

توسعه مدل بهبودیافته سیستم ترکیبی تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش بر اساس پیلسوختی اکسیدجامد

فرزین گلزار^۱، مجید آستانه^۲، رامین روشنده^۳

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۳/۵/۲۸

تاریخ دریافت مقاله:

۹۲/۱۱/۱۱

چکیده:

در این پژوهش ابتدا یک سیستم تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش بر اساس پیلسوختی اکسیدجامد با استفاده از گاز طبیعی معرفی می‌شود. برای توسعه مدل کامل سیستم ترکیبی، معادلات مبدل سوخت داخلی، روابط الکتروشیمیایی، گرمایش و سرمایش به صورت همزمان حل شده‌اند. برای استفاده از گرمای تولید شده مازاد بر تقاضا، دو سناریو معرفی شده است. در سناریوی اول، از گرمای مازاد برای تولید بخارآب استفاده می‌شود و بخارآب تولید شده به توربین گاز تزریق می‌شود که این فرایند $1/27\%$ بازده سیستم تولید سه‌گانه و $1/3\text{ kW}$ توان الکتریکی تولیدی را افزایش می‌دهد. در سناریوی دوم، بخارآب مازاد بر تقاضا در توربین بخار جهت تولید برق استفاده می‌شود که در این حالت $1/7\%$ بازده تولید سه‌گانه و $1/7\text{ kW}$ توان تولیدی را افزایش می‌دهد. به این ترتیب، چنانچه گرمای تولید شده سیستم تولید همزمان بدرستی مدیریت شود، راندمان کلی سیستم تبدیل انرژی می‌تواند تا 85% افزایش یابد.

کلمات کلیدی:

پیلسوختی اکسیدجامد، سیستم تولید همزمان برق و گرمایش و سرمایش، چرخه سرمایش جذبی، توربین گاز تزریق بخار

golzar@energy.sharif.ir
astaneh@energy.sharif.ir
roshandel@sharif.edu

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی
(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی
(۳) هیات علمی دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی (نویسنده مسئول)

مقدمه

افزایش روزافزون مصرف سوخت‌های فسیلی و آلودگی ناشی از مصرف آنها در سال‌های اخیر، توجه همگان را به سمت فناوری‌های تبدیل انرژی با بازده بالا و آلودگی کم جلب کرده است. یکی از فناوری‌های تبدیل انرژی با بازده بالا، پیلهای سوختی اکسید‌جامد هستند که انرژی شیمیایی سوخت را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نمایند. دمای عملکردی این نوع پیلهای سوختی بین ۶۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه‌سانتی‌گراد می‌باشد [۱۰]. دمای عملکردی بالای پیلهای سوختی اکسید‌جامد، استفاده مستقیم از انواع سوخت‌های موجود مانند گازطبیعی را امکان‌پذیر نموده است [۷]. در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری در مورد زیر ساختار پیلهای سوختی اکسید‌جامد جهت افزایش بازده آن انجام پذیرفته است [۱]. همچنین به دلیل داشتن دمای بالا می‌توان از آنها در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت استفاده نمود [۱۹]. بازده بالا و آلودگی محیط زیستی کم، دمای عملکردی بالا، توان تولیدی زیاد و نداشتن سر و صدای زیاد و قطعه متحرک از جمله ویژگی‌های پیلهای سوختی اکسید‌جامد هستند که استفاده از آنها را قابل رقابت با فناوری‌های مشابه نظیر موتورهای احتراق داخلی نموده است [۲۰]. در حال حاضر، گروه‌های تحقیقاتی بسیاری در جهان به صورت تجربی برای افزایش کارایی و کاهش هزینه پیلهای سوختی اکسید‌جامد کار می‌کنند. برای مثال، گروه تحقیقاتی کریستین میشلسن یک استک ۳ کیلوواتی پیلهای سوختی اکسید‌جامد را در کشور نروژ راه اندازی نموده است [۱۴]. پیشرفت در زمینه ساخت این پیلهای سوختی به گونه‌ای است که شرکت‌های بزرگی نظیر گوگل و وال‌مارت مشتری پیلهای سوختی ساخته شده شرکت بلوم می‌باشند [۱۳].

علاوه بر فناوری‌های تبدیل انرژی با بازده بالا، سیستم‌های تولید همزمان برق و گرما توانایی کاهش هزینه عملیاتی و آلودگی محیط‌زیست و همچنین کاهش مصرف حامل‌های انرژی اولیه را دارند [۱۳].

سیستم تولید همزمان برق و گرما که مبدل اصلی انرژی آن پیلهای سوختی اکسید‌جامد باشد، یکی از بهترین سیستم‌های تولید انرژی در میان انواع سیستم‌های ترکیبی است [۲۰]. در سال‌های اخیر، تحقیقات بسیاری در مورد ترکیب پیلهای سوختی با توربین‌های گاز انجام گرفته است [۱۰]. بهزادی و روشنده [۲] با اعمال مدیریت حرارتی و بازیابی حرارت پیلهای سوختی اکسید‌جامد به وسیله میکروتوربین گازی، ۱۷,۸٪ بازده کلی سیستم را افزایش دادند. چان و همکاران [۹] یک سیستم ترکیبی پیلهای سوختی اکسید‌جامد و توربین گاز با بازده الکتریکی ۶۰٪ ارائه دادند. به این ترتیب، بازده سیستم ترکیبی پیلهای سوختی اکسید‌جامد و توربین گاز در مقایسه با سیستم‌های تبدیل انرژی رایج مانند محفظه احتراق سوخت و توربین گاز یا سیکل ترکیبی حدود ۲۰٪ بیشتر می‌باشد. سaba و همکاران [۲۲] بخشی از گاز خروجی از کاتد پیلهای سوختی را دوباره در توربین گاز مورد استفاده قرار دادند. استفاده مجدد از گاز خروجی کاتد، کار مورد نیاز کمپرسورهوا و همچنین سوخت ورودی را کاهش داده، بازده الکتریکی سیستم را تا ۶۵٪ افزایش می‌دهد. در تحقیقات بسیاری سیستم

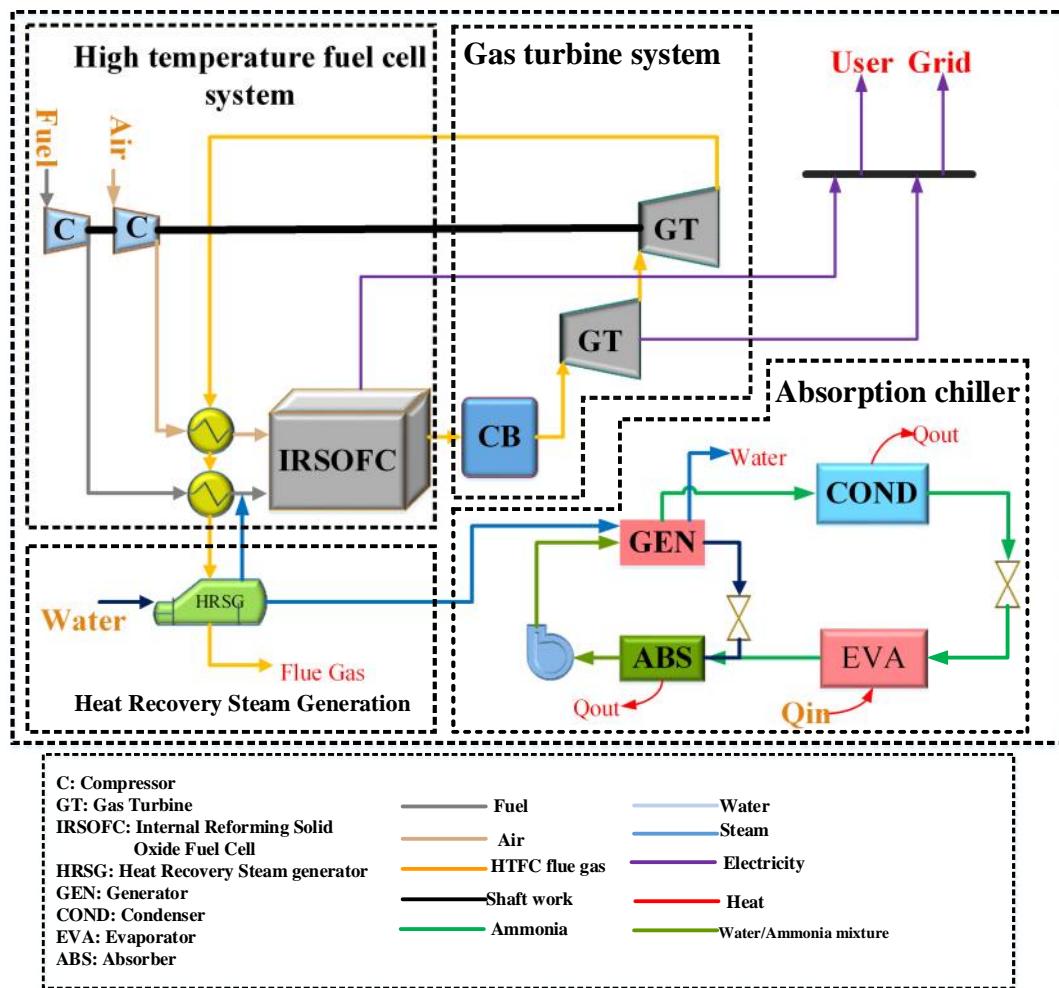
تولید همزمان برق و گرما بر اساس پیل سوختی اکسید جامد بررسی شده است. هانزو و همکاران [۲۴] یک سیستم تولید همزمان برق و گرما بر اساس پیل سوختی اکسید جامد برای یک منطقه مسکونی ارائه دادند. این سیستم پیشنهادی 1 kW انرژی الکتریکی و 0.52 kW انرژی گرمایی تولید می نماید و دارای $52/1\%$ بازده الکتریکی و $79/2\%$ بازده تولید همزمان (بازده کل) می باشد. نایمستر و اسلیتی [۱۶] با ارائه سیستم تولید همزمان برق و گرما بر اساس پیل سوختی اکسید جامد برای ساختمان اداری نشان دادند که استفاده از این سیستم، $14/5\%$ مصرف انرژی سالانه و 62% تولید دی اکسید کربن را در مقایسه با سیستم های تهویه مطبوع رایج، کاهش می دهد. قاضیزاده و همکاران [۴] سیستم تولید همزمان برق، گرما و برودت بر اساس پیل سوختی اکسید جامد برای یک ساختمان نمونه در تهران طراحی کردند. نتایج کار آنها نشان می دهد که استفاده از پیل سوختی در شرایط کنونی اقتصادی نیست ولی در آینده و یا با در نظر گرفتن هزینه های اجتماعی آینده ها، اقتصادی خواهد شد. با توجه به اینکه دولت قصد دارد با اعطای تسهیلاتی نظیر خرید برق تضمینی با قیمت مناسب از نیروگاه های تجدیدپذیر خصوصی حمایت کند، اجرای چنین طرح هایی از نظر اقتصادی و عملی در ایران نیز امکان پذیر می باشد.

اگرچه تحقیقات انجام گرفته نشان می دهد که سیستم های تولید همزمان برق و گرما توانایی کاهش هزینه عملیاتی، آلودگی و مصرف سوخت را دارند [۱۶]، اما کاربرد سیستم های تولید همزمان محدودیت هایی نیز دارد. یکی از مهم ترین مشکلات کاربرد سیستم های تولید همزمان، عدم تطابق میزان برق و گرمای تولید شده با برق و گرمای مورد نیاز است [۲۳]. از آنجا که برق تولیدی مازاد بر تقاضا را می توان به شبکه فروخت، میزان برق تولیدی محدود کننده نمی باشد. اما چنانچه گرمای تولیدی مازاد بر تقاضا باشد، یا سیستم تولید همزمان را می بایست از مدار خارج نمود و یا اینکه گرمای مازاد را بدون استفاده رها کرد. دلاته و همکاران [۱۱] برای حل مشکل گرمای مازاد تولید شده به وسیله سیستم تولید همزمان، توربین گاز تزریق بخارآب را پیشنهاد دادند. آنها از گرمای مازاد بر تقاضا در فصول گرم سال، برای تولید بخارآب استفاده کردند و بخارآب تولید شده را به توربین گاز تزریق نمودند. آنها نشان دادند که با جایگزین کردن $3/2\%$ گاز ورودی به توربین گاز با بخارآب، $5/1\%$ بازده الکتریکی سیستم افزایش می یابد.

با توجه به ساخت استک ۱۰۰ واتی پیل سوختی اکسید جامد به صورت کاملاً بومی [۵] و قیمت کمتر گاز طبیعی در ایران، در سال های آینده استفاده از این نوع پیل سوختی به صورت عملی امکان پذیر می باشد.

در مقاله حاضر، یک سیستم تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش بر اساس سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز ارائه می شود که جریان های انرژی و جرم سیستم در شکل (۱) نشان داده شده است. در این کار از گازهای داغ خروجی از سیستم پیل سوختی و توربین گاز برای پیش گرم کردن گازهای ورودی به پیل سوختی و تولید بخارآب استفاده می شود. بخشی از بخارآب تولید شده، در مبدل سوخت داخلی پیل سوختی مصرف می شود و مابقی بخارآب در فصول سرد سال برای تامین گرمایش و در فصول گرم برای تامین سرمایش استفاده می شود. برای مدیریت گرمای مازاد بر تقاضا دو

سناریو تعریف می‌شود. در سناریوی اول بخارآب مازاد به مخلوط گاز ورودی توربین گاز تزریق می‌شود و در سناریوی دوم، از بخارآب مازاد برای تولید برق در توربین بخارآب استفاده می‌شود.



شکل ۱) سیستم تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش بر اساس پیلسوختی اکسیدجامد

مدل سازی ریاضی

مدل سازی پیلسوختی اکسیدجامد

مهماًترین مفروضات این پژوهش برای مدل سازی پیلسوختی اکسیدجامد عبارتند از:

- ۱- سیستم در حالت پایا کار می‌کند.
- ۲- هوای ورودی به پیل‌سوختی حاوی ۷۹٪ نیتروژن و ۲۱٪ اکسیژن می‌باشد.
- ۳- واکنش‌های شیمیایی به حالت تعادل می‌رسند.
- ۴- فشار در آند و کاتد پیل‌سوختی ثابت و برابر هستند.
- ۵- دمای گازهای خروجی از آند و کاتد پیل‌سوختی برابر با دمای عملکردی پیل‌سوختی می‌باشد.
- ۶- متان واکنش نداده در پیل‌سوختی به طور کامل در محفظه احتراق اکسید می‌شود.
- ۷- از افت فشار در پیل‌سوختی صرف‌نظر شده است.

مدل مبدل‌سوخت‌داخلی

برای پیل‌سوختی اکسید جامد که سوخت مصرفی آن متان باشد، مبدل‌سوخت‌خارجی یا داخلی برای تبدیل متان به گاز هیدروژن الزامی است. استفاده از مبدل سوخت داخلی به دلیل قیمت پایین‌تر، انتخاب بهتری است. واکنش‌هایی که در مبدل سوخت، آند و کاتد پیل‌سوختی انجام می‌پذیرد، به صورت زیر می‌باشد:

واکنش تبدیل متان به هیدروژن^۱:



واکنش تبدیل کربن مونواکسید به هیدروژن^۲:



واکنش الکتروشیمیایی:



در روابط بالا x و y و z سرعت مولی واکنش‌های تبدیل متان به هیدروژن و تبدیل کربن مونواکسید به هیدروژن و الکتروشیمیایی می‌باشند. با انجام مواده جرمی جریان گازهای مختلف، دبی مولی گازهای خروجی از پیل‌سوختی مشخص می‌شود که در ادامه روابط آنها ارائه شده است.

1) reforming reaction
2) shift reaction

$$n_{CH_4}^{out} = n_{CH_4}^{in} - x \quad (4)$$

$$n_{H_2O}^{out} = n_{H_2O}^{in} - x - y + z \quad (5)$$

$$n_{H_2}^{out} = n_{H_2}^{in} + 3x + y - z \quad (6)$$

$$n_{CO}^{out} = n_{CO}^{in} + x - y \quad (7)$$

$$n_{CO_2}^{out} = n_{CO_2}^{in} + y \quad (8)$$

$$n_{tot}^{out} = n_{tot}^{in} + 2x \quad (9)$$

با استفاده از روابط ۴ تا ۹ و رابطه ۱۰ فشار جزئی گازهای خروجی از آند و کاتد پیل سوختی به دست خواهد آمد.

$$P_i = \frac{n_i}{n_{tot}} P_{tot} \quad (10)$$

واکنش‌های تبدیل متان به هیدروژن و تبدیل کربن مونوکسید به هیدروژن، واکنش‌هایی تعادلی هستند [۱۶ و ۹] و مقادیر محصولات این واکنش‌ها به جزء مولی واکنش دهنده‌ها و دمای واکنش وابسته می‌باشند. ثابت واکنش پارامتری است که میزان محصولات، واکنش دهنده‌ها و دمای واکنش را به یکدیگر وابسته می‌کند. برای واکنش‌های تبدیل متان به هیدروژن و تبدیل کربن مونوکسید به هیدروژن ثابت واکنش به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$K_{p,r} = \frac{P_{H_2}^3 \times P_{CO}}{P_{CH_4} \times P_{H_2O}} \quad (11)$$

$$K_{p,s} = \frac{P_{CO_2} \times P_{H_2}}{P_{CO} \times P_{H_2O}} \quad (12)$$

مقادیر ثابت واکنش به صورت تابعی از دما می باشند.

$$\log K = AT_{SOFc}^4 + BT_{SOFc}^3 + CT_{SOFc}^2 + DT_{SOFc} + E \quad (13)$$

که مقادیر ثابت در رابطه (13) با استفاده از مرجع [۱۷] ارائه شده است. با استفاده از روابط ۴ تا ۱۳، رابطه میان واکنش دهنده‌ها و فراورده‌ها و دمای واکنش به صورت روابط ۱۴ تا ۱۶ نشان داده می شود:

$$K_{p,r} = \frac{(n_{H_2}^{in} + 3x + y - z)^3 \times (n_{CO}^{in} + x - y)}{(n_{CH_4}^{in} - x) \times (n_{H_2O}^{in} - x - y + z)} \times \frac{P_{cell}^2}{(n_{tot}^{in} + 2x)^2} \quad (14)$$

$$K_{p,s} = \frac{(n_{CO_2}^{in} + y) \times (n_{H_2}^{in} + 3x + y - z)}{(n_{CO}^{in} + x - y) \times (n_{H_2O}^{in} - x - y + z)} \quad (15)$$

$$U_f = \frac{z}{3x + y} \Rightarrow z = U_f \times (3x + y) \quad (16)$$

در رابطه ۱۶، U_f ضریب مصرف سوخت می باشد که برابر است با نسبت هیدروژن مصرف شده در آند به کل هیدروژن وارد شده به پیل سوختی.

مدل الکتروشیمیایی

ولتاژ عملکردی سلول با کم کردن تمامی افت‌ها (فعال‌سازی، اهمیک و غلظتی) از ولتاژ استاندارد نرنست در دما و فشار عملکردی داده شده به دست خواهد آمد. افتها تابعی از جریان، دما و فشار عملکردی و همچنین ساختار سلول می باشد:

$$V = V_{OCV} - \left(\sum_j y_{ohm,j} + y_{conc,3} + y_{conc,5} + y_{act,3} + y_{act,5} \right), j = 1, 3, 4, 5 \quad (17)$$

در معادله بالا، y_{ohm} افت اهمیک در قسمت‌های جامد سلول و V_{OCV} ولتاژ مدار باز سلول می باشد. معادله برای تعیین ولتاژ مدار باز بر اساس این فرض که هر دو واکنش الکتروشیمیایی در دمای پیل سوختی انجام می شود، به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_{OCV} = \frac{-\left(H_{H_2O} - H_{H_2} - \frac{1}{2}H_{O_2}\right) + T \times \left(S_{H_2O} - S_{H_2} - \frac{1}{2}S_{O_2}\right) - RT \ln \left[\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}(P_{O_2})^{\frac{1}{2}}} \right]}{2F} \quad (۱۸)$$

به طول فعال ناحیه سه گانه(TPB) که واکنش‌های شیمیایی واقع در آنجا اتفاق می‌افتد، اشاره می‌کند. نیم واکنش‌های الکتروشیمیایی در مکان‌های اتفاق می‌افتد که جمع تمام افت‌های ولتاژ در الکترودهای آند و کاتد، $y_{tot,j}$ ، به کمینه مقدار خود برسند. در مطالعه حاضر، الکترودهای ترکیب شده که ترکیبی از رساناهای یونی و الکترونی هستند، در نظر گرفته شده است. افت ولتاژ اهمیک بر اساس قانون اهم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$y_{ohm,j} = I S_j, \quad j=1,4 \quad (۱۹)$$

$$y_{ohm,j} = \frac{I(A_{j,opt} - L_y L_z) L_{j,opt}}{2 A_{j,opt} L_y L_z (1 - w_j) \dagger_4} + \frac{I(L_j - L_{j,opt})}{L_y L_z (1 - 1.8w_j) \dagger_i}, \quad j=3,5 \quad (۲۰)$$

عبارت اول سمت راست معادله ۲۰، افت اهمیک را در نواحی سه گانه فعال (TPB) و در مکانی که مقاومت هدایت یونی غالب است، بیان می‌کند. عبارت دوم همین معادله به افت اهمیک مربوط به سایر مکان‌های آند و کاتد که مقاومت هدایت الکترونی غالب می‌باشد، اشاره می‌کند. S_1 و S_4 مقاومت‌های صفحات دوقطبی و الکترولیت هستند که بر اساس ویژگی‌های مواد و هندسه سلول به صورت زیر به دست می‌آیند [۲۴]:

$$S_1 = \frac{L_1}{L_y L_z \dagger_1} + \frac{L_2}{(1+n_{ch}) L_t L_y \dagger_1} + \frac{L_6}{(1+n_{ch}) L_t L_z \dagger_1} \quad (۲۱)$$

$$S_4 = \frac{L_4}{L_y L_z \dagger_4} \quad (۲۲)$$

مساحت ناحیه فعال TPB می‌باشد و به صورت زیر به دست می‌آید:

$$A_{j,opt} = (1 + 2Lj, opt / DP, j) Lyz \quad (۲۳)$$

قطر میانگین حفره‌های موازی در دو الکترود است و توسط معادله ۲۴ تعریف می‌شود:

$$D_{P,j} = D_{W,j} \mathbb{W}_j / (1 - \mathbb{W}_j) \quad (24)$$

فشارهای نواحی سه‌گانه می‌باشد که به فشار جزئی واکنش‌دهنده‌ها و محصولات در TPB اشاره می‌کند. فشارهای نواحی سه‌گانه توسط کیم و اوگیر و همکارانش توسط معادلات ۲۶ تا ۲۴ بیان شده است [۱۵و۵]:

$$P_{H_2O,TPB} = p_f X_{H_2O} + \frac{RT\mathbb{E}_3}{2FD_3\mathbb{W}_3} \frac{L_3 I}{L_y L_z} \quad (25)$$

$$P_{H_2,TPB} = p_f X_{H_2} - \frac{RT\mathbb{E}_3}{2FD_3\mathbb{W}_3} \frac{L_3 I}{L_y L_z} \quad (26)$$

$$P_{O_2,TPB} = p_{air} - \left(p_{air} - X_{O_2} p_{air} \right) \exp \left(\frac{RT\mathbb{E}_5 L_5 I}{4FD_5 \mathbb{W}_5 p_{air} L_y L_z} \right) \quad (27)$$

ضرایب نفوذ در الکترود آند و کاتد از طریق معادلات زیر به دست می‌آید [۱۶]:

$$D_3 = \frac{1.43 \times 10^{-7} T^{1.75} (M_{H_2} + M_{H_2O})^{1/2}}{p_f (2M_{H_2} M_{H_2O})^{1/2} (\mathbb{E}_{H_2}^{1/3} + \mathbb{E}_{H_2O}^{1/3})^2} \quad (28)$$

$$D_5 = \frac{1.43 \times 10^{-7} T^{1.75} (M_{O_2} + M_{N_2})^{1/2}}{p_{air} (2M_{O_2} M_{N_2})^{1/2} (\mathbb{E}_{O_2}^{1/3} + \mathbb{E}_{N_2}^{1/3})^2} \quad (29)$$

افت‌های غلطی، $\mathbb{Y}_{conc,j}$ ، در الکترودهای آند و کاتد توسط اوگیر و همکارانش به صورت زیر ارائه شده است [۲۱]:

$$\mathbb{Y}_{conc,c} = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2,TPB}} \right) \quad (30)$$

$$\mathbb{Y}_{conc,a} = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{H_2O,TPB}}{P_{H_2,TPB} P_{H_2O}} \right) \quad (31)$$

در این مطالعه، برای محاسبه افتهای فعال‌سازی از معادله بالتر- والمر استفاده شده است [۶]:

$$i = i_{0,j} \left[\exp\left(\frac{rnF}{RT}y_{act,j}\right) - \exp\left(-\frac{(1-r)nF}{RT}y_{act,j}\right) \right], \quad j = 3,5 \quad (32)$$

افتهای فعال‌سازی، $y_{act,j}$ که انرژی مورد نیاز برای فعال شدن نیم واکنش‌های الکتروشیمیایی را فراهم می‌کند بر اساس معادله بالتر- والمر و به صورت معادله ۳۳ تعریف می‌شود:

$$y_{act,j} = \frac{RT}{rnF} \sinh^{-1}\left(\frac{i}{i_{0,j}}\right), \quad j = 3,5 \quad (33)$$

i در معادله بالا برابر ۲ و α که ضریب انتقال بار را نشان می‌دهد در اینجا مقدار نوعی ۵/۰ را می‌گیرد. $i_{0,j}$ که نشان دهنده چگالی جریان تبادلی می‌باشد، به صورت معادله زیر تعریف شده است:

$$i_{0,j} = \frac{RT}{nF} u_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right), \quad j = 3,5 \quad (34)$$

چگالی توان الکتریکی تک پیل سوختی اکسید جامد برابر است با:

$$P_{elec,cell} = V \times i \quad (35)$$

مقادیر پارامترهای فیزیکی و ثابت‌هایی که در این مدل و برای رسم نمودار عملکردی تک پیل سوختی اکسید جامد استفاده شده، در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱) پارامترهای فیزیکی و ثابت‌های مدل تک‌پیل‌سوختی‌اکسید‌جامد

| پارامتر | مقدار | پارامتر | مقدار |
|---|-----------------|---|--------------------------------------|
| 100 cm^2 | A | | پارامترهای مربوط به خواص فیزیکی سلول |
| $0/05 \text{ cm}$ | L_1 | $14 \times 10^{-6} \text{ m}$ | $D_{W,3}$ |
| $0/1 \text{ cm}$ | L_2 | $14 \times 10^{-6} \text{ m}$ | $D_{W,5}$ |
| $0/05 \text{ cm}$ | L_3 | $140 \times 10^3 \text{ J mol}^{-1}$ | E_3 |
| $0/002 \text{ cm}$ | L_4 | $137 \times 10^3 \text{ J mol}^{-1}$ | E_5 |
| $0/005 \text{ cm}$ | L_5 | ۱۰ | n_{ch} |
| $0/1 \text{ cm}$ | L_6 | ۰/۵ | Γ |
| $0/2 \text{ cm}$ | L_{ch} | $6/54 \times 10^{11} \Omega^{-1} \text{ m}^{-2}$ | U_3 |
| $0/8 \text{ cm}$ | L_t | $2/35 \times 10^{11} \Omega^{-1} \text{ m}^{-2}$ | U_5 |
| 10 cm | L_y | $16/3 \text{ cm}^3$ | ϵ_{o_2} |
| 10 cm | L_z | $6/12 \text{ cm}^3$ | ϵ_{H_2} |
| $3/75 \times 10^{-4}$ | $L_{3,opt}$ | $13/1 \text{ cm}^3$ | ϵ_{H_2O} |
| $7/20 \times 10^{-4}$ | $L_{5,opt}$ | $18/5 \text{ cm}^3$ | ϵ_{N_2} |
| | پارامترهای ثابت | $1/5 \times 10^6 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ | \dagger_1 |
| $0/1 \text{ MPa}$ | $P_f = P_{air}$ | $8/0 \times 10^4 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ | \dagger_3 |
| $0/1 \text{ MPa}$ | P_{ref} | $33/4 \times 10^3 \exp(-10/3 \times 10^3/T) \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ | \dagger_4 |
| $1073 \text{ }^\circ\text{K}$ | T | $8/4 \times 10^3 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ | \dagger_5 |
| | ثابت‌های جهانی | ۹/۵ | Ψ_3 |
| 96500 C mol^{-1} | F | ۷/۲ | Ψ_5 |
| $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ | R | | پارامترهای مربوط به طراحی هندسی |

توان کلی که توسط استک پیل سوختی تولید می‌شود، برابر است با:

$$P_{total} = V \times i \times N \times A \quad (36)$$

که N تعداد کل سلول های استک است.

بازده الکتریکی برای این سیستم به صورت زیر می‌باشد:

$$Eff = \frac{V \times i \times N \times A}{n_{H_2} \times LHV_f} \quad (37)$$

چرخه خنک سازی جذبی

میزان خنک سازی چرخه های یخچالی جذبی به میزان گرمایشی که در اختیار سیستم قرار می‌گیرد و ضریب عملکرد یخچال بستگی دارد. ضریب عملکرد چرخه های خنک سازی جذبی برای چیلهای یک اثربرداری ۰/۷ تا ۰/۰ و برای چیلهای دو اثربرداری ۰/۹ تا ۰/۱۲ می‌باشد. از آنجا که برای بازیابی حرارتی، چیلهای یک اثربرداری مناسب‌تر می‌باشند، در کار حاضر ضریب عملکرد یخچال ۰/۷ در نظر گرفته شده و از مخلوط آمونیاک و آب به عنوان سیال عامل استفاده شده است.

$$Q_{Cooling} = Q_{heating} \times COP \quad (38)$$

شاخص های عملکردی و معیار مقایسه

عملکرد سیستم تولید همزمان برق و گرمایش و سرمایش با استفاده از شاخص هایی نظیر بازده الکتریکی پیل سوختی اکسید جامد، بازده الکتریکی سیستم ترکیبی و بازده کلی تبدیل انرژی سنجیده می‌شود.

بازده الکتریکی پیل سوختی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\gamma_{SOFC} = \frac{W_{SOFC}}{n_{fuel} \times LHV_{fuel}} \quad (39)$$

بازده الکتریکی سیستم ترکیبی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\gamma_{elec} = \frac{W_{SOFC} + W_{Turbine} - W_{Compressor}}{n_{fuel} \times LHV_{fuel}} \quad (40)$$

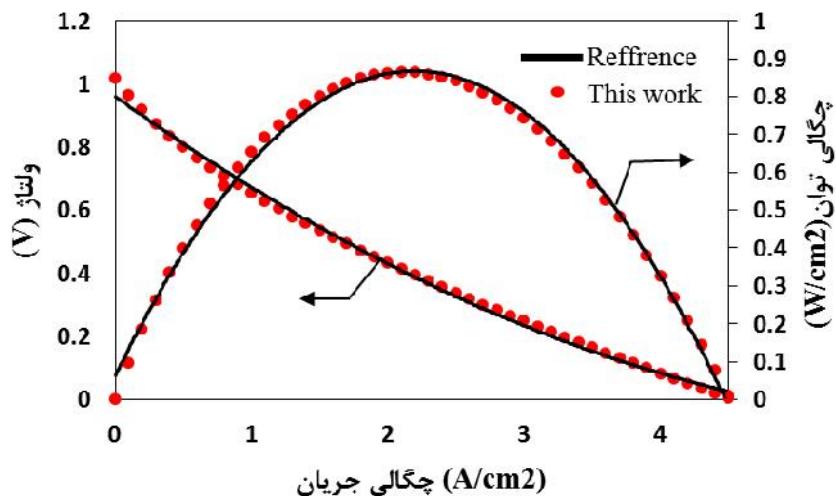
و بازده کلی تبدیل انرژی برای سیستم تولید همزمان سه گانه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma_{tri} = \frac{W_{SOFC} + W_{Turbine} - W_{Compressor} + Q_{Heating} + Q_{Cooling}}{n_{fuel} \times LHV_{fuel}} \quad (41)$$

نتایج و بحث

اعتبار سنجی

همان طور که قبلاً بیان شد، جزء اصلی تبدیل انرژی در سیستم ترکیبی مورد نظر پیل سوختی اکسیدجامد می باشد. برای اعتبارسنجی مدل، نمودار عملکردی که توسط مدل حاضر شبیه‌سازی شده با نمودار عملکردی بدست آمده از کار ون و همکارانش [۲۴] مقایسه شده است. شکل (۲) نتیجه این مقایسه را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، تحت شرایط یکسان (دما ۱۰۷۳ کلوین)، شکل کلی دو نمودار قابل تطبیق با یکدیگر است. به طور متوسط، نتایج حاصل از مدل سازی کار حاضر با نتایج مرجع، ۲٪ با یکدیگر اختلاف دارند.



شکل (۲) مقایسه نتایج مدل پیل سوختی کار حاضر با مرجع [۲۴]

برای صحت مدل مبدل سوخت داخلی از نتایج کار آقای کالیس و همکاران [۸] استفاده می شود. چون مبدل سوخت داخلی می باشد، معادلات حاکم بر مبدل سوخت با معادلات الکتروشیمیابی آند و کاتد همزمان حل می شوند و خروجی آن دبی مولی و جزء مولی گاز های خروجی از آند و کاتد پیل سوختی می باشد. در جدول (۲) جزء مولی گازهای خروجی از آند پیل سوختی کار حاضر با نتایج مرجع [۸] مقایسه شده اند.

جدول ۲) مقایسه نتایج مدل ریفرمر(دبی گاز خروجی آند) کار حاضر با مرجع [۸]

| | کار حاضر (mol/s) | مرجع (mol/s) | خطای نسبی % |
|------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| CO | 0/0268 | 0/026 | 3/07 |
| H ₂ O | 0/684 | 0/7 | 2/28 |
| H ₂ | 0/116 | 0/119 | 2/52 |
| CH ₄ | 3/53×10 ⁻⁷ | 3/9×10 ⁻⁷ | 0 |
| N ₂ | 3/87×10 ⁻⁷ | 3/8×10 ⁻⁷ | 0 |
| CO ₂ | 0/1732 | 0/168 | 3/09 |
| O ₂ | 3/87×10 ⁻⁷ | 3/87×10 ⁻⁷ | 0 |

نتایج

در سیستم‌های تولید همزمان توجه به تقاضا بسیار مهم است. گاهی اوقات انرژی تولید شده توسط سیستم تولید همزمان بیش از میزان تقاضاست. چنان چه انرژی مازاد بر تقاضا به صورت انرژی الکتریکی باشد، قابل فروش به شبکه می‌باشد. چنانچه انرژی حرارتی تولیدی بیش از تقاضای گرمایش باشد، می‌توان گرمایی مازاد را ذخیره کرد. اما سیستم‌های ذخیره گرمایی برای مدت زمان طولانی قادر به ذخیره انرژی حرارتی با کیفیت بالا نیستند. در ادامه، دو سناریویی متفاوت برای استفاده از گرمایی مازاد بر تقاضا ارائه خواهد شد.

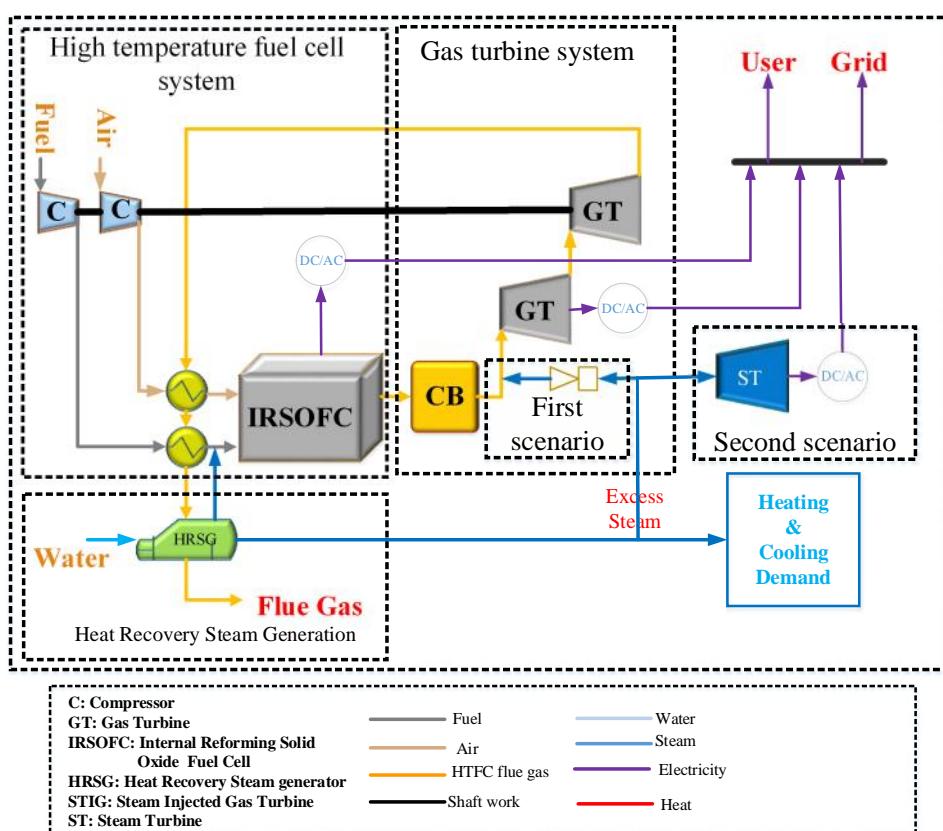
سناریوی اول

در این سناریو، از گرمایی مازاد بر تقاضا برای تولید بخارآب استفاده می‌شود و بخارآب تولیدی به توربین گاز تزریق می‌شود. سیستم ترکیبی مربوط به سناریوی اول در شکل (۳) نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است، با استفاده از گازهای داغ خروجی از سیستم پیل‌سوختی و توربین گاز، بخارآب تولید می‌شود. مقداری از بخارآب تولید شده که مازاد بر تقاضای گرمایش و سرمایش است، به مخلوط گاز ورودی به توربین گاز تزریق می‌شود. این کار دمای گاز ورودی به توربین گاز را کاهش و دبی آن را افزایش می‌دهد. باید توجه داشت که مقدار بخارآب تزریق شده، از محدودیت سرج توربین نباید بیشتر شود که محدودیت سرج حدود ۳۰٪ گاز ورودی به توربین می‌باشد [۱۲]. نتایج حاصل از مدل‌سازی این سیستم نشان می‌دهد که تزریق بخارآب به توربین گاز، $W = \frac{1}{3} kW$ به برق تولیدی کل سیستم می‌افزاید. اگر تقاضای

گرمایش و سرمایش سیستم اولیه کاهش یابد، بازده تولید سه‌گانه ۸٪ کاهش می‌یابد. چنانچه از گرمایی مازاد برای تولید بخارآب به منظور تزریق به توربین‌غاز استفاده شود، ۱/۲۷٪ بازده تولید سه‌گانه افزایش می‌یابد.

سناریوی دوم

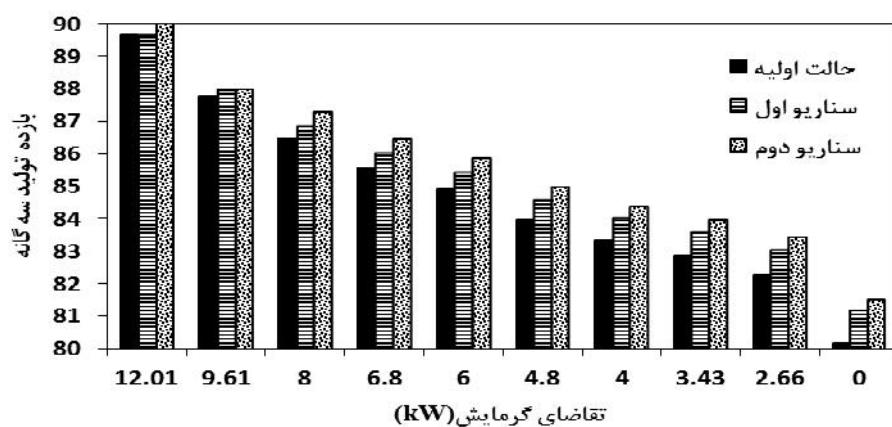
سیستم ترکیبی سناریوی دوم نیز در شکل (۳) نشان داده شده است. در این سناریو، از گرمایی مازاد بر تقاضا برای تولید بخارآب استفاده شده و از آن در توربین‌بخار برای تولید برق استفاده می‌شود. مزیت استفاده از توربین‌بخار نسبت به توربین‌غاز، تزریق بخار آن است که محدودیت سرج ندارد و از انرژی بخارآب بهتر استفاده می‌نماید. مزیت دیگر توربین‌بخار آن است که می‌توان از آب خروجی از توربین‌بخار دوباره در چرخه استفاده نمود در حالی که بخارآب تزریق شده به توربین‌غاز چنانچه مایع شود با گاز دی‌اسیدی‌کربن ترکیب شده، تولید گاز اسیدی می‌کند. نتایج مدل‌سازی سناریوی دوم نشان می‌دهد که استفاده از توربین‌بخار، ۱/۷ kW انرژی الکتریکی کل سیستم را افزایش می‌دهد و ۱/۷٪ بازده تولید سه‌گانه را در مقایسه با عدم استفاده از گرمایی مازاد ارتقا می‌بخشد.



شکل (۳) سیستم ترکیبی تولید همزمان برای سناریوهای اول و دوم

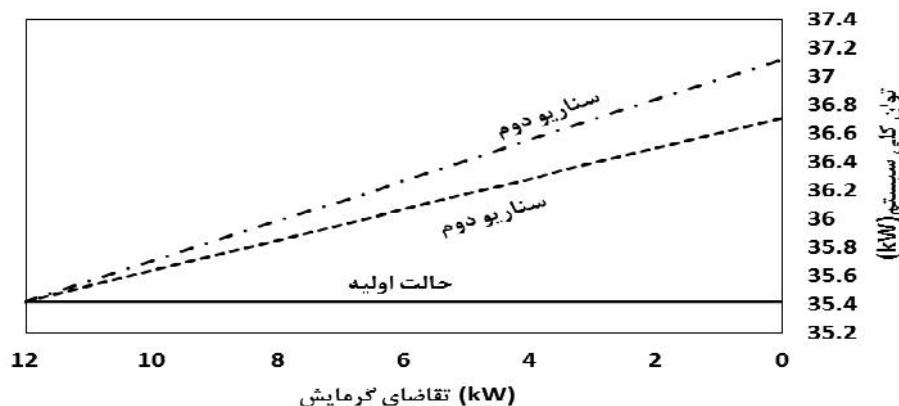
مقایسه دو سناریو

شکل (۴) تغییرات بازده تولید سه گانه را بر حسب کاهش تقاضای گرمایش نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، کاهش تقاضای گرمایش به طور کلی بازده تولید سه گانه را کاهش می‌دهد. اما استفاده از گرمایی مازاد به منظور افزایش تولید برق در سناریوهای تعریف شده، کاهش بازده تولید سه گانه را کاهش می‌دهد. در هر تقاضای گرمایش، سناریو اول $1/27\%$ و سناریو دوم $1/7\%$ بازده تولید سه گانه را افزایش می‌دهد.



شکل (۴) تغییرات بازده تولید سه گانه را بر حسب کاهش تقاضای گرمایش

در شکل (۵) تغییرات توان الکتریکی تولیدی توسط سیستم توربین بر حسب تقاضای گرمایش ارائه شده است. در حالت اولیه که از گرمایی مازاد استفاده نمی‌شود، برق تولیدی توربین و کل سیستم ثابت می‌ماند. اما با کاهش تقاضای گرمایش، برق تولیدی در سناریو اول $1/3\text{ kW}$ و در سناریو دوم $1/7\text{ kW}$ افزایش می‌یابد.



شکل (۵) تغییرات توان تولیدی توسط سیستم توربین بر حسب تقاضای گرمایش

نتایج دو سناریو نشان می‌دهد که استفاده از توربین‌بخار نسبت به توربین گاز تزریق‌بخار برای استفاده از گرمایی مازاد بر تقاضا از لحاظ بازده انرژی مناسب‌تر می‌باشد. اما اضافه کردن توربین‌بخار به سیستم، هزینه اولیه سیستم را افزایش می‌دهد. بنابراین، هزینه اولیه افزایش را کاهش و هزینه اولیه را افزایش می‌دهد. در مقاله‌های بعدی، بررسی اقتصادی دو سناریو پیشنهادشده انجام خواهد شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سیستم تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش بر اساس پیل‌سوختی اکسیدجامد مدل‌سازی شد. برای توسعه مدلی کامل از سیستم تولید همزمان، معادلات مبدل‌سوخت داخلی، روابط الکتروشیمیایی پیل‌سوختی، گرمایش و سرمایش همزمان با هم حل شدند. برای اطمینان از صحت مدل‌های بدست آمده، نتایج مبدل‌سوخت داخلی و پیل‌سوختی با نتایج مراجع مربوطه مقایسه شدند. برای استفاده از گرمایی مازاد بر تقاضا، دو سناریو تعریف شد. مهمترین نتایجی که از کار حاضر استخراج می‌شود، عبارتند از:

- اگر تقاضای گرمایش و سرمایش سیستم اولیه کاهش یابد، بازده تولید سه گانه ۸٪ کاهش می‌یابد.
- چنانچه از گرمایی مازاد بر تقاضا برای تولید بخارآب به منظور تزریق به توربین گاز استفاده شود، $kW_{1/3} = 1/3$ توان الکتریکی و $1/27$ ٪ بازده تولید سه گانه افزایش می‌یابد.
- چنانچه از گرمایی مازاد بر تقاضا برای تولید بخارآب استفاده شده و از آن در توربین‌بخار برای تولید برق استفاده شود، $kW_{1/7} = 1/7$ انرژی الکتریکی کل سیستم افزایش یافته و $1/7$ ٪ بازده تولید سه گانه در مقایسه با عدم استفاده از گرمایی مازاد ارتقا می‌یابد.

نتایج کار حاضر نشان می‌دهد که سیستم تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش بر اساس پیل‌سوختی اکسیدجامد دارای بازده تبدیل انرژی ۸۵٪ می‌باشد که رقمی قابل توجه است. همچنین در صورت کاهش تقاضای گرمایش، استفاده از گرمایی مازاد بر تقاضا برای تولید بخارآب و تزریق آن به توربین گاز و یا استفاده از آن در توربین‌بخار به منظور تولید برق، بازده سیستم را افزایش می‌دهد.

منابع

- [۱] بزرگمهری، شهریار. حامدی، محسن. محبی، حامد. قبادزاده، امیر. اصلاح نژاد، حامد. (۱۳۹۱)، ارزیابی عملکرد و ریزساختار تکسل پیل سوختی اکسید جامد، نشریه انرژی ایران، ۲۱-۳۶.
- [۲] بهزادی فروغ، عاطفه. روشنیل، رامین. (۱۳۹۱)، مدل سازی و بررسی پارامتریک سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی، نشریه انرژی ایران، ۱-۱۷.
- [۳] فرشید، بهزاد. قبادزاده، امیرحسین. لاری، حمیدرضا. رضایی، مسعود. (۱۳۷۸)، اتصال دهنده‌ها در پیل سوختی اکسید جامد، اولین کنفرانس ملی هیدروژن و پیل سوختی.
- [۴] قاضی‌زاده، محمد صادق. غلامی، عادل. رودکی، سید میر جواد. (۱۳۹۰)، تعیین ظرفیت پهیمه و آنالیز حساسیت سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه محرک اولیه پیل سوختی برای یک آپارتمان مسکونی، نشریه انرژی ایران، ۱-۱۸.
- [۵] Aguiar, P., Adjiman, C.S., Brandon, N.P. "High Efficiency Process for the Production of Pure Oxygen Based on solid oxide fuel cell-solid oxide electrolyzer technology" J. Power Sources, Vol. 138, p.p. 120-136, 2004.
- [۶] Bard, A.J., Faulkner, L.R. "Electrochemical Methods-Fundamentals and Applications", 2nd ed., Wiley, New York, 2001.
- [۷] Calise, F. "Design of a hybrid polygeneration systemwith solar collectors and a Solid Oxide Fuel Cell: Dynamic simulation and economic assessment" international journal of hydrogen energy, Vol. 36, pp. 6128-6150, 2011.
- [۸] Calise, F., Accadia, M.D.D., Vanoli, L., Spakovsky, M.V. "Single-level optimization of a hybrid SOFC-GT power plant" Journal of Power Sources, Vol. 159, p.p. 1169–1185, 2006.
- [۹] Chan, S. H., Ho, H. K., Tian, Y. "Modeling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant" Journal of power sources, Vol. 109, p.p. 111-120, 2002.
- [۱۰] Cheddie, D. F. "Thermo-economic optimization of an indirectly coupled solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid power plant" international journal of hydrogen energy, Vol. 36, pp. 1702-1709, 2011.
- [۱۱] Delattin, F., Bram, S., Knoops, S., Ruyck, J. D. "Effects of steam injection on microturbine efficiency and performance" Energy, Vol. 33, p.p. 241–247, 2008.
- [۱۲] Ghanbari Bavarsad, P. "Energy and exergy analysis of internal reforming solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system" Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, p.p. 4591-4599, 2007.
- [۱۳] http://en.wikipedia.org/wiki/Bloom_Energy_Server.
- [۱۴] <http://www.prototech.no/index.cfm?id=256196>.

- [15] Kim, J.W., Virkar, A.V., Fung, K.Z., Mehta, K., Singhal, S.C." *Polarization Effect in Intermediate Temperature, Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cell*" Electrochim. Soc. 146(1), p.p. 69–78, 1999.
- [16] Ma, S., Wang, J., Yan, Z., Dai, Y., Lu, B. "Thermodynamic analysis of a new combined cooling, heat and power system driven by solid oxide fuel cell based on ammonia–water mixture."
- [17] Massardo, AF, Lubelli, F. "Internal reforming solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycles (IRSOFCeGT): part A - cell model and cycle thermodynamic analysis" ASME J Eng Gas Turb Power, Vol.122, p.p. 27-35, 2000.
- [18] Motahar, S., Alemrajabi, A.A. "Exergy based performance analysis of a solid oxide fuel cell and steam injected gas turbine hybrid power system" Journal of Hydrogen Energy, Vol 34, p.p. 2396-2407, 2009.
- [19] Naimaster, E. J., Sleiti, A.K. "Potential of SOFC CHP systems for energy-efficient commercial buildings" Energy and Buildings, Vol. 61, p.p. 153-160, 2013.
- [20] Pirkandi, J., Ghassemi, M., Hamed, M. H., Mohammadi, R. "Electrochemical and thermodynamic modeling of a CHP system using tubular solid oxide fuel cell (SOFC-CHP)" Journal of Cleaner Production, Vol 29-30, p.p. 151-162, 2012.
- [21] Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Poling, B.E. "The Properties of Gases and Liquids", 4th ed., McGraw Hill, New York, 1988.
- [22] Saebia, D., Patcharavorachot, Y., Assabumrungrat, S., Arpornwichanop, A. "Analysis of a pressurized solid oxide fuel cellegas turbine hybrid power system with cathode gas recirculation" international journal of hydrogen energy, Vol. 38, pp. 4748-4759, 2013.
- [23] Smith, A. D., Mago, P. J., Fumo, N. "Benefits of thermal energy storage option combined with CHP system for different commercial building types" Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol.1, p.p.3–12, 2013.
- [24] Wen, H., Ordonez, J.C., Vargas., J.V.C. "Single solid oxide fuel cell modeling and optimization" Journal of power sources, Vol. 196, p.p. 7519-7532, 2011.
- [25] Xu, H., Dang, Z., Bai, B. F. "Analysis of a 1 kW residential combined heating and power system based on solid oxide fuel cell" Applied Thermal Engineering, Vol. 50, p.p. 1101-1110, 2013.

فهرست علائم

| | | | |
|----------------------------|----------|---|-----------------|
| انحنا | Ψ | مساحت، m^2 | A |
| زیر نویس‌ها و بالا نویس‌ها | | مساحت ناحیه فعال، m^2 | A_{opt} |
| صفحه دو قطبی | 1 | ضریب کارایی پیچال | COP |
| کانال سوخت | 2 | نفوذ جرمی، m^2/s | D |
| آند | 3 | عرض یک شیار، m | D_w |
| الکتروولیت | 4 | $J \ mol^{-1}$ انرژی فعالسازی، $J \ mol^{-1}$ | E |
| کاتند | 5 | $C \ mol^{-1}$ ثابت فارادی، $C \ mol^{-1}$ | F |
| کانال هوا | 6 | A/cm^2 چگالی جریان، A/cm^2 | i |
| آند | a | چگالی جریان تبادلی، A/cm^2 | i_0 |
| فعالسازی | act | ثابت تعادل | k |
| فعال | $active$ | طول، m | L |
| کاتند | c | ضخامت ناحیه فعال، m | L_{opt} |
| کانال | ch | J/mol ارزش حرارتی هیدروژن، J/mol | LHV |
| غلظت | $diff$ | Kg/mol وزن مولکولی | M |
| سوخت | f | تعداد الکترون به ازای هر واکنش دهنده | n |
| ریفرمینگ | r | mol/s دبی مولی جریان ورودی | n_{in} |
| شیفت | s | mol/s دبی مولی جریان خروجی | n_{out} |
| ورودی | in | تعداد کانال‌ها | n_{ch} |
| ولتاژ مدار باز | ocv | Pa فشار | P |
| اهمی | ohm | kW توان الکتریکی هر سلول | $P_{elec,cell}$ |
| خروچی | out | kW توان کلی سیستم | P_{total} |
| ناحیه سه گانه | TPB | $^{\circ}K$ دما | T |
| تولید همزمان سه گانه | tri | V ولتاژ | V |
| | | کسر مولی مولفه در ترکیب | X |
| | | سرعت واکنش ریفرمینگ، mol/s | x |
| | | سرعت واکنش شیفت، mol/s | y |
| | | سرعت واکنش الکتروشیمیایی، mol/s | z |
| علائم یونانی | | | |
| | | γ | |
| | | ρ ضریب انتقال بار | |
| | | Ω مقاومت اهمی، Ω | S |
| | | $^{-1} m^{-2} \exp$ ضریب قبل از تخلخل | U |
| | | ضریب مصرف سوخت | w |
| | | V افت ولتاژ | x_f |
| | | نسبت استوکیومتری هوا | y |
| | | cm^3 حجم نفوذ مولکول ساده، cm^3 | $\}_{air}$ |
| | | $^{-1} m^{-1}$ هدایت الکتریکی، $^{-1} m^{-1}$ | ϵ |
| | | | \dagger |