

تحلیل انرژی و انرژی یک سیستم تولید همزمان کوچک بر پایه پیل سوختی پلیمری برای سرمایه‌گذاری

محمود چهارطاقی^{۱*}، بهراد علی‌زاده خارکشی^۲

^۱استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

chahartaghi@shahroodut.ac.ir

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

b.alizadeh@shahroodut.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک سیستم تولید همزمان برای استفاده از گرمای اتلافی پیل سوختی پلیمری ارائه شده است که می‌تواند در کاربردهای ساختمانی مفید باشد. اجزای اصلی این سیستم شامل یک توده پیل سوختی پلیمری، مبدل سوخت، چیلر جذبی و تانک ذخیره حرارتی است. معادلات الکتروشیمیایی پیل سوختی در متلب و معادلات چیلر جذبی، مبدل سوخت متان به هیدروژن و تانک ذخیره حرارتی در نرم‌افزار ایزحل شده است. سیستم ارائه شده از دیدگاه‌های انرژی، انرژی و زیست‌محیطی مورد تحلیل قرار گرفته و تأثیر دمای کاری پیل سوختی بر راندمان‌های انرژی و انرژی، درصد کاهش مصرف سوخت و درصد کاهش آلایندگی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج ناشی از مدل‌سازی انجام شده نشان‌دهنده این مطلب است که قدرت تبرید سیکل جذبی ۱۲/۲۴ کیلووات، قدرت الکتریکی خروجی از پیل سوختی ۳۸/۶۳ کیلووات، توان حرارتی پیل ۳۹/۱۲ کیلووات و میزان بازگشت‌ناپذیری تولیدی در پیل ۸۴/۲۱ کیلووات است. در نهایت وقتی سیستم به ترتیب در حالت تولید برق به تنهایی، برق و حرارت و نیز برق و حرارت و سرما باشد، دارای راندمان‌های ۳۲/۶٪، ۶۵/۵٪ و ۷۵/۸٪ خواهد بود. همچنین با افزایش چگالی جریان کاری پیل سوختی راندمان انرژی سیکل کاهش ولی ضریب عملکرد چیلر جذبی افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تولید همزمان برق حرارت و برودت، پیل سوختی پلیمری، چیلر جذبی.

چندگانه به کار گرفته شود، سیستم با پیل پلیمری راندمان ۷۵٪ دارد، درحالی که سیستم با پیل سوختی اکسید جامد دارای راندمان ۷۲٪ است. ژائو [۷] تحلیل پارامتریکی را روی یک سیستم تولید قدرت همزمان بر پایه محرک اصلی پیل سوختی پلیمری و محرک سیکل ارگانیک رانکین انجام داده است. در تحقیق ایشان مشخص شد که به ازای سیال عامل های مختلف ارگانیک، بیشترین بازده متعلق به سیستمی است که از سیال ارگانیک R123 بهره می برد و استفاده از این سیال ارگانیک راندمان سیستم را تا ۲۴/۵٪ افزایش می دهد.

آدام [۸] در زمینه استفاده از سیستم های تولید همزمان بر پایه پیل های سوختی مختلف برای کاربردهای ساختمانی تحقیق کرد و در آن به مناسب بودن پیل های سوختی پلیمری برای کاربردهای ساختمانی، به دلیل چگالی قدرت و راندمان بالا اشاره کرد.

نجفی و همکاران [۹] نیز دو نوع سیستم پیل سوختی پلیمری ۳۰ کیلوواتی را برای کاربردهای ساختمانی بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که استفاده از پیل سوختی پلیمری دما بالا دارای راندمان ۲۹/۲۱٪ و میزان صرفه جویی در مصرف انرژی اولیه آن ۱۷/۵٪ می باشد، درحالی که پیل سوختی پلیمری دما پایین راندمان ۲۱/۱۸٪ و صرفه جویی در مصرف انرژی اولیه ۶/۵٪ دارد.

در این مقاله، یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه 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 و مبدل متان به هیدروژن بهره برده است. همچنین تحلیل سیستم از چهار دیدگاه انرژی، انرژی، زیست محیطی و میزان صرفه جویی در مصرف سوخت توسط نرم افزار اییز^۱ انجام شده است. این در حالی است که در عمده کارهایی که به بررسی عملکرد سیستم های تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه پیل سوختی پلیمری پرداخته اند، به تحلیل یک یا دو دیدگاه از این چهار دیدگاه بسنده شده است. در این سیکل، در ابتدا مدل های انرژی و انرژی برای پیل سوختی پلیمری و چیلر جذبی ارائه شده، سپس با کمک این مدل ها، راندمان های انرژی، انرژی و میزان بازگشت ناپذیری تولیدی در اجزای چیلر و پیل سوختی محاسبه شده است. البته با توجه به اینکه مقدار انرژی محلول لیتیم بروماید-آب در جداول موجود نیست، از یکی از مدل های معرفی شده برای محاسبه انرژی محلول استفاده شده است. سپس سیستم پیشنهاد شده، با سیستم های سنتی تولید برق و حرارت مورد مقایسه قرار گرفته و آنالیز سیستم از لحاظ میزان صرفه جویی در مصرف سوخت و میزان کاهش آلودگی انجام شده و در نهایت نیز تأثیر عوامل مختلفی پیل سوختی بر هر چهار دیدگاه انرژی، انرژی، زیست محیطی و صرفه جویی در

با توجه به رشد روزافزون جمعیت، صنعت و آلودگی های زیست محیطی، تقاضا برای سیستم های تولید انرژی با راندمان بالا و آلودگی های زیست محیطی پایین، افزایش یافته است. یکی از سیستم هایی که راندمان بالایی دارد، سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرماست. سیستم های تولید همزمان می توانند دارای کاربردهای متنوعی باشند که از آن جمله می توان به استفاده از این سیستم ها در هتل ها، بیمارستان ها، شهرک ها و کارخانه ها اشاره کرد. این سیستم ها برخلاف نیروگاه های سنتی که راندمان نسبتاً پایینی دارند، می توانند به راندمان کل حدود ۶۰٪ تا ۹۰٪ برسند [۱-۲].

سیستم های تولید همزمان برق، حرارت و سرما با محرک های اولیه مختلفی مانند توربین گاز، موتور احتراقی، پیل سوختی و موتور استرلینگ ارائه شده اند که هر کدام از این محرک های اولیه، محدوده راندمان و میزان آلودگی مشخصی دارند. از جمله تحقیقاتی که راجع به سیستم های تولید همزمان با محرک های اولیه مختلف انجام شده است، می توان به تحقیق داوین و شیفی [۳] که استفاده از یک سیستم تولید همزمان با محرک اولیه توربین گاز را برای بیمارستانی در شانگهای بررسی کردند، اشاره کرد. ایشان مسائل مربوط به راه اندازی سیستم تولید همزمان و همچنین ارزیابی های اقتصادی را مورد بررسی قرار دادند.

کونگ و همکاران [۴] راندمان انرژی و اقتصادی یک سیستم تولید همزمان سه گانه با محرک اولیه موتور استرلینگ را با یک سیستم تولید جداگانه مقایسه کردند. ایشان نشان دادند که سیستم همزمان سه گانه با محرک اولیه موتور استرلینگ در مقایسه با سیستم تولید جداگانه ۳۳٪ در مصرف انرژی اولیه صرفه جویی می کند. همچنین نتایج نشان داد که عملکرد حرارتی چیلر جذبی تأثیر زیادی بر راندمان سیستم همزمان سه گانه دارد و وقتی که نسبت قیمت برق به گاز بیشتر یا کمتر از ۰/۱۹ باشد، دو نقطه بهینه مجزا برای استراتژی عملکرد سیستم وجود دارد.

یک سیستم تولید همزمان بر پایه پیل سوختی اسید فسفریک توسط داس و همکاران [۵] ارائه شد و نتایج نشان داد که راندمان الکتریکی پیل های سوختی اسید فسفریک بین ۳۷-۴۲٪ است، اما وقتی در سیستم های تولید همزمان به کار می روند، راندمان آن ها به ۸۵٪ نیز می رسد. در [۶] تحلیلی ترمودینامیکی روی یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما انجام شده که سیستم را در دو حالت مقایسه کرده است. در حالت اول پیل سوختی پلیمری و در حالت دوم پیل سوختی اکسید جامد به عنوان محرک اولیه در نظر گرفته شده است و در این دو حالت راندمان انرژی و انرژی سیستم ها مورد مقایسه قرار گرفته است و نتایج نشان دادند که راندمان پیل سوختی پلیمری ۳۲٪ و راندمان پیل سوختی اکسید جامد ۴۰٪ است، اما وقتی سیستم در حالت تولید

مصرف سوخت نیز بررسی شده است.

۲. طرح سیستم تولید همزمان

۱.۲. طرح سیستم

طرح سیستم موردنظر در شکل (۱) نشان داده شده است. در این سیستم، گاز متان از خط اصلی وارد شده و به دو قسمت تقسیم می‌شود که یک خط آن وارد مشعل^۱ شده تا گرمای مورد نیاز برای انجام واکنش تبدیل متان به هیدروژن را تأمین کند، گاز متان در ورودی به مشعل با نسبت هم ارزی احتراق ۱ با هوا واکنش می‌دهد و گرمای مورد نیاز مبدل سوخت را تأمین می‌کند، خط دیگر گاز متان نیز وارد ریفورمر می‌شود تا به هیدروژن تبدیل گردد، سپس هیدروژن خروجی به‌عنوان سوخت ورودی به پیل داده می‌شود. هیدروژن تولیدی وارد پیل سوختی پلیمری می‌شود و با هوایی که توسط کمپرسور فشرده شده است، واکنش می‌دهد و پس از انجام واکنش الکتروشیمیایی در پیل مقداری کار (به‌صورت الکتریسته) و حرارت تولید می‌شود. کار تولیدی به مصرف کننده داده می‌شود، اما حرارت تولیدی در پیل سوختی باید توسط یک سیستم خنک کاری دفع شود تا از داغی پیل سوختی جلوگیری شود، لذا برای خنک‌کاری پیل یک خط آب ۷۱ درجه سلسیوس وارد پیل می‌شود تا گرمای تولیدی در پیل سوختی را دریافت کرده و علاوه بر خنک‌سازی پیل، به مخزن ذخیره حرارتی رفته و آب گرم مصرفی را تأمین کند. در نهایت برای تبرید، گازهای داغ خروجی از مشعل به چیلر

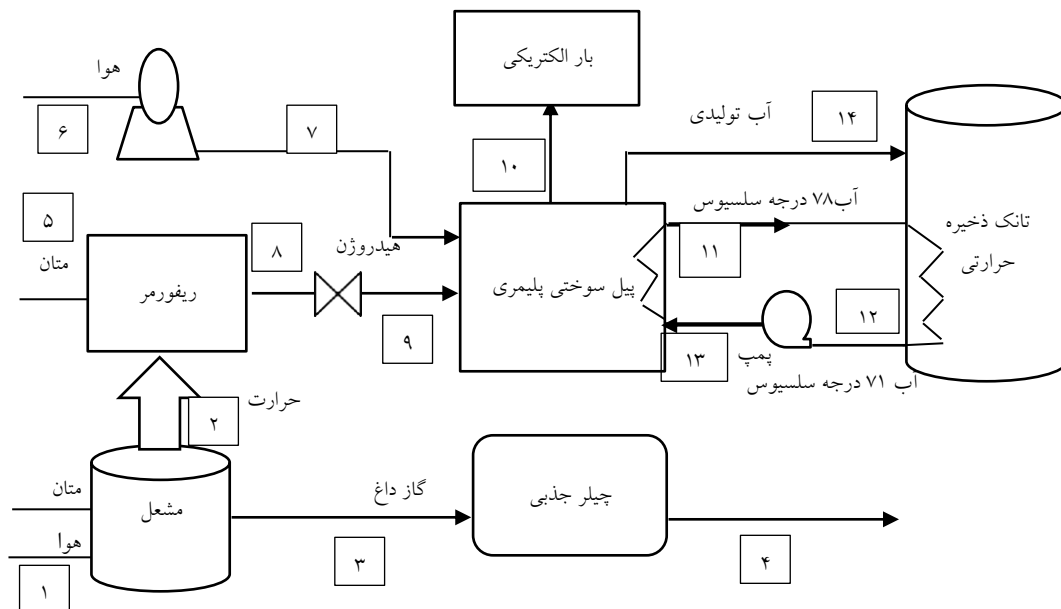
جذبی داده خواهد شد تا انرژی حرارتی مورد نیاز ژنراتور چیلر جذبی تأمین و تبرید انجام گیرد.

فرضیات حاکم بر سیکل به شرح زیر است [۷ و ۱۰]:

- سیستم به حالت پایا برسد.
- واکنش‌های شیمیایی سیستم به حالت تعادل برسند.
- هوا در پیل سوختی و مشعل شامل ۷۹٪ نیتروژن و ۲۱٪ اکسیژن است.
- دمای کاری پیل ۸۰ درجه سلسیوس و فشار کاری آن ۳ بار است.
- ضرایب گرمای ویژه ثابت در نظر گرفته شده است.
- 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.
- دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.
- فشار محیط ۱ بار فرض شده است.

۲.۲. مدل‌سازی انرژی پیل سوختی پلیمری

پیل‌های سوختی انرژی شیمیایی را به الکتریکی تبدیل می‌کنند و چون این تبدیل مستقیم است، راندمان این سیستم‌ها بالاست. در پیل‌های سوختی پلیمری از هیدروژن خالص باید به‌عنوان سوخت استفاده شود چون برخلاف پیل‌های سوختی اکسید جامد که ریفورمر داخلی دارند، در پیل سوختی پلیمری برای جلوگیری از مسمومیت کاتالیست در اثر تشکیل کربن مونوکسید نمی‌توان از سوخت‌های هیدروکربن استفاده نمود و باید از یک ریفورمر^۲ خارجی استفاده کرد [۱۱].



شکل (۱): شماتیک سیکل

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

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

در واقعیت، در پیل‌های سوختی میزان ولتاژ به دست آمده کمتر از ولتاژ نرنست است. علت این امر وجود بازگشت‌ناپذیری‌هایی است که به نام‌های تلفات اهمی V_{ohm} ، تلفات غلظت V_{conc} و تلفات فعال‌سازی V_{act} شناخته شده است و ولتاژ واقعی به دست آمده از رابطه (۱۱) پیروی می‌کند [۷].

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

در رابطه (۱۱) 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 (۱۲) تا (۱۵) می‌توان استفاده کرد [۷].

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

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

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

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

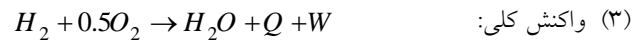
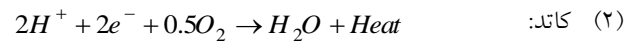
با استفاده از روابط (۱۲) تا (۱۵) می‌توان افت ولتاژ فعال‌سازی را محاسبه کرد که در روابط بالا $C_{H_2,conc}$ بر غلظت هیدروژن و $C_{O_2,conc}$ بر غلظت اکسیژن دلالت دارد.

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 از رابطه (۱۶) استفاده می‌شود [۷].

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

در رابطه (۱۶)، i_L چگالی حدی جریان است. در ادامه به محاسبه افت ولتاژ اهمی پرداخته می‌شود. مقاومت اهمی به دلیل مقاومت یون‌های جریان‌یافته در الکترولیت و مقاومتی که در اثر رسانایی اجزای پیل به وجود

همچنین این محرک‌های اولیه کاربری مناسبی در زمینه مولدهای خانگی، نیروگاهی کوچک، صنعت حمل‌ونقل و نظامی دارند. واکنش‌های انجام‌شده در پیل سوختی پلیمری در روابط (۱) تا (۳) آمده است [۷].



ولتاژ مدار باز سیستم‌های پیل سوختی به ولتاژ نرنست معروف است و طبق رابطه (۴) به دست می‌آید [۷].

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

در معادله (۴) $-\Delta G^0$ تغییرات انرژی آزاد گیبس n_e تعداد الکترون منتقل شده، R ثابت جهانی گازها، T_{fc} دمای کاری پیل سوختی در مقیاس کلونین، F ثابت فارادی و برای به دست آوردن ولتاژ نرنست در معادله بالا داشتن P_j ها ضروری است. P_j نشان‌دهنده فشار جزئی واکنش‌دهنده‌هاست. برای حل این معادله، فشار جزئی بخار آب از رابطه تجربی (۵) قابل محاسبه است [۱۲].

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

در رابطه تجربی (۵) t دمای کاری پیل سوختی در واحد درجه سلسیوس است و برای به دست آوردن فشارهای جزئی هیدروژن و اکسیژن نیز از روابط (۶) و (۷) استفاده شده است [۱۲].

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

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

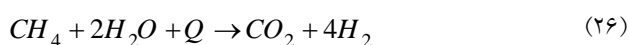
در روابط (۶) و (۷)، P فشار کاری پیل سوختی برحسب بار، i چگالی جریان برحسب آمپر بر سانتی‌مترمربع و $x_{H_2O}^{sat}$ کسر مولی آب و $x_{N_2}^{channel}$ کسر مولی نیتروژن می‌باشد که این مقادیر با کمک روابط (۸) تا (۱۰) قابل محاسبه است [۷].

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

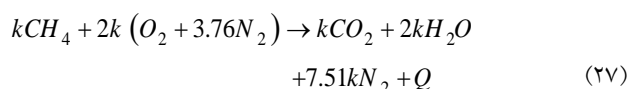
۳.۲. مبدل متان به هیدروژن

مبدل‌های مختلفی برای تبدیل هیدروکربن‌ها به هیدروژن وجود دارند که از آن جمله می‌توان به ریفورمر بخار، اکسیداسیون جزئی و اتوترمال ریفورمر اشاره کرد که هرکدام واکنش‌های خاص خود را دارند. همان‌طور که از شکل (۲) مشخص است، پردازش‌گر سوختی که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته، از نوع ریفورمر بخار است که واکنشی گرماگیر است. این گرما عموماً در اثر سوختن هیدروکربنی که قرار است به هیدروژن تبدیل گردد، تأمین می‌شود.

در این سیستم از بخار آب و گاز طبیعی به‌عنوان واکنش‌دهنده استفاده می‌شود و پس از انجام واکنش‌های (۲۶) و (۲۷) هیدروژن و کربن دی‌اکسید از آن خارج می‌گردد [۱۳].

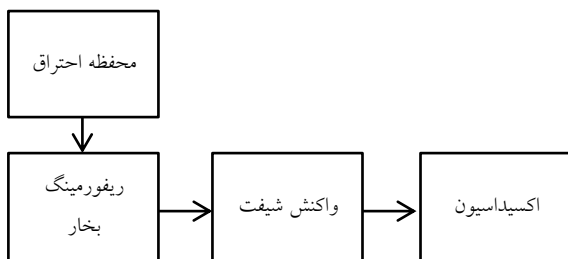


در واکنش (۲۶) آبی که در واکنش‌دهنده‌ها وجود دارد، به‌صورت بخار است و دمای کاری این مبدل‌های سوخت عموماً بین ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس است [۱۲] و گرمای این واکنش از طریق سوختن متان با هوا طبق واکنش (۲۷) تأمین می‌شود [۱۳].



در رابطه (۲۷) k میزان اضافی دبی جرمی متان است که باید وارد پردازش‌گر سوخت شود و میزان تغییرات انتالپی واکنش‌های بالا با کمک قانون اول ترمودینامیک به‌سادگی قابل محاسبه است، مقدار k از رابطه (۲۸) تعیین می‌شود [۱۳].

$$k = \frac{\Delta H_{SR} + \Delta H_{SHIFT}}{\Delta H_{COMBUSTION}} \quad (28)$$



شکل (۲): نحوه کار ریفورمر

راندمان ریفورمر نیز از رابطه (۲۹) قابل محاسبه است [۱۳].

$$\eta_{reformer} = \frac{4}{K+1} \frac{\Delta H_{H_2}}{\Delta H_{Fuel}} \quad (29)$$

۴.۲. مدل کمپرسور

برای آنکه هوای موردنیاز پیل سوختی پلیمری و مبدل سوخت تأمین

می‌آید، محاسبه شده و فرض شده است که افت ولتاژ اهمی در کاتالیست ناچیز است، چون کاتالیست دارای لایه نازکی می‌باشد و فقط مقاومت اهمی غشاء در نظر گرفته شده است. برای محاسبه افت ولتاژ اهمی از قانون اهم استفاده می‌شود که از روابط (۱۷) و (۱۸) قابل استخراج است و در نهایت با داشتن روابط (۱۱) تا (۱۸) میزان واقعی ولتاژ را می‌توان محاسبه کرد و پس از محاسبه ولتاژ واقعی، کار خروجی از پیل از رابطه (۱۹) به‌دست می‌آید [۷].

$$V_{ohm} = IR_{int} \quad (17)$$

$$R_{int} = \frac{r_{mem}L}{A_{cell}} \quad (18)$$

$$W_{fc} = N_{cell}V_{fc}I \quad (19)$$

حال برای محاسبه میزان حرارت خالص تولیدی در پیل سوختی با استفاده از قانون اول ترمودینامیک رابطه (۲۰) به‌دست می‌آید [۷].

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{ch} - \dot{Q}_{s,l} - \dot{W}_{fc} \quad (20)$$

که در آن \dot{Q}_{net} حرارت تولیدی خالصی است که در پیل به‌وجود می‌آید و قابل تبادل با سیال خنک‌کننده است، \dot{Q}_{ch} نرخ حرارت تولیدی در اثر انجام واکنش شیمیایی بین هیدروژن و اکسیژن است، $\dot{Q}_{s,l}$ نرخ حرارتی که به‌صورت محسوس و نهان موجب بالا رفتن دمای محصولات واکنش می‌شود و \dot{W}_{fc} نرخ کار تولیدی به‌صورت انرژی الکتریکی در پیل سوختی است که نرخ کار تولیدی از روابط بالا محاسبه شد، اما حرارت شیمیایی و نهان و محسوس با استفاده از روابط (۲۱) تا (۲۵) قابل محاسبه است [۷].

$$\dot{n}_{H_2cons} = N_{cell} \frac{iA}{2F} \quad (21)$$

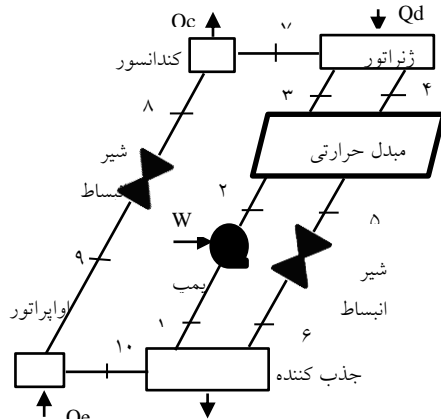
$$\dot{n}_{O_2cons} = N_{cell} \frac{iA}{4F} \quad (22)$$

$$\dot{n}_{H_2Ogen} = N_{cell} \frac{iA}{2F} \quad (23)$$

حال با داشتن دبی مولی واکنش‌دهنده‌ها می‌توان حرارت تولیدی و مصرفی را به‌دست آورد [۷].

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{n}_{H_2cons} \cdot HHV \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{s,l} = & C_{H_2} \left(\dot{n}_{H_2,out} T_{fc} - \dot{n}_{H_2,in} T_{amb} \right) \\ & + C_{O_2} \left(\dot{n}_{O_2,out} T_{fc} - \dot{n}_{O_2,in} T_{out,comp} \right) \\ & + C_{N_2} \left(\dot{n}_{N_2,out} T_{fc} - \dot{n}_{N_2,in} T_{out,comp} \right) \\ & + \dot{n}_{H_2O,gen} C_{H_2O} (T_{fc} - T_{amb}) + \dot{n}_{H_2O,gen} H_v \end{aligned} \quad (25)$$



شکل (۳): پیکربندی سیکل تبرید جذبی

در این چیلر جذبی از لیتیوم بروماید به عنوان جذب کننده و از آب به عنوان مبرد استفاده می شود. همان طور که از شکل مشخص است روند سیکل به گونه ای است که در ابتدا گرما در دیزوربر به مخلوط آب و لیتیوم بروماید داده می شود و سپس آب بخار شده و به کندانسور می رود و در کندانسور حرارت از دست می دهد و تبدیل به مایع می گردد. پس از آن، آب از شیر فشار شکن عبور کرده، در اواپراتور حرارت مورد نیاز برای تبرید را جذب کرده و به ابزوربر می رود و در ابزوربر در اثر اختلاط با لیتیوم بروماید که فرایندی گرماده است، گرما از دست می دهد. سپس مخلوط حاصل به ژنراتور پمپ می شود و دوباره این سیکل تکرار می شود [۱۵]. در سیکل مورد بررسی گازهای خروجی از محفظه احتراق به ژنراتور رفته و حرارت خود را از دست می دهند. این انرژی محرک اصلی سیکل تبرید جذبی است. برای مبدل حرارتی چیلر جذبی روابط (۳۳) تا (۳۶) برقرار است.

$$Eff_{Hx} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_2} \quad (33)$$

$$C_{hot} = m_4 \cdot \left[\frac{h_4 - h_5}{T_4 - T_5} \right] \quad (34)$$

$$C_{cold} = m_2 \cdot \left[\frac{h_3 - h_2}{T_3 - T_2} \right] \quad (35)$$

$$Q_{hx} = m_1 \cdot (h_3 - h_2) = m_4 \cdot (h_4 - h_5) \quad (36)$$

در روابط (۳۳) تا (۳۶) Eff_{Hx} کارایی مبدل حرارتی است و Q_{hx} حرارتی است که بین دو جریان جرمی ورودی به دیزوربر و دبی جرمی خروجی از دیزوربر برای ورود به ابزوربر تبادل می شود.

روابط حاکم بر دیزوربر در روابط (۳۷) تا (۳۹) آمده است [۱۳].

$$m_3 = m_4 + m_7 \quad (37)$$

$$m_3 x_3 = m_4 x_4 \quad (38)$$

شود، سیکل نیاز به یک کمپرسور هوا دارد تا هوا را از فشار ۱ بار تا فشار ۳ بار فشرده سازد. این کمپرسور کار مصرف می کند و هرچقدر کار الکتریکی مصرفی این کمپرسور کمتر باشد در نتیجه، راندمان سیکل بالاتر خواهد بود. برای مدل سازی کمپرسور فرضیات زیر در نظر گرفته شده است [۷].

- دمای هوای ورودی ۲۵ درجه سلسیوس است.

- نسبت فشار ۳ در نظر گرفته شده است.

- راندمان کمپرسور ۸۵٪ فرض شده است.

$$\frac{T_{out,s}}{T_{amb}} = \left(r \right)^{\frac{\theta-1}{\theta}} \quad (30)$$

در این رابطه، $T_{out,s}$ دمای خروجی در حالت ایزونتروپیک است، T_{amb} دمای محیط یا همان دمای ورودی به کمپرسور است، r نسبت فشار کاری کمپرسور و θ نمای ایزونتروپیک است که ۱/۴ در نظر گرفته شده است [۱۴].

$$T_{outcomp} = \frac{T_{outs} - T_{amb}}{\eta_{comp}} + T_{amb} \quad (31)$$

$$W_{comp} = \frac{\dot{m}_{air} \left(\frac{\theta}{\theta-1} \right) RT_{amb} \left(r^{\left(\frac{\theta-1}{\theta} \right)} - 1 \right)}{\eta_{comp}} \quad (32)$$

در روابط (۳۱) و (۳۲) $T_{outcomp}$ دمای خروجی واقعی از کمپرسور \dot{m}_{air} دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور و η_{comp} راندمان کمپرسور است. با استفاده از روابط (۳۱) و (۳۲) می توان میزان کاری را که کمپرسور مصرف می کند، محاسبه و به هنگام محاسبه راندمان از W_{comp} استفاده کرد.

۵.۲. مدل چیلر جذبی

چیلرهای جذبی سیستم هایی هستند که دارای ژنراتور و جذب کننده هستند و برخلاف چیلرهای تراکمی که از انرژی الکتریکی به عنوان انرژی اولیه استفاده می کنند، این چیلرها از حرارت به عنوان انرژی اولیه استفاده می کنند که این حرارت اولیه به ژنراتور داده می شود. از آنجا که محرک اصلی این چیلرها انرژی حرارتی است، این چیلرها راه کار خوبی برای استفاده از انرژی های حرارتی اتلافی است و یکی از کاربردهای این سیستم ها در سیستم های تولید همزمان است [۱۵].

در این چیلرها برای کاربردهای تبرید صنعتی از محلول آمونیاک-آب و برای کاربردهای تهویه مطبوع از محلول لیتیوم بروماید-آب استفاده می شود و به دو نوع تک اثره و چند اثره تقسیم می شوند. پیکربندی یک چیلر جذبی تک اثره در شکل (۳) نشان داده شده است [۱۵].

۳. تحلیل انرژی سیستم تولید همزمان

۱.۳. تحلیل انرژی پیل سوختی

تحلیل انرژی پیل سوختی پلیمری اطلاعات مفیدی را ارائه می‌دهد. در واقع این کار به فهم اینکه قدرت خروجی از پیل سوختی پلیمری برحسب اینکه سوخت ورودی به پیل حداکثر چه مقدار کار می‌توانست تولید کند، کمک می‌کند. آنالیز انرژی با کمک قوانین بقای جرم، قانون اول ترمودینامیک و قانون دوم ترمودینامیک انجام می‌شود. به‌طور کلی برای یک حجم کنترل تحلیل انرژی با کمک رابطه (۴۷) انجام می‌پذیرد [۱۶].

$$\sum \dot{E}X_{in} - \sum \dot{E}X_{out} + \sum_k \dot{E}X^Q - \sum \dot{E}X^W - \sum \dot{I} = 0 \quad (47)$$

در رابطه (۴۷)، $\sum \dot{E}X_{in}$ نرخ انرژی ورودی، $\sum \dot{E}X_{out}$ نرخ انرژی خروجی، $\sum_k \dot{E}X^Q$ انرژی انتقال حرارت منتقل می‌شود، $\sum \dot{E}X^W$ انرژی که توسط کار تبادل می‌شود و $\sum \dot{I}$ انرژی تخریب یا بازگشت‌ناپذیری است [۱۶].

ترم $\dot{E}X$ با رابطه (۴۸) تعریف می‌شود که حاصل جمع انرژی فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل است [۱۶].

$$\dot{E}X = \dot{m} (ex_{ph} + ex_{ch} + ex_{kn} + ex_{pt}) \quad (48)$$

در پیل‌های سوختی پلیمری، انرژی فیزیکی و شیمیایی مد نظر است و از انرژی جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر می‌شود. در نتیجه، رابطه (۴۸) ساده شده و به رابطه (۴۹) تبدیل می‌شود [۱۶].

$$ex = ex_{ph} + ex_{ch} \quad (49)$$

عبارت کلی برای انرژی فیزیکی در رابطه (۵۰) آمده است. در این رابطه، دمای مرجع ۲۹۸ درجه سلسیوس و فشار مرجع یک اتمسفر در نظر گرفته شده است [۱۶].

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0 (S - S_0) \quad (50)$$

در رابطه (۵۰)، h بر انتالی و S بر انتروپی دلالت دارد و زیرنویس صفر به معنای شرایط محیطی است. این رابطه برای یک گاز ایدئال به شکل رابطه (۵۱) ساده می‌شود [۱۶].

$$ex_{ph} = C_p T_0 \left[\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + \ln \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \quad (51)$$

برای محاسبه انرژی شیمیایی پیل سوختی از رابطه (۵۲) استفاده می‌شود [۱۶].

$$ex_{ch} = \sum x_n ex_{ch}^n + RT_0 \sum x_n \ln x_n \quad (52)$$

$$m_3 h_3 - m_4 h_4 - m_7 h_7 + Q_d = 0 \quad (39)$$

در روابط (۳۷) تا (۳۹) x غلظت و Q_d گرمایی است که در اثر عبور گازهای خروجی از محفظه احتراق به دی‌وزبر مبادله می‌شود و معادلات حاکم بر کندانسور، شیر فشارشکن و اواپراتور در روابط (۴۰) تا (۴۵) آمده است [۱۶-۱۵].

$$Q_c = m_7 (h_7 - h_8) \quad (40)$$

$$h_9 = h_8 \quad (41)$$

$$Q_e = m_9 (h_{10} - h_9) \quad (42)$$

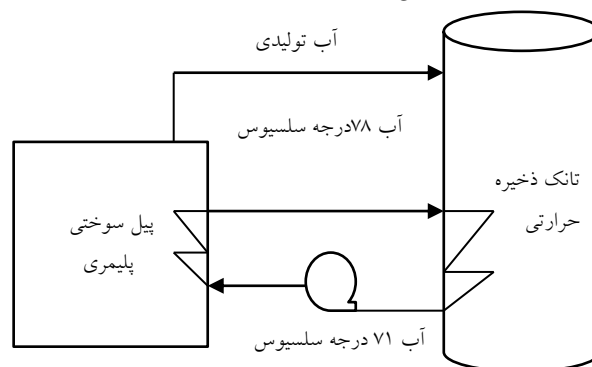
$$m_{10} h_{10} + m_6 h_6 - Q_a - m_1 h_1 = 0 \quad (43)$$

$$h_6 = h_5 \quad (44)$$

$$COP = \frac{Q_E}{Q_d} \quad (45)$$

۶.۲. مدل تأمین آب گرم

همان‌طور که از شکل (۴) معلوم است، آب ۷۱ درجه سلسیوس از پیل سوختی عبور کرده و گرمای قابل تبادل پیل را دریافت کرده دمای آن به ۷۸ درجه سلسیوس می‌رسد و علاوه بر خنک‌کاری پیل آب گرم مورد نیاز مصرف‌کننده را نیز تأمین می‌کند. میزان دبی جرمی آب از رابطه (۴۶) به دست می‌آید.



شکل (۴): پیکربندی تأمین آب گرم

$$\dot{m}_{hotwater} = \frac{Q_{net}}{C_{p,water} (T_{in,water} - T_{out,water})} \quad (46)$$

در رابطه (۴۶) $\dot{m}_{hotwater}$ دبی جرمی آبی است که برای گرمایش مصرف‌کننده و خنک‌کاری پیل سوختی از آن عبور داده می‌شود و گرم می‌شود، $C_{p,water}$ ظرفیت گرمایی ویژه آب است و چون آب در حالت مایع غیرقابل تراکم فرض شده ثابت در نظر گرفته شده است، $T_{in,water}$ دمای آب ورودی و $T_{out,water}$ دمای آب خروجی از پیل Q_{net} حرارت خالص تولیدی در پیل سوختی است که با آب خنک‌کننده تبادل حرارت می‌کند و آب را برای مصارف خانگی می‌تواند گرم کند.

محاسبه نرخ تخریب انرژی کلی می توان استفاده کرد [۱۸].

$$\Delta\psi_T = \Delta\psi_1 + \Delta\psi_2 + \Delta\psi_3 + \Delta\psi_4 + \Delta\psi_5 + \Delta\psi_6 \quad (57)$$

اما برای تحلیل انرژی چیلر جذبی لیتیوم بروماید-آب نیاز به محاسبه انرژی محلول آب با لیتیوم بروماید است. نرم افزار اییز که برای مدل سازی چیلر جذبی از آن استفاده شده است، دارای کتابخانه ای برای محاسبه انرژی این محلول نیست. برای حل این مشکل در مرجع [۱۹] معادله ای برای محاسبه انرژی لیتیوم بروماید-آب ارائه شده که برای استفاده از آن در نرم افزار اییز تابعی به صورت کد دستی نوشته شده است که براساس آن میزان انرژی چیلر در هر نقطه با داشتن غلظت و دما قابل محاسبه باشد. عبارت قابل استفاده برای محاسبه انرژی در رابطه (۵۸) آمده است [۱۹].

$$S = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 B_{ij} X^j T^i \quad (58)$$

برای محاسبه i و j می توان از جدول (۲) استفاده کرد. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که معادله ارائه شده در شرایط (۵۹) معتبر است [۱۹].

$$\begin{cases} 40 \leq T \leq 210 \\ 40 \leq X \leq 65 \end{cases} \quad (59)$$

۴. راندمان

پارامترهای مورد نیاز برای به دست آوردن راندمان سیکل در روابط (۶۰) تا (۶۲) آمده است [۷].

$$\eta_{elec} = \frac{W_{fc}}{n_{CH} 4in LHV} \quad (60)$$

$$\eta_{CHP} = \frac{W_{fc} + Q_{net} - W_{comp}}{n_{CH} 4in LHV} \quad (61)$$

$$\eta_{CCHP} = \frac{W_{fc} + Q_{net} + Q_{evap} - W_{pump} - W_{comp}}{n_{CH} 4in LHV} \quad (62)$$

در روابط (۶۰) تا (۶۲)، LHV نشان دهنده ارزش حرارتی پایین متان W_{fc} کار انجام شده توسط پیل سوختی، η_{elec} راندمان الکتریکی شده توسط کمپرسور، η_{CCHP} راندمان سیکل همزمان برق، حرارت و سرما و Q_{evap} بار حرارتی جذب شده از اواپراتور سیکل تبرید است. راندمان انرژی الکتریکی پیل سوختی پلیمری در حالت تولید الکتریسته به تنهایی از رابطه (۶۳) به دست می آید و دیگر راندمانها نیز با کمک روابط (۶۴) تا (۶۶) قابل محاسبه است [۱۶].

در این رابطه، x_n کسر جرمی جزء n ام است که ex_{ch}^n انرژی شیمیایی استاندارد جزء n ام است که در حالت مرده اندازه گرفته شده است. انرژی شیمیایی مواد در جدول (۱) آمده است [۱۷]. برای محاسبه مقادیر انرژی که در اثر کار و انتقال حرارت با محیط تبادل می شود، از روابط (۵۳) و (۵۴) استفاده می گردد [۱۶].

$$\sum \dot{E}X^W = W_{net} \quad (53)$$

$$\sum_k \dot{E}X^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_{fc}}\right) \dot{Q}_{net} \quad (54)$$

۲.۳. تحلیل انرژی چیلر جذبی

تحلیل انرژی به محاسبه میزان تخریب انرژی کمک می کند و راهی برای تحلیل قانون دوم ترمودینامیک است. انرژی یک جریان از سیال از رابطه (۵۵) پیروی می کند [۱۸].

$$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (55)$$

جدول (۱): انرژی شیمیایی مواد موجود در این سیستم [۱۷]

ماده	کسر جرمی	انرژی شیمیایی (J.kg ⁻¹)
اکسیژن	۰/۲۰۲	۱۲۴۰۰۰
نیترژن	۰/۷۷۵	۲۵۷۱۴
آب	۰/۰۱۸	۵۰۵۵۰
هیدروژن	۱	۱۱۸۰۵۰۰۰۰
متان	۱	۵۲۹۸۶۲۲۵۰
آب تولیدی	۱	۵۰۵۵۰

در معادله (۵۵)، نماد ψ نشان دهنده انرژی جریان سیال است و s, T, h و نماد صفر به ترتیب بر انتالپی، دما (برحسب کلونین)، انرژی و حالت مرده دلالت دارند. نرخ تخریب انرژی در هر یک از اجزای چیلر جذبی را می توان به فرم معادله (۵۶) نوشت [۱۸].

$$\Delta\psi = \sum (m\psi)_i - \sum (m\psi)_o + \sum W - \left[\sum Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_i - \sum Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_o \right] \quad (56)$$

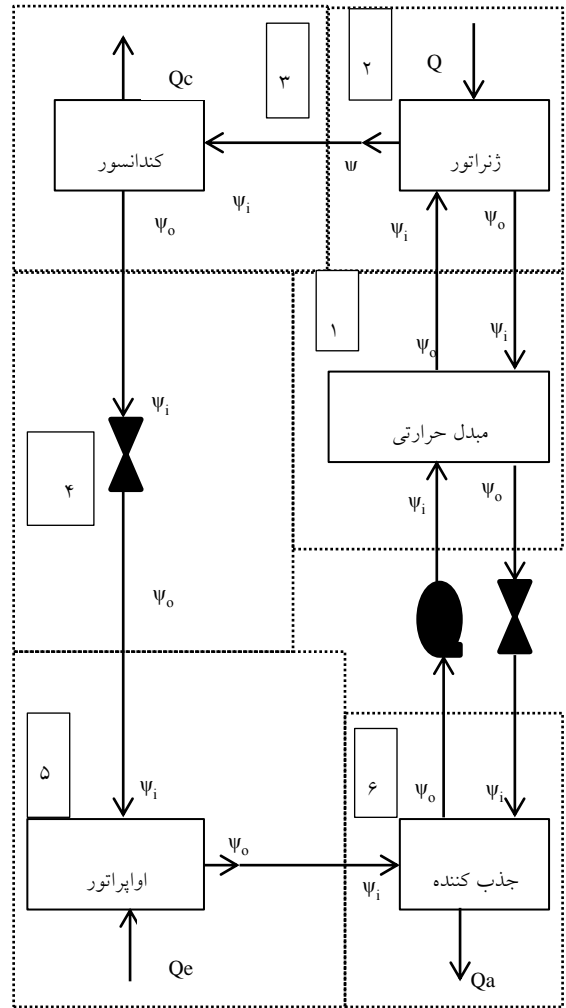
در معادله (۵۶)، $\Delta\psi$ بازگشت ناپذیری تولیدی در هر جزء چیلر جذبی است. $\sum (m\psi)_o$ و $\sum (m\psi)_i$ نرخ انرژی ورودی و خروجی، $\left[\sum Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_i - \sum Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_o \right]$ تغییر انرژی در اثر انتقال حرارت و $\sum W$ کار در هر جزء چیلر جذبی است. برای تحلیل انرژی چیلر جذبی تک اثره که در این مقاله مورد بحث است، باید چیلر جذبی را به صورت شکل (۵) تقسیم بندی کرد و رابطه (۵۶) را برای هر عضو به ازای هر ورودی خروجی نوشته و از رابطه (۵۷) برای

$$\eta_{ex,el} = \frac{\dot{W}_{net}}{\left[\dot{m} (ex_{ph} + ex_{ch}) \right]_{H_{2,in}}} \quad (63)$$

$$\eta_{ex,Cog,h} = \frac{\dot{W}_{net} + \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{heat}} \right) \dot{Q}_{heat}}{\left[\dot{m} (ex_{ph} + ex_{ch}) \right]_{CH_4}} \quad (64)$$

$$\eta_{ex,Cog,C} = \frac{\dot{W}_{net} + \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{cool}} \right) \dot{Q}_{cool}}{\left[\dot{m} (ex_{ph} + ex_{ch}) \right]_{CH_4}} \quad (65)$$

$$\eta_{ex, trig} = \frac{\dot{W}_{net} + \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{cool}} \right) \dot{Q}_{cool} + \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{heat}} \right) \dot{Q}_{heat}}{\left[\dot{m} (ex_{ph} + ex_{ch}) \right]_{CH_4}} \quad (66)$$



شکل (۵): تعادل جریان انرژی برای چیلر جذبی تک اثره

جدول (۲): ضرایب معادله انرژی لیتیوم بروماید-آب [۱۹]

i	۰	۱	۲	۳
B ₁₀	۵/۱۲۷۵۵۸×۱۰ ^{-۱}	۱/۲۲۶۷۸×۱۰ ^{-۲}	-۱/۳۶۴۸۹۵×۱۰ ^{-۵}	۱/۰۲۱۵۰۱×۱۰ ^{-۸}
B ₁₁	-۱/۳۹۳۹۵۴×۱۰ ^{-۲}	-۹/۱۵۶۸۲×۱۰ ^{-۵}	۱/۰۶۸۹۰۴×۱۰ ^{-۷}	.
B ₁₂	۲/۹۲۴۱۴۵×۱۰ ^{-۵}	۱/۸۲۰۴۵۳×۱۰ ^{-۸}	-۱/۳۸۱۱۰۹×۱۰ ^{-۹}	.
B ₁₃	۹/۰۳۵۶۹۷×۱۰ ^{-۷}	-۷/۹۹۱۸۰۶×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۲۵۲۹۷۸۴×۱۰ ^{-۱۱}	.

$$F_{conv} = \frac{W_{fc}}{\eta_{con}} + \frac{Q_u}{\eta_b} + \frac{Q_c}{COP_e} \quad (68)$$

در روابط (۶۷) و (۶۸) راندمان سیستم‌های سستی و Q_u حرارت تولیدی در بویلر و η_b راندمان بویلر F_{CCHP} میزان سوخت مصرفی در سیستم $CCHP$ است و F_{conv} میزان سوخت مصرفی در سیستم‌های سستی است. میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت و درصد کاهش مصرف سوخت نیز طبق روابط (۶۹) و (۷۰) محاسبه می‌شوند [۲۰].

$$FS = \frac{W_{fc}}{\eta_{con}} + \frac{Q_u}{\eta_b} + \frac{Q_c}{COP_e} - F \quad (69)$$

۵. درصد کاهش مصرف سوخت

در این قسمت، تحلیل میزان صرفه‌جویی مصرف انرژی محاسبه شده است. برای این کار باید سیستم تولید همزمان مدل‌شده در این مقاله را با سیستم‌های سستی تولید برق و بویلرها مقایسه کرد که یک نمای کلی از سیستم‌های سستی در شکل (۶) آمده است. برای محاسبه سوخت صرفه‌جویی‌شده، در ابتدا میزان سوخت مصرفی توسط سیستم تولید همزمان و مقدار انرژی مصرف شده توسط سیستم تولید سستی برای تولید همان میزان انرژی مورد نیاز، با کمک روابط (۶۷) و (۶۸) محاسبه می‌شود [۲۰].

$$F_{CCHP} = \dot{n}_{H_2} HHV \quad (67)$$

معادلات پیوستگی و الکتروشیمیایی پیل سوختی تحلیل جرم و انرژی پیل سوختی انجام شد و سپس به بررسی میزان انرژی اتلافی پرداخته و مشخص شد که میزان زیادی از انرژی پیل (تقریباً ۵۰ درصد آن) به صورت حرارت در حال اتلاف است، لذا این انرژی برای تأمین آب گرم مصرفی مورد استفاده قرار گرفت.

برای ایجاد تبرید، از گازهای داغ خروجی از مشعل مبدل متان به هیدروژن استفاده شده است. با استفاده از معادلات پیل سوختی میزان دبی جرمی هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی مشخص شده است، لذا با داشتن این دبی هیدروژن ورودی به پیل و معادلات مبدل هیدروژن به متان، میزان متان مورد نیاز مبدل با کمک قوانین ترمودینامیک محاسبه شده است. دبی جرمی گاز خروجی از مشعل و دمای آن، با قانون اول ترمودینامیک به راحتی قابل محاسبه است و سپس گازهای داغ خروجی به ژنراتور چیلر جذبی داده می شود تا انرژی خود را به صورت حرارت به ژنراتور چیلر جذبی دهد و گاز داغ تا نقطه شبنم خنک شود. بدین ترتیب سیکل حاضر به طور همزمان برق، حرارت و سرما تولید می کند. اطلاعات ورودی برای مدل سازی پیل سوختی پلیمری در جدول (۳) آمده است [۷]. در جدول (۴)، نتایج حاصل از مدل سازی پیل سوختی و سیکل به همراه مقایسه با مرجع [۲۲] آمده است و همان طور که مشاهده می شود، درصد خطای محاسبات کم است.

جدول (۳): اطلاعات ورودی برای مدل سازی پیل سوختی پلیمری [۷]

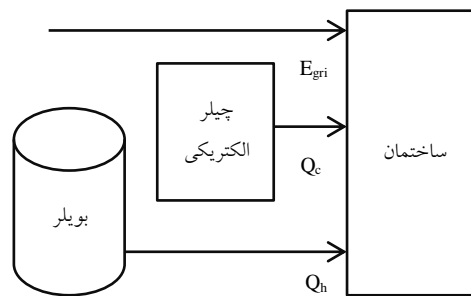
پارامتر ورودی	مقدار	واحد
تعداد الکترون منتقل شده	۲	(-)
ضریب فاراده	۹۶۴۸۵	(C.mol ⁻¹)
دمای محیط	۲۹۳/۱۵	(K)
فشار محیط	۱	(bar)
تعداد سلول در استک پیل	۴۲۰	(-)
مساحت هر سلول	۲۳۲	(cm ²)
فشار کاری پیل	۳	(bar)
دمای کاری	۸۰	(°C)
چگالی جریان کاری	۰/۶	(A.cm ⁻²)
چگالی جریان حدی	۱/۵	(A.cm ⁻²)
ارزش حرارتی بالای هیدروژن	۲۸۵۵۵۰	(J.mol ⁻¹)
نسبت استوکیومتری هیدروژن	۱/۲	(-)
نسبت استوکیومتری هوا	۲	(-)
ظرفیت حرارتی ویژه هیدروژن	۲۸/۸۶	(J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
ظرفیت حرارتی ویژه اکسیژن	۲۹/۷۲	(J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
ظرفیت حرارتی ویژه نیتروژن	۲۸/۳۹	(J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
ظرفیت حرارتی ویژه آب	۷۵/۹۵	(J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
چگالی تبادل جریان	۰/۰۰۰۰۰۰۱۲	(A.cm ⁻²)
راندمان کمپرسور	۸۵	(%)

$$FESR = \frac{\Delta F}{\frac{W_{fc}}{\eta_{con}} + \frac{Q_u}{\eta_b} + \frac{Q_c}{COP_e}} \quad (۷۰)$$

در روابط (۶۹) و (۷۰) مقدار سوخت صرفه جویی شده در واحد کیلوژول بر ثانیه و FESR درصد کاهش مصرف سوخت را نشان می دهند.

۶. درصد کاهش آلاینده‌گی

در این مقاله، ارزیابی زیست محیطی سیستم ارائه شده است؛ این ارزیابی بر اساس معیار درصد کاهش آلاینده دی اکسید کربن انجام شده است. برای محاسبه درصد کاهش انتشار دی اکسید کربن در این سیستم تولید همزمان می توان از روابط (۷۱) تا (۷۳) استفاده کرد [۲۱]. اما نحوه مقایسه این تحقیق به گونه ای است که فرض شده ساختمان مینا نیازی به روشن کردن بویلر کمکی نداشته باشد و سیستم با پیل سوختی خود بتواند پاسخ گوی نیازهای حرارتی مصرف کننده باشد.



شکل (۶): سیستم سستی تأمین انرژی برای یک ساختمان

به عبارت دیگر، محاسبات بر این اساس انجام شده است که با توجه به میزانی که پیل، کار و حرارت تولید می کند، مصرف کننده به جای استفاده از سیستم تولید همزمان از سیستم های سستی استفاده کند (برای تولید همان مقدار کار و حرارت)، چه میزان آلاینده گی به وجود می آید [۲۱].

$$CDER = 1 - \frac{CDE_{CCHP}}{CDE_{shp}} \quad (۷۱)$$

$$CDE_{shp} = \mu_e E_{grid}^{shp} + \mu_f F_b \quad (۷۲)$$

$$CDE_{cchp} = \mu_e E_{grid}^{cchp} + \mu_f F_{on-site} \quad (۷۳)$$

در رابطه (۷۱)، محاسبه درصد کاهش آلاینده گی انجام می شود و CDER درصد کاهش آلاینده گی را نشان می دهد. همچنین در روابط (۷۲) و (۷۳) میزان تولید آلاینده گی سیستم، μ_e و μ_f شاخص انتشار آلاینده دی اکسید کربن برای برق شبکه و گاز را نشان می دهند [۲۱].

۷. نتایج و بحث

سیکل جدید طراحی شده با استفاده از روابط و قوانین ترمودینامیکی در نرم افزار ایزو مدل سازی شده و علت استفاده از این نرم افزار، وجود کتابخانه قوی برای خواص ترمودینامیکی است. در ابتدا با داشتن

جدول (۴): نتایج ناشی از مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری

مقدار	نتایج مرجع	درصد	خروجی ناشی از شبیه‌سازی
شبه‌سازی	[۲۲]	خطای واحد	شبه‌سازی
		[%]	
ولتاژ پیل سوختی	۰/۶۶	۰/۶۷۸۷	۲ (V)
کار پیل سوختی	۳۸/۶۳	-	(kW)
حرارت پیل	۳۹/۱۷	-	(kW)
افت ولتاژ اهمی	۰/۰۳۳۵	۰/۰۳۴۱	۱/۷ (V)
افت ولتاژ غلظتی	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳۶۵	۱/۳ (V)
افت ولتاژ فعال‌سازی	۰/۵۰۸۱	۰/۵۲۱	۳/۷ (V)
دبی مولی متان مصرفی	۰/۱۴۷۷	-	(mol.s ⁻¹)
نسبت هم‌ارزی احتراق	۱	-	-
دبی مولی اکسیژن مصرفی	۰/۳	-	(mol.s ⁻¹)
راندمان انرژی پیل سوختی	۳۲/۶۱	-	(%)
راندمان انرژی پیل سوختی	۳۱/۴۵	-	(%)
بازگشت‌ناپذیری تولیدی در پیل سوختی	۸۴/۲۱	-	(kW)

در جدول (۵)، اطلاعات ورودی برای مدل‌سازی چیلر جذبی آمده و در جدول (۶)، نتایج ناشی از مدل‌سازی چیلر جذبی قابل مشاهده است.

جدول (۵): اطلاعات ورودی برای مدل‌سازی چیلر جذبی

پارامتر ورودی	مقدار	واحد
فشار بالای سیکل جذبی	۵	(kPa)
فشار پایین سیکل جذبی	۰/۹	(kPa)
دمای ژنراتور سیکل جذبی	۷۲	(°C)
دبی جرمی ورودی به پمپ	۰/۳	(kg.s ⁻¹)
حرارت ورودی به ژنراتور سیکل جذبی	۱۹/۲۶	(kW)

جدول (۶): نتایج ناشی از مدل‌سازی چیلر جذبی

پارامتر	مقدار	واحد
حرارت دریافتی از اواپراتور	۱۲/۲۳	(kW)
حرارت خروجی از جذب‌کننده	۱۸/۶۳	(kW)
حرارت خروجی از کندانسور	۱۲/۸۷	(kW)
ضریب عملکرد چیلر	۰/۶۳۵	(-)
بازگشت‌ناپذیری تولیدی	۵/۹۳	(kW)

در جدول (۷) نیز ورودی‌های لازم برای مدل‌سازی کلی سیکل از لحاظ لحاظ زیست‌محیطی و میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت قابل مشاهده است. در جدول (۸) نیز نتایج کلی ناشی از مدل‌سازی سیکل ارائه شده و همان‌طور که از این جدول مشخص است، راندمان به‌دست‌آمده برای سیستم تولید هم‌زمان راندمان مناسبی است.

در شکل (۷)، میزان کار خروجی از پیل سوختی پلیمری برحسب

چگالی جریان کاری نشان داده شده، همان‌طور که از نمودار پیداست با افزایش جریان تا ۱/۱ آمپر بر سانتی‌متر مربع، کار خروجی از پیل سیر صعودی دارد، اما از این چگالی جریان به بعد کار خروجی در حال کاهش است. علت این امر آن است که از چگالی جریان ۱/۱ به بعد، افت ولتاژهای غلظتی و فعال‌سازی با افزایش جریان به شدت زیاد می‌شوند.

جدول (۷): اطلاعات ورودی برای مدل‌سازی زیست‌محیطی و صرفه‌جویی مصرف سوخت

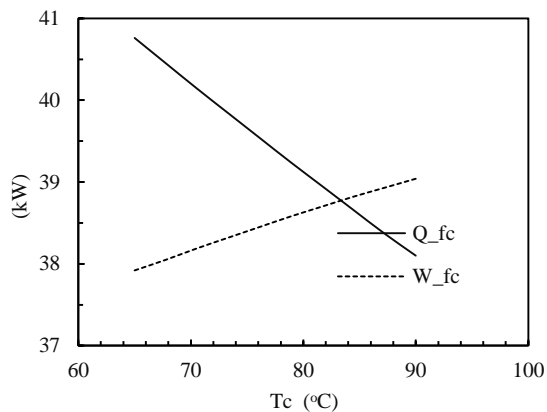
پارامتر	مقدار	واحد
T_{cool} [۲۲]	۹	(°C)
T_{heat} [۲۲]	۴۳	(°C)
COP_e [۲۱]	۳	(-)
η_b [۲۱]	۰/۸	(-)
η_{conv} [۲۳]	۰/۳	(-)
μ_f [۲۴]	۲۲۰	(gr.kWh ⁻¹)
μ_e [۲۳]	۸۳۶	(gr.kWh ⁻¹)

جدول (۸): نتایج ناشی از مدل‌سازی کل سیکل

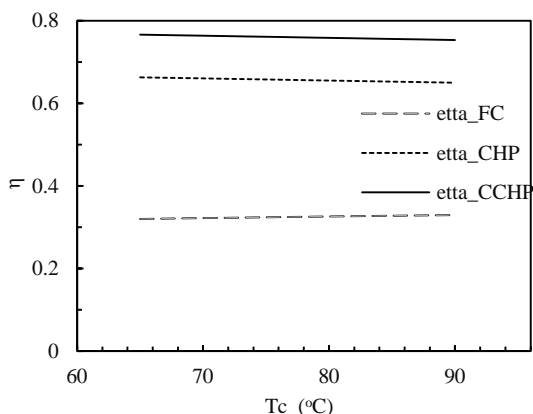
پارامتر	مقدار	واحد
راندمان انرژی در حالت CHP	۶۵/۵	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت تولید برق و سرمایه‌گذاری	۴۲/۸۱	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت CCHP	۷۵/۸۳	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت CHP	۳۳/۲۵	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت تولید برق و سرمایه‌گذاری	۳۰/۸۸	(%)
راندمان انرژی سیکل در حالت CCHP	۳۲/۶۷	(%)
درصد کاهش مصرف سوخت	۴۰/۲۳	(%)
درصد کاهش آلاینده‌گی	۲۲/۷۵	(%)

در شکل (۸)، تأثیر تغییر چگالی جریانی که پیل سوختی با آن کار می‌کند، برافت ولتاژ غلظتی نمایش داده شده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است، شیب نمودار با افزایش چگالی جریان به سمت جریان حدی به شدت در حال افزایش است. علت این امر این است که افزایش چگالی جریان از غلظت واکنش دهنده‌ها در پیل می‌کاهد و باعث افزایش افت ولتاژ غلظتی می‌شود. همچنین در شکل (۶) به تأثیر تغییر چگالی جریانی که پیل سوختی پلیمری با آن کار می‌کند، برافت ولتاژ فعال‌سازی پرداخته شده است و همان‌طور که از نمودار پیداست، برخلاف نمودار (۷) با افزایش جریان شیب افزایش افت ولتاژ فعال‌سازی زیاد نمی‌شود، بلکه به سمت مقداری ثابت میل می‌کند. این دو نمودار نشان‌دهنده آن هستند که مشکل اصلی برای افزایش چگالی جریان (که باعث افزایش کار خروجی پیل می‌شود) افت ولتاژ غلظتی است و به همین دلیل در نمودار شکل (۵) برای کار خروجی از پیل سوختی یک اکستریم وجود دارد، یعنی در نقطه اکستریم پیل در بهترین

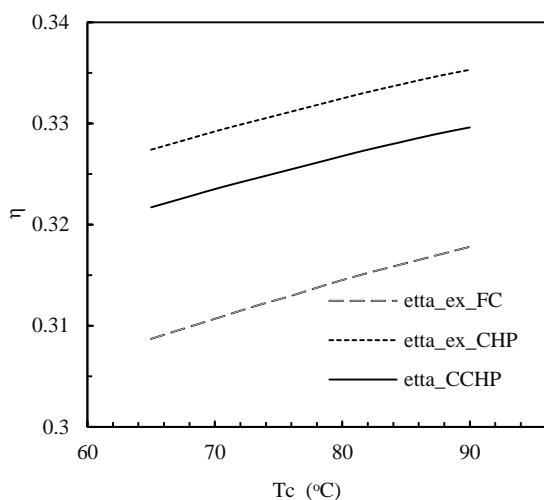
تغییرات دمای کاری پیل سوختی قابل مشاهده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است، با افزایش دمای کاری پیل سوختی راندمان‌های انرژی پیل سوختی می‌یابند، زیرا همان‌طور که از نمودار شکل (۹) قابل مشاهده است، با افزایش دمای کاری پیل، کار خروجی از پیل سوختی می‌یابد و در نتیجه، راندمان‌های انرژی پیل سوختی نیز افزایش می‌یابند.



شکل (۹): تغییرات کار و گرمای تولیدی در پیل با افزایش دما



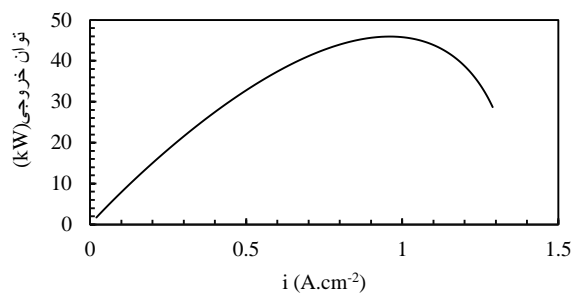
شکل (۱۰): تأثیر تغییر دمای کاری پیل بر راندمان انرژی سیکل



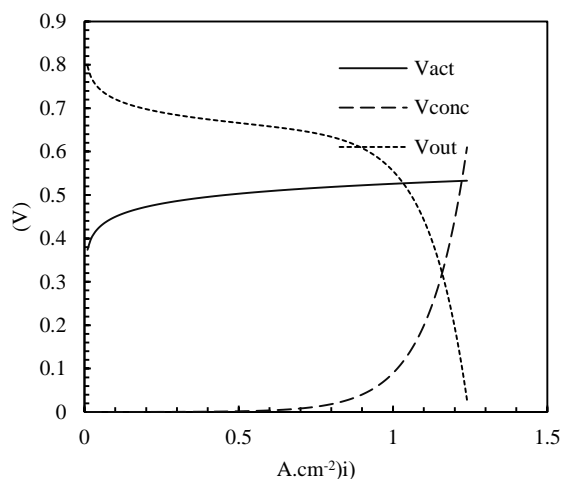
شکل (۱۱): تأثیر تغییر دمای کاری پیل بر راندمان‌های انرژی سیکل

حالت کارکرد خود قرار دارد.

در ادامه شکل (۸) نیز میزان افت ولتاژ کلی پیل در اثر افزایش جریان کاری پیل قابل مشاهده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش جریان کاری پیل سوختی به سمت چگالی جریان حدی، میزان افت ولتاژ غلطی به شدت افزایش می‌یابد و از طرفی همان‌طور که از شکل (۸) نیز مشخص است، با افزایش چگالی جریان افت ولتاژ فعال‌سازی نیز افزایش می‌یابد که در نهایت وقتی افزایش چگالی جریان، به چگالی جریان حدی برسد، ولتاژ خروجی به صفر می‌رسد. در شکل (۹)، تأثیر افزایش دما بر کار و گرمای تولیدی قابل مشاهده است و همان‌طور که از آن مشخص است، با افزایش دما، کار تولیدی افزایش می‌یابد، اما گرمای تولیدی کاهش می‌یابد. و این مسئله تأثیر خود را بر نمودار شکل (۱۰) گذاشته است. در شکل (۱۰)، تغییرات راندمان سیکل در سه حالت با تغییرات دمای کاری پیل سوختی قابل مشاهده است، همان‌طور که از نمودار مشخص است، با افزایش دمای کاری پیل سوختی راندمان پیل به تنهایی افزایش می‌یابد، اما راندمان‌های تولید چندگانه سیکل کاهش پیدا می‌کند.

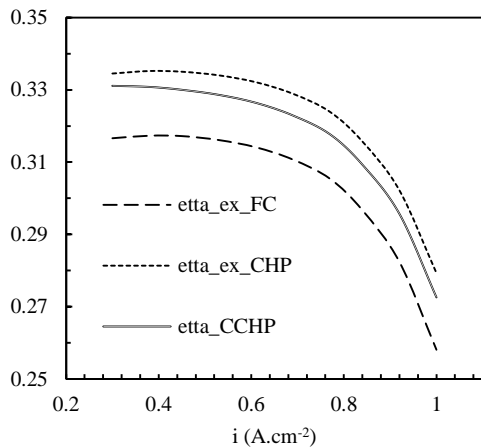


شکل (۷): قدرت خروجی از پیل بر حسب چگالی جریان



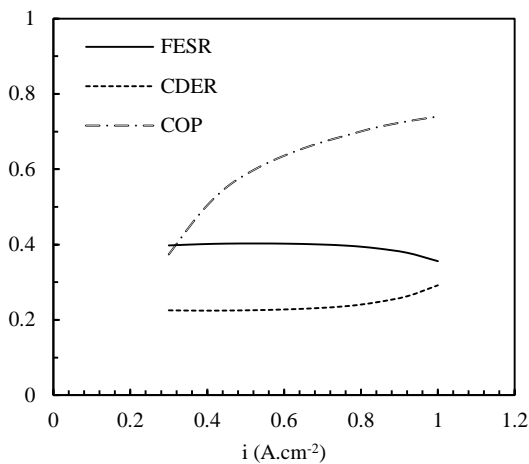
شکل (۸): تأثیر تغییرات چگالی بر ولتاژهای پیل

در شکل (۱۱)، تغییرات راندمان انرژی سیکل در سه حالت با



شکل (۱۴): تأثیر چگالی جریان کاری پیل بر راندمان‌های انرژی سیستم

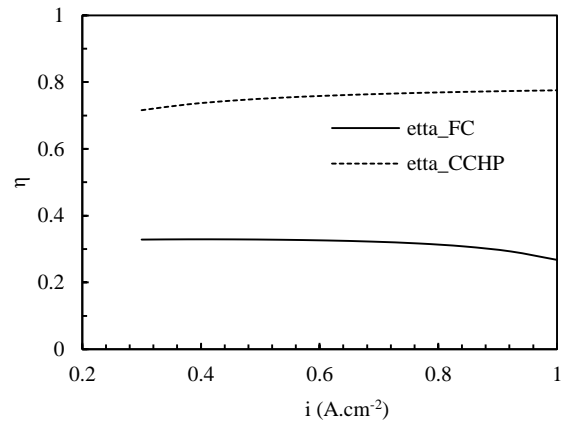
در شکل (۱۵)، تأثیر چگالی جریان کاری پیل سوختی بر ضریب عملکرد چیلر جذبی، درصد کاهش مصرف سوخت و درصد کاهش آلاینده‌گی نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار (۱۵) مشخص است، با افزایش چگالی جریان چون حرارت تولیدی در پیل سوختی، دبی مولی گازهای داغ خروجی از مشعل ریفورمر افزایش می‌یابند، در نتیجه درصد کاهش آلاینده‌گی و ضریب عملکرد چیلر جذبی افزایش می‌یابند، اما چون کار تولیدی در پیل سوختی با افزایش چگالی جریان کاهش می‌یابد، درصد صرفه‌جویی در مصرف سوخت نیز کاهش می‌یابد.



شکل (۱۵): تأثیر چگالی جریان کاری پیل بر ضریب عملکرد چیلر جذبی، درصد کاهش مصرف سوخت و درصد کاهش آلاینده‌گی

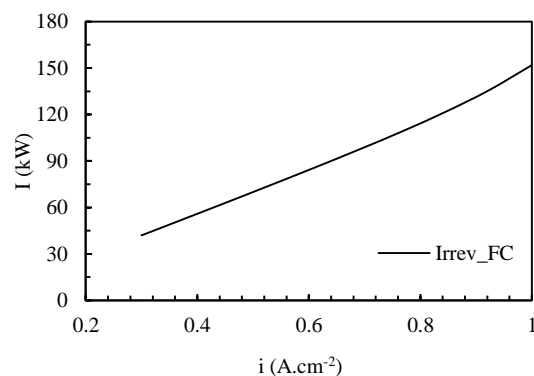
در شکل (۱۶)، تغییرات کار و بازگشت‌ناپذیری تولیدی در پیل سوختی بر حسب تعداد سلول نشان داده شده است. نتایج نشان داده‌اند که با افزایش تعداد سلول، کار و بازگشت‌ناپذیری تولیدی در پیل هر دو افزایش می‌یابند، اما شیب بازگشت‌ناپذیری تولیدی در پیل سوختی بیشتر از شیب کار تولیدی است و از لحاظ قانون دوم ترمودینامیک، این مسئله مطلوب نیست.

در شکل (۱۲)، تأثیر چگالی جریان کاری پیل سوختی بر راندمان‌های انرژی مشاهده می‌شود و همان‌طور که از نمودار مشخص است، با افزایش چگالی جریان راندمان پیل کاهش می‌یابد، چون افت ولتاژهای پیل با افزایش چگالی جریان افزایش می‌یابد. اما راندمان انرژی سیستم در حالت تولید سه‌گانه افزایش می‌یابد، چون از حرارت تولیدی در پیل سوختی به‌واسطهٔ افزایش چگالی جریان استفاده شده است.



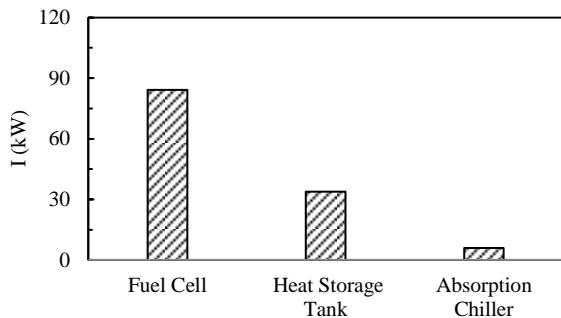
شکل (۱۲): تأثیر چگالی جریان کاری پیل بر راندمان انرژی

در شکل (۱۳)، تأثیر چگالی جریان کاری پیل سوختی بر بازگشت‌ناپذیری تولیدی در پیل سوختی ارائه شده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است، با افزایش چگالی جریان، چون کار تولیدی در پیل کاهش می‌یابد، بازگشت‌ناپذیری تولیدی در پیل سوختی افزایش می‌یابد.

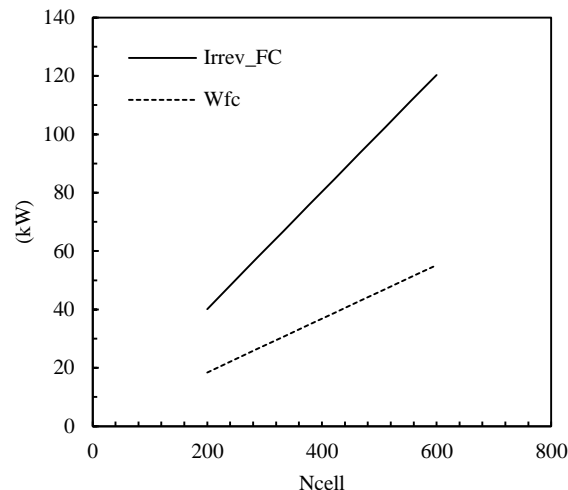


شکل (۱۳): تأثیر چگالی جریان کاری پیل بر بازگشت‌ناپذیری تولیدی در پیل

در شکل (۱۴)، تأثیر چگالی جریان کاری پیل سوختی بر راندمان‌های انرژی سیستم قابل مشاهده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است، با افزایش چگالی جریان، چون بازگشت‌ناپذیری تولیدی در پیل سوختی افزایش می‌یابد، راندمان‌های انرژی سیستم کاهش می‌یابد.

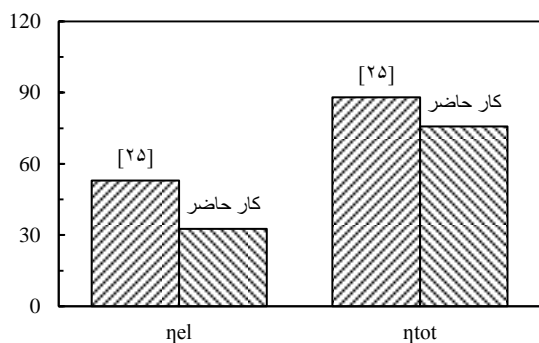


شکل (۱۸): بازگشت‌ناپذیری تولیدی در هریک از اجزای تولید قدرت، گرمایش و سرمایش



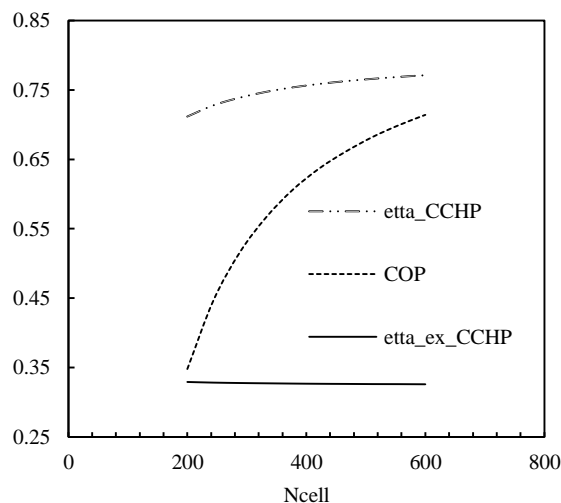
شکل (۱۶): تأثیر تعداد سلول بر کار و بازگشت‌ناپذیری تولیدی در پیل سوختی

در شکل (۱۹)، راندمان‌های سیستم با سیستم معرفی شده در [۲۵] مقایسه شده است. در مرجع [۲۵] نیز یک سیستم برای بهره‌برداری از حرارت تولیدی پیل سوختی اکسید جامد پیشنهاد شده است. زیرا سیستم معرفی شده توسط پیرکندی و همکاران [۲۵] از لحاظ قدرت با سیستم حاضر قابل مقایسه نیست. اعداد بی بعد سیستم آن‌ها مانند راندمان‌ها با سیستم این مقاله مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل (۱۹) دیده می‌شود، هم راندمان الکتریکی و هم راندمان تولید چندگانه سیستم با محرک اولیه پیل سوختی اکسید جامد بالاتر است. اما پیل سوختی اکسید جامد نسبت به پیل سوختی پلیمری معایبی دارد که از آن جمله می‌توان به زمان راه‌اندازی بالای آن‌ها و خرابی و خوردگی به دلیل کار در دمای بالا اشاره کرد. سیستم حاضر برای کاربردهای ساختمانی پیشنهاد شده و زمان راه‌اندازی پایینی دارد، درحالی‌که سیستم [۲۵] دارای زمان راه‌اندازی بالایی است و برای کاربردهای ساختمانی مناسب نیست.



شکل (۱۹): مقایسه سیستم تولید همزمان ارائه شده با سیستم تولید چندگانه [۲۵]

در شکل (۱۷)، تأثیر تعداد سلول بر راندمان‌های انرژی، انرژی و ضریب عملکرد چیلر مشخص است. با افزایش تعداد سلول راندمان انرژی و ضریب عملکرد چیلر جذبی هردو افزایش می‌یابند، اما راندمان انرژی سیستم به دلیل آنچه در شکل (۱۶) مشخص است، کاهش می‌یابد.



شکل (۱۷): تأثیر تعداد سلول بر راندمان‌های انرژی، انرژی و ضریب عملکرد چیلر جذبی

در شکل (۱۸)، بازگشت‌ناپذیری تولیدی در هریک از اجزای اصلی سیستم که تولید قدرت، سرمایش و گرمایش می‌کنند، نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، بیشترین میزان بازگشت‌ناپذیری تولیدی در سیستم متعلق به پیل سوختی با ۸۴/۲۱ کیلووات تولید بازگشت‌ناپذیری می‌باشد.

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به مدل‌سازی یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و

پیشنهاد می‌شود در آینده، سیستم پیشنهادی در این مقاله برای یک ساختمان مینا براساس انرژی مورد نیاز مصرف کننده، مورد مطالعه اقتصادی و زیست‌محیطی قرار گیرد.

۹. فهرست علائم

A_{cell}	مساحت (m^2)
C_i	ظرفیت گرمایی ویژه ($J.mol^{-1}K^{-1}$)
COP_e	ضریب عملکرد چیلر
I	چگای جریان کاری پیل (A)
EX	اگرزری (kW)
ex_{ph}	اگرزری فیزیکی (kW)
ex_{ch}	اگرزری شیمیایی (kW)
E_{Nemst}	ولتاژ نرنست (V)
$FESR$	درصد کاهش مصرف سوخت
FS	میزان کاهش مصرف سوخت (kJ)
h	انتالپی ($kJ.kg^{-1}$)
I	جریان کاری (A)
\dot{I}	نرخ اگرزری (kW)
i_L	چگالی جریان حدی ($A.cm^{-2}$)
\dot{m}	دبی جرمی ($kg.s^{-1}$)
\dot{n}	دبی مولی ($mol.s^{-1}$)
n_e	تعداد مول
N_{cell}	تعداد سلول
P	فشار (bar)
Q	حرارت (kW)
R	مقاومت الکتریکی (Ω)
S	انتروپی ($kJ.kg^{-1}K^{-1}$)
T	دما (K)
T	دما ($^{\circ}C$)
V	ولتاژ (V)
W_{fc}	کار پیل سوختی (kW)
X	کسر مولی

علائم یونانی

ξ_i	ضریب ولتاژ فعالسازی
η	راندمان
λ	ضریب استوکیمتری

سرما که بر پایه پیل سوختی پلیمری کار می‌کند، پرداخته شده است. در این سیکل که آرایشی نوین دارد، از گرمای تولیدی در پیل سوختی برای گرمایش و از گرمای گازهای داغ خروجی از مشعل نیز برای تأمین حرارت مورد نیاز در ژنراتور سیکل جذبی استفاده شده و نحوه مدل‌سازی سیکل بدین گونه بوده است که با توجه به معادلات ارائه شده برای پیل سوختی پلیمری، ابتدا به مدل‌سازی پیل سوختی پرداخته شد، پس از انجام مدل‌سازی پیل میزان قدرت الکتریکی و انرژی حرارتی خروجی از پیل محاسبه شده است، سپس مدل چیلر جذبی برای استفاده از انرژی گازهای خروجی از مشعل ارائه شده است و پس از مدل‌سازی سیکل تولید همزمان توسط نرم‌افزار اینز نتایج مهمی به دست آمده که به شرح زیر 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 کل این حرارت تولیدی به تانک ذخیره حرارتی و انرژی گازهای خروجی از بویلر مبدل سوختی نیز به ژنراتور چیلر جذبی داده شده است. توان اواپراتور چیلر $12/23$ کیلووات و ضریب عملکرد چیلر جذبی $0/635$ محاسبه شده است. راندمان انرژی سیستم در حالت پیل به تنهایی $32/61$ درصد، در حالت تولید دوگانه برق و حرارت $65/5$ درصد، در حالت تولید برق و سرمایش $42/81$ درصد و در حالت تولید سه‌گانه برق، حرارت و سرمایش $75/83$ درصد به دست آمده است. از دیدگاه اگرزری نتایج به دست آمده را می‌توان به‌طور خلاصه در ادامه ارائه کرد:

- راندمان اگرزری سیستم در حالت پیل به تنهایی $31/45$ درصد، در حالت تولید دوگانه برق و حرارت $33/25$ درصد، در حالت تولید برق و سرمایش $30/88$ درصد و در حالت تولید سه‌گانه برق، حرارت و سرمایش $32/67$ درصد به دست آمده است.

- محاسبات نشان داده است که بیشترین بازگشت ناپذیری در پیل سوختی رخ می‌دهد و مقدار آن $84/21$ کیلووات است و بازگشت ناپذیری تولیدی در چیلر جذبی $5/93$ کیلووات است.

از دیدگاه صرفه‌جویی در مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌گی نیز می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- در سیستم حاضر در مقایسه با سیستم‌های سنتی تولید برق، حرارت و سرمایش، $40/23$ درصد کاهش مصرف سوخت در مقایسه با سیستم‌های سنتی تولید برق، گرمایش و سرمایش رخ می‌دهد.

- در سیستم حاضر در مقایسه با سیستم‌های سنتی تولید برق، حرارت و سرمایش، $22/75$ درصد کاهش آلاینده‌گی رخ می‌دهد.

- [1] Ellamla, H.R., Staffell, I., Bujlo, P., Pollet, B.G., Pasupathi, S., "Current Status of Fuel Cell Based Combined Heat and Power Systems for Residential Sector," *Journal of Power Sources*, Vol. 293, pp. 312-328, 2015.
- [2] Ebrahimi, M., Keshavarz, A., *Combined Cooling, Heating and Power: Decision-making, Design and Optimization*. Elsevier, 2014.
- [3] Daolin, L., Shifei, Z., "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, p. 2, 2010.
- [4] Kong, X.Q., Wang, R.Z., Huang, X.H., "Energy Efficiency and Economic Feasibility of CCHP Driven by Stirling Engine," *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 9, pp. 1433-1442, 2004.
- [5] Dodds, P.E., Hawkes, A., *The Role of Hydrogen and Fuel Cells In Providing Affordable, Secure Low-Carbon Heat*, University College London, 2014.
- [6] Barelli, L., Bidini, G., Gallorini, F., Ottaviano, A., "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.
- [7] Zhao, P., Wang, J., Gao, L., Dai, Y., "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.
- [8] Adam, A., Fraga, E.S., Brett, D.J., "Options for Residential Building Services Design Using Fuel Cell Based Micro-CHP and the Potential For Heat Integration," *Applied Energy*, Vol. 138, pp. 685-694, 2015.
- [9] Najafi, B., Mamaghani, A.H., Baricci, A., Rinaldi, F., Casalegno, A., "Mathematical Modeling and Parametric Study on a 30 kW el High Temperature PEM Fuel Cell Based Residential Micro Cogeneration Plant," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 3, pp. 1569-1583, 2015.
- [10] Wang, C., Nehrir, M.H., Shaw, S.R., "Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits," *IEEE*, Vol. 20, No. 2, pp. 442-451, 2005.
- [11] Larminie, J., Dicks, A., McDonald, M.S., *Fuel Cell Systems Explained*, Vol. 2, New York, Wiley, 2003.
- [12] Spiegel, C., *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB*, Academic press, 2011.
- [13] Barbir, F., *PEM Fuel cells Theory and Practice*, ser. Sustainable World, 2005.
- [14] Sonntag, R.E., Borgnakke, C., Van Wylen, G.J., Van Wyk, S., *Fundamentals of Thermodynamics*, Vol. 6, New York: Wiley, 1998.
- [15] Handbook-Heating, A.S.H.R.A.E., *Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment (IP Edition)*, 2008.
- [16] Yilanci, A., Dincer, I., Ozturk, H.K., "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.
- [17] *Exergy calculator*, Accessed on 8 August 2015; <http://www.exergoecology.com/excalc/2015-8-8>.
- [18] Şencan, A., Yakut, K.A., Kalogirou, S.A., "Exergy Analysis of Lithium Bromide/Water Absorption Systems," *Renewable energy*, Vol. 30, No. 5, pp. 645-657, 2005.
- [19] Kaita, Y., "Thermodynamic Properties of Lithium Bromide-Water Solutions at High Temperatures," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 24, No. 5, pp. 374-390, 2001.
- [20] Horlock, J.H., *Combined Power Plant*, Pergamon Press, Oxford, 1990.
- [21] Farahnak, M., Farzaneh-Gord, M., Deymi-Dashtebayaz, M., Dashti, F., "Optimal Sizing of Power Generation Unit Capacity in ICE-Driven CCHP Systems for Various Residential Building Sizes," *Applied Energy*, Vol. 158, pp. 203-219, 2015.
- [22] Yari, M., Rezaee, V., "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.
- [23] *Iran Energy Balance*, Accessed on 8 August 2015; <http://www.saba.org/energyinfo/tashilat/taraz/2015-8-8>.
- [24] Jiang-Jiang, W., Chun-Fa, Z., You-Yin, J., "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.
- [۲۵] پیرکندی ج، قاسمی، م. «مدل سازی الکتروشیمیایی اقتصادی توده پیل سوختی اکسید جامد لوله ای در یک سیستم تولید انرژی»، مجله مهندسی و مدیریت انرژی، شماره اول، صفحه ۱۶-۲۹، دانشگاه کاشان، بهار ۹۲.