



تحلیل عملکرد یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه‌ی پیل سوختی پلیمری تحت شرایط کاری مختلف

محمود چهارطاقی^{1*}، بهراد علی‌زاده خارکشی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
* شاهرود، صندوق پستی 3619995161، chahartaghi@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 14 دی 1394
پذیرش: 24 بهمن 1394
ارائه در سایت: 07 فروردین 1395
کلید واژگان:

چکیده

در این مقاله یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما برای استفاده از گرمای اتلافی پیل سوختی پلیمری پیشنهاد شده است. سیستم حاضر می‌تواند دارای کاربردهای ساختمانی باشد. این سیستم شامل پیل سوختی پلیمری؛ تانک ذخیره حرارتی؛ چیلر جذبی؛ تانک هیدروژن؛ کمپرسور هوا و پمپ می‌باشد. حرارت تولیدی در پیل سوختی توسط یک سیال عامل جذب شده است و قسمتی از این حرارت به ژنراتور چیلر جذبی برای تأمین سرمایش و قسمت دیگر آن به تانک ذخیره حرارتی برای تأمین گرمایش ساختمان داده شده است. مدل‌سازی این سیستم از چهار دیدگاه انرژی؛ انرژی؛ صرفه‌جویی سوخت و آلاینده‌ی انجام شده است. پیل سوختی این سیستم تولید همزمان دارای توان الکتریکی 38.63 کیلووات و توان حرارتی 39.17 کیلووات است. راندمان پیل سوختی به تنهایی 37.21% محاسبه شده است، در حالی که وقتی از تانک ذخیره حرارتی و چیلر جذبی برای بهره بردن از حرارت اتلافی پیل استفاده شود، راندمان انرژی به 68% می‌رسد. بیشترین بازگشت ناپذیری در پیل سوختی پلیمری رخ می‌دهد و بازگشت ناپذیری پیل 47.21 کیلووات است و بازگشت ناپذیری تولیدی در چیلر جذبی نیز 5.94 کیلووات محاسبه شده است. از لحاظ درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ی در مقایسه با سیستم‌های سنتی تأمین انرژی ساختمان‌ها به ترتیب درصد کاهش مصرف سوخت 34% و درصد کاهش آلاینده‌ی 25% بدست آمده است. همچنین محاسبات نشان داد که با افزایش فشار کاری پیل سوختی راندمان‌های انرژی و انرژی افزایش یافته است.

سیستم تولید همزمان
پیل سوختی پلیمری
چیلر جذبی، راندمان
درصد کاهش مصرف سوخت

Performance analysis of a combined cooling, heating and power system driven by PEM fuel cell at different conditions

Mahmood Chahartaghi*, Behrad Alizadeh Kharkeshi

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
* P.O.B. 3619995161 Shahrood, Iran, chahartaghi@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 January 2016
Accepted 13 February 2016
Available Online 26 March 2016

Keywords:

CCHP, PEM fuel cell
Absorption chiller
Efficiency
FESR

ABSTRACT

In this paper, a combined cooling, heating and power system for using heat losses in PEM fuel cell has been proposed that can be used for residential application. This system consists of PEM fuel cell, heat storage tank, absorption chiller, hydrogen tank, air compressor and pump. Heat generated in fuel cell has been absorbed by a working fluid and a part of heat has been given to absorption chiller and another part to heat storage tank. Modeling of this system has been done from four energy, exergy, FESR and CDER perspective. Fuel cell of this CCHP system generates 38.63 kW electrical power and 39.17 kW heat power. Energy efficiency of fuel cell singly is 37.21% but when heat storage tank and absorption chiller have been used for recovering waste heat, energy efficiency reaches to 68%. Maximum irreversibility loss occurs in fuel cell which is calculated 47.21 kW and absorption chiller irreversibility has been calculated 5.94 kW. From the viewpoint of FESR and CDER in comparison with conventional systems, FESR and CDER are 34% and 25% respectively. Also, analysis has shown that with increasing fuel cell operating pressure energy and exergy efficiency increased.

1- مقدمه

کشورها بیشتر به دنبال سیستم‌هایی باشند که دارای راندمان بالاتری نسبت به سیستم‌های سنتی هستند.

فارغ از هزینه‌ی بالای ساخت پیل‌های سوختی، آن‌ها یکی از بهترین محرک‌های اولیه‌ی سیستم‌های تولید قدرت به حساب می‌آیند، علت این امر مزایای بسیار زیاد این نوع از محرک‌های اولیه می‌باشد، که از آن جمله

سرعت بالای افزایش جمعیت و پیشرفت صنعت در دنیای امروز باعث شده تا در قرن حاضر سرعت مصرف سوخت‌های فسیلی به شدت افزایش یابد، همچنین از طرف دیگر با توجه به کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش نگران کننده میزان آلودگی‌های زیست محیطی، باعث شده است تا بسیاری از

Please cite this article using:

M. Chahartaghi, B. Alizadeh Kharkeshi, Performance analysis of a combined cooling, heating and power system driven by PEM fuel cell at different conditions, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 383-394, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می‌توان به بازدهی بالای این محرک‌های اولیه که بین 30 تا 90 درصد است، اشاره نمود. این محرک‌های اولیه مزایای دیگری نیز دارند که از آن جمله می‌توان به آلودگی زیست محیطی و صوتی پایین، ساختار انعطاف پذیر نسبت به توان مورد نیاز، در بعضی موارد قابل حمل بودن، قابلیت ترکیب شدن با سیستم‌های دیگر تأمین انرژی و تولید حرارت علاوه بر الکتریسیته اشاره کرد [1]. سیستمی که عموماً پیشنهاد می‌شود تا با پیل سوختی ترکیب گردد، و باعث بالا رفتن راندمان پیل شود، سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما¹ می‌باشد. در سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و سرما از گرمای اتلافی اجزای مختلف سیکل برای مصارف مفید، استفاده حداکثری می‌شود. این سیستم‌ها مزایای زیادی نسبت به سیستم‌های سنتی پراکنده تولید برق دارند که از آن جمله می‌توان به راندمان بالای 60 الی 90 درصدی این سیستم‌ها اشاره کرد [2].

انتخاب نوع محرک اولیه² برای سیستم‌های تولید همزمان مسأله‌ای بسیار مهم می‌باشد. این سیستم‌ها می‌توانند از محرک‌های اولیه‌ی مختلفی بهره ببرند، که از آن جمله می‌توان به توربین بخار، توربین گاز، موتور استرلینگ، موتور احتراق داخلی و پیل سوختی اشاره کرد. مطالعات زیادی در زمینه‌ی سیستم‌های تولید همزمان بر پایه‌ی محرک‌های اولیه‌ی مختلف انجام شده است، که از آن جمله می‌توان به کار داوولین و شیفی که استفاده از یک سیستم تولید همزمان با محرک اولیه توربین گاز را برای بیمارستانی در شانگهای بررسی نمودند، اشاره کرد. آن‌ها مسائل مربوط به راه‌اندازی سیستم تولید همزمان و همچنین ارزیابی‌های اقتصادی آن را مطرح نمودند [3]. کونگ و همکاران راندمان انرژی و اقتصادی یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه با محرک اولیه موتور استرلینگ را با یک سیستم تولید جداگانه مقایسه کردند، آن‌ها نشان دادند که سیستم تولید همزمان سه‌گانه با محرک اولیه موتور استرلینگ در مقایسه با سیستم تولید جداگانه 33% در مصرف انرژی اولیه صرفه‌جویی می‌نماید. همچنین نتایج نشان داد که عملکرد حرارتی چیلر جذبی تأثیر زیادی بر راندمان سیستم تولید همزمان سه‌گانه دارد [4]. کستا و همکاران عملکرد اقتصادی یک سیستم تولید همزمان سه‌گانه با توربین بخار را مورد بررسی قرار دادند، آن‌ها تولید همزمان سه‌گانه، دوگانه و پمپ حرارتی جذبی را با هم مقایسه کردند. پمپ حرارتی جذبی برای این انتخاب شد که بتواند بیش‌ترین کاهش مصرف انرژی را صرف‌نظر از تولید برق بررسی کنند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سیستم تولید همزمان سه‌گانه دارای بیش‌ترین بهره‌وری است. به هر حال سیستم تولید دوگانه سرمایه‌ش تولید نمی‌کند و پمپ حرارتی جذبی نیز برق تولید نمی‌کند بنابراین این نتیجه‌گیری نمی‌توانست دقیق باشد [5]. یک سیستم میکرو CCHP خانگی که شامل یک چیلر جذبی است توسط هانگ فو و همکاران مورد بررسی تجربی قرار گرفت. آن‌ها عملکرد چیلر جذبی را تحت شرایط مختلف گرمایشی مورد مطالعه قرار دادند و آن‌ها دریافتند که تقریباً یک رابطه خطی بین چیلر جذبی با تغییر دمای آب گرم ورودی وجود دارد [6]. یک سیستم تولید همزمان بر پایه‌ی پیل سوختی اسید فسفریک توسط دادس ارائه شد، ایشان و همکارانشان نشان دادند که راندمان الکتریکی پیل‌های سوختی اسید فسفریک بین 37-42% است اما وقتی در سیستم‌های تولید همزمان به کار می‌روند، راندمان آن‌ها می‌تواند به 85% نیز برسد [7]. سوگویرا و همکاران نیز به امکان‌سنجی استفاده از پیل سوختی کربنات مذاب برای کاربردهای تولید همزمان پرداختند. سیستم تولید همزمان مد نظر آن‌ها بر پایه پیل

پارامترهای هندسی پیل بر راندمان سیستم پرداخته‌اند [12].

در این مقاله یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه‌ی پیل سوختی پلیمری برای کاربردهای ساختمانی پیشنهاد شده است. این سیستم از تانک ذخیره حرارتی و چیلر جذبی برای استفاده از حرارت اتلافی در پیل سوختی پلیمری بهره برده است. در مقاله‌ی حاضر تحلیل سیستم از چهار دیدگاه انرژی، انرژی، زیست محیطی و میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت انجام گشته است. در حالی که در عمده‌ی کارهایی که به بررسی عملکرد سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه‌ی پیل سوختی پلیمری پرداخته‌اند، به تحلیل یک یا دو دیدگاه از این چهار دیدگاه پرداخته شده است. در این سیکل در ابتدا مدل‌سازی انرژی و انرژی پیل سوختی پلیمری و چیلر جذبی انجام شده است. با کمک این مدل‌ها، راندمان‌های انرژی، انرژی و میزان بازگشت ناپذیری تولیدی در اجزای چیلر و پیل سوختی محاسبه شد. البته با توجه به اینکه مقدار انرژی محلول لیتیم بروماید-آب در جداول موجود نیست، از یکی از مدل‌های معرفی شده برای محاسبه‌ی انرژی محلول استفاده شده است و برای کمک به آنالیز انرژی چیلر جذبی، تابعی در EES نوشته شد که انرژی محلول را با داشتن غلظت و دمای محلول محاسبه کرده و نشان می‌دهد. سپس سیستم پیشنهاد شده، با سیستم‌های سنتی تولید برق و حرارت مورد مقایسه قرار گرفت و آنالیز سیستم از لحاظ میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت و میزان کاهش آلاینده‌ی دی‌اکسید کربن انجام شده است. و در نهایت نیز تأثیر عوامل مختلفی از پیل و چیلر جذبی بر هر چهار دیدگاه انرژی، انرژی، زیست محیطی و صرفه‌جویی در مصرف سوخت نیز مورد بررسی قرار گرفت.

2- طرح سیستم

طرح سیستم مورد نظر در شکل 1 نشان داده شده است. سیستم تولید همزمان مورد بررسی در این مقاله شامل پشته پیل سوختی پلیمری، چیلر جذبی تک اثره و تانک ذخیره حرارتی است. این سیستم توانایی تولید همزمان برق، حرارت و سرما را برای مصارف ساختمانی دارد و از چیلر جذبی لیتیم بروماید-آب برای تهویه مطبوع و همچنین تانک ذخیره حرارتی برای تأمین آب گرم مورد نیاز بهره می‌برد. همچنین در کنار این سیستم نیز از

¹ Combined Cooling Heating And Power

² Prime Mover

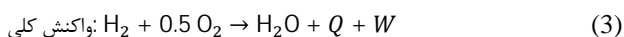
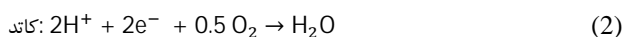
- فرض شده است که عایق‌بندی پیل سوختی به‌گونه‌ای است که حرارتی را که پیل به محیط دفع می‌کند قابل صرف‌نظر است و آب سرد عبوری تمام انرژی حرارتی پیل را دریافت کند [15].
- ضرایب گرمای ویژه ثابت در نظر گرفته شده است [15,13].

3- مدل پیل سوختی پلیمری

در پیل‌های سوختی پلیمری هیدروژن در آند یونیزه، الکترون‌های آن جدا شده و یون‌های هیدروژن که دارای بار مثبت هستند با عبور از غشا، به سمت کاتد می‌روند ولی در مسیر عبور، الکترون‌ها نمی‌توانند از این غشا عبور کنند، در نتیجه این الکترون‌ها از مدار خارجی می‌گذرند و این امر موجب تولید جریان الکتریکی می‌شود، در نهایت در کاتد الکترون‌ها و اکسیژن و هیدروژن باهم واکنش داده، آب، کار و گرما تولید می‌شود [20].

3-1- مدل انرژی پیل سوختی پلیمری

واکنش‌های انجام شده در پیل سوختی پلیمری در روابط (1) تا (3) آمده است [15].



ولتاژ مدار باز سیستم‌های پیل سوختی به ولتاژ نرنست معروف است و طبق رابطه‌ی (4) به دست می‌آید [21].

$$E_{Nernst} = \frac{-\Delta G^0}{n_e F} + \frac{RT_{fc}}{n_e F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}^{sat}} \right) \quad (4)$$

در معادله‌ی (4) $-\Delta G^0$ تغییرات انرژی آزاد گیبس، n_e تعداد الکترون منتقل‌شده، R ثابت جهانی گازها، T_{fc} دمای کاری پیل سوختی در مقیاس کلوین، F ثابت فارادی است و برای به دست آوردن ولتاژ نرنست در معادله (4) نیاز به داشتن P_j ها می‌باشد، که این P_j نشان‌دهنده فشار جزئی واکنش دهنده‌ها است. برای حل این معادله ابتدا فشار جزئی بخار آب را از رابطه‌ی تجربی (5) قابل محاسبه است [21].

$$\log(P_{H_2O}^{sat}) = -2.1794 + 0.02953t - 9.1837 \times 10^{-5}t^2 + 1.4454 \times 10^{-7}t^3 \quad (5)$$

در رابطه‌ی تجربی (5)، t دمای کاری پیل سوختی در واحد درجه سلسیوس است و برای به دست آوردن فشارهای جزئی هیدروژن و اکسیژن نیز از روابط (6) و (7) می‌توان استفاده نمود [21].

$$P_{H_2} = (0.5 P_{H_2O}^{sat}) \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{1.653i}{T_{fc}^{1.334}}\right) \times x_{H_2O}^{sat}} - 1 \right] \quad (6)$$

$$P_{O_2} = P \left[1 - x_{H_2O}^{sat} - x_{N_2}^{channel} \exp\left(\frac{0.291i}{T_{fc}^{0.832}}\right) \right] \quad (7)$$

در روابط (6) و (7) P فشار کاری پیل سوختی برحسب بار، i چگالی جریان برحسب آمپر بر سانتی‌متر مربع و $x_{H_2O}^{sat}$ کسر مولی آب و $x_{N_2}^{channel}$ کسر مولی نیتروژن است و برای محاسبه‌ی مجهولات معادلات (6) و (7) می‌توان از روابط (8) تا (10) استفاده نمود [21].

$$x_{N_2}^{channel} = \frac{(x_{N_2,in} - x_{N_2,out})}{\ln\left(\frac{x_{N_2,in}}{x_{N_2,out}}\right)} \quad (8)$$

$$x_{N_2,in} = 0.79(1 - x_{H_2O}^{sat}) \quad (9)$$

$$x_{N_2,out} = \frac{1 - x_{H_2O}^{sat}}{1 + \left(\frac{\lambda_{air}-1}{\lambda_{air}}\right)\left(\frac{0.21}{0.79}\right)} \quad (10)$$

بوiler کمکی برای مواقعی که سیستم نمی‌تواند حرارت مورد نیاز خود را تأمین کند نیز استفاده شده است، اما تحلیل در این مقاله بر این اساس انجام شده است که سیستم در ظرفیت نامی خود پاسخ‌گوی نیاز الکتریکی و حرارتی ساختمان باشد و بوiler تنها محض اطمینان در سیکل وجود داشته باشد. هیدروژن در تانک هیدروژن در فشار 10 بار موجود است و هیدروژن برای ورود به پیل سوختی از یک اجکتور یا شیر تنظیم فشار عبور می‌کند و به فشار 2 تا 3 بار می‌رسد، سپس سوخت هیدروژن پس از عبور از رطوبت زن به پیل سوختی وارد می‌شود [13]. هوا نیز پس از عبور از تجهیزات نشان داده شده از جمله کمپرسور هوا، مبدل فشار هوا و رطوبت زن وارد پیل سوختی می‌شود. هیدروژن و هوا پس از ورود به پیل سوختی و انجام واکنش الکتروشیمیایی آب، برق و حرارت تولید می‌کنند. آب تولیدی ناشی از واکنش الکتروشیمیایی، از پیل سوختی خارج و وارد تانک ذخیره حرارتی می‌شود. از طرف دیگر برای آن که دمای پیل سوختی افزایش پیدا نکند (زیرا افزایش دمای پیل سوختی پلیمری برای پلیمر آن مضر است)، پیل سوختی نیاز به خنک‌کاری دارد و برای خنک‌کاری پیل سوختی از یک خط آب 73 درجه سلسیوس استفاده شده است زیرا اگر اختلاف دمای سیال خنک‌کاری پیل سوختی با خود پیل زیاد باشد پیل از لحاظ توزیع دمایی دچار مشکل می‌شود [14]. سیال عامل خنک‌کاری پیل پس از عبور از پیل و دریافت گرمای آن به دو انشعاب تقسیم می‌شود که یک قسمت از آن به سمت تانک ذخیره‌ی حرارتی رفته و قسمت دیگر آن نیز به سمت ژنراتور چیلر جذبی می‌رود. در این مقاله فرض شده است که آب خروجی از پیل به دو قسمت مساوی تقسیم شده است. آب داغی که وارد تانک ذخیره حرارتی می‌شود می‌تواند نیاز گرمایشی ساختمان را تأمین کند اما برای اطمینان بوiler کمکی از نوع آب داغ لحظه‌ای نیز برای مواقعی که مشکل کمبود انرژی حرارتی وجود دارد، برای اطمینان تعبیه شده است. ظرفیت منبع ذخیره حرارتی 2 متر مکعب و آب سرد در دمای 15 درجه سلسیوس وارد تانک شده و در دمای 60 درجه سلسیوس نیز تانک را ترک می‌کند. از طرف دیگر در فصل تابستان برای تأمین سرمایش مورد نیاز ساختمان از یک چیلر جذبی تک اثره که دمای ژنراتور آن 72 درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است استفاده می‌شود. قسمت دوم آب گرم خروجی از پیل وارد ژنراتور چیلر جذبی می‌شود تا انرژی حرارتی خود را از دست دهد و به دمای 73 درجه سلسیوس برسد و با این کار چیلر جذبی می‌تواند سرمایش مورد نیاز برای تهویه مطبوع ساختمان را فراهم کند. در پایان نیز این دو خط آب باز با هم ترکیب شده و با دمای 73 درجه سلسیوس وارد پیل سوختی می‌شوند تا خنک‌کاری پیل را انجام دهند و این سیکل تکرار می‌گردد. برق تولیدی توسط پیل سوختی نیز به مبدل جریان مستقیم به متناوب وارد می‌شود تا برای مصرف کننده قابل استفاده باشد. برای مدل‌سازی سیکل فرضیاتی در نظر گرفته شده است که این فرضیات عبارتند از:

- سیستم به حالت پایا برسد [15-19].
- سوخت هیدروژن و اکسیژن‌دهنده هوای مرطوب است، بخار موثر آند 50% بخار اشباع است در حالی که بخار موثر کاتد 100% است [15-19].
- آب تولیدی توسط پیل سوختی پلیمری در فاز مایع قرار دارند [15,13].
- هوا شامل 79% نیتروژن و 21% اکسیژن است [15].
- دمای کاری پیل 80 درجه سلسیوس و فشار کاری آن 3 بار است [15].

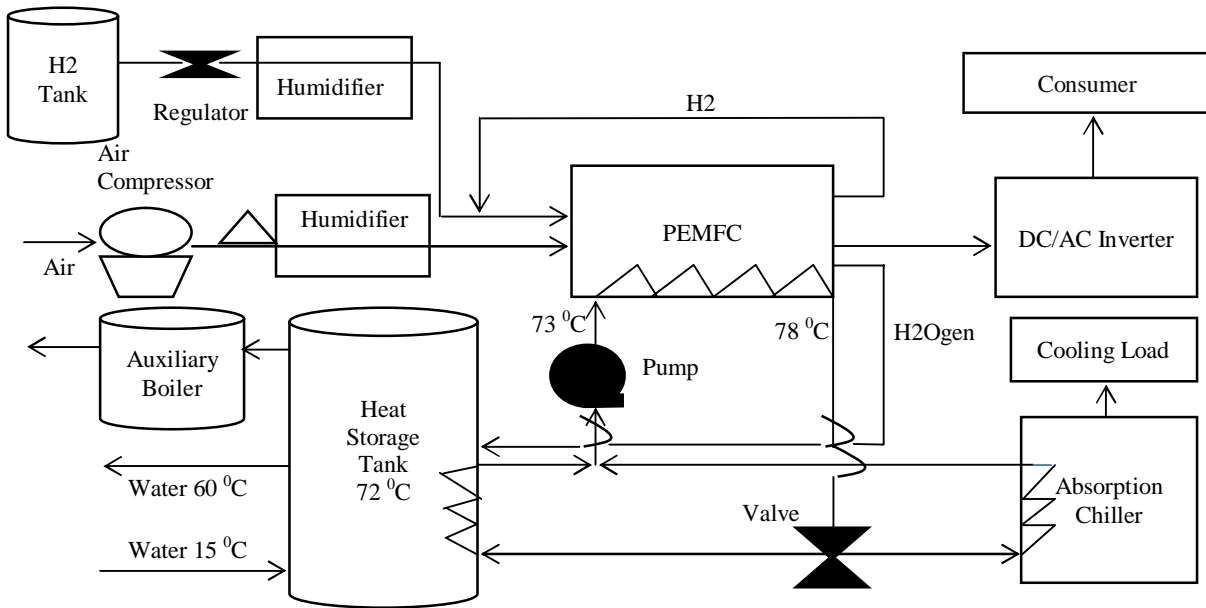


Fig. 1 Schematic of cycle

شکل 1 پیکربندی سیکل

$$i_L = nFh_m \left[\frac{\Delta C_{in} - \Delta C_{out}}{\ln \left(\frac{\Delta C_{in}}{\Delta C_{out}} \right)} \right] \quad (17)$$

در ادامه به محاسبه افت ولتاژ اهمی پرداخته می‌شود، مقاومت اهمی به خاطر مقاومت یون‌های جریان یافته در الکترولیت و مقاومتی که در اثر رسانایی اجزای پیل به وجود می‌آید محاسبه شده است، فرض شده است که افت ولتاژ اهمی در کاتالیست ناچیز است چون کاتالیست دارای لایه‌ی نازکی می‌باشد و فقط مقاومت اهمی غشا در نظر گرفته شده است [13]، مقاومت اهمی در پیل سوختی پلیمری تابعی از جریان، دما و درصد رطوبت غشا است. برای محاسبه افت ولتاژ اهمی می‌توان از قانون اهم استفاده نمود که از روابط (18) تا (20) قابل محاسبه است [15].

$$V_{ohm} = IR_{int} \quad (18)$$

$$r_{mem} = \frac{181.6 \left(1 + 0.03i + 0.062 \left(\frac{T_{fc}}{303} \right)^2 (i^{2.5}) \right)}{[\zeta - 0.634 - (3i)] \exp \left(4.18 \left(1 - \frac{303}{T_{fc}} \right) \right)} \quad (19)$$

$$R_{int} = \frac{r_{mem}L}{A_{cell}} \quad (20)$$

که در رابطه‌ی (18) جریان کاری و R_{int} مقاومت داخلی کل پیل است. در رابطه‌ی (19) نیز r_{mem} مقاومت ویژه غشا و ζ درصد رطوبت غشا می‌باشند. در شرایطی که رطوبت نسبی پیل سوختی 100% باشد مقدار ζ 14 در نظر گرفته می‌شود [22]. همچنین در رابطه‌ی (20) ضخامت غشا بر حسب سانتی‌متر می‌باشد. در نهایت با داشتن روابط (11) الی (20) میزان واقعی ولتاژ را می‌توان محاسبه نمود. پس از محاسبه ولتاژ واقعی کار خروجی از پیل طبق رابطه‌ی (21) به دست می‌آید [21].

$$W_{fc} = N_{cell}V_{fc}I \quad (21)$$

حال برای محاسبه‌ی میزان حرارت خالص تولیدی در پیل سوختی با استفاده از قانون اول ترمودینامیک می‌توان رابطه‌ی (22) را به کار برد [15].

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{ch} - \dot{Q}_{s,l} - \dot{W}_{fc} \quad (22)$$

حرارت تولیدی خالص که در پیل به وجود می‌آید و قابل تبادل با

در واقعیت، در پیل‌های سوختی میزان ولتاژ به دست آمده کمتر از ولتاژ نرنست است و علت این امر وجود بازگشت‌ناپذیری‌هایی است که به نام‌های تلفات اهمی V_{ohm} ، تلفات غلظت V_{conc} و تلفات فعال‌سازی V_{act} شناخته می‌شوند و ولتاژ واقعی به دست آمده از رابطه‌ی (11) پیروی می‌کند [21].

$$V_{fc} = E_{nernst} - V_{act} - V_{conc} - V_{ohm} \quad (11)$$

در رابطه‌ی (11) برای به دست آوردن ولتاژ واقعی علاوه بر محاسبه ولتاژ نرنست باید افت ولتاژهای بعدی را نیز محاسبه کرد برای محاسبه این افت‌ها از روابط (12) تا (15) می‌توان استفاده نمود [15].

$$V_{act} = -[-0.948 + \varepsilon T_{fc} + 0.000076 T_{fc} \ln(I) - 0.000193 T_{fc} \ln(C_{O_2,conc})] \quad (12)$$

$$\varepsilon = 0.00286 + 0.0002 \ln(A_{cell}) + 0.000043 \ln(C_{H_2,conc}) \quad (13)$$

$$C_{O_2,conc} = 1.97 \times 10^{-7} P_{O_2} \exp \left(\frac{498}{T_{fc}} \right) \quad (14)$$

$$C_{H_2,conc} = 9.174 \times 10^{-7} P_{H_2} \exp \left(\frac{-77}{T_{fc}} \right) \quad (15)$$

در روابط (12) تا (15) دمای کاری پیل سوختی در مقیاس کلوین، I نیز جریان کاری پیل سوختی بر حسب آمپر و ε نیز ضریب پارامتریک می‌باشد. همچنین $C_{H_2,conc}$ غلظت هیدروژن و $C_{O_2,conc}$ غلظت اکسیژن را نشان می‌دهند.

افت ولتاژ غلظتی در اثر افزایش چگالی جریان و نزدیک شدن چگالی جریان به چگالی جریان حدی به وجود می‌آید در واقع با افزایش چگالی جریان غلظت واکنش‌دهنده‌ها کم می‌شود و در اثر این کاهش، افت ولتاژ غلظتی به وجود آمده و افزایش می‌یابد. برای محاسبه افت ولتاژ غلظتی می‌توان از رابطه‌ی (16) استفاده نمود [15].

$$V_{conc} = \frac{RT_{fc}}{n_e F} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (16)$$

که در رابطه‌ی (16) i_L چگالی حدی جریان است. و برای محاسبه‌ی چگالی جریان حدی می‌توان از رابطه‌ی (17) استفاده نمود که در این رابطه η_m ضریب انتقال جرم و ΔC تغییرات غلظت واکنش دهنده‌ی هوا می‌باشد [21].

است [23].

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(S - S_0) \quad (33)$$

در رابطه‌ی (33) h بر انتالپی و S برانتروپی دلالت دارد و زیر نویس صفر به معنای شرایط محیطی است. این رابطه برای یک گاز ایده‌آل به شکل رابطه‌ی (34) در می‌آید [23].

$$ex_{ph} = C_p T_0 \left[\frac{T}{T_0} - 1 - \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \quad (34)$$

برای محاسبه‌ی انرژی شیمیایی پیل سوختی از رابطه‌ی (35) استفاده می‌شود [23].

$$ex_{ch} = \sum x_n ex_{ch}^n + RT_0 \sum x_n \ln x_n \quad (35)$$

که x_n کسر جرمی جز n ام است که ex_{ch}^n انرژی شیمیایی استاندارد جز n ام است، که در حالت مرده اندازه گرفته شده است و مقادیر انرژی شیمیایی در جدول 1 آمده است [24]. برای محاسبه‌ی مقادیر انرژی که در اثر کار و انتقال حرارت با محیط تبادل می‌گردد از روابط (36) و (37) استفاده می‌شود [23].

$$\sum \dot{E}X^W = \dot{W}_{net} \quad (36)$$

$$\sum_k \dot{E}X^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_{fc}}\right) \dot{Q}_{net} \quad (37)$$

4- چیلر جذبی

چیلرهای جذبی سیستم‌هایی هستند که دارای ژنراتور و جذب‌کننده‌اند و برخلاف چیلرهای تراکمی که از انرژی الکتریکی به‌عنوان انرژی اولیه استفاده می‌کنند.

4-1- مدل انرژی چیلر جذبی

پیکربندی یک چیلر جذبی تک اثره در شکل 2 نشان داده شده است. در این چیلر جذبی از لیتیوم بروماید به‌عنوان جذب‌کننده و از آب به‌عنوان میرد استفاده می‌شود. همان‌طور که از شکل مشخص است گرما در ژنراتور به محلول آب و لیتیوم بروماید داده می‌شود و سپس آب بخار شده و به کندانسور می‌رود و در کندانسور حرارت از دست می‌دهد، تبدیل به مایع می‌گردد، از شیر فشارشکن عبور کرده، در اواپراتور حرارت موردنیاز برای تبرید را جذب کرده و به ایزوربر وارد می‌شود، در ایزوربر در اثر اختلاط با لیتیوم بروماید که فرآیندی گرماده است گرما از دست می‌دهد و مخلوط حاصل به ژنراتور پمپ می‌شود و دوباره این سیکل تکرار می‌گردد [25].

معادلات مبدل حرارتی چیلر در روابط (38) الی (41) آمده است [26].

$$Eff_{Hx} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_2} \quad (38)$$

$$C_{hot} = m_4 \cdot \left[\frac{h_4 - h_5}{T_4 - T_5} \right] \quad (39)$$

$$C_{cold} = m_2 \cdot \left[\frac{h_3 - h_2}{T_3 - T_2} \right] \quad (40)$$

جدول 1 انرژی شیمیایی استاندارد اجزا [24]

Table 1 Chemical standard exergy of species [24]

ماده	کسر جرمی	انرژی شیمیایی (kJ/kg)
اکسیژن	0.202	124000
نیتروژن	0.775	25714
هیدروژن	1	118050000
آب تولیدی	1	50550

سیال خنک‌کننده است را نشان می‌دهد، \dot{Q}_{ch} نرخ حرارت تولیدی در اثر انجام واکنش شیمیایی بین هیدروژن و اکسیژن است، $\dot{Q}_{s,1}$ نرخ حرارتی که به‌صورت محسوس و نهان موجب بالا رفتن دمای محصولات واکنش می‌گردد. \dot{W}_{fc} نرخ کار تولیدی به‌صورت انرژی الکتریکی در پیل سوختی است که نرخ کار تولیدی از رابطه (21) محاسبه شد. برای استفاده از رابطه‌ی (22) انجام موازنه‌ی جرم ضروری است، موازنه‌ی جرم پیل سوختی در روابط (23) تا (27) قابل مشاهده است [15].

$$\dot{n}_{H_2,cons} = N_{cell} \frac{iA}{2F} \quad (23)$$

$$\dot{n}_{O_2,cons} = N_{cell} \frac{iA}{4F} \quad (24)$$

$$\dot{n}_{H_2,Ogen} = N_{cell} \frac{iA}{2F} \quad (25)$$

$$\dot{n}_{H_2,in} = \lambda_{H_2} \dot{n}_{H_2,cons} \quad (26)$$

$$\dot{n}_{O_2,in} = \lambda_{Air} \dot{n}_{O_2,cons} \quad (27)$$

در روابط (23) تا (25) $\dot{n}_{H_2,cons}$ ، $\dot{n}_{O_2,cons}$ و $\dot{n}_{H_2,Ogen}$ به ترتیب نرخ هیدروژن، اکسیژن مصرفی و آب تولید شده در پیل سوختی را نشان می‌دهند. در روابط (26) و (27)، λ_{H_2} و λ_{Air} نیز بر ضرایب استوکیومتری هیدروژن و اکسیژن دلالت دارند.

انرژی آزاد شده در اثر احتراق هیدروژن در رابطه‌ی (28) آمده است که چون فرض شده است که محصول واکنش در فاز مایع قرار دارد از ارزش حرارتی بالای هیدروژن استفاده شده است. در رابطه‌ی (29) نیز حرارت محسوس و نهان جذب شده قابل محاسبه است [15].

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{n}_{H_2,cons} \cdot HHV \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{s,1} = & C_{H_2} (\dot{n}_{H_2,out} T_{fc} - \dot{n}_{H_2,in} T_{amb}) \\ & + C_{O_2} (\dot{n}_{O_2,out} T_{fc} - \dot{n}_{O_2,in} T_{out,comp}) \\ & + C_{N_2} (\dot{n}_{N_2,out} T_{fc} - \dot{n}_{N_2,in} T_{out,comp}) \\ & + \dot{n}_{H_2O,gen} C_{H_2O} (T_{fc} - T_{amb}) + \dot{n}_{H_2O,gen} H_v \end{aligned} \quad (29)$$

3-2- مدل انرژی پیل سوختی پلیمری

آنالیز انرژی پیل سوختی پلیمری اطلاعات مفیدی را ارائه می‌دهد، در واقع این کار به فهم اینکه قدرت خروجی از پیل سوختی پلیمری بر حسب انرژی ورودی به پیل کمک می‌کند. آنالیز انرژی با کمک قوانین بقای جرم، اول و دوم ترمودینامیک انجام می‌شود. بطور کلی برای یک حجم کنترل آنالیز انرژی با کمک رابطه‌ی (30) قابل محاسبه است [23].

$$\sum \dot{E}X_{in} - \sum \dot{E}X_{out} + \sum_k \dot{E}X^Q - \sum \dot{E}X^W - \sum i = 0 \quad (30)$$

که در رابطه‌ی (30)، $\sum \dot{E}X_{in}$ نرخ انرژی ورودی است، $\sum \dot{E}X_{out}$ نرخ انرژی خروجی، $\sum \dot{E}X^Q$ انرژی که در اثر انتقال حرارت منتقل می‌شود، $\sum \dot{E}X^W$ انرژی که توسط کار تبادل می‌شود و $\sum i$ بازگشت ناپذیری است. ترم $\dot{E}X$ با رابطه‌ی (31) تعریف می‌شود که حاصل جمع انرژی فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل می‌باشد [23].

$$\dot{E}X = \dot{m} (ex_{ph} + ex_{ch} + ex_{kn} + ex_{pt}) \quad (31)$$

در پیل‌های سوختی پلیمری انرژی فیزیکی و شیمیایی مد نظر است و از انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر می‌شود. در نتیجه رابطه‌ی (30) ساده شده و به رابطه‌ی (32) تبدیل می‌گردد [13].

$$ex = ex_{ph} + ex_{ch} \quad (32)$$

عبارت کلی برای انرژی فیزیکی در رابطه‌ی (33) آمده است که در این رابطه دمای مرجع 298 کلوین و فشار مرجع یک اتمسفر در نظر گرفته شده

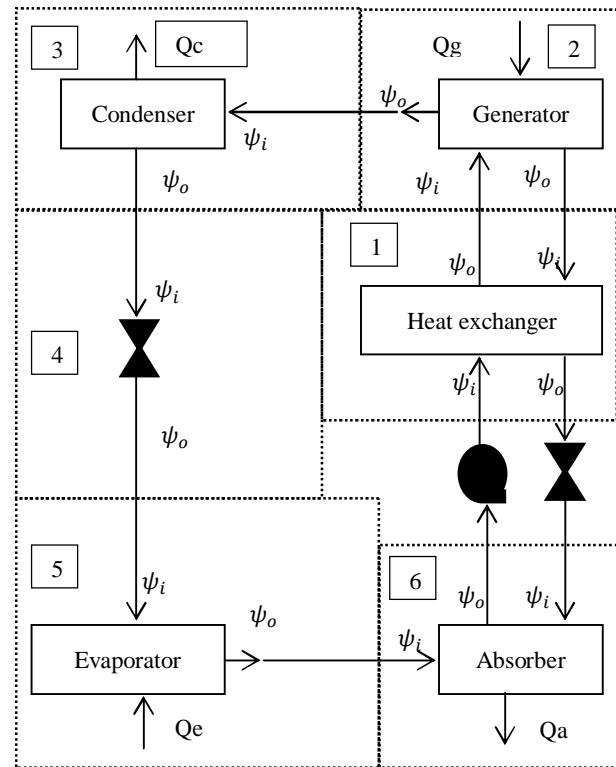


Fig. 3 Exergy flow balance of single effect absorption chiller

شکل 3 تعادل جریان انرژی برای چیلر جذبی تک اثره

نوشته و از رابطه ی (51) برای محاسبه ی نرخ تخریب انرژی کلی می توان استفاده کرد [25].

$$\Delta\psi_T = \Delta\psi_1 + \Delta\psi_2 + \Delta\psi_3 + \Delta\psi_4 + \Delta\psi_5 + \Delta\psi_6 \quad (51)$$

اما برای تحلیل انرژی چیلر جذبی لیتیوم بروماید آب نیاز به محاسبه ی انرژی محلول آب با لیتیوم بروماید وجود دارد. نرم افزار EES که برای مدل سازی چیلر جذبی از آن استفاده شده دارای کتابخانه ی برای محاسبه ی انرژی این محلول نیست. برای حل این مشکل در مرجع [27] معادله های برای محاسبه ی انرژی لیتیوم بروماید آب ارائه شده است که برای استفاده از آن در نرم افزار EES تابعی به صورت کد دستی نوشته شده است که بر اساس آن میزان انرژی چیلر در هر نقطه با داشتن غلظت و دما قابل محاسبه باشد. عبارت قابل استفاده برای محاسبه ی انرژی در رابطه ی (52) آمده است [27]

$$S = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 B_{ij} X^j T^i \quad (52)$$

برای محاسبه ی i و j می توان از جدول 2 استفاده نمود. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که معادله ی ارائه شده در شرایط (53) معتبر است [27].

$$\begin{cases} 40 \leq T \leq 210 \\ 40 \leq X \leq 65 \end{cases} \quad (53)$$

5- راندمان

محاسبه ی راندمان سیستم معیاری برای سنجش عملکرد آن سیستم است.

1-5- راندمان انرژی

پارامترهای موردنیاز برای به دست آوردن راندمان سیکل در روابط (54) تا (56) آمده است [15]. که در روابط (54) تا (56) نشان دهنده ارزش

$$Q_{hx} = m_1 \cdot (h_3 - h_2) = m_4 \cdot (h_4 - h_5) \quad (41)$$

که در روابط (38) تا (41) کارایی مبدل حرارتی است و Q_{hx} حرارتی است، که بین دو جریان جرمی ورودی به ژنراتور و دبی جرمی خروجی از ژنراتور برای ورود به ابزوربر تبادل می گردد. روابط حاکم بر ژنراتور نیز در روابط (42) تا (44) آورده شده است [26].

$$m_3 = m_4 + m_7 \quad (42)$$

$$m_3 x_3 = m_4 x_4 \quad (43)$$

$$m_3 h_3 - m_4 h_4 - m_7 h_7 + Q_d = 0 \quad (44)$$

در روابط (42) تا (44) x غلظت و Q_d گرمایی است که در اثر عبور آب گرم خروجی از پیل سوختی به ژنراتور مبادله می گردد و معادلات حاکم بر کندانسور، شیر فشارشکن و ابزوربر در روابط (45) تا (48) آمده است [26].

$$Q_c = m_7 (h_7 - h_8) \quad (45)$$

$$Q_e = m_9 (h_{10} - h_9) \quad (46)$$

$$m_{10} h_{10} + m_6 h_6 - Q_a - m_1 h_1 = 0 \quad (47)$$

$$COP = \frac{Q_E}{Q_d} \quad (48)$$

2-4- مدل انرژی چیلر جذبی

آنالیز انرژی به محاسبه ی تخریب انرژی کمک می کند و راهی برای تحلیل قانون دوم ترمودینامیک است. انرژی یک جریان از سیال از رابطه ی (49) پیروی می کند [25].

$$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (49)$$

در معادله ی (49) نماد ψ نشان دهنده ی انرژی جریان سیال است و h ، T ، s و نماد صفر به ترتیب بر انتالپی، دما (بر حسب کلوین)، انرژی و حالت مرده دلالت دارند. نرخ تخریب انرژی در هر یک از اجزای چیلر جذبی را می توان به فرم معادله ی (50) نوشت [25].

$$\Delta\psi = \sum (m\psi)_i - \sum (m\psi)_o + \sum W - \left[\sum q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_i - \sum q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_o \right] \quad (50)$$

در معادله ی (50) بازگشت ناپذیری تولیدی در هر جز چیلر جذبی است. $\sum (m\psi)_i$ و $\sum (m\psi)_o$ نرخ انرژی ورودی و خروجی، $\left[\sum q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_i - \sum q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_o \right]$ اثر انتقال حرارت و $\sum W$ کار در هر جز چیلر جذبی است. برای تحلیل انرژی چیلر جذبی تک اثره که در این مقاله مورد بحث است باید چیلر جذبی را به صورت شکل 3 تقسیم بندی کرد و رابطه ی (50) را برای هر عضو به ازای هر ورودی خروجی

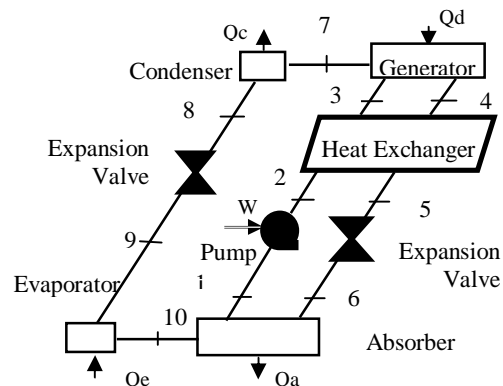


Fig. 2 Schematic of absorption chiller

شکل 2 پیکربندی چیلر جذبی

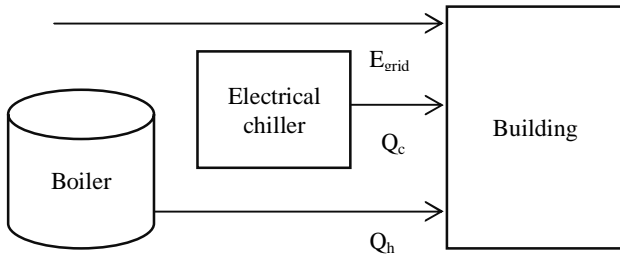


Fig. 4 Conventional systems for energy supply of a building

شکل 4 سیستم سنتی تأمین انرژی برای یک ساختمان

مقدار انرژی مصرف شده توسط سیستم تولید سنتی برای تولید همان میزان انرژی مورد نیاز، با کمک روابط (62) تا (63) محاسبه می‌شود [28].

$$F_{CCHP} = \dot{n}_{H_2} HHV \quad (62)$$

$$F_{conv} = \frac{W_{fc}}{\eta_{con}} + \frac{Q_u}{\eta_b} + \frac{Q_c}{COP_e} \quad (63)$$

در روابط (62) تا (63) η_{con} راندمان سیستم‌های سنتی تولید برق و η_b حرارت تولیدی در بویلرهای مورد استفاده در سیستم‌های سنتی و η_b راندمان این بویلرها F_{CCHP} میزان سوخت مصرفی در سیستم CCHP است بر حسب کیلوژول بر ثانیه و F_{conv} میزان سوخت مصرفی در سیستم‌های سنتی بر حسب کیلوژول بر ثانیه می‌باشند. میزان صرفه جویی در مصرف سوخت بر حسب کیلوژول بر ثانیه و درصد کاهش مصرف سوخت نیز طبق روابط (64) تا (65) محاسبه می‌شوند [28].

$$FS = \frac{W_{fc}}{\eta_{con}} + \frac{Q_u}{\eta_b} + \frac{Q_c}{COP_e} - F \quad (64)$$

$$FESR = \frac{\Delta F}{\frac{W_{fc}}{\eta_{con}} + \frac{Q_u}{\eta_b} + \frac{Q_c}{COP_e}} \quad (65)$$

در روابط (64) و (65) FS مقدار سوخت صرفه‌جویی شده در واحد کیلوژول بر ثانیه و $FESR$ درصد کاهش مصرف سوخت را نشان می‌دهند.

7- درصد کاهش آلاینده‌گی

در این مقاله ارزیابی زیست محیطی سیستم ارائه شده است، این ارزیابی بر اساس معیار درصد کاهش آلاینده‌ی دی اکسید کربن انجام شده است. برای محاسبه‌ی درصد کاهش انتشار دی اکسید کربن در این سیستم تولید همزمان می‌توان از روابط (66) الی (69) استفاده نمود [29]. اما نحوه‌ی مقایسه‌ی این تحقیق به گونه‌ای بود که فرض شده است ساختمان مبنا نیازی به روشن کردن بویلر کمکی نداشته باشد و سیستم با پیل سوختی خود بتواند پاسخگوی نیازهای حرارتی مصرف کننده باشد. به عبارت دیگر محاسبات بر این اساس انجام شد که با توجه به میزانی که پیل کار و حرارت تولید می‌کند، مصرف کننده به جای استفاده از سیستم تولید همزمان از سیستم‌های سنتی استفاده می‌کرد (برای تولید همان مقدار کار و حرارت)، چه میزان آلاینده‌گی بوجود می‌آمد [30]. که در رابطه‌ی (65) محاسبه‌ی درصد کاهش آلاینده‌گی انجام می‌شود و CDE درصد کاهش آلاینده‌گی را نشان می‌دهد، همچنین در روابط (67) و (68)، CDE میزان تولید آلاینده‌گی سیستم، μ_e و μ_f شاخص انتشار آلاینده‌ی دی اکسید کربن برای برق شبکه و گاز را نشان می‌دهند [29].

$$CDE = 1 - \frac{CDE_{CCHP}}{CDE_{shp}} \quad (66)$$

¹ Carbon Dioxide Emission Reduction

² Carbon Dioxide Emission

حرارتی بالای هیدروژن، W_{fc} کار انجام شده توسط پیل سوختی، η_{elec} راندمان الکتریکی سیکل، η_{H_2in} دبی مولی هیدروژن ورودی به سیکل، η_{CHP} راندمان سیکل کار و حرارت، Q_{net} حرارت تولیدی در پیل سوختی که برای تأمین آب گرم مورد استفاده قرار می‌گیرد، W_{comp} کار انجام شده توسط کمپرسور، η_{CCHP} راندمان سیکل همزمان برق، حرارت و سرما، Q_{evap} بار حرارتی جذب شده از اواپراتور سیکل تبرید است.

$$\eta_{elec} = \frac{W_{fc}}{n_{H_2in} \cdot HHV} \quad (54)$$

$$\eta_{CHP} = \frac{W_{fc} + Q_{net} - W_{comp}}{n_{H_2in} \cdot HHV} \quad (55)$$

$$\eta_{CCHP} = \frac{W_{fc} + Q_{net} + Q_{evap} - W_{pump} - W_{comp}}{n_{H_2in} \cdot HHV} \quad (56)$$

2-5- راندمان انرژی

راندمان انرژی الکتریکی پیل سوختی پلیمری در حالت تولید الکتریسیته به تنهایی از رابطه‌ی (57) یا (58) بدست می‌آید [23].

$$\psi = 1 - \frac{i}{\sum \dot{E} X_{in}} \quad (57)$$

$$\eta_{ex,el} = \frac{W_{net}}{[\dot{m}(ex_{ph} + ex_{ch})]_{H_2in}} \quad (58)$$

راندمان انرژی برای چهار حالت مختلف کاری سیستم با روابط (59) تا (61) قابل محاسبه است [15].

$$\eta_{ex,Cog,h} = \frac{W_{net} + (1 - \frac{T_{amb}}{T_{heat}}) \dot{Q}_{heat}}{[\dot{m}(ex_{ph} + ex_{ch})]_{H_2}} \quad (59)$$

$$\eta_{ex,Cog,C} = \frac{W_{net} + (1 - \frac{T_{amb}}{T_{cool}}) \dot{Q}_{cool}}{[\dot{m}(ex_{ph} + ex_{ch})]_{H_2}} \quad (60)$$

$$\eta_{ex,CCHP} = \frac{W_{net} + (1 - \frac{T_{amb}}{T_{cool}}) \dot{Q}_{cool} + (1 - \frac{T_{amb}}{T_{heat}}) \dot{Q}_{heat}}{[\dot{m}(ex_{ph} + ex_{ch})]_{H_2}} \quad (61)$$

در رابطه‌ی (59) $\eta_{ex,Cog,h}$ نشان دهنده‌ی راندمان انرژی تولید توام برق با گرمایش است که البته T_{heat} در این رابطه برابر با 43 درجه سلسیوس [13] در نظر گرفته شده است. همچنین در رابطه‌ی (60) عبارت $\eta_{ex,Cog,C}$ راندمان انرژی تولید برق و سرمایش توام را نشان می‌دهد و در این رابطه نیز T_{cool} نیز دمای مورد نیاز برای سرمایش فضا هست که برابر با 9 درجه سلسیوس در نظر گرفته می‌شود [13].

6- درصد کاهش مصرف سوخت

در این قسمت آنالیز میزان صرفه جویی مصرف انرژی محاسبه شده است. برای این کار باید سیستم تولید همزمان مدل شده در این مقاله را با سیستم‌های سنتی تولید برق و حرارت مقایسه کرد، که یک نمای کلی از سیستم‌های سنتی در شکل 4 آمده است. برای محاسبه‌ی سوخت صرفه جویی شده در ابتدا میزان سوخت مصرفی توسط سیستم تولید همزمان و

جدول 2 ضرایب مورد نیاز برای محاسبه انتروپی محلول لیتیم-بروماید آب

i	0	1	2	3
B_{i0}	5.127558 $\times 10^{-1}$	1.22678 $\times 10^{-2}$	-1.364895 $\times 10^{-5}$	1.021501 $\times 10^{-8}$
B_{i1}	-1.393954 $\times 10^{-2}$	-9.156820 $\times 10^{-5}$	1.068904 $\times 10^{-7}$	0
B_{i2}	2.924145 $\times 10^{-5}$	1.820453 $\times 10^{-8}$	-1.381109 $\times 10^{-9}$	0
B_{i3}	9.035697 $\times 10^{-7}$	-7.991806 $\times 10^{-10}$	1.529784 $\times 10^{-11}$	0

جدول 4 نتایج ناشی از مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری

Table 4 Output results of fuel modeling

واحد	درصد خطای [%]	نتایج مرجع [13]	مقدار شبیه‌سازی	خروجی ناشی از شبیه‌سازی
(V)	2	0.6787	0.66	ولتاژ پیل سوختی
(kW)	-	-	38.63	کار پیل سوختی
(kW)	-	-	39.17	حرارت پیل سوختی
(V)	1.7	0.0341	0.0335	افت ولتاژ اهمی
(V)	1.3	0.00365	0.0036	افت ولتاژ غلطی
(V)	3.7	0.521	0.5081	افت ولتاژ فعال‌سازی
(mol s ⁻¹)	-	-	0.36	دبی مولی هیدروژن مصرفی
(mol s ⁻¹)	-	-	0.3	دبی مولی اکسیژن مصرفی
(%)	-	-	37.21	راندمان انرژی پیل سوختی
(%)	-	-	45	راندمان انرژی پیل سوختی بازگشت ناپذیری
(kW)	-	-	47.21	تولیدی در پیل سوختی

جدول 5 پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی چیلر جذبی

Table 5 Input parameters for energy and exergy modeling of Absorption chiller

واحد	مقدار	پارامتر ورودی
(kPa)	5	فشار بالای سیکل جذبی [31]
(kPa)	0.9	فشار پایین سیکل جذبی [31]
(°C)	72	دمای ژنراتور سیکل جذبی [32]
(kg s ⁻¹)	0.3	دبی جرمی ورودی به پمپ
(kW)	19.56	حرارت ورودی به ژنراتور سیکل جذبی

جدول 6 نتایج ناشی از مدل‌سازی ترمودینامیکی چیلر جذبی

Table 6 Output results of thermodynamic modeling of absorption chiller

انتروبی (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	انتالپی (kJ kg ⁻¹)	فشار (kPa)	دبی جرمی (kg s ⁻¹)	دما (°C)	نقطه سیکل جذبی
0.2405	107.4	0.900	0.3000	40.3	1
0.2405	107.4	5.000	0.3000	40.3	2
0.373	151.2	5.000	0.3000	62.5	3
0.4274	170.3	5.000	0.2997	72.0	4
0.2979	126.4	5.000	0.2997	49.8	5
0.2452	126.4	0.900	0.2997	41.2	6
155.3	47457.7	5.000	0.0003	71.9	7
151.2	2481.1	5.000	0.0003	32.9	8
162.4	2481.1	0.900	0.0003	5.4	9
162.4	45227.8	0.900	0.0003	5.4	10

سیکل جذبی به همراه انتروبی محلول با توجه به شماره گذاری شکل 3 قابل مشاهده می‌باشد و همان‌طور که از این نتایج مشخص است دمای اواپراتور با توجه به مرجع [31] مقدار مناسبی بدست آمده است. در جدول 8 نیز اطلاعات مورد نیاز برای تحلیل زیست محیطی و صرفه‌جویی در مصرف سوخت سیستم تولید همزمان ارائه شده در این مقاله برای مقایسه با سیستم‌های سنتی تولید انرژی آورده شده است.

$$CDE_{shp} = \mu_e E_{grid}^{shp} + \mu_f F_b \quad (67)$$

$$CDE_{cchp} = \mu_e E_{grid}^{cchp} + \mu_f F_{on-site} \quad (68)$$

8- بحث و نتیجه‌گیری

سیستم CCHP بر پایه‌ی پیل سوختی پلیمری ارائه شده در این مقاله با استفاده از معادلات الکتروشیمی و ترمودینامیک مدل‌سازی شده است. در مرحله‌ی اول معادلات پیل سوختی پلیمری در نرم‌افزار متلب نوشته؛ تحلیل انرژی و انرژی پیل سوختی انجام شده است. سپس با داشتن حرارت قابل استفاده در پیل سوختی مدل‌سازی انرژی و انرژی چیلر جذبی با کمک نرم‌افزار EES، به خاطر وجود کتابخانه‌های قوی شامل خواص ترمودینامیکی مواد، انجام شده است، فرضیات اولیه به عنوان ورودی برای مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری طبق مراجع [15,13] در جدول 3 آمده است؛ نتایج ناشی از حل مدل پیل سوختی نیز به همراه اعتبار سنجی آن در جدول 4 ارائه شده است. همچنین پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی چیلر جذبی تک اثره در جدول 5 مشخص شده است [26].

نتایج ناشی از مدل‌سازی چیلر جذبی نیز در جدول 6 قابل مشاهده است. در جدول 7 نیز اطلاعات ناشی از مدل‌سازی کلی سیکل جذبی ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج جدول 4 مشخص است، مقادیر بدست آمده ناشی از مدل‌سازی پیل دارای تطابق نسبتاً خوبی با مقادیر بدست آمده توسط مرجع [13] می‌باشد و راندمان‌ها نیز با توجه به بازه راندمانی که برای پیل سوختی پلیمری تعریف می‌شود [14] اعداد مناسبی هستند.

مقادیر معرفی شده به عنوان ورودی برای مدل‌سازی چیلر جذبی در جدول 5 آمده است. نتایج ناشی از مدل‌سازی چیلر جذبی در EES نیز در جدول 6 و 7 بطور کامل ارائه شده است. در جدول 6 اطلاعات هر نقطه از

جدول 3 پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی انرژی و انرژی پیل سوختی پلیمری [15,13]

Table 3 Input parameters for energy and exergy modeling of PEM fuel cell [13,15]

واحد	مقدار	پارامتر ورودی
(-)	2	تعداد الکترون منتقل شده
(Cmol ⁻¹)	96485	ضریب فاراده
(K)	293.15	دمای محیط
(bar)	1	فشار محیط
(-)	420	تعداد سلول در استک پیل
(cm ²)	232	مساحت هر سلول
(bar)	3	فشار کاری پیل
(°C)	80	دمای کاری
(Acm ⁻²)	0.6	چگالی جریان کاری
(Acm ⁻²)	1.5	چگالی جریان حدی
(Jmol ⁻¹)	285550	ارزش حرارتی بالای هیدروژن
(-)	1.2	نسبت استوکیومتری هیدروژن
(-)	2	نسبت استوکیومتری هوا
(J mol ⁻¹ K ⁻¹)	28.86	ظرفیت حرارتی ویژه هیدروژن
(J mol ⁻¹ K ⁻¹)	29.72	ظرفیت حرارتی ویژه اکسیژن
(J mol ⁻¹ K ⁻¹)	28.39	ظرفیت حرارتی ویژه نیتروژن
(J mol ⁻¹ K ⁻¹)	75.95	ظرفیت حرارتی ویژه آب
(Acm ⁻²)	0.00000012	چگالی تبادل جریان
(%)	85	راندمان کمپرسور

افت ولتاژها افزایش می‌یابند و در نتیجه ولتاژ خروجی از پیل کاهش می‌یابد. در شکل‌های 7 و 8 به تأثیر ضریب استوکیومتری هیدروژن در واکنش الکتروشیمیایی بر راندمان‌های انرژی و آگرژی سیستم پرداخته شده است. همان‌طور که از شکل‌های 7 و 8 مشخص است با افزایش ضریب استوکیومتری هیدروژن، راندمان کاهش می‌یابد و می‌توان به این نتیجه رسید که پیل سوختی پلیمری باید طوری ساخته شود که با ضریب استوکیومتری هیدروژن پایین کار کند تا راندمان سیستم افزایش یابد.

پیل سوختی ارائه شده در این مقاله دارای حداکثر توان الکتریکی 38.63 کیلووات است، اما بسته به نیاز مصرف کننده یا بعضی از شرایط دیگر، پیل در بعضی از موارد در توانی کمتر از توان نامی خود کار می‌کند. در این مقاله نسبت توان الکتریکی تولیدی به حداکثر توانی که پیل می‌تواند تولید کند؛ درصد از حداکثر توان نامیده می‌شود. در شکل 9 تأثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌ی قابل مشاهده است.

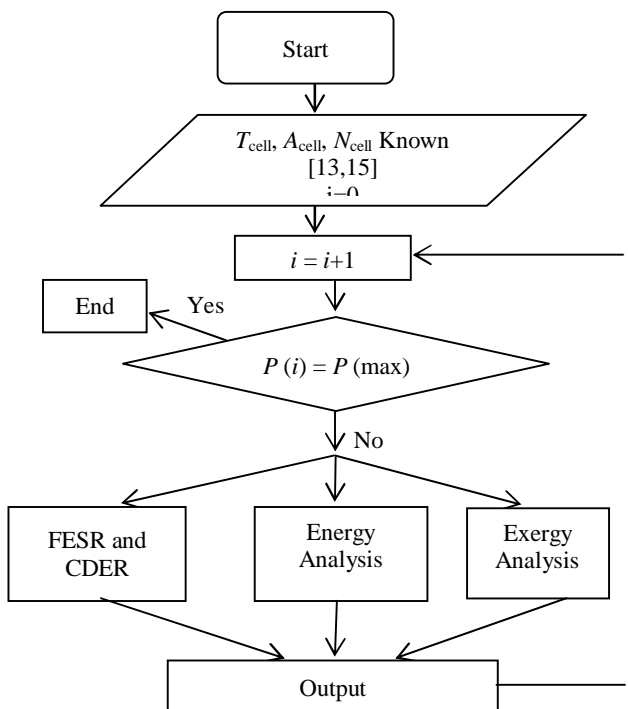


Fig. 5 Flowchart of system modeling

شکل 5 فلوجارت مدل‌سازی سیستم

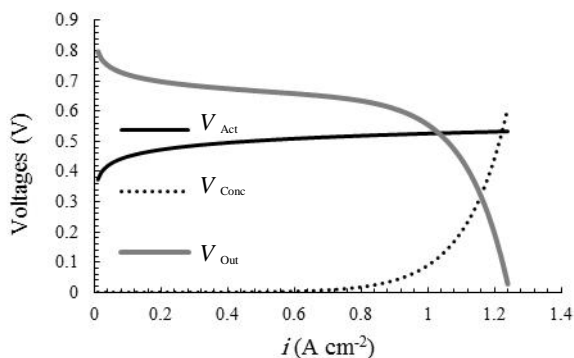


Fig. 6 Voltages of PEM based on current density

شکل 6 چگالی جریان بر حسب ولتاژهای پیل سوختی

نتایج ناشی از مدل‌سازی سیستم از چهار دیدگاه مختلف انرژی، آگرژی، درصد کاهش مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌ی دی اکسید کربن نیز در جدول 9 قابل مشاهده است و همان‌طور که از این نتایج مشخص است سیستم پیشنهاد شده از نظر هر چهار دیدگاه مناسب و قابل‌توجه است [15,13].

در شکل 5 فلوجارت نحوه‌ی بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم نشان داده شده است. با توجه به اینکه در این مقاله تأثیر پارامترهای مختلفی بر مسائل انرژی، آگرژی، FESR و CDER بررسی شده‌اند، فلوجارت شکل 5 بصورت کلی می‌باشد. در شکل 5، $P(i)$ می‌تواند هر کدام از متغیرهای نمودارهای آینده باشد. مثلاً برای بررسی تأثیر فشار کاری پیل سوختی بر چهار دیدگاه، در ابتدا فشار در بازه‌ی مد نظر از یک مقدار اولیه تا مقدار حداکثر به تعداد مناسب تقسیم‌بندی می‌شود و هر قسمت از فشار به عنوان $P(i)$ به کد نوشته شده داده می‌شود تا پاسخ‌های $P(i)$ محاسبه و ذخیره گردد و سپس i به $i+1$ تغییر پیدا می‌کند و این حلقه تا جایی تکرار می‌شود که $P(i)$ همان مقدار حداکثر فشار پیل سوختی شود و وقتی پارامتر i نام به حداکثر خود برسد محاسبات متوقف می‌شود.

نحوه‌ی تغییرات افت ولتاژها و ولتاژ خروجی پیل در شکل 6 نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل 6 مشخص است با افزایش چگالی جریان

جدول 7 نتایج عملکرد چیلر جذبی

Table 7 Performance results of absorption chiller

پارامتر	مقدار	واحد
حرارت ورودی به ژنراتور	19.56	(kW)
حرارت دریافتی از اواپراتور	12.53	(kW)
حرارت خروجی از جذب کننده	18.91	(kW)
حرارت خروجی از کندانسور	13.15	(kW)
ضریب عملکرد چیلر	0.64	(-)
بازگشت ناپذیری تولیدی	5.95	(kW)

جدول 8 پارامترهای ورودی برای تحلیل عملکرد کل سیکل

Table 8 Input parameters for overall performance analysis of cycle

پارامتر	مقدار	واحد
T_{cool} [13]	9	(°C)
T_{heat} [13]	43	(°C)
COP_e [29]	3	(-)
η_f [29]	0.8	(-)
$conv\eta$ [33]	0.3	(-)
μ [34]	220	(gr kWh ⁻¹)
μ [33]	836	(gr kWh ⁻¹)

جدول 9 نتایج ناشی از شبیه‌سازی کل سیکل

Table 9 Simulation results of performance analysis of cycle

پارامتر	مقدار	واحد
راندمان انرژی در حالت CHP	55.9	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت تولید برق و سرمایش	49.1	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت CCHP	68	(%)
راندمان آگرژی سیکل در حالت CHP	46.3	(%)
راندمان آگرژی سیکل در حالت تولید برق و سرمایش	44.2	(%)
راندمان آگرژی سیکل در حالت CCHP	45.5	(%)
درصد کاهش مصرف سوخت	34	(%)
درصد کاهش آلاینده‌ی	25	(%)

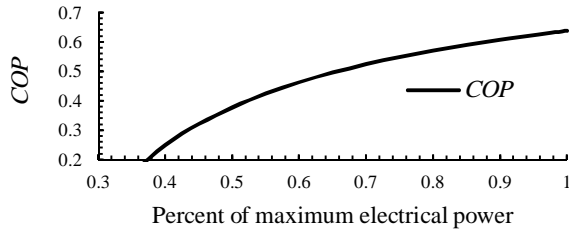


Fig. 10 Effect of percent of maximum electrical power on COP of absorption chiller

شکل 10 تأثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر ضریب عملکرد چیلر جذبی

حرارت تولیدی رخ می‌دهد، این حالت از لحاظ انرژی یکی از حالت‌های ایده‌آل می‌باشد و در نتیجه چون با افزایش فشار کاری پیل سوختی حرارت تولیدی کاهش و کار تولیدی افزایش می‌یابد، سیستم از انرژی ورودی خود استفاده‌ی بهتری می‌کند و نرخ بازگشت ناپذیری پیل سوختی کاهش می‌یابد. در شکل 12 تأثیر فشار کاری پیل سوختی بر راندمان‌های انرژی و انرژی سیستم تولید همزمان نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل 12 مشخص است با افزایش فشار کاری پیل سوختی پلیمری چون کار تولیدی افزایش می‌یابد راندمان‌های انرژی و انرژی نیز افزایش می‌یابند.

در شکل 13 نیز تأثیر فشار کاری پیل سوختی بر ضریب عملکرد چیلر جذبی، درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی مورد بررسی قرار گرفته است. در نمودار 13 چون با افزایش فشار کاری پیل سوختی تولیدی در پیل سوختی و در نتیجه حرارت ورودی به چیلر جذبی کاهش می‌یابد، ضریب عملکرد چیلر جذبی نیز کم شده است. همچنین با توجه به بالا رفتن راندمان سیستم در اثر افزایش فشار کاری پیل سوختی، سیستم در مقایسه با سیستم‌های سنتی مصرف سوخت کمتری دارد. در نتیجه درصد کاهش مصرف سوخت نیز افزایش یافته است. از طرف دیگر با افزایش فشار کاری پیل سوختی چون کار خروجی از پیل سوختی افزایش و حرارت تولیدی کاهش می‌یابد لذا سیستم سنتی که قرار است با سیستم حاضر مقایسه شود باید حرارت کمتری تولید کند؛ مخرج کسر رابطه‌ی (65) کوچکتر می‌شود و در نتیجه درصد کاهش آلاینده‌گی نیز کمتر می‌شود.

در شکل 14 نیز میزان بازگشت ناپذیری تولیدی در هر جز سیکل از جمله پیل سوختی پلیمری، چیلر جذبی و مخزن ذخیره حرارتی نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، بیشترین بازگشت ناپذیری تولیدی در سیکل مربوط به پیل سوختی است.

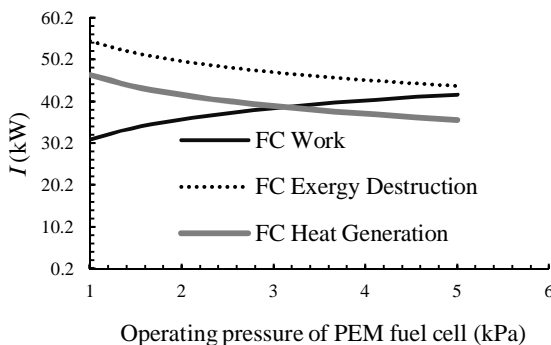


Fig. 11 Effect of operating pressure of PEM fuel cell on energy and exergy analysis

شکل 11 تأثیر فشار کاری پیل سوختی بر آنالیزهای انرژی و انرژی سیستم

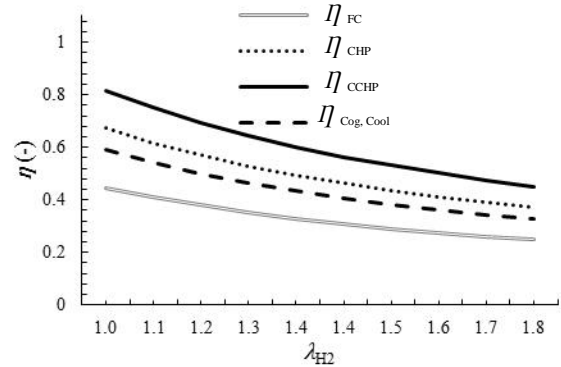


Fig. 7 Effect of hydrogen stoichiometry ratio on efficiencies

شکل 7 تأثیر ضریب مصرف هیدروژن بر راندمان‌های انرژی سیستم

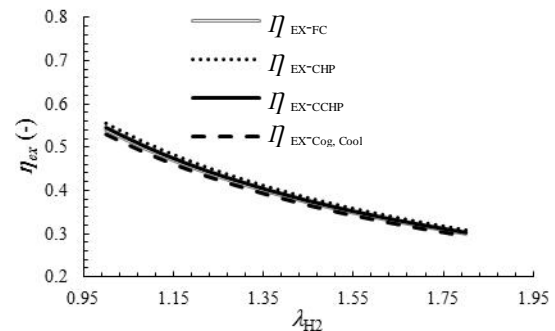


Fig. 8 Effect of hydrogen stoichiometry ratio on exergy efficiencies

شکل 8 تأثیر ضریب مصرف هیدروژن بر راندمان‌های انرژی سیستم

همان‌طور که از این نمودار پیداست با افزایش درصد از حداکثر توان الکتریکی میزان صرفه جویی مصرف سوخت افزایش می‌یابد اما میزان کاهش آلاینده‌گی تقریباً ثابت می‌ماند و علت افزایش میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت تفاوت راندمان‌های سیستم‌های سنتی با پیل سوختی است که چون راندمان پیل سوختی بیشتر است لذا با افزایش کار خروجی از پیل سوختی میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت در مقایسه با سیستم‌های سنتی نیز بیشتر می‌گردد. همچنین در شکل 10 تأثیر درصد از حداکثر توان بر ضریب عملکرد چیلر جذبی نشان داده شده است و همان‌طور از شکل مشخص است، با افزایش درصد از حداکثر توان، چون حرارت تولیدی پیل سوختی افزایش می‌یابد، ضریب عملکرد چیلر جذبی نیز افزایش می‌یابد.

در شکل 11 تأثیر فشار کاری پیل سوختی بر کار، حرارت و بازگشت ناپذیری‌های پیل سوختی نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل پیداست با افزایش فشار کاری پیل سوختی، افزایش کار خروجی و کاهش

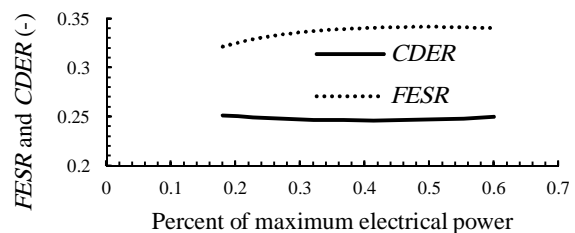


Fig. 9 Effect of percent of maximum electrical power on CDER and FESR

شکل 9 تأثیر درصد از حداکثر توان الکتریکی بر درصد کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌گی

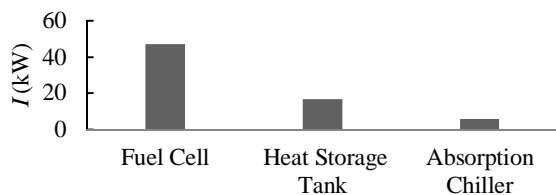


Fig. 14 Irreversibility losses in system components

شکل 14 بازگشت ناپذیری اجزای سیستم

اقتصادی و زیست محیطی قرار گیرد و با توجه به نتایج ارائه شده در این مقاله بحث بهینه‌سازی سیکل ارائه شده نیز می‌تواند در آینده انجام پذیرد.

10- مراجع

- [1] H. R. Ellamla, I. Staffell, P. Bujlo, B. G. Pollet, S. Pasupathi, Current status of fuel cell based combined heat and power systems for residential sector, *Journal of Power Source*, Vol. 293, No. 1, pp. 312-328, 2015.
- [2] A. Keshavarz, M. Ebrahimi, *Combined cooling, heating and power : decision-making, design and optimization*, pp. 35-89, Amsterdam, Elsevier, 2015.
- [3] L. Daolin, Z. Shifei, Tri-generation (electrical power, heated and chilled water) system and their application in shanghai, *American Society of Mechanical Engineers, Power Division (Publication) PWR*, Vol. 34, No. 2, pp. 265-270, 1999.
- [4] X. Q. Kong, R. Z. Wang, X. H. Huang, Energy efficiency and economic feasibility of CCHP driven by stirling engine, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 9, pp 1433-1442, 2004.
- [5] A. Costa, J. Paris, M. Towers, T. Browne, Economics of trigeneration in a kraft pulp mill for enhanced energy efficiency and reduced GHG emissions, *Energy*, Vol. 4, No. 32, pp 474-481, 2007.
- [6] Y. Huangfu, J. Y. Wu, R. Z. Wang, Z. Z. Xia, Experimental investigation of adsorption chiller for Micro-scale BCHP system application, *Energy and Buildings*, Vol. 2, No. 39, pp 120-127, 2007.
- [7] P. E. Dodds, A. D. Hawkes, W. McDowall, F. Li, I. Staffell, P. Grünwald, *The Role of Hydrogen and Fuel Cells in Providing Affordable, Secure Lowcarbon Heat, H2FC Supergen*, pp. 15-25, London, Imperial College London, 2014.
- [8] K. Sugiura, I. Naruse, Feasibility study of the co-generation system with direct internal reforming-molten carbonate fuel cell (DIR-MCFC) for residential use, *Journal of Power Source*, Vol. 106, No. 1, pp 51-59, 2002.
- [9] L. Barelli, G. Bidini, F. Gallorini, A. Ottaviano, An energetic exergetic comparison between PEMFC and SOFC-based micro-CHP systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 4, pp. 3206-3214, 2011.
- [10] A. Adam, E. S. Fraga, D. J. L. Brett, Options for residential building services design using fuel cell based micro-CHP and the potential for heat integration, *Journal of Applied Energy*, Vol. 138, No.1 , pp. 685-694, 2014.
- [11] Y. Wang, Y. Shi, M. Ni, N. Cai, A micro tri-generation system based on direct flame fuel cells for residential applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 11, pp. 5996-6005, 2014.
- [12] M. Ni, M. K. H. Leung, D. Y. C. Leung, Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant, *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, No. 10, pp. 2748-2756, 2008.
- [13] M. Yari, V. Rezaee, Modeling a novel design of multi generation package based on the PEM fuel cell, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 14, pp. 107-121, 2014. (in Persian)
- [14] Barbir F, *PEM fuel cells: Theory and practice*, pp. 33-71, Amsterdam, Elsevier, 2005.
- [15] P. Zhao, J. Wang, L. Gao, Y. Dai, Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle to recover waste heat from proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 4, pp. 3382-3391, 2012.
- [16] C. Wang, M. H. Nehrir, S. R. Shaw, Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits, *IEEE*, Vol. 20, No. 2, pp. 442-451, 2005.
- [17] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell, I. Mechanistic model development, *Journal of Electrochemistry Society*, Vol. 142, No. 1, pp. 1-8, 1995.
- [18] A. Rowe and X. Li, Mathematical modeling of proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 102, No. 1, pp. 82-96, 2001.
- [19] J. C. Amphlett, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, A. Rodrigues, A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 61, No.1, pp. 183-188, 1996.
- [20] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, pp. 67-75, New York, Wiley, 2001.

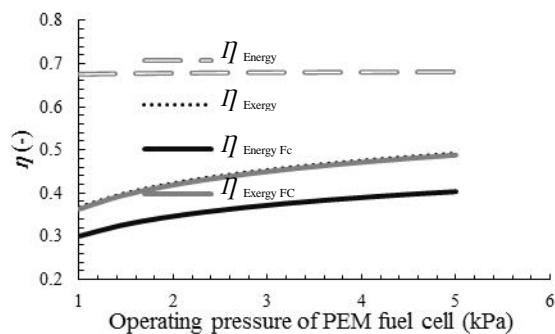


Fig. 12 Effect of operating pressure of PEM fuel cell on efficiencies

شکل 12 تأثیر فشار کاری پیل سوختی بر راندمان‌ها

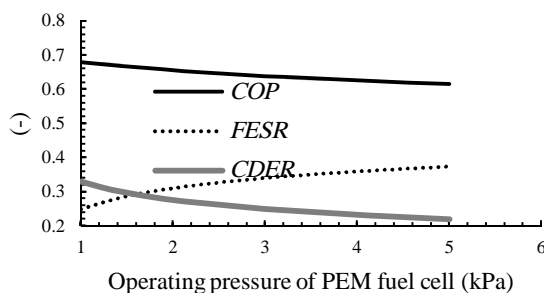


Fig. 13 Effect of operating pressure of PEM fuel cell on FESR, CDER and COP of absorption chiller

شکل 13 تأثیر فشار کاری پیل سوختی بر درصد کاهش مصرف سوخت، درصد کاهش تولید آلاینده‌ی و ضریب عملکرد چیلر جذبی

9- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک طرح سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما پیشنهاد شده است و سیستم از چهار دیدگاه مورد بررسی قرار گرفته است. که نتایج حاصله به شرح ذیل است:

- پیل سوختی مورد بررسی در این مقاله دارای توان نامی الکتریکی 38.63 کیلووات است. پیل در این توان 39.17 کیلووات حرارت تولید می‌کند، که 50% این حرارت به تانک ذخیره حرارتی و 50% دیگر به ژنراتور چیلر جذبی داده شده است؛ توان اواپراتور چیلر 12.53 کیلووات و COP چیلر 0.64 بدست آمده است.
 - راندمان انرژی سیستم در حالت پیل به تنهایی 37.21%، در حالت تولید دوگانه برق و حرارت 55.9%، در حالت تولید برق و سرمایش 49.1% و در حالت تولید سه‌گانه برق، حرارت و سرمایش 68% بدست آمده است.
 - راندمان انرژی سیستم در حالت پیل به تنهایی 45%، در حالت تولید دوگانه برق و حرارت 46.3%، در حالت تولید برق و سرمایش 44.2% و در حالت تولید سه‌گانه برق، حرارت و سرمایش 45.5% بدست آمده است.
 - در سیستم حاضر در مقایسه با سیستم‌های سنتی تولید برق، حرارت و سرمایش، 34% کاهش مصرف سوخت رخ می‌دهد.
 - در سیستم حاضر در مقایسه با سیستم‌های سنتی تولید برق، حرارت و سرمایش، 25% کاهش آلاینده‌ی رخ می‌دهد.
- پیشنهاد می‌شود در آینده سیستم پیشنهادی در این مقاله برای یک ساختمان مینا بر اساس انرژی مورد نیاز مصرف کننده مورد مطالعه‌ی

- [28] J. H. Horlock, *Combined Power Plant*, pp. 10-45, Pergamon Press, Oxford, 1990.
- [29] M. Marefat, P. Shafie, Multi-criteria evaluation of CCHP system under different operating strategies for an office building in Tehran using AHP method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 37-48, 2014. (in Persian فارسی)
- [30] A. Malekian, *Review and improve the performance of CCHP system*, M.S Thesis Shahrood University, 2014.
- [31] ASHRAE handbook, *Heating, Ventilating and Air-Conditioning Systems and Equipment (I-P Edition)*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, ISBN 978-1-933742-33-5, 2008.
- [32] O. Marc, F. Sinama, J. P. Praene, F. Lucas, J. C. Lasvignottes, Dynamic modeling and experimental validation elements of a 30 kW LiBr/H₂O single effect absorption chiller for solar application, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 90, No. 1, pp. 980-993, 2015.
- [33] *Iran Energy Balance*, Accessed on 10 August 2015; <http://www.saba.org/energyinfo/tashilat/taraz>.
- [34] J. J. Wang, C. F. Zhai, Y. Y. Jing, Multi-criteria analysis of combined cooling, heating and power systems in different climate zones in china, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 4, pp. 1247-1259, 2010.
- [21] C. Spiegel, *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, , pp. 49-76, Amsterdam, Academic Press, 2008.
- [22] M. Mirzaee, M. Masjedian, Design and Simulation of a hybrid fuel cell motorcycle and comparison with non-hybrid system, in *The 1st National Conference on Hydrogen and Fuel Cell*, Tehran, Iran, 2009. (in Persian فارسی)
- [23] A. Yilanci, I. Dincer, H. K. Ozturk, Performance analysis of a PEM fuel cell unit in a solar-hydrogen system, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 24, pp. 7538-7552, 2008.
- [24] *Exergy calculator*, Accessed on 20 August 2015; <http://www.exergoecology.com/excalc>.
- [25] A. Sencan, K. A. Yakut, S. A. Kalogirou, Exergy analysis of lithium bromide/water absorption systems, *Renewable Energy*, Vol. 30, No. 5, pp. 645-657, 2005.
- [26] Ch. M. Laminea, Z. Saidb, Energy analysis of single effect absorption chiller (LiBr/H₂O) in an industrial manufacturing of detergent, *Energy Procedia*, Vol. 50, No. 1, pp. 105-112, 2014.
- [27] Y. Kaita, Thermodynamic properties of lithium bromide-ware solutions at high temperature, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 24, No. 5, pp. 374-390, 2001.