



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

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

جاماسب پیرکندی^{۱*}، مجید قاسمی^{۲**} و محمدحسین حامدی^{۳***}

۱- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه پیل سوختی

۲- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک

(دریافت: ۱۳۸۹/۹/۲۷، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۰/۴/۲۸، پذیرش: ۹۰/۶/۱۵)

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 جانبی 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 نشانگر افزایش بازده 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.

کلیدواژه: پیل سوختی اکسید جامد، میکروتوربین گازی، سیستم هیبریدی، تولید هم‌زمان

مقدمه

با توجه به روند روبه‌رشد مصرف انرژی در جهان استفاده از روش‌ها و سیستم‌های جدید تولید انرژی با بازدهی بالا و آلاینده‌گی 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 (۷۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس) پتانسیل بسیار خوبی برای استفاده در سیستم‌های تولید هم‌زمان (CHP- Combined heat and power) را داراست. گرمای تولیدشده در این نوع از پیل‌های سوختی به دلیل دمای بالا دارای کیفیت مطلوبی بوده و قابلیت استفاده در سیستم‌های هیبریدی را داراست [۱]. یکی از موارد پرکاربرد پیل‌های سوختی اکسید جامد در سیستم‌های تولید هم‌زمان، ترکیب این نوع پیل‌ها با انواع مختلف

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

** استاد (ایمیل: ghasemi@kntu.ac.ir)

*** استاد (ایمیل: hamed@kntu.ac.ir)

جاماسب پیرکندی، مجید قاسمی و محمدحسین حامدی

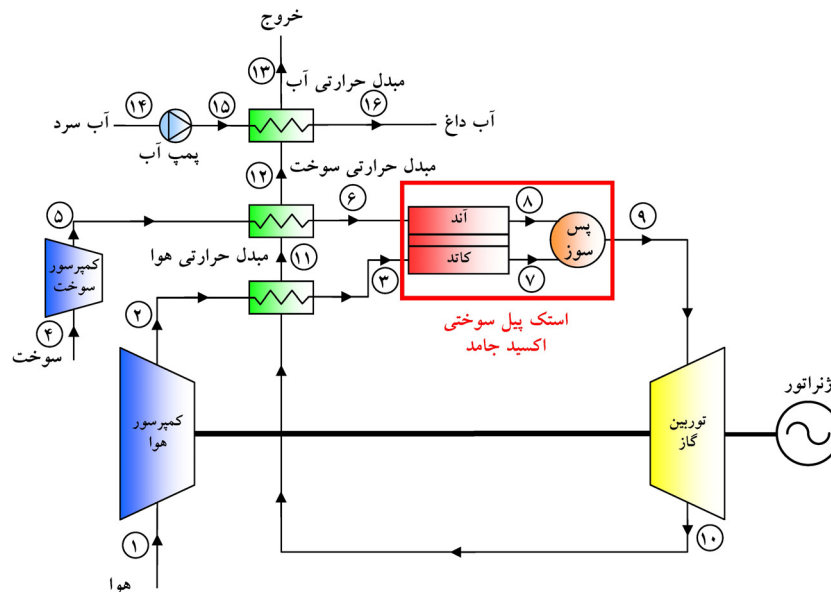
میکروتوربین‌های گازی است. میکروتوربین‌ها مولدهای کوچک برق‌اند که سوخت گازی یا مایع را سوزانده و یک ژنراتور را با سرعت بالا به چرخش در می‌آورند. در اوایل سال‌های ۱۹۸۰، بازدهی و قابلیت اطمینان میکروتوربین‌ها به مقداری رسید که برای کاربرد در سیستم‌های CHP صنعتی بزرگ مناسب شناخته شدند [۲]. ترکیب پیل سوختی 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 به خاطر 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 ۶۵ درصد دست یافت [۲].

مطالعه تحقیقات گذشته در مورد سیستم‌های هیبریدی نشان می‌دهد که بررسی‌های نظری بر روی این نوع از سیستم‌های هیبریدی برای اولین بار 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 وستورت 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 اسپن (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 در نظر گرفته شده و سپس برای تمام اجزای چرخه مورد نظر یک تحلیل ترمودینامیکی و برای پیل سوختی به‌کاررفته در آن یک تحلیل الکتروشیمیایی مجزا و کامل انجام می‌شود. برخلاف بیشتر تحقیقات انجام‌شده [۱۵ و ۱۸-۲۰]، 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 اشاره‌شده، تاثیر دما و فشار کاری پیل، نرخ جریان هوا و سوخت ورودی به سیستم و همچنین نسبت نرخ جریان هوا به سوخت ورودی به سیستم بر روی بازده، توان و آنتروپی تولیدی و آگزرژی تخریب‌شده در آن بررسی می‌شود و در نهایت یک حالت کارکرد بهینه برای سیستم پیشنهادی ارائه می‌شود.

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 در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- ترکیب‌بندی سیستم هیبریدی شبیه‌سازی شده

هوا و گاز طبیعی به‌کاررفته 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 به‌دست‌آمده از گاز طبیعی با اکسیژن موجود در هوا که از بازیاب دیگری گذشته و وارد پیل سوختی شده واکنش می‌دهد. با توجه به گرم‌آبودن واکنش الکتروشیمیایی در پیل سوختی، مقداری از گرمای تولید شده از این واکنش برای بهسازی گاز طبیعی به‌کار رفته، مقداری از آن وارد محیط شده و مقدار باقی‌مانده نیز گازهای داخل و خروجی از پیل سوختی را گرم می‌کند. واکنش هیدروژن با اکسیژن در پیل توان الکتریکی قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کند که باعث افزایش بازده سیستم هیبریدی می‌شود. در ادامه گازهای خروجی از پیل سوختی که در واکنش بهسازی به کار نیامدند وارد محفظه پس‌سوز شده و با هم واکنش می‌دهند. سپس محصولات خروجی از محفظه پس‌سوز وارد میکروتوربین شده و در اثر انبساط کار مکانیکی تولید می‌کنند. گازهای داغ پس از خروج از میکروتوربین در ادامه مسیر خود وارد سه بازیاب می‌شوند. دو بازیاب اول جهت پیش‌گرم کردن هوا و سوخت ورودی به پیل به‌کار رفته و از بازیاب سوم نیز برای تولید انرژی حرارتی استفاده می‌شود.

فرضیات

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

- از تغییرات انرژی های جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده است.
- رفتار تمامی گازهای موجود در چرخه به صورت گاز ایدئال فرض شده است.
- از توزیع دما، فشار و اجزای شیمیایی درون پیل صرف نظر شده است.
- دمای گازهای خروجی آند و کاتد یکسان و برابر دمای کاری پیل فرض شده است.
- ولتاژ در زیر توده های 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 به کاررفته 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 رایانه ای در نرم افزار 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 سیستم های هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی مربوط به پیل است، برای رسیدن به نتایج دقیق تر محاسبات این بخش به طور کامل و در سه بخش مجزا صورت گرفته است.

محاسبات بهسازی

یک مشخصه مثبت برای پیل های 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 هیدروکربن هایی مانند گاز طبیعی در داخل پیل وجود دارد. در این مقاله، از پیل سوختی با بهبوددهنده داخلی مستقیم استفاده شده است که در آن از حرارت آزادشده طی واکنش الکتروشیمیایی الکترودها جهت انجام واکنش گرماگیر بهسازی استفاده می شود. مزیت این روش نسبت به روش های دیگر (بهبوددهنده خارجی و بهبوددهنده داخلی غیرمستقیم) کاهش سرمایه گذاری برای تهیه تجهیزات اضافی و افزایش اثرمندی انتقال حرارت در توده پیل است [۲۳]. واکنش های انجام یافته در این فرایند به صورت زیر است [۲۴، ۲۳، ۱۴]:



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 [۲۳-۲۵]:



سازوکار واکنش بهسازی داخلی متان و دگرگونی آب و گاز در پیل سوختی طبق معادلات تعادلی زیر است [۲۴، ۲۳، ۱۴]:



در رابطه‌های بالا x ، y 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 به دست خواهد آمد:

$$\begin{aligned} [\dot{n}_{CH_4}]^{out} &= [\dot{n}_{CH_4}]^{in} - x \\ [\dot{n}_{H_2O}]^{out} &= [\dot{n}_{H_2O}]^{in} - x - y + z \\ [\dot{n}_{H_2}]^{out} &= [\dot{n}_{H_2}]^{in} + 3x + y - z \\ [\dot{n}_{CO}]^{out} &= [\dot{n}_{CO}]^{in} + x - y \\ [\dot{n}_{CO_2}]^{out} &= [\dot{n}_{CO_2}]^{in} + y \\ [\dot{n}_{tot}]^{out} &= [\dot{n}_{tot}]^{in} + 2x \end{aligned} \quad (7)$$

با توجه به معادلات بالا، فشار جزئی گازهای خروجی از آند و کاتد با استفاده از رابطه زیر حاصل خواهد شد:

$$P_i = \frac{\dot{n}_i}{\dot{n}_{tot}} P_{tot} \quad (8)$$

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:

$$Kp,r = \frac{P_{H_2}^3 \times P_{CO}}{P_{CH_4} \times P_{H_2O}} \quad (9)$$

$$Kp,s = \frac{P_{CO_2} \times P_{H_2}}{P_{CO} \times P_{H_2O}} \quad (10)$$

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 می‌شود:

$$\text{Log } Kp = AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT + E \quad (11)$$

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

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

بهسازی	دگرگونی	
$-2/63121 * 10^{-11}$	$5/47301 * 10^{-12}$	A
$1/24065 * 10^{-7}$	$-2/57479 * 10^{-8}$	B
$-2/25232 * 10^{-4}$	$4/63742 * 10^{-5}$	C
$1/95028 * 10^{-1}$	$-3/91500 * 10^{-2}$	D
$-6/61395 * 10^1$	$1/32097 * 10^1$	E

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

$$Kp,r = \frac{\left([\dot{n}_{H_2}]^{in} + 3x + y - z\right)^3 \times \left([\dot{n}_{CO}]^{in} + x - y\right)}{\left([\dot{n}_{CH_4}]^{in} - x\right) \times \left([\dot{n}_{H_2O}]^{in} - x - y + z\right)} \times \frac{P_{cell}^2}{\left([\dot{n}_{tot}]^{in} + 2x\right)^2} \quad (12)$$

$$Kp,s = \frac{([\dot{n}_{CO_2}]^m + y) \times ([\dot{n}_{H_2}]^m + 3x + y - z)}{([\dot{n}_{CO}]^m + x - y) \times ([\dot{n}_{H_2O}]^m - x - y + z)} \quad (13)$$

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

در رابطه (۱۴)، U_f ضریب مصرف سوخت بوده و به صورت نسبت هیدروژن واکنش داده 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 الکتروشیمیایی

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 می‌شود [۱]:

$$E = E^\circ + \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (15)$$

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 همیک (V_{ohm}) و افت ولتاژ ناحیه غلظت (V_{conc}) هستند، محاسبه شده و در نهایت از رابطه زیر مقدار ولتاژ واقعی آن (V_{cell}) به دست آید [۱]:

$$V_{cell} = E - (V_{act} + V_{ohm} + V_{conc}) = E - \Delta V_{Loss} \quad (16)$$

مقدار افت مربوط به فعالسازی شامل افت‌های مربوط به راه‌اندازی پیل و همچنین غلبه بر واکنش‌های الکتروشیمیایی است که به دلیل پایین‌بودن انرژی فعالسازی به‌کندی 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]:

$$V_{act} = V_{act,an} + V_{act,ca} \quad (17)$$

$$V_{act} = \frac{2R_u T}{n_e F} \sinh^{-1} \left(\frac{i}{2i_0} \right) \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، i_0 و i 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]:

$$i_{0,an} = \gamma_{an} \left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp \left(- \frac{E_{act,an}}{R_u T} \right) \quad (19)$$

$$i_{0,ca} = \gamma_{ca} \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^{0.25} \exp \left(- \frac{E_{act,ca}}{R_u T} \right) \quad (20)$$

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

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

۱۱۰۰۰۰	$E_{act,an}$ (KJ/Kmol)
۱۵۵۰۰۰	$E_{act,ca}$ (KJ/Kmol)
$7*10^{-9}$	γ_{an} (A/m ²)
$7*10^{-9}$	γ_{ca} (A/m ²)

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]:

$$V_{ohm} = V_{ohm,an} + V_{ohm,ca} + V_{ohm,el} + V_{ohm,in} \quad (21)$$

$$V_{ohm} = ir \quad (22)$$

$$r = \delta\rho \quad (23)$$

$$\rho = A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (24)$$

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

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

δ (m)	B (K)	A (Ω -m)	اجزا
۰/۰۰۲۲	۶۰۰	۰/۰۰۰۰۸۱۱	کاتد
۰/۰۰۰۱	-۱۳۹۲	۰/۰۰۰۰۲۹۸	آند
۰/۰۰۰۰۴	۱۰۳۵۰	۰/۰۰۰۰۲۹۴	الکترولیت
۰/۰۰۰۰۸۵	۴۶۹۰	۰/۰۰۱۲	جداکننده‌ها

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]:

$$V_{conc} = V_{conc}^{an} + V_{conc}^{ca} \quad (25)$$

$$V_{conc}^{an} = \frac{R_u T}{n_e F} \ln\left(\frac{1 - i / i_{L,H_2}}{1 + i / i_{L,H_2O}}\right) \quad (26)$$

$$V_{conc}^{ca} = \frac{R_u T}{n_e F} \ln\left(\frac{1}{1 - i / i_{L,O_2}}\right) \quad (27)$$

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]:

$$i_{L,H_2} = \frac{n_e F D_{eff,H_2}}{R_u T \delta_{an}} p_{H_2} \quad (28)$$

$$i_{L,H_2O} = \frac{n_e F D_{eff,H_2O}}{R_u T \delta_{an}} p_{H_2O} \quad (29)$$

$$i_{L,O_2} = \frac{n_e F D_{eff,O_2}}{R_u T \delta_{ca}} p_{O_2} \quad (30)$$

در رابطه‌های بالا، δ_{an} 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 می‌شود. ضرایب پخش موثر به کاررفته در روابط (۲۸) تا (۳۰) می‌تواند 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:

$$\frac{1}{D_{eff,H_2}} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left(\frac{1}{D_{H_2,k}} + \frac{1}{D_{H_2,H_2O}} \right) \quad (31)$$

ε و τ به ترتیب ضریب تخلخل و انحنای الکترودها [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 به دست خواهد آمد:

$$D_{H_2,H_2O} = \frac{0.00143 T^{1.75}}{M_{H_2,H_2O}^{1/2} (v_{H_2}^{1/3} + v_{H_2O}^{1/3})^2 P} \quad (32)$$

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 به دست می‌آید:

$$M_{H_2,H_2O} = \frac{2}{(1/M_{H_2}) + (1/M_{H_2O})} \quad (33)$$

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 به دست خواهد آمد:

$$D_{H_2,k} = 97 r_{por} \sqrt{\frac{T}{M_{H_2}}} \quad (34)$$

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

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

۱۶/۶	v_{O_2}	10^{-6}	$r_{por} (m)$
۱۲/۷	v_{H_2O}	۳۰	$\varepsilon (\%)$
۷/۰۷	v_{H_2}	۳	τ
۱۷/۹	v_{N_2}	----	----

پس از محاسبه افت ولتاژهای اشاره شده مقدار ولتاژ واقعی سلول طبق رابطه (۱۶) به دست خواهد آمد. با مشخص بودن رابطه بین چگالی جریان و سطح سلول مقدار جریان و توان هر سلول نیز به دست خواهد آمد. مقدار مساحت هر سلول در این مقاله ۱۰۳۶/۲ سانتی متر مربع در نظر گرفته شده است.

$$I_{cell} = iA_{cell} \quad (35)$$

$$Power_{DC-cell} = V_{cell} \times I_{cell} \quad (36)$$

با مشخص شدن 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.

$$I_{tot} = 2Fz \quad (37)$$

$$Power_{DC-tot} = V_{cell} I_{tot} \quad (38)$$

$$Power_{AC-tot} = Power_{DC-tot} \times \eta_{in,FC} \quad (39)$$

$$n = Power_{DC-tot} / Power_{DC-cell} \quad (40)$$

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 گرمازا، لذا کل انتقال حرارت خالص پیل سوختی اکسید جامد از اختلاف مقادیر گرمایی سه واکنش بالا به دست خواهد آمد. مقدار گرمای حاصل از واکنش‌های بهسازی و دگرگونی طبق روابط زیر به دست می‌آیند [۲۴، ۱۴].

$$\dot{Q}_r = x(\bar{h}_{CO} + 3\bar{h}_{H_2} - \bar{h}_{CH_4} - \bar{h}_{H_2O}) \quad (41)$$

$$\dot{Q}_{sh} = y(\bar{h}_{CO_2} + \bar{h}_{H_2} - \bar{h}_{CO} - \bar{h}_{H_2O}) \quad (42)$$

گرمای حاصل از واکنش الکتروشیمیایی انجام شده در پیل سوختی اکسید جامد نیز طبق رابطه زیر حاصل می‌شود [۲۴]:

$$\dot{Q}_{elec} = z.T.\Delta S - I.\Delta V_{Loss} \quad (43)$$

$$\Delta S = \left(S_{H_2O}^{\circ} - S_{H_2}^{\circ} - \frac{1}{2}S_{O_2}^{\circ} \right) + \frac{R_u}{2} \ln \left(\frac{p_{H_2}^2 \times p_{O_2}}{p_{H_2O}^2} \right)$$

همان‌طور که اشاره شد، گرمای خالص باقی مانده از واکنش‌های انجام شده در پیل سوختی طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{elec} + \dot{Q}_{sh} - \dot{Q}_r \quad (44)$$

همان‌طور که در رابطه (۴۵) نیز نشان داده شده، مقداری از این گرمای خالص باقی مانده صرف افزایش دمای گازهای داخل و خروجی پیل شده (\dot{Q}') و بخش دیگری نیز به محیط (\dot{Q}_{surr}) وارد می‌شود.

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}' + \dot{Q}_{surr} \quad (45)$$

$$\dot{Q}_{net} = \Delta h_{c1} + \Delta h_{c2} + \Delta h_{a1} + \Delta h_{a2} + \dot{Q}_{surr} \quad (46)$$

$$\left(\dot{n}_3 \bar{h}_3 + \dot{n}_6 \bar{h}_6 \right) = \dot{Q}_{surr} + \dot{W}_{out} + \left(\dot{n}_7 \bar{h}_7 + \dot{n}_8 \bar{h}_8 \right) \quad (47)$$

با توجه به رابطه (۴۶)، دمای گازهای خروجی از پیل که تقریباً برابر دمای کاری پیل است به دست می‌آید. در رابطه (۴۶)، Δh_{c1} و Δh_{a1} مقدار تغییرات آنتالپی واکنش دهنده‌ها در آند و کاتد و Δh_{c2} و Δh_{a2} 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، آگرژی تخریب‌شده و بازده آگرژی نیز از روابط زیر حاصل خواهد شد:

$$\dot{S}_{gen,sofc} = (\dot{n}_7 \bar{s}_7 + \dot{n}_8 \bar{s}_8) - (\dot{n}_3 \bar{s}_3 + \dot{n}_6 \bar{s}_6) + \frac{\dot{Q}_{surr}}{T_{surr}} \quad (48)$$

$$\dot{E}_{D,sofc} = \dot{E}_3 + \dot{E}_6 - \dot{E}_7 - \dot{E}_8 - \dot{E}_Q - \dot{W}_{SOFC} \quad (49)$$

$$\psi_{sofc} = \frac{\dot{W}_{SOFC}}{\dot{E}_3 + \dot{E}_6 - \dot{E}_7 - \dot{E}_8} \quad (50)$$

مدلسازی کمپرسورهای هوا و سوخت

همان‌طور 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 بی‌دررو (Adiabatic) بودن فرایند تراکم و با مشخص بودن نسبت فشار (PR) و بازده کمپرسور (η_c) و نسبت گرمای ویژه هوا (k_a) می‌توان دمای گازهای خروجی از کمپرسور (T_2) و همچنین کار واقعی مورد نیاز آن (w_c) را از روابط زیر به دست آورد:

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k_a-1}{k_a}} = (pr)^{\frac{k_a-1}{k_a}} \quad (51)$$

$$\eta_{ca} = \frac{w_{ca,s}}{w_{ca}} = \frac{\bar{h}_{2s} - \bar{h}_1}{\bar{h}_2 - \bar{h}_1} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (52)$$

$$\dot{W}_{ca} = \dot{n}_a (\bar{h}_2 - \bar{h}_1) \quad (53)$$

مقدار نرخ آنتروپی تولیدشده، آگرژی تخریب‌شده و بازده آگرژی در طی فرایند تراکم نیز طبق روابط زیر حاصل خواهد شد:

$$\dot{S}_{gen,ca} = \dot{n}_a (\bar{s}_2 - \bar{s}_1) \quad (54)$$

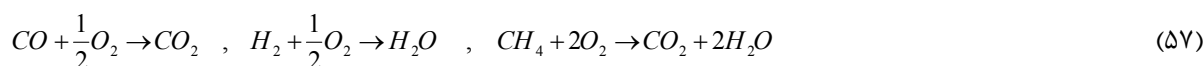
$$\dot{E}_{D,ca} = \dot{W}_{ca} - \dot{n}_a (e_2 - e_1) \quad (55)$$

$$\psi_{ca} = \frac{\dot{n}_a (e_2 - e_1)}{\dot{W}_{ca}} \quad (56)$$

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 در نظر 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.

مدلسازی 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 پس‌سوز با هم واکنش می‌دهند:



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

$$\dot{n}_7 \bar{h}_7 + \dot{n}_8 \bar{h}_8 - \dot{n}_9 \bar{h}_9 - \dot{Q}_{Loss,ab} = 0 \quad (58)$$

در رابطه بالا $\dot{Q}_{Loss,ab}$ تلفات حرارتی محفظه پس‌سوز 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].

$$\dot{Q}_{Loss,ab} = \dot{n}_4 \times (1 - U_f) \times (1 - \eta_{ab}) \times LHV \quad (59)$$

مقدار نرخ آنتروپی تولیدی، آگرژی تخریب‌شده و بازده آگرژی در این محفظه طبق روابط زیر به دست می‌آید:

$$\dot{S}_{gen,ab} = \dot{n}_9 \bar{s}_9 - \dot{n}_7 \bar{s}_7 - \dot{n}_8 \bar{s}_8 + \frac{\dot{Q}_{loss,ab}}{T_{sur}} \quad (60)$$

$$\dot{E}_{ab} = \dot{E}_7 + \dot{E}_8 - \dot{E}_9 - \dot{E}_{Q,ab} \quad (61)$$

$$\psi_{ab} = \frac{\dot{E}_9}{\dot{E}_7 + \dot{E}_8} \quad (62)$$

مدلسازی میکروتوربین

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 پیش‌گرم 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]:

$$\eta_{mgt} = \frac{W_{mgt,a}}{W_{mgt,s}} = \frac{\bar{h}_9 - \bar{h}_{10}}{\bar{h}_9 - \bar{h}_{10s}} = \frac{T_9 - T_{10}}{T_9 - T_{10s}} \quad (63)$$

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

$$P_{10} = P_9 \left(\frac{T_{10s}}{T_9} \right)^{\frac{k_g}{k_g - 1}} \quad (64)$$

$$\dot{W}_{mgt} = \dot{n}_9 (\bar{h}_9 - \bar{h}_{10}) \quad (65)$$

نرخ تولید آنتروپی، آگرژی تخریب‌شده و بازده آگرژی در فرایند انبساط انجام شده در میکروتوربین، مطابق روابط زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{S}_{gen,mgt} = \dot{n}_9 (\bar{s}_{10} - \bar{s}_9) \quad (66)$$

$$\dot{E}_{D,mgt} = \dot{n}_9 (e_9 - e_{10}) - \dot{W}_{mgt} \quad (67)$$

$$\psi_{mgt} = \frac{\dot{W}_{mgt}}{\dot{n}_9 (e_9 - e_{10})} \quad (68)$$

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 گرم کردن 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.

$$\varepsilon_{reg,1} = \frac{T_3 - T_2}{T_{10} - T_2} \quad (۶۹)$$

$$\varepsilon_{reg,2} = \frac{T_6 - T_5}{T_{11} - T_5} \quad (۷۰)$$

برای محاسبه بارحرارتی مفید در بازیاب سوم، با در نظر گرفتن بازده این بازیاب، از روابط زیر استفاده شده است.

$$Q_{reg,3} = \varepsilon_{reg,3} \dot{n}_{12} (\bar{h}_{12} - \bar{h}_{13}) \quad (۷۱)$$

$$Q_{reg,3} = \dot{n}_{water} \bar{C}_p (T_{16} - T_{15}) \quad (۷۲)$$

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

$$\dot{S}_{gen,reg,1} = \dot{n}_2 (\bar{s}_3 - \bar{s}_2) - \dot{n}_{10} (\bar{s}_{10} - \bar{s}_{11}) \quad (۷۳)$$

$$\dot{E}_{D,reg,1} = \dot{n}_{10} (e_{10} - e_{11}) - \dot{n}_2 (e_3 - e_2) \quad (۷۴)$$

$$\psi_{reg,1} = \frac{\dot{n}_2 (e_3 - e_2)}{\dot{n}_{10} (e_7 - e_8)} \quad (۷۵)$$

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 به دست خواهد آمد:

$$\dot{W}_{wp} = \dot{n}_{water} v_{14} (P_{15} - P_{14}) \quad (۷۶)$$

مقدار نرخ آنتروپی تولیدی، آگرژی تخریب‌شده و بازده آگرژی در پمپ نیز طبق روابط زیر به دست می‌آید:

$$\dot{S}_{gen,wp} = \dot{n}_w \cdot (\bar{s}_{15} - \bar{s}_{14}) \quad (۷۷)$$

$$\dot{E}_{D,wp} = \dot{W}_{wp} - \dot{n}_w \cdot (e_{15} - e_{14}) \quad (۷۸)$$

$$\psi_{wp} = \frac{\dot{n}_w \cdot (e_{15} - e_{14})}{\dot{W}_{wp}} \quad (۷۹)$$

مدلسازی سیستم

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

$$\eta_{ele} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{n}_f \times LHV} \quad (۸۰)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{reg,3}}{\dot{n}_f \times LHV} \quad (81)$$

$$\eta_{tot} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{reg,3}}{\dot{n}_f \times LHV} \quad (82)$$

$$\psi_{sys} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}_{16}}{\dot{E}_1 + \dot{E}_4 + \dot{E}_{14}} \quad (83)$$

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 آزاد شده ناشی از مصرف سوخت در پیل و محفظه پس سوز است.

$$\dot{W}_{net} = (Power_{AC-tot})_{FuelCell} + (\dot{W}_{AC-net})_{Micro Gas Turbine} \quad (84)$$

$$(\dot{W}_{AC-net})_{Micro Gas Turbine} = (\dot{W}_{DC-net})_{Micro Gas Turbine} \times \eta_{inv,gen} \quad (85)$$

$$(\dot{W}_{DC-net})_{Micro Gas Turbine} = \dot{W}_{mgt} - \dot{W}_{wp} - \dot{W}_{ca} - \dot{W}_{cf} \quad (86)$$

در رابطه (۸۴) $\eta_{inv,gen}$ ضریب تبدیل جریان مستقیم به متناوب در ژنراتور میکروتوربین است. نرخ تولید آنتروپی و آگزرژی تخریب شده در کل سیستم از روابط زیر حاصل خواهد شد:

$$S_{gen}^{cyc} = \sum_i S_{gen,i} \quad (87)$$

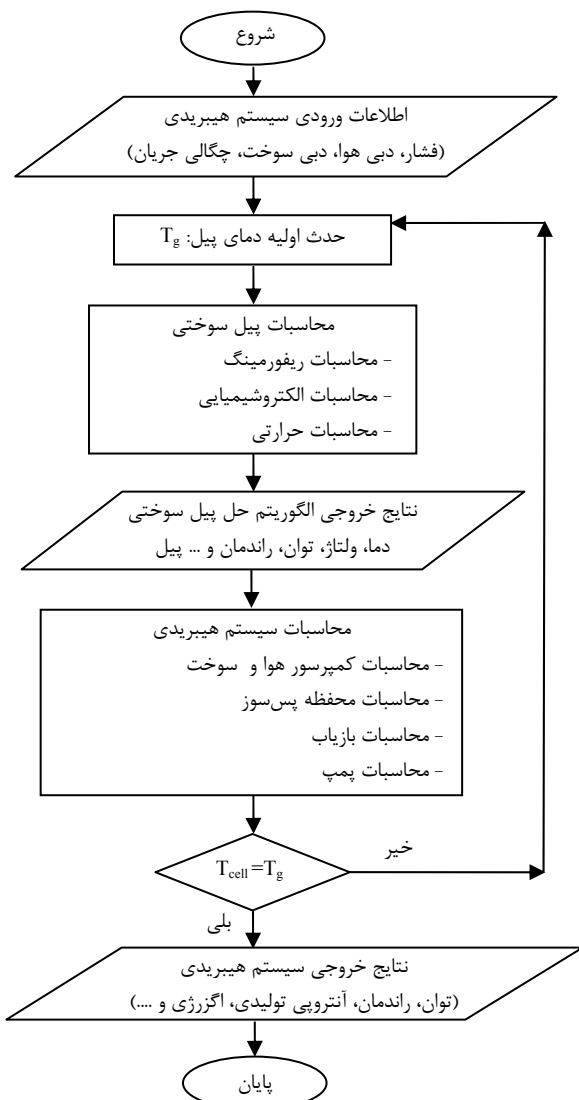
$$\dot{E}_{D,sys} = \dot{E}_1 + \dot{E}_4 + \dot{E}_{14} - \dot{E}_{13} - \dot{W}_{net} - \dot{E}_{16} \quad (88)$$

روش حل

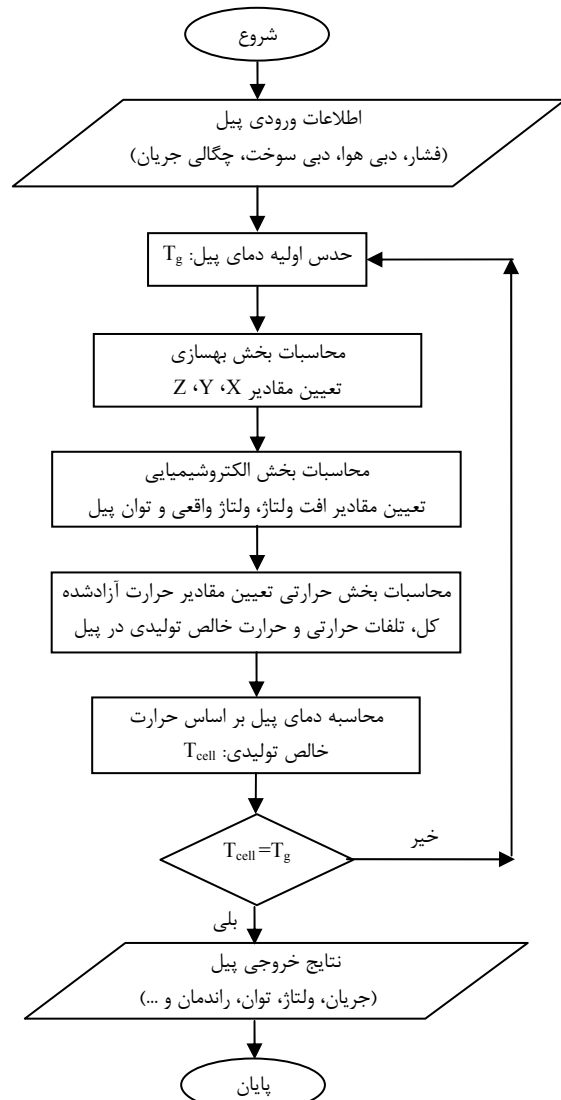
با توجه به معادلات ذکر شده در بخش‌های قبلی، جهت تحلیل مسئله یک برنامه رایانه‌ای نوشته شده است که روند آن مطابق فلوجارت‌های زیر است (شکل ۲ و ۳). در بخش اول این کد رایانه‌ای، معادلات غیرخطی بهسازی و الکتروشیمیایی به همراه معادلات حرارتی پیل به طور هم‌زمان حل شده و نتایج مطلوب شامل محاسبه ترکیبات اجزای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

اعتبارسنجی

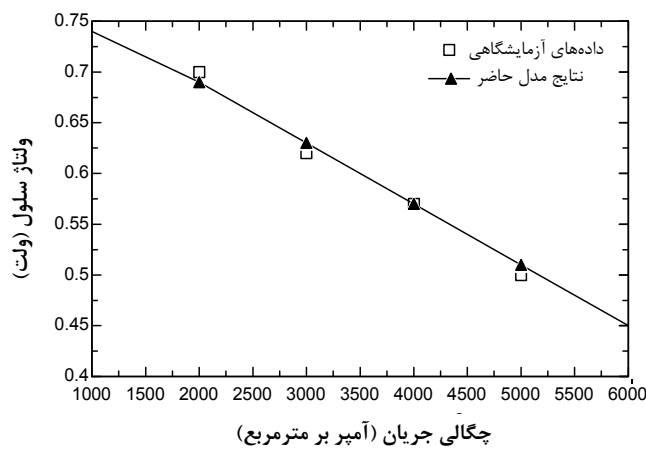
جهت اعتبارسنجی کد تهیه شده، لازم است برای یک نمونه معین نتایج حاصل از این کد تهیه شده با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه شود. با توجه به کمبود نتایج تجربی در زمینه پیل‌های سوختی اکسید جامد، در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته توسط سینگال [۸] به اعتبارسنجی کد تهیه شده در این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



شکل ۳- فلوجارت حل سیستم هیبریدی



شکل ۲- فلوجارت حل پیل سوختی



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

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

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

پارامترهای بررسی شده	نتایج چان و همکاران [۱۴]	نتایج با کد تهیه شده
بازده الکتریکی سیستم	۶۲/۲	۶۰/۵۲
بازده کلی سیستم	۸۳/۸	۸۰/۶۲
حرارت باز یافت شده (کیلووات)	۷۳۱	۷۲۲/۳
توان خروجی از سیستم (کیلووات)	۳۸۱	۳۷۴/۴۵
ولتاژ سلول (ولت)	۰/۷۳۸	۰/۷۱
چگالی جریان (آمپر بر مترمربع)	۱۴۱۶	۱۴۱۶
دمای کاری پیل (کلوین)	۱۱۶۶	۱۱۶۶

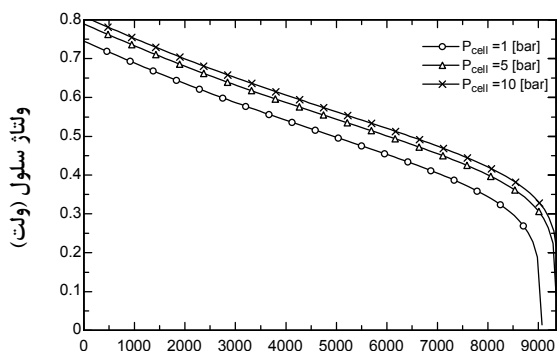
نتایج

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 به‌کاررفته در پیل سوختی پیشنهادی، تحت دما و فشارهای کاری مختلف، بررسی شده و در ادامه سیستم هیبریدی مورد نظر تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

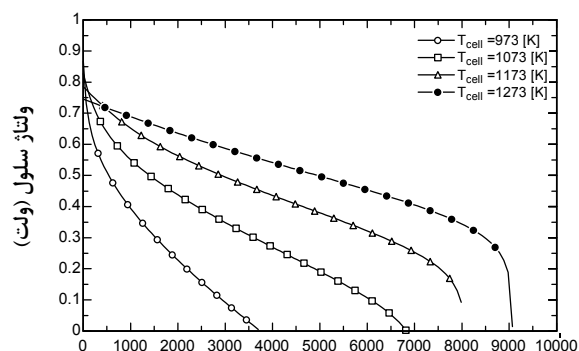
منحنی قطبیت پیل سوختی در یک سلول از روابط (۱۵) و (۱۶) به دست می‌آید. به این نمودار که بیان‌کننده ولتاژ سلول بر حسب چگالی جریان گرفته شده از آن است، منحنی قطبیت گفته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در این نمودارها که در دماهای کاری مختلفی از پیل رسم شده‌اند، سه ناحیه افت ولتاژ مشاهده می‌شود.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

با توجه به موارد بالا، همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، افزایش دمای کاری پیل سبب بالارفتن نرخ فعل‌وانفعال 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 فعل‌وانفعال 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.



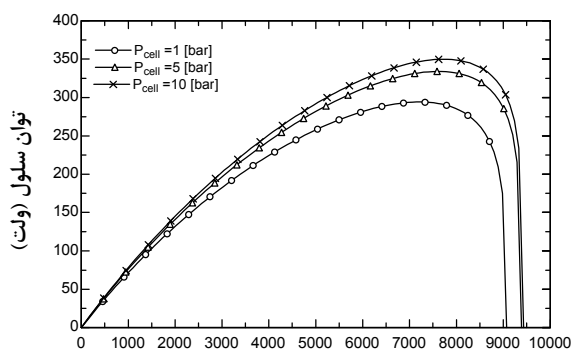
چگالی جریان (آمپر بر مترمربع)



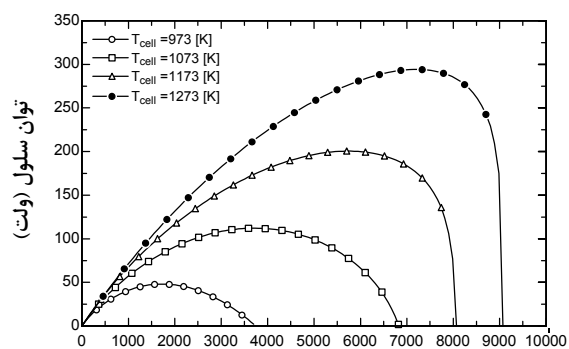
چگالی جریان (آمپر بر مترمربع)

شکل ۵- تغییرات ولتاژ پیل نسبت به چگالی جریان در فشار کاری ۱ بار و دماهای متفاوت
شکل ۶- تغییرات ولتاژ پیل نسبت به چگالی جریان در دمای کاری ۱۲۷۳ کلوین و فشارهای 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 به دست 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 به شدت افت می‌کند. اگرچه به نظر می‌رسد مقدار بهینه طراحی در نقطه بیشینه نمودارهای فوق رخ می‌دهد ولی نزدیک بودن آن به ناحیه افت‌های ناشی از غلظت برای پیل به شدت خطرناک است. شکل ۸ نیز نشان می‌دهد که با افزایش فشار کاری سلول عملکرد آن بهتر شده و افت ولتاژ غلظتی در چگال‌های جریان بالاتر تاثیر خود را نشان می‌دهد. 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 باشد تا سیستم بتواند الکتریکی خود را به صورت پایدار تولید نماید. افزایش چگالی جریان منجر به افزایش زیاد افت ولتاژ غلظت شده که این نیز به نوبه خود باعث کاهش شدید توان و ولتاژ خروجی از سلول خواهد 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. همان‌طور که در شکل ۸ نیز مشاهده می‌شود، بر خلاف افزایش دما، افزایش فشار کمتر تاثیر را بر روی چگالی جریان حدی دارد.



چگالی جریان (آمپر بر مترمربع)

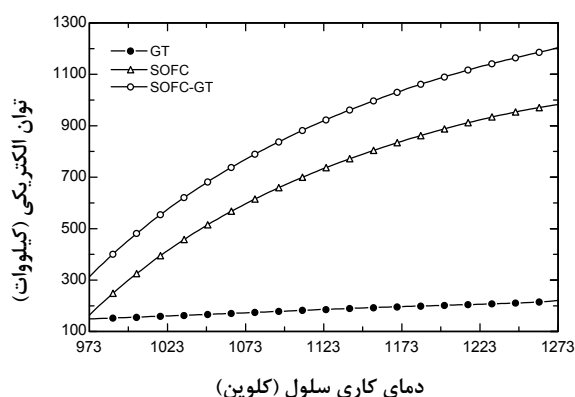


چگالی جریان (آمپر بر مترمربع)

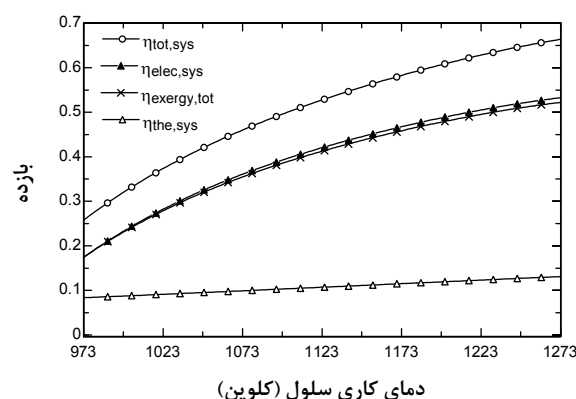
شکل ۸- تغییرات توان تولیدی پیل نسبت به چگالی جریان در دمای کاری ۱۲۷۳ کلوین و فشارهای متفاوت

شکل ۷- تغییرات توان تولیدی پیل نسبت به چگالی جریان در فشار کاری ۱ بار و دماهای 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. همان‌طور که در تحلیل روابط مربوط به فرایند الکتروشیمیایی پیل بیان شد، دمای کاری پیل یکی از عوامل موثر در تغییر عملکرد آن است. در شکل ۹ بازده کلی، الکتریکی و حرارتی سیستم پیشنهادی در محدوده دماهای مختلفی از عملکرد پیل نشان داده شده است. با افزایش دمای کاری پیل، بازده الکتریکی، حرارتی و کلی سیستم افزایش خواهد یافت. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دمای کاری پیل تا ۱۲۷۳ کلوین، بازده کلی آن تا حدود ۷۲ درصد افزایش یافته است. در شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش دمای کاری پیل، توان الکتریکی تولیدی در این سیستم افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که در بخش مربوط به نتایج تک سلول ارائه شد، افزایش دمای کاری پیل سبب بالا رفتن 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 خروجی از پیل نیز تابع دمای کاری آن است، این مسئله نیز به نوبه خود باعث افزایش دمای گازهای ورودی به توربین و افزایش توان خروجی از آن می‌شود. با توجه به موارد بالا، می‌توان این‌گونه بیان کرد که دمای کاری پیل از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد سیستم هیبریدی است. با توجه به محدوده دمایی کارکرد پیل‌های سوختی اکسید جامد (۷۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس)، نتایج نشان می‌دهد که می‌توان با افزایش دمای کاری پیل به بیشینه افزایش بازدهی در حدود ۴۵ درصد در سیستم هیبریدی دست یافت.



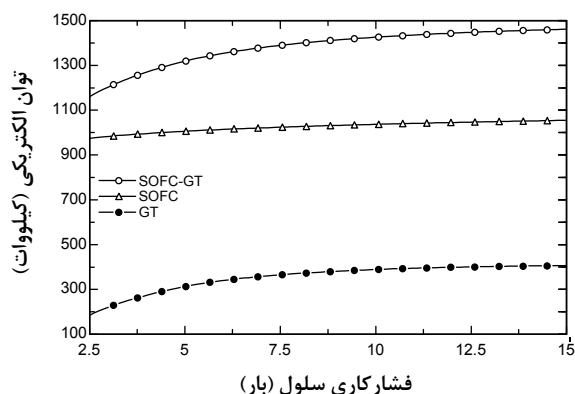
شکل ۱۰- تغییرات توان تولیدی سیستم هیبریدی نسبت به دمای کاری پیل در فشار ۳ بار و چگالی جریان ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع



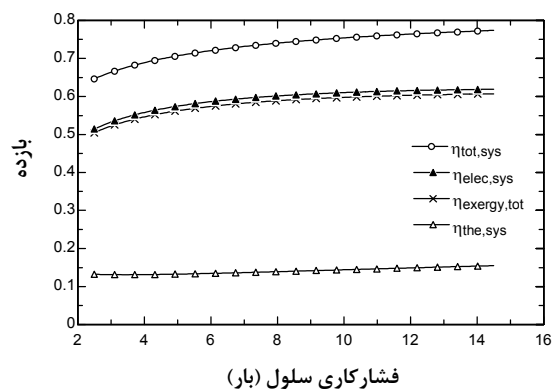
شکل ۹- تغییرات بازده سیستم هیبریدی نسبت به دمای کاری پیل در فشار ۳ بار و چگالی جریان ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع

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 ولتاژ خروجی در پیل سوختی خواهد شد. از سوی دیگر، این افزایش فشار باعث ازدیاد دمای هوای ورودی به پیل شده و متعاقباً این امر موجب افزایش گرمای تولیدشده در پیل و در نتیجه ازدیاد دمای آن می‌شود. در ادامه این افزایش دما در پیل باعث بیشتر شدن دمای گازهای خروجی از آن شده و در نتیجه توان میکروتوربین را نیز افزایش خواهد داد. در شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که افزایش نسبت فشار کمپرسور منجر به افزایش توان تولیدی در هر سه گزینه اشاره شده 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 بیشینه بازده کلی سیستم در حدود ۸۰ درصد برآورد شده است. مسئله مهمی که باید در این حالت به آن توجه کرد استفاده از

کمپرسورهای هوا و سوخت قوی‌تر در نسبت فشارهای بالاتر است که این مسئله به نوبه خود باعث کاهش توان کلی و در نتیجه ثابت ماندن 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.

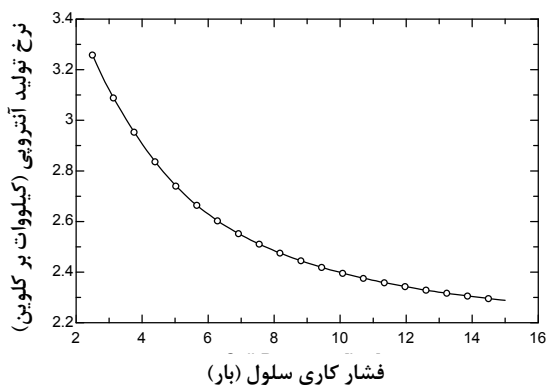


شکل ۱۲- تغییرات توان تولیدی سیستم هیبریدی نسبت به فشار در دمای ۱۲۷۳ کلوین و چگالی جریان ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع کاری پیل

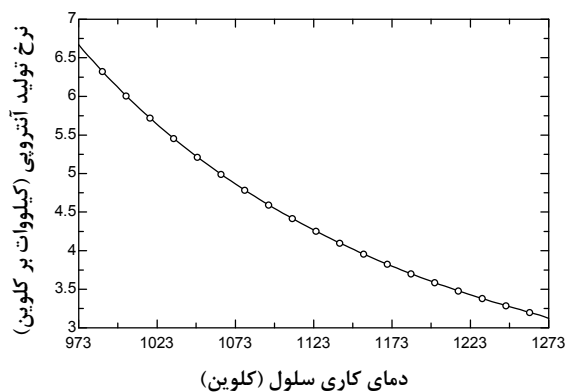


شکل ۱۱- تغییرات بازده سیستم هیبریدی نسبت به فشار کاری پیل در دمای ۱۲۷۳ کلوین و چگالی جریان ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع

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.



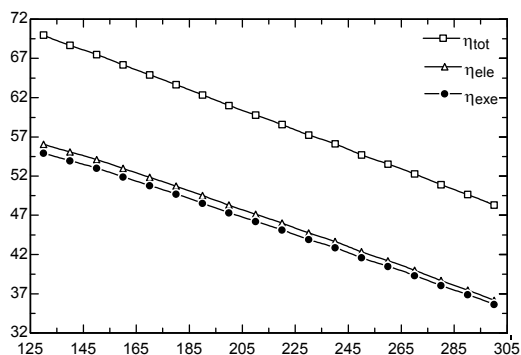
شکل ۱۴- تغییرات آنتروپی تولیدی سیستم هیبریدی نسبت به فشار کاری پیل



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

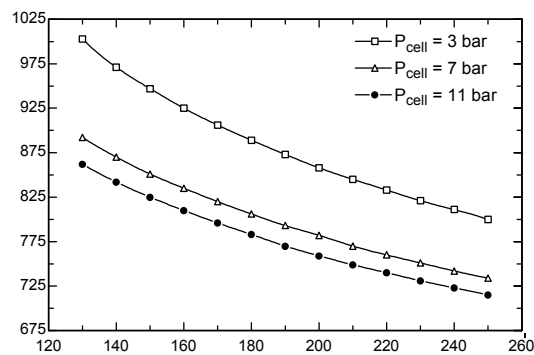
دبی هوای مورد نیاز چرخه به نرخ واکنش الکتروشیمیایی، دمای پیل و واکنش‌های محفظه احتراق بستگی دارد. میزان هوا باید به حدی باشد که برای اکسیداسیون هیدروژن در پیل و گازهای باقی‌مانده از آن در محفظه پس‌سوز و همچنین خنک‌کاری پیل سوختی کافی باشد. از سوی دیگر، افزایش بیش از حد نرخ جریان هوای ورودی به سیستم به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

شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان می‌دهند که افزایش نرخ جریان عبوری از سیستم سبب افزایش آنتروپی تولیدی و آگزرژی تخریب‌شده در سیستم می‌شود.



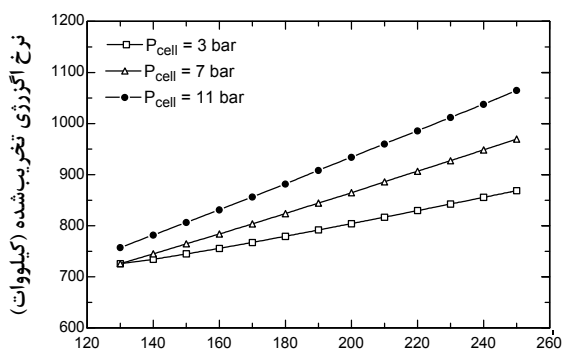
نرخ جریان هوا (کیلومول بر ساعت)

شکل ۱۶- تغییرات بازده سیستم هیبریدی نسبت به نرخ دبی هوای عبوری



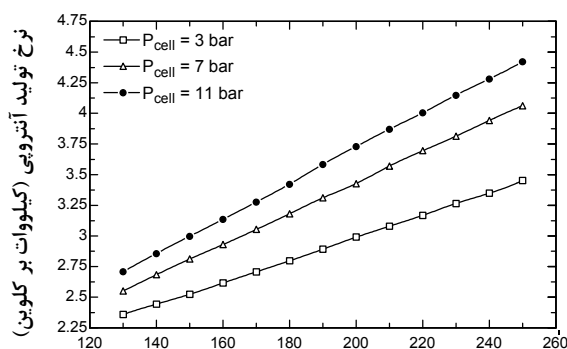
نرخ جریان هوا (کیلومول بر ساعت)

شکل ۱۵- تغییرات دمای کاری پیل نسبت به نرخ دبی هوای عبوری در فشارهای کاری متفاوت



نرخ جریان هوا (کیلومول بر ساعت)

شکل ۱۸- تغییرات آگزرژی تخریب‌شده در سیستم هیبریدی نسبت به نرخ دبی هوای مصرفی در فشارهای کاری متفاوت



نرخ جریان هوا (کیلومول بر ساعت)

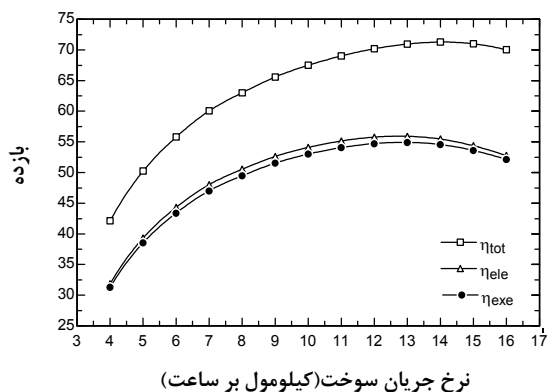
شکل ۱۷- تغییرات آنتروپی تولیدی نسبت به نرخ دبی هوای مصرفی در فشارهای کاری متفاوت

افزایش دبی سوخت ورودی به همراه ثابت ماندن 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 بیشتر شدن اضافه ولتاژ پیل شده و تولید گرمای بیشتری را در آن سبب می‌شود که نتیجه آن افزایش دمای پیل است (شکل ۱۹). به طور کلی افزایش دبی سوخت اثر مطلوبی بر عملکرد سیستم نداشته و بازگشت‌ناپذیری‌ها را به شدت افزایش می‌دهد. اثر مثبت این پارامتر در افزایش توان سیستم است، در حالی که افزایش بیشتر آن کاهش بازده را در پی خواهد داشت (شکل ۲۰).

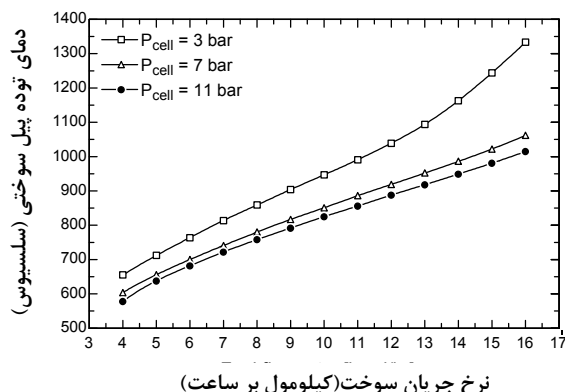
شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان می‌دهند که افزایش نرخ جریان عبوری از سیستم سبب افزایش آنتروپی تولیدی و آگزرژی تخریب‌شده در سیستم می‌شود.

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

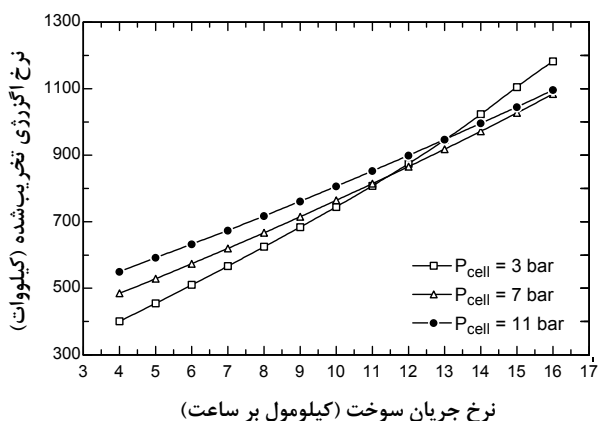
مشاهده می شود، با افزایش نسبت نرخ هوا به سوخت، توان الکتریکی تولیدی در سیستم هیبریدی تا حد معینی بیشتر شده و سپس در ادامه سیر نزولی پیدا می کند. انتخاب نسبت هوا به سوخت بیشتر باعث کاهش چشمگیر توان الکتریکی و حرارت تولیدی در پیل خواهد شد. در شکل ۲۴ و ۲۵ نیز تغییرات بازده سیستم هیبریدی نسبت به تغییر این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



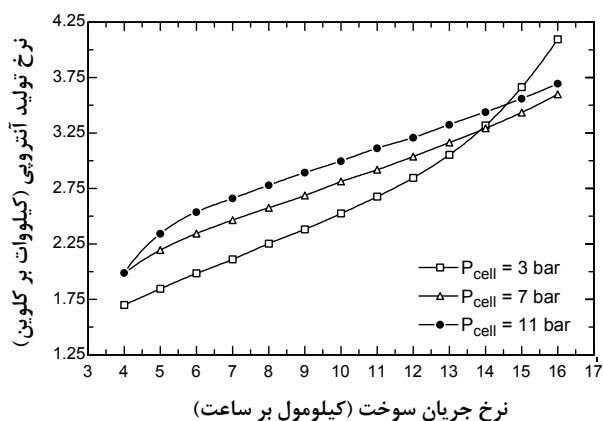
شکل ۲۰- تغییرات بازده سیستم هیبریدی نسبت به نرخ دبی سوخت مصرفی



شکل ۱۹- تغییرات دمای کاری پیل نسبت به نرخ دبی سوخت مصرفی در فشارهای کاری متفاوت



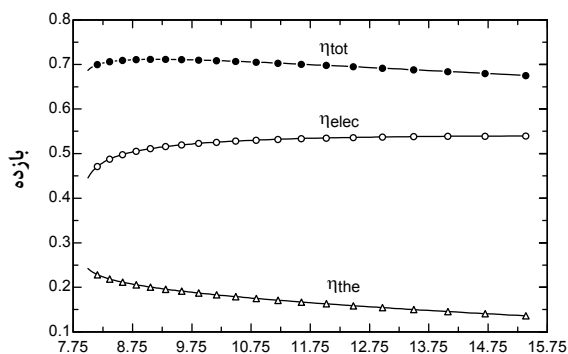
شکل ۲۲- تغییرات آگزردی تخریب شده در سیستم هیبریدی نسبت به نرخ دبی سوخت مصرفی در فشارهای کاری متفاوت



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

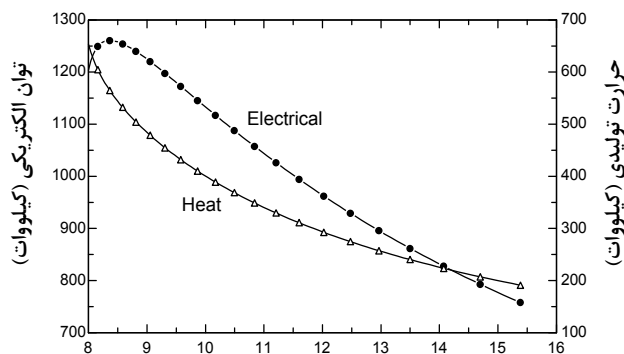
افزایش مقدار توانایی استفاده از سوخت، توان تولیدی در پیل سوختی و سیستم هیبریدی را افزایش داده و سیستم در شدت جریان بالاتری به ناحیه غلظت می رسد. همان طور که در شکل ۲۶ مشاهده می شود افزایش ضریب مصرف سوخت در پیل تا یک حد معین باعث افزایش توان الکتریکی تولید شده در پیل شده و سپس با افزایش بیشتر این ضریب،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

پیل سوختی به کاررفته در این تحقیق از نوع اکسید جامد لوله ای (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].



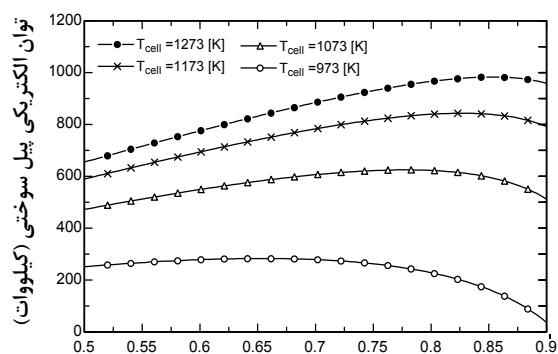
نسبت هوا به سوخت

شکل ۲۴- تغییرات بازده کلی، الکتریکی و حرارتی سیستم هیبریدی در نسبت‌های هوا به سوخت متفاوت



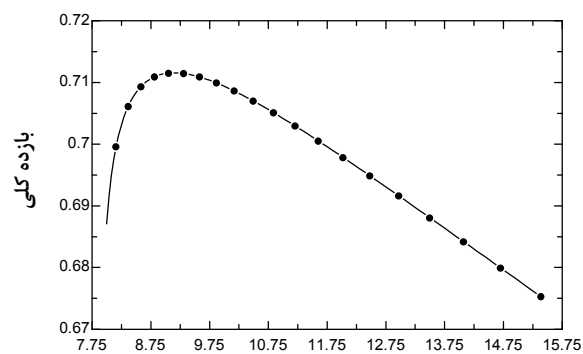
نسبت هوا به سوخت

شکل ۲۳- تغییرات توان الکتریکی و حرارت تولیدی سیستم هیبریدی در نسبت‌های هوا به سوخت متفاوت



ضریب مصرف سوخت

شکل ۲۶- تغییرات توان الکتریکی پیل سوختی نسبت به ضریب مصرف سوخت



نسبت هوا به سوخت

شکل ۲۵- تغییرات بازده کلی سیستم هیبریدی در نسبت‌های هوا به سوخت متفاوت

جدول ۶ - پارامترهای عملکردی سیستم در حالت بهینه

مقدار فرض شده	پارامتر
۸۱ درصد	بازده ایزونتروپیک کمپرسور سوخت
۸۱ درصد	بازده ایزونتروپیک 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 ایزونتروپیک میکروتوربین
۹۵ درصد	بازده ژنراتور
۸۹ درصد	بازده معکوس‌کننده (یکسوساز) (Inventor)
۴ درصد	افت فشار بازیاب‌ها
۴ درصد	افت فشار پیل سوختی
۵ درصد	افت فشار محفظه پس‌سوز
۹/۱	نسبت هوا به سوخت بهینه

مقدار فرض شده	پارامتر
۱۰۳۶/۲ سانتی‌متر مربع	مساحت هر سلول
۱۵۰ سانتی‌متر	طول هر سلول
۲/۲ سانتی‌متر	قطر هر سلول
۵۸۵۷ عدد	تعداد سلول
۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع	چگالی جریان
۰/۸۵	ضریب مصرف سوخت
۱۲۷۳ کلوین	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	بازده کلی سیستم
۵۱/۴۵ درصد	بازده الکتریکی سیستم
۱۹/۷۱ درصد	بازده حرارتی سیستم

نتیجه گیری

با توجه به مطالب ارائه شده در این مقاله، می توان موارد زیر را به عنوان جمع بندی 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 می دهد.
- دمای کاری پیل در مقایسه با فشار کاری آن دارای اثرگذاری بیشتری در بهبود عملکرد آن است.
- چگالی شدت جریان گرفته شده از پیل در نقطه طراحی باید در ناحیه افت های 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 می شود. با توجه به محدوده دمایی کارکرد پیل های سوختی اکسید جامد (۷۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس)، نتایج نشان می دهد که می توان با افزایش دمای کاری پیل به بیشینه افزایش بازدهی در حدود ۴۵ درصد در سیستم هیبریدی دست یافت.
- افزایش فشار کاری پیل باعث افزایش توان الکتریکی در پیل سوختی، میکروتوربین و سیستم هیبریدی خواهد شد. نتایج بیانگر این است که به دلیل استفاده از کمپرسورهای قوی در نسبت فشارهای بالا، افزایش فشار کاری پیل باعث افزایش ۱۰ درصدی در بازده کلی سیستم شده و تاثیر زیادی در بازده حرارتی سیستم ندارد.
- 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 آن کاهش خواهد یافت. ضریب بهینه مصرف سوخت برای این سیستم پیشنهادی (در دمای کاری ۱۲۷۳ کلوین برای پیل) حدود ۰/۸۵ توصیه می شود.
- 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 در نظر گرفتن حداکثر بازده آن، مقدار نسبت هوا به سوخت برابر ۹/۴ پیشنهاد می شود.
- 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 خنک کنندگی، باعث کاهش دمای پیل و در نتیجه افزایش افت ولتاژ و کاهش بازده الکتریکی، کل و آگزرژی 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-ناپذیری ها در آن خواهد شد.

تشکر و قدردانی

از حمایت های مالی سازمان انرژی های 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.nfrcr.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 Fuel 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