



Simulation and Performance Analysis of the Solar Preheater of the Cogeneration Power Plant of the Sugarcane Industry

Ayoub Kaabimofrad¹ | Abbas Asakereh² | Ebrahim Hajidavalloo³ | Mostafa Kiani Deh Kiani⁴

1. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: 1402-s12mhr9788@scu.ac.ir

2. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: A.asakereh@scu.ac.ir

3. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: hajidae@scu.ac.ir

2. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.kiani@scu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 16, 2025

Revised: Jan. 29, 2026

Accepted: Feb. 14, 2026

Published: Spring, 2026

Keywords:

Energy analysis,
Simulation TRNSYS,
Parabolic trough collector,
Evacuated tube collector,
Greenhouse gases

This research investigated the technical and environmental feasibility of a solar preheater at the Dehbal Khuzayi CHP plant. The goal was to reduce fossil fuel consumption and boost thermal efficiency by using solar energy for boiler feedwater preheating. Dynamic simulations were performed using TRNSYS software to evaluate and compare the thermal behavior of the system, including evacuated tube and parabolic trough collectors. Weather data and the technical characteristics of the base system were considered in the model, and the model's validity was confirmed by matching its outputs with experimental data. The results showed that the ETC is capable of producing 26,519 GJ of thermal energy per hectare annually, while the PTC has the capacity to produce 16,239 GJ per hectare annually. The outlet temperature of both collector types is capable of reaching the system's design temperature during peak solar radiation hours. From an environmental perspective, the use of solar collectors resulted in an annual reduction of 4,243 tons of CO₂-eq in the ETC and 3,096 tons of CO₂-eq in the PTC. The economic analysis showed that the ETC is more economical, with a payback period of 2.7 years and an internal rate of return of 31.9 percent. Overall, the results indicate the high efficiency of integrating solar energy into boiler feedwater preheating and its positive impact on reducing fuel consumption, improving thermal efficiency, and decreasing greenhouse gas emissions at the Dehbal Khuzayi power plant.

Cite this article: Kaabimofrad, A. Asakereh, A. Hajidavalloo, E., Kiani Deh Kiani, M. (2026) Simulation and Performance Analysis of the Solar Preheater of the Cogeneration Power Plant of the Sugarcane Industry, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 57 (1), 107-128. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.406402.665627>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.406402.665627>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Energy, the vital artery of development, faces environmental challenges due to fossil fuel reliance, making renewable technology development imperative for sustainability. Combined Heat and Power (CHP) systems enhance efficiency as a cornerstone of sustainable energy, yet require clean source integration, like solar, to mitigate pollution. Integrating a solar preheater significantly cuts fossil fuel consumption and operational costs of CHP plants by raising boiler feedwater temperature. Precise thermodynamic analysis and performance simulation of these hybrid systems, accounting for solar irradiation variability, are crucial for validation, which studies confirm offers substantial potential for boosting overall efficiency and lowering emissions. Specifically in the sugarcane industry, like at Dehbal Khozaei Company, heating boiler water with steam increases fossil fuel demand, creating a research gap in quantifying this opportunity. This study aims to fill that gap by modeling and comparing evacuated tube and parabolic trough collectors at the Dehbal Khozaei CHP plant, offering a practical optimization guide for management decisions

Method

This study investigates the performance and the technical, environmental, and economic feasibility of integrating solar energy to preheat boiler feedwater at the Dehbal Khozaei CHP plant. The study aims to reduce fossil fuel consumption and enhance the plant's thermal efficiency by substituting part of the natural gas used in the boiler feedwater preheating process with solar energy. The plant's current process involves mixing demineralized water (21°C) and returned condensate (75°C) to 62°C, followed by preheating in a closed heater (92°C) and finally in a deaerator to the boiler entry temperature (133°C), with all required heat supplied by steam extracted from turbine bleeds. To achieve the objective, dynamic simulations of two solar collector types (parabolic trough collector (PTC) and evacuated tube collector (ETC)) were performed in TRNSYS software. The model incorporated precise local meteorological data for the latitude 31.3° N, 48.7° E extracted from Meteororm software for dynamic analysis. Energy balance calculations using the steady-flow method determined the necessary solar collector area to partially substitute the control steam demand. This substitution directly translates to an increase in the plant's overall thermal efficiency by reducing reliance on extraction steam. Following the modeling, an economic analysis and an assessment of the potential greenhouse gas emission reductions resulting from this substitution were conducted in RETScreen software, using data from the TRNSYS simulations. The validity of the entire developed TRNSYS model was confirmed by comparing its outputs with field data from a reference solar power plant (SEGS VI) in the Mojave Desert, ensuring the accuracy of the results.

Results

The simulation results showed that the developed thermodynamic model has a low average relative difference of 6% when comparing the hourly fluid temperature output from the solar field with the empirical data from the reference power plant (SEGS VI), which validates the model's reliability for analyzing the preheating system of the Dehbal Khozaei power plant. Over one working year, the required heat transfer rate for the heater (from 62 to 92 C°) and the deaerator (from 92 to 133 C°) were 22.64 GJ/h and 33.18 GJ/h, respectively at peak capacity. The total annual energy required for preheating was calculated to be 489022 GJ. Simulation of ETC performance revealed a maximum production capacity of 55.16 GJ/h at peak irradiation, enabling it to meet 99% of the thermal demand at baseline conditions. Results indicated that an ETC with an area of 29,000 m² is capable of producing 76,905 GJ of thermal energy annually, supplying about 15.7% of the total feedwater preheating energy requirement. In contrast, PTC with an area of 34,560 m² can produce 56,122 GJ, covering approximately 11.5% of the baseline system's needs. The outlet temperature of both collector types during peak solar hours is capable of reaching the system's design temperature. From an environmental perspective, using solar collectors led to an annual reduction of 4,243 tons of CO₂ eq for the ETC system and 3,096 tons of CO₂-eq for the PTC system, equivalent to removing approximately 777 and 567 gasoline-powered vehicles from the transportation cycle, respectively. The Net Present Value (NPV) of the solar preheating system with ETC was calculated at \$128 million after tax. The after-tax Internal Rate of Return (IRR) for this system was 31.9% with a payback period of 7.2 years. For the PTC-based system, the after-tax NPV was \$74 million with an IRR of 18.7% and a payback period of 13.5 years. Although both projects are economically viable, the ETC system is recommended as the more economically favorable option for the Dehbal Khozaei CHP plant due to its lower initial investment, shorter payback period, and higher profitability indices. Ultimately, both solar systems act as complementary heat sources and are unable to continuously supply the thermal load throughout the entire year.

Conclusions

The ETC, with a smaller absorption area, offers a higher annual efficiency (producing 15.7% the total energy requirement) compared to the PTC (11.4% of the total energy requirement). Both technologies are capable of supplying the required temperature for boiler feedwater preheating, but ETC creates a greater reduction in CO₂-eq emissions (16% versus 11%). The results demonstrate the high effectiveness of integrating solar energy for boiler feedwater preheating and its positive impact on reducing fuel consumption, enhancing thermal efficiency, and lowering greenhouse gas emissions at the Da'bal Khazae plant. Overall, the Evacuated Tube Collector is introduced as the superior technology for reducing fuel consumption and emissions in this power plant, although both remain complementary sources.

Funding

The study was funded by Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, and Grant No. SCU.AA98.29747.

Authorship contribution

Conceptualization, Ayoub Kaabimofrad, Abbas Asakereh, Ebrahim Hajidavalloo and Mostafa Kiani Deh Kiani; methodology, Ayoub Kaabimofrad, Abbas Asakereh and Ebrahim Hajidavalloo; software, Ayoub Kaabimofrad and Mostafa Kiani Deh Kiani; validation, Abbas Asakereh and Ebrahim Hajidavalloo; formal analysis, Abbas Asakereh; investigation, Ayoub Kaabimofrad; resources, Ayoub Kaabimofrad and Abbas Asakereh; data curation, Ayoub Kaabimofrad; writing—original draft preparation, Ayoub Kaabimofrad; writing—review and editing, Abbas Asakereh, Ebrahim Hajidavalloo and Mostafa Kiani Deh Kiani; visualization, Ayoub Kaabimofrad; supervision, Abbas Asakereh and Ebrahim Hajidavalloo; project administration, Abbas Asakereh; funding acquisition, Abbas Asakereh. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work, the authors did not use any generative AI or AI-assisted technologies.

Data availability statement

All data utilized in this study are provided within the text, as well as in the form of tables and figures. Additional data are available from the authors on request.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Vice Chancellor for Research and Technology of Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, for providing financial support through the research grant (No. SCU.AA98.29747).

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد پیش‌گرمکن خورشیدی نیروگاه تولید همزمان برق و حرارت صنعت نیشکر

ایوب کعبی مفرد^۱ | عباس عساکره^۲ | ابراهیم حاجی دولو^۳ | مصطفی کیانی ده کیانی^۴

۱. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه:

s12mhr9788@scu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه:

A.asakereh@scu.ac.ir۳. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: hajidae@scu.ac.ir۴. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.kiani@scu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش، عملکرد و امکان‌سنجی فنی، محیط زیستی و اقتصادی پیش‌گرمکن خورشیدی برای نیروگاه تولید همزمان برق و حرارت شرکت دعبل خزاعی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف این مطالعه، کاهش مصرف سوخت فسیلی و افزایش بازده حرارتی نیروگاه از طریق جایگزینی بخشی از گاز طبیعی در فرآیند پیش‌گرمایش آب تغذیه دیگ بخار با انرژی خورشیدی است. شبیه‌سازی‌های دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس انجام شد تا رفتار حرارتی سامانه، شامل دو نوع کلکتور خورشیدی لوله خلاً و سهموی، ارزیابی و مقایسه شود. داده‌های آب‌وهوایی و خصوصیات فنی سامانه پایه در مدل لحاظ گردید و اعتبار مدل از طریق تطبیق خروجی‌ها با داده‌های تجربی تأیید شد. نتایج نشان داد کلکتور لوله خلاً به ازای هر هکتار سطح قادر به تولید ۲۶۵۱۹ گیگاژول انرژی حرارتی در سال است، در حالی که کلکتور سهموی به ازای هر هکتار سطح توان تولید ۱۶۲۳۹ گیگاژول در سال را دارد. دمای خروجی هر دو نوع کلکتور در ساعات اوج تابش خورشیدی قادر به دستیابی به دمای طراحی سامانه است. از دیدگاه محیط زیستی، استفاده از کلکتورهای خورشیدی موجب کاهش سالانه ۴۲۴۳ تن CO₂ eq در سامانه لوله خلاً و ۳۰۹۶ تن CO₂ eq در سامانه سهموی شد. تحلیل اقتصادی نشان داد که طرح استفاده از جمع‌کننده لوله خلاً با دوره بازگشت سرمایه ۷/۲ سال و نرخ بازده سرمایه ۳۱/۹ درصد اقتصادی‌تر است. در مجموع، یافته‌ها بیانگر کارایی بالای ادغام انرژی خورشیدی در پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار و تأثیر مثبت آن بر کاهش مصرف سوخت، ارتقای بازده حرارتی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در نیروگاه دعبل خزاعی است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵

تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

تحلیل انرژی، شبیه‌سازی با ترنسیس، کلکتور سهموی شکل، کلکتور لوله خلاً، گازهای گلخانه‌ای.

استناد: کعبی‌فرد؛ ایوب، عساکره؛ عباس، حاجی دولو؛ ابراهیم، کیانی ده کیانی؛ مصطفی، (۱۴۰۵) شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد پیش‌گرمکن خورشیدی نیروگاه تولید همزمان برق و حرارت صنعت نیشکر، مجله مهندسی بیوسیستم ایران، ۵۷ (۱)، ۱۰۷-۱۲۸.

<https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.406402.665627>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.406402.665627>

مقدمه

انرژی به‌عنوان شریان حیاتی توسعه صنعتی و رشد اقتصادی، همواره در کانون سیاست‌های جهانی قرار داشته است (Bhuiyan *et al.*, 2022). با این حال، افزایش بی‌رویه تقاضای برق و وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی، چالش‌های زیست‌محیطی گسترده‌ای همچون گرمایش جهانی و آلودگی هوا را در پی داشته است (Anonymous, 2021). در پاسخ به این بحران‌ها، جامعه علمی و مهندسی به سمت توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر و ارتقای بهره‌وری سامانه‌های تبدیل انرژی موجود گام برداشته‌اند. در میان راهکارهای مطرح برای افزایش کارایی، سامانه‌های تولید همزمان توان و حرارت (CHP) جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. این فناوری با بازیابی گرمای تلف‌شده از فرآیند تولید برق برای مصارف حرارتی، بازده مصرف انرژی اولیه را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد و به‌عنوان یکی از ستون‌های اصلی معماری انرژی پایدار شناخته می‌شود (Kemal *et al.*, 2018; Mahian *et al.*, 2020). در نیروگاه‌های سنتی، بخش قابل توجهی از انرژی به‌صورت حرارت دفع می‌شود، در حالی که سامانه‌های تولید همزمان توان و حرارت با استفاده همزمان از سوخت برای تولید برق و حرارت مفید، این تلفات را به حداقل می‌رسانند. با این حال، نیروگاه‌های تولید همزمان توان و حرارت متعارف هنوز به‌دلیل وابستگی به سوخت‌های فسیلی با محدودیت‌هایی نظیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و نوسانات اقتصادی قیمت انرژی مواجه هستند (Bagherian and Mehranzamir, 2020). از این رو، ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی، در ساختار سامانه‌های همزمان تولید توان و گرما به‌عنوان راهکاری نوین برای دستیابی به توسعه پایدار مطرح شده است. انرژی خورشیدی به‌عنوان منبعی پاک، دائمی و رایگان، پتانسیل بالایی برای کاهش مصرف سوخت فسیلی، بهبود بازدهی و کاهش آثار زیست‌محیطی دارد (IEA, 2020).

در دهه اخیر، پژوهش‌ها بر ترکیب سامانه‌های حرارتی خورشیدی با نیروگاه‌های تولید برق تمرکز یافته‌اند که مسیری مؤثر برای کاهش انتشار CO₂ و هزینه‌های سوخت ارائه می‌دهد (Abdelhalim *et al.*, 2024; Benny, 2024). یکی از کاربردهای مهم این رویکرد، استفاده از پیش‌گرمکن خورشیدی در سامانه‌های تولید همزمان توان و حرارت است. این تجهیز با جذب تابش خورشیدی و انتقال حرارت به سیال ورودی (مانند آب تغذیه دیگ بخار)، دمای آن را پیش از ورود به بخش‌های حرارتی افزایش می‌دهد. در نتیجه، میزان انرژی حرارتی موردنیاز از احتراق سوخت کاهش یافته و بازده ترمودینامیکی و اقتصادی سامانه بهبود می‌یابد (Chen and Ba, 2022; Qin *et al.*, 2024; Wu and Han, 2023). ادغام پیش‌گرمکن خورشیدی با سامانه‌های تولید همزمان توان و گرما می‌تواند موجب کاهش مصرف سوخت فسیلی و هزینه‌های عملیاتی و در عین حال افزایش بازده حرارتی و الکتریکی از طریق ارتقای شرایط کاری سیال عامل می‌شود.

تحلیل‌های ترمودینامیکی دقیق برای ارزیابی عملکرد این سامانه‌های ترکیبی از منظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی ضروری است. مدل‌سازی جامع باید پارامترهایی چون دبی جریان، دمای خروجی سیال و شدت تابش خورشیدی در بازه‌های زمانی مختلف را لحاظ کند تا شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌ای از عملکرد نیروگاه در شرایط عملیاتی گوناگون فراهم شود (Wang *et al.*, 2018). یکی از چالش‌های مهم در طراحی پیش‌گرمکن خورشیدی، تطبیق بازده و خروجی گرمایی با نیازهای حرارتی متغیر نیروگاه است. برای مثال در ساعات اوج تقاضای برق ممکن است نیاز به تولید همزمان گرما و برق افزایش یابد، در حالی که تابش خورشیدی نوسان دارد. به‌همین دلیل، یکپارچه‌سازی ذخیره‌سازهای حرارتی (مانند مخازن آب داغ یا مواد ذخیره‌ساز فاز تغییری) و سامانه‌های کنترلی هوشمند برای هماهنگ‌سازی تولید خورشیدی با پروفیل بار، نقشی کلیدی در تضمین پایداری عملکرد دارند.

مطالعات تجربی و شبیه‌سازی نشان داده‌اند که ادغام مناسب پیش‌گرمکن خورشیدی می‌تواند به افزایش قابل توجه کارایی کل سامانه و کاهش مصرف سوخت منجر شود، اما میزان این بهبود وابسته به طراحی دقیق، شرایط اقلیمی، و کاربری نیروگاه است. عواملی همچون نوع گیرنده خورشیدی (مثلاً صفحه تخت، لوله خلا یا کلکتورهای خطی)، دمای عملیاتی، و نوع سیال انتقال‌دهنده حرارت (هوا، آب، روغن حرارتی یا نمک مذاب) در تعیین عملکرد نهایی مؤثرند. استفاده از پیش‌گرمکن خورشیدی آب تغذیه برای هر دو واحد نیروگاه برق و سامانه‌ی نمک‌زدایی چندمرحله‌ای موجب افزایش خروجی سالانه‌ی نیروگاه برق با کارایی بالا شده است (Kabiri *et al.*, 2021). بررسی‌ها نشان داده است که جایگزینی استخراج بخار از توربین فشارپایین با یک سامانه کمکی خورشیدی مبتنی بر کلکتورهای سهموی خطی موجب بهبود راندمان ۱/۴ درصدی نیروگاه و کاهش ۳۶۴۸۰ تن در انتشار CO₂ می‌شود (Alotaibi *et al.*, 2020). در مطالعه‌ای، با بهره‌گیری از تحلیل ترمودینامیکی، هفت طرح برای ادغام سامانه خورشیدی در نیروگاه شهید منتظری اصفهان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد جایگزینی هر سه گرم‌کن فشار قوی با سامانه خورشیدی، بازده خالص انرژی و انرژی را به میزان ۱۸/۳ درصد

افزایش می‌دهد. در این طرح، مصرف سوخت دیگ بخار نیز به میزان ۶۶۹۸ مترمکعب بر ساعت نسبت به سیکل پایه کاهش یافته و در نتیجه انتشار سالانه‌ی CO₂ حدود ۶۸۹۵۳ تن کاهش پیدا می‌کند (Ahmadi et al., 2017). با شبیه‌سازی حالت گذرا در نرم‌افزار ترنسیس، امکان‌سنجی فنی و اقتصادی گرمایش آب تغذیه‌ی نیروگاه تولید هم‌زمان ۶۲ مگاواتی در عربستان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد برای بیشترین صرفه‌جویی طی عمر عملیاتی، به میزان تقریبی ۴۱/۵ میلیون دلار، مساحت بهینه‌ی کلکتورهای سهموی برابر با ۱۵۰۰۰۰ مترمربع است و دوره‌ی برگشت سرمایه ۱۴/۶ سال برآورد می‌شود. این طرح قادر است سالانه ۴۶۱۹ تن سوخت صرفه‌جویی کرده و منجر به کاهش حدود ۷۷۷ تن آلاینده‌ی CO₂ گردد (Abdel-Dayem and Hawsawi, 2022). نتایج استفاده از پیش‌گرمکن خورشیدی برای آب خوراک نیروگاه برق و واحد نمک‌زدایی نشان داد پیش‌گرمکن خورشیدی موجب افزایش راندمان و خروجی سالانه نیروگاه برق می‌شود (Kabiri et al., 2021). تجزیه و تحلیل انرژی جمع‌کننده حرارتی خورشیدی سهموی شکل و فرنل خطی برای گرم کردن آب خوراک دیگ بخار از ۹۵ درجه سلسیوس به ۱۵۰ درجه سلسیوس در نیروگاه باگاس‌سوز تولید هم‌زمان توان و حرارت موجب افزایش بازده نیروگاه می‌شود (López et al., 2021). مطالعاتی نیز استفاده از جمع‌کننده‌های خورشیدی جهت پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار در نیروگاه‌های تولید برق بر پایه سوخت زغال‌سنگ را مورد بررسی قرار دادند (Shagdar et al., 2022). مطالعات نشان می‌دهد استفاده از انرژی گرمایی خورشیدی در کاهش مصرف انرژی فسیلی و انتشار آلاینده‌ها بسیار موثر است. با این وجود، تطبیق بازده و خروجی گرمایی پیش‌گرمکن خورشیدی با نیازهای متغیر حرارتی نیروگاه، به‌ویژه در هنگام نوسانات تابش خورشیدی و اوج تقاضا، نیازمند طراحی دقیق و احتمالاً یکپارچه‌سازی با سامانه‌های ذخیره‌ساز حرارتی است و تحلیل‌های ترمودینامیکی جامع برای ارزیابی عملکرد این سامانه‌های ترکیبی در شرایط عملیاتی گوناگون، با در نظر گرفتن متغیرهایی چون دبی جریان، دمای خروجی سیال و شدت تابش خورشیدی، ضروری است (Wang et al., 2018). از نظر کاربردی، صنعت نیشکر که از نیروگاه‌های تولید هم‌زمان توان و حرارت بر پایه سیکل رانکین برای تولید هم‌زمان برق و بخار فرآیندی استفاده می‌کند، نمونه‌ای مهم از صنایع مصرف‌کننده گاز طبیعی است؛ در شرکت دعبل خزاعی، بخار موردنیاز برای تولید شکر و انرژی آسیاب، عمدتاً از طریق سوزاندن گاز طبیعی در دیگ بخار تأمین می‌شود و فرآیند پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار که در حال حاضر از طریق انشعاب بخار صورت می‌گیرد، منجر به افزایش مصرف گاز طبیعی و کاهش بازده کلی سامانه می‌گردد. شکاف مطالعاتی در این حوزه، مربوط به عدم ارزیابی جامع و کمی‌سازی دقیق امکان‌سنجی فنی و اقتصادی استفاده از انرژی خورشیدی برای پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار در نیروگاه تولید هم‌زمان برق و حرارت این شرکت، و به‌طور خاص، عدم مقایسه عملکرد و بازده دو نوع کلکتور خورشیدی رایج، یعنی کلکتور لوله خلا و کلکتور سهموی شکل^۳، برای این کاربرد خاص و در شرایط عملیاتی نیروگاه مذکور است. در بررسی ادبیات موجود مطالعه‌ای مشاهده نشد که امکان استفاده از پیش‌گرمکن‌های خورشیدی جهت تأمین انرژی پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار نیروگاه‌های تولید هم‌زمان برق و توان نیروگاه‌های کشت و صنعت نیشکر بر پایه گاز طبیعی را مورد بررسی قرار داده است. همچنین ماهیت خاص نیروگاه‌های تولید هم‌زمان برق و توان کشت و صنعت نیشکر و مشکلات کشت و صنعت در تأمین گاز طبیعی، ضرورت مطالعه در این زمینه را بیشتر می‌کند. در نیروگاه‌های کشت و صنعت نیشکر از بخار تولیدی علاوه بر چرخاندن توربین‌ها جهت تولید برق، برای به حرکت در آوردن غلطک‌های کارخانه نیشکر برای عصاره‌گیری و همچنین فرآیندهای حرارتی استفاده می‌شود. لذا، هدف اصلی این پژوهش، پر کردن این شکاف از طریق تحلیل ترمودینامیکی و مدل‌سازی دو پیکربندی مختلف برای ترکیب پیش‌گرمکن خورشیدی با سامانه موجود نیروگاه تولید هم‌زمان برق و حرارت دعبل خزاعی است؛ این مدل‌سازی شامل ارزیابی جامع بازده انرژی سامانه در حالت ترکیبی و مقایسه با سامانه کنونی جهت بهره‌برداری حداکثری از پتانسیل انرژی خورشیدی خواهد بود تا یافته‌ها به‌عنوان راهنمای عملی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در صنعت نیشکر جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی و پایداری عمل نمایند.

روش‌شناسی پژوهش

سامانه گرمایش آب خوراک دیگ بخار

نیروگاه تولید هم‌زمان برق و حرارت شرکت دعبل خزاعی برای تأمین آب خوراک دیگ بخار، از ترکیب دو جریان آب استفاده می‌کند:

1. TRNSYS
2. Evacuated Tube Collector- ETC
3. Parabolic Trough Collector- PTC

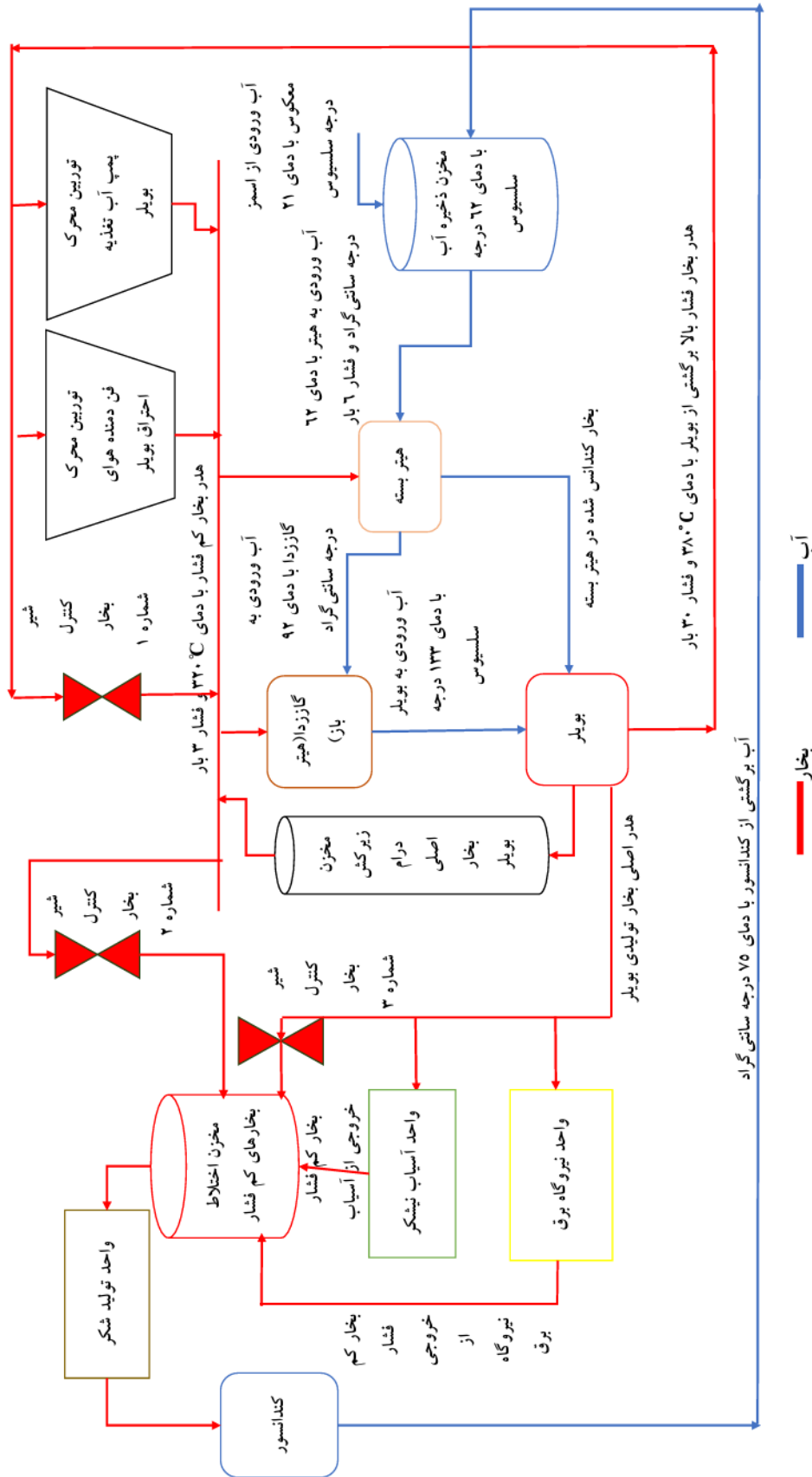
آب تصفیه‌شده‌ی خروجی از واحد اسمز معکوس با دمای حدود ۲۱ درجه سلسیوس و آب برگشتی از کندانسور با دمای تقریبی ۷۵ درجه سلسیوس. این دو جریان در مخزن ذخیره‌ی آب تغذیه با یکدیگر مخلوط شده و دمای مخلوط حاصل به حدود ۶۲ درجه سلسیوس می‌رسد. در ادامه، جریان مخلوط‌شده توسط پمپ به سمت گرمکن بسته‌ارسال می‌شود و در آنجا دمای آب تا حدود ۹۲ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. در مرحله‌ی نهایی، آب پیش‌گرم‌شده وارد گاززدا^۱ یا گرمکن باز شده و دمای آن تا حدود ۱۳۳ درجه سلسیوس بالا می‌رود تا شرایط لازم برای ورود به دیگ بخار فراهم شود. گرمکن بسته، یک مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای است که در آن جریان بخار ورودی و جریان آب خوراک به صورت جداگانه و بدون اختلاط با یکدیگر تبادل حرارت می‌کنند در حالی است که گرمکن باز، که به عنوان مخلوط‌کن نیز شناخته می‌شود، دستگاهی است که در آن بخار استخراجی مستقیماً با آب خوراک مخلوط شده و تبادل حرارتی صورت می‌گیرد. شماتیک کلی سیکل نیروگاه تولید همزمان توان و حرارت دعبل خزاعی در شکل ۱ نشان داده شده است. شیر کنترل بخار شماره ۱ برای کنترل دمای آب خوراک به صورت مستقیم بخار از دیگ بخار دریافت می‌کند. توربین‌های بخار نیز که یکی از آن‌ها محرک فن دمنده هوای مورد نیاز احتراق در دیگ بخار و دیگری محرک پمپ آب خوراک دیگ بخار هستند، بخار مورد نیاز خود را از دیگ بخار دریافت می‌کنند. مجموع بخارهای فشار پایین خروجی از شیر کنترل شماره ۱ و توربین‌های ذکر شده و بخار خروجی از مخزن زیرکش استوانه اصلی بخار^۳ انرژی مورد نیاز تجهیزات پیش‌گرمایش آب ورودی دیگ بخار که شامل گرمکن بسته و دستگاه گاززدا هستند، را تأمین می‌کند. بخش دیگری از بخار تولید شده در دیگ بخار انرژی مورد نیاز توربین‌های واحد نیروگاه تولید برق و واحد آسیاب نیشکر را تأمین می‌کند و پس از انجام کار و افت فشار در این واحدها، وارد مخزن اختلاط بخار می‌شود. مقداری از بخار تولیدی دیگ بخار نیز پس از افت فشار در شیر کنترل بخار شماره ۳ وارد مخزن اختلاط بخار می‌شود. هنگامی که دمای آب ورودی دیگ بخار به دمای مورد نظر برسد، بخار اضافی هدر بخار کم فشار از طریق شیر کنترل شماره ۲ به مخزن اختلاط بخار ارسال شده و مقدار بخار دریافتی از شیر کنترل شماره ۳ کاهش می‌یابد.

در این پژوهش، ابتدا با محاسبه‌ی توازن انرژی حرارتی در هیترها و گاززدا، میزان حرارتی که از مسیر شیر کنترل به سامانه وارد می‌شود، تعیین خواهد شد. در ادامه، با استفاده از مقدار حرارت مورد نیاز و طراحی پیش‌گرم‌کن خورشیدی، سطح مؤثر مورد نیاز برای صفحات خورشیدی محاسبه می‌شود. در واقع می‌توان با تأمین انرژی مورد نیاز پیش‌گرمایش آب خوراک توسط جمع‌کننده‌های خورشیدی در مواقعی که تابش خورشید در دسترس است، بخار کمتری از شیر کنترل بخار شماره ۱ دریافت کرد و بخارهای استخراج شده از توربین‌های فن دمنده هوا و پمپ آب خوراک و مخزن زیرکش از استوانه اصلی بخار را از طریق شیر کنترل بخار شماره ۲ به مخزن اختلاط بخار ارسال کرد و از شیر کنترل بخار شماره ۳ بخار کمتری برای مخزن اختلاط دریافت کرد. بنابراین مصرف انرژی دیگ بخار کاهش یافته و بازده کلی نیروگاه افزایش می‌یابد. در این طرح، با توجه به محدوده‌ی دمایی نقاط مختلف سامانه، دو نوع جمع‌کننده خورشیدی برای ارزیابی انتخاب گردید که شامل جمع‌کننده خورشیدی لوله‌خلأ با محدوده‌ی دمایی عملکرد ۵۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس و جمع‌کننده سهموی خطی با محدوده‌ی دمایی ۱۰۰ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد. در مدل‌سازی جمع‌کننده‌های لوله‌خلأ (شکل ۲ الف) تابش کل^۴ و در مدل‌سازی جمع‌کننده‌های سهموی شکل (شکل ۲ ب)، تابش مستقیم نرمال^۵ به عنوان جریان ورودی در نظر گرفته می‌شود. این دو نوع جمع‌کننده از دیدگاه فنی و حرارتی مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفتند. برای انجام مدل‌سازی دینامیکی و بررسی عملکرد گذرای سامانه، از نرم‌افزار ترنسیس نسخه ۱-۱۶ استفاده شد.

موقعیت نیروگاه و داده‌های آب و هوایی

نیروگاه تولید همزمان توان و حرارت دعبل خزاعی با ظرفیت تولید ۱۱ مگاوات برق در مختصات جغرافیایی عرض ۳۱/۳ درجه شمالی و طول ۴۸/۷ درجه شرقی نصف النهار گرینویچ در ۲۰ کیلومتری جنوب شهر اهواز و در فاصله بین رودخانه کارون و جاده اهواز-آبادان قرار دارد. میانگین تابش سالیانه خورشید در این منطقه حدود ۵/۵ کیلووات‌ساعت بر متر مربع برآورد می‌شود که این میزان تابش، استفاده از انرژی خورشیدی در این مکان را سودآور و مقرون‌به‌صرفه می‌سازد. در کمربند خورشیدی با عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر از ۴۰ درجه شمالی و به‌طور کلی در نواحی با فاصله کمتر از ۱۵ درجه از استوا، راندمان سالیانه انرژی در صورت جهت‌گیری شمالی - جنوبی پنل‌ها بیش‌تر است. بنابراین، با توجه به موقعیت جغرافیایی نیروگاه دعبل خزاعی، جهت‌گیری مناسب آرایه‌های خورشیدی، شمالی - جنوبی در نظر گرفته شد.

1. Closed Heater
2. Deaerator
3. Blow Down Tank
4. Total Radiation
5. Direct Normal Radiation



شکل ۱. شماتیک کلی سیکل نیروگاه تولید همزمان توان و حرارت دعبیل خزاعی (توسیم شده بر اساس اطلاعات نیروگاه)



ب



الف

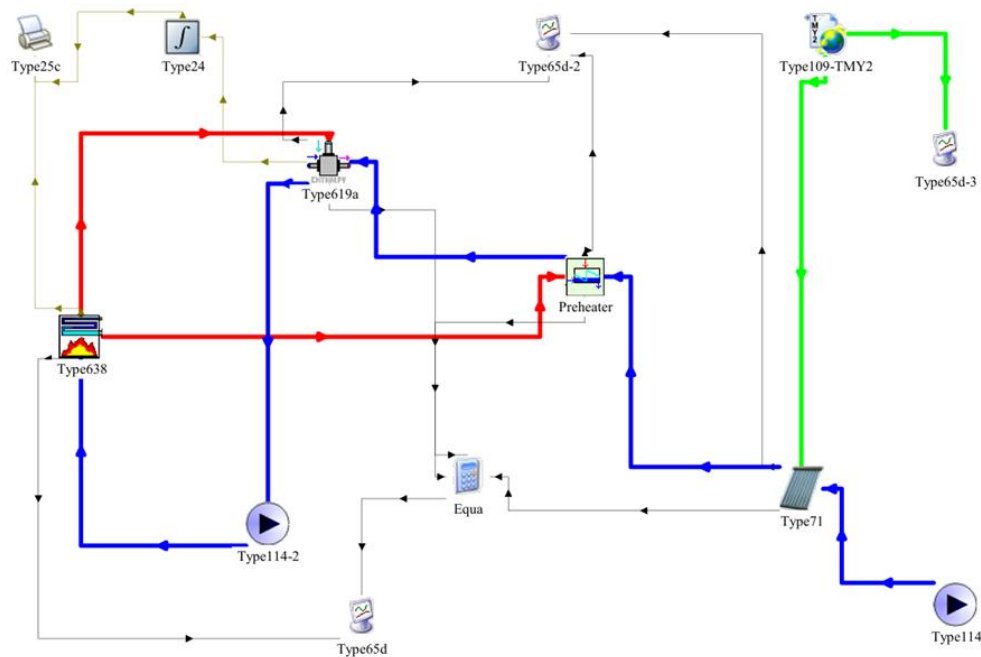
شکل ۲. کلکتور لوله خلاء (الف) و کلکتور سهموی شکل (ب)

در سامانه‌های خورشیدی تأمین انرژی مورد نیاز به شرایط آب‌وهوایی وابسته است؛ از جمله دمای محیط و میزان تابش خورشید در طول سال. لذا استخراج دقیق این داده‌های اقلیمی برای ورود به نرم‌افزار ترنسیس به منظور شبیه‌سازی عملکرد سامانه ضروری بود. در پژوهش حاضر برای استخراج داده‌های اقلیمی از نرم‌افزار 8.0.3 Meteonorm استفاده شد. این نرم‌افزار یک بانک اطلاعاتی جامع اقلیم‌شناسی محسوب می‌شود که در حوزه‌های انرژی خورشیدی و مطالعات مهندسی از جمله طراحی کلکتورهای خورشیدی حرارتی کاربرد وسیعی دارد. خروجی این نرم‌افزار شامل اطلاعاتی مانند میزان تابش، دمای محیط، مدت تابش، بارش، دمای نقطه شبنم و سایر پارامترهای اقلیمی است. داده‌های بانک اطلاعاتی Meteonorm بر اساس اندازه‌گیری‌های ۲۰ ساله محاسبه و میان‌یابی شده‌اند. برای استفاده از این داده‌ها در نرم‌افزار ترنسیس، از خروجی نوع TMY₂ در مقیاس ساعتی استفاده شده است. بر اساس اداره کل هواشناسی استان خوزستان، بیشینه دمای سالیانه در اهواز ۵۳/۷ درجه سلسیوس و کمینه آن ۱/۲- درجه سلسیوس است؛ نتایج استخراج‌شده از نرم‌افزار Meteonorm نیز این مقادیر را تأیید می‌کنند. در مدل‌سازی کلکتورهای لوله خلاء تابش کل و در مدل‌سازی کلکتورهای سهموی شکل، تابش مستقیم نرمال به عنوان جریان ورودی در نظر گرفته می‌شود. تابش کل و تابش مستقیم نرمال و تابش پراکنده^۱ برای موقعیت جغرافیایی نیروگاه در صفحه افقی برای یک دوره سالانه (۸۷۶۰ ساعت) با استخراج فایل TMY₂ از نرم‌افزار Meteonorm و وارد کردن این فایل در نرم‌افزار ترنسیس بدست آمد.

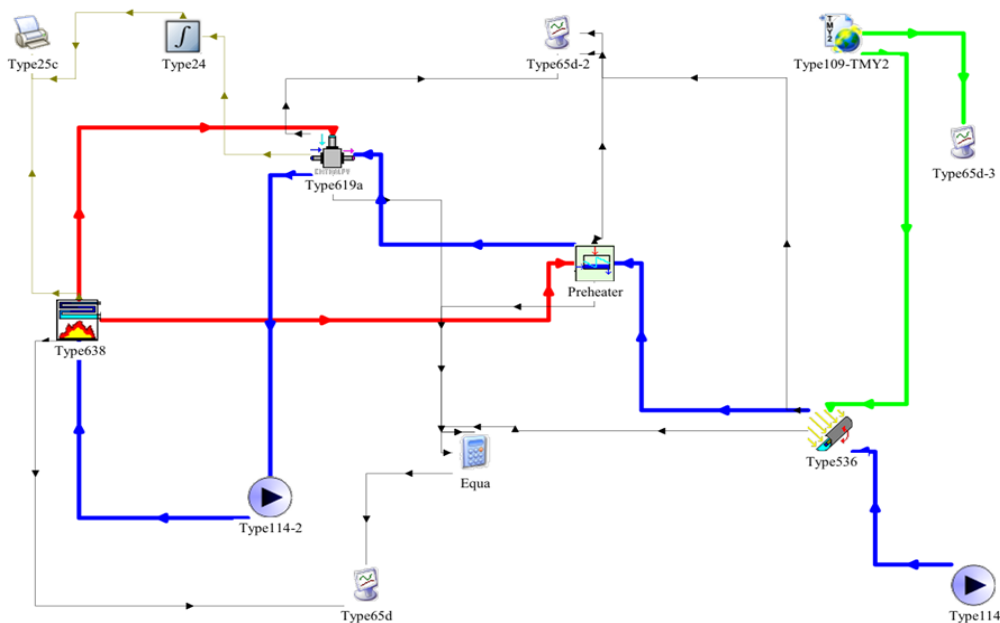
شبیه‌سازی سامانه یکپارچه

شبیه‌سازی سامانه یکپارچه جهت ارزیابی و تنظیم دقیق عملکرد آن، با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس انجام شد. این نرم‌افزار یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی رفتار گذرا^۲ در سامانه‌های حرارتی و انرژی است و در این پژوهش به عنوان اصلی برای شبیه‌سازی فنی و حرارتی سامانه‌ی ترکیبی کلکتور خورشیدی و نیروگاه مورد استفاده قرار گرفت؛ ترنسیس امکان مدل‌سازی دقیق عملکرد کلکتورهای خورشیدی و محاسبه‌ی خروجی انرژی حرارتی را در شرایط کاری واقعی نیروگاه فراهم ساخت. در این مدل‌سازی، متغیرهای خروجی سامانه از جمله دماهای ورود و خروج آب از کلکتورهای خورشیدی ($T_{in, coll}$ و $T_{out, coll}$)، مقدار گرمای جذب‌شده (\dot{Q})، و میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت دیگ بخار به‌صورت ساعتی محاسبه شدند. اجزای اصلی سامانه شامل کلکتورهای خورشیدی، گرمکن آب بسته، گاززدا، دیگ بخار، پمپ‌ها، منابع داده‌های هواشناسی، خروجی‌ها و واحد ثبت داده هستند. در نیروگاه کشت و صنعت دعبل خزاعی، از دیگ بخار نوع لوله‌ای^۳ برای تولید بخار فوق گرم استفاده می‌شود که آب در داخل لوله‌های آن جریان دارد، در حالی که لوله‌ها توسط گازهای داغ حاصل از احتراق احاطه شده‌اند. دمای سیال فرآیند ورودی به دیگ بخار نیروگاه کشت و صنعت دعبل خزاعی ۱۳۳ درجه سلسیوس با ظرفیت و دبی سیال فرآیند ورودی ۱۸۷۹۶۶ کیلوگرم بر ساعت است. مصرف گاز طبیعی این دیگ بخار ۱۲۵۸۲ مترمکعب گاز در ساعت و دارای بازده ۸۸ درصد است. دما و فشار سیال خروجی از آن به ترتیب ۳۸۰ درجه سلسیوس و ۵۰ بار است. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نمایی از طراحی و مدل‌سازی سامانه‌های پیش‌گرم‌کن خورشیدی لوله خلاء و سهموی شکل (شکل ۲)، یکپارچه‌شده با نیروگاه تولید همزمان برق و حرارت شرکت دعبل خزاعی را در محیط نرم‌افزار ترنسیس نشان می‌دهند. این نماهای شماتیک، آرایش و نحوه‌ی

اتصال اجزای مختلف مدل را به صورت دقیق به تصویر می‌کشند که با Type و عدد معرفی شدند. جزء (عدد) ۱۰۹ نشان دادن خوانشگر داده و پردازشگر تشعشع است که جهت خواندن داده‌های آب و هوا در فواصل زمانی منظم از یک فایل داده (قالب استاندارد TMY2) و تبدیل آن به یک سامانه دلخواه از واحدها و پردازش داده‌های تابش خورشیدی برای به دست آوردن تابش روی سطح شیبدار و زاویه تابش برای تعداد دلخواه از سطوح می‌باشد. جزء ۷۱ برای مدل‌سازی دینامیکی عملکرد جمع‌کننده‌های لوله خلاء طراحی شده است و با استفاده از رابطه بازدهی حرارتی لحظه‌ای استاندارد جمع‌کننده‌ها، که ارتباط بین بازدهی و پارامترهای عملیاتی را توصیف می‌کند، عمل می‌کند. جزء ۵۳۶ برای شبیه‌سازی دینامیکی عملکرد حرارتی جمع‌کننده سهموی شکل استفاده گردید که بر پایه داده‌های فنی سازنده صورت گرفت. برای شبیه‌سازی عملکرد حرارتی این نوع جمع‌کننده، از معادله راندمان تجربی استاندارد که بر مبنای مدل هتل-ویلیبر-بلیس^۱ بنا شده، استفاده گردیده است (Aail et al., 2025).



شکل ۳. مدل‌سازی سامانه پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار و کلکتور خورشیدی لوله خلاء در نرم‌افزار ترنسیس (یافته‌های پژوهش)



شکل ۴. مدل‌سازی سامانه پیش‌گرمایش آب خوراک و کلکتور خورشیدی لوله سهموی شکل در نرم‌افزار ترنسیس (یافته‌های پژوهش)

دیگ بخار به عنوان جزء اصلی تأمین‌کننده انرژی حرارتی مورد نیاز، با استفاده از جزء ۶۳۸ در نرم‌افزار ترنسیس مدل‌سازی شده است. مدل دیگ بخار در ترنسیس بر اساس کارایی حرارتی ثابت و توان اسمی آن تعریف شده است. در این مطالعه، برای شبیه‌سازی فرآیند گرمایش آب خوراک در گاززدا پیش از ورود به دیگ بخار، از جزء ۶۱۹ در نرم‌افزار ترنسیس استفاده شده است. این جزء، یک مبدل حرارتی جریان مستقیم را مدل‌سازی می‌کند که در آن آب خوراک با بخار استخراج‌شده از دیگ بخار، به صورت مستقیم، پیش‌گرم می‌شود. جزء ۳۱۷ به تشریح مبانی مدل‌سازی مبدل حرارتی پیش‌گرم‌کن مورد استفاده در شبیه‌سازی سیکل ترمودینامیکی با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس می‌پردازد. هدف اصلی این مدل، تعیین دبی جرمی بخار استخراجی مورد نیاز جهت تأمین بار حرارتی مورد نظر و حفظ شرایط عملیاتی پایدار در سیستم است. جزء ۱۱۴ یک پمپ تک سرعته (ثابت) را مدل‌سازی می‌کند که قادر به حفظ نرخ جریان جرمی خروجی سیال ثابت است. جزء ۲۵۰ (پرینتر) داده‌های خروجی مورد نظر را از نقاط مختلف سامانه جمع‌آوری و در فواصل زمانی مشخص در یک فایل متنی ذخیره می‌کند. برای نظارت بر عملکرد دینامیکی سامانه در حین شبیه‌سازی، از جزء ۶۵ (نمایشگر گرافیکی آنلین) استفاده شده است که تغییرات متغیرهای کلیدی سامانه، مانند دما و توان را، به صورت برخط و در لحظه نشان می‌دهد. این نمایش گرافیکی به درک بهتر رفتار سامانه در شرایط مختلف کمک کرده و صحت عملکرد مدل را می‌توان بر اساس آن تأیید کرد. در تحلیل عملکرد بلندمدت یک سیستم انرژی، محاسبه مقادیر تجمعی مانند انرژی تولیدی کل، صرفه‌جویی در سوخت کل، یا انتشار کربن سالانه اهمیت حیاتی دارد. برای این منظور، از جزء ۲۴ (انتگرال‌گیر) در نرم‌افزار ترنسیس استفاده شده است. این جزء، یک ابزار ریاضی برای انتگرال‌گیری عددی از متغیرهای ورودی در طول دوره شبیه‌سازی است. از جزء Equa به عنوان یک ماشین حساب جهت اعمال معادلات و محاسبات استفاده شد.

رابطه ۱ بازده حرارتی لحظه‌ای کلکتور لوله خلاء را نشان می‌دهد که مبنای محاسبات در نرم‌افزار ترنسیس است.

$$\eta = A_0 - A_1 \frac{(T_c - T_a)}{I} - A_2 \frac{(T_c - T_a)^2}{I} \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه ۱، η بازده حرارتی کلکتور (بدون واحد)، A_0 ضریب بهره‌وری در شرایط ایده‌آل (بدون واحد)، A_1 ضریب اتلاف حرارت کلی کلکتور ($W/m^2.K$)، A_2 ضریب اتلاف حرارتی مرتبه دوم ($W/m^2.K$)، T_c دمای سیال ورودی به کلکتور (C)، T_a دمای محیط اطراف (C) و I شدت تابش خورشیدی کلی روی صفحه کلکتور (W/m^2) را نشان می‌دهد. ضریب بهره‌وری در شرایط ایده‌آل بیانگر میزان جذب تابش توسط کلکتور در غیاب اتلافات حرارتی است. ضریب A_1 نشان‌دهنده‌ی میزان اتلاف گرما از سطح کلکتور به محیط اطراف، و ضریب A_2 بیانگر تلفات حرارتی ناشی از تابش حرارتی (به‌ویژه در دماهای بالاتر) است. ضرایب عملکرد حرارتی کلکتور که در نرم‌افزار ترنسیس برای محاسبه‌ی بازده لحظه‌ای وارد شده‌اند، بر اساس پارامترهای فنی استخراج‌شده از کاتالوگ سازنده تنظیم گردیده‌اند. این داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. با در نظر گرفتن دمای عملیاتی آب خوراک دیگ بخار در ۱۳۳ درجه سلسیوس، مصرف نسبتاً بالای انرژی، و همچنین قیمت پیشنهادی شرکت انرژی نو هاینینگ می‌شنگ^۴ کلکتور لوله خلاء مدل حرارتی به‌عنوان گزینه‌ی نهایی در مقایسه با مدل‌های دیگر انتخاب شد.

جدول ۱. ضرایب عملکرد حرارتی و مشخصات مازول استخراج شده از کاتالوگ سازنده برای مدل‌سازی کلکتور لوله خلاء

پارامتر	مقدار	واحد
بازده نوری (A_0)	۰/۷۰	بدون واحد
ضریب اتلاف خطی (A_1)	۱/۵۲	$W/(m^2.C)$
ضریب اتلاف درجه دوم (A_2)	۰/۰۰۸۵	$W/(m^2.C)^2$
ابعاد لوله (قطر*طول)	۵۸×۱۸۰۰	M
تعداد لوله در مازول	۲۴	عدد
فاصله مرکز به مرکز لوله‌ها	۷۵	M
مساحت هر مازول	۳/۲۴	m^2
دمای کاری	-۳۷ ~ ۲۵۰	C
راندمان	۵۵ %	-

1. Direct-contact Heat Exchanger
2. Preheater stage
3. Quantity Integrator
4. Haining Meisheng New Energy Co.

کلکتورهای سهموی خطی از فناوری‌های حرارتی خورشیدی متمرکزکننده هستند که نور مستقیم خورشید را بر روی یک لوله جاذب^۱ در نقطه کانونی آینه سهموی متمرکز می‌کنند. این ویژگی امکان دستیابی به دماهای بالا را فراهم می‌آورد که آن‌ها را برای کاربردهای صنعتی مانند پیش‌گرمایش آب خوراک نیروگاه‌ها مناسب می‌سازد. راندمان لحظه‌ای کلکتور سهموی شکل به صورت کلی با توجه به پارامترهای اپتیکی و تلفات حرارتی از رابطه ۲ تعریف می‌شود.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_a I_{DNI}} = F_r(T\alpha)_n - F_r U_L \frac{T_{fi} - T_a}{I_{DNI}} \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه ۲، η راندمان حرارتی لحظه‌ای کلکتور (بدون واحد)، Q_u توان حرارتی مفید خروجی (گرمای جذب شده توسط سیال عامل) (KJ/s)، A_a مساحت دهانه کلکتور (مساحت مورد استفاده برای جمع آوری تابش) (m^2)، I_{DNI} تابش مستقیم نرمال ورودی بر سطح دهانه کلکتور (W/m^2)، $F_r(T\alpha)_n$ راندمان رهگیری (راندمان نوری در شرایط ایده‌آل) (بدون واحد)، $F_r U_L$ شیب راندمان (ضریب کلی تلفات حرارتی کلکتور) ($W/m^2.K$)، T_{fi} دمای ورودی سیال عامل در کلکتور (C) و T_a دمای محیط اطراف کلکتور (C) است. پارامترهای $F_r U_L$ و $F_r(T\alpha)_n$ از کاتالوگ سازنده استخراج و محاسبه شدند (جدول ۲).

جدول ۲. مقادیر مربوط به راندمان‌های اپتیکی کلکتور سهموی شکل ارائه شده توسط سازنده

مقدار	نماد	پارامترهای نوری
۰/۹۲	ρ	بازتاب آینه
۰/۹۳	\mathcal{J}	عبور پوشش شیشه‌ای
۰/۹۵	α	جذب لوله گیرنده
۰/۹۸	η_{geom}	راندمان هندسی سایه اندازی

راندمان رهگیری ($F_r(T\alpha)_n$) از رابطه ۳ محاسبه گردید. این روش تضمین می‌کند که تمامی تلفات نوری (بازتاب، جذب و عبور) و همچنین خطاهای هندسی^۲ در مدل لحاظ می‌شوند.

$$F_r(T\alpha)_n \approx \rho \cdot \mathcal{J} \cdot a \cdot \eta_{geom} \quad \text{رابطه ۳}$$

شیب راندمان ($F_r U_L$) نشان‌دهنده میزان اتلاف حرارت کلکتور در واحد دما، مساحت و زمان است. با توجه به وجود لوله گیرنده با خلاء بسیار بالا ($3 \times 10^{-4} Pa$) و گسیلندگی^۳ پایین که توسط شرکت سازنده اعلام شده، تلفات حرارتی ناشی از جابجایی و تابش به حداقل مقدار ممکن کاهش یافته است. بنابراین، بر اساس داده‌های فنی مرجع مربوط به کلکتورهای سهموی با کیفیت بالا، مقدار $W/m^2.K$ ۰/۳ به‌عنوان شیب راندمان انتخاب و در مدل ترنسیس وارد شد (Duffie and Beckman, 2013). مشخصات ماژول کلکتور سهموی مدل ZY-T-40 ساخت شرکت شاندونگ^۴ که شبیه‌سازی بر مبنای آن انجام شده است، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات ماژول کلکتور خورشیدی سهموی شکل مورد استفاده

واحد	مقدار	پارامتر
M	۶	طول کلکتور
M	۳/۲۰	عرض کلکتور
-	۶۴	فاکتور تمرکز
m^2	۳/۲۴	مساحت هر ماژول
C	۲۵۰	دمای کاری
C	۳۰۰	حداکثر دمای کاری
-	٪۶۲/۸	راندمان

تعداد ماژول‌ها و ابعاد نهایی جمع‌کننده‌ها بر اساس مساحت مورد نیاز برای تامین کل انرژی گرمایی پیش‌گرمایش آب دیگ بخار در اوج تابش خورشیدی محاسبه گردید. از تقسیم مساحت به دست آمده بر مساحت ماژول جمع‌کننده‌های خورشیدی، تعداد ماژول‌ها

1. Receiver Tube
2. Effect of Tracking and Geometry
3. Low Emissivity
4. Shandong Co.

به دست آمد. مساحت هر ماژول جمع‌کننده لوله خلاء ۳/۲۴ مترمربع و مساحت هر ماژول جمع‌کننده سهموی شکل ۱۹/۲ مترمربع در نظر گرفته شد (طبق کاتالوگ جمع‌کننده‌های استفاده شده در پروژه). برای جمع‌کننده‌های لوله خلاء در کاربردهای دمایی متوسط، معمولاً طول رشته‌های سری بلندتر در نظر گرفته می‌شود. برای تبدیل ماژول مورد نیاز به یک ساختار قابل اجرا، ترکیب سری و موازی انتخاب گردید. در این طرح، طول رشته‌های سری به گونه‌ای انتخاب شد تا در عین دستیابی به دمایی خروجی، تعداد خطوط موازی کاهش یافته و پیچیدگی سیستم لوله‌کشی به حداقل برسد.

انتشار گازهای گلخانه‌ای

در این بخش، جهت بررسی پتانسیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در نتیجه استفاده از گرمکن خورشیدی از نرم‌افزار رت اسکرین^۱ استفاده گردید. انتشار گازهای گلخانه بر اساس نتایج داده‌های ترنسیس در نرم‌افزار رت اسکرین محاسبه گردید و براساس دی اکسید کربن معادل ارائه گردید. به طور کلی، این نرم‌افزار از یک روش استاندارد مبتنی بر موازنه جرم و انرژی و فاکتورهای انتشار^۲ استفاده می‌کند. در این نرم‌افزار از یک پایگاه داده از فاکتورهای انتشار برای سوخت‌های مختلف استفاده کرده و تولید انرژی خورشیدی پیش‌بینی شده را با آن مقایسه می‌کند تا میزان صرفه‌جویی در انتشار گازهای گلخانه‌ای را به صورت تن در سال گزارش دهد.

اعتبارسنجی

به منظور تأیید اعتبار و صحت مدل شبیه‌سازی توسعه‌یافته در نرم‌افزار ترنسیس، انجام فرایند اعتبارسنجی خروجی‌ها با مقایسه داده‌ها در برابر یک منبع معتبر و مستقل ضروری است. این استراتژی، که با روش‌شناسی‌های استاندارد مهندسی همسو است، دقت مدل را در انطباق با داده‌های واقعی یا تجربی ارزیابی می‌کند. برای این منظور، داده‌های میدانی ثبت‌شده مانند شدت تابش آفتاب، دما، سرعت باد، طول روز، پارامترهای دمایی سیال ورودی و خروجی، زوایای آزیموت و زینت، پارامترهای نوری، مساحت جمع‌کننده‌ها و راندمان همراه با داده‌های عملکرد نیروگاه خورشیدی شماره ۳۶ واقع در صحرای موهاوی ایالت کالیفرنیا برای یک روز مشخص (۱۸ ژوئیه ۱۹۹۱) به‌عنوان مبنای اعتبارسنجی انتخاب شدند (Jones et al., 2001). این منطقه به دلیل همگونی مناسب شرایط اقلیمی و قابلیت دسترسی به داده‌های تجربی معتبر، به‌عنوان مطالعه موردی برگزیده شد.

تحلیل اقتصادی

هدف این تحلیل، بررسی توجیه اقتصادی سرمایه‌گذاری در سیستم خورشیدی از طریق مقایسه هزینه‌های اولیه و نگهداری با منافع حاصل از اجرای طرح (کاهش هزینه سوخت و آلاینده‌ها) است. هزینه سالانه نصب و نگهداری ۲/۵ درصد از سرمایه‌گذاری اولیه در نظر گرفته شده که بر اساس پروژه‌های مشابه و داده‌های بین‌المللی (IRENA, 2020; Vimmerstedt, 2022) تعیین شده است. شاخص‌های اقتصادی اصلی شامل دوره بازگشت سرمایه، ارزش فعلی خالص (NPV) و نرخ بازگشت داخلی (IRR) با در نظر گرفتن نرخ بهره، قیمت سوخت و عمر مفید پروژه ارزیابی شده‌اند. محاسبات توسط نرم‌افزار RETScreen انجام گرفته که امکان بررسی فنی و مالی پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر را به‌صورت یکپارچه فراهم می‌سازد. در مدل اقتصادی، پارامترهایی از جمله نرخ افزایش بهای سوخت (۴۵ درصد)، نرخ تورم (۲۲ درصد) و نرخ تخفیف (صفر درصد) به همراه مؤلفه‌های مالیاتی نظیر مالیات بر درآمد (۳۰ درصد) و استهلاک خط مستقیم لحاظ شده‌اند. عمر مفید اقتصادی پروژه ۲۰ سال و دوره استهلاک مالیاتی ۱۵ سال فرض گردیده است تا با رویکردی محافظه‌کارانه، ریسک منسوخ شدن فناوری کاهش یافته و بازگشت سرمایه در دوره‌ای کوتاه‌تر تضمین شود.

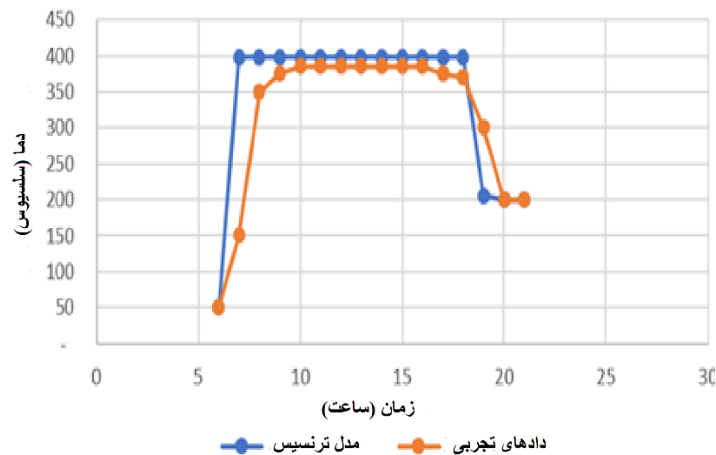
نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل توسعه یافته بر اساس داده‌های تجربی

نتایج شبیه‌سازی به‌صورت ساعتی با داده‌های تجربی واقعی مقایسه شد. مهم‌ترین پارامتر مورد بررسی در این مقایسه، دمایی خروجی سیال انتقال حرارت از مزرعه‌ی خورشیدی بود. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نتایج نشان‌دهنده‌ی تطابق بسیار مطلوب میان مقادیر شبیه‌سازی‌شده و داده‌های تجربی نیروگاه SEGS VI است. میانگین اختلاف نسبی بین خروجی مدل و مقادیر تجربی تنها ۶ درصد برآورد شده است. این میزان خطای پایین بیانگر دقت و اعتبار بالای مدل ترمودینامیکی توسعه‌یافته است. در نتیجه، با توجه به

1. Retscreen Software
2. Emission Factors
3. Solar Electric Generating System VI

موفقیت در فرآیند اعتبارسنجی، مدل حاضر می‌تواند به‌عنوان ابزاری قابل اعتماد برای تحلیل عملکرد حرارتی سامانه پیش‌گرمایش خورشیدی در نیروگاه تولید هم‌زمان توان و حرارت دعبل خزاعی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵. اعتبارسنجی مدل ترنسیس با داده‌های واقعی نیروگاه SEGS VI (یافته‌های پژوهش)

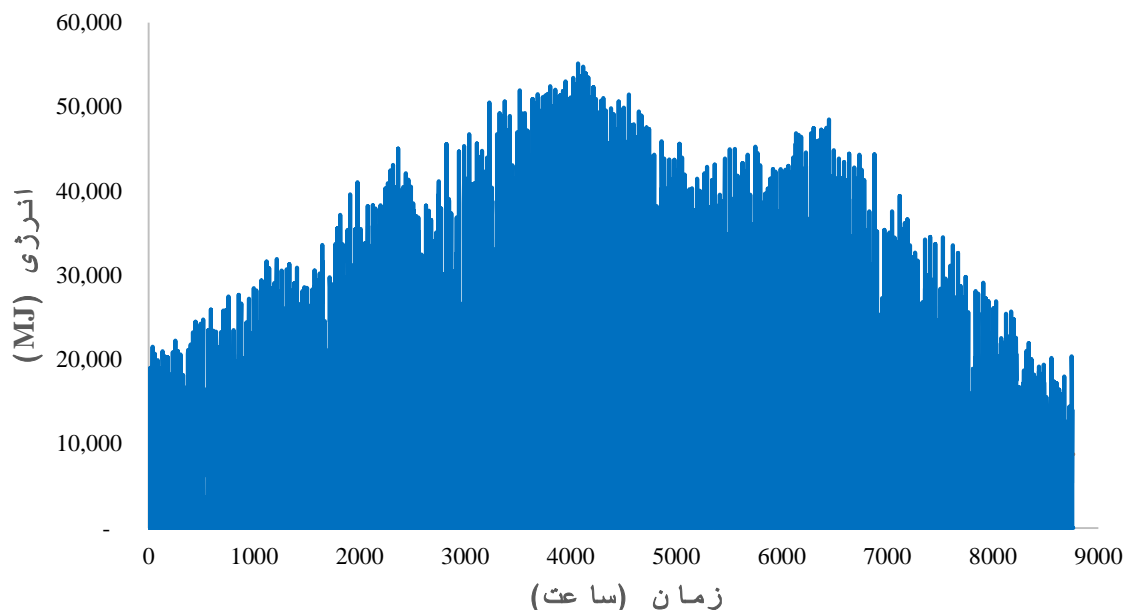
نرخ انتقال حرارت ثابت در گرمکن و گاززدا در شرایط حداکثر ظرفیت تولید نیروگاه

نرخ انتقال حرارت در گرمکن، گاززدا و مجموع نرخ انتقال حرارت در هر دو تجهیز (انرژی مورد نیاز پیش‌گرمایش آب خوراک) را در طول یک سال کاری (۸۷۶۰ ساعت) در شرایط حداکثر ظرفیت تولید ثابت به ترتیب ۲۲/۶۴، ۳۳/۱۸ و ۵۵/۸۲ گیگاژول بر ساعت به دست آمد. مقدار نرخ انتقال حرارت در گرمکن نشان‌دهنده میزان انرژی حرارتی است که برای افزایش دمای آب خوراک از ۶۲ درجه سلسیوس به ۹۲ درجه سلسیوس مورد نیاز است. به طور مشابه، مقدار نرخ انتقال حرارت در گاززدا نشان‌دهنده انرژی حرارتی مورد نیاز برای حذف گازهای غیرقابل کندانس و افزایش دمای آب خوراک از ۹۲ درجه سلسیوس به ۱۳۳ درجه سلسیوس می‌باشد. مجموع این دو مقدار کل بار حرارتی مورد نیاز برای آماده‌سازی آب خوراک قبل از ورود به دیگ بخار در حداکثر ظرفیت تولید را نشان می‌دهد. در بازه یک ساله، انرژی مورد نیاز گرمکن، گاززدا و کل به ترتیب ۱۹۸۳۳۹، ۲۹۰۶۸۳ و ۴۸۹۰۲۲ گیگاژول محاسبه شد.

شبیه‌سازی جمع‌کننده‌های خورشیدی

شکل ۶ نتایج حاصل از شبیه‌سازی یک‌ساله را نشان می‌دهد که عملکرد سامانه کلکتور خورشیدی با لوله‌های خلأ را برای تأمین کل توان حرارتی مورد نیاز پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار در شرایط اوج تابش بررسی کرده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تولید انرژی این سامانه دارای یک الگوی نوسانی فصلی است؛ به‌طوری‌که بیشترین میزان تولید انرژی در فصول گرم سال و ساعات میانی روز رخ می‌دهد، در حالی که در فصول سرد و در ساعات اولیه یا پایانی روز، تولید انرژی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. بر اساس تحلیل داده‌ها، حداکثر توان تولیدی سامانه کلکتور لوله خلأ در شرایط اوج تابش به ۵۵/۱۶ گیگاژول بر ساعت می‌رسد. این مقدار انرژی قادر است حدود ۹۹ درصد از نیاز حرارتی برای پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار را در حالت پایه تأمین کند که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این سامانه در کاهش چشمگیر بار حرارتی پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار در ساعات اوج تابش است. با این حال، به دلیل ماهیت متغیر تابش خورشیدی، میزان کل انرژی تولیدی سالانه این سامانه ۷۶۹۰۴ گیگاژول برآورد شده است که حدود ۱۵/۷ درصد از کل انرژی حرارتی سالانه مورد نیاز برای پیش‌گرمایش آب خوراک را پوشش می‌دهد. این امر مستقیماً به کاهش دبی بخار مورد نیاز برای تأمین نیاز حرارتی پیش‌گرمایش و همچنین کاهش قابل توجه در مصرف سوخت دیگ بخار منجر می‌شود. این یافته‌ها با مطالعات مشابهی مانند مطالعه Abdel-Dayem & Hawsawi (۲۰۲۲) که در آن امکان‌سنجی استفاده از انرژی خورشیدی برای پیش‌گرمایش آب خوراک در نیروگاه‌های تولید هم‌زمان با استفاده از مدل‌سازی ترنسیس بررسی شده است، همخوانی دارد. Wang et al. (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای مشابه، سهم انرژی خورشیدی در یک نیروگاه حرارتی را حدود ۱۲ درصد گزارش کردند. همچنین، Karapekmez & Dincer (۲۰۲۰) در پژوهشی بر روی سامانه‌های مشابه، به میزان صرفه‌جویی انرژی در حدود ۷ تا ۱۵ درصد اشاره داشته‌اند. مساحت بهینه‌ی سطح کلکتور لوله خلأ برای تأمین کل توان حرارتی پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار در شرایط اوج تابش، ۲۹،۰۰۰ مترمربع به‌دست آمده است. این نتیجه نشان می‌دهد که سامانه‌ی خورشیدی لوله خلأ با این سطح جذب، به‌عنوان یک منبع

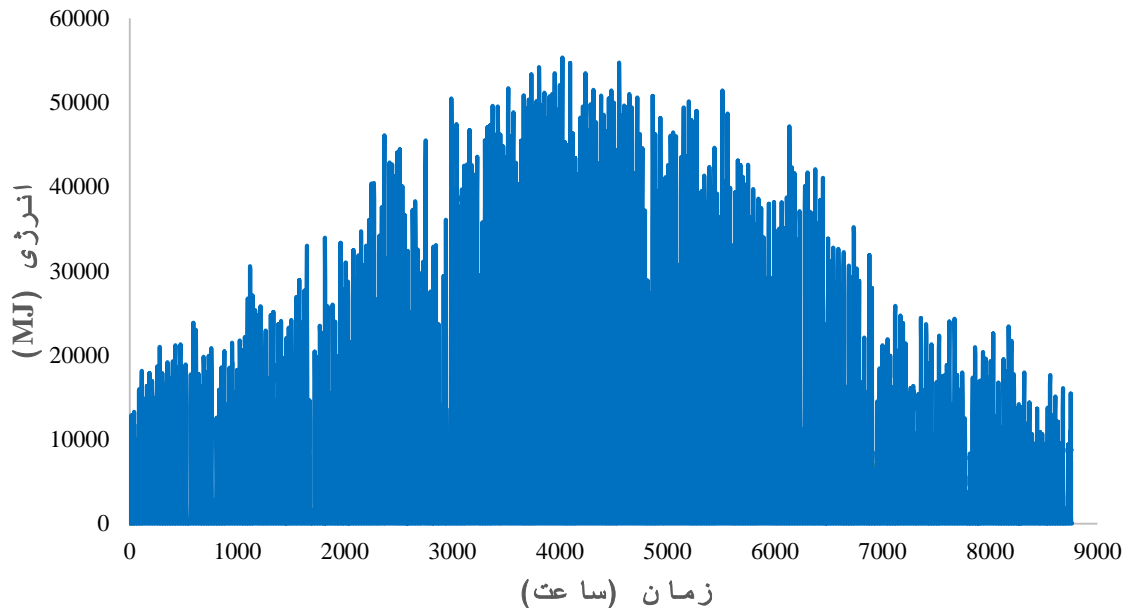
کمکی، مؤثر عمل کرده و می‌تواند در ساعات دارای تابش بالا، بخش عمده‌ای از انرژی مورد نیاز را فراهم آورد و در سایر زمان‌ها، میزان مصرف گاز طبیعی برای تأمین بار حرارتی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد.



شکل ۶. انرژی تولید شده توسط کلکتور لوله خلاء در بازه زمانی یکساله (یافته‌های پژوهش)

شکل ۷ نتایج حاصل از شبیه‌سازی یک‌ساله‌ی عملکرد سامانه کلکتور خورشیدی سهموی را جهت تأمین کل توان حرارتی مورد نیاز برای پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار در شرایط اوج تابش نشان می‌دهد. بر اساس تحلیل داده‌ها، حداکثر توان تولیدی این سامانه در اوج تابش به ۵۵/۳۳ گیگاژول بر ساعت می‌رسد که قادر به پوشش ۹۹ درصد از انرژی مورد نیاز پیش‌گرمایش در حالت پایه نیروگاه است. همانند کلکتور لوله خلاء، ماهیت متغیر انرژی خورشیدی بر تولید کلی سالانه این نوع کلکتور نیز تأثیرگذار است؛ به‌طوری‌که کل انرژی تولیدی سالانه‌ی کلکتور سهموی با مساحت ۳۴۵۶۰ مترمربع، برابر با ۵۶۱۲۲ گیگاژول در سال محاسبه شد که تنها ۱۱/۴ درصد از کل انرژی حرارتی سالانه‌ی مورد نیاز برای پیش‌گرمایش آب خوراک را تأمین می‌کند. این نتایج با تحقیقات انجام شده در این زمینه هم‌راستا است (Wang et al., 2018; Karapekmez & Dincer, 2020). به عنوان مثال Burin et al. (۲۰۱۵) نشان دادند استفاده از جمع‌کننده خورشیدی سهموی برای پیش‌گرمایش آب تغذیه دیگ بخار در نیروگاه تولید هم‌زمان توان و حرارت وابسته به سوخت باگاس نیشکر در برزیل موجب افزایش تولید برق به میزان ۳۶۱۰ مگاوات‌ساعت در سال می‌شود که ۱/۵ درصد بیش از طراحی پایه‌ی کارخانه است. در مطالعه مشابه در برزیل، گزارش شده است که استفاده از کلکتورهای خورشیدی فرنل خطی جهت گرمایش آب خوراک مولدهای بخار در نیروگاه تولید هم‌زمان انرژی و حرارت نیشکر موجب کاهش حدود ۱۰ درصد مصرف سوخت می‌شود (López et al., 2018). برای پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار در نیروگاه تولید هم‌زمان توان و گرمای نیشکر در کلمبیا، دو نوع مختلف کلکتور شامل کلکتور سهموی خطی و کلکتور فرنل خطی مقایسه شدند. نتایج نشان داد افزودن کلکتورهای حرارتی خورشیدی، مصرف سوخت را در طول یک سال با شرایط آب و هوایی معمولی ۱/۱ درصد کاهش می‌دهد که معادل ۶۴۰۰ تن باگاس در سال است. علاوه بر این، PTC در طول سال ۳۵٪ حرارت بیشتری به ازای هر متر مربع از سطح دهانه نسبت به LFC تولید کرد (López et al., 2021). نتایج ارزیابی استفاده از کلکتور سهموی خطی جهت گرمایش آب خوراک به جای باگاس نیشکر در نیروگاه تولید هم‌زمان واقع در برزیل نشان داد با پیش‌گرمایش خورشیدی، نیاز به مصرف باگاس برای تولید بخار اولیه کاهش می‌یابد. این امر اجازه می‌دهد تا باگاس ذخیره‌شده برای راه‌اندازی نیروگاه در دوره‌هایی که برداشت نیشکر وجود ندارد استفاده شود (Burin et al., 2015). در مطالعه ای ارزیابی یکپارچه‌سازی نیروگاه خورشیدی متمرکز با یک نیروگاه تولید هم‌زمان باگاس نیشکر واقع در کامپو گراند (برزیل) انجام شد که از فناوری‌های فرنل خطی، سهموی خطی و برج خورشیدی استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان داد صادرات برق به شبکه بین ۱/۳ درصد تا ۱۹/۸ درصد افزایش یافت (Burin et al., 2016). Chantasiriwan and Charoenvai (۲۰۲۰) نشان دادند که ادغام یک کلکتور خورشیدی سهموی پارابولیک (با مساحت ۱۰۰۰ متر مربع) در سامانه خشک‌کن بخار فوق‌گرم یک کارخانه تولید هم‌زمان نیشکر موجب

کاهش مصرف سوخت (کاهش مصرف باگاس خشک به میزان ۲۸۳ تن در سال) می‌شود.



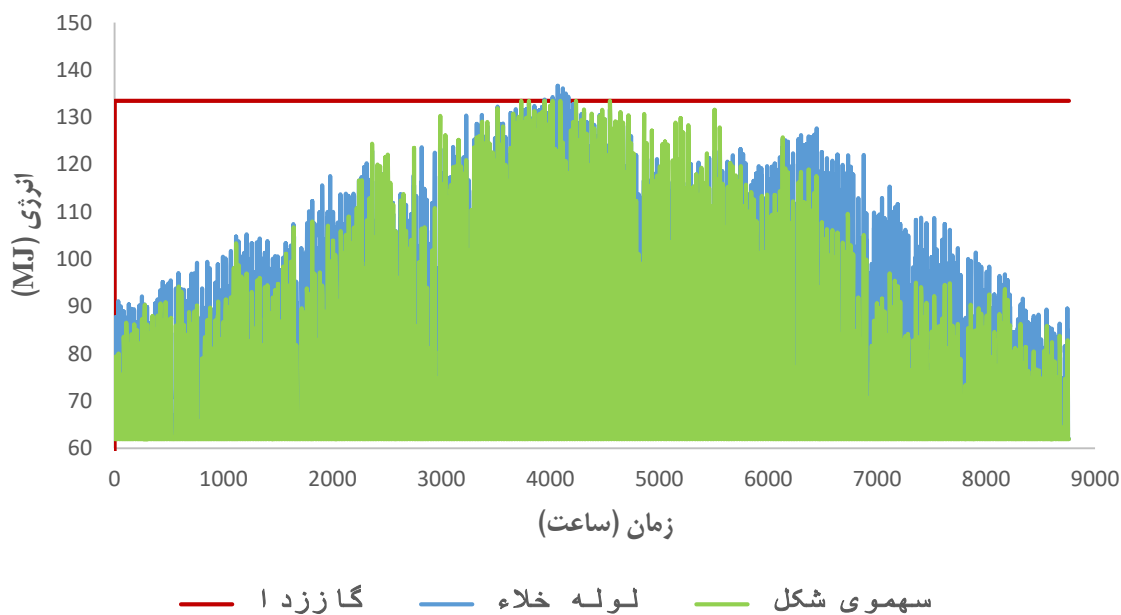
شکل ۷. انرژی تولید شده توسط کلکتور سهموی شکل در بازه زمانی یکساله (یافته‌های پژوهش)

در یک مقایسه‌ی مستقیم با سامانه کلکتور لوله‌خلاق، تفاوت‌های مهمی آشکار می‌شود: سامانه لوله‌خلاق با مساحت کمتر توانسته است سهم بیشتری (۴/۳ درصد بیشتر) از کل توان حرارتی سالانه را پوشش می‌دهد. این مقایسه نشان می‌دهد که علی‌رغم سطح جذب کوچک‌تر، کلکتور لوله‌خلاق بازدهی بالاتری در تولید انرژی سالانه داشته و می‌تواند بار حرارتی بیشتری را نسبت به سامانه سهموی با سطح بزرگ‌تر، از منبع خورشیدی تأمین کند. همان‌طور که بیان شد جمع‌کننده سهموی با مساحت ۳۴۵۶۰ مترمربع، پتانسیل تولید ۷۵۹۰۴ گیگاژول انرژی در سال را دارد، در حالی که جمع‌کننده لوله‌خلاق با مساحت ۲۹۰۰۰ مترمربع دارای پتانسیل تولید ۷۵۹۰۴ گیگاژول انرژی در سال است. مساحت‌های جمع‌کننده‌ها بر اساس تأمین کل توان حرارتی پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار در ساعت اوج تابش به دست آمد. مقایسه ظرفیت تولیدی دو نوع کلکتور در ساعات اوج تابش خورشیدی نشان می‌دهد که هر دو سامانه قادر به تأمین بخش قابل توجهی از انرژی مورد نیاز هستند. با این حال، برتری عملکردی کلکتور لوله‌خلاق، عمدتاً ناشی از دو عامل کلیدی بهره‌برداری بهینه از کل تابش خورشیدی (تابش مستقیم و پراکنده) بالا در منطقه مطالعاتی و حفظ راندمان بالا در محدوده‌ی دمایی متوسط عملیاتی، که مدیون تکنولوژی خلاق و کاهش چشمگیر تلفات حرارتی است. این دو عامل مشترک باعث شده‌اند که کلکتور لوله‌خلاق، در مقایسه با واحد مساحت، چگالی انرژی مؤثرتری را جهت تأمین انرژی پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار فراهم آورد. نتیجه‌ی این برتری، کاهش مساحت نصب مورد نیاز و بهبود عملکرد کلی سالانه بوده است. استفاده از جمع‌کننده لوله‌خلاق پتانسیل کاهش مصرف انرژی معادل ۲/۲۲۵ میلیون متر مکعب گاز طبیعی در سال را فراهم می‌کند، در حالی که این مقدار با استفاده از جمع‌کننده سهموی شکل برابر با ۱/۶۲۴ میلیون متر مکعب در سال به دست آمد. در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که سامانه‌های خورشیدی در این کاربرد به‌عنوان منابع تکمیل‌کننده عمل می‌کنند و قادر به تأمین پیوسته‌ی کل انرژی مورد نیاز پیش‌گرمایش در تمام طول سال نیستند. با این حال، استفاده از آن‌ها به‌طور مؤثر باعث کاهش بار حرارتی سیستم پایه و صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که دمای خروجی از دو بخش کلیدی سامانه پیش‌گرمایش آب خوراک، یعنی گرمکن بسته و گاززدا، به‌صورت پایدار بر روی ۹۲ و ۱۳۳ درجه سلسیوس ثابت باقی می‌ماند. این سطح از ثبات دمایی حاکی از عملکرد مؤثر سامانه کنترل نیروگاه در تنظیم دقیق عملکرد گرمکن و گاززدا، به‌منظور حفظ دماهای خروجی مطلوب، حتی در مواجهه با نوسانات شرایط محیطی است. در واقع، این مقادیر دمایی ثابت، نقاط هدف تنظیم‌شده برای سامانه کنترلی نیروگاه محسوب می‌شوند که برای بهینه‌سازی فرآیند

سیکل رانکین و ممانعت از آسیب‌های احتمالی به تجهیزات پایین‌دست (نظیر پمپ‌ها) نقشی حیاتی ایفا می‌کنند. این نتایج کلیدی، صحت و اعتبار مدل‌سازی سامانه پایه‌ی نیروگاه در نرم‌افزار ترنسیس را تأیید می‌نماید.

دمای خروجی کلکتور لوله خلاً، دمای خروجی کلکتور سهموی و دمای گاززدا در شکل ۸ ارائه شده است. در هر دو نوع کلکتور، یک الگوی نوسانی نسبتاً مشابه (فصلی) مشاهده می‌شود. داده‌ها حاکی از آن است که حداکثر دمای خروجی از کلکتور لوله خلاً به ۱۳۶ درجه سلسیوس می‌رسد که این دما از دمای مطلوب پیش‌گرمایش (۱۳۳ درجه سلسیوس) فراتر می‌رود. این یافته تأیید می‌کند که سامانه کلکتور لوله خلاً در ساعات اوج تابش خورشید در طول سال، قادر است دمای مورد نیاز برای پیش‌گرمایش آب خوراک را به طور کامل تأمین کند. در مقابل، حداکثر دمای خروجی از کلکتور سهموی به ۱۳۳/۵ درجه سلسیوس می‌رسد که با دمای مطلوب پیش‌گرمایش مطابقت دارد و نشان می‌دهد سامانه کلکتور سهموی نیز در ساعات تابش بالای خورشید، قابلیت تأمین دمای لازم برای پیش‌گرمایش آب خوراک را داراست. با این حال، دمای خروجی هر دو کلکتور خورشیدی نوسانات قابل توجهی را نشان می‌دهد.



شکل ۸. مقایسه دمای خروجی گاززدا و هر دو کلکتور خورشیدی (یافته‌های پژوهش)

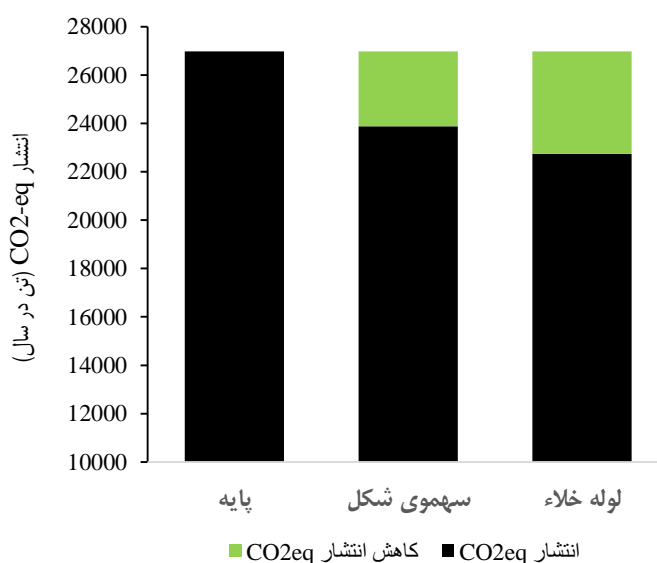
تعداد ماژول‌ها و ابعاددهی نهایی کلکتورها

بر اساس خروجی نرم‌افزار ترنسیس، مساحت کل مورد نیاز برای تأمین کامل توان پیش‌گرمایش آب ورودی دیگ بخار توسط کلکتور لوله خلاً در اوج تابش خورشیدی سالانه، برابر با ۲۹۰۰۰ متر مربع به دست آمد. با توجه به مشخصات ماژول مورد استفاده در مدل، که مساحت هر واحد کلکتور لوله خلاً برابر با ۳/۲۴ متر مربع است، تعداد ماژول‌های مورد نیاز ۸۹۵۱ واحد خواهد بود. در کاربردهای دمای متوسط کلکتورهای لوله خلاً، معمولاً طول رشته‌های متصل به صورت سری بلندتر در نظر گرفته می‌شود. در این طراحی، طول مناسبی برای ماژول‌ها در هر رشته سری لحاظ گردید تا ضمن رسیدن به دمای خروجی مطلوب، تعداد انشعابات موازی به حداقل برسد. بر این اساس، تعداد رشته‌های سری ۱۵۵ و در نتیجه تعداد رشته‌های موازی ۶۰ واحد تعیین شد. همچنین، طبق خروجی نرم‌افزار ترنسیس، مساحت کل مورد نیاز کلکتور سهموی برای تأمین توان پیش‌گرمایش آب ورودی دیگ بخار در اوج تابش، برابر با ۳۴۵۶۰ متر مربع محاسبه شد. مساحت هر ماژول از این نوع کلکتور، بر اساس مدل مورد استفاده، ۱۹/۲ متر مربع است و تعداد ماژول‌های مورد نیاز ۱۸۰۰ واحد برآورد می‌گردد. برای تبدیل این تعداد ماژول مورد نیاز به یک آرایش اجرایی در محل، یک طرح ترکیبی سری-موازی شامل ۴۵ رشته سری و ۴۰ رشته موازی انتخاب شد. در این طرح، طول رشته‌های سری به نحوی تنظیم شد که ضمن دستیابی به دمای خروجی هدف، تعداد خطوط موازی کاهش یافته و پیچیدگی سامانه لوله‌کشی به کمترین میزان برسد.

کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

شکل ۹ میزان انتشار سالانه دی‌اکسید کربن معادل را در سامانه پایه و همچنین میزان کاهش این انتشار ناشی از به‌کارگیری کلکتورهای

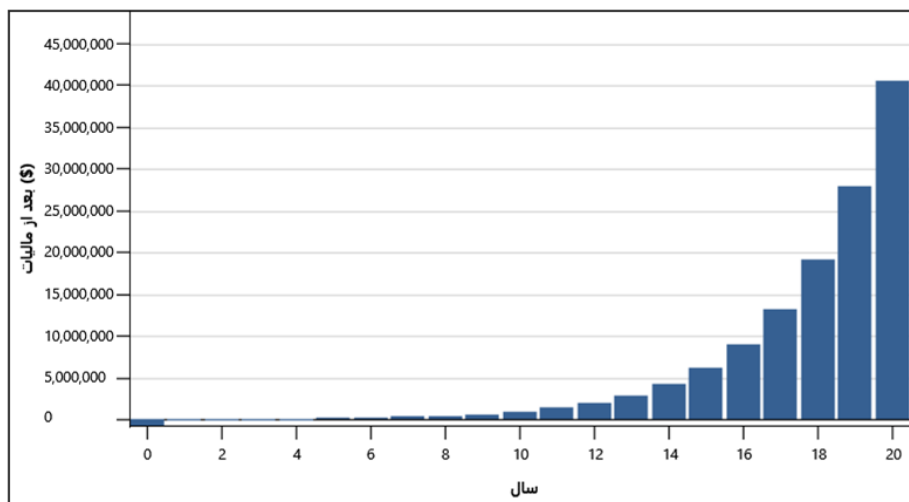
خورشیدی، بر اساس نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار رت‌اسکرین، نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۹ قابل مشاهده است، میزان انتشار سالانه دی‌اکسید کربن معادل برای سامانه پیش‌گرمایش آب خوراک پایه نیروگاه، ۲۶۹۸۲ تن در سال است. با استفاده از کلکتور لوله خلاء (با مساحت ۲۹۰۰۰ مترمربع و ۸۹۵۱ ماژول)، این میزان به ۲۲۷۳۹ تن در سال کاهش می‌یابد. این امر منجر به کاهش مطلق ۴۲۴۳ تن معادل دی‌اکسید کربن در سال می‌شود که معادل ۱۶ درصد کاهش در انتشار سالانه دی‌اکسید کربن سامانه پیش‌گرمایش آب خوراک نیروگاه است. تحلیل مشابهی برای کلکتورهای سهموی نشان می‌دهد که این نوع کلکتورها عملکرد ضعیف‌تری در کاهش انتشار دی‌اکسید کربن معادل دارند. در این حالت، میزان انتشار سالانه دی‌اکسید کربن معادل از ۲۶۹۸۲ تن به ۲۳۸۸۵ تن در سال کاهش می‌یابد. این کاهش، معادل ۳۰۹۶ تن در سال است که ۱۱ درصد از کل انتشار سالانه دی‌اکسید کربن سامانه پیش‌گرمایش را شامل می‌شود. در کل نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار رت‌اسکرین برای هر دو نوع جمع‌کننده، به وضوح تأثیر مثبت استفاده از انرژی خورشیدی در بهبود عملکرد زیست‌محیطی نیروگاه را نشان می‌دهد. این امر با یافته‌های Lopez et al. (۲۰۲۱) که به مقایسه‌ی آزرزی جمع‌کننده‌های خورشیدی در نیروگاه‌های تولید همزمان پرداخته‌اند و بر مزایای زیست‌محیطی آن‌ها تأکید کرده‌اند، همسو است. Kalogirou (۲۰۲۳) در مروری جامع بر سامانه‌های خورشیدی نیز نشان داد که این فناوری‌ها می‌توانند انتشار دی‌اکسید کربن را بین ۵ تا ۲۰ درصد کاهش دهند. برای درک بهتر دامنه و اهمیت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، نتایج با معادل‌سازی‌های زیست‌محیطی مقایسه شده‌اند. کاهش سالانه ۴۲۴۳ تن معادل دی‌اکسید کربن ناشی از کلکتورهای لوله خلاء، با حذف حدود ۷۷۷ دستگاه ماشین و کامیون سبک از جاده‌ها معادل‌سازی می‌شود. در مقابل، کاهش ۳۰۹۶ تن معادل دی‌اکسید کربن با استفاده از کلکتورهای سهموی، برابر با حذف حدود ۵۶۷ دستگاه ماشین و کامیون سبک از چرخه حمل‌ونقل است. این مقایسه تأیید می‌کند که تلفیق سامانه‌های خورشیدی در هر دو حالت، تأثیر قابل توجهی در تعدیل اثرات زیست‌محیطی نیروگاه دارد، اما کلکتورهای لوله خلاء با کاهش ۱۶ درصدی نسبت به ۱۱ درصد کلکتورهای سهموی، برتری عملکردی خود را به اثبات می‌رسانند.



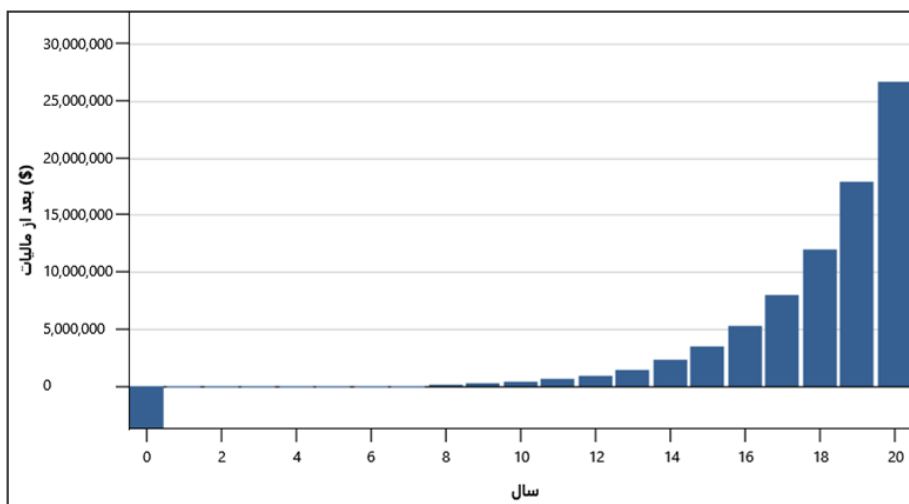
شکل ۹. میزان انتشار CO₂-eq و میزان کاهش انتشار آن در نتیجه استفاده از کلکتور خورشیدی (یافته‌های پژوهش)

تحلیل اقتصادی

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب گردش‌های مالی ۲۰ ساله استفاده از هر دو فناوری جمع‌کننده‌های لوله خلاء و سهموی شکل را نشان می‌دهند. با مقایسه هر دو شکل مشخص است که گردش مالی هر دو پروژه در سال اول منفی می‌باشد، اما جمع‌کننده‌های لوله خلاء به دلیل هزینه اولیه کمتر (۹۲۰۰۹۶ دلار) نسبت به جمع‌کننده‌های سهموی (۲۸۳۲۹۰۲ دلار) گردش مالی منفی کمتری دارند و به همین دلیل از سال پنجم وارد گردش مالی مثبت شده در صورتی که جمع‌کننده‌های سهموی در سال هشتم وارد گردش مالی مثبت می‌شوند.



شکل ۱۰. گردش مالی سالانه سامانه پیش‌گرمکن خورشیدی با جمع‌کننده لوله خلاء



شکل ۱۱. گردش مالی سالانه سامانه پیش‌گرمکن خورشیدی با جمع‌کننده سهموی شکل

ارزش خالص فعلی سامانه پیش‌گرمکن خورشیدی با جمع‌کننده لوله خلاء پس از کسر مالیات ۱۲۸/۳ میلیون دلار محاسبه شد که نشان می‌دهد ارزش فعلی خالص جریان‌های نقدی در طول عمر پروژه، به مراتب از هزینه‌ها بیشتر است و پروژه ارزش مالی قابل توجهی ایجاد می‌کند. نرخ بازده سرمایه برای این سامانه قبل از مالیات برابر با ۳۹/۶ درصد و پس از مالیات ۳۱/۹ درصد محاسبه گردید. همچنین دوره بازگشت سرمایه ۷/۲ سال به دست آمد که به معنای آن است که سرمایه‌گذاری اولیه در این طرح، در طول ۷/۲ سال از محل صرفه‌جویی در مصرف سوخت بازخواهد گشت. ارزش خالص فعلی سامانه پیش‌گرمکن خورشیدی با جمع‌کننده سهموی شکل پس از کسر مالیات ۷۴/۵ میلیون دلار محاسبه شد که نشان‌دهنده عملکرد مالی ضعیف‌تری نسبت به سامانه پیش‌گرمکن با جمع‌کننده لوله خلاء است. نرخ بازده داخلی سامانه پیش‌گرمکن خورشیدی با جمع‌کننده سهموی شکل قبل از مالیات ۲۰/۵ درصد و پس از مالیات ۱۸/۷ درصد است. اگرچه این مقادیر نشان‌دهنده اقتصادی بودن این سامانه است، اما جذابیت مالی آن کمتر از طرح لوله خلاء است. دوره بازگشت سرمایه این سامانه با ۱۳/۵ سال، به مراتب طولانی‌تر از طرح لوله خلاء است. این دوره بازگشت سرمایه طولانی‌تر، ریسک مالی پروژه را افزایش می‌دهد. هرچند که هر دو پروژه از نظر اقتصادی سودآور هستند، طرح استفاده از جمع‌کننده لوله خلاء به دلیل سرمایه‌گذاری اولیه کمتر، دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تر و شاخص‌های سودآوری بالاتر، به عنوان طرح اقتصادی‌تر برای نیروگاه تولید همزمان برق و حرارت شرکت دعبل خزاعی توصیه می‌شود. یافته‌های این مطالعه با تحقیقات انجام شده در این زمینه هم‌راستا است. Guarino et al. (۲۰۲۲) در یک مطالعه اقتصادی، دوره بازگشت سرمایه برای یک پروژه مشابه خورشیدی-حرارتی را ۱۰ تا ۱۵ سال تخمین زدند. همچنین، Alvi et al. (۲۰۲۴) دوره بازگشت سرمایه را در یک پروژه نیروگاه خورشیدی-حرارتی در حدود ۱۱ سال گزارش

کردند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، امکان‌سنجی و تحلیل عملکرد دو نوع کلکتور خورشیدی، یعنی کلکتور لوله خلاء و کلکتور سهموی شکل به‌منظور پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار در نیروگاه دعبل خزاعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل‌سازی فنی با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس استخراج شدند. انرژی حرارتی مورد نیاز سالانه برای پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار در سامانه پایه، معادل ۴۸۹۰۲۲ گیگاژول برآورد گردید. کلکتور لوله خلاء با سطح پوشش ۲۹۰۰۰ متر مربع، قادر به تولید سالانه ۷۶۹۰۵ گیگاژول انرژی حرارتی است که ۱۵/۷ درصد از کل نیاز انرژی سالانه سامانه پایه را پوشش می‌دهد. کلکتور سهموی با سطح پوشش ۳۴۵۶۰ متر مربع، توانایی تولید ۵۶۱۲۲ گیگاژول انرژی را داشت که این میزان معادل ۱۱/۵ درصد از نیاز انرژی کل گرمایش آب دیگ بخار را تأمین می‌کند. هر دو نوع کلکتور، توانایی تأمین دمای مورد نیاز برای فرآیند پیش‌گرمایش آب خوراک را دارا هستند. در بهترین شرایط تابش خورشیدی، دمای خروجی کلکتور لوله خلاء به ۱۳۶ درجه سلسیوس و دمای خروجی کلکتور سهموی به ۱۳۳/۵ درجه سلسیوس می‌رسد. این نتایج کارایی حرارتی مطلوب هر دو فناوری را در دستیابی به دمای عملیاتی مورد نظر تأیید می‌کنند. ترکیب هر یک از کلکتورهای خورشیدی با سامانه نیروگاه، کاهش قابل توجهی در انتشار سالانه دی‌اکسید کربن معادل ایجاد می‌کند. میزان انتشار سامانه پایه ۲۶۹۸۲ تن دی‌اکسید کربن معادل در سال بود. استفاده از کلکتور لوله خلاء این میزان را به ۲۲۷۳۹ تن کاهش می‌دهد که معادل ۱۶ درصد کاهش است. استفاده از کلکتور سهموی این انتشار را به ۲۳۸۸۵ تن کاهش می‌دهد که معادل ۱۱ درصد کاهش است. با وجود آنکه هر دو فناوری نقش مؤثری در کاهش آلاینده‌گی دارند، کلکتور لوله خلاء در شرایط مورد بررسی، کارایی حرارتی بالاتری (با سطح پوشش کمتر، انرژی بیشتری تولید می‌کند) و همچنین کاهش بیشتری در انتشار دی‌اکسید کربن نسبت به کلکتور سهموی ارائه می‌دهد. تحلیل اقتصادی نشان داد هر دو سامانه پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار اقتصادی می‌باشند ولی استفاده از سامانه پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار با جمع‌کننده لوله خلاء با دوره بازگشت سرمایه ۷/۲ سال، ارزش خالص فعلی حدود ۱۲۸ میلیون دلار و نرخ بازده سرمایه ۳۱/۹ درصد، اقتصادی‌تر از سامانه پیش‌گرمایش آب خوراک دیگ بخار با جمع‌کننده سهموی شکل است. با توجه به نتایج و محدودیت‌های پژوهش، انجام تحلیل اگزرژی و آنتروپی جامع‌تر بر روی کل سیستم نیروگاه پس از ادغام با پیش‌گرمکن خورشیدی برای ارزیابی دقیق‌تر افت‌های اگزرژی و پتانسیل بهبود بهره‌وری و همچنین بررسی تأثیر انواع دیگر جمع‌کننده‌های خورشیدی مانند جمع‌کننده‌های متمرکزکننده دیش یا ترکیب‌های مختلف از جمع‌کننده‌ها برای بهینه‌سازی عملکرد پیشنهاد می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه شماره SCU.AA98.29747 انجام شد.

مشارکت نویسندگان

ایوب کعبی مفرد: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله

عباس عساکره: استاد راهنمای اول پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

ابراهیم حاجی دولو: استاد راهنمای دوم پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

مصطفی کیانی ده کیانی: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان از هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نوشتن مقاله استفاده نکردند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از دانشگاه شهید چمران اهواز و حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز به خاطر حمایت مالی در قالب پژوهانه (SCU.AA98.29747) تشکر و قدردانی می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد

REFERENCES

- Aail, M., Das, T., & Kalhar, J. A. (2025). Thermodynamic analysis of combined cooling, water, and power plant integrated with parabolic trough solar collectors and thermal energy storage system. *Spectrum of Engineering Sciences*, 3(10), 156–176.
- Abdel-Dayem, A. M., & Hawsawi, Y. M. (2022). Feasibility study using TRANSYS modelling of integrating solar heated feed water to a cogeneration steam power plant. *Case Studies in Thermal Engineering*, 39, 102396. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102396>.
- Abdelhalim, A. M., Meana-Fernández, A., & Suarez-Ramon, I. (2024). Integration of Thermal Solar Power in an Existing Combined Cycle for a Reduction in Carbon Emissions and the Maximization of Cycle Efficiency. *Processes*, 12(11), 2557. <https://doi.org/10.3390/pr12112557>.
- Ahmadi, G., Toghraie, D., & Akbari, O. A. (2017). Solar parallel feed water heating repowering of a steam power plant: A case study in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 474–485. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.019>.
- Alotaibi, S., Alotaibi, F., & Ibrahim, O. M. (2020). Solar-assisted steam power plant retrofitted with regenerative system using Parabolic Trough Solar Collectors. *Energy Reports*, 6, 124–133. 10.1016/j.egy.2019.12.019.
- Alvi, J. Z., Guan, Z., & Imran, M. (2024). Thermoeconomic Evaluation and Sustainability Insights of Hybrid Solar–Biomass Powered Organic Rankine Cycle Systems: A Comprehensive Review. *Biomass*, 4(4), 1092–1121.
- Anonymous, 2021. The IPCC finalized the first part of the Sixth Assessment Report, Climate Change 2021: The Physical Science Basis, the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report on 6 August 2021 during the [14th Session of Working Group I and 54th Session of the IPCC](#).
- Bagherian, M.A. & Mehranzamir, K. (2020). A comprehensive review on renewable energy integration for combined heat and power production. *Energy Conversion and Management*, 224, 113454. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113454>.
- Benny, M. G. (2024). Analysis of solar thermal power plants with thermal energy storage and solar hybrid operation strategy. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 21(3), 27-33. 10.9790/1684-2103032733.
- Bhuiyan, M. A., Zhang, Q., Khare, V., Mikhaylov, A., Pinter, G., & Huang, X. (2022). Renewable energy consumption and economic growth nexus—a systematic literature review. *Frontiers in environmental science*, 10, 878394. 10.3389/fenvs.2022.878394.
- Burin, E. K., Buranello, L., Giudice, P.L., Vogel, T., Görner, K., & Bazzo, E. (2015). Boosting power output of a sugarcane bagasse cogeneration plant using parabolic trough collectors in a feedwater heating scheme. *Applied Energy*, 154, 232-241. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.100>.
- Burin, E. K., Vogel, T., Mulhaupt, S., Thelen, A., Oeljeklaus, G., Görner, K., & Bazzo, E. (2016). Thermodynamic and economic evaluation of a solar aided sugarcane bagasse cogeneration power plant. *Energy*, 117, 416-428. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.071>.
- Chantasiriwan, S., & Charoenvai, S. (2020). Improving the Performance of Cogeneration System in Sugar Factory by the Integration of Superheated Steam Dryer and Parabolic Trough Solar Collector. In: Sayigh, A. (eds) *Renewable Energy and Sustainable Buildings*. Innovative Renewable Energy. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18488-9_75.
- Chen, Z. & Ba, D. (2022). Solar Preheating in Power Plants: An Overview Of The Current State Of The Technology. *International Journal of Advanced Science and Computer Applications*, 1(1), 10-15. <https://doi.org/10.47679/ijasca.v1i1.4>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). John Wiley & Sons
- Guarino, S., Buscemi, A., Messineo, A., & Lo Brano, V. (2022). Energy and environmental assessment of a hybrid dish-stirling concentrating solar power plant. *Sustainability*, 14(10), 6098.
- IEA (2020). *Renewable Energy Market Update: Outlook for 2020 and 2021*. International Energy Agency.
- IRENA. (2020). *Renewable Power Generation Costs in 2019*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Jones, S.A., Pitz-Paal, R., Schwarzboezl, P., Blair, N., & Cable, R. (2001). TRANSYS modeling of the SEGS VI parabolic

- trough solar electric generating system. *International Solar Energy Conference* (Vol. 16702, pp. 405-412). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/SED2001-152>.
- Kabiri, S., Manesh, M. K., Yazdi, M., & Amidpour, M. (2021). New procedure for optimal solar repowering of thermal power plants and integration with MSF desalination based on environmental friendliness and economic benefit. *Energy Conversion and Management*, 240, 114247. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114247>.
- Kalogirou, S. (2023). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Elsevier press.
- Karapekmez, A., & Dincer, I. (2020). Comparative efficiency and environmental impact assessments of a solar-assisted combined cycle with various fuels. *Applied Thermal Engineering*, 164, 114409.
- Kemal, Ç., Uğur, Ç., Ayşegül, Ç.K., & Erol, Ş. (2018). Contribution of the Cogeneration Systems to Environment and Sustainability. In: Aloui, F., Dincer, I. (eds) *Exergy for A Better Environment and Improved Sustainability 2. Green Energy and Technology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62575-1_56.
- López, J. C., Escobar, A., Cárdenas, D. A., & Restrepo, Á. (2021). Parabolic trough or linear fresnel solar collectors? An exergy comparison of a solar-assisted sugarcane cogeneration power plant. *Renewable Energy*, 165, 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.138>.
- López, J. C., Restrepo, Á., & Bazzo, E. (2018). Exergy analysis of the annual operation of a sugarcane cogeneration power plant assisted by linear Fresnel solar collectors. *Journal of Solar Energy Engineering*, 140(6), 061004. <https://doi.org/10.1115/1.4040534>.
- Mahian, O., Mirzaie, M. R., Kasaieian, A., & Mousavi, S.H. (2020). Exergy analysis in combined heat and power systems: A review. *Energy conversion and management*, 226, 113467. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113467>.
- Qin, Y., Liu, T., Li, P., Zhao, K., Jiao, F., Pei, G., & Liu, Q. (2024). New hybrid CHP system integrating solar energy and exhaust heat thermochemical synergistic conversion with dual-source energy storage. *Journal of Thermal Science*, 33(3), 970-984. <https://doi.org/10.1007/s11630-024-1906-3>.
- Shagdar, E., Shuai, Y., Lougou, B. G., Mustafa, A., Choidorj, D., & Tan, H. (2022). New integration mechanism of solar energy into 300 MW coal-fired power plant: performance and techno-economic analysis. *Energy*, 238, 122005.
- Vimmerstedt, L. (2022). Annual technology baseline: The 2022 electricity update. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Wang, S., Fu, Z., Sajid, S., Zhang, T., & Zhang, G. (2018). Thermodynamic and economic analysis of an integrated solar combined cycle system. *Entropy*, 20(5), 313. <https://doi.org/10.3390/e20050313>.
- Wu, J., & Han, Y. (2023). Integration strategy optimization of solar-aided combined heat and power (CHP) system. *Energy*, 263, p.125875. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125875>.