



# مدل سازی یک طرح جدید پکیج تولید چندگانه بر اساس پیل سوختی پلیمری

مرتضی یاری<sup>۱\*</sup>، وحید رضایی<sup>۲</sup>

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 میسوتسنکو است، از دیدگاه ترمودینامیکی مدل سازی شده و مورد تحلیل قرار گرفت. پکیج تولید چندگانه شامل اجزای اصلی پیل سوختی پلیمری، چرخه میسوتسنکو، کوئل گرمایشی، مخزن ذخیره حرارت و دیگ کمکی می باشد. از قابلیت های این پکیج تولید برق، گرمایش، سرمایش تبخیری غیرمستقیم تا نقطه شبنم و آب گرم مصرفی است. عملکرد سیستم با قانون های ترمودینامیکی و مدل های ریاضی حالت پایدار ارزیابی می شود. با استفاده از نرم افزارهای متلب و EES کدنویسی انجام شده و نتایج با رسم نمودارها و جداول ارائه می شود. همچنین با استفاده از تحلیل انرژی و آگزوری راندمان های پشته پیل سوختی، راندمان های تولید هم زمان گرمایش و سرمایش و راندمان های تولید چندگانه پکیج بدست می آید. نتایج نشان می دهد 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<sup>1\*</sup>, V. Rezaee<sup>2</sup>

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.

## ۱- مقدمه

تولید چندگانه<sup>۱</sup> یا تولید چندکاره<sup>۲</sup>، معمولاً ترکیب تولید چندگانه حامل‌های انرژی (برای مثال الکتروسیته، 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<sup>۳</sup> نامیده می‌شود، می‌باشد. در مورد ترکیب گرما، سرما و تولید برق، تجهیزات تولید چندگانه سیستم‌های تری‌جنریشن تعریف می‌شوند. تکنولوژی‌های تولید توأم 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<sup>۴</sup> است. الکترولیت در این پیل سوختی یک غشای تبادل یونی<sup>۵</sup> 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 انرژی پیل سوختی غشای تبادل پروتون را انجام دادند [۴].

بن زو 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 وانگ و همکاران در مقاله خود مدل‌سازی ریاضی سیستم هیبرید پیل سوختی پلیمری-فتولتائیک را انجام دادند [۶]. فرانچسکو کالایز و همکاران شبیه‌سازی دینامیکی یک سیستم تولید چندگانه ابتکاری بر اساس 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 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 می‌کند 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 ارائه می‌شود. مدل‌سازی بر اساس قوانین ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی برای اجزای اصلی پکیج انجام خواهد شد.

4. Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC)  
5. Ion exchange membrane

1. Polygeneration  
2. Multi-generation  
3. Cogeneration

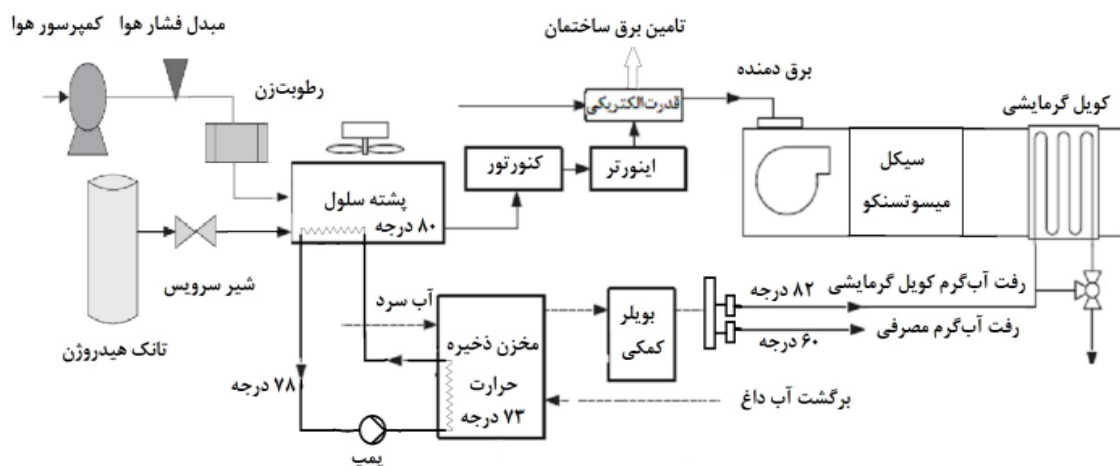
## ۲- شرح و آرایش سیستم

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 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 غیرمستقیم 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 می‌توان از یک سیرکولاسیون اجباری (جریان آب و یا روغن)



شکل ۱ پکیج تولید چندگانه بر اساس پیل سوختی پلیمری

$$P_{H_2} = (0.5P_{H_2O}^{sat}) \left[ \frac{1}{\exp\left(\frac{1.653i}{T_{FC}^{1.334}}\right) X_{H_2O}^{sat}} - 1 \right] \quad (4)$$

$$P_{O_2} = P \left[ 1 - X_{H_2O}^{sat} - X_{N_2}^{channel} \exp\left(\frac{0.291i}{T_{FC}^{0.832}}\right) \right] \quad (5)$$

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].

$$X_{H_2O}^{sat} = \frac{P_{H_2O}^{sat}}{P} \quad (6)$$

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]:

$$X_{N_2}^{channel} = \frac{(X_{N_2,in} - X_{N_2,out})}{\ln\left(\frac{X_{N_2,in}}{X_{N_2,out}}\right)} \quad (7)$$

$$X_{N_2,in} = 0.79(1 - X_{H_2O}^{sat}) \quad (8)$$

$$X_{N_2,out} = \frac{1 - X_{H_2O}^{sat}}{1 + \left(\frac{\lambda_{air}-1}{\lambda_{air}}\right)\left(\frac{0.21}{0.79}\right)} \quad (9)$$

در معادلات (۷)، (۸) و (۹)  $X_{N_2,out}$  و  $X_{N_2,in}$  به ترتیب کسر مولی نیتروژن در ورودی و خروجی، و  $\lambda_{air}$  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.

$$V_{FC} = V_N - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (10)$$

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 الکتروود - الکتروولیت نتیجه می‌شود. برای محاسبه قطبش فعال‌سازی در این مقاله از معادله باترلر-وولمر به صورت رابطه (۱۱) استفاده می‌شود [۱۰].

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

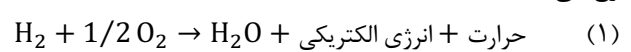
- فشارهای ثابت و برابر در کانال‌های جریان گاز پیل سوختی وجود دارد [۵].

- 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 واتر 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]:



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

$$V_N = E_{T,P} + \frac{RT_{FC}}{n_e F} \ln \left[ \frac{P_{H_2} \times P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (2)$$

در معادله (۲)  $E_{T,P}$  ولتاژ برگشت‌پذیر در شرایط استاندارد دما و فشار که برابر ۱/۲۲۹ ولت می‌باشد،  $R$  ثابت جهانی گاز،  $P_j$  فشار جزئی 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].

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

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

$$W_{fc} = N_{cell} V_{fc} I \quad (16)$$

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].

$$\dot{n}_{H_2,consumed} = \frac{N_{cell} I}{2F} \quad (17)$$

$$\dot{n}_{O_2,consumed} = \frac{N_{cell} I}{4F} \quad (18)$$

$$\dot{n}_{H_2O,generated} = \frac{N_{cell} I}{2F} \quad (19)$$

با استفاده از بالانس ترمودینامیکی انرژی حرارتی 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].

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{chem} - \dot{q}_{elec} - \dot{q}_{sens+latent} - \dot{q}_{loss} \quad (20)$$

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

$$\dot{q}_{chem} = \dot{n}_{H_2,consumed} \Delta H \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)  $\Delta H$  تغییر آنتالپی واکنش شیمیایی داخل پیل سوختی و  $\dot{n}_{H_2,consumed}$  نرخ مصرف هیدروژن بر حسب مول بر ثانیه می‌باشند.

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

$$\begin{aligned} \dot{q}_{sens+latent} = & (\dot{n}_{H_2,out} T_{FC} - \dot{n}_{H_2,in} T_0) C_{H_2} \\ & + (\dot{n}_{O_2,out} T_{FC} - \dot{n}_{O_2,in} T_0) C_{O_2} \\ & + \dot{n}_{H_2O,generated} (T_{FC} - T_0) C_{H_2O,l} \\ & + \dot{n}_{H_2O,generated} H_V \end{aligned} \quad (22)$$

$\dot{n}_i$  جریان مولی جزء  $i$ ،  $C_i$  ظرفیت حرارت مخصوص جزء  $i$ ،  $H_V$  گرمای تبخیر آب و  $T_0$  دمای محیط بر حسب کلون است. اتلاف حرارت که با جابجایی هوا و تشعشع منتقل می‌شود اساساً با فرمول‌های (۲۳) تا (۲۵) محاسبه می‌شود.

$$\dot{q}_{conv} = h_{cell} (T_{FC} - T_0) N_{cell} A_{cell} \quad (23)$$

$h_{cell}$  ضریب انتقال حرارت جابجایی هوا تقریباً برابر با  $5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{k)}$  است [۴].

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_{cell} (T_{FC}^4 - T_0^4) \quad (24)$$

$$\dot{q}_{loss} = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} \quad (25)$$

$$V_{act} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left( \frac{i}{i_0} \right) \quad (11)$$

در معادله (۱۱)،  $\alpha$  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]:

$$V_{ohm} = I R_{int} \quad (12)$$

$I$  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:

$$R_{int} = \frac{r_{mem} L}{A_{cell}} \quad (13)$$

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

$$r_{mem} = \frac{181.6 \left[ 1 + 0.03i + 0.062 \left( \frac{T_{FC}}{303} \right)^2 i^{2.5} \right]}{[\zeta - 0.634 - 3i] \exp \left[ 4.18 \left( \frac{T_{FC} - 303}{T_{FC}} \right) \right]} \quad (14)$$

در معادله (۱۴)،  $\zeta$  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 الکتروود 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].

$$V_{conc} = C \exp \left( \frac{i}{d} \right) \quad (15)$$

$C$  و  $d$  ضرایب تجربی به ترتیب برابر با  $10^{-5} \times 3$  ولت و  $0.125$  آمپر بر سانتی متر مربع می‌باشند [۱۱].

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

سوختی از آگرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر می‌شود. آگرژی فیزیکی به دما و فشار واکنش‌دهنده‌ها و محصولات در سیستم پیل سوختی وابسته است. آگرژی فیزیکی بر حسب اختلاف آنتالپی و آنروپی در شرایط استاندارد دما و فشار که به ترتیب برابر  $T_0 = 298K$  و  $P_0 = 1atm$  می‌باشند، بیان می‌شود. رابطه کلی آگرژی فیزیکی به صورت رابطه (۳۳) می‌باشد.

$$e_{x,ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (33)$$

در رابطه (۳۳)،  $h$  و  $s$  به ترتیب آنتالپی و آنروپی هستند و زیرنویس صفر دلالت بر محیط دارد. آگرژی فیزیکی یک گاز ایده‌آل با ظرفیت حرارتی ثابت  $C_p$  و نسبت گرمای ویژه  $k$  به صورت رابطه (۳۴) است:

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

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

$$e_{x,Ch} = \sum x_n e_{x,n}^{ch} + RT_0 \sum x_n \ln x_n \quad (35)$$

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

**جدول ۱** کسر مولی و آگرژی شیمیایی واکنش‌دهنده‌ها و محصولات

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

## ۵- مدل سرمایه‌ش تبخیری غیرمستقیم نقطه

### شبهنم بر اساس چرخه میسوتسنکو

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

در معادله (۲۴)  $\varepsilon$  ضریب نشر سطح که برای سطح ایده‌آل برابر یک فرض شده و  $\sigma$  ثابت بولتزمن برابر با  $5/67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$  می‌باشد [۴].

## ۴-۱- تحلیل آگرژی

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 لارمین و دس ارزیابی می‌شود. دبی جرمی هوا و سوخت ورودی هیدروژن با معادلات (۲۶) و (۲۷) ارزیابی می‌شوند [۱۰].

$$\dot{m}_{air,in} = 3.57 \times 10^{-7} \left( \frac{\lambda_{air} W_{fc}}{V_{FC}} \right) \quad (26)$$

$$\dot{m}_{H_2,in} = 1.05 \times 10^{-8} \left( \frac{W_{fc}}{V_{FC}} \right) \quad (27)$$

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:

$$\dot{m}_{air,out} = 3.57 \times 10^{-7} \left( \frac{\lambda_{air} W_{fc}}{V_{FC}} \right) - 8.29 \times 10^{-8} \left( \frac{W_{fc}}{V_{FC}} \right) \quad (28)$$

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

$$\dot{m}_{H_2O,in} = 9.34 \times 10^{-8} \left( \frac{W_{fc}}{V_{FC}} \right) \quad (29)$$

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

$$\dot{E}_{x,in} = \dot{E}_{x,out} + \dot{E}_{x,D} + \dot{E}_{x,loss} \quad (30)$$

$$\dot{E}_{x,in} = \sum_i \dot{m}_{i,in} e_x + \dot{W}_{in} + \sum_i \dot{Q}_{i,in} \left( 1 - \frac{T_0}{T_i} \right) \quad (31)$$

$$\dot{E}_{x,out} = \sum_i \dot{m}_{i,out} e_x + \dot{W}_{out} + \sum_i \dot{Q}_{i,out} \left( 1 - \frac{T_0}{T_i} \right) \quad (32)$$

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

انتقال آگرژی کل ( $e_x$ ) برای یک ماده می‌تواند مجموع آگرژی‌های فیزیکی  $e_{x,ph}$ ، شیمیایی  $e_{x,Ch}$ ، جنبشی  $e_{x,kn}$  و پتانسیل  $e_{x,pt}$  بیان شود [۴]. معمولاً در محاسبات سیستم پیل

$$\epsilon_{wb} = \frac{T_{SI} - T_{SO}}{T_{SI} - T_{wb,SI}} \quad (36)$$

$T_{SI}$  دمای هوای ورودی تحویلی،  $T_{SO}$  دمای هوای خروجی تحویلی، و  $T_{wb,SI}$  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 (37) تعریف شود [18, 17].

$$\epsilon_{dp} = \frac{T_{SI} - T_{SO}}{T_{SI} - T_{dp,SI}} \quad (37)$$

در رابطه (37)،  $\epsilon_{dp}$  کارایی نقطه شبنم و  $T_{dp,SI}$  دمای نقطه شبنم خارج شده هوای اولیه بر حسب کلین می‌باشند.

نرخ ظرفیت سرمایش چرخه میسوتسنکو  $\dot{Q}_{cooling}$  با رابطه (38) تعریف شود.

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{m}_{SO}(h_{in} - h_{SO}) \quad (38)$$

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

ضریب عملکرد انرژی چرخه میسوتسنکو می‌تواند با رابطه (39) بدست بیاید.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{cooling}}{\dot{W}_{blower}} \quad (39)$$

در رابطه (39)  $\dot{W}_{blower}$  قدرت مصرفی دمنده 276 وات [17] است.

با استفاده از حجم کنترل در نظر گرفته شده در شکل 2 و رابطه 30 بالانس انرژی چرخه میسوتسنکو به صورت زیر انجام می‌شود:

نرخ انرژی ورودی  $\dot{E}_{x,in}$  با استفاده از رابطه (40) بدست می‌آید.

$$\dot{E}_{x,in} = \dot{E}_{x,in,da} + \dot{E}_{x,in,w} \quad (40)$$

$\dot{E}_{x,in,w}$  و  $\dot{E}_{x,in,da}$  به ترتیب نرخ انرژی هوای خشک و آب ورودی هستند که با استفاده از روابط (41) و (42) بدست می‌آیند.

$$\dot{E}_{x,in,da} = \dot{m}_{da}e_{da} \quad (41)$$

$$\dot{E}_{x,in,w} = \dot{m}_w e_w = \dot{m}_{da} \omega_{SI} e_w \quad (42)$$

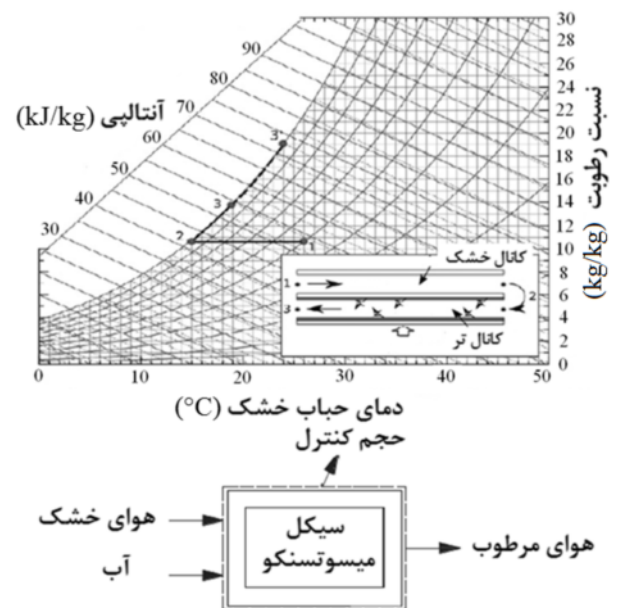
$\dot{m}_{da}$  و  $\dot{m}_w$  به ترتیب دبی جرمی هوای خشک و دبی جرمی بخار آب،  $\omega_{SI}$  نسبت رطوبت هوای ورودی، و  $e_w$  و  $e_{da}$  به ترتیب جریان ویژه انرژی کل هوای خشک و آبی‌باشنده که

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 2 نشان‌دهنده نمودار سایکرومتریک به‌مراه اصول کار مبدل چرخه ایده‌ال و حجم کنترل در نظر گرفته شده برای تحلیل انرژی می‌باشد [14, 15]. 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 [14].

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 [16].

عملکرد چرخه میسوتسنکو می‌تواند با کارایی حباب تر  $\epsilon_{wb}$  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 (36) بیان می‌شود [16].



شکل 2 نمودار سایکرومتریک به‌مراه اصول کار مبدل و حجم کنترل بر اساس چرخه میسوتسنکو [15, 14]

پارامترهای  $JP$  را برای کویل‌های خشک به صورت روابط (۴۹) تا (۵۲) ارایه کرد.

$$\left(\frac{h_o}{\rho V_{\min} c_{p,a}}\right) Pr^{2/3} = 0.00125 + 0.27 Re_{D,o}^{-0.4} \left(\frac{A_o}{A_p}\right)^{-0.15} \quad (49)$$

$$JP = Re_{D,o}^{-0.4} \left(\frac{A_o}{A_p}\right)^{-0.15} \quad (50)$$

$$Re_{D,o} = \frac{GD_o}{\mu} \quad (51)$$

$$G = \rho V_{\min} \quad (52)$$

$V_{\min}$  سرعت مینیمم هوا،  $Pr$  عدد پراانتل،  $Re$  عدد رینولدز،  $A_p$  مساحت کل سطح خارجی لوله‌های کویل،  $G$  سرعت جرمی،  $D_o$  قطر خارجی لوله، و  $\mu$  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.

$$\frac{h_i D_i}{k_w} = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (53)$$

$D_i$  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].

$$\eta_{\text{stack}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{HHV_{H_2} \dot{n}_{H_2, \text{consumed}}} \quad (54)$$

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_{\text{fc}} - 276 - 300 \quad (55)$$

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]:

$$\eta_{\text{cog,h}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}} + \dot{Q}_{\text{coil}}}{HHV_{H_2} \dot{n}_{H_2, \text{consumed}}} \quad (56)$$

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

روابط مربوط به اینها در مراجع [۱۶] و [۱۷] داده شده است. نرخ اگزرژی خروجی  $\dot{E}_{x,\text{out}}$  با استفاده از رابطه (۴۳) بدست می‌آید.

$$\dot{E}_{x,\text{out}} = \dot{m}_{\text{da}} e_t \quad (43)$$

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

$$\dot{E}_{x,\text{loss}} = \dot{Q}_{\text{cooling}} \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{SI}}}\right) \quad (44)$$

نرخ تخریب اگزرژی  $\dot{E}_{x,D}$  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.

$$\eta_{e,m,\text{cyc}} = \frac{\dot{E}_{x,\text{out}}}{\dot{E}_{x,\text{in}}} = \frac{e_t}{e_{\text{da}} + \omega_{\text{SI}} e_w} \quad (45)$$

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

$$COP_{\text{ex}} = COP \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{SI}}}\right) \quad (46)$$

## 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.

$$\dot{Q}_{\text{coil}} = U_o A_o \Delta T_m \quad (47)$$

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.

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{1-\eta}{h_o \left(\frac{A_o}{A_f} + \eta\right)} + \frac{1}{h_o}} \quad (48)$$

$A_f$  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  $\eta$  راندمان پره خشک است.

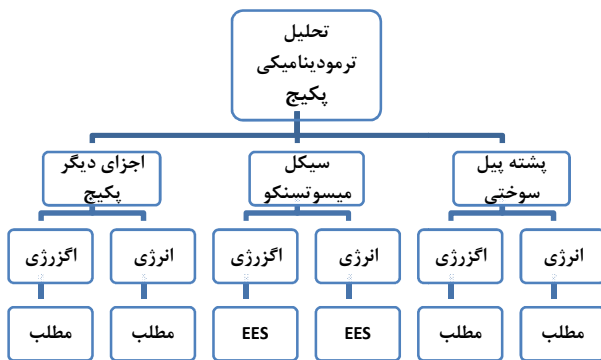
مک کوئیستون [۱۹] رابطه بین ضریب  $J$  کولبرن و



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 سرمایه‌ش 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 کوپل 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 نرم‌افزار مطلب 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 انرژی 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. فلوجارت 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 فلوجارت کلی شبیه‌سازی

$$\eta_{\text{cog,c}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}} + \dot{Q}_{\text{cooling}}}{HHV_{\text{H}_2} \dot{n}_{\text{H}_2, \text{consumed}}} \quad (57)$$

در رابطه (۵۷) زیرنویسهای  $\text{cog,c}$  نشان‌دهنده تولید توام سرمایه‌ش است. راندمان تولید چندگانه به صورت رابطه (۵۸) تعریف می‌شود [۲۲].

$$\eta_{\text{tri}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}} + \dot{Q}_{\text{cooling}} + \dot{Q}_{\text{coil}}}{HHV_{\text{H}_2} \dot{n}_{\text{H}_2, \text{consumed}}} \quad (58)$$

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

$$\eta_{\text{exel}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{[\dot{m}(e_{x,ph} + e_{x,ch})]_{\text{H}_2, \text{in}}} \quad (59)$$

راندمان انرژی تولید توام سرمایه‌ش مطابق رابطه (۶۰) تعریف می‌شود.

$$\eta_{\text{excog,c}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}} + \left(1 - \frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{cool}}}\right) \times \dot{Q}_{\text{cooling}}}{[\dot{m}(e_{x,ph} + e_{x,ch})]_{\text{H}_2, \text{in}}} \quad (60)$$

راندمان انرژی تولید توام گرمایش مطابق رابطه (۶۱) تعریف می‌شود:

$$\eta_{\text{excog,h}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}} + \left(1 - \frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{heat}}}\right) \times \dot{Q}_{\text{coil}}}{[\dot{m}(e_{x,ph} + e_{x,ch})]_{\text{H}_2, \text{in}}} \quad (61)$$

راندمان انرژی تولید چندگانه به صورت رابطه (۶۲) تعریف می‌شود:

$$\eta_{\text{extri}} = \frac{W_{\text{net}} + x + y}{[\dot{m}(e_{x,ph} + e_{x,ch})]_{\text{H}_2, \text{in}}} \quad (62)$$

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

$$x = \left(1 - \frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{cool}}}\right) \times \dot{Q}_{\text{cooling}} \quad (63)$$

$$y = \left(1 - \frac{T_{\text{amb}}}{T_{\text{heat}}}\right) \times \dot{Q}_{\text{coil}} \quad (64)$$

$T_{\text{cool}}$  و  $T_{\text{heat}}$  دمای مورد نیاز برای سرمایه‌ش 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

جدول ۲ مشخصات پیل سوختی پلیمری

پارامتر	مقدار
تعداد الکترونها 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 سانتی‌متر مربع)	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
انتالیپی هوای محصول در شرایط استاندارد (کیلوژول بر کیلومول)	-۲۱۱۲۰

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 ۰/۰۳۶۵ ولت بدست آمدند.

جدول ۳ نتایج مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری و معادلات کلی پکیج

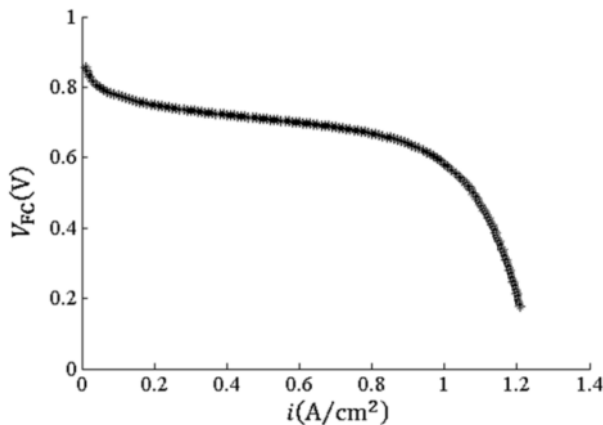
پارامتر	مقادیر بدست آمده از مدل‌سازی پکیج		مقادیر بدست آمده از مدل‌سازی پکیج	
	مقدار بدست آمده با مرجع [۵]	مقدار بدست آمده با مرجع [۴]	مقدار بدست آمده با مرجع [۵]	مقدار بدست آمده با مرجع [۴]
راندمان پشته پیل سوختی	۰/۶۹۳	۰/۸۱۰۲	۰/۴۲۱۶۷	۰/۴۵۱۸۵
ولتاژ خروجی از پشته پیل سوختی (ولت)	۰/۳۱۷۸	-	۰/۶۵۳	۰/۶۷۸۷
قدرت خروجی پیل سوختی (وات)	-	۱۲۰۰	-	۳۳۰۷
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	-	-	-	۰/۶۴۱۶۲
راندمان تولید توام گرمایش	-	-	-	۰/۵۰۲۱
راندمان تولید چندگانه پکیج	-	-	-	۰/۷۷۲۹
راندمان انرژی الکتریکی	-	۰/۲۱۹	۰/۳۸۱۱۲	۰/۳۹۲۶
راندمان انرژی الکتریکی تولید توام گرمایش	-	-	-	۰/۴۰۱۳
راندمان انرژی الکتریکی تولید توام گرمایش	-	-	-	۰/۳۸۷۸
راندمان انرژی الکتریکی تولید چندگانه	-	-	-	۰/۴۰۱۶

برای چرخه میسوتسنکو و کوئل 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 انرژی، بازده انرژی چرخه میسوتسنکو و بار حرارتی کوئل گرمایشی می‌باشند.

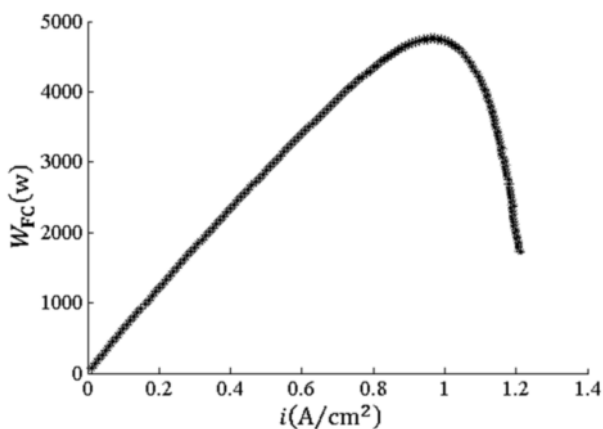
در شکل ۴ نمودار چگالی جریان بر حسب اتلافات فعال‌سازی، اهمی و غلظتی نشان داده شده که این نمودار به منحنی قطبش معروف است. شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش چگالی جریان قطبش‌های فعال‌سازی، اهمی و غلظتی افزایش می‌یابند. قطبش فعال‌سازی در هر چگالی جریانی بسیار بزرگتر از قطبش‌های دیگر می‌باشد و بنابراین در پیل 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

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



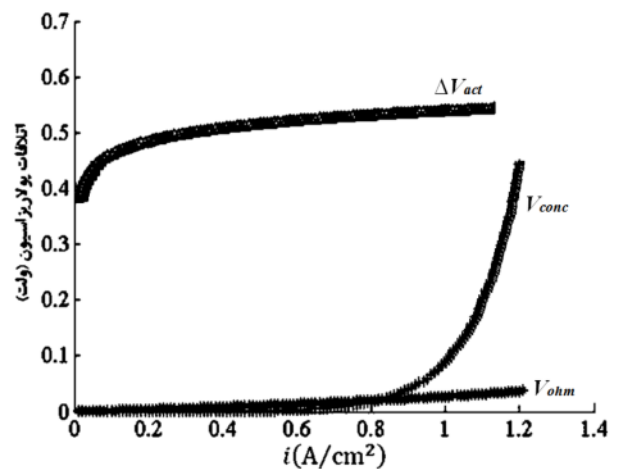
شکل ۶ نمودار چگالی جریان بر حسب قدرت خروجی از پیل سوختی پلیمری

جدول ۴ پارامترهای ورودی به چرخه میسوتسنکو و کوئل گرمایشی

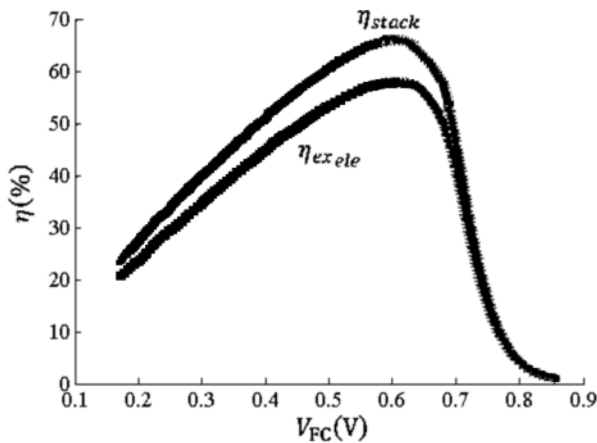
پارامتر	مقدار
دمای هوای ورودی (دمای محیط)	۲۵ درجه سانتی‌گراد
دمای هوای خروجی	۱۳ درجه سانتی‌گراد
دبی جرمی هوای خشک	۰/۰۷۴۸۳۳ کیلوگرم بر ثانیه
دبی جرمی آب	۰/۰۰۰۹۸۹ کیلوگرم بر ثانیه
نسبت رطوبت هوای ورودی	۰/۰۲۱ کیلوگرم آب بر کیلوگرم هوای خشک
دمای آب گرم ورودی به کوئل گرمایشی	۸۲ درجه سانتی‌گراد
دمای آب گرم خروجی از کوئل 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 کوئل گرمایشی

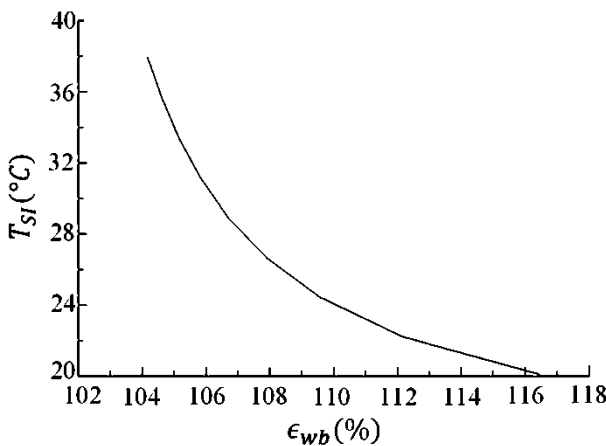
پارامتر	مقادیر بدست آمده	مقادیر بدست آمده	در مرجع [۱۶]	خطا
کارایی حباب تر	٪۱۰۹/۱	٪۱۱۵	٪۵/۴	
کارایی نقطه شبنم	٪۷۵	٪۷۸	٪۴	
ظرفیت سرمایشی (وات)	۶۹۳/۴	۶۳۶	٪۸/۲۷	
ضریب عملکرد	۲/۵۱۲	۲/۳	٪۸/۴۳	
$COP_{ex}$ اگزرتیک	۰/۳۳۷۸	۰/۳۴۶۸	٪۲/۴۵	
بازده اگزرتی	٪۱۴/۱۱	٪۱۳/۹۳	٪۱/۲۷	
بار حرارتی کوئل گرمایشی (وات)	۲۰۹۹	-	-	



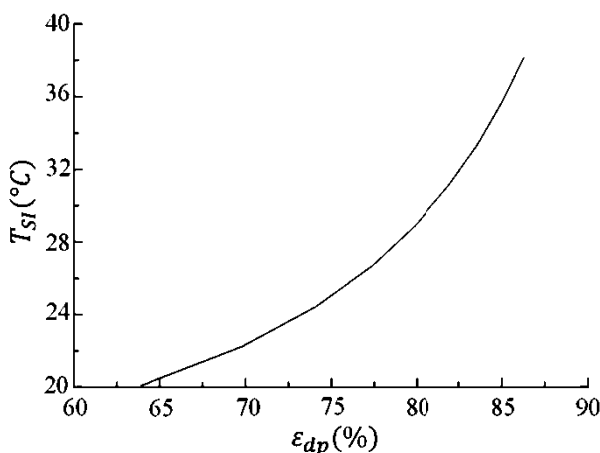
شکل ۴ نمودار چگالی جریان بر حسب اتلافات ولتاژ



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

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 انرژی 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 انرژی الکتریکی پشته پیل سوختی با استفاده از مدل‌سازی به ترتیب برابر با ۴۵/۸۵٪ و ۳۹/۲۶٪ بدست آمد.

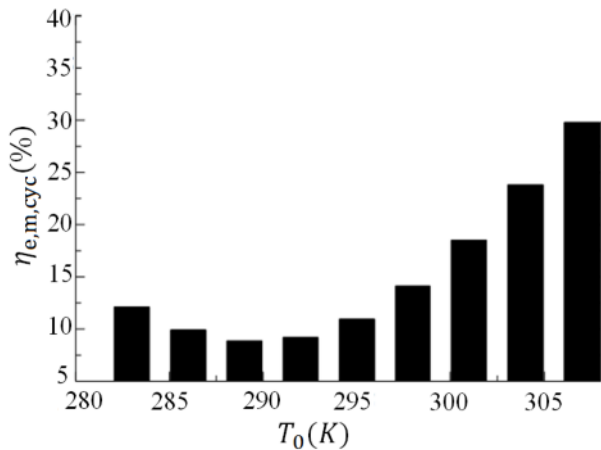
در نمودار ولتاژ خروجی بر حسب راندمان الکتریکی پشته پیل سوختی پلیمری در ولتاژهای بالاتر از ۱ ولت افت شدیدی در راندمان الکتریکی پشته پیل سوختی ملاحظه می‌شود.

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.

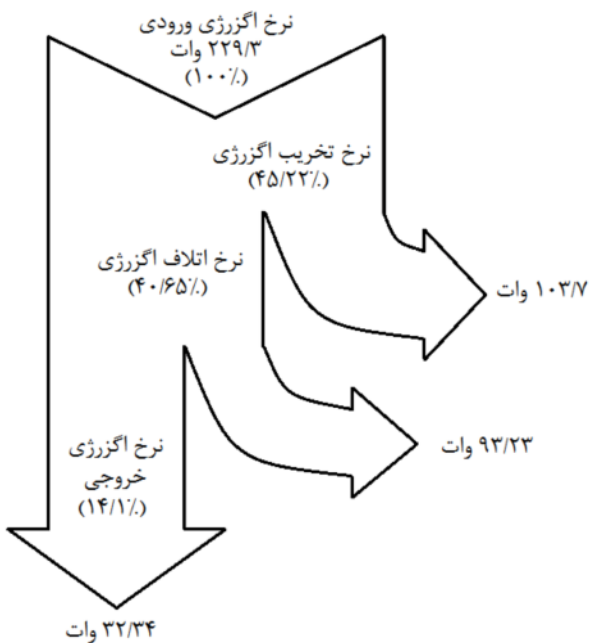
در شکل ۸ نمودار کارایی حباب تر بر حسب دمای هوای ورودی به مبدل نشان داده شده است. این تغییرات دمای هوای ورودی بین ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. کارایی حباب تر می‌تواند بزرگتر از ۱ (یا ۱۰۰٪) باشد و نشان‌دهنده توانایی چرخه میسوتسنکو برای خنک کردن هوا به زیر دمای حباب تر با کمینه کردی (یا بدون) رطوبت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

دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱ بار نشان داده شده است.



شکل ۱۲ نمودار راندمان آگزورژی چرخه میسوتسنکو



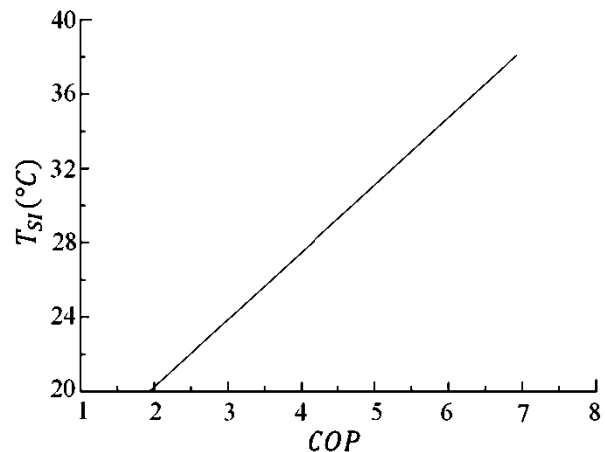
شکل ۱۳ نمودار گراسمن چرخه میسوتسنکو در دما و فشار محیط

### ۱۰- نتیجه‌گیری

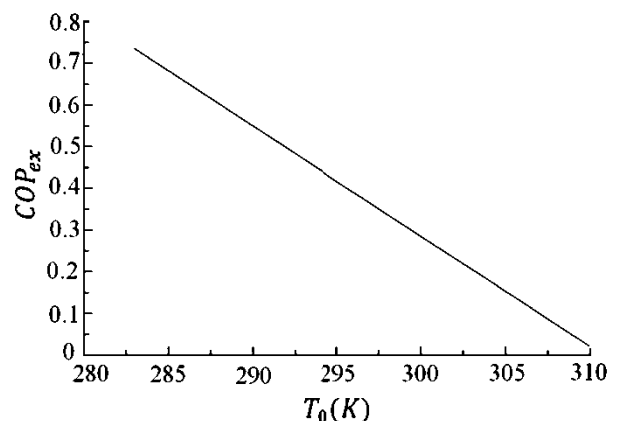
در این مقاله پکیج جدید تولید چندگانه بر اساس پیل سوختی پلیمری پیشنهاد و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اصلی از این بررسی به صورت زیر خلاصه می‌شود:  
- قدرت الکتریکی خروجی، حرارت تولید شده و ولتاژ واقعی خروجی از پشته انفرادی پیل سوختی پلیمری به ترتیب برابر

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

بر اساس تحلیل آگزورژی، نمودار ضریب عملکرد آگزورژتیک و راندمان آگزورژی 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 آگزورژتیک و راندمان آگزورژی چرخه میسوتسنکو به ترتیب برابر با ۰/۳۳۷۸ و ۱۴/۱۱٪ بدست آمد. نمودار ضریب عملکرد آگزورژتیک با افزایش دمای محیط به شدت کاهش می‌یابد. از نمودار راندمان آگزورژی چرخه میسوتسنکو قابل مشاهده است که با افزایش دمای محیط از ۲۹۵ کلوین تا ۳۰۵ کلوین راندمان آگزورژی به شدت افزایش می‌یابد.



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



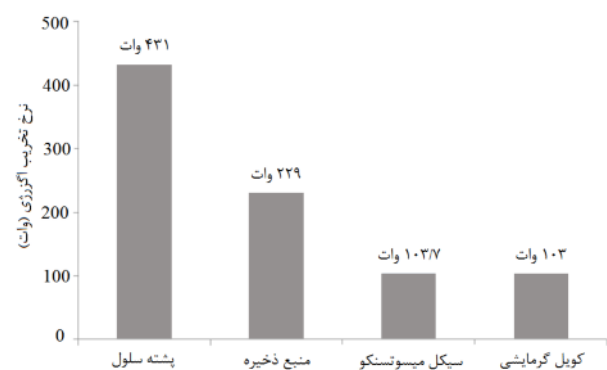
شکل ۱۱ نمودار ضریب عملکرد آگزورژتیک چرخه میسوتسنکو

در شکل ۱۳ نمودار گراسمن چرخه میسوتسنکو بر حسب

- [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 21st Annual International Conference on Mechanical Engineering*, Tehran, Iran, 2013. (In Persian)
- [15] Miyazaki T., Akisawa A., Nikai I., "The cooling 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

۳۳۰۷ وات، ۲۹۳۱ وات 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 ۰/۴۵/۵۸، ۰/۷۷/۲۹، ۰/۶۴/۶۲ و ۰/۵۰/۲۱ می‌باشد. همچنین راندمان اگزرژی الکتریکی، راندمان اگزرژی تولید چندگانه، راندمان اگزرژی تولید توام گرمایش و تولید توام سرمایش به ترتیب برابر ۰/۳۹/۲۶، ۰/۴۰/۱۶، ۰/۴۰/۱۳ و ۰/۳۸/۷۸ 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 ۰/۱۰۹/۱ و ۰/۷۵، ۰/۶۹۳/۴ وات، ۲/۵۱۲ و ۰/۳۳۷۸، ۰/۱۴/۱۱ و ۰/۲۰۹۹ 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.

- [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.
- novel air cooling cycle: Maisotsenko cycle", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, No. 4, pp. 980-990, 2011.
- [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)