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

فرزين گلزار '، مجيد آستانه' ، رامين روشندل "

تاريخ پذيرش مقاله:	تاريخ دريافت مقاله:
93/0/71	97/11/11

چکیدہ:

در این پژوهش ابتدا یک سیستم تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش بر اساس پیل سوختی اکسیدجامد با استفاده از گازطبیعی معرفی می شود. برای توسعه مدل کامل سیستم ترکیبی، معادلات مبدل سوخت اخلی، 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 می شود و بخارآب تولید شده به توربین گاز تزریق می شود که این فرایند ۱/۲۷٪ بازده سیستم تولید سه گانه و ۱/۳ لاول الکتریکی تولیدی را افزایش می دهد. در سناریوی دوم، بخارآب مازاد بر تقاضا در توربین بخار جهت تولید برق استفاده می شود که در این حالت ۱/۳٪ بازده تولید همزمان سه گانه و ۱/۷ kW توان تولیدی را افزایش می دهد. به این ترتیب، چنانچه گرمای تولید شده سیستم تولید همزمان بدرستی مدیریت شود، راندمان کلی سیستم تبدیل انرژی می تواند تا ۸۵٪ افزایش یابد.

كلمات كليدى:

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

۱) دانشجوی کارشناسیارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی

۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی

٣) هیات علمی دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی (نویسنده مسئول)

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

مقدمه

افزایش روزافزون مصرف سوختهای فسیلی و آلودگی ناشی از مصرف آنها در سال های 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، پیلهایسوختیاکسیدجامد هستند که انرژی شیمیایی سوخت را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می نمایند. دمای عملکردی این نوع پیل های سوختی بین ۲۶۰ تا ۱۱۰۰ درجهسانتیگراد میباشد [۱۰]. دمای عملکردی بالای پیلهای سوختی اکسید جامد استفاده مستقیم از انواع سوختهای موجود مانند گازطبیعی را امکانپذیر نموده است [۷]. در سال های انوع پیل های سوختی بن ۲۰۰ تا ۱۱۰۰ درجهسانتیگراد میباشد [۱۰]. دمای عملکردی بالای پیلهای سوختی اکسید جامد، استفاده مستقیم از انواع سوختهای موجود مانند گازطبیعی را امکانپذیر نموده است [۷]. در سال های اخیر تحقیقات بسیاری در مورد زیر ساختار پیل سوختی اکسید جامد 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 [۹۰]. است[۱]. همچنین به دلیل داشتن دمای بالا میتوان از آنها در سیستمهای تولید همزمان برق و حرارت استفاده نمود [۹۰]. است[۱]. همچنین به دلیل داشتن دمای بالا میتوان از آنها در سیستمهای تولید همزمان برق و حرارت استفاده نمود [۹۸]. است[۱]. همچنین به دلیل داشتن دمای بالا میتوان از آنها در سیستمهای تولید همزمان برق و حرارت استفاده نمود و در بازده بالا و آلودگی محیط زیستی کم، دمای عملکردی بالا، توان تولیدی زیاد و نداشتن سر و صدای زیاد و قطعه متحرک موتورهای احتراق داخلی نموده است [۲۰]. در حال حاضر، گروههای تحقیقاتی بسیاری در جهان به صورت تجربی برای موتورهای احتراق داخلی نموده است [۲۰]. در حال حاضر، گروههای تحقیقاتی بسیاری در جهان به صورت تجربی برای افزایش کارایی و کاهش هزینه پیل سوختیاکسیدجامد هستند که استفاده از آنها را قابل رقابت با فناوریهای مشاسن یک موتورهای از برای و کاوش هزینه پیل سوختیاکسیدجامد دار میکنند. برای مثال، گروه تحقیقاتی کریستین میشلسن یک موتواتی پیل سوختیاکسیدجامد دار در کشور نروژ راه اندازی نموده است [۱۹]. پیل های سوختی میشند ایستی میشای یک مولی موزی موانی پیل های سوختی در زمینه ساخت این موده است [۱۸]. یونایش کاری مولی مونای می میزی مودی مو مو و والمارت مشری یولی مولی موزی مولی مودی مولی مولی مولی مولی م

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 پیل 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 روشندل [۲] با اعمال مدیریت حرارتی و بازیابی حرارت پیل سوختی اکسید جامد به وسیله میکروتوربین گازی، ۱۷٫۸٪ بازده کلی سیستم را افزایش دادند. چان و همکاران [۹] یک سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی، ۱۷٫۸٪ بازده الکتریکی ۶۰٪ ارائه دادند. به این ترتیب، بازده سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز در مقایسه با سیستم های تبدیل انرژی رایج مانند محفظه احتراق سوخت و توربین گاز یا سیکل ترکیبی حدود ۲۰٪ بیشتر میباشد. سابا و همکاران [۲۲] بخشی از گاز خروجی از کاتد پیل سوختی را دوباره در توربین گاز مورد استفاده قرار دادند. استفاده مجدد از گاز خروجی کاتر، کار مورد نیاز کمپرسورهوا و تولید همزمان برق وگرما بر اساس پیل سوختی اکسید جامد بررسی شده است. هانزو و همکاران [۲۴] یک سیستم تولید همزمان برق و گرما بر اساس پیل سوختی اکسیدجامد برای یک منطقه مسکونی ارائه دادند. این سیستم پیشنهادی kW ا انرژی الکتریکی و XW ۲۵/۰ انرژی گرمایی تولید می نماید و دارای ۵۲/۱ ٪ بازده الکتریکی و ۷۹/۲ ٪ بازده تولید همزمان (بازده کل) می باشد. نایمستر و اسلیتی [۱۹] با ارائه سیستم تولید همزمان برق و گرما بر اساس پیل سوختی اکسید جامد برای ساختمان اداری نشان دادند که استفاده از این سیستم، ۱۴/۵٪ مصرف انرژی سالانه و ۶۶٪ تولید دیاکسیدکربن را در مقایسه با سیستمهای تهویه مطبوع رایج، کاهش میدهد. قاضیزاده و همکاران [۴] سیستم تولید منزمان برق، همزمان برق، گرما و برودت بر اساس پیل سوختی اکسید جامد برای یک ساختمان نمونه در تهران طراحی کردند. نتایج کار آنها نشان میدهد که استفاده از پیل سوختی در شرایط کنونی اقتصادی نیست ولی در آینده و یا با در نظر گرفتن همزمان برق، گرما و برودت بر اساس پیل سوختی در شرایط کنونی اقتصادی نیست ولی در آینده و یا با در نظر گرفتن مهزمان برق، میده که استفاده از پیل سوختی در شرایط کنونی اقتصادی نیست ولی در آینده و یا با در نظر گرفتن مهزینههای اجتماعی آلایندهها، اقتصادی خواهد شد. با توجه به اینکه دولت قصد دارد با اعطای تسهیلاتی نظیر خرید برق 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 [۳7]. 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 را می توان به شبکه فروخت، میزان برق تولیدی محدود کننده نمی باشد. اما را بدون استفاده رهاکرد. 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 ۳/۳٪ گاز ورودی به توربین گاز با بخارآب، ۵/۱ ٪ بازده الکتریکی سیستم افزایش می یابد.

با توجه به ساخت استک ۱۰۰ واتی پیل سوختی اکسیدجامد به صورت کاملا 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 اکسیدجامد 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 تولیدبخار آب استفاده می شود. بخشی از بخار آب تولید شده، در مبدل سوخت داخلی پیل سوختی مصرف می شود و مابقی بخار آب 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 می شود. در سناریوی اول بخارآب مازاد به مخلوط گاز ورودی توربین گاز تزریق می شود و در سناریوی دوم، از بخارآب مازاد برای تولید برق در توربین بخارآب استفاده می شود.

شکل۱) سیستم تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش بر اساس پیلسوختیاکسیدجامد

مدل سازی ریاضی

مدل سازی پیلسوختیاکسیدجامد

مهمترين مفروضات اين پژوهش برای مدلسازی پيل سوختی اکسيدجامد عبارتند از:

مدل مبدلسوختداخلى

برای پیل سوختی اکسیدجامد که سوخت مصرفی آن متان باشد، مبدل سوختخارجی یا داخلی برای تبدیل متان به گاز هیدروژن الزامی است. استفاده از مبدل سوخت داخلی به دلیل قیمت پایین تر، انتخاب بهتری است. واکنش هایی که در مبدل سوخت، آند و کاتد پیل سوختی انجام می پذیرد، به صورت زیر می باشد:

$$x \to [CH_4 + H_2O \leftrightarrow 3H_2 + CO] \tag{(1)}$$

$$y \to [CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2] \tag{(7)}$$

واكنش الكتروشيميايي:

$$z \to \left[\frac{1}{2}O_2 + H_2 \leftrightarrow H_2 O\right] \tag{(7)}$$

در روابط بالا x و y و z سرعت مولی واکنشهای تبدیل متان به هیدروژن و تبدیل کربنمونواکسید به هیدروژن و الکتروشیمیایی می باشند. با انجام موازنه جرمی جریان گازهای مختلف، دبی مولی گازهای خروجی از پیل سوختی مشخص می شود که در ادامه روابط آنها ارائه شده است.

¹⁾ reforming reaction

²⁾ shift reaction

$$n_{CH_4}^{out} = n_{CH_4}^{in} - x \tag{(f)}$$

۳۶

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

$$n_{H_2}^{out} = n_{H_2}^{in} + 3x + y - z \tag{9}$$

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

$$n_{CO_2}^{out} = n_{CO_2}^{in} + y \tag{A}$$

$$n_{tot}^{out} = n_{tot}^{in} + 2x \tag{9}$$

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

$$P_i = \frac{n_i}{n_{tot}} P_{tot} \tag{(1.)}$$

واکنشهای تبدیل متان به هیدروژن و تبدیل کربنمونواکسید به هیدروژن، واکنشهایی تعادلی هستند [۹و۱۲و۱۶] 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 کربنمونواکسید به هیدروژن ثوابت واکنش به صورت زیر تعریف می شوند.

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

$$K_{p,s} = \frac{P_{CO_2} \times P_{H_2}}{P_{CO} \times P_{H_2O}}$$
(17)

مقادیر ثابت واکنش به صورت تابعی از دما می باشند.

$$\log K = AT_{SOFC}^{4} + BT_{SOFC}^{3} + CT_{SOFC}^{2} + DT_{SOFC} + E$$
(17)

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

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

$$K_{p,s} = \frac{(n_{CO_2}^{\ in} + y) \times (n_{H_2}^{\ in} + 3x + y - z)}{(n_{CO}^{\ in} + x - y) \times (n_{H_2O}^{\ in} - x - y + z)}$$
(10)

$$U_f = \frac{z}{3x + y} \Longrightarrow z = U_f \times (3x + y) \tag{19}$$

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 الكتروشيميايي

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

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

در معادله بالا، Y_{ohm} افت اهمیک در قسمت های 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:

$$V_{OCV} = \frac{-\left(H_{H_2O} - H_{H_2} - \frac{1}{2}H_{O_2}\right) + T \times \left(S'_{H_2O} - S'_{H_2} - \frac{1}{2}S'_{O_2}\right) - RT \ln \left[\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}(P_{O_2})^{\frac{1}{2}}}\right] \qquad (1A)$$

لم مول فعال ناحیه سه گانه(TPB) که واکنشهای شیمیایی واقعا در آنجا اتفاق میافتد، اشاره میکند. $L_{j,opt}$ نیم واکنشهای الکتروشیمای در الکترودهای آند و کاتد، نیم واکنشهای الکتروشیمای الکتروشیمایی در مکانهایی اتفاق می افتد که جمع تمام افت های 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 می شود:

$$\mathbf{y}_{ohm,\,j} = I\mathbf{S}_{j}, \quad j = 1,4 \tag{19}$$

$$Y_{ohm,j} = \frac{I(A_{j,opt} - L_y L_z)L_{j,opt}}{2A_{j,opt}L_y L_z(1 - W_j)^{\dagger}_4} + \frac{I(L_j - L_{j,opt})}{L_y L_z(1 - 1.8W_j)^{\dagger}_i}, \quad j = 3,5$$
(Y.)

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 می کند. S₁ و S₄ مقاومتهای صفحات دو قطبی و الکترولیت هستند که بر اساس ویژگیهای مواد و هندسه سلول به صورت زیر به دست می آیند [۲۴]:

$$S_{1} = \frac{L_{1}}{L_{y}L_{z}^{\dagger} + \frac{L_{2}}{(1+n_{ch})L_{t}L_{y}^{\dagger} + \frac{L_{6}}{(1+n_{ch})L_{t}L_{z}^{\dagger} + \frac{L_{6}}{(1+n_{ch})L_{t}L_{z}^$$

$$S_4 = \frac{L_4}{L_y L_z \dagger_4} \tag{(YY)}$$

می باشد و به صورت زیر به دست می آید:
$$A_{j,opt}$$

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

قطر میانگین حفرههای موازی در دو الکترود است و توسط معادله ۲۴ تعریف می شود: $D_{P,j}$

$$D_{P,j} = D_{W,j} W_j / (1 - W_j) \tag{(Yf)}$$

فشارهای نواحی سه گانه می باشد که به فشار جزئی واکنش دهنده و محصولات در TPB اشاره می کند. فشارهای P_{TPB} نواحی سه گانه توسط کیم و اوگیر و همکارانش توسط معادلات ۲۶ تا ۲۴ بیان شده است [۵۵]:

$$P_{H_2O,TPB} = p_f X_{H_2O} + \frac{RTE_3}{2FD_3W_3} \frac{L_3I}{L_y L_z}$$
(Ya)

$$P_{H_2,TPB} = p_f X_{H_2} - \frac{RTE_3}{2FD_3W_3} \frac{L_3I}{L_y L_z}$$
(19)

$$P_{O_2,TPB} = p_{air} - \left(p_{air} - X_{O_2} p_{air}\right) \exp\left(\frac{RT \mathbb{E}_5 L_5 I}{4F D_5 \mathbb{W}_5 p_{air} L_y L_z}\right)$$
(YV)

ضرایب نفوذ در الکترود آند و کاتد از طریق معادلات زیر به دست می آید [۱۹]:

$$D_{3} = \frac{1.43 \times 10^{-7} T^{1.75} \left(M_{H_{2}} + M_{H_{2}O}\right)^{\frac{1}{2}}}{p_{f} \left(2M_{H_{2}}M_{H_{2}O}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\mathfrak{E}_{H_{2}}^{\frac{1}{3}} + \mathfrak{E}_{H_{2}O}^{\frac{1}{3}}\right)^{\frac{1}{2}}}$$
(YA)

$$D_5 = \frac{1.43 \times 10^{-7} T^{1.75} (M_{O_2} + M_{N_2})^{1/2}}{p_{air} (2M_{O_2} M_{N_2})^{1/2} (\mathbb{E}_{O_2}^{-1/3} + \mathbb{E}_{N_2}^{-1/3})^2}$$
(Y9)

افتهای غلطتی، Y_{conc,j} ، در الکترودهای آند و کاتد توسط اوگیر و همکارانش به صورت زیر ارائه شده است [۲۱]:

$$Y_{conc,c} = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2,TPB}} \right)$$
(r.)

$$y_{conc,a} = \frac{RT}{4F} \ln(\frac{P_{H_2}P_{H_2O,TPB}}{P_{H_2O,TPB}P_{H_2O}})$$
(r)

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

$$i = i_{o,j} \left[\exp\left(\frac{\Gamma nF}{RT} \mathbf{y}_{act,j}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\Gamma)nF}{RT} \mathbf{y}_{act,j}\right) \right],$$

$$j = 3,5$$
(TY)

افتهای فعال سازی، Y_{act,j} که انرژی مورد نیاز برای فعال شدن نیم واکنشهای الکتروشیمیایی را فراهم می کند بر اساس معادله بالتر– والمر و به صورت معادله ۳۳ تعریف می شود:

$$y_{act,j} = \frac{RT}{\Gamma nF} \sinh^{-1}(\frac{i}{i_{0,j}}), \quad j = 3,5$$
(YY)

n در معادله بالا برابر ۲ و α که ضریب انتقال بار را نشان می دهد در اینجا مقدار نوعی 0/0 را می گیرد. $i_{0,j}$ که نشان دهنده چگالی جریان تبادلی می باشد، به صورت معادله زیر تعریف شده است:

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

چگالی توان الکتریکی تکپیلسوختیاکسیدجامد برابر است با:

 $P_{elec,cell} = V \times i \tag{7a}$

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.

1100		.1\10~	
	پررمبر	معدار	پارامىر
100 cm ²	A		پارامترهای مربوط به خواص فیزیک سلوا
0/05 cm	L_1	14×10 ⁻⁶ m	$D_{W,3}$
0/1 cm	L_2	14×10 ⁻⁶ m	$D_{\scriptscriptstyle W,5}$
0/05 cm	L_3	140×10 ³ Jmol ⁻¹	E_3
0/002 cm	L_4	137×10 ³ Jmol ⁻¹	E_5
0/005 cm	L_5	10	n _{ch}
0/1 cm	L_6	0/5	r
0/2 cm	L_{ch}	$6/54 \times 10^{11} \Omega^{-1} \mathrm{m}^{-2}$	U_3
0/8 cm	L_t	$2/35 \times 10^{11} \Omega^{-1} m^{-2}$	u ₅
10 cm	L_y	16/3 cm ³	${\mathfrak E}_{o_2}$
10 cm	L_{z}	6/12 cm ³	$\epsilon_{_{H_2}}$
3/75 🗙 10 ⁻⁴	L _{3,opt}	13/1 cm ³	$\epsilon_{_{H_2O}}$
7/20 \times 10 ⁻⁴ $L_{5,opt}$ پارامترهای ثابت	$L_{5,opt}$	18/5 cm ³	ϵ_{N_2}
	پارامترهای ثابت	$1/5 \times 10^{6} \Omega^{-1} m^{-1}$	† 1
0/1 MPa	$P_f = P_{air}$	8/0×10 ⁴ Ω ⁻¹ m ⁻¹	† ₃
0/1 MPa	P_{ref}	$33/4 \times 10^{3} exp(-10/3 \times 10^{3}/T) \Omega^{-1} m^{-1}$	† ₄
1073 °K	Т	8/4×10 ³ Ω ⁻¹ m ⁻¹	† ₅
	ئابت های جهانی	9/5	Ψ_3
96500 C mol ⁻¹	F	7/2	Ψ_5
8.314 J mol ⁻¹ K ⁻¹	R		پارامترهای مربوط به طراحی هندسی

جدول۱) پارامترهای فیزیکی و ثابتهای مدل تک پیل سوختی اکسیدجامد

توان کلی که توسط استک پیل سوختی تولید می شود، برابر است با: (۳۶)

$$P_{total} = V \times i \times N \times A$$

که N تعداد کل سلول های استک است.

بازده الکتریکی برای این سیستم به صورت زیر می باشد:

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

چرخه خنک سازی جذبی

میزان خنکسازی چرخههای یخچالیجذبی به میزان گرمایشی که در اختیار سیستم قرار میگیرد و ضریب عملکرد یخچال بستگی دارد. ضریب عملکرد چرخههای خنکسازیجذبی برای چیلرهای یک اثره ۲/۶ تا ۲/۷ و برای چیلرهای دو اثره ۲/۹ تا ۲/۲ می باشد. از آنجا که برای بازیابی حرارتی، چیلرهای یک اثره مناسب تر می باشند، در کار حاضر ضریب عملکرد یخچال ۲/۷ درنظر گرفته شده و از مخلوط آمونیاک و آب به عنوان سیال عامل استفاده شده است. $Q_{Cooling} = Q_{heating} \times COP$

شاخصهای عملکردی و معیار مقایسه

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

بازده الکتریکی پیل سوختی از رابطه زیر به دست می آید:

$$y_{SOFC} = \frac{W_{SOFC}}{n_{fuel} \times LHV_{fuel}}$$
(ra)

بازده الکتریکی سیستم ترکیبی از رابطه زیر به دست می آید:

$$\mathbf{y}_{elec} = \frac{W_{SOFC} + W_{Turbine} - W_{Compressor}}{n_{fuel} \times LHV_{fuel}} \tag{(*.)}$$

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

$$y_{tri} = \frac{W_{SOFC} + W_{Turbine} - W_{Compressor} + Q_{Heating} + Q_{Cooling}}{n_{fuel} \times LHV_{fuel}}$$
(*1)

نتايج و بحث

اعتبار سنجى

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



شکل۲) 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 میباشد، معادلات حاکم بر مبدل سوخت با معادلات الکتروشیمیایی 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 شدهاند.

	کار حاضر	مرجع (م) ام س	خطای نسبی ۰/
	(moi/s)	(mol/s)	/•
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	3/8Y×10 ⁻⁷	0

جدول۲) مقایسه نتایج مدل ریفرمر(دبی گاز خروجی آند) کار حاضر با مرجع [۸]

نتايج

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، می توان گرمای مازاد را ذخیره کرد. اما سیستمهای ذخیره گرمایی برای مدت زمان طولانی قادر به ذخیره انرژی حرارتی با کیفیت بالا نیستند. در ادامه، دو سناریوی متفاوت برای استفاده از گرمای مازاد بر تقاضا ارائه خواهد شد.

سناريوی اول

در این سناریو، از گرمای مازاد بر تقاضا برای تولید بخارآب استفاده می شود و بخارآب تولیدی به توربین گاز تزریق می شود. 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 پیل سوختی و توربین گاز، بخارآب تولید می شود. مقداری از بخارآب تولید شده که مازاد بر تقاضای گرمایش و سرمایش است، به مخلوط گاز ورودی به توربین گاز تزریق می شود. این کار دمای گاز ورودی به توربین گاز را کاهش و دبی آن را افزایش می دهد. باید توجه داشت که مقدار بخارآب تزریق شده، از محدودیت سرج توربین نباید بیشتر شود که محدودیت سرج حدود ۳۰٪ گاز ورودی به توربین می باشد [۱۲]. نتایج حاصل از مدل سازی این سیستم نشان می دهد که تزریق بخارآب به توربین گاز، ۱/۳ kW گرمایش و سرمایش سیستم اولیه کاهش یابد، بازده تولید سه گانه ۸ ٪ کاهش می یابد. چنانچه از گرمای مازاد برای تولید بخار آب به منظور تزریق به توربین گاز استفاده شود، ۱/۲۷٪ بازده تولید سه گانه افزایش می یابد.

سناريوى دوم

سیستم ترکیبی سناریوی دوم نیز در شکل (۳) نشان داده شده است. در این سناریو، از گرمای مازاد بر تقاضا برای تولید بخارآب استفاده شده و از آن در توربین بخار برای تولید برق استفاده می شود. مزیت استفاده از توربین بخار نسبت به توربین گاز، تزریق بخار آن است که محدودیت سرج ندارد و از انرژی بخارآب بهتر استفاده می نماید. مزیت دیگر توربین بخار نسبت به توربین گاز، تزریق بخار آن است که محدودیت سرج ندارد و از انرژی بخارآب بهتر استفاده می نماید. مزیت دیگر توربین در یری توربین گاز، تزریق بخار آن است که محدودیت سرج ندارد و از انرژی بخارآب بهتر استفاده می نماید. مزیت دیگر توربین بخار آن است که می محدودیت سرج ندارد و از انرژی بخارآب بهتر استفاده می نماید. مزیت دیگر موربین بخار آن است که می توان از آب خروجی از توربین بخار دوباره در چرخه استفاده نمود در حالی که بخارآب تزریق شده به توربین گاز چنانچه مایع شود با گاز دی اکسید کربن ترکیب شده، تولید گاز اسیدی می کند. نتایج مدل سازی سناریوی دوم نشان می دهد که استفاده از توربین بخار، انرژی الکتریکی کل سیستم را افزایش می دهد و ۱۷ ٪ بازده تولید می سه گانه را در مقایسه با عدم استفاده از گرمای مازاد ارتقا می بخشد.



شکل۳) سیستم ترکیبی تولید همزمان برای سناریوهای اول و دوم

مقایسه دو سناریو

شکل (۴) تغییرات بازده تولید سهگانه را بر حسب کاهش تقاضای گرمایش نشان می دهد. همان گونه که مشخص است، کاهش تقاضای گرمایش به طور کلی بازده تولید سه گانه را کاهش می دهد. اما استفاده از گرمای مازاد به منظور افزایش تولید برق در سناریوهای تعریف شده، کاهش بازده تولید سه گانه را کاهش می دهد. در هر تقاضای گرمایش، سناریو اول ۱/۲۷ ٪ و سناریو دوم ۱/۷ ٪ بازده تولید سه گانه را افزایش می دهد.



شکل۴) 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 گرمای مازاد استفاده نمی شود، برق تولیدی توربین و کل سیستم ثابت می ماند. اما با کاهش تقاضای گرمایش، برق تولیدی در سناریو اول ۱/۳ kW و در سناریو دوم ۱/۷ kW افزایش می یابد.



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

نتایج دو سناریو نشان میدهد که استفاده از توربین بخار نسبت به توربین گاز تزریق بخار برای استفاده از گرمای مازاد بر تقاضا از لحاظ بازده انرژی مناسب تر می باشد. اما اضافه کردن توربین بخار به سیستم، هزینه اولیه سیستم را افزایش می دهد. بنابراین، هزینه مصرف سوخت را کاهش و هزینه اولیه را افزایش می دهد. در مقاله های بعدی، بررسی اقتصادی دو سناریو پیشنهادشده انجام خواهد شد.

نتيجهگيرى

در این پژوهش، سیستم تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش بر اساس پیل سوختی اکسیدجامد مدل سازی شد. برای توسعه مدلی کامل از سیستم تولید همزمان، معادلات مبدل سوخت داخلی، روابط الکتروشیمیایی پیل سوختی، گرمایش و سرمایش همزمان با هم حل شدند. برای اطمینان از صحت مدل های بدست آمده، نتایج مبدل سوخت داخلی و پیل سوختی با نتایج مراجع مربوطه مقایسه شدند. برای استفاده از گرمای مازاد بر تقاضا، دو سناریو تعریف شد. مهمترین نتایجی که از کار حاضر استخراج می شود، عبارتند از:

- اگر تقاضای گرمایش و سرمایش سیستم اولیه کاهش یابد، بازده تولید سه گانه ۸٪ کاهش می یابد.
- چنانچه از گرمای مازاد بر تقاضا برای تولید بخاراب به منظور تزریق به توربین گاز استفاده شود، kW ۱/۳ اون
 الکتریکی و ۱/۲۷٪ بازده تولید سه گانه افزایش می یابد.
- چنانچه از گرمای مازاد بر تقاضا برای تولید بخارآب استفاده شده و از آن در توربین بخار برای تولید برق استفاده شود،۱/۷ kW انرژی الکتریکی کل سیستم افزایش یافته و ۱/۷٪ بازده تولید سه گانه در مقایسه با عدم استفاده از گرمای مازاد ارتقا می یابد.

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

- [۱] بزرگمهری، شهریار. حامدی، محسن. محبی، حامد. قبادزاده، امیـر. اصـلان نـژاد، حامـد. (۱۳۹۱)، ارزیـابی عملکـرد و ریزساختار تکسلپیل سوختی اکسیدجامد، نشریه انرژی ایران، ۳۶–۲۱.
- [۲] بهزادیفروغ، عاطفه. روشندل، رامین. (۱۳۹۱)، مدل سازی و بررسی پارامتریک سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسیدجامد و میکروتوربین گازی، نشریه انرژی ایران، ۱۷–۱۱.
- [۳] فرشید، بهزاد. قبادزاده، امیرحسین. لاری، حمیدرضا. رضایی، مسعود. (۱۳۷۸)، اتصال دهندهها در پیل سوختی اکسیدجامد، اولین کنفرانس ملی هیدروژن و پیل سوختی.
- [۴] قاضیزاده، محمد صادق. غلامی، عادل. رودکی، سید میر جواد. (۱۳۹۰)، تعیین ظرفیت بهینه و آنالیز حساسیت سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه محرک اولیه پیل سوختی برای یک آپارتمان مسکونی، نشریه انرژی ایران،۱۸–۱۰.
- [5] 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.
- [6] Bard, A.J., Faulkner, L.R. "*Electrochemical Methods-Fundamentals and Applications*", 2nd ed., Wiley, New York, 2001.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Ghanbari Bavarsad, P. "Energy and exergy analysis of internal reforming solid oxide fuel cellegas turbine hybrid system" Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, p.p. 4591-4599, 2007.
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Bloom_Energy_Server.
- [14] http://www.prototech.no/index.cfm?id=256196.

۴۸

منابع

- [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" Electrochem. 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., Hamedi, 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] Saebea, 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

۵۰

انحنا	Ψ	${ m m}^2$ مساحت،	A
زیر نویسها و بالا نویسها		m^2 مساحت ناحیه فعال،	Aopt
صفحه دو قطبی	1	ضریب کارایی یخچال	COP
كانال سوخت	2	${ m m}^2/{ m s}$ نفوذ جرمی، ${ m m}^2/{ m s}$	D
آند	3	عرض یک شیار، _ی m	D_w
الكتروليت	4	انرژی فعالسازی، ¹ -J mol	E
کاتد	5	$\operatorname{C}\operatorname{mol}^{-1}$ ثابت فارادی، C	F
کانال هوا	6	چگالی جریان، ^۲ A/cm	i
أند	а	چگالی جریان تبادلی، ^۲ A/cm	i_0
فعالسازى	act	ثابت تعادل	k
فعال	active	طول، m	L
کاتد	С	ضخامت ناحیه فعال، m	L_{opt}
كانال	ch	ارزش حرارتی هیدروژن، J/mol	LHV
غلظت	diff	وزن مولکولی Kg/mol	M
سوخت	f	تعداد الکترون به ازای هر واکنشدهنده	n
ريفرمينگ	r	دبی مولی جریان ورودی mol/s	n _{in}
شيفت	S	دبی مولی جریان خروجی mol/s	n _{out}
ورودى	in	تعداد كانالها	n _{ch}
ولتاژ مدار باز	OCV	فشار Pa	Р
اهمى	ohm	توان الکتریکی هر سلول kW	$P_{elec,cell}$
خروجى	out	توان کلی سیستم kW	P _{total}
ناحیه سه گانه	ТРВ	°k دما	T
تولید همزمان سه گانه	tri	ولتاژ V	V
		کُسر مولی مولفه در ترکیب	X
		سرعت واکنش ريفرمينگ،mol/s	x
		سرعت واكنش شيفت،mol/s	У
		سرعت واكنش الكتروشيميايى،mol/s	Z
		علائم يونانى	
		ضريب انتقال بار	r
		مقاومت اهمی، Ω	S
		ضریب قبل از exp، ⁻¹ m ⁻²	u
		تخلخل	W
		ضريب مصرف سوخت	Х _f
		افت ولتاژ، V	У
		نسبت استوکیومتری هوا	}
		حجم نفوذ مولکول ساده، cm ³	, _{air} €
		هدایت الکتریکی، ⁻¹ m ⁻¹	†

هدایت الکتریکی، ¹ m⁻¹