

تحلیل انرژی و اگزرژی یک سیستم بر مبنای انرژی زمین گرمایی برای تولید همزمان توان، آب شیرین، گرمایش و هیدروژن

مهران عبدالعلی پورعدل

دکتری مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، m.abdolalipour@urmia.ac.ir

محسن رستمی

کارشناس ارشد، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، mohsen.rostami@modares.ac.ir

شهرام خلیل آریا*

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، sh.khalilarya@urmia.ac.ir

مرتضی یاری

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، myari@tabrizu.ac.ir

چکیده

استفاده از سیستم‌های تولید همزمان به سرعت در دهه اخیر در حال گسترش می‌باشد. مطالعه حاضر به توسعه یک سیستم مجتمع بر مبنای زمین گرمایی، تخیر آبی دومرحله‌ای، چرخه رانکین آلی، الکترولیزر غشاء پروتونی، واحد اسمز معکوس و آب گرم کن داخلی می‌پردازد. این آرایش برای تولید چهار خروجی توان، گرمایش، آب شیرین و هیدروژن طراحی شده است. این سیستم تولید همزمان جدید از دیدگاه انرژی و اگزرژی مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین یک مطالعه پارامتری جامع روی سیستم تولید همزمان انجام شده و در ادامه از سه دیدگاه مختلف (توان خالص تولیدی، بازده حرارتی و بازده اگزرژی) مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که توان خالص تولیدی، بازده حرارتی و بازده اگزرژی دارای مقادیر بهینه نسبت به دو فشار جداساز می‌باشند. همچنین نتایج بهینه‌سازی از دیدگاه توان خالص تولیدی نشان می‌دهد که مقادیر توان خالص تولیدی ۵۰۹۱ کیلووات، آب شیرین تولید ۴۱/۷۵ کیلوگرم بر ثانیه، بازده حرارتی ۱۵/۵۸٪، بازده اگزرژی ۴۳/۴۴٪ و هیدروژن تولیدی ۲/۸۳ کیلوگرم بر ساعت، مقدار گرمایش ۳۵۰/۶ کیلووات می‌باشد. **واژه‌های کلیدی:** تحلیل انرژی و اگزرژی، تولید همزمان، آب شیرین کن، تولید هیدروژن، زمین گرمایی.

Energy and exergy analysis of a novel geothermal energy based system for power, desalination water and hydrogen production

M. Abdolalipouradl

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

M. Rostami

Department of Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Sh. Khalilarya

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

M. Yari

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The usage of multi-generation systems is quickly developing in the last decade. The current study develops a new geothermal based integrated system, double flash, organic Rankine cycle (ORC), proton membrane electrolyzer (PEM), reverse osmosis (RO) unit and domestic heat water. The configuration is designed to produce four outputs namely, power, heating, desalination water and hydrogen. The proposed multi generation system is evaluated from thermodynamic and exergy point of view. A comprehensive parametric study is done as well and then, the multi generation system is optimized for three viewpoints (net output power, thermal efficiency and exergy efficiency). The results show that the net output power, thermal and exergy efficiencies have optimum values in regard to two separator pressures. Also, optimization results from net output power viewpoint show that, the power generation, desalination water, thermal efficiency, exergy efficiency, hydrogen production and heating were obtained as 5091 kW, 41.75 kg/s, 15/58%, 43.44%, 2.83 kg/hr and 350.6 kW, respectively.

Keywords: Energy and Exergy analysis, multi-generation, desalination water, hydrogen production, geothermal energy.

زیست طی دهه‌های گذشته، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۶، ۷]. بنابراین انرژی زمین گرمایی با داشتن شرایط گفته شده، استفاده از این نوع منبع انرژی در بسیاری از کشورها برای تولید توان یا سایر مصارف از جمله تولید توان، گرمایش، خشک‌سازی و سایر مصارف افزایش پیدا کرده است [۸، ۹]. تعداد مطالعات زیادی در مورد استفاده از آب زمین-گرمایی به عنوان منبع گرمایی برای سیستم‌های تبدیل انرژی انجام شده است. مرور و بررسی مقالات زیر بیانگر آخرین مطالعات در این زمینه می‌باشد.

برای چاه‌های زمین گرمایی سیلان، عبدالعلی پور و همکاران [۱۰] یک چرخه ترکیبی تولید توان جدید (شامل یک چرخه ترکیبی از دو

۱- مقدمه

افزایش تقاضای انرژی در جهان و محدود بودن سوخت‌های فسیلی به همراه تأثیرات زیست محیطی منجر به توسعه سیستم‌های تبدیل انرژی با منابع تجدیدپذیر شده است [۱، ۲]. انرژی زمین گرمایی به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان منبع قابل اعتماد در تولید توان مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. در واقع، انرژی زمین گرمایی روشی برای استفاده دائم و پایدار از منبع انرژی تجدیدپذیر برای تولید توان می‌باشد [۴، ۵]. از طرف دیگر با توجه به رشد سریع جمعیت در کشورهای در حال توسعه و افزایش استانداردهای زندگی در جوامع توسعه‌یافته، در کنار افزایش انتشار آلاینده‌ها، تغییر سوخت‌ها به گزینه‌های تمیز و سازگار با محیط

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: sh.khalilarya@urmia.ac.ir

چرخه تبخیر تک مرحله‌ای که از چرخه دی‌اکسید کربن گذر بحرانی و کالینا به‌عنوان چرخه تحتانی استفاده شده است) پیشنهاد و مورد بهینه‌سازی قرار دادند. طبق نتایج حاصله، توان خالص ۱۹۴۴۸ کیلووات، بازده انرژی ۱۶/۶۳٪ و بازده انرژی ۶۳/۷۸٪ و هزینه تولید توان واحد ۴/۵۲۱ دلار برگیگاژول محاسبه شد. در مطالعه دیگری از این چاه‌ها برای تولید همزمان هیدروژن، توان و سرمایه‌اش استفاده کردند. طبق این بررسی توان خالص تولیدی ۱۴۷۴۹ کیلووات، تولید هیدروژن ۱۳/۲۵ کیلوگرم بر ساعت، سرمایه‌اش ۱۰۹۲۵ کیلووات، بازده حرارتی ۲۲/۳۴ درصد و بازده انرژی ۵۰/۶۲ درصد محاسبه شد [۱۱].

زراع دو سیستم تولید همزمان سرمایه‌اش، گرمایش و توان با استفاده از منبع زمین گرمایی و با تفاوت در قسمت تولید توان (چرخه‌های کالینا و رانکین آلی) را تحلیل انرژی و انرژی انجام داد، طبق این بررسی از دیدگاه قانون دوم، چرخه‌ی تولید همزمان بر اساس چرخه‌ی تولید توان با کالینا نتایج بهتری را نشان داد [۱۲]. گنجه سرایی [۱۳] برای تولید هیدروژن توسط الکترولیزر غشاء پروتونی از تولید توان توسط مخلوط سیال‌های عامل در قسمت رانکین آلی بهره برد، طبق این بررسی بیشترین هزینه به ترتیب، متعلق به الکترولیزر، توربین و چگالنده است. کارایی سیستم‌های زمین گرمایی چرخه تبخیر چندگانه برای تولید همزمان توان و هیدروژن توسط راتلاموالا و دینسر [۱۴] مورد بررسی قرار گرفت، طبق نتایج حاصله، بازده انرژی کل با افزایش تعداد مراحل تبخیر از یک مرحله به پنج مرحله از ۶/۵۲٪ به ۴۷/۲۹٪ افزایش پیدا کرده است. بیلماز و همکاران [۱۵] 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. کیانفرد و همکاران [۱۶] از انرژی زمین گرمایی برای تولید هیدروژن و آب شیرین استفاده کرده و نشان دادند که بازگشت سرمایه ۵/۶ سال برای سیستم پیشنهادی می‌باشد. اکرایی و همکاران [۱۷] یک سیستم تولید همزمان متشکل از چرخه‌ی رانکین آلی از منبع انرژی زمین گرمایی، الکترولیزر غشاء پروتونی برای تولید هیدروژن و سیستم تبرید جذبی با سیال لیتیم برماید-آب پیشنهاد و مورد تحلیل انرژی و اقتصادی قرار دادند. برای سیستم پیشنهادی، بازده حرارتی ۳۴/۹۸ درصد و بازده انرژی ۴۹/۱۷ درصد به دست آمد. یوسکل و همکاران [۱۸] نیز یک سیستم تولید همزمان برای توان، سرمایه‌اش و هیدروژن پیشنهاد کرده و نشان دادند که با افزایش دمای منبع گرم از ۱۳۰ تا ۲۰۰ درجه‌ی سلسیوس مقدار هیدروژن تولیدی از ۰/۰۳ تا ۰/۰۷۵ کیلوگرم بر ثانیه افزایش می‌یابد. محمدی و مهرپویا [۱۹] از یک چرخه‌ی ترکیبی از کالینا، آب گرم کن داخلی و واحد اسمز معکوس برای تولید همزمان از یک منبع انرژی زمین گرمایی استفاده کردند. نتایج نشان داد که این سیستم قادر به تأمین توان ۴۶/۷۷ کیلووات، گرمایش ۴۵۱ کیلووات، سرمایه‌اش ۵۲ کیلووات و آب آشامیدنی ۰/۷۹ کیلوگرم در ثانیه می‌باشد. غایبی و همکاران [۲۰] به بررسی یک چرخه تولید سه‌گانه گرمایش، سرمایه‌اش بر اساس تبرید جذبی و توان بر پایه انرژی زمین گرمایی پرداختند. طبق این بررسی در حالت بهینه انرژی‌اکنونومیک، بازده حرارتی، بازده انرژی و مجموع هزینه واحد تولید محصول به ترتیب ۹۴/۸۴ درصد، ۴۷/۸۹ درصد و ۸۹/۹۵ دلار برگیگاژول حاصل شد.

استفاده از یک تبخیر آبی دو مرحله‌ای در بسیاری از مطالعه‌ها

باعث می‌شود تا مقدار زیادی از انرژی از قسمت مایع اشباع جداساز دوم خارج شود و در نتیجه بازده انرژی این سیستم‌ها بالا نباشد [۲۱]. از سوی دیگر مصرف کل توان انرژی زمین گرمایی جهت تولید هیدروژن و آب شیرین با استفاده از کل توان منبع زمین گرمایی باعث بازده انرژی بسیار پایین‌تر از سیستم تولید توان با شرایط یکسان شود [۱۶]. بنابراین بهتر است برای افزایش بازده انرژی از سیستم‌های تولید همزمان که دارای تولید توان باشد استفاده شود. با توجه به این نقصان برای افزایش بازده انرژی یک سیستم جدید تولید همزمان توان، آب شیرین، گرمایش و هیدروژن از منبع زمین گرمایی پیشنهاد و مورد تحلیل انرژی و انرژی قرار گرفته است. همچنین در ادامه برای این سیستم یک مطالعه پارامتری برای بررسی اثرات متغیرهای تصمیم‌گیری بر روی پارامترهای عملکردی انجام می‌شود. درواقع اصلی عمده این تحقیق به‌صورت زیر می‌باشند:

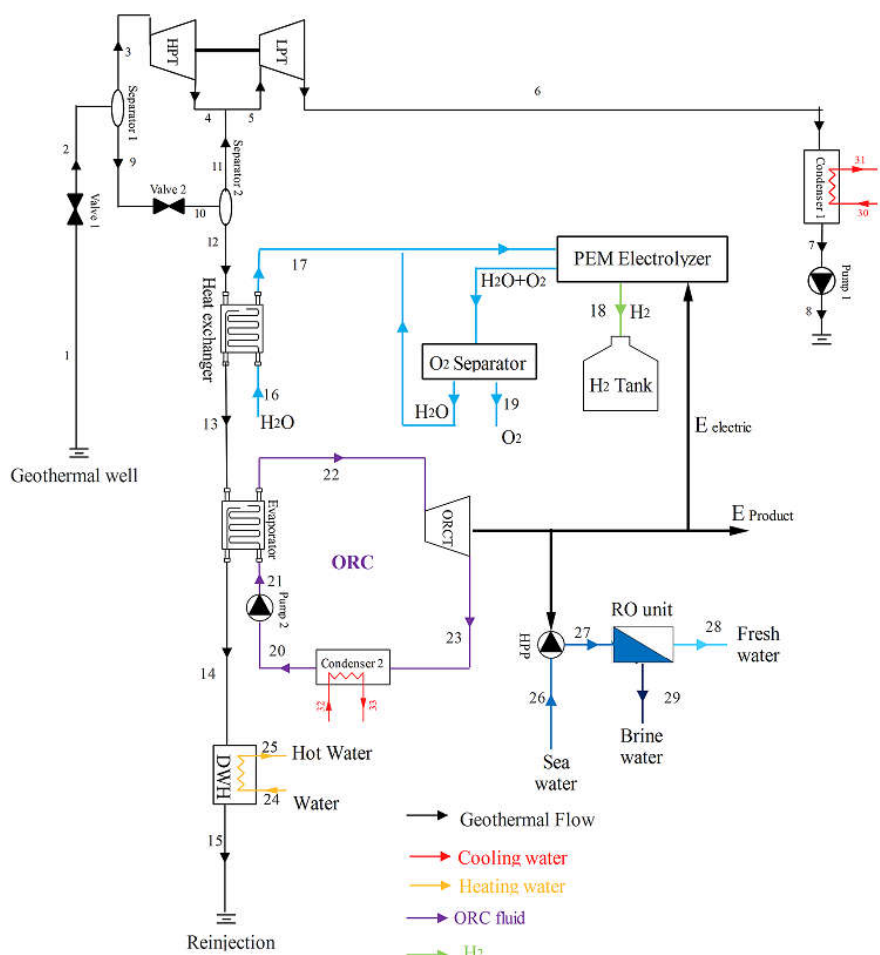
- استفاده از انرژی زمین گرمایی به‌عنوان منبع حرارتی و بهره‌گیری از چرخه‌های تبخیر آبی دو مرحله‌ای و رانکین آلی برای تولید توان
- تولید هیدروژن به‌وسیله‌ی سیستم الکترولیزر غشاء پروتونی و گرمایش سیستم توسط آب گرم کن داخلی
- استفاده از سیستم اسمز معکوس برای تولید آب شیرین
- تحلیل انرژی و انرژی سیستم و تحلیل جامع پارامتری
- بهینه‌سازی سیستم از سه دیدگاه مختلف
- افزایش بازده انرژی سیستم پیشنهادی نسبت به مطالعات مشابه دارای منبع حرارتی با دمای یکسان

۲- توصیف سیستم و مدل‌سازی

۲-۱- توصیف سیستم

در شکل ۱، دیاگرام طرحواره چرخه‌ی تولید چهارگانه توان، آب شیرین، گرمایش و هیدروژن با استفاده از منبع زمین گرمایی ارائه شده است. در این آرایش از یک چرخه‌ی تبخیر آبی دو مرحله‌ای برای تولید توان استفاده شده است، با توجه به اینکه مایع اشباع خروجی از جداساز دوم (جریان ۱۲) دارای دمای بالایی (متناسب با فشار اشباع جداساز دوم) می‌باشد، از چرخه‌ی رانکین آلی استفاده شده است. همچنین در این سیستم تولید همزمان چندگانه، از الکترولیزر غشاء پروتونی برای تولید هیدروژن، واحد اسمز معکوس برای تولید آب شیرین و آب گرم کن داخلی برای گرمایش استفاده شده است.

آب زمین گرمایی طی یک فرایند آنتالپی ثابت و افت فشار در شیر انبساط اول، وارد جداساز اول شده تا به دو قسمت بخار اشباع و مایع اشباع (جریان ۹) تبدیل شود. بخار اشباع برای تولید توان وارد توربین فشار بالا شود. مایع اشباع خروجی پس از افت فشار در شیر انبساط دوم وارد جداساز دوم می‌شود. بخار اشباع خروجی با جریان خروجی از توربین فشار بالا (جریان ۴) مخلوط شده و وارد توربین فشار پایین برای تولید توان بیشتر می‌شود. سیال زمین گرمایی خروجی از توربین فشار پایین (جریان ۶) وارد چگالنده اول شده تا با تبدیل شدن به مایع و عبور از پمپ اول، به فشار تزریق چاه برسد. مایع اشباع خروجی از جداساز دوم (جریان ۱۲)، دمای آب را در مبادله‌کن گرمایی از دمای محیط به دمای الکترولیزر می‌رساند (مرحله‌ی ۱۶-۱۷). سیستم الکترولیزر از



شکل ۱- چرخه پیشنهادی تولید چهارگانه توان، هیدروژن، گرمایش و آب شیرین

۲-۲- فرضیات

به منظور ساده سازی برای مدل سازی سیستم تولید همزمان، فرض های زیر به کار گرفته شده است [۲۱-۲۴]:

- اجزای سیستم پیشنهادی در حالت پایا کار می کند.
- در لوله ها و مبادله کن های گرمایی و اجزای ترمودینامیکی، از افت فشار و تلفات حرارتی صرف نظر شده است.
- حداقل اختلاف دمایی^۱ تبخیر کردن چرخه رانکین آلی ۵ تا ۲۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.
- سیال عامل آلی R141b برای قسمت رانکین آلی در فرض اولیه استفاده شده است.
- دمای محیط و فشار محیط به ترتیب ۲۵ درجه سلسیوس و ۱۰۱/۱ کیلو پاسکال فرض شده است.
- دمای چگالنده ها ۴۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.
- راندمان آیزنتروپیک توربین ها ۸۵٪ و پمپ ها ۹۰٪ در نظر گرفته شده است.

^۱ Pinch Point Temperature Difference (PPTD)

غشاء پروتونی قادر به تولید هیدروژن و اکسیژن از آب را ضمن استفاده توان و گرما را دارد. آب عبوری از الکترولیزر غشاء پروتونی، به دو جریان تبدیل می شود. این دو جریان شامل هیدروژن خروجی از کاتد (جریان ۱۸) و جریان مخلوط آب و اکسیژن خروجی از آنند می باشد. هیدروژن خروجی در مخازن برای انتقال به مصرف ذخیره می شود و در جداساز مخلوط خروجی اکسیژن و آب از هم تفکیک شده و اکسیژن به صورت خالص جدا می شود (جریان ۱۹). آب زمین گرمایی خروجی از مبادله کن گرمایی (جریان ۱۳) در تبخیرکن چرخه رانکین آلی برای تولید توان بیشتر و همچنین تولید توان برای مصارف در واحد الکترولیزر و سیستم اسمز معکوس استفاده می شود. در سیستم اسمز معکوس، پمپ فشار بالا فشار لازم برای عبور آب شور از غشا را فراهم می کند. آب شور یا آب دریا ضمن عبور از واحد اسمز معکوس، شوری خود را از دست داده و به آب شیرین (جریان ۲۸) و به آبی با شور بیشتر (جریان ۲۹) تبدیل می شود. همچنین در این سیستم از آب گرم کن داخلی برای گرمایش از آب زمین گرمایی خروجی از تبخیرکن (جریان ۱۴) استفاده شده است. سپس آب زمین گرمایی پس از خروج از آب گرم کن داخلی، دوباره به زمین تزریق می شود.

- دمای منبع زمین گرمایی ۱۷۵ درجه‌ی سلسیوس و دبی آن ۱۰۰ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است.
- در این بررسی پارامترهای ورودی مربوط به الکترولیزر غشاء پروتونی و سیستم اسمز معکوس به ترتیب در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- پارامترهای ورودی الکترولیزر غشاء پروتونی [۲۳]

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۱	$P_0 (bar)$	۸۰	$T_{PEM} (^{\circ}C)$
۵۰	$D (\mu m)$	۷۶	$E_{act,a} (kJ/mol)$
۹۶۴۸۶	$F (C/mol)$	۱۸	$E_{act,c} (kJ/mol)$
۱۷۰۰۰۰	$J_a^{ref} (A/m^2)$	۱۴	λ_a
۴۶۰۰	$J_c^{ref} (A/m^2)$	۱۰	λ_c

جدول ۲- پارامترهای ورودی سیستم اسمز معکوس [۲۴]

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۰/۸۵	$FF (-)$	۴۸۵/۹	$M_f (m^3/hr)$
۴/۳۵	$A_e (m^2)$	۴۵۰۰۰	$X_f (PPM)$
۲۵	$T_0 (^{\circ}C)$	۰/۳	$RR (-)$
۸۰	$\eta_{HPP} (\%)$	۷	$n_e (-)$
۲۵	$T_F (^{\circ}C)$	۴۲	$n_v (-)$

۳-۲- تحلیل انرژی

با در نظر گرفتن حجم کنترل برای هر یک از اجزای سیستم تولید همزمان، بقای جرم و انرژی برای هر جزء به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۶، ۲۵]:

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

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_i h_i = \dot{W} + \sum \dot{m}_o h_o \quad (2)$$

بازده آیزنتروپیک و توان توربین‌ها به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۵، ۲۶]:

$$\eta_{Tur} = \frac{h_i - h_o}{h_i - h_{o,s}} \quad (3)$$

$$\dot{W}_{Tur} = \dot{m} (h_i - h_o) \quad (4)$$

بازده آیزنتروپیک پمپ‌ها و توان مصرفی به صورت زیر ارائه می‌شوند [۲۶، ۲۵]:

$$\eta_p = \frac{v_i (P_o - P_i)}{h_o - h_i} \quad (5)$$

$$\dot{W}_p = \dot{m}_i (h_o - h_i) \quad (6)$$

با در نظر گرفتن اختلاف نقطه تنگش برای تبخیرکن می‌توان روابط زیر را نوشت [۲]:

$$T_{pp,ev} = T_{ev} + \Delta T_{pp,ev} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{13} (h_{13} - h_{pp}) = \dot{m}_{22} (h_{22} - h(T_{ev}, x=0)) \quad (8)$$

تحلیل انرژی و معادلات حاکم بر سیستم اسمز معکوس و

همچنین الکترولیزر غشاء پروتونی به ترتیب در جدول ۳ و جدول ۴ ارائه شده است.

۴-۲- تحلیل انرژی

مقدار انرژی فیزیکی طبق رابطه زیر به دست خواهد آمد [۲۷]:

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m} (h - h_0 - T_0 (s - s_0)) \quad (9)$$

با صرف نظر کردن انرژی جنبشی و پتانسیل مقدار انرژی کل از مجموع انرژی فیزیکی و شیمیایی طبق رابطه‌ی زیر محاسبه خواهد شد [۲۷]:

$$\dot{E}x_{tot} = \dot{E}x_{ph} + \dot{E}x_{ch} \quad (10)$$

بعد از محاسبه انرژی برای تمام جریان‌های سیال، مقدار تخریب انرژی را می‌توان از دو رابطه‌ی زیر محاسبه کرد [۲۷]:

$$\dot{E}x_{heat} + \sum \dot{E}x_{in} = \sum \dot{E}x_{out} + \dot{W} + \dot{E}x_D \quad (11)$$

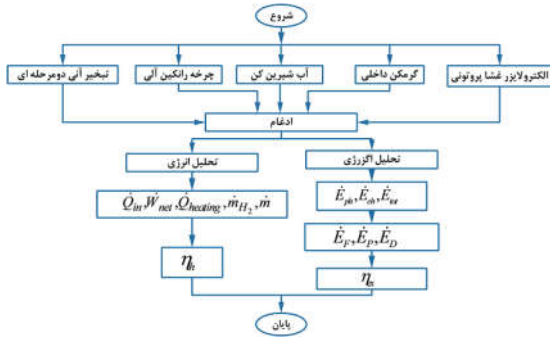
$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_F - \dot{E}x_P \quad (12)$$

که در رابطه‌ی بالا $\dot{E}x_F, \dot{E}x_P, \dot{E}x_{in}, \dot{E}x_{out}, \dot{E}x_{heat}$ به ترتیب به عنوان نرخ انرژی گرمایی، نرخ انرژی خروجی، انرژی ورودی، انرژی سوخت و محصول بیان می‌گردند. با توجه به صرف نظر از اتلافات گرمایی در اجزای این سیستم و نبودن احتراق و گازهای حاصل از آن در این بررسی از اتلاف انرژی در اجزای سیستم صرف نظر شده است و تنها اتلاف انرژی از طریق چاه‌های برگشت زمین گرمایی اتفاق می‌افتد. همچنین برای مقایسه بهتر تخریب انرژی اجزاء، پارامتر نسبت تخریب انرژی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}x_{P,k}}{\dot{E}x_{F,k}} \quad (13)$$

جدول ۳- روابط مربوط به آب شیرین کن با روش اسمز معکوس [۲۴]

پارامتر	معادله
نسبت بازیابی	$RR = M_d / M_f$
دبی آب شور	$M_b = M_f - M_d$
نمک موجود در آب شیرین خروجی	$X_d = X_f (1 - SR)$
نمک موجود در آب شور خروجی	$X_b = \frac{M_f \cdot X_f - M_d \cdot X_d}{M_b}$
متوسط غلظت نمک	$X_b = \frac{M_f \cdot X_f - M_b \cdot X_b}{M_b}$
فاکتور اصلاح دما	$TCF = \exp\left\{2700 \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right\}$
نفوذپذیری غشاء	$k_w = \frac{6.48 \times 10^{-8} \times (18.6865 - 0.177 X_b)}{T}$
متوسط فشار در سمت تغذیه	$\Pi_{ave} = 0.5 \times (\Pi_b + \Pi_f)$
فشار اسمزی خالص	$\Delta \Pi = \Pi_{ave} - \Pi_d$
اختلاف فشار خالص	$\Delta P = \left(\frac{M_d}{3600 \times TCF \times FF \times A_e \times n_e \times n_v \times k_w} \right) + \Delta \Pi$
توان پمپ فشار بالا	$\dot{W}_{HPP} = \left(\frac{1000 \times M_f \times \Delta P}{3600 \times \eta_p \times \rho_f} \right)$



شکل ۲- فلوجارت خلاصه تحلیل

۲-۶- بهینه‌سازی

در آرایش تولید همزمان پیشنهادی، توان خالص، بازده انرژی و آگرژی به فشار جداساز اول و دوم، دمای تبخیرکن و اختلاف دمای نقطه تنگش تبخیرکن وابسته است. در این بررسی سه تابع بهینه مختلف تعریف شده و نسبت به چهار متغیر بهینه‌سازی می‌شود. همچنین بهینه‌سازی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک در نرم افزار E.E.S انجام خواهد شد. برای بهینه‌سازی سه تابع عملکردی (روابط ۱۹-۲۱) نسبت به چهار متغیر ذکر شده که محدوده آن‌ها طبق روابط (۲۲-۲۵) است، می‌توان نوشت:

$$\text{Maximize } \dot{W}_{net} (P_2, P_{10}, \Delta T_{pp, ev}, T_{ev}) \quad (19)$$

$$\text{Maximize } \eta_{th} (P_2, P_{10}, \Delta T_{pp, ev}, T_{ev}) \quad (20)$$

$$\text{Maximize } \eta_{ex} (P_2, P_{10}, \Delta T_{pp, ev}, T_{ev}) \quad (21)$$

$$P_{10} \leq P_2 \text{ (kPa)} \leq 891.8 \quad (22)$$

$$20 \leq P_{10} \text{ (kPa)} \leq P_2 \quad (23)$$

$$5 \leq \Delta T_{pp, ev} (^{\circ}\text{C}) \leq 20 \quad (24)$$

$$50 \leq T_{ev} (^{\circ}\text{C}) \leq 120 \quad (25)$$

۲-۷- اعتبار سنجی

برای اعتبار سنجی مطالعه کنونی، در سه قسمت، تولید آب شیرین، تولید هیدروژن و چرخه رانکین آلی با نتایج تحقیقات گذشته به ترتیب در جدول ۵، شکل‌های ۳ و ۴ مقایسه شده است. طبق نتایج حاصله از مطابقت بسیار خوب کار حاضر با نتایج تحقیقات قبلی می‌باشد. شایان ذکر است این مطالعه با استفاده از نرم افزار EES [۲۸] شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۵- نتایج مدل‌سازی قسمت آب شیرین

متغیرها	کار حاضر	[24]	درصد خطا (%)
$M_f (m^3/hr)$	۴۸۵/۹	۴۸۵/۹	۰/۰
$M_b (m^3/hr)$	۳۴۰/۱	۳۴۰/۱	۰/۰
$X_a (ppm)$	۲۵۲	۲۵۰	۰/۸
$X_b (ppm)$	۶۴۱۸۰	۶۴۱۸۰	۰/۰
$\dot{W}_{HPP} (kW)$	۱۱۱۸	۱۱۳۱	۱/۱۶
$\Delta P (kPa)$	۶۸۳۲	۶۸۵۰	۰/۲۶

جدول ۴- روابط مربوط به الکترولایزر غشا پروتونی [۲۳]

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

۲-۵- عملکرد کلی سیستم تولید همزمان

برای محاسبه بازده انرژی طبق رابطه (۱۴) ارائه می‌شود:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{m}_{H_2} LHV + \dot{Q}_{heating} + \dot{m}_{28} h_{28}}{\dot{m}_1 (h_1 - h_0)} \quad (14)$$

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

$$\dot{Q}_{heating} = \dot{m}_{25} (h_{25} - h_{24}) \quad (15)$$

$$\dot{W}_{net} = \sum \dot{W}_T - (\sum \dot{W}_P + \dot{E}_{electric}) \quad (16)$$

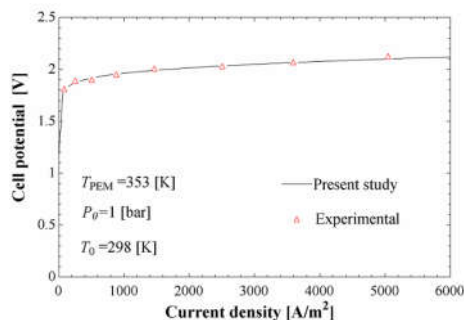
همچنین بازده آگرژی و آگرژی حاصل از گرمایش به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}_{x28} + \dot{E}_{x18} + \dot{E}_{x heating}}{\dot{E}_{x1}} \quad (17)$$

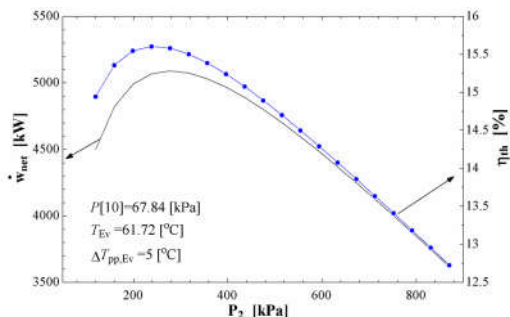
$$\dot{E}_{x heating} = \dot{E}_{x25} - \dot{E}_{x24} \quad (18)$$

روش حل و خلاصه بررسی این سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است. در ابتدا برای این سیستم تحلیل انرژی انجام داده و در ادامه تحلیل آگرژی روی این سیستم برای بررسی انجام پذیری آن انجام می‌پذیرد. تحلیل انجام شده در این سیستم در نرم افزار E.E.S انجام خواهد شد

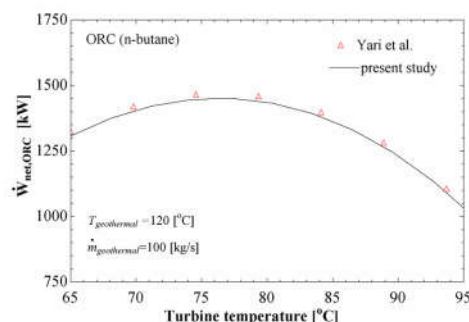
جریان و تولید هیدروژن دارای نقطه بهینه متناظر با نقطه بهینه توان خالص چرخه‌ی رانکین خواهد بود. همچنین بازده اگزرژی نیز به علت تغییرات عملکردی اگزرژی بالخصوص اگزرژی محصول یعنی توان خالص دارای نقطه‌ی بهینه‌شده است. نتایج تأثیر افزایش فشار جداساز دوم روی توان خالص چرخه و بازده حرارتی در شکل ۷ نمایش داده شده است. با افزایش فشار جداساز و به تبع آن دما و آنتالپی نقاط ۴ و ۵ افزایش پیدا خواهد کرد، و در نتیجه توان توربین فشار بالا کاهش و توان توربین‌های فشار پایین و رانکین آلی افزایش می‌یابد. که این روندها باعث ایجاد نقطه‌ی بهینه برای توان خالص شده است.



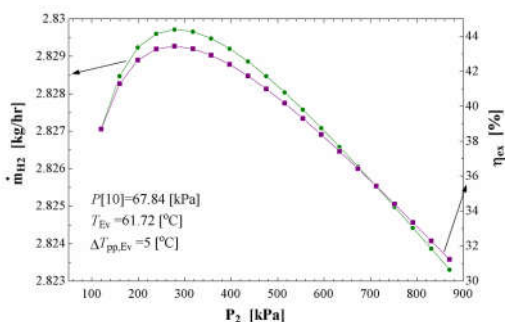
شکل ۲۳- نتایج مدل‌سازی قسمت تولید هیدروژن [۲۳]



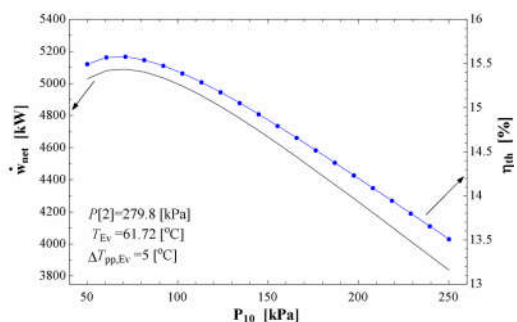
شکل ۵- توان خالص و بازده حرارتی بر حسب فشار جداساز اول



شکل ۴- نتایج مدل‌سازی قسمت چرخه رانکین آلی [۲۹]



شکل ۶- تولید هیدروژن و بازده اگزرژی بر حسب فشار جداساز اول



شکل ۷- توان خالص و بازده حرارتی بر حسب فشار جداساز دوم

۳- نتایج و بحث

حالت اولیه چرخه‌ی تولید همزمان در این بررسی به ازای فشار جداساز اول ۲۷۹/۸ کیلو پاسکال، فشار جداساز دوم ۶۷/۸۴ کیلو پاسکال، دمای تبخیرکن ۶۱/۷۲ درجه سلسیوس و اختلاف نقطه تنگش ۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. برای این حالت مشخصات ترمودینامیکی مانند دما، فشار، آنتالپی، آنترپی، دبی جرمی برای سیستم پیشنهادی در جدول ۶ ارائه شده است. همچنین برای این حالت توان خالص تولیدی ۵۰۹۱ کیلووات، آب شیرین تولید ۴۱/۷۵ کیلوگرم بر ثانیه، بازده حرارتی ۱۵/۵۸٪، بازده اگزرژی ۴۳/۴۴٪، هیدروژن تولیدی ۲/۸۳ کیلوگرم بر ساعت، مقدار گرمایش ۳۵۰/۶ کیلووات، مقدار اکسیژن تولیدی ۲۲/۴۶ کیلوگرم بر ساعت و تخریب اگزرژی کل ۶۱۱۰ کیلووات محاسبه شده‌اند.

۳-۱- بررسی پارامتری

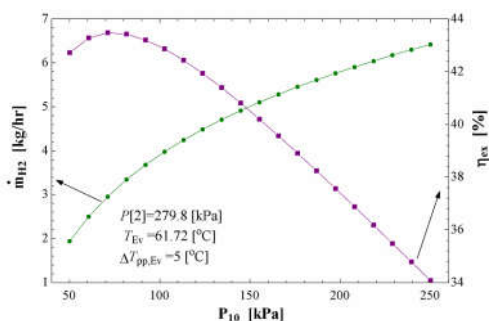
یک بررسی پارامتری برای تأثیر پارامترهای سیستم روی عملکرد سیستم انجام می‌شود. در شکل ۵ توان خالص چرخه و بازده حرارتی بر حسب فشار جداساز اول ارائه شده است، با افزایش فشار جداساز، دمای اشباع ورودی به توربین فشار بالا افزایش و از سوی دیگر دبی جرمی ورودی به آن کاهش می‌یابد که باعث می‌شود توان خالص دارای نقطه‌ی بهینه در حدود ۲۸۰ کیلوپاسکال شود. همچنین تغییرات پارامتری عملکردی سیستم بالخصوص توان خالص باعث ایجاد نقطه بهینه برای توان خالص شده است. همچنین افزایش فشار جداساز اول باعث افزایش دمای ورودی زمین‌گرمایی تبخیرکن شده و این حالت باعث یک نقطه بهینه در توان خالص رانکین آلی می‌شود. وجود نقطه بهینه برای توان چرخه‌ی رانکین، طبق رابطه اول جدول ۴، انرژی الکتریکی مورد نیاز برای واکنش الکتروشیمیایی و به تبع آن چگالی

جدول ۶- نتایج تحلیل ترمودینامیکی چرخه پیشنهادی

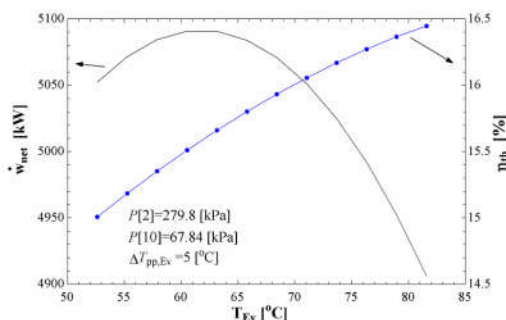
نقطه	سیال	T (°C)	P (kPa)	\dot{m} (kg/s)	h (kJ/kg)	S (kJ/kgK)
۱	زمین گرمایی	۱۷۵	۸۹۱/۸	۱۰۰	۷۴۱/۲	۲/۰۹۱
۲	زمین گرمایی	۱۳۱/۲	۲۷۹/۸	۱۰۰	۷۴۱/۲	۲/۱۱۶
۳	زمین گرمایی	۱۳۱/۲	۲۷۹/۸	۸/۷۴	۲۷۲۲	۷/۰۱۵
۴	زمین گرمایی	۸۹/۱۳	۶۷/۸۴	۸/۷۴	۲۵۲۲	۷/۱۱۳
۵	زمین گرمایی	۸۹/۱۳	۶۷/۸۴	۱۵/۸۶	۲۵۸۳	۷/۲۸۲
۶	زمین گرمایی	۴۰	۷/۳۸۱	۱۵/۸۶	۲۳۱۶	۷/۴۳۳
۷	زمین گرمایی	۴۰	۷/۳۸۱	۱۵/۸۶	۱۶۷/۵	۰/۵۷۲۳
۸	زمین گرمایی	۴۰/۰۱	۱۱۰	۱۵/۸۶	۱۶۷/۶	۰/۵۷۲۳
۹	زمین گرمایی	۱۳۱/۲	۲۷۹/۸	۹۱/۲۶	۵۵۱/۵	۱/۶۴۷
۱۰	زمین گرمایی	۸۹/۱۳	۶۷/۸۴	۹۱/۲۶	۵۵۱/۵	۱/۶۷۴
۱۱	زمین گرمایی	۸۹/۱۳	۶۷/۸۴	۷/۱۱۸	۲۶۵۸	۷/۴۹
۱۲	زمین گرمایی	۸۹/۱۳	۶۷/۸۴	۸۴/۱۴	۳۷۳/۳	۱/۱۸۲
۱۳	زمین گرمایی	۸۸/۴۸	۶۷/۸۴	۸۴/۱۴	۳۷۰/۶	۱/۱۷۵
۱۴	زمین گرمایی	۶۴/۵۹	۶۷/۸۴	۸۴/۱۴	۲۷۰/۴	۰/۸۸۸۴
۱۵	زمین گرمایی	۵۵	۶۷/۸۴	۸۴/۱۴	۲۳۰/۳	۰/۷۶۷۹
۱۶	آب	۲۵	۱۰۰/۱	۱	۱۰۴/۸	۰/۳۶۶۹
۱۷	آب	۸۰	۱۰۰/۱	۱	۳۳۵	۱/۰۷۵
۱۸	هیدروژن	۲۵	۱۰۰/۱	۰/۰۰۰۷۸۶	۳۹۳۲	۵۳/۳۸
۱۹	اکسیژن	۲۵	۱۰۰/۱	۰/۰۰۶۲۳	-۰/۲۹۶	-۰/۰۰۰۳
۲۰	R141b	۴۰	۱۳۲/۹	۳۶/۹۵	۸۵/۰۶	۰/۳۱۱۴
۲۱	R141b	۴۰/۰۱	۲۵۸/۸	۳۶/۹۵	۸۵/۱۸	۰/۳۱۱۴
۲۲	R141b	۶۱/۷۴	۲۵۸/۸	۳۶/۹۵	۳۱۹/۵	۱/۰۱۴
۲۳	R141b	۴۳/۱۶	۱۳۲/۹	۳۶/۹۵	۳۰۷/۲	۱/۰۲۱
۲۴	آب	۲۵	۱۰۰/۱	۲/۳۹۵	۱۰۴/۸	۰/۳۶۶۹
۲۵	آب	۶۰	۱۰۰/۱	۲/۳۹۵	۲۵۱/۲	۰/۸۳۱۱
۲۶	آب شور	۲۵	۱۰۰/۱	۱۳۹/۲	۹۸/۲۵	۰/۳۴۱۷
۲۷	آب شور	۲۷/۰۴	۶۹۳۳	۱۳۹/۲	۱۰۶/۲۸	۰/۳۶۸۶
۲۸	آب شیرین	۲۵	۱۰۰/۱	۴۱/۷۵	۱۰۴/۹	۰/۳۶۷۲
۲۹	آب شورتر	۲۵	۱۰۰/۱	۹۷/۴۱	۹۵/۲۵	۰/۳۲۴
۳۰	آب	۲۵	۱۰۰/۱	۲۲۵۲	۱۰۴/۸	۰/۳۶۶۹
۳۱	آب	۲۸/۶۲	۱۰۰/۱	۲۲۵۲	۱۲۰	۰/۴۱۷۴
۳۲	آب	۲۵	۱۰۰/۱	۲۰۰۰	۱۰۴/۸	۰/۳۶۶۹
۳۳	آب	۲۵/۹۸	۱۰۰/۱	۲۰۰۰	۱۰۸/۹	۰/۳۸۰۷

درجه سلسیوس شده است. همچنین با افزایش دمای تبخیرکن، مقدار $\dot{m}_{22}h_{22}$ همواره کاهش می‌یابد در نتیجه طبق بقای انرژی در تبخیرکن مقدار $\dot{m}_{14}h_{14}$ و به تبع آن مقدار انرژی گرمایشی و اگزرژی مرتبط با آن افزایش پیدا می‌کند. روند افزایش انرژی گرمایشی به تغییرات سایر پارامترهای عملکردی تأثیر گذاشته و باعث می‌شود که توان حرارتی همواره افزایش یابد. در شکل ۱۰ تأثیر دمای تبخیرکن روی بازده اگزرژی و تولید هیدروژن ارائه شده است. تولید هیدروژن همانند چرخه‌ی رانکین آلی دارای نقطه‌ی بهینه در دمای ۶۰ درجه‌ی سلسیوس بوده و در این حالت هیدروژن تولیدی ۲/۷۵ کیلوگرم بر ساعت می‌باشد. طبق نتایج مشاهده شده در شکل ۱۰، تغییرات عملکردی اجزا باعث بازده اگزرژی بهینه با مقدار ۴۳/۴ درصدی شده است.

تأثیر اختلاف دمای تنگش تبخیرکن روی توان خالص و بازده حرارتی در شکل ۱۱ و همچنین تأثیر این پارامتر روی بازده اگزرژی و تولید هیدروژن در شکل ۱۲ ارائه شده است. با افزایش اختلاف دمای تنگش تبخیرکن از ۵ تا ۲۰ درجه سلسیوس مقدار انرژی ورودی به توربین رانکین ($\dot{m}_{22}h_{22}$) کم شده و بنابراین پارامترهای عملکردی سیستم تولید همزمان همانند توان چرخه‌ی رانکین، توان خالص کل چرخه، تولید هیدروژن و بازده اگزرژی کاهش خواهند یافت. با کاهش مقدار $\dot{m}_{22}h_{22}$ در تبخیرکن، مقدار $\dot{m}_{14}h_{14}$ افزایش یافته و بنابراین باعث افزایش گرمایش می‌شود. افزایش گرمایش بر سایر پارامترهای عملکردی غلبه کرده و باعث می‌شود تا بازده انرژی روندی صعودی داشته باشد.



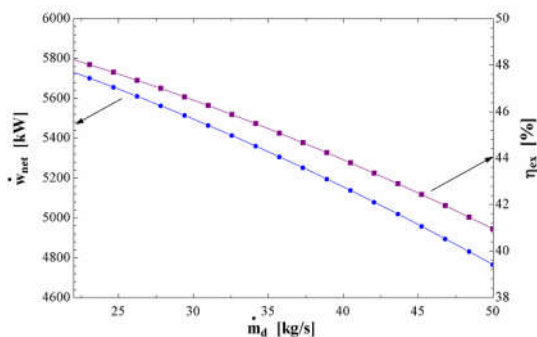
شکل ۸- تولید هیدروژن و بازده اگزرژی بر حسب فشار جداساز دوم



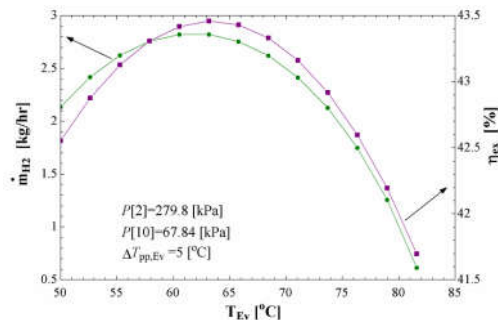
شکل ۹- توان خالص و بازده حرارتی بر حسب دمای تبخیرکن

طبق نتایج شکل ۸ با توجه به افزایش توان چرخه‌ی رانکین آلی با فشار جداساز دوم، تولید هیدروژن پیوسته افزایش می‌یابد. شایان‌ذکر است با افزایش توان چرخه رانکین مقدار انرژی ورودی به آب‌گرم‌کن داخلی ($\dot{m}_{14}h_{14}$) یا به عبارت دیگر مقدار گرمایشی و اگزرژی گرمایشی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به تغییرات پارامترهای عملکردی سیستم، مطابق شکل ۷ و ۸ بازده حرارتی و اگزرژی دارای نقطه‌ی بهینه نسبت به فشار جداساز دوم می‌باشند.

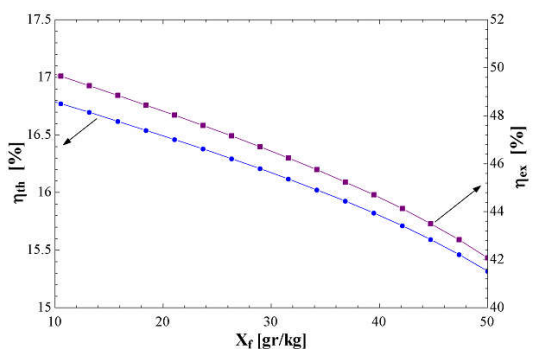
تأثیر دمای تبخیرکن روی توان خالص و بازده حرارتی در شکل ۹ نشان داده شده است. با افزایش دمای تبخیرکن، مقدار آنتالپی ورودی توربین چرخه‌ی رانکین افزایش پیدا کرده درحالی‌که دبی کاهش می‌یابد، از سوی دیگر توان مصرفی پمپ رانکین افزایش یافته است، این روند متضاد باعث ایجاد نقطه‌ی بهینه برای توان چرخه‌ی رانکین و به تبع آن برای کل سیستم تولید همزمان در دمای تبخیرکن تقریباً ۶۰



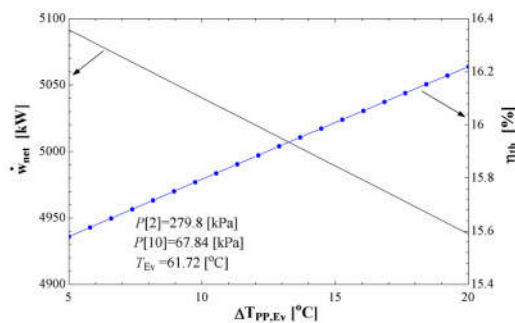
شکل ۱۳- توان خالص و بازده اگزرژی برحسب دبی آب شیرین



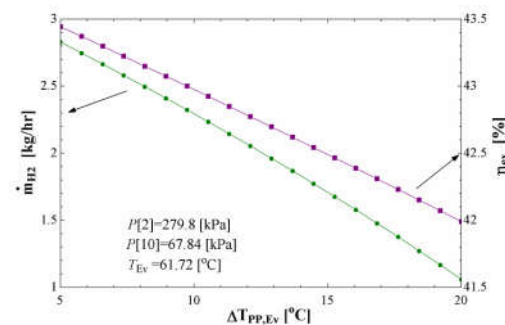
شکل ۱۰- تولید هیدروژن و بازده اگزرژی برحسب دمای تبخیرکن



شکل ۱۴- بازده حرارتی و بازده اگزرژی برحسب غلظت آب شور



شکل ۱۱- توان خالص و بازده حرارتی برحسب اختلاف دمای تنگش تبخیرکن



شکل ۱۲- تولید هیدروژن و بازده اگزرژی برحسب اختلاف دمای تنگش تبخیرکن

۳-۱- نتایج بهینه‌سازی

برای سیستم تولید همزمان نتایج بهینه‌سازی از سه دیدگاه مختلف در جدول ۷ ارائه شده است. همان‌طور که طبق نتایج مشخص است، پارامترها و عملکردهای سیستم از لحاظ سه دیدگاه باهم متفاوت است. از دیدگاه بهینه‌سازی توان خالص چرخه، برای این حالت توان خالص تولیدی، بازده حرارتی، بازده اگزرژی، هیدروژن تولیدی و گرمایش به- ترتیب، ۵۰۹۱ کیلووات، ۱۵/۵۸٪، ۴۳/۴۴٪ و ۲/۸۳ کیلوگرم بر ساعت، ۳۵۰/۶ کیلووات حاصل شده است. با توجه به نتایج می‌توان فهمید که از دیدگاه بازده حرارتی، بیشترین مقدار در اختلاف دمای تنگش تبخیرکن ۲۰ درجه سلسیوس اتفاق افتاده است، در این حالت مقدار گرمایش به بیشترین مقدار خود می‌رسد و باعث بیشینه شدن بازده حرارتی می‌شود. یا به عبارت دیگر بر روی توان خالص، گرمایش بیشترین تأثیر را دارد که شکل‌های ۸ و ۱۰ مؤید این مطلب می‌باشند. در این حالت مقدار توان خالص تولیدی ۳۹۲۹ کیلووات، بازده حرارتی ۱۶/۹۷٪، بازده اگزرژی ۳۴/۳۳٪، هیدروژن تولیدی ۰/۷۴ کیلوگرم بر ساعت و گرمایش ۲۴۷۰ کیلووات حاصل شده است. بهینه‌سازی از دیدگاه اگزرژی نشان می‌دهد که در این حالت هیدروژن تولیدی (۳/۳۹ کیلوگرم بر ساعت) بیشترین مقدار نسبت به دو دیدگاه دیگر را دارا می‌باشد. شایان ذکر است نتایج متغیرهای بهینه از دیدگاه توان، به‌عنوان پیش‌فرض در مطالعه پارامتریک استفاده شده است. همچنین نتایج این بررسی از دیدگاه بهینه بازده اگزرژی با استفاده از دمای منبع زمین گرمایی ۱۷۵ درجه سلسیوس با سیستم‌های موجود در مطالعات گذشته در جدول ۸ مقایسه شده است. نتایج نشان‌گر بهبود بازده اگزرژی این سیستم نسبت به مطالعات گذشته می‌باشد.

تأثیر دبی آب شیرین روی توان خالص و بازده اگزرژی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با افزایش دبی آب شیرین، مقدار توان مصرفی پمپ فشار بالا جهت تولید آب شیرین افزایش پیدا کرده و به تبع آن توان خالص چرخه کاهش می‌یابد، در نتیجه طبق رابطه ۱۷ بازده اگزرژی نیز کاهش می‌یابد. تغییرات بازده‌های حرارتی و اگزرژی با تغییر غلظت آب دریا در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، افزایش غلظت آب دریا منجر به افزایش توان مصرفی پمپ فشار بالا و کاهش توان خالص چرخه و به تبع آن بازده‌های حرارتی و اگزرژی کاهش می‌یابند. طبق نتیجه حاصل شده از این شکل با افزایش غلظت آب دریا از ۱۰ تا ۵۰ گرم بر کیلوگرم، بازده اگزرژی از ۴۹ تا ۴۲ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۷- عملکرد بهینه چرخه پیشنهادی از سه دیدگاه مختلف

پارامترها/ مقادیر بهینه	نسبت به توان خالص	نسبت به بازده حرارتی	نسبت به بازده اگزرژی
فشار جداساز اول (kPa)	۲۷۹/۸	۱۸۱/۳	۲۹۵/۶
فشار جداساز دوم (kPa)	۶۷/۸۴	۱۴۱/۷	۸۱/۷۱
دمای تبخیرکن ($^{\circ}\text{C}$)	۶۱/۷۲	۸۷/۱	۶۶/۱۱
اختلاف دمای نقطه تنگش تبخیرکن ($^{\circ}\text{C}$)	۵	۲۰	۵
توان تولیدی خالص (kW)	۵۰۹۱	۳۹۲۹	۵۰۷۹
بازده حرارتی (%)	۱۵/۵۸	۱۶/۹۷	۱۵/۵۷
تخریب اگزرژی کل (kW)	۶۱۱۰	۷۲۹۷	۶۱۱۵
بازده اگزرژی (%)	۴۳/۴۴	۳۴/۳۳	۴۳/۵۴
تولید هیدروژن (kg/hr)	۲/۸۳	-۰/۷۴	۳/۳۹
تولید آب شیرین (kg/s)	۴۱/۷۵	۴۱/۷۵	۴۱/۷۵
مقدار گرمایش (kW)	۳۵۰/۶	۲۴۷۰	۴۶۵/۹

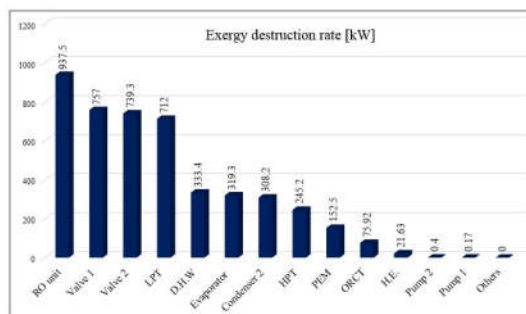
جدول ۸- عملکرد بازده اگزرژی آرایش پیشنهادی و پژوهش‌های گذشته

مقادیر بهینه	مطالعه کنونی	[۱۶]	[۲۱]
بازده اگزرژی (%)	۴۳/۵۴	۱۷/۲	۳۷/۴۲
بهبود نسبت به مطالعه قبلی	-	۱۵۳/۴	۱۶/۳۵

۵- نمادها

\dot{E}_x	نرخ تخریب اگزرژی (kW)
h	آنتالپی مخصوص (kJ/kg)
\dot{m}_k	دبی جرمی عبوری از جزء k (kg/s)
ORC	چرخه رانکین آلی
P	فشار (kPa)
PEM	الکترولیزر غشاء پروتونی
RO	اسمز معکوس
s	آنتروپی مخصوص (kJ/kgK)
T	دما ($^{\circ}\text{C}$)
v	حجم مخصوص (m^3/kg)
\dot{W}_{net}	توان خالص چرخه (kW)
x	کیفیت (-)
مخفف و زیرنویس‌ها	
D	تخریب اگزرژی
ev	اواپراتور
f	مایع اشباع، اگزرژی سوخت
g	بخار اشباع
HPP	پمپ فشار بالا
HPT	توربین فشار بالا
LPT	توربین فشار پایینی
ORCT	توربین چرخه رانکین آلی
P	پمپ، اگزرژی محصول
ph	اگزرژی فیزیکی
pp	نقطه تنگش
T	توربین

برای سیستم تولید همزمان، برای حالت بهینه از دیدگاه توان تولیدی خالص، نرخ تخریب اگزرژی اجزای سیستم در شکل ۱۵ ارائه شده‌اند. در این بین بیشترین مقدار تخریب اگزرژی به ترتیب مرتبط با واحد اسمز معکوس، شیر انبساط ۱ و ۲ و توربین فشار پایین می‌باشد. بیشتر بودن مقدار تخریب اگزرژی واحد اسمز معکوس مربوط به مقدار توان مصرفی بسیار زیاد این سیستم که باعث بالا بودن مقدار تخریب اگزرژی سوخت نسبت به اگزرژی محصول این عضو می‌باشد. همچنین بالا بودن نرخ تخریب اگزرژی شیرهای انبساط به علت افت فشار زیاد در این اعضا می‌باشد. همچنین در این بررسی مقدار اتلاف اگزرژی تنها از طریق چاه‌ها بوده و برابر با ۵۱۹/۵۸ کیلووات می‌باشد.



شکل ۱۵- تخریب اگزرژی اجزای سیستم

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک آرایش تولید همزمان توان، آب شیرین، هیدروژن و گرمایش با استفاده از یک منبع زمین‌گرمایی پیشنهاد و

علامت یونانی

η_{ex} بازده انرژی (%)

η_{th} بازده حرارتی (%)

η_p راندمان آیزنتروپیک پمپ (%)

η_T راندمان آیزنتروپیک توربین (%)

۶- مراجع

- energy. *International journal of hydrogen energy*, Vol. 37, pp. 2058-69, 2012.
- [16] Kianfard H, Khalilarya S, Jafarmadar S., Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC. *Energy Conversion and Management*, Vol. 177, pp. 339-49, 2018.
- [17] Akrami E, Chitsaz A, Nami H, Mahmoudi S., Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy. *Energy*, Vol. 124, pp. 625-39, 2017.
- [18] Yuksel YE, Ozturk M., Thermodynamic and thermoeconomic analyses of a geothermal energy based integrated system for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, pp. 2530-46, 2017.
- [19] Mohammadi A, Mehrpooya M., Energy and exergy analyses of a combined desalination and CCHP system driven by geothermal energy. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 116, pp. 685-694, 2017.
- [20] Ghaebi H, Namin AS, Rostamzadeh H., Performance assessment and optimization of a novel multi-generation system from thermodynamic and thermoeconomic viewpoints. *Energy conversion and management*, Vol. 165, pp. 419-39, 2018.
- [21] 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*, Vol. 91, pp. 479-95, 2015.
- [22] Aali A, Pourmahmoud 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*, Vol. 143, pp. 377-90, 2017.
- [23] Ni M, Leung MK, Leung DY., Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant. *Energy conversion and management*, Vol. 49, pp. 2748-56, 2008.
- [24] Nafey A, Sharaf M., Combined solar organic Rankine cycle with reverse osmosis desalination process: energy, exergy, and cost evaluations. *Renewable Energy*, Vol. 35, No 11, pp. 2571-2580, 2010.
- [25] Cengel, Y. A., & Boles, M. A., *Thermodynamics: an engineering approach*. McGraw-Hill, USA, 8862.
- [26] Sonntag RE, Borgnakke C, Van Wylen GJ, Van Wyk S., *Fundamentals of thermodynamics*. Wiley, New York, 1998.
- [27] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M., *Thermal design and optimization*. John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [28] Klein S, Alvarado F. EES—Engineering Equation Solver. *F-Chart Software*, 2002.
- [29] Yari M, Mehr A, Zare V, Mahmoudi S, Rosen M., Exergoeconomic comparison of TLC (trilateral Rankine cycle), ORC (organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low grade heat source. *Energy*, Vol. 83, pp. 712-22, 2015.
- [1] Abdolalipouradi M, Khalilarya S, Jafarmadar S., Energy and Exergy Analysis of a New Power, Heating, Oxygen and Hydrogen Cogeneration Cycle Based on the Sabalan Geothermal Wells. *International Journal of Engineering*, Vol. 32, pp. 445-50, 2019.
- [۲] عبدالعلی پورعدل م، خلیل آریا ش، جعفرمدار ص. استفاده از یک چرخه ترکیبی تبخیر آبی یک و سه مرحله ای با رانکین آبی برای تولید توان از چاههای زمین گرمایی سبلان. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، در حال انتشار.
- [3] Olabi AG, Mahmoud M, Soudan B, Wilberforce T, Ramadan M., Geothermal based hybrid energy systems, toward ecofriendly energy approaches. *Renewable Energy*, Vol. 147, pp. 2003-12, 2020.
- [4] Rubio C-L, García-Alcaraz JL, Martínez-Cámara E, Latorre-Biel JI, Jiménez-Macías E, Blanco-Fernández J., Replacement of electric resistive space heating by a geothermal heat pump in a residential application—Environmental amortisation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 37, pp. 100567, 2020.
- [5] Martinez EH, Carlos MPA, Solis JIC, Avalos MMdCP., Thermodynamic simulation and mathematical model for single and double flash cycles of Cerro Prieto geothermal power plants. *Geothermics*, Vol. 83, pp. 101713, 2020.
- [6] Yari M., Exergetic analysis of various types of geothermal power plants. *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 112-21, 2010.
- [7] Shokati N, Ranjbar F, 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, pp. 527-42, 2015.
- [8] DiPippo R. *Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact*. Butterworth-Heinemann, United Kingdom, 2012.
- [9] Tester JW, Anderson BJ, Batchelor A, Blackwell D, DiPippo R, Drake E, et al., *The future of geothermal energy. Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, U. 2006.
- [10] Abdolalipouradi M, Khalilarya S, Jafarmadar S., Exergoeconomic analysis of a novel integrated transcritical CO2 and Kalina 11 cycles from Sabalan geothermal power plant. *Energy Conversion and Management*, Vol. 915, pp. 420-35, 2019.
- [۱۱] عبدالعلی پورعدل م، خلیل آریا ش، محمدخانی ف. تحلیل ترمودینامیکی یک آرایش جدید تولید همزمان توان، برودت، هیدروژن و اکسیژن با استفاده از چاههای زمین گرمایی سبلان. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، در حال انتشار.
- [12] Zare V., A comparative thermodynamic analysis of two tri-generation systems utilizing low-grade geothermal energy. *Energy conversion and management*, Vol. 118, pp. 264-74, 2016.
- [13] Ganjehsarabi H., Mixed refrigerant as working fluid in Organic Rankine Cycle for hydrogen production driven by geothermal energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, pp. 18703-11, 2019.
- [14] Ratlamwala T, Dincer I., Comparative efficiency assessment of novel multi-flash integrated geothermal systems for power and hydrogen production. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 48, pp. 359-66, 2012.
- [15] Yilmaz C, Kanoglu M, Bolatturk A, Gadalla M., Economics of hydrogen production and liquefaction by geothermal