب بالارفتن نرخ فعل و انفعال شیمیایی در پیل شده و در نتیجه این کار سبب افزایش ولتاژ خروجی و بهبود عملکرد آن خواهد شد. از سوی دیگر با توجه به اینکه دمای گازهای نتیجه این کار سبب افزایش ولتاژ خروجی و بهبود عملکرد آن خواهد شد. از سوی دیگر با توجه به اینکه دمای گازهای نتیجه این کار سبب افزایش ولتاژ خروجی و بهبود عملکرد آن خواهد شد. از سوی دیگر با توجه به اینکه دمای گازهای نتیجه این کار سبب افزایش ولتاژ خروجی و بهبود ممارد بالا، میتوان اینگونه بیان کرد که دمای کاری پیل از مهمترین افزایش توان خروجی از آن میشود. با توجه به موارد بالا، میتوان اینگونه بیان کرد که دمای کاری پیل از مهمترین پارامترهای تائیرگذار در عملکرد سیستم هیبریدی است. با توجه به محدوده دمایی کارکرد پیلهای سوختی اکسید جامد درود ۴۵ درصد در سیستم هیبریدی دست.





شکل ۹- تغییرات بازده سیستم هیبریدی نسبت به دمای کاری پیل در فشار ۳ بار و چگالی جریان ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع

شکل ۱۰– تغییرات توان تولیدی سیستم هیبریدی نسبت به دمای کاری پیل در فشار ۳ بار و چگالی جریان ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع

یکی دیگر از پارامترهای موثر بر عملکرد سیستم هیبریدی فشار کاری پیل است. شکل ۱۱ تغییرات بازده کلی، الکتریکی و حرارتی سیستم را نسبت به فشار کاری پیل نشان میدهد. افزایش نسبت فشار کمپرسور باعث ایجاد فشار بیشتر در پیل سوختی میشود که این به نوبه خود باعث افزایش تابع گیبس و در نتیجه افزایش ولتاژ خروجی در پیل سوختی خواهد شد. از پیل و در نتیجه ازدیاد دمای آن میشود. در ادامه این افزایش دما در پیل باعث بیشترشدن دمای گازهای خروجی از آن شده و پیل و در نتیجه ازدیاد دمای آن میشود. در ادامه این افزایش دما در پیل باعث بیشترشدن دمای گازهای خروجی از آن شده و ما در نتیجه توان میکروتوربین را نیز افزایش خواهد داد. در شکل ۱۲، مشاهده می شود که افزایش نسبت فشار کمپرسور منجر به افزایش توان تولیدی در هر سه گزینه اشارهشده خواهد شد. نتایج نشان میدهد که افزایش فشار کاری پیل باعث افزایش ۱۰ در منتیجه توان میکروتوربین را نیز افزایش خواهد داد. در شکل ۱۲، مشاهده می شود که افزایش نسبت فشار کمپرسور منجر به افزایش توان تولیدی در هر سه گزینه اشارهشده خواهد شد. نتایج نشان میدهد که افزایش فشار کاری پیل باعث افزایش ۱۰ درصدی در بازده کلی سیستم شده و تاثیر زیادی در بازده حرارتی سیستم ندارد. طبق نتایج حاصله، در نسبت فشارهای بالا کمپرسورهای هوا و سوخت قوی تر در نسبت فشارهای بالاتر است که این مسئله به نوبه خود باعث کاهش توان کلی و در نتیجه ثابتماندن بازده و توان خروجی از سیستم هیبریدی در نسبت فشارهای بالاتر خواهد شد. مقایسه نتایج این دو بخش نشان میدهد که افزایش دمای کاری پیل در مقایسه با فشار کاری آن اثرگذاری بیشتری بر کارایی سیستم هیبریدی خواهد داشت.



شکل ۱۱- تغییرات بازده سیستم هیبریدی نسبت به فشار کاری پیل در دمای ۱۲۷۳ کلوین و چگالی جریان ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع

شکل ۱۲– تغییرات توان تولیدی سیستم هیبریدی نسبت به فشار در دمای ۱۲۷۳ کلوین و چگالی جریان۲۰۰۰ آمپر بر مترمربع کاری پیل

بحث کاهش آنتروپی تولیدی در سیستمهای حرارتی از موارد مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد. شکلهای ۱۳ و ۱۴ نشان میدهند که افزایش نسبت فشار و دما نه تنها موجب افزایش بازده سیستم هیبریدی میشود، بلکه باعث کاهش آنتروپی تولیدی در آن نیز خواهد شد.



به مسلم ۲۰۱۰ کیپر،ت ۱۹۷۹ کروپی تولیدی سیستم هیبریدی ت فشار کاری پیل

شکل ۱۳– تغییرات آنتروپی تولیدی سیستم هیبریدی نسبت به دمای کاری پیل

دبی هوای مورد نیاز چرخه به نرخ واکنش الکتروشیمیایی، دمای پیل و واکنشهای محفظه احتراق بستگی دارد. میزان هوا باید به حدی باشد که برای اکسیداسیون هیدروژن در پیل و گازهای باقیمانده از آن در محفظه پسسوز و همچنین خنککاری پیل سوختی کافی باشد. از سوی دیگر، افزایش بیش از حد نرخ جریان هوای ورودی به سیستم به دلیل اثرات خنککنندگی، باعث کاهش دمای پیل و در نتیجه افزایش افت ولتاژ و کاهش بازده الکتریکی، کل و اگزرژی در سیستم هیبریدی خواهد شد. همان طور که در شکل ۱۵ و ۱۶ مشاهده میشود، افزایش نرخ دبی هوای عبوری از سیستم به دلیل اثرات خنککنندگی سبب کاهش دمای پیل و در نتیجه کاهش بازده سیستم هیبریدی میشود.





2.75

2.25

120

140

160

180

نرخ جریان هوا (کیلومول بر ساعت)

شکل ۱۷- تغییرات آنتروپی تولیدی نسبت به نرخ دبی هوای مصرفی

در فشارهای کاری متفاوت

200

220

ر كلوين) 2.5





شکل ۱۸- تغییرات اگزرژی تخریب شده در سیستم هیبریدی نسبت به نرخ دبی هوای مصرفی در فشارهای کاری متفاوت

افزایش دبی سوخت ورودی به همراه ثابتماندن ضریب مصرف سوخت به این معنی است که انرژی شیمیایی بیشتری در پیل در حال تبدیل شدن به انرژی الکتریکی است. در این حالت سوخت بیشتر و در نتیجه هوای بیشتری در پیل مصرف خواهد شد. افزایش جریان باعث بیشترشدن اضافه ولتاژییل شده و تولید گرمای بیشتری را در آن سبب می شود که نتیجه آن افزایش دمای پیل است (شکل ۱۹). به طور کلی افزایش دبی سوخت اثر مطلوبی بر عملکرد سیستم نداشته و بازگشتناپذیریها را بهشدت افزایش میدهد. اثر مثبت این پارامتر در افزایش توان سیستم است، در حالی که افزایش بیشتر آن کاهش بازده را درپی خواهد داشت (شکل ۲۰).

شکلهای ۲۱ و ۲۲ نشان میدهند که افزایش نرخ جریان عبوری از سیستم سبب افزایش آنتروپی تولیدی و اگزرژی تخریبشده در سیستم می شود.

با توجه به موارد بالا، باید برای نسبت هوا به سوخت ورودی به سیستم یک مقدار بهینه بهدست آورد. در شکل ۲۳، تغییرات توان الکتریکی و حرارت تولیدی سیستم نسبت به تغییر این پارامتر آورده شده است. همان طور که در این شکل

260

240

مشاهده می شود، با افزایش نسبت نرخ هوا به سوخت، توان الکتریکی تولیدی در سیستم هیبریدی تا حد معینی بیشتر شده و سپس در ادامه سیر نزولی پیدا میکند. انتخاب نسبت هوا به سوخت بیشتر باعث کاهش چشمگیر توان الکتریکی و حرارت تولیدی در پیل خواهد شد. در شکل ۲۴ و ۲۵ نیز تغییرات بازده سیستم هیبریدی نسبت به تغییر این ضریب نشان داده شده است. با توجه به موارد بالا، برای سیستم پیشنهادی در این مقاله و با درنظر گرفتن رسیدن به حداکثر بازده در آن، مقدار نسبت هوا به سوخت برابر ۹/۴ حاصل شده است.



شکل ۲۲- تغییرات اگزرژی تخریبشده در سیستم هیبریدی نسبت به نرخ دبی سوخت مصرفی در فشارهای کاری متفاوت

شکل ۲۱- تغییرات آنتروپی تولیدی سیستم هیبریدی نسبت به نرخ دبی سوخت مصرفی در فشارهای کاری متفاوت

افزایش مقدار توانایی استفاده از سوخت، توان تولیدی در پیل سوختی و سیستم هیبریدی را افزایش داده و سیستم در شدت جریان بالاتری به ناحیه غلظت میرسد. همانطور که در شکل ۲۶ مشاهده میشود افزایش ضریب مصرف سوخت در پیل تا یک حد معین باعث افزایش توان الکتریکی تولید شده در پیل شده و سپس با افزایش بیشتر این ضریب، توان الکتریکی تولیدی آن کاهش خواهد یافت. همانطور که در این شکل مشاهده میشود ضریب بهینه مصرف سوخت در دمای ۱۲۷۳ کلوین در حدود ۸۵/۰ بهدست آمده است.

پیل سوختی به کاررفته در این تحقیق از نوع اکسید جامد لولهای (مشابه مدل شرکت زیمنس وستینگهاوس) بوده و مشخصات آن به همراه پارامترهای سیستم هیبریدی پیشنهادی، در یک حالت بهینه، در جدول ۶ ارائه شده است[۲۶].



مصرف سوخت



مقدار فرضشده	پارامتر
۸۱ درصد	بازده ايزونتروپيک کمپرسور سوخت
۸۱ درصد	بازده ايزونتروپيک کمپرسور هوا
۸۰ درصد	بازده بازیابهای هوا-گاز
۸۵ درصد	بازده بازیاب آب-گاز
۸۵ درصد	بازده پمپ
۹۵ درصد	بازده محفظه پسسوز
۸۴ درصد	بازده ايزونتروپيک ميکروتوربين
۹۵ درصد	بازده ژنراتور
۸۹ درصد	بازده معکوسکننده (یکسوساز) (Inventor)
۴ درصد	افت فشار بازيابها
۴ درصد	افت فشار پیل سوختی
۵ درصد	افت فشار محفظه پسسوز
٩/١	نسبت هوا به سوخت بهینه

حالت بهينه	در	سيستم	عملكردي	نر های	– يارامت	۶.	جدول
	-	,	<u> </u>	~ ^	. .		

مقدار فرضشده	پارامتر
۱۰۳۶/۲سانتیمتر مربع	مساحت هر سلول
۱۵۰سانتیمتر	طول هر سلول
۲/۲ سانتیمتر	قطر هر سلول
۵۸۵۷ عدد	تعداد سلول
۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع	چگالی جریان
• /A۵	ضريب مصرف سوخت
١٢٧٣ كلوين	دمای کاری سلول
۳ بار	فشار کاری سلول
۱۰۰ کیلومول بر ساعت	دبی هوای ورودی
۱۰/۸۳ کیلومول بر ساعت	دبی سوخت ورودی
۷۱/۱۵ درصد	بازدہ کلی سیستم
۵۱/۴۵ درصد	بازده الكتريكي سيستم
۱۹/۷۱ درصد	بازده حرارتي سيستم

نتيجهگيرى

با توجه به مطالب ارائه شده در این مقاله، میتوان موارد زیر را به عنوان جمعبندی بحث ارائه کرد: – با افزایش دما و فشار کاری پیل افت ولتاژ کلی آن کمتر شده و در نتیجه ولتاژ خروجی از پیل افزایش پیدا خواهد کرد. – افزایش دما و فشار کاری پیل توان خروجی از آن را افزایش داده و عملکرد آن را بهبود میدهد. – دمای کاری پیل در مقایسه با فشار کاری آن دارای اثرگذاری بیشتری در بهبود عملکرد آن است. – چگالی شدت جریان گرفتهشده از پیل در نقطه طراحی باید در ناحیه افتهای ناشی از مقاومت و به دور از ناحیه غلظت باشد تا سیستم بتواند توان الکتریکی خود را به صورت پایدار تولید کند. – افزایش دمای کاری پیل باعث افزایش توان الکتریکی در پیل سوختی، میکروتوربین و سیستم هیبریدی میشود. با توجه به محدوده دمایی کارکرد پیل های سوختی اکسید جامد (۷۰۰ الی ۲۰۰۱ درجه سلسیوس)، نتایج نشان میدهد که میتوان با افزایش دمای کاری پیل باعث افزایش بازدهی در حدود ۴۵ درصد در سیستم هیبریدی دستی یفت. – افزایش دمای کاری پیل به بیشینه افزایش بازدهی در حدود ۴۵ درصد در سیستم هیبریدی دست یافت. – افزایش دمای کاری پیل باعث افزایش بازدهی در حدود ۴۵ درصد در سیستم هیبریدی دست یافت. – افزایش دمای کاری پیل به بیشینه افزایش بازدهی در حدود ۴۵ درصد در سیستم هیبریدی دست یافت. – افزایش فشار کاری پیل به دایل استفاده از کمپرسورهای قوی در نسبت فشارهای بالا، افزایش فشار کاری پیل باعث افزایش دوان الکتریکی در پیل سوختی، میکروتوربین و سیستم هیبریدی خواه د شد. نتایچ

- افزایش ضریب مصرف سوخت در پیل تا یک حد معین باعث افزایش تـوان الکتریکـی تولیدشـده در پیـل شـده و سـپس بـا افزایش بیشتر این ضریب توان الکتریکی آن کاهش خواهد یافت. ضریب بهینه مصرف سوخت برای این سیستم پیشنهادی (در دمای کاری ۱۲۷۳ کلوین برای پیل) حدود ۰/۸۵ توصیه میشود.

- جهت دستیابی به بازده بالا در سیستم هیبریدی، باید نسبت هوا به سوخت ورودی به سیستم یک مقدار مناسب انتخاب شود. برای سیستم پیشنهادی در این مقاله و با درنظر گرفتن حداکثر بازده آن، مقدار نسبت هوا به سوخت برابر ۹/۴ پیشنهاد میشود. - افزایش دما و فشار کاری پیل باعث کاهش نرخ تولید آنتروپی در سیستم هیبریدی خواهد شد.

- افزایش بیش از حد نرخ جریان هوای ورودی به سیستم به دلیل اثرات خنککنندگی، باعث کاهش دمای پیل و در نتیجه افزایش افت ولتاژ و کاهش بازده الکتریکی، کل و اگزرژی در سیستم هیبریدی خواهد شد.

- افزایش بیش از حد دبی سوخت اثر مطلوبی بر عملکرد سیستم نداشته و باعث کاهش بازده سیستم و افزایش بازگشت-ناپذیریها در آن خواهد شد.

تشکر و قدردانی

از حمایتهای مالی سازمان انرژیهای نو ایران (سانا) در انجام این تحقیق تشکر می شود.

منابع

- 1. M. C. Williams, Fuel cell handbook, EG&G Technical Services, Inc., West Virginia, 2004.
- 2. J. Brouwer, "Hybrid Gas Turbine Fuel Cell Systems," National Fuel Cell Research Center, University of California, See also URL http://www.nfcrc.uci.edu.
- 3. S. P. Harvey and H. J. Richter, "Gas Turbine Cycles with Solid Oxide Fuel Cells, Part I and II," *Journal of Energy Resources Technology*, 116, 1994, pp. 305-318.
- 4. G. Lee and f. Sudhoff, "Fuel Cell/Gas Turbine System Performance Studies," Fuel Cells '96 Review Meeting, Morgantown, West Virginia, August 20-21, 1996, DOE/METC/C-97/7278.
- 5. J. Chaney, R. Tharp, W. Wolf, A. Fuller and J. Hartvigson, "Fuel Cell/Micro Turbine Combined Cycle," Final Report, McDermott Technology, Inc. Alliance, 1999.
- 6. A. F. Massardo and F. Lubelli, "Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Combined Cycles (IRSOFC-GT): Part I-Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 122, 2000, pp. 27-35.
- 7. N. F. Bessette and J. F. Pierre, "Status of Siemens Westinghouse Tubular Solid Oxide Fuel Cell Technology and Development Program," *Proceedings of the 2000 Fuel Cell Seminar*, Courtesy Associates, November 2000.

- 8. S. C. Singhal, "Advances in Solid Oxide Fuel Cells," Journal of Solid State Ionic, 135, 2000, pp.305-313.
- 9. H. Ide and et al., "Natural Gas Reformed Fuell Cell Power Generation System-a Comparison of Three System Efficiencies," 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington, DC, pp. 1571-1522, 1989.
- 10. P. Costamagna, L. Magistri and A.F. Massardo, "Design and Part-Load Performance of a Hybrid System Based on a Solid Oxide Fuel Cell Reactor and a Micro Gas Turbine," Journal of Power Sources, 96, No. 2, 2001, pp. 352-368.
- 11. J. Palsson, "Thermodynamic Modeling and Performance of Combined Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine System," Ph.D. Thesis, Department of Heat and Power Engineering, Lund University of Sweden, 2002.
- 12. A. Selimovic, "Modeling of Solid Oxide Fuel Cells Applied to the Analysis of Integrated Systems with Gas Turbines," Ph.D. Thesis, Department of Heat and Power Engineering, Lund University of Sweden, 2002.
- 13. J. Palsson, A. Selimovic and L. Sjunnesson, "Combined Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Systems for Efficient Power and Heat Generation," *Journal of Power Sources*, 86, 2000, pp. 442-448. 14. S. H. Chan, H. K. Ho and Y. Tian, "Modelling of Simple Hybrid Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Power Plant,"
- Journal of Power Sources, 109, No. 1, pp. 111-120, 2002.
- 15. H. Uechi, S. Kimijima and N. Kasagi, "Cycle Analysis of Gas Turbine-Fuel Cell Cycle Hybrid micro Generation System," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 126, 2004, pp.755-762.
- 16. K. Rajashekara, "Hybrid Fuel Cell Strategies for Clean Power Generation," IEEE Transactions on industry applications, 41, No. 3, 2005, pp. 682-689.
- 17. S. Motahar and A. A. Alamrajabi, "Exergy Based Performance Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell and Steam Injected Gas Turbine Hybrid Power System," International journal of hydrogen, 34, 2009, pp. 2396-2407.
- 18. T. W. Song and et al., "Performance Analysis of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell/Micro Gas Turbine Hybrid Power System Based on a Quasi-Two Dimensional Model," Journal of Power Sources, 142, 2005, pp. 30-42.
- 19. W. H. Lai and et al., "Experimental Simulation on the Integration of Solid Oxide Fuel Cell and Micro-Turbine Generation System," *Journal of Power Sources*, 171, 2007, pp. 130-139. 20. Y. Haseli, I. Dincer and G. F. Naterer, "Thermodynamic Modeling of a Gas Turbine Cycle Combined with a Solid Oxide
- Fuel Cell," Journal of Hydrogen energy, 33, 2008, pp. 5811-5822.
- 21. D. Cocco and V. Tola, "Externally Reformed Solid Oxide Fuel Cell-Micro-Gas Turbine (SOFC-MGT) Hybrid Systems Fueled by Methanol and Di-Methyl-Ether (DME)," Journal of energy, 34, 2009, pp. 2124-2130.
- 22. Y. Komatsu and S. Kimijima, "Performance Analysis for the Part-Load Operation of a Solid Oxide Fuel Cell-Micro Gas Turbine Hybrid System," *Journal of energy*, 35, 2010, pp. 982-988. 23. P. Ghanbari Bavarsad, "Energy and Exergy Analysis of Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid
- System," International Journal of Hydrogen Energy, 32, No. 17, 2007, pp. 4591-4599.
- 24. A. Volkan Akkaya, "Electrochemical Model for Performance Analysis of a Tubular SOFC," International Journal of Energy Research, 31, 2007, pp.79-98.
- 25. M. Ghasemi and et al., "Parametric Study of the Tubular SOFC Power Cycle with a Thermodynamic Model," ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition: IMECE 2007, USA, Washington, Seattle, 2007.
- 26. J. A. Ciesar, "Hybrid Systems Development by the Siemens Westinghouse Power Corporation," Presented by Siemens Westinghouse Power Corporation, Natural Gas/Renewable Energy Hybrids Workshop, August 2001.

English Abstract

Thermodynamic Performance Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid Cycle in a CHP System

J. Pirkandi¹, M. Ghasemi² and M. H. Hamedi²

1- Laboratory of Fuel Cell, Department of Mechanical Engineering, K. N. T. University of Technology 2- Department of Mechanical Engineering, K. N. T. University of Technology (Received: 2010.12.17, Received in revised form: 2011.7.17, Accepted: 2011.8.26)

The purpose of this article is thermodynamic analysis of a hybrid system to provide simultaneous electrical and thermal energy. In this paper, a hybrid system of solid oxide fuel cell and micro gas turbine is investigated with all accessories and then, thermodynamic analysis for all components of the cycle is done. Also, an electrochemical analysis is separately performed for the fuel cell. Then, with parametric study for the mentioned hybrid system, the effect of cell temperature, working pressure and air to fuel flow ratio on efficiency, power, and entropy generation in the hybrid system are studied. Finally, a case for optimum performance is presented. The results indicate increased efficiency of hybrid system with increasing cell temperature and working pressure (up to 80 percent). Determining the optimum air to fuel flow ratio and the full calculations of fuel cell at three separate parts (reforming, electrochemical, thermal) are the other items presented in this study.

Keywords: Solid oxide fuel cell, Micro gas turbine, Hybrid system, CHP