http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

فوق‌العاده اسفند ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۱۴ ص‌ص ۱۰۷-۱۲۱

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۲/۳/۵
تاریخ پذیرش ۹۲/۵/۱۹
ارائه در سایت ۹۲/۱۰/۳۰

مدل‌سازی یک طرح جدید پکیج تولید چندگانه بر اساس پیل سوختی پلیمری

مرتضی یاری[۱*]، وحید رضایی[۲]

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
* اردبیل، صندوق پستی ۵۶۱۹۹۱۱۳۶۷ ، myari@uma.ac.ir

چکیده- در این مقاله یک طرح جدید پکیج تولید چندگانه که بر اساس تکنولوژی پیل سوختی پلیمری و چرخه میسوتسنکواست، از دیدگاه ترمودینامیکی مدل‌سازی شده و مورد تحلیل قرار گرفت. پکیج تولید چندگانه شامل اجزای اصلی پیل سوختی پلیمری، چرخه میسوتسنکو، کویل گرمایشی، مخزن ذخیره حرارت و دیگ کمکی می‌باشد. از قابلیت‌های این پکیج تولید برق، گرمایش، سرمایش تبخیری غیرمستقیم تا نقطه شبنم و آب گرم مصرفی است. عملکرد سیستم با قانون‌های ترمودینامیکی و مدل‌های ریاضی حالت پایدار ارزیابی می‌شود. با استفاده از نرم‌افزارهای متلب و EES کدنویسی انجام شده و نتایج با رسم نمودارها و جداول ارایه می‌شود. همچنین با استفاده ازتحلیل انرژی و اگزرژی راندمان‌های پشته پیل سوختی، راندمان‌های تولید هم‌زمان گرمایش و سرمایش و راندمان‌های تولید چندگانه پکیج بدست می‌آید.نتایج نشان می‌دهد که قدرت خروجی و ولتاژ واقعی خروجی از پشته پیل سوختی پلیمری به ترتیب برابر ۳۳۰۷ وات و ۰/۶۷۸۷ ولت است.

کلیدواژگان: پیل سوختی پلیمری، پکیج تولید چندگانه، چرخه میسوتسنکو.

Modeling a novel design of multi-generation package based on the PEM fuel cell

M. Yari[1*], V. Rezaee[2]

1- Assoc. Prof., Dept. of Mech. Eng., Mohaghegh Ardabili Univ., Ardabil, Iran
2- MSc Student, Dept of Mech Eng, Mohaghegh Ardabili Univ., Ardabil, Iran
* P.O.B. 5619911367 Ardabil, Iran. myari@uma.ac.ir

Abstract- A novel design of multi-generation package based on the PEM fuel cell and Maisotsenko cycle is proposed and analyzed in detail. This package consists of the proton exchange membrane (PEM) fuel cell stack, novel dew point indirect evaporative cooling system (Maisotsenko cycle), heating coil, heat storage tank and the backup boiler. This package is capable of producing electricity, water and space heating as well as indirect evaporative cooling. The system performance is evaluated through the steady-state mathematical models and thermodynamic laws. Using the Matlab and EES software the results are presented in the form of Tables and Figures. Energy and exergy analyses revealed the fuel cell stack efficiency, heating and cooling cogeneration efficiency and the package multi-generation efficiency. The results indicate that, the actual output power and voltage from the PEM fuel cell stack are 3307 W and 0.6787 V, respectively.

Keywords: PEM Fuel Cell, Multi-Generation Package, Maisotsenko Cycle.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

۱- مقدمه

تولید چندگانه[1] یا تولید چندکاره[2]، معمولا ترکیب تولید چندگانه حامل‌های انرژی (برای مثال الکتریسیته، سرما، قدرت و غیره) و یا تولید کردن (برای مثال هیدروژن، متانول و غیره) با استفاده از منابع طبیعی (سوختهای فسیلی، چوب و غیره) و یا منابع انرژی تجدیدپذیر (برای مثال خورشید، باد، و غیره) تعریف می‌شود. از این‌رو ساده‌ترین مثال تولید چندگانه ترکیب تولید قدرت و حرارت، که همچنین تولید توأم[3] نامیده می‌شود، می‌باشد. در مورد ترکیب گرما، سرما و تولید برق، تجهیزات تولیدچندگانه سیستم‌های تری‌جنریشن تعریف می‌شوند. تکنولوژی‌های تولید توام و تولید چندگانه مشهور هستند و در بسیاری موارد برای کاربردهای صنعتی، مسکونی و تجاری وفق داده شده‌اند. همچنین به ویژه تولید توأم مقیاس کوچک برای کاربردهای مسکونی بسیار امیدبخش می‌باشند. در حقیقت وقتی تولید توأم مقیاس کوچک بر اساس تجهیزات تبدیل انرژی (مانند پیل‌های سوختی) کار می‌کنند و تقاضای انرژی حرارتی بسیار مهم است، صرفه‌جویی مالی و انرژی بسیار بالایی رخ می‌دهد. معمولاً سیستم‌های تولید چندگانه پذیرفته شده در تولید متمرکز بر اساس ۱) تکنولوژی موتور (موتورهای رفت و برگشتی، میکروتوربین‌های گاز و پیل‌های سوختی ۲) دستگاه‌های تحتانی (چیلرهای جذبی یا برقی) ۳) دستگاه‌های کمکی (هیترها، چیلرهای جذبی گازسوز یا پمپ‌های گرمایی، چیلرهای با حرکت موتور) ۴) منابع انرژی تجدیدپذیر احتمالی (خورشیدی، باد، بیوماس و نیروی محرکه آب) طبقه‌بندی می‌شوند. بنابراین روشن است که تعداد زیادی از طرح‌های سیستم ممکن است سیستم‌های تولید چندگانه شناسایی شوند. در میان اینها این مقاله روی تکنولوژی پیل سوختی متمرکز می‌باشد [۱].

پیل‌های سوختی دستگاه‌های برقی شیمیایی هستند که به طور مستقیم انرژی شیمیایی حاصل از واکنش را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. ساختار اصلی پیل سوختی شامل یک لایه الکترولیت در تماس با آند و کاتد متخلخل در هر سمت می‌باشد. یک نوع مشهور پیل‌های سوختی، پیل سوختی الکترولیت پلیمری[4] است. الکترولیت در این پیل سوختی یک غشای تبادل یونی[5] است تا مسأله خوردگی حداقل شود [۲].

مهدی صدیق و همکاران مشخصه‌های الکتروشیمیایی یک پیل سوختی غشای تبادل پروتون در کاتالیست کاتد را به روش بولتزمن شبکه‌ای تحلیل کردند [۳]. ابراهیم دینسر و همکاران تحلیل انرژی و اگزرژی پیل سوختی غشای تبادل پروتون را انجام دادند [۴].

پن زِو و همکاران سیستم هیبرید قدرت که شامل پشته پیل سوختی غشای تبادل پروتون و چرخه رانکین آلی بود، را پیشنهاد کردند. عملکرد سیستم را با مدل ریاضی حالت پایدار و قانون‌های ترمودینامیکی مورد ارزیابی قرار دادند [۵]. جی جی وانگ و همکاران در مقاله خود مدل‌سازی ریاضی سیستم هیبرید پیل سوختی پلیمری-فتوولتائیک را انجام دادند [۶]. فرانچسکو کالایز و همکاران شبیه‌سازی دینامیکی یک سیستم تولید چندگانه ابتکاری براساس سرمایش و گرمایش خورشیدی و تکنولوژی پیل سوختی غشای تبادل پروتون را انجام دادند [۱].

در این تحقیق، طرح جدید پکیج ترکیبی پیل سوختی-دستگاه رطوبت‌زن (سرمایش تبخیری) مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پکیج بر اساس اداره ثبت اختراعات ایران شماره اظهارنامه اختراع ۱۳۹۱۵۰۱۴۰۰۰۳۰۰۵۸۱ و شماره ثبت اختراع ۷۵۶۵۳ توسط یاری و رضایی ثبت شده است.از قابلیت‌های این پکیج تأمین برق ساختمان، سرمایش تبخیری غیرمستقیم تا نقطه شبنم بر اساس چرخه میسوتسنکو، گرمایش و تأمین آب گرم مصرفی در تمام فصول می‌باشد. نوآوری این طرح در قسمت گرمایش می‌باشد به این صورت که چرخه میسوتسنکو فقط سرمایش تولید می‌کرد و فاقد فرایند گرمایش بود که فرایند گرمایش به آن اضافه شده است. همچنین بر اساس تعریف تولید چندگانه یعنی چیدمان تجهیزاتی که گرمایش، سرمایش و برق تولید می‌کنند، از نقطه نظر چیدمان تجهیزات، این طرح دارای نوآوری می‌باشد. در این مقاله مدل‌سازی پکیج ارایه می‌شود. مدل‌سازی بر اساس قوانین ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی برای اجزای اصلی پکیج انجام خواهد شد.

1. Polygeneration
2. Multi-generation
3.Cogeneration
4. Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC)
5. Ion exchange membrane

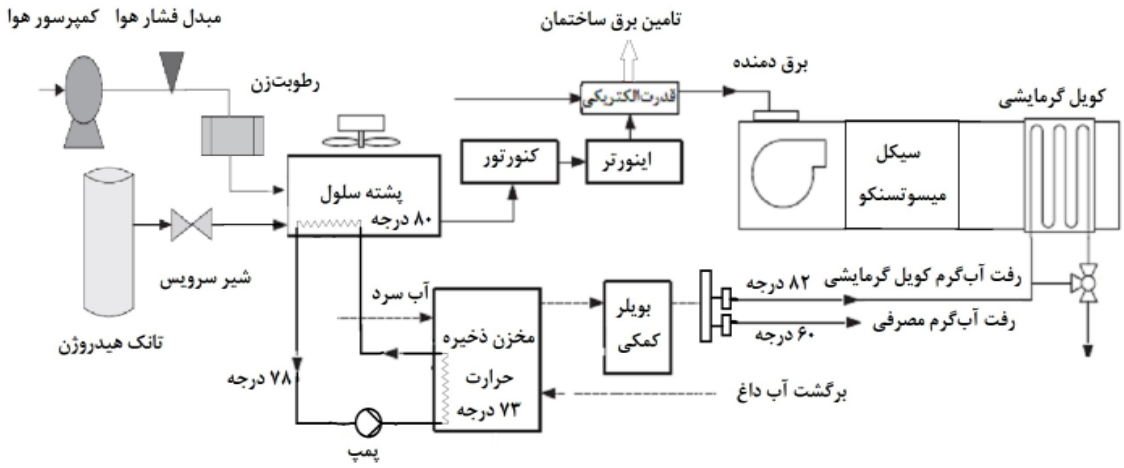
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

۲- شرح و آرایش سیستم

شکل ۱ شماتیک اصلی پکیج که در این مقاله برای مدل‌سازی استفاده شده است را نشان می‌دهد. پکیج شامل پشته پیل سوختی و تجهیزات سوخت‌رسانی و هوارسانی، مخزن ذخیره حرارت، بویلر پشتیبان، سیستم سرمایش تبخیری غیر مستقیم نقطه شبنم (چرخه میسوتسنکو) و کویل گرمایشی است. این پکیج تولید چندگانه قابلیت تامین برق، سرمایش تبخیری غیرمستقیم تا نقطه شبنم، گرمایش و آب گرم مصرفی برای ساختمان را دارد. هوا توسط کمپرسور هوا و با عبور از تجهیزات کمکی دیگر به داخل پشته سلول کشیده می‌شود. همچنین هیدروژن که در مخزن هیدروژن ذخیره شده وارد آند پشته پیل سوختی می‌شود. برای ذخیره‌سازی هیدروژن از روش‌های متفاوتی استفاده می‌شود؛ یکی از این روشها استفاده از هیدروژن تحت فشار است، در این روش هیدروژن در ۱۰ بار ذخیره می‌شود. در این سیستم‌ها برای کم کردن فشار هیدروژن از یک شیر تنظیم فشار (رگولاتور) و یا اجکتور استفاده می‌کنند. در این صورت هیدروژن از ۱۰ بار به ۲ تا ۳ بار رسانده شده و پس از آن هیدروژن به پیل سوختی وارد می‌شود. پشته پیل سوختی حرارت و برق تولید می‌کند. برق تولید شده برای مصرف ساختمان و دستگاه سرمایش تبخیری غیرمستقیم و تجهیزات کمکی دیگر استفاده می‌شود. حرارت تولید شده توسط واکنش برقی شیمیایی و اضافه ولتاژ پشته سلول بایستی از پشته پیل سوختی برداشته شود. بدین منظور می توان از یک سیرکولاسیون اجباری (جریان آب و یا روغن) برای دفع حرارت از پیل سوختی و استفاده مفید از آن با هدف تأمین گرمایش فضای مسکونی و آب‌گرم مصرفی ساختمان و کویل گرمایشی استفاده کرد. واحد ذخیره حرارت با منبع ذخیره و بویلر پشتیبان ترکیب شده است. در مواقعی که حجم آب داغ از منبع ذخیره نمی‌تواند جواب‌گوی گرمایش و آب گرم باشد بویلر پشتیبان به طور اتوماتیک وارد مدار می‌شود. بویلر پشتیبان از نوع بویلر آب داغ لحظه‌ای متداول است. بویلر پشتیبان در مواقع اوج مصرف بار گرمایشی به خصوص در زمستان مورد استفاده قرار می‌گیرد. ظرفیت منبع ذخیره ۲۰۰ لیتر است. آب سرد (آب شیر) در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد وارد و در دمای ۶۰ درجه برای مصارف آب گرم مصرفی و در دمای ۸۲ درجه برای کویل گرمایشی خارج خواهد شد. در فصل تابستان سیستم سرمایش تبخیری غیرمستقیم مطابق سیستم‌های مرسوم میسوتسنکو کار می‌کند. در فصل زمستان آب گرم خروجی از مخزن ذخیره حرارت به کویل گرمایشی رفته و با هوای سرد که توسط دمنده از هوای بیرون مکش شده و از روی کویل عبور می‌کند، تبادل حرارت کرده و برای گرمایش فضا فرستاده می‌شود. لازم به ذکر است که در فصل زمستان پمپ کولر خاموش است.

۳- مدل‌سازی سیستم

در بررسی حاضر فرضیاتی به شرح زیر برای تحلیل پشته پیل سوختی پلیمری بکار گرفته می‌شود:



شکل ۱ پکیج تولید چندگانه بر اساس پیل سوختی پلیمری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

– هوا در پیل سوختی شامل ۷۹٪ نیتروژن و ۲۱٪ اکسیژن می‌باشد.

– فشارهای ثابت و برابر در کانال‌های جریان گاز پیل سوختی وجود دارد [۵].

– دمای عملکرد پیل سوختی در ۸۰ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته می‌شود و فشار عملکرد پیل سوختی برابر ۳ بار است [۵].

– مصرف برق تجهیزات کمکی از قبیل کمپرسور هوای پیل سوختی با توجه به کاتالوگ سازندگان کمپرسورهای پیل سوختی برابر ۲۰۰ وات و دمنده برابر با ۱۰۰ واتدر نظر گرفته شده است [۷]. همچنین از مصرف برق پمپ صرف‌نظر شده است.

۴- مدل پشته پیل سوختی پلیمری

در پیل سوختی پلیمری هوا و هیدروژن به پیل وارد می‌شوند و آب، قدرت الکتریکی و حرارت تولید می‌شود. واکنش الکتروشیمیایی کلی که در پیل سوختی پلیمری هیدروژن-هوا رخ می‌دهد [۸]:

$$H_2 + 1/2\,O_2 \rightarrow H_2O + \text{انرژی الکتریکی} + \text{حرارت} \qquad (۱)$$

ولتاژ مدار باز سیستم برای پیل سوختی پلیمری که به معادله نرنست معروف است با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید [۹]:

$$V_{\mathrm{N}} = E_{T,P} + \frac{RT_{\mathrm{FC}}}{n_{\mathrm{e}}F}\ln\left[\frac{P_{\mathrm{H_2}} \times P_{\mathrm{O_2}}^{0.5}}{P_{\mathrm{H_2O}}}\right] \qquad (۲)$$

در معادله (۲) $E_{T,P}$ ولتاژ برگشت‌پذیر در شرایط استاندارد دما و فشار که برابر ۱/۲۲۹ولت می‌باشد، R ثابت جهانی گاز، P_j فشار جزیی موثر واکنش‌دهنده j، $P_{H_2O}^{sat}$ فشار اشباع بخار آب است، F ثابت فارادی و n_e تعداد الکترونهای منتقل شده آب می‌باشند. فشار اشباع بخار آب برای پیل سوختی پلیمری می‌تواند بواسطه فرمول تجربی به صورت رابطه (۳) بیان شود [۹].

$$\log_{10}\left(P_{\mathrm{H_2O}}^{\mathrm{sat}}\right) = -2.1794 + 0.02953t - 9.1837 \times 10^{-5}t^2 + 1.4454 \times 10^{-7}t^3 \qquad (۳)$$

t دمای عملکرد پیل سوختی بر حسب سانتی‌گراد است. برای محاسبه فشار جزیی هیدروژن و اکسیژن در معادله نرنست از روابط (۴) و (۵) استفاده می‌شود [۹].

$$P_{\mathrm{H_2}} = \left(0.5P_{\mathrm{H_2O}}^{\mathrm{sat}}\right)\left[\frac{1}{\exp\left(\frac{1.653i}{T_{Fc}^{1.334}}\right)X_{\mathrm{H_2O}}^{\mathrm{sat}}} - 1\right] \qquad (۴)$$

$$P_{\mathrm{O_2}} = P\left[1 - X_{\mathrm{H_2O}}^{\mathrm{sat}} - X_{\mathrm{N_2}}^{\mathrm{channel}}\exp\left(\frac{0.291i}{T_{\mathrm{FC}}^{0.832}}\right)\right] \qquad (۵)$$

در معادلات (۴) و (۵)، P فشار عملکرد پیل سوختی پلیمری (بار)، i چگالی جریان (آمپر بر سانتی‌متر مربع)، $X_{N_2}^{channel}$ کسر مولی نیتروژن و $X_{H_2O}^{sat}$ کسر مولی آب در جریان گاز اشباع در دمای معین که با استفاده از رابطه (۶) بدست می‌آید [۹].

$$X_{\mathrm{H_2O}}^{\mathrm{sat}} = \frac{P_{\mathrm{H_2O}}^{\mathrm{sat}}}{P} \qquad (۶)$$

کسر مولی نیتروژن در جریان هوا توسط میانگین متوسط لگاریتمی بین کسر مولی نیتروژن در جریان هوا در ورودی و خروجی تعیین و محاسبه می‌شود [۹]:

$$X_{\mathrm{N_2}}^{\mathrm{channel}} = \frac{\left(X_{\mathrm{N_2,in}} - X_{\mathrm{N_2,out}}\right)}{\ln\left(\frac{X_{\mathrm{N_2,in}}}{X_{\mathrm{N_2,out}}}\right)} \qquad (۷)$$

$$X_{\mathrm{N_2,in}} = 0.79\left(1 - X_{\mathrm{H_2O}}^{\mathrm{sat}}\right) \qquad (۸)$$

$$X_{N_2,\mathrm{out}} = \frac{1 - X_{H_2O}^{\mathrm{sat}}}{1 + \left(\frac{(\lambda_{\mathrm{air}}-1)}{\lambda_{\mathrm{air}}}\right)\left(\frac{0.21}{0.79}\right)} \qquad (۹)$$

در معادلات (۷)، (۸) و (۹) $X_{\mathrm{N_2,in}}$ و $X_{\mathrm{N_2,out}}$ به ترتیب کسر مولی نیتروژن در ورودی و خروجی، و λ_{air} نسبت استوکیومتری هوا است.

به طور کلی ولتاژی واقعی در پیل سوختی از مقدار بدست آمده در معادله نرنست به علت تلفات برگشت‌ناپذیر کمتر است[۱۰]. این تلفات به طور کلی قطبش‌های فعال‌سازی، اهمی و غلظتی هستند. بنابراین ولتاژ واقعی خروجی پیل سوختی پلیمری از رابطه (۱۰) بدست می‌آید.

$$V_{\mathrm{FC}} = V_{\mathrm{N}} - V_{\mathrm{act}} - V_{\mathrm{ohm}} - V_{\mathrm{conc}} \qquad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰) V_{act}، V_{ohm}، V_{conc}، به ترتیب قطبش فعال‌سازی، اهمی و غلظتی بر حسب ولت می‌باشند.

قطبش فعالسازی از جنبش واکنش انتقالی بار الکتریکی از مرکز سطح مشترک الکترود – الکترولیت نتیجه می‌شود. برای محاسبه قطبش فعال‌سازی در این مقاله از معادله باترلر-وولمر به صورت رابطه (۱۱) استفاده می‌شود [۱۰].

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

$$V_{\mathrm{act}} = \frac{RT}{\alpha F}\ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (۱۱)$$

در معادله (۱۱)، α ضریب انتقال الکترون واکنش در آند (بین ۰/۱ تا ۰/۵ می‌باشد) و i_0 چگالی تبادل جریان است. اتلافات اهمی به دلیل مقاومت جریان یون‌ها در الکترولیت و مقاومت جریان به خاطر رسانایی الکتریکی اجزای پیل سوختی رخ می‌دهد. افت اهمی فقط در غشاء در نظر گرفته شده و از افت اهمی در لایه کاتالیست به علت خیلی نازک بودن آن صرف‌نظر می‌شود. این اتلافات توسط قانون اهم بیان می‌شود [۱۰]:

$$V_{\mathrm{ohm}} = IR_{\mathrm{int}} \quad (۱۲)$$

I جریان عملکرد پشته و R_{int} مقاومت داخلی کل است. مقاومت داخلی کل تابعی پیچیده از جریان و دما است که از رابطه (۱۳) بدست می‌آید:

$$R_{\mathrm{int}} = \frac{r_{\mathrm{mem}}L}{A_{\mathrm{cell}}} \quad (۱۳)$$

در رابطه (۱۳) r_{mem} مقاومت ویژه غشاء، L ضخامت غشاء بر حسب سانتی متر و A_{cell} مساحت فعال پیل بر حسب سانتی‌متر مربع می‌باشد. رابطه تجربی برای مقاومت ویژه غشا با رابطه (۱۴) بیان می‌شود.

$$r_{\mathrm{mem}} = \frac{181.6\left[1 + 0.03i + 0.062\left(\frac{T_{FC}}{303}\right)^2 i^{2.5}\right]}{[\zeta - 0.634 - 3i]exp\left[4.18\left(\frac{T_{FC}-303}{T_{FC}}\right)\right]} \quad (۱۴)$$

در معادله (۱۴)، ζ درصد رطوبت غشا است. مقدار رطوبت غشا معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ می‌باشد و در صورتی که رطوبت-نسبی داخل پیل ۱۰۰٪ باشد مقدار آن برابر ۱۴ خواهد بود [۷]. قطبش غلظتی از تغییرات غلظت بین واکنش‌دهنده‌ها یا محصولات در سطح الکترود و حجم محلول ناشی می‌شود [۱۱]. یک معادله تجربی که قطبش غلظتی را بهتر شرح می‌دهد توسط کیم و همکاران به صورت رابطه (۱۵) پیشنهاد شده است [۱۱].

$$V_{\mathrm{conc}} = C\,\exp\left(\frac{i}{d}\right) \quad (۱۵)$$

C و d ضرایب تجربی به ترتیب برابر با ۳×۱۰^{-۵} ولت و ۰/۱۲۵ آمپر بر سانتی‌متر مربع می‌باشند [۱۱].

قدرت خروجی از پشته پیل سوختی پلیمری با استفاده از رابطه (۱۶) بدست می‌آید.

$$W_{\mathrm{fc}} = N_{\mathrm{cell}}V_{fc}I \quad (۱۶)$$

نرخ هیدروژن و اکسیژن مصرف شده و آب تولید شده با استفاده از قانون فاراده برای پشته‌های پیل به صورت روابط (۱۷) تا (۱۹) بدست می‌آید[۱۰].

$$\dot{n}_{\mathrm{H2,consumed}} = \frac{N_{\mathrm{cell}}I}{2F} \quad (۱۷)$$

$$\dot{n}_{\mathrm{O2,consumed}} = \frac{N_{\mathrm{cell}}I}{4F} \quad (۱۸)$$

$$\dot{n}_{\mathrm{H2O,generated}} = \frac{N_{\mathrm{cell}}I}{2F} \quad (۱۹)$$

با استفاده از بالانس ترمودینامیکی انرژی حرارت خالص تولید شده توسط واکنش شیمیایی داخل پیل سوختی، که به علت افزایش یا افت دما می‌باشد، با استفاده از رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود [۱۲].

$$\dot{q}_{\mathrm{net}} = \dot{q}_{\mathrm{chem}} - \dot{q}_{\mathrm{elec}} - \dot{q}_{\mathrm{sens+latent}} - \dot{q}_{\mathrm{loss}} \quad (۲۰)$$

$\dot{q}_{net}$ انرژی حرارتی خالص بر حسب ژول، $\dot{q}_{chem}$ انرژی شیمیایی، $\dot{q}_{\mathrm{elec}}$ انرژی الکتریکی و برابر با W_{fc}، $\dot{q}_{sens+latent}$ حرارت محسوس و نهان و $\dot{q}_{\mathrm{loss}}$ تلفات حرارتی است. قدرت در دسترس به علت واکنش شیمیایی آزاد شده مطابق رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$\dot{\mathrm{q}}_{\mathrm{chem}} = \dot{\mathrm{n}}_{\mathrm{H2,consumed}}\Delta\mathrm{H} \quad (۲۱)$$

در رابطه (۲۱) ΔH تغییر آنتالپی واکنش شیمیایی داخل پیل سوختی و $\dot{n}_{H2,consumed}$ نرخ مصرف هیدروژن بر حسب مول بر ثانیه می‌باشند.

حرارت محسوس و نهان جذب شده در طی فرایند می‌تواند با معادله (۲۲) محاسبه شود.

$$\begin{aligned}\dot{q}_{\mathrm{sens+latent}} &= \left(\dot{n}_{\mathrm{H2,out}}T_{\mathrm{FC}} - \dot{n}_{\mathrm{H2,in}}T_0\right)C_{\mathrm{H2}} \\ &+\left(\dot{n}_{\mathrm{O2,out}}T_{\mathrm{FC}}\dot{n}_{\mathrm{O2,in}}T_0\right)C_{\mathrm{O2}} \\ &+\dot{n}_{\mathrm{H2O,generated}}(T_{\mathrm{FC}} - T_0)C_{\mathrm{H2O},l} \\ &+\dot{n}_{\mathrm{H2O,generated}}H_{\mathrm{V}}\end{aligned} \quad (۲۲)$$

$\dot{n}_{\mathrm{i}}$ جریان مولی جزء i، C_{i} ظرفیت حرارت مخصوص جزء i، H_{V} گرمای تبخیر آب و T_0 دمای محیط بر حسب کلوین است.

اتلاف حرارت که با جابجایی هوا و تشعشع منتقل می‌شود اساساً با فرمول‌های (۲۳) تا (۲۵) محاسبه می‌شود.

$$\dot{q}_{\mathrm{conv}} = h_{\mathrm{cell}}(T_{\mathrm{FC}} - T_0)N_{\mathrm{cell}}A_{\mathrm{cell}} \quad (۲۳)$$

h_{cell} ضریب انتقال حرارت جابجایی هوا تقریباً برابر با ۵ $\mathrm{W/(m^2.k)}$ است[۴].

$$\dot{q}_{\mathrm{rad}} = \varepsilon\sigma A_{\mathrm{cell}}\left(T_{\mathrm{FC}}^4 - T_0^4\right) \quad (۲۴)$$

$$\dot{q}_{\mathrm{loss}} = \dot{q}_{\mathrm{conv}} + \dot{q}_{\mathrm{rad}} \quad (۲۵)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

در معادله (۲۴) ε ضریب نشر سطح که برای سطح ایده‌ال برابر یک فرض شده و σ ثابت بولتزمن برابر با $۵/۶۷ \times ۱۰^{-۸}\ \mathrm{W/m^2K^4}$ می‌باشد [۴].

۴-۱- تحلیل اگزرژی

با استفاده از قدرت خروجی، ولتاژ پیل سوختی و استوکیومتریک هوا دبی جرمی محصولات و واکنش‌دهنده‌ها در پیل سوختی به آسانی با استفاده از معادلات لارمنین و دکس ارزیابی می‌شود. دبی جرمی هوا و سوخت ورودی هیدروژن با معادلات (۲۶) و (۲۷) ارزیابی می‌شوند [۱۰].

$$\dot{m}_{\mathrm{air,in}} = 3.57 \times 10^{-7}\left(\frac{\lambda_{\mathrm{air}} W_{\mathrm{fc}}}{V_{\mathrm{FC}}}\right) \quad (۲۶)$$

$$\dot{m}_{\mathrm{H_2,in}} = 1.05 \times 10^{-8}\left(\frac{W_{\mathrm{fc}}}{V_{\mathrm{FC}}}\right) \quad (۲۷)$$

دبی جرمی محصولات هوا می‌تواند اختلاف بین مقدار اکسیژن در واکنش الکتروشیمیایی و مقدار اکسیژن مصرف شده توسط واکنش با هیدروژن با آب محصول تعریف شود:

$$\dot{m}_{\mathrm{air,out}} = 3.57 \times 10^{-7}\left(\frac{\lambda_{\mathrm{air}} W_{\mathrm{fc}}}{V_{\mathrm{FC}}}\right) - 8.29 \times 10^{-8}\left(\frac{W_{\mathrm{fc}}}{V_{\mathrm{FC}}}\right) \quad (۲۸)$$

مقدار آب تولید شده توسط پیل سوختی با استفاده از معادله (۲۹) بدست می‌آید.

$$\dot{m}_{\mathrm{H_2o,in}} = 9.34 \times 10^{-8}\left(\frac{W_{\mathrm{fc}}}{V_{\mathrm{FC}}}\right) \quad (۲۹)$$

در حالت کلی می‌توان بالانس اگزرژی در حالت پایدار برای هر سیستمی را به صورت رابطه (۳۰) نوشت [۱۳].

$$\dot{E}_{\mathrm{x,in}} = \dot{E}_{\mathrm{x,out}} + \dot{E}_{\mathrm{x,D}} + \dot{E}_{\mathrm{x,loss}} \quad (۳۰)$$

$$\dot{E}_{\mathrm{x,in}} = \sum_i \dot{m}_{\mathrm{i,in}} e_{\mathrm{x}} + \dot{W}_{\mathrm{in}} + \sum_i \dot{Q}_{\mathrm{i,in}}\left(1 - \frac{T_0}{T_{\mathrm{i}}}\right) \quad (۳۱)$$

$$\dot{E}_{\mathrm{x,out}} = \sum_i \dot{m}_{\mathrm{i,out}} e_{\mathrm{x}} + \dot{W}_{\mathrm{out}} + \sum_i \dot{Q}_{\mathrm{i,out}}\left(1 - \frac{T_0}{T_{\mathrm{i}}}\right) \quad (۳۲)$$

$\dot{E}_{\mathrm{x,in}}$ و $\dot{E}_{\mathrm{x,out}}$ به ترتیب اگزرژی ورودی و خروجی به و از سیستم توسط کار، حرارت و جرم، $\dot{E}_{\mathrm{x,D}}$ انهدام یا تخریب اگزرژی توسط برگشت‌ناپذیری و $\dot{E}_{\mathrm{x,loss}}$ نشان دهنده اتلاف اگزرژی می‌باشند.

انتقال اگزرژی کل (e_{x}) برای یک ماده می‌تواند مجموع اگزرژی‌های فیزیکی $e_{x,ph}$، شیمیایی $e_{x,Ch}$، جنبشی $e_{\mathrm{x,kn}}$ و پتانسیل $e_{x,pt}$ بیان شود [۴]. معمولاً در محاسبات سیستم پیل سوختی از اگزرژی جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر می‌شود. اگزرژی فیزیکی به دما و فشار واکنش‌دهنده‌ها و محصولات در سیستم پیل سوختی وابسته است. اگزرژی فیزیکی بر حسب اختلاف آنتالپی و آنتروپی در شرایط استاندارد دما و فشار که به ترتیب برابر $T_0 = ۲۹۸\mathrm{K}$ و $P_0 = ۱\mathrm{atm}$ می‌باشند، بیان می‌شود. رابطه کلی اگزرژی فیزیکی به صورت رابطه (۳۳) می‌باشد.

$$e_{\mathrm{x,ph}} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (۳۳)$$

در رابطه (۳۳)، h و s به ترتیب آنتالپی و آنتروپی هستند و زیرنویس صفر دلالت بر محیط دارد. اگزرژی فیزیکی یک گاز ایده‌آل با ظرفیت حرارتی ثابت C_{p} و نسبت گرمای ویژه k به صورت رابطه (۳۴)است:

$$e_{\mathrm{x,ph}} = C_{\mathrm{p}} T_0\left[\frac{T}{T_0} - 1 - \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{K-1}{K}}\right]$$

(۳۴) به منظور تخمین این که چه مقدار ترکیب شیمیایی اگزرژی سیستم از شرایط مرجع محیط منحرف می‌شود، اگزرژی شیمیایی ورودی و خروجی جریان پیل با رابطه (۳۵) تعیین می شود.

$$e_{\mathrm{x,Ch}} = \sum x_{\mathrm{n}}\, e_{\mathrm{x,n}}^{\mathrm{ch}} + RT_0 \sum x_{\mathrm{n}} \ln x_{\mathrm{n}} \quad (۳۵)$$

در رابطه (۳۵) x_n و $e_{x,n}^{ch}$ به ترتیب کسر مولی و اگزرژی مخصوص شیمیایی هستند که مقادیر آنها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ کسر مولی و اگزرژی شیمیایی واکنش‌دهنده‌ها و محصولات

واکنش‌دهنده‌ها – محصولات	کسر مولی	اگزرژی شیمیایی (ژول بر کیلوگرم)
	واکنش دهنده‌ها	
اکسیژن	۰/۲۱	۱۲۴۰۰۰
نیتروژن	۰/۷۹	۲۵۷۱۴
آب	۰/۰۱۸	۵۰۵۵۰
هیدروژن	۱	۱۱۸۰۵۰۰۰۰
	محصولات	
آب	۱	۵۰۵۵۰

۵- مدل سرمایش تبخیری غیرمستقیم نقطه شبنم بر اساس چرخه میسوتسنکو

میسوتسنکو چرخه ترمودینامیکی جدیدی بنام چرخه میسوتسنکو را اختراع کرد. از لحاظ تئوری دمای حباب تر

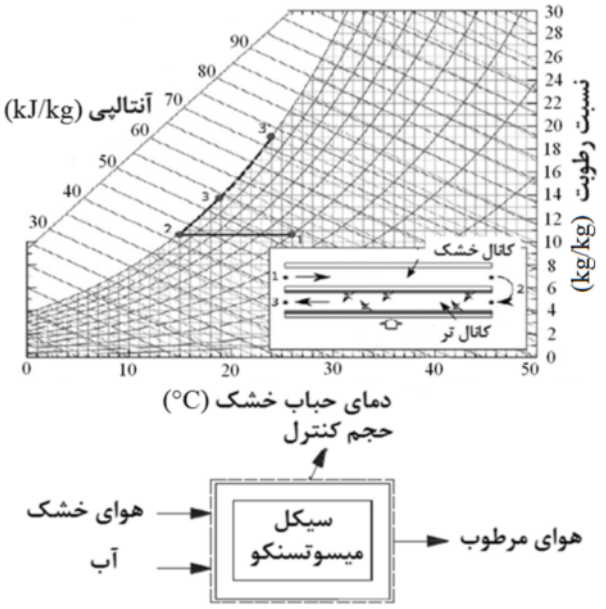
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

پایین‌ترین دمای قابل دست‌یابی بوسیله سیستم‌های خنک کننده تبخیری و برج‌های خنک‌کن می‌باشد. در حالی که به وسیله چرخه میسوتسنکو می‌توان به دمایی پایین‌تر از دمای حباب تر و نزدیک به نقطه شبنم دست یافت.

شکل ۲ نشان‌دهنده نمودار سایکرومتریک بهمراه اصول کار مبدل چرخه ایده‌ال و حجم کنترل در نظر گرفته شده برای تحلیل اگزرژی می‌باشد [۱۴،۱۵]. مبدل چرخه میسوتسنکو، یک مبدل انتقال حرارت و جرم می‌باشد که از یک کانال مرطوب و یک کانال خشک تشکیل شده است. جریان سیال عامل ابتدا در یک کانال خشک، خنک شده سپس به بخش‌های مختلف تقسیم می‌شود و وارد کانال مرطوب می‌شود [۱۴].

کانال مرطوب این جریان سیال را بطور پله‌ای خنک و اشباع می‌کند. این فرایند در یک فضای کوچک با دفعات زیاد تکرار شده و نهایتاً سبب دست‌یابی به حداقل دما می‌شود [۱۶].

عملکرد چرخه میسوتسنکو می‌تواند با کارایی حباب تر ϵ_{Wb} توضیح داده شود. کارایی حباب تر اختلاف دمای ورودی و تحویلی تقسیم بر اختلاف بین دمای حباب تر و حباب خشک هوای ورودی است، که به صورت معادله (۳۶) بیان می‌شود [۱۶]:



شکل ۲ نمودار سایکرومتریک بهمراه اصول کار مبدل و حجم کنترل بر اساس چرخه میسوتسنکو [۱۵،۱۴]

$$\epsilon_{\mathrm{wb}} = \frac{T_{\mathrm{SI}} - T_{\mathrm{SO}}}{T_{\mathrm{SI}} - T_{\mathrm{wb,SI}}} \quad (۳۶)$$

T_{SI} دمای هوای ورودی تحویلی، T_{SO} دمای هوای خروجی تحویلی، و $T_{\mathrm{wb,SI}}$ دمای حباب تر هوای ورودی است.

سیستم‌های سرمایش تبخیری نقطه شبنم می‌توانند هوای تحویلی پایین‌تر نسبت به دمای حباب تر هوای اولیه ورودی به سوی دمای نقطه شبنم فراهم کنند. در این وضعیت کارایی نقطه شبنم که برای سنجش کولرها استفاده می‌شود می‌تواند به صورت فرمول (۳۷) تعریف شود [۱۸،۱۷].

$$\varepsilon_{\mathrm{dp}} = \frac{T_{\mathrm{SI}} - T_{\mathrm{SO}}}{T_{\mathrm{SI}} - T_{\mathrm{dp,SI}}} \quad (۳۷)$$

در رابطه (۳۷)، ε_{dp} کارایی نقطه شبنم و $T_{dp,SI}$ دمای نقطه شبنم خارج شده هوای اولیه بر حسب کلوین می‌باشند.

نرخ ظرفیت سرمایش چرخه میسوتسنکو$\dot{Q}_{\mathrm{cooling}}$ با رابطه (۳۸) تعریف شود.

$$\dot{Q}_{\mathrm{cooling}} = \dot{m}_{\mathrm{SO}}(h_{\mathrm{in}} - h_{\mathrm{SO}}) \quad (۳۸)$$

$\dot{m}_{SO}$ تامین کننده دبی جرمی هوای خروجی، h_{in} آنتالپی هوای ورودی و h_{SO} آنتالپی هوای خروجی ارسالی است.

ضریب عملکرد انرژتیک چرخه میسوتسنکو می‌تواند با رابطه (۳۹) بدست بیاید.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{cooling}}}{\dot{W}_{\mathrm{blower}}} \quad (۳۹)$$

در رابطه (۳۹)$\dot{W}_{\mathrm{blower}}$ قدرت مصرفی دمنده ۲۷۶ وات [۱۷] است.

با استفاده از حجم کنترل در نظر گرفته شده در شکل ۲ و رابطه ۳۰ بالانس اگزرژی چرخه میسوتسنکو به صورت زیر انجام می‌شود:

نرخ اگزرژی ورودی $\dot{E}_{\mathrm{x,in}}$ با استفاده از رابطه (۴۰) بدست می‌آید.

$$\dot{E}_{\mathrm{x,in}} = \dot{E}_{\mathrm{x,in,da}} + \dot{E}_{\mathrm{x,in,w}} \quad (۴۰)$$

$\dot{E}_{\mathrm{x,in,da}}$ و $\dot{E}_{\mathrm{x,in,w}}$ به ترتیب نرخ اگزرژی هوای خشک و آب ورودی هستند که با استفاده از روابط (۴۱) و (۴۲) بدست می‌آیند.

$$\dot{E}_{\mathrm{x,in,da}} = \dot{m}_{\mathrm{da}} e_{\mathrm{da}} \quad (۴۱)$$

$$\dot{E}_{\mathrm{x,in,w}} = \dot{m}_{\mathrm{w}} e_{\mathrm{w}} = \dot{m}_{\mathrm{da}} \omega_{\mathrm{SI}} e_{\mathrm{w}} \quad (۴۲)$$

$\dot{m}_{\mathrm{da}}$ و $\dot{m}_{\mathrm{w}}$ به ترتیب دبی جرمی هوای خشک و دبی جرمی بخار آب، ω_{SI} نسبت رطوبت هوای ورودی، e_{da} و e_{w} به ترتیب جریان ویژه اگزرژی کل هوای خشک و آبمی‌باشندکه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

روابط مربوط به اینها در مراجع [۱۶] و [۱۷] داده شده است.

نرخ اگزرژی خروجی $\dot{E}_{\mathrm{x,out}}$ با استفاده از رابطه (۴۳) بدست می‌آید.

$$\dot{E}_{\mathrm{x,out}} = \dot{m}_{\mathrm{da}} e_{\mathrm{t}} \quad (۴۳)$$

در رابطه (۴۳) e_t جریان ویژه اگزرژی کل است که رابطه آن در مرجع [۱۶] داده شده است.نرخ اتلاف اگزرژی $\dot{E}_{x,loss}$ با استفاده از فرمول (۴۴) به راحتی محاسبه می‌شود.

$$\dot{E}_{\mathrm{x,loss}} = \dot{Q}_{\mathrm{cooling}} \left(1 - \frac{T_0}{T_{\mathrm{SI}}}\right) \quad (۴۴)$$

نرخ تخریب اگزرژی $\dot{E}_{\mathrm{x,D}}$ با مرتب‌سازی معادله (۳۰) معین می‌شود دیگر مولفه‌های معادله (۳۰) ابتدا تعیین می‌شوند و سپس به آسانی نرخ تخریب اگزرژی بدست می‌آید.

بازده اگزرژی چرخه میسوتسنکو با رابطه (۴۵) تعیین می‌شود.

$$\eta_{\mathrm{e,m,cyc}} = \frac{\dot{E}_{\mathrm{x,out}}}{\dot{E}_{\mathrm{x,in}}} = \frac{e_{\mathrm{t}}}{e_{\mathrm{da}} + \omega_{\mathrm{SI}} e_{\mathrm{w}}} \quad (۴۵)$$

ضریب عملکرد اگزرژتیک چرخه میسوتسنکو با رابطه (۴۶) تعریف می‌شود.

$$COP_{\mathrm{ex}} = COP \left(1 - \frac{T_0}{T_{\mathrm{SI}}}\right) \quad (۴۶)$$

۶- مدلکویل گرمایشی

در مدل‌سازی کویل گرمایشی، در این مقاله شرایط هوای ورودی به کویل و خروجی از آن مشخص می‌باشد. در کویل‌های گرمایشی از روش اختلاف دمای متوسط لگاریتمی استفاده می‌شود. نرخ انتقال حرارت از یک کویل جریان مخالف از معادله (۴۷) بدست می‌آید.

$$\dot{Q}_{\mathrm{coil}} = U_{\mathrm{o}} A_{\mathrm{o}} \Delta T_{\mathrm{m}} \quad (۴۷)$$

در معادله (۴۷)، A_o مساحت کل سطح خارجی کویل بر حسب مترمربع، U_o ضریب انتقال حرارت کلی سطح است که به صورت رابطه (۴۸) تعریف می‌شود.

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{1-\eta}{h_o\left(\frac{A_o}{A_{\mathrm{F}}}+\eta\right)} + \frac{1}{h_o}} \quad (۴۸)$$

A_F مساحت کل سطح خارجی پره‌ها، A_i مساحت کل سطح داخلی لوله‌های کویل، h_i و h_o به ترتیب ضریب انتقال حرارت سطح داخلی و خارجی کویل، و η راندمان پره خشک است.

مک کوئیستون [۱۹] رابطه بین ضریب j کولبرن و پارامترهای JP را برای کویل‌های خشک به صورت روابط (۴۹) تا (۵۲) ارایه کرد.

$$\left(\frac{h_o}{\rho V_{\min} c_{p,a}}\right) \mathrm{Pr}^{2/3} = 0.00125 + 0.27 \mathrm{Re}_{\mathrm{D,o}}^{-0.4} \left(\frac{A_o}{A_p}\right)^{-0.15} \quad (۴۹)$$

$$JP = \mathrm{Re}_{\mathrm{D,o}}^{-0.4} \left(\frac{A_o}{A_{\mathrm{p}}}\right)^{-0.15} \quad (۵۰)$$

$$\mathrm{Re}_{\mathrm{D,o}} = \frac{G D_o}{\mu} \quad (۵۱)$$

$$G = \rho V_{\min} \quad (۵۲)$$

V_{min} سرعت مینیمم هوا، Pr عدد پرانتل، Re عدد رینولدز، A_p مساحت کل سطح خارجی لوله‌های کویل، G سرعت جرمی، D_o قطر خارجی لوله، و μ لزجت دینامیکی می‌باشند. برای جریان مغشوش آب گرم درون لوله‌ها، ضریب انتقال سطح داخلی لوله از معادله دیتوس – بولتر به صورت رابطه (۵۳) محاسبه می‌شود.

$$\frac{h_{\mathrm{i}} D_{\mathrm{i}}}{k_{\mathrm{w}}} = 0.023 \mathrm{Re}^{0.8} \mathrm{Pr}^{n} \quad (۵۳)$$

D_i قطر داخلی، k_w ضریب هدایت گرمایی آب و مقدار n برای گرمایش برابر ۰/۴ می‌باشد.

۷- معادلات ارزیابی عملکرد پکیج

راندمان الکتریکی پشته پیل سوختی از رابطه (۵۴) بدست می‌آید[۲۱،۲۰].

$$\eta_{\mathrm{stack}} = \frac{\dot{W}_{\mathrm{net}}}{HHV_{\mathrm{H_2}} \dot{n}_{\mathrm{H2,consumed}}} \quad (۵۴)$$

$\dot{W}_{\mathrm{net}}$ قدرت خالص است که از رابطه (۵۵) بدست می‌آید.

$$\dot{W}_{\mathrm{net}} = W_{\mathrm{fc}} - 276 - 300 \quad (۵۵)$$

در رابطه (۵۵) عدد ۲۷۶ و ۳۰۰ وات به ترتیب برای قدرت مصرفی دمنده چرخه میسوتسنکو، دمنده‌های پشته پیل سوختی و کمپرسور هوا در نظر گرفته شده است.

راندمان تولید توام گرمایش به صورت رابطه (۵۶) تعریف می‌شود [۲۲]:

$$\eta_{cog,h} = \frac{\dot{W}_{\mathrm{net}} + \dot{Q}_{\mathrm{coil}}}{HHV_{\mathrm{H_2}} \dot{n}_{\mathrm{H2,consumed}}} \quad (۵۶)$$

$\dot{Q}_{coil}$ توان حرارتی کویل گرمایشی و زیرنویس cog, h نشان‌دهنده تولید توام گرمایش است. راندمان تولید توام سرمایش با رابطه (۵۷) تعریف می‌شود.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

$$\eta_{\mathrm{cog,c}} = \frac{\dot{W}_{\mathrm{net}} + \dot{Q}_{\mathrm{cooling}}}{HHV_{\mathrm{H_2}}\dot{n}_{\mathrm{H2,consumed}}} \quad (۵۷)$$

در رابطه (۵۷) زیرنویسهای cog, c نشان‌دهنده تولید توام سرمایش است. راندمان تولید چندگانه به صورت رابطه (۵۸) تعریف می‌شود[۲۲].

$$\eta_{\mathrm{tri}} = \frac{\dot{W}_{\mathrm{net}} + \dot{Q}_{\mathrm{cooling}} + \dot{Q}_{\mathrm{coil}}}{HHV_{\mathrm{H_2}}\dot{n}_{\mathrm{H2,consumed}}} \quad (۵۸)$$

راندمان اگزرژی الکتریکی پشته پیل سوختی به صورت رابطه (۵۹) تعریف می‌شود [۲۳].

$$\eta_{\mathrm{ex_{el}}} = \frac{\dot{W}_{\mathrm{net}}}{\left[\dot{m}\left(e_{x,ph} + e_{x,Ch}\right)\right]_{\mathrm{H_{2,in}}}} \quad (۵۹)$$

راندمان اگزرژی تولید توام سرمایش مطابق رابطه (۶۰) تعریف می‌شود.

$$\eta_{\mathrm{ex_{cog,c}}} = \frac{\dot{W}_{\mathrm{net}} + \left(1 - \left(\frac{T_{\mathrm{amb}}}{T_{\mathrm{cool}}}\right)\right) \times \dot{Q}_{\mathrm{cooling}}}{\left[\dot{m}\left(e_{x,ph} + e_{x,Ch}\right)\right]_{\mathrm{H_{2,in}}}} \quad (۶۰)$$

راندمان اگزرژی تولید توام گرمایش مطابقرابطه (۶۱) تعریف می‌شود:

$$\eta_{\mathrm{ex_{cog,h}}} = \frac{\dot{W}_{\mathrm{net}} + \left(1 - \left(\frac{T_{\mathrm{amb}}}{T_{\mathrm{heat}}}\right)\right) \times \dot{Q}_{\mathrm{coil}}}{\left[\dot{m}\left(e_{x,ph} + e_{x,Ch}\right)\right]_{\mathrm{H_{2,in}}}} \quad (۶۱)$$

راندمان اگزرژی تولید چندگانه به صورت رابطه (۶۲) تعریف می شود:

$$\eta_{\mathrm{ex_{tri}}} = \frac{W_{\mathrm{net}} + x + y}{\left[\dot{m}\left(e_{x,ph} + e_{x,Ch}\right)\right]_{\mathrm{H_{2,in}}}} \quad (۶۲)$$

در رابطه (۶۲)، x و y از روابط (۶۳) و (۶۴) بدست می‌آیند.

$$x = \left(1 - \left(\frac{T_{\mathrm{amb}}}{T_{\mathrm{cool}}}\right)\right) \times \dot{Q}_{\mathrm{cooling}} \quad (۶۳)$$

$$y = \left(1 - \left(\frac{T_{\mathrm{amb}}}{T_{\mathrm{heat}}}\right)\right) \times \dot{Q}_{\mathrm{coil}} \quad (۶۴)$$

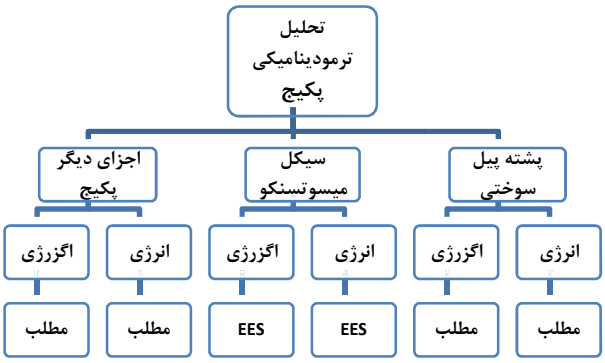
T_{cool} و T_{heat} دمای مورد نیاز برای سرمایش و گرمایش فضا هستند که به ترتیب برابر ۹ و ۴۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشند.

۸- اعتبارسنجی مدل پکیج

به منظور تأیید مدل‌سازی انجام شده، نتایج حاصل از این مقاله، از نتایج منتشر شده در مقالات مراجع دیگر برای شرایط محدود استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی پیل سوختی با مراجع [۴] و [۵] دارای سازگاری خوبی می‌باشد (جدول ۳). همچنین به منظور تایید اعتبار مدل سرمایش تبخیری غیرمستقیم از نتایج منتشر شده در مراجع [۱۶] و [۱۷] استفاده شده است (جدول ۵). در جدول‌های ۱، ۲ و ۴ به ترتیب فرضیات اصلی و پارامترهای ورودی برای پیل سوختی پلیمری، چرخه میسوتسنکو و کویل گرمایشی لیست شده است. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی به همراه مقادیر بدست آمده در مراجع در جدول ۳ و ۵ برای پکیج نشان داده شده است.

۹- بحث و نتایج

طرح جدید پکیج تولید چندگانه بر اساس پیل سوختی پلیمری با استفاده از ترمودینامیک الکتروشیمی و روابط دیگر مدل‌سازی شد. با استفاده از نرم‌افزارهای مطلب و EES کدنویسی انجام شده و نتایج با رسم نمودارها و جداول برجسته شده است. برای شبیه‌سازی پکیج تولید چندگانه از هر دو نرم-افزار متلب و EES استفاده شده است. برای شبیه‌سازی پیل سوختی پلیمری تمام روابط گفته شده در بخش‌های قبلی باید به طور هم‌زمان در نرم‌افزار مطلب حل شوند. برای تحلیل انرژی و اگزرژی چرخه میسوتسنکو از نرم‌افزار EES استفاده شده است. دلیل این کار خاصیت‌های ترموفیزیکی است که در کتابخانه نرم‌افزار EES موجود می‌باشند به طوری که نرم‌افزار مطلب فاقد چنین مزیتی می‌باشد. فلوچارت کلی حل در شکل ۳ نشان داده شده است. فرضیات استفاده شده در پیل سوختی در جداول ۱ و ۲ و نتایج بدست آمده از مدل‌سازی به همراه درصد خطا در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۳ فلوچارت کلی شبیه‌سازی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

جدول ۲ مشخصات پیل سوختی پلیمری

پارامتر	مقدار
تعداد الکترونهای منتقل شده	۲
عدد ثابت فارادی (کولن بر مول)	۹۶۴۵۸
دمای پیل سوختی (کلوین)	۳۵۳
فشار پیل سوختی (بار)	۳
تعداد سلولهای پشته	۳۵
مساحت سلول (سانتی‌متر مربع)	۲۳۲
نسبت استوکیومتری هوا	۲
ارزش حرارتی بالای هیدروژن (ژول بر مول)	۲۸۵۵۵۰
چگالی جریان (آمپر بر سانتی‌مترمربع)	۰/۶
ثابت جهانی گاز (ژول بر مول کلوین)	۸/۳۱۴
دمای محیط (کلوین)	۲۹۸
ضخامت غشا (سانتی‌متر)	۰/۴۵۲۰۰
نسبت استوکیومتری هیدروژن	۱/۲
چگالی تبادل جریان (آمپر بر سانتی‌متر مربع) [۹]	$۱۰^{-۶/۹۱۲}$
گرمای ویژه متوسط هوا (ژول بر کیلوگرم کلوین)	۱۰۰۵
گرمای ویژه متوسط هیدروژن (ژول بر کیلوگرم کلوین)	۱۴۳۰۰
نسبت گرمای ویژه برای هوا و هیدروژن	۱/۴
آنتالپی هوای محصول در شرایط استاندارد (کیلوژول بر کیلومول)	-۲۱۱۲۰

برای چرخه میسوتسنکو و کویل گرمایشی پارامترهای ورودی در جدول ۴ و نتایج بدست آمده از نرم‌افزار به همراه درصد خطا در جدول ۵ نوشته شده است. این نتایج کارایی حباب تر و نقطه شبنم، ظرفیت سرمایشی، ضریب عملکرد انرژی و اگزرژی، بازده اگزرژی چرخه میسوتسنکو و بار حرارتی کویل گرمایشی می‌باشند.

در شکل ۴ نمودار چگالی جریان بر حسب اتلافات فعال‌سازی، اهمی و غلظتی نشان داده شده که این نمودار به منحنی قطبش معروف است. شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش چگالی جریان قطبش‌های فعال‌سازی، اهمی و غلظتی افزایش می‌یابند. قطبش فعال‌سازی در هر چگالی جریانی بسیار بزرگتر از قطبش‌های دیگر می‌باشد و بنابراین در پیل سوختی پلیمری قطبش فعال‌سازی بزرگترین اتلاف ولتاژ محسوب می‌شود. بر اساس فرمول ۱۱ برای قطبش فعال‌سازی با افزایش چگالی جریان قطبش فعال‌سازی به صورت لگاریتمی افزایش یافته و در چگالی ۰/۶ به ماکزیمم می‌رسد.

نمودار قطبش اهمی با چگالی جریان تقریباً به صورت معادله یک خط راست است و با افزایش چگالی جریان افزایش می‌یابد اما این افزایش قابل توجه نیست. همان طور که از فرمول (۱۵) این نتیجه مورد انتظار بود. قطبش غلظتی نسبت به دو قطبش دیگر کمترین مقدار عددی را دارد و با چگالی جریان به صورت نمایی افزایش می‌یابد.

همچنین با استفاده از شبیه‌سازی پشته پیل سوختی پلیمری افت‌های ولتاژ فعالسازی، اهمی و غلظتی در چگالی جریان ۰/۶ آمپر بر سانتی متر مربع به ترتیب برابر با ۰/۵۲۱ ولت، ۰/۰۳۴۱ ولت و ۰/۰۰۳۶۵ ولت بدست آمدند.

جدول ۳ نتایج مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری و معادلات کلی پکیج

پارامتر	مقادیر بدست آمده از مدل‌سازی پکیج	مقادیر بدست آمده در مرجع [۴]	درصد خطا با مرجع [۴]	مقادیر بدست آمده در مرجع [۵]	درصد خطا با مرجع [۵]
راندمان پشته پیل سوختی	٪۴۵/۸۵	٪۴۲/۱۷	٪۸/۰۲	٪۴۲/۶۷	٪۶/۹۳
ولتاژ خروجی از پشته پیل سوختی (ولت)	۰/۶۷۸۷	-	-	۰/۶۵۳	٪۳/۷۸
قدرت خروجی پیل سوختی(وات)	۳۳۰۷	۱۲۰۰	-	-	-
حرارت تولید شده در پیل سوختی (وات)	۲۹۳۱	-	-	-	-
نرخ مصرف هیدروژن (مول بر ثانیه)	۰/۰۲۵	-	-	-	-
نرخ مصرف اکسیژن (مول بر ثانیه)	۰/۰۱۲	-	-	-	-
راندمان تولید توام گرمایش	٪۶۴/۶۲	-	-	-	-
راندمان تولید توام سرمایش	٪۵۰/۲۱	-	-	-	-
راندمان تولید چندگانه پکیج	٪۷۷/۲۹	-	-	-	-
راندمان اگزرژی الکتریکی	٪۳۹/۲۶	٪۳۸/۱۲	٪۲/۹	-	-
راندمان اگزرژی تولید توام گرمایش	٪۴۰/۱۳	-	-	-	-
راندمان اگزرژی تولید توام سرمایش	٪۳۸/۷۸	-	-	-	-
راندمان اگزرژی تولید چندگانه	٪۴۰/۱۶	-	-	-	-

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

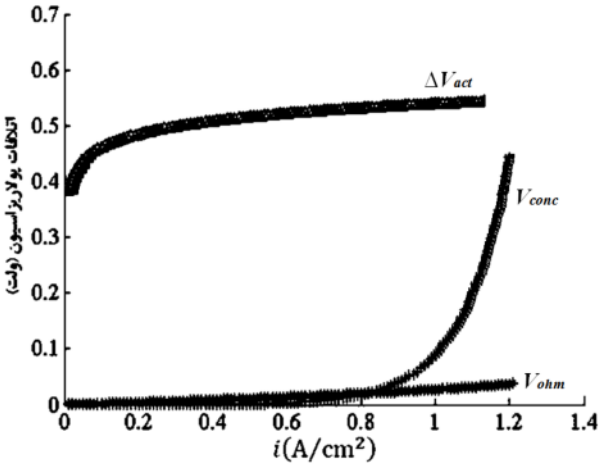
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

جدول ۴ پارامترهای ورودی به چرخه میسوتسنکو و کویل گرمایشی

پارامتر	مقدار
دمای هوای ورودی (دمای محیط)	۲۵ درجه سانتی‌گراد
دمای هوای خروجی	۱۳ درجه سانتی‌گراد
دبی جرمی هوای خشک	۰/۰۷۴۸۳۳ کیلوگرم بر ثانیه
دبی جرمی آب	۰/۰۰۰۹۸۹ کیلوگرم بر ثانیه
نسبت رطوبت هوای ورودی	۰/۰۲۱ کیلوگرم آب بر کیلوگرم هوای خشک
دمای آب گرم ورودی به کویل گرمایشی	۸۲ درجه سانتی‌گراد
دمای آب گرم خروجی از کویل گرمایشی	۷۱ درجه سانتی‌گراد
دمای هوای گرم خروجی (ارسالی برای گرمایش)	۴۳ درجه سانتی‌گراد
راندمان پره خشک	٪۷۰
نسبت A_o/A_i	۱۱/۴
نسبت A_o/A_F	۱/۰۹۵
نسبت A_o/A_p	۱۱/۵۴

جدول ۵ نتایج چرخه میسوتسنکو و کویل گرمایشی

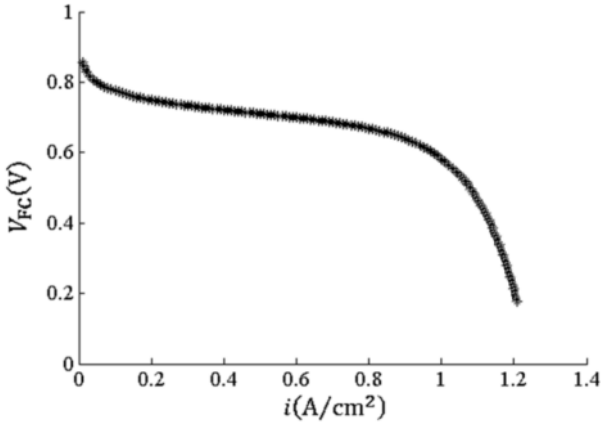
پارامتر	مقادیر بدست آمده از مدل‌سازی	مقادیر بدست آمده در مرجع [۱۶]	درصد خطا
کارایی حباب تر	٪۱۰۹/۱	٪۱۱۵	٪۵/۴
کارایی نقطه شبنم	٪۷۵	٪۷۸	٪۴
ظرفیت سرمایشی (وات)	۶۹۳/۴	۶۳۶	٪۸/۲۷
ضریب عملکرد	۲/۵۱۲	۲/۳	٪۸/۴۳
اگزرژتیک COP_{ex}	۰/۳۳۷۸	۰/۳۴۶۸	٪۲/۴۵
بازده اگزرژی	٪۱۴/۱۱	٪۱۳/۹۳	٪۱/۲۷
بار حرارتی کویل گرمایشی (وات)	۲۰۹۹	-	-



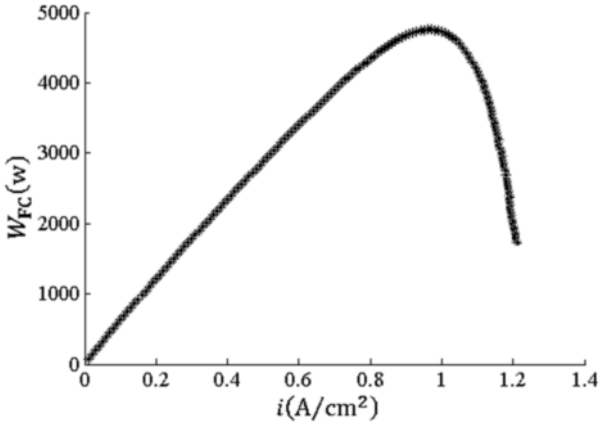
شکل ۴ نمودار چگالی جریان بر حسب اتلافات ولتاژ

نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ واقعی خروجی از پشته پیل سوختی پلیمری در شکل ۵ نشان داده شده است. ولتاژ واقعی خروجی از پشته پیل سوختی پلیمری در رنج بین ۰/۶ تا ۰/۷ ولت قرار دارد. که در این مقاله مقدار عددی ۰/۶۷۸۷ ولت بدست آمده است. همان طور که از شکل ۵ مشهود است با افزایش چگالی جریان، ولتاژ خروجی از پشته پیل سوختی پلیمری به علت اتلافات قطبش کاهش می‌یابد. در چگالی جریان صفر بالاترین و در چگالی جریان ۱/۲ پایین‌ترین مقدار ولتاژ مشاهده می‌شود.

نمودار چگالی جریان بر حسب قدرت خروجی از پیل سوختی پلیمری در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش چگالی جریان قدرت خروجی از پیل سوختی به صورت معادله یک خط راست افزایش یافته و در چگالی جریان بین ۰/۸ - ۱ به ماکزیمم رسیده و سپس شدیداً کاهش می‌یابد.



شکل ۵ نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ خروجی از پشته پیل سوختی پلیمری



شکل ۶ نمودار چگالی جریان بر حسب قدرت خروجی از پیل سوختی پلیمری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

از دلایل افت شدید توان در چگالی بالا می‌توان به افت غلظتی اشاره کرد که قدرت خروجی با ورود به ناحیه افت غلظتی، به شدت کاهش می‌یابد.

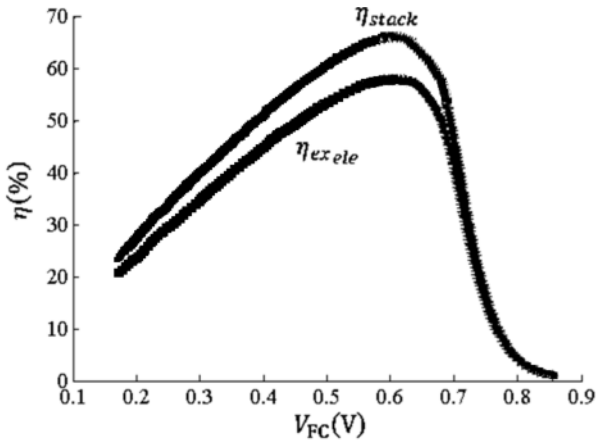
شکل ۷ نمودار ولتاژ خروجی از پشته پیل سوختی پلیمری در مقابل راندمان‌های انرژی و اگزرژی الکتریکی پشته پیل سوختی پلیمری را نشان می‌دهد. در بازه ولتاژ خروجی بین ۰/۵ تا ۰/۶ ولت بالاترین راندمان الکتریکی از پشته پیل سوختی پلیمری قابل حصول است. به طوری کلی راندمان انرژی الکتریکی پیل‌های سوختی پلیمری در رنج بین ۳۵- ۶۵ درصد قرار دارد. در ولتاژ ۰/۶۷۸۷ ولت مقدار راندمان‌های انرژی و اگزرژی الکتریکی پشته پیل سوختی با استفاده از مدل‌سازی به ترتیب برابر با ۴۵/۸۵٪ و ۳۹/۲۶٪ بدست آمد.

در نمودار ولتاژ خروجی بر حسب راندمان الکتریکی پشته پیل سوختی پلیمری در ولتاژهای بالاتر از ۱ ولت افت شدیدی در راندمان الکتریکی پشته پیل سوختی ملاحظه می‌شود.

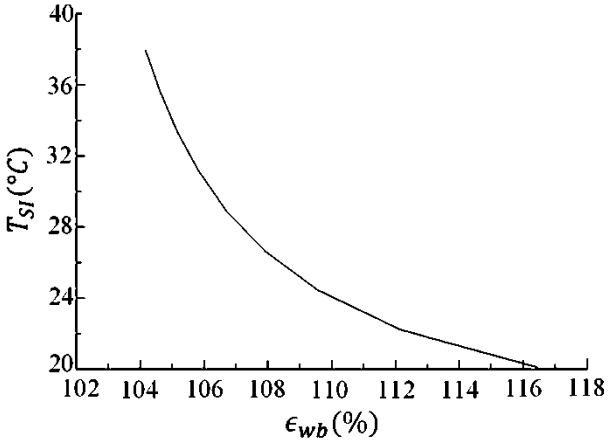
از دلایل افت راندمان پشته پیل سوختی پلیمری می‌توان به اتلافات قطبش اشاره کرد که شامل اتلافات فعال‌سازی، اهمی و غلظتی می‌باشند. به طور کلی راندمان پشته الکتریکی پیل سوختی در رنج بین ۳۵ تا ۶۵ درصد قرار دارد.

در شکل ۸ نمودار کارایی حباب تر بر حسب دمای هوای ورودی به مبدل نشان داده شده است. این تغییرات دمای هوای ورودی بین ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. کارایی حباب تر می‌تواند بزرگتر از ۱ (یا ۱۰۰٪) باشد و نشان‌دهنده توانایی چرخه میسوتسنکو برای خنک کردن هوا به زیر دمای حباب تر با کمینه کردی (یا بدون) رطوبت اضافی برای تأمین کردن جریان هوای خروجی است. در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد کارایی حباب تر برابر ۱۰۹/۱٪ است.

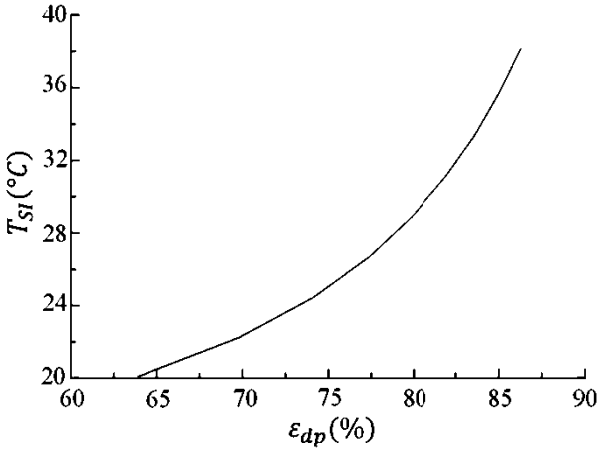
در شکل ۹ نمودار کارایی نقطه شبنم چرخه میسوتسنکو بر حسب دمای هوای ورودی نشان داده شده است. کارایی نقطه شبنم بر حسب دمای هوای ورودی افزایش می‌یابد. بر عکس کارایی حباب تر که با افزایش دما کاهش می‌یابد. در دمای ۲۵ درجه یعنی دمای محیط کارایی نقطه شبنم برابر ۷۵٪ است. در شکل ۱۰ نمودار ضریب عملکرد چرخه میسوتسنکو بر حسب دمای هوای ورودی نشان داده شده است. نمودار نشان می‌دهد که ضریب عملکرد با افزایش دمای ورودی افزایش می‌یابد. در دمای ۲۵ و ۳۷ درجه ضریب عملکرد به ترتیب برابر با ۲/۵۱۲ و ۶/۶۲۷ می‌باشد.



شکل ۷ نمودار ولتاژ خروجی از پشته پیل سوختی در مقابل راندمان‌های الکتریکی انرژی و اگزرژی پشته پیل سوختی پلیمری



شکل ۸ نمودار کارایی حباب تر بر حسب دمای هوای ورودی به مبدل



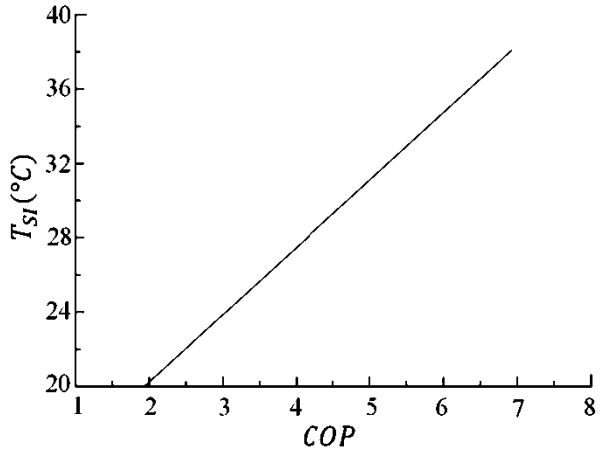
شکل ۹ نمودار کارایی نقطه شبنم چرخه میسوتسنکو بر حسب دمای هوای ورودی

همچنین در دمای ورودی یا حباب خشک محیط بالاتر از

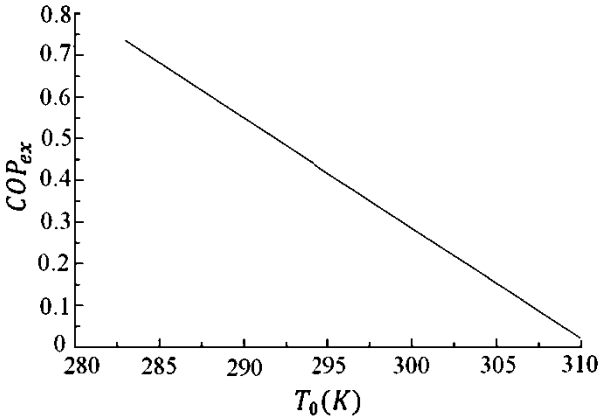
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

۴۰ درجه سانتی‌گراد ضریب عملکرد چرخه میسوتسنکو به عدد قابل توجه ۷ خواهد رسید.

بر اساس تحلیل اگزرژی، نمودار ضریب عملکرد اگزرژتیک و راندمان اگزرژی چرخه میسوتسنکو بر حسب دمای محیط به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. در دمای ۲۹۸ کلوین (۲۵ درجه سانتی‌گراد) ضریب عملکرد اگزرژتیک و راندمان اگزرژی چرخه میسوتسنکو به ترتیب برابر با ۰/۳۳۷۸و ۱۴/۱۱٪ بدست آمد. نمودار ضریب عملکرد اگزرژتیک با افزایش دمای محیط به شدت کاهش می‌یابد. از نمودار راندمان اگزرژی چرخه میسوتسنکو قابل مشاهده است که با افزایش دمای محیط از ۲۹۵ کلوین تا ۳۰۵ کلوین راندمان اگزرژی به شدت افزایش می‌یابد.

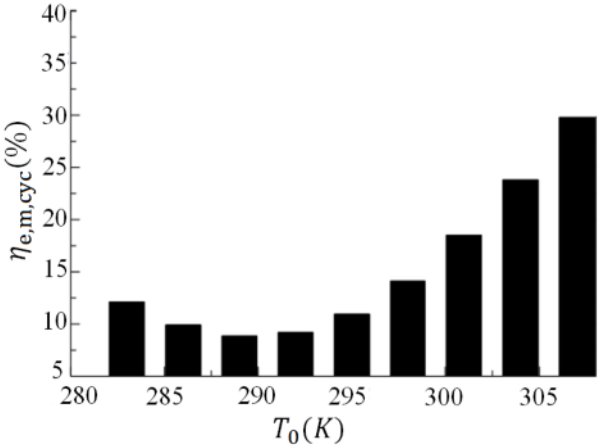


شکل ۱۰ نمودار ضریب عملکرد چرخه میسوتسنکو بر حسب دمای هوای ورودی

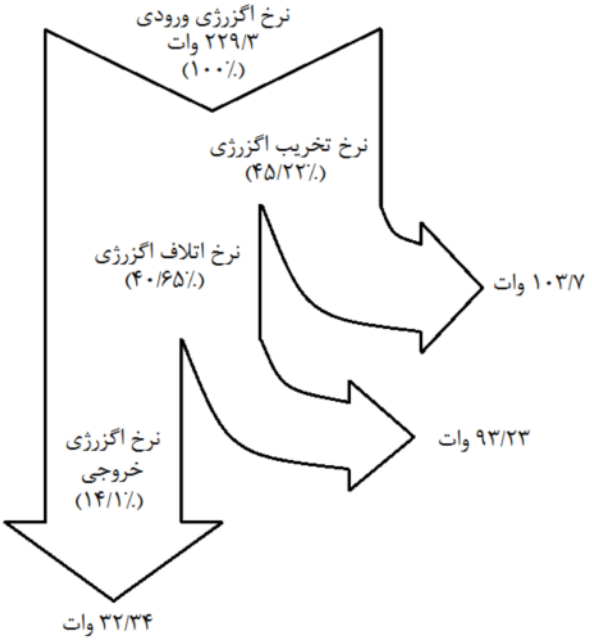


شکل ۱۱ نمودار ضریب عملکرد اگزرژتیک چرخه میسوتسنکو

در شکل ۱۳ نمودار گراسمن چرخه میسوتسنکو بر حسب دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ بار نشان داده شده است.



شکل ۱۲ نمودار راندمان اگزرژی چرخه میسوتسنکو



شکل ۱۳ نمودار گراسمن چرخه میسوتسنکو در دما و فشار محیط

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله پکیج جدید تولید چندگانه بر اساس پیل سوختی پلیمری پیشنهاد و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اصلی از این بررسی به صورت زیر خلاصه می‌شود:

– قدرت الکتریکی خروجی، حرارت تولید شده و ولتاژ واقعی خروجی از پشته انفرادی پیل سوختی پلیمری به ترتیب برابر

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

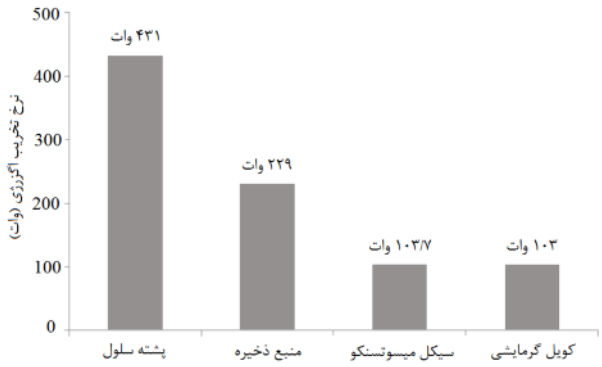
۳۳۰۷ وات، ۲۹۳۱وات و ۰/۶۷۸۷ ولت به دست آمد.

– راندمان الکتریکی پشته، راندمان تولید چندگانه، راندمان تولید توام گرمایش و راندمان تولید توام سرمایش به ترتیب برابر ۴۵/۵۸٪، ۷۷/۲۹٪، ۶۴/۶۲٪ و ۵۰/۲۱٪ می‌باشد. همچنین راندمان اگزرژی الکتریکی، راندمان اگزرژی تولید چندگانه، راندمان اگزرژی تولید توأم گرمایش و تولید توأم سرمایش به ترتیب برابر ۳۹/۲۶٪، ۴۰/۱۶٪، ۴۰/۱۳٪ و ۳۸/۷۸ می‌باشد.

– برای چرخه میسوتسنکو کارایی حباب تر و نقطه شبنم، ظرفیت سرمایشی، ضریب عملکرد انرژی و اگزرژی، بازده اگزرژی و بار حرارتی کویل گرمایشی به ترتیب برابر ۱۰۹/۱٪ و ۷۵٪، ۶۹۳/۴ وات، ۲/۵۱۲ و ۰/۳۳۷۸، ۱۴/۱۱٪ و ۲۰۹۹ وات بدست آمد.

– نرخ تخریب اگزرژی قسمت‌های اصلی پکیج یعنی پشته سلول، منبع ذخیره، چرخه میسوتسنکو و کویل گرمایشی در شکل ۱۴ بر حسب دما و فشار محیط نشان داده شده است. پشته پیل سوختی و کویل گرمایشی به ترتیب با ۴۳۱ و ۱۰۳ وات بیشترین و کمترین نرخ تخریب اگزرژی را در پکیج دارند.

همچنین پیشنهاد می‌شود که به منظور کامل شدن این طرح ارزیابی اقتصادی آن نیز در آینده مورد مطالعه قرار گیرد.



شکل ۱۴ نمودار نرخ تخریب اگزرژی پکیج در دما و فشار محیط

۱۱- مراجع

[1] Calise F., Ferruzzi G., Vanoli L., "Transient simulation of polygeneration systems based on PEM fuel cells and solar heating and cooling technologies", *Energy,* Vol. 41, No. 1, pp. 18-30, 2012.

[2] Saidi M.H., Ehyaei M.A., Abbasi A., "Optimization of a combined heat and power PEFC by exergy analysis", *Journal of Power Sources*, Vol. 143, No. 1-2,pp. 179-184, 2005.

[3] Seddiq M., Maerefat M., Mirzaei M., "Analysis of electrochemical characteristics of a proton exchange membrane fuel cell at the cathode catalyst by lattice-Boltzmann method", *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 12, No. 1, pp. 115-127, 2012. (In Persian)

[4] 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.

[5] 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.

[6] Hwang J.J., Lai L.K., Wu W., Chang W.R., "Dynamic modeling of a photovoltaic hydrogen fuel cell hybrid system", *International Journal of Hydrogen Energy,* Vol. 34, No. 23, pp. 9531-9542, 2009.

[7] Mirzaee M., Masjedian M., "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)

[8] Cecilia W., *Design and evaluation of stationary polymer electrolyte fuel cell systems*, PhD Thesis, KTH – Royal institute of technology department of chemical engineering and technology energy processes, Sweden, 2007.

[9] Spiegel C., *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB*, Academic Press, 2008.

[10] Larminie J., Dicks A., *Fuel Cell Systems Explained*, Second ed., John Wiley & Sons, 2003.

[11] Barbir F., *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, Elsevier Academic Press, 2005.

[12] Wang C., *Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems,* PhD Thesis, Montana state university, Montana, 2006.

[13] Leo T. J., Durango J. A., Navarro E., Exergy analysis of PEM fuel cells for marine applications, *Energy*, Vol. 35, No. 2, pp. 1164–1171, 2010.

[14] Yari M., Rahimi F., Evaluating the feasibility of a new indirect evaporative cooling system based on the Maisotsenko cycle in Iran, in The 21*st Annual International Conference on Mechanical Engineering*, Tehran, Iran, 2013. (In Persian)

[15] Miyazaki T., Akisawa A., Nikai I., "Thecooling performance of a building integrated evaporative cooling system driven by solar energy", *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 9, pp. 2211-2218, 2011.

[16] Caliskan H., Hepbasli A., Dincer I., Maisotsenko V., "Thermodynamic performance assessment of a

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]

[17] Caliskan H., Dincer I., Hepbasli A., "A comparative study on energetic, exergetic and environmental performance assessments of novel M-Cycle based air coolers for buildings", *Energy Conversion and Management*, Vol. 56, pp. 69–79, 2012.

[18] Duan Z., *Investigation of a Novel Dew Point Indirect Evaporative Air Conditioning System for Buildings*, PhD Thesis, University of Nottingham, the United Kingdom, 2011.

[19] Saeedi M., Mahbubi D., "Thermodynamic modeling and optimization of air conditioning units", in *The 15th Annual International Conference on Mechanical Engineering*, Tehran, Iran, 2007. (In Persian)

[20] Al-Sulaiman F. A., Hamdullahpur F., Dincer I., "Performance comparison of three trigeneration systems using organic rankine cycles", *Energy*, Vol. 36, No. 9, pp. 5741-5754, 2011.

[21] Kazempoor P., Dorer V., Weber A., "Modeling and evaluation of building integrated SOFC systems", *International Journal of Hydrogen Energy,* Vol. 36, No. 20, pp. 13241-13249, 2011.

[22] Briguglio N., Ferraro M., Brunaccini G., Antonucci V., "Evaluation of a low temperature fuel cell system for residential CHP", *International Journal of Hydrogen Energy,* Vol. 36, No. 13, pp. 8023-8029, 2011.

[23] Al-Sulaiman F. A., Hamdullahpur F., Dincer I., "Exergy analysis of an integrated solid oxide fuel cell and organic Rankine cycle for cooling, heating and power production", *Journal of Power Sources*, Vol. 195, No. 8, pp. 2346-2354, 2010.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1392.13.14.7.5]