

افزایش توان تولیدی نیروگاه ترکیبی زمین گرمایی به کمک انرژی زیست توده: طراحی و شبیه سازی

محمدعلی ستایش¹، محمد ایرانی^{2*}

¹ کارشناس ارشد مهندسی انرژی و محیط زیست دانشگاه آزاد، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

² دکتری مهندسی شیمی، استادیار پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

نوع مقاله: ترویجی

دریافت: 1400/02/12 پذیرش: 1400/07/07

چکیده

در این مقاله یکپارچه سازی فرآیند گازی سازی زیست توده با یک نیروگاه زمین گرمایی بررسی شده است. هدف از این پژوهش بهبود توان مؤثر خروجی توربین یک نیروگاه زمین گرمایی توسط فوق اشباع کردن بخار خروجی از چاه زمین گرمایی با بهره گیری از حرارت مازاد فرآیند گازی سازی زیست توده است. در این راستا یک نیروگاه زمین گرمایی با ظرفیت توان تولیدی 2/8 مگاوات به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب و در نرم افزار اسپن پلاس شبیه سازی گردید. سپس یک فرآیند گازی سازی زیست توده به روش بستر سیال دوتایی نیز توسط این نرم افزار شبیه سازی شد. در مرحله آخر یک سیستم ترکیبی شامل انرژی حاصل از چاه زمین گرمایی و انرژی حاصل از زیست توده طراحی و شبیه سازی گردید. برای این منظور 3/9 کیلوگرم بر ثانیه بخار اشباع از چاه زمین گرمایی استحصال و به کمک حرارت مازاد از فرآیند گازی سازی با دبی زیست توده 31950 کیلوگرم بر ثانیه، فوق اشباع گردید. گاز سنتز تولیدی در این فرآیند به عنوان محصول جانبی 34353/9 کیلوگرم بر ساعت است. نتایج نشان داد که راندمان فرآیند زمین گرمایی از 15/7٪ به 29/5٪ افزایش پیدا کرده و توان تولیدی آن نیز در شرایط یکسان عملیاتی از 2/8 مگاوات به 3/6 مگاوات ارتقا یافته است.

کلمات کلیدی: گازی سازی، بستر سیال دوتایی، زیست توده، انرژی زمین گرمایی، نیروگاه ترکیبی

1- مقدمه

جمعیت کره زمین سالانه در حال افزایش است و نیاز به انرژی به طور روزانه افزایش می‌یابد. مهم‌ترین منبع انرژی انسان‌ها در جهان سوخت‌های فسیلی است. اما منابع سوخت‌های فسیلی تجدیدپذیر نبوده و همچنین خطرات زیست‌محیطی مهمی را به همراه دارد. تحقیقات نشان می‌دهد در سال 2011 میزان 15 تراوات انرژی برای حدود 7 میلیارد نفر مصرف شده است، در حالی که پیش‌بینی می‌شود این میزان در سال 2050 به 30 تراوات انرژی برای حدود 9 میلیارد نفر خواهد رسید [1]. در سال‌های اخیر اثرات زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی بیش‌ازپیش نمایان شده است. گرم شدن کره زمین منجر به آب شدن یخ‌های قطبی شده و زندگی همه موجودات را به خطر انداخته است. همچنین آتش‌سوزی‌های طبیعی و طوفان‌ها خطرات جبران‌ناپذیری را به بار آورده است. به همین علت استفاده از منابع انرژی جایگزین و پاک برای سوخت‌های فسیلی در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. انرژی‌های خورشیدی، باد، آب، پیل سوختی، زمین‌گرمایی و زیست‌توده از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر هستند [2].

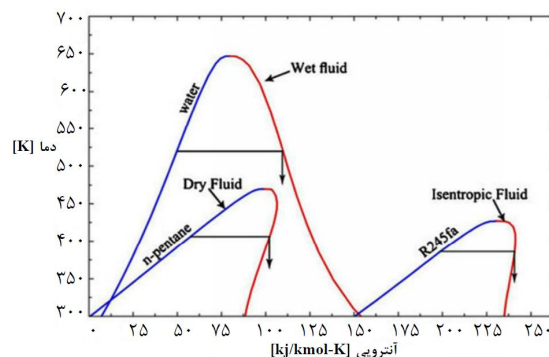
انتخاب روش تولید انرژی پاک بستگی به عوامل مختلفی از جمله شرایط جغرافیایی، زیستی و همچنین هزینه‌های بهره‌برداری دارد. علاوه بر این، فرآیندهای تبدیل انرژی باید فاقد مخاطرات زیست‌محیطی بوده و باید از اثرات نامطلوب آن‌ها مانند تولید گرمای شدید و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی جلوگیری شود [3]. در میان روش‌های تولید انرژی پاک، استفاده از انرژی باد و آب کمترین هزینه و استفاده انرژی خورشیدی بیشترین هزینه را به خود اختصاص می‌دهند [2]. تکنولوژی پیل سوختی به علت محدودیت‌های آن مانند بازده پایین و هزینه بالا به برخی کاربردهای خاص محدود می‌شود [4]. انرژی زمین‌گرمایی نیز به علت برخی مزایای یکی از گزینه‌های مناسب جهت تولید انرژی تجدیدپذیر است. انرژی زمین‌گرمایی برخلاف سایر انرژی‌های تجدیدپذیر محدود به فصل، زمان و شرایط خاصی نبوده و می‌تواند بدون وقفه بهره‌برداری شود [5]. همچنین قیمت تمام شده برق در نیروگاه‌های زمین‌گرمایی با سایر نیروگاه‌های رایج (فسیلی) قابل رقابت بوده و حتی از برخی انواع دیگر انرژی‌های نو به مراتب ارزان‌تر است. لذا منابع زمین‌گرمایی به دلیل در دسترس بودن، تکنولوژی ساده برای ایجاد نیروگاه، امکان بهره‌برداری بدون وقفه و استفاده طولانی مدت دارای اهمیت ویژه‌ای هستند [6]. یکی دیگر از منابع انرژی‌های پاک زیست‌توده¹ است که علاوه بر تجدیدپذیر بودن دارای آلودگی بسیار کمی در مقایسه با سوخت‌های فسیلی نیز است. زیست‌توده می‌تواند از زباله‌هایی که منبع زیستی دارند مانند فضولات دامی، محصولات و پسماندهای کشاورزی و ضایعات صنایع غذایی تهیه شود [7]. امروزه انرژی حاصل از زیست‌توده و انرژی زمین‌گرمایی بعد از انرژی حاصل از آب به ترتیب دومین و سومین نوع از انرژی‌های نو هستند که در دنیا جهت تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرند، به طوری که 92% از انرژی برق تولید شده از انرژی‌های نو در جهان مربوط به سهم برق‌آبی، 5/5% سهم زیست‌توده، 1/6% زمین‌گرمایی، 0/6% باد و 0/5% مربوط به انرژی خورشید است [8].

1-1- انرژی زمین‌گرمایی

منبع انرژی زمین‌گرمایی، انرژی حرارتی موجود در پوسته زمین است که حاصل از ذخیره انرژی در طی فرآیند تشکیل کره زمین و همچنین فروپاشی یا زوال ایزوتوپ‌های رادیواکتیو اورانیوم، توریم و پتاسیم طی سالیان دراز است. این انرژی عمدتاً در نواحی زلزله‌خیز و آتش‌فشانی جوان و صفحات تکتونیکی زمین متمرکز شده است. به‌طور کلی با نفوذ

¹ Bio mass

به عمق زمین از سطح آن به ازای هر 1000 متر، دما 30 درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و این دما در هسته زمین به حدود 5000 درجه سانتی‌گراد می‌رسد [9]. برای دستیابی به این منبع، از طریق حفاری چاه‌های عمیق در حدود 1500 الی 3000 متر سیال عملیاتی داغ به سطح زمین آورده می‌شود. در سطح زمین سیال داغ از طریق خطوط انتقال از سر چاه به دستگاه جداکننده هدایت می‌شود که در آن فشار به‌طور ناگهانی کم شده و سهم زیادی از سیال داغ به بخار تبدیل می‌شود. بخار تولیدی به سمت توربین هدایت شده و نیروی حاصل از بخار، پره‌های توربین را به چرخش درمی‌آورد. توربین نیرو را مستقیماً به ژنراتور الکتریکی منتقل کرده و در نهایت حرکت ژنراتور، الکتریسیته را تولید می‌کند که توسط سیستم‌های انتقال، به شبکه سراسری منتقل شده و به محل‌های مصرف می‌رسد [10]. از آنجا که حرارت زمین گرمایی معمولاً از نوع درجه پایین یا متوسط است، آب سیال عملیاتی مناسبی برای انجام این فرآیند نیست. به همین منظور چرخه رانکین² که توسط یک سیال آلی کار می‌کند، می‌تواند مؤثرتر باشد. شکل 1 نمودار دما-آنترپوی را برای سیالات مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست سیالات آلی در دماهای پایین‌تری تغییر فاز داده و برای استفاده در دماهای عملیاتی پایین‌تر مناسب‌تر می‌باشند. حال آن‌که استفاده از بخار آب برای تولید توان، با انجام کار بیشتری همراه است اما آلودگی و خوردگی کمتری را نیز در پی دارد [11 و 12].



شکل 1- مقایسه نمودار دما-آنترپوی سیالات آلی و آب [12]

سرسی³ [13] در سال 2001 ارزیابی عملکرد یک نیروگاه زمین‌گرمایی در ترکیه را بررسی کرد. برای این منظور از آب به‌عنوان سیال عملیاتی استفاده شد. دمای چاه بین 147 تا 239 درجه سانتی‌گراد و فشار آن از 1033 تا 7333/5 کیلو پاسکال متغیر بود. نتایج نشان داد که بازده انرژی در این نیروگاه بین 20/8 تا 46/9 درصد است. در سال 2018 نیز بینا و همکاران [14] نیروگاه زمین‌گرمایی سبلان در ایران را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که میزان تولید توان توسط چینش تک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای در این نیروگاه به ترتیب 28/838 و 36/055 است. نیروگاه‌های ترکیبی زمین‌گرمایی-خورشیدی، زمین‌گرمایی-باد و زمین‌گرمایی-پیل سوختی نیز در سال‌های اخیر توسط محققان بررسی شده است. قاسمی و همکاران [15] نیروگاه ترکیبی زمین‌گرمایی-خورشیدی را مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور آن‌ها یک مدل برای یک نیروگاه در حال سرویس ارائه دادند. این نیروگاه تنها از انرژی زمین‌گرمایی استفاده می‌کرد. در مدل‌سازی آن‌ها برای افزایش دمای بخار خروجی از چاه یک سیستم خورشیدی طراحی کردند. نتایج نشان داد با این طراحی بازده نیروگاه می‌تواند تا 34 درصد افزایش یابد. لی⁴ و همکاران [16] بیان کردند که

² Rankine cycle

³ Cerci

⁴ Li

استفاده از انرژی باد و انرژی زمین‌گرمایی به‌طور هم‌زمان می‌تواند منجر به تولید الکتریسیته کاملاً پاک و پایدار شود. استفاده از پیل سوختی جهت افزایش توان نیروگاه زمین‌گرمایی نیز توسط صدیقی و همکاران [17] بررسی شد. آن‌ها بیان کردند که بازده سیستم طراحی شده 42/3 درصد است که این بیان‌گر بازده پایین آن نسبت به انرژی خورشیدی و باد است.

گو⁵ و همکاران [18] در سال 2019 شبیه‌سازی فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده توسط نرم‌افزار اسپن را انجام دادند. آن‌ها با استفاده از مدل برج حبایی برای راکتور اثر متغیرهای مختلفی را بر روی این فرآیند مطالعه کردند. آن‌ها بیان کردند که افزایش دما باعث افزایش تولید هیدروژن و افزایش راندمان تبدیل کربن می‌شود. همچنین افزایش نسبت بخار به زیست‌توده باعث افزایش تولید هیدروژن و مونوکسید کربن و کاهش کارایی تبدیل دی‌اکسید کربن و کربن می‌شود.

در سال 2011 ماننته⁶ و همکاران [19] یک نیروگاه ترکیبی زمین‌گرمایی-خورشیدی را توسط نرم‌افزار اسپن پلاس شبیه‌سازی کردند. آن‌ها بیان کردند که توان خروجی از نیروگاه ترکیبی مورد نظر به‌شدت وابسته به دمای محیط است به‌طوری‌که در دمای سرد بازده نیروگاه زمین‌گرمایی به‌شدت کاهش می‌یابد. لذا استفاده از سیستم خورشیدی در کنار آن می‌تواند توان خروجی را به‌خصوص در روزهای سرد افزایش دهد.

هدف از این مطالعه افزایش توان خروجی از یک نیروگاه زمین‌گرمایی با استفاده از انرژی حاصل از گازی‌سازی زیست‌توده است. برای این منظور یک نیروگاه زمین‌گرمایی و یک فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده بر اساس اطلاعات موجود در منابع به‌طور جداگانه در نرم‌افزار اسپن پلاس شبیه‌سازی شدند. سپس یکپارچه‌سازی این فرآیند به‌منظور افزایش توان خروجی نیروگاه صورت گرفت و به‌منظور کاهش هدر رفت انرژی، بهینه‌سازی حرارتی نیز صورت گرفت.

2- شبیه‌سازی

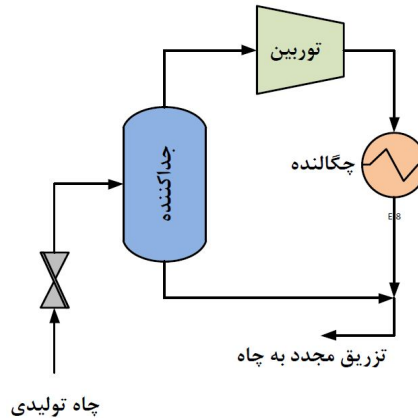
همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، در این بررسی، شبیه‌سازی فرآیند تولید توان از انرژی زمین‌گرمایی و گازی‌سازی زیست‌توده در ابتدا به‌صورت جداگانه صورت گرفت و سپس این دو فرآیند با هدف افزایش دمای خروجی از انرژی زمین‌گرمایی با یکدیگر ترکیب شدند. در ادامه به بررسی شبیه‌سازی این دو بخش پرداخته شده است.

2-1- شبیه‌سازی نیروگاه زمین‌گرمایی

در این مطالعه به‌منظور شبیه‌سازی نیروگاه زمین‌گرمایی، یک مورد مطالعاتی [20] به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شد. شمای کلی این نیروگاه در شکل 2 نشان داده شده است. دما و فشار جریان اصلی بخار این فرآیند به‌ترتیب 151/7 درجه سانتی‌گراد و 0/5 مگاپاسکال هستند. سایر اطلاعات مربوط به این سامانه در جدول 1 بیان شده است.

⁵ Gu

⁶ Manente



شکل 2- شمای کلی فرآیند نیروگاه زمین گرمایی در ژاپن [20]

جدول 1- اطلاعات مربوط به مورد مطالعاتی [20]

تبخیر ناگهانی یک مرحله‌ای	نوع سامانه
82%	راندمان آدیباتیک توربین
درجه سانتی‌گراد 28	دمای آب خنک‌کننده
درجه سانتی‌گراد 20	دمای حباب مرطوب
80%	راندمان پمپ
0/6	نسبت دبی جریان بخار در اجکتور
15/7%	راندمان خالص
16/5%	راندمان ناخالص

موازنه انرژی در حالت پایا برای هر قسمت را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum (\dot{m}h)_{out} - \sum (\dot{m}h)_{in} \quad (1)$$

آنتالپی جریان ورودی از معادله 2 محاسبه می‌گردد.

$$h_{in} = \frac{\sum (\dot{m}_{in} \times h_{in})}{\dot{m}_{total}} \quad (2)$$

توان خالص و ناخالص توربین به ترتیب توسط معادله 3 و 4 محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{\dot{W}_{out} - \dot{W}_{in}}{\Delta h} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{out}}{\Delta h} \quad (4)$$

2-2- شبیه‌سازی فرآیند گازی زیست‌توده

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، به منظور افزایش بازده نیروگاه زمین گرمایی، می‌توان از فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده استفاده کرد. در یک فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده واکنش‌های زیر اتفاق می‌افتد [21]:



که در آن‌ها α فاکتور سازوکار⁷ است که بین 0/5 تا 1 متغیر است [21]. در معادله (9)، $(2-\beta/\beta)$ کسری از بخار مصرف شده توسط واکنش 6 و $2(\beta-1)/\beta$ کسری از بخار مصرف شده توسط واکنش 8 را نشان می‌دهند [21]. در این مطالعه فرآیند گازی سازی زیست توده با استفاده از نرم افزار اسپن پلاس شبیه سازی گردید. ترکیبات زیست توده بر مبنای اطلاعات موجود در منابع اتخاذ گردید [21]. مدل ترمودینامیکی پینگ-رابینسون⁸ برای این شبیه سازی انتخاب شد که برای مخلوط‌های غیرقطبی یا مخلوط‌های قطبی خفیف مانند هیدروکربن‌ها و گازهای سبک و همچنین فرآیندهای گازی، پالایشگاهی و پتروشیمی مناسب است [22]. از آنجاکه زیست توده و خاکستر به عنوان مواد غیرمتعارف تعریف شده بودند، تنها دانسیته و آنتالپی در طی شبیه سازی محاسبه شد به طوری که مدل آنتالپی عمومی زغال سنگ⁹ به عنوان مدل انتخابی برای آنتالپی و مدل دانسیته زغال سنگ به عنوان مدل دانسیته در زیست توده و خاکستر به کار گرفته شد. مشخصات دقیق جریان‌ها در جدول 2 آمده است.

جدول 2- مشخصات دقیق جریان‌های خوراک

جرم	دما (C°)	فشار (atm)	نرخ دبی جرمی (kg/h)
زیست توده	25	1	200
هوا	450	1	224
بخار	450	1	120

در نرم افزار اسپن پلاس، مدل از پیش آماده شده‌ای برای شبیه سازی فرآیند گازی سازی وجود ندارد. به همین دلیل برای شبیه سازی راکتور گازی ساز بستر سیال دوتایی می‌بایست مجموعه فرآیند را به اجزایی کوچک تر تقسیم کرد تا به کمک واحدهای فرآیندی موجود در نرم افزار قابل شبیه سازی باشد. شکل 3 نمایان گر شماتیک شبیه سازی مجموعه فرآیند گازی سازی مذکور است. با توجه به ویژگی‌های نرم افزار اسپن پلاس و همچنین مدل تعادل ترمودینامیکی مورد استفاده، فرضیات زیر به منظور شبیه سازی فرآیند گازی سازی زیست توده در نظر گرفته شده‌اند:

- فرآیند به صورت پایا است.
- شبیه سازی به شکل صفر بعدی است (بدون در نظر گرفتن بعد زمان).
- اندازه ذرات لحاظ نگردیده است.
- توزیع حرارت برای ذرات زیست توده یکنواخت در نظر گرفته شده است.
- از حرارت اتلافی در راکتورها صرف نظر شده است.

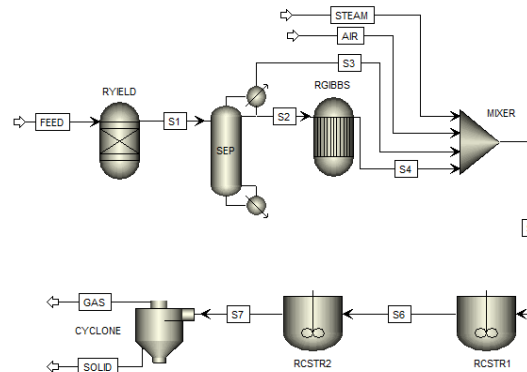
⁷ Mechanism factor

⁸ Peng-Robinson

⁹ HCOALGEN

- زغال تماماً از کربن تشکیل شده است.
- تمامی واکنش‌ها در گازی‌سازی تا مرحله تعادل پیشرفته‌اند.
- تنها 90 درصد از زغال ورودی به محفظه احتراق سوزانده شده است.
- راندمان سیکلون 85 درصد است.
- خاکستر حاصل از زیست‌توده به‌عنوان ماده خنثی در نظر گرفته شده است و با سایر ترکیبات وارد واکنش نمی‌شود.

● تمامی اجزای تشکیل‌دهنده زیست‌توده به زغال، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن، کربن و گوگرد تبدیل می‌شوند. همان‌طور که شکل 3 نشان می‌دهد جهت تجزیه زیست‌توده از راکتور RYIELD در نرم‌افزار اسپن استفاده شده است. در این مرحله، زیست‌توده به اجزای تشکیل‌دهنده آن شامل کربن، هیدروژن، اکسیژن، گوگرد، نیتروژن و خاکستر با تعیین توزیع بازده بر اساس آنالیز جرم نهایی تبدیل می‌شود. به‌منظور شبیه‌سازی احتراق زیست‌توده از راکتور RGIBBS استفاده شده است. در این راکتور واکنش‌های احتراق صورت می‌گیرد که منجر به تولید زغال و گازهای فرار می‌شود. در مرحله بعد لازم است تا گازی‌سازی زغال صورت گیرد. برای این منظور از راکتورهای CSTR به‌صورت پشت سر هم استفاده شده است. RCSTR با استفاده از سینتیک واکنش گازی شدن زغال را انجام می‌دهد.



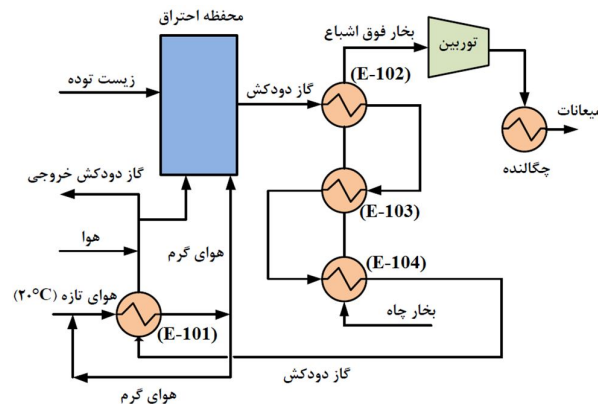
شکل 3- شماتیک کلی شبیه‌سازی مجموعه فرآیند گازی‌سازی

3-2- شبیه‌سازی نیروگاه ترکیبی زمین‌گرمایی

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، به‌منظور ارتقای حرارت زمین‌گرمایی از سطح پایین به سطح بالا، می‌توان از یک منبع گرمایی دیگر استفاده کرد [15-17]. برای این کار در این مطالعه، یکپارچه‌سازی فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده و نیروگاه زمین‌گرمایی صورت گرفت. گاز تولیدی از زیست‌توده که حرارت بالایی دارد (حدود 900 درجه سانتی‌گراد) می‌تواند جهت افزایش دمای بخار ایجاد شده از منبع زمین‌گرمایی و فوق‌گرم کردن آن استفاده شود تا بتوان در توربین بخار از آن با بازده بیشتری برق تولید کرد. شمای ساده این چرخه در شکل 4 نشان داده شده است.

در سامانه ترکیبی زمین‌گرمایی-زیست‌توده، هوا ابتدا وارد یک مبدل حرارتی (E-101) می‌شود. در این مبدل دما برابر 800 درجه سانتی‌گراد و فشار برابر 1 بار است. پس از پیش‌گرم شدن، هوا و بخار وارد محفظه احتراق زیست‌توده می‌شود که مطابق با توضیحات داده شده در بخش شبیه‌سازی گازی‌سازی زیست‌توده در انتها گاز خروجی با دمای 900 درجه سانتی‌گراد در دسترس است تا جهت فوق‌اشباع‌سازی بخار حاصل از چاه مورد استفاده قرار گیرد. این جریان وارد مبدل (E-102) می‌شود و بخار حاصل از چاه از سمت دیگر مبدل‌ها به‌صورت خلاف جهت وارد می‌شود

(E-104). در مبدل‌های E-102 تا E-104 سطح انتقال حرارت برابر 57/1545 مترمربع و ضریب انتقال حرارت $0/003 \text{ Gj/hr.m}^2.\text{C}$ است. بخار فوق اشباع خروجی از مبدل E-102 خارج شده و به یک توربین وارد می‌شود که بازده آدیباتیک آن 82 درصد است. بخار حاصل پس از عبور از توربین از آن خارج شده و وارد یک چگالنده می‌شود. در این چگالنده دما به 45 درجه سانتی‌گراد می‌رسد و به چاه برگردانده می‌شود.



شکل 4- شمای کلی از چرخه ترکیبی زمین‌گرمایی-زیست‌توده

3- نتایج و بحث

1-3- اعتبارسنجی

به منظور یافتن دقت شبیه‌سازی فرآیندهای گازی‌سازی زیست‌توده و نیروگاه زمین‌گرمایی، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با موردهای مطالعاتی مقایسه شدند. جدول 3 و 4 به ترتیب نتایج حاصل از اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده و نیروگاه زمین‌گرمایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است شبیه‌سازی با دقت مناسبی صورت گرفته و خطای آن قابل قبول است.

جدول 3- نتایج حاصل از اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده

خطا (%)	شبیه‌سازی	مورد مطالعاتی	
3	1/89	1/95	CO/H ₂
0/23	83/8	84	بازده
0/11	899	900	دمای گاز خروجی (°C)

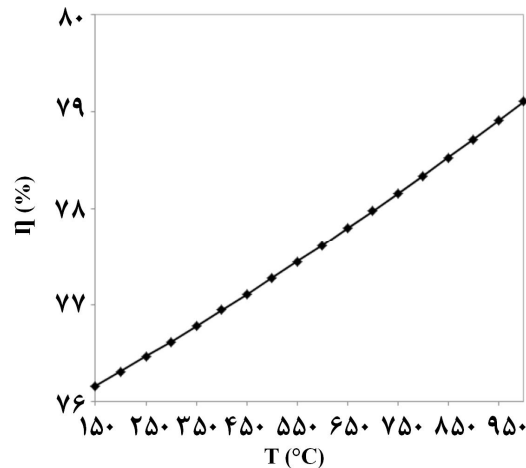
جدول 4- نتایج حاصل از اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی نیروگاه زمین‌گرمایی

خطا (%)	شبیه‌سازی	مورد مطالعاتی	
0/7	2/8	2/82	توان تولیدی (MW)
0/38	15/76	15/7	راندمان خالص

2-3- آنالیز حساسیت

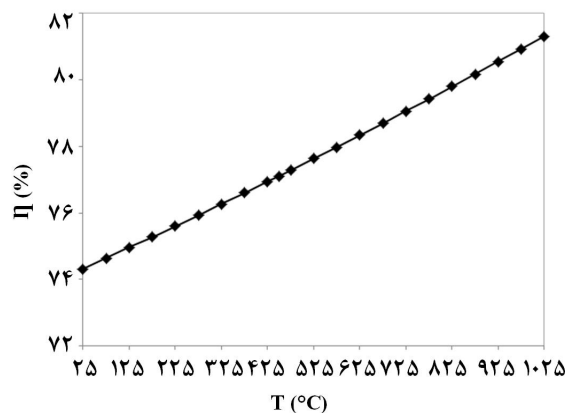
به منظور ارزیابی عملکرد سامانه‌ی ترکیبی طراحی شده، تأثیر پارامترهای مؤثر فرآیندی بر روی سامانه گازی‌سازی زیست‌توده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

شکل 5 اثر دمای جریان بخار را بر راندمان گازی سازی نشان می‌دهد. شکل 5 نشان می‌دهد که با افزایش دمای جریان بخار، راندمان فرآیند گازی سازی اندکی (2/95٪) افزایش می‌یابد. این امر بیانگر بهبود کمی در عملکرد گازی ساز است. بنابراین، پیش گرم کردن جریان بخار تا دمای بالا توصیه نمی‌گردد مگر در شرایطی که حرارتی اضافی موجود باشد.



شکل 5- اثر دمای جریان بخار را بر راندمان گازی سازی

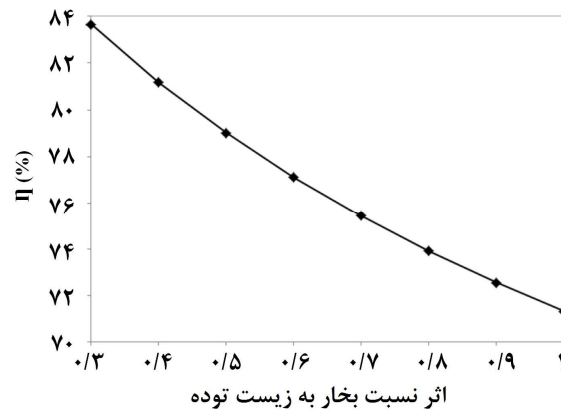
شکل 6 اثر دمای هوای ورودی بر راندمان فرآیند گازی سازی را نشان می‌دهد. شکل 6 بیان می‌کند که با افزایش دمای هوای ورودی به میزان 1000 درجه سانتی‌گراد راندمان فرآیند گازی سازی حدود 7 درصد افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که پیش گرم کردن جریان هوا مؤثرتر از پیش گرم کردن جریان بخار است. بنابراین، پیش گرم کردن جریان هوا بر پیش گرم کردن جریان بخار ارجح است. در صورت وجود حرارت اضافی، می‌بایست جریان هوا پیش گرم گردد. جریان گاز خروجی دارای حرارتی است که می‌توان از آن برای پیش گرم کردن جریان هوا استفاده کرد. این امر با استفاده از یک مبدل حرارتی میسر است.



شکل 6- اثر دمای هوای ورودی بر راندمان فرآیند گازی سازی

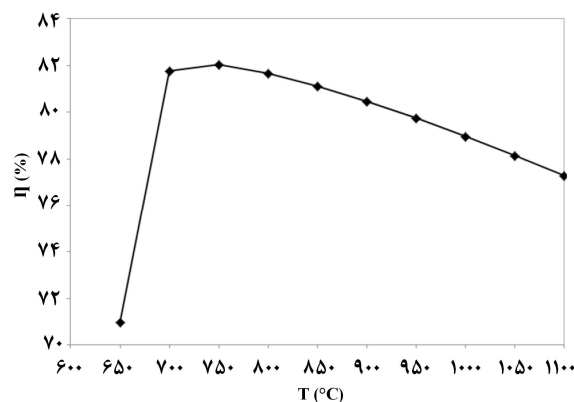
شکل 7 تغییرات راندمان فرآیند گازی سازی با افزایش نسبت بخار به زیست توده را نشان می‌دهد. شکل 7 بیان می‌کند که افزایش نسبت بخار به زیست توده تأثیر زیادی بر راندمان فرآیند گازی سازی دارد به طوری که با افزایش نسبت بخار

به زیست توده از 0/3 تا 1 منجر به کاهش 12/34 درصدی راندمان فرآیند گازی سازی می شود. افزایش نسبت بخار به زیست توده منجر می شود تا میزان کربن مونواکسید کاهش و میزان هیدروژن و دی اکسید کربن افزایش یابد. افزایش هیدروژن و دی اکسید کربن منجر می شود تا واکنش ریفرمینگ متان در جهت معکوس بیشتر صورت گیرد و بازده گازی سازی کاهش یابد. لذا بدیهی است که این نسبت بر روی تا حد امکان پایین قرار گیرد.



شکل 7- اثر نسبت بخار به زیست توده بر راندمان فرآیند گازی سازی

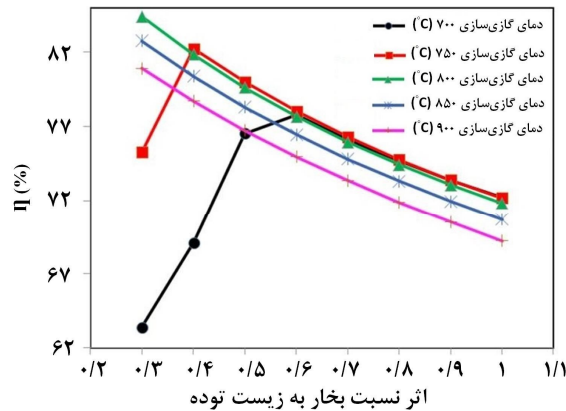
اثر دمای گازی سازی بر راندمان این فرآیند در شکل 8 آورده شده است. شکل 8 نشان می دهد زمانی که دمای فرآیند گازی سازی از 650 تا 1100 درجه سانتی گراد افزایش می یابد، راندمان فرآیند گازی سازی ابتدا تا دمای 700 درجه سانتی گراد از 66/97٪ به 78/03٪ افزایش یافته و سپس تا 73/29٪ کاهش می یابد. در ابتدا افزایش دما منجر می شود واکنش ریفرمینگ متان با سرعت بیشتری صورت گیرد. اما با افزایش دما میزان تولید هیدروژن و مونواکسید کربن توسط واکنش های شیفیت آب-گاز به شدت افزایش می یابد که این امر واکنش ریفرمینگ متان را تحت تأثیر قرار داده و این واکنش در جهت معکوس بیشتر صورت می گیرد. لذا بازده شروع به افت می کند. نتایج نشان می دهد که دمای بهینه در این مطالعه حدود 750 درجه سانتی گراد است.



شکل 8- اثر دمای گازی سازی بر راندمان این فرآیند

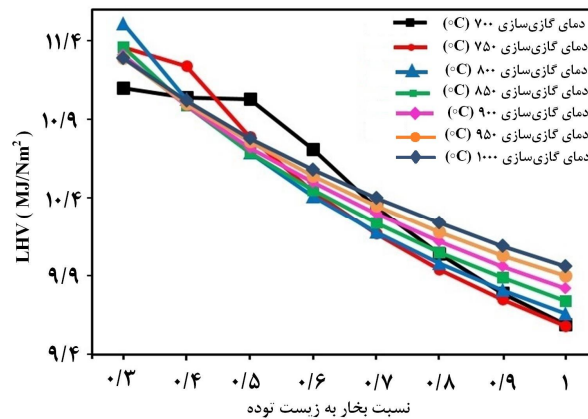
شکل 9 تأثیر نسبت بخار به زیست توده و دمای فرآیند گازی سازی بر راندمان فرآیند گازی سازی را به طور هم زمان نشان می دهد. نمودار 9 نشان می دهد که در دماهای پایین تر از 750 درجه سانتی گراد و نسبت های پایین بخار به زیست توده کم تر از 0/6، راندمان گازی سازی با افزایش نسبت بخار به زیست توده و دمای فرآیند، افزایش می یابد. علت

این امر می‌تواند این باشد که در دماهای پایین‌تر و نسبت‌های کم‌تر بخار به زیست‌توده، میزان کافی بخار و حرارت برای واکنش‌های گرماگیر وجود ندارد که موجب می‌گردد تا میزان کم‌تری هیدروژن و مونواکسید کربن تولید گردد. واضح است که راندمان فرآیند گازی‌سازی در رنج دمایی 750 تا 800 درجه سانتی‌گراد و میزان حداقلی از نسبت بخار به زیست‌توده (0/3)، حداکثر می‌گردد.



شکل 9- اثرات نسبت بخار به زیست‌توده و دمای فرآیند گازی‌سازی بر راندمان فرآیند

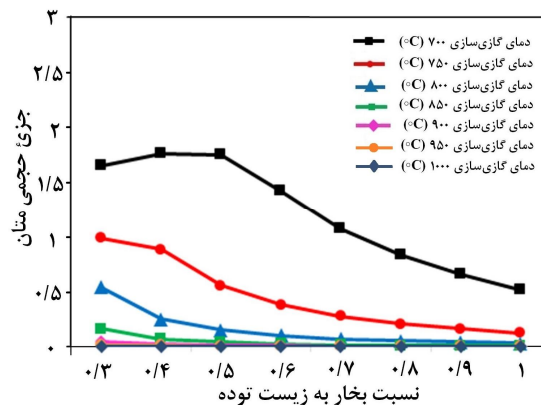
شکل 10 نشان می‌دهد که روند کلی ارزش حرارتی پایین گاز سنتز در یک نسبت بخار به زیست‌توده ثابت، با افزایش دمای فرآیند گازی‌سازی افزایش می‌یابد. زیرا زمانی که دمای فرآیند افزایش می‌یابد، میزان مونواکسید کربن و هیدروژن افزایش یافته درحالی‌که میزان سایر مواد قابل احتراق تغییر چندانی نمی‌کند و موجب افزایش ارزش حرارتی پایین گاز سنتز تولیدی می‌گردد.



شکل 10- اثرات نسبت بخار به زیست‌توده و دمای گازی‌سازی بر ارزش حرارتی پایین گاز سنتز

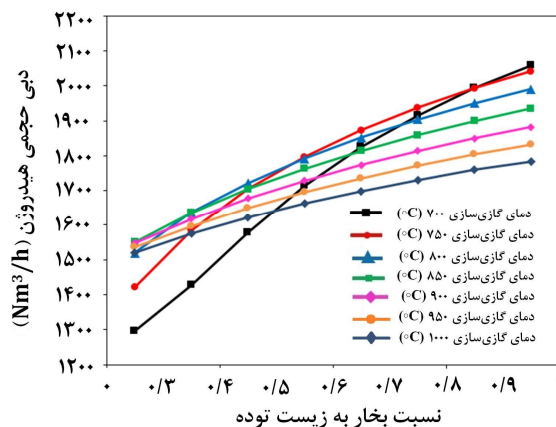
با این وجود در دماهای پایین‌تر (کم‌تر از 800 درجه سانتی‌گراد) و نسبت‌های کم بخار به زیست‌توده (کم‌تر از 0/5)، روند کلی تغییر ارزش حرارتی با تغییر نسبت بخار به زیست‌توده و همچنین دمای فرآیند گازی‌سازی متفاوت با مجموعه کلی فرآیند است. علت این امر می‌تواند این باشد که در شرایط دمایی و نسبت بخار به زیست‌توده پایین‌تر، میزان متان مطابق شکل 11 نسبتاً بالا است. ارزش حرارتی پایین متان معادل $35/814 \text{ MJ/Nm}^3$ است که سه برابر

بیش تر از ارزش حرارتی پایین هیدروژن ($10/788 \text{ MJ/Nm}^3$) است. بنابراین تغییر هرچند کوچک در میزان متان، تأثیر بزرگتری بر میزان ارزش حرارتی پایین گاز سنتز تولیدی خواهد داشت.



شکل 11- اثرات نسبت بخار به زیست توده و دمای فرآیند گازی سازی بر جزء حجمی متان

تأثیر نسبت بخار به زیست توده و همچنین دمای فرآیند گازی سازی بر میزان هیدروژن تولیدی در شکل 12 نمایش داده شده است. نرخ دبی حجمی هیدروژن از 1296 MJ/Nm^3 تا 2059 MJ/Nm^3 متغیر است. نمودار 12 نشان می دهد که به طور کلی میزان تولید هیدروژن با افزایش نسبت بخار به زیست توده افزایش یافته و با افزایش دمای فرآیند گازی سازی ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. عمده تولید هیدروژن توسط واکنش های شیف آب-گاز و واکنش گازی سازی زغال تأمین می گردد. افزایش دمای فرآیند گازی سازی موجب افزایش تولید هیدروژن در واکنش گازی سازی زغال شده و کاهش تولید هیدروژن در واکنش شیف آب-گاز را به همراه دارد.



شکل 12- نسبت بخار به زیست توده پایین بر، میزان تولید هیدروژن

3-3- نتایج سیکل ترکیبی

پس از یافتن شرایط بهینه برای حداکثر شدن راندمان گازی سازی سیکل ترکیبی تولید توان با استفاده از انرژی زمین گرمایی و زیست توده مطابق شکل 4 طراحی شد. به منظور بررسی و مقایسه بازده فرآیند تولید انرژی زمین گرمایی، بر مبنای مورد مطالعاتی، تولید توان نیروگاه زمین گرمایی و نیروگاه ترکیبی با هم مقایسه شد. نتایج نشان داد که توان تولیدی در شرایط یکسان عملیاتی از $2/8$ مگاوات به $3/6$ مگاوات ارتقا یافته است و راندمان خالص

فرآیند از 15/7٪ به 29/5٪ رسیده است. نتایج حاصل از مقایسه مورد مطالعاتی و سامانه ترکیبی طراحی شده در جدول 5 نشان داده شده است.

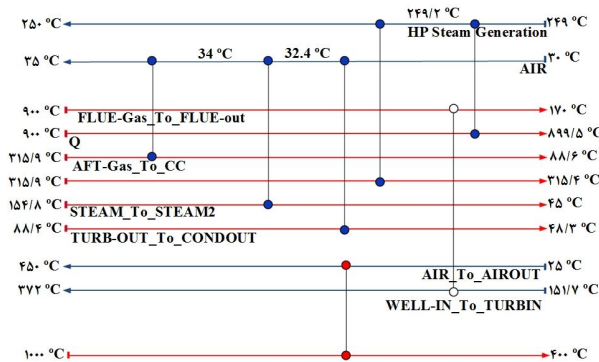
جدول 5- مقایسه نیروگاه زمین گرمایی با یک نیروگاه ترکیبی

نیروگاه ترکیبی	نیروگاه زمین گرمایی	توان تولیدی
3/6	2/8	
29/5	15/7	راندمان خالص

حرارت مورد نیاز برای تجزیه حرارتی زیست توده برابر با 2/38 MW بوده که معادل یک چهارم حرارت تولید شده پس از انجام فرآیند گازی سازی است. بنابراین، اگرچه تجزیه حرارتی زیست توده نیازمند مقدار زیادی انرژی است اما فرآیند گازی سازی زیست توده، خود قادر به تأمین آن است. در یک واحد حقیقی، به منظور احتراق زیست توده و تأمین حرارت فرآیند پیرولیز نیاز به سوخت است. با این وجود در این شبیه سازی، یک جریان حرارتی برای تأمین گرمای مورد نیاز تجزیه حرارتی زیست توده در نظر شده است.

3-2- بهینه سازی فرآیند

در این مطالعه هدف از بهینه سازی فرآیند به حداقل رساندن مصرف انرژی در مبدل ها و پیش گرم کن ها با استفاده از قوانین پینچ و انتگراسیون است. برای این منظور از قابلیت آنالیز انرژی¹⁰ در نرم افزار اسپن استفاده شد. تکنولوژی پینچ روشی برای به حداقل رساندن مصرف انرژی در فرآیندهای شیمیایی است. در این روش تمامی جریان های حرارتی به صورت نموداری کشیده و انتقال حرارت بین جریان های سرد و گرم مشخص می شوند. این کار کمک می کند تا حرارت های مازاد و هدر رفت انرژی مشخص گردد. به کمک این روش می توان از حرارت های مازاد سیستم در بخش هایی که نیاز به حرارت دارد استفاده نمود تا هدر رفت انرژی را به حداقل رساند. شبکه مبدل های حرارتی در حالت اولیه (قبل از بهینه سازی) در شکل 13 نمایش داده شده است.



شکل 13- شبکه مبدل های حرارتی در حالت اولیه

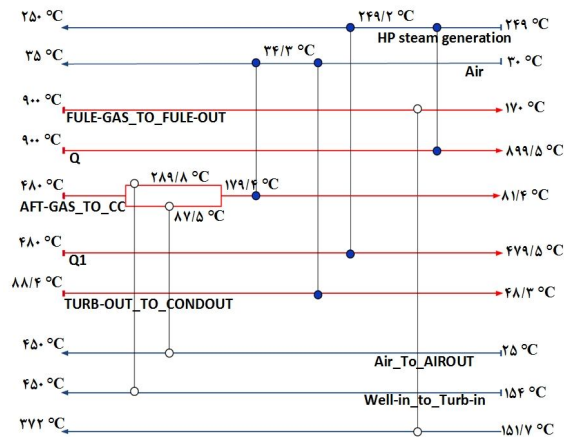
در بهینه سازی توسط قواعد پینچ، برای استفاده بهینه از یک جریان، آن را به دو یا چند جریان تقسیم می کنند. اما تقسیم جریان ها نیازمند دو قانون کلی زیر است:

- بر اساس قوانین پینچ در صورتی که در دو سمت جریان نامساوی $N_{out} \geq N_{in}$ برقرار باشد، آن جریان باید تقسیم شود.

¹⁰ Aspen Energy Analyzer

● بر اساس قوانین پینچ در صورتی که در دو سمت جریان نامساوی $(FC_p)_{out} \geq (FC_p)_{in}$ برقرار باشد، آن جریان باید تقسیم شود.

در طرح اولیه مبدل‌های حرارتی، هوای ورودی به راکتور گازی‌سازی (GASIFIER) لازم است تا پیش‌گرم شود و دمای آن از 25°C به 450°C برسد. برای این منظور یک جریان بخار با دمای 1000°C در نظر گرفته شده است. همچنین برای تولید بخار با دمای 250°C نیاز به انرژی بسیار زیادی است. بر طبق نتایج حاصل از نرم‌افزار میزان انرژی مورد نیاز برای تأمین حرارت مورد نیاز این دو جریان در شبکه اولیه حدود $4/5$ مگاوات است. از طرفی در این فرآیند، از بالای راکتور گازی‌سازی، جریان گاز با دمای حدود 480°C درجه سانتی‌گراد تولید می‌شود که پتانسیل پیش‌گرمایش هوا و گرم کردن بخار ورودی به همین راکتور را دارد. جهت استفاده از این جریان در گرم کردن جریان هوا و جریان بخار، با تقسیم جریان بخار گرم خروجی از راکتور گازی‌سازی به دو شاخه جریان با نسبت‌های $0/6$ و $0/4$ و استفاده از این دو شاخه جریان در دو مبدل مجزا جهت گرم کردن جریان هوا و جریان بخار، میزان مصرف انرژی در این واحد، به شکل بهینه‌ای کاهش یافت. نسبت‌های تقسیم جریان‌ها بر اساس حرارت‌های مورد نیاز در بخش‌های مختلف است. این کار توسط محاسبات پینچ و با در نظر گرفتن ظرفیت گرمایی جریان‌ها و اختلاف دمای موردنظر صورت می‌گیرد. با این کار نیاز به انرژی خارجی برای بخش‌های مختلف از بین رفت. این به معنای کاهش $4/5$ مگاوات انرژی است. تصویر شبکه مبدل‌های حرارتی اصلاح شده و در شکل 14 نشان داده شده است. در جدول 6 شبکه مبدل اصلاح شده با اولیه مقایسه شده است.



شکل 14- تصویر شبکه مبدل‌های حرارتی اصلاح شده

جدول 6- مقایسه بین شبکه مبدل‌های حرارتی در حالت اولیه و اصلاح شده

نام جریان	مبدل اولیه ($^\circ\text{C}$)	مبدل اصلاح شده ($^\circ\text{C}$)
جریان گاز ورودی	900	900
بخار خروجی از چاه	152	152
جریان گاز خروجی	387	170
بخار فوق اشباع	372	372

به منظور مقایسه نتیجه حاصل از این تحقیق، نیروگاه‌های ترکیبی با استفاده از منابع حرارتی دیگر نیز بررسی شده است. ژو¹¹ و همکاران [23] در سال 2015 بهبود توان خروجی از نیروگاه زمین‌گرمایی با استفاده از انرژی خورشیدی را بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند استفاده از انرژی خورشیدی می‌تواند تا 20 درصد توان خروجی از نیروگاه زمین‌گرمایی را افزایش دهد. قاسمی و همکاران [15] نیز بیان کردند استفاده بهینه از انرژی خورشیدی می‌تواند بازده نیروگاه زمین‌گرمایی را تا 34 درصد بهبود دهد. این در حالی است که استفاده از زیست‌توده در این مطالعه منجر به بهبود 46/6 درصدی شده است.

4- جمع‌بندی

در این مطالعه، طراحی و شبیه‌سازی سامانه ترکیبی انرژی زمین‌گرمایی و گازی‌سازی زیست‌توده به روش بستر سیال دوتایی انجام شد. برای این منظور ابتدا یک نیروگاه زمین‌گرمایی با ظرفیت 2/8 MW به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شد. سپس یک فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده طراحی و شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که بازده گازی‌سازی به‌طور کلی با افزایش نسبت بخار به زیست‌توده و دمای فرآیند گازی‌سازی، روند کاهشی دارد. بیش‌ترین بازده در دمای 800°C و نسبت بخار به زیست‌توده 0/3 رخ می‌دهد. در شرایط بهینه میزان حرارت تولیدی در فرآیند گازی‌سازی 3 MJ/Nm³ 10/48 است. در مرحله بعد گرمای خروجی از فرآیند گازی‌سازی جهت فوق‌اشباع کردن بخار اشباع خروجی از چاه زمین‌گرمایی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که توان تولیدی در شرایط یکسان عملیاتی از 2/8 مگاوات برای نیروگاه زمین‌گرمایی به 3/6 مگاوات برای نیروگاه ترکیبی ارتقا یافته است و راندمان خالص فرآیند نیز از 15/7 به 29/5٪ رسیده است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که نیروگاه ترکیبی زمین‌گرمایی-زیست‌توده دارای پتانسیل بالایی برای تولید انرژی پاک است و این سیستم می‌تواند در بسیاری از نقاط جهان و همچنین ایران که دارای شرایط مناسب هستند اجرا شود.

5- فهرست علائم

T	دما (°C)
S	آنتروپی (KJ/kmol-K)
s	آنتروپی مخصوص (KJ/Kg)
V/Bi	نسبت بخار به زیست‌توده (-)
LHV	ارزش حرارتی پایین گاز سنتز (MJ/Nm ²)
V_{CH4}	جزء حجمی متان (-)
F_{H2}	دبی حجمی گاز هیدروژن (Nm ³ /h)
h	آنتالپی جریان
\dot{w}_{out}	توان خروجی
\dot{w}_{in}	توان ورودی

¹¹ Zhou

علائم یونانی

η بازده گازی سازی (%)

6- منابع

- [1] ZOBAA, F. Ahmed, BANSAL, C. Ramesh, Handbook of renewable energy technology, World Scientific, 2011.
- [2] Razaghi. A, Geothermal energy and its applications, Journal of Nesha Science, Vol. 2, No. 1, 2011. (In Persian)
- [3] A. K. KURCHANIA, Biomass energy, Biomass Conversion, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 91-122.
- [4] NORDIN, Normayati, Limitations of Commercializing Fuel Cell Technologies, in: AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, 2010, pp. 498-506.
- [5] SANNER, Burkhard, Shallow geothermal energy, GHC Bulletin, 2001.
- [6] A. B. KARKI, Biogas as renewable energy from organic waste, Biotechnology, Vol. 10, 2009 pp. 1-9.
- [7] P. MCKENDRY, Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, Bioresource technology, Vol. 83, No. 1, 2002, pp. 37-46.
- [8] B. M. VOELKER, Waste-to-energy: solutions for solid waste problems for the 21st century, Retrieved July, Vol. 20, 1997, pp. 2011.
- [9] E. BARBIER, Geothermal energy technology and current status: an overview, Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 6, No.1-2, 2002, pp. 3-65.
- [10] M. H. DICKSON, M. FANELLI, Geothermal energy: utilization and technology. Routledge, 2013.
- [11] I. H. ALJUNDI, Effect of dry hydrocarbons and critical point temperature on the efficiencies of organic Rankine cycle, Renewable Energy, Vol. 36, No. 4, 2011, pp. 1196-1202.
- [12] A. Ataei, F. Safari, J. K. Choi, Thermodynamic performance analysis of different organic Rankine cycles to generate power from renewable energy resources, American Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 1, No. 2, 2015, pp. 31-38.
- [13] CERCI, Y. Performance evaluation of a single-flash geothermal power plant in Denizli, Turkey. Energy, Vol. 28, No. 1, 2003, pp. 27-35.
- [14] BINA, Saeid Mohammadzadeh; JALILINASRABADY, Saeid; FUJII, Hikari. Exergoeconomic analysis and optimization of single and double flash cycles for Sabalan geothermal power plant. Geothermics, Vol. 72, 2018, pp. 74-82.
- [15] GHASEMI, Hadi, et al. Hybrid solar-geothermal power generation: Optimal retrofitting. Applied energy, Vol. 131, 2014, pp. 158-170.
- [16] LI, Kewen, et al. Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 42, 2015, pp. 1464-1474.
- [17] SIDDIQUI, Osamah; DINCER, Ibrahim. A new solar and geothermal based integrated ammonia fuel cell system for multigeneration. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 45, No.60, 2020, pp. 34637-34653.
- [18] Gu, H., Tang, Y., Yao, J., & Chen, F. Study on biomass gasification under various operating conditions. Journal of the energy institute, Vol. 92, No. 5, 2019, pp. 1329-1336.
- [19] Manente, G., Field, R., DiPippo, R., Tester, J. W., Paci, M., & Rossi, N., Hybrid solar-geothermal power generation to increase the energy production from a binary geothermal plant. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol. 54907, 2011, pp. 109-119.
- [20] Y. Nakao, Y. Mugikura, K. Ogata, N. Katsuki, Development of hybrid geothermal power plants in Japan, Transactions-Geothermal Resources Council, Vol. 41, 2017.



- [21] M. B. NIKOO, N. MAHINPEY, Simulation of biomass gasification in fluidized bed reactor using ASPEN PLUS, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 32, No. 12, 2008, pp. 1245-1254.
- [22] M. CHAANAOU, V. Sébastien, T. BOUNAHMIDI, Benchmark of Concentrating Solar Power Plants: Historical, Current and Future Technical and Economic Development, *Procedia Computer Science*, Vol. 83, 2016, pp. 782-789.
- [23] Zhou, C., Doroodchi, E., & Moghtaderi, B., An in-depth assessment of hybrid solar–geothermal power generation. *Energy conversion and management*, Vol. 74, 2013, PP. 88-101.