

بررسی قانون اول و دوم یک سیستم جدید جهت تولید توان، گرمایش، هیدروژن با استفاده از سیستم پیل سوختی پلیمری

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران، m.abdolalipour@jsu.ac.ir

مهران عبدالعلی پورعدل*

چکیده

استفاده از سیستم تولید همزمان برای نیروگاه‌ها می‌تواند روشی امیدوارکننده برای افزایش راندمان سیستم از نظر انرژی و انرژی باشد. در این مطالعه، یک سیستم تولید چندگانه که شامل چرخه رانکین آلی، آب‌گرم‌کن داخلی، الکتروولایزر غشاء پروتونی و پیل سوختی غشاء تبادل پروتونی پیشنهاد شده است. در این سیستم ترکیبی از بازیابی گرمای هدر رفت پیل سوختی استفاده شده است. این سیستم مورد تحلیل انرژی و انرژی قرار گرفته و تاثیر پارامترهای مهمی همانند دمای تبخیرکن، اختلاف دمای تنگش تبخیرکن، چگالی جریان و دمای پیل سوختی روی پارامترهای عملکردی سیستم بررسی شده است. برای سیستم پیشنهادی توان تولیدی پیل سوختی ۶۰۹/۴ کیلووات، مقدار هیدروژن تولیدی ۰/۱۳۷ کیلوگرم بر ساعت، گرمایش ۲۱۰/۲ کیلووات، تولید توان سیستم ۵۸۸/۹ کیلووات، بازده حرارتی پیل سوختی ۵۳/۷۱٪، بازده حرارتی کل ۷۱/۷۶٪ و بازده انرژی کل ۵۴/۸۴٪ محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل انرژی، تحلیل انرژی، سیستم تولید همزمان، الکتروولایزر غشاء پروتونی، پیل سوختی غشاء تبادل پروتونی، رانکین آلی.

Investigating the first and second laws of a proposed system for generating power, heating, and hydrogen using a polymer fuel cell system

M. Abdolalipourad

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

Abstract

The use of a cogeneration system for power plants can be a promising way to increase the efficiency of the system from the energy and exergy viewpoints. In the present study, a multigeneration system including an Organic Rankine Cycle (ORC), Domestic Water Heater (DWH), Proton Exchange Membrane (PEM) electrolyzer, and Proton-Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) is proposed. A heat recovery system is employed for the multigeneration system from a PEM fuel cell's waste heat. This proposed system is investigated from energy and exergy viewpoints. Also, a parametric study is done to illustrate the effects of some important factors including pinch point temperature difference of evaporator, evaporator temperature, current density, and PEMFC temperature on the main performance criteria of the multigeneration system. For multigeneration system values of PEMFC power generation, produced hydrogen, heating, net output power, PEMFC thermal efficiency, system thermal efficiency, and system exergy efficiency, are calculated as 609.4 kW, 0.137 kg/hr, 210.2 kW, 588.9 kW, 53.71%, 71.76%, 54.84%, respectively.

Keywords: Energy analysis, Exergy analysis, Multigeneration System, Proton exchange membrane electrolyzer, Proton-exchange membrane fuel cell, ORC.

۱- مقدمه

مورد تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی قرار گرفت. مدل‌های شبیه‌سازی پیل سوختی غشاء تبدالی پروتونی توسط بیبک اوغلو [۶] توصیف و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به عنوان هدف اصلی در این مطالعه برای کاتالیزور و ولتاژ سلولی، روش صحیح مدل‌سازی عددی بحث شده و نتایج به دست آمده از این روش با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. بیبک اوغلو نشان داد که با افزایش دمای کاری، رسانش غشاء پیل سوختی افزایش یافته و رطوبت زنی سوخت و هوا در عملکرد پیل سوختی تأثیر مطلوبی گذاشته است. اوزگور و یاکاریلماز [۷] یک پیل سوختی ۱ کیلووات را مدل‌سازی کرده و نتایج آن را با داده‌های تجربی مورد مقایسه قرار دادند و مشاهده کردند که برای مدل‌سازی عددی با افزایش توان خروجی از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ وات، بازده انرژی و انرژی به ترتیب از ۶۲/۸۱ به ۴۱/۲۷ درصد و از ۶۲/۸۱ به ۴۵/۵۸ کاهش یافته است.

استفاده از سیستم‌های تولید همزمان در جامعه جهانی مزایای

افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و به تبع آن افزایش آلودگی‌های زیست محیطی و کاهش منابع فسیلی به دلیل افزایش در مصارف خانگی و صنایع به عنوان یک دغدغه در میان کشورهای دنیا تبدیل شده است [۱، ۲]. از این رو استفاده بیش‌تر از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان یک انرژی با آلودگی‌های کمتر به یک هدف در جوامع مختلف تبدیل شده است. پیل‌های سوختی غشاء تبادل پروتونی یکی از انواع مختلف انرژی‌های تجدید یافته که اخیراً به دلیل تبدیل مستقیم انرژی سوخت به جریان مستقیم الکتریسیته با استفاده از واکنش‌های شیمیایی، بازده بالا، دمای کارکرد پایین پیل سوختی و عمر طولانی مورد توجه بیش از پیش قرار گرفته است [۳، ۴]. در زمینه پیل سوختی مطالعاتی در این زمینه انجام شده است. از جمله تاثیرات پارامترهای مهم عملکردی همانند جریان، دما، فشار و چگالی را بر روی یک پیل سوختی توسط کاور [۴] و همچنین سانتارلی و تورچیو [۵]

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.abdolalipour@jsu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۳۱/۰۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۳۱/۰۵/۱۵

زیست محیطی، فنی و اقتصادی زیادی داشته و استفاده از گرمای اتلافی به عنوان یک راه‌حل برای سیستم‌های تولید همزمان مطرح می‌باشد. [۸، ۹]. تاپو و همکاران [۱۰] یک سیستم ترکیبی متشکل از پیل سوختی پلیمری، یک چرخه رانکین آلی، الکترولیز غشا تبادل پروتونی و ترموالکتریک بررسی کردند. طبق نتایج بازده انرژی و انرژی به ترتیب ۱۶/۷۷ درصد و ۱۶/۶۹ درصد محاسبه شد. صباغی و همکاران [۱۱] سیستمی شامل یک چرخه توربین گاز اصلاح شده، یک چرخه دی‌اکسیدکربن گذر بحرانی و فرابحرانی، الکترولیز غشای تبادل پروتونی و یک واحد پیل سوختی را تحت تاثیر منابع مختلف زیست توده (کاغذ، چوب، پوسته شلتوک و زباله‌های جامد شهری) مورد مطالعه قرار دادند طبق نتایج بازده انرژی و انرژی، تولید هیدروژن و نرخ مصرف زیست-توده به ترتیب ۴۷/۸۹ درصد و ۳۲/۲۶ درصد، ۲/۷۴ کیلوگرم در ساعت و ۰/۰۵۵ کیلوگرم بر ثانیه بدست آمد. مردنی و همکاران [۱۲] یک سیستم ترکیبی که شامل پیل سوختی پلیمری (به عنوان قسمت اصلی سیستم مدل بوده)، دو چرخه رانکین آلی و جریان پایین دست چرخه بخار هیدروژن بوده از نظر انرژی و انرژی مطالعه کرده و سپس تحلیل انرژی و اکونومیکی جهت ارزیابی کل سیستم از جنبه‌ی اقتصادی انجام دادند. نتایج برای سیستم پیشنهادی مذکور نشان داد که این چرخه پیشنهادی قابلیت تولید توان ۱۳۵۳ کیلووات، بازده انرژی و انرژی به ترتیب ۶۲/۳۴ درصد و ۵۸/۱۵ درصد بوده و همچنین ضریب انرژی و اکونومیکی آن ۲۶/۲۱ درصد حاصل شد. تحلیل‌های پارامتری نشان داد که با افزایش دمای کاری و کاهش شدت جریان پیل سوختی، هزینه‌های مربوط به کل سیستم کاهش خواهند یافت. همچنین با افزایش دما و فشار توربین چرخه اول، نرخ هزینه‌ها افزایش یافته اما تغییرات مذکور برای چرخه دوم باعث کاهش نرخ هزینه‌های کل سیستم خواهد شد. مردنی و همکاران [۱۳] چهار سیستم تولید توان ترکیبی مبتنی بر پیل سوختی پلیمری در دمای پایین و دمای بالا با چرخه رانکین آلی تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای آبشاری برای بازیابی گرمای تلف شده از پیل‌های سوختی و همچنین بهره‌برداری از بخار شدن هیدروژن برای تولید توان اضافی و تغذیه به پیل‌های سوختی پیشنهاد و مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه بالاترین مقادیر بازده انرژی و انرژی در بین سیستم‌های در نظر گرفته شده ۶۱/۴۲ درصد و ۶۲/۲۰ درصد) مربوط به چرخه ترکیبی پیل سوختی دما پایین- رانکین دو مرحله‌ای آبشاری است، اما کمترین هزینه تولید توان واحد ۳۳/۷۵ دلار بر گیگاوات، مربوط به چرخه ترکیبی پیل سوختی دما بالا- رانکین ساده می‌باشد.

با توجه به بررسی‌های گذشته مشخص شد که انرژی زیادی در قسمت خنک‌کاری در سیستم‌های پیل سوختی اتلاف شده و یا در نهایت از چرخه رانکین برای بهره‌برداری از این انرژی استفاده شده است [۱۲-۱۵]، که خلا مطالعاتی برای استفاده از گرمای اتلافی قابل مشاهده است. کم بودن بازده این نوع پیل سوختی‌ها از یک طرف و از سوی دیگر مزایای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های تولید همزمان دو دلیل اصلی برای پیشنهاد یک سیستم مبتنی بر پیل سوختی پلیمری برای تولید همزمان هیدروژن، توان مضاعف و گرمایش شده است. در این سیستم جدید آب خنک کاری انرژی لازم برای چرخه رانکین آلی (برای تولید توان مضاعف)، آبگرمکن داخلی (برای گرمایش) و مبدل الکترولیز غشا پروتونی تامین می‌کند. به طور

- خلاصه اهداف پژوهش حاضر را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:
- ✓ پیشنهاد یک سیستم ترکیبی جدید برای بازیابی گرمای اتلافی از یک پیل سوختی پلیمری
 - ✓ تولید هیدروژن، گرمایش و توان اضافی با استفاده از گرمای اتلافی پیل سوختی
 - ✓ استفاده از مزایای هیدروژن (که در مخزن حامل هیدروژن ذخیره می‌شود) برای تغذیه پیل سوختی
 - ✓ تجزیه و تحلیل از دیدگاه‌های انرژی و انرژی
 - ✓ ارزیابی اثرات برخی از متغیرهای مهم بر عملکرد سیستم از طریق مطالعه پارامتریک جامع.

۲- توصیف سیستم و مدل‌سازی

۲-۱- توصیف سیستم

طرحواره‌ی سیستم هیبریدی تولید سه‌گانه در شکل ۱ نشان داده شده از سیستمی متشکل از پیل سوختی غشاء تبادل پروتونی، چرخه رانکین آلی برای تولید توان، الکترولیز غشا پروتونی برای تولید هیدروژن و از آب گرم‌کن داخلی در قسمت آب خنک‌کاری جهت گرمایش استفاده شده است. هیدروژن و هوا به عنوان واکنش دهنده‌ها وارد پیل سوختی شده و با انجام واکنش گرماده، توان، گرما و آب تولید می‌شود. البته مقداری هوا و سوخت هیدروژن نیز که در پیل سوختی واکنش نداده‌اند، از آن خارج می‌شوند که این سوخت هیدروژن استفاده نشده، دوباره به پیل سوختی بازخورانی می‌شود. حرارت تولیدی نیز که با استفاده از آب خنک‌کاری حاصل می‌شود به عنوان منبع گرمایی چرخه رانکین آلی استفاده می‌شود. این حرارت به تبخیر کن توسط آب گردش‌ی منتقل می‌شود که این آب گردش‌ی در کانال مخصوص به خود در پیل‌های سوختی به عنوان خنک‌سازی جریان می‌یابد. منبع گرمایی چرخه رانکین آلی تامین و باعث تولید توان در توربین چرخه رانکین می‌شود. شایان ذکر است آب با دمای بالا (جریان ۵) جهت خنک‌کاری در مبادله‌کن گرمایی الکترولیز، دمای آب محیط را به دمای لازم برای الکترولیز (جریان ۱۱) می‌رساند. شایان ذکر است انرژی لازم برای الکترولیز و تولید هیدروژن توسط توان چرخه رانکین استفاده می‌کند. آب در الکترولیز به دو جریان مخلوط آب و اکسیژن خروجی از آند و هیدروژن خروجی از کاتد در مخازن برای موارد مورد مصرف ذخیره می‌گردد یا می‌توان از آن در پیل سوختی استفاده کرد. همچنین آب خروجی از تبخیرکننده (جریان ۸) به دلیل بالا بودن دما، از آب‌گرمکن داخلی برای گرمایش استفاده می‌شود تا دمای آن به دمای خنک‌کاری پیل سوختی برسد.

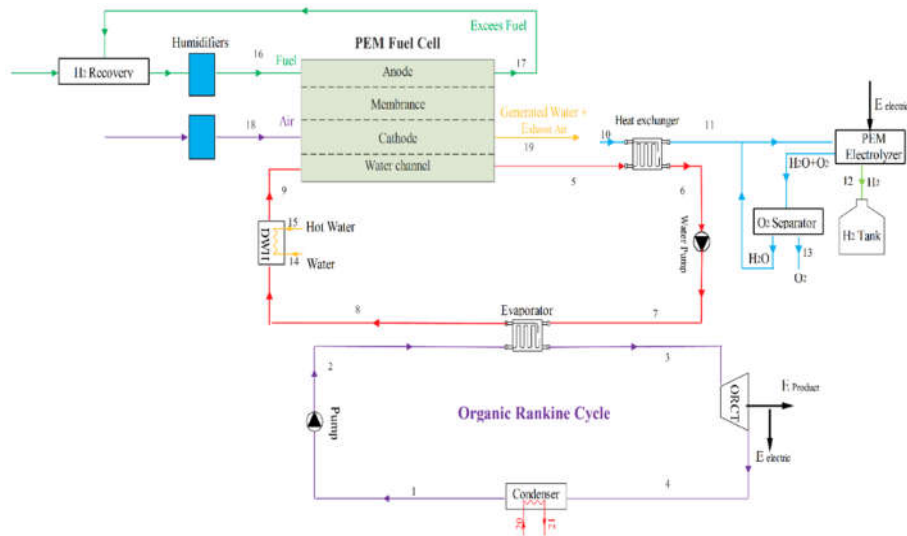
۲-۲- معادلات و روابط حاکم

۲-۲-۱- معادلات حاکم بر پیل سوختی پروتونی

واکنش در آند و کاتد برای پیل سوختی به‌ترتیب طبق رابطه (۱) و (۲) نشان داده شده است [۱۶]:



پس واکنش کلی پیل سوختی طبق رابطه (۳) ارایه می‌شود [۱۶]:



شکل ۱- چرخه پیشنهادی تولید چهارگانه توان، گرمایش، آب شیرین و هیدروژن بر مبنای چرخه توربین گازی زیست توده

$$\log(P_{H_2O}^{sat}) = -2.1794 + 0.02953(T_{fc} - 273.15) - 9.18137 \times 10^{-5}(T_{fc} - 273.15)^2 + 1.4454 \times 10^{-7}(T_{fc} - 273.15)^3 \quad (9)$$

$$x_{H_2O}^{sat} = \frac{P_{H_2O}^{sat}}{P} \quad (10)$$

$$x_{N_2, in} = 0.79(1 - x_{H_2O}^{sat}) \quad (11)$$

$$x_{N_2, out} = \frac{1 - x_{H_2O}^{sat}}{1 + \left(\frac{0.21}{0.79}\right)\left(\frac{\lambda_{air}^{sat} - 1}{\lambda_{air}}\right)} \quad (12)$$

همچنین در روابط بالا λ_{air} نسبت استوکیومتری هوا است. ولتاژ بازگشت پذیر پیل سوختی را می توان با معادلات فوق بدست آورد. افت ولتاژ فعال سازی بر روی سطح الکترودها طبق معادلات زیر محاسبه می گردند [۱۲، ۱۵]:

$$V_{act} = -(\xi_1 + \xi_2 T_{fc} + \xi_3 T_{fc} \ln(C_{O_2}) + \xi_4 T_{fc} \ln(I)) \quad (13)$$

$$\xi_1 = -0.948 \quad (14)$$

$$\xi_2 = 0.00286 + 0.0002 \ln(A_{fc}) - 4.38 \times 10^{-5} \ln(C_{H_2}) \quad (15)$$

$$\xi_3 = 7.6 \times 10^{-5} \quad (16)$$

$$\xi_4 = -1.93 \times 10^{-4} \quad (17)$$

$$I = iA_{fc} \quad (18)$$

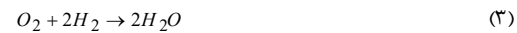
$$C_{O_2} = 1.97 \times 10^{-7} P_{O_2} \exp\left(\frac{498}{T_{fc}}\right) \quad (19)$$

$$C_{H_2} = 9.174 \times 10^{-7} P_{H_2} \exp\left(\frac{-77}{T_{fc}}\right) \quad (20)$$

که در رابطه ی بالا C_{H_2} و C_{O_2} به ترتیب غلظت هیدروژن و اکسیژن در فصل مشترک کاتالیزور، I جریان در سلول ها و ξ_i ضرایب پارامتری می باشد.

بر اساس قانون اهم، افت ولتاژ اهمی به صورت زیر محاسبه می شود [۱۲، ۱۵]:

$$V_{ohm} = I(R_m + R_c) \quad (21)$$



توان تولیدی پیل سوختی از رابطه (۴) محاسبه می شود [۱۶]:

$$W_{fc} = N_{cell} IV_{fc} \quad (4)$$

که در رابطه بالا N_{cell} و I به ترتیب تعداد سلول ها، جریان و ولتاژ واقعی سلول ها می باشند ولتاژ واقعی سلول ها از کم کردن ولتاژ نرسنت (E_{Nernst}) از افت ولتاژ محاسبه می شود. افت ولتاژها شامل افت ولتاژ اهمی (V_{ohm}) و افت ولتاژ غلظت (V_{conc}) و افت ولتاژ فعال-سازی (V_{act}) می باشد. ولتاژ واقعی طبق رابطه زیر می باشد [۱، ۱۷، ۱۸]:

$$V_{fc} = E_{nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (5)$$

ولتاژ نرسنت یا ولتاژ بازگشت پذیر پیل سوختی تابعی از فشارهای جزئی هیدروژن و اکسیژن و دمای کارکرد مطابق رابطه ی زیر محاسبه می شود [۱۲، ۱۵]:

$$E_{nernst} = 1.229 - 0.8 \times 10^{-3}(T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}) \quad (6)$$

در رابطه بالا فشارهای جزئی مؤثر اکسیژن و هیدروژن به ترتیب از روابط (۷) و (۸) محاسبه می شود: [۱۲، ۱۵]:

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

$$P_{H_2} = 0.5 P_{H_2}^{sat} \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{1.653i}{T_{fc} 1.334}\right) x_{H_2O}^{sat}} - 1 \right) \quad (8)$$

در روابط بالا i چگالی جریان پیل سوختی، $x_{H_2O}^{sat}$ کسر مولی آب، $P_{H_2}^{sat}$ فشار اشباع آب، $x_{N_2}^{channel}$ کسر مولی نیتروژن در جریان هوا می باشد، پارامترهای بالا از روابط زیر محاسبه می شود [۱۲، ۱۵]:

بازده آیزنروتروپیک پمپ و توان مصرفی در قسمت رانکین به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۴، ۲۱]:

$$\eta_{ORCP} = \frac{v_i(P_o - P_i)}{h_o - h_i} \quad (36)$$

$$\dot{W}_{ORCP} = \dot{m}_i(h_o - h_i) \quad (37)$$

برای تبخیرکن با در نظر گرفتن اختلاف نقطه تنگش می‌توان معادلات زیر را نوشت [۱۴، ۲۱]:

$$T_{PP,ev} = T_{ev} + \Delta T_{pp,ev} \quad (38)$$

$$\dot{m}_7(h_7 - h_{pp}) = \dot{m}_3(h_3 - h(T_{ev}, x = 0)) \quad (39)$$

همچنین برای آب گرمکن داخلی می‌توان نوشت [۱۴، ۲۱]:

$$\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{14} h_{14} = \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{15} h_{15} \quad (40)$$

۳-۲-۲- معادلات حاکم بر قسمت الکترولایزر

در این مطالعه برای این سیستم، تحلیل معادلات حاکم برای الکترولایزر غشاء پروتونی از جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱- روابط مربوط به الکترولایزر غشا پروتونی [۱۹، ۲۰]

معادله	پارامتر
$\dot{E}_{electric} = JV, \dot{E}_{electric} = a \times \dot{W}_{ORCT}$	توان مصرفی الکترولایزر
$V = V_0 + V_{act,c} + V_{act,a} + V_{ohm}$	ولتاژ الکترولایزر
$V_{act,c} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{0,c}} \right)$ $J_{0,c} = J_c^{ref} \exp \left(\frac{-E_{act,c}}{RT} \right)$	پتانسیل فعال سازی کاتد
$V_{act,a} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{0,a}} \right)$ $J_{0,a} = J_a^{ref} \exp \left(\frac{-E_{act,a}}{RT} \right)$	پتانسیل فعال سازی آند
$V_{ohm} = JR_{PEM} \cdot R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]}$ $\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D} x + \lambda_c$ $\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = [0.5139\lambda(x) - 0.326] \times \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right]$	پتانسیل اهمی
$V_0 = 1.229 - 0.00085(T_{PEM} - 298)$	پتانسیل برگشت پذیر
$\dot{N}_{H_2,out} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2O,reacted}$	دبی جریان مولی هیدروژن
$\dot{N}_{O_2,out} = \frac{J}{4F}$	دبی جریان مولی اکسیژن
$\dot{N}_{H_2O,out} = \dot{N}_{H_2O,in} - \frac{J}{2F}$	دبی جریان آب باقی مانده

اگرژی فیزیکی طبق رابطه ۴۱ حاصل خواهد شد [۲۲]:

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m}(h - h_0 - T_0(s - s_0)) \quad (41)$$

همچنین مقدار اگرژی کل با صرف نظر کردن اگرژی جنبشی و پتانسیل از رابطه‌ی زیر محاسبه خواهد شد [۲۲]:

$$\dot{E}x_{tot} = \dot{E}x_{ph} + \dot{E}x_{ch} \quad (42)$$

که در رابطه بالا $\dot{E}x_{ch}$ اگرژی شیمیایی می‌باشد.

بعد از محاسبه اگرژی تمام جریان‌ها مقدار تخریب اگرژی از

$$R_m = \frac{r_{mem}L}{A_{fc}} \quad (22)$$

$$r_{mem} = \frac{181.6 \left(1 + 0.03i + 0.062(T_{fc}/303)^2 i^{2.5} \right)}{(\Psi - 0.634 - 3i) \exp(4.18(T_{fc} - 303)/T_{fc})} \quad (23)$$

که در روابط بالا r_{mem} ، R_c ، R_m ، L و Ψ به ترتیب مقاومت قسمت ثابت سلول، مقاومت غشایی، مقاومت غشایی، ضخامت هیدراتاسیون غشاء می‌باشد.

همچنین افت ولتاژ غلظت از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۲، ۱۵]:

$$V_{conc} = \frac{RT_{fc}}{n_e F} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (24)$$

در رابطه‌ی بالا F ثابت فارادی، i_L حداکثر چگالی جریان، \bar{R} ثابت جهانی گاز و n_e مقدار الکترون بوده که مقدار آن برابر با ۲ است. بعد از محاسبه ولتاژ واقعی پیل سوختی پلیمری توان تولید شده توسط معادله زیر بدست خواهد آمد [۱۲، ۱۵]:

$$W_{fc} = N_{cell} IV_{fc} \quad (25)$$

میزان آب تولید شده مصرف هوا و هیدروژن برای پیل سوختی پلیمری به ترتیب طبق روابط زیر حاصل می‌شود [۱۹، ۲۰]:

$$\dot{n}_{H_2O, gene} = \frac{N_{cell} I}{2F} \quad (26)$$

$$\dot{n}_{O_2, cons} = \frac{N_{cell} I}{4F} \quad (27)$$

$$\dot{n}_{H_2, cons} = \frac{N_{cell} I}{2F} \quad (28)$$

نرخ ورودی هیدروژن به کانال آند و اکسیژن به کاتد با ضرب نسبت استوکیومتری آن‌ها (λ_{O_2} و λ_{H_2}) محاسبه می‌شود [۱۲، ۱۵]:

$$\dot{n}_{H_2, inlet} = \lambda_{H_2} \dot{n}_{O_2, cons} \quad (29)$$

$$\dot{n}_{O_2, inlet} = \lambda_{O_2} \dot{n}_{O_2, cons} \quad (30)$$

گرمای خالص یا اتلافی پیل سوختی با استفاده از قانون اول برای پشته، از معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{ch} - W_{fc} - \dot{Q}_{sl} \quad (31)$$

در اینجا \dot{Q}_{ch} گرمای تولید شده توسط واکنش‌ها در سلول و \dot{Q}_{sl} گرمای نهان ورودی و خروجی جریان‌ها از طریق پشته است بوده که از رابطه‌ی (۳۲) حساب می‌شود.

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{n}_{H_2, cons} \overline{LHV} \quad (32)$$

$$\dot{Q}_{sl} = \bar{C}_{p, H_2} (\dot{n}_{H_2, out} T_{fc} - \dot{n}_{H_2, in} T_{in}) + \bar{C}_{p, O_2} (\dot{n}_{O_2, out} T_{fc} - \dot{n}_{O_2, in} T_{in}) + \bar{C}_{p, N_2} (\dot{n}_{N_2, out} T_{fc} - \dot{n}_{N_2, in} T_{amb}) + \dot{n}_{H_2O, gene} \bar{H}_v \quad (33)$$

در حالیکه \bar{C}_p گرمای ویژه برای هر گاز و \bar{H}_v گرمای نهان تبخیر آب است.

۳-۲-۲- معادلات حاکم بر قسمت رانکین

در قسمت رانکین بازده آیزنروتروپیک و توان توربین به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۴، ۲۱]:

$$\eta_{ORCT} = \frac{h_i - h_o}{h_i - h_{o,s}} \quad (34)$$

$$\dot{W}_{ORCT} = \dot{m}(h_i - h_o) \quad (35)$$

رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد [۲۲]:

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_F - \dot{E}x_P \quad (43)$$

که در رابطه‌ی بالا $\dot{E}x_F$ و $\dot{E}x_P$ به ترتیب انرژی سوخت محصول بیان می‌گردند.

۲-۲-۴- معادلات حاکم بر کل سیستم

بازده انرژی برای سیستم تولید همزمان طبق رابطه‌ی زیر ارائه می‌شود [۲۳-۲۵]:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{m}_{H_2} LHV + \dot{Q}_{heating}}{\dot{n}_{fuel} LHV_{fuel}} \quad (44)$$

که در رابطه‌ی بالا مقدار توان خالص و گرمایش به ترتیب طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{FC} + \dot{W}_{ORCT} - (\sum \dot{W}_P + \dot{W}_{humidifiers} + \dot{E}_{electric}) \quad (45)$$

$$\dot{Q}_{heating} = \dot{m}_{15} (h_{15} - h_{14}) \quad (46)$$

همچنین بازده انرژی به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳-۲۵]:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{heating}}{\dot{n}_{fuel} \dot{e}x_{ch, fuel}^0} \quad (47)$$

$$\dot{Q}_{heating} = \dot{m}_{15} (h_{15} - h_{14}) \quad (48)$$

که در رابطه‌ی بالا مقدار انرژی سوخت به گرمایش طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\dot{E}x_{heating} = \dot{E}x_{15} - \dot{E}x_{14} \quad (49)$$

۲-۳- فرضیات

برای مدل‌سازی این سیستم از فرض‌های زیر استفاده شده است:

- ✓ اجزای سیستم تولید همزمان در حالت پایا کار می‌کند [۱۲، ۱۳].
- ✓ از انتقال گرما به محیط در همه‌ی اجزا صرف نظر شده است [۱۲، ۱۳].

- ✓ پمپ‌ها و توربین به ترتیب با بازده آیزنتروپیک ثابت ۹۰ درصد و ۸۵ درصد در نظر گرفته شده‌اند [۱۹].

- ✓ افت فشار در لوله‌ها در قسمت آب خنک‌کاری کاهش ۵ درصدی در نظر گرفته شده و در سایر قسمت‌ها از این افت صرف نظر شده است [۱۲، ۱۳].

- ✓ سوخت پیل سوختی هیدروژن خالص بوده و هوای ورودی آن ۲۱ درصد اکسیژن و ۷۹ درصد نیتروژن در نظر گرفته شده است [۱۲، ۱۳].

- ✓ تمام توان توربین رانکین جهت الکترولایزر استفاده شده است. [۱۹].

- ✓ دمای محیط، فشار محیط و دمای الکترولایزر به ترتیب ۱۵ درجه سلسیوس و ۱ بار و ۷۰ درجه سلسیوس فرض شده است [۱۲، ۱۳].

- ✓ سیال عامل آمونیاک برای قسمت رانکین در نظر گرفته شده است.

✓ در این بررسی پارامترهای ورودی مربوط به الکترولایزر غشاء پروتونی در جدول ۲ و پارامترهای ورودی مربوط به پیل سوختی در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به روابط گفته شده و فرضیات در نظر گرفته از نرم افزار E.E.S [۲۶] در این بررسی برای تحلیل نتایج استفاده شده است.

جدول ۲- پارامترهای ورودی الکترولایزر غشاء پروتونی [۱۹]

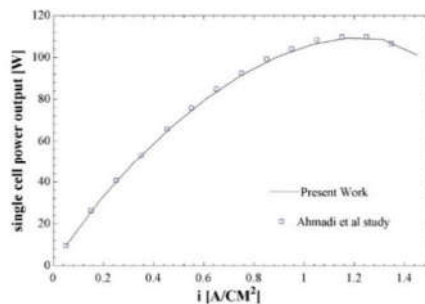
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$T_{PEM} (^{\circ}C)$	۸۰	$P_0 (bar)$	۱
$E_{act,a} (kJ/mol)$	۷۶	$D (\mu m)$	50
$E_{act,c} (kJ/mol)$	۱۸	$F (C/mol)$	96486
λ_a	۱۴	$J_a^{ref} (A/m^2)$	170000
λ_c	۱۰	$J_c^{ref} (A/m^2)$	4600

جدول ۳- داده‌های مربوط به پیل سوختی [۱۲، ۱۵]:

پارامتر	نماد (واحد)	مقدار
عدد ثابت فارادی	$F (C/mol)$	۹۶۴۸۵
ارزش گرمایی پایین هیدروژن	$LHV (kJ/mol)$	۲۴۲
درجه‌ی هیدراته شدن غشاء	Ψ	۲۳
دمای کاری	$T_{fc} (K)$	۳۵۳
تعداد سلول	$N_{cell} (-)$	۱۳۰۰۰
فشار کاری	$P_{fc} (bar)$	۳
مساحت موثر	$A_{fc} (cm^2)$	۲۳۲
چگالی جریان	$i (A/cm^2)$	۰/۶
بیشینه‌ی چگالی جریان	$i_m (A/cm^2)$	۱/۵
ضخامت غشاء تبادل	$L (cm)$	۰/۰۱۷۸
دمای اولیه	$T_0 (^{\circ}C)$	۱۵
فشار اولیه	$P_0 (bar)$	۱
دبی استوکیومتری اکسیژن	λ_{O_2}	۲
دبی استوکیومتری هیدروژن	λ_{H_2}	۱/۲

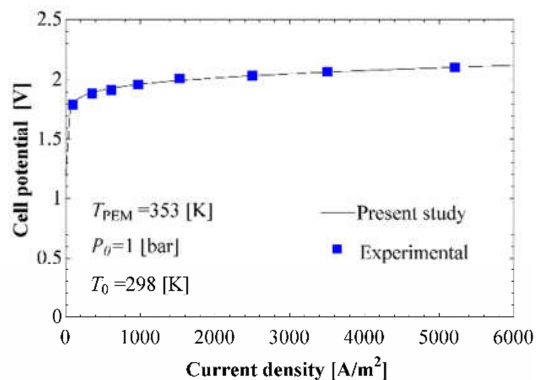
۲-۴- اعتبار سنجی

اعتبار سنجی مطالعه حاضر در دو قسمت جداگانه پیل سوختی پلیمری و الکترولایزر غشاء پروتونی با نتایج مطالعات گذشته به ترتیب در شکل ۲ و شکل ۳ مقایسه شده است. مطابق با این نتایج، مدل-سازی کنونی مطابقت بسیار خوبی با نتایج مطالعات قبلی دارد.



شکل ۲- نتایج مدل‌سازی توان تولیدی یک سلول از سیستم پیل

سوختی پلیمری با احمدی و همکاران [۱۵]



شکل ۳- نتایج مدل سازی تولید هیدروژن و مطالعه نی و همکاران [۲۷]

۳- نتایج و بحث

حالت اولیه سیستم سه گانه بر مبنای پیل سوختی به ازای دمای پیل سوختی ۸۰ درجه سلسیوس، فشار پیل سوختی ۳ بار، دمای تبخیر کن ۵۰ درجه سلسیوس، اختلاف دمای تنگش ۲ درجه سلسیوس، دمای محیط ۱۵ درجه سلسیوس و دمای الکترولایزر ۷۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. نتایج شامل تحلیل انرژی و انرژی به صورت خلاصه در جدول ۴ بیان شده است. مشاهده می شود برای این حالت توان سیستم ۵۸۸/۹ کیلووات، توان تولیدی پیل سوختی ۶۰۹/۴ کیلووات، توان مصرفی الکترولایزر ۶/۸۴ کیلووات، بازده حرارتی پیل سوختی ۵۳/۷۱٪، بازده حرارتی کل ۷۱/۷۶٪، بازده انرژی کل ۵۴/۸۴٪، هیدروژن تولیدی ۰/۱۳۷ کیلوگرم بر ساعت و مقدار گرمایش ۲۱۰/۲ کیلووات محاسبه شده است.

جدول ۴- خلاصه نتایج تحلیل انرژی و انرژی

پارامتر عملکردی	(واحد)	مقدار
هیدروژن تولیدی	(kg/hr)	۰/۱۳۷
گرمایش	(kW)	۲۱۰/۲
توان تولیدی پیل سوختی	(kW)	۶۰۹/۴
توان مصرفی الکترولایزر	(kW)	۶/۸۴
توان سیستم	(kW)	۵۸۸/۹
بازده حرارتی پیل سوختی	(%)	۵۳/۷۱
بازده حرارتی کل	(%)	۷۱/۷۶
بازده انرژی کل	(%)	۵۴/۸۴

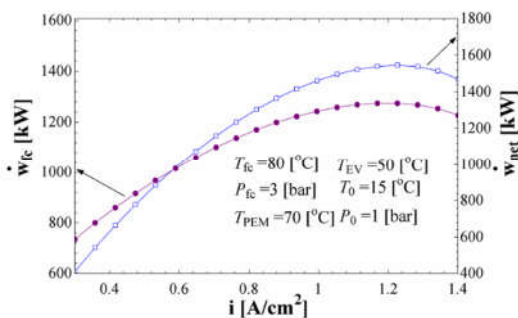
برای مطالعه اثر پارامترهای موثر روی عملکرد سیستم تحلیل پارامتریکی انجام شده است. برای این منظور اثر پارامترهای مهم همانند چگالی جریان، دمای پیل سوختی، دمای تبخیر کن، فشار چگالنده روی پارامترهای عملکردی سیستم بررسی شده است.

در شکل ۴ تاثیر چگالی جریان روی توان پیل سوختی و توان خالص سیستم ارائه شده است. با توجه به نتایج منحنی مربوط به توان پیل سوختی ابتدا با افزایش چگالی جریان افزایش ولی سپس کاهش می یابد که مقدار بیشینه توان پیل سوختی و توان خالص به ازای چگالی جریان تقریباً ۱/۲ آمپر بر سانتی متر مربع حاصل شده است. دلیل این نقطه بهینه برای چگالی جریان، افزایش چگالی بیشتر از افت ولتاژ پیل سوختی بوده ولی با رسیدن به ناحیه تلفات غلظت، افت

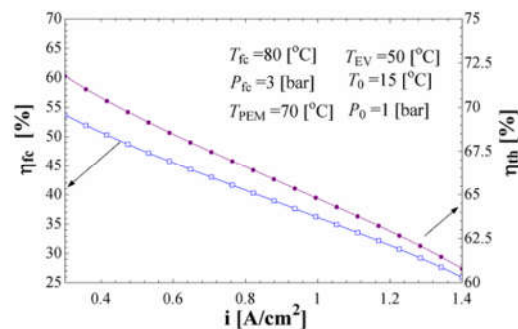
ولتاژ شدت بیشتری داشته و در نتیجه به ازای میزان مشخصی از چگالی جریان، توان تولیدی کاهش می یابد. توان خالص کل سیستم نیز دارای روندی شبیه به توان پیل سوختی خواهد داشت.

در شکل ۵ اثر چگالی جریان بر روی بازده پیل سوختی و بازده حرارتی سیستم تولید همزمان نشان داده شده است. در این شکل میتوان مشاهده کرد که این مقادیر هردو به ازای افزایش چگالی جریان کاهش می یابند. در مورد پیل سوختی، با افزایش چگالی جریان، اگرچه توان پیل سوختی افزایش می یابد اما میزان مولی هیدروژن مصرفی به شدت افزایش می یابد و منجر به کاهش بازده پیل سوختی و کل سیستم می شود.

نتایج تأثیر افزایش چگالی جریان روی هیدروژن تولیدی و بازده انرژی در شکل ۶ نمایش داده شده است. با توجه به افزایش چگالی جریان، مقدار انرژی ورودی به چرخه رانکین و همچنین توان تولیدی توسط این چرخه افزایش می یابد، با توجه به رابطه جدول ۱، مقدار انرژی ورودی به جهت الکترولایزر افزایش یافته در نتیجه هیدروژن تولیدی افزایش می یابد. اما با توجه به این شکل مشخص است که انرژی سیستم کاهش می یابد که به دلیل افزایش شدید مصرف هیدروژن در پیل سوختی است که باعث می شود با توجه به رابطه ۴۷ بازده انرژی کاهش یابد.

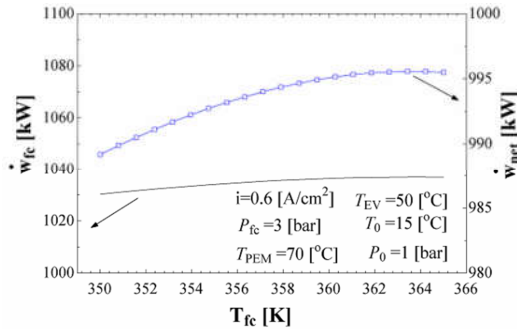


شکل ۴- توان پیل سوختی و توان خالص بر حسب چگالی جریان

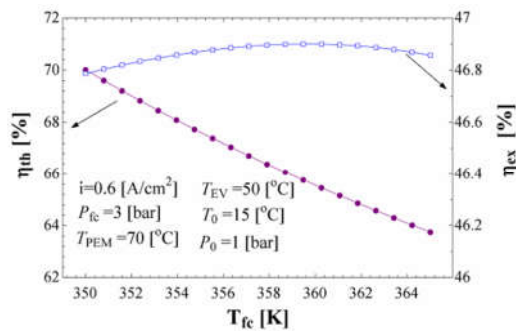


شکل ۵- بازده پیل سوختی و بازده حرارتی بر حسب چگالی جریان

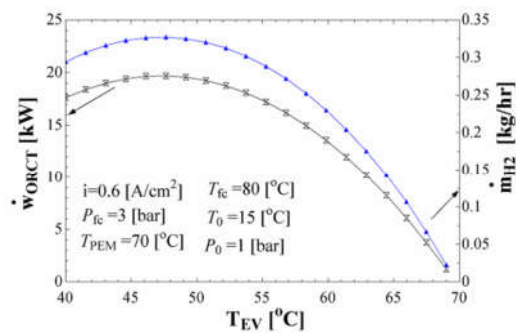
تبخیرکن، مقدار انرژی نقطه ۸ افزایش می‌یابد. با توجه به بقای انرژی باعث افزایش آنتالپی جریان ۱۵ شده و در نتیجه مقدار گرمایش و انرژی مرتبط با آن افزایش می‌یابد. با توجه به زیاد بودن مقدار انرژی مرتبط با گرمایش طبق رابطه (۴۶) مقدار بازده حرارتی افزایش می‌یابد. این روندها همچنین باعث ایجاد یک نقطه بهینه برای بازده انرژی در دمای ۶۲/۸۸ درجه سلسیوس شده است.



شکل ۶- توان پیل سوختی و توان خالص برحسب دمای پیل سوختی

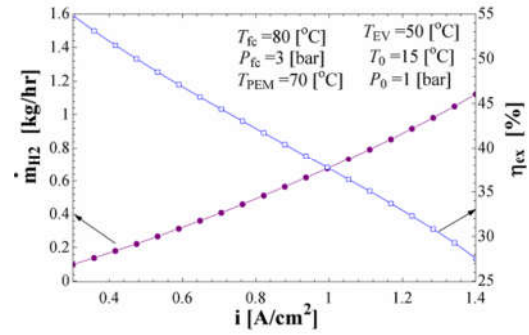


شکل ۷- بازده‌های حرارتی و انرژی برحسب دمای پیل سوختی



شکل ۸- تولید هیدروژن و توان چرخه رانکین بر حسب دمای تبخیرکن

تأثیر اختلاف دمای تنگش تبخیرکن روی توان خالص و تولید هیدروژن در شکل ۱۱ و همچنین تأثیر این پارامتر روی بازده حرارتی و بازده انرژی و در شکل ۱۲ ارائه شده است. با افزایش اختلاف دمای تنگش تبخیرکن مقدار انرژی ورودی به توربین رانکین کم شده و بنابراین تولید هیدروژن نیز به دلیل کاهش انرژی لازم برای



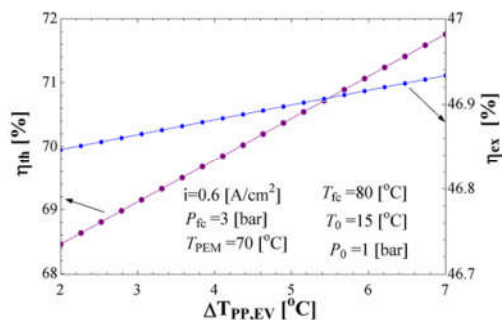
شکل ۹- هیدروژن تولیدی و بازده انرژی برحسب چگالی جریان

در شکل ۷ اثرات دمای پیل سوختی بر روی توان تولیدی پیل سوختی و توان خالص این سیستم پیشنهادی نشان داده شده است. در این شکل می‌توان مشاهده کرد که توان تولیدی پیل سوختی و توان خالص سیستم با شیب کمی دارای نقطه بهینه‌ای می‌باشند. با توجه به روابط موجود برای ولتاژها مشخص است که با افزایش دمای پیل سوختی، افت ولتاژ غلظت افزایش یافته در حالیکه افت ولتاژ فعال‌سازی و اهمی کاهش می‌یابند. در نتیجه یک حالت عکس روی ولتاژ پیل سوختی می‌گذارند. تا نقطه بیشینه ولتاژ با افزایش دمای پیل سوختی افزایش افت ولتاژ غلظت بر کاهش افت ولتاژ فعال‌سازی و اهمی غلبه کرده و در نتیجه نمودار صعودی می‌شود ولی بعد از این نقطه حالت عکس شده و افت ولتاژ غالب مرتبط با افت ولتاژ فعال‌سازی و اهمی می‌شود. با توجه به رابطه (۲۴) باعث می‌شود تا روند توان تولیدی پیل سوختی شبیه با ولتاژ پیل سوختی گردد. همچنین با توجه به رابطه (۴۵) باعث می‌شود که توان کل سیستم نیز روندی شبیه توان تولیدی پیل سوختی اما با روندی ملایم‌تر باشد.

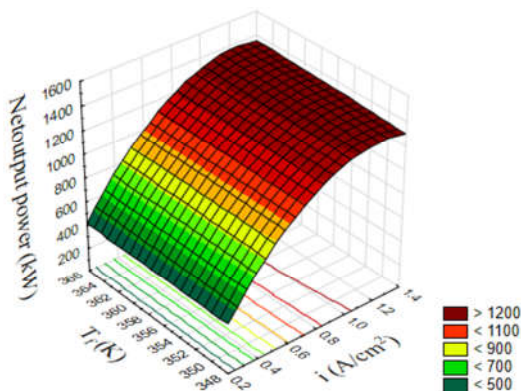
تغییرات بازده‌های حرارتی و انرژی برحسب دمای پیل سوختی در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، افزایش دمای پیل سوختی باعث کاهش بازده حرارتی شده و در حالیکه انرژی دارای نقطه بهینه‌ای می‌باشد. با افزایش دمای پیل سوختی، مقدار گرمایش با شیب بیشتری کاهش می‌یابد. این کاهش منجر به کاهش مداوم بازده حرارتی شده است، در حالیکه کاهش انرژی گرمایش بسیار کم بوده و طبق رابطه (۴۷) روند بازده انرژی بیشتر با روند انرژی محصول یا توان خالص سیستم یکسان می‌باشد. شایان ذکر است انرژی و انرژی حاصل از تولید هیدروژن تأثیر بسیار کمی روی بازده‌های حرارتی و انرژی می‌گذارد.

در شکل ۹ تأثیر دمای تبخیرکن روی تولید هیدروژن و توان چرخه رانکین ارائه شده است. با افزایش دمای تبخیرکن، مقدار آنتالپی ورودی توربین چرخه رانکین و دبی چرخه روند عکس داشته و باعث می‌شود تا توان توربین چرخه رانکین افزایش و سپس کاهش یابد. این روند در توربین چرخه رانکین منجر به افزایش و سپس کاهش انرژی مربوط به تولید هیدروژن شود و در نتیجه طبق روابط موجود در جدول ۱، باعث ایجاد یک نقطه بهینه همانند تولید توربین چرخه رانکین شود.

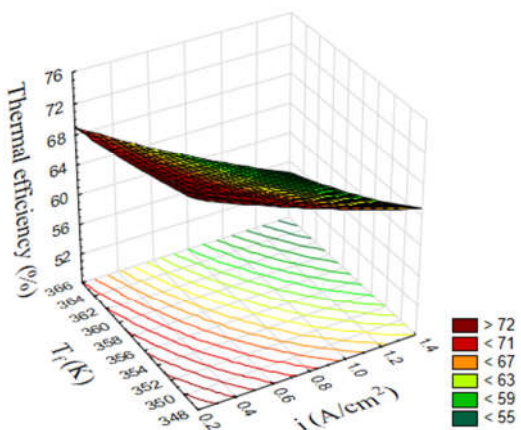
نتایج تأثیر افزایش دمای تبخیرکن روی بازده‌های حرارتی و انرژی در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. با توجه به دمای



شکل ۱۲- بازده‌های حرارتی و اگزرژی ر حسب اختلاف دمای تنگش تبخیرکن

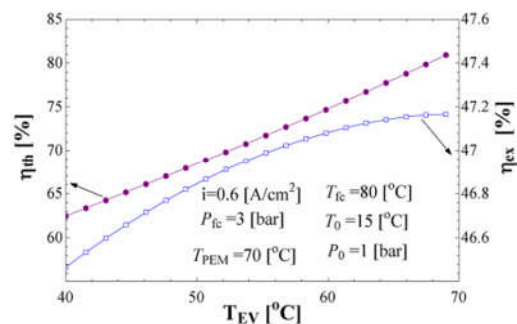


شکل ۱۳- تاثیر چگالی جریان و دمای پیل سوختی روی توان خالص سیستم



شکل ۱۴- تاثیر چگالی جریان و دمای پیل سوختی روی بازده حرارتی

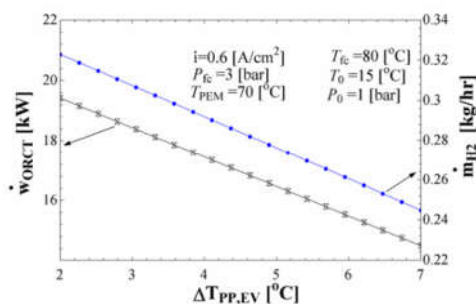
الکترولایزر کاهش می‌یابد. همچنین افزایش اختلاف دمای تنگش باعث افزایش انرژی گرمایش و اگزرژی مرتبط با گرمایش می‌شود. این افزایش در روندها باعث می‌شود تا بازده انرژی و اگزرژی روندی صعودی داشته باشند.



شکل ۱۰- بازده‌های حرارتی و اگزرژی بر حسب دمای تبخیرکن

تاثیر همزمان چگالی جریان و دمای پیل سوختی روی توان خالص سیستم در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. طبق نتایج حاصله از این شکل، این سیستم در حالتی که دارای چگالی جریان ۱/۲ باشد، بیشترین مقدار توان خالص می‌باشد در حالیکه نسبت به دمای پیل سوختی تقریباً دارای نقطه بهینه ملایمی می‌باشد. که شکل‌های ۴ و ۷ نیز موید این مطلب می‌باشند. همچنین با بررسی تاثیر همزمان همزمان چگالی جریان و دمای پیل سوختی روی بازده حرارتی که در شکل ۱۴ نشان داده شده است می‌توان فهمید که این دو پارامتر در مقادیر کوچکتر دارای مقادیر بالاتری برای بازده حرارتی می‌باشند. در واقع روند این دو پارامتر شبیه شکل ۵ و ۸ می‌باشد.

نرخ تخریب اگزرژی اجزای سیستم در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مشخص است که بیشترین مقدار تخریب اگزرژی به ترتیب مرتبط با پیل سوختی پلیمری، الکترولایزر غشا پروتونی و مبدل حرارتی الکترولایزر که به ترتیب برابر با ۴۱۰/۸، ۶/۳۲۴ و ۳/۵۷ کیلووات می‌باشد. بیشتر بودن مقدار تخریب پیل سوختی پلیمری به علت بالا بودن دما در این عضو و بازگشت ناپذیری می‌باشد. شایان ذکر است که کمترین نرخ تخریب اگزرژی مرتبط با پمپ قسمت خنک- کاری و رانکین می‌باشد.

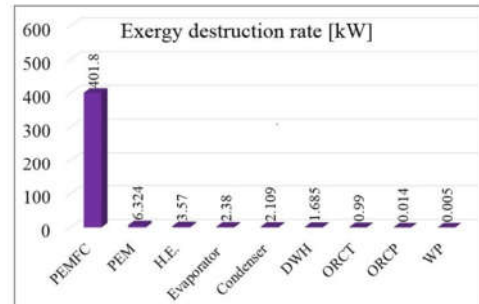


شکل ۱۱- تولید هیدروژن و توان چرخه رانکین بر حسب اختلاف دمای تنگش تبخیرکن

PEM	الکترولاایز غشاء پروتونی
R	ثابت جهانی گازها (J/mol.K)
s	آنترویی مخصوص (kJ/kgK)
T	دما (K)
W_{net}	توان خالص چرخه (kW)
x	عمق غشاء اندازه گیری شده (kW)
مخفف و زیرنویسها	
.	حالت محیط
D	تخریب آگزروی
DHW	گرمکن داخلی
EV	تبخیر کن
f	آگزروی سوخت
fc	پیل سوختی
ORCT	توربین چرخه رانکین آلی
P	پمپ، آگزروی محصول
PEM	الکترولاایز غشا پروتونی
ph	آگزروی فیزیکی
pp	نقطه تنگش
T	توربین
علامت یونانی	
η_{ex}	بازده آگزروی (%)
η_{th}	بازده حرارتی (%)
η_p	راندمان آیزنتروپیک پمپ (%)
η_T	راندمان آیزنتروپیک توربین (%)

۶- مراجع

- [1] Chammam A, Tripathi AK, Alvarez JRN, Alsaab HO, Romero-Parra RM, Mayet AM, et al. Multiobjective optimization and performance assessment of a PEM fuel cell-based energy system for multiple products. *Chemosphere*. 2023;337:139348.
- [2] Abdolalipouradi M, Mohammadkhani F, Khalilarya S, Jafarmadar S. Thermodynamic Analysis of New Cogeneration Cycle Based on Gaynarje Hotspring. *International Journal of Engineering*. 2020;33(6):1149-55.
- [3] Jiao K, Wang B, Du Q, Wang Y, Zhang G, Yang Z, et al. Water and thermal management of proton exchange membrane fuel cells: Elsevier; 2021.
- [4] Kaur G. PEM fuel cells: fundamentals, advanced technologies, and practical application: Elsevier; 2021.
- [5] Santarelli M, Torchio M. Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single PEMFC. *Energy conversion and management*. 2007;48(1):40-51.
- [6] Bıyıkoğlu A. RETRACTED: Review of proton exchange membrane fuel cell models. Elsevier; 2005.
- [7] Özgür T, Yakarıılmaz AC. Thermodynamic analysis of a Proton Exchange Membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018;43(38):18007-13.
- [8] صباغی م، سفید م. بررسی چرخه اصلاح شده رانکین آلی به منظور تولید هیدروژن و آب شیرین با استفاده از انرژی زمین گرمایی و زیست توده از دیدگاه انرژی، آگزروی، اقتصادی و زیست محیطی. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۲۳؛ ۵۲(۴): ۳۰۱-۱۰.



شکل ۱۵- تخریب آگزروی اجزای سیستم

۴- نتیجه گیری

گرمای تولیدی آب خنکاری در پیل سوختی پلیمری مقدار قابل توجهی است، با رویکرد جلوگیری از هدر رفت این انرژی، از یک گرمکن داخلی، مبدل حرارتی الکترولاایز و چرخه رانکین آلی استفاده شده است. در واقع این سیستم تولید سه گانه جدید بر مبنای یک پیل سوختی پلیمری با بهره مندی از گرمای زاید برای تولید توان، گرمایش و هیدروژن پیشنهاد و مورد بررسی ترمودینامیکی قرار گرفته است. برای تولید هیدروژن در این سیستم از یک الکترولاایز غشا پروتونی و برای گرمایش از یک گرمکن داخلی استفاده شده است. نتایج کلی این سیستم بر مبنای پیل سوختی به صورت زیر بیان شده است:

✓ برای این سیستم تولید توان سیستم ۵۸۸/۹ کیلووات، توان تولیدی پیل سوختی ۶۰۹/۴ کیلووات، توان مصرفی الکترولاایز ۶/۸۴ کیلووات، بازده حرارتی پیل سوختی ۵۳/۷۱ درصد، بازده حرارتی کل ۷۱/۷۶ درصد، بازده آگزروی کل ۵۴/۸۴ درصد، هیدروژن تولیدی ۰/۱۳۷ کیلوگرم بر ساعت و مقدار گرمایش ۲۱۰/۲ کیلووات محاسبه شده است.

✓ مقدار بیشینه توان پیل سوختی و توان خالص به ازای چگالی جریان تقریباً ۱/۲ آمپر بر سانتی مترمربع حاصل شده است در حالیکه با افزایش چگالی جریان مقدار بازده حرارتی پیل سوختی، کل سیستم و تولید هیدروژن کاهش می یابد.

✓ توان پیل سوختی و بازده آگزروی نسبت به دمای پیل سوختی دارای مقدار بهینه ای می باشد در حالیکه بازده حرارتی کاهش می یابد.

✓ با افزایش اختلاف دمای تنگش تبخیرکن توان چرخه رانکین و تولید هیدروژن کاهش می یابد.

✓ بیشترین مقدار تخریب آگزروی مرتبط با پیل سوختی پلیمری، الکترولاایز و مبادله کن گرمایی می باشد.

۵- نمادها

D	ضخامت غشاء (μm)
\dot{E}_x	نرخ تخریب آگزروی (kW)
F	ثابت فارادی (C/mol)
h	آنثالپی مخصوص (kJ/kg)
I	آمپر (A)
ORC	چرخه رانکین آلی
P	فشار (bar)

- [23] Nafey A, Sharaf M. Combined solar organic Rankine cycle with reverse osmosis desalination process: energy, exergy, and cost evaluations. *Renewable Energy*. 2010;35(11):2571-80.
- [24] Gholizadeh T, Vajdi M, Mohammadkhani F. Thermodynamic and thermoeconomic analysis of basic and modified power generation systems fueled by biogas. *Energy conversion and management*. 2019;181:463-75.
- [25] Abdolalipouradl M, Khalilarya S, Jafarmadar S. Energy and Exergy Analysis of a New Power, Heating, Oxygen and Hydrogen Cogeneration Cycle Based on the Sabalan Geothermal Wells. *International Journal of Engineering*. 2019;32(3):445-50.
- [26] Klein S, Alvarado F. EES—Engineering Equation Solver. F-Chart Software. 2002.
- [27] Ni M, Leung MK, Leung DY. Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant. *Energy conversion and management*. 2008;49(10):2748-56.
- [۹] اشجاری اقدم س، جعفرمدار ص، خلیل آریا ش، چیت ساز خوبی ع. شبیه سازی و بررسی پارامتری سیستم تولید سه گانه توان، گرما و تبرید با استفاده از سلول های خورشیدی متمرکز و خنک کننده ترموالکتریک. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۲۳؛۵۳(۱):۴۱-۹.
- [10] Tao H, Al Mamun K, Ali A, Solomin E, Zhou J, Sinaga N. Performance enhancement of integrated energy system using a PEM fuel cell and thermoelectric generator. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;44(51):1280-92.
- [11] Sabbaghi MA, Baniasadi E, Genceli H. Thermodynamic assessment of an innovative biomass-driven system for generating power, heat, and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024.
- [12] Marandi S, Mohammadkhani F, Yari M. An efficient auxiliary power generation system for exploiting hydrogen boil-off gas (BOG) cold exergy based on PEM fuel cell and two-stage ORC: Thermodynamic and exergoeconomic viewpoints. *Energy Conversion and Management*. 2019;195:502-18.
- [13] Marandi S, Sarabchi N, Yari M. Exergy and exergoeconomic comparison between multiple novel combined systems based on proton exchange membrane fuel cells integrated with organic Rankine cycles, and hydrogen boil-off gas subsystem. *Energy Conversion and Management*. 2021;244:114532.
- [14] Abdolalipouradl M, Khalilarya S, Mohammadkhani F. Hydrogen Production Using Proposed Cycle from Sabalan Geothermal Wells via Proton Exchange Membrane Electrolysis. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(2),(in persian).
- [15] Ahmadi MH, Mohammadi A, Pourfayaz F, Mehrpooya M, Bidi M, Valero A, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a waste heat recovery system for proton exchange membrane fuel cell using transcritical carbon dioxide cycle and cold energy of liquefied natural gas. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016;34:428-38.
- [16] Wang D, Dhahad HA, Ali MA, Almojil SF, Almohana AI, Alali AF, et al. Environmental/Economic assessment and multi-aspect optimization of a poly-generation system based on waste heat recovery of PEM fuel cells. *Applied Thermal Engineering*. 2023;223:119946.
- [17] Gharibzadeh S, Motallebzadeh R, Jafarmadar S, Ebrahimipour A. Comprehensive optimization of an integrated energy system for power, hydrogen, and freshwater generation using high-temperature PEM fuel cell. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024;56:104181.
- [18] Li Z, Khanmohammadi S, Khanmohammadi S, Al-Rashed AA, Ahmadi P, Afrand M. 3-E analysis and optimization of an organic rankine flash cycle integrated with a PEM fuel cell and geothermal energy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(3):2168-85.
- [19] Abdolalipouradl M, Mohammadkhani F, Khalilarya S, Yari M. Thermodynamic and exergoeconomic analysis of two novel tri-generation cycles for power, hydrogen and freshwater production from geothermal energy. *Energy Conversion and Management*. 2020;226:113544.
- [20] Mehdikhani V, Mirzaee I, Khalilian M, Abdolalipouradl M. Thermodynamic and exergoeconomic assessment of a new combined power, natural gas, and hydrogen system based on two geothermal wells. *Applied Thermal Engineering*. 2022;206:118116.
- [21] Abdolalipouradl M, Mousavi V, Mohammadkhani F, Yari M. Proposing new configurations of flash cycle for effective utilization of geothermal resources: thermodynamic and exergoeconomic assessments. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022;44(10):465.
- [22] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. *Thermal design and optimization*: John Wiley & Sons; 1996.