اثر سرمایش تبخیری هوای ورودی کمپرسور در سیکل ترکیبی توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد

مریم فرهمندپور
دانشجو –گروه تبدیل انرژی- دانشگاه آزاد اسلامی-واحد دزفول
farahmandpour_m@yahoo.com

رضا باهوش کازرونی
استادیار–گروه تبدیل انرژی- دانشگاه شهید چمران اهواز
reza.bahoosh@gmail .com

* *دریافت:*دی ماه ۹۰ ،* *اصلاح:*فروردین ماه ۹۱، * *تایید:* مرداد ماه ۹۱
صفحه های: ۴۷تا ۵۸

چکیده:
در این مقاله، ابتدا یک سیکل ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای[17] و توربین گاز با بازیاب حرارتی[18]، به عنوان سیکل پایه در نظر گرفته شده است. از آنجائی که بازیافت حرارت از گازهای خروجی توربین گاز جهت تولید بخار و تزریق آن به محفظه احتراق و هم‌چنین افزایش سیستم سرمایش تبخیری هوای ورودی کمپرسور و تزریق آب به هوای ورودی، فناوری‌های شناخته شده جهت افزایش کارآیی می‌باشند، برای ارتقاء سیکل پایه به کار برده شده‌اند. با مدل‌سازی الکتروشیمیایی پیل سوختی و مشخص نمودن افت ولتاژهای درون آن، ولتاژ پیل سوختی در شرایط کاری متفاوت به دست می‌آید. پس از تحلیل الکتروشیمیایی، به مدل‌سازی ترمودینامیکی اجزاء سیکل پرداخته می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی، مزایای سیکل ارتقاء یافته آن با تزریق هم‌زمان بخار و آب را نسبت به سیکل پایه نشان می‌دهد، که توان خروجی آن، ۱۸/۹۵ درصد نسبت به سیکل پایه افزایش یافته است. در پایان مقایسه پارامتری عملکرد سیکل نسبت به سه عامل مهم چگالی جریان پیل سوختی، نسبت فشار تراکم و دبی جرمی سوخت صورت گرفته است.

کلمات کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد- توربین گاز-سیکل ترکیبی- توان

۱- مقدمه

با توجه به روند رو به رشد مصرف انرژی در جهان، استفاده از روش‌ها و سیستم‌های جدید تولید توان که علاوه بر راندمان بالا دارای آلایندگی پایینی باشند، در اولویت قرار گرفته است. پیل سوختی به دلیل راندمان بالا در تبدیل انرژی شیمیایی سوخت فسیلی به انرژی الکتریکی و انتشار ناچیز آلاینده‌ها، یکی از این موارد می‌باشد. از میان انواع مختلف پیل‌های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد به دلیل دمای بالای کارکرد آن قابلیت استفاده در سیستم‌های تولید توان و یا تولید هم‌زمان توان و حرارت را دارد. به علاوه قابلیت پیل سوختی اکسید جامد در ترکیب با سیکل‌های تولید توان مانند سیکل توربین گاز، سبب شده است که سیکل ترکیبی حاصل به عنوان پیشنهادی برای نیروگاه‌های آینده مدنظر باشد. مفهوم استفاده از پیل سوختی اکسید جامد در سیکل توربین گاز از سال‌ها پیش مطرح شده است.
مرکز ملی پژوهش‌های پیل سوختی در دانشگاه کالیفرنیا ساخته شد. این بررسی مقالات نشان می‌دهد که این مفهوم اولین بار توسط یوشیدا و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها می‌دانستند عمده بازگشت ناپذیری در سیکل توربین گاز سنتی مربوط به فرآیند محفظه احتراق است. بنابراین اگر از تماس مستقیم بین سوخت و هوا جلوگیری شود و احتراق صورت نگیرد، راندمان حرارتی بیشتر خواهد شد، همان‌گونه که در پیل سوختی اتفاق می‌افتد[۱].
مدل‌های ترمودینامیکی و ریاضی، توسط گروه‌های تحقیقاتی متعددی توسعه و استخراج شده است، که از مهمترین آن‌ها می‌توان به گروه‌هایی از جمله لوبلی و ماساردو و کمپاناری و ماکچی اشاره نمود، که از ترکیب انواع پیل‌های سوختی و سیکل‌های توانی با اندازه‌های متفاوت استفاده شده بود. پیل‌های سوختی مورد مطالعه عموماً از نوع پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای[29] بودند که در ترکیب با سیکل گازی یا دیگر سیکل‌ها در توان‌های بالا مورد بررسی قرار گرفتند. در آن‌ها از گاز طبیعی به عنوان سوخت استفاده شده بود. نتایج برای سیستم‌های کوچک راندمان حدود ۵۵ درصد و برای سیستم‌های بزرگتر تا ۷۷ درصد را نشان می‌دهد[۲ و۳].شرکت‌های زیادی در جهان در حال پژوهش، ساخت و گسترش سیستم‌های ترکیبی از این دست می‌باشند. از جمله شرکت زیمنس- وستینگ هوس برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ به مطالعه در این زمینه پرداخت. این شرکت مبدع پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای است. فناوری پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای، ساخت شرکت زیمنس- وستینگ هوس در سال ۱۹۹۹، توسط سینگال بررسی شد. سینگال در مطالعه خود به مزایای استفاده از پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای در ترکیب با میکروتوربین‌ها تحت فشار بالا یا تحت فشار اتمسفر پرداخته است. هم‌چنین ساختمان و جنس اجزاء پیل، نمودار ولتاژ- جریان تولیدی این پیل برای سوخت هیدروژن بررسی شده است[۴]. از سال ۱۹۹۷ در هلند یک نمونه ۱۰۰ کیلوواتی از این سیستم تحت فشار اتمسفر، برای تولید هم‌زمان توان و حرارت شروع به کار کرد. با ساخت میکروتوربین‌هایی با توان زیر ۲۵۰ کیلووات و امکان ترکیب عملی آن‌ها با پیل‌های سوختی موجود، پژوهش‌ها در زمینه سیستم ترکیبی شتاب بیشتری گرفت. اولین سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز در سال ۲۰۰۰ در

17 Tubular Solid Oxide Fuel Cell (TSOFC)
18 Recuperator
29 Planar Solid Oxide Fuel Cell (PSOFC)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.3.6.9]

سیستم دارای توان اسمی ۲۲۰ کیلووات بود. در این سیستم از پیل سوختی اکسید جامد که در هلند آزمایش شده بود، استفاده شده است[۵]. اختلاف پتانسیل تولید شده توسط پیل یا ولتاژ آن، یک عامل بسیار مهم در تعیین عملکرد آن می‌باشد. از طرفی در پیل سوختی به دلائل مختلف افت ولتاژ وجود دارد. چان و همکاران تحلیل کاملی از افت ولتاژ درون پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای و حساسیت ولتاژ نسبت به ضخامت اجزاء پیل را ارائه کردند[۶].در ادامه این کار، چان و همکاران یک سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی را مدل‌سازی کردند. در این سیستم ترکیبی از یک پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای با به‌سازی داخلی[۱۹]، که متان درون خود پیل به هیدروژن تبدیل می‌شود، استفاده شده است[۷].دمای گازهای خروجی از توربین گاز معمولاً زیاد است و می‌توان جهت تولید بخار آب از آن استفاده نمود. یکی از جنبه‌های تجاری در استفاده از این بخار، توربین گاز با تزریق بخار[۲۰] می‌باشد. در آخرین پژوهش انجام گرفته در این زمینه، عالم رجبی و مطهر به آنالیز اگزرژی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای و توربین گاز با تزریق بخار پرداختند. برای این منظور از حرارت گازهای خروجی توربین برای تولید بخار و تزریق آن به محفظه احتراق استفاده شده است، که باعث افزایش راندمان اگزرژی و راندمان حرارتی به ترتیب به میزان ۱۲/۱۱ درصد و ۱۲/۳۱ درصد شده است[۸].توربین گاز نقش بسیار مهمی در تأمین برق مورد نیاز کشور مخصوصاً در زمان اوج مصرف بر عهده دارد. یکی از معایب اصلی توربین گازی، تغییرات زیاد توان تولید و راندمان آن بر اثر تغییر شرایط جوی می‌باشد. از طرفی در زمان اوج مصرف شبکه برق ایران و هم‌زمان با ماه‌های گرم سال، توان تولید توربین گازی تحت تأثیر افزایش دمای محیط، به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، بنابراین اتخاذ روش‌هایی جهت سرمایش هوای ورودی کمپرسور و بازیابی توان از دست رفته آن ضروری می‌باشد. در این مطالعه به بررسی تأثیر سرمایش هوای ورودی کمپرسور در سیکل ترکیبی پیل سوختی و توربین گاز با تزریق بخار پرداخته شده است.

علاوه بر هیدروژن، منوکسید کربن و سایر هیدروکربن‌ها نظیر متان به عنوان سوخت نیز استفاده می‌شوند. ولتاژ بازگشت پذیر پیل سوختی (V_{re}) از رابطه زیر که به ولتاژ نرنست معروف است، محاسبه می‌شود:

$$V_{re}=V^0+\Delta V=-\frac{\Delta G_0^0}{n_e F}+\frac{R_u T}{n_e F}\ln\frac{P_{H_2}\sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \qquad (۴)$$

در رابطه فوق ΔG_0^0 تغییرات تابع گیبس واکنش در شرایط استاندارد می‌باشد. F ثابت فارادی و برابر بار یک مول الکترون است. در یک پیل سوختی، به ازای مصرف یک مولکول هیدروژن و تشکیل یک مولکول آب، n_e تا الکترون از مدار خارجی عبور می‌کند، که در اینجا مقدار آن ۲ است. R_u ثابت جهانی گازها، T دمای پیل سوختی و P_i فشار پاره‌ای اجزاء موجود در واکنش الکتروشیمیایی است. ولتاژ نرنست، ولتاژ مدار باز سیستم است. با عبور جریان از درون سلول به علت وقوع افت ولتاژ، ولتاژ پیل از مقدار ایده‌آل خود کمتر می‌شود. برای محاسبه ولتاژ واقعی پیل باید افت‌های مربوط به بازگشت ناپذیری‌ها را نیز درنظر گرفت. این افت‌ها ناشی از سرعت انجام واکنش، مقاومت درونی، تغییرات غلظت و موارد دیگر می‌باشد. با اعمال افت‌های ولتاژ و کم کردن آن از ولتاژ بازگشت پذیر، ولتاژ واقعی پیل سوختی به دست خواهد آمد. افت ولتاژ درون پیل سوختی را با نام اضافه ولتاژ[۳۰] نیز می‌شناسند. افت ولتاژها را می‌توان در سه گروه اصلی افت ولتاژ فعال‌سازی[۳۱]، افت ولتاژ اهمی[۳۲] و افت ولتاژ غلظت یا انتقال جرم[۳۳] طبقه بندی کرد. روابط مربوط به محاسبات افت ولتاژها در مرجع [۸] به طور کامل شرح داده شده است. با در نظر گرفتن کلیه پدیده‌های حاکم بر پیل سوختی، مقدار ولتاژ خروجی پیل به صورت رابطه زیر خواهد بود:

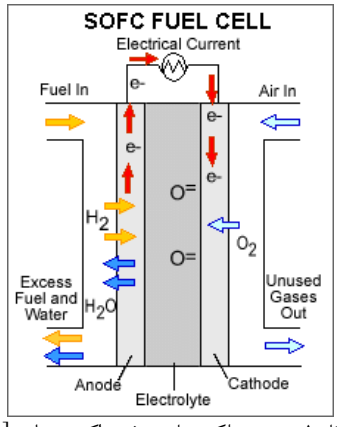
(۵)

$$V=V_{re}-V_{act}-V_{ohm}-V_{conc}$$

عملکرد یک پیل سوختی عموماً با منحنی ولتاژ بر حسب چگالی جریان نمایش داده می‌شود، که به آن منحنی قطبیت (پلاریزاسیون)[۳۴] می‌گویند.

۲- تحلیل الکتروشیمیایی پیل سوختی اکسید جامد

مطابق شکل ۱، در کاتد اکسیژن هوا با الکترون ترکیب می‌شود و یون اکسیژن را تولید می‌کند. هنگامی که یک سوخت گازی حاوی هیدروژن از آند عبور می‌کند، یون‌های اکسیژن از شبکه کریستالی الکترولیت عبور می‌کنند، تا سوخت را اکسید کنند.



شکل ۱- نحوه عملکرد پیل سوختی اکسید جامد [۹]

نکته بسیار مهمی که باید در طراحی پیل منظور گردد آن است

19 Internal Reforming (IR)
20 Steam Injected Gas Turbine (SIGT)
30 Over voltage or Over potential
31 Activation Loss (V_{act})
32 Ohmic Loss (V_{ohm})
33 Mass Transport or Concentration Loss (V_{conc})
34 Polarization Curve

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.3.6.9]

است[۱۰]:

واکنش آند:

$$H_2+O^{-2}\leftrightarrow H_2O+2e^- \quad (۱)$$

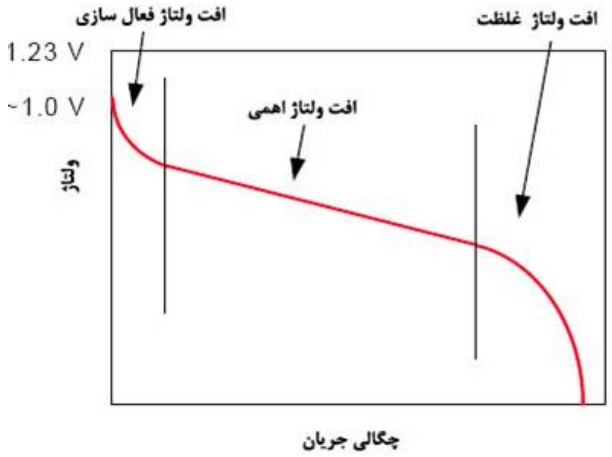
واکنش کاتد:

$$\frac{1}{2}O_2+2e^-\leftrightarrow O^{-2} \quad (۲)$$

واکنش کلی پیل سوختی:

$$H_2+\frac{1}{2}O_2\leftrightarrow H_2O \quad (۳)$$

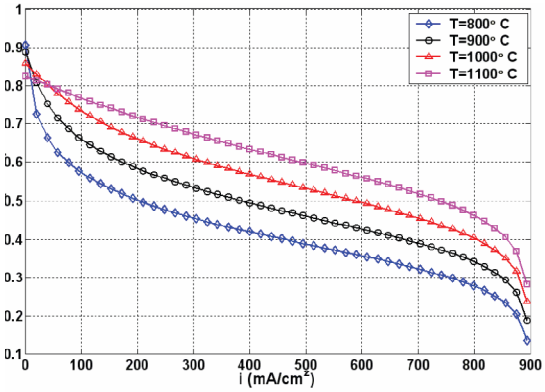
معمولاً، یک پیل واحد ولتاژی بین صفر تا یک ولت تولید می‌کند. مطابق شکل ۲ در منحنی قطبیت، بیشترین ولتاژ بازگشت پذیر همراه با افت‌های ولتاژ نشان داده شده است. در حالت کلی، بیشترین ولتاژ تئوری مربوط به زمانی است که جریانی وجود ندارد. ولی در عمل، ولتاژ مفید خروجی مقداری کمتر از ولتاژ تئوری است و با افزایش بار و چگالی جریان مقدار آن کاهش می‌یابد[۹].



شکل ۲- منحنی قطبیت پیل سوختی [۹]

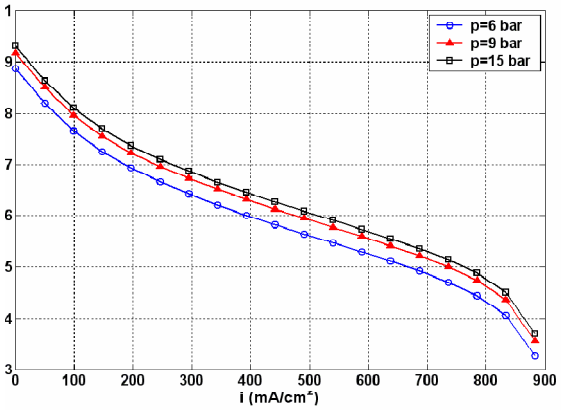
منحنی قطبیت برای پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای مورد مطالعه در دماها و فشارهای کاری متفاوت در شکل ۳ و ۴ رسم شده است. سوخت مورد استفاده هیدروژن و اکسایندهٔ اکسیژن است[۱۰].همان‌گونه که از شکل ۳ بر می‌آید، افزایش دمای سوخت و هوای ورودی به پیل سوختی سبب افزایش نرخ فعل و انفعال واکنش‌های الکتروشیمیایی در پیل می‌شود و ولتاژ افزایش خواهد یافت.

هوای محیط وارد سیستم خنک کاری تبخیری شده و سپس از نقطه ۱ وارد کمپرسور هوا شده و تا حالت ۲ فشرده می‌شود. هوای فشرده شده وارد بازیاب حرارتی می‌شود و با جذب حرارت از جریان گرم خروجی توربین دمای آن تا نقطه ۵ بالا می‌رود. هوای گرم شده در بازیاب حرارتی، وارد استاک پیل که، چگالی شدت جریان گرفته شده از پیل در نقطه طراحی باید در ناحیه افت‌های ناشی از مقاومت در پیل سوختی و به دور از ناحیه غلظت باشد تا سیستم بتواند توان الکتریکی خود را به صورت پایداری تولید نماید.



شکل ۳- نمودار ولتاژ- چگالی جریان پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای در دماهای مختلف و فشار ۱bar [۱۰]

در شکل ۴ اثر فشار بر عملکرد پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل و همچنین رابطه نرنست افزایش فشار باعث افزایش ولتاژ پیل سوختی می‌گردد. همان‌طور که از شکل‌های ۳ و ۴ در مقایسه با شکل ۲ پیداست، در چگالی جریان‌های پایین افت ولتاژ غالب مربوط به فعال‌سازی است. با زیاد شدن جریان و مقاومت اهمی، افت ولتاژ بیشتر و در نتیجه ولتاژ کاهش می‌یابد. شکل لگاریتمی افت ولتاژ غلظت باعث خم شدن نمودار در چگالی جریان‌های بالاتر می‌شود.



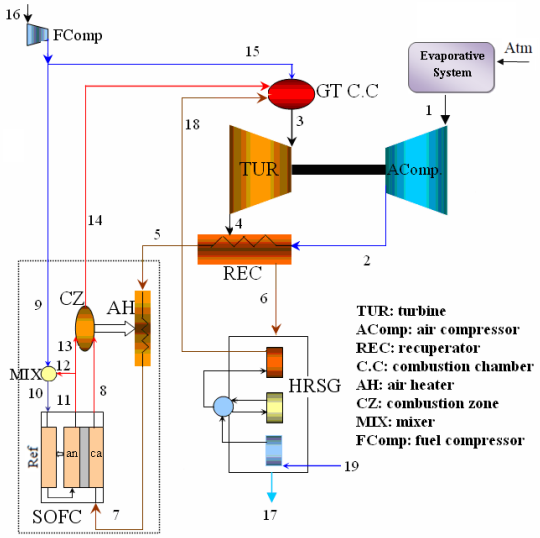
شکل ۴- نمودار ولتاژ- چگالی جریان پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای در فشارهای مختلف و دمای ۱۰۰۰°C [۱۰]

۳- طرح کلی سیکل ترکیبی

برای مدل‌سازی سیکل ترکیبی، نمای شماتیک سیکل مورد نظر به صورتی که در شکل ۵ مشخص شده، در نظر گرفته می‌شود. در این سیکل، ابتدا از سوی دیگر، آب در نقطه ۱۹ وارد صرفه جو شده و با عبور از تبخیر

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.3.6.9]

سوختی[۲۱] می‌گردد و پس از گرم شدن توسط گازهای گرم خروجی از ناحیه احتراقی در گرم‌کن هوا، از نقطه ۷ وارد قسمت کاتد می‌شود. لازم بذکر است که استاک پیل سوختی، شامل تعداد زیادی تک سلول است که به منظور افزایش ولتاژ خروجی و توان الکتریکی به دنبال هم سری شده‌اند. از طرف دیگر سوخت (متان خالص) در نقطه ۱۶ وارد کمپرسور سوخت شده و تا نقطه ۹ و ۱۵ فشرده می‌گردد. سپس در نقطه ۹ وارد همزن شده و با بخار و دیگر اجزاء برگشت داده شده از آند مخلوط گشته و از نقطه ۱۰ وارد پیل سوختی با به‌سازی داخلی می‌گردد. انرژی حرارتی مورد نیاز فرآیند به‌سازی از انجام واکنش الکتروشیمیایی درون پیل سوختی تأمین می‌شود. پس از انجام واکنش الکتروشیمیایی درون پیل سوختی و تولید کار الکتریکی، جریان هوای خروجی کاتد در نقطه ۸ و جریان گازهای خروجی آند در نقطه ۱۱ از پیل سوختی خارج می‌گردد. پس از برگشت مقداری از خروجی آند در نقطه ۱۲، باقیمانده خروجی آند از نقطه ۱۳ وارد ناحیه احتراقی پیل سوختی شده، با سوختن تمام هیدروژن، منوکسید کربن و یا متان باقیمانده در نقطه ۱۴ وارد محفظه احتراق توربین گاز می‌شود. سوخت اضافی هم جهت رساندن دمای محصولات به دمای مورد نیاز برای ورودی توربین از نقطه ۱۵ وارد می‌شود. محصولات احتراق در نقطه ۳ وارد توربین شده، پس از انجام کار توسط توربین در نقطه ۴ از آن خارج و به صورت نامخلوط با هوای خروجی کمپرسور وارد بازیاب حرارتی می‌گردد. سپس، در نقطه ۶ وارد مبدل بازیاب تولید بخار شده و با عبور از فوق گرم‌کن، تبخیر کننده و صرفه جو و انتقال حرارت به آن، در نقطه ۱۷ از آن خارج می‌شود.



شکل ۵- نمای شماتیک سیکل ترکیبی توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد

و دگرگونی آب-گاز دلالت می‌کند. $\dot{n}$ نرخ جریان مولی اجزاء گاز و زیر نویس tot کل جریان مولی مخلوط گاز به‌سازی شده می‌باشد. K_p برای واکنش‌های به‌سازی بخار و دگرگونی آب-گاز تابع دما بوده که به صورت یک تابع چند جمله‌ای نمایش داده می‌شود:

کننده و فوق گرم‌کن، از نقطه ۱۸ به صورت بخار فوق گرم خارج و وارد محفظه احتراق توربین گازی می‌شود.

۴- مدل‌سازی ترمودینامیکی پیل سوختی اکسید جامد

هر جزء از سیستم شکل ۵ را به صورت یک حجم کنترل در نظر می‌گیریم. پیل سوختی اکسید جامد از جنبه ترمودینامیکی به همراه واکنش‌های الکتروشیمیایی آن و بر اساس روابط و اطلاعات مربوط به پیل سوختی لوله‌ای مدل شده است. واکنش‌های تعادلی به‌سازی بخار[۳۵] و دگرگونی آب-گاز[۳۶] به صورت ذیل در به‌ساز انجام می‌گیرد[۱۱ و ۱۲]:

معادله به‌سازی بخار:

(۶)

$$\underbrace{CH_4}_{\dot{x}} + \underbrace{H_2O}_{\dot{x}} \leftrightarrow \underbrace{CO}_{\dot{x}} + 3\underbrace{H_2}_{\dot{x}} \qquad (\Delta H_0 = 206\ kJ/kmol)$$

معادله دگرگونی آب-گاز:

(۷)

$$\underbrace{CO}_{\dot{y}} + \underbrace{H_2O}_{\dot{y}} \leftrightarrow \underbrace{CO_2}_{\dot{y}} + \underbrace{H_2}_{\dot{y}} \qquad (\Delta H_0 = -41\ kJ/kmol)$$

و معادله کلی به صورت ذیل نوشته می‌شود:

(۸)

$$CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2$$

یعنی از لحاظ تئوری هر مول متان ۴ مول هیدروژن تولید می‌کند. واکنش اول گرماگیر و واکنش دوم گرماده است. در واکنش به‌سازی بخار (رابطه ۶)، $\dot{x}$ مول بر ثانیه متان همراه $\dot{x}$ مول بر ثانیه بخار آب واکنش داده، $\dot{x}$ مول بر ثانیه گاز منوکسید کربن و $3\dot{x}$ مول بر ثانیه هیدروژن تولید می‌کند. در واکنش دگرگونی آب-گاز (رابطه۷)، $\dot{y}$ مول بر ثانیه گاز منوکسید کربن با $\dot{y}$ مول بر ثانیه بخار آب واکنش داده و با همین مقدار گاز دی اکسید کربن و هیدروژن در تعادل می‌باشد. ثابت تعادل برای دو واکنش ۶ و ۷ به ترتیب به صورت زیر نوشته می‌شود[۱۱]:

(۹)

$$K_{pr} = \frac{\left(\dot{n}_{H_2,\,in} + 3\dot{x} + \dot{y}\right)^3 \left(\dot{n}_{CO,\,in} + \dot{x} - \dot{y}\right)}{\left(\dot{n}_{H_2O,\,in} - \dot{x} - \dot{y}\right)\left(\dot{n}_{CH_4,\,in} - \dot{x}\right)\left(\dot{n}_{tot}\right)^2} P_{tot}^{\ 2}$$

(۱۰)

$$K_{ps} = \frac{\left(\dot{n}_{H_2,\,in} + 3\dot{x} + \dot{y}\right)\left(\dot{n}_{CO_2,\,in} + \dot{y}\right)}{\left(\dot{n}_{H_2O,\,in} - \dot{x} - \dot{y}\right)\left(\dot{n}_{CO,\,in} + \dot{x} - \dot{y}\right)}$$

که K_p ثابت تعادل و زیر نویس r و s به ترتیب بر به‌سازی بخار

که برای به‌سازی داخلی:

21 Stack
35 Steam Reforming
36 Water-Gas Shifting

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.3.6.9]

$$\log K_p = AT^4+BT^3+CT^2+DT+E \quad (۱۱)$$

A، B، C، D و E ثابت‌های تجربی بوده و در جدول ۱ آورده شده‌اند و دمای تعادل (T)، دمای کاری پیل سوختی در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱- ضرایب مربوط به محاسبه K_p [۱۱]

ثابت	واکنش به‌سازی بخار	واکنش دگرگونی آب-گاز
A	$-۲/۶۳۱۲۱\times۱۰^{-۱۱}$	$۵/۴۷۳۰۱\times۱۰^{-۱۲}$
B	$۱/۲۴۰۶۵\times۱۰^{-۷}$	$-۲/۵۷۴۷۹\times۱۰^{-۸}$
C	$-۲/۲۵۲۳۲\times۱۰^{-۴}$	$۴/۶۳۷۴۲\times۱۰^{-۵}$
D	$۱/۹۵۰۲۸\times۱۰^{-۱}$	$-۳/۹۱۵۰۰\times۱۰^{-۲}$
E	$-۶/۶۱۳۹۵\times۱۰^{۱}$	$۱/۳۲۰۹۷\times۱۰^{۱}$

بخار آب لازم برای به‌سازی متان از جریان برگشتی خروجی آند که حاوی مقدار زیادی بخار آب می‌باشد، تأمین می‌گردد. برای جلوگیری از تشکیل کربن در حین انجام واکنش ۶، باید نسبت بخار آب به کربن[۲۲] که طبق رابطه زیر تعریف می‌شود، عدد نسبتاً بزرگی باشد و معمولاً بین ۲ تا ۳ انتخاب می‌شود[۸].

$$SCR=\frac{\dot{n}_{H_2O,\,in}}{\dot{n}_{CH_4,\,in}} \quad (۱۲)$$

مقدار گازهای خروجی آند که باید برای تأمین مقدار بخار آب برگشت داده شود، نسبت باز گردش[۲۳] نام دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید[۱۰]:

$$RR=\left(\frac{\dot{n}_{CH_4,\,in}}{\dot{n}_{H_2O,\,cell\ exit}}\right)SCR \quad (۱۳)$$

واکنش ۶، واکنشی کند و به شدت گرماگیر است. در حالی که واکنش ۷، واکنشی سریع و تا حدی گرماده است. بنابراین در کل واکنش به‌سازی متان گرماگیر می‌باشد که حرارت مورد نیاز برای انجام آن از حرارت واکنش الکتروشیمیایی تأمین می‌شود[۸].

با نوشتن معادله موازنه انرژی برای پیل سوختی، با توجه به شکل ۵ خواهیم داشت:

$$\left(\sum \dot{n}_i\tilde{h}_i\right)_{in}=\left(\sum \dot{n}_e\tilde{h}_e\right)_{out}+\dot{W}_{DC,\,SOFC} \quad (۱۴)$$

بخار آب را در هوا به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$P_{H_2O}=\phi.P_{sat@T_{air}} \quad (۲۰)$$

در رابطه فوق T_{air} دمای هوا بر حسب درجه سانتیگراد و ϕ رطوبت نسبی می‌باشد. برای یافتن فشار بخار اشباع بر حسب bar در دمای هوای محیط از رابطه تجربی زیر استفاده می‌کنیم[۱۴]:

$$P_{sat@T_{air}}=220.64\exp\left[\left(\frac{647.14}{T_{air}+273.15}\right).f(\tau)\right] \quad (۲۱)$$

$$\dot{Q}_{cell}=-\dot{Q}_{ref} \quad (۱۵)$$

دمای خروجی از ناحیه احتراقی با برقرار کردن معادله موازنه انرژی روی حجم کنترل آن به دست می‌آید:

$$\left(\sum \dot{n}_i\tilde{h}_i\right)_{in}=\left(\sum \dot{n}_e\tilde{h}_e\right)_{out}+\dot{Q}_{AH} \quad (۱۶)$$

$\dot{Q}_{AH}$ حرارت داده شده به گرم‌کن هوا جهت گرمایش هوای ورودی کاتد است.

$$\dot{Q}_{AH}=\dot{n}_a\tilde{C}_{Pa}\left(T_7-T_5\right) \quad (۱۷)$$

توان تولید شده در پیل سوختی مستقیماً به هیدروژن مصرف شده در واکنش الکتروشیمیایی بستگی دارد. ضریب مصرف سوخت[۳۷] در پیل سوختی به صورت نسبت هیدروژن واکنش داده به هیدروژن ورودی به آند تعریف می‌شود:

$$U_f=\frac{\dot{n}_{H_2,\,in}-\dot{n}_{H_2,\,out}}{\dot{n}_{H_2,\,in}}=\frac{\dot{n}_{H_2,\,reacted}}{4\dot{n}_{CH_4,\,in}}=\frac{\dot{Z}}{4\dot{n}_{CH_4,\,in}} \quad (۱۸)$$

در رابطه فوق $\dot{Z}$ مقدار مولی هیدروژن می‌باشد که در واکنش الکتروشیمیایی مصرف می‌شود. جریان مستقیم پیل سوختی به صورت زیر خواهد بود:

$$I=iA_c=n_eF\dot{Z} \quad (۱۹)$$

که، A_c سطح فعال پیل سوختی و i چگالی جریان می‌باشد.

۵- مدل‌سازی ترمودینامیکی سیکل توربین گاز

هوای ورودی به کمپرسور هوای محیط می‌باشد. کسر مولی عناصر موجود در هوای خشک در جدول زیر آورده شده است[۱۳]:

جدول ۲- کسر مولی عناصر موجود در هوای خشک [۱۳]

عنصر	CO_2	O_2	N_2	Ar	Ne	He
کسر مولی	۰/۰۰۰۳۱۴	۰/۲۰۹۴۷۶	۰/۷۸۰۸۴	۰/۰۰۹۳۴	۰/۰۰۰۰۱۸	۰۰۰۰۰۵ ۰/

در اینجا با تقریب، خواص سه عنصر آخر را برابر آرگون فرض می‌کنیم. در نتیجه هوای خشک شامل عناصر مرجع دی اکسید کربن، اکسیژن، نیتروژن و آرگون می‌باشد. با اضافه شدن رطوبت یا بخار آب به هوای خشک کسرهای مولی فوق تغییر خواهند نمود. برای تعیین مقدار رطوبت در هوا، فشار پاره‌ای

22 Steam/Carbon Ratio (SCR)
23 Recirculation Ratio (RR)
37 Fuel Utilization Factor (U_f)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.3.6.9]

$$-15.9393\tau^{4}+1.77516\tau^{7.5} \quad (۲۲)$$

$$\tau=1-\frac{T_{air}+273.15}{647.14} \quad (۲۳)$$

با داشتن فشار بخار هوا مقدار مولی آن در ترکیب مشخص می‌شود و با به دست آوردن مقدار مولی بخار آب در یک کیلومول هوای خشک، کسر مولی همه عناصر در هوای مرطوب محاسبه می‌شود.در این مطالعه توربین و کمپرسور به صورت آدیاباتیک با جریان پایدار تحلیل می‌شوند. با فرض انجام فرآیند آیزنتروپیک از ۱ تا ۲ داریم[۱۵]:

$$\frac{T_{2is}}{T_1}=\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{(k-1)}{k}}=r_P^{\frac{(k-1)}{k}} \quad (۲۴)$$

راندمان آیزنتروپیک کمپرسور هوا به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{AC}=\frac{w_{AC\,is}}{w_{AC}}=\frac{h_{2is}-h_1}{h_2-h_1} \quad (۲۵)$$

قانون اول ترمودینامیک برای کمپرسور هوا عبارت است از:

$$\dot{W}_{AC}=\dot{m}_a(h_2-h_1)=\dot{m}_a C_{Pa}(T_2-T_1) \quad (۲۶)$$

بازیاب حرارتی یک مبدل حرارتی است که گازهای گرم خروجی از توربین به آن وارد شده و با انتقال حرارت به جریان هوای خروجی از کمپرسور، هوای ورودی را گرم می‌کند. ضریب کارآیی (نسبت حرارتی)[۲۴] یک عامل بسیار مهم در تعیین عملکرد یک مبدل حرارتی می‌باشد. با داشتن دماهای خروجی توربین و کمپرسور، هم‌چنین دبی‌های جرمی جریان هوا و گازهای داغ حاصل از احتراق و فرض عدم انتقال حرارت به محیط، با استفاده از روش ϵ_{REC}-NTU می‌توان محاسبات مربوط به انتقال حرارت و دماهای خروجی بازیاب را انجام داد. در این روش ضریب کارآیی به صورت نسبت مقدار حرارت انتقال یافته واقعی به بیشترین مقدار انتقال حرارت تئوری تعریف می‌شود:

$$\epsilon_{REC}=\frac{C_c(T_{c,\,out}-T_{c,\,in})}{C_{min}(T_{h,\,in}-T_{c,\,in})}=\frac{C_h(T_{h,\,in}-T_{h,\,out})}{C_{min}(T_{h,\,in}-T_{c,\,in})} \quad (۲۷)$$

که در آن $C=\dot{m}C_P$. در رابطه فوق $C_{min}=C_c$، وقتی $C_h > C_c$ و $C_{min}=C_h$، وقتی $C_c > C_h$.

با توجه به اینکه دمای خروجی محفظه احتراق (دمای شعله) زیاد می‌باشد، احتراق کامل در نظر گرفته می‌شود، یعنی تمام هیدروژن به بخار آب و تمام کربن به دی اکسید کربن تبدیل می‌شود. معادله احتراق برای سوختن کامل هر هیدروکربنی به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$)n_{CO_2}CO_2+n_{H_2O}H_2O+n_{Ar}Ar \quad (۲۸)$$

λ درصد هوای اضافی است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\lambda=\frac{A}{a_{th}}\times 100 \quad (۲۹)$$

a_{th} ضریب هوای تئوری می‌باشد و مقدار آن $n+\frac{m}{4}$ است که در اینجا برابر ۲ است. با فرض فرآیند احتراق آدیاباتیک معادله موازنه انرژی روی حجم کنترل محفظه احتراق به صورت زیر می‌باشد:

$$\sum_{react} n_i\tilde{h}_i=\sum_{prod} n_e\tilde{h}_e \quad (۳۰)$$

نسبت سوخت به هوا در محفظه احتراق از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$f=\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \quad (۳۱)$$

هم‌چنین با تزریق بخار به محفظه احتراق، نسبت تزریق بخار برابر است با:

$$x=\frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_a} \quad (۳۲)$$

در نتیجه مقدار بخار وارد شده به ازای ورود یک کیلومول سوخت به محفظه احتراق عبارت است از:

$$\dot{n}_s=\frac{M_a}{M_s}.x.A.(1+a+b+c+d) \quad (۳۳)$$

M_a و M_s به ترتیب جرم مولکولی هوا و بخار می‌باشد. با در نظر گرفتن فرآیند آیزنتروپیک در توربین خواهیم داشت:

$$\frac{T_3}{T_{4is}}=\left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{kg-1}{kg}} \quad (۳۴)$$

$$\eta_{GT}=\frac{W_{GT}}{W_{GT_{is}}}=\frac{h_3-h_4}{h_3-h_{4is}} \quad (۳۵)$$

قانون اول ترمودینامیک برای توربین گازی برابر است با:

$$\dot{W}_{GT}=\dot{m}_g(h_3-h_4)=\dot{m}_a(1+f+x)C_{Pg}(T_3-T_4) \quad (۳۶)$$

در مبدل بازیاب تولید بخار از حرارت گازهای خروجی از توربین جهت تهیه بخار و تزریق بخار تولید شده به محفظه احتراق به منظور افزایش کارآیی سیکل استفاده می‌شود. طبق تعریف، اختلاف دمای نقطه پینچ[۲۵] در یک مبدل بازیاب برابر اختلاف دمای بین گازهای خروجی از تبخیر کننده (T_{pp}) و دمای اشباع متناظر با فشار تبخیر کننده (T_{w2}) می‌باشد. اختلاف دمای نقطه پینچ از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

24 Effectiveness (Thermal Ratio)
25 Pinch Point Temperature

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.3.6.9]

$$\Delta T_{pp}=T_{pp}-T_{w2} \quad (۳۷)$$

اختلاف دمای بین گازهای ورودی به مبدل بازیاب و بخار خروجی از فوق گرم‌کن به نام رسش دما[۲۶] از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta T_{ap}=T_6-T_s \quad (۳۸)$$

معادله بالانس انرژی برای حجم کنترل شامل تبخیر کننده و فوق گرم‌کن خواهد بود با:

$$\dot{m}_g(h_6-h_{pp})=\dot{m}_s(h_s-h_{w2}) \quad (۳۹)$$

هم‌چنین معادله بالانس انرژی برای صرفه جو به صورت زیر می‌باشد:

(۴۰)

$$\dot{m}_g(h_{pp}-h_e)=\dot{m}_s(h_{w2}-h_{w1})$$

۶- توان سیکل ترکیبی پیل سوختی و توربین گاز

توان مستقیم تولید شده توسط پیل سوختی از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$\dot{W}_{DC,\,SOFC}=VI=n_eF\dot{Z}V \quad (۴۱)$$

بیشترین راندمان ممکن برای یک موتور حرارتی، یعنی وسیله‌ای که با دو منبع سرد و گرم در تماس بوده و به صورت سیکلی کار می‌کند (مانند توربین گاز)، از رابطه کارنو به دست می‌آید. اما در مورد پیل سوختی از رابطه کارنو برای به دست آوردن بیشترین حد راندمان استفاده نمی‌شود. در مورد پیل سوختی، نسبت بیشترین کار الکتریکی تولید شده از جریان سوخت و هوا به بیشترین حرارتی که از سوختن همان سوخت و هوا تولید می‌شود، را در نظر می‌گیرند. بیشترین کار الکتریکی برابر تغییرات تابع گیبس و بیشترین حرارت

جدول ۴- پارامترهای ثابت برای مدل‌سازی ترمودینامیکی [۸، ۱۷ و ۱۸]

پارامتر	مقدار
ضریب کارآیی بازیاب حرارتی	۰/۹۲
افت فشار سمت گاز در بازیاب حرارتی (bar)	۰/۱۳
افت فشار سمت هوا در بازیاب حرارتی (bar)	۰/۰۶
افت فشار مبدل بازیاب تولید بخار (bar)	۰/۰۱۲۵
افت فشار محفظه احتراق (%)	۵
افت فشار خروجی توربین گاز (%)	۱
راندمان محفظه احتراق	۰/۹۹
راندمان مکانیکی	۰/۹۵
راندمان مبدل ژنراتور	۰/۹۸
اختلاف دمای نقطه پینچ (K)	۱۰
رسش دما (K)	۴۰
ارزش حرارتی پایین متان (kJ/mol)	۸۰۲/۳
ضریب مصرف سوخت	۰/۸۵
نسبت بخار آب به کربن	۲/۵۰
فشار کاری پیل سوختی (bar)	۹/۹۰

حاصل از احتراق سوخت، آنتالپی احتراق می‌باشد. بنابراین بیشترین راندمان برابر خواهد بود با[۱۰]:

(۴۲)

$$\eta_{SOFC,\,max}=\frac{\Delta G_0}{\Delta H_0}$$

راندمان حرارتی برای این سیکل به صورت زیر نوشته می‌شود:

(۴۳)

$$\eta_{GT}=\frac{\dot{W}_{GT}}{\dot{m}_f LHV}$$

LHV ارزش حرارتی پایین متان است. توان الکتریکی خالص تولید شده توسط سیکل ترکیبی و راندمان کل سیکل به ترتیب عبارتند از:

(۴۴)

$$\dot{W}_{CYC}=\dot{W}_{AC,\,SOFC}+\dot{W}_{AC,\,GT}$$

(۴۵)

$$\eta_{CYC}=\frac{\dot{W}_{CYC}}{(\dot{m}_f LHV)_{CYC}}$$

نسبت توان‌های تولیدی پیل سوختی و توربین گاز هم به عنوان نسبت توان معرفی می‌شود:

(۴۶)

$$\text{Power Ratio}=\frac{\dot{W}_{AC,\,SOFC}}{\dot{W}_{AC,\,GT}}$$

۷- نتایج

توربین گازی مورد مطالعه برای ترکیب شدن با پیل سوختی اکسید جامد، توربین گازی مرکوری ۵۰ می‌باشد. در اینجا سیکل ساده توربین گاز به همراه بازیاب حرارتی در نظر گرفته شده است. مشخصه‌های عملکرد توربین گازی که توسط شرکت سازنده ارائه گردیده است، مطابق جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳- مشخصه‌های عملکرد توربین گاز مرکوری ۵۰ [۱۶]

کمپرسور	نسبت فشار	۹/۹۰
	راندمان آیزنتروپیک	۰/۸۶
	دبی جرمی جریان هوا (kg/s)	۱۷/۸۰
محفظه احتراق	دمای خروجی (°C)	۱۱۶۰/۰۰
توربین گاز	راندمان آیزنتروپیک	۰/۸۶
	دمای داخلی روتور (°C)	۱۱۳۰/۰۰
بازیاب حرارتی	دمای جریان گاز خروجی (°C)	۳۷۴/۰۰

26 Temperature Approach

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.3.6.9]

راندمان تبدیل برق مستقیم به متناوب (پیل سوختی)	۰/۹۶
دبی جرمی سوخت ورودی به پیل سوختی (kg/s)	۰/۲۶۱
دمای محیط و دمای آب ورودی (°C)	۲۵/۰۰
فشار محیط (bar)	۱/۰۱۳۲۵
رطوبت نسبی محیط (%)	۶۰/۰۰
چگالی جریان حدی (mA/cm^2)	۹۰۰/۰۰

دمای ورودی توربین گاز همان دمای خروجی محفظه احتراق در نظر گرفته شده است. هم‌چنین برای داشتن تمام اطلاعات لازم جهت مدل‌سازی، پارامترهای موجود در جدول ۴ نیز اعمال شده است، که در بسیاری از مراجع برای تحلیل توربین‌های گازی مشابه استفاده شده است[۸، ۱۷ و ۱۸].در اینجا برای ارتقاء دادن سیکل موجود از یک مبدل بازیاب تک فشاره استفاده شده است که فشار بخار تزریق شده در آن ۳bar از فشار محفظه احتراق بیشتر فرض می‌شود[۱۷]. جهت انجام مدل‌سازی، دمای ورودی کاتد و دمای ماکزیمم پیل سوختی به ترتیب برابر ۹۰۰°C و ۱۰۲۰°C فرض شده‌اند[۱۰].با سرد شدن هوای ورودی به کمپرسور، کار مصرفی آن کاهش یافته و در عین حال برای کمپرسورهای کوچک که تقریباً دبی حجمی هوای ثابتی دارند، می‌توان این فرض را نمود که با سرد شدن هوای ورودی، چون چگالی هوا افزایش یافته، دبی جرمی افزایش می‌یابد. افزایش دبی جرمی هوای ورودی به محفظه احتراق به ما امکان تزریق سوخت بیشتری را خواهد داد که باعث افزایش دبی جرمی محصولات احتراق عبوری از توربین خواهد شد. چون دبی جرمی گاز داغ عبوری از توربین گاز، تأثیر مستقیمی بر توان تولید توربین دارد، لذا کاهش دما و افزایش دبی جرمی هوای ورودی کمپرسور، باعث افزایش توان تولیدی توربین

جدول ۶ عملکرد سیستم در نقطه طراحی برای سیکل ترکیبی همراه تزریق آب و بخار

پارامترهای مورد بررسی	SOFC-SWIGT Media	SOFC-SWIGT Fog
توان خروجی (kW)	۱۳۹۸۱	۱۴۲۴۶/۵
راندمان حرارتی (%)	۵۹/۰	۵۹/۵
دبی جرمی سوخت (kg/s)	۰/۴۷۲	۰/۴۷۷
دمای جریان گاز خروجی از بازیاب حرارتی (°C)	۴۱۳	۴۰۴
دمای خروجی از کمپرسور (°C)	۲۹۸/۴	۳۰۵/۰
دمای خروجی از توربین (°C)	۶۶۹/۴	۶۶۱/۰
نسبت توان پیل سوختی به توان توربین	۰/۹۸	۰/۹۵
دبی جرمی سوخت ورودی به محفظه احتراق (kg/s)	۰/۲۱۱	۰/۲۱۷
دمای خروجی از مبدل بازیاب تولید بخار (°C)	۱۳۶/۶	۱۳۵/۰
نسبت تزریق بخار	۰/۱۰۳	۰/۰۹۹

طبق رابطه زیر خواهد شد[۱۹]:

$$\dot{W}_{net}=\dot{m}(q_H-q_L)=\dot{m}(w_t-|w_c|) \quad (۴۷)$$

کاهش کار مصرفی کمپرسور، باعث افزایش کار خالص سیکل شده و به تبع آن راندمان نیز افزایش خواهد یافت:

$$w_{net}=w_t-|w_c| \quad (۴۸)$$

$$\eta_{th}=\frac{w_{net}}{q_H}=1-\frac{1}{(r_p)^{\frac{(k-1)}{k}}}=1-\frac{T_1}{T_2} \quad (۴۹)$$

در جدول ۵ نتایج حاصل برای سیکل ترکیبی پایه (SOFC-GT) و سیکل ترکیبی توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد با تزریق بخار (SOFC-SIGT) به دست آمده است. در جدول ۶ نتایج تحلیل ترمودینامیکی اثر تزریق آب در ورودی کمپرسور (سرمایش تبخیری) بر سیکل ترکیبی توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد به همراه تزریق بخار (SOFC-SWIGT) با دو روش مدیا و فاگ به دست آمده است. تأثیر این دو روش که به صورت مستقیم بر عملکرد کمپرسور عمل می‌کنند، بر سیکل ترکیبی بسیار کمتر از سیکل توربین گازی تنها می‌باشد. از آنجائی که توان خروجی سیکل ترکیبی حاصل جمع توان توربین و پیل سوختی می‌باشد و سرمایش تبخیری تأثیر محسوسی بر توان خروجی پیل نداشته، اثر کلی این روش بر توان خروجی نهایی کاهش می‌یابد.

جدول ۵ عملکرد سیستم در نقطه طراحی برای سیکل ترکیبی پایه و تزریق بخار

پارامترهای مورد بررسی	SOFC-GT	SOFC-SIGT
توان خروجی (kW)	۱۱۹۷۶/۰	۱۳۷۳۶/۰
راندمان حرارتی (%)	۵۹/۰	۵۹/۷
دبی جرمی سوخت (kg/s)	۰/۳۹۰	۰/۴۶۳
دمای جریان گاز خروجی از بازیاب حرارتی (°C)	۳۸۵/۰	۴۳۴/۵
دمای خروجی از کمپرسور (°C)	۳۴۱/۳	۳۴۱/۳
دمای خروجی از توربین (°C)	۶۴۹/۶	۶۶۰/۰
نسبت توان پیل سوختی به توان توربین	۱/۶۶	۱/۱۸
دبی جرمی سوخت ورودی به محفظه احتراق (kg/s)	۰/۱۳۰	۰/۲۰۲
دمای خروجی از مبدل بازیاب تولید بخار (°C)	----	۱۳۳
نسبت تزریق بخار	----	۰/۱۱۲

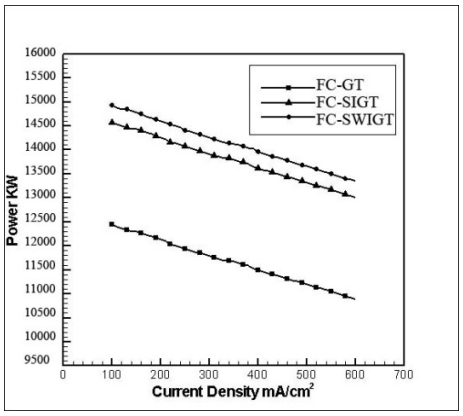
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.3.6.9]

۸- تحلیل پارامتری سیکل ترکیبی پیل سوختی و توربین گاز

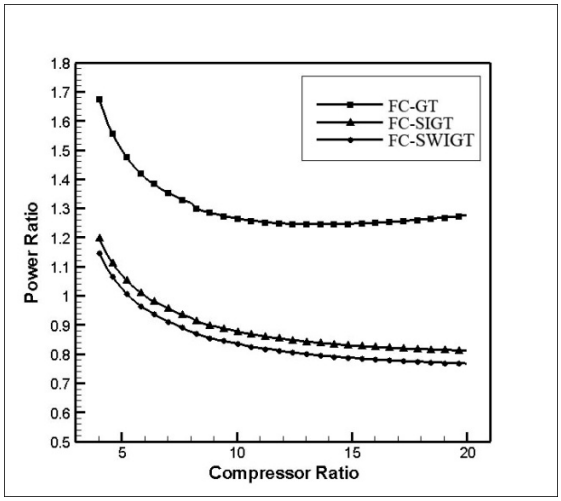
عملکرد سیکل ترکیبی پایه توربین گاز و پیل سوختی و سیکل‌های ارتقاء یافته آن از لحاظ ترمودینامیکی نسبت به چند متغیر بررسی و مقایسه شده است.

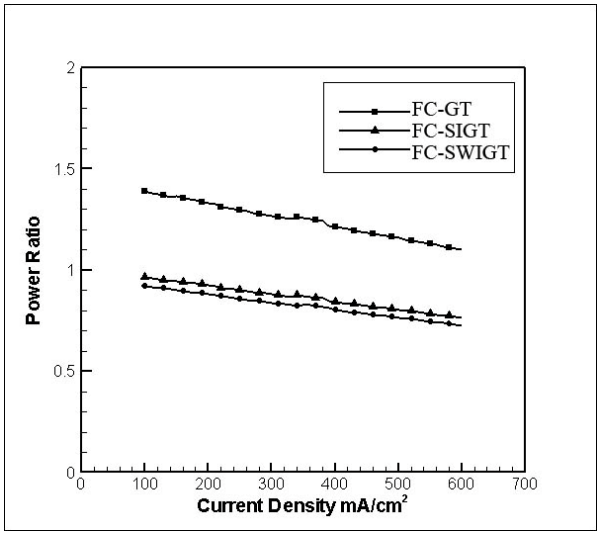
۸-۱- تغییر چگالی جریان الکتریکی در پیل سوختی

چگالی جریان یکی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد پیل سوختی می‌باشد. چگالی جریان در نقطه کارکرد سیستم با توجه به مساحت فعال هر پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای که $834cm^2$ می‌باشد، برابر $300mA/cm^2$ به دست می‌آید. با افزایش چگالی جریان در پیل سوختی، ولتاژ به طور کلی کاهش می‌یابد. بنابراین توان پیل سوختی هم با افزایش چگالی جریان و فرض ثابت ماندن دیگر پارامترها کاهش می‌یابد. شکل ۶ تغییرات توان سیکل ترکیبی پایه و سیکل‌های ارتقاء یافته را بر حسب چگالی جریان نشان می‌دهد. توان پیل سوختی به دلیل تأثیر مستقیم چگالی جریان بر آن کاهش می‌یابد، ولی در توان خروجی توربین گاز اثر چندانی ندارد و در کل توان خروجی سیستم ترکیبی در تمام حالات کاهش می‌یابد.



شکل ۶- نمودار تغییرات توان خروجی بر حسب چگالی جریان



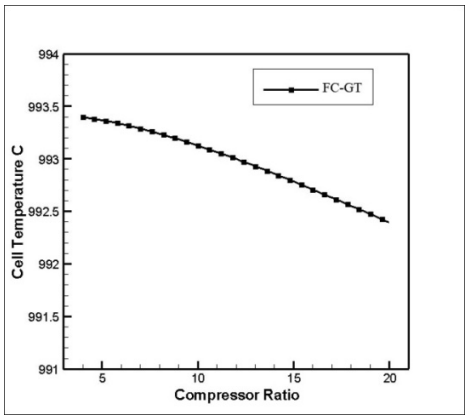


شکل ۷- نمودار تغییرات نسبت توان پیل سوختی به توان توربین بر حسب چگالی جریان

هم‌چنین در شکل ۷ نسبت توان پیل سوختی به توان توربین گاز بر حسب چگالی جریان به تصویر کشیده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت و با توجه به توضیحات فوق روند نمودارها نزولی بوده و نسبت توان با افزایش چگالی جریان کاهش می‌یابد.

۸-۲- تغییر فشار کاری کمپرسور

با افزایش فشار سیستم، طبق نمودار شکل ۴، ولتاژ و در نتیجه توان خروجی پیل سوختی بیشتر می‌شود، به همین جهت دمای خروجی پیل سوختی کاهش پیدا می‌کند. این تغییرات در شکل ۸ نشان داده شده است.

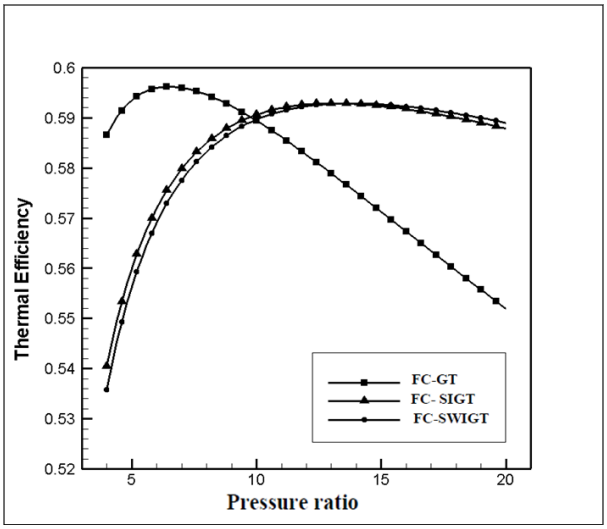


شکل ۸- نمودار تغییرات دمای خروجی پیل سوختی بر حسب نسبت فشار

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.3.6.9]

شکل ۹- نمودار تغییرات نسبت توان پیل سوختی به توان توربین گازی بر حسب نسبت فشار

نمودار تغییرات نسبت توان پیل سوختی به توان توربین گازی بر حسب نسبت فشار در شکل ۹ رسم شده است. به طور کلی با افزایش فشار، توان سیکل پایه و سیکل‌های ارتقاء یافته بیشتر می‌شود. اگر چه توان خروجی پیل سوختی هم با افزایش فشار کاری زیاد می‌شود، ولی در توربین گاز این افزایش محسوس‌تر است. توان سیکل‌های ارتقاء یافته با افزایش فشار، افزایش بیشتری نسبت به سیکل بدون تزریق دارد و از طرفی در سیکل حاوی تزریق بخار و سیکل با تزریق بخار و آب، سهم تولید توان توربین افزایش یافته و در نتیجه طبق نمودار شکل ۹ نسبت توان کمتر می‌شود. هم‌چنین در نسبت فشارهای پایین‌تر، توان کمتری توسط توربین تولید می‌شود و در نتیجه نسبت توان تغییرات بیشتری نسبت به فشار خواهد داشت.



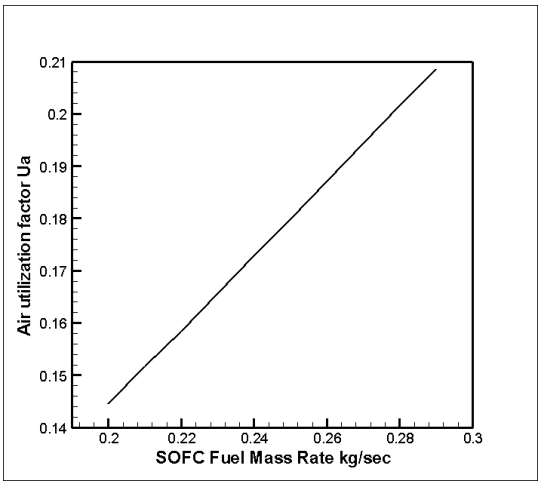
شکل ۱۰- نمودار تغییرات راندمان حرارتی بر حسب نسبت فشار

افزایش دبی سوخت در پیل سوختی اکسید جامد باعث زیاد شدن جریان تولیدی می‌شود. این افزایش جریان طبق معادله ۱۹ رابطه خطی با مصرف هیدروژن در پیل دارد. افزایش جریان باعث بیشتر شدن اضافه ولتاژ پیل شده و تولید حرارت بیشتری را در آن سبب می‌شود که در نتیجه منجر به افزایش دمای پیل خواهد شد. افزایش جریان پیل سوختی توان خروجی آن را افزایش می‌دهد. توان توربین گاز هم به دلیل افزایش دبی گذرنده از توربین با اضافه شدن دبی سوخت، افزایش کمی خواهد داشت و در کل توان با افزایش دبی سوخت افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۰ نمودار تغییرات راندمان حرارتی برای سیکل ترکیبی پایه و دو سیکل ارتقاء یافته ارائه شده است. مطابق شکل ۱۰ در نسبت فشارهای پایین به علت اینکه نسبت توان بالا بوده و نقش توربین گاز در سیکل پایه ترکیبی کم می‌باشد، راندمان حرارتی بالا خواهد بود. ولی با افزایش نسبت فشار و کاهش نسبت توان، راندمان توربین گاز کمتر و در نتیجه راندمان حرارتی سیکل پایه کاهش می‌یابد. برای سیکل‌های ارتقاء یافته در نسبت فشارهای پایین به علت وجود آب تزریقی در ورودی کمپرسور و بخار تزریقی در محفظه احتراق، به سوخت بیشتر نیاز است. این مقدار سوخت جهت رساندن دمای گاز به دمای ورودی توربین (دمای ورودی توربین ثابت و برابر ۱۱۶۰°C فرض شده است.) باید به سیستم اعمال شود. از طرفی به دلیل پایین بودن نسبت فشار، دمای گازهای خروجی از کمپرسور پایین می‌باشد و در کل، موارد ذکر شده باعث کاهش راندمان حرارتی شده، در عین حالی که افزایش توان خروجی نیز حاصل می‌شود. با افزایش نسبت فشار، چون دمای گازهای خروجی کمپرسور بالا رفته و اثر توان توربین در سیکل ترکیبی پر رنگ‌تر شده، در نتیجه راندمان حرارتی افزایش می‌یابد.

۸-۳- تغییر دبی سوخت

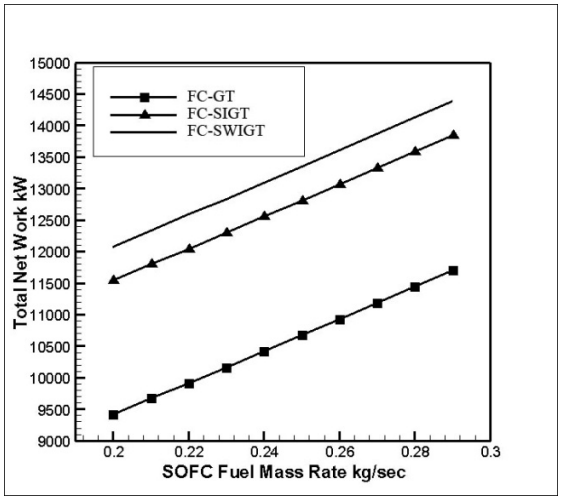
با ثابت نگه داشتن نسبت فشار کمپرسور هوا و سوخت، دبی جرمی هوا و ضریب مصرف سوخت، فقط دبی جرمی سوخت ورودی را تغییر داده و پارامترهای عملکرد سیکل مورد بررسی قرار می‌گیرد. افزایش مصرف سوخت به همراه ثابت ماندن ضریب مصرف سوخت در پیل سوختی به این معناست که انرژی شیمیایی بیشتری در پیل به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. بنابراین سوخت بیشتر و در نتیجه هوای بیشتری در پیل سوختی مصرف خواهد شد که منجر به افزایش ضریب مصرف هوا خواهد شد که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



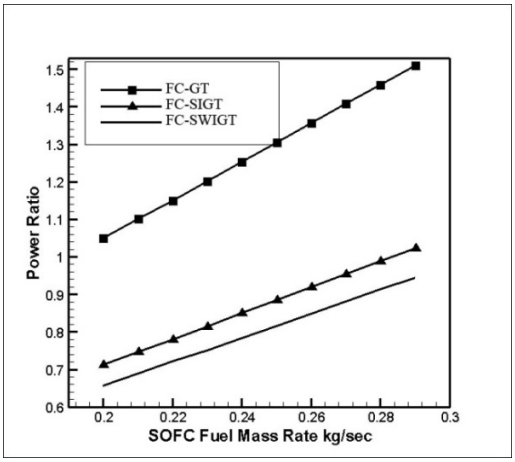
شکل ۱۱- نمودار تغییرات ضریب مصرف هوا بر حسب دبی جرمی سوخت برای سیکل ترکیبی پایه

شکل ۱۲ نشان دهنده تغییرات توان خروجی سیکل ترکیبی پایه و سیکل‌های ارتقاء یافته بر حسب تغییرات دبی جرمی سوخت می‌باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.3.6.9]



شکل ۱۲ نمودار تغییرات توان خروجی بر حسب دبی جرمی سوخت



شکل ۱۲ نمودار تغییرات نسبت توان پیل سوختی به توان توربین بر حسب دبی جرمی سوخت

در دبی‌های پایین سوخت، سهم پیل سوختی در تولید توان کل کمتر شده و در نتیجه نسبت توان پیل به توان توربین کاهش می‌یابد. با افزایش دبی سوخت، توان پیل سوختی و نسبت توان افزایش پیدا می‌کند. این تغییرات در شکل ۱۲ به نمایش در آمده است.

نتیجه گیری

ترکیب پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز با بازیاب مورد تحلیل قرار گرفت. برای سیکل ترکیبی پایه، توان ۱۱۹۷۶/۰ کیلووات و راندمان حرارتی ۵۹/۰ درصد محاسبه شد. سپس با بازیافت حرارت از گازهای داغ خروجی توربین و تولید بخار و تزریق آن به محفظه احتراق، سیستم ارتقاء یافته و باعث بهبود عملکرد توربین گازی می‌شود. تزریق بخار به محفظه احتراق توربین گاز باعث تولید توان ۱۳۷۳۶/۰ کیلووات در سیستم ترکیبی می‌شود. با استفاده از بازیافت حرارت برای تولید بخار، دمای گازهای خروجی از سیستم بسیار کاهش پیدا کرده، که به معنای استفاده بیشتر از انرژی و کاهش آلایندگی حرارتی محیط می‌باشد.هم‌چنین با افزایش سیستم سرمایش تبخیری در ورودی کمپرسور، توان خروجی سیکل ترکیبی به ۱۴۲۴۶/۵ و ۱۳۹۸۱/۰ برای دو روش فاگ و مدیا پیش‌بینی می‌شود، که این افزایش نسبت به سیستم ترکیبی پایه ۱۸/۹۵ درصد افزایش در توان را با روش فاگ از خود نشان می‌دهد. با سرمایش هوای ورودی به کمپرسور، کار مخصوص کمپرسور کاهش یافته و توان خروجی سیستم در دماهای بالای محیط می‌تواند بدون تغییر و یا با کاهش کم همراه باشد. مقایسه پارامتری نسبت به سه عامل مهم چگالی جریان پیل سوختی، نسبت فشار کمپرسور و دبی جرمی سوخت صورت گرفت. افزایش چگالی جریان باعث افزایش افت ولتاژهای درون پیل سوختی شده و این افزایش سبب کاهش توان و راندمان سیکل ترکیبی می‌شود. در مورد سیستم با تزریق بخار و سرمایش تبخیری این اثر کاهش می‌یابد که آن هم به دلیل کاهش نقش پیل سوختی در تولید توان سیکل ترکیبی می‌باشد.فشار پارامتری است که بر عملکرد توربین گاز و پیل سوختی در سیکل ترکیبی اثر می‌گذارد. تأثیر تغییرات فشار بر توربین گاز بیشتر از پیل سوختی می‌باشد. افزایش نسبت فشار باعث بهبود عملکرد توربین گازی می‌شود، که از نمودار نسبت توان بر حسب نسبت فشار به راحتی برداشت می‌شود.پارامتر مهم دیگری که بررسی شد، دبی جرمی سوخت ورودی به پیل سوختی می‌باشد. افزایش این پارامتر سبب افزایش چگالی جریان و افزایش دمای کاری پیل می‌شود. توان خروجی سیکل ترکیبی با افزایش دبی سوخت به طور کلی افزایش می‌یابد، که با تزریق بخار و آب به سیکل این افزایش بیشتر خواهد بود.

منابع:

[1] Yoshida, T., Ide, H., Ueda, H. and Horiuchi, N., 1989, "*Natural gas reformed fuel cell power generation systems-a comparison of three system efficiencies*", In Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington, DC, Vol.3, pp.1517–1522.

[2] Lubelli, F. and Massardo, A.F., 1998, "*Internal reforming solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycle (IRSOFC-GT), Part A: cell model and cycle thermodynamic analysis*", ASME, No.98-GT-557.

[3] Campanari, S. and Macchi, E., 1998, "*Thermodynamic analysis of advanced power cycles based upon solid oxide fuel cell, gas turbine and Rankin*

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.3.6.9]

cycles", ASME, No.98-GT-585.

[4] Singhal, S.C., 2000, "*Advances in solid oxide fuel cells*", Journal of Solid State Ionic, Vol.135, pp.305-313.

[5] http://www.powergeneretion.siemense.com

[6] Chan, S.H., Khor, K.A. and Xia, Z.T., 2001, "*A complete polarization modle of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness*", Journal of Power Sources, Vol.93, pp.130-140.

[7] Chan, S.H., Ho, H.K. and Tian, Y., 2002, "*Modeling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant*", Journal of Power Sources, Vol.109, pp.111-120.

and Alemrajabi, A.A., March 2009, [8] Motahar, S. "*Exergy based performance analysis of a solid oxide fuel cell and steam injected gas turbine hybrid power system*", International Journal of Hydrogen Energy, Vo.34, pp.2396-2407.

[9] Yixin, L., 2005, "*Numerical simulation of a flat-tube high power density solid oxide fuel cell*", School of Engineering, University of Pittsburgh, USA.

[10] Williams, M.C., November 2004, "*Fuel Cell Handbook*", 7th Edition, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory.

[۱۰] مطهر، ص. و عالم رجبی، ع.ا.، اردیبهشت ۱۳۸۶،" *مدلسازی نرمودینامیکی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد توان بالا و توربین گاز*"، پانزدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک.

[۱۱] ابراهیمی، م. و حیدری، م.، تابستان ۱۳۸۹،" *تحلیل ترمودینامیکی و آنالیز گزرژی سیکل های نوین تولید همزمان برق و حرارت و پیل سوختی اکسید جامد*"، دانشگاه علم و صنعت ایران، نشریه انرژی نو، دوره ۱۳، شماره ۲، صفحه ۳۵-۴۸.

[12] Dicks, A.L., 1998, "*Advances in catalysts for internal reforming in high temperature fuel cells*", Journal of Power Sources, Vol.71, pp. 111-122.

[13] Wark, K., 1995, "*Advanced thermodynamics for engineers*", McGraw-Hill, New York.

[14] Carlsson, I., 2005, "*A reduced-ordered through- flow program for chocked and cooled axial turbines*", Department of Heat and Power Engineering, Lund University of Sweden.

[۱۵] سنجل، ی.ا. و بولز، م.ا.، مترجم ابراهیمی، م.، ۱۳۷۹، " *علم ترمودینامیک: رهیافتی در مهندسی*"، تهران، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، جلد اول.

[16] http://www.solarturbines.com

[17] Song, T.W., Sohn, J.L., Kim, T.S.and Ro, S.T., 2006, "*Performance characteristics of a MW-class SOFC/GT hybrid system based on commercially available gas turbine*", Journal of Power Sources, Vol.158, pp.361-367.

[18] De paepe, M. and Dick, E., 2000, "*Cycle improvement to steam injected gas turbines*", Int. J. Energy Res., Vol. 24, pp.1081-1107.

[۱۹] محمد الوکیل، م.، مترجم سرابچی، ک.، ۱۳۸۲، " *نیروگاه‌های حرارتی*" تهران، انتشارات نشر دانشگاهی، جلد اول.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.3.6.9]