DOR: 20.1001.1.24234931.1399.7.2.15.4

سال هفتم، شماره دوم، پائیز و زمستان ۱۳۹۹، ص ص ۱۳۱- ۱۳۸

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

مقاله

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۲۳

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۳

مطالعه عملکرد انواع پیکره‌بندی موجود در سیکل‌های توربین‌گاز خورشیدی

علی امینایی[۱]، جاماسب پیرکندی[۲*]

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوافضا، تهران

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوافضا، تهران

* تهران، ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵، jpirkandi@mut.ac.ir

چکیده

روند کاهشی سوخت‌های فسیلی و نیاز به جایگزین کردن آنها با منابع جدید انرژی یکی از دغدغه‌های مهم حوزه انرژی به حساب می‌آید. از سوی دیگر افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی، استفاده از سوخت‌های فسیلی را محدود کرده است. در سال‌های اخیر منابع انرژی‌های جدید که سازگار با محیط‌زیست بوده و نرخ مصرف آنها با نرخ تولیدشان برابر می‌باشد، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از این منابع بی‌پایان طبیعت، انرژی حرارتی خورشید می‌باشد. استفاده از انرژی خورشیدی در سال‌های اخیر به شکل و شیوه‌های مختلفی توجه پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است. در این میان سیکل‌های توربین‌گاز خورشیدی در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته و استفاده از آن‌ها توجه کشورهای زیادی را به خود جلب کرده است. در این مقاله عملکرد انواع پیکره‌بندی جدید در سیکل‌های توربین‌گاز خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفته است. این دسته‌بندی‌ها شامل سیکل‌های مستقیم اتمسفریک و تحت فشار می‌باشد. از سوی دیگر در این تحقیق سعی شده است که سیکل‌های هیبریدی بر پایه توربین‌گاز خورشیدی نیز مورد بررسی قرار گیرند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از سیکل‌های توربین‌گاز خورشیدی علاوه بر کاهش مصرف سوخت، میزان آلایندگی هوا را نیز به شدت پایین می‌آورند.

کلیدواژگان: توربین‌گاز خورشیدی، دریافت کننده خورشیدی، سیستم مستقیم، اتمسفریک، تحت فشار.

Study of different configurations in solar gas turbine cycles

Ali Aminaei[1], Jamasb Pirkandi [2*]

- Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Iran.
- Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Iran.
* P.O.B. 15875-1774 Tehran, Iran, jpirkandi@mut.ac.ir

Received: 14 September 2019 Accepted: 2 February 2020

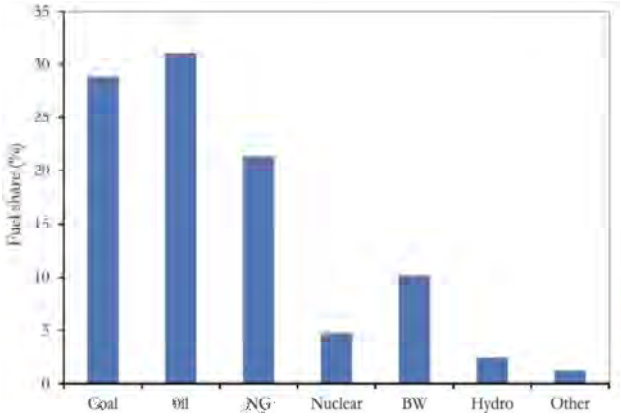
Abstract

The downward trend of fossil fuels and the need to replace them with new energy sources is one of the major concerns in the energy field. On the other hand, the increase in environmental pollutants has limited the use of fossil fuels. Therefore, new energy sources that are environmentally friendly and their consumption rates are equal to their production rates have attracted the attention of researchers. One of these endless sources is the solar thermal energy .In recent years, the use of solar energy in various forms and ways has attracted the attention of researchers. Meanwhile, solar turbine cycles have received much attention in recent years and their use has attracted the attention of many countries. In this paper, the performance of new configuration types available in solar turbine cycles is studied. These classifications include straight atmospheric and pressurized cycles. On the other hand, hybrid cycles based on solar turbines have also been studied. Studies show that the use of solar turbine cycles significantly reduces air pollution in addition to reducing fuel consumption.

Keywords: Solar gas turbine, Solar receiver, Direct system, Atmospheric, pressurized

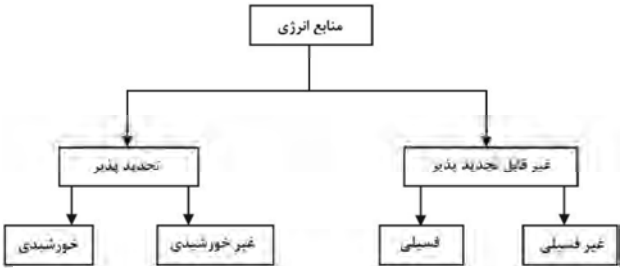
۱- مقدمه

بررسی‌ها نشان می‌دهد که منابع اصلی انرژی در جهان، سوخت‌های فسیلی مانند زغال‌سنگ، نفت و گاز می‌باشند. استفاده از سوخت‌های فسیلی یکی از عوامل مهم تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای است. افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو، میزان جذب اشعه مادون‌قرمز از سطح زمین را افزایش داده و این مساله باعث گرم‌تر شدن زمین می‌شود. دی‌اکسیدکربن در جو دلیل اصلی این تغییرات اقلیمی است[۱]. با توجه به این‌که بخش اعظم این گاز توسط سیستم‌های انرژی و نیروگاه‌های حرارتی تولید می‌شود، کاهش انتشار آن و کاهش تغییرات آب و هوایی، مستلزم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد[۱]. از این رو نگرانی‌ها در مورد اثرات منفی زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی ناشی از به‌کارگیری این منابع انرژی وجود دارد. در سال‌های اخیر به علت رشد جمعیت و رشد اقتصادی جهان، تقاضا برای استفاده از این نوع سوخت‌ها افزایش یافته است. در نتیجه تحقیقات و تلاش‌های توسعه‌ای در دنیا به سمت استراتژی‌های پایدار جهت تأمین و مصرف انرژی است. در شکل ۱ درصد استفاده از منابع انرژی در جهان ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سوخت‌های فسیلی مانند نفت، ذغال سنگ و گاز طبیعی در صدر مصرف انرژی جهان قرار دارند.



شکل ۱ درصد استفاده از منابع انرژی در جهان[۱]

منابع انرژی به‌طور گسترده‌ای به دو دسته تجدیدپذیر و غیر قابل تجدید تقسیم‌بندی می‌شوند. بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر، یک رکن مهم در تولید انرژی پایدار است. منابع انرژی تجدیدپذیر خود را از طریق روش‌های طبیعی دوباره بازیابی می‌کنند و هنگامی که نرخ مصرف بالا می‌رود، می‌توانند این تقاضای انرژی را پاسخگو باشند[۱]. به طور کلی، این منابع را می‌توان به دو دسته خورشیدی و غیرخورشیدی (مانند باد، زمین گرمایی، جزر و مد و ....) طبقه‌بندی کرد. امکان استفاده از انرژی خورشیدی به طور مستقیم از طریق فن‌آوری‌های خورشیدی فتوولتائیک یا حرارتی امکان‌پذیر می‌باشد. در شکل ۲ خلاصه‌ای از طبقه‌بندی منابع انرژی ارائه شده است.

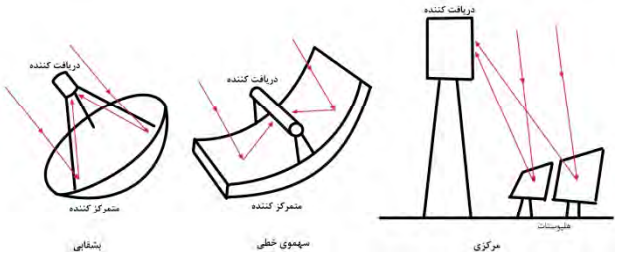


شکل ۲ طبقه‌بندی منابع انرژی[۱]

در میان انرژی‌های تجدیدپذیر خورشید به عنوان یک منبع بی‌پایان انرژی مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. میانگین انرژی خورشیدی که به جو زمین می‌رسد ۳۵۳/۱ کیلووات بر هر مترمربع است[۲]. از این مقدار تنها مقدار اندکی از آن یعنی یک کیلووات بر مترمربع قابل دریافت و بهره‌برداری است. این مقدار در طی دو ساعت و در ظهر روزهای گرم تابستان قابل دریافت است. لازم به ذکر است که در بیشتر نواحی زمین این رقم به ۰/۲ کیلووات بر مترمربع نیز تنزل می‌یابد[۲]. استفاده از انرژی خورشیدی در کنار سایر سیستم‌های تولید توان موضوع جدیدی است که طی سالیان گذشته مورد توجه قرار گرفته است. توربین‌های گاز خورشیدی، توربین بخار خورشیدی، دودکش خورشیدی، دیوار خورشیدی و ... همگی از جمله سیستم‌های ترکیبی هستند که برای کاهش مصرف سوخت فسیلی، از انرژی خورشیدی بهره می‌برند. در این میان با توجه به کاربرد گسترده توربین‌گاز جهت تولید برق در نیروگاه‌ها و سیستم‌های تولید همزمان، استفاده از انرژی خورشیدی در آنها به شدت مورد توجه قرارگرفته است. این سیستم‌های جدید تحت عنوان توربین‌های گاز خورشیدی بوده و در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. هدف عمده این پژوهش مطالعه انواع پیکره‌بندی موجود در سیکل‌های توربین‌گاز خورشیدی می‌باشد.

۲- معرفی توربین‌گاز خورشیدی

توربین‌های گاز خورشیدی مشابه توربین‌های‌گاز نیروگاهی می‌باشند و از سه جزء اصلی کمپرسور، محفظه احتراق و توربین تشکیل شده‌اند. نقطه تمایز توربین گازهای خورشیدی با نوع نیروگاهی، وجود متمرکز کننده خورشیدی در ساختار آن می‌باشد. متمرکز کننده قلب سیکل جدید معرفی شده بوده و وظیفه آن افزایش دما هوای ورودی به محفظه احتراق است. این امر باعث کاهش مصرف سوخت در سیستم و پایین آمدن نرخ آلایندگی در آن خواهد شد. متمرکز کننده‌های خورشیدی به سه دسته متمرکز کننده سهموی خطی، متمرکز کننده مرکزی و متمرکز کننده بشقابی تقسیم‌بندی می‌شوند. در شکل ۳ شماتیکی از انواع متمرکز کننده‌های خورشیدی ارائه شده است.



شکل ۳ شماتیک انواع دریافت‌کننده‌های خورشیدی

در ادامه این مقاله به معرفی انواع متمرکز کننده‌های خورشیدی و نحوه قرارگیری آن‌ها در سیکل توربین‌گاز خورشیدی پرداخته می‌شود.

۲-۱- متمرکز کننده سهموی خطی

در حال حاضر تکنولوژی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از متمرکز کننده‌ی سهومی خطی، قابل توجه‌ترین روش در بین روش‌های حرارتی برقی برای تولید انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. این تکنولوژی برای اولین بار از سال ۱۹۸۴ در صحرای مجاو کالیفرنیای آمریکا به کار گرفته شد ولی بعدها هم به

صورت خورشیدی و هم به صورت هیبرید در کشورهایی مانند اسپانیا، مصر، مراکش و عمارات به کار گرفته شد. این نیروگاه‌ها که بر اساس ویژگی‌های آب و هوای روزانه کار می‌کنند، حدود ۱۴ تا ۸۰ مگاوات برق تولید می‌کنند. در این متمرکز کننده‌ها جهت تمرکز پرتوهای خورشید از منعکس‌کننده‌های که به صورت سهموی خطی می‌باشند، استفاده می‌شود. دریافت‌کننده به صورت یک لوله در خط کانونی منعکس‌کننده‌ها قرار دارد. انرژی خورشیدی توسط یک مایع که اغلب نوعی روغن می‌باشد و در داخل لوله‌های واقع در امتداد خط کانونی سهموی‌ها قرار دارد، جذب می‌شود. مایع گرم شده وارد یک بازیاب حرارتی شده و سیال ثانویه عبوری از آن را گرم می‌کند. در این متمرکز کننده‌ها حداکثر دمای کاری روغن در حدود ۴۵۰ درجه سلسیوس می‌باشد[۳]. در شکل ۴ تصویری از یک دریافت‌کننده سهموی خطی ارائه شده است.

شکل ۴ متمرکز کننده سهموی خطی[۴]

۲-۲- متمرکز کننده مرکزی

در این سیستم پرتوهای خورشیدی توسط مزرعه‌ای متشکل از تعداد زیادی آینه منعکس‌کننده به نام هلیوستات، بر روی یک دریافت‌کننده که در بالای برج بلندی استقرار یافته است، متمرکز می‌گردد. روی محل تمرکز پرتوها، انرژی گرمایی زیادی به دست می‌آید. این انرژی گرمایی به‌وسیله یک سیال عامل وارد بازیاب حرارتی شده و باعث گرم شدن سیال مجاور خود می‌شود. دمای سیال عامل ناقل انرژی حرارت می‌تواند تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس باشد[۳]. در شکل ۵ تصویری از یک دریافت‌کننده مرکزی ارائه شده است. با توجه به دمای بالا در متمرکز کننده خورشیدی این نوع سیستم‌ها قابلیت مناسبی برای ترکیب با سیکل توربین‌گاز خورشیدی دارند.

شکل ۵ متمرکز کننده مرکزی[۵]

۲-۳- متمرکز کننده بشقابی

متمرکز کننده‌های بشقابی جهت تمرکز نقطه‌ای پرتوهای خورشیدی از یک شلجمی بشقابی استفاده می‌کنند. گیرنده‌های حرارتی در کانون شلجمی قرار داشته و سیال جاری در گیرنده کانونی آن، انرژی گرمایی را جذب می‌کند. دمای به دست آمده در دریافت‌کننده بشقابی به بیش از ۱۵۰۰ درجه سلسیوس می‌رسد[۳]. بر اساس ظرفیت سیال عبوری، از این متمرکز کننده خورشیدی می‌توان به‌صورت تک یا چندتایی نیز استفاده کرد. این متمرکز کننده‌ها قابلیت خوبی برای ترکیب با موتورهای استرلینگ دارند. در این سیستم رديابی همواره سطح متمرکز کننده را در مقابل خورشید قرار می دهد تا نور دقیقاً در دریافت کننده موتور استرلینگ تمرکز یابد. بعلاوه سیستم کنترل با دریافت اطلاعات از سنسورهای مختلف و همچنین موتور استرلینگ، در هر وضعیت فرمان مناسبی برای کنترل سیستم ارسال می نماید.

شکل ۶ متمرکز کننده بشقابی[۵]

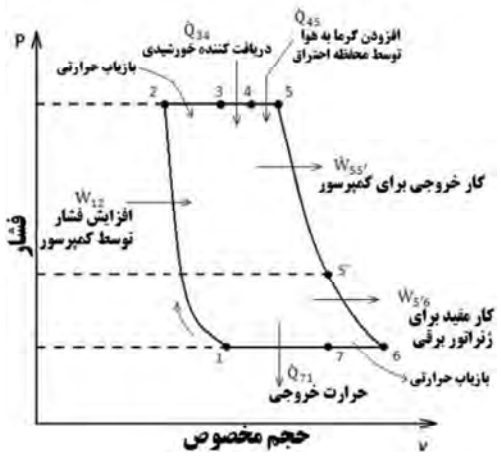
۲-۴- مقایسه متمرکز کننده‌های خورشیدی

بر اساس نیاز به دمای دریافتی از تابش خورشید و فضای قرارگیری دستگاه، از سه نوع متمرکز کننده معرفی شده می‌توان استفاده کرد. تفاوت اصلی انواع متمرکزکننده‌های خورشیدی معرفی شده در حداکثر دمای دریافتی از خورشید در شدت‌های تابش یکسان می‌باشد. بیشترین میزان دما توسط متمرکز کننده بشقابی دریافت می‌شود و بعد از آن به ترتیب متمرکز کننده مرکزی و سهموی خطی بیشترین دما را دریافت می‌کنند. این مساله سبب تعیین محل قرارگیری انواع متمرکز کننده‌های خورشیدی در چرخه توربین‌گاز می‌شود. اغلب از متمرکز کننده سهموی خطی برای پیش‌گرمایش هوای ورودی به محفظه احتراق استفاده می‌شود. با توجه به بالا بودن دمای دریافتی از تابش خورشید در متمرکز کننده‌های بشقابی و مرکزی، در بیشتر موارد این متمرکز کننده‌ها جایگزین محفظه احتراق در سیکل توربین‌گاز می‌شوند. برای جبران نوسانات دمایی در طول روز، از یک محفظه پس‌سوز که به طور موازی در کنار متمرکز کننده خورشیدی قرار دارد، استفاده می‌شود.

۳- سیکل ترمودینامیکی توربین‌گاز خورشیدی

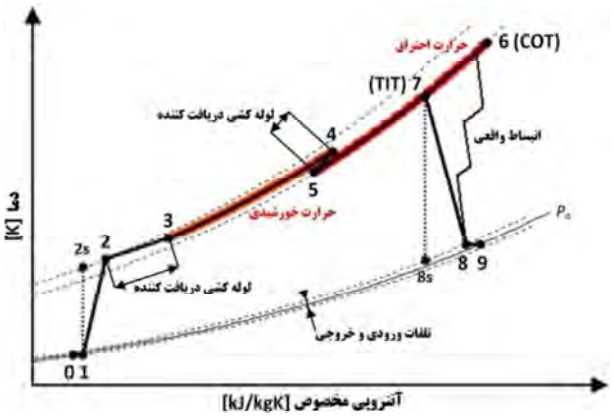
نمودار تغییرات فشار - حجم سیکل توربین‌گاز خورشیدی ایده‌آل و نمودار تغییرات دما - آنتروپی این سیکل در حالت ایده‌آل و واقعی در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود فرآیند

حرارت دهی در این سیکل در سه مرحله انجام می‌شود. هوای خروجی از کمپرسور (نقطه ۲) ابتدا در بازیاب حرارتی گرم شده (فرآیند ۲ تا ۳) و سپس به ترتیب در دریافت کننده خورشیدی (فرآیند ۳ تا ۴) و محفظه احتراق گرم (فرآیند ۴ تا ۵) می‌شود. هر سه فرآیند در حالت ایده‌آل در فشار ثابت رخ می‌دهد.



شکل ۷ تغییرات فشار – حجم سیکل توربین‌گاز خورشیدی ایده‌آل[۶]

استفاده از بازیاب حرارتی و دریافت‌کننده خورشیدی موجب کاهش حرارت منتقل شده در محفظه احتراق می‌شود. این مسئله باعث افزایش بازده سیکل و کاهش آلایندگی در آن خواهد شد. شکل ۸ بیانگر رفتار یک سیکل ترمودینامیکی واقعی توربین‌گاز خورشیدی می‌باشد[۶]. در این چرخه هوای فشرده پس از گرم شدن در دریافت‌کننده خورشیدی از طریق لوله‌هایی به سمت محفظه احتراق ارسال می‌شوند. همان‌طور که در نمودار شکل ۸ مشخص است، در مسیر بین کمپرسور و دریافت‌کننده خورشیدی دمای هوا افزایش و فشار آن کاهش می‌یابد. در مسیر خروجی متمرکز کننده تا محفظه احتراق نیز دما و فشار هوا کاهش ناچیزی دارد که این مسئله تأثیر زیادی بر عملکرد سیستم ندارد. عایق‌کاری لوله‌های خروجی از دریافت‌کننده خورشیدی تا حد امکان این کاهش دما را جبران می‌کند[۶].

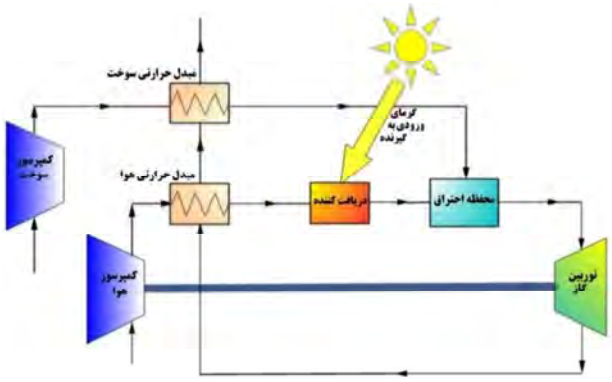


شکل ۸ تغییرات دما – آنتروپی سیکل توربین‌گاز خورشیدی ایده‌آل و واقعی[۶]

۴- معرفی پیکربندی‌های مختلف سیکل توربین‌گاز خورشیدی

سیکل توربین‌گاز خورشیدی به دلیل استفاده از انرژی خورشید از قابلیت‌های بالایی برخوردار می‌باشد. تنوع در چیدمانی تجهیزات داخل سیکل از جمله دریافت کننده خورشیدی و محفظه احتراق یکی از مزایای مهم این سیکل می‌باشد[۷]. انواع رایج پیکربندی توربین‌های خورشیدی را می‌توان به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی کرد. هر کدام از این دسته‌ها بر اساس محل قرار گیری دریافت کننده خورشیدی به دو گروه اتمسفریک و تحت فشار نیز دسته بندی می‌شوند.

سیکل توربین‌گاز ساده متشکل از کمپرسور، محفظه احتراق، توربین و ژنراتور جهت تولید برق می‌باشد. چیدمان یک توربین‌گاز خورشیدی ساده در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود هوا با عبور از کمپرسور متراکم شده و با فشار بالا آن را ترک می‌کند. در ادامه هوا با عبور از یک بازیاب حرارتی گرم شده و سپس وارد دریافت کننده خورشیدی می‌گردد. پس از بالا رفتن دمای هوا در اثر انرژی خورشیدی در ادامه مسیر هوای داغ وارد محفظه احتراق شده و پس از انجام فرآیند احتراق با دمای حداکثر وارد توربین می‌گردد. گازهای داغ ورودی به توربین پس از تولید انرژی مکانیکی با فشار و دمای پایین از توربین خارج شده و وارد بازیاب‌های حرارتی هوا و سوخت می‌گردند. این دو بازیاب وظیفه گرم کردن هوای خروجی از کمپرسور و سوخت ورودی به محفظه احتراق سیکل را بر عهده دارند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود دریافت کننده خورشیدی و محفظه احتراق در بالادست توربین قرار داشته و در فشار بالا کار می‌کنند.



شکل ۹ چیدمان سیکل ساده توربین‌گاز خورشیدی[۸]

در ادامه این بخش انواع پیکربندی‌های استفاده شده در سیکل توربین‌گاز خورشیدی معرفی خواهد شد.

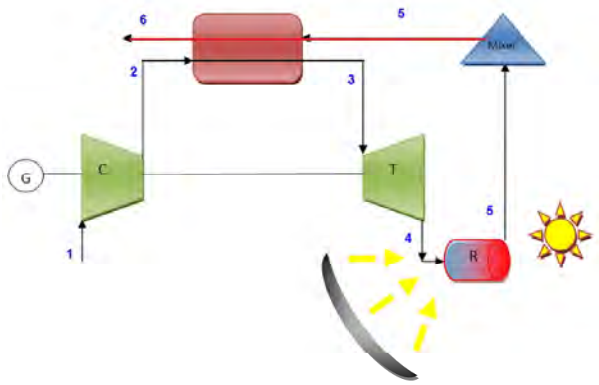
۴-۱-پیکربندی‌های مستقیم

در این نوع پیکربندی‌ها دریافت کننده خورشیدی به صورت مستقیم در سیکل توربین‌گاز قرار دارد. هوای عبوری از سیکل به طور مستقیم از داخل دریافت کننده خورشیدی عبور کرده و گرم می‌شود. با توجه به محل قرارگیری دریافت کننده خورشیدی پیکربندی مستقیم به دو دسته اتمسفریک و تحت فشار تقسیم بندی می‌شود. در نوع تحت فشار دریافت کننده در بالادست توربین بوده و در نوع اتمسفریک دریافت کننده در پایین دست توربین قرار دارد.

۴-۱-۱- پیکربندی مستقیم اتمسفریک

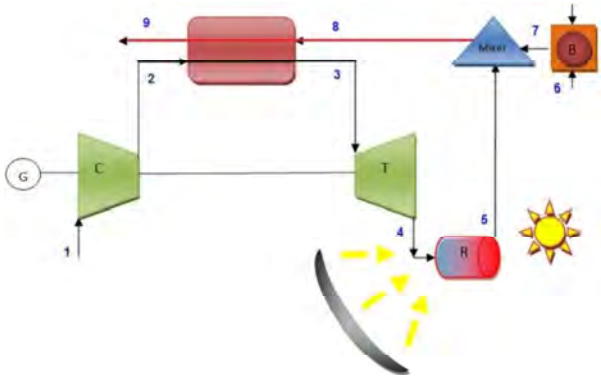
در پیکربندی مستقیم اتمسفریک، دریافت کننده خورشیدی همواره بعد از توربین قرار داشته و فشار سیال عبوری از آن نزدیک یا برابر فشار اتمسفر

است. در این پیکربندی دریافت کننده خورشیدی دمای گازهای خروجی از توربین را افزایش داده تا با عبور از مبدل حرارتی باعث افزایش دمای سیال ورودی به توربین یا محفظه احتراق شوند. در این پیکربندی می‌توان محفظه احتراق را قبل از توربین یا بعد از توربین قرار داد. در چیدمان ارائه شده در شکل ۱۰ محفظه احتراق حذف شده و دریافت کننده خورشیدی تنها منبع حرارتی در چرخه توربین‌گاز خورشیدی می‌باشد. از مزیت‌های این پیکربندی می‌توان به حذف مصرف سوخت و عدم انتشار آلاینده‌های زیست محیطی اشاره کرد و از معایب آن نیز می‌توان به وابستگی شدید سیستم به تابش خورشید اشاره کرد.



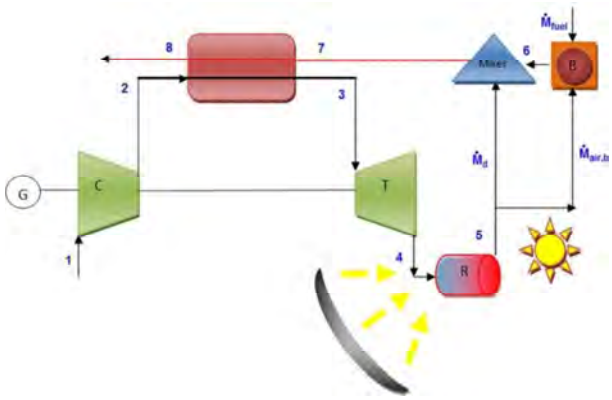
شکل ۱۰ توربین‌گاز خورشیدی اتمسفریک فاقد محفظه احتراق[۷]

با توجه به متغیر بودن میزان شدت تابش خورشید در طی روز برای جبران کاهش حرارت، می‌توان از محفظه احتراق استفاده کرد. در پیکربندی ارائه شده در شکل ۱۱ محفظه احتراق بعد از دریافت کننده خورشیدی و برای جبران کاهش حرارت قرار گرفته است.



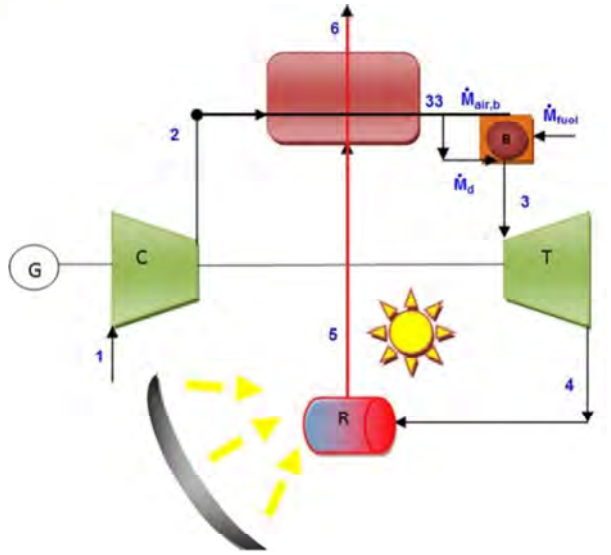
شکل ۱۱ توربین‌گاز خورشیدی اتمسفریک با محفظه احتراق بعد از توربین[۷]

شماتیک یک پیکربندی مستقیم اتمسفریک دیگری در شکل ۱۲ ارائه شده است. این پیکربندی همانند شکل ۱۱ دارای یک محفظه احتراق بعد از دریافت کننده خورشیدی می‌باشد. تفاوت پیکربندی‌های شکل ۱۱ و ۱۲ در نحوه قرارگیری محفظه احتراق آنها می‌باشد. در شکل ۱۱ هوای احتراق از بیرون تامین شده اما در شکل ۱۲ هوای احتراق از هوای پیش‌گرم شده بعد از دریافت کننده خورشیدی تامین می‌شود. پیش‌گرم کردن هوا منجر به کاهش سوخت مصرفی در محفظه احتراق خواهد شد.



شکل ۱۲ توربین‌گاز خورشیدی اتمسفریک با محفظه احتراق بعد از توربین همراه با تأمین هوای احتراق از سیال عبوری از دریافت‌کننده خورشیدی[۷]

در شکل ۱۳ یک نمونه دیگر از پیکربندی مستقیم اتمسفریک ارائه شده است. در این پیکربندی برای جبران کاهش حرارت دریافتی در دریافت کننده خورشیدی، محفظه احتراق همراه با مسیر کنارگذر قبل از توربین قرار گرفته است. این سیکل تقریباً مشابه سیکل پایه نشان داده شده در شکل ۹ می‌باشد و تنها فرق آن محل قرار گیری دریافت کننده خورشیدی است. در این سیکل محفظه احتراق تحت فشار بوده و در بالادست توربین قرار دارد. این نحوه قرار گیری محفظه احتراق این امکان را فراهم می‌کند که در صورت نیاز و در مواقعی که تابش خورشد کم شده است، محفظه احتراق وارد مدار کاری شود. این امر باعث کاهش چشم‌گیر تولید گازهای آلاینده خواهد شد. از طرف دیگر با توجه به این که هوای ورودی به محفظه احتراق از طریق مبدل حرارتی با گازهای خروجی از توربین و عبوری از دریافت کننده پیش گرم می شود، مصرف سوخت سیستم کاهش می‌یابد.

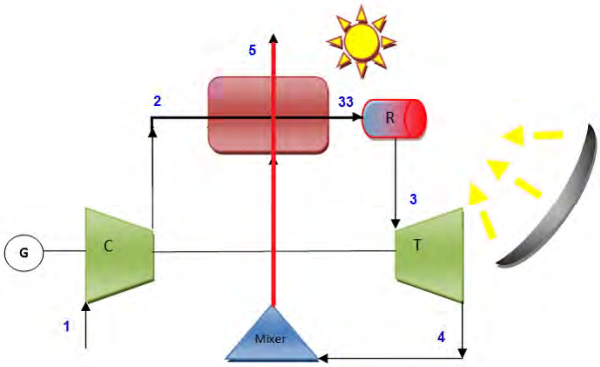


شکل ۱۳ توربین‌گاز خورشیدی اتمسفریک همراه با محفظه احتراق قبل از توربین[۷]

۲-۱-۴-پیکربندی مستقیم تحت فشار

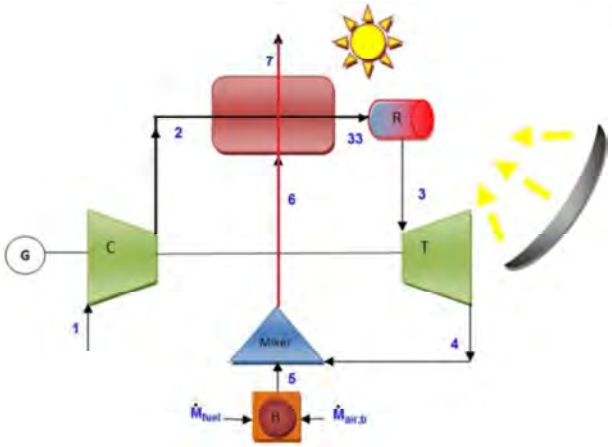
در پیکربندی مستقیم تحت فشار، همواره دریافت کننده خورشیدی قبل از توربین قرار گرفته و فشار سیال عبوری از آن برابر فشار خروجی از کمپرسور

است. در این پیکربندی سیال عامل قبل از ورود به توربین توسط دریافت کننده خورشیدی گرم می‌شود. در این چیدمان محفظه احتراق بعد از توربین یا دریافت کننده خورشیدی و به صورت‌های سری یا موازی قرار می‌گیرد. در شکل ۱۴ شماتیکی از پیکربندی توربین‌گاز خورشیدی مستقیم تحت فشار و فاقد محفظه احتراق نشان داده شده است. مزایا و معایب این چیدمان همانند پیکربندی ارائه شده در شکل ۱۰ می باشد.



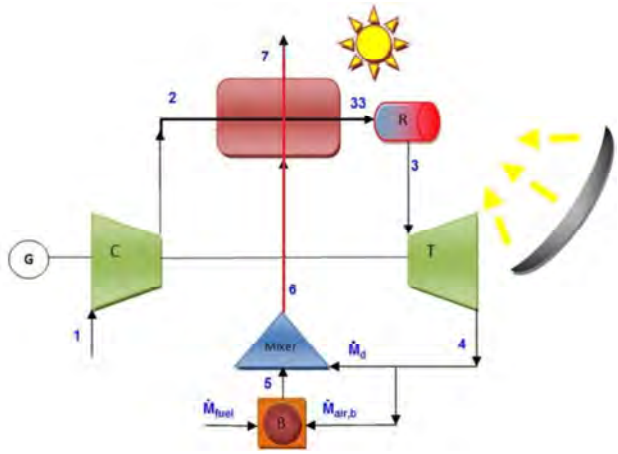
شکل ۱۴ توربین‌گاز خورشیدی تحت فشار فاقد محفظه احتراق [۷]

چیدمان‌های دیگری از نوع مستقیم تحت فشار در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است که در آنها محفظه احتراق بعد از توربین قرار دارد. در پیکربندی ارائه شده در شکل ۱۵ هوای احتراق از بیرون تامین شده و در چیدمان شکل ۱۶ هوای احتراق از هوای گرم خروجی توربین تامین شده است که این مساله منجر به کاهش مصرف سوخت در محفظه احتراق می‌شود.

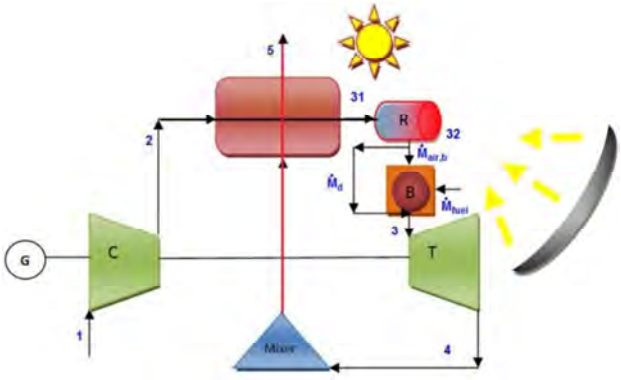


شکل ۱۵ توربین‌گاز خورشیدی تحت فشار با محفظه احتراق بعد از توربین[۷]

در شکل ۱۷ یک نمونه دیگر از سیکل مستقیم تحت فشار ارائه شده است. در این سیکل محفظه احتراق بعد از دریافت کننده و قبل از توربین بوده و یک مسیر کنار گذر برای آن لحاظ شده است. وجود مسیر کنار گذر به این منظور است که در زمان اوج شدت تابش خورشید هیچ احتراقی صورت نگرفته و همانند چیدمان شکل ۱۴ تنها منبع حرارتی دریافت کننده خورشیدی می‌باشد. هم زمان با کاهش شدت تابش و افت حرارت دریافتی از خورشید، محفظه احتراق وارد مدار کاری شده و کاهش تابش خورشید را جبران خواهد کرد. از طرفی با توجه به این که هوای ورودی به محفظه احتراق همواره توسط مبدل حرارتی قبل از دریافت کننده خورشیدی پیش‌گرم می‌شود، در این حالت میزان مصرف سوخت به کمترین حد خود خواهد رسید. یک نمونه دیگر از این نوع سیستم تحت فشار مستقیم در شکل ۱۸ نیز نشان داده شده است. در این حالت مسیر بای پس لحاظ نشده و امکان حذف محفظه احتراق وجود ندارد. در این حالت باید بر اساس حداکثر دمای ورودی به توربین پاشش سوخت در محفظه احتراق را کنترل نمود. مشکل عمده این سیکل مساله کنترل دقیق دمای گازهای خروجی از محفظه احتراق می‌باشد.



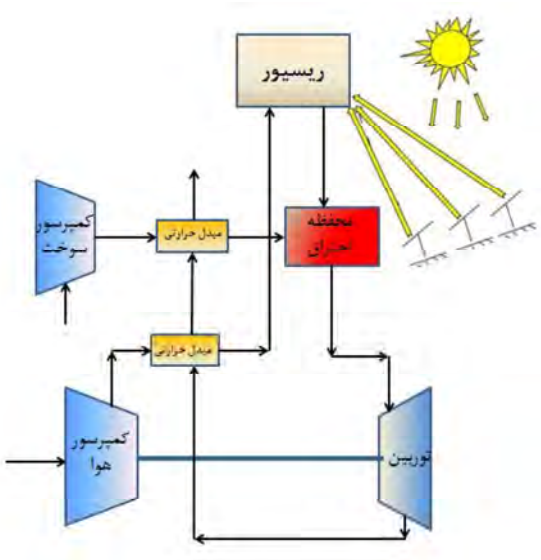
شکل ۱۶ توربین‌گاز خورشیدی تحت فشار با محفظه احتراق بعد از توربین و همراه با تأمین هوای احتراق از سیال خروجی از توربین[۷]



شکل ۱۷ توربین‌گاز خورشیدی تحت فشار با محفظه احتراق قبل از توربین و مسیر کنار گذر[۷]

۲-۴- پیکربندی‌های غیرمستقیم

در این نوع پیکربندی سیکل توربین‌گاز و دریافت کننده خورشیدی کاملاً از هم مجزا بوده و سیال عامل آنها نیز می‌تواند متفاوت باشد. ارتباط این دو سیکل اغلب از طریق یک مبدل حرارتی مشترک می‌باشد. در این سیستم‌ها هوای خروجی از کمپرسور در یک بازیاب حرارتی توسط سیال عامل دیگری که اغلب روغن می‌باشد پیش گرم می‌گردد. وظیفه گرم شدن روغن توسط یک نیروگاه حرارتی خورشیدی انجام می‌شود. این نیروگاه حرارتی می‌تواند از هر نوع متمرکز کننده خورشیدی بهره ببرد. با توجه به هزینه بالا و راندمان پایین کمتر از این نوع پیکربندی در سیکل‌های توربین‌گاز استفاده شده و بیشتر در سیکل‌های بخار از این نوع استفاده می‌شود.



شکل ۱۸ توربین‌گاز خورشیدی تحت فشار با محفظه احتراق قبل از توربین و بدون مسیر کنار گذر [۷]

۳-۴- پیکربندی هیبریدی

این نوع پیکربندی از همراهی این سیکل با سایر چرخه‌های تولید انرژی (مانند سیکل بخار و ...) به وجود می‌آید. رایج‌ترین نوع پیکربندی هیبریدی ترکیب چرخه رانکین و برایتون می‌باشد[۹]. چرخه رانکین و برایتون از چرخه‌های تولید توان رایج در نیروگاه‌ها می‌باشند. ترکیب این دو چرخه ترمودینامیکی باعث افزایش راندمان کلی سیکل نسبت به چرخه توربین‌گاز و بخار تنها می‌شود. با توجه به این موضوع ترکیب توربین‌گاز خورشیدی و سیکل رانکین ایده جدیدی است که در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. گازهای داغ خروجی از چرخه توربین‌گاز ابتدا وارد یک بازیاب حرارتی شده و جهت تولید بخار در سیکل رانکین مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترکیب چرخه رانکین و برایتون به‌طور معمول به دو صورت انجام می‌شود[۹]. این دو صورت براساس نحوه قرار گیری دریافت کننده خورشیدی به پیکربندی ترکیبی مستقیم و غیرمستقیم دسته‌بندی می‌شوند. از سوی دیگر در این چرخه هیبریدی دریافت‌کننده خورشیدی می‌تواند در بالادست توربین‌بخار یا در بالادست توربین‌گاز نیز قرار گیرد.

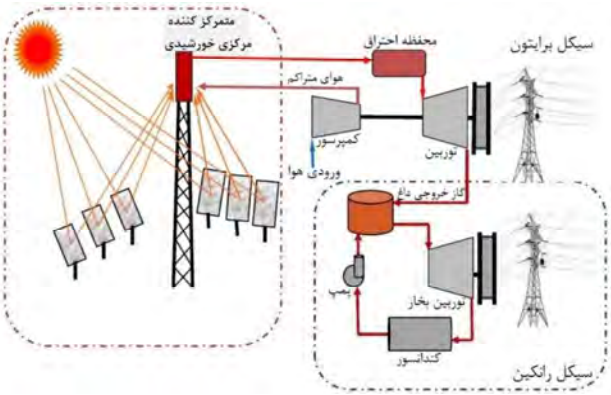
۱-۳-۴- پیکربندی هیبریدی مستقیم

این پیکربندی حاصل ترکیب یک سیکل توربین‌گاز خورشیدی مستقیم تحت فشار با یک سیکل بخار ساده می‌باشد. در شکل ۱۹ شماتیکی از این نوع پیکربندی ارائه شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود گازهای خروجی از توربین جهت تولید بخار سیکل رانکین وارد یک مولد بخار می‌گردند. راندمان سیکل هیبریدی معرفی شده بالاتر ازسیکل‌های ترکیبی ساده بوده و دارای آلایندگی کمتری نیز می‌باشد.

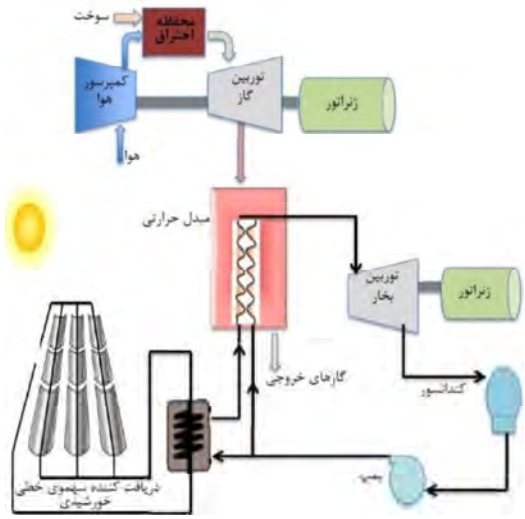
۲-۳-۴- پیکربندی هیبریدی غیرمستقیم

در سیستم هیبریدی غیرمستقیم حرارت دریافت شده از انرژی خورشیدی توسط یک سیال واسط و از طریق مبدل حرارتی به سیال عامل چرخه ترکیبی منتقل می‌شود. محل قرارگیری دریافت کننده خورشیدی در این چیدمان متفاوت است. در برخی از این نوع سیستم‌های هیبریدی متمرکز کننده خورشیدی در سیکل توربین‌گاز تاثیر گذاشته و دمای هوای این سیکل را بالا می‌برد و در برخی دیگر نیز بر سیکل بخار موثر بوده و دمای سیال داخل سیکل را زیاد می‌کند.

در پیکربندی ارائه‌شده در شکل ۲۰ دریافت‌کننده خورشیدی با سیکل بخار ترکیب‌شده و دمای سیال عامل داخل سیکل را افزایش می‌دهد. در این سیکل هیبریدی دریافت‌کننده خورشیدی اغلب از نوع سهموی خطی بوده و در موازات مبدل حرارتی بین دو چرخه قرار گرفته است. این پیکربندی متشکل از دو چرخه تولید توان می‌باشد. چرخه اول توربین‌گاز ساده و چرخه دوم سیکل بخار است. در چرخه دوم سیال عامل کندانس شده بعد از عبور از پمپ وارد دو مسیر مجزا می‌شود. در یک مسیر سیال وارد مبدل حرارتی اصلی شده و توسط گازهای خروجی از سیکل توربین‌گاز تبدیل به بخار سوپرهیت می‌شود. در مسیر دوم بعد از پمپ سیال وارد یک مبدل حرارتی ثانویه شده و توسط سیال واسط کلکتورهای خورشیدی که اغلب روغن داغ می‌باشد، گرم می‌شود. سیال پس از گرم شدن توسط انرژی خورشیدی در ادامه وارد مبدل اصلی شده و مجدداً گرم شده و تبدیل به بخار سوپرهیت می‌شود. در خروج مبدل حرارتی اصلی دو جریان بخار سوپرهیت با هم مخلوط شده و به سمت توربین بخار حرکت می‌کنند. استفاده از این طرح هیبریدی سبب شده تا بار حرارتی مربوط به تولید بخار در مبدل حرارتی اصلی کم شده و بخشی از آن توسط کلکتورهای خورشیدی تامین گردد.

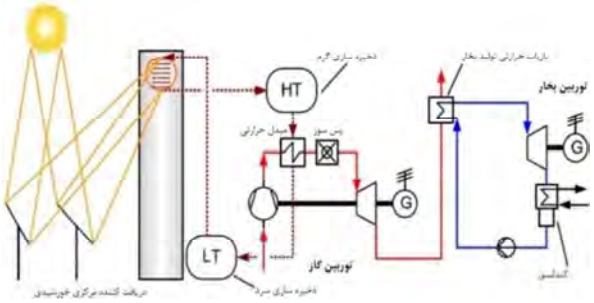


شکل ۱۹ ترکیب هیبریدی مستقیم توربین‌گاز خورشیدی و سیکل رانکین[۱۰]



شکل ۲۰ ترکیب هیبریدی غیرمستقیم توربین‌گاز، سیکل رانکین و نیروگاه خورشیدی سهموی خطی[۱۱]

در پیکربندی دیگری که در شکل ۲۱ نشان داده شده است، سیستم هیبریدی متشکل از یک سیکل توربین‌گاز با دریافت کننده خورشیدی غیرمستقیم و یک سیکل بخار می‌باشد. در این سیکل متمرکز کننده خورشیدی با سیکل توربین‌گاز در ارتباط می‌باشد. همانطور که در بخش ۴-۲ توضیح داده شد، هوای گرم خروجی از کمپرسور توسط سیال گرم شده در سیستم متمرکز کننده مرکزی داغ شده و سپس وارد محفظه احتراق می‌شود. گازهای خروجی از توربین نیز در ادامه وارد یک مبدل حرارتی مشترک با سیکل بخار شده و جهت تولید بخار در آن استفاده می‌شوند.



شکل ۲۱ ترکیب هیبریدی غیرمستقیم توربین‌گاز خورشیدی و سیکل رانکین[۱۱]

با توجه به موارد فوق در سال‌های اخیر تحقیقات جدیدی در حوزه توربین‌های گاز خورشیدی انجام شده و رشد تحقیقات در این زمینه رو به افزایش است [۱۲ تا ۱۴]. تعیین محل متمرکز کننده خورشیدی یکی از چاش‌های عمده در تحلیل این سیستم‌ها می‌باشد. از سوی دیگر لزوم انجام تحلیل‌های اقتصادی و اگزرژی در این سیستم‌های هیبریدی یک مساله مهم دیگری است که باید مورد توجه قرار گیرد.

۵- جمع بندی

هدف اصلی این مقاله مطالعه و بررسی عملکرد انواع پیکره‌بندی موجود در سیکل‌های توربین‌گاز خورشیدی بود. بررسی‌های این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از متمرکز کننده‌های خورشیدی در ساختار سیکل توربین‌گاز سبب بالا رفتن راندمان و کاهش آلایندگی خواهد شد. با توجه به پایین بودن راندمان سیکل‌های توربین‌گاز ساده استفاده از این متمرکز کننده‌های خورشیدی می‌تواند سبب بهبود عملکرد این سیستم تولید توان سنتی باشد. مطالعات نشان می‌دهد که در طراحی یک سیکل توربین‌گاز خورشیدی باید شرایطی لحاظ شود که بتوان به طور همزمان از انرژی خورشیدی و محفظه احتراق استفاده کرد. با کم شدن شدت تابش خورشید محفظه احتراق وارد عمل شده و توان تولیدی نیروگاه ثابت نگه داشته شود. از دیگر مزایای مهم توربین‌گاز خورشیدی می‌توان به تنوع آن در نوع پیکربندی اشاره کرد. متمرکز کننده خورشیدی می‌تواند به صورت مستقیم و غیرمستقیم با سیکل توربین‌گاز ساده ترکیب شده و همچنین در نوع ترکیب مستقیم هم می‌تواند تحت فشار یا اتمسفریک باشد. این تنوع چیدمانی یک مزیت مهم بوده و دست طراحان سیستم‌های انرژی را باز گذاشته و بر اساس اولویت‌های خود به انتخاب بهترین سیستم مبادرت می‌ورزند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نیاز به مناطق وسیع جهت نصب دریافت‌کننده‌های خورشیدی از مشکلات اصلی نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشد. این نیروگاه ها باید خارج از شهرها و در مناطق کویری یا زمین‌های بایر احداث شوند. با این وجود با پیشرفت تکنولوژی در ساخت دریافت کننده‌هایی با راندمان بالا نیاز مشکل به مناطق وسیع در حال رفع شدن است.

۶- مراجع

[1] A. Madhlopa, *Principles of Solar Gas Turbines for Electricity Generation*, Springre, 2018.

[۲] انجمن انرژی خورشیدی ایران، حفظ محیط زیست با تولید انرژی از تابش خورشید، *خبر نامه انجمن انرژی خورشیدی*، سال هشتم شماره ۲۹.

[3] S. Ozlu, *Development and analysis of solar energy based multigenertion systems*, PhD Thesis, University of Ontario Institute of Technology (UOIT), 2015.

[4] D. Xu, Q. Liu, J. Lei, Performance of a combined cooling heating and power system with mid-and-low temperature solar thermal energy and methanol decomposition integration, *Energy Conversion and Management*, Vol. 102, pp. 17–25, 2015.

[5] S. Gopalakrishna, *Investigation of solar applicable gas cycles*, MSc Thesis, Georgia Institute of Technology, 2013.

[6] J.D. Spelling, *Hybrid Solar Gas-Turbine Power Plants A Thermoeconomic Analysis*, PhD Thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2013.

[7] S. Ghaem Sigarchian, *Modeling and Analysis of a Hybrid Solar-Dish Brayton Engine*, MSc Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology, 2012.

[8] J.Pirkandi, A. Maroufi, Sh. Khodaparast, Parametric simulation and performance analysis of a solar gas turbine power plant from thermodynamic and exergy perspectives, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol 32 (5), pp. 2365-2 , .

[9] A.C. Fernandez, *Economic Study of Solar Thermal Plant based on Gas Turbines*, MSc Thesis, Department of Energy Sciences Faculty of Engineering LTH, Lund University, Sweden, 2013.

[10] B.J. Alqahtani, *Integrated Solar Combined Cycle Power Plants: Paving the Way for Thermal Solar*, MSc Thesis, Duke University, ۲۰۱۵.

[11] F. Cavallaro, E.K. Zavadskas, D. Streimikiene, Concentrated SOLAR Power (csp) hybridized systems. ranking based on an intuitionistic fuzzy multi-criteria algorithm, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 179, pp. 407-416, 2018.

[12] A. Ferriere, G. Flamant, PH. Costerg, B. Gagnepain, Solar Field Efficiency and Electricity Generation Estimations for a Hybrid Solar Gas Turbine Project in France, *ASME J. Sol. Energy Eng.*,Vol 130 pp 22-24, 2008.

[13] S. Bonnet, M. Alaphilippe, P. Stouffs, Thermodynamic solar energy conversion: Reflections on the optimal solar concentration ratio, *International Journal of Energy Environment and Economics*, Vol. 12, No 3, pp141-152, 2006.

[14] S.O. Oyedepo, O. Kilanko, Thermodynamic analysis of a gas turbine power plant modeled with an evaporative cooler, *International Journal of Thermodynamics*, Vol. 17 (1), pp. 14-2 , .