

تحلیل ترمودینامیکی یک آرایش جدید تولید همزمان توان، برودت، هیدروژن و اکسیژن با استفاده از چاه‌های زمین گرمایی سبلان

مهران عبدالعلی پورعدل^۱، شهرام خلیل آریا^{۱*}، فرزاد محمدخانی^۲

^۱ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۰-۰۱

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۲-۱۳

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۱-۲۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۱-۲۸

کلمات کلیدی:

تحلیل ترمودینامیکی

نیروگاه زمین گرمایی سبلان

الکترولایزر غشاء پروتونی

تبرید جذبی

چرخه‌ی رانکین آلی

خلاصه: استفاده از سیستم‌های تولید همزمان به سرعت در جهان در حال گسترش می‌باشد. با وجود این که منطقه زمین گرمایی سبلان یکی از مهم‌ترین مناطق زمین گرمایی ایران می‌باشد، مطالعه‌ای در خصوص امکان‌سنجی سیستم‌های تولید همزمان در این منطقه انجام نگرفته است. با هدف پر کردن خلأ موجود در این زمینه، در این مقاله امکان استفاده از یک چرخه ترکیبی جدید برای تولید همزمان توان، هیدروژن، اکسیژن و برودت از چاه‌های زمین گرمایی سبلان پیشنهاد و مورد مطالعه قرار گرفته است. چرخه پیشنهادی، ترکیبی از تبخیر آبی دو مرحله‌ای از چاه‌های زمین گرمایی سبلان به‌عنوان منبع حرارتی، چرخه‌ی رانکین آلی به‌عنوان مولد انرژی برای تولید هیدروژن از الکترولایزر غشاء پروتونی و سیستم تبرید جذبی تک اثره به‌عنوان قسمت تولید سرمایش می‌باشد. ابتدا شبیه‌سازی ترمودینامیکی چرخه تولید همزمان با استفاده از نرم‌افزار حل معادلات مهندسی انجام شده و سپس تأثیر پارامترهای مؤثر همانند فشار جداساز اول و دوم، دمای اواپراتور رانکین، اختلاف دمای نقطه‌ی تنگش، دمای ژنراتور، نسبت کار ورودی به سیستم غشایی و دمای محیط بر عملکرد سیستم بررسی شده است. طبق بررسی پارامتریک با افزایش فشار جداساز اول و دوم مقدار بازده حرارتی و برودت افزایش می‌یابند. طبق نتایج حاصله، توان خالص تولیدی، تولید هیدروژن، سرمایش، بازده حرارتی و بازده انرژی به ترتیب ۱۴۷۴۹ کیلووات، ۱۳/۲۵ کیلوگرم بر ساعت، ۱۰۹۲۵ کیلووات، ۲۲/۳۴ درصد و ۵۰/۶۲ درصد حاصل شده است.

۱- مقدمه

از روش‌های مناسب برای تولید هیدروژن می‌باشد [۵]. والورده و همکاران [۶] تولید هیدروژن را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی در سیستم الکترولایزر غشاء پروتونی مورد مطالعه قرار دادند. در مطالعه دیگری نی و همکاران [۷] یک بررسی جامع پارامتریک را برای تولید هیدروژن در سیستم الکترولایزر غشاء پروتونی مورد بررسی تراکمی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. گمری در یک بررسی، سیستم‌های تبرید جذبی تک اثره و دو اثره را با استفاده از سیال آب-لیتیم برماید مورد تحلیل انرژی قرار داد، طبق نتایج، بازده انرژی سیستم‌های تک اثره در محدوده ۱۲/۵-۲۳/۲٪ و سیستم‌های دو اثره در محدوده ۱۴/۳-۲۵/۱٪ حاصل شد [۸].

امروزه تولید همزمان با استفاده از منبع انرژی زمین گرمایی

افزایش مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی باعث شده تا کشورها به استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر روی بیاورند [۱ و ۲]. از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی زمین گرمایی است که به‌عنوان یک منبع قابل اطمینان، به‌طور عمده برای تولید برق، گرمایش، سرمایش، خشک کردن صنعتی، تقطیر و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه با آلودگی سوخت‌های فسیلی، تولید و استفاده از سوخت‌های جدید و پاک همانند هیدروژن، بیشتر مورد توجه می‌باشد [۳ و ۴]. استفاده از غشاء مبدل پروتونی به دلیل سازگاری بیشتر با منابع زمین گرمایی و تولید هیدروژن خالص‌تر یکی

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



کاربرد زیادی دارد به طوری که تولید همزمان یکی از فن‌آوری‌های امیدوارکننده با مزایای فنی، اقتصادی و زیست محیطی می‌باشد [۹].

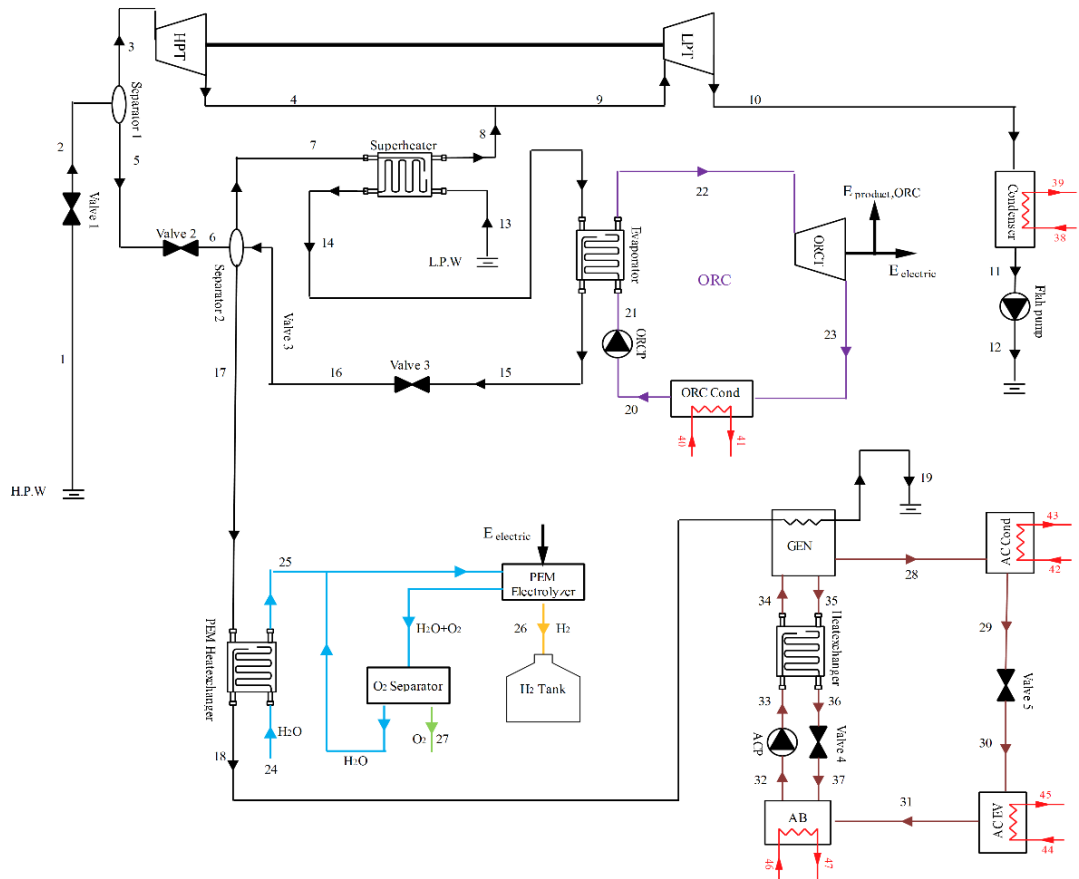
زارع [۱۰] یک چرخه تولید سه‌گانه سرمایش، گرمایش و توان برای چرخه‌ی زمین‌گرمایی را با زیر چرخه‌های کالینا و رانکین آلی مورد مقایسه قرار داد. طبق نتایج، چرخه‌ی کالینا بازده قانون دوم بهتری را نشان داد. غایبی و همکاران [۱۱] نیز یک چرخه تولید سه‌گانه گرمایش، سرمایش را بر اساس تبرید جذبی و توان بر پایه انرژی زمین‌گرمایی بررسی کردند. طبق این مطالعه در حالت بهینه، 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.

غایبی و همکاران [۱۲] در یک مطالعه دیگر یک چرخه‌ی ترکیبی زمین‌گرمایی تولید همزمان گرمایش و سرمایش را بر اساس تبرید اجکتوری و کالینا مورد تحلیل انرژی و انرژی قرار دادند. طبق نتایج حاصله توان خالص، برودت، بازده‌های حرارتی و انرژی به ترتیب ۲۳۱۹ کیلووات، ۱۱۳۳ کیلووات، ۱۵ درصد و ۴۷/۸ درصد محاسبه شدند. یوکسل و همکاران [۱۳] به مطالعه ترمودینامیکی چرخه تولید همزمان هیدروژن مایع و توان بر پایه انرژی زمین‌گرمایی پرداختند و گزارش کردند که وقتی دمای سیال زمین‌گرمایی از ۱۳۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد، بازده انرژی از ۳۸ درصد به ۶۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای الکترولیز غشاء پروتونی از ۶۰ تا ۸۵ سلسیوس، بازده تولید هیدروژن از تقریباً ۳۹ به ۴۴ درصد می‌رسد. احمدی و همکاران [۱۴] به مدل‌سازی جامع ترمودینامیکی و بهینه‌سازی چندهدفه از یک سیستم چندمنظوره انرژی بر اساس یک توربین میکرو گاز، یک مولد بخار بازیافت گرمای دوگانه، یک چیلر جذبی، یک چرخه تبرید اجکتوری، یک گرم‌کن خانگی و یک مبدل غشایی پروتون الکترولایزر برای تولید برق، حرارت، سرمایش، آب گرم و هیدروژن پرداخته و تحلیل انرژی، انرژی و ارزیابی اثرات زیست محیطی را انجام دادند. احمدی و همکاران [۱۵] به بررسی تولید همزمان توان، سرمایش، هیدروژن و آب گرم مصرفی بر اساس سوختن زیست‌توده پرداخته و یک بررسی جامع پارامتری را انجام دادند. در مطالعه دیگری دینسر و زامفیرسکو [۱۶] به تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی انرژی‌های تجدیدپذیر مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی با توجه به تولید همزمان مانند برق، گرما، آب گرم، سرمایش، هیدروژن

و آب شیرین پرداختند.

اولین چاه‌های زمین‌گرمایی در ایران، در منطقه مشگین‌شهر و روستای موییل احداث شده و در حال توسعه می‌باشد [۱۷]. نصرآبادی و همکاران [۱۸] برای داده‌های فرضی چاه‌های سبلان، دو آرایش چرخه تبخیر آبی تک و دومرحله‌ای را مورد مطالعه و بهینه‌سازی قرار دادند. طبق نتایج در حالت بهینه برای چرخه تبخیر آبی تک‌مرحله‌ای توان خالص خروجی ۳۱ مگاوات و چرخه دومرحله‌ای توان خالص ۴۹/۷ مگاوات را تولید می‌کند. با در نظر گرفتن همان مشخصات چاه‌ها در مطالعه قبلی، بینا و همکاران [۱۹]، چهار آرایش مختلف رانکین آلی را مورد مطالعه قرار داده و در حالت بهینه، بازده انرژی و انرژی به ترتیب ۲۰/۵۷ درصد و ۶۳/۷۲ درصد برای چرخه رانکین آلی با مبدل حرارتی را گزارش کرده‌اند. عالی و همکاران [۲۰ و ۲۱] به تحلیل انرژی و انرژی زمین‌گرمایی سبلان بر اساس داده‌های واقعی برای دو دسته چاه بر اساس آرایش جدید ترکیبی تبخیر آبی دومرحله‌ای با رانکین آلی پرداختند. در حالت بهینه، توان خالص تولیدی ۱۷/۱۱ مگاوات، راندمان انرژی ۱۴/۳۵ درصد و راندمان انرژی ۵۳/۳۸ بدست آمد. این نویسندگان در یک مطالعه دیگر، همان چرخه پیشنهادی را مورد تحلیل انرژی و اکونومیکی قرار داده و نشان دادند که هزینه تولید توان در حالت بهینه ۵/۰۶۸ دلار برگیگاژول می‌باشد [۲۲]. عبدالعلی پور و همکاران [۲۳] با در نظر گرفتن دو دسته چاه زمین‌گرمایی سبلان، یک چرخه‌ی ترکیبی تولید توان جدید (شامل یک چرخه ترکیبی از دو چرخه تبخیر تک‌مرحله‌ای، چرخه دی‌اکسید کربن گذر بحرانی و رانکین آلی) پیشنهاد و بهینه‌سازی کرده و گزارش کرده‌اند که در حالت بهینه توان خالص و بازده‌های انرژی و انرژی به ترتیب ۱۹۹۳۴ کیلووات، ۱۷/۰۵ درصد و ۶۵/۳۸ درصد حاصل می‌گردد. در مطالعه دیگری عبدالعلی پور و همکاران [۲۴] یک چرخه‌ی ترکیبی جدید (بر اساس ترکیبی از دو چرخه تبخیر تک‌مرحله‌ای، چرخه دی‌اکسید کربن گذر بحرانی و کالینا ۱۱) برای زمین‌گرمایی سبلان پیشنهاد دادند. بر اساس شرایط عملکرد چرخه‌ی پیشنهادی در حالت بهینه، توان خالص چرخه ترکیبی ۲۰۰۴۶ کیلووات، بازده حرارتی ۱۷/۱۵ درصد، تخریب انرژی ۸۲۵۹ کیلووات و بازده انرژی ۶۵/۷۴ درصد محاسبه شده است.

امروزه تولید همزمان با توجه به کاربردهای مختلف از یک منبع انرژی بسیار مورد اهمیت می‌باشد. اخیراً استفاده از چرخه‌های تولید



شکل ۱. چرخه جدید پیشنهادی برای تولید همزمان از چاه‌های زمین‌گرمایی سبلان
 Fig. 1. The new multi-generation cycle from Sabalan geothermal wells

قرار گرفته است. همچنین در بررسی‌های گذشته برای تولید همزمان هیچ مطالعه‌ای بر اساس چاه‌هایی با دما و فشار متفاوت انجام نگرفته است. بر اساس داده‌های واقعی چاه‌های سبلان از چرخه‌ی تبخیر آبی دومرحله‌ای برای تولید توان، چرخه‌ی رانکین آبی به‌عنوان چرخه تحتانی و تأمین‌کننده انرژی مورد نیاز برای فرایند تولید هیدروژن از الکترولایزر غشاء پروتونی و همچنین سیستم تبرید جذبی تک اثره با مبرد آب-لیتیم بر مایند به‌منظور تولید سرمایه‌ش استفاده شده است. در واقع اهداف عمده این تحقیق به‌صورت زیر می‌باشند:

- استفاده از دو دسته از چاه‌های زمین‌گرمایی سبلان به‌عنوان منبع حرارتی برای تولید همزمان توان، سرمایه‌ش، هیدروژن و اکسیژن
- سرمایه‌ش مجموعه توسط تبرید جذبی تک اثره و تولید هیدروژن و اکسیژن به وسیله‌ی الکترولایزر غشاء
- شبیه‌سازی چرخه‌ی پیشنهادی از دیدگاه انرژی و اگزرژی
- بررسی پارامترهای تأثیرگذار روی تولید توان، سرمایه‌ش و

همزمان به دلیل بازده‌های حرارتی و اگزرجی بالاتر، بیشتر مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. همچنین با توجه به مشکلات مربوط به سوخت‌های فسیلی و آلودگی زیست محیطی این نوع سوخت‌ها استفاده از سوخت‌هایی پاک همانند هیدروژن در حال افزایش می‌باشد. از طرف دیگر توزیع انرژی الکتریسیته در منطقه سبلان به دلیل کوهستانی بودن آن ناحیه با مشکلاتی همراه می‌باشد. با توجه به مطالب بالا استفاده از منبع انرژی زمین‌گرمایی سبلان برای تولید همزمان که علاوه بر تأمین انرژی آن منطقه قادر به تأمین سرمایه‌ش و سوخت هیدروژن نیز می‌باشد اهمیت مضاعف پیدا می‌کند. با مرور مطالعات قبلی مشخص می‌شود که علیرغم اینکه منطقه زمین‌گرمایی سبلان یکی از مهم‌ترین مناطق زمین‌گرمایی ایران می‌باشد، مطالعه‌ای در خصوص امکان‌سنجی سیستم‌های تولید همزمان در این منطقه انجام نگرفته است. باهدف پر کردن خلأ موجود در این زمینه، در این مقاله امکان استفاده از یک چرخه ترکیبی جدید مورد بررسی

هیدروژن چرخه‌ی پیشنهادی

۲- توصیف چرخه تولید همزمان جدید و فرضیات

۲-۱- بررسی چرخه تولید همزمان

دیاگرام شماتیک چرخه‌ی تولید همزمان توان، هیدروژن و سرمایه‌ی که از دو دسته چاه زمین‌گرمایی سبلان به‌عنوان منبع حرارتی استفاده می‌کند، در شکل ۱ آمده است. در این چرخه‌ی پیشنهادی از فرایند الکترولایزر غشاء پروتونی برای تولید هیدروژن و سیستم تبرید جذبی تک اثره برای سرمایه‌ی استفاده شده است. آب زمین‌گرمایی خروجی از چاه‌های فشار بالا پس از اختناق در شیر انبساط اول (مرحله ۱-۲) وارد جداساز اول می‌شود. مایع و بخار توسط جداساز اول از هم جدا شده و از بخار در توربین فشار بالا استفاده می‌شود (مرحله ۳-۴). مایع خروجی از جداساز اول، پس از کاهش فشار در شیر انبساط دوم وارد جداساز دوم شده و مایع و بخار برای استفاده در زیر چرخه‌ها از هم جدا می‌شوند. آب زمین‌گرمایی خروجی از چاه‌های فشار پایین سبلان، با مافوق‌گرم کردن سیال خروجی از جداساز دوم (مرحله ۱۳-۱۴) وارد اواپراتور چرخه رانکین می‌شود تا با از دست دادن انرژی خود در چرخه رانکین (مرحله ۱۳-۱۵) و عبور از شیر انبساط سوم به فشار جداساز دوم برسد. سیال مافوق‌گرم خارج شده (مرحله ۷-۸) از فوق‌گرم‌کن با سیال خروجی از توربین فشار بالا مخلوط شده و این سیال با انجام کار در توربین فشار پایین (مرحله ۹-۱۰) در کندانسور به مایع اشباع تبدیل می‌شود (مرحله ۱۰-۱۱) و سپس توسط پمپ با فشار بالاتر از فشار محیط به چاه تزریق می‌گردد. سیال عامل آلی ضمن گرفتن انرژی در اواپراتور (مرحله ۲۱-۲۲) و انجام کار در توربین چرخه رانکین آلی، انرژی مورد نیاز را برای راه‌اندازی سیستم تولید هیدروژن فراهم می‌کند. به‌طور خلاصه سیستم الکترولایزر غشاء پروتونی توانایی تولید هیدروژن و اکسیژن از آب را ضمن مصرف توان و حرارت دارد. آب با دمای محیط ضمن عبور سیال زمین‌گرمایی از مبدل غشایی (مرحله ۱۷-۱۸) به دمای الکترولایزر رسیده و سپس در پیل سوختی غشاء پروتونی، هیدروژن از کاتد و جریان مخلوط آب و اکسیژن از آند خارج می‌شود. هیدروژن خروجی که به دمای محیط رسیده در مخازن ذخیره شده تا به مکان مصرف انتقال داده شود. همچنین اکسیژن از جریان خروجی از آند توسط جداساز اکسیژن

جدا شده و آب باقیمانده چون دمای بالایی دارد برای استفاده دوباره در پیل سوختی غشاء پروتونی با جریان ۲۵ مخلوط می‌شود. به دلیل بالا بودن دمای خروجی در نقطه ۱۸ از سیستم تبرید جذبی برای سرمایه‌ی استفاده می‌شود، که در آن لیتیم برماید به‌عنوان جاذب و آب به‌عنوان مبرد استفاده می‌شود. آب در قسمت اواپراتور تبرید جذبی ضمن تأمین سرمایه‌ی (مرحله ۴۴-۴۵)، گرمای خود را به مبرد موجود در اواپراتور می‌دهد تا مبرد تبدیل به بخار اشباع شود (مرحله ۳۰-۳۱). سپس آب توسط محلول لیتیم برماید در جاذب، جذب می‌شود (مرحله ۳۱-۳۲). ضمن جذب آب، محلول لیتیم برماید کارایی خود را از دست می‌دهد و بنابراین فشار آن توسط پمپ به فشار بالا رسیده (مرحله ۳۲-۳۳) و ضمن پیش‌گرم شدن برای غلیظ‌سازی (مرحله ۳۴-۳۵) به ژنراتور انتقال داده می‌شود. در ژنراتور گرمای لازم برای بخارسازی آب و در نتیجه افزایش غلظت لیتیم برماید موجود در محلول از آب زمین‌گرمایی گرفته می‌شود. محلول غلیظ شده ضمن انتقال گرمای خود در بازیاب (مرحله ۳۵-۳۶)، توسط شیر فشارشکن به فشار جاذب می‌رسد. مبرد خارج شده از ژنراتور توسط کندانسور به مایع اشباع (مرحله ۲۸-۲۹) تبدیل شده و ضمن عبور از شیر فشارشکن ۵ به فشار پایین چرخه می‌رسد.

۲-۲- فرضیات

به‌منظور مدل‌سازی چرخه تولید همزمان فرضیات زیر برای ساده‌سازی مسئله در نظر گرفته شده است:

- عملکرد اجزای سیستم در حالت پایا بوده و از تلفات حرارتی و افت فشار در لوله‌ها و مبدل‌های حرارتی و همچنین از تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی صرف نظر شده است [۲۲].
- راندمان آیزنتروپیک برای توربین‌ها و پمپ‌های قسمت زمین‌گرمایی و چرخه رانکین آلی و حداقل اختلاف دمای نقطه تنگش^۱ به ترتیب ۸۵٪ و ۹۰٪ و ۱۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است [۲۲ و ۲۳].
- دمای محیط ۱۵ درجه سلسیوس و فشار محیط ۱ بار در نظر گرفته شده است [۲۲ و ۲۳].
- برای قسمت زمین‌گرمایی از اطلاعات واقعی چاه‌های سبلان که

1 Pinch point temperature difference

جدول ۱. مشخصات ترمودینامیکی برای چاه‌های زمین‌گرمایی سبلان [۲۰-۲۴]

Table 1. The thermodynamic properties for fluids in the Sabalan geothermal wellheads [20-24]

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

جدول ۲. پارامترهای مؤثر ورودی برای شبیه‌سازی الکترولایزر غشاء پروتونی و سیستم تبرید جذبی تک اثره [۷ و ۹ و ۱۱]

Table 2. Some required input parameters for the simulation of the proton exchange membrane electrolysis and single effect absorption refrigeration system [7, 9, 11]

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۳۵	دمای کندانسور (°C)	۷۶	انرژی فعال‌سازی آند (kJ/mol)	۱	فشار هیدروژن و اکسیژن (atm)
۳۵	دمای ایزوربر (°C)	۱۸	انرژی فعال‌سازی کاتد (kJ/mol)	۵۰	ضخامت غشاء (μm)
۵	دمای اواپراتور (°C)	۱۴	مقدار آب موجود در سطح آند	۹۶۴۸۶	ثابت فارادی (C/mol)
۸۰	دمای ژنراتور (°C)	۱۰	مقدار آب موجود در سطح کاتد	۱۷۰۰۰۰	فاکتور پتانسیل اولیه آند (A/m ²)
۱۳	دمای نقطه ۴۴ (°C)	۷۰	راندمان مبدل حرارتی (%)	۴۶۰۰	فاکتور پتانسیل اولیه کاتد (A/m ²)
۸	دمای نقطه ۴۵ (°C)	۹۵	راندمان پمپ تبرید (%)	۸۰	دمای غشاء (°C)

$$a = \frac{E_{electric}}{W_{ORCT}} \quad (3)$$

کل انرژی لازم برای تولید هیدروژن در چرخه‌ی پیشنهادی از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta H = \Delta G + T \Delta S \quad (4)$$

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

در فرایند الکترولایزر غشاء پروتونی، نرخ جریان‌های مولی هیدروژن، اکسیژن تولیدی و آب باقی مانده به ترتیب از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$\dot{N}_{H_2, out} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2O, reacted} \quad (5)$$

$$\dot{N}_{O_2, out} = \frac{J}{4F} \quad (6)$$

$$\dot{N}_{H_2O, out} = \dot{N}_{H_2O, in} - \frac{J}{2F} \quad (7)$$

در جدول ۱ آمده استفاده شده است [۲۰-۲۴].

- برای سیستم الکترولایزر غشاء پروتونی و برای سیستم تبرید جذبی از داده‌های موجود در جدول ۲ استفاده شده است.

۳- تحلیل ترمودینامیکی

به‌منظور بررسی عملکرد چرخه و با در نظر گرفتن حجم کنترل برای هر یک از اجزای چرخه، بالانس جرم و انرژی به‌صورت زیر نوشته می‌شوند [۲۲ و ۲۵]:

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

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

که در آن \dot{Q} و \dot{W} گرما و کار تبدالی در حجم کنترل می‌باشند.

۳-۱- تحلیل الکترولایزر غشاء پروتونی

در این بررسی جهت تولید هیدروژن در واکنش الکتروشیمیایی از توان تولیدی توربین چرخه رانکین آلی استفاده شده است. به عبارت دیگر a قسمت از توان توربین چرخه‌ی رانکین آلی صرف الکترولایزر در قسمت تولید هیدروژن مطابق رابطه‌ی زیر می‌شود [۷]:

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{0,i}} \right) \quad i = a, c \quad (15)$$

که در رابطه‌ی بالا J ، تبادل چگالی جریان مبدل بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J_{0,i} = J_i^{ref} \exp \left(\frac{-E_{act,i}}{RT} \right) \quad , i = a, c \quad (16)$$

که در رابطه (۱۶)، J^{ref} فاکتور پتانسیل اولیه و E_{act} انرژی فعال‌سازی می‌باشند [۱۷].

۳-۲- تحلیل چرخه‌ی رانکین آلی

در این بررسی از چرخه‌ی رانکین آلی که عموماً در چرخه‌های تحتانی برای منابع دما پایین و متوسط مناسب بوده، استفاده شده است، در اواپراتور چرخه‌ی رانکین آلی با توجه به در نظر گرفتن اختلاف نقطه‌ی تنگش، دبی چرخه رانکین از روابط زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$T_{PP,EV} = T_{EV} + \Delta T_{PP,EV} \quad (17)$$

$$\dot{m}_{14}(h_{14} - h(T_{PP,EV})) = \dot{m}_{22}(h_{22} - h(T_{EV}, x = 0)) \quad (18)$$

شایان‌ذکر است روابط انرژی برای سایر اعضای چرخه‌ی رانکین آلی طبق جدول ۳ می‌باشد. همچنین در این بررسی از سیال R1۲۳ به علت سازگاری با لایه اوزون، آیزنتروپیک بودن سیال و عدم نیاز به مافوق گرم کردن، دما و فشار بحرانی متوسط، عدم اسیدی بودن و دمای جوش نرمال مناسب استفاده شده است [۲۲].

۳-۳- تحلیل سیستم تبرید جذبی

برای سیستم تبرید جذبی بالانس جرم و غلظت به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۰]:

$$\sum \dot{m}_i x_i = \sum \dot{m}_o x_o \quad (19)$$

که در رابطه‌ی بالا x غلظت لیتیم برماید در محلول می‌باشد. غلظت بالا و پایین مبرد در محلول طبق روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$x_{high} = x_{LIBRH_2O}(T_{35}, P_{35}) \quad (20)$$

$$x_{low} = x_{LIBRH_2O}(T_{31}, P_{31}) \quad (21)$$

در معادله‌ی بالا، J و F به ترتیب بیانگر چگالی جریان و ثابت فارادی می‌باشند و همچنین انرژی الکتریکی مورد نیاز در واکنش الکتروشیمیایی از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$E_{electric} = JV \quad (8)$$

به‌عنوان انرژی ورودی و پارامتر V که از مجموع چهار پارامتر تشکیل شده به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$V = V_0 + V_{act,c} + V_{act,a} + V_{ohm} \quad (9)$$

که در رابطه‌ی بالا، V_0 ، $V_{act,c}$ ، $V_{act,a}$ و V_{ohm} به ترتیب بیانگر پتانسیل برگشت‌پذیر، پتانسیل فعال‌کننده کاتد و پتانسیل فعال‌کننده آند و پتانسیل اهمیک می‌باشند. پتانسیل برگشت‌پذیر طبق رابطه‌ی (۱۰) به دست می‌آید:

$$V_0 = 1.229 - 0.00085(T_{PEM} - 298) \quad (10)$$

رسانایی یونی محلی الکترولایزر غشاء پروتونی از رابطه‌ی زیر ارائه می‌گردد:

$$\sigma_{PEM}[\lambda(x)] = [0.5139\lambda(x) - 0.326] \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (11)$$

که x و $\lambda(x)$ به ترتیب عمق غشای اندازه‌گیری شده و مقدار آب موجود در موقعیت x از سطح کاتد بوده که از رابطه‌ی (۱۲) به دست می‌آید:

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{D} x + \lambda_c \quad (12)$$

که در رابطه بالا λ_a ، λ_c و D به ترتیب، مقدار آب موجود در سطح غشاء در کاتد و آند و ضخامت غشاء می‌باشند. همچنین مقاومت اهمی از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$R_{PEM} = \int_0^D \frac{dx}{\sigma_{PEM}[\lambda(x)]} \quad (13)$$

پتانسیل اهمیک بر اساس قانون اهم، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$V_{ohm} = JR_{PEM} \quad (14)$$

پتانسیل فعال‌سازی در کاتد و آند برای واکنش الکتروشیمیایی طبق رابطه (۱۵) محاسبه می‌گردند:

جدول ۳. روابط انرژی و روابط جرم برای چرخه تولید همزمان
Table 3. Mass and energy equations for the multi-generation cycle

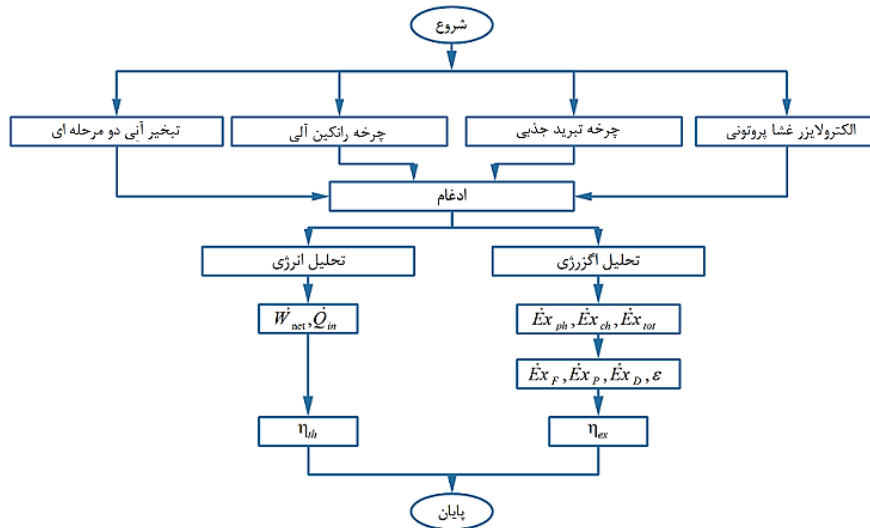
روابط جرم	روابط انرژی	جزء
$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$h_1 = h_2$	شیر انبساط ۱
$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_5$	$h_3 = h_{2g}, h_5 = h_{2f}$	مخزن فلش ۱
$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$	$\eta_{HPT} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,s}}, \dot{W}_{HPT} = \dot{m}_3 (h_3 - h_4)$	توربین فشار بالا
$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$	$h_5 = h_6$	شیر انبساط ۲
$\dot{m}_8 + \dot{m}_4 = \dot{m}_9$	$\dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_8 h_8$	اختلاط
$\dot{m}_6 + \dot{m}_{18} = \dot{m}_7 + \dot{m}_{17}$	$h_7 = h_{6g}, h_{17} = h_{6f}$	مخزن فلش ۲
$\dot{m}_{10} = \dot{m}_9$	$\eta_{LPT} = \frac{h_9 - h_{10}}{h_9 - h_{10,s}}, \dot{W}_{LPT} = \dot{m}_9 (h_9 - h_{10})$	توربین فشار پایین
$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}, \dot{m}_{38} = \dot{m}_{39}$	$\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{38} h_{38} = \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{39} h_{39}$	کندانسور ۱
$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{11}$	$\eta_{FCP} = \frac{v_{11} (P_{12} - P_{11})}{h_{12} - h_{11}}, \dot{W}_{FCP} = \dot{m}_{11} (h_{12} - h_{11})$	پمپ فلش
$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{15}, \dot{m}_{21} = \dot{m}_{22}$	$\dot{m}_{21} h_{21} + \dot{m}_{14} h_{14} = \dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{22} h_{22}$	اوپراتور
$\dot{m}_{23} = \dot{m}_{20}, \dot{m}_{40} = \dot{m}_{41}$	$\dot{m}_{23} h_{23} + \dot{m}_{40} h_{40} = \dot{m}_{20} h_{20} + \dot{m}_{41} h_{41}$	کندانسور رانکین
$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{20}$	$\eta_{ORCP} = \frac{v_{20} (P_{21} - P_{20})}{h_{21} - h_{20}}, \dot{W}_{ORCP} = \dot{m}_{21} (h_{21} - h_{20})$	پمپ رانکین
$\dot{m}_{23} = \dot{m}_{22}$	$\eta_{ORCT} = \frac{h_{22} - h_{23}}{h_{22} - h_{23,s}}, \dot{W}_{ORCT} = \dot{m}_{22} (h_{22} - h_{23})$	توربین رانکین
$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14}, \dot{m}_7 = \dot{m}_8$	$\dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_8 h_8$	فوق گرم کن
$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16}$	$h_{15} = h_{16}$	شیر انبساط ۳
$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19}, \dot{m}_{34} = \dot{m}_{35} + \dot{m}_{28}$	$\dot{m}_{34} h_{34} + \dot{m}_{18} h_{18} = \dot{m}_{35} h_{35} + \dot{m}_{28} h_{28} + \dot{m}_{19} h_{19}$	ژنراتور
$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29}, \dot{m}_{42} = \dot{m}_{43}$	$\dot{m}_{42} h_{42} + \dot{m}_{28} h_{28} = \dot{m}_{29} h_{29} + \dot{m}_{43} h_{43}$	کندانسور تبرید
$\dot{m}_{29} = \dot{m}_{30}$	$h_{29} = h_{30}$	شیر انبساط ۵
$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{31}, \dot{m}_{44} = \dot{m}_{45}$	$\dot{m}_{44} h_{44} + \dot{m}_{30} h_{30} = \dot{m}_{31} h_{31} + \dot{m}_{45} h_{45}$	اوپراتور تبرید
$\dot{m}_{46} = \dot{m}_{47}, \dot{m}_{37} = \dot{m}_{31} + \dot{m}_{32}$	$\dot{m}_{46} h_{46} + \dot{m}_{37} h_{37} + \dot{m}_{31} h_{31} = \dot{m}_{47} h_{47} + \dot{m}_{32} h_{32}$	جاذب
$\dot{m}_{32} = \dot{m}_{33}$	$\eta_{ACP} = \frac{v_{32} (P_{33} - P_{32})}{h_{33} - h_{32}}, \dot{W}_{ACP} = \dot{m}_{33} (h_{33} - h_{32})$	پمپ تبرید
$\dot{m}_{33} = \dot{m}_{34}, \dot{m}_{35} = \dot{m}_{36}$	$\dot{m}_{35} h_{35} + \dot{m}_{33} h_{33} = \dot{m}_{34} h_{34} + \dot{m}_{36} h_{36}$	مبدل حرارتی
$\dot{m}_{37} = \dot{m}_{36}$	$h_{36} = h_{37}$	شیر انبساط ۴
$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18}, \dot{m}_{24} = \dot{m}_{25}$	$\dot{m}_{24} h_{24} + \dot{m}_{17} h_{17} = \dot{m}_{18} h_{18} + \dot{m}_{25} h_{25}$	مبدل حرارتی الکترولايزر
$\dot{m}_{25} = \dot{m}_{26} + \dot{m}_{27}$	$\dot{E}_{electric} + \dot{m}_{25} h_{25} = \dot{m}_{27} h_{27} + \dot{m}_{26} h_{26}$	الکترولايزر پروتونی

۳-۴- تحلیل انرژی

سایر روابط انرژی برای اعضای سیستم تبرید جذبی لیتیم برماید

انرژی یک جریان از مجموع انرژی‌های فیزیکی، شیمیایی،

در جدول ۳ آمده است.



شکل ۲. فلوچارت خلاصه تحلیل
Fig. 2. Flow chart of the summary analysis

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{HPT} + \dot{W}_{LPT} + \dot{W}_{ORCT} - (\dot{W}_{FP} + \dot{W}_{ACP} + \dot{W}_{ORCP} + \dot{E}_{electric}) \quad (25)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{m}_{H_2} LHV + \dot{Q}_{cooling}}{\dot{m}_1 (h_1 - h_0) + \dot{m}_{13} (h_{13} - h_0)} \quad (26)$$

که LHV ارزش حرارتی پایین سوخت هیدروژن بوده و $\dot{Q}_{cooling}$ مقدار سرمایش چرخه بوده که طبق رابطه‌ی زیر حاصل می‌گردد:

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{m}_{44} (h_{44} - h_{45}) \quad (27)$$

بازده اگزرژی چرخه و نرخ اگزرژی سرمایش چرخه‌ی پیشنهادی طبق روابط زیر ارائه می‌شوند [۱۴ و ۲۲]:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{26} + \dot{E}x_{cooling}}{\dot{E}x_1 + \dot{E}x_{13}} \quad (28)$$

$$\dot{E}x_{cooling} = \dot{E}x_{45} - \dot{E}x_{44} \quad (29)$$

با در نظر گرفتن روابط گفته شده برای قسمت‌های مختلف چرخه‌ی تولید همزمان و روابط موجود در جدول ۳ و فرضیات در نظر گرفته شده، تحلیل انرژی و اگزرژی همانند فلوچارت شکل ۲ با استفاده از نرم‌افزار حل معادلات مهندسی^۱ انجام می‌شود [۲۸]. پس از به دست آمدن مشخصات ترمودینامیکی برای جریان‌های مختلف، برای تأثیرگذاری پارامترهای مختلف روی عملکرد چرخه‌ی تولید همزمان یک بررسی پارامتریک جامع انجام می‌گیرد.

پتانسیل و جنبشی تشکیل شده است. مقدار اگزرژی فیزیکی برای هر جریان طبق رابطه زیر حاصل می‌گردد [۲۶]:

$$\dot{E}x_{ph} = \dot{m} (h - h_0 - T_0 (s - s_0)) \quad (22)$$

با توجه به صرف نظر کردن از اگزرژی جنبشی و پتانسیل، مقدار اگزرژی کل برای هر جریان طبق معادله (۲۳) حاصل می‌شود [۲۷]:

$$\dot{E}x_{total,i} = \dot{E}x_{ph,i} + \dot{E}x_{ch,i} \quad (23)$$

که در رابطه‌ی بالا $\dot{E}x_{ch}$ مقدار اگزرژی شیمیایی می‌باشد. همچنین در این مطالعه $\dot{E}x_{ch,H_2}$ و $\dot{E}x_{ch,O_2}$ به ترتیب برابر ۲۳۸ و ۳/۹۷۳ کیلوژول بر مول در نظر گرفته شده و برای سایر جریان‌ها صفر در نظر گرفته شده است [۲۷].

مقدار تخریب اگزرژی با در نظر گرفتن حجم کنترل برای هر عضو طبق رابطه‌ی زیر حاصل می‌گردد [۲۶]:

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_F - \dot{E}x_P \quad (24)$$

که در رابطه‌ی بالا $\dot{E}x_F$ اگزرژی سوخت و $\dot{E}x_P$ اگزرژی محصول بیان می‌گردند.

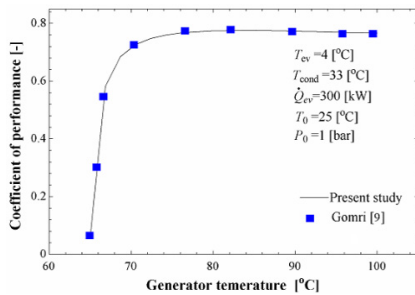
۳-۵- عملکرد کل چرخه ترکیبی

توان خالص و بازده حرارتی چرخه تولید همزمان طبق روابط زیر حاصل می‌گردد [۱۴ و ۲۲]:

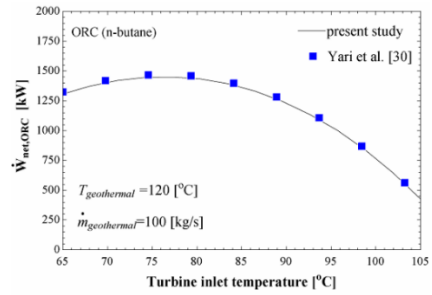
1 Engineering Equation Solver (E.E.S)

جدول ۴. اعتبار سنجی چرخه تبخیر آبی دومرحله‌ای چاه‌های سبلان
 Table 4. Verification of simulation the double flash cycle from Sabalan geothermal wells

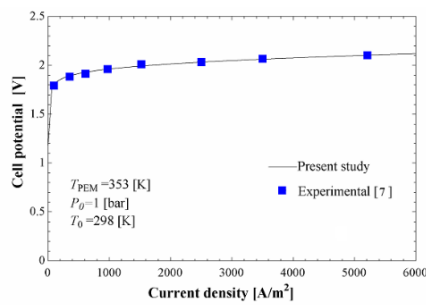
دبی (kJ/kgK)		آنتالپی (kJ/kg)		فشار (kPa)		دما (°C)		حالت
[۲۰ و ۲۱]	کار حاضر	[۲۰ و ۲۱]	کار حاضر	[۲۰ و ۲۱]	کار حاضر	[۲۰ و ۲۱]	کار حاضر	
۵۷	۵۷	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۱۰۷۲	۱۰۷۲	۱۸۳	۱۸۲/۹۶۰	۱
۵۷	۵۷	۱۱۵۰	۱۱۵۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۷۰/۴	۱۷۰/۴۴۴	۲
۱۱/۹۴	۱۱/۹۳۶	۲۷۶۹	۲۷۶۸/۸۹۲	۸۰۰	۸۰۰	۱۷۰/۴	۱۷۰/۴۴۴	۳
۱۱/۹۴	۱۱/۹۳۶	۲۴۵۸	۲۴۵۷/۹۷۰	۹۲	۹۲	۹۷/۳۲	۹۷/۳۱۸	۴
۴۵/۰۶	۴۵/۰۶۴	۷۲۱/۲	۷۲۱/۲۲۶	۸۰۰	۸۰۰	۱۷۰/۴	۱۷۰/۴۴۴	۵
۴۵/۰۶	۴۵/۰۶۴	۷۲۱/۲	۷۲۱/۲۲۶	۹۲	۹۲	۹۷/۳۲	۹۷/۳۱۸	۶
۶/۲۵	۶/۲۵۱	۲۶۷۱	۲۶۷۱/۴۶۰	۹۲	۹۲	۹۷/۳۲	۹۷/۳۱۸	۷
۶/۲۵	۶/۲۵۱	۲۷۸۶	۲۷۸۶/۴۷۱	۹۲	۹۲	۱۵۵	۱۵۴/۹۸۳	۸
۱۸/۱۹	۱۸/۱۸۷	۲۵۷۱	۲۵۷۰/۸۸۴	۹۲	۹۲	۹۷/۳۲	۹۷/۳۱۸	۹
۱۸/۱۹	۱۸/۱۸۷	۲۲۷۰	۲۲۶۹/۶۴۳	۷/۳۸	۷/۳۸۱	۴۰	۴۰	۱۰
۱۸/۱۹	۱۸/۱۸۷	۱۶۵/۵	۱۶۷/۵۰۳	۷/۳۸	۷/۳۸۱	۴۰	۴۰	۱۱



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۳. اعتبار سنجی الف) چرخه رانکین آلی، ب) چرخه‌ی تبرید جذبی ج) تولید هیدروژن
 Fig. 3. Verification of simulation for a) the organic Rankine cycle b) the absorption refrigeration c) the hydrogen production

زمین گرمایی، چرخه رانکین آلی، قسمت الکترولیزر غشا پروتونی
 برای تولید هیدروژن و سیستم تبرید جذبی لیتیم برماید برای

۳-۵- اعتبارسنجی
 با توجه به این که آرایش پیشنهادی از چهار قسمت سیستم

جدول ۵. مشخصات خواص نقاط مختلف چرخه‌ی تولید همزمان پیشنهادی
Table 5. Calculated thermodynamic properties of the streams

اگرژی (kW)	آنتروپی (kJ/kg)	آنتالپی (kJ/kgK)	غلظت لیتیم برماید (%)	دبی (kg/s)	فشار (bar)	دما (K)	سیال	
۱۶۵۷۳	۲/۹۸۸	۱۱۵۰	-	۵۷	۱۰/۷۲	۴۵۶/۱	زمین گرمایی	۱
۱۶۴۷۸	۲/۹۹۳	۱۱۵۰	-	۵۷	۱۰	۴۵۳/۱	زمین گرمایی	۲
۹۶۵۵	۶/۵۸۶	۲۷۷۸	-	۱۰/۹۵	۱۰	۴۵۳/۱	زمین گرمایی	۳
۶۶۶۸	۶/۶۹۴	۲۵۳۶	-	۱۰/۹۵	۲	۳۹۳/۴	زمین گرمایی	۴
۶۸۲۳	۲/۱۳۹	۷۶۲/۹	-	۴۶/۰۵	۱۰	۴۵۳/۱	زمین گرمایی	۵
۶۱۹۲	۲/۱۸۶	۷۶۲/۹	-	۴۶/۰۵	۲	۳۹۳/۴	زمین گرمایی	۶
۶۵۶۶	۷/۱۲۷	۲۷۰۷	-	۱۰/۰۳	۲	۳۹۳/۴	زمین گرمایی	۷
۶۷۸۲	۷/۳۰۳	۲۷۷۹	-	۱۰/۰۳	۲	۴۲۸/۱	زمین گرمایی	۸
۱۳۴۲۸	۶/۹۸۹	۲۶۵۲	-	۲۰/۹۸	۲	۳۹۳/۴	زمین گرمایی	۹
۱۴۶۳	۷/۲۷۷	۲۱۶۵	-	۲۰/۹۸	۰/۰۳۱۶۹	۲۹۸/۲	زمین گرمایی	۱۰
۱۲/۸۶	۰/۳۶۷	۱۰۴/۸	-	۲۰/۹۸	۰/۰۳۱۶۹	۲۹۸/۲	زمین گرمایی	۱۱
۱۵/۳۲	۰/۳۶۷	۱۰۴/۹	-	۲۰/۹۸	۱/۲	۲۹۸/۲	زمین گرمایی	۱۲
۱۳۹۲۰	۲/۹۱۲	۱۱۰۰	-	۵۳	۷	۴۳۸/۱	زمین گرمایی	۱۳
۱۳۶۷۲	۲/۸۸	۱۰۸۶	-	۵۳	۷	۴۳۸/۱	زمین گرمایی	۱۴
۶۶۱۴	۱/۹۹۳	۶۹۷/۴	-	۵۳	۷	۴۳۸/۱	زمین گرمایی	۱۵
۶۱۹۸	۲/۰۲	۶۹۷/۴	-	۵۳	۲	۳۹۳/۴	زمین گرمایی	۱۶
۵۸۲۴	۱/۵۳	۵۰۴/۸	-	۸۹/۰۲	۲	۳۹۳/۴	زمین گرمایی	۱۷
۳۸۱۲	۱/۲۹۱	۴۱۳/۱	-	۸۹/۰۲	۲	۳۷۱/۷	زمین گرمایی	۱۸
۲۳۸۵	۱/۰۷۵	۳۳۴/۸	-	۸۹/۰۲	۲	۳۵۳/۱	زمین گرمایی	۱۹
۱۷/۴۹	۱/۰۹۲	۲۲۶/۲	-	۸۶/۲۴	۰/۹۱۶۵	۲۹۸/۲	R1۲۳	۲۰
۲۳/۰۹	۱/۰۹۷	۲۲۷/۹	-	۸۶/۲۴	۲۲/۹۳	۲۹۹/۱	R1۲۳	۲۱
۵۳۷۴	۱/۷۱۱	۴۶۶/۹	-	۸۶/۲۴	۲۲/۹۳	۴۲۸/۱	R1۲۳	۲۲
۶۷۸/۹	۱/۷۳۷	۴۱۹/۹	-	۸۶/۲۴	۰/۹۱۶۵	۳۲۸/۴	R1۲۳	۲۳
۰	۰/۲۲۴۲	۶۳/۰۱	-	۳۰	۱	۲۸۸/۲	آب	۲۴
۸۰/۱/۹	۱/۰۷۵	۳۳۵	-	۳۰	۱	۳۵۳/۲	آب	۲۵
۴۳۴/۹	۵۵/۸۶	۴۷۲۳	-	۰/۰۰۳۶۸۱	۱	۳۵۳/۲	هیدروژن	۲۶
۳/۷۹۹	۰/۱۵۹	۵۰/۵	-	۰/۰۲۹۲۱	۱	۳۵۳/۲	اکسیژن	۲۷
۳۸۰/۸	۸/۶۰۹	۲۶۵۰	-	۲/۲۳۴	۰/۰۵۶۲۷	۳۵۳/۲	آب	۲۸
۵/۹۹	۰/۵۰۵	۱۴۶/۶	-	۲/۲۳۴	۰/۰۵۶۲۷	۳۰۸/۲	آب	۲۹
-۸/۶۴۳	۰/۵۲۷۷	۱۴۶/۶	-	۲/۲۳۴	۰/۰۰۸۷۲۶	۲۷۸/۲	آب	۳۰
-۱۹۸/۴	۹/۰۲۴	۲۵۱۰	-	۲/۲۳۴	۰/۰۰۸۷۲۶	۲۷۸/۲	آب	۳۱
۳۴/۹۴	۰/۲۱۱۳	۸۵/۲۹	۰/۵۵۲۸	۲۶/۹۳	۰/۰۰۸۷۲۶	۳۰۸/۲	لیتیم برماید-آب	۳۲
۳۴/۹۴	۰/۲۱۱۳	۸۵/۲۹	۰/۵۵۲۸	۲۶/۹۳	۰/۰۵۶۲۷	۳۰۸/۲	لیتیم برماید-آب	۳۳
۱۸۷/۳	۰/۳۸۳۳	۱۴۰/۵	۰/۵۵۲۸	۲۶/۹۳	۰/۰۵۶۲۷	۳۳۵/۳	لیتیم برماید-آب	۳۴
۲۸۸/۱	۰/۴۵۰۸	۱۹۵/۸	۰/۶۰۲۸	۲۴/۷	۰/۰۵۶۲۷	۳۵۳/۲	لیتیم برماید-آب	۳۵
۷۳/۰۴	۰/۲۷۲	۱۳۵/۶	۰/۶۰۲۸	۲۴/۷	۰/۰۵۶۲۷	۳۲۱/۷	لیتیم برماید-آب	۳۶

۶۶/۶۹	۰/۲۶۹۷	۱۳۵/۶	۰/۶۰۴۱	۲۴/۷	۰/۰۰۸۷۲۶	۳۱۸/۵	لیتیم برماید-آب	۳۷
۰	۰/۲۲۴۲	۶۳/۰۱	-	۲۰۶۷	۱	۲۸۸/۲	آب	۳۸
۳۷۰/۸	۰/۲۹۶۲	۸۳/۹۳	-	۲۰۶۷	۱	۲۹۳/۲	آب	۳۹
۰	۰/۲۲۴۲	۶۳/۰۱	-	۷۹۸/۴	۱	۲۸۸/۲	آب	۴۰
۱۴۳/۲	۰/۲۹۶۲	۸۳/۹۳	-	۷۹۸/۴	۱	۲۹۳/۲	آب	۴۱
۰	۰/۲۲۴۲	۶۳/۰۱	-	۲۶۷/۳	۱	۲۸۸/۲	آب	۴۲
۴۷/۹۶	۰/۲۹۶۲	۸۳/۹۳	-	۲۶۷/۳	۱	۲۹۳/۲	آب	۴۳
۷/۳۵۷	۰/۱۹۵۱	۵۴/۶۴	-	۲۵۲/۲	۱	۲۸۶/۲	آب	۴۴
۹۱/۲۶	۰/۱۲۱۳	۳۳/۷۱	-	۲۵۲/۲	۱	۲۸۱/۲	آب	۴۵
۰	۰/۲۲۴۲	۶۳/۰۱	-	۳۱۸/۳	۱	۲۸۸/۲	آب	۴۶
۵۷/۱۱	۰/۲۹۶۲	۸۳/۹۳	-	۳۱۸/۳	۱	۲۹۳/۲	آب	۴۷

سیال‌ها (دما، دبی، فشار، آنتالپی، آنترپی و ...) در جدول ۵ آمده است. توان خالص تولیدی ۱۴۷۴۹ کیلووات، بازده حرارتی ۲۲/۳۴ درصد، تولید هیدروژن ۱۳/۲۵ کیلوگرم بر ساعت، سرمایه‌ش ۱۰۹۲۵ کیلووات، بازده انرژی ۵۰/۶۲ درصد و تخریب انرژی کل چرخه‌ی تولید همزمان ۱۲۶۴۹ کیلووات حاصل شده‌اند. در واقع برای این حالت ۷۷/۶۶ درصد از انرژی ورودی به چرخه‌ی تولید همزمان توسط چاه‌ها اتلاف شده است.

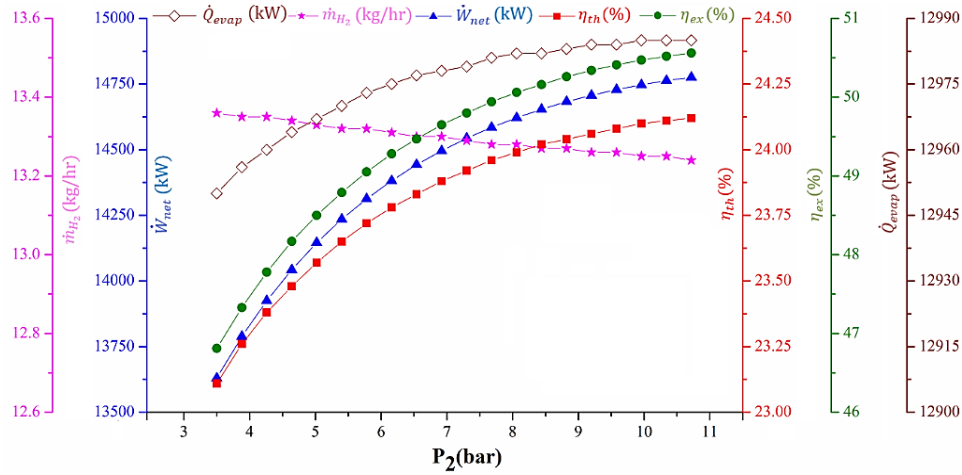
۱-۴- نتایج مطالعه پارامتری

برای چرخه‌ی تولید همزمان، تأثیر پارامترهای مختلف (همانند فشار جداساز اول و دوم، دمای اواپراتور چرخه‌ی رانکین، اختلاف دمای نقطه‌ی تنگش، دمای مبدل غشا پروتونی، نسبت کار ورودی، دمای ژنراتور و دمای محیط) بر پارامترهای عملکردی چرخه همچون توان خالص، تولید هیدروژن، سرمایه‌ش، بازده حرارتی و بازده انرژی انجام شده است. تأثیر تغییر فشار جداساز اول روی توان خالص، تولید هیدروژن، سرمایه‌ش و بازده‌های حرارتی و انرژی چرخه‌ی تولید همزمان در شکل ۴ به نمایش درآمده است. با افزایش فشار جداساز اول تا فشار سر چاه ۱۰/۷۲ بار، مقدار کیفیت و به تبع آن دبی عبوری کاهش پیدا کرده ولی از طرف دیگر فشار و آنتالپی ورودی توربین فشار بالا افزایش پیدا می‌کند. افزایش آنتالپی بر کاهش دبی غلبه کرده و باعث می‌شود تا توان توربین فشار بالا افزایش یابد. با کاهش دبی نقطه ۳، دبی مایع اشباع نقطه ۵ افزایش و به تبع آن دبی بخار اشباع خروجی جداساز دوم افزایش پیدا کرده و باعث می‌شود انرژی

سرمایش استفاده شده، اعتبار سنجی برای هر چهار قسمت به صورت جداگانه با توجه به عدم وجود یک آرایش شبیه به چرخه‌ی تولید همزمان پیشنهادی، انجام گرفته است. نتایج چرخه تبخیر آبی دومرحله‌ای (برای نیروگاه زمین‌گرایی سبلان) با مطالعه عالی و همکاران [۲۰ و ۲۱]، چرخه رانکین آبی (برای شرایط دمای منبع زمین‌گرایی ۱۲۰ درجه‌ی سلسیوس و دبی جرمی ۱۰۰ کیلوگرم بر ثانیه) با بررسی یاری و همکاران [۲۹]، چرخه تبرید جذبی (برای شرایط دمای اواپراتور ۴ درجه‌ی سلسیوس، دمای کندانسور ۳۳ درجه‌ی سلسیوس، فشار محیط ۱ بار و دمای محیط ۲۵ درجه‌ی سلسیوس) با مطالعه گمری [۸] و قسمت الکترولایزر غشا پروتونی (برای شرایط دمای محیط ۲۵ درجه‌ی سلسیوس، دمای الکترولایزر ۸۰ درجه‌ی سلسیوس و فشار محیط ۱ بار) با مطالعه آزمایشگاهی نی و همکاران [۷] مقایسه شده است، نتایج ارائه شده در جدول ۴ و همچنین شکل ۳ نشان از صحت فرایند شبیه‌سازی در این مطالعه دارد.

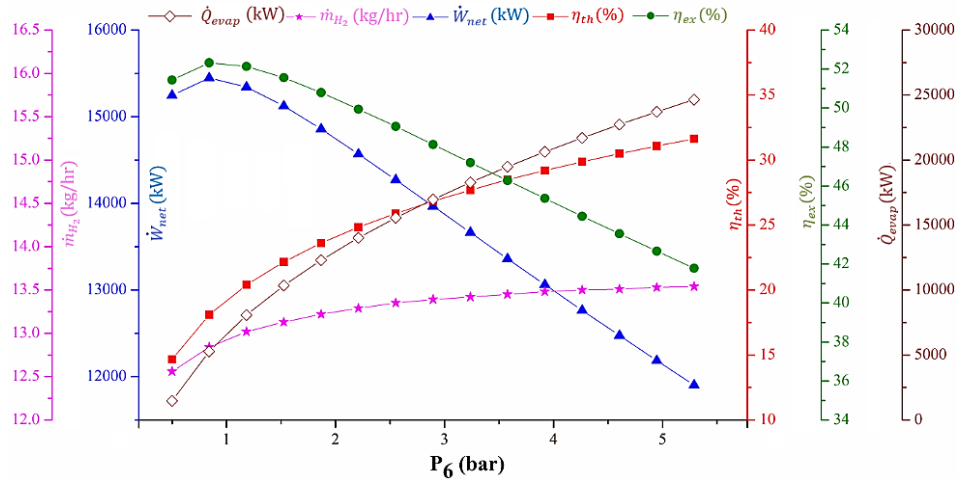
۴- نتایج و بحث

برای حالت اولیه (برای شرایط فشار جداساز اول ۱۰ بار، فشار جداساز دوم ۲ بار، دمای الکترولایزر ۸۰ درجه‌ی سلسیوس، دمای اختلاف نقطه تنگش ۱۰ درجه‌ی سلسیوس و نصف استفاده از توان چرخه‌ی رانکین برای تولید هیدروژن در سیستم الکترولایز) سیال عامل آبی R123 یک بررسی کلی با توجه به روابط موجود در جدول ۳ و فرضیات گفته شده در قسمت قبلی برای چرخه‌ی تولید همزمان پیشنهادی انجام شده است. برای این حالت، مشخصات ترمودینامیکی



شکل ۴. تأثیر فشار جداساز اول روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده انرژی و سرمایش

Fig. 4. Effects of the first separator pressure on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and cooling

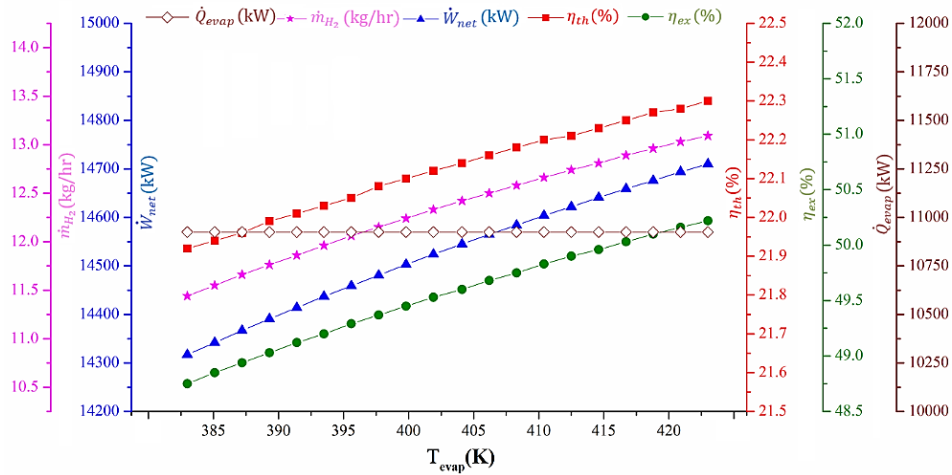


شکل ۵. تأثیر فشار جداساز دوم روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده انرژی و سرمایش

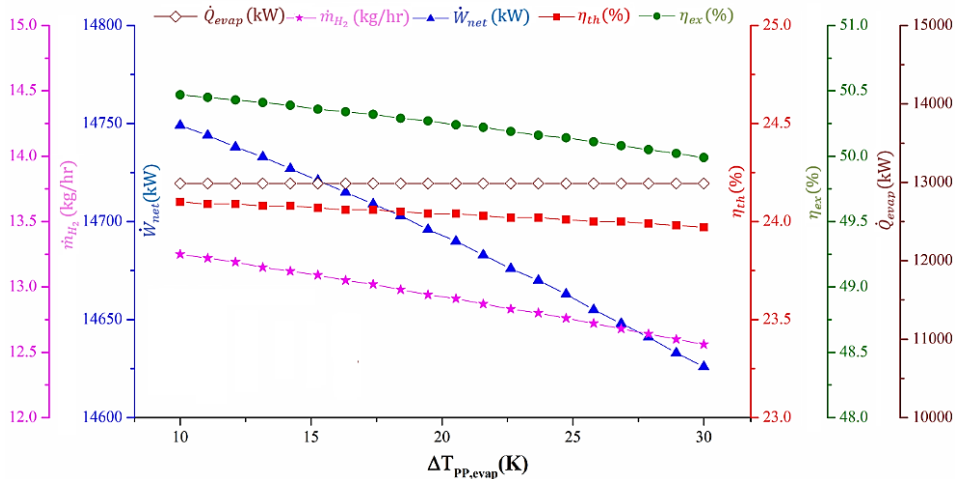
Fig. 5. Effects of the second separator pressure on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and cooling

اشاره شد با افزایش فشار، دبی نقطه ۵ و به تبع آن دبی مایع اشباع خروجی جداساز دوم افزایش پیدا کرده و باعث می‌شود دبی سیستم تبرید جذبی افزایش یابد و طبق رابطه (۲۷) مقدار سرمایش چرخه تولید همزمان افزایش یابد. در رابطه (۲۶) افزایش کار خالص و سرمایش بر کاهش تولید هیدروژن غلبه کرده و باعث می‌شود با افزایش فشار تا فشار سر چاه اول بازده حرارتی تا ۲۴/۱۸ درصد افزایش یابد. همچنین با افزایش انرژی ورودی به تولید توان و سرمایش مطابق رابطه (۲۸) با افزایش فشار جداساز اول، مقدار بازده انرژی نیز تا ۵/۵ درصد افزایش می‌یابد.

بیشتری از سیال خروجی از چاه دوم در فوق‌گرم‌کن گرفته شده و انرژی نقطه ۱۴ یا انرژی ورودی به اواپراتور چرخه رانکین کمتر شود و این کاهش باعث کاهش توان چرخه رانکین آلی می‌شود. افزایش توان توربین فشار بالا بر کاهش توان چرخه رانکین آلی غلبه کرده و باعث می‌شود توان خالص چرخه مطابق شکل ۴ تا ۱۴۷۰۰ کیلووات افزایش یابد. همان‌طور که گفته شد توان چرخه رانکین آلی کاهش پیدا کرده و طبق روابط (۸) و (۳) انرژی الکتریکی مورد نیاز برای واکنش الکتروشیمیایی و به تبع آن چگالی جریان و تولید هیدروژن کمتر می‌شود. همان‌طور که



شکل ۶. تأثیر دمای اواپراتور چرخه رانکین روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده انرژی و سرمایش
 Fig. 6. Effects of the evaporator temperature on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and cooling

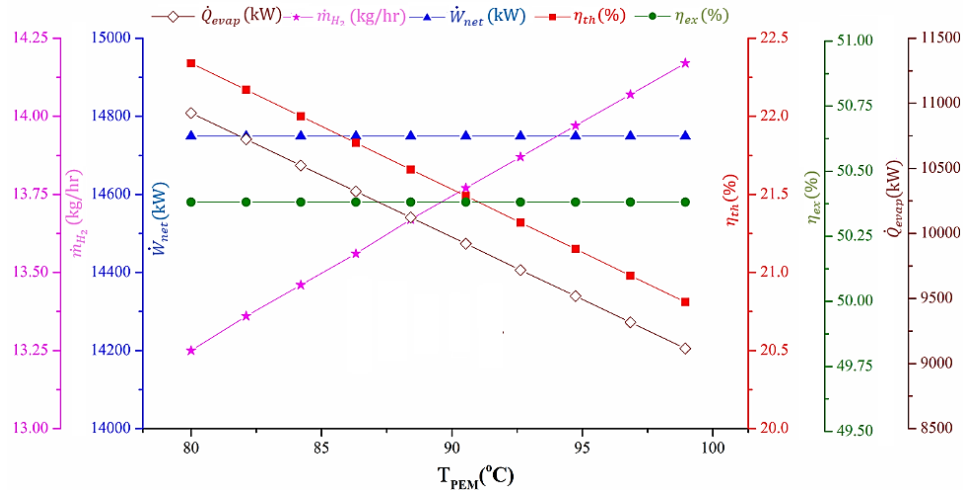


شکل ۷. تأثیر اختلاف دمای نقطه تنگش اواپراتور روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده انرژی و سرمایش
 Fig. 7. Effects of the evaporator pinch point temperature difference on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and cooling

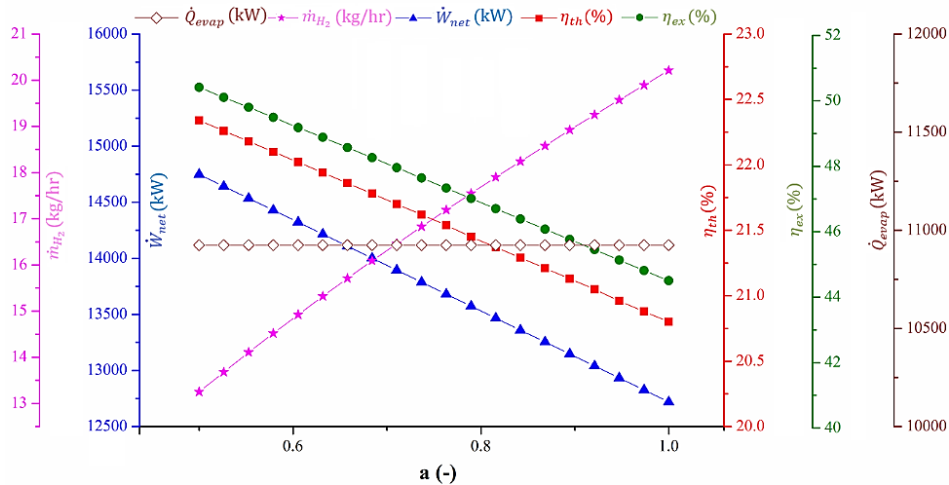
افزایش می‌یابد. افزایش فشار جداساز دوم نیز همانند جداساز دوم باعث افزایش دبی نقطه ۱۷ می‌شود و مطابق مطالب گفته شده باعث افزایش سرمایش خواهد شد. از طرفی روند موجود برای سرمایش، توان و تولید هیدروژن باعث می‌شود که بازده حرارتی و بازده انرژی مطابق شکل ۵ روندی افزایشی داشته باشند.

تأثیر دمای اواپراتور چرخه رانکین روی توان خالص، تولید هیدروژن، سرمایش و بازده‌های حرارتی و بازده انرژی چرخه تولید همزمان در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش دمای اواپراتور، مقدار انرژی ورودی به چرخه رانکین افزایش پیدا کرده و

تأثیر تغییر فشار جداساز دوم روی پارامترهای عملکردی چرخه‌ی تولید همزمان در شکل ۵ به نمایش درآمده است. با افزایش فشار جداساز دوم، مقدار دبی عبوری نقطه ۷ کاهش پیدا کرده ولی از طرف دیگر فشار و آنتالپی نقطه ۷ افزایش پیدا می‌کند. این روند باعث افزایش توان توربین فشار پایین و کاهش توان توربین فشار بالا شده و باعث می‌شود توان خالص دارای یک نقطه بهینه در فشار ۱ بار مطابق شکل ۵ باشد. از طرفی افزایش فشار جداساز دوم باعث افزایش توان چرخه رانکین شده و به تبع آن انرژی الکتریکی مورد نیاز برای واکنش الکتروشیمیایی افزایش و در نتیجه تولید هیدروژن



شکل ۸. تأثیر دمای مبدل غشا پروتونی روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده انرژی و سرمایش
 Fig. 8. Effects of the proton exchange membrane temperature on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and cooling



شکل ۹. اثر نسبت کار ورودی مبدل غشایی به کار تولیدی چرخه رانکین آلی روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده انرژی و سرمایش
 Fig. 9. Effects of the ratio of consumed power on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and cooling

در شکل ۷ تأثیر اختلاف دمای نقطه‌ای تنگش روی توان خالص، تولید هیدروژن، سرمایش و بازده‌های حرارتی و انرژی چرخه‌ای تولید همزمان نشان داده شده است و نشان می‌دهد که با افزایش اختلاف دمای نقطه‌ای تنگش، مقدار دمای ورودی توربین چرخه‌ای رانکین کاهش پیدا می‌کند. این روند باعث کاهش توان خالص و تولید هیدروژن شده و در نتیجه باعث کاهش بازده‌های حرارتی و انرژی چرخه‌ای تولید همزمان خواهد شد. از این رو انتخاب مبدلی با اختلاف دمای نقطه‌ای تنگش کمتر که گران‌تر بوده تأثیر بسیار

باعث می‌شود تا توان توربین چرخه رانکین و به تبع آن کار خالص چرخه و انرژی الکتریکی مورد نیاز برای واکنش الکتروشیمیایی افزایش پیدا کند و در این حالت، همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، تولید هیدروژن افزایش خواهد یافت. همچنین طبق رابطه‌های (۲۶) و (۲۸) بازده‌های حرارتی و انرژی چرخه‌ای تولید همزمان با افزایش مقدار تولید هیدروژن افزایش پیدا می‌کنند. افزایش دمای اواپراتور چرخه‌ای رانکین روی سیستم تبرید جذبی تأثیری ندارد و باعث می‌شود که تولید سرمایش مقدار ثابتی داشته باشد.

۳ب دارد. با توجه به مستقل بودن هیدروژن تولیدی و توان خالص چرخه از دمای ژنراتور، روند تغییرات بازده حرارتی و اگزرژی با دمای ژنراتور بر اساس رابطه (۲۶) و (۲۸) روندی مطابق با روند سرمایه‌گذاری خواهد بود.

تأثیر افزایش دمای محیط روی توان خالص، تولید هیدروژن، سرمایه‌گذاری و بازده‌های حرارتی و اگزرژی چرخه‌ی پیشنهادی در شکل ۱۱ به نمایش درآمده است. توان خالص چرخه و هیدروژن تولیدی با افزایش دمای محیط مقدار ثابتی دارند ولی با افزایش دمای محیط مقدار سرمایه‌گذاری تولیدی افزایش می‌یابد و در نتیجه به علت افزایش تولید سرمایه‌گذاری و کاهش مخرج روابط (۲۶) و (۲۸) بر اثر افزایش دمای محیط، بازده‌های حرارتی و اگزرژی نیز افزایش پیدا کرده و به مقادیر ۲۳ و ۵۱ درصد می‌رسند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک چرخه‌ی تولید همزمان جدید با منبع گرمایی چاه‌های زمین‌گرمایی سبلان و به‌صورت ترکیب تبخیر آبی دومرحله‌ای، چرخه‌ی رانکین آبی، تبرید جذبی و سیستم الکترولایزر غشاء پروتونی برای تولید همزمان توان، هیدروژن و سرمایه‌گذاری معرفی شد. پس از انجام مدل‌سازی، جمع‌بندی نتایج حاصل شده در زیر آمده است:

- برای حالت اولیه مورد بررسی برای چرخه‌ی تولید همزمان، توان خالص تولیدی ۱۴۷۴۹ کیلووات، بازده حرارتی ۲۲/۳۴ درصد، تولید هیدروژن ۱۳/۲۵ کیلوگرم بر ساعت، سرمایه‌گذاری ۱۰۹۲۵ کیلووات و بازده اگزرژی ۵۰/۶۲ درصد به دست آمدند.

- افزایش فشار جداساز اول باعث کاهش هیدروژن تولیدی شده درحالی‌که توان خالص، سرمایه‌گذاری و بازده حرارتی چرخه‌ی تولید همزمان افزایش می‌یابند. برای فشار جداساز ۱۰/۷۲ بار، توان خالص تولیدی، تولید هیدروژن، سرمایه‌گذاری، بازده حرارتی و بازده اگزرژی به ترتیب ۱۴۷۰۰ کیلووات، ۱۳/۲۵ کیلوگرم بر ساعت، ۱۲۹۸۵ کیلووات، ۲۴/۱۸ درصد و ۵۰/۵ درصد حاصل شده است.

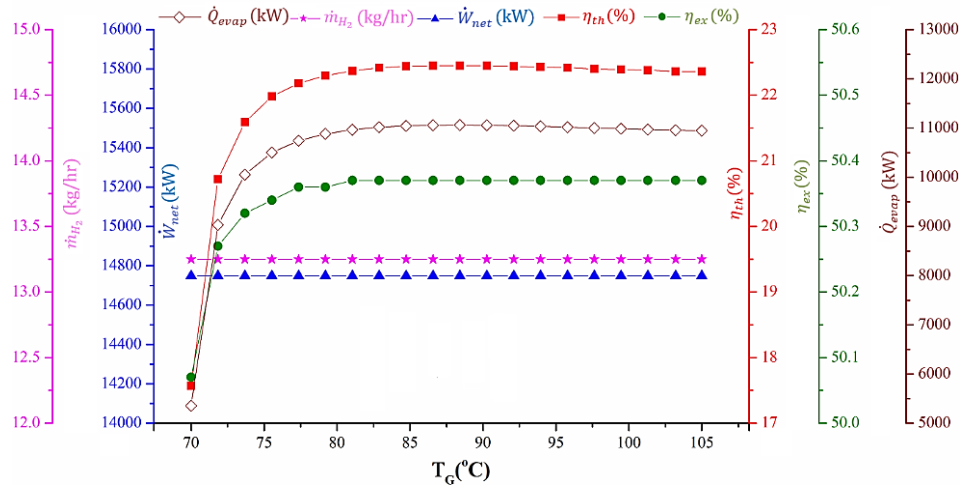
- توان خالص و بازده اگزرژی برای فشار جداساز دوم دارای مقادیر بهینه در فشار تقریباً ۱ بار می‌باشند، درحالی‌که با افزایش فشار جداساز دوم مقدار هیدروژن، سرمایه‌گذاری و بازده حرارتی افزایش می‌یابند.

مناسبتی روی عملکرد چرخه‌ی تولید همزمان خواهد داشت.

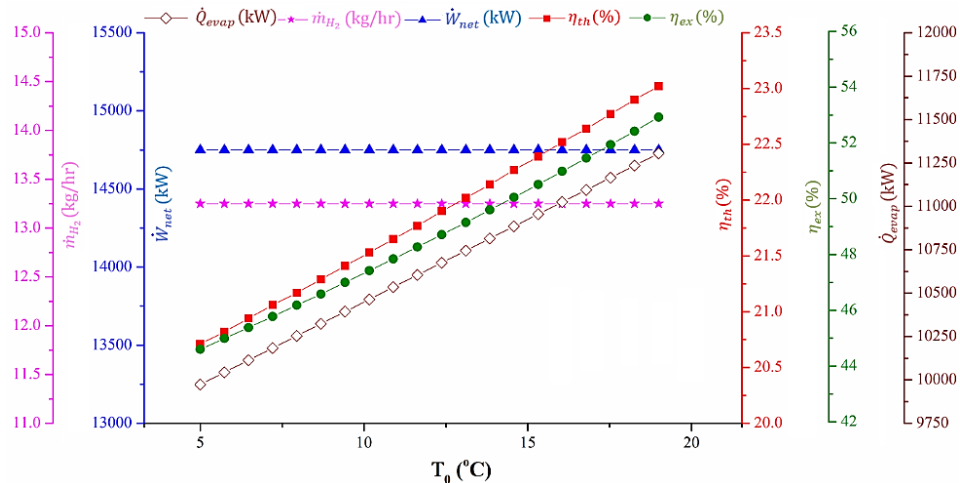
تأثیر افزایش دمای مبدل غشایی روی توان خالص، تولید هیدروژن، سرمایه‌گذاری و بازده‌های حرارتی و اگزرژی چرخه‌ی تولید همزمان در شکل ۸ آمده است. با افزایش دمای مبدل غشایی مقدار چگالی جریان افزایش پیدا کرده و به تبع آن مقدار هیدروژن تولیدی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای مبدل غشایی، دمای نقطه ۱۸ کمتر شده و در نتیجه طبق بقای انرژی، دبی چرخه تبرید جذبی کمتر شده و تولید سرمایه‌گذاری کاهش پیدا می‌کند. همچنین با توجه به ثابت بودن توان خالص چرخه، کاهش سرمایه‌گذاری بر افزایش مؤلفه $\dot{m}_{H_2} LHV$ غلبه کرده و باعث می‌شود که بازده حرارتی چرخه کاهش پیدا کند. توان خالص، تولید هیدروژن، سرمایه‌گذاری و بازده‌های حرارتی و اگزرژی در دمای مبدل غشایی ۱۰۰ سلسیوس، به ترتیب به ۱۴۷۵۰ کیلووات، ۱۴/۲ کیلوگرم بر ساعت، ۹۱۰۰ کیلووات و ۲۰/۷۵ درصد و ۵۰/۳۵ درصد می‌رسند.

اثر نسبت کار ورودی مبدل غشایی به کار تولیدی چرخه‌ی رانکین آبی روی پارامترهای عملکردی چرخه‌ی تولید همزمان در شکل ۹ ارائه شده است. با افزایش این نسبت، مقدار انرژی ورودی الکترولایزر غشاء پروتونی و به تبع آن چگالی جریان و در نتیجه مقدار دبی هیدروژن تولیدی افزایش می‌یابد، ولی از سوی دیگر صرف انرژی کامل برای فرایند انرژی واکنش شیمیایی الکترولایزر، توان خالص چرخه را کاهش می‌دهد. کاهش توان خالص چرخه بر افزایش $\dot{m}_{H_2} LHV$ غلبه کرده و باعث می‌شود تا بازده حرارتی چرخه نیز کاهش یابد. همین‌طور کاهش اگزرژی مربوط به کار خالص چرخه نیز بر افزایش $\dot{E}x_{T_6}$ غلبه کرده و در نتیجه بازده اگزرژی چرخه‌ی تولید همزمان نیز کاهش می‌یابد. به ازای مقدار استفاده کامل از کار توربین چرخه‌ی رانکین برای انرژی الکترولایزر در سیستم غشاء پروتونی توان خالص، تولید هیدروژن، سرمایه‌گذاری، بازده حرارتی و بازده اگزرژی چرخه‌ی تولید همزمان به ترتیب به مقادیر ۱۲۶۰۰ کیلووات، ۲۰ کیلوگرم بر ساعت، ۱۰۹۰۰ کیلووات، ۲۰/۸ درصد و ۴۴/۵ درصد می‌رسند.

در شکل ۱۰ تأثیر دمای ژنراتور روی توان خالص، تولید هیدروژن، سرمایه‌گذاری و بازده‌های حرارتی و اگزرژی چرخه‌ی پیشنهادی بررسی شده است. با افزایش دمای ژنراتور تا ۸۰ درجه‌ی سلسیوس، مقدار سرمایه‌گذاری تولیدی توسط چرخه‌ی تبرید جذبی روندی شبیه شکل



شکل ۱۰. اثر دمای ژنراتور روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده انرژی و سرمایش و سرمایش
 Fig. 10. Effects of the generator temperature on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and cooling



شکل ۱۱. اثر دمای محیط روی هیدروژن تولیدی، توان خالص، بازده حرارتی، بازده انرژی و سرمایش و سرمایش
 Fig. 11. Effects of the ambient temperature on the hydrogen production, net output power, thermal efficiency, exergy efficiency and cooling

-تولید هیدروژن و توان تولیدی چرخه تولید همزمان با افزایش دمای ژنراتور ثابت مانده درحالی که سرمایش تولیدی، بازدهای حرارتی و انرژی تا دمای ۸۰ درجه سلسیوس ابتدا افزایش یافته و سپس تقریباً ثابت باقی می‌مانند.

-تولید هیدروژن و توان خالص مستقل از دمای محیط بوده درحالی که تولید سرمایش و بازده حرارتی و بازده انرژی چرخه تولید همزمان با افزایش دمای محیط تا ۲۰ درجه سلسیوس، افزایش می‌یابند. در این حالت بازده حرارتی به ۲۳ درصد و بازده انرژی به

-در این بررسی مقادیر بیشینه برای دمای اوپراتور چرخه رانکین آلی و کمینه برای اختلاف نقطه تنگش برای عملکردهای چرخه تولید همزمان مطلوب ارزیابی گردید.

-به ازای استفاده کامل از کار توربین چرخه رانکین برای انرژی الکترولایزر در سیستم غشاء پروتونی، توان خالص، تولید هیدروژن، سرمایش، بازده حرارتی و بازده انرژی چرخه تولید همزمان به ترتیب ۱۲۶۰۰ کیلووات، ۲۰ کیلوگرم بر ساعت، ۱۰۹۰۰ کیلووات، ۲۰/۸ درصد و ۴۴/۵ درصد حاصل می‌شوند.

۵۱ درصد می‌رسد.

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

فهرست علائم

علائم انگلیسی

	جاذب	AB
	سیستم تبرید	AC
	ضخامت، μm	D
	توان داده شده به الکترولایزر، kW	$E_{\text{electrolic}}$
	توان داده شده به مصرف مستقیم، kW	E_{product}
	انرژی فعال‌سازی کاتد و آند، kJ/mol	$E_{\text{act},i} \quad i = a, c$
	ثابت فارادی، $^{\circ}\text{C/mol}$	F
	انرژی آزاد گیبس، J/mol	G
	ژنراتور	GEN
	آنتالپی مخصوص، kJ/kg	h
	مبدل	H.E.
	چاه فشار بالا	H.P.W.
	چگالی جریان مبدل، A/m^2	$J_{i, \cdot} \quad i = a, c$
	فاکتور پتانسیل اولیه آند و کاتد، A/m^2	$J_i^{\text{ref}} \quad i = a, c$
	چگالی جریان، A/m^2	J
	چاه فشار پایین	L.P.W.
	دبی جرمی، kg/s	\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، K	T
	دمای الکترولایزر، K	T_{PEM}
	پتانسیل برگشت‌پذیر، V	V.
	پتانسیل فعال‌کننده آند و کاتد، V	$V_{\text{act},i} \quad i = a, c$
	غلظت لیتمیم برآمید در مخلوط	x

علائم یونانی

η_{th} بازده حرارتی، %

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
اهمیک	ohm
پمپ	P
نقطه تنگش	pp
الکترولایزر غشا پروتونی	PEM
توربین	T

منابع

- [1] A. Coskun, A. Bolatturk, M. Kanoglu, Thermodynamic and economic analysis and optimization of power cycles for a medium temperature geothermal resource, *Energy conversion and management*, 78 (2014) 39-49.
- [2] A.D. Pasek, T.F. Soelaiman, C. Gunawan, Thermodynamics study of flash–binary cycle in geothermal power plant, *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(9) (2011) 5218-5223.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] A.T. Pham, T. Baba, T. Shudo, Efficient hydrogen

- [14] P. Ahmadi, I. Dincer, M.A. Rosen, Thermodynamic modeling and multi-objective evolutionary-based optimization of a new multigeneration energy system, *Energy Conversion and Management*, 76 (2013) 282-300.
- [15] P. Ahmadi, I. Dincer, M.A. Rosen, Development and assessment of an integrated biomass-based multi-generation energy system, *Energy*, 56 (2013) 155-166.
- [16] I. Dincer, C. Zamfirescu, Renewable-energy-based multigeneration systems, *International Journal of Energy Research*, 36(15) (2012) 1403-1415.
- [17] M. Ameri, S. Amanpour, S. Amanpour, Energy and exergy analysis and optimization of a double flash power plant for Meshkin Shahr region, in: World Renewable Energy Congress-Sweden; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden, Linköping University Electronic Press, 2011, pp. 1297-1304.
- [18] S. Jalilinasrabad, R. Itoi, P. Valdimarsson, G. Saevarsdottir, H. Fujii, Flash cycle optimization of Sabalan geothermal power plant employing exergy concept, *Geothermics*, 43 (2012) 75-82.
- [19] S.M. Bina, S. Jalilinasrabad, H. Fujii, Thermo-economic evaluation of various bottoming ORCs for geothermal power plant, determination of optimum cycle for Sabalan power plant exhaust, *Geothermics*, 70 (2017) 181-191.
- [20] A. Aali, N. Pourmahmoud, V. Zare, Proposal and Analysis of a New Cycle for Power Generation from Sabalan Geothermal Wells, *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*, 47(3) (2017) 139-147. (in Persian).
- [21] A. Aali, N. Pourmahmoud, V. Zare, Exergy Analysis of a New Proposed Cycle for Power Generation from Sabalan Geothermal Wells, *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*, 48(1) (2018) 251-260. (in Persian).
- [22] 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.
- [23] m. abdolipouradl, S. Khalilarya, s. jafarmadar, Exergy analysis of a new proposal combined cycle from Sabalan geothermal source, *Modares Mechanical Engineering*, 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*, 38(24) (2013) 9945-9953.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] R. Gomri, Second law comparison of single effect and double effect vapour absorption refrigeration systems, *Energy Conversion and Management*, 50(5) (2009) 1279-1287.
- [9] 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.
- [10] V. Zare, A comparative thermodynamic analysis of two tri-generation systems utilizing low-grade geothermal energy, *Energy Conversion and Management*, 118 (2016) 264-274.
- [11] H. Ghaebi, A.S. Namin, H. Rostamzadeh, Performance assessment and optimization of a novel multi-generation system from thermodynamic and thermoeconomic viewpoints, *Energy Conversion and Management*, 165 (2018) 419-439.
- [12] H. Ghaebi, T. Parikhani, H. Rostamzadeh, B. Farhang, Proposal and assessment of a novel geothermal combined cooling and power cycle based on Kalina and ejector refrigeration cycles, *Applied Thermal Engineering*, 130 (2018) 767-781.
- [13] 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.

- [26] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran, Thermal design and optimization, *John Wiley & Sons*, 1996.
- [27] J. Ahrendts, Reference states, *Energy*, 5(8-9) (1980) 666-677.
- [28] S. Klein, F. Alvarado, EES—Engineering Equation Solver. *F-Chart Software*. 2002.
- [29] 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.
- 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) (2018) 335-346. (in Persian).
- [25] F. Mohammadkhani, F. Ranjbar, M. Yari, A comparative study on the ammonia–water based bottoming power cycles: The exergoeconomic viewpoint, *Energy*, 87 (2015) 425-434.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Abdolalipouradl, S. Khalilarya, F. Mohammadkhani, *Thermodynamic Analysis of a Novel Power, Cooling, Hydrogen and Oxygen Multi-Generation Combined Cycle Based on the Sabalan Geothermal Wells*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(1) (2021) 135-154.

DOI: [10.22060/mej.2019.15500.6138](https://doi.org/10.22060/mej.2019.15500.6138)



