

# انرژی زمین‌گرمایی و ترکیب آن با انرژی‌های تجدیدپذیر دیگر در سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، سرما و گرما

شکیلا ذبیح‌الله<sup>۱</sup>، دنیز رفیعی<sup>۱</sup>، فرشاد ترابی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

<sup>۲</sup> دانشیار گروه سیستم‌های انرژی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

\*مسئول مکاتبات: ftorabi@kntu.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

انرژی زمین‌گرمایی  
انرژی‌های تجدیدپذیر  
سیستم‌های تولید ترکیبی گرمایش  
سرماایش و توان  
سیستم‌های تولید چندگانه

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۸  
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۲

در این مقاله به بررسی سیستم‌های تولید هم‌زمان با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی پرداخته شده است. این سیستم‌ها به طور کلی از سه چرخه اصلی شامل چرخه زمین‌گرمایی، چرخه مولد برق و چرخه تبرید جذبی تشکیل می‌شوند که با توجه به سیستم‌های مختلف و خروجی‌های آن‌ها امکان اضافه شدن چرخه‌های دیگری هم به سه چرخه یاد شده وجود دارد. پس از مطرح کردن یکی از جدیدترین سیستم‌های پیشنهادی تولید هم‌زمان برق، سرما و گرما با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی، به بحث پیرامون سیستم دیگری که با بهره‌گیری از الکترولایزر علاوه بر سه خروجی قبلی، توانایی تولید هیدروژن را نیز دارد پرداخته شده است. همچنین جهت بررسی سیستم‌های نوین با راندمان بالاتر، به بررسی سیستم‌هایی که علاوه بر انرژی زمین‌گرمایی، از انرژی خورشیدی و یا بیومس به صورت هم‌زمان بهره می‌گیرند پرداخته شده. در سیستم‌های خورشیدی یک جز اصلی کلکتورهای خورشیدی هستند که امکان فراهم کردن دماهای بالاتر را دارند. همچنین سیستم زمین‌گرمایی-خورشیدی جدیدی که به هدف بهینه کردن سیستم‌های قدیمی مشابه پیشنهاد شده است بررسی شده است. در این سیستم علاوه بر ایجاد تغییراتی در چرخه آلی رانکین، از الکترولایزر و چرخه اسمز معکوس، به ترتیب برای تولید هیدروژن و آب شیرین استفاده شده است. نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که راندمان سیستم‌های ذکر شده به عوامل مختلفی از جمله: درجه حرارت اولیه مایعات زمین‌گرمایی، دبی جریان، شدت خورشیدی، فشار ورودی توربین بخار، درجه حرارت نقطه بخار ژنراتور بخار و ... بستگی دارد. به طور کلی با استفاده از این سیستم‌ها می‌توان به راندمان‌های بسیار بالاتر از سیستم‌های متداول دست یافت و به حفظ منابع انرژی و پاکیزگی محیط زیست کمک کرد.

## ۱ مقدمه

انتشار برای تولید چندین نوع محصول به طور هم‌زمان از جمله برق، گرمایش، سرماایش و غیره می‌تواند یکی از این موارد باشد. انرژی زمین‌گرمایی یک منبع انرژی تجدیدپذیر مطمئن و از نظر محیط زیست خوش‌حیم محسوب می‌شود که از گرمای زمین استفاده می‌کند.

در سال‌های اخیر، سیستم انرژی توزیع شده به دلیل راندمان بالای انرژی، حفاظت از محیط زیست و قابلیت اطمینان بالا بطور گسترده‌ای توسعه یافته است [۲]. بسیاری از ساختارهای مختلف با توجه به ورودی‌ها و خروجی‌های انرژی متمایز، مانند سیستم گرمایشی و قدرت ترکیبی [۳]، سیستم ترکیبی خنک‌کننده، گرمایش و قدرت [۴] وجود دارند. در حال حاضر، انرژی تجدیدپذیر بیشتر و بیشتری در سیستم انرژی توزیع شده اتخاذ می‌شود تا بتواند وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش داده و کاربردهای انرژی تجدیدپذیر را افزایش دهد.

تحقیقات مرتبط با موضوعات مختلفی از جمله تجزیه و تحلیل عملکرد ترمودینامیکی [۵]، امکان‌سنجی اقتصادی [۶]، بهینه‌سازی ساختار سیستم و بهره‌برداری انجام شده است [۷]. در فرایند تولید هم‌زمان برق و حرارت

هم‌زمان با پیشرفت سریع جامعه و اقتصاد جهانی، موضوعات انرژی توجه بیشتری را جلب می‌کنند. طبق آمار آژانس بین‌المللی انرژی، تقاضای جهانی انرژی در سال ۲۰۱۷ با ۲/۱ درصد افزایش، بیش از دو برابر نرخ سال ۲۰۱۶ بوده است [۱]. سوخت‌های فسیلی مانند نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ حدود ۸۱ درصد از آن را به خود اختصاص داده‌اند.

سوخت‌های فسیلی در انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش دارند و باعث بروز مسائل زیست محیطی مانند گرم شدن کره زمین و تغییر اوضاع می‌شوند. ذخایر سوخت‌های فسیلی نیز محدود و به تدریج در حال کاهش هستند. برای تأمین نیازهای فعالیت‌های انسانی، اهمیت دارد که با استفاده از منابع انرژی جایگزین مانند انرژی‌های تجدیدپذیر، بخشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی کاهش یابد.

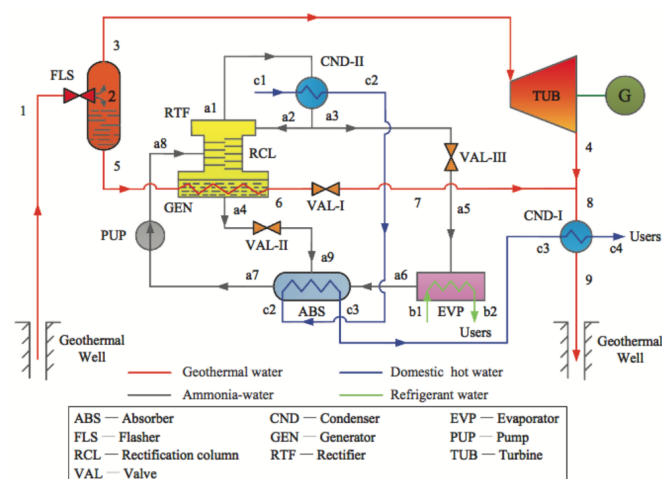
علاوه بر یافتن راه‌حل‌های سازگار با محیط زیست، توسعه پایدار در عین حال نیاز به تأکید بیشتر دارد. یکی از راهکارهای دستیابی به این هدف، استفاده گسترده از انرژی تجدیدپذیر است. استفاده از منابع انرژی بدون

مسکونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها ضمن برآورده کردن همزمان نیازهای انرژی ساختمان، با توجه به بازده بالای انرژی، موجب کاهش مصرف انرژی و همچنین کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی شده و نتایج ارزشمندی از جمله صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی مصرف‌کنندگان و نیز کاهش آلاینده‌های زیست محیطی به همراه خواهد داشت.

در سال‌های اخیر، کاربرد این سیستم‌ها به نیروگاه‌های بخار محدود نشده و به سایر مولدهای تولید قدرت اعم از مکانیکی یا الکتریکی گسترش یافته است، به طوری که امروزه می‌توان هر سیستم مولد قدرت را با هر اندازه و هر کاربردی به صورت یک واحد مشترک طراحی کرد و بدین ترتیب علاوه بر تولید توان الکتریکی یا مکانیکی به وسیله دستگاه، از حرارت اتلافی مولد یا موتور به صورت انرژی گرمایی استفاده می‌توان نمود.

## ۱.۲ سیستم تولید برق، سرما و گرمای پیشنهادی ونگ و همکاران

یک سیستم تولید برق، سرما و گرما (شکل ۱) با ساختار ساده، چرخه فلاش کوپل و چرخه تبرید جذبی آمونیاک-آب، برای تأمین برق، آب سرد و آب گرم خانگی به طور هم‌زمان، توسط ونگ و همکاران [۹] بررسی شده است.



شکل ۱: سیستم تولید همزمان پیشنهادی ونگ و همکاران [۹]

سیکل تبرید جذبی برای بازیابی گرمای اتلافی چرخه قدرت فلاش زمین‌گرمایی تک مرحله‌ای استفاده می‌شود. اگرچه این سیستم عمدتاً از یک چرخه نیرو و یک چرخه تبرید تشکیل شده است، این سیستم نه تنها می‌تواند نیرو و سرمایش را تولید کند بلکه با بازیابی گرمای اتلافی چرخه‌های نیرو و تبرید نیز باعث تولید گرما می‌شود.

در سیستم پیشنهادی، تمام گرمای اتلافی چرخه برق فلاش و چرخه تبرید جذبی برای بازیابی گرما بازیافت می‌شود و باعث کاهش مؤثر هدر رفت انرژی از سیستم به محیط می‌شود. سیکل تبرید جذبی در اینجا برای دستیابی به دمای تبرید بالاتر، آمونیاک را به عنوان سیال در نظر می‌گیرد و به همین دلیل در این سیستم از یکسوکننده و ژنراتور، تحت عنوان ستون اصلاح استفاده شده است تا آمونیاک بسیار تمیز بعنوان مبرد تولید شود و در اثر اختلاط بخار آمونیاک و بخار آب بر عملکرد سرمایش تأثیر منفی گذاشته

اگر از حرارت تولیدی به منظور تولید برودت استفاده شود، به این سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت گفته می‌شود. برودت تولیدی عموماً برای استفاده در سیستم‌های تهویه مطبوع در ساختمان‌های اداری، تجاری و یا متعادل‌سازی دما در خطوط تولید حساس و دیتا سنترها و گلخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این سرمایش برای سردخانه‌های بالای صفر درجه نیز می‌توان استفاده نمود. عمده مزیت این سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های مرسوم یعنی استفاده از چیلرهای تراکمی یا سایر تجهیزات تهویه مطبوع عدم نیاز به انرژی الکتریکی و استفاده از حرارت آگروز و آب گرم موتور-ژنراتور هست. در نتیجه به عنوان یک راه حل امیدوارکننده در مورد مشکلات ناشی از انرژی در جهان، سیستم‌های خنک‌کننده، گرمایش و تولید توان ممکن است راه مؤثری برای کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و متعاقباً انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین فراهم کردن مزایای اقتصادی ایجاد کند. مفهوم تولید همزمان برق، حرارت و برودت که همچنین به عنوان تولید چندگانه شناخته می‌شود، یک روش تأمین انرژی توزیع شده انعطاف‌پذیر برای ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر و تکنولوژی‌های ذخیره انرژی ارائه می‌دهد.

در مقایسه با رویکرد متمرکز که تولید و توزیع نیروی الکتریکی عظیمی برای مسافت‌های طولانی است، سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و برودت همچنین قادر به استفاده از انرژی گرمای تلف‌شده در نیروگاه‌های سوخت فسیلی و یا سایر نیروگاه‌های صنعتی اطراف برای گرمایش و تهویه مطبوع هستند.

تنها در بخش ساختمان تخمین زده می‌شود که ۴۶ درصد از کل تقاضای انرژی در جهان به برنامه‌های مختلف تهویه مطبوع منتسب می‌شود [۸]. از آنجا که سیستم‌های تهویه مطبوع بخش قابل توجهی از مصرف انرژی در بخش‌های مسکونی و صنعتی را تشکیل می‌دهند، این رویکرد ممکن است انرژی حرارتی ناخواسته و یا استفاده نشده از زیرساخت‌های مجاور را حفظ و استفاده کند. از طرف دیگر، سیستم‌های تولید همزمان برق، حرارت و برودت می‌تواند به راحتی با انواع متنوع منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی و زمین‌گرمایی ادغام شود.

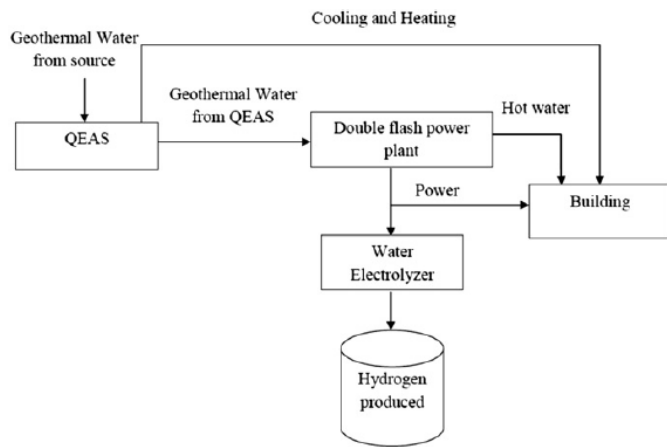
انرژی زمین‌گرمایی را می‌توان از آب داغ در گردش در میان صخره‌های زیر سطح زمین، یا با پمپاژ آب سرد درون صخره‌های داغ و برگشت آب گرم شده به سطح، خارج کرد. برخلاف منابع انرژی تجدیدپذیر متناوب، انرژی زمین‌گرمایی تقریباً بطور مداوم می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد تا بتواند انرژی پایدار برای یک ساختمان، منطقه یا یک کارخانه صنعتی خاص تأمین کند. هدف اصلی سیستم‌های ترکیبی زمین‌گرمایی، تولید همزمان برق، حرارت و برودت، متنوع‌سازی منابع انرژی است.

در این مقاله تحقیقاتی در مورد استفاده از انرژی زمین‌گرمایی و ترکیب آن با انرژی‌های دیگر در سیستم‌ها خلاصه شده و همچنین به مقایسه هر روش و کارایی هر کدام اشاره شده است.

## ۲ تحقیقات انجام‌شده

همان‌طور که ذکر شد، سیستم‌های تولید همزمان به عنوان یکی از مؤثرترین راهکارها در جهت تأمین انرژی‌های مصرفی ساختمان در بخش تجاری و

ضعیف گرما را به مبدل حرارتی با دمای بسیار بالا آزاد می‌کند و با محلول ضعیف حاصل از وضعیت ۳۰ مخلوط می‌شود. این مخلوط از وضعیت ۴۱ گرما را در مبدل حرارتی با دمای بالا از دست می‌دهد و خارج می‌شود و به همین ترتیب چرخه ادامه می‌یابد.



شکل ۲: سیستم پیشنهادی راتلاموالا و همکاران [۱۰].

در نهایت، محلول ضعیف در حالت ۱۵ وارد شیر انبساط می‌شود که فشار و دما کاهش می‌یابد و در حالت ۱۶ وارد جذب‌کننده می‌شود. بخار از حالت ۳۷ وارد ژنراتور درجه حرارت بالا می‌شود و محلول قوی حاصل از حالت ۳۴ را گرم می‌کند و به عنوان بخار آمونیاک-آب در حالت ۲۸ و ۳۱ خارج می‌شود. این دو جریان مخلوط شده و وارد ژنراتور دمای متوسط می‌شوند و فرایند اتفاق افتاده در ژنراتور دما بالا تکرار می‌گردد. همین فرایند در ژنراتور دما پایین ادامه یافته و در نهایت جریان در حالت ۷ مستقیماً وارد کندانسور می‌شود در حالی که حالت ۶ به مبدل حرارتی کندانسور هدایت می‌شود تا گرما را به بخشی از مایع در حالت ۱۷ که توسط پمپ تغذیه شده است، انتقال بدهد. مایع گرما می‌گیرد و کندانسور را در حالت ۱۸ ترک می‌کند. بخار آب-آمونیاک که از مبدل حرارتی کندانسور خارج می‌شود وارد کندانسور می‌شود، گرما می‌دهد و سپس در حالت ۹ خارج می‌شود.

هوا برای خنک کردن جریان در کندانسور استفاده می‌شود. این جریان هوا که گرم شده است سپس برای گرمایش ساختمان آماده می‌شود. سپس جریان آمونیاک-آب از دریچه انبساط عبور کرده و وارد اواپراتور می‌شود. در اواپراتور گرما توسط سیستم از هوای برگشتی از ساختمان به دست می‌آید. هوا خنک می‌شود و برای خنک‌کاری در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. بخار آب-آمونیاک گرم‌شده در اواپراتور، وارد جذب‌کننده می‌شود. در جذب هر سه جریان با هم مخلوط شده و گرما را به محیط اطراف می‌دهند تا به صورت مایع وارد پمپ محلول شوند. پس از تأمین انرژی برای سیستم‌های جذب چهار اثره، انرژی زمین‌گرمایی همان‌طور که در شکل ۳b نشان داده شده است وارد نیروگاه دو فلاشه می‌شود.

جریان زمین‌گرمایی در نیروگاه دو فلاشه، در حالت ۱ وارد شیر انبساط می‌شود. در اینجا فشار جریان کاهش می‌یابد و وارد قسمت اول فلاش می‌شود. در قسمت فلاش بخار از نیمه فوقانی خارج می‌شود و مخلوط اشباع از آنها در حالت ۸ خارج می‌شود. جریان حالت ۳ برای تولید توان وارد توربین فشار قوی می‌شود. جریان حالت ۸ هم که وارد شیر انبساط دوم شده،

نشود. مایع رفلکس یکسوکننده توسط قسمت‌هایی از مایع آمونیاک چگالش شده در خروجی کندانسور تأمین می‌شود.

این سیستم شامل چهار حلقه: حلقه آب زمین‌گرمایی (خطوط قرمز)، آمونیاک-آب (خطوط سیاه)، آب گرم خانگی (خطوط آبی) و آب مبرد (خطوط سبز) است. لازم به ذکر است که حلقه‌های آب گرم خانگی و مبرد حلقه‌های باز هستند.

در حلقه آب زمین‌گرمایی، آب پس از خروج از زیر زمین به فلاشر فرستاده می‌شود، جایی که به فشار کمتری می‌رسد و به دو فاز بخار و مایع جدا می‌شود. بخار برای تولید نیرو به یک توربین بخار فرستاده می‌شود، در حالی که مایع به عنوان منبع گرمای فرآیند اصلاح به ژنراتور ستون اصلاح می‌رود. سپس، مایع توسط شیر خفه شده و با خروجی توربین مخلوط می‌شود و برای آزاد کردن گرما وارد کندانسور می‌شود و مجدداً به زیر زمین برمی‌گردد.

در حلقه آب آمونیاک، یک جریان از محلول قوی آمونیاک به ستون اصلاح رفته، طی یک سری فرآیندهای تبخیر، سلب و اصلاح، بخار آمونیاک را در یکسوکننده و محلول ضعیف آمونیاک در ژنراتور ایجاد می‌کند. بخار آمونیاک در یک میعان‌کننده به مایع متراکم شده و سپس به دو جریان تقسیم می‌شود. یک جریان به عنوان مایع رفلکس مورد نیاز برای اصلاح به یکسوکننده ارسال می‌شود. جریان دیگر از شیر عبور می‌کند تا فشار آن کاهش یافته و آمونیاک دو فاز با دمای پایین تولید کند. آمونیاک با درجه حرارت پایین (مبرد)، برای جذب گرما برای تولید آب مبرد ۵ درجه سانتیگراد، وارد تبخیرکننده می‌شود و پس از آن بخار تشکیل شده به جذب می‌رود. محلول ضعیف آمونیاک از ژنراتور از طریق دریچه ای فشرده می‌شود و سپس به داخل جذب‌کننده می‌رود. بخار آمونیاک توسط محلول ضعیف آمونیاک در جذب جذب می‌شود. سرانجام، محلول قوی آمونیاک توسط پمپ تحت فشار قرار می‌گیرد و با تکمیل چرخه تبرید جذب آمونیاک-آب به ستون اصلاح منتقل می‌شود. در مورد حلقه آب گرم خانگی، ابتدا آب با دمای محیط به عنوان آب خنک‌کننده وارد کندانسور می‌شود تا گرما را از بخار آمونیاک جذب کند، سپس به جذب‌کننده می‌رود تا گرمای آزاد شده جذب شود، و در نهایت آب وارد کندانسور می‌شود تا با جذب حرارت باقی مانده از آب زمین‌گرمایی قبل از اینکه وارد زیرزمین شود درجه حرارت تا ۷۰ درجه سانتیگراد افزایش یابد. در حلقه آب مبرد، آب تحت دمای محیط به طور مستقیم توسط آمونیاک با دمای پایین در تبخیرکننده تا ۵ درجه سانتیگراد خنک می‌شود و بدین ترتیب آب مبرد مورد استفاده برای تهویه مطبوع مرکزی یا سایر تولید می‌شود.

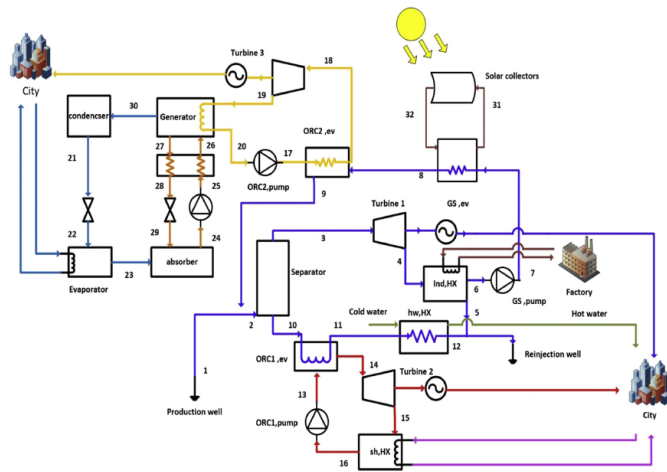
## ۲.۲ سیستم تولید همزمان پیشنهادی راتلاموالا و همکاران

در سیستم پیشنهادی راتلاموالا و همکاران [۱۰] علاوه بر محصولات قبلی هیدروژن هم تولید می‌شود.

در این سیستم (شکل ۲) سه ژنراتور با دماهای مختلف (بالا، متوسط و پایین) و همچنین چهار مبدل حرارتی با دماهای مختلف (بسیار بالا، بالا، متوسط و پایین) وجود دارند.

در ژنراتور درجه حرارت بسیار بالا، محلول قوی از جذب‌کننده آمده و گرم می‌شود تا به محلول ضعیف و بخار آب آمونیاک تبدیل شود. محلول

پمپ می‌شود و سپس به اواپراتور خورشیدی می‌رود. اواپراتور خورشیدی گرما را بین آب و سیال انتقال گرما تبادل می‌کند. در این سیستم، ترمینول وی پی ۱ به دلیل مزایای آن از جمله ویسکوزیته پایین و پایداری حرارتی بالا در مقایسه با سایر سیالات انتقال گرما می‌آی، به عنوان سیال انتقال گرما انتخاب شده است. جریان پس از خروج از اواپراتور خورشیدی، گرمای لازم را برای اواپراتور چرخه آلی رانکین دوم تأمین می‌کند و در حالت ۹ خارج می‌شود تا با سیال زمین‌گرمایی در حالت ۱ مخلوط شود. مایع اشباع در حالت ۱۰ برای تأمین گرما به چرخه آلی رانکین اول می‌رود و سپس وارد مخزن آب می‌شود.

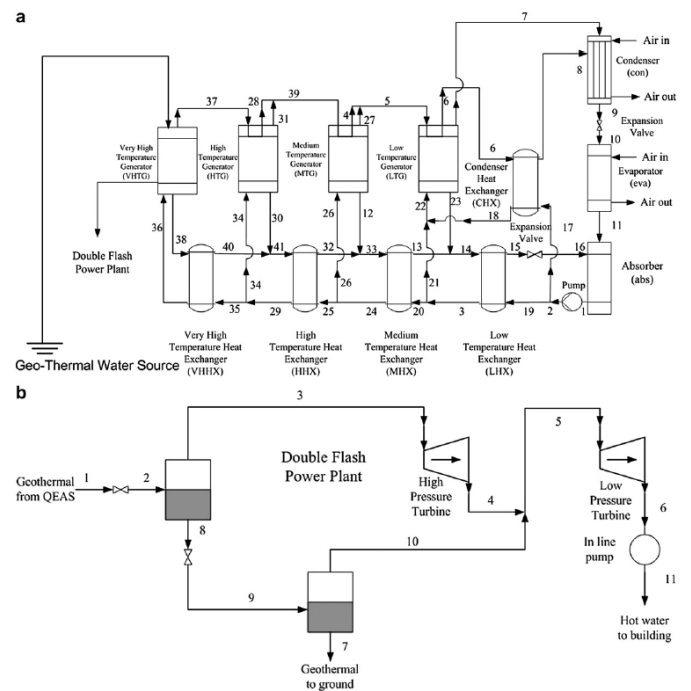


شکل ۴: دیاگرام شماتیک سیستم تولیدکننده ترکیبی زمین‌گرمایی و خورشیدی [۱۱].

سیال آلی استفاده‌شده در چرخه آلی رانکین اول ایزوپنتان می‌باشد و چرخه آن به شرح زیر است:

جریان وارد اواپراتور چرخه آلی رانکین اول در حالت ۱۳ می‌شود و در دمای بالاتر خارج می‌شود. سپس سیال در توربین منبسط می‌شود تا برق تولید کند. پس از آن، سیال وارد کندانسور می‌شود تا گرمای لازم برای گرمایش فضا را تأمین کند و پس از ورود به پمپ و افزایش فشار سیال در حالت ۱۳ که ورودی چرخه آلی رانکین اول است، از پمپ خارج می‌شود. از آنجا که چرخه آلی رانکین دوم در دمای بالا کار می‌کند، سیال مورد استفاده این چرخه  $n$ -اکتان است، این سیال آلی دارای دمای بحرانی نسبتاً بالایی است. این چرخه کاملاً مشابه چرخه آلی رانکین اول می‌باشد با این تفاوت که سیال وارد مبدل حرارتی می‌شود تا گرمای لازم برای عملکرد چیلر جذبی را تأمین کند. پس از دریافت گرما از مبدل حرارتی چرخه آلی رانکین دوم در ژنراتور، مقداری از آب محلول  $\text{LiBrH}_2\text{O}$  تبخیر شده و ژنراتور را برای ورود به کندانسور ترک می‌کند. این بخار در کندانسور خنک می‌شود و به عنوان آب مایع اشباع به شیر انبساط می‌رود تا مقداری بخار تشکیل دهد و دما و فشار آب را کاهش دهد. پس از آن، آب برای بدست آوردن گرما و تأمین بار خنک‌کننده وارد اواپراتور می‌شود و اواپراتور را در حالت بخار ترک می‌کند و وارد جذب‌کننده می‌شود. این آب با یک محلول ضعیف  $\text{LiBrH}_2\text{O}$  که درون جذب‌کننده و از ژنراتور وارد شده مخلوط می‌شود. پس از مخلوط شدن، یک محلول قوی  $\text{LiBrH}_2\text{O}$  تشکیل می‌شود و به ژنراتور پمپ می‌شود و از یک مبدل حرارتی عبور می‌کند و چرخه ادامه می‌یابد.

پس از کاهش فشار به قسمت دوم فلاش در حالت ۹ وارد می‌شود. مجدداً در قسمت دوم فلاش بخار در حالت ۱۰ استخراج می‌شود و سپس با حالت ۴ مخلوط شده، وارد توربین کم فشار می‌شود. مایع زمین‌گرمایی از محفظه فلاش در حالت ۷ به چاه آزاد شده است. توان تولید شده توسط توربین فشار بالا و توربین فشار پایین به ساختمان (۸٪) و الکترولیزر (۲۰٪) عرضه می‌شود. همچنین، مایع زمین‌گرمایی که توربین فشار پایین را ترک می‌کند، تحت فشار جو قرار می‌گیرد و به ساختمان عرضه می‌شود. از توان فراهم‌شده برای الکترولیزر برای شکستن پیوند آب به منظور تولید هیدروژن استفاده می‌شود. هیدروژن تولید شده برای استفاده‌های بعدی در مخازن ذخیره می‌شود.



شکل ۳: a- دیاگرام شماتیک QEAS، b- دیاگرام شماتیک نیروگاه چندمرحله‌ای باینری [۱۰].

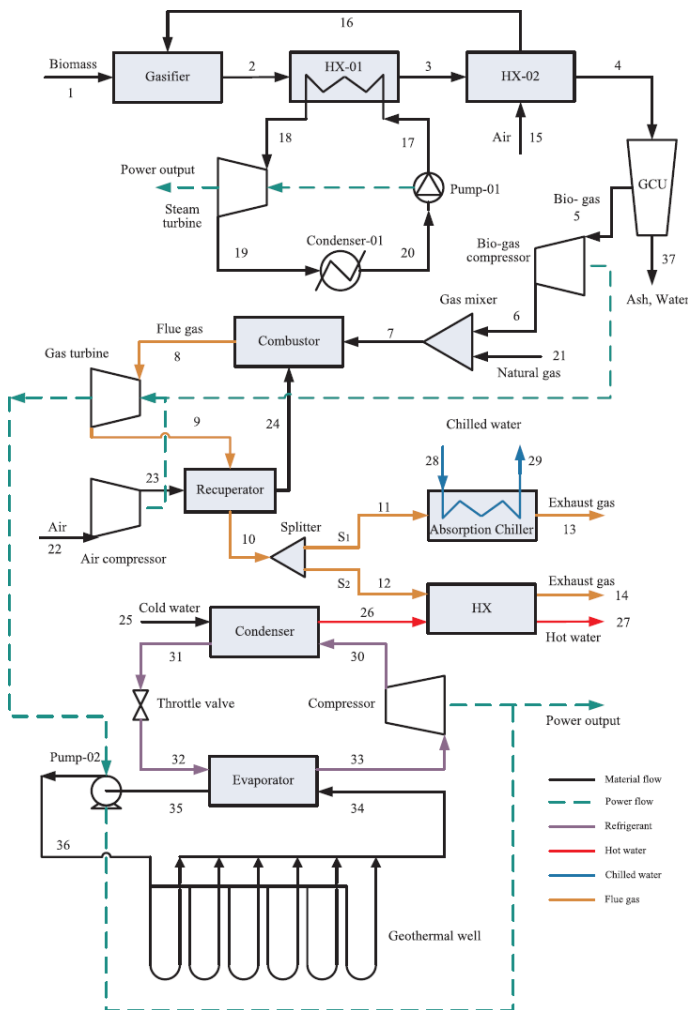
### ۳.۲ ترکیب انرژی زمین‌گرمایی با خورشیدی در سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت

جهت افزایش راندمان سیستم‌های ذکر شده می‌توان علاوه بر انرژی زمین‌گرمایی، از سایر انرژی‌های تجدیدپذیر هم در سیستم بهره گرفت. العلی و همکاران [۱۱] در سیستم پیشنهادی خود از انرژی خورشیدی هم بهره گرفتند (شکل ۴). این سیستم ترکیبی پنج خروجی مفید را تولید می‌کند که عبارتند از توان الکتریکی، خنک‌کاری، گرمایش فضا، آب گرم و گرمای فرایند صنعتی. این سیستم شامل چهار چرخه اصلی، یعنی چرخه زمین‌گرمایی، چرخه آلی رانکین اول، چرخه آلی رانکین دوم و چیلر جذب است.

چرخه زمین‌گرمایی مشابه چرخه زمین‌گرمایی سیستم پیشنهادی ونگ و همکاران می‌باشد با این تفاوت که سیال در حالت ۶ چرخه را ادامه می‌دهد و وارد پمپ زمین‌گرمایی می‌شود، در حالی که بخشی دیگر از سیال در حالت ۵ به چاه تزریق منتقل می‌شود. آب در حالت ۶ برای افزایش فشار سیال وارد

## ۵.۲ ترکیب انرژی زمین‌گرمایی با بیومس و گاز طبیعی در CCHP

پیکربندی سیستم ترکیبی تولید همزمان برق، حرارت و برودت مبتنی بر زیست توده، گاز طبیعی و انرژی زمین‌گرمایی در شکل ۶ نشان داده شده است [۱۳]. این سیستم از یک زیر سیستم تبدیل گاز زیست توده-هوا، زیر سیستم تولید برق توربین بخار، زیر سیستم تولید توربین گازی، زیر سیستم استفاده از گرمای هدر رفته و زیر سیستم پمپ حرارتی منبع زمین تشکیل شده است.



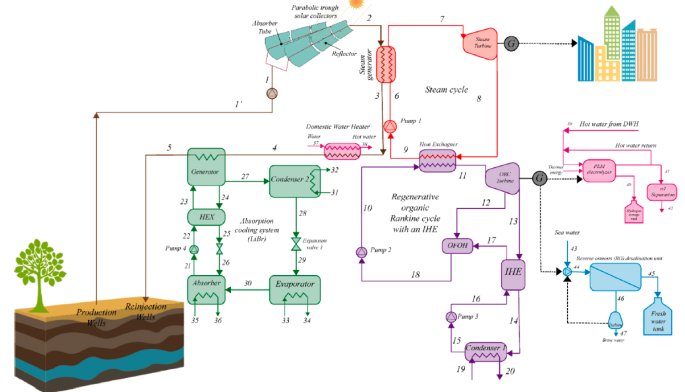
شکل ۶: سیستم ترکیبی بیومس و تبدیل گاز و گاز طبیعی و پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت [۱۳].

برای زیر سیستم تبدیل گاز زیست توده - هوا، زیست توده (جریان ۱)، برای واکنش تبدیل به گاز، با هوای دما بالا (جریان ۱۶، ۲۰۰ درجه سانتیگراد، فشار ۱ بار) به سیستم تبدیل گاز داده می‌شود و در نتیجه هوا (جریان ۱۵، ۲۵ درجه سانتیگراد، فشار ۱ بار) توسط گرمای محسوس بیوگاز در مبدل حرارتی دو پیش گرم می‌شود. با توجه به نیاز استفاده از بیوگاز (جریان ۴) به واحد تهویه گاز که عمدتاً از یک سیکلون و اسکرابر تشکیل شده است داده می‌شود تا ناخالصی‌ها و آب را از بین ببرد.

در زیر سیستم تولید برق توربین بخار، چرخه رانکین پیشنهاد می‌شود تا از گرمای محسوس دمای بالا بیوگاز بیشتر استفاده شود. آب تحت فشار (جریان ۱۷، فشار ۵۵ بار) با گرمای محسوس بیوگاز تبدیل به سوپرهیت می‌شود،

## ۴.۲ بهینه‌سازی طراحی یک سیستم تولید همزمان مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی و خورشیدی

علی رحمی و همکاران [۱۲]، در یک سیستم بهینه‌تر از انرژی خورشیدی و زمین‌گرمایی به صورت همزمان برای تولید سرمایش، آب شیرین، هیدروژن و گرما به طور همزمان استفاده کرده‌اند. نیرو توسط چرخه ترکیبی بخار رانکین و یک چرخه آلی رانکین تولید می‌شود.



شکل ۵: سیستم بهینه شده مورد استفاده توسط علی رحمی و همکاران [۱۲]

سیستم پیشنهادی شامل یک گودال زمین‌گرمایی، پنل‌های خورشیدی پارابولیک خطی، یک چرخه بخار، یک چرخه آلی رانکین با مبدل حرارتی داخلی، یک چیلر جذبی، یک الکترولیزر پیل سوختی پلیمری و یک واحد اسمز معکوس می‌باشد (شکل ۵).

بخار گرم از چاه‌های تولید بدست می‌آید و گرمای بیشتری را در کلتورهای خورشیدی جذب می‌کند و برای گرم کردن مایه عملیاتی در چرخه بخار استفاده می‌شود. سپس از آب گرم خروجی از ژنراتور، در نقطه ۳، استفاده می‌شود تا انرژی حرارتی باقیمانده آن برای پیش‌گرم کردن آب خوراکی الکترولیزر پیل سوختی پلیمری، مبادله شود. همچنین، چرخه آلی رانکین علاوه بر مبدل حرارتی، توربین، پمپ و کندانسور، از یک هیتر باز و مبدل حرارتی داخلی، برای تقویت راندمان سیستم تشکیل شده است. این چرخه گرمای لازم را از طریق یک مبدل حرارتی در نقطه ۱۱ بدست می‌آورد.

در قسمت دیگر سیستم، انرژی الکتریکی تولید شده از چرخه رانکین و چرخه بخار جمع می‌شود تا در سیستم نمک زدایی اسمز معکوس و همچنین در یک الکترولیزر پیل سوختی پلیمری برای تولید هیدروژن برای مصارف بعدی استفاده شود. در نقطه ۴۶، یک توربین کوچک برای برداشت برق از آب شور واحد اسمز معکوس، که قرار است به دریا تخلیه شود قرار داده شده است. این سیستم از یک چرخه زمین‌گرمایی باینری دوتایی استفاده می‌کند.

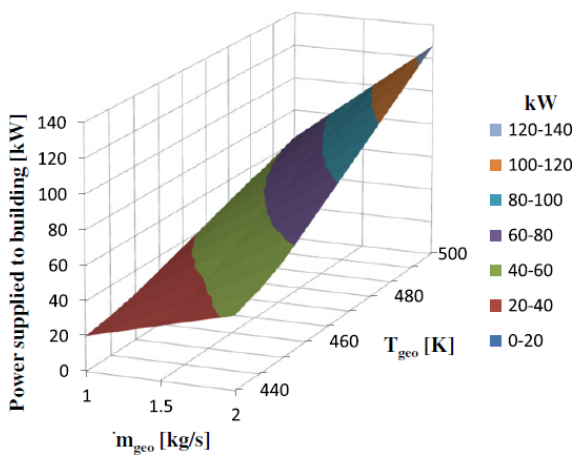
همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، یک ژنراتور الکتریکی توان واکنش در الکترولیزر را فراهم می‌کند. آب با پیش‌گرم شدن در گرم کن آب خانگی، برای تولید هیدروژن وارد الکترولیزر می‌شود. هیدروژن حاصل از کاتد خارج می‌شود و گرمای خود را از دست می‌دهد تا به دمای محیط برسد. پس از آن، مخلوط اکسیژن و آب به منظور جدا کردن اکسیژن از آند خارج می‌شود و آب باقیمانده دوباره در الکترولیزر استفاده می‌شود.

### ۱.۳ تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد سیستم پیشنهادی راتلاموالا و همکاران

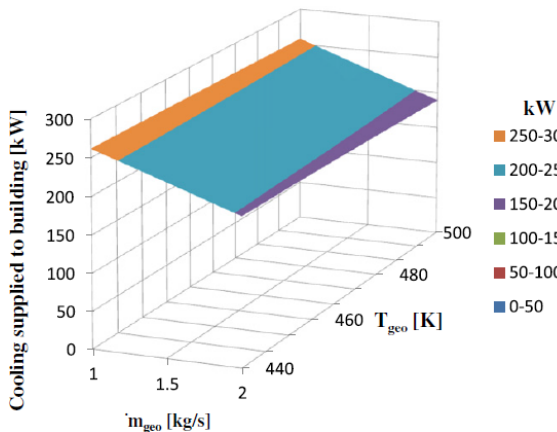
#### ۱.۱.۳ تأثیر دمای منبع زمین‌گرمایی

دمای منبع زمین‌گرمایی نقش اصلی را در عملکرد سیستم‌های زمین‌گرمایی ایفا می‌کند. این دما پارامتری است که اطلاع می‌دهد که منبع زمین‌گرمایی دارای توان تولید انرژی است یا فقط می‌تواند برای اهداف مستقیم مانند خنک‌کاری یا گرمایش استفاده شود.

افزایش این دما همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در سیستم پیشنهادی راتلاموالا و همکاران [۱۰]، تأثیر مثبتی در توان تأمین‌شده به ساختمان دارد و همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، تأثیری منفی بر سرمایشی که به ساختمان داده می‌شود دارد.



شکل ۷: تأثیر دمای منبع زمین‌گرمایی و دبی جرمی بر توان تأمین‌شده به ساختمان‌ها [۱۰]



شکل ۸: تأثیر دمای منبع زمین‌گرمایی و دبی جرمی بر سرمایشی که به ساختمان‌ها می‌رسد [۱۰].

میزان تولید هیدروژن با افزایش دمای منبع زمین‌گرمایی و دبی جرمی زمین‌گرمایی همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود افزایش می‌یابد، زیرا این دو پارامتر قدرت تولیدشده توسط نیروگاه دو فاصله را افزایش می‌دهند. با افزایش مقدار توان فراهم‌شده به الکترولیز، مقدار هیدروژن تولیدشده افزایش می‌یابد.

سپس بخار سوپرهیت فشار بالا (جریان ۱۸، ۵۰۰ درجه سانتیگراد، فشار ۵۵ بار) در توربین بخار برای تولید برق قرار می‌گیرد. پس از آن، بخار خروجی در کندانسور-۱ متراکم می‌شود و سپس در پمپ-۱ پمپ می‌شود، که کل چرخه ترمودینامیکی را تکمیل می‌کند.

در زیر سیستم تولید برق توربین گازی، بیوگاز فشار بالا با گاز طبیعی مخلوط می‌شود و گاز مخلوط با هوای فشار و دما بالا در محفظه احتراق، محترق می‌شود. گاز دودکش (جریان ۸) توربین گازی را برای تولید برق هدایت می‌کند و سپس هوای حاصل از کمپرسور هوا را گرم می‌کند. برای زیر سیستم استفاده از گرمای هدر رفته، گاز دودکش (جریان ۱۰) به دو جریان تقسیم می‌شود: گاز دودکش برای تولید آب سرد (جریان ۲۹، ۷ درجه سانتیگراد)، به داخل چیلر جذبی می‌رود. دیگری به منظور دوباره گرم کردن گرم کردن آب گرم (جریان ۲۶، ۳۹ درجه سانتیگراد)، به مبدل حرارتی می‌رود که باعث تولید آب داغ مورد نیاز (جریان ۲۷، ۵۵ درجه سانتیگراد) می‌شود. در زیر سیستم پمپ حرارتی منبع زمین، مبرد R22 گرما را در کندانسور آزاد می‌کند و آب سرد (جریان ۲۵، ۲۵ درجه سانتیگراد، فشار ۱ بار) را تا دمای مشخص شده (جریان ۲۶، مانند ۳۹ درجه سانتیگراد) گرم می‌کند. پس از کاهش فشار در دریاچه گلوگاه، مبدل در اوپراتور، گرمای زمین‌گرمایی را از چاه زمین‌گرمایی جذب می‌کند و به حالت بخار اشباع می‌رسد. سپس مبرد سوپرهیت حاصل از کمپرسور، داخل کندانسور می‌شود و آب سرد را گرم می‌کند.

بر خلاف سیستم ترکیبی پمپ حرارتی توزیع شده و منبع زمین معمولی، پمپ حرارتی منبع زمین در سیستم پیشنهادی فقط آب گرم را تولید می‌کند، که در آن دمای آب گرم زیر دمای آب داغ است. سپس از گرمای تلف شده گاز دودکش برای گرمایش بیشتر آب گرم تا دمای مورد نیاز استفاده می‌شود. این اقدامات می‌تواند ضریب عملکرد پمپ حرارتی منبع زمین و بازده مبدل حرارتی گاز دودکش را بهبود بخشد.

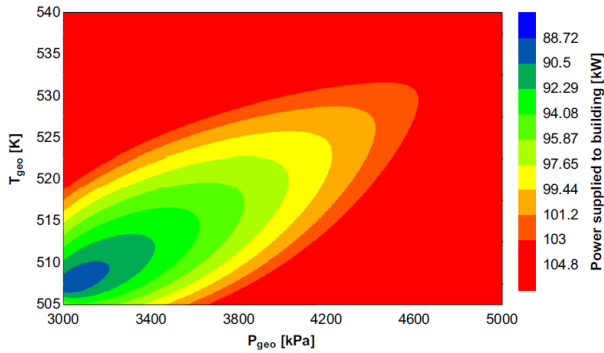
### ۳ نتایج و بحث

با توجه به افزایش غیرمنتظره در قیمت سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، طراحی سیستم‌های انرژی سازگار با محیط زیست، مقرون به صرفه و پایدار بسیار برجسته شده است.

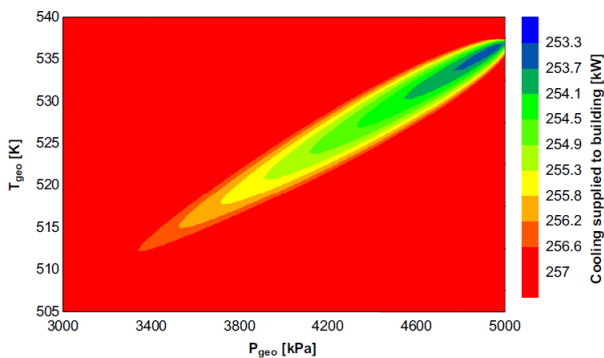
در این مقاله، انواع سیستم‌های مختلف با منبع انرژی زمین‌گرمایی و یا ترکیب آن با انرژی‌های تجدیدپذیر دیگر برای تأمین سرمایش، گرمایش، توان و آب گرم برای ساختمان و تولید هیدروژن به شیوه‌ای سازگار با محیط زیست و قابل استفاده، مطالعه شد.

حال تأثیر عوامل مختلف مانند دبی جرمی آب زمین‌گرمایی، دمای منبع آب زمین‌گرمایی، دمای محیط، فشار منبع زمین‌گرمایی در ادامه بررسی می‌شود تا بتوان تأثیر آن‌ها را در تولید خنک‌کاری، گرمایش، قدرت، آب گرم و تولید هیدروژن مشاهده کرد.

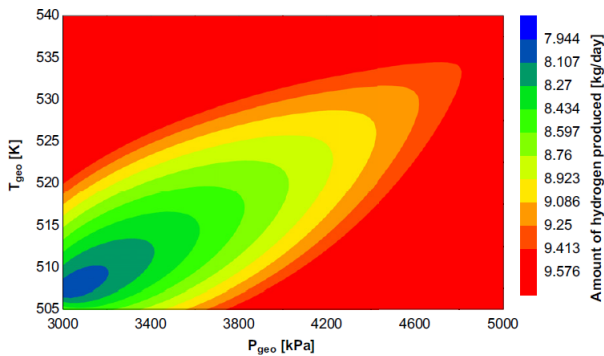
سیستم افزایش می‌یابد. این پیشرفت در عملکرد سیستم نشان‌دهنده ضریب عملکرد و فاکتور بهره‌برداری است.



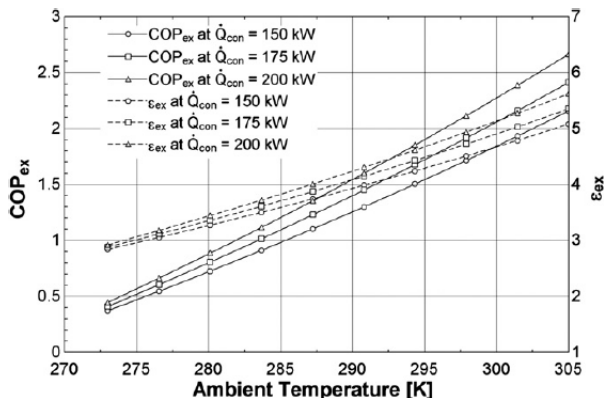
شکل ۱۰: تأثیر فشار منبع زمین‌گرایی بر توان تأمین‌شده به ساختمان‌ها [۱۰].



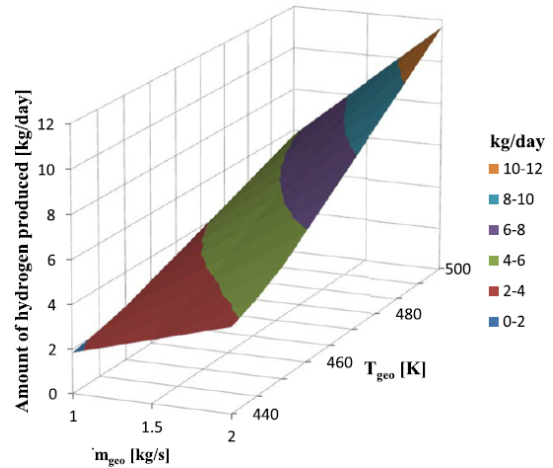
شکل ۱۱: تأثیر فشار منبع زمین‌گرایی بر سرمایشی که به ساختمان‌ها می‌رسد [۱۰].



شکل ۱۲: تأثیر فشار منبع زمین‌گرایی بر میزان هیدروژن تولیدشده [۱۰].



شکل ۱۳: تأثیر دمای هوای اطراف بر ضریب عملکرد و فاکتور کلی بهره‌برداری [۱۰]



شکل ۹: تأثیر دمای منبع زمین‌گرایی و دبی جرمی بر مقدار هیدروژن تولیدشده [۱۰].

### ۲.۱.۳ تأثیر فشار منبع زمین‌گرایی

وقتی تولید توان را در نظر می‌گیریم، فشار جریان نقش مهمی را ایفا می‌کند. در این مقاله، اثرات تغییر در فشار منبع انرژی زمین‌گرایی بر عملکرد در سیستم پیشنهادی راتلاموالا و همکاران [۱۰]، بررسی شده است تا سیستم مورد مطالعه بتواند در مکان‌های مختلف تطبیق یابد. همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود افزایش فشار منبع زمین‌گرایی منجر به افزایش توان تولیدی و کاهش ظرفیت تولیدشده خنک‌کاری می‌گردد.

افزایش توان به‌طور عمده ناشی از اختلاف فشار بیشتر بین ورودی و خروجی توربین‌ها است. با افزایش اختلاف فشار، اختلاف آنتالپی افزایش می‌یابد و در نهایت میزان توان تأمین‌شده برای ساختمان افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، افزایش فشار منجر به افزایش دمای اشباع و در نتیجه افزایش انرژی ورودی به ژنراتور دمای بسیار بالا می‌شود. با افزایش انرژی ورودی به ژنراتور دمای بسیار بالا برای یک بار کندانسور خاص، سرمایش تولید شده به دلیل دمای بالاتر جریان وارد شده به اواپراتور کاهش می‌یابد. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، افزایش فشار منبع زمین‌گرایی تأثیر مثبتی بر مقدار هیدروژن تولیدشده دارد. این افزایش مستقیماً با افزایش توان عرضه‌شده به الکترولیز مرتبط است. با افزایش فشار منبع زمین‌گرایی، توان بیشتری در نیروگاه دو فلاشه ایجاد می‌شود و این به این معنی است که توان بیشتری برای تولید هیدروژن برای الکترولیزور در دسترس است.

### ۳.۱.۳ تأثیر دمای هوای اطراف

تغییرات دمای محیط همیشه به عملکرد سیستم کمک می‌کند. شکل ۱۳ تنوع در فاکتور ضریب عملکرد و استفاده خارجی با افزایش دمای محیط را در سیستم پیشنهادی راتلاموالا و همکاران [۱۰]، نشان می‌دهد.

هر دو فاکتور ضریب عملکرد و بهره‌برداری با افزایش دمای محیط افزایش می‌یابند. این مقادیر به ترتیب برای بارهای مختلف کندانسور ۱۵۰ کیلووات، ۱۷۵ کیلووات و ۲۰۰ کیلووات به ترتیب از ۳۷٪ تا ۷/۲ و ۸/۲ تا ۶/۵ متغیر هستند. این رفتار مورد توجه است زیرا افزایش درجه حرارت محیط منجر به افزایش خروجی‌های مورد نظر می‌شود. با افزایش خروجی مورد نظر، عملکرد

## ۲.۳ تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد سیستم پیشنهادی ونگ و همکاران

### ۱.۲.۳ تأثیر فشار فلاش

حرارت اولیه بالاتر مایع زمین‌گرمایی به معنای راندمان اکسرژی بهتر برای همان مایع است. دوم، شدت تابش خورشیدی بیشتر می‌تواند منجر به بهبود راندمان اکسرژی شود. این در شرایطی است که شدت تابش خورشیدی باعث افزایش دمای خروجی مایع زمین‌گرمایی از کلکتورها و به تبع آن، دبی جریان چرخه بخار و چرخه آلی رانکین می‌شود.

تأثیر غیرمستقیم دیگر شدت تابش خورشیدی بر تولید هیدروژن الکترولیت پیل سوختی پلیمری است. همانطور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، با وجود اینکه برای شدت‌های خورشیدی کمتر از ۳۰۰ وات بر متر مربع، میزان تولید هیدروژن تقریباً برای انواع مختلف مایعات زمین‌گرمایی برابر است، با افزایش شدت تابش خورشید، تولید هیدروژن به طور قابل توجهی برای هر سیال متفاوت است. این رابطه برای واحد اسمز معکوس و تولید آب نیز کاربرد دارد. این موضوع به دلیل رابطه جدانشدنی نرخ تولید هر دو الکترولیت پیل سوختی پلیمری و واحد اسمز معکوس با توان تولید شده توسط چرخه آلی رانکین است. از آنجا که از برق تولیدی چرخه آلی رانکین برای اجرای این واحدها استفاده می‌شود، افزایش تولید برق در نتیجه شدت بیشتر تابش خورشیدی، همانطور که توضیح داده شد، می‌تواند بر میزان تولید هیدروژن و آب شیرین تأثیر مثبت بگذارد. با توجه به محاسبات انجام شده، تولید برق چرخه آلی رانکین می‌تواند از ۹۳/۵۲ کیلووات تا ۴/۳۹۹ کیلووات، برای شدت‌های خورشیدی به ترتیب  $300 \frac{W}{m^2}$  و  $900 \frac{W}{m^2}$  متغیر باشد.

## ۴ نتیجه‌گیری

نتایج راتلاموالا و همکاران [۱۰] نشان داد که افزایش دمای منبع زمین‌گرمایی و دبی جرمی زمین‌گرمایی تأثیر مثبتی بر تولید قدرت و هیدروژن دارد. همچنین افزایش فشار زمین‌گرمایی اثر مثبتی بر تولید قدرت و هیدروژن دارد. علاوه بر این، افزایش دمای محیط منجر به عملکرد بهتر سیستم کلی می‌شود. سیستم ترکیبی مورد بررسی در این مقاله نشان می‌دهد که سیستم‌های تولید همزمان با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر سیستم را کارآمدتر و مؤثرتر می‌کنند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که ساختمان‌ها را می‌توان با سیستم فعلی پایدارتر و مستقل از شبکه ایجاد کرد. هیدروژن تولیدشده می‌تواند بعداً برای تولید توان و خنک‌کاری در ساعات اوج استفاده شود.

بر اساس نتایج ونگ و همکاران [۹] می‌توان مشاهده کرد که:

- راندمان اکسرژی سیستم زمین‌گرمایی در سیستم پیشنهادی ترکیبی خنک‌کننده، گرمایش و تولید توان می‌تواند در شرایط آب گرم ۱۷۰ درجه سانتیگراد به ۴۳/۶۹ درصد برسد.
- نتایج آنالیز ازدست دادن اکسرژی نشان می‌دهد که حداکثر تخریب اکسرژی، که به ۴۸/۵۳ درصد از کل تخریب‌های اکسرژی سیستم می‌رسد، به دلیل اختلاف دمای زیاد انتقال حرارت و دبی جرمی زیاد در کندانسور سیکل قدرت فلش وجود دارد. علاوه بر این، تخریب‌های اکسرژی در ستون اصلاح، جاذب و فلاشر نیز بخش بزرگی از کل تخریب‌های اکسرژی سیستم زمین‌گرمایی در سیستم پیشنهادی ترکیبی خنک‌کننده، گرمایش و تولید توان را تشکیل می‌دهند که به ترتیب ۱۷/۶۸، ۹/۰۲ و ۸/۳ درصد را تشکیل می‌دهند.

شکل ۱۴ تأثیر فشار فلاش بر عملکرد سیستم را در سیستم پیشنهادی ونگ و همکاران [۹] نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، فشار فلاش عمدتاً بر عملکرد چرخه توان فلاش زمین‌گرمایی و سپس به طور غیرمستقیم بر عملکرد چرخه تبرید جذبی آب-آمونیاک تأثیر می‌گذارد. فشار بهینه‌ای در حدود ۳۰۰ kPa به دست می‌آید تا حداکثر توان خروجی توربین بدست آید.

### ۲.۲.۳ تأثیر دمای ژنراتور

شکل ۱۵ تأثیر دمای ژنراتور را بر عملکرد سیستم در سیستم پیشنهادی ونگ و همکاران [۹] نشان می‌دهد. توان خروجی توربین در ۸۶/۳۲۸ کیلو وات به دلیل عدم تأثیر افزایش دمای ژنراتور، ثابت مانده است. با افزایش دمای ژنراتور از ۹۰ درجه سانتیگراد به ۱۲۰ درجه سانتیگراد، مایع اشباع شده از فلاشر باعث تولید گرمای بسیار کمتری در ژنراتور ستون اصلاح می‌شود. در نتیجه آب زمین‌گرمایی داخل کندانسور می‌تواند گرمای بیشتری را برای آب گرم خانگی تأمین کند و متعاقباً دبی جرمی آب گرم خانگی افزایش می‌یابد.

### ۳.۲.۳ تأثیر غلظت آمونیاک بر عملکرد سیستم

شکل ۱۶ تأثیر غلظت آمونیاک محلول قوی آمونیاک بر عملکرد سیستم را در سیستم پیشنهادی ونگ و همکاران [۹] نشان می‌دهد. با افزایش غلظت آمونیاک محلول قوی آمونیاک از ۴۱٪ به ۴۷٪، دمای اشباع‌شده از محلول آمونیاک قوی خارج از جاذب، به دلیل فشار جذب ثابت، کاهش می‌یابد، بنابراین جذب گرمای لازم در واحد دبی جرمی جریان افزایش می‌یابد. میزان مصرف پمپ از ۱۰/۱۸ کیلو وات به ۸۷/۱۱ کیلووات کاهش می‌یابد زیرا دبی جرمی جریان محلول قوی آمونیاک کاهش می‌یابد؛ بنابراین توان خالص سیستم از ۷۶/۳۰۸ کیلو وات به ۳۱۵ کیلو وات افزایش می‌یابد.

از یک طرف، بخار آمونیاک به دلیل افزایش دبی جرمی جریان، گرمای بیشتری را در کندانسور ۲ آزاد می‌کند. از طرف دیگر، فرایند جذب در جاذب نیز به دلیل دمای ورودی بدون تغییر محلول ضعیف آمونیاک و بخار آمونیاک و کاهش دمای خروجی محلول قوی آمونیاک، گرمای بیشتری را آزاد می‌کند. سرانجام راندمان اکسرژی سیستم از ۴۲/۶۳٪ به ۴۴/۴۴٪ افزایش می‌یابد.

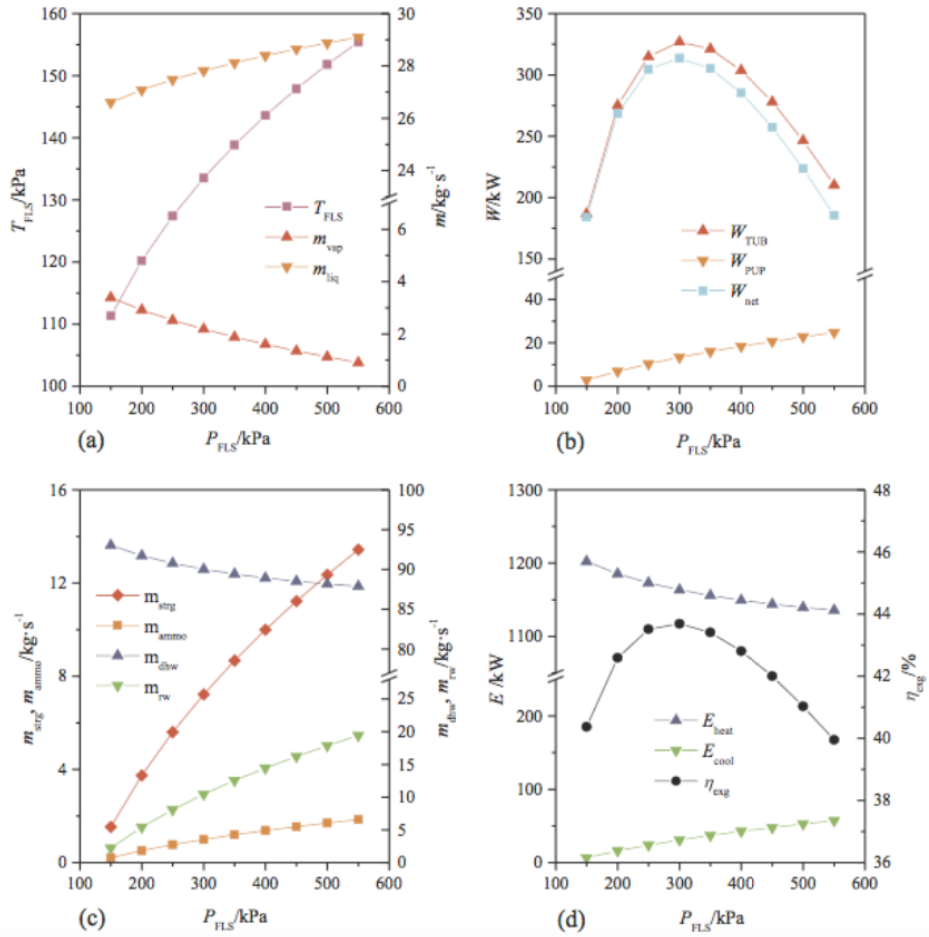
## ۳.۳ تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد سیستم پیشنهادی علی رحمی و همکاران

### ۱.۳.۳ تأثیرات شدت تابش خورشید

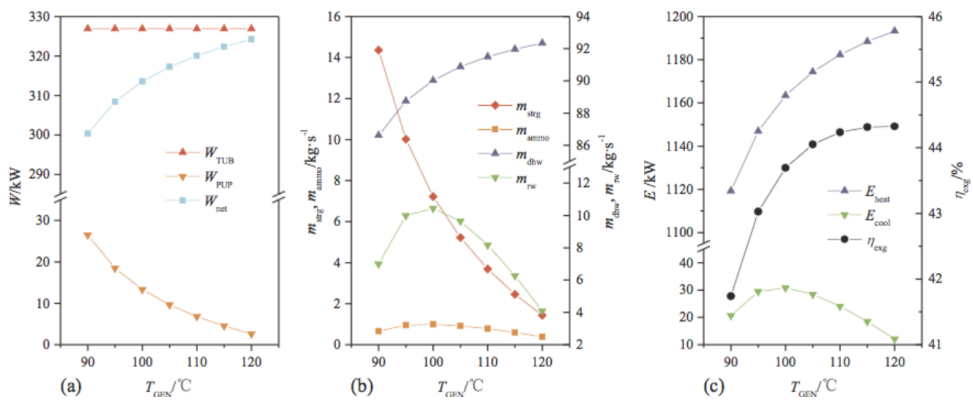
انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی مکمل برای سیال زمین‌گرمایی در سیستم پیشنهادی علی رحمی و همکاران [۱۲]، می‌تواند بازده بالاتری را برای سیستم ایجاد کند. می‌دانیم که افزایش دمای سیال زمین‌گرمایی با تولید برق رابطه مثبت دارد.

شکل ۱۷ دو ویژگی مهم ترمینول ۵۹ را توضیح می‌دهد. اول، درجه

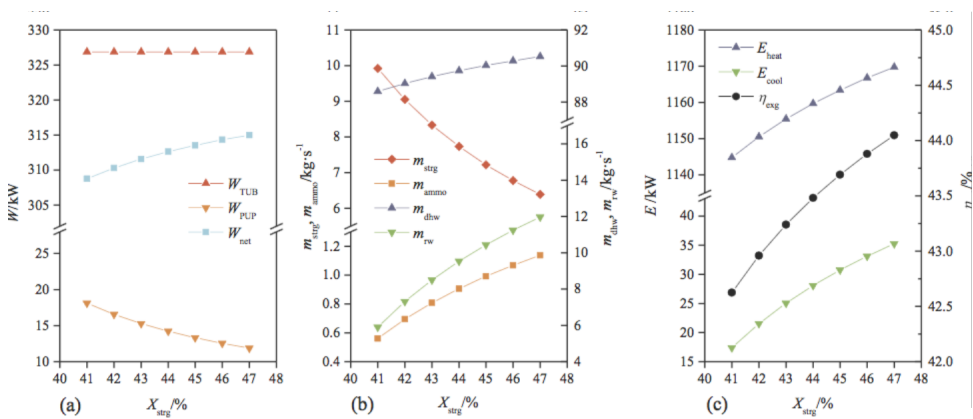




شکل ۱۴: تأثیر فشار فلاش بر عملکرد سیستم [۹].



شکل ۱۵: تأثیر دمای ژنراتور بر عملکرد سیستم [۹].



شکل ۱۶: تأثیر غلظت آمونیاک بر عملکرد سیستم [۹].

استفاده از الگوریتم NSGA-II بهینه شده است. بهترین نقطه دارای راندمان اکسرژی ۳۱/۹۹ درصد و بازده انرژی ۱۸/۶۹ درصد است. نتایج دیگر آنها به شرح زیر است:

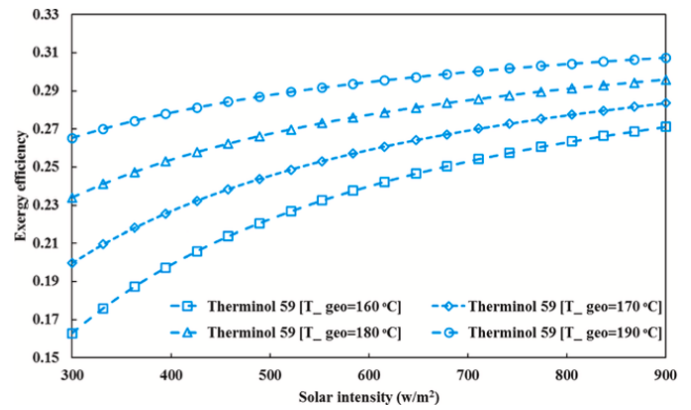
- در میان مایعات در نظر گرفته شده برای چرخه آلی رانکین، R123 دارای بالاترین راندمان انرژی و اکسرژی است.
- با فرض تعداد ثابت صفحات خورشیدی، هنگامی که دبی جریان ورودی افزایش می‌یابد، کار خروجی سیستم کاهش می‌یابد و بار خنک‌کننده افزایش می‌یابد.
- افزایش فشار ورودی توربین باعث افزایش تخریب اکسرژی می‌شود. عملکرد ترمودینامیکی و اقتصادی سیستم پیشنهادی ترکیبی خنک‌کننده، گرمایش و تولید توان با زیست توده، گاز طبیعی و انرژی زمین‌گرمایی [۱۳] بررسی شده است. تأثیر پارامترهای کلیدی (مانند نسبت گاز به جرم، نسبت تقسیم گاز دودکش) بر عملکرد سیستم اعمال شده است؛ علاوه بر این تجزیه و تحلیل حساسیت برخی از فاکتورهای اقتصادی (قیمت زیست توده، قیمت گاز طبیعی، نرخ بهره، ضریب زمان بهره‌برداری و عمر سرویس) مورد مطالعه قرار گرفته است. یافته‌های اصلی تحقیق را می‌توان به شرح زیر نشان داد: وجود گاز طبیعی موجب پیشرفت قابلیت اطمینان تأمین انرژی می‌شود و چگالی انرژی سیستم تأمین انرژی را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، وجود انرژی زمین‌گرمایی خروجی گرمایش را برای سیستم پیشنهادی افزایش می‌دهد.

نسبت گاز به جرم و نسبت تقسیم گاز دودکش تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم دارند. برق، گرمایش و سرمایش تولیدشده توسط سیستم پیشنهادی همگی با افزایش نسبت گاز به جرم افزایش می‌یابند. با افزایش نسبت تقسیم گاز دودکش، برق و سرمایش افزایش می‌یابند، در عوض، به دلیل کاهش گاز دودکش در مبدل حرارتی، خروجی گرمایش کاهش می‌یابد. راندمان انرژی کلی، با افزایش نسبت تقسیم و نسبت گاز به جرم افزایش می‌یابد و هنگامی که نسبت گاز به جرم از ۴ فراتر رود، دامنه فزاینده بازده کلی انرژی کاهش می‌یابد.

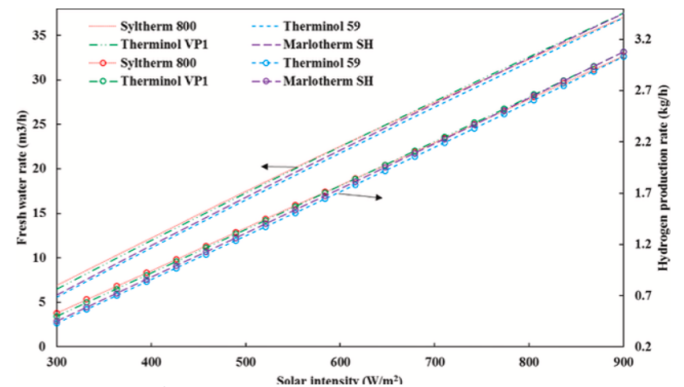
به طور کلی، سیستم ترکیبی خنک‌کننده، گرمایش و تولید توان پیشنهادی مبتنی بر زیست توده، گاز طبیعی و انرژی زمین‌گرمایی، استفاده ترکیبی از انرژی تجدیدپذیر و سوخت فسیلی را تحقق می‌بخشد، که یک رویکرد امیدوارکننده برای سیستم ترکیبی انرژی جدید را فراهم می‌کند [۱۴].

## مراجع

- [1] ASHRAE, ANSI. Standard 55-2004, thermal environmental conditions for human occupancy, atlanta: american society of heating, refrigerating, and air-conditioning engineers. Inc., USA, 2004.
- [2] Cheng, Yuanda, Niu, Jianlei, and Gao, Naiping. Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *Building and Environment*, 47:13-22, 2012.
- [3] Maerefat, M and Omidvar, A. *Thermal Comfort*. Kelid Amoozesh, 2008.
- [4] Katic, Katarina, Li, Rongling, and Zeiler, Wim. Ther-



شکل ۱۷: تأثیر شدت تابش بر اکسرژی در دماهای مختلف سیال زمین‌گرمایی [۱۲].



شکل ۱۸: تأثیر شدت تابش بر تولید هیدروژن و آب شیرین [۱۲].

• بر اساس شرایط طراحی، نتایج آنالیز ترمودینامیکی نشان می‌دهد که فشار بهینه در حدود ۳۰۰ کیلو پاسکال و دمای مطلوب ژنراتور در حدود ۱۲۰ درجه سانتیگراد است، که می‌تواند باعث حداکثر راندمان اکسرژی سیستم شوند. در حالی که فشار پشت توربین و فشار ستون اصلاح پایین‌تر و غلظت آمونیاک بالاتر در محلول قوی آمونیاک، بازده اقتصادی بالاتری از سیستم به همراه دارد، فشار تبخیر و نسبت ریفلکس یکسوکندنه تفاوت اندکی در بازده اکسرژی دارند.

در تجزیه و تحلیل انرژی سیستم پیشنهادی علی و همکاران [۱۱] مزیت بسیار خوبی در استفاده از سیستم تولید چندگانه با راندمان ۷۸ درصد در مقایسه با گزینه تولید تکی با راندمان تنها ۱۶/۴ درصد، نشان داده شد. از طرفی، در تجزیه و تحلیل اکسرژی نشان داده شد که برای تولید چندگانه، راندمان اکسرژی ۳۶/۶ درصد و برای تولید تکی ۲۶/۲ درصد می‌شود. همچنین، حدود ۷۵ درصد از تخریب اکسرژی در کلکتورهای خورشیدی اتفاق می‌افتد.

عملکرد سیستم پیشنهادی علی رحیمی و همکاران [۱۲] نیز به درجه حرارت اولیه مایعات زمین‌گرمایی، سرعت جریان، شدت خورشیدی، فشار ورودی توربین بخار، درجه حرارت نقطه بخار ژنراتور بخار و تعداد پنل‌های خورشیدی بستگی دارد. کلکتورهای پارابولیک خطی بیشترین تخریب اکسرژی را به وجود می‌آورند، از این رو برای بهبود عملکرد این قسمت از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر آن، آب گرمکن محلی، چیلر جذب و توربین بخار هم نقش مهمی در تخریب اکسرژی دارند. سیستم پیشنهادی با

- caused by wearing clothing. *Building and Environment*, 45(3):776-783, 2010.
- [10] Dongmei, Pan, Mingyin, Chan, Shiming, Deng, and Minglu, Qu. A four-node thermoregulation model for predicting the thermal physiological responses of a sleeping person. *Building and Environment*, 52:88-97, 2012.
- [11] Davoodi, Farzin, Hasanzadeh, Hasan, Zolfaghari, Seyed Alireza, and Maerefat, Mehdi. Developing a new individualized 3-node model for evaluating the effects of personal factors on thermal sensation. *Journal of thermal biology*, 69:1-12, 2017.
- [12] Kaynakli, Omer and Kilic, Muhsin. Investigation of indoor thermal comfort under transient conditions. *Building and Environment*, 40(2):165-174, 2005.
- [13] Foda, Ehab and Sirén, Kai. A new approach using the pierce two-node model for different body parts. *International journal of biometeorology*, 55(4):519-532, 2011.
- [14] Stolwijk, Jan A.J. A mathematical model of physiological temperature regulation in man. 1971.
- mophysiological models and their applications: A review. *Building and Environment*, 106:286-300, 2016.
- [5] Parsons, Ken. *Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance*. CRC press, 2014.
- [6] Fanger, Poul O et al. Thermal comfort. analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.*, 1970.
- [7] Gagge, Adolf P. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *Ashrae Trans.*, 77:247-262, 1971.
- [8] Zolfaghari, S.A. *Modification of standard thermal comfort models by using the frequency thermal analysis of the human body*. Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2010.
- [9] Zolfaghari, Alireza and Maerefat, Mehdi. A new simplified model for evaluating non-uniform thermal sensation