



استفاده از حرارت خورشیدی جهت تولید مستقیم بخار

پوهندوی شهلا شریفی عضو کدر علمی دیپارتمنت تکنالوژی کیمیاوی، پوهنځی انجیری، پوهنتون بلخ

Using solar heat to directly produce steam

Abstract

Given the increasing global need for clean and sustainable energy, the use of solar energy in thermal operations, especially Direct Steam Generation (DSG), has been proposed as an effective solution to reduce dependence on fossil resources. This research aims to comprehensively investigate direct steam generation technologies from solar energy, evaluate its advantages and limitations, and provide solutions to improve the performance of these systems. The research method is a review type and was carried out by collecting data from reliable scientific sources, research articles, industrial reports and case studies of solar projects in different countries. In this study, the two-phase behavior of thermal fluids, the operation of parabolic trough collectors, the impact of climatic conditions on system efficiency, and challenges such as pressure fluctuations, thermal control, pipe fouling, and the need for advanced equipment are analyzed. The results show that direct steam generation systems can increase thermal efficiency by up to 25% compared to indirect systems and reduce surface energy costs (LCOH) on a medium scale (30–50) MW to about (0.045–0.065) \$/kWh. These findings indicate the high potential of this technology in industrial energy supply, power generation stations, and even water desalination in sunny areas.

Keywords: Solar energy, solar steam generation, solar thermal systems, solar concentrators, solar thermal power plants.

چکیده

با توجه به رشد روز افزون نیاز جهانی به انرژی پاک و پایدار، استفاده از انرژی خورشیدی در عملیه های حرارتی به ویژه تولید مستقیم بخار (Direct Steam Generation - DSG) به عنوان یک راهکار مؤثر در کاهش وابستگی به منابع فسیلی مطرح شده است. این تحقیق با هدف بررسی جامع فن آوری های تولید مستقیم بخار از انرژی خورشیدی، ارزیابی مزایا و محدودیت های آن، و ارزیابی راهکارهایی جهت بهبود عمل کرد این سیستم ها انجام شده است.

روش تحقیق از نوع مروری بوده و با جمع آوری داده ها از منابع علمی معتبر، مقالات پژوهشی، گزارش های صنعتی و مطالعات موردی از پروژه های خورشیدی در کشورهای مختلف، انجام گرفته است.



در این مطالعه، به تحلیل رفتار دو فازی سیالات حرارتی، نحوه عمل کرد کلکتور های سهموی، تاثیر شرایط اقلیمی بر بهره وری سیستم و مشکلات چون نوسانات فشار، کنترل حرارتی، رسوب گذاری در لوله ها و نیاز به تجهیزات پیشرفته پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد که سیستم های تولید مستقیم بخار می توانند موثریت حرارتی را تا ۲۵٪ نسبت به سیستم های غیرمستقیم افزایش داده و مصارف سطحی انرژی (LCOH) را در مقیاس متوسط (۳۰-۵۰ میگاوات) به حدود (۰.۰۴۵-۰.۰۶۵) دلار بر کیلووات ساعت کاهش دهند. این یافته ها نشان دهنده پتانسیل بالای این فن آوری در تأمین انرژی صنعتی، استیشن های تولید برق و حتی شیرین سازی آب در مناطق آفتابی می باشد.

کلید واژه ها: انرژی خورشیدی، تولید بخار خورشیدی، سیستم های حرارتی خورشیدی، متمرکزکننده های خورشیدی، نیروگاه های حرارتی خورشیدی.

۱. مقدمه

استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع پایدار و تجدیدپذیر در تولید انرژی های مختلف، در سال های اخیر توجه بسیاری از محققان و متخصصان را به خود جلب کرده است. یکی از موارد استفاده برجسته انرژی خورشیدی، تولید مستقیم بخار به وسیله سیستم های حرارتی خورشیدی است. این تکنالوژی، با تبدیل انرژی تابشی خورشید به حرارت و سپس استفاده از آن برای تولید بخار، می تواند به عنوان یک روش مؤثر و سازگار با محیط زیست در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد (Bosetti, et al. 2012). تولید بخار به طور مستقیم از انرژی خورشیدی در عملیه هایی نظیر تولید برق، تصفیه آب، تولید مواد و عملیه های کیمیایی بسیار کاربرد دارد. این روش به ویژه در مناطقی که دارای تابش خورشیدی فراوان هستند مانند افغانستان، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. وسایل مختلفی نظیر collectors خورشیدی، متمرکزکننده ها و سیستم های ترموسولار برای تولید بخار خورشیدی استفاده می شود که هر کدام ویژگی ها و مزایای خاص خود را دارند

(Akbari, H., & Heidarinejad, G. 2019).

استفاده از حرارت خورشیدی برای تولید بخار علاوه بر مزایای اقتصادی و کاهش مصارف انرژی، به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و ترویج استفاده از منابع انرژی پاک کمک می کند. در این زمینه، تحقیقات علمی و توسعه روش های نوین در تلاش اند تا موثریت این سیستم ها را افزایش دهند و مشکلات موجود در بهره برداری از انرژی خورشیدی را برطرف کنند.

این مقاله به بررسی اصول و روش های مختلف تولید بخار از انرژی خورشیدی، مزایا، مشکلات و کاربرد های این شیوه ها در صنایع مختلف می پردازد. با توجه به رشد سریع تقاضای انرژی در سطح



جهانی و افزایش نگرانی‌ها در مورد پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر به ویژه انرژی خورشیدی بیش از پیش ضروری شده است. انرژی خورشیدی، به‌عنوان یکی از منابع انرژی پاک و قابل‌دسترس در بسیاری از مناطق، پتانسیل بالایی برای تأمین نیازهای انرژی دارد. یکی از کاربردهای مهم و امیدوارکننده این انرژی، استفاده از آن برای تولید مستقیم بخار است.

تولید بخار خورشیدی، به‌ویژه در عملیه‌هایی مانند تولید برق، آب‌گرم‌کن‌های صنعتی، عملیه‌های کیمیایی و تصفیه آب، اهمیت زیادی دارد. بخار به‌عنوان یک عامل انتقال انرژی حرارتی می‌تواند در بسیاری از عملیه‌های صنعتی و تولیدی به کار رود. به‌ویژه در صنایع حرارتی، مانند استیشن‌های خورشیدی، این بخار می‌تواند در توربین‌ها برای تولید برق استفاده شود. همچنین، در برخی از عملیه‌های صنعتی، بخار خورشیدی به‌عنوان یک منبع حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (آرشو و صالحی، ۲۰۱۸). با این حال، مشکلات فنی و اقتصادی مختلفی در استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید بخار وجود دارد. این مشکلات شامل مسایل مرتبط با ذخیره سازی انرژی خورشیدی، مصارف بالا در مقیاس صنعتی، تغییرات فصلی در تابش خورشید و نیاز به استفاده از طریقه‌های دقیق برای متمرکز کردن انرژی خورشید است. علاوه بر این، موثریت این سیستم‌ها نیز به طور مستقیم به شرایط جغرافیایی و محیطی وابسته است، که می‌تواند در برخی مناطق باعث محدودیت‌های استفاده از آن شود. بنابراین، مسأله اصلی در این تحقیق، بررسی مشکلات، مزایا و امکانات موجود برای استفاده نارمل از انرژی خورشیدی در تولید بخار است. هدف این تحقیق، ارائه راهکارهای مناسب سازی عملیه‌های حرارتی خورشیدی و کاهش موانع اقتصادی و فنی این سیستم‌ها به منظور ارتقاء استفاده از این فن‌آوری در صنایع مختلف است. به طور خاص، چگونگی افزایش موثریت سیستم‌ها، کاهش مصارف و بهبود عملیه‌های تولید بخار خورشیدی از جمله محورهای اصلی این مطالعه خواهد بود. اهداف و ضرورت تحقیق ارتباط می‌گیرد به رشد تقاضا برای انرژی پاک و تجدید پذیر، توسعه صنعت انرژی خورشیدی و بهبود بهره‌وری، کاهش مصارف انرژی در صنایع مختلف، مشکلات فنی و اقتصادی تولید بخار خورشیدی، تأثیرات زیست محیطی و پایداری.

در حال حاضر، جهان با بحران تغییرات اقلیمی و کاهش منابع فسیلی مواجه است (بهرامی، ۲۰۲۰). استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی برای تولید بخار می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی مطرح



باشد. این تحقیق می‌تواند به ارتقاء تکنالوژی‌ها و شیوه‌های بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در تولید بخار کمک کند. با توجه به پیشرفت‌های سریع تکنالوژی در زمینه انرژی خورشیدی، نیاز به تحقیق و بررسی دقیق‌تر در خصوص بهتر سازی سیستم‌ها و افزایش موثریت تولید بخار خورشیدی احساس می‌شود. تحقیقات بیشتر می‌تواند به افزایش موثریت سیستم‌های خورشیدی و توسعه آن‌ها در مقیاس‌های بزرگ کمک کند.

استفاده از انرژی خورشیدی به ویژه در تولید بخار می‌تواند مصارف انرژی صنایع را کاهش دهد. بسیاری از صنایع که به بخار برای عملیه‌های تولیدی خود نیاز دارند، می‌توانند از انرژی خورشیدی بهره‌مند شوند. این تحقیق می‌تواند به بهتر سازی این عملیه و کاهش مصارف کمک کند.

هرچند استفاده از بخار خورشیدی پوتانسیل زیادی دارد، اما هنوز مشکلات فنی و اقتصادی زیادی در این زمینه وجود دارد که باید برطرف شوند. بررسی و تحلیل این مشکلات و ارائه راه‌حل‌های کاربردی می‌تواند به بهبود استفاده از این فن‌آوری در سطح جهانی کمک کند.

استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید بخار می‌تواند به طور قابل توجهی به کاهش انتشار گاز‌های گلخانه‌ای کمک کند (علی‌زاده، ۲۰۱۹). این تحقیق با ارزیابی تأثیرات زیست محیطی و مقایسه آن با دیگر منابع انرژی، اهمیت استفاده از انرژی خورشیدی را از نظر کاهش تغییرات اقلیمی و حفاظت از محیط‌زیست برجسته می‌کند. در نتیجه، این تحقیق می‌تواند به عنوان یک ابزار کلیدی در جهت ارتقاء استفاده از انرژی خورشیدی در تولید بخار و توسعه پایدار انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح جهانی و در صنایع مختلف عمل کند.

این تحقیق به سوالات چون، چگونه می‌توان موثریت سیستم‌های حرارتی خورشیدی را در تولید بخار بهتر سازی کرد؟ چه طریقه‌هایی برای تولید مستقیم بخار از انرژی خورشیدی وجود دارند و مزایا و معایب هر یک چیست؟ چه عواملی بر موثریت و عمل کرد سیستم‌های تولید بخار خورشیدی تأثیر می‌گذارند؟ و چه تأثیراتی بر محیط‌زیست برای استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید بخار به وجود می‌آید؟ پاسخ می‌دهد.

برای بهبود موثریت سیستم‌های حرارتی خورشیدی، استفاده از کلکتورهای پیشرفته، گیرنده‌های مناسب خورشیدی و عایق‌کاری مناسب توصیه می‌شود. روش‌های رایج شامل کلکتورهای سهموی، دیشی و فرنل می‌باشند که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. عواملی چون شدت تابش، طراحی، نوع سیال و شرایط اقلیمی بر عمل کرد این سیستم‌ها تأثیرگذارند. این فن‌آوری



باعث کاهش مصرف سوخت های فسیلی و کاهش آلودگی محیط زیست می شود. در مجموع، تولید بخار خورشیدی راه حلی پایدار، پاک و قابل اتکا برای آینده انرژی است. این فرضیه ها به عنوان مبنای تحقیق برای بررسی استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید بخار استفاده خواهد شد.

۲. پیشینه تحقیق

تولید مستقیم بخار با استفاده از حرارت خورشیدی یکی از روش های نوین و مؤثر در بهره برداری از انرژی های تجدید پذیر به شمار می رود. کالوگیر (۲۰۰۹)، در کتاب خود به تفصیل فن آوری های مختلف حرارتی خورشیدی را تحلیل کرده و کلکتورهای سهموی خطی را به عنوان یکی از کاربردی ترین روش ها معرفی نموده است. زارزا و دیگران (۲۰۱۰)، در مطالعه ای تجربی، موفقیت آمیز بودن تولید بخار با کلکتورهای سهموی را در مقیاس صنعتی نشان داده اند. در پژوهشی زی و دیگران (۲۰۱۶)، کلکتورهای فرنل به دلیل مصارف پایین تر ساخت و سهولت نصب برای کاربردهای صنعتی در کشورهای در حال توسعه مناسب تشخیص داده شده اند. همچنین، تورچی و دیگران (۲۰۱۱)، به مقایسه کلکتورهای دیشی و سهموی پرداخته اند و نتیجه گرفتند که هرچه کلکتورهای دیشی حرارت بالاتری تولید می کنند، اما مصارف ساخت و نگهداری آن ها بیشتر است.

در کنار این موارد، پژوهش هایی نیز بر روی ترکیب انرژی خورشیدی با سیستم های هابریدی انجام شده است مختاری و دیگران (۲۰۲۰)، نشان داده اند که ترکیب انرژی خورشیدی با منابع پشتیبان (نظیر گاز طبیعی یا دیزل) باعث افزایش پایداری تولید بخار در شرایط متغیر جوی می گردد. همچنین مطالعات جدید گروسوامی و کريت (۲۰۱۵)، اهمیت کنترل و اتوماسیون در نارمل سازی عمل کرد سیستم های خورشیدی را مطرح کرده اند. کیو و دیگران (۲۰۱۳)، نیز با مدل سازی حرارتی سیستم های بخار خورشیدی، نشان دادند که طراحی دقیق و انتخاب زاویه و موقعیت مناسب نصب کلکتورها، تأثیر بسزایی در افزایش موثریت دارد.

جمع بندی مطالعات فوق نشان می دهد که موثریت تولید بخار خورشیدی به شدت وابسته به نوع فن آوری، طراحی سیستم، موقعیت جغرافیایی، نوع سیال حرارتی و وجود منابع مرتبط است. بنابراین، انتخاب راه برد مناسب متناسب با شرایط اقلیمی و صنعتی هر کشور از اهمیت ویژه ای برخوردار است.



۳. مواد و روش کار

این پژوهش با بهره‌گیری از روش توصیفی - تحلیلی و مبتنی بر مطالعه کتابخانه‌ای انجام یافته است. روش کتابخانه‌ای از جمله روش‌های بنیادی در تحقیق‌های نظری و مفهومی به شمار می‌رود که به پژوهش‌گر امکان می‌دهد تا از طریق مطالعه منابع معتبر و تحلیل محتوای آن‌ها، به درک عمیق‌تر از موضوع تحقیق نایل آید. با توجه به این که هدف این پژوهش، تحلیل روش‌های تولید مستقیم بخار توسط انرژی خورشیدی و بررسی مزایا، معایب و مؤلفه‌های تأثیرگذار بر عمل‌کرد آن‌ها می‌باشد، استفاده از این روش بهترین انتخاب در راستای پاسخ‌گویی به سوالات تحقیق بوده است.

برای گردآوری اطلاعات و داده‌های مورد نیاز، از منابع مکتوب و دیجیتال استفاده گردید. این منابع شامل کتاب‌های تخصصی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، مقالات علمی منتشرشده در ژورنال‌های بین‌المللی، گزارش‌های پژوهشی سازمان‌های جهانی انرژی و مطالعات موردی کشورهای مختلف بود. منابع اصلی از طریق پایگاه‌های علمی بین‌المللی مانند Science Direct، IEEE Explore، Google Scholar، Scopus، Springer و همچنین وب‌سایت‌های رسمی سازمان‌هایی چون آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) و سازمان جهانی انرژی‌های تجدیدپذیر (IRENA) گردآوری شده است. مراحل عملی گردآوری و تحلیل داده‌ها به صورت زیر انجام شد:

۱. جستجو، انتخاب و فیلتر منابع: تمرکز بر منابعی که پس از سال ۲۰۱۰ منتشر شده‌اند تا از به روز بودن اطلاعات اطمینان حاصل گردد.

۲. بررسی محتوای منابع و استخراج اطلاعات: با دسته‌بندی محتوای استخراج شده در قالب موضوعاتی چون نوع سیستم، شرایط اقلیمی، سطح موثریت، مصارف اقتصادی، مزایا و محدودیت‌ها.

۳. تحلیل مقایسه‌ای: مقایسه یافته‌ها برای استخراج نقاط قوت و ضعف هر سیستم، و ارزیابی نقش عوامل محیطی، طراحی فنی و تکنالوژی‌های مورد استفاده.

همچنین در راستای درک بهتر از تطبیق عملی این سیستم‌ها، گزارش‌ها و مطالعات موردی مربوط به کشورهایی که در زمینه‌ی انرژی خورشیدی پیش‌رو بوده‌اند، مانند هندوستان، اسپانیا، آلمان، مراکش، و امارات متحده عربی نیز مورد تحلیل قرار گرفتند. این مطالعات زمینه‌ساز شناخت دقیق‌تری از میزان موفقیت سیستم‌ها در شرایط اقلیمی و اقتصادی مختلف شده‌اند. در نهایت، تمام یافته‌ها با روی‌کرد تحلیلی تلفیق و ارزیابی گردید تا علاوه بر آرایه دیدگاه جامع از وضعیت

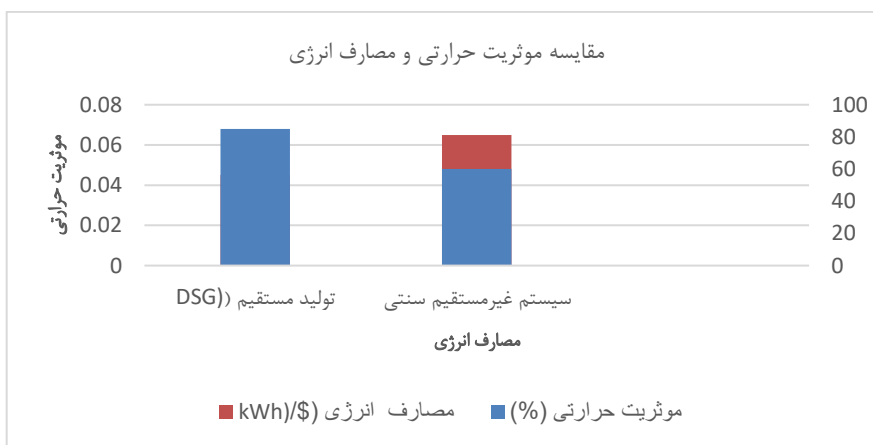


کنونی، زمینه برای ارایه پیشنهاد های کار بردی در جهت بهبود بهره وری سیستم های خورشیدی در تولید مستقیم بخار فراهم گردد.

۴. یافته ها

بررسی های انجام شده نشان می دهد که استفاده از سیستم های تولید مستقیم بخار (Direct Steam Generation) از انرژی خورشیدی، مزایای چشم گیری نسبت به روش های سنتی دارد. یکی از مهم ترین یافته ها، افزایش موثریت حرارتی این سیستم ها است. با حذف سیالات واسطه مانند روغن های ترمال و انتقال مستقیم حرارت خورشیدی به آب، تلفات انرژی به طور قابل توجهی کاهش یافته و موثریت کلی سیستم بهبود می یابد. بر اساس تحقیقات (Zarza et al., 2004)، این افزایش موثریت می تواند تا حدود ۲۵٪ نسبت به سیستم های غیرمستقیم باشد. قسمی که در دیاگرام (۱) شان داده شده است. علاوه بر آن، کاهش مصارفات عملیاتی از دیگر مزایای برجسته این فن آوری است. به دلیل عدم نیاز به خرید و نگهداری سیالات حرارتی گران قیمت، مصارف نگهداری و مصرفی کاهش یافته و عمر سیستم نیز افزایش می یابد.

سیستم های DSG همچنین قابلیت ترکیب با منابع انرژی دیگر (Hybridization) مانند گاز طبیعی را دارند، که موجب افزایش پایداری تولید انرژی در شرایط آب و هوای ناپایدار یا ساعات کم تابش خورشید می شود. از نظر عمل کرد فنی، این سیستم ها قادر به تولید بخار با فشار و حرارت بالا هستند (تا ۱۰۰ بار و ۵۰۰ درجه سانتی گرید)، که آنها را برای کاربرد های صنعتی سنگین و توربین های بخار مناسب می سازد.



نمودار ۱: مقایسه موثریت حرارتی و مصارف انرژی در سیستم های تولید بخار خورشیدی



با این حال، چالش های کنترولی یکی از موارد مهم در بهره برداری از این سیستم ها است. نوسانات تابش خورشیدی باعث تغییرات لحظه ای در حرارت سیال و فشار بخار می شود، که نیازمند استفاده از وسایل کنترلی دقیق و پیچیده را دارد (Mertins, et al., 2009). در ادامه یافته های فوق الذکر میتوان موارد ذیل را به عنوان نتایج تکمیلی این پژوهش در نظر گرفت:

۱. در تولید مستقیم بخار، آب و بخار به صورت دو فاز (liquid-vapor) در لوله گیرنده جریان دارند. تحقیقات نشان داده اند که انتخاب (mass flow rate) و ساختار لوله می تواند ضریب انتقال حرارت را تا (۲۰-۱۵)٪ افزایش دهد، چرا که حباب های ریز بخار موجب توربولانس داخلی می شوند و ضخامت لایه مرزی حرارتی را کاهش می دهند (Abdollahi, et al., 2017).

۲. یکی از چالش های عملیاتی سیستم های DSG، رسوب گذاری املاح در دیواره لوله های گیرنده است. بررسی های آزمایشگاهی نشان می دهد که استفاده از آب با سختی کمتر از ۱۰۰ ppm و اجرای دوره های پاک کاری متناوب (CIP) می تواند مقدار رسوب را به نصف کاهش دهد و در نتیجه کم شدن موثریت دستگاه را کند سازد (Dugan, et al., 2016).

۳. برای مقابله با نوسانات تابش و بهبود پایداری فشار و حرارت، کار برد کنترل پیش بین مدل محور (Model Predictive Control – MPC) در سیستم های DSG پیشنهاد شده است. این می تواند تغییرات فشار را تا ۳۰٪ و مدت زمان گذار (settling time) را تا ۴۰٪ کاهش دهد (Perez et al., 2018).

۴. تحلیل مصارف سطحی بخار در پروژه های خورشیدی حاکی از آن است که برای مقیاس (۵۰-۳۰ MW، LCOH) مصارف بین (۰.۰۴۵-۰.۰۶۵) دلار فی کیلووات در ساعت است که با استفاده از DSG به دلیل حذف سیالات ترمال گران قیمت می تواند تا ۱۰٪ کمتر باشد (Mancini et al., 2019).

۵. ارزیابی چرخه عمر (Life Cycle Assessment) نشان می دهد که انتشار CO₂ معادل در سیستم های DSG حدود (۱۵-۱۰) گرم به فی کیلووات در ساعت است، این رقم بسیار پایین تر از روش های غیرمستقیم و سوخت های فسیلی می باشد (IEA, 2010).



۵. نتیجه گیری

بر اساس یافته های این تحقیق، می توان نتیجه گرفت که استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید مستقیم بخار یکی از راه کار های مؤثر در جهت کاهش مصرف سوخت های فسیلی، کاهش آلودگی محیط زیست و افزایش موثریت انرژی در بخش های صنعتی و استیشن های حرارتی به شمار می رود. هر یک از فن آوری های مورد بررسی (کلکتور سهموی خطی، فرنل خطی و دیشی) دارای مزایا و محدودیت هایی هستند که باید بر اساس شرایط اقلیمی، بودجه ای اجرایی، ظرفیت مورد نیاز و فضای در دسترس انتخاب شوند. در کشورهای آفتاب خیز مانند افغانستان، که دارای پتانسیل بالای تابش خورشید می باشند، این فن آوری می تواند جای گزینی پایدار و اقتصادی برای روش های سنتی تولید بخار باشد. به ویژه، استفاده از کلکتورهای فرنل خطی با مصرف نصب پایین و طراحی ساده، گزینه ای مناسب برای صنایع کوچک و متوسط تلقی می شود. مطالعات مختلف نشان داده اند که تولید بخار خورشیدی به عنوان یکی از منابع انرژی تجدید پذیر با پتانسیل بالا، نقش بسیار مهمی در تولید برق، عملیه های صنعتی، و تأمین انرژی پاک ایفا می کند. این تکنالوژی نه تنها به کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی و کاهش انتشار گاز های گلخانه ای کمک می کند، بلکه با استفاده از منابع طبیعی و بی پایان خورشید امکان دستیابی به انرژی پایدار را فراهم می سازد. با این حال، توسعه و بهره برداری گسترده از استیشن های خورشیدی حرارتی با مشکلات متعددی همراه است. این مشکلات شامل مصارف اولیه بالا برای ساخت و نصب تجهیزات، مشکلات مربوط به ذخیره سازی انرژی حرارتی، و مسایل مربوط به نگهداری و بهره برداری از سیستم ها در شرایط محیطی متغیر هستند. علاوه بر این، بهره وری پایین برخی از سیستم ها و نیاز به تکنالوژی پیشرفته برای بهترسازی عملیه تولید بخار از دیگر موانع توسعه این فن آوری به شمار می رود.

تحقیقات نشان می دهد که بهبود طراحی کلکتور ها و استفاده از مواد پیشرفته می تواند به افزایش موثریت سیستم ها و کاهش تلفات حرارتی کمک کند. همچنین، توسعه روش های ذخیره سازی حرارتی و استفاده از سیستم های هوشمند مدیریت انرژی به منظور بهره وری بهتر از این سیستم ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مچنین، با به کارگیری سیستم های ذخیره سازی حرارتی و ترکیب این سیستم ها با منابع دیگر مانند گاز طبیعی یا زیست توده، می توان پایداری و استمرار تولید بخار را در ساعات غیر آفتابی نیز تضمین نمود.



از منظر اقتصادی، نیاز به کاهش مصارف تولید و بهره برداری از سیستم های خورشیدی حرارتی وجود دارد تا این تکنالوژی بتواند با منابع انرژی سنتی رقابت کند. برای این منظور، حمایت های دولتی از طریق ارائه کمک های مالی، سیاست های تشویقی، و سرمایه گذاری در تحقیقات مرتبط می تواند نقش مؤثری در کاهش مصارف و افزایش پذیرش این تکنالوژی داشته باشد.

به علاوه، ترویج آگاهی عمومی و آموزش نیروهای متخصص در حوزه انرژی خورشیدی از دیگر عوامل کلیدی در توسعه پایدار این فن آوری محسوب می شود. در نهایت، همکاری میان دولت ها، سازمان های تحقیقاتی و بخش خصوصی می تواند زمینه را برای دستیابی به روش های نو آورانه و بهتر در زمینه تولید بخار خورشیدی فراهم آورد. بنابراین، ادامه تحقیقات در زمینه بهتر سازی تکنالوژی، توسعه مواد نوین، کاهش مصارف و افزایش موثریت سیستم های تولید بخار خورشیدی نه تنها از اهمیت علمی برخوردار است، بلکه می تواند گامی مؤثر در راستای دست یابی به اهداف توسعه پایدار و کاهش تغییرات اقلیمی باشد

۶. فهرست منابع

۱. آرش، ن. و صالحی، م. (۱۳۹۷). مطالعه تطبیقی کاربرد سیستم های تولید بخار خورشیدی در کشورهای در حال توسعه. نشریه بین المللی انرژی های تجدیدپذیر، ۲۳۱، ۷۸-۸۹.
۲. بهرامی، ر. (۱۳۹۹). انرژی های تجدیدپذیر و توسعه پایدار: ارزیابی فناوری های تولید بخار خورشیدی. نشریه علمی فناوری های نوین انرژی، ۳، ۲۴-۳۵.
۳. علی زاده، م. (۱۳۹۸). بررسی سیستم های انرژی خورشیدی در تولید بخار و کاربردهای آن در صنایع. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۸۹، ۶۷.
4. Bosetti, V., Catenacci, M., Fiorese, G., & Verdolini, E. (2012). The future prospect of PV and CSP solar technologies: An expert elicitation survey. *Energy Policy, 49*, 308-317.
5. Dugan, R. C., Thomas, S. A., & Rizy, D. T. (1984). Integrating dispersed storage and generation (DSG) with an automated distribution system. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, (6) *, 1142-1146.
6. Goswami, D. Y., & Kreith, F. (2015). *Energy Conversion*. CRC Press.
7. Hosseini, R., Soltani, M., & Valizadeh, G. (2015). Simulation and optimization of a hybrid solar-gas thermal power plant. *Applied Thermal Engineering, 81*, 231-240.
8. International Energy Agency. (2017). *Global trends in solar thermal energy*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-trends-in-solar-thermal-energy>
9. International Renewable Energy Agency. (2015). *Renewable power generation costs: Annual review*. Retrieved from <https://www.irena.org/publications/january/renewable-power-generation-costs-2015>



10. Kalogirou, S. A. (2009). *Solar energy engineering: Processes and systems*. Academic Press.
11. Mancini, S., Moruzzo, R., Riccioli, F., & Paci, G. (2019). European consumers' readiness to adopt insects as food: A review. *Food Research International, 122*, 661–678.
12. Mokhtari, H., Ebrahimi, M., & Amidpour, M. (2020). Thermo-economic analysis of a combined solar steam generation system. *Energy, 193*, 116724.
13. Perez-Jimenez, F., Pascual, V., Meco, J. F., Martínez, P. P., Lista, J. D., Domenech, M., ... & Ros, E. (2018). Documento de recomendaciones de la SEA 2018. *Clínica e Investigación en Arteriosclerosis, 30*(6), 280–310.
14. Qiu, Y., Chen, H., & Liu, Q. (2013). Thermal performance analysis and optimization of solar direct steam generation systems. *Energy Procedia, 49*, 1285–1294.
15. Turchi, C. S., Wagner, M. J., & Kutscher, C. F. (2011). *Use of water/steam as the heat-transfer fluid in parabolic trough solar power plants*. National Renewable Energy Laboratory.
16. Xu, C., Wang, Z., Yu, G., et al. (2016). Performance evaluation of a linear Fresnel solar collector system. *Renewable Energy, 92*, 501–512.
17. Zarza, E., Valenzuela, L., León, J., et al. (2010). Direct steam generation with parabolic-trough collectors for industrial applications. *Solar Energy, 84*(5), 867–875