

# تحلیل ترمودینامیکی (انرژی و انگرژی) و انتخاب سیال عامل مناسب برای یک سیستم یکپارچه تولید توان و هیدروژن با استفاده از چرخه ارگانیک رانکین اصلاح شده و الکترولایزر مبادله‌کن غشا پروتونی

هادی غائبی\*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

بهزاد فرهنگ

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

ابراهیم عبدی اقدم

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

## چکیده

در این تحقیق برای تولید توان یک چرخه ارگانیک رانکین تجهیز شده به مبادله‌کن بازیافت حرارت (ریژنراتور) و گرمکن سیال تغذیه استفاده شده است. همچنین برای تولید هیدروژن از یک غشاء مبادله‌کن پروتونی که توان و گرمای مورد نیاز آن از طریق چرخه رانکین آلی تأمین شده، استفاده شده است. این چرخه توسط انرژی زمین گرمایی راه‌اندازی شده است. یک مدل‌سازی جامع ترمودینامیکی (انرژی و انگرژی) برای مقایسه عملکرد چهار سیال مختلف بر روی سیستم‌های پیشنهادی صورت گرفته است. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار EES استفاده شده است. همچنین مطالعه پارامتری نیز برای بررسی تأثیر پارامترهای عملکردی مهم بر روی عملکرد انرژی و انگرژی سیستم‌های مورد بررسی انجام شده است. نتایج نشان دادند که سیال عامل R245fa با ترتیب ۳۵۱۱٪ و ۶۷٫۵۸٪ بیشترین بازده انرژی و انگرژی را دارد. سیال عامل‌های R114، R600 و R236fa نیز به لحاظ مشخصه‌های عملکردی در رده‌های بعدی قرار دارند. با افزایش دمای سیال زمین گرمایی تولید توان و هیدروژن افزایش می‌یابد اما بازده انرژی و انگرژی کاهش می‌یابد. **واژه‌های کلیدی:** انرژی زمین گرمایی، چرخه رانکین آلی، مقایسه سیال عامل‌ها، الکترولایزر مبادله‌کن غشاء پروتونی، تولید هیدروژن، تولید توان.

## Thermodynamic Analysis (Energy and Exergy) of an Integrated Cogeneration System of Power and Hydrogen using Organic Rankine Cycle and Proton Exchange Membrane Electrolyzer

H. Ghaebi

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

B. Farhang

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

E. Abdi Aghdam

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

## Abstract

In this research, an organic Rankine cycle (ORC) equipped with a regenerator and a feed fluid heater used for power production. Also a proton exchange membrane used for hydrogen production that handled by the ORC. Energy requirement of the ORC was supplied via geothermal energy. A comprehensive thermodynamic model (energy and exergy) of the integrated system was done to compare the operation of four different fluid works. The EES software was used for all of the simulations. Also, a parametric study was done to investigate the effects of the important operational parameters on the energetic and exergetic performance of the considered systems. The results showed that among the different working fluids, R245fa has the most energy and exergy efficiency with the amounts of 3.511% and 67.58%, respectively. After that, R114, R600 and R236fa have the best operating performance, respectively. By increasing of the geothermal fluid temperature, the amounts of power and hydrogen productions increased but the energy and exergy efficiencies decreased.

**Keywords:** Geothermal energy, Organic Rankine cycle, Fluid works comparison, PEM electrolyzer, Hydrogen production, Power production.

محدوده‌ی دما پائین هستند، پیش بینی می‌شود که نسل بعدی نیروگاه‌های زمین گرمایی بیشتر از منابع دما پائین استفاده خواهند کرد [۳]. چرخه ارگانیک رانکین (ORC) یک چرخه تولید توان بوده که بدلیل استفاده از سیالات ارگانیک با نقطه جوش پایین، می‌تواند با استفاده از منابع انرژی دما پائین راه‌اندازی می‌شود [۴]. هیدروژن به عنوان حامل انرژی پاک برای تولید انرژی‌های سازگار

## ۱- مقدمه

امروزه مسئله‌ی تأمین انرژی از روش‌های تجدید پذیر تبدیل به یک نیاز اساسی شده و بسیاری از کشورها بدلیل خالی شدن منابع سوخت‌های فسیلی بدنبال روش‌های تجدید پذیر برای تولید انرژی هستند. انرژی زمین گرمایی به عنوان یک روش تجدید پذیر مطرح است که از لحاظ اقتصادی ظرفیت بالایی را برای تولید توان الکتریکی دارد [۱ و ۲]. علیرغم اینکه منابع دما بالای زمین گرمایی از لحاظ اقتصادی به صرفه ترند اما بدلیل اینکه اکثر منابع زمین گرمایی در

<sup>1</sup> Organic Rankine Cycle

کان اوغلو و همکاران در یک سیستم تولید هیدروژن با منبع زمین گرمایی از چهار مدل مختلف و دو حالت برگشت پذیر و برگشت ناپذیر استفاده کردند و برای هر چهار سیستم تحلیل انرژی انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بازده انرژی مدل ۱، ۲، ۳ و ۴ بترتیب ۲۸.۵٪، ۲۹.۹٪، ۳۷.۲٪ و ۱۶.۱٪ است [۱۷].

در این تحقیق برای تولید توان یک چرخه ارگانیک رانکین تجهیز شده به مبادله‌کن بازایافت حرارت (ریژنراتور) و گرمکن سیال تغذیه استفاده شده است. این چرخه توسط انرژی زمین گرمایی راه‌اندازی شده است. همچنین برای تولید هیدروژن از یک غشاء مبادله‌کن پروتونی که توان مورد نیاز آن از طریق چرخه رانکین آلی تأمین شده، استفاده شده است. اهداف عمده این تحقیق عبارتند از:

- استفاده از انرژی زمین گرمایی به عنوان منبع انرژی دما پائین برای تولید همزمان توان و هیدروژن
- استفاده از چرخه رانکین آلی اصلاح شده با چهار سیال عامل مختلف برای تولید هیدروژن از طریق الکترولیزر و مقایسه آن‌ها
- مدلسازی جامع ترمودینامیکی سیستم تلفیق شده برای همه سیال‌ها
- مطالعه پارامتری جهت بررسی تأثیر پارامتری مهم بر روی عملکرد سیستم ترکیبی

## ۲- شرح سیستم

در کار حاضر یک چرخه رانکین آلی اصلاح شده (تجهیز شده با ریژنراتور و گرمکن سیال تغذیه) با یک الکترولیزر PEM برای تولید همزمان توان و هیدروژن ترکیب شده‌اند. شکل ۱ طرحواره سیستم مورد بررسی را نشان می‌دهد. سیستم ترکیبی از انرژی زمین گرمایی برای تبخیر سیال عامل ارگانیک در تبخیرکن (۴-۵) چرخه ORC استفاده می‌کند. سیال واسطه جهت انتقال انرژی زمین گرمایی آب است. بخشی از بخار وارد شده به توربین پس از انبساط تا فشار گرمکن سیال تغذیه، از توربین زیرکش شده (حالت ۶) و وارد گرمکن سیال تغذیه می‌شود. باقیمانده بخار تا مرحله انتهایی انبساط در توربین را طی می‌کند (حالت ۷). بخار خروجی توربین پس از عبور از مبادله‌کن گرما پیش گرمکن و انتقال حرارت به آب ورودی سیستم الکترولیزر PEM (۷-۸) وارد چگالنده شده و در آنجا تقطیر صورت می‌گیرد (۱-۸). سیال خروجی از چگالنده با افزایش فشار توسط پمپ ۱ (۱-۲) وارد گرمکن سیال تغذیه می‌شود. در گرمکن با بخار زیرکش شده از توربین گرم شده (حالت ۳) و توسط پمپ ۲ (۳-۴) به فشار تبخیرکن می‌رسد. بخشی از توان تولیدی توربین به مصرف مستقیم رسیده ( $\dot{E}_{\text{product}}$ ) و بخشی دیگر برای راه‌اندازی الکترولیزر PEM استفاده می‌شود ( $\dot{E}_{\text{electrolyzer}}$ ). آب ورودی در فشار و دمای محیط به مبادله‌کن گرما پیش گرمکن وارد شده و مقداری حرارت دریافت می‌کند (۱۴-۱۳). سپس وارد مبادله‌کن گرما سیستم الکترولیزر می‌شود و تا رسیدن به دمای الکترولیزر PEM گرم شده و در نهایت وارد الکترولیزر می‌شود (۱۴-۱۵). در الکترولیزر هیدروژن خروجی از کاتد گرمای خود را به محیط داده و در یک مخزن ذخیره می‌گردد (حالت ۱۶). مخلوط آب و اکسیژن تولید شده در آند الکترولیزر PEM (حالت ۱۷) وارد یک جداکننده اکسیژن شده که در آنجا اکسیژن از آب جدا شده و آب داغ برای تولید هیدروژن دوباره به الکترولیزر PEM برمی‌گردد.

با محیط زیست در نظر گرفته شده است که به طور عمده در صنایع نیروگاهی و شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵ و ۶]. علاوه بر این می‌تواند به طور موثر در سیستم‌های پیل سوختی با اثرات ناچیز گلخانه‌ای، تبدیل به الکتریسته شود [۷ و ۸]. امروزه هیدروژن می‌تواند از طریق منابع سوخت‌های فسیلی، فرآیندهای ریفرمینگ هیدروکربن‌ها و الکترولیز آب تولید شود اما به دلیل محدودیت منابع فسیلی و همچنین تغییرات شرایط آب و هوایی به علت نشر دی‌اکسید کربن و سایر آلاینده‌ها، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک مورد توجه قرار گرفته شده است [۹]. در این بین الکترولیز آب یک تکنولوژی پذیرفته شده برای تولید هیدروژن در مقیاس بزرگ است. تولید هیدروژن توسط الکترولیز از طریق مبادله‌کن غشاء پروتونی (PEM) دارای مزایای فراوانی از جمله اثرات زیست محیطی بسیار کم و نگهداری آسان است [۱۰]. تولید همزمان یکی از بهترین روش‌های حفظ و ذخیره انرژی بوده که امکان استفاده مؤثر از منابع انرژی و کمک به حفظ محیط زیست را فراهم می‌آورد. تولید همزمان امکان تولید برق و سایر انواع مفید انرژی (گرما، سرما، آب داغ، آب شیرین، هیدروژن و ...) را از یک منبع واحد فراهم می‌آورد [۱۱].

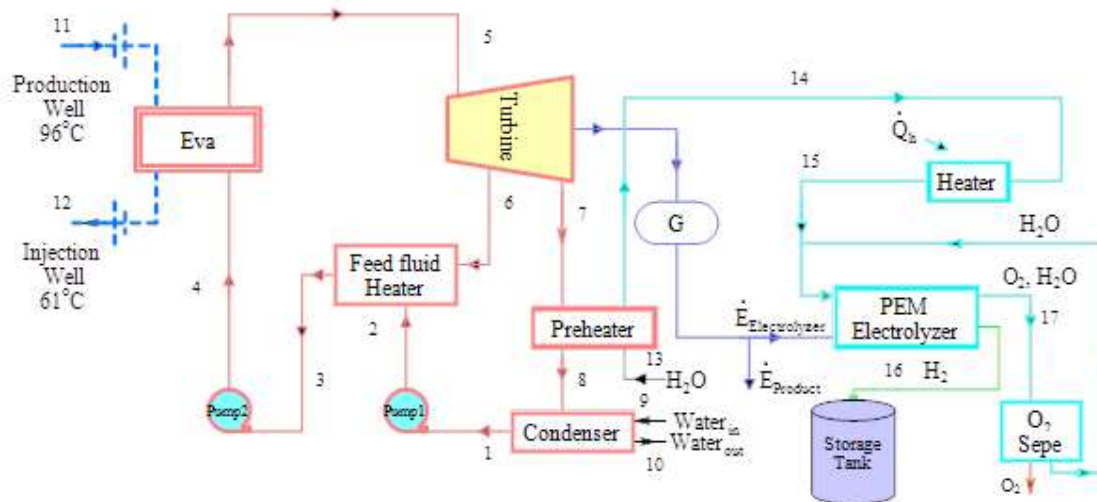
بین منابع مختلف انرژی، انرژی زمین گرمایی دارای پتانسیل قابل توجهی در تولید هیدروژن می‌باشد. کل توان یا بخشی از توان خروجی یک نیروگاه زمین گرمایی می‌تواند برای تولید هیدروژن از طریق فرایند الکترولیز آب مصرف شود. به نظر می‌رسد تولید هیدروژن بر مبنای انرژی زمین گرمایی و توسط عملیات الکترولیز آب نقش انکارناپذیری در اقتصاد تولید هیدروژن خواهد داشت [۱۲]. تحقیقات زیادی در مورد استفاده از منبع زمین گرمایی برای تولید هیدروژن وجود دارد.

راهمونی و همکاران در یک چرخه ترکیبی زمین گرمایی که با استفاده از گاز کربن دی‌اکسید به عنوان سیال انتقال دهنده گرما کار می‌کرد، برای تولید هیدروژن روش تجزیه الکتریکی آب را به کار بردند. آن‌ها تحلیل‌های تکنیکی، اقتصادی و محیطی را بر روی سیستم انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که سیستم انرژی الکتریکی با بیش از ۹۰ درصد کل هزینه بیشترین سهم هزینه را دارد. همچنین هزینه‌ی تولید هیدروژن  $8/24 \text{ \$/kg}$  است [۱۳].

بیسر و همکار بر روی یک سیستم با مبنای ترکیب انرژی زمین گرمایی و خورشیدی برای تولید هیدروژن کار کردند. آن‌ها برای تولید هیدروژن و گرمایش از انرژی خورشیدی و برای تولید توان و سرمایش از انرژی زمین گرمایی بهره بردند. با انجام تحلیل‌های انرژی و انرژی پارامتریک را بر روی سیستم آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در دمای ۲۱۰ درجه سلسیوس آب زمین گرمایی بازده انرژی و انرژی می‌تواند بترتیب به  $10/8$  و  $46/3$  درصد برسد [۱۴].

بالتا و همکاران بر روی یک سیستم تجزیه آب ترموشیمیایی مس-کلرین ترکیب شده با انرژی زمین گرمایی برای تولید هیدروژن تحلیل‌های انرژی، اقتصادی و جرمی انجام دادند. نتایج نشان داد که هزینه تولید هیدروژن به طور مستقیم و خیلی نزدیک به ظرفیت نیروگاه و بازده انرژی وابسته است [۱۵].

کای و همکاران در یک تحقیق روش‌های بهینه برای کنترل تولید هیدروژن زمانی که الکترولیزر به یک انرژی تجدید پذیر متناوب متصل است را بررسی کردند و میزان کارآمدی روش‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند [۱۶].



شکل ۱- طرحواره چرخه ارگانیک رانکین تجهیز شده به مبادله‌کن بازایفات حرارت (ریژنراتور) و گرمکن سیال تغذیه ترکیب شده با انرژی زمین گرمایی الکترولیزر مبادله‌کن غشا پروتونی

### ۳- تحلیل انرژی

تحلیل انرژی سیستم در این بخش ارائه می‌شود. نرم افزار EES به عنوان ابزار اصلی برای تمامی محاسبات استفاده می‌شود. برای آنالیز انرژی اصول بقاء جرم و انرژی برای تک‌تک اجزاء سیستم اعمال می‌شود.

با موازنه انرژی در گرمکن، کسر جرمی بخار زیرکشی از توربین بدست می‌آید.

$$X = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} \quad (6)$$

توان تولید شده خالص چرخه ORC از جمع جبری توان تولیدی توربین و مصرفی پمپ بدست می‌آید که بعد از تبدیل در ژنراتور به دو بخش تقسیم می‌شود. مقداری از آن به مصرف مستقیم ( $\dot{E}_{product}$ ) و بقیه برای تولید هیدروژن به مصرف الکترولیزر می‌رسد ( $\dot{E}_{electrolyzer}$ ).

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_t - \dot{W}_p = \dot{E}_{electrolyzer} + \dot{E}_{product} \quad (7)$$

بازده انرژی چرخه رانکین از معادله (۸) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{ORC} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{evap}} \quad (8)$$

### ۳-۲- الکترولیزر PEM

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (9)$$

ارزیابی ترمودینامیکی سیستم الکترولیزر با مدلسازی الکتروشیمیایی انجام می‌شود. انرژی کلی مورد نیاز برای سیستم از رابطه (۹) بدست می‌آید.

که در آن  $\Delta G$  تغییرات انرژی آزاد گیبس و  $T\Delta S$  انرژی گرمایی مورد نیاز است. مقادیر انرژی آزاد گیبس و آنتالپی و آنتروپی هیدروژن و اکسیژن از جداول ترمودینامیکی بدست می‌آید [۱۸]. آهنگ مولی هیدروژن تولیدی از معادله (۱۰) بدست می‌آید [۱۹].

$$\dot{N}_{H_2, out} = \frac{I}{2F} = \dot{N}_{H_2O, out} \quad (10)$$

که در آن  $I$  چگالی جریان،  $F$  ثابت فارادی و  $\dot{N}_{H_2O, out}$  دبی مولی هیدروژن و دبی مولی آبی است که وارد الکترولیزر شده است. انرژی داده شده به الکترولیزر بصورت زیر است:

$$\dot{E}_{electrolyzer} = JV \quad (11)$$

### ۳-۱- چرخه رانکین

از طریق توازن انرژی بین سیال عامل و سیال زمین گرمایی در ورودی و خروجی تبخیرکن می‌توان گرمای داده شده به تبخیرکن ORC را محاسبه کرد.

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{brine}(h_{11} - h_{12}) = \dot{m}_{ORC}(h_5 - h_4) \quad (1)$$

$\dot{m}_{brine}$  دبی جرمی آب زمین گرمایی و  $\dot{m}_{ORC}$  دبی جرمی سیال عامل چرخه ORC است.

با اعمال موازنه انرژی توان تولیدی توربین بدست می‌آید.

$$\dot{W}_t = \dot{W}_{t, isen} \eta_t = \eta_t \dot{m}_{ORC} ((h_5 - h_{6s}) + X(h_{6s} - h_{7s})) \quad (2)$$

$\eta_t$  بازده آیزنتروپیک توربین و  $X$  کسر جرمی بخار زیر کش شده از توربین است.

$$X = \frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_5} \quad (3)$$

گرمای داده شده به آب خنک کننده در چگالنده از معادله (۴) محاسبه می‌شود.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{ORC}(1 - X)(h_1 - h_8) \quad (4)$$

کار مصرفی پمپها در چرخه از معادله (۵) محاسبه می‌شود.

$$\dot{W}_p = \dot{W}_{p1} + \dot{W}_{p2} = \frac{\dot{m}_{ORC}}{\eta_p}(1 - X)(h_1 - h_{2s}) + \frac{\dot{m}_{ORC}}{\eta_p}(h_3 - h_{4s}) \quad (5)$$

که در آن  $\eta_p$  بازده آیزنتروپیک پمپها است.

$$\eta_{tot} = \frac{LHV_{H_2} \dot{N}_{H_2} + \dot{E}_{product}}{Q_{evap} + Q_{Heat, PEM}} \quad (22)$$

#### ۴- آنالیز اگزرژی

اگزرژی هر جریانی بیشینه کاری نظری قابل حصول از آن جریان است در شرایطی که آن جریان فقط با محیط تبادل گرما داشته و به فشار و دمای محیط آورده شود. از آنجا که مفهوم اگزرژی در تحلیل اگزرژی و اکونومیک استفاده خواهد شد، اگزرژی هر جریانی و تخریب اگزرژی در هر تجهیز باید محاسبه شود. اگزرژی دارای چهار مولفه است: فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل. از آنجا که تغییرات سرعت و ارتفاع برای جریانها قابل چشم‌پوشی است، پس از اگزرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر می‌شود. اگزرژی فیزیکی بیشینه کار قابل حصول از سیستم است زمانیکه سیستم با محیط در اندرکنش بوده و به تعادل دمایی و فشاری با محیط برسد [۲۰]. اگزرژی شیمیایی مربوط به اختلاف ترکیب شیمیایی سیستم از تعادل شیمیایی یک محیط مرجع است [۲۰]. اگزرژی شیمیایی در ارزیابی فرایندهای احتراقی اهمیت دارد [۱۰]. با ترکیب قوانین اول و دوم ترمودینامیک معادله موازنه اگزرژی برای هر جز سیستم بدست می‌آید.

$$\dot{E}x_Q + \sum_i \dot{m}_i ex_i = \sum_e \dot{m}_e ex_e + \dot{E}x_W + \dot{E}x_D \quad (23)$$

$\dot{E}x_D$  مربوط به اگزرژی تخریب شده است. سایر عبارات معادله فوق به صورت زیر بدست می‌آیند [۲۰].

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_r}\right) \dot{Q}_r \quad (24)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W}_r \quad (25)$$

$$ex = ex_{ph} + ex_{ch} \quad (26)$$

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (27)$$

$\dot{E}x_Q$  و  $\dot{E}x_W$  به ترتیب اگزرژی مرتبط با انتقال گرما و کار عبوری از مرزهای سیستم است.  $T$  دمای مطلق و زیرنویس 0 مربوط به شرایط مرجع محیطی است. اگزرژی شیمیایی مخصوص برای یک ترکیب گازی از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۰].

$$\dot{E}x_{ch} = \dot{m} \left[ \sum_{i=1}^n X_i ex_{ch,i} + RT_0 \sum_{i=1}^n X_i \ln X_i \right] \quad (28)$$

که  $X_i$  مربوط به جز مولی و  $ex_{ch,i}$  اگزرژی شیمیایی مخصوص مربوط به ماده مورد نظر است.

در بررسی اگزرژی اجزا اگزرژی سوخت و محصول برای هر جز سیستم تعریف می‌شود. محصول اگزرژی آن چیزی است که ما از آن جز انتظار داریم و سوخت اگزرژی مورد نیاز جهت تولید محصول است و بر این اساس معادله موازنه اگزرژی بصورت زیر نوشته می‌شود.

$$\dot{E}x_F = \dot{E}x_P + \dot{E}x_D + \dot{E}x_L \quad (29)$$

$\dot{E}x_P$ ،  $\dot{E}x_F$  به ترتیب مربوط به نرخ اگزرژی سوخت و محصول و  $\dot{E}x_L$  و  $\dot{E}x_D$  به ترتیب مربوط به تخریب اگزرژی و اتلاف اگزرژی هر جزء از سیستم است. جدول ۱ معادلات اگزرژی سوخت و محصول را برای اجزا مختلف سیستم نشان می‌دهد.

$\dot{E}_{electrolyzer}$  انرژی داده شده به سیستم الکترولیزر یا همان  $\Delta H$  و  $V$  پتانسیل الکتریکی مورد نیاز است که از معادله (۱۲) حاصل می‌شود.

$$V = V_0 + V_{ohm} + V_{act,a} + V_{act,c} \quad (12)$$

$V_0$  پتانسیل برگشت پذیر است که توسط معادله نرنست بیان می‌شود [۱۹].

$$V_0 = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{PEM} - 298) \quad (13)$$

$V_{ohm}$  و  $V_{act,a}$ ،  $V_{act,c}$  بترتیب پتانسیل فعال کننده کاتد، پتانسیل فعال کننده آند و پتانسیل اهمی است. مقاومت یونی غشا به رطوبت، ضخامت و همچنین دمای غشا بستگی دارد [۱۹]. رسانایی محلی غشای مبادله‌کن پروتونی ( $\sigma(x)$ ) از طریق رابطه (۱۴) بدست می‌آید [۱۹].

$$\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = [0.5139\lambda(x) - 0.326] \exp \left[ 1268 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T_{PEM}} \right) \right] \quad (14)$$

$x$  نشانگر عمق غشای اندازه‌گیری شده از سطح غشای کاتد و  $\lambda(x)$  مقدار آب موجود در محل  $x$  است. مقدار  $\lambda(x)$  را می‌توان از حجم آب موجود در سطح غشای الکتروود بدست آورد.

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D} x + \lambda_c \quad (15)$$

$D$  نشانگر ضخامت غشا و  $\lambda_a$  و  $\lambda_c$  بترتیب آب موجود در سطح غشای آند و کاتد هستند. همچنین مقاومت اهمی سرتاسر سیستم ( $R_{PEM}$ ) از معادله (۱۶) بدست می‌آید [۱۹].

$$R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]} \quad (16)$$

بر اساس قانون اهم، پتانسیل اهمی از معادله (۱۷) محاسبه می‌شود.

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

پتانسیل فعال کننده کاتد و آند از معادله (۱۸) محاسبه می‌شود [۱۹].

$$i = a, c V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left( \frac{j}{j_{0,i}} \right) \quad (18)$$

$j_{0,i}$  چگالی جریان مبادله‌کن است که از رابطه (۱۹) بدست می‌آید [۱۹].

$$i = a, c j_{0,i} = j_i^{ref} \exp \left( -\frac{E_{act,i}}{RT} \right) \quad (19)$$

$j_i^{ref}$  فاکتوری برای پتانسیل اولیه و  $E_{act,i}$  انرژی فعالسازی برای آند و کاتد است.

گرمای داده شده به آب در مبادله‌کن گرما الکترولیزر PEM از معادله (۲۰) محاسبه می‌شود.

$$= \dot{m}_{H_2O} Q_{Heat, PEM} \dot{Q}_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} (h_{15} - h_{14}) \quad (20)$$

که در آن  $\dot{m}_{H_2O}$  دبی جرمی آب ورودی و  $Q_{Heat, PEM}$  گرمای مخصوص داده شده به آب در مبادله‌کن گرما است.

بازده انرژی الکترولیزر PEM از معادله (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{energy, PEM} = \frac{LHV_{H_2} \dot{N}_{H_2}}{Q_{Heat, PEM} + \dot{E}_{electrolyzer}} \quad (21)$$

$LHV_{H_2}$  ارزش حرارتی پایین هیدروژن و  $\dot{N}_{H_2}$  دبی مولی هیدروژن است.

#### ۳-۳- سیستم کلی

بازده سیستم کلی از معادله (۲۲) محاسبه می‌شود:

- تمامی فرایندها در حالت پایدار هستند.
- تمامی اجزا سیستم آدیاباتیکی هستند.
- افت فشار در اجزا سیستم وجود ندارد.
- ورودی پمپها مایع اشباع است.

جدول های ۲ و ۳ به ترتیب پارامترهای لازم برای شبیه سازی چرخه ORC اصلاح شده و الکترو لایزر PEM را لیست کرده است.

**جدول ۲- اطلاعات ورودی لازم برای چرخه ORC [۲۱]**

مقدار	پارامتر
۵۰۰	فشار سیال زمین گرمایی (kPa)
۷۵	دبی سیال زمین گرمایی (kg/s)
۹۶	دمای آب خروجی از چاه برداشت (°C)
۶۱	دمای آب ورودی به چاه تزریق (°C)
۲۰۰	توان تولیدی جهت مصرف مستقیم (kW)
۱۰۰۰	فشار تبخیرکن (kPa)
۵۰۰	فشار گرمکن سیال تغذیه (kPa)
۷۵	راندمان آیزنتروپیک پمپها (%)
۸۰	راندمان آیزنتروپیک توربینها (%)

**جدول ۳- اطلاعات ورودی لازم برای الکترو لایزر [۱۰]**

مقدار	پارامتر
۱	فشار اکسیژن (atm)
۱	فشار هیدروژن (atm)
۸۰	دمای الکترو لایزر (°C)
۷۶	انرژی فعال سازی آند (kJ/mol)
۱۸	انرژی فعال سازی کاتد (kJ/mol)
۱۴	$\lambda_a$
۱۰	$\lambda_c$
۱۰۰	ضخامت غشا ( $\mu\text{m}$ )
$1.7 \times 10^5$	$J_a^{\text{ref}}$
$4.6 \times 10^3$	$J_c^{\text{ref}}$
۹۶۴۸۶	ثابت فارادی (C/mol)
۸۰	راندمان مبادله کن گرما الکترو لایزر (%)

### ۵-۲- اعتبار سنجی مدل سازی

اعتبار سنجی کار حاضر با استفاده از مراجع [۲۲] و [۱۰] بترتیب برای چرخه رانکین آلی به همراه بازیاب و گرمکن و همچنین سیستم الکترو لایزر استفاده شدند. با مقایسه مراجع و کار حاضر که بترتیب در جدول های ۴ و ۵ ارائه شده است ملاحظه می شود که انطباق خوبی بین نتایج پارامترهای محاسبه شده در کار حاضر و مراجع معتبر می باشد.

بازده اگزرژی می تواند به صورت نسبت نرخ اگزرژی محصول به اگزرژی سوخت تعریف شود.

$$\eta_{\text{exergy}} = \frac{\dot{E}X_P}{\dot{E}X_F} \quad (30)$$

**جدول ۱- معادلات مربوط به اگزرژی سوخت و محصول برای اجزای مختلف سیستم**

اجزای سیستم	اگزرژی سوخت	اگزرژی محصول
پمپ ۱	$W_{\text{pump1}}$	$\dot{E}X_2 - \dot{E}X_1$
مبادله کن گرما پیش گرمکن	$\dot{E}X_7 - \dot{E}X_8$	$\dot{E}X_{14} - \dot{E}X_{13}$
گرمکن سیال تغذیه	$\dot{E}X_2 + \dot{E}X_6$	$\dot{E}X_3$
پمپ ۲	$W_{\text{pump2}}$	$\dot{E}X_4 - \dot{E}X_3$
تبخیرکن	$\dot{E}X_{11} - \dot{E}X_{12}$	$\dot{E}X_5 - \dot{E}X_4$
توربین	$\dot{E}X_5 - \dot{E}X_6 - \dot{E}X_7$	$\dot{W}_{\text{tur}}$
چگالنده	$\dot{E}X_8 - \dot{E}X_1$	$\dot{E}X_{10} - \dot{E}X_9$
مبادله کن گرما الکترو لایزر	$\dot{E}X_q$	$\dot{E}X_{15} - \dot{E}X_{14}$
الکترو لایزر	$\dot{E}_{\text{electrolyzer}}$	$\dot{E}X_{16} + \dot{E}X_{17} - \dot{E}X_{15}$

نرخ اگزرژی مربوط به انتقال گرما در تبخیرکن چرخه رانکین و همچنین مبادله کن گرما سیستم الکترو لایزر بترتیب از روابط (۳۱) و (۳۲) محاسبه می شوند.

$$\dot{E}X_{\text{evap}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{Geothermal,mean}}}\right) \dot{Q}_{\text{evap}} \quad (31)$$

$$\dot{E}X_{\text{Heat,PEM}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{PEM}}}\right) \dot{Q}_{\text{Heat,PEM}} \quad (32)$$

در روابط فوق  $T_{\text{Geothermal,mean}}$  دمای متوسط ترمودینامیکی سیال زمین گرمایی و  $T_{\text{PEM}}$  دمای الکترو لایزر می باشند.

به این ترتیب بازده اگزرژی چرخه رانکین آلی، سیستم الکترو لایزر و همچنین کل سیستم ترکیبی بترتیب از روابط (۳۳)، (۳۴) و (۳۵) بدست می آیند.

$$\eta_{\text{exergy,ORC}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{E}X_{\text{evap}}} \quad (33)$$

$$\eta_{\text{exergy,PEM}} = \frac{\dot{E}X_{\text{H}_2}}{\dot{E}X_{\text{Heat,PEM}} + \dot{E}_{\text{electrolyzer}}} \quad (34)$$

$$\eta_{\text{exergy,tot}} = \frac{\dot{E}_{\text{product}} + \dot{E}X_{\text{H}_2}}{\dot{E}X_{\text{evap}} + \dot{E}X_{\text{Heat,PEM}}} \quad (35)$$

که در آن  $\dot{E}X_{\text{evap}}$  و  $\dot{E}X_{\text{Heat,PEM}}$  بترتیب اگزرژی تبخیرکن چرخه رانکین آلی و آب مصرفی الکترو لایزر می باشد همچنین  $\dot{E}_{\text{product}}$  بخشی از توان تولید شده توربین است که به مصرف مستقیم می رسد.

### ۵-۵- بحث و بررسی نتایج

#### ۵-۱- فرضیات و اطلاعات ورودی

برای مدل سازی الکترو لایزر غشا پروتونی تلفیق شده با چرخه رانکین آلی اصلاح شده، کدی در نرم افزار EES توسعه داده شده است. فرضیاتی برای انجام مدل سازی اعمال شده است که به قرار زیر می باشند:

تبخیرکن دارد، توان بیشتری تولید می‌کند و اتلاف انرژی بالاتری در الکترولایزر را تولید می‌کند.

جدول ۶- مشخصه‌های عملکردی سیستم

R236fa	R600	R114	R245fa	مشخصه عملکردی
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	توان مصرف شده مستقیم (kW)
۷۷۰۵	۷۷۰۵	۷۷۰۵	۷۷۰۵	گرمای تبخیرکن (kW)
۶۵۶۸	۶۴۸۴	۶۲۰۱	۶۳۱۳	گرمای چگالنده (kW)
۷۰۷۷	۸۳۲۲	۸۵۹۶	۹۴۱۵	توان توربین (kW)
۲۶/۳۵	۲۶/۲۲	۲۹/۸۳	۲۴/۸۸	توان پمپ (kW)
۴۵۶/۳	۴۱۵/۲	۶۷۴/۷	۴۷۵/۴	مبادله‌کن گرما پیش گرمکن (kW)
۳۸۰/۳	۵۰۱/۵	۳۷۳/۸	۵۴۷/۳	مبادله‌کن گرما سیستم الکترولایزر (kW)
۶۸۱/۴	۸۰۶	۸۲۹/۸	۹۱۶/۷	توان چرخه رانکین (kW)
۸۸۴۳	۱۰/۴۶	۱۰/۷۷	۱۱/۹	بازده حرارتی چرخه رانکین (%)
۱۰/۷۲	۹/۷۸	۹/۹۲۶	۹/۲۴۱	بازده حرارتی سیستم الکترولایزر (%)
۳۳/۱۵	۳/۴۲	۳/۴۵	۳/۵۱۱	بازده حرارتی کل (%)
۶۸/۸۸	۷۳/۵۱	۷۴/۳۹	۷۵/۴۵	بازده انرژی چرخه رانکین (%)
۴۱/۷۳	۳۸/۰۷	۳۸/۷۹	۳۶	بازده انرژی سیستم الکترولایزر (%)
۶۴/۸۶	۶۷/۵۴	۶۷/۵۶	۶۷/۵۸	بازده انرژی کل (%)

جدول ۷- آهنگ انرژی تلف شده اجزای مختلف سیستم

R236fa	R600	R114	R245fa	اجزای سیستم
۷/۰۵۲	۰/۰۱	۸/۹۶	۰/۰۰۲	پمپ ۱
۱۱/۹۸	۱۳/۴۲	۲۱/۱۲	۱۶/۹۴	مبادله‌کن گرما پیش گرمکن
۲۶/۹۲	۴۲	۵۴/۴۴	۸۸/۵۷	گرمکن سیال تغذیه
۱۷/۹	۰/۰۲	۱۸/۷۷	۰/۰۱	پمپ ۲
۶۸۵/۷	۵۳۴/۶	۴۴۷/۷	۳۴۳	تبخیرکن
۲۲۰/۷	۲۵۹/۶	۲۶۲/۲	۲۹۰/۹	توربین
۱۱۶/۲	۱۱۴/۱	۱۰۹/۶	۱۰۹/۲	چگالنده
۴۰/۸۷	۴۷/۱۲	۴۹/۷۹	۵۲/۱۷	مبادله‌کن گرما الکترولایزر
۳۰۱/۵	۴۰۸/۳	۴۰۴/۹	۴۹۶/۲	الکترولایزر

جدول ۴- پارامترهای عملکردی چرخه رانکین آلی به‌همراه بازیاب و گرمکن سیال تغذیه (الف) مدل حاضر (ب) مرجع [۲۲]

پارامتر	(الف)	(ب)
سیال عامل	R113	R113
بار تبخیرکن (kW)	۲۵۲	۲۵۲
بار چگالنده (kW)	۱۹۱/۸	۱۹۴/۶
توان تولیدی توربین (kW)	۶۰/۸۶	۶۱
توان مصرفی پمپ (kW)	۲/۹۵۵	۳/۴۶
توان تولید شده خالص (kW)	۵۷/۹	۵۷/۵۴
بازده انرژی (%)	۲۲/۹۸	۲۲/۸۳
دبی جرمی سیال عامل (kg/s)	۴/۵۸	۴/۵۱

جدول ۵- پارامترهای عملکردی سیستم الکترولایزر PEM (الف) مدل حاضر (ب) مرجع [۱۰]

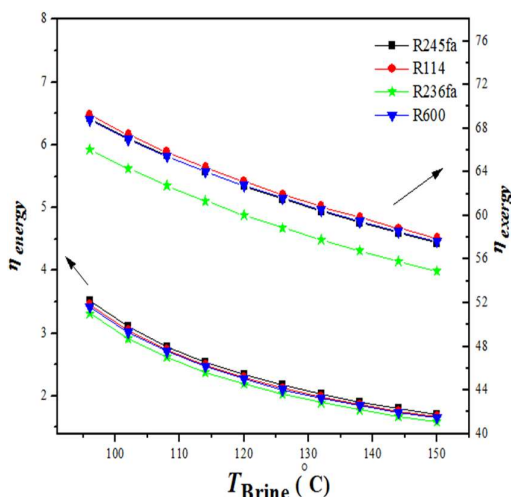
پارامتر	(الف)	(ب)
دمای الکترولایزر (°C)	۸۰	۸۰
دمای اولیه آب (°C)	۲۵	۲۵
فشار آب (atm)	۱	۱
توان خالص خروجی (kW)	۱۰۱/۴۳	۱۰۱/۹۶
بازده انرژی (%)	۳/۷۵	۳/۶
بازده انرژی (%)	۲۳/۱	۲۳/۷
بازده انرژی الکترولایزر PEM (%)	۵۷/۱۵	۵۶/۳۴
آهنگ تولید هیدروژن (kg/s)	۱/۱۹۷	۱/۲

### ۵-۳- نتایج مدل‌سازی

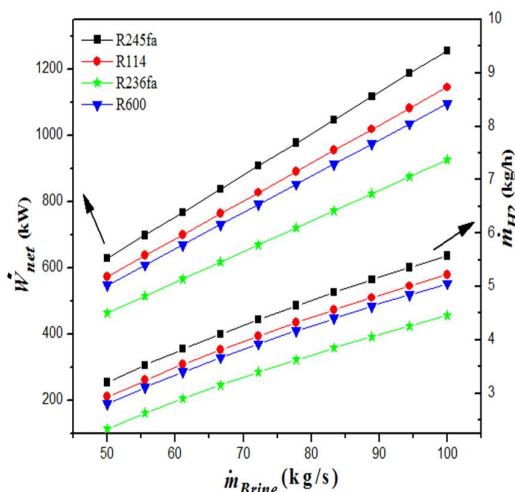
جدول ۶ مشخصه‌های عملکردی سیستم را نشان می‌دهد. تمامی این مقادیر برای چهار سیال عامل مختلف محاسبه شده است. ملاحظه می‌شود که سیال عامل R245fa به ترتیب با ۳/۵۱۱٪ و ۶۷/۵۸٪ بیش‌ترین بازده انرژی و انرژی را دارد. سیال عامل‌های R114، R600 و R236fa نیز به لحاظ مشخصه‌های عملکردی در رده‌های بعدی قرار دارند.

جدول ۷ آهنگ انرژی تلف شده اجزای سیستم را برای همه‌ی سیال عامل‌ها نشان می‌دهد. در بررسی انرژی سیستم بر اساس جدول‌های بالا ملاحظه می‌شود که تبخیرکن و الکترولایزر بیش‌ترین اتلاف انرژی را دارند به این دلیل که آهنگ جریان انرژی سوخت هر دو بسیار زیاد است. همچنین مشاهده می‌شود که با تغییر سیال عامل هر چقدر اتلاف انرژی در تبخیرکن کاهش می‌یابد اتلاف انرژی در الکترولایزر افزایش می‌یابد. دلیل این روند افزایش توان با کاهش اتلاف انرژی در تبخیرکن است. در مقایسه سیال عامل‌ها از لحاظ انرژی‌تکی ملاحظه می‌شود که سیال عامل R245fa کمترین اتلاف انرژی و سیال عامل R236fa بیشترین اتلاف انرژی را در تبخیرکن دارند در حالی که این ترتیب در الکترولایزر برعکس می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت سیال عاملی که اتلاف انرژی کمتری در

افزایش یابد و این روند موجب افزایش توان خروجی سیستم و به تبع آن تولید هیدروژن می‌شود.



شکل ۳- تغییرات بازده انرژی و اگزرژی کل سیستم بر حسب دمای سیال زمین گرمایی

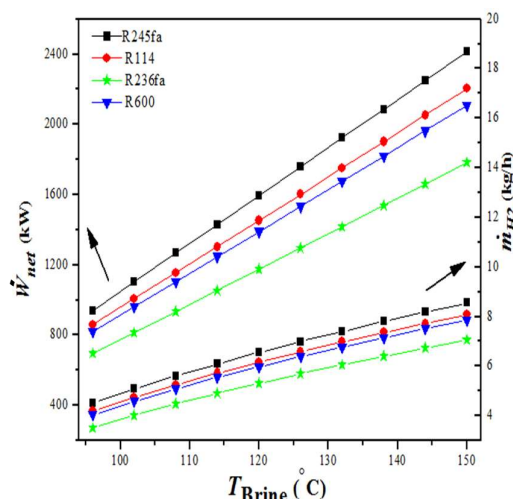


شکل ۴- تغییرات تولید هیدروژن و توان خروجی کل سیستم بر حسب دبی جرمی سیال زمین گرمایی

شکل ۵ تغییرات بازده انرژی و اگزرژی کل سیستم را بر حسب دبی سیال زمین گرمایی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش دبی سیال زمین گرمایی موجب کاهش بازده انرژی و اگزرژی می‌شود. دلیل این روند افزایش بار گرمایی تبخیرکن است که موجب کاهش بازده انرژی و اگزرژی شده است.

#### ۴-۵- مطالعه پارامتری

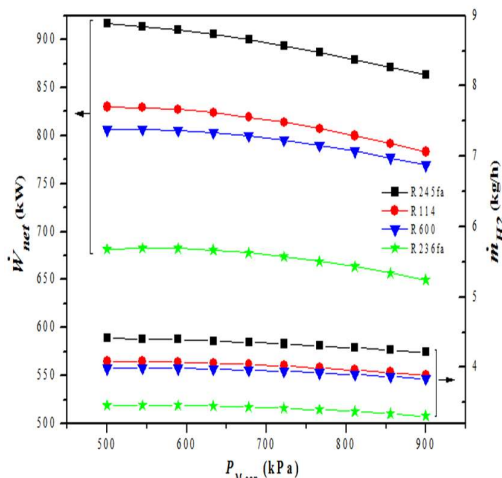
برای مطالعه اثر تغییرات دمای سیال زمین گرمایی بر روی عملکرد سیستم در شکل (۲) تغییرات تولید هیدروژن و توان خروجی سیستم بر حسب دمای سیال زمین گرمایی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش دمای سیال زمین گرمایی توان خروجی سیستم افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. با افزایش دمای سیال زمین گرمایی در ورودی تبخیرکن، با ثابت ماندن دمای خروجی و دبی جرمی سیال زمین گرمایی اختلاف آنتالپی ورودی و خروجی افزایش می‌یابد و با ثابت ماندن دمای سیال عامل در ورودی و خروجی تبخیرکن دبی جرمی سیال عامل درون چرخه افزایش می‌یابد و موجب افزایش توان خروجی سیستم شده و به تبع افزایش توان خروجی تولید هیدروژن نیز افزایش می‌یابد.



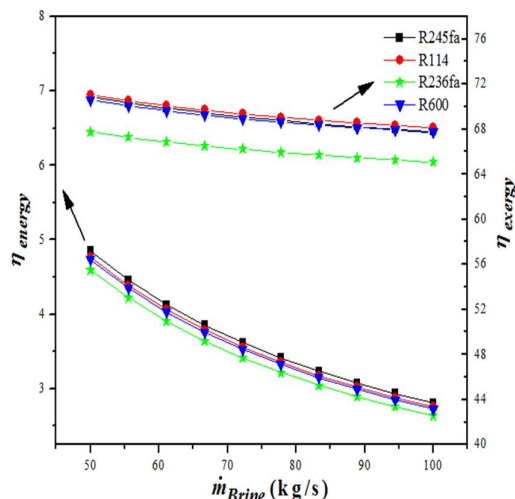
شکل ۲- تغییرات تولید هیدروژن و توان خروجی کل سیستم بر حسب دمای سیال زمین گرمایی

شکل ۳ تغییرات بازده انرژی و اگزرژی را بر حسب دمای سیال زمین گرمایی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش دمای سیال زمین گرمایی بازده انرژی کاهش می‌یابد. علیرغم اینکه افزایش دمای سیال زمین گرمایی موجب افزایش توان خروجی شده است اما این افزایش موجب افزایش گرمای داده شده به سیستم نیز می‌شود و با توجه به رابطه‌ی (۲۲) تاثیر منفی روی بازده انرژی می‌گذارد. علاوه بر آن ملاحظه می‌شود که بازده اگزرژی نیز کاهش می‌یابد. این روند نیز به دلیل افزایش جریان اگزرژی سیال زمین گرمایی در ورودی تبخیرکن است که موجب کاهش بازده اگزرژی سیستم می‌شود.

برای بررسی اثر تغییر دبی سیال زمین گرمایی بر روی عملکرد سیستم شکل ۴ تغییرات تولید هیدروژن و توان را بر حسب دبی سیال زمین گرمایی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که افزایش دبی سیال زمین گرمایی موجب افزایش توان و تولید هیدروژن شده است. افزایش دبی سیال زمین گرمایی موجب افزایش بار گرمایی تبخیرکن می‌شود و با توجه به ثابت بودن دماهای ورودی و خروجی سیال عامل درون چرخه برای جلوگیری از اتلاف این بار گرمایی باید دبی سیال عامل

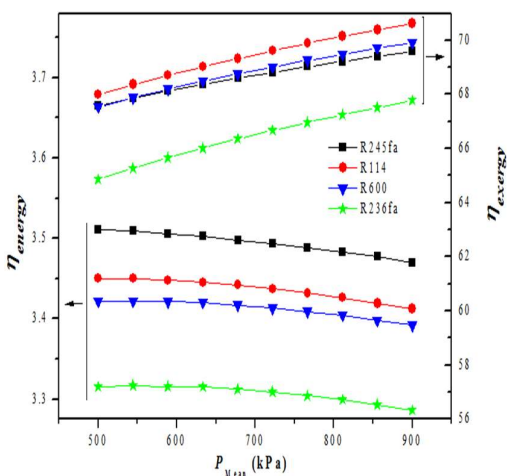


شکل ۶- تغییرات تولید هیدروژن و توان خروجی کل سیستم بر حسب فشار متوسط میانی



شکل ۵- تغییرات بازده انرژی و انرژی کل سیستم بر حسب دبی جرمی سیال زمین گرمایی

شکل ۷ تغییرات بازده انرژی و انرژی را بر حسب فشار متوسط میانی نشان می‌دهد.



شکل ۷- تغییرات بازده انرژی و انرژی کل سیستم بر حسب فشار متوسط میانی

ملاحظه می‌شود که با افزایش فشار متوسط میانی بازده انرژی کاهش می‌یابد. دلیل این روند کاهش تولید هیدروژن است که به طور مستقیم روی بازده انرژی اثر می‌گذارد. همچنین با افزایش فشار متوسط میانی شاهد افزایش بازده انرژی هستیم. با افزایش فشار متوسط میانی همانطور که قبلاً ذکر شد آنتالپی بخار زیرکس شده افزایش می‌یابد و کسر جرمی آن نیز کاهش می‌یابد. این دو عامل موجب کاهش آهنگ جریان انرژی سوخت در توربین می‌شود. علاوه بر آن افزایش فشار متوسط میانی موجب کاهش توان می‌شود و کاهش توان با توجه به روابط جدول ۱ موجب کاهش آهنگ انرژی سوخت در الکترولایزر می‌شود. عوامل ذکر شده هر کدام تأثیر مثبت روی بازده

در مقایسه تأثیر دو عامل دمای سیال زمین‌گرمایی و دبی سیال زمین‌گرمایی ملاحظه می‌شود که با تغییر دمای سیال زمین‌گرمایی مشخصه‌های عملکردی سیستم افزایش بیشتری دارد پس تأثیر دمای سیال زمین‌گرمایی روی عملکرد سیستم بیشتر از دبی جرمی سیال زمین‌گرمایی است. زیرا با افزایش دمای سیال زمین‌گرمایی آنتالپی سیال زمین‌گرمایی فقط در ورودی تبخیرکن افزایش می‌یابد در حالی که آنتالپی خروجی ثابت است و موجب افزایش بیشتر بار گرمایی تبخیرکن و همچنین جریان انرژی در ورودی توربین می‌شود این در حالی است که با افزایش دبی سیال زمین‌گرمایی این افزایش بر روی اختلاف آنتالپی سیال زمین‌گرمایی در ورودی و خروجی تبخیرکن تأثیری ندارد و به تبع آن بار گرمایی تبخیرکن افزایش کمتری داشته و جریان انرژی علاوه بر ورودی در خروجی تبخیرکن نیز افزایش می‌یابد.

در بررسی اثر فشار متوسط میانی (فشار بخار زیرکس شده از توربین) بر روی عملکرد سیستم در شکل ۶ تغییرات تولید توان و هیدروژن بر حسب فشار متوسط میانی نشان داده شده است. می‌توان دید که با افزایش فشار متوسط میانی کار خروجی کاهش می‌یابد. ملاحظه می‌شود که از فشار ۵۰۰ کیلو پاسکال تا فشار ۷۰۰ کیلو پاسکال این کاهش اندک می‌باشد و از فشار ۷۰۰ کیلو پاسکال به بعد شیب کاهش تندتر می‌شود. با افزایش فشار متوسط میانی آنتالپی بخار زیرکس شده افزایش می‌یابد و موجب کاهش کسر جرمی بخار زیرکس شده می‌شود و در نهایت با توجه به رابطه ۲ این دو عامل تأثیر منفی روی توان می‌گذارند. همچنین با کاهش توان انرژی ورودی به الکترولایزر کاهش می‌یابد و موجب کاهش چگالی جریان می‌شود پس با افزایش فشار متوسط میانی شاهد کاهش تولید هیدروژن مستقیم هستیم.



ثابت جهانی گازها (kJ/kgK)	R
مقاومت اهمی ( $\Omega$ )	$R_{PEM}$
آنتروپی مخصوص (kJ/kgK)	s
دمای محیط (K)	$T_0$
دمای الکترولايزر ( $K$ یا $^{\circ}C$ )	$T_{PEM}$
دمای متوسط ترمودینامیکی سیال زمین گرمایی (K)	$T_{Geothermal,mean}$
پتانسیل برگشت پذیر (V)	$V_0$
پتانسیل فعال کننده آند و کاتد (V)	$V_{act,i} \quad i = a, c$

**علائم یونانی**

بازده (%)	$\eta$
رسانایی محلی غشای مبادله‌کن پروتونی (s/m)	$\sigma$
آب موجود در سطح غشای آند و کاتد ( $\Omega^{-1}$ )	$\lambda$

**زیر نویس‌ها**

آند	a
سیال زمین گرمایی	brine
چگالنده	C
کاتد	c
سرد	cold
تبخیرکن	evap
ورودی	in
خروجی	out
اهمی	ohm
پمپ	p
سیال عامل	ref
توربین	t
متوسط میانی	mean

**۸-مراجع**

[1] Alhamid M. I., Daud Y., Surachman A., Sugiyono A., and Aditya H., Mahlia T., Potential of geothermal energy for electricity generation in Indonesia: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 53, No. 0, pp. 733-740, 2016.

[2] Michaelides E. E. S., Future directions and cycles for electricity production from geothermal resources, *Energy Conversion and Management*, Vol. 107, No. 0, pp. 3-9, 2016.

[3] Shokati N., Ranjbar. and Yari M., Exergoeconomic analysis and optimization of basic, dual-pressure and dual-fluid ORCs and Kalina geothermal power plants: A comparative study. *Renewable Energy*, Vol. 83, No. 0, pp. 527-542, 2015.

اگرزری می‌گذارند و موجب افزایش بازده اگرزری می‌شوند. مشاهده می‌شود که در فشارهای بالاتر سیال عامل R114 بیش‌ترین بازده اگرزری را دارد.

**۶-نتیجه‌گیری**

در این تحقیق تحلیل انرژی، اگرزری یک سیستم تولید همزمان توان و هیدروژن با تلفیق چرخه رانکین آلی اصلاح شده و الکترولايزر مبادله‌کن غشا پروتونی ارائه شده است. مدلسازی جامع ترمودینامیکی، مطالعه‌ی پارامتری نیز برای همه‌ی سیال عامل‌ها انجام شده است. نتایج مهمی که از این تحقیق بدست آمده عبارتند از:

- سیال عامل R245fa به ترتیب با ۳۵۱۱٪ و ۶۷۵۸٪ بیش‌ترین بازده انرژی و اگرزری را دارد. سیال عامل‌های R114، R600 و R236fa نیز به لحاظ مشخصه‌های عملکردی در رده‌های بعدی قرار دارند.
- سیال عامل R245fa کمترین اتلاف اگرزری و سیال عامل R236fa بیشترین اتلاف اگرزری را در تبخیرکن دارند در حالی که این ترتیب در الکترولايزر برعکس می‌باشد.
- سیال عاملی که اتلاف اگرزری کمتری در تبخیرکن دارد، توان بیشتری تولید می‌کند و اتلاف اگرزری بالاتری در الکترولايزر را تولید می‌کند.

- با افزایش دمای سیال زمین گرمایی تولید توان و هیدروژن افزایش می‌یابد اما بازده انرژی و اگرزری کاهش می‌یابد.
- با افزایش دبی جرمی سیال زمین گرمایی تولید توان و هیدروژن افزایش می‌یابد اما بازده انرژی و اگرزری کاهش می‌یابد.
- با افزایش فشار متوسط میانی تولید توان و هیدروژن و بازده انرژی کاهش می‌یابد اما بازده اگرزری افزایش می‌یابد.

**۷-نمادها**

D	ضخامت ( $\mu m$ )
$\dot{E}_{electric}$	توان داده شده به الکترولايزر (kW)
$\dot{E}_{product}$	توان داده شده به مصرف مستقیم (kW)
$\dot{E}_x$	آهنگ اگرزری (kW)
$E_{act,i} \quad i = a, c$	انرژی فعالساز آند و کاتد (kJ/mol)
F	ثابت فارادی (C/mol)
G	انرژی آزاد گیبس (J/mol)
h	آنتالپی مخصوص (kJ/kgK)
$J_{0,i} \quad i = a, c$	چگالی جریان مبادله‌کن ( $A/m^2$ )
$J_i^{ref} \quad i = a, c$	فاکتور پتانسیل اولیه آند و کاتد
J	چگالی جریان ( $A/m^2$ )
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/h یا kg/s)
$\dot{N}$	دبی مولی (mol/s)
P	فشار (atm یا kPa)
q	گرمای مخصوص (kJ/kg)
Q	آهنگ گرما (kW)

- production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant. *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, No. 0, pp. 2748-275, 2008.
- [20] Adrian Bejan., George Tsatsaronis. and Michael Moran. *Thermal design and optimization*. John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [21] Basaran A. and Ozgener L., Investigation of the effect of different refrigerants on performances of binary geothermal power plants. *Energy Conversion and Management*, Vol. 76, No. 0, pp. 483-498, 2013.
- [22] Safarian S. and Aramoun F., Energy and exergy assessments of modified Organic Rankine Cycles (ORCs). *Energy Reports*. Vol. 1, No. 0, pp. 1-7, 2015.
- [4] Kalina A.I., Combined cycle and waste-heat recovery power systems based on a novel thermodynamic energy cycle utilizing low temperature heat for power generation. *Power Generation Conference: GT Papers*, Indianapolis, Indiana, USA, 1983.
- [5] Balat M., Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems, *International journal of hydrogen energy*, vol. 33, No. 0, pp. 4013-4029, 2008.
- [6] Winter C. J., Hydrogen energy Abundant, efficient, clean: A debate over the energy system of change. *International journal of hydrogen energy*, Vol. 34, No. 0, pp. 1-52, 2009.
- [7] Dincer I., Hydrogen and Fuel Cell Systems. *Advanced Power Generation Systems*. No. 0, pp. 143-198, 2014.
- [8] Kang J.S., Kim D.H., Lee S.D., Hong S.I., Moon D.J. and Nickel-based tri-reforming catalyst for the production of synthesis gas, *Appl. Catal*, Vol. 332, No. 0, pp.153-158, 2007.
- [9] Braga L.B., Silveira J.L., Evaristo S.M., Tuna C., Machin E.B. and Pedroso D.T., Hydrogen production by biogas steam reforming: a technical, economic and ecological analysis. *Ren Sust Energy Rev*, Vol. 28, No. 0, pp. 6166-6173, 2013.
- [10] Ahmadi P., Dincer I. and Rosen. M. A., Energy and exergy analyses of hydrogen production via solar-boostered ocean thermal energy conversion and PEM electrolysis. *International Journal of Hydrogen energy*, Vol. 38, No. 0, pp. 1795-1805, 2013.
- [11] Jiang L., Wang L.W., Liu C.Z. and Wang R.Z., Experimental study on a resorption system for power and refrigeration cogeneration. *Energy*, Vol. 97, No. 0, pp. 182-190, 2016.
- [12] Momirlan M. and Veziroglu TN., The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *International Journal of Hydrogen energy*, Vol. 30, No. 0, pp. 795-802, 2005.
- [13] Soumia Rahmouni., Noureddine Settou., Nasreddine Chennouf., Belkhir Negrou. and Moustafa Houari., A technical, economic and environmental analysis of combining geothermal energy with carbon sequestration for hydrogen production. *Energy Procedia*, Vol. 35, No. 0, pp. 263-269, 2014.
- [14] Yusuf Bicer. and Ibrahim Dincer., Development of a new solar and geothermal based combined system for hydrogen production. *Solar Energy*, Vol. 127, No. 0, pp. 269-284, 2016.
- [15] Tolga Balta M., Ibrahim Dincer. and Arif Hepbasli., Exergoeconomic analysis of a hybrid copperechlorine cycle driven by geothermal energy for hydrogen production. *International journal of hydrogen energy*, vol. 36, No. 0, pp. 11300-11308, 2011.
- [16] Qiong Cai., Claire S., Adjiman. and Nigel P. Brandon., Optimal control strategies for hydrogen production when coupling solid oxide electrolyzers with intermittent renewable energies. *Journal of Power Sources*, Vol. 268, No. 0, pp. 212-224, 2014.
- [17] Mehmet Kanoglu., Ali Bolatturk. and Ceyhan Yilmaz., Thermodynamic analysis of models used in hydrogen production by geothermal energy. *International journal of hydrogen energy*, Vol. 35, No. 0, pp. 8783-8791, 2010.
- [18] Cengel, Yunus A. and Michael A. Boles., *Thermodynamics: an engineering approach*. McGraw-Hill, New York, 2006.
- [19] Meng Ni., Michael K.H. Leung. and Dennis Y.C. Leung., Energy and exergy analysis of hydrogen