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

فرزین گلزار[۱]، مجید آستانه[۲] ، رامین روشندل [۳]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۵/۲۸

چکیده:

در این پژوهش ابتدا یک سیستم تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش بر اساس پیل‌سوختی‌اکسیدجامد با استفاده از گازطبیعی معرفی می‌شود. برای توسعه مدل کامل سیستم ترکیبی، معادلات مبدل سوخت‌داخلی، 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 توربین‌گاز تزریق می‌شود که این فرایند ۱/۲۷٪ بازده سیستم تولید سه‌گانه و ۱/۳ kW توان الکتریکی تولیدی را افزایش می‌دهد. در سناریوی‌دوم، بخارآب مازاد بر تقاضا در توربین‌بخار جهت تولید برق استفاده می شود که در این حالت ۱/۷٪ بازده تولید سه‌گانه 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.

کلمات کلیدی:

پیل‌سوختی‌اکسیدجامد، سیستم تولید همزمان برق و گرمایش و سرمایش، چرخه سرمایش‌جذبی، توربین‌گاز تزریق‌بخار

۱) دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی golzar@energy.sharif.ir
۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی astaneh@energy.sharif.ir
۳) هیات علمی دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی (نویسنده مسئول) roshandel@sharif.edu

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

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 ۶۰۰ 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 سال‌های 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 [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 پیل‌های‌سوختی‌اکسیدجامد 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 پیل‌سوختی‌اکسیدجامد کار می‌کنند. برای مثال، گروه تحقیقاتی کریستین میشلسن یک استک ۳ کیلوواتی پیل‌سوختی‌اکسیدجامد 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 می باشند [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 پیل‌سوختی‌اکسیدجامد 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 توربین‌های‌گاز 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 توربین‌گاز با 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 توربین‌گاز یا سیکل‌ترکیبی حدود ۲۰٪ بیشتر می‌باشد. سابا و همکاران [۲۲] بخشی از گاز خروجی از کاتد پیل‌سوختی 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

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 پیل‌سوختی‌اکسیدجامد برای یک منطقه مسکونی ارائه دادند. این سیستم پیشنهادی ۱ kW انرژی الکتریکی و ۰/۵۲ kW 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 ۶۲٪ تولید دی‌اکسیدکربن را در مقایسه با سیستم‌های تهویه مطبوع رایج، کاهش می‌دهد. 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 می‌دهد که استفاده از پیل‌سوختی در شرایط کنونی اقتصادی نیست ولی در آینده و یا با در نظر گرفتن هزینه‌های اجتماعی آلاینده‌ها، 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.

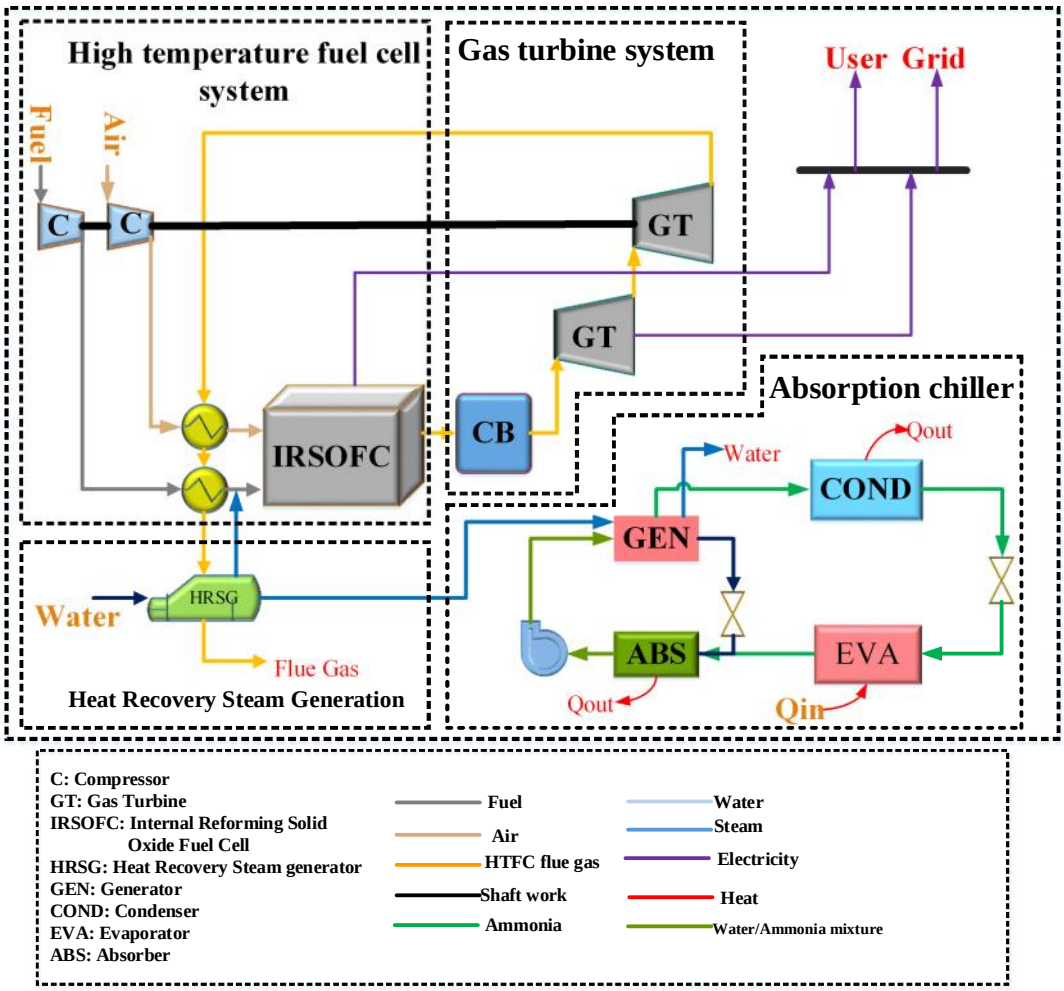
اگرچه تحقیقات انجام گرفته نشان می دهد که سیستم های تولید همزمان برق و گرما توانایی کاهش هزینه عملیاتی، آلودگی و مصرف سوخت را دارند [۱۶]، اما کاربرد سیستم های تولید همزمان محدودیت هایی نیز دارد. یکی از مهم ترین مشکلات کاربرد سیستم های تولید همزمان، عدم تطابق میزان برق و گرمای تولید شده با برق و گرمای 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 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 توربین‌گاز تزریق نمودند. آنها نشان دادند که با جایگزین کردن ۳/۳٪ گاز ورودی به توربین‌گاز با بخارآب، ۵/۱ ٪ بازده الکتریکی سیستم افزایش می یابد.

با توجه به ساخت استک ۱۰۰ واتی پیل‌سوختی‌اکسیدجامد 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 امکان‌پذیر می باشد.

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

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



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

مدل سازی ریاضی

مدل سازی پیل‌سوختی‌اکسیدجامد

مهمترین مفروضات این پژوهش برای مدل‌سازی پیل‌سوختی‌اکسیدجامد عبارتند از:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

۱- سیستم در حالت پایا کار می‌کند.

۲- هوای ورودی به پیل‌سوختی حاوی ۷۹٪ نیتروژن و ۲۱٪ اکسیژن می باشد.

۳- واکنش‌های شیمیایی به حالت تعادل می رسند.

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 به‌طور کامل در محفظه احتراق اکسید می‌شود.

۷- از افت فشار در پیل‌سوختی صرف‌نظر شده است.

مدل مبدل‌سوخت‌داخلی

برای پیل‌سوختی‌اکسیدجامد 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 می باشد:

واکنش تبدیل متان به هیدروژن[1]:

$$x \rightarrow [CH_4 + H_2O \leftrightarrow 3H_2 + CO] \quad (۱)$$

واکنش تبدیل کربن مونواکسید به هیدروژن[2]:

$$y \rightarrow [CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2] \quad (۲)$$

واکنش الکتروشیمیایی:

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

در روابط بالا x و y و z سرعت مولی واکنش‌های تبدیل متان به هیدروژن و تبدیل کربن‌مونواکسید به هیدروژن و الکتروشیمیایی می‌باشند. 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

$$n_{CH_4}{}^{out} = n_{CH_4}{}^{in} - x \quad (۴)$$

$$n_{H_2O}{}^{out} = n_{H_2O}{}^{in} - x - y + z \quad (۵)$$

$$n_{H_2}{}^{out} = n_{H_2}{}^{in} + 3x + y - z \quad (۶)$$

$$n_{CO}{}^{out} = n_{CO}{}^{in} + x - y \quad (۷)$$

$$n_{CO_2}{}^{out} = n_{CO_2}{}^{in} + y \quad (۸)$$

$$n_{tot}{}^{out} = n_{tot}{}^{in} + 2x \quad (۹)$$

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

$$P_i = \frac{n_i}{n_{tot}} P_{tot} \quad (۱۰)$$

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.

$$K_{p,r} = \frac{P_{H_2}{}^3 \times P_{CO}}{P_{CH_4} \times P_{H_2O}} \quad (۱۱)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

$$K_{p,s} = \frac{P_{CO_2} \times P_{H_2}}{P_{CO} \times P_{H_2O}} \quad (۱۲)$$

مقادیر ثابت واکنش به صورت تابعی از دما می باشند.

$$\log K = AT_{SOFC}{}^4 + BT_{SOFC}{}^3 + CT_{SOFC}{}^2 + DT_{SOFC} + E \quad (۱۳)$$

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:

$$K_{p,r} = \frac{(n_{H_2}{}^{in} + 3x + y - z)^3 \times (n_{CO}{}^{in} + x - y)}{(n_{CH_4}{}^{in} - x) \times (n_{H_2O}{}^{in} - x - y + z)} \times \frac{P_{cell}{}^2}{(n_{tot}{}^{in} + 2x)^2} \quad (۱۴)$$

$$K_{p,s} = \frac{(n_{CO_2}{}^{in} + y) \times (n_{H_2}{}^{in} + 3x + y - z)}{(n_{CO}{}^{in} + x - y) \times (n_{H_2O}{}^{in} - x - y + z)} \quad (۱۵)$$

$$U_f = \frac{z}{3x + y} \Rightarrow z = U_f \times (3x + y) \quad (۱۶)$$

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 پیل‌سوختی.

مدل الکتروشیمیایی

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:

$$V = V_{OCV} - \left(\sum_j \eta_{ohm,j} + \eta_{conc,3} + \eta_{conc,5} + \eta_{act,3} + \eta_{act,5} \right), j = 1,3,4,5 \quad (۱۷)$$

در معادله بالا، η_{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 پیل‌سوختی انجام می شود، به صورت زیر تعریف می شود:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

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

$L_{j,opt}$ به طول فعال ناحیه سه گانه(TPB) که واکنش‌های شیمیایی واقعا در آنجا اتفاق می‌افتد، اشاره می‌کند. نیم واکنش‌های الکتروشیمیایی در مکان‌هایی اتفاق می افتد که جمع تمام افت های ولتاژ در الکترودهای آند و کاتد، $\eta_{tot,j}$، 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:

$$\eta_{ohm,j}=I\ \ _j,\quad j=1,4 \quad (۱۹)$$

$$\eta_{ohm,j}=\frac{I\left(A_{j,opt}-L_yL_z\right)L_{j,opt}}{2A_{j,opt}L_yL_z\left(1-\varepsilon_j\right)\sigma_4}+\frac{I\left(L_j-L_{j,opt}\right)}{L_yL_z\left(1-1.8\varepsilon_j\right)\sigma_i},\quad j=3,5 \quad (۲۰)$$

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 می کند. $_1$ و $_4$ مقاومت‌های صفحات دو قطبی و الکترولیت هستند که بر اساس ویژگی‌های مواد و هندسه سلول به صورت زیر به دست می آیند [۲۴]:

$$_1=\frac{L_1}{L_yL_z\sigma_1}+\frac{L_2}{\left(1+n_{ch}\right)L_tL_y\sigma_1}+\frac{L_6}{(1+n_{ch})L_tL_z\sigma_1} \quad (۲۱)$$

$$_4=\frac{L_4}{L_yL_z\sigma_4} \quad (۲۲)$$

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

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

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

$$D_{P,j} = D_{W,j}¤_j / (1-¤_j) \tag{۲۴}$$

P_{TPB} فشارهای نواحی سه‌گانه می‌باشد که به فشار جزئی واکنش‌دهنده‌ها و محصولات در TPB اشاره می کند. فشارهای نواحی سه‌گانه توسط کیم و اوگیر و همکارانش توسط معادلات ۲۶ تا ۲۴ بیان شده است [۵و۱۵]:

$$P_{H_2O,TPB} = p_f X_{H_2O} + \frac{RT \cdot {}_3}{2FD_3¤_3} \frac{L_3 I}{L_y L_z} \tag{۲۵}$$

$$P_{H_2,TPB} = p_f X_{H_2} - \frac{RT \cdot {}_3}{2FD_3¤_3} \frac{L_3 I}{L_y L_z} \tag{۲۶}$$

$$P_{O_2,TPB} = p_{air} - \left(p_{air} - X_{O_2} p_{air} \right) \exp\left(\frac{RT \cdot {}_5 L_5 I}{4FD_5¤_5 p_{air} L_y L_z} \right) \tag{۲۷}$$

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

$$D_3 = \frac{1.43\times10^{-7} T^{1.75} \left(M_{H_2} + M_{H_2O} \right)^{\frac{1}{2}}}{p_f \left(2M_{H_2} M_{H_2O} \right)^{\frac{1}{2}} \left(¬_{H_2}^{\frac{1}{3}} + ¬_{H_2O}^{\frac{1}{3}} \right)^2} \tag{۲۸}$$

$$D_5 = \frac{1.43\times10^{-7} T^{1.75} \left(M_{O_2} + M_{N_2} \right)^{1/2}}{p_{air} \left(2M_{O_2} M_{N_2} \right)^{1/2} \left(¬_{O_2}^{1/3} + ¬_{N_2}^{1/3} \right)^2} \tag{۲۹}$$

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

$$¦_{conc,c} = \frac{RT}{4F} \ln\left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2,TPB}} \right) \tag{۳۰}$$

$$¦_{conc,a} = \frac{RT}{4F} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{H_2O,TPB}}{P_{H_2,TPB} P_{H_2O}} \right) \tag{۳۱}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

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

$$i = i_{o,j}\left[\exp\left(\frac{\sim nF}{RT}\,\text{¦}_{act,j}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\sim)nF}{RT}\,\text{¦}_{act,j}\right)\right], \quad j = 3,5 \tag{۳۲}$$

افت‌های فعال‌سازی، $\text{¦}_{act,j}$ 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:

$$\text{¦}_{act,j} = \frac{RT}{\sim nF}\sinh^{-1}\left(\frac{i}{i_{0,j}}\right), \quad j = 3,5 \tag{۳۳}$$

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

$$i_{0,j} = \frac{RT}{nF}\text{¢}_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right), \quad j = 3,5 \tag{۳۴}$$

چگالی توان الکتریکی تک‌پیل‌سوختی‌اکسیدجامد برابر است با:

$$P_{elec,cell} = V \times i \tag{۳۵}$$

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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

جدول۱) پارامترهای فیزیکی و ثابت‌های مدل تک‌پیل‌سوختی‌اکسیدجامد

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
پارامترهای مربوط به خواص فیزیکی سلول		A	100 cm^2
$D_{W,3}$	14×10^{-6} m	L_1	0/05 cm
$D_{W,5}$	14×10^{-6} m	L_2	0/1 cm
E_3	140×10^{3} $Jmol^{-1}$	L_3	0/05 cm
E_5	137×10^{3} $Jmol^{-1}$	L_4	0/002 cm
n_{ch}	10	L_5	0/005 cm
~	0/5	L_6	0/1 cm
¢$_3$	$6/54\times10^{11}$ $\Omega^{-1}m^{-2}$	L_{ch}	0/2 cm
¢$_5$	$2/35\times10^{11}$ $\Omega^{-1}m^{-2}$	L_t	0/8 cm
¬$_{o_2}$	16/3 cm^3	L_y	10 cm
¬$_{H_2}$	6/12 cm^3	L_z	10 cm
¬$_{H_2O}$	13/1 cm^3	$L_{3,opt}$	$3/75\times10^{-4}$
¬$_{N_2}$	18/5 cm^3	$L_{5,opt}$	$7/20\times10^{-4}$
±$_1$	$1/5\times10^{6}$ $\Omega^{-1}m^{-1}$	پارامترهای ثابت	
±$_3$	$8/0\times10^{4}$ $\Omega^{-1}m^{-1}$	$P_f = P_{air}$	0/1 MPa
±$_4$	$33/4\times10^{3}\exp(-10/3\times10^{3}/T)\Omega^{-1}m^{-1}$	P_{ref}	0/1 MPa
±$_5$	$8/4\times10^{3}\Omega^{-1}m^{-1}$	T	1073 °K
Ψ_3	9/5	ثابت های جهانی	
Ψ_5	7/2	F	96500 C mol^{-1}
پارامترهای مربوط به طراحی هندسی		R	8.314 J mol^{-1} K^{-1}

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

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

$$P_{total} = V \times i \times N \times A \quad (۳۶)$$

که N تعداد کل سلول های استک است.

بازده الکتریکی برای این سیستم به صورت زیر می باشد:

$$Eff = \frac{V \times i \times N \times A}{n_{H_2} \times LHV_f} \quad (۳۷)$$

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 ۰/۶ تا ۰/۷ و برای چیلرهای دو اثره ۰/۹ تا ۱/۲ می باشد. از آنجا که برای بازیابی حرارتی، چیلرهای یک اثره مناسب‌تر می باشند، در کار حاضر ضریب عملکرد یخچال ۰/۷ درنظر گرفته شده و از مخلوط آمونیاک و آب به عنوان سیال عامل استفاده شده است.

$$Q_{Cooling} = Q_{heating} \times COP \quad (۳۸)$$

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 پیل‌سوختی از رابطه زیر به دست می آید:

$$\eta_{SOFC} = \frac{W_{SOFC}}{n_{fuel} \times LHV_{fuel}} \quad (۳۹)$$

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

$$\eta_{elec} = \frac{W_{SOFC} + W_{Turbine} - W_{Compressor}}{n_{fuel} \times LHV_{fuel}} \quad (۴۰)$$

و بازده‌کلی تبدیل انرژی برای سیستم تولید همزمان سه‌گانه به صورت زیر تعریف می شود:

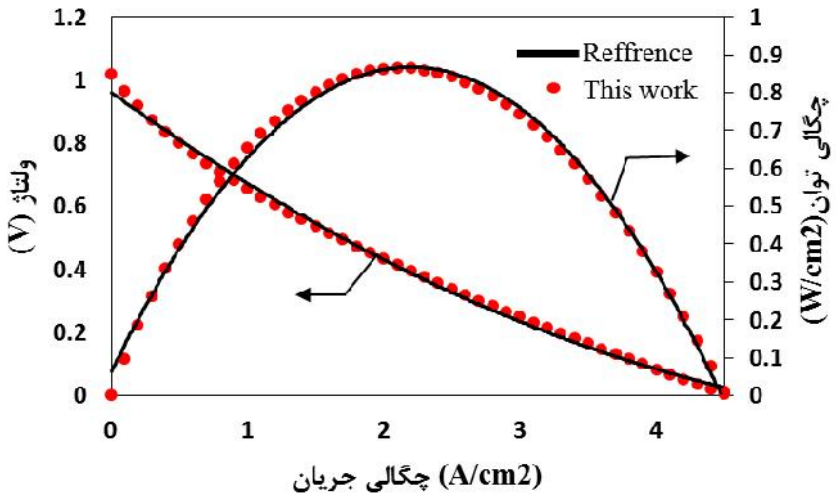
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

$$\eta_{tri} = \frac{W_{SOFC} + W_{Turbine} - W_{Compressor} + Q_{Heating} + Q_{Cooling}}{n_{fuel} \times LHV_{fuel}} \quad (۴۱)$$

نتایج و بحث

اعتبار سنجی

همان‌طور که قبلا بیان شد، جزء اصلی تبدیل انرژی در سیستم ترکیبی مورد نظر پیل‌سوختی‌اکسیدجامد 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(دمای ۱۰۷۳کلوین)، شکل کلی دو نمودار قابل تطبیق با یکدیگر است. به طور متوسط ، نتایج حاصل از مدل‌سازی کار حاضر با نتایج مرجع، ۲/۲ ٪ با یکدیگر اختلاف دارند.



شکل۲) مقایسه نتایج مدل پیل‌سوختی 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 مبدل‌سوخت با معادلات الکتروشیمیایی آند و کاتد همزمان حل می‌شوند و خروجی آن دبی مولی و جزء مولی گاز های خروجی از آند و کاتد پیل‌سوختی می باشد. در جدول (۲) جزء مولی گازهای خروجی از آند پیل سوختی کار حاضر با نتایج مرجع [۸] مقایسه شده‌اند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

جدول۲) 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_2O	0/684	0/7	2/28
H_2	0/116	0/119	2/52
CH_4	$3/53\times10^{-7}$	$3/9\times10^{-7}$	0
N_2	$3/87\times10^{-7}$	$3/8\times10^{-7}$	0
CO_2	0/1732	0/168	3/09
O_2	$3/87\times10^{-7}$	$3/8۷\times10^{-7}$	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، 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.

سناریوی اول

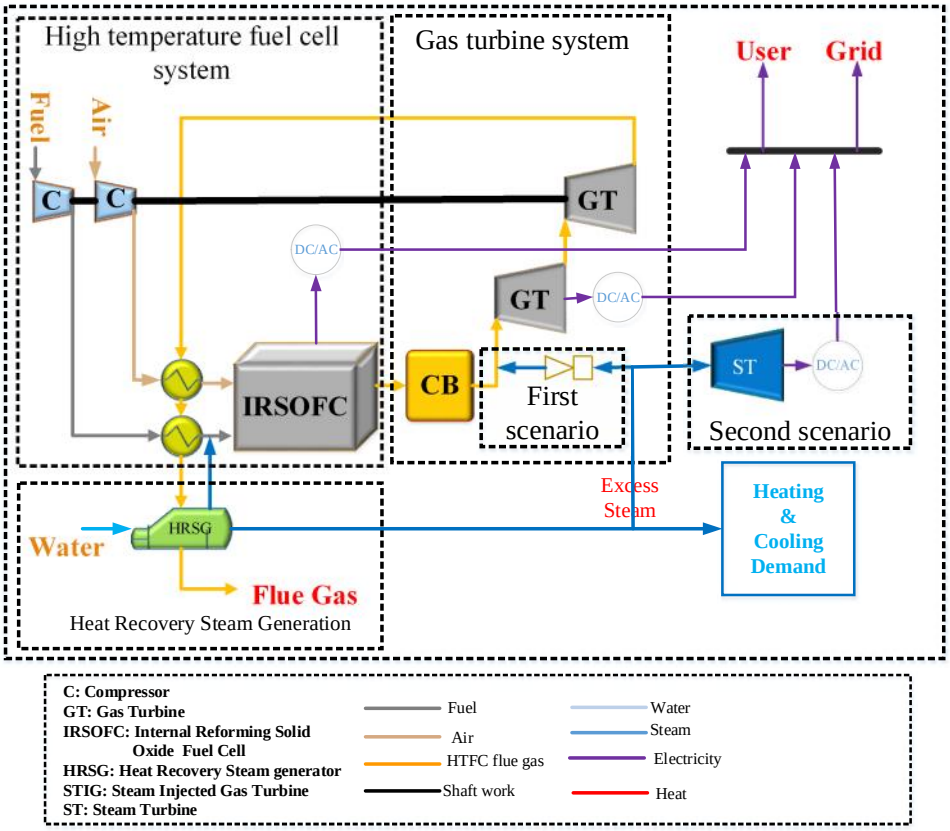
در این سناریو، از گرمای مازاد بر تقاضا برای تولید بخارآب استفاده می شود و بخارآب تولیدی به توربین‌گاز تزریق می‌شود. سیستم ترکیبی مربوط به سناریوی اول در شکل (۳) نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است، با استفاده از گازهای داغ خروجی از سیستم پیل‌سوختی و توربین‌گاز، بخارآب تولید می شود. مقداری از بخارآب تولید شده که مازاد بر تقاضای گرمایش و سرمایش است، به مخلوط گاز ورودی به توربین‌گاز تزریق می شود. این کار دمای گاز ورودی به توربین‌گاز 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 مدل‌سازی این سیستم نشان می‌دهد که تزریق بخارآب به توربین گاز، ۱/۳ kW به برق تولیدی کل سیستم می افزاید. اگر تقاضای

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

گرمایش و سرمایش سیستم اولیه کاهش یابد، بازده تولید سه‌گانه ۸ ٪ کاهش می‌یابد. چنانچه از گرمای مازاد برای تولید بخارآب به منظور تزریق به توربین‌گاز 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 گرمای مازاد بر تقاضا برای تولید بخارآب استفاده شده و از آن در توربین‌بخار برای تولید برق استفاده می‌شود. مزیت استفاده از توربین‌بخار نسبت به توربین گاز، تزریق بخار آن است که محدودیت سرج ندارد و از انرژی بخارآب بهتر استفاده می‌نماید. مزیت دیگر توربین‌بخار آن است که می توان از آب خروجی از توربین‌بخار دوباره در چرخه استفاده نمود در حالی که بخارآب تزریق شده به توربین گاز چنانچه مایع شود با گاز دی‌اکسیدکربن 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 گرمای مازاد ارتقا می‌بخشد.

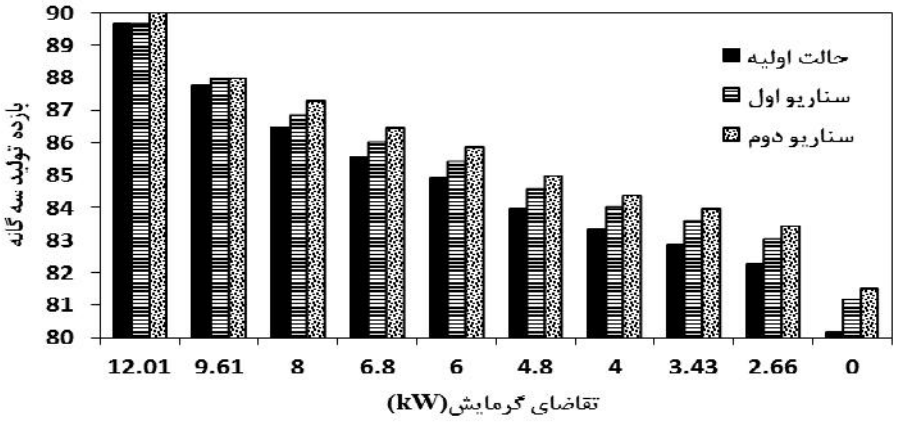


شکل۳) سیستم ترکیبی تولید همزمان برای سناریوهای اول و دوم

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

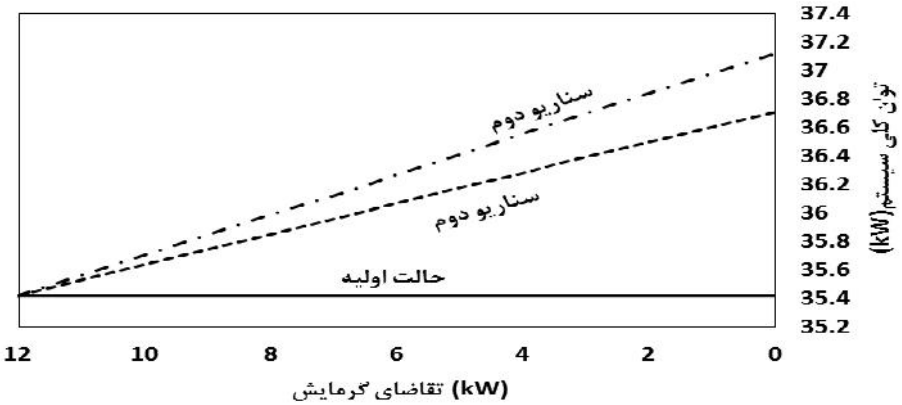
مقایسه دو سناریو

شکل (۴) تغییرات بازده تولید سه‌گانه را بر حسب کاهش تقاضای گرمایش نشان می دهد. همان‌گونه که مشخص است، کاهش تقاضای گرمایش به طور کلی بازده تولید سه‌گانه را کاهش می‌دهد. 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 می‌دهد.



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 kW ۱/۳ و در سناریو دوم kW ۱/۷ افزایش می یابد.



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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

نتایج دو سناریو نشان می‌دهد که استفاده از توربین‌بخار نسبت به توربین‌گازتزریق‌بخار برای استفاده از گرمای مازاد بر تقاضا از لحاظ بازده انرژی مناسب‌تر می‌باشد. اما اضافه‌کردن توربین‌بخار به سیستم، هزینه اولیه سیستم را افزایش می‌دهد. بنابراین، هزینه مصرف سوخت 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 پیل‌سوختی‌اکسیدجامد مدل‌سازی شد. برای توسعه مدلی کامل از سیستم تولید همزمان، معادلات مبدل‌سوخت‌داخلی، روابط الکتروشیمیایی پیل‌سوختی، گرمایش و سرمایش همزمان با هم حل شدند. برای اطمینان از صحت مدل‌های بدست آمده، نتایج مبدل‌سوخت‌داخلی و پیل‌سوختی 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 بخارآب به منظور تزریق به توربین‌گاز استفاده شود، ۱/۳ kWتوان الکتریکی و ۱/۲۷٪ بازده تولید سه‌گانه افزایش می یابد.
- چنانچه از گرمای مازاد بر تقاضا برای تولید بخارآب استفاده شده و از آن در توربین‌بخار برای تولید برق استفاده شود،۱/۷ kW انرژی الکتریکی کل سیستم افزایش یافته و ۱/۷٪ بازده تولید سه‌گانه در مقایسه با عدم استفاده از گرمای مازاد ارتقا می‌یابد.

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

منابع

[۱] بزرگمهری، شهریار. حامدی، محسن. محبی، حامد. قبادزاده، امیر. اصلان نژاد، حامد. (۱۳۹۱)، ارزیابی عملکرد و ریزساختار تک‌سل‌پیل‌سوختی‌اکسیدجامد، نشریه انرژی ایران، ۳۶-۲۱.

[۲] بهزادی‌فروغ، عاطفه. روشندل، رامین. (۱۳۹۱)، مدل سازی و بررسی پارامتریک سیستم ترکیبی پیل‌سوختی‌اکسیدجامد و میکروتوربین‌گازی، نشریه انرژی ایران، ۱۷-۱.

[۳] فرشید، بهزاد. قبادزاده، امیرحسین. لاری، حمیدرضا. رضایی، مسعود. (۱۳۷۸)، اتصال دهنده‌ها در پیل‌سوختی‌اکسیدجامد، اولین کنفرانس ملی هیدروژن و پیل‌سوختی.

[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 پیل‌سوختی برای یک آپارتمان مسکونی، نشریه انرژی ایران،۱۸-۱.

[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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

[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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]

فهرست علائم

A	مساحت، m^2
A_{opt}	مساحت ناحیه فعال، m^2
COP	ضریب کارایی یخچال
D	نفوذ جرمی، m^2/s
D_w	عرض یک شیار، m
E	انرژی فعالسازی، $J\ mol^{-1}$
F	ثابت فارادی، $C\ mol^{-1}$
i	چگالی جریان، A/cm^2
i_0	چگالی جریان تبادلی، A/cm^2
k	ثابت تعادل
L	طول، m
L_{opt}	ضخامت ناحیه فعال، m
LHV	ارزش حرارتی هیدروژن، J/mol
M	وزن مولکولی Kg/mol
n	تعداد الکترون به ازای هر واکنش‌دهنده
n_{in}	دبی مولی جریان ورودی mol/s
n_{out}	دبی مولی جریان خروجی mol/s
n_{ch}	تعداد کانال‌ها
P	فشار Pa
$P_{elec,cell}$	توان الکتریکی هر سلول kW
P_{total}	توان کلی سیستم kW
T	دما °k
V	ولتاژ V
X	کسر مولی مولفه در ترکیب
x	سرعت واکنش ریفرمینگ، mol/s
y	سرعت واکنش شیفت، mol/s
z	سرعت واکنش الکتروشیمیایی، mol/s

علائم یونانی

~	ضریب انتقال بار
	مقاومت اهمی، Ω
¢	ضریب قبل از exp، $\Omega^{-1}\ m^{-2}$
¤	تخلخل
¥ $_f$	ضریب مصرف سوخت
¦	افت ولتاژ، V
ª $_{air}$	نسبت استوکیومتری هوا
¬	حجم نفوذ مولکول ساده، cm^3
±	هدایت الکتریکی، $\Omega^{-1}\ m^{-1}$
Ψ	انحنا

زیر نویس‌ها و بالا نویس‌ها

1	صفحه دو قطبی
2	کانال سوخت
3	آند
4	الکترولیت
5	کاتد
6	کانال هوا
a	آند
act	فعالسازی
$active$	فعال
c	کاتد
ch	کانال
$diff$	غلظت
f	سوخت
r	ریفرمینگ
s	شیفت
in	ورودی
ocv	ولتاژ مدار باز
ohm	اهمی
out	خروجی
TPB	ناحیه سه گانه
tri	تولید همزمان سه گانه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-01-30]