



Hydrogen Production Using Proposed Cycle from Sabalan Geothermal Wells via Proton Exchange Membrane Electrolysis

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Abdolalipouradi M.¹ PhD,

Khalilarya Sh.^{*1} PhD,

Mohammadkhani F.² PhD

How to cite this article

Abdolalipouradi M, Khalilarya Sh, Mohammadkhani F. Hydrogen Production Using Proposed Cycle from Sabalan Geothermal Wells via Proton Exchange Membrane Electrolysis. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(2):267-278.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Urmia University, Urmia, Iran

²Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty of Khoj, Urmia University, Urmia, Iran

*Correspondence

Address: Engineering Faculty, Urmia University, 11km Sero Road, University Boulevard, Urmia, Iran
Phone: +98 (44) 32752741
Fax: +98 (44) 32752746
sh.khalilarya@urmia.ac.ir

Article History

Received: November 21, 2018

Accepted: May 14, 2019

ePublished: February 01, 2020

ABSTRACT

In the present study, a new combined cycle (including a two-step flash evaporation, the Kalina cycle, and a proton-exchange membrane) for simultaneous power and hydrogen generation from Sabalan geothermal wells has been proposed and analyzed from the viewpoints of energy and exergy. The effects of important parameters including separators pressure of flash evaporation, the minimum temperature difference in the pinch point, Kalina higher pressure, superheated geothermal fluid, the ratio of consumed power for hydrogen production and dead state temperature on the amount of produced hydrogen, the net generating power, thermal and exergy efficiencies of the proposed combined cycle have been studied. The results show that for the investigated case in the proposed combined cycle, the amount of the produced hydrogen, net generating power and energy, and exergy efficiency were 1536kg/hr, 12.83MW, 11.39% and 43.64%, respectively. Increasing the pressure of the separators was not effective in increasing hydrogen production, while with increasing the first separator pressure, as well as, the second separator pressure to the optimum pressure, the thermal and exergy efficiency increase. With increasing the temperature of the proton membrane electrolyzer, the produced hydrogen discharge increases and while maintaining cycle net output power, thermal and exergy efficiencies increase. Also, at the optimum point for high-pressure Kalina, the maximum amount of hydrogen production is obtained. The highest amount of exergy degradation was obtained for the protonated membrane electrolyzer, evaporator and condenser 2, respectively.

Keywords Sabalan Geothermal Power Plant; Proton-Exchange Membrane Electrolysis; Hydrogen Production; Kalina Cycle; Energy and Exergy Analyses

CITATION LINKS

[1] Proposal and thermoeconomic analysis of geothermal flash binary power plants utilizing ... [2] Exergetic analysis of various types of geothermal power ... [3] Rankine-cycle systems for harnessing power from low-grade energy ... [4] Thermodynamic comparative analyses between (organic) Rankine cycle and Kalina ... [5] The performance of the Kalina Cycle System 11(KCS-11) with low-temperature heat ... [6] Flash cycle optimization of Sabalan geothermal power plant employing exergy ... [7] Proposal and analysis of a new cycle for power generation from Sabalan geothermal ... [8] Exergy analysis of a new proposed cycle for power generation from sabalan geothermal ... [9] Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a novel combined ... [10] Exergy analysis of a new proposal combined cycle from Sabalan geothermal ... [11] A review: Exergy analysis of PEM and PEM fuel cell based CHP ... [12] Investigation of an integrated hydrogen production system based on nuclear and ... [13] Efficient hydrogen production from aqueous methanol in a PEM electrolyzer with ... [14] Simple PEM water electrolyser model and experimental ... [15] Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) ... [16] Energy and exergy analyses of hydrogen production via solar-boosted ocean thermal ... [17] Multi-objective optimization of a novel solar-based multigeneration energy ... [18] Hydrogen production using waste heat recovery of MATIANT non-emission system ... [19] Economics of hydrogen production and liquefaction by geothermal ... [20] Using various organic Rankine cycles for production of power and hydrogen by ... [21] Comparative efficiency assessment of novel multi-flash integrated geothermal [22] Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a cogeneration system for power and [23] Thermodynamics: An engineering approach [24] Exergoeconomic comparison of TLC (trilateral Rankine cycle), ORC (organic Rankine cycle) [25] Reference states [26] Thermal design and optimization [27] Comparative and parametric study of double flash and single flash/ORC combined [28] Thermodynamic performance of Kalina Cycle System 11 ...

تولید هیدروژن با استفاده از یک چرخه پیشنهادی از چاه‌های زمین گرمایی سبلان توسط الکترولایزر غشای پروتونی

مهران عبدالعلی پورعدل PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

شهرام خلیل‌آریا PhD*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

فرزاد محمدخانی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی خوی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

در این بررسی یک چرخه ترکیبی جدید (شامل تبخیر آبی دو مرحله‌ای، چرخه‌ی کالینا و مبدل غشای پروتونی) از چاه‌های زمین گرمایی سبلان برای تولید همزمان توان و هیدروژن پیشنهاد شده و مورد تحلیل انرژی و آگرژی قرار گرفته است. در ادامه اثر پارامترهای مهم از جمله فشار جداساز اول و دوم تبخیر آبی، حداقل اختلاف دمای نقطه تنگش، فشار بالای چرخه کالینا، فوق گرم کردن سیال زمین گرمایی، نسبت توان مصرف شده برای تولید هیدروژن و دمای محیط بر مقدار هیدروژن تولیدی، توان خالص تولیدی، بازده حرارتی و آگرژی چرخه ترکیبی پیشنهادی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که برای حالت مورد بررسی در چرخه ترکیبی پیشنهادی هیدروژن تولیدی ۱۵۳۶ کیلوگرم بر ساعت، توان خالص ۱۲/۸۳ مگاوات، بازده انرژی ۱۱/۳۹٪ و بازده آگرژی ۴۳/۶۴٪ به دست آمده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که افزایش فشار جداسازها در افزایش تولید هیدروژن بی‌تاثیر بوده در حالی که با افزایش فشار جداساز اول و افزایش فشار جداساز دوم تا فشار بهینه، بازده حرارتی و آگرژی افزایش می‌یابند. با افزایش دمای الکترولایزر غشای پروتونی، دبی هیدروژن تولیدی افزایش پیدا کرده و باعث می‌شود ضمن ثابت ماندن کار خالص چرخه، بازده حرارتی و آگرژی افزایش یابند، همچنین در یک نقطه بهینه برای فشار بالای کالینا، بیشترین مقدار هیدروژن تولیدی به دست آمده است. در این بررسی بیشترین مقدار تخریب آگرژی به ترتیب برای الکترولایزر غشای پروتونی، اواپراتور و کندانسور ۲ حاصل شد.

کلیدواژه‌ها: نیروگاه زمین گرمایی سبلان، الکترولایزر غشای پروتونی، تولید هیدروژن، چرخه کالینا، تحلیل انرژی و آگرژی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۲۴

*نویسنده مسئول: sh.khalilarya@urmia.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه تولید و استفاده از منابع انرژی سوخت‌های فسیلی با نیروگاه‌های هسته‌ای با آلودگی محیط زیستی علاوه بر هزینه زیاد، همراه است. از سوی دیگر انرژی زمین‌گرمایی علاوه بر تجدیدپذیری، آلودگی کمتری در مقایسه با سایر منابع تولید انرژی داشته و جزء انرژی‌های پاک به شمار می‌رود^[1]. عموماً سه روش برای تولید توان از منابع زمین‌گرمایی با توجه به دمای منبع گرم استفاده می‌شود که عبارتند از: به‌طور مستقیم، باینری، چرخه تبخیر آبی یا ترکیبی. برای دمای منبع زمین‌گرمایی بالاتر از

۲۳۵ درجه سلسیوس کاربرد مستقیم و در صورت بالابودن دمای منبع گرم از ۱۸۰ درجه سلسیوس، چرخه‌های بخار انبساط آبی تک و دو مرحله‌ای مناسب است و برای دمای زیر ۱۸۰ درجه سلسیوس از چرخه ترکیبی با باینری استفاده می‌شود^[2]. عموماً برای منابع دماپایین چرخه کالینا و چرخه رانکین آبی به‌عنوان چرخه‌های تحتانی بسیار استفاده می‌شوند^[3]. وجود یک درجه آزادی بیشتر به علت غلظت آمونیاک در مخلوط آب- آمونیاک در چرخه کالینا باعث ایجاد یک مزیت نسبت به چرخه رانکین آبی می‌شود^[4]. یکی از انواع چرخه‌های کالینا، کالینای شماره ۱۱ است، هیتارچی و همکاران کارایی چرخه کالینای ۱۱ را که از منبع زمین‌گرمایی دماپایین استفاده می‌کرد، بررسی و با چرخه رانکین آبی مقایسه کردند، طبق این بررسی چرخه کالینا نتایج بهتری را نشان داد^[5].

در ایران و در منطقه مشگین‌شهر نیروگاه زمین‌گرمایی سبلان در حال توسعه و بهره‌برداری است^[6]، عالی و همکاران با استفاده از یک چرخه ترکیبی جدید بخار آبی دو مرحله‌ای و چرخه رانکین آبی برای دو دسته چاه با اطلاعات واقعی تحلیل انرژی و آگرژی انجام دادند^[7,8]. همچنین در یک بررسی دیگر برای همین آرایش برای چهار سیال عامل آبی تحلیل آگرژی و آکونومیکی انجام داده و طبق نتایج در حالت بهینه، توان خالص حرارتی و نرخ هزینه ویژه مربوط به تولید توان برای سیال R141b به ترتیب ۱۷/۱۱ مگاوات و ۵/۶۸ دلار بر گیگاژول محاسبه شد^[9]. یک چرخه ترکیبی تولید توان جدید (شامل یک چرخه ترکیبی از دو چرخه تبخیر تک‌مرحله‌ای، چرخه دی‌اکسید کربن گذر بحرانی و رانکین آبی) مطابق با چاه‌های مطالعه قبلی توسط عبدالعلی پور و همکاران پیشنهاد شد و مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج در حالت بهینه توان خالص، بازده‌های حرارتی و آگرژی به ترتیب ۱۹۹۳۴ کیلووات، ۱۷/۰۵٪ و ۶۵/۳۸٪ محاسبه شدند^[10].

امروزه با پیشرفت جوامع و نیاز بیشتر به انرژی، استفاده از سوخت‌های فسیلی و به تبع آن انتشار گازهای دی‌اکسید کربن، مشکلات عمده‌ای از لحاظ زیست‌محیطی ایجاد کرده است. بنابراین استفاده از منبع جدید انرژی همانند هیدروژن که یک سوخت کاملاً پاک بوده، به‌صورت گسترده‌ای مورد توجه محققین قرار گرفته است^[11,12]. اخیراً استفاده از غشای مبدل پروتونی به دلیل سازگاری بیشتر با منابع زمین‌گرمایی و تولید هیدروژن خالص‌تر بیشتر مورد توجه بوده است^[13]. یک مدل ترمودینامیکی ساده برای تولید هیدروژن توسط سیستم الکترولایزر غشای پروتونی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی توسط واورده و همکاران بررسی شد^[14]. یک مطالعه تحلیلی و بررسی پارامتریک جامع برای تولید هیدروژن با استفاده از سیستم الکترولایزر غشای پروتونی توسط نی و همکاران انجام شد^[15]. احمدی و همکاران برای راه‌اندازی چرخه رانکین آبی از انرژی اقیانوس استفاده کرده و محاسبه کردند که راندمان انرژی و آگرژی و تولید هیدروژن به ترتیب ۳/۶٪، ۲۲/۷٪ و ۱/۲ کیلوگرم بر ساعت به دست می‌آیند^[16]. احمدی و همکاران در مطالعه دیگری یک چرخه ترکیبی جدید بر پایه انرژی خورشیدی برای تولید همزمان

تولید سوخت برای مصارف دیگر به صورت جانبی تمرکز نداشته است. در این بررسی یک آرایش جدید با استفاده از دو دسته چاه زمین گرمایی سبلان که به صورت تبخیر آبی دو مرحله‌ای استفاده شده و چرخه کالینا به عنوان چرخه تحتانی و تأمین کننده انرژی مورد نیاز برای فرآیند تولید هیدروژن از الکترولیزر غشای پروتونی است، مورد تحلیل انرژی و اگزرژی قرار می‌گیرد. در واقع اهداف عمده این تحقیق به صورت زیر هستند:

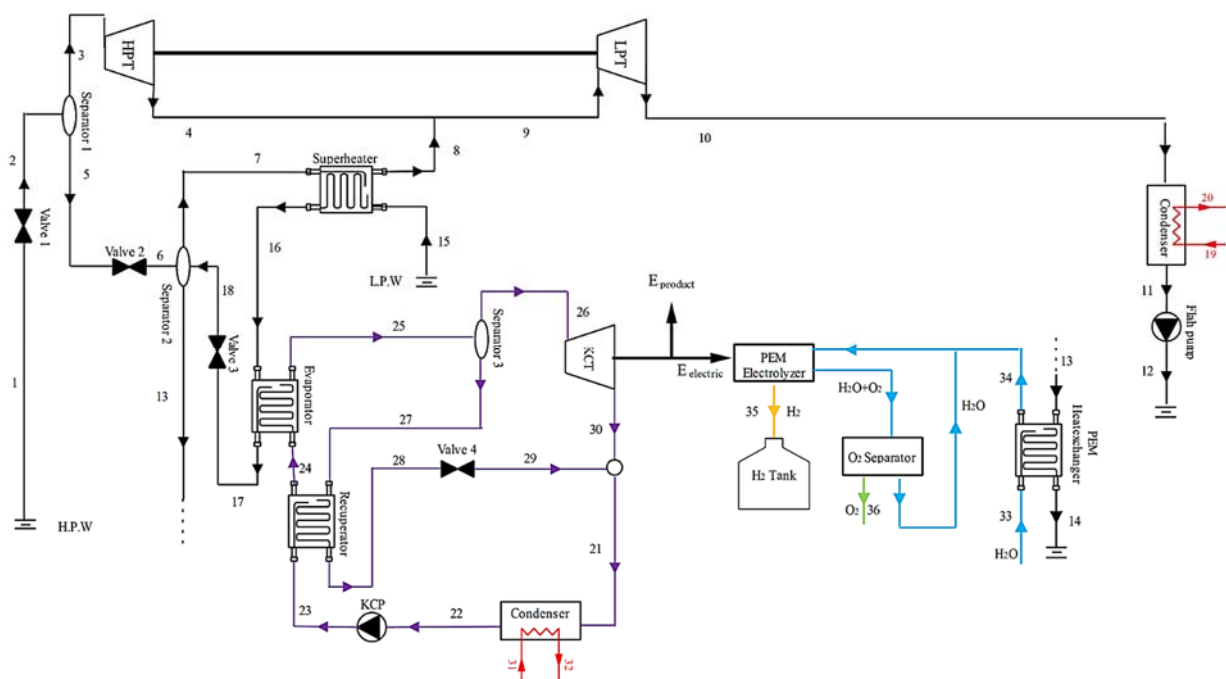
- استفاده از دو دسته چاه سبلان به عنوان منبع گرما برای تولید همزمان توان و هیدروژن.
- تولید هیدروژن به روش الکترولیزر غشای پروتونی و ماهیت بدون آلاینده‌گی و همچنین تولید اکسیژن برای سایر مصارف از طریق این روش.
- مدل سازی کامل چرخه پیشنهادی از لحاظ قانون اول و دوم ترمودینامیک.
- مطالعه جامع برای پارامترهای تاثیرگذار برای عملکرد چرخه پیشنهادی.

۲- مدل سازی و تحلیل چرخه پیشنهادی

۲-۱- توصیف چرخه پیشنهادی

شماتیک چرخه ترکیبی جدید که توانایی همزمان تولید توان و همچنین هیدروژن با استفاده از فرآیند الکترولیزر غشای پروتونی را با استفاده از چاه‌های زمین گرمایی سبلان را دارد، در شکل ۱ نشان داده شده است. این چرخه ترکیبی برای تولید توان و هیدروژن از دو دسته چاه که دارای دما و فشار متفاوت است، استفاده می‌کند. مشخصات واقعی این چاه‌ها در جدول ۱ آمده است.

توان، آب و هیدروژن را پیشنهاد دادند و برای حالت بهینه گزارش کردند که آهنگ هزینه کل صرف شده برابر با ۱۵۴ دلار بر ساعت و بازده اگزرژی ۶۰٪ حاصل می‌شوند^[17]. رنجبر و همکاران در یک بررسی به تولید هیدروژن با استفاده از بازیاب گرمای اتلافی از سیستم ماتینانت پرداخته و اثر پارامترهای مهم را مورد بررسی قرار دادند^[18]. بیلماز و همکاران به بررسی هفت آرایش مختلف زمین گرمایی و تولید هیدروژن به روش الکترولیزر پرداختند و مشاهده کردند هزینه تولید هیدروژن به ازای افزایش دمای منبع زمین گرمایی کاهش می‌یابد^[19]. غایبی و فرهنگ، چهار آرایش ترکیبی زمین گرمایی و چرخه رانکین شامل ساده، دارای بازیاب، گرمکن سیال تغذیه و بازیاب به همراه گرمکن سیال تغذیه که انرژی لازم برای الکترولیزر غشای پروتونی را فراهم می‌کند را مورد بررسی قرار دادند. آنها ملاحظه کردند که چرخه رانکین آبی به همراه بازیاب دارای گرمکن سیال تغذیه و مبدل غشای پروتونی دارای بیشترین راندمان انرژی (۳/۵۱۴٪) و اگزرژی (۶۸/۹۳٪) در مقایسه با چهار آرایش دیگر است^[20]. راتلامولار و دینسر، چند آرایش زمین گرمایی با تبخیر آبی یک، دو و چند مرحله‌ای را که با یک آرایش تولید هیدروژن ترکیب شده بود، بررسی کرده و مشاهده کردند که با افزایش دمای محیط و دمای منبع گرم بازده حرارتی و اگزرژی افزایش می‌یابد^[21]. غایبی و همکاران در مطالعه دیگری یک آرایش برای تولید هیدروژن از یک چرخه رانکین جدید به ازای چهار سیال عامل را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند برای R245fa بیشترین بازده حرارتی ۳/۵۱۱٪ و بازده اگزرژی ۶۷/۵۸٪ حاصل شد^[22]. در بررسی‌های گذشته فقط به تولید توان از چاه‌های نیروگاه سبلان پرداخته شده بود و تاکنون هیچ مطالعه‌ای علاوه بر تولید توان به



شکل ۱) شماتیک سیستم ترکیبی پیشنهادی

مشخصات	چاه اول	چاه دوم
فشار (kPa)	۱۰۷۲	۷۰۰
دما (°C)	۱۸۳	۱۶۵
دبی جرمی (kg/s)	۵۷	۵۳
آنتالپی (kJ/kg)	۱۱۵۰	۱۱۰۰

آب زمین‌گرمایی پس از اختناق در شیر انبساط اول وارد جداساز اول شده تا مایع و بخار از هم جدا شوند. از بخار اشباع در توربین فشاریلا برای تولید توان استفاده می‌شود. مایع اشباع خارج‌شده از جداساز اول وارد شیر انبساط دوم شده تا ضمن افت فشار، باعث تولید مخلوط دو فازی شود. همچنین سیال زمین‌گرمایی خروجی از چاه‌های زمین‌گرمایی فشارپایین، بخار اشباع خروجی از جداساز دوم را به بخار مافوق‌گرم تبدیل می‌کند (مراحل ۷ و ۸). سیال زمین مافوق‌گرم ضمن مخلوط با سیال خروجی از توربین فشاریلا، وارد توربین فشارپایین شده و ضمن انجام کار وارد کندانسور شده تا ضمن تبدیل به مایع اشباع توسط پمپ، به فشار بالای محیط رسیده و به چاه تزریق شود. سیال زمین‌گرمایی پس از فوق‌گرمکن وارد اواپراتور چرخه کالینا شده تا بعد از ازدست‌دادن انرژی خود، با استفاده از شیر انبساط سوم به فشار اشباع نقطه ۴ برسد. چرخه کالینا در این بررسی به‌عنوان چرخه تحتانی و مولد انرژی برای فرآیند الکترولایزر غشای پروتونی مورد استفاده قرار گرفته است. مخلوط آب- آمونیک بعد از فرآیند تبخیر (مراحل ۲۴ و ۲۵) وارد جداساز ۳ شده تا با افزایش غلظت آمونیک و آنتالپی وارد توربین چرخه کالینا شود. با استفاده از بازیاب از اتلاف انرژی مایع اشباع خروجی از جداساز ۳ جلوگیری می‌شود. سپس آب- آمونیک ضمن عبور از شیر انبساط (مراحل ۲۸ و ۲۹) به فشار پایین چرخه کالینا می‌رسد؛ جریان خارج‌شده از شیر انبساط ۴ با جریان خروجی توربین کالینا ترکیب شده و این جریان ضمن عبور و تبدیل شدن مایع اشباع در کندانسور کالینا (مراحل ۲۱ و ۲۲)، وارد پمپ کالینا شده تا فشار جریان تا فشار بالای چرخه کالینا افزایش یابد. همچنین از آب مایع اشباع خروجی از جداساز دوم برای گرمایش در مبدل حرارتی قسمت تولید هیدروژن استفاده شده و در آن، آب با دمای محیط را به دمای الکترولایزر می‌رساند (مراحل ۳۳ و ۳۴). هیدروژن خروجی از کاتد غشای پروتونی ضمن ازدست‌دادن انرژی خود به دمای محیط رسیده (مراحل ۳۴ و ۳۵) و در مخازن جهت مصرف ذخیره می‌شود. اکسیژن تولیدی در قسمت آند که به‌صورت مخلوط با آب بوده در قسمت جداساز اکسیژن از آب جدا شده و در انتها آب خروجی از جداساز برای تولید هیدروژن دوباره به الکترولایزر غشای پروتونی برمی‌گردد. به‌طور خلاصه الکترولایزر غشای پروتونی توانایی تولید هیدروژن و اکسیژن از آب ضمن مصرف توان و حرارت را دارد.

۲-۲-۲ تحلیل انرژی

۲-۲-۲-۱ مدل‌سازی قسمت زمین‌گرمایی و کالینا

چرخه ترکیبی پیشنهادی برای تولید توان و هیدروژن با در نظر گرفتن حجم کنترل برای هر یک از اجزای سیستم، بالانس جرم، بالانس

جرم و غلظت آب و آمونیک و بقای انرژی به‌ترتیب طبق روابط ۱ تا ۳ نوشته می‌شود [23].

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \quad (1)$$

$$\sum \dot{m}_i x_i = \sum \dot{m}_o x_o \quad (2)$$

$$\sum \dot{m}_i x_i = \sum \dot{m}_o x_o \quad (3)$$

توربین‌های چرخه پیشنهادی، بازده آیزنتروپیک و کار تولیدی به‌صورت زیر تعریف خواهند شد [9]:

$$\eta_T = \frac{h_i - h_o}{h_i - h_{o,s}} \quad (4)$$

$$\dot{W}_T = \dot{m}_i (h_i - h_o) \quad (5)$$

پمپ قسمت زمین‌گرمایی و کالینا، بازده آیزنتروپیک و کار مصرفی به‌صورت زیر بیان خواهند شد [9]:

$$\eta_P = \frac{v_i(P_o - P_i)}{h_o - h_i} \quad (6)$$

$$\dot{W}_P = \dot{m}_i (h_o - h_i) \quad (7)$$

بقای انرژی در مبدل‌های حرارتی به‌صورت زیر بیان می‌شود [9]:

$$\dot{m}_h (h_{i,h} - h_{o,h}) = \dot{m}_c (h_{o,c} - h_{i,c}) \quad (8)$$

در نظر گرفتن نقطه تنگش برای اواپراتور، رابطه زیر ارائه می‌شود [24].

$$\min \Delta T(T_h, T_c) - T_{PP} = 0 \quad (9)$$

۲-۲-۲-۲ مدل‌سازی الکترولایزر غشای پروتونی

همان‌طور که گفته شد از توان تولیدی توربین چرخه کالینا جهت تولید هیدروژن برای واکنش الکترو شیمیایی استفاده می‌شود در واقع a مقدار از توان توربین کالینا مطابق رابطه زیر صرف الکترولایزر می‌شود.

$$a = \frac{E_{electric}}{W_{KCT}} \quad (10)$$

کل انرژی مورد نیاز برای تولید هیدروژن از رابطه (۱۱) برای تولید هیدروژن به‌دست می‌آید [15, 16].

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (11)$$

که در آن $T\Delta S$ و ΔG به‌ترتیب انرژی گرمایی مورد نیاز در واحد ژول بر مول هیدروژن و انرژی آزاد گیبس هستند. آنتالپی، آنتروپی و مقادیر گیبس برای آب، هیدروژن و اکسیژن از جداول ترمودینامیکی به‌دست می‌آیند.

آهنگ جریان مولی هیدروژن تولیدی در فرآیند الکترولایزر غشای پروتونی از رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید [15, 16].

$$\dot{N}_{H_2, out} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2 O, reacted} \quad (12)$$

در معادله بالا، J بیانگر چگالی جریان و F بیانگر ثابت فارادی است. آهنگ جریان مولی اکسیژن تولیدی و آب باقی‌مانده به‌ترتیب طبق رابطه‌های زیر تعریف می‌شود [15, 16].

$$\dot{N}_{O_2, out} = \frac{J}{4F} \quad (13)$$

$$\dot{N}_{H_2 O, out} = \dot{N}_{H_2 O, in} - \frac{J}{2F} \quad (14)$$

انرژی الکتریکی مورد نیاز برای واکنش الکتروشیمیایی به‌صورت زیر بیان می‌شود [15, 16].

$$E_{electric} = JV \quad (15)$$

$E_{electric}$ به‌عنوان انرژی ورودی است و پارامتر V نیز به‌صورت زیر تعریف می‌شود [15, 16].

هستند. همچنین در این مطالعه که ex_{ch,O_2}^0 و ex_{ch,H_2}^0 به ترتیب برابر ۲۳۸ و ۳/۹۷۳ کیلوژول بر مول در نظر گرفته شده است [25].

با صرف نظر از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل، مقدار انرژی کل برای هر جریان از رابطه زیر حاصل می‌شود [26, 27].

$$\dot{E}x_i = \dot{E}x_{ph,i} + \dot{E}x_{ch,i} \quad (۲۶)$$

با در نظر گرفتن حجم کنترل برای هر جزء سیستم تخریب انرژی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [26, 27].

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_f - \dot{E}x_p \quad (۲۷)$$

که $\dot{E}x_f$ انرژی سوخت و $\dot{E}x_p$ انرژی محصول هستند.

۴-۲- بازده حرارتی و انرژی کل چرخه ترکیبی

کار خالص چرخه پیشنهادی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{HPT} + \dot{W}_{LPT} + \dot{W}_{KCT} - (\dot{W}_{FP} + \dot{W}_{KCP} + \dot{E}_{electric}) \quad (۲۸)$$

بازده حرارتی و انرژی طبق روابط ۲۹ و ۳۰ به دست می‌آیند [9, 22].

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{m}_{H_2} LHV}{\dot{m}_1(h_1 - h_0) + \dot{m}_{15}(h_{15} - h_0)} \quad (۲۹)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{35}}{\dot{E}x_1 + \dot{E}x_5} \quad (۳۰)$$

که LHV ارزش حرارتی پایین سوخت هیدروژن است.

۳- نتایج

۳-۱- فرضیات و داده‌های مورد استفاده

در مطالعه کنونی برای ساده‌سازی مساله فرضیات زیر در نظر گرفته شده است [7-10]:

۱- چرخه ترکیبی پیشنهادی در حالت پایا کار کرده و تلفات حرارتی و از افت فشار در مبدل‌های حرارتی و لوله‌ها صرف نظر شده است.

۲- تغییرات انرژی و انرژی پتانسیل و جنبشی ناچیز است.

۳- در چرخه کالینا برای اواپراتور حداقل اختلاف دمایی نقطه تنگش ۱۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.

۴- در چرخه کالینا غلظت آمونیاک در مخلوط ۸۰٪ و دمای کندانسورها ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شده است.

۵- برای بخار خروجی از فوق گرمکن، ۵ تا ۲۰ درجه سلسیوس فوق گرم در نظر گرفته شده است.

۶- دمای محیط و فشار محیط ۲۸۸ کلوین و ابار در نظر گرفته شده است.

۷- برای توربین‌ها و پمپ‌ها راندمان آیزن‌تروپیک به ترتیب ۸۵٪ و ۹۰٪ در نظر گرفته شده است.

۸- برای چاه‌های زمین گرمایی از شرایط واقعی سر چاه‌ها مطابق جدول ۱ استفاده شده است [7-10].

۹- پارامترهای مؤثر برای تولید هیدروژن از شبیه‌سازی الکترولیز غشای پروتونی در جدول ۲ استفاده شده است [15-18].

برای مدل‌سازی سیستم ترکیبی پیشنهادی با استفاده روابط گفته شده و همچنین استفاده از فرضیات در نظر گرفته شده، از نرم افزار E.E.S برای حل تحلیلی این چرخه استفاده شده است.

$$V = V_0 + V_{act,c} + V_{act,a} + V_{ohm} \quad (۱۶)$$

که V_0 پتانسیل برگشت پذیر بوده که به وسیله معادله نرنست حاصل می‌شود و $V_{act,c}$ و $V_{act,a}$ و V_{ohm} به ترتیب بیانگر پتانسیل فعال کننده کاتد و پتانسیل فعال کننده آند و پتانسیل اهمیک هستند. پتانسیل برگشت پذیر طبق معادله (۱۷) به دست می‌آید [15, 16].

$$V_0 = 1.229 - 0.00085(T_{PEM} - 298) \quad (۱۷)$$

رسانایی یونی محلی الکترولیز غشای پروتونی طبق رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = [0.5139\lambda(x) - 0.326] \exp[1268(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})] \quad (۱۸)$$

x عمق غشای اندازه گیری شده و $\lambda(x)$ مقدار آب موجود در موقعیت x از سطح کاتد بوده که از رابطه (۱۹) به دست می‌آید [15, 16].

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D} x + \lambda_c \quad (۱۹)$$

λ_a و λ_c و D به ترتیب، مقدار آب موجود در سطح غشاء در کاتد و آند و ضخامت غشاء هستند. مقاومت اهمی و پتانسیل اهمیک به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شوند [15, 16].

$$R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]} \quad (۲۰)$$

$$V_{ohm} = JR_{PEM} \quad (۲۱)$$

پتانسیل فعال سازی برای واکنش الکتروشیمیایی در کاتد و آند طبق رابطه (۲۲) برای هر کدام محاسبه می‌شوند [15, 16].

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{j}{2j_{0,i}} \right) \quad i = a, c \quad (۲۲)$$

که j_0 تبادل چگالی جریان مبدل بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود [15, 16].

$$j_{0,i} = j_i^{ref} \exp\left(\frac{-E_{act,i}}{RT}\right), \quad i = a, c \quad (۲۳)$$

که در رابطه (۲۳) j^{ref} فاکتور پتانسیل اولیه و E_{act} انرژی فعال سازی است.

۳-۲- تحلیل انرژی

تحلیل انرژی که در واقع از قانون دوم ترمودینامیک نشأت گرفته است، جهت تحلیل، ارتقاء سیستم‌های انرژی و برای انجام پذیری چرخه‌های جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد. انرژی فیزیکی برای یک جریان مطابق رابطه زیر حساب می‌شود [24].

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m}(h - h_0 - T_0(s - s_0)) \quad (۲۴)$$

انرژی شیمیایی مخلوط آب- آمونیاک در چرخه کالینا به صورت زیر ارائه می‌شود [24].

$$\dot{E}x_{ch} = \dot{m} \left(\left(\frac{x_i}{M_{NH_3}} \right) ex_{ch,NH_3}^0 + \left(\frac{1-x_i}{M_{H_2O}} \right) ex_{ch,H_2O}^0 \right) \quad (۲۵)$$

که ex_{ch,NH_3}^0 و ex_{ch,H_2O}^0 انرژی شیمیایی استاندارد آب و آمونیاک که به ترتیب برابر ۳۴۰ و ۹/۵ کیلوژول بر مول است و همچنین x_i غلظت آمونیاک در مخلوط و M_{NH_3} و M_{H_2O} جرم مولی آمونیاک و آب بوده که به ترتیب ۱۷ و ۱۸ کیلوگرم بر کیلومول

جدول (۲) پارامترهای ورودی برای شبیه سازی الکترولیزر غشای پروتونی [15-18]

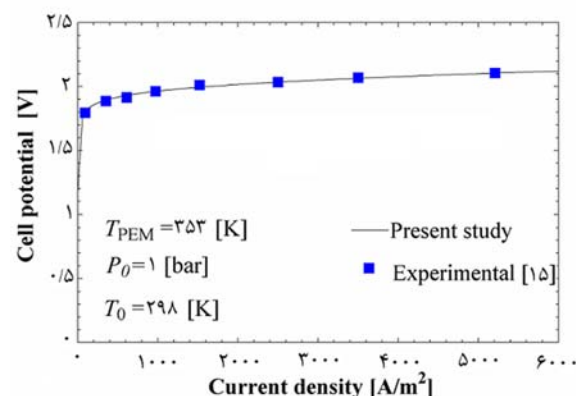
پارامتر	مقدار
$P_{O_2} = P_{H_2} (atm)$	۱/۰
$D (\mu m)$	۵۰
$F (C/mol)$	۹۶۴۸۶
$J_a^{ref} (A/m^2)$	۱۷۰۰۰۰
$J_c^{ref} (A/m^2)$	۴۶۰۰
$T_{PEM} (^\circ C)$	۸۰
$E_{act,a} (kJ/mol)$	۷۶
$E_{act,c} (kJ/mol)$	۱۸
λ_a	۱۴
λ_c	۱۰

۲-۳- اعتبارسنجی نتایج

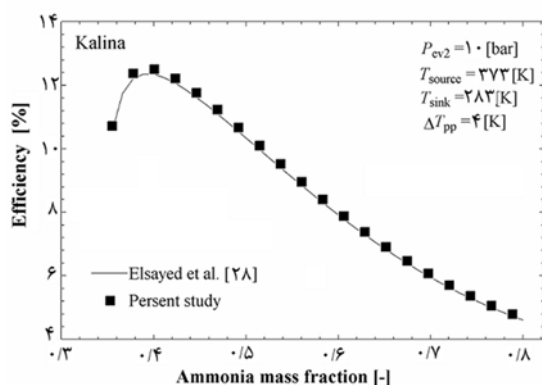
به منظور اعتباردهی و اعتبارسنجی نتایج از نتایج مطالعات موجود به طور جداگانه برای سیستم تبخیر آبی دو مرحله ای، کالینا و الکترولیزر غشای پروتونی استفاده شده است. جدول ۳ مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل یاری [2] و بررسی چرخه تبخیر آبی دو مرحله ای را نشان می دهد. همچنین نمودار ۱ مقایسه نتایج به دست آمده از منبع [15] و تحلیل حاضر در مورد الکترولیزر غشای پروتونی و نمودار ۲ مقایسه نتایج این مطالعه با چرخه کالینا را در منبع [28] نشان می دهد. نتایج جدول ۳ و نمودارهای ۱ و ۲ حاکی از مطابقت قابل قبول نتایج کار حاضر با نتایج تحقیقات پیشین است. همچنین برای چرخه پیشنهادی برای تولید توان و هیدروژن، مشخصات ترمودینامیکی مانند دما، فشار، آنتالپی، آنترپی، دبی جرمی، غلظت آب-آمونیاک و آگرزژی کل با در نظر گرفتن $P_2 = 10 (bar)$ ، $P_6 = 1.2 (bar)$ ، $P_{25} = 30 (bar)$ ، $T_{PEM} = 353 (K)$ و $X = 0.8$ ، در جدول ۴ آمده است. برای این حالت توان خالص تولیدی ۱۲/۸۳ مگاوات، بازده حرارتی ۱۱/۳۹٪، تخریب آگرزژی کل ۱۲۹۵۶ کیلووات، بازده آگرزژی ۴۳/۶۴٪ و تولید هیدروژن ۱۵/۳۶ کیلوگرم بر ساعت به دست می آیند.

جدول (۳) اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی برای تبخیر آبی دو مرحله ای [2]

مشخصات	کار حاضر	مرجع [2]
توان تولیدی (kW)	۱۰۰/۲	۹۶/۹۵
بازده حرارتی (%)	۱۱/۴۵	۱۰/۹۵



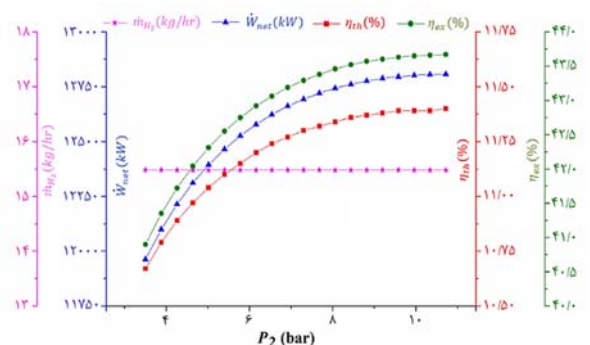
نمودار (۱) اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی برای الکترولیزر غشای پروتونی



نمودار (۲) اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی برای چرخه کالینا

۳-۳- مطالعه پارامتریک

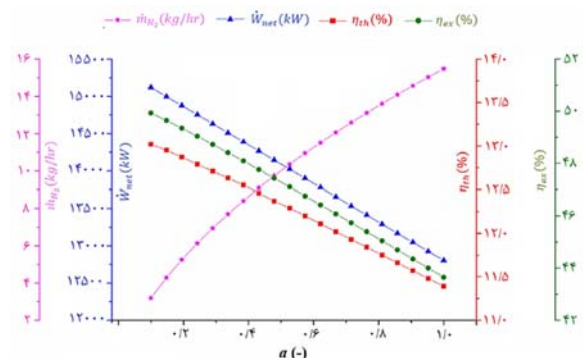
اثر افزایش فشار جداساز اول روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده آگرزژی در نمودار ۳ نشان داده شده اند. با افزایش فشار جداساز اول تا فشار سر چاه اول، مقدار دبی عبوری از توربین فشاربالا کاهش ولی از سوی دیگر فشار و به تبع آن آنتالپی ورودی توربین فشاربالا افزایش پیدا می کند. در واقع با افزایش این فشار، روند افزایشی آنتالپی بر روند کاهش دبی عبوری از توربین فشاربالا غلبه کرده و در حالت کلی باعث افزایش توان خالص کل چرخه می شود. طبق روابط ۲۹ تا ۳۰، بازده حرارتی و بازده آگرزژی طبق روندی مشابه توان کار خالص با افزایش فشار جداساز اول افزایش پیدا می کند. همچنین از جایی که با ثابت ماندن سایر پارامترها، افزایش فشار جداساز دوم تاثیری روی کار تولیدی توربین کالینا نداشته، بنابراین انرژی الکترولیزر ثابت مانده و باعث می شود تا تولید هیدروژن مقدار ثابت ۱۵/۳۶ کیلوگرم بر ساعت داشته باشد.



نمودار (۳) اثر فشار جداساز اول روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده آگرزژی

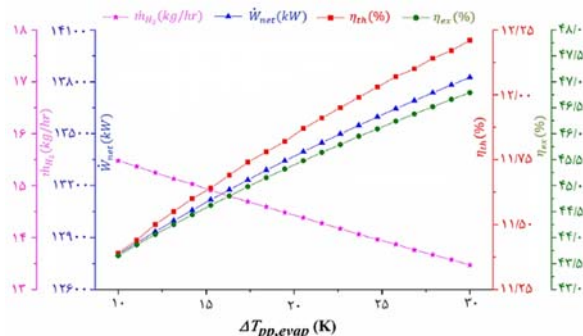
تاثیر افزایش فشار جداساز دوم روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده آگرزژی در نمودار ۴ به نمایش درآمده است. با افزایش فشار جداساز دوم کار خالص، بازده حرارتی و بازده آگرزژی به مقدار بهینه خود رسیده و سپس کاهش می یابد. با افزایش فشار جداساز دوم، مقدار فشار و آنتالپی خروجی توربین فشاربالا افزایش پیدا کرده و بنابراین باعث می شود که همواره کار توربین فشاربالا کاهش پیدا کند، اما از سوی دیگر افزایش فشار جداساز دوم باعث

۶ بیان شده است. با افزایش این نسبت، مقدار انرژی ورودی الکترولیزر غشای پروتونی و به تبع آن چگالی جریان و در نتیجه مقدار دبی هیدروژن تولیدی افزایش می‌یابد. با استفاده بیشتر از کار توربین کالینا، مقدار کار خالص چرخه و به تبع آن بازده حرارتی و بازده انرژی کل چرخه ترکیبی کاهش می‌یابد. به ازای مقدار استفاده کامل از کار توربین کالینا برای انرژی الکترولیزر در سیستم غشای پروتونی، کار خالص چرخه پیشنهادی، بازده‌های حرارتی و انرژی و تولید هیدروژن تقریباً به مقدار ۱۲۷۰۰ کیلووات، ۱۱/۵٪، ۴۴٪ و ۱۵ کیلوگرم بر ساعت می‌رسند.



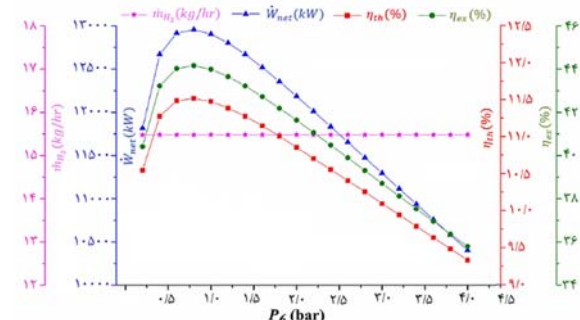
نمودار ۶) اثر نسبت کار ورودی مبدل غشایی به کار تولیدی چرخه کالینا روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی

حداقل اختلاف دمایی نقطه تنگش اواپراتور بین سیال زمین‌گرمایی و مخلوط آب- آمونیاک به‌طور شماتیک در نمودار ۷ دیده می‌شود. برای حداقل مقدار اختلاف دمای نقطه تنگش دبی هیدروژن بیشتر تولید بیشتر می‌شود، چون رعایت حداقل اختلاف دمایی نقطه تنگش اواپراتور منجر به ورود انرژی بیشتر به توربین چرخه کالینا و در نتیجه طبق مطالب گفته شده، در قسمت‌های قبل باعث تولید بیشتر هیدروژن می‌شود. از جمله نتایج بسیار جالب افزایش کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی با افزایش اختلاف نقطه تنگش است. با افزایش نقطه تنگش طبق بقای انرژی در اواپراتور مقدار دما و به تبع آن آنتالپی سیال زمین‌گرمایی افزایش می‌یابد که منجر به افزایش کار توربین فشارپایین می‌شود. افزایش کار توربین فشارپایین بر کاهش توربین چرخه کالینا غلبه کرده و باعث می‌شود کار خالص چرخه پیشنهادی، بازده حرارتی و بازده انرژی مطابق روند نمودار ۷ افزایش یابند.



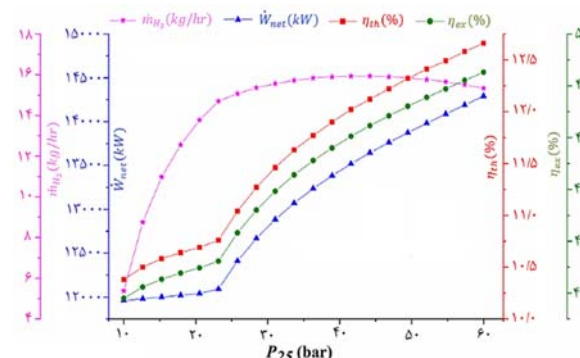
نمودار ۷) اثر حداقل اختلاف دمایی اواپراتور روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی

می‌شود که مقدار دبی توربین فشارپایین کاهش ولی آنتالپی آن افزایش پیدا کند. مجموع این حالت باعث افزایش کار خالص توربین فشارپایین شده است. در مجموع این حالات، کار خالص، بازده‌های حرارتی و انرژی مطابق نتایج نمودار ۴ تقریباً به مقدار بیشینه ۱۲۹۵۰ کیلووات، ۱۱/۵٪ و ۴۴٪ در فشار ۶/۰ بار می‌رسد. همچنین افزایش فشار جداساز دوم چون تاثیری روی انرژی الکترولیزر در سیستم غشای پروتونی ندارد، مقدار تولید هیدروژن ثابت باقی می‌ماند.



نمودار ۴) اثر فشار جداساز دوم روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی

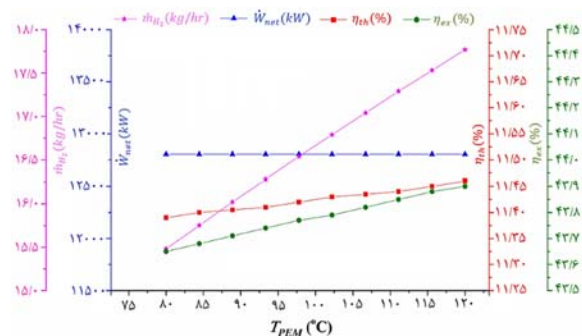
در نمودار ۵ اثر فشار بالای چرخه کالینا روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی سیستم ترکیبی ارائه شده است. با افزایش فشار بالای کالینا، ابتدا کار خالص چرخه کالینا افزایش سپس کاهش می‌یابد؛ بنابراین باعث می‌شود که انرژی ورودی الکترولیزر غشای پروتونی افزایش و کاهش یابد که با توجه به رابطه ۱۵ باعث می‌شود که چگالی جریان و در نتیجه تولید هیدروژن مطابق روند نمودار ۵ به مقدار بهینه برسد. اما از سوی دیگر چون با افزایش فشار بالای کالینا، مقدار آنتالپی نقطه ۱۷ افزایش می‌یابد و باعث می‌شود مقدار بخار خروجی از جداساز دوم و در نتیجه کار توربین فشارپایین افزایش یابد. در نتیجه این روند، باعث شده است که کار خالص چرخه، بازده حرارتی و بازده انرژی افزایش یابند.



نمودار ۵) اثر فشار بالای چرخه کالینا روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی

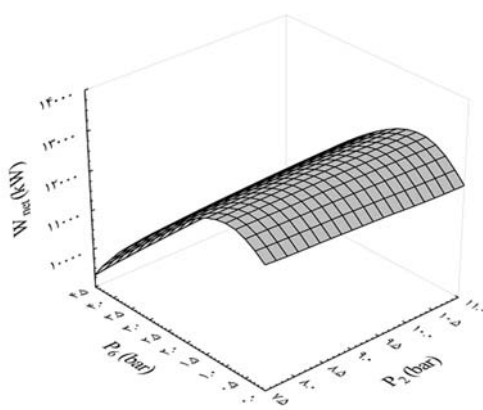
اثر نسبت کار ورودی مبدل غشایی به کار تولیدی چرخه کالینا روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی در نمودار

تولیدی به ۱۷/۶ کیلوگرم بر ساعت، بازده حرارتی ۱۱/۴۶٪ و بازده انرژی به ۴۳/۹٪ می‌رسند.

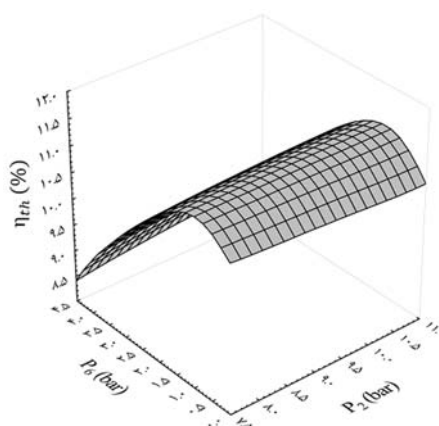


نمودار ۱۰) اثر دمای مبدل غشایی روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی

در نمودارهای ۱۱ تا ۱۳ تاثیر همزمان فشار جداسازهای ۱ و ۲ به ترتیب روی توان حرارتی، بازده حرارتی و بازده انرژی مشاهده می‌شود، همان‌طور که در بخش قبلی ملاحظه شد با افزایش فشار جداساز اول، کار خالص چرخه ترکیبی افزایش می‌یابد. درحالی‌که برای فشار جداساز دوم دارای یک نقطه بهینه است، تاثیرگذاری همزمان در نمودار ۱۱ آمده است. با توجه به ثابت بودن تولید هیدروژن و روابط ۲۹ و ۳۰ روند بازده حرارتی و انرژی در نمودارهای ۱۲ و ۱۳ شبیه نمودار ۱۱ خواهد بود.

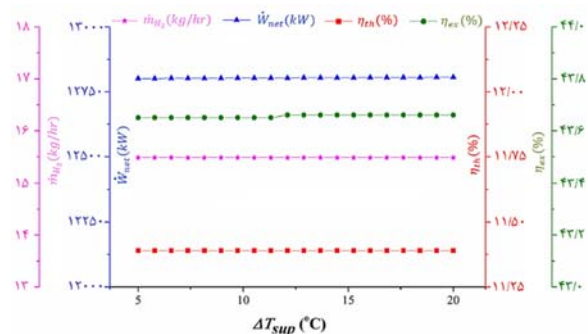


نمودار ۱۱) اثر فشار جداساز اول و دوم روی کار خالص چرخه



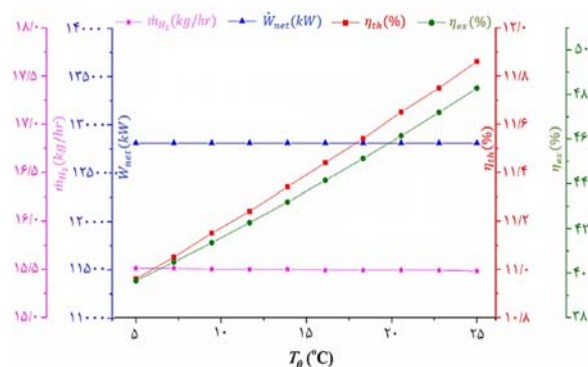
نمودار ۱۲) اثر فشار جداساز اول و دوم روی بازده حرارتی

اثر افزایش دمای فوق گرم کردن سیال زمین‌گرمایی روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی در نمودار ۸ نشان داده شده است. با افزایش دمای فوق گرم، آنتالپی نقطه ۸ افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث می‌شود کار توربین فشارپایین افزایش، ولی کار توربین فشاربالا کاهش یابد و در مجموع باعث می‌شود کار خالص چرخه پیشنهادی، بازده حرارتی و بازده انرژی مقادیر ثابتی باشند. از طرفی به علت عدم تاثیرگذاری انرژی الکترولیزر در سیستم غشای پروتونی، مقدار دبی هیدروژن تولیدی نیز ثابت می‌ماند.



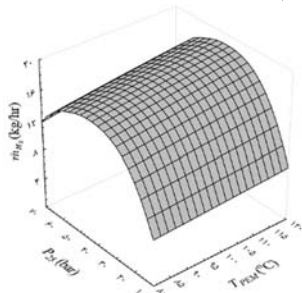
نمودار ۸) اثر فوق گرم کردن سیال زمین‌گرمایی روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی

تاثیر افزایش دمای محیط روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی به‌طور شماتیک در نمودار ۹ ملاحظه می‌شود. با افزایش دمای محیط مقدار توان خالص چرخه و هیدروژن تولیدی تقریباً ثابت مانده ولی بازده حرارتی و انرژی با توجه کاهش انرژی و انرژی ورودی به چرخه با توجه به روابط ۲۹ و ۳۰ افزایش می‌یابند.



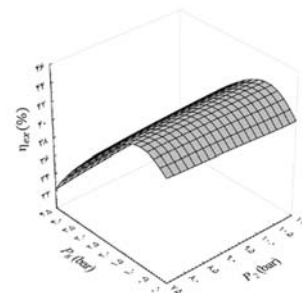
نمودار ۹) اثر دمای محیط روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی

تاثیر افزایش دمای مبدل غشایی روی هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی در نمودار ۱۰ ارائه شده است. با افزایش دمای مبدل غشایی مقدار چگالی جریان افزایش پیدا می‌کند که باعث می‌شود مقدار هیدروژن تولیدی افزایش یابد و با توجه به روابط ۲۹ و ۳۰ صورت این دو معادله افزایش یافته و در نتیجه بازده‌های حرارتی و انرژی افزایش می‌یابند. همچنین درحالتی‌که دمای مبدل غشایی به ۱۲۰ درجه سلسیوس می‌رسد، هیدروژن



نمودار ۱۴) اثر دمای الکترولایز و فشار بالای کالینا روی هیدروژن تولیدی

با انجام تحلیل آگرژی روی اعضای چرخه ترکیبی نشان داده می‌شود که اجزای چرخه قانون دوم را نقض نمی‌کنند. نرخ تخریب آگرژی اجزای چرخه تولید توان و هیدروژن برای نتایج جدول ۴ در نمودار ۱۵ آمده است. طبق نتایج الکترولایزر غشای پروتونی، اواپراتور و کندانسور ۲ بیشترین مقدار تخریب آگرژی را دارند که نشان از اختلاف دمایی زیاد سیال‌ها در این مبدل‌ها است. کمترین نرخ تخریب آگرژی متعلق به پمپ‌ها، شیر انبساط ۴ و جداسازها است.

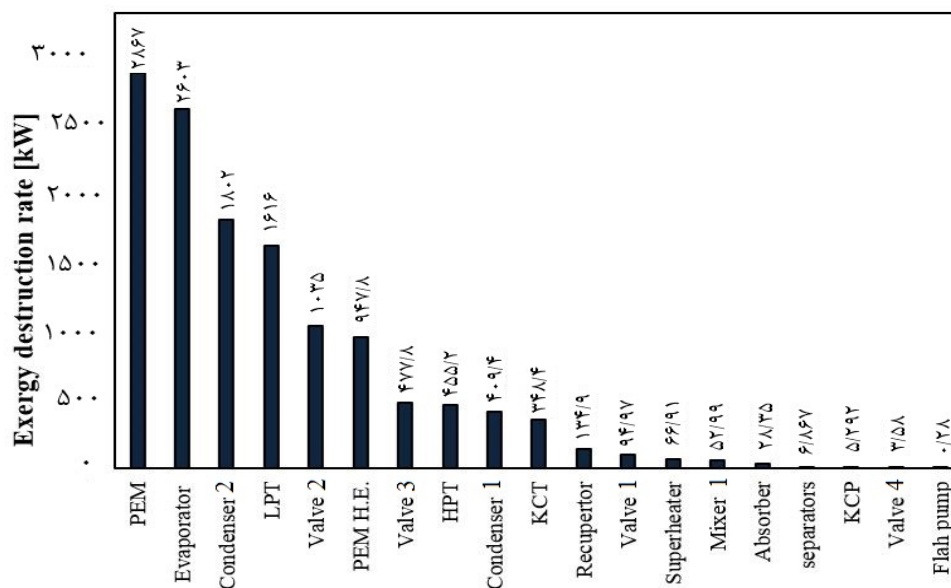


نمودار ۱۳) اثر فشار جداساز اول و دوم روی بازده آگرژی

تأثیر همزمان دمای الکترولایز و فشار بالای کالینا روی هیدروژن تولیدی در چرخه ترکیبی در نمودار ۱۴ آمده است. با افزایش فشار بالای کالینا تا نقطه بهینه، مقدار کار خالص تولیدی و به تبع آن انرژی ورودی الکترولایزر غشای پروتونی افزایش یافته و در نتیجه تولید هیدروژن افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش دمای مبدل الکترولایزر غشای پروتونی با شیب کمی، تولید هیدروژن نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۴) مشخصات ترمودینامیکی برای سیال‌ها در چرخه ترکیبی پیشنهادی جدید

نقطه	سیال	دما (K)	فشار (bar)	دبی جرمی (kg/s)	غلظت آمونیاک (-)	انتالپی (kJ/kg)	آنتروپی (kJ/kgK)	آگرژی (kW)
۱	زمین گرمایی	۴۵۶/۱	۱۰/۷۲	۵۷	-	۱۱۵۰	۲/۹۸۸	۱۶۵۷۳
۲	زمین گرمایی	۴۵۳/۱	۱۰	۵۷	-	۱۱۵۰	۲/۹۹۳	۱۶۴۷۸
۳	زمین گرمایی	۴۵۳/۱	۱۰	۱۰/۹۵	-	۲۷۷۸	۶/۵۸۶	۹۶۵۵
۴	زمین گرمایی	۳۷۸	۱/۲	۱۰/۹۵	-	۲۴۶۹	۶/۷۳	۵۸۱۶
۵	زمین گرمایی	۴۵۳/۱	۱۰	۴۶/۰۵	-	۷۶۲/۹	۲/۱۳۹	۶۸۲۳
۶	زمین گرمایی	۳۷۸	۱/۲	۴۶/۰۵	-	۷۶۲/۹	۲/۲۱۷	۵۷۸۸
۷	زمین گرمایی	۳۷۸	۱/۲	۱۱/۳۱	-	۲۶۸۳	۷/۲۹۸	۶۵۸۳
۸	زمین گرمایی	۴۲۸/۱	۱/۲	۱۱/۳۱	-	۲۷۸۵	۷/۵۴۹	۶۹۰۸
۹	زمین گرمایی	۳۷۸	۱/۲	۲۲/۲۶	-	۲۶۲۹	۷/۱۵۵	۱۲۶۷۱
۱۰	زمین گرمایی	۲۹۸/۲	۰/۳۱۶۹	۲۲/۲۶	-	۲۲۰۴	۷/۴۰۷	۱۵۸۱
۱۱	زمین گرمایی	۲۹۸/۲	۰/۳۱۶۹	۲۲/۲۶	-	۱۰۴/۸	۰/۳۶۷	۱۳/۶۴
۱۲	زمین گرمایی	۲۹۸/۲	۱/۲	۲۲/۲۶	-	۱۰۴/۹	۰/۳۶۷	۱۶/۲۶
۱۳	زمین گرمایی	۳۷۸	۱/۲	۸۷/۷۴	-	۴۳۹/۴	۱/۳۶۱	۴۲۸۴
۱۴	زمین گرمایی	۳۵۵/۹	۱/۲	۸۷/۷۴	-	۳۴۶/۴	۱/۰۷	۲۵۲۴
۱۵	زمین گرمایی	۴۳۸/۱	۷	۵۳	-	۱۱۰۰	۲/۹۱۲	۱۳۹۲۰
۱۶	زمین گرمایی	۴۳۸/۱	۷	۵۳	-	۱۰۷۸	۲/۸۶۲	۱۳۵۲۸
۱۷	زمین گرمایی	۴۲۴/۲	۷	۵۳	-	۶۳۷/۲	۱/۸۵۳	۵۵۵۷
۱۸	زمین گرمایی	۳۷۸	۱/۲	۵۳	-	۶۳۷/۲	۱/۸۸۴	۵۰۷۹
۱۹	هوا	۲۸۸/۲	۱	۳۰۰۱	-	۲۸۸/۵	۵/۶۶۵	۰
۲۰	هوا	۳۰۳/۲	۱	۳۰۰۱	-	۳۰۳/۶	۵/۷۱۶	۱۱۵۸
۲۱	آب- آمونیاک	۳۷۳/۲	۸/۰۹۱	۱۵	۰/۸	۱۳۶۷	۴/۶۱۴	۲۴۵۲۴۳
۲۲	آب- آمونیاک	۲۹۸/۲	۸/۰۹۱	۱۵	۰/۸	۲۳/۵۶	۰/۳۲۳۴	۲۴۳۰۲۴
۲۳	آب- آمونیاک	۲۹۸/۶	۳۰	۱۵	۰/۸	۲۰/۰۸	۰/۳۲۴۶	۲۴۳۰۷۱
۲۴	آب- آمونیاک	۳۱۰/۵	۳۰	۱۵	۰/۸	۳۶/۰۳	۰/۵۰۸۸	۲۴۳۰۱۱۶
۲۵	آب- آمونیاک	۴۲۸/۱	۳۰	۱۵	۰/۸	۱۵۹۵	۴/۶۷۷	۲۴۸۴۸۴
۲۶	آب- آمونیاک	۴۲۸/۱	۳۰	۱۳/۴۵	۰/۸۵۵۹	۱۷۲۱	۴/۹۹۵	۲۳۸۰۱۱
۲۷	آب- آمونیاک	۴۲۸/۱	۳۰	۱/۵۴۸	۰/۳۱۴۴	۵۰۳	۱/۹۱۸	۱۰۴۶۶
۲۸	آب- آمونیاک	۳۰۸/۶	۳۰	۱/۵۴۸	۰/۳۱۴۴	۴۰/۶۵	۰/۴۳۵۲	۱۰۲۸۶
۲۹	آب- آمونیاک	۳۰۹	۸/۰۹۱	۱/۵۴۸	۰/۳۱۴۴	۴۰/۶۵	۰/۴۴۳۲	۱۰۲۸۲
۳۰	آب- آمونیاک	۳۷۵/۸	۸/۰۹۱	۱۳/۴۵	۰/۸۵۵۹	۱۵۲۹	۵/۰۸۵	۲۳۵۰۸۹
۳۱	هوا	۲۸۸/۲	۱	۱۳۸۵	-	۲۸۸/۵	۵/۶۶۵	۰
۳۲	هوا	۳۰۳/۲	۱	۱۳۸۵	-	۳۰۳/۶	۵/۷۱۶	۵۱۶/۹
۳۳	آب	۲۸۸/۲	۱	۳۰	-	۶۳/۰۱	۰/۲۲۴۲	۰
۳۴	آب	۳۵۳/۲	۱	۳۰	-	۳۳۵	۱/۰۷۵	۸۰۱/۹
۳۵	هیدروژن	۳۵۳/۲	۱	۰/۰۰۴۲۶۵	-	۴۷۲۳	۵۵/۸۶	۵۰۴
۳۶	اکسیژن	۳۵۳/۲	۱	۰/۰۳۳۸۵	-	۵۰/۵	۰/۱۵۹	۴/۴۰۳



نمودار ۱۵) نرخ تخریب انرژی اجزای چرخه ترکیبی

۴- نتیجه گیری

امروزه استفاده از انرژی های پاک و سوخت پاک و جایگزین بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است در این بررسی یک چرخه جدید بر اساس چاه های زمین گرمایی سبلان پیشنهاد شده که علاوه بر تولید توان، به تولید هیدروژن با استفاده از فرآیند الکترولایزر غشایی پروتونی از چرخه تحتانی کالینا می پردازد. در این تحقیق اثر پارامترهای مؤثر بر تولید هیدروژن و کار تولیدی چرخه زمین گرمایی سبلان مورد بررسی قرار گرفته و به طور خلاصه این نتایج به صورت زیر بیان می شوند:

۱- برای حالت اولیه بررسی کار خالص چرخه پیشنهادی، بازده های حرارتی و انرژی و تولید هیدروژن تقریباً به مقدار ۱۲۷۰۰ کیلووات، ۱۱/۵٪ و ۴۴٪ و ۱۵ کیلوگرم بر ساعت محاسبه شد.

۲- با افزایش فشار جداساز اول، مقدار تولید هیدروژن ثابت باقی مانده در حالی که کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی افزایش یافته است.

۳- مقدار هیدروژن تولیدی با افزایش فشار جداساز دوم ثابت باقی مانده در حالی که کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی به مقدار بیشینه ۱۲۹۵۰ کیلووات، ۱۱/۴٪ و ۴۴٪ در فشار ۱۰/۶ بار می رسند.

۴- با افزایش فشار بالای چرخه کالینا تولید هیدروژن دارای مقدار بهینه خواهد بود در حالی که با افزایش این فشار بازده حرارتی و انرژی افزایش می یابند.

۵- با افزایش دمای فوق گرم، هیدروژن تولیدی، کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی تقریباً ثابت باقی می ماند در حالی که با افزایش نسبت کار ورودی مبدل غشایی، تولید هیدروژن افزایش و کار خالص، بازده حرارتی و بازده انرژی کاهش می یابند.

۶- افزایش اختلاف نقطه تنگش اواپراتور باعث کاهش هیدروژن تولیدی شده در حالی که توان خالص چرخه، بازده حرارتی و انرژی افزایش می یابند.

۷- با افزایش دمای مبدل حرارتی در الکترولایزر، مقدار دبی هیدروژن تولیدی افزایش یافته و به همین دلیل ضمن ثابت ماندن کار خالص چرخه، بازده حرارتی و انرژی افزایش یافته به طوری که در دمای مبدل غشایی ۱۲۰ درجه سلسیوس، هیدروژن تولیدی ۱۷/۶ کیلوگرم بر ساعت، بازده حرارتی ۱۱/۴۶٪ و بازده انرژی ۴۳/۹٪ محاسبه شد.

تشکر و قدردانی: بدین وسیله از دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه که امکان انجام این پژوهش را فراهم نمود، تشکر و قدردانی می شود.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: مهران عبدالعلی پورعدل (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۵٪)، شهرام خلیل آریا (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۵٪)، فرزاد محمدخانی (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۲۰٪)

منابع مالی: منابع مالی خاصی برای انجام این تحقیق استفاده نشده است.

۵- پی نوشت

D	ضخامت (μm)
$E_{\text{electrolic}}$	توان داده شده به الکترولایزر (kW)
E_{product}	توان داده شده به مصرف مستقیم (kW)
$\dot{E}_x$	آهنگ انرژی (kW)

- 11) with low-temperature heat sources. *Journal of Energy Resources Technology*. 2007;129(3):243-247.
- 6- Jalilinasrabady S, Itoi R, Valdimarsson P, Saevarsdottir G, Fujii H. Flash cycle optimization of Sabalan geothermal power plant employing exergy concept. *Geothermics*. 2012;43:75-82.
- 7- Aali A, Pourmahmood N, Zare V. Proposal and analysis of a new cycle for power generation from Sabalan geothermal wells. *Journal of Mechanical Engineering of Tabriz University*. 2017;47(3):139-147. [Persian]
- 8- Aali A, Pourmahmood N, Zare V. Exergy analysis of a new proposed cycle for power generation from sabalan geothermal wells. *Journal of Mechanical Engineering of Tabriz University*. 2018;48(1):251-260. [Persian]
- 9- Aali A, Pourmahmood N, Zare V. Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a novel combined flash-binary cycle for Sabalan geothermal power plant in Iran. *Energy Conversion and Management*. 2017;143:377-390.
- 10- Abdolalipouradl M, Khalilarya S, Jafarmadar S. Exergy analysis of a new proposal combined cycle from Sabalan geothermal source. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(4):11-22. [Persian]
- 11- Ozgur T, Yakaryilmaz AC. A review: Exergy analysis of PEM and PEM fuel cell based CHP systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018;43(38):17993-8000.
- 12- Orhan MF, Babu BS. Investigation of an integrated hydrogen production system based on nuclear and renewable energy sources: Comparative evaluation of hydrogen production options with a regenerative fuel cell system. *Energy*. 2015;88:801-820.
- 13- Pham AT, Baba T, Shudo T. Efficient hydrogen production from aqueous methanol in a PEM electrolyzer with porous metal flow field: Influence of change in grain diameter and material of porous metal flow field. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013;38(24):9945-9953.
- 14- Garcia-Valverde R, Espinosa N, Urbina A. Simple PEM water electrolyser model and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(2):1927-1938.
- 15- Ni M, Leung MKH, Leung DY. Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant. *Energy Conversion and Management*. 2008;49(10):2748-2756.
- 16- Ahmadi P, Dincer I, Rosen MA. Energy and exergy analyses of hydrogen production via solar-boostered ocean thermal energy conversion and PEM electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013;38(4):1795-1805.
- 17- Ahmadi P, Dincer I, Rosen MA. Multi-objective optimization of a novel solar-based multigeneration energy system. *Solar Energy*. 2014;108:576-591.
- 18- Ranjbar SF, Nami H, Khorshid A, Mohammadpour H. Hydrogen production using waste heat recovery of MATIANT non-emission system via PEM electrolysis. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(10):42-50. [Persian]
- 19- Yilmaz C, Kanoglu M, Bolatturk A, Gadalla M. Economics of hydrogen production and liquefaction by geothermal energy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(2):2058-2069.
- 20- Ghaebi H, Farhang B. Using various organic Rankine cycles for production of power and hydrogen by incorporating geothermal energy and proton exchange membrane (A comparative study). *Modares Mechanical*

انرژی فعال‌سازی کاتد و آند (kJ/mol)	$E_{act,i} \quad i = a, c$
ثابت فارادی (C/mol)	F
انرژی آزاد گیبس (J/mol)	G
آنتالپی مخصوص (kJ/kgK)	h
مبدل	$H.E.$
چگالی جریان مبدل (A/m^2)	$J_{i,0} \quad i = a, c$
فاکتور پتانسیل اولیه آند و کاتد	$J_i^{ref} \quad i = a, c$
چگالی جریان (A/m^2)	J
دبی جرمی (kg/h)	$\dot{m}$
دبی مولی (mol/s)	$\dot{N}$
فشار (bar)	P
آهنگ گرما (kW)	$\dot{Q}$
ثابت جهانی گازها (kJ/kgK)	R
مقاومت اهمیک (Ω)	R_{PEM}
آنتروپی مخصوص (kJ/kgK)	s
دما ($^{\circ}C.K$)	T
دمای الکتروالایزر (K)	T_{PEM}
پتانسیل برگشت‌پذیر (V)	V_0
پتانسیل فعال‌کننده آند و کاتد (V)	$V_{act,i} \quad i = a, c$
غلظت آمونیاک در مخلوط (-)	x
علامه یونانی	
بازده (%)	η
بازده آگزوری (%)	η_{ex}
بازده انرژی (%)	η_{th}
رسانایی محلی غشای مبدل پروتونی (S/m)	σ
آب موجود در سطح غشای آند و کاتد (Ω^{-1})	λ
زیرنویس‌ها	
آند	a
کاتد، جریان سرد	c
جریان گرم	c
ورودی	in
چرخه کالینا	KC
خروجی	Out
اهمیک	ohm
پمپ	P
نقطه تنگش	pp
الکتروالایزر غشا پروتونی	PEM
توربین	T

منابع

- 1- Mosaffa AH, Zareei A. Proposal and thermoeconomic analysis of geothermal flash binary power plants utilizing different types of organic flash cycle. *Geothermics*. 2018;72:47-63.
- 2- Yari M. Exergetic analysis of various types of geothermal power plants. *Renewable Energy*. 2010;35(1):112-121.
- 3- Badr O, O'Callaghan PW, Probert SD. Rankine-cycle systems for harnessing power from low-grade energy sources. *Applied Energy*. 1990;36(4):263-292.
- 4- Lin D, Zhu Q, Li X. Thermodynamic comparative analyses between (organic) Rankine cycle and Kalina cycle. *Energy Procedia*. 2015;75:1618-1623.
- 5- Hettiarachchi HDM, Golubovic M, Worek WM, Ikegami Y. The performance of the Kalina Cycle System 11(KCS-

cycle), ORC (organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low grade heat source. *Energy*. 2015;83:712-722

25- Ahrendts J. Reference states. *Energy*. 1980;5(8-9):666-677.

26- Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. Thermal design and optimization. Hoboken: John Wiley & Sons; 1996.

27- Shokati N, Ranjbar F, Yari M. Comparative and parametric study of double flash and single flash/ORC combined cycles based on exergoeconomic criteria. *Applied Thermal Engineering*. 2015;91:479-495.

28- Elsayed A, Embaye M, AL-Dadah R, Mahmoud S, Rezk A. Thermodynamic performance of Kalina Cycle System 11 (KCS11): feasibility of using alternative zeotropic mixtures. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2013;8(S1):69-78.

Engineering. 2016;16(6):138-148. [Persian]

21- Ratlamwala TAH, Dincer I. Comparative efficiency assessment of novel multi-flash integrated geothermal systems for power and hydrogen production. *Applied Thermal Engineering*. 2012;48:359-366.

22- Ghaebi H, Farhang B, Parikhani T, Rostamzadeh H. Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a cogeneration system for power and hydrogen production purpose based on TRR method and using low grade geothermal source. *Geothermics*. 2018;71:132-145.

23- Cengel YA, Boles MA. Thermodynamics: An engineering approach. 7th Edition. New York: McGraw-Hill; 2011.

24- Yari M, Mehr AS, Zare V, Mahmoudi SMS, Rosen MA. Exergoeconomic comparison of TLC (trilateral Rankine