



تحلیل ترمودینامیکی و مقایسه دو آرایش جدید تولید سه گانه (توان، هیدروژن و گرمایش) با استفاده از انرژی زمین گرمایی

مهران عبدالعلی پورعدل^۱، محسن رستمی^۲، شهرام خلیل آریا^{۳*}

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- دانشکده هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۵
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۳/۲۲

کلمات کلیدی:

تحلیل ترمودینامیکی
تولید همزمان
مبدل غشاء پروتونی
کالینا
چرخه‌ی رانکین آلی.

خلاصه: در این مطالعه دو چرخه جدید تولید همزمان (توان، هیدروژن و گرمایش) مورد تحلیل ترمودینامیکی و بهینه‌سازی قرار گرفته است. برای چرخه‌های پیشنهادی، این دو سیستم توسط قسمت تولید توان از هم متمایز شده‌اند، یا به عبارت دیگر چرخه رانکین آلی و چرخه کالینا برای تولید توان استفاده شده است. همچنین در این دو سیستم از آب گرم‌کن داخلی برای گرمایش و الکترولایزر غشاء پروتونی برای تولید هیدروژن استفاده شده است. پس از شبیه‌سازی ترمودینامیکی، یک بررسی جامع به ازای پارامترهای تأثیرگذار روی تولید هیدروژن، توان خالص، گرمایش، بازده حرارتی و بازده انرژی دو آرایش تولید همزمان انجام شده است. همچنین در نهایت نسبت به بازده انرژی بهینه‌سازی شده است. طبق نتایج این بررسی، بازده انرژی و تولید هیدروژن نسبت به دمای اواپراتور چرخه تولید همزمان بر اساس رانکین آلی دارای مقدار بهینه است در حالی که برای چرخه تولید همزمان بر مبنای کالینا، صعودی می‌باشند. همچنین طبق بررسی انجام شده برای سیال‌های عامل مختلف برای قسمت رانکین آلی، سیال عامل R1۵۲a مقدار هیدروژن بیشتری تولید می‌کند. بر اساس نتایج بهینه برای دمای ۱۲۰ درجه‌ی سلسیوس منبع گرم، چرخه‌ی تولید همزمان بر مبنای کالینا دارای بازده انرژی و تولید هیدروژن بیشتری نسبت به چرخه‌ی تولید همزمان بر مبنای چرخه‌ی رانکین آلی می‌باشد.

۱- مقدمه

دادند و مشاهده کردند چرخه‌ی تولید توان رانکین آلی دارای بهترین مشخصات از لحاظ اقتصادی می‌باشد [۳].

در صد سال اخیر با توجه به مشکلات و آلودگی‌های سوخت‌های فسیلی، تولید و استفاده از سوخت‌های جدید بیشتر مورد توجه می‌باشد [۵، ۶]. از سوی دیگر محققین بر این باورند که بهره‌برداری از سیستم‌های انرژی هیدروژنی، می‌تواند راه حل مناسبی در جایگزینی سوخت‌های فسیلی و رفع معضلات مربوط به آن باشد [۷]. هیدروژن به دلیل پاسخ‌گویی به تمامی نیازها و داشتن خصوصیات یک حامل انرژی مناسب و پاک، در بلندمدت می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشد [۷، ۸]. عموماً هیدروژن به صورت مستقیم در طبیعت یافت نمی‌شود و باید از روش‌های جداسازی بدین منظور استفاده کرد [۹، ۱۰]. بیشتر جداسازی و تبدیلات هیدروژن از سوخت‌های فسیلی می‌باشد. راه حل جایگزین برای تولید هیدروژن و عدم استفاده از سوخت‌های فسیلی، استفاده از آب برای جداسازی هیدروژن و اکسیژن توسط سیستم الکترولایزر غشاء پروتونی می‌باشد [۱۱، ۱۲]. برای تولید هیدروژن با استفاده از الکترولایزر غشاء

با در نظر گرفتن هزینه‌های سوخت‌های فسیلی، اتمام پذیری، مسائل زیست‌محیطی و گرمایش جهانی استفاده از انرژی‌های جایگزین از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر اهمیت خود را بیش از حد نشان می‌دهد. از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی زمین‌گرمایی است که یک منبع قابل اطمینان بوده که به طور عمده برای تولید توان، گرمایش، سرمایش، خشک‌کردن صنعتی، تقطیر و استفاده در سایر چرخه‌های تحتانی بسته به شرایط منبع مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱، ۲]. چرخه‌ی رانکین آلی^۱ و چرخه‌ی کالینا^۲ از جمله چرخه‌های تحتانی هستند که امروزه برای تولید توان از منابع دما پایین یا انرژی اتلافی از منابع حرارتی بسیار استفاده می‌شوند [۳، ۴]. یاری و همکاران به ازای دمای منبع گرم ۱۲۰ درجه سلسیوس، سه چرخه‌ی تولید توان رانکین آلی، کالینا و مثلثی^۳ را مورد مطالعه قرار

- 1 Organic Rankine Cycle (ORC)
- 2 Kalina Cycle (KC)
- 3 Trilateral Cycle (TLC)

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sh.khalilarya@urmia.ac.ir



همزمان توان، هیدروژن، اکسیژن و برودت از چاه‌های زمین‌گرمایی سبلان انجام داده و گزارش کردند که توان خالص تولیدی، تولید هیدروژن، سرمایه‌ش، بازده حرارتی و بازده انرژی به ترتیب ۱۴۷۴۹ کیلووات، ۱۳/۲۵ کیلوگرم بر ساعت، ۱۰۹۲۵ کیلووات، ۲۲/۳۴ درصد و ۵۰/۶۲ درصد می‌باشد.

همان‌گونه که اشاره شد، بحث استفاده از سیستم‌های تولید همزمان از منابع انرژی زمین‌گرمایی، با توجه به افزایش بازده انرژی و انرژی از جمله مواردی است که در سال‌های اخیر با اقبال زیادی مواجه شده است. سیستم‌های تولید سه‌گانه (گرمایش، هیدروژن و توان) مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی بدلیل ایجاد انعطاف در تولید هیدروژن و ایجاد بستر مناسب برای گرمایش منطقه، از درجه اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. با این وجود هیچ مطالعه‌ای منحصراً به بررسی سیستم تولید سه‌گانه (گرمایش، هیدروژن و توان) نپرداخته است و بالاخص در رابطه با استفاده برای دمای منبع حرارت کم و متوسط، هیچ‌گونه توجهی به چرخه کالینا به‌عنوان منبع تولید توان در سیستم‌های تولید همزمان (گرمایش، هیدروژن و توان) و مقایسه عملکرد آن با چرخه شناخته‌شده‌ای همانند چرخه رانکین آلی نشده است. مطالعه، مقایسه و بهینه‌سازی دو سیستم تولید سه‌گانه بر مبنای چرخه رانکین آلی و کالینا برای دماهای مختلف زمین‌گرمایی از جمله مواردی است که خلا آن در ادبیات موضوع کاملاً مشهود است. در همین راستا در مطالعه حاضر یک مطالعه جامع ترمودینامیکی و مقایسه بین این دو سیستم تولید همزمان انجام گرفته است. به‌طور کلی مهم‌ترین اهداف این مطالعه عبارت است از:

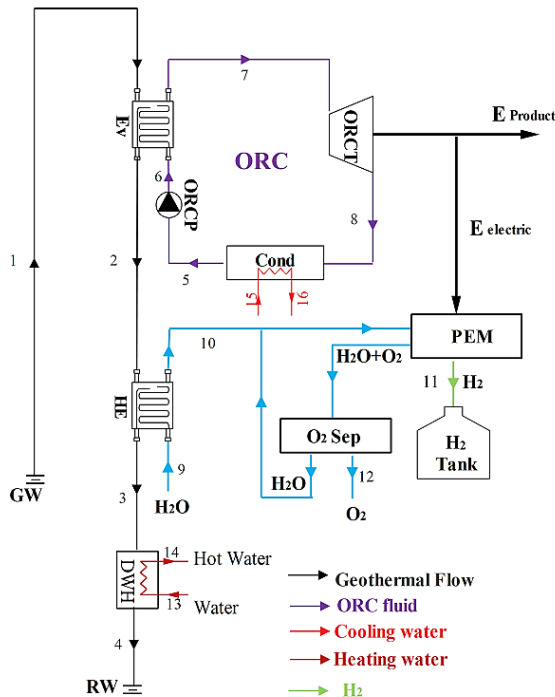
- استفاده از انرژی زمین‌گرمایی به‌عنوان منبع حرارتی برای تولید همزمان توان، گرمایش، هیدروژن و اکسیژن
- گرمایش سیستم به‌وسیله آب‌گرم‌کن داخلی و تولید هیدروژن و اکسیژن به‌وسیله الکترولایزر غشاء
- مدل‌سازی دو سیستم تولید همزمان پیشنهادی از دیدگاه قانون اول و دوم
- بررسی پارامتریکی و بهینه‌سازی برای دو سیستم موجود برای دماهای مختلف منبع گرم زمین‌گرمایی برای انتخاب بهترین آرایش.

پروتونی، والورده و همکاران یک مطالعه آزمایشگاهی انجام دادند [۱۳]. همچنین نی و همکاران یک مطالعه جامع پارامتریکی برای تولید هیدروژن را از سیستم الکترولایزر غشاء پروتونی مورد ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که با افزایش توان ورودی برای الکترولایزر مقدار هیدروژن تولیدی افزایش می‌یابد [۱۴].

امروزه تولید همزمان به دلیل مزایای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی با استفاده از منبع انرژی زمین‌گرمایی دارای اهمیت زیادی بوده و در حال گسترش می‌باشد [۱۵]. یک سیستم تولید همزمان سرمایه‌ش، گرمایش و توان با استفاده از منبع زمین‌گرمایی و با زیرچرخه‌های کالینا و رانکین آلی توسط زارع مورد تحلیل انرژی و انرژی قرار گرفت. طبق نتایج حاصله، چرخه‌ی تولید همزمان بر اساس چرخه‌ی کالینا از دیدگاه قانون دوم عملکرد بهتری را نشان داد [۱۶]. گنج‌سرابی [۱۷] با استفاده از تولید توان توسط مخلوط سیال‌های عامل در قسمت رانکین آلی، به تولید هیدروژن توسط الکترولایزر غشاء پروتونی پرداخت و نشان داد که بیشترین هزینه به‌ترتیب، مربوط به الکترولایزر، توربین و کندانسور می‌باشد. کاراپکمز و دینسر [۱۸] به تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی یک سیستم جدید انرژی مبتنی بر انرژی خورشیدی و زمین‌گرمایی برای تولید هیدروژن پرداختند و نشان دادند که بالاترین بازده انرژی و انرژی به ترتیب در مدت زمان ذخیره‌سازی ۷۸/۳۷ درصد و ۵۸/۴۰ درصد می‌باشد. یوکسل و همکاران به مطالعه ترمودینامیکی چرخه تولید همزمان هیدروژن مایع و توان بر پایه انرژی زمین‌گرمایی به ازای دماهای مختلف ۱۳۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس پرداخته و نشان دادند که به ازای این افزایش دما، بازده انرژی از ۳۸ تا ۶۴ درصد افزایش یافته و همچنین با افزایش دمای الکترولیز غشاء پروتونی از ۶۰ تا ۸۵ درجه سلسیوس، بازده تولید هیدروژن تقریباً از ۳۹ به ۴۴ درصد می‌رسد [۱۹]. در مطالعه دیگری دینسر و زامفیرسکو به تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی انرژی‌های تجدیدپذیر مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی با توجه به تولید همزمان برق، گرما، آب گرم، سرمایه‌ش، هیدروژن و آب شیرین پرداختند [۲۰]. کیانفرد و همکاران [۲۱] به تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی یک چرخه‌ی تولید همزمان توان، هیدروژن و آب شیرین‌کن پرداختند و نشان دادند که هزینه تولید واحد انرژی ۱/۳ دلار بر گیگاژول می‌باشد. عبدالعلی پورعدل و همکاران [۲۲] یک بررسی جامع برای استفاده از چرخه ترکیبی جدید برای تولید

۲- توصیف چرخه‌های تولید همزمان سه‌گانه

۲-۱ بررسی چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی رتبه‌بندی آلی^۱



شکل ۱. چرخه جدید پیشنهادی تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی رانکین آلی در این بررسی

Fig. 1. The new ORC based tri-generation cycle in this study

زمین‌گرایی نشان داده شده است، در واقع در این آرایش از چرخه‌ی کالینا به جای چرخه‌ی رانکین آلی برای تولید توان و همچنین تأمین انرژی برای تولید هیدروژن استفاده شده است. مخلوط آب-آمونیاک در چرخه‌ی کالینا پس از دریافت انرژی در اواپراتور (مرحله‌ی ۷-۸) وارد جداساز شده تا با افزایش غلظت آمونیاک و آنتالپی وارد توربین کالینا شده تا بتوان تولید شود (مرحله‌ی ۹-۱۳). مایع خارج شده از جداساز (مرحله‌ی ۱۰) به علت بالا بودن دما از بازیاب استفاده می‌شود. مخلوط آب-آمونیاک خروجی از بازیاب در شیر انبساط شده به فشار پایین چرخه می‌رسد (مرحله‌ی ۱۱-۱۲). جریان خروجی از توربین و شیر انبساط در جاذب ترکیب شده و سپس وارد کندانسور می‌شود تا ضمن تبدیل شدن به مایع اشباع (مرحله‌ی ۵) توسط پمپ به فشار بالای چرخه‌ی کالینا برسد. در شکل ۲ سایر اجزای سیستم همانند شکل ۱ می‌باشد.

۳- تحلیل ترمودینامیکی

معادلات بقای جرم و انرژی، با در نظر گرفتن اجزای چرخه

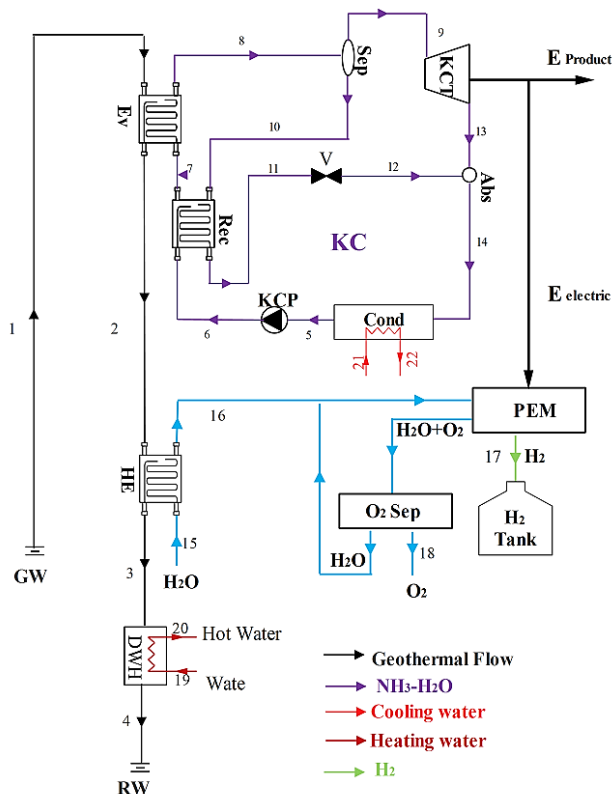
به‌عنوان حجم کنترل، به‌صورت زیر بیان می‌گردند [۷]:

دیگرام شماتیک چرخه‌ی تولید سه‌گانه توان، هیدروژن و گرمایش بر اساس چرخه‌ی رانکین آلی که از انرژی زمین‌گرایی بهره می‌برد، در شکل ۱ ارائه شده است. در آرایش (الف) از چرخه‌ی رانکین آلی برای تولید توان، از الکترولیزر غشاء پروتونی برای تولید هیدروژن و سیستم آب‌گرم‌کن داخلی برای گرمایش استفاده شده است. آب زمین‌گرایی خروجی از چاه، انرژی خود را به اواپراتور چرخه رانکین آلی (مرحله‌ی ۷-۸) داده تا دمای سیال آلی (مرحله‌ی ۶-۷) افزایش یافته و این سیال گرم شده در توربین، کار انجام دهد (مرحله‌ی ۷-۸). سیال خروجی در کندانسور به مایع اشباع تبدیل شده (مرحله‌ی ۵-۸) و سپس توسط پمپ به فشار بالای (مرحله‌ی ۵-۶) چرخه‌ی رانکین آلی می‌رسد. قسمتی از توان تولیدی در چرخه رانکین آلی، انرژی مورد نیاز را برای راه‌اندازی سیستم الکترولیزر غشاء پروتونی برای تولید هیدروژن را فراهم می‌کند. این سیستم قادر به تولید هیدروژن و اکسیژن از آب را ضمن استفاده از توان و گرما را دارد. آب زمین‌گرایی خروجی از اواپراتور در مبدل حرارتی، دمای آب را از دمای محیط به دمای غشاء می‌رساند (مرحله‌ی ۹-۱۰). آب عبوری از الکترولیزر غشاء پروتونی، به دو جریان تبدیل می‌شود. این دو جریان شامل هیدروژن خروجی از کاتد و جریان مخلوط آب و اکسیژن خروجی از آنند می‌باشد. هیدروژن خروجی در مخازن برای انتقال به مصرف‌کننده ذخیره می‌شود (مرحله‌ی ۱۱) و در ادامه اکسیژن، از خروجی آنند توسط جداساز اکسیژن از مخلوط خروجی که شامل اکسیژن و آب، جدا می‌شود. همچنین آب خروجی از جداساز به علت بالا بودن دما با آب خروجی گرم شده در مبدل (مرحله‌ی ۱۰) مخلوط شده تا دوباره در الکترولیزر غشاء پروتونی مورد استفاده قرار گیرد. از جایی که آب زمین‌گرایی خروجی از مبدل حرارتی دمای زیادی را دارد از آن برای گرمایش در آب‌گرم‌کن داخلی (مرحله‌ی ۱۳-۱۴) استفاده می‌شود.

۲-۲ بررسی چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی کالینا^۲

در شکل ۲، دیگرام شماتیک چرخه‌ی تولید سه‌گانه توان، هیدروژن و گرمایش بر اساس چرخه‌ی کالینا با استفاده از انرژی

- 1 ORC-based tri-generation system
- 2 KC-based tri-generation system



شکل ۲. چرخه جدید پیشنهادی تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی کالینا در این بررسی

Fig. 2. The new Kalina based tri-generation cycle in this study

۳-۱-۲- تحلیل چرخه‌ی کالینا

برای هر عضو چرخه کالینا و با در نظر گرفتن غلظت آمونیاک در مخلوط آب آمونیاک، علاوه بر بقای جرم، بقای جرم و غلظت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sum x_i \dot{m}_i = \sum x_o \dot{m}_o \quad (7)$$

در رابطه‌ی بالا x نشانگر غلظت آمونیاک در مخلوط آب-آمونیاک می‌باشد. توان تولیدی توربین و توان مصرفی پمپ چرخه‌ی کالینا طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند [۲۴]:

$$\dot{W}_{KCT} = \dot{m}_9 (h_9 - h_{13}) \quad (8)$$

$$\dot{W}_{KCP} = \dot{m}_6 (h_7 - h_6) \quad (9)$$

۳-۲- سیستم الکترولایزر غشاء پروتونی

در شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب a قسمت از توان توربین چرخه‌ی

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

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

که در روابط بالا \dot{Q} گرما و \dot{W} کار تبدیلی از مرزهای حجم کنترل می‌باشند.

همچنین برای مدل‌سازی ترمودینامیکی، سیستم‌های تولید همزمان سه‌گانه پیشنهادی به سه قسمت تقسیم می‌شوند: سیستم تولید توان (چرخه‌ی کالینا یا رانکین آلی)، سیستم تولید هیدروژن توسط الکترولایزر غشاء پروتونی و همچنین آب گرم کن داخلی برای گرمایش که در ادامه هر سه قسمت به صورت جداگانه بیان خواهند شد.

۳-۱- سیستم تولید توان

۳-۱-۱- تحلیل چرخه‌ی رانکین آلی

در این بخش برای تولید توان و همچنین انرژی لازم برای تولید هیدروژن از چرخه‌ی رانکین آلی استفاده شده است. سیال عامل آلی در اواپراتور، انرژی لازم را از منبع زمین گرمایی دریافت می‌کند. با در نظر گرفتن اختلاف نقطه‌ی تنگش^۱ برای اواپراتور، دبی چرخه رانکین از روابط زیر حاصل می‌شود [۲۳]:

$$T_{PP, EV} = T_{EV} + \Delta T_{PP, EV} \quad (3)$$

$$\dot{m}_1 (h_1 - h(T_{PP, EV})) = \dot{m}_7 (h_7 - h(T_{EV}, x=0)) \quad (4)$$

همچنین توان تولیدی توربین و توان مصرفی پمپ چرخه‌ی رانکین آلی طبق روابط زیر بیان می‌گردند:

$$\dot{W}_{ORCT} = \dot{m}_7 (h_7 - h_8) \quad (5)$$

$$\dot{W}_{ORCP} = \dot{m}_5 (h_6 - h_5) \quad (6)$$

همچنین در این بررسی از سیال‌های عامل R152a، R245fa، ایزوبوتان و انپنتان به علت خواص مناسب ترمودینامیکی، زیست محیطی و شیمیایی استفاده شده است [۱۶].

1 Pinch point temperature difference

در کاتد و آند، پتانسیل فعال سازی برای واکنش الکتروشیمیایی طبق رابطه زیر محاسبه می گردند [۱۲]:

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{0,i}} \right) \quad i = a, c \quad (17)$$

که J_0 ، تبادل چگالی جریان مبدل بوده و طبق رابطه‌ی (۱۸) بیان می گردند [۱۲]:

$$J_{0,i} = J_i^{ref} \exp \left(\frac{-E_{act,i}}{RT} \right) \quad , i = a, c \quad (18)$$

که در رابطه بالا، J^{ref} و E_{act} به ترتیب فاکتور پتانسیل اولیه و انرژی فعال سازی می باشند.

پتانسیل برگشت پذیر به صورت تابعی از دمای الکترولیزر غشاء پروتونی به صورت زیر حاصل می شود [۱۲]:

$$V_0 = 1.229 - 0.00085(T_{PEM} - 298) \quad (19)$$

رسانایی یونی محلی الکترولیزر غشاء پروتونی از رابطه‌ی (۲۰) به دست می آید [۱۲]:

$$\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = \frac{0.5139\lambda(x) - 0.326}{\exp[1268(1/303 - 1/T)]} \quad (20)$$

که x عمق غشای اندازه گیری شده و $\lambda(x)$ مقدار آب موجود در موقعیت x از سطح کاتد بوده که طبق رابطه‌ی (۲۱) ارائه می گردد:

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D} x + \lambda_c \quad (21)$$

که در رابطه بالا λ_c ، λ_a و D به ترتیب، مقدار آب موجود در سطح غشاء در کاتد و آند و ضخامت غشاء می باشند.

همچنین مقاومت اهمی از رابطه‌ی زیر حاصل می شود [۱۲]:

$$R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]} \quad (22)$$

رانکین آلی یا کالینا جهت الکترولیزر مطابق رابطه‌ی زیر جهت تولید هیدروژن مصرف می شود:

$$a = \frac{E_{electric}}{\dot{W}_{ORCT}} \quad \text{یا} \quad a = \frac{E_{electric}}{\dot{W}_{KCT}} \quad (10)$$

کل انرژی لازم برای تولید هیدروژن به صورت زیر حاصل می گردد [۱۲]:

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

که در رابطه‌ی بالا $T\Delta S$ و ΔG به ترتیب انرژی گرمایی مورد نیاز در واحد ژول بر مول هیدروژن و انرژی آزاد گیبس بوده که از جداول ترمودینامیکی استخراج می گردند.

نرخ جریان های مولی هیدروژن، اکسیژن تولیدی و آب باقی مانده به ترتیب از رابطه های زیر حاصل می گردند [۱۲]:

$$\dot{N}_{H_2, out} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2O, reacted} \quad (12)$$

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

$$\dot{N}_{H_2O, out} = \dot{N}_{H_2O, in} - \frac{J}{2F} \quad (14)$$

که J چگالی جریان و F ثابت فارادی می باشند. در واکنش الکتروشیمیایی، انرژی الکتریکی مورد نیاز ($E_{electric}$) از رابطه زیر حاصل می گردد [۱۲]:

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

در رابطه‌ی بالا V که از مجموع چهار پارامتر (پتانسیل برگشت پذیر (V_0))، پتانسیل فعال کننده کاتد ($V_{act,c}$))، پتانسیل فعال کننده آند ($V_{act,a}$) و پتانسیل اهمیک (V_{ohm})) تشکیل شده و به صورت زیر بیان می گردد:

$$V = V_0 + V_{act,c} + V_{act,a} + V_{ohm} \quad (16)$$

که در رابطه‌ی بالا $\dot{E}x_P$ و $\dot{E}x_F$ به ترتیب انرژی سوخت و محصول می‌باشند.

۳-۵- عملکرد کل چرخه ترکیبی

توان خالص برای شکل‌های ۱ و ۲ و بازده حرارتی چرخه تولید همزمان به ترتیب طبق روابط زیر حاصل می‌گردد:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{ORCT} - (\dot{W}_{ORCP} + \dot{E}_{electric}) \quad (29)$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{KCT} - (\dot{W}_{KCP} + \dot{E}_{electric}) \quad (30)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{m}_{H_2} LHV + \dot{Q}_{heating}}{\dot{m}_1 (h_1 - h_0)} \quad (31)$$

که در رابطه‌ی LHV ارزش حرارتی پایین سوخت هیدروژن بوده و $\dot{Q}_{heating}$ مقدار گرمایش چرخه تولید سه‌گانه بوده که طبق رابطه‌ی زیر برای شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب زیر بیان خواهد شد:

$$\dot{Q}_{heating} = \dot{m}_{14} (h_{14} - h_{13}) \quad (32)$$

$$\dot{Q}_{heating} = \dot{m}_{20} (h_{20} - h_{19}) \quad (33)$$

بازده انرژی و نرخ انرژی گرمایش برای شکل ۱ طبق روابط زیر ارائه می‌شوند:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{11} + \dot{E}x_{heating}}{\dot{E}x_1} \quad (34)$$

$$\dot{E}x_{heating} = \dot{E}x_{14} - \dot{E}x_{13} \quad (35)$$

همچنین برای بازده انرژی و نرخ انرژی گرمایش برای شکل ۲ به ترتیب طبق روابط زیر بیان می‌گردند:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{11} + \dot{E}x_{heating}}{\dot{E}x_1} \quad (36)$$

$$\dot{E}x_{heating} = \dot{E}x_{14} - \dot{E}x_{13} \quad (37)$$

بنابراین معادله (۲۲)، بیانگر پتانسیل اهمیت بر پایه قانون اهم می‌باشد [۱۲]:

$$V_{ohm} = JR_{PEM} \quad (23)$$

۳-۳- سیستم گرمایش

برای گرمایش از آب‌گرم‌کن داخلی استفاده شده است و طبق بقای انرژی و با صرف‌نظر از اتلافات گرمایی برای این جز رابطه‌ی زیر برای شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب زیر بیان خواهد شد:

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{10} h_{10} \quad (24)$$

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{15} h_{15} = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{16} h_{16} \quad (25)$$

۳-۴- تحلیل انرژی

مقدار انرژی فیزیکی برای هر جریان طبق رابطه (۲۶) حاصل می‌گردد [۲۵]:

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m} (h - h_0 - T_0 (s - s_0)) \quad (26)$$

انرژی کل برای هر جریان مجموع انرژی‌های فیزیکی، شیمیایی، پتانسیل و جنبشی می‌باشد. با توجه به صرف‌نظر کردن از انرژی جنبشی و پتانسیل، مقدار انرژی کل برای هر جریان طبق زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{E}x_{total,i} = \dot{E}x_{ph,i} + \dot{E}x_{ch,i} \quad (27)$$

که در رابطه‌ی بالا $\dot{E}x_{ch}$ مقدار انرژی شیمیایی می‌باشد، که مقدار آن برای سیال‌های آلی این بررسی و آب زمین‌گرمایی صفر می‌باشد. همچنین برای محاسبه انرژی شیمیایی هیدروژن و اکسیژن مقادیر ex_{ch,H_2}^0 و ex_{ch,O_2}^0 به ترتیب برابر ۲۳۸ و ۳/۹۷۳ کیلوژول بر مول در نظر گرفته شده است [۲۶]. یکی از پارامترهای مهم از دیدگاه قانون دوم، تخریب انرژی بوده که طبق رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود [۲۵]:

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_F - \dot{E}x_P \quad (28)$$

جدول ۱. پارامترهای ورودی برای سیستم الکترولاایزر غشاء پروتونی [۱۲]
Table 1. The input data in the Proton exchange membrane electrolyzer

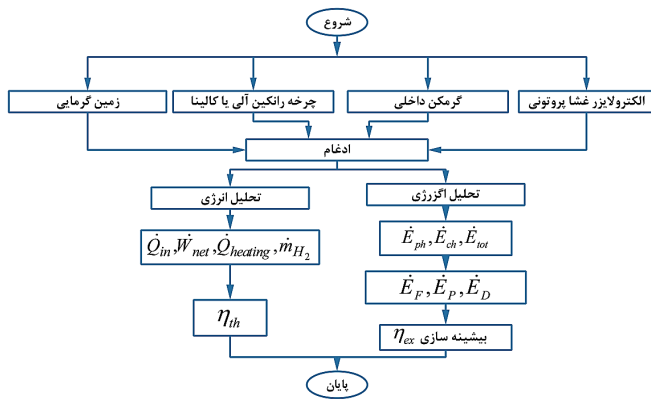
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۷۶	انرژی فعال سازی آند (kJ/mol)	۱	فشار هیدروژن و اکسیژن (atm)
۱۸	انرژی فعال سازی کاتد (kJ/mol)	۵۰	ضخامت غشاء (μm)
۱۴	مقدار آب موجود در سطح آند (-)	۹۶۴۸۶	ثابت فارادی (C/mol)
۱۰	مقدار آب موجود در سطح کاتد (-)	۱۷۰۰۰۰	فاکتور پتانسیل اولیه آند (A/m ²)
۸۰	دمای غشاء (°C)	۴۶۰۰	فاکتور پتانسیل اولیه کاتد (A/m ²)

۳-۶- فرضیات

در این بررسی به منظور مدل سازی و ساده سازی مسئله برای هر دو آرایش جهت تولید سه گانه، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- تلفات حرارتی و افت فشار در لوله ها و مبدل های حرارتی صفر در نظر گرفته شده است.
- از تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی در اجزای سیستم صرف نظر شده است.
- راندمان آیزنتروپیک برای توربین و پمپ برای چرخه رانکین آلی یا کالینا ۸۵% در نظر گرفته شده است [۱۶].
- دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس، فشار محیط ۱ بار و حداقل اختلاف دمای نقطه تنگش ۱۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است [۲۷، ۲۸].
- برای قسمت زمین گرمایی در بررسی اولیه دمای منبع زمین گرمایی ۱۲۰ درجه سلسیوس و دبی حجمی منبع ۱۰۰ کیلوگرم بر ثانیه فرض شده است [۱۶].
- در این بررسی برای سیستم الکترولاایزر غشاء پروتونی از داده های موجود در جدول ۱ استفاده شده است.

برای دو آرایش تولید همزمان با توجه به روابط گفته شده، فرضیات در نظر گرفته شده و همچنین پارامترهای موجود در جدول ۱، ابتدا تحلیل انرژی انجام شده و سپس این دو سیستم از دیدگاه انرژی با استفاده از نرم افزار حل معادلات مهندسی [۲۹] مورد بررسی قرار خواهد گرفت. خلاصه تحلیل انجام شده در این سیستم در فلوچارت شکل ۶ ارایه شده است. همچنین بهینه سازی این دو سیستم بر مبنای بازده انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در نرم افزار حل معادلات مهندسی انجام شده است. در این بررسی در واقع دمای



شکل ۳. فلوچارت خلاصه تحلیل در این مطالعه

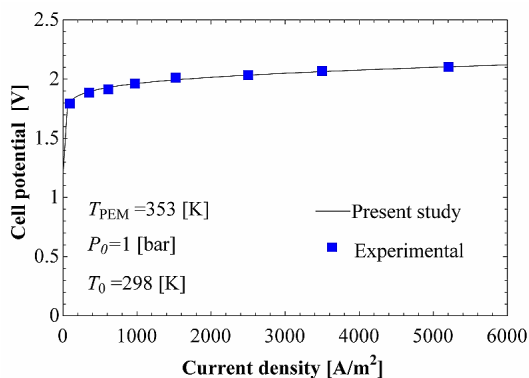
Fig. 3. The flowchart of summary analysis in this study

اوپراتور، اختلاف دمای تنگش اوپراتور و فشار بالای چرخه کالینا به عنوان متغیر وابسته و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین در این مطالعه تاثیر پارامترهای مختلف روی توان خالص، هیدروژن تولیدی، بازده حرارتی و بازده انرژی و گرمایش مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- اعتبارسنجی

برای دو آرایش پیشنهادی اعتبارسنجی برای چرخه رانکین آلی، کالینا و الکترولاایزر غشاء پروتونی به ترتیب در شکل ۴، شکل ۵ و شکل ۶ انجام شده است. نتایج این بررسی با چرخه رانکین آلی (برای شرایط دمای منبع زمین گرمایی ۱۲۰ درجه سلسیوس و دبی جرمی ۱۰۰ کیلوگرم بر ثانیه) با بررسی یاری و همکاران [۳] در شکل ۴، نتایج چرخه کالینا (برای شرایط دمای منبع زمین گرمایی ۳۷۳ کلوین و فشار اوپراتور ۱۰ بار) با بررسی الساید و همکاران [۴] در شکل ۵ و قسمت الکترولاایزر غشاء پروتونی (برای شرایط دمای محیط ۲۵

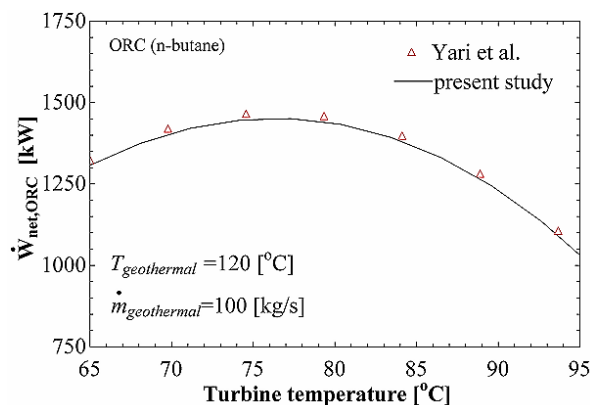


شکل ۶. اعتبار سنجی الکترولایزر غشا پروتونی جهت تولید هیدروژن
Fig. 6. Verification of simulation for the Proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production

۱/۸۶۷ درصد، بازده انرژی ۳۶/۸۶ درصد، تولید هیدروژن ۱/۸۶۷ کیلوگرم بر ساعت، گرمایش ۱۳۷۰۸ کیلووات و تخریب انرژی کل سیستم ۲۶۳۳ کیلووات بدست آمده است. یک مطالعه پارامتری برای بررسی اثرات متغیرهای تصمیم‌گیری بر روی پارامترهای عملکردی انجام می‌شود. در مطالعه پارامتریک تأثیر پارامترهای مختلف (دمای اواپراتور چرخه رانکین، اختلاف دمای نقطه‌ی تنگش، دمای مبدل غشا پروتونی و دمای محیط) بر پارامترهای عملکردی چرخه همچون توان خالص، تولید هیدروژن، گرمایش، بازده حرارتی و بازده انرژی انجام شده است.

در شکل ۷ اثر افزایش دمای اواپراتور چرخه رانکین روی پارامترهای عملکردی نشان داده شده است. با افزایش دمای اواپراتور، آنتالپی ورودی به توربین افزایش پیدا کرده درحالی‌که دبی چرخه رانکین کاهش پیدا می‌کند، این روند متضاد باعث ایجاد نقطه بهینه برای توان خالص می‌شود. وجود نقطه بهینه برای توان، طبق روابط ۱۰ و ۱۵ انرژی الکتریکی مورد نیاز برای واکنش الکتروشیمیایی و به تبع آن چگالی جریان و تولید هیدروژن دارای نقطه بهینه متناظر با نقطه بهینه توان خالص خواهد شد. همچنین در این حالت دمای نقطه‌ی ۲ و ۳ افزایش یافته که باعث می‌شود طبق بقای انرژی گرمایش افزایش یابد. روند تغییرات سه پارامتر عملکردی بالا باعث ایجاد نقطه بهینه برای بازده انرژی و افزایش بازده حرارتی می‌شود. طبق این بررسی توان خالص چرخه و تولید هیدروژن در دمای ۷۷ درجه سلسیوس دارای مقادیر بیشینه می‌باشند در حالیکه این دما برای بیشینه مقدار بازده انرژی در حدود ۷۷ درجه سلسیوس می‌باشد.

در شکل ۸ اثرات اختلاف دمای نقطه‌ی تنگش اواپراتور روی

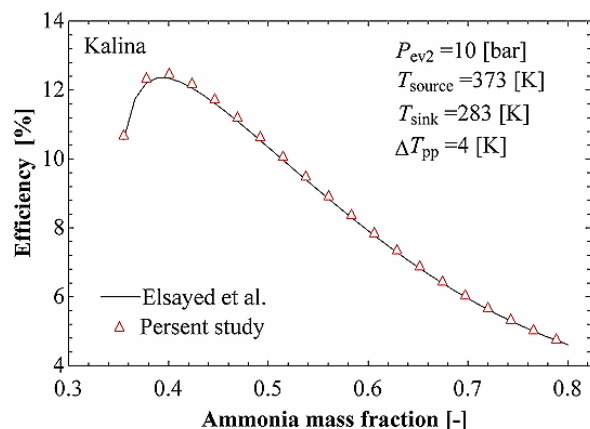


شکل ۴. اعتبار سنجی چرخه رانکین آلی
Fig. 4. Verification of simulation for the organic Rankine cycle

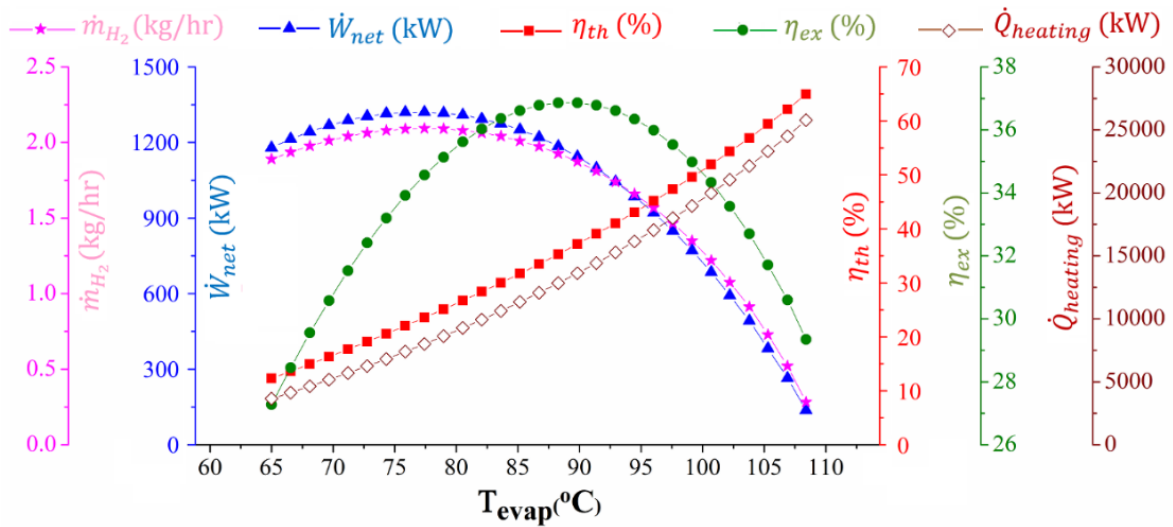
درجه‌ی سلسیوس، دمای الکترولایزر ۸۰ درجه‌ی سلسیوس و فشار محیط ۱ بار) با مطالعه آزمایشگاهی نی و همکاران [۱۲] در شکل ۶ مقایسه شده است، نتایج حاصله نشان‌گر صحت فرایند شبیه‌سازی در این بررسی می‌باشد.

۴-۲- نتایج چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه رانکین آلی

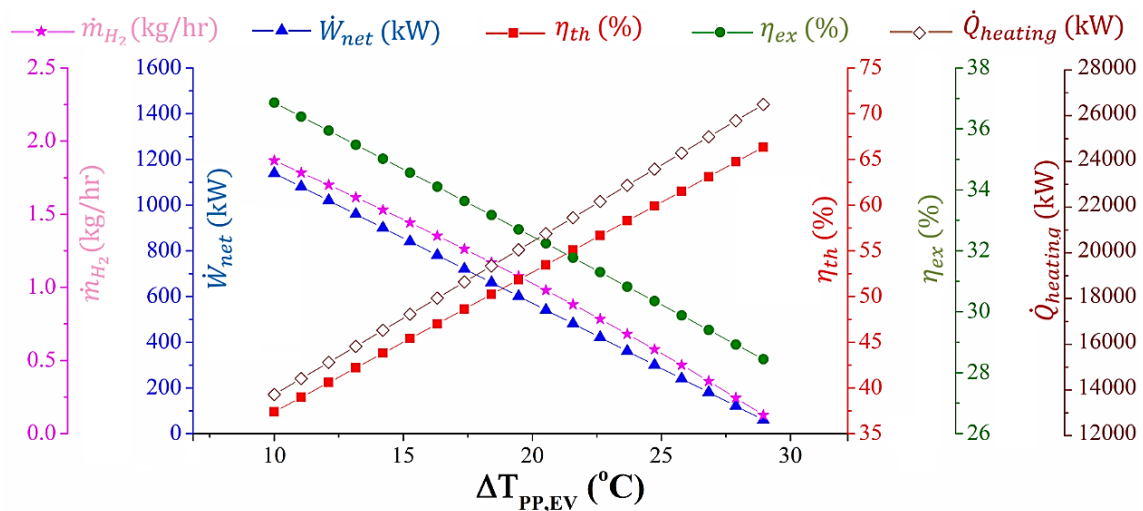
برای حالت اولیه (برای شرایط دمای منبع گرم ۱۲۰ درجه‌ی سلسیوس، دمای اواپراتور ۹۰ درجه‌ی سلسیوس، دمای الکترولایزر ۸۰ درجه‌ی سلسیوس، دمای اختلاف نقطه تنگش ۱۰ درجه‌ی سلسیوس و ۱۰ درصد استفاده از توان چرخه رانکین برای تولید هیدروژن) و سیال عامل آلی ایزوبوتان، بررسی ترمودینامیکی برای سیستم تولید سه‌گانه بر اساس چرخه رانکین آلی انجام گرفته است. طبق نتایج حاصله توان خالص تولیدی ۱۱۳۹ کیلووات، بازده حرارتی



شکل ۵. اعتبار سنجی چرخه کالینا
Fig. 5. Verification of simulation for the Kalina cycle



شکل ۷. تأثیر دمای اواپراتور چرخه رانکین آلی روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده آگزژی و گرمایش چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه رانکین آلی
 Fig. 7. Effects of the evaporator temperature on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and heating in the ORC based tri-generation cycle



شکل ۸. تأثیر اختلاف دمای تنگش اواپراتور چرخه رانکین آلی روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده آگزژی و گرمایش چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه رانکین آلی
 Fig. 8. Effects of the pinch point temperature difference on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and heating in the ORC based tri-generation cycle

جدول ۲. نتایج بهینه‌سازی برای چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه رانکین آلی

Table 2. Optimazation results in the ORC based tri-generation cycle

مقادیر بهینه برای مقادیر مختلف دمای منبع گرم (°C)				پارامترهای بهینه‌سازی شده / مشخصات عملکردی
۱۵۰	۱۴۰	۱۳۰	۱۲۰	
۱۰۹/۵	۱۰۱/۵	۹۴/۹۷	۸۹/۰۶	دمای اواپراتور (°C)
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	اختلاف دمای تنگش اواپراتور (°C)
۱۳۰۵۶	۱۳۴۸۸	۱۳۵۳۹	۱۳۲۲۶	گرمایش (kW)
۲۷۹۳	۲۱۴۸	۱۶۱۳	۱۱۶۵	کار خالص چرخه (kW)
۳۰/۲۹	۳۲/۵	۳۴/۵	۳۶/۲۳	بازده حرارتی (%)
۴۱/۴۳	۳۹/۷	۳۸/۲۴	۳۶/۸۷	بازده اگزرژی (%)
۳/۸۸۸	۳/۱۵۱	۲/۴۹۵	۱/۹۰۱	هیدروژن تولیدی (kg/hr)

جدول ۳. نتایج بهینه‌سازی برای سیال‌های عامل مختلف برای قسمت رانکین در چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه رانکین آلی برای دمای منبع ۱۲۰ درجه‌ی سلسیوس

Table 3. Optimazation results for varius ORC working fluids in the ORC based tri-generation cycle for a heat source temperature of 120 °C

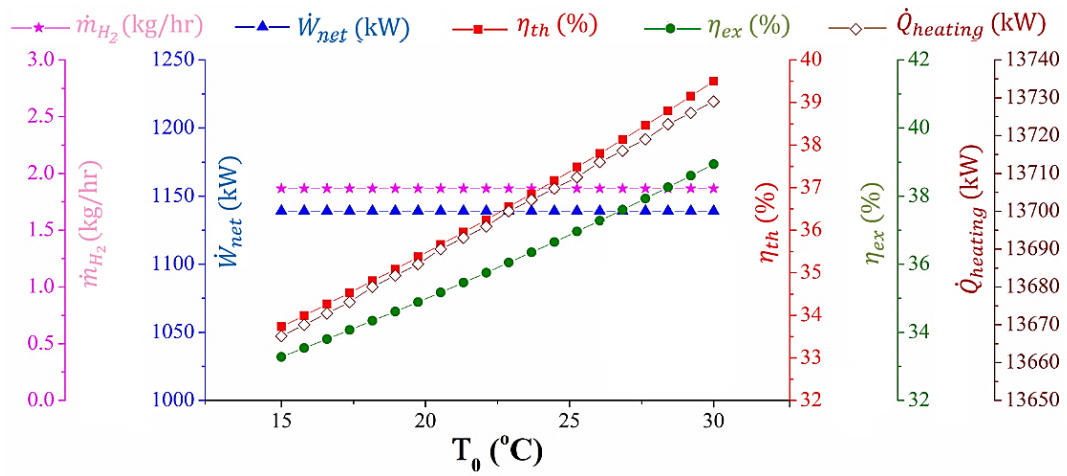
مقادیر بهینه برای سیال‌های عامل در نظر گرفته شده				پارامترهای بهینه‌سازی شده / مشخصات عملکردی
R152a	R245fa	n-pentane	Isobutane	
۸۹/۵۴	۸۸/۳۶	۸۸/۰۷	۸۹/۰۶	دمای اواپراتور (°C)
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	اختلاف دمای تنگش اواپراتور (°C)
۱۳۰۷۶	۱۳۶۳۴	۱۴۲۱۹	۱۳۲۲۶	گرمایش (kW)
۱۱۷۳	۱۱۶۰	۱۱۱۳	۱۱۶۵	کار خالص چرخه (kW)
۳۵/۸۸	۳۷/۲۴	۳۸/۵۸	۳۶/۲۳	بازده حرارتی (%)
۳۶/۹۱	۳۷/۱۴	۳۶/۸۱	۳۶/۸۷	بازده اگزرژی (%)
۱/۹۷۳	۱/۸۳۱	۱/۷۴۳	۱/۹۰۱	هیدروژن تولیدی (kg/hr)

می‌یابد. با توجه به اینکه مقدار گرمایش بسیار بزرگتر از اگزرژی مربوط به گرمایش بوده بنابراین روند تغییرات گرمایش بیشترین تأثیر را روی تغییرات بازده حرارتی گذاشته است.

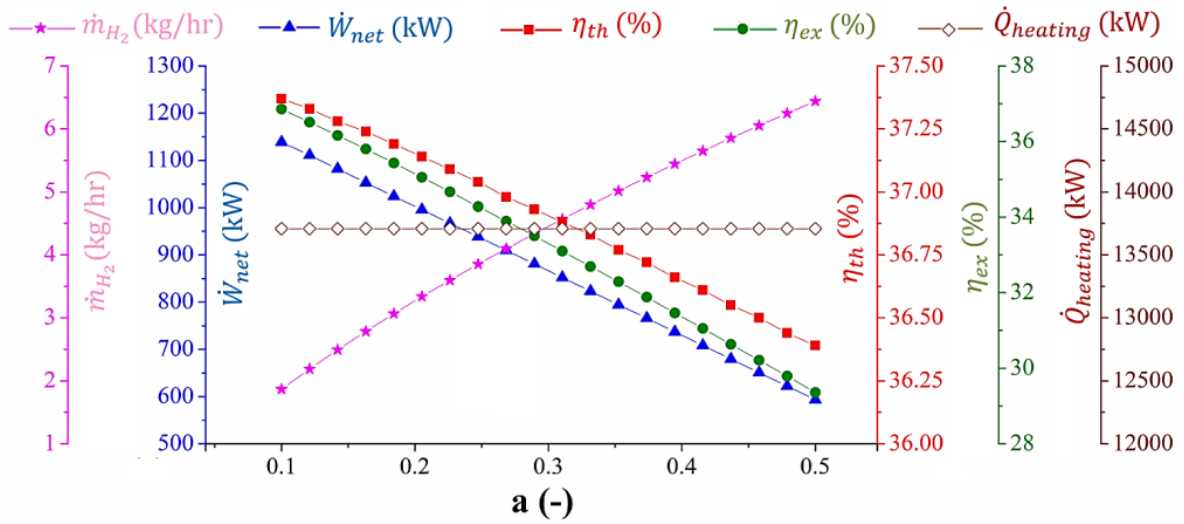
تأثیر افزایش دمای محیط روی پارامترهای عملکردی چرخه‌ی تولید همزمان بر اساس رانکین آلی در شکل ۹ به نشان داده شده است. فزایش دمای محیط با توجه به روابط ارائه‌شده تأثیری روی توان خالص چرخه و به تبع آن هیدروژن تولیدی ندارد. ولی با افزایش دمای محیط با توجه به روابط ۲۴ و ۳۲ مقدار گرمایش تولیدی افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش گرمایش و همچنین کاهش مخرج روابط ۳۱ و ۳۴ بر اثر افزایش دمای محیط از ۱۵ تا ۳۰ درجه‌ی سلسیوس، مقادیر بازده‌های حرارتی و اگزرژی به ترتیب تا ۳۹/۵ و ۳۹ درصد افزایش می‌یابند.

در شکل ۱۰ تأثیر نسبت کار ورودی مبدل غشایی به کار تولیدی

توان خالص، تولید هیدروژن، گرمایش و بازده‌های حرارتی و اگزرژی سیستم تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی رانکین آلی ارائه شده است. با افزایش اختلاف دمای نقطه‌ی تنگش، دبی چرخه‌ی رانکین آلی کاهش پیدا کرده و این کاهش باعث کاهش توان خالص و به تبع آن طبق روابط ۱۰ و ۱۵، تولید هیدروژن نیز کاهش می‌یابد. طبق بقای انرژی، کاهش $\dot{m}_7 h_7$ سبب افزایش $\dot{m}_2 h_2$ و $\dot{m}_3 h_3$ می‌شود، در نتیجه مقدار گرمایش این چرخه افزایش می‌یابد. روند تغییرات توان خالص، تولید هیدروژن، گرمایش باعث می‌شود که بازده حرارتی افزایش و بازده اگزرژی به صورت پیوسته‌ای کاهش یابد. با افزایش اختلاف دمای نقطه‌ی تنگش از ۱۰ تا ۳۰ درجه‌ی سلسیوس، مقدار هیدروژن تولیدی، توان خالص و بازده اگزرژی به ترتیب تا ۰/۱۳ کیلوگرم بر ساعت، ۶۰ کیلووات و ۲۸/۴۴ درصد کاهش می‌یابند در حالیکه مقدار گرمایش و بازده حرارتی تا ۲۶۴۰۰ کیلووات و ۶۶/۳۴ درصد افزایش



شکل ۹. تأثیر دمای محیط روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده اگزرژی و گرمایش چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی رانکین آلی
 Fig. 9. Effects of environment temperature on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and heating in the ORC based tri-generation cycle



شکل ۱۰. تأثیر نسبت کار روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده اگزرژی و گرمایش چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی رانکین آلی
 Fig. 10. Effects of power ratio on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and heating in the ORC based tri-generation cycle

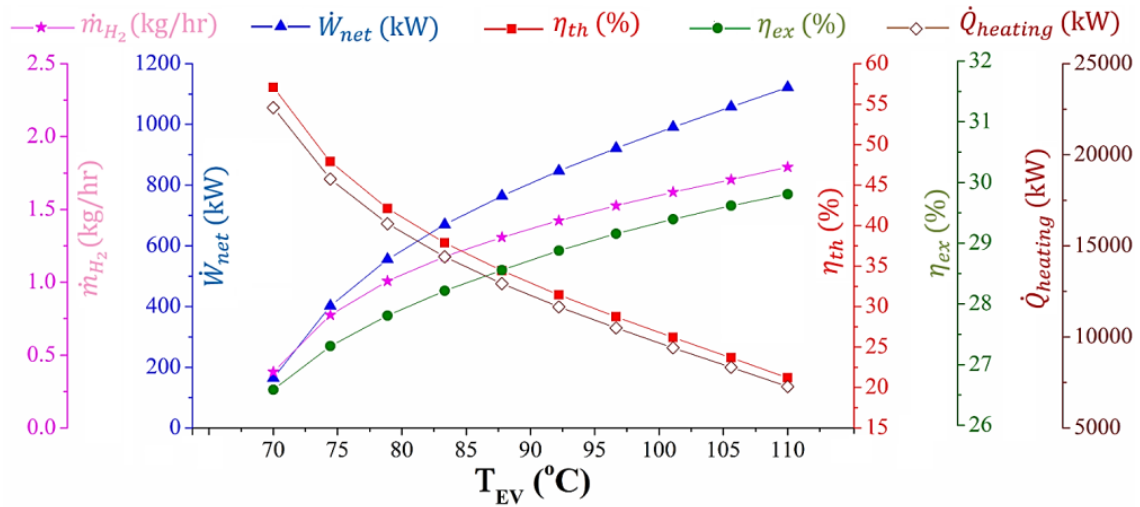
۴-۳- نتایج چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی کالینا

برای حالت چرخه‌ی معرفی شده در سیستم تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی کالینا (برای شرایط دمای منبع گرم ۱۲۰ درجه‌ی سلسیوس، دمای اواپراتور ۱۱۰ درجه‌ی سلسیوس، فشار بالای کالینا ۲۵ بار، غلظت آمونیاک ۰/۸، دمای الکترولایزر ۸۰ درجه‌ی سلسیوس، دمای اختلاف نقطه تنگش ۱۰ درجه‌ی سلسیوس و ۱۰ درصد استفاده از توان چرخه‌ی کالینا برای تولید هیدروژن)، توان خالص تولیدی ۱۵۸۷ کیلووات، بازده حرارتی ۲۴/۹۸ درصد، بازده انرژی ۲۶/۱۳ درصد، تولید هیدروژن ۲/۳۶۱ کیلوگرم بر ساعت، گرمایش ۱۱۵۱۰ کیلووات و تخریب انرژی کل چرخه‌ی ۵۶۶۲ کیلووات حاصل شده‌اند. اثر افزایش دمای اواپراتور چرخه‌ی کالینا روی پارامترهای عملکردی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با افزایش دمای اواپراتور، مقدار انرژی ورودی و به تبع آن توان چرخه‌ی تولید همزمان و در نتیجه تولید هیدروژن افزایش پیدا می‌کند. با افزایش $\dot{m}_8 h_8$ ، مقدار $\dot{m}_2 h_2$ و $\dot{m}_3 h_3$ و در نتیجه مقدار گرمایش کاهش پیدا می‌کند. روند تغییرات سه عملکرد بالا باعث می‌شود تا بازده حرارتی روندی نزولی و بازده انرژی روندی افزایشی داشته باشد. در این حالت نیز تغییرات مقدار گرمایش بیشترین تاثیر را روی بازده حرارتی گذاشته است در حالیکه برای بازده انرژی، افزایش توان خالص و انرژی تولید هیدروژن بر کاهش انرژی گرمایش غلبه کرده و باعث شده است که بازده انرژی افزایش یابد. در این حالت با افزایش دمای اواپراتور تا ۱۱۰ درجه سلسیوس، بازده انرژی تا حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است. اثرات اختلاف دمای نقطه‌ی تنگش اواپراتور کالینا روی توان خالص، تولید هیدروژن، گرمایش و بازده‌های حرارتی و انرژی برای سیستم تولید سه‌گانه بر مبنای کالینا در شکل ۱۲ آورده شده است. روند تغییرات اختلاف دمای نقطه‌ی تنگش اواپراتور کالینا همانند سیستم تولید سه‌گانه بر مبنای رانکین می‌باشد. با افزایش اختلاف دمای نقطه‌ی تنگش از ۱۰ تا ۳۰ درجه‌ی سلسیوس، مقدار هیدروژن تولیدی، توان خالص و بازده انرژی به ترتیب تا ۱/۳۶۸ کیلوگرم بر ساعت، ۸۰۷ کیلووات و ۲۸/۷۷ درصد کاهش می‌یابند در حالیکه مقدار گرمایش و بازده حرارتی تا ۱۲۲۶۸ کیلووات و ۳۲/۸۹ درصد افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۳ تأثیر فشار بالای کالینا روی توان خالص، تولید

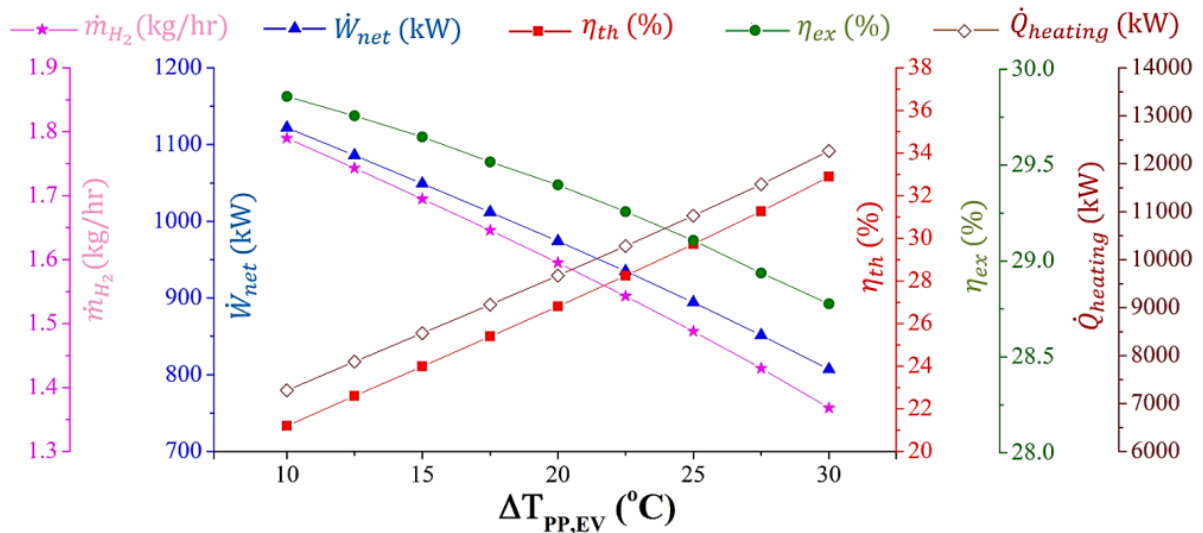
چرخه‌ی رانکین آلی روی توان خالص، تولید هیدروژن، گرمایش و بازده‌های حرارتی و انرژی سیستم تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی رانکین آلی نشان داده شده است. با افزایش این نسبت از ۰/۱ به ۰/۵، مقدار توان خالص چرخه کاهش می‌یابد ولی مقدار انرژی ورودی الکترولایزر غشاء پروتونی و به تبع آن چگالی جریان و در نتیجه مقدار دبی هیدروژن تولیدی تقریباً از ۱/۸ تا ۶/۴۴ کیلوگرم بر ساعت افزایش می‌یابد. در این حالت تغییرات این نسبت تأثیری روی مقدار گرمایش تولیدی نخواهد گذاشت. با توجه به مستقل بودن گرمایش از دمای محیط و همچنین تغییرات کاهش توان خالص چرخه بر افزایش $\dot{m}_{H_2} LHV$ و $\dot{E}_{x_{11}}$ غلبه کرده و در نتیجه بازده حرارتی و انرژی به‌طور پیوسته به ترتیب تا ۳۶/۳۹ درصد و ۲۹/۳۶ درصد کاهش یابند. در جدول ۲ نتایج بهینه‌سازی و پارامترهای عملکردی سیستم تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی رانکین آلی به ازای دمای منبع گرم مختلف و سیال عامل ایزوبوتان آورده شده است. در دمای منبع گرم ۱۲۰ درجه‌ی سلسیوس و دمای اواپراتور بهینه ۸۹/۰۶ درجه‌ی سلسیوس، توان خالص تولیدی ۱۱۶۵ کیلووات، بازده حرارتی ۳۶/۲۳ درصد، بازده انرژی ۳۶/۸۷ درصد، تولید هیدروژن ۱/۹۰۱ کیلوگرم بر ساعت، گرمایش ۱۳۲۲۶ کیلووات حاصل شده‌اند. طبق نتایج بهینه‌سازی شده با افزایش دمای منبع گرم تا ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس دمای اواپراتور بهینه نیز افزایش می‌یابد. این افزایش دمای منبع گرم منجر به افزایش توان خالص تولیدی و به تبع آن هیدروژن تولیدی و در نتیجه بازده انرژی شده است. برای عملکرد بهینه پارامترها در دمای منبع گرم تا ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس، توان خالص تولیدی، هیدروژن تولیدی و بازده انرژی به ترتیب ۲۷۹۳ کیلووات، ۳/۸۸۸ کیلوگرم بر ساعت و ۴۱/۴۳ درصد بدست آمده است.

همچنین نتایج بهینه‌سازی سیستم تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی رانکین آلی به ازای سیال‌های عامل انتخابی برای قسمت رانکین در جدول ۳ ارائه شده است. در این حالت سیال R1۵۲a نتایج بهتری را از لحاظ تولید توان خالص و هیدروژن تولیدی داشته است. برای این سیال به علت تطابق دمایی مناسب برای منبع گرم و سرد در اواپراتور، باعث افزایش توان ورودی به توربین و در نتیجه افزایش توان خالص سیستم و به تبع آن هیدروژن تولیدی شده است. از سوی دیگر سیال R2۴۵fa عملکرد بهتری از لحاظ قانون دوم داشته است



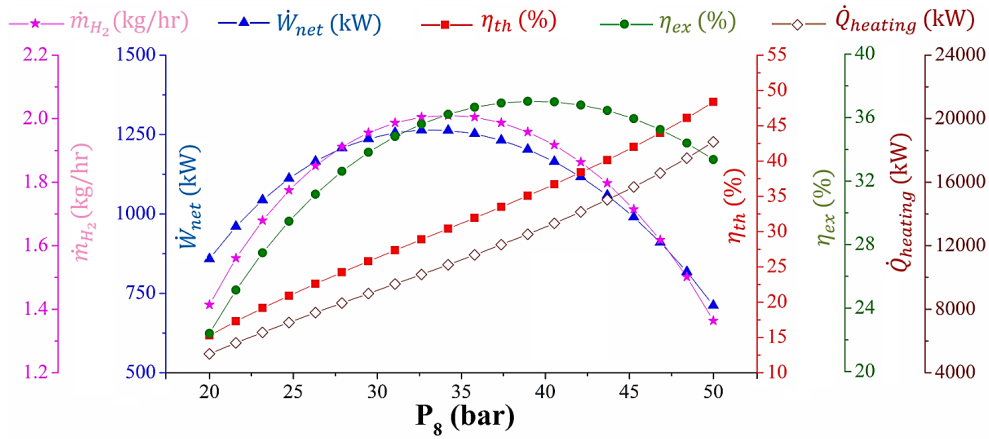
شکل ۱۱. تأثیر دمای اواپراتور چرخه کالینا روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده انرژی و گرمایش چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی کالینا

Fig. 11. Effects of the evaporator temperature on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and heating in the Kalina based tri-generation cycle



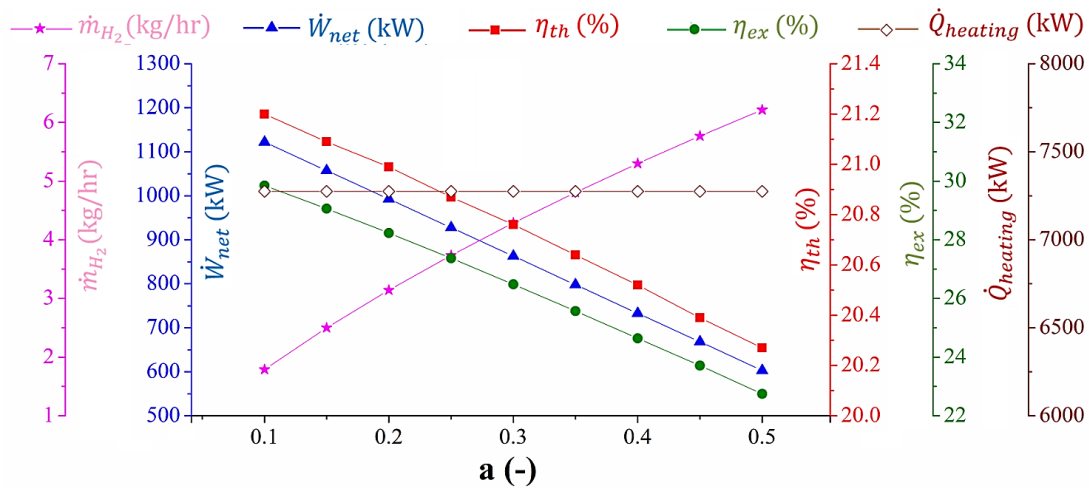
شکل ۱۲. تأثیر اختلاف دمای تنگش اواپراتور کالینا روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده انرژی و گرمایش چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی کالینا

Fig. 12. Effects of the pinch point temperature difference on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and heating in the Kalina based tri-generation cycle



شکل ۱۳. تأثیر فشار ورودی توربین روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده انرژی و گرمایش چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه کالینا

Fig. 13. Effects of turbine inlet pressure on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and heating in the Kalina based tri-generation cycle



شکل ۱۴. تأثیر نسبت کار روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده انرژی و گرمایش چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه کالینا

Fig. 14. Effects of power ratio on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and heating in the Kalina based tri-generation cycle

در نتیجه بازده قانون اول افزایش یابد. روند تغییرات عملکردی سیستم باعث ایجاد نقطه بهینه برای بازده انرژی در حدود ۳۹ بار شده است در حالیکه برای فشار بالای کالینا یعنی ۳۵ بار، بیشترین مقدار توان خالص و تولید هیدروژن به ترتیب ۱۲۶۵ کیلووات و ۲/۰۱ کیلوگرم بر ساعت حاصل گردید.

در شکل ۱۴ تأثیر نسبت کار ورودی مبدل غشایی به کار تولیدی چرخه کالینا روی توان خالص، تولید هیدروژن، گرمایش و بازده‌های حرارتی و انرژی سیستم تولید سه‌گانه بر مبنای کالینا ارائه شده

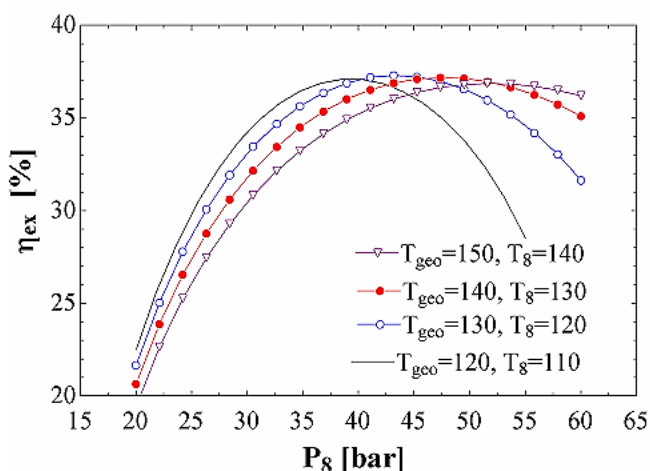
هیدروژن، گرمایش و بازده‌های حرارتی و انرژی چرخه تولید سه‌گانه بر مبنای کالینا نشان داده شده است. با افزایش فشار بالای چرخه، مقدار توان مصرفی پمپ و توان تولیدی توربین کالینا افزایش می‌یابد، در نتیجه اثر متضادی را روی توان خالص چرخه کالینا و کل چرخه‌ی ترکیبی نشان داده و در یک نقطه مشخص، به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این بیشترین مقدار توان متناظر با بیشترین هیدروژن تولیدی خواهد بود. همچنین با افزایش فشار بالای چرخه، مقدار انرژی بیشتری به آب‌گرم‌کن رسیده و باعث می‌شود که مقدار گرمایش و

جدول ۴. نتایج بهینه‌سازی برای چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی کالینا
 Table 4. Optimization results in the Kalina based tri-generation cycle

مقادیر بهینه برای مقادیر مختلف دمای منبع گرم (°C)				پارامترهای بهینه‌سازی شده / مشخصات عملکردی
۱۵۰	۱۴۰	۱۳۰	۱۲۰	
۱۴۰	۱۳۰	۱۲۰	۱۱۰	دمای اواپراتور (°C)
۵۲/۱	۴۷/۶۷	۴۳/۳۲	۳۹/۲۵	فشار ورودی توربین (bar)
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	اختلاف دمای تنگش اواپراتور (°C)
۲۱۴۴۷	۱۸۵۵۶	۱۵۶۶۲	۱۲۸۵۵	گرمایش (kW)
۱۹۶۸	۱۷۰۱	۱۴۴۵	۱۱۹۷	کار خالص چرخه (kW)
۴۴/۵۷	۴۲	۳۸/۹۱	۳۵/۳۹	بازده حرارتی (%)
۳۶/۸۶	۳۷/۱۸	۳۷/۳	۳۷/۳۲	بازده انرژی (%)
۲/۹۰۵	۲/۵۸۹	۲/۲۷۲	۱/۹۵۱	هیدروژن تولیدی (kg/hr)

درصد، تولید هیدروژن ۲/۹۰۵ کیلوگرم بر ساعت، گرمایش ۲۱۴۴۷ کیلووات می‌باشد. با توجه به اینکه در این سیستم، افزایش دمای منبع گرم باعث افزایش گرمایش شده است و این افزایش بیشترین مقدار در بازده حرارتی را می‌گذارد، بدین علت بازده حرارتی به طور پیوسته‌ای افزایش یافته است.

با مقایسه دو آرایش برای نتایج بهینه برای دمای ۱۲۰ درجه‌ی سلسیوس منبع گرم، سیستم تولید سه‌گانه بر مبنای کالینا دارای بازده انرژی و تولید هیدروژن بیشتری نسبت به سیستم تولید سه‌گانه بر مبنای رانکین می‌باشد. همچنین برای حالت بهینه و دمای ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس، سیستم تولید سه‌گانه بر مبنای رانکین



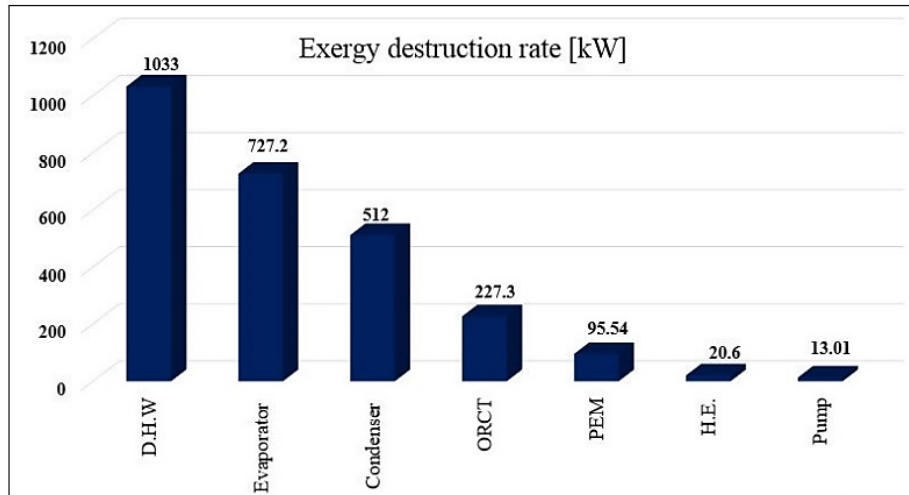
شکل ۱۵. تأثیر فشار توربین و دمای منبع گرم روی بازده انرژی چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی کالینا

Fig. 15. Effects of turbine inlet pressure and temperature heat source on the exergy efficiency in the Kalina based tri-generation cycle

است. طبق نتایج مشاهده شده روند تغییرات پارامترهای عملکردی سیستم با افزایش این نسبت از ۰/۱ به ۰/۵ شبیه به چرخه‌ی تولید سه‌گانه بر مبنای رانکین می‌باشد. به عبارت دیگر با توجه به مستقل بودن گرمایش از نسبت کار ورودی مبدل غشایی، افزایش توان خالص بر کاهش دبی تولیدی هیدروژن غلبه کرده و باعث می‌شود تا با افزایش نسبت کار ورودی مبدل غشایی به ۵۰ درصد استفاده از توان رانکین، توان خالص و به تبع آن بازده‌های حرارتی و انرژی به ترتیب به ۶۰۳ کیلووات، ۲۰/۳ درصد و ۲۲/۷۵ درصد کاهش یابند.

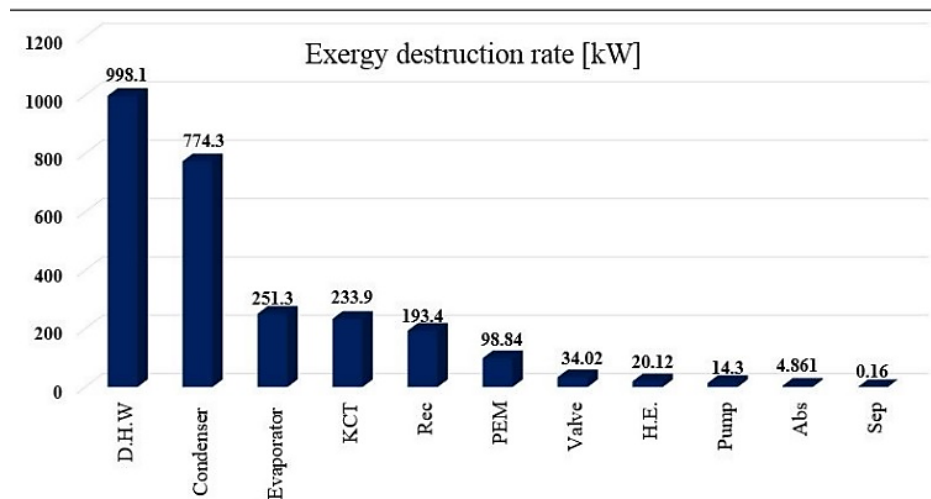
در شکل ۱۵ تأثیر فشار بالای کالینا به ازای دماهای منبع گرم روی بازده انرژی چرخه‌ی تولید سه‌گانه بر مبنای کالینا نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، همانند شکل ۱۳ بازده انرژی دارای مقدار بهینه نسبت به فشار بالای چرخه می‌باشد. طبق نتایج حاصل شده با افزایش دمای منبع گرم، فشار برای بیشینه بازده انرژی به سمت مقادیر بزرگ‌تر سیر می‌کند.

در جدول ۴ نتایج بهینه‌سازی و پارامترهای عملکردی سیستم تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی کالینا در حالت بهینه به ازای دمای منابع گرم مختلف ارائه شده است. طبق نتایج با افزایش دمای منبع گرم، مقادیر فشار بهینه به سمت مقادیر بزرگ‌تر سوق پیدا می‌کند که منطبق بر نتایج شکل ۱۵ می‌باشد. همچنین با افزایش دمای منبع گرم، مقدار توان خالص و تولید هیدروژن و همچنین بازده انرژی افزایش می‌یابند. طبق نتایج بهینه‌سازی برای چرخه‌ی تولید سه‌گانه بر مبنای کالینا در دمای ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس، توان خالص تولیدی ۱۹۶۸ کیلووات، بازده حرارتی ۴۴/۵۷ درصد، بازده انرژی ۳۶/۸۶



شکل ۱۶. تخریب انرژی اجزای چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه رانکین آلی

Fig. 16. The exergy destruction of system components in the ORC based tri-generation cycle



شکل ۱۷. تخریب انرژی اجزای چرخه تولید سه‌گانه بر اساس چرخه کالینا

Fig. 17. The exergy destruction of system components in the Kalina based tri-generation cycle

دیدگاه قانون دوم می‌باشد. در چرخه تولید سه‌گانه بر مبنای رانکین آب‌گرم‌کن داخلی، اواپراتور و کندانسور دارای بیشترین نرخ تخریب انرژی می‌باشند در حالی که برای چرخه تولید سه‌گانه بر مبنای کالینا به ترتیب آب‌گرم‌کن داخلی، کندانسور و اواپراتور دارای بیشترین مقدار تخریب انرژی می‌باشند. بیشتر بودن تخریب انرژی در سه مبدل حرارتی در هر دو آرایش نشان‌گر اختلاف دمایی مبدل‌های حرارتی می‌باشد.

شرایط بهتری برای تولید هیدروژن دارد در حالی که بازده حرارتی، چرخه تولید سه‌گانه بر مبنای کالینا هیدروژن بیشتری را تولید می‌کند. همچنین چرخه تولید سه‌گانه بر مبنای رانکین دارای بازده انرژی بیشتری نسبت به چرخه تولید سه‌گانه بر مبنای کالینا می‌باشد.

در نهایت نتایج نرخ تخریب انرژی اجزا برای چرخه تولید سه‌گانه بر مبنای رانکین و کالینا به ترتیب در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ نشان داده شده است. تخریب انرژی مثبت نشان‌گر انجام‌پذیری سیستم از

۵- نتیجه گیری

در این بررسی برای تولید توان، هیدروژن و گرمایش با استفاده از منبع زمین گرمایی، دو آرایش مختلف پیشنهاد و مورد مطالعه قرار گرفته است. برای چرخه‌های پیشنهادی، این دو سیستم توسط قسمت تولید توان (چرخه‌ی رانکین آلی و کالینا) از هم متمایز شده‌اند. برای این دو آرایش یعنی تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی رانکین آلی و تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی کالینا یک مطالعه پارامتریک جامع انجام شده و سپس مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است. خلاصه نتایج این مطالعه به صورت زیر بیان شده‌اند:

- در سیستم تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی رانکین با افزایش دمای اواپراتور مقدار گرمایش و بازده حرارتی روندی صعودی داشته‌اند؛ درحالی‌که توان چرخه، هیدروژن تولیدی و بازده اگزرژی دارای نقاط بهینه می‌باشند.
- با افزایش دمای اواپراتور چرخه‌ی کالینا در سیستم تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی کالینا، توان چرخه، هیدروژن تولیدی و بازده اگزرژی افزایش پیدا می‌کند؛ درحالی‌که مقدار گرمایش و بازده حرارتی همیشه روندی نزولی داشته‌اند.
- با افزایش دمای منبع گرم، مقدار فشار بالای چرخه کالینا برای بهینه بازده اگزرژی، به سمت مقادیر بزرگ‌تر سیر می‌کند.
- با افزایش دمای محیط، توان خالص و هیدروژن تولیدی دارای مقادیر ثابتی بوده درحالی‌که مقدار گرمایش و به تبع آن بازده‌های حرارتی و اگزرژی روندی صعودی داشته‌اند.
- برای هر دو آرایش تولید همزمان، با افزایش نسبت توان مصرفی برای الکترولایزر، مقدار گرمایش تولیدی تغییری نیافته درحالی‌که مقدار دبی هیدروژن تولیدی افزایش و توان خالص، بازده حرارتی و اگزرژی به‌طور پیوسته کاهش یافته‌اند.
- طبق نتایج بهینه‌سازی برای سیستم تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی رانکین به ازای سیال‌های عامل انتخابی برای قسمت رانکین، سیال R۱۵۲a نتایج بهتری را در حالت بهینه برای توان خالص و تولید هیدروژن از خود نشان داده است.
- برای دمای منبع گرم ۱۲۰ درجه‌ی سلسیوس، سیستم تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی کالینا نتایج بهتری برای بازده اگزرژی و تولید هیدروژن از خود نشان داده، درحالی‌که بازده حرارتی و مقدار گرمایش تولیدی سیستم تولید سه‌گانه بر اساس چرخه‌ی رانکین مطلوب‌تر ارزیابی گردید.

۶- فهرست علائم

فهرست علائم

علائم انگلیسی

جاذب	Abs
ضخامت، μm	D
توان داده شده به الکترولایزر، kW	$E_{electrolic}$
توان داده شده به مصرف مستقیم، kW	$E_{product}$
انرژی فعال‌سازی کاتد و آند، kJ/mol	$E_{act,i} \quad i = a, c$
ثابت فارادی، $^{\circ}C/mol$	F
انرژی آزاد گیبس، J/mol	G
چاه زمین گرمایی	GW
آنتالپی مخصوص، kJ/kg	h
مبدل	H.E.
چگالی جریان مبدل، A/m^2	$J_{i,0} \quad i = a, c$
فاکتور پتانسیل اولیه اند و کاتد، A/m^2	$J_i^{ref} \quad i = a, c$
چگالی جریان، A/m^2	J
پمپ چرخه کالینا	KCP
توربین چرخه کالینا	KCT
دبی جرمی، kg/s	\dot{m}
دبی مولی، mol/s	\dot{N}
فشار، bar	P
پمپ چرخه رانکین آلی	$ORCP$
توربین چرخه رانکین آلی	$ORCT$
آهنگ گرما، kW	\dot{Q}
ثابت جهانی گازها، kJ/kgK	R
چاه برگشت زمین گرمایی	RW
بازیاب	Rec
مقاومت اهمیک، Ω	R_{PEM}
آنتروپی مخصوص، kJ/kgK	s
دما، K و $^{\circ}C$	T
دمای الکترولایزر، K	T_{PEM}
پتانسیل برگشت‌پذیر، V	V_0

- [3] M. Yari, A. Mehr, V. Zare, S. Mahmoudi, M. Rosen, Exergoeconomic comparison of TLC (trilateral Rankine cycle), ORC (organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low grade heat source, *Energy*, 83 (2015) 712-722.
- [4] A. Elsayed, M. Embaye, R. Al-dadah, S. Mahmoud, A. Rezk, Thermodynamic performance of Kalina cycle system 11 (KCS11): feasibility of using alternative zeotropic mixtures, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8(suppl_1) (2013) i69-i78.
- [5] M.F. Orhan, B.S. Babu, 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*, 88 (2015) 801-820.
- [6] T. Özgür, A.C. Yakaryılmaz, A review: Exergy analysis of PEM and PEM fuel cell based CHP systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(38) (2018) 17993-18000.
- [7] I. Dincer, Environmental and sustainability aspects of hydrogen and fuel cell systems, *International Journal of Energy Research*, 31(1) (2007) 29-55.
- [8] M. Rosen, Thermodynamic comparison of hydrogen production processes, *International Journal of Hydrogen Energy*, 21(5) (1996) 349-365.
- [9] D.R. Palo, R.A. Dagle, J.D. Holladay, Methanol steam reforming for hydrogen production, *Chemical reviews*, 107(10) (2007) 3992-4021.
- [10] J. Xu, W. Zhou, Z. Li, J. Wang, J. Ma, Biogas reforming for hydrogen production over nickel and cobalt bimetallic catalysts, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(16) (2009) 6646-6654.
- [11] H. Ghaebi, B. Farhang, T. Parikhani, H. Rostamzadeh, *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*, 71 (2018) 132-145.
- [12] M. Ni, M.K. Leung, D.Y. Leung, Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant, *Energy conversion and management*, 49(10) (2008) 2748-2756.

پتانسیل فعال کننده آند و کاتد، V	$V_{act,i} i = a, c$
غلظت آمونیاک در مخلوط	x
علائم یونانی	
بازده حرارتی، %	η_{th}
راندمان آیزنتروپیک پمپ، %	η_P
راندمان آیزنتروپیک توربین، %	η_T
رسانایی محلی غشای مبدل پروتونی، s/m	σ
آب موجود در سطح غشای آند و کاتد، Ω^{-1}	λ
زیرنویس	
آند	a
کاتد، جریان سرد	c
جریان گرم	c
اوپراتور	EV
ورودی	i
آند	a
کاتد، جریان سرد	c
چرخه کالینا	KC
خروجی	O
چرخه رانکین آلی	ORC
اهمیک	ohm
پمپ	P
نقطه تنگش	pp

۷- منابع

- [1] M. Abdolalipouradl, S. Khalilarya, S. Jafarmadar, Exergoeconomic analysis of a novel integrated transcritical CO₂ and Kalina 11 cycles from Sabalan geothermal power plant, *Energy Conversion and Management*, 195 (2019) 420-435.
- [2] M. Abdolalipouradl, S. Khalilarya, S. Jafarmadar, The thermodynamic analysis of new combined cycle using Sabalan geothermal wells and LNG cold energy, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 52 (6) (2019) 21-30. (in persian)

- RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC, *Energy Conversion and Management*, 177 (2018) 339-349.
- [22] M. Abdolalipouradl, S. Khalilarya, F. Mohammadkhani, Thermodynamic analysis of a novel power, cooling, hydrogen and oxygen multi-generation combined cycle based on Sabalan geothermal wells, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, article in press. (in persian)
- [23] M. Abdolalipouradl, S. Khalilarya, S. Jafarmadar, Exergy analysis of a new proposal combined cycle from Sabalan geothermal source, *Modares Mechanical Engineering*, 18(4) (2018) 11-22. (in persian)
- [24] M. Abdolalipouradl, S. Khalilarya, S. Jafarmadar, The thermodynamic analysis of a novel integrated transcritical CO₂ with Kalina 11 cycles from Sabalan geothermal wells, *Modares Mechanical Engineering*, 19(2) (2019) 335-346. (in persian)
- [25] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran, *Thermal design and optimization*, John Wiley & Sons, 1996.
- [26] J. Ahrendts, Reference states, *Energy*, 5(8-9) (1980) 666-677.
- [27] A. Aali, N. Pourmahmoud, V. Zare, Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a novel combined flash-binary cycle for Sabalan geothermal power plant in Iran, *Energy Conversion and Management*, 143 (2017) 377-390.
- [28] M. Abdolalipouradl, S. Khalilarya, S. Jafarmadar, Energy and Exergy Analysis of a New Power, Heating, Oxygen and Hydrogen Cogeneration Cycle Based on the Sabalan Geothermal Wells, *International Journal of Engineering*, 32(3) (2019) 445-450.
- [29] S. Klein, F. Alvarado, *EES—Engineering Equation Solver. F-Chart Software*. 2002, in.
- [13] R. García-Valverde, N. Espinosa, A. Urbina, Simple PEM water electrolyser model and experimental validation, *international journal of hydrogen energy*, 37(2) (2012) 1927-1938.
- [14] A. Şencan, K.A. Yakut, S.A. Kalogirou, Exergy analysis of lithium bromide/water absorption systems, *Renewable energy*, 30(5) (2005) 645-657.
- [15] M. Jradi, S. Riffat, Tri-generation systems: Energy policies, prime movers, cooling technologies, configurations and operation strategies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32 (2014) 396-415.
- [16] V. Zare, A comparative thermodynamic analysis of two tri-generation systems utilizing low-grade geothermal energy, *Energy conversion and management*, 118 (2016) 264-274.
- [17] H. Ganjehsarabi, Mixed refrigerant as working fluid in Organic Rankine Cycle for hydrogen production driven by geothermal energy, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(34) (2019) 18703-18711.
- [18] A. Karapekmez, I. Dincer, Thermodynamic analysis of a novel solar and geothermal based combined energy system for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, (2018).
- [19] Y.E. Yuksel, M. Ozturk, I. Dincer, Analysis and performance assessment of a combined geothermal power-based hydrogen production and liquefaction system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(22) (2018) 10268-10280.
- [20] I. Dincer, C. Zamfirescu, Renewable-energy-based multigeneration systems, *International Journal of Energy Research*, 36(15) (2012) 1403-1415.
- [21] H. Kianfard, S. Khalilarya, S. Jafarmadar, Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:
M. Abdolalipouradl, M. Rostami, S. Khalilarya, *Thermodynamic Analysis and Comparison of Two New Tri-Generation (Hydrogen, Power, Heating) Systems Using Geothermal Energy*, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(5) (2021) 2983-3002.

DOI: [10.22060/mej.2020.17411.6597](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17411.6597)



