Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering

Vol. 4, No. 1, pp. 67–91, Year 2025

Journal Homepage: https://stmechanics.bmtc.ac.ir/?lang=en

DOI: 10.22034/stme.2025.509066.1108

An Overview of combining hybrid solar collector and heat pump methods

Iman Shemshadi *1

1. M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

Abstract

Hybrid photovoltaic-thermal (PVT) solar collectors are among the innovative technologies for converting solar energy into both electricity and heat. These systems, by combining electricity and heat production in a single unit, increase energy efficiency and enable optimized energy consumption. Alongside this technology, vapor-compression heat pumps are considered clean and effective solutions for meeting the thermal demands of buildings. The integration of these two technologies into a unified system enables efficient use of renewable energy sources and contributes to reducing fossil fuel consumption and greenhouse gas emissions. This review study examines the current status of combined systems incorporating heat pumps and hybrid solar collectors, and analyzes the integration methods, configurations, and design of subsystem components. According to scientific studies, the use of hybrid solar collectors as evaporators in direct-expansion heat pumps shows better performance compared to indirect-expansion systems. The coefficient of performance (COP) in these systems ranges from 2.7 to 7, while for indirect-expansion systems, this value is reported between 2.3 and 4.5. Recent advancements in control strategies, compressor design, and refrigerant development have had a positive impact on the performance of these systems. This technology is considered an effective solution for nearly zero-energy buildings and holds high potential for energy optimization and carbon emission reduction in the building sector. Further development and research in this field can enhance the performance and scalability of these systems.

Keywords

Heat Pump

Hybrid Solar Collector

Direct Expansion System

Indirect Expansion System

Energy Consumption

Optimization

Received: 26.02.2025
Revised: 22.04.2025
Accepted: 18.05. 2025

*Corresponding Author
First Author
Email
Shemshadyeman@gmail.com

1- Introduction

Approximately 30% of the world's final energy consumption is allocated to the building sector [1]. In the European Union, this share reaches up to 40% of total final energy consumption [2]. In response, the EU has introduced and enforced directives that set targets for member states, requiring the entire energy chain—from production to consumption—to become more efficient, including the building sector [3]. The Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) was revised and reissued in 2010, mandating that all new public buildings must achieve "nearly zero-energy" status by the end of 2020 [4]. In recent decades, the global energy sector has faced numerous challenges due to growing energy demand, environmental degradation, and the depletion of fossil fuels. The world's dependence on non-renewable resources has not only led to an energy crisis but has also intensified environmental concerns such as greenhouse gas emissions and climate change. As a result, the transition to renewable energy sources has become an urgent necessity. Governments, industries, and researchers are increasingly exploring renewable energy technologies—such as solar, wind, and biomass—as sustainable alternatives to conventional energy sources (International Energy Agency, 2021). Renewable energy holds the potential to reduce environmental impacts while offering a long-term,

How to Cite this Article:
[1] I. Shemshadi, "An overview of combining hybrid solar collector and heat pump methods," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*., vol. 4, no. 1, pp. 67–91, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.22034/stme.2025.509066.1108 (in Persian)

©2025 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

E-ISSN: 2981-2232

sustainable solution to growing global energy demand [5]. The EPBD emphasizes the integration of renewable energy sources—particularly solar technologies—for decarbonizing the building sector, especially in densely populated urban areas with limited space. As evidence, solar thermal energy has emerged as one of the most important renewable heating technologies, with 479 GW of installed capacity. From 2000 to 2019, the cumulative capacity of solar thermal systems increased nearly eightfold [6]. Hybrid solar collectors, representing a new generation of solar equipment, achieved the highest capacity among renewable technologies by the end of 2020 [7]. On the other hand, developing clean technologies for building climate control is a crucial step forward. Heat pumps are considered one of the most promising technologies for utilizing renewable energy in residential buildings [8], playing a key role in reducing future CO_2 emissions [9]. For five consecutive years, the number of newly installed heat pumps has doubled across the EU [10], with global sales growth averaging around 5% in recent years and expected to reach 22% by 2030 [11]. The growing adoption of heat pumps and their integration with hybrid solar collectors can be attributed to the following reasons:

1. Solar thermal collectors are weather-dependent and often cannot meet the entire heating demand in cold regions, requiring integration with other systems [12].

2. Biomass remains the most widely used renewable heat source [13], but supply chain management complexity [14] and local pollutant emissions may limit its suitability in densely populated areas [15], where zero-carbon renewable energy is preferred.

3. Heat pumps can utilize low-temperature sources such as ambient air, ground, or geothermal wells to provide heat at higher temperatures. When operated in reverse, they can also meet cooling demands—an increasingly important feature in light of global warming [16] .

In recent years, researchers have paid increasing attention to hybrid systems combining heat pumps and hybrid solar collectors [18]. While first-generation thermal panels (producing either heat or electricity) are still commonly used, the application of hybrid collectors is expanding due to their capability to simultaneously generate thermal and electrical energy . The aim of this paper is to provide a comprehensive overview of the integrated system combining heat pumps with hybrid solar collectors. In addition, various configurations of this system are analyzed and discussed.

2- Heat Pump with First-Generation Solar Panels

A heat pump transfers heat from a low-temperature point to a high-temperature point and requires a driving force to perform this function [19]. This driving force can be mechanical, electrical, or thermal. Heat pumps typically operate based on the vapor-compression refrigeration cycle. As part of a central heating and cooling system, a heat pump uses outdoor air to heat indoor spaces during winter and cool them during summer. These systems are increasingly used to meet the thermal demands of buildings [20–21]. Studies have shown that vapor-compression refrigeration systems yield better outcomes in terms of economics [23], energy efficiency [24], and cost savings [28], compared to traditional heating systems such as hot water boilers and gas-fired packages [25]. The first concept of integrating heat pumps with solar energy was proposed by Sporn and Ambrose in 1955 [26], and later gained more attention during the 1970s. Subsequently, various opportunities for heating water for domestic and other low-temperature applications were explored [27]. The advantages of combining heat pumps with solar systems—such as good performance at low temperatures and reduced need for defrosting—have been clearly stated [28]. Geothermal heat pumps can also benefit from elevated evaporation temperatures [29].

3- Heat Pump with Hybrid Solar Collectors

These systems face challenges in maintaining optimal operating temperatures, especially at high latitudes and during the winter season [30], such that they alone are unable to meet the entire heating demand [31]. The integration of hybrid solar collectors with heat pumps enables the provision of thermal needs using solar energy [32]. Heat pumps can utilize the thermal energy generated by hybrid

solar collectors to satisfy building energy demands. Additionally, the electricity produced by the hybrid solar collectors can supply power to the heat pump compressor, which in turn reduces primary energy consumption. In this system and under these conditions, the share of renewable energy generated and consumed on-site increases, yielding significant benefits in reducing carbon dioxide emissions.

4- Conclusions and Future Perspectives

Solar-assisted heat pump systems with hybrid solar collectors offer a promising solution for nearly zero-energy buildings by meeting thermal demands with high renewable energy use. Integrating these collectors with heat pumps improves efficiency and solar utilization. Thermal storage and advanced control systems further enhance performance but add complexity and cost. Few studies have analyzed economic viability, highlighting the need for detailed cost assessments. Advancing the technology readiness level, increasing real-world testing, comparing performance in different climates, and developing accurate modeling tools are also crucial for broader adoption and optimization.

5- References

[1] IEA, *Transitions to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050*, 2013.
[2] *Buildings*, 2017. [Online]. Available: Accessed on Aug. 19, 2020.

[3] European Parliament and the Council, "Directive 2012/27/EU on the energy efficiency," *Journal of the European Union*, 2012.

[4] European Parliament and the Council, "Directive 2002/91/EC on the energy performance of buildings," *Journal of the European Union*, 2002.

[5] I. Shemshadi, "Modeling and Optimization of Microgrid Networks Using Renewable Energy Sources," *Front. Health Inform.*, vol. 13, no. 8, pp. 2927–2937, 2024. [Online]. Available: doi: 10.52783/fhi.vi.1994

[6] W. Weiss, *Solar Heat Worldwide: Global Market Development and Trends in 2019*, 2019.

[7] IEA-PVPS, *Snapshot of Global PV Markets 2021*, 2021.

[8] J.-C. Hadorn, *Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings*, Wilhelm Ernst & Sohn, 2015.

[9] D. Fischer and H. Madani, "On heat pumps in smart grids: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, pp. 342–357, 2017. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.rser.2016.11.182

[10] HPA, *European Heat Pump Market and Statistics Report 2019*, 2019.

[11] *Tracking Buildings 2020*. [Online]. Available: Accessed on Apr. 28, 2021.

[12] I. Beausoleil-Morrison, B. Kemery, A. D. Wills, and C. Meister, "Design and simulated performance of a solar-thermal system employing seasonal storage for providing the majority of space heating and domestic hot water heating needs to a single-family house in a cold climate," *Sol. Energy*, vol. 191, pp. 57–69, 2019. [Online]. Available: doi:10.1016/j.solener.2019.08.034

[13] IEA, *Renewables 2020: Analysis and Forecast to 2025*, 2020.

[14] A. Akgül and S. U. Seçkiner, "Optimization of biomass to bioenergy supply chain with tri-generation and district heating and cooling network systems," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 137, p. 106017, 2019. [Online]. Available: doi:. 10.1016/j.cie.2019.106017

[15] P. Caputo, G. Ferla, and S. Ferrari, "Evaluation of environmental and energy effects of biomass district heating by a wide survey based on operational conditions in Italy," *Energy*, vol. 174, pp. 1210–1218, 2019. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.energy.2019.03.073

[16] International Energy Agency, *The Future of Cooling: Opportunities for Energy-Efficient Air Conditioning*, 2018.

[17] W. Stanek, T. Simla, and W. Gazda, "Exergetic and thermo-ecological assessment of heat pump supported by electricity from renewable sources," *Renew. Energy*, vol. 131, pp. 404–412, 2019. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.renene.2018.07.084

[18] M. S. Buker and S. B. Riffat, "Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 399–413, 2016. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.rser.2015.10.157

[19] G. Besagni, L. Croci, R. Nesa, and L. Molinaroli, "Field study of a novel solar-assisted dual-source multifunctional heat pump," *Renew. Energy*, vol. 132, pp. 1185–1215, 2019. [Online]. Available: doi. 10.1016/j.renene.2018.08.076

[20] R. S. Kamel and A. S. Fung, "Modeling, simulation and feasibility analysis of residential BIPV/T + ASHP system in cold climate – Canada," *Energy Build.*, vol. 82, pp. 758–770, 2014. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.081

[21] N. Sommerfeldt and H. Madani, "In-depth techno-economic analysis of PV/thermal plus ground source heat pump systems for multi-family houses in a heating dominated climate," *Sol. Energy*, vol. 190, pp. 44–62, 2019. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.solener.2019.07.080

[22] G. Hailu, P. Dash, and A. S. Fung, "Performance evaluation of an air source heat pump coupled with a building-integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system under cold climatic conditions," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1913–1918, 2015. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.370

[23] N. Aste, C. D. Pero, F. Leonforte, and R. S. Adhikari, "Energy and economic assessment of a hybrid solar assisted heat pump system," in *Proc. Int. Conf. Clean Electr. Power (ICCEP)*, 2015, pp. 110–114. [Online]. Available: doi: 10.1109/ICCEP.2015.7177609

[24] A. Ramos, M. A. Chatzopoulou, I. Guarracino, J. Freeman, and C. N. Markides, "Hybrid photovoltaic-thermal solar systems for combined heating, cooling and power provision in the urban environment," *Energy Convers. Manage.*, vol. 150, pp. 838–850, 2017. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.enconman.2017.03.024

[25] X. Zhai, M. Qu, Y. Li, and R. Wang, "A review for research and new design options of solar absorption cooling systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4416–4423, 2011. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.rser.2011.06.016

[26] M. Aprile, T. Toppi, M. Guerra, and M. Motta, "Experimental and numerical analysis of an air-cooled double-lift NH_3-H_2O absorption refrigeration system," *Int. J. Refrig.*, vol. 50, pp. 57–68, 2015. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.10.018

[27] M. Alobaid, B. Hughes, J. K. Calautit, D. O'Connor, and A. Heyes, "A review of solar driven absorption cooling with photovoltaic thermal systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 728–742, 2017. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.rser.2017.03.081

[28] R. Scoccia, T. Toppi, M. Aprile, and M. Motta, "Absorption and compression heat pump systems for space heating and DHW in European buildings: Energy, environmental and economic analysis," *J. Build. Eng.*, vol. 16, pp. 94–105, 2018. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.jobe.2017.12.006

[29] F. Reda et al., "Comparison of solar assisted heat pump solutions for office building applications in northern climate," *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 1392–1417, 2020. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.renene.2019.09.044

[30] F. Calise, M. D. d'Accadia, R. D. Figaj, and L. Vanoli, "A novel solar-assisted heat pump driven by photovoltaic/thermal collectors: Dynamic simulation and thermoeconomic optimization," *Energy*, vol. 95, pp. 346–366, 2016. [Online]. Available: doi:10.1016/j.energy.2015.11.071

[31] M. Noro and R. Lazzarin, "Solar cooling between thermal and photovoltaic: An energy and economic comparative study in the Mediterranean conditions," *Energy*, vol. 73, pp. 453–464, 2014. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.energy.2014.06.035

[32] P. Sporn and E. Ambrose, "The heat pump and solar energy," in *Proc. World Symp. Applied Solar Energy*, Phoenix, US, 1955.

نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

سال ۱۴۰۴، دوره ۴ شماره ۱، صفحه ۶۷-۹۱

آدرس نشریه: https://stmechanics.bmtc.ac.ir

DOI: 10.22034/stme.2025.509066.1108

مروری بر روش‌های ترکیب پمپ حرارتی و جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی

ایمان شمشادی[1*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

جمع‌کننده‌های خورشیدی فتوولتائیک حرارتی (ترکیبی) یکی از فناوری‌های نوین در تبدیل انرژی خورشیدی به برق و گرما هستند. این سیستم‌ها با ترکیب تولید برق و گرما در یک واحد، بازده انرژی را افزایش داده و بهینه‌سازی مصرف انرژی را ممکن می‌سازند. در کنار این فناوری، پمپ‌های حرارتی تراکمی نیز یکی از راهکارهای پاک و مؤثر برای تأمین نیازهای حرارتی ساختمان‌ها محسوب می‌شوند. ترکیب این دو فناوری در یک سیستم یکپارچه، امکان استفاده بهینه از انرژی‌های تجدیدپذیر را فراهم کرده و موجب کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. این مطالعه مروری، وضعیت فعلی سیستم‌های ترکیبی پمپ حرارتی و جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی را بررسی کرده و به تحلیل روش‌های ترکیب، پیکربندی‌ها و طراحی اجزای زیرسیستم پرداخته است. بر اساس یافته‌های مطالعات علمی، استفاده از جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی به‌عنوان اواپراتور در پمپ‌های حرارتی انبساط مستقیم، عملکرد بهتری نسبت به سیستم‌های انبساط غیرمستقیم دارد. ضریب عملکرد در این سیستم‌ها بین ۲/۷ تا ۷ متغیر است، درحالی‌که برای سیستم‌های انبساط غیرمستقیم، این مقدار بین ۲/۳ تا ۴/۵ گزارش شده است. پیشرفت‌های اخیر درزمینه استراتژی‌های کنترل، طراحی کمپرسورها و توسعه مبردها، تأثیر مثبتی بر عملکرد این سیستم‌ها داشته است. این فناوری به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای ساختمان‌های با مصرف انرژی نزدیک به صفر معرفی‌شده و پتانسیل بالایی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش انتشار کربن در بخش ساختمان دارد. توسعه و تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌تواند به بهبود عملکرد این سیستم‌ها و افزایش بهره‌وری آن‌ها در مقیاس وسیع کمک کند.

کلمات کلیدی

پمپ حرارتی

جمع‌کننده خورشیدی ترکیبی

سیستم انبساط مستقیم

سیستم انبساط غیرمستقیم

بهینه‌سازی مصرف انرژی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

نویسنده مسئول*

ایمان شمشادی

ایمیل

Shemshadyeman@gmail.com

۱- مقدمه

حدود ۳۰ درصد مصرف انرژی نهایی تولیدشده در جهان به بخش ساختمان تخصیص داده می‌شود [۱]. در اتحادیه اروپا، این سهم به ۴۰٪ از مصرف نهایی انرژی کل تولیدشده می‌رسد [۲]. با توجه به دلایل بیان‌شده، دستورالعمل‌هایی که توسط اتحادیه اروپا معرفی و وضع شده‌اند، اهدافی را برای کشورهای عضو تعیین کرده‌اند که درنتیجه آن کل زنجیره انرژی، از تولید تا مصرف، باید کارآمدتر شود که ساختمان‌ها نیز از این تغییر مستثنی نیستند [۳].

دستورالعمل عملکرد انرژی ساختمان‌ها در سال ۲۰۱۰ بازنگری و ابلاغ شد که در آن تمام ساختمان‌های عمومی جدید ملزم شدند که تا پایان سال ۲۰۲۰ به ساختمان‌هایی با "مصرف انرژی تقریباً صفر" تبدیل شوند [۴]. در دهه‌های اخیر، بخش انرژی جهانی به دلیل افزایش تقاضای انرژی، تخریب محیط‌زیست و کاهش سوخت‌های فسیلی با چالش‌های زیادی موجه شده است. وابستگی جهان به منابع تجدیدناپذیر نه تنها منجر به بحران انرژی شده است، بلکه نگرانی‌های زیست‌محیطی از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییر اقلیم را تشدید

How to Cite this Article:
[1] I. Shemshadi, "An overview of combining hybrid solar collector and heat pump methods," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*., vol. 4, no. 1, pp. 67–91, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.22034/stme.2025.509066.1108 (in Persian)

©2025 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

شاپای الکترونیکی: ۲۲۳۲-۲۹۸۱

کرده است. در نتیجه انتقال به منابع انرژی تجدیدپذیر به یک ضرورت فوری تبدیل شده است. دولت‌ها، صنایع و محققان به‌طور فزاینده‌ای در حال بررسی فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی، باد و زیست‌توده، به‌عنوان جایگزین‌های پایدار برای منابع انرژی مرسوم هستند (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۱). انرژی تجدیدپذیر پتانسیل کاهش اثرات زیست‌محیطی را دارد درحالی‌که یک راه‌حل پایدار و بلند مدت برای افزایش تقاضای انرژی جهان فراهم می‌کند[۵].

این دستورالعمل، یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌ویژه استفاده از تکنولوژی‌های خورشیدی را برای کربن‌زدایی بخش ساختمان‌ها، به‌خصوص در نواحی پرجمعیت شهری با فضای محدود بیان می‌کند. به‌عنوان یک تأیید، انرژی خورشیدی یکی از مهم‌ترین فناوری‌های گرمایش تجدیدپذیر با ۴۷۹ گیگاوات تولید است که ظرفیت تجمعی تولید این انرژی از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۱۹، حدود هشت برابر افزایش داشته است [۶]. جمع‌کننده خورشیدی ترکیبی که نسل جدید تجهیزات خورشیدی است، نیز تا پایان سال ۲۰۲۰، به بالاترین ظرفیت خود در مقایسه با انرژی‌های تجدیدپذیر دیگر رسیده است [۷]. از طرف دیگر، ایجاد تکنولوژی تمیز برای تهویه مطبوع ساختمان یکی از گام‌های مهم در این زمینه است. پمپ‌های حرارتی به‌عنوان نوید بخش‌ترین فن‌آوری برای تهویه مطبوع از منابع انرژی تجدیدپذیر در ساختمان‌های مسکونی [۸]، نقش اصلی را در کاهش دی‌اکسید کربن در آینده ایفا می‌کنند [۹]. به‌طوری‌که تعداد پمپ‌های حرارتی تازه نصب‌شده در مدت پنج سال متوالی در تمام اتحادیه اروپا، افزایش دو برابری داشته است [۱۰]، رشد فروش طی سال‌های اخیر در سطح جهانی حدود ۵٪ بوده است و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۰ به ۲۲٪ برسد [۱۱]. دلایل گسترش استفاده از پمپ‌های حرارتی و ادغام آن‌ها با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی می‌تواند براساس موارد ذیل باشد:

۱-جمع‌کننده‌های خورشیدی حرارتی به شرایط جوی وابسته هستند، نمی‌توانند در مناطق سرد کل تقاضای گرمایش را تأمین کنند و نیازمند ادغام با سیستم‌های دیگر می‌باشند.[۱۲]

۲-زیست‌توده همچنان به‌عنوان متداول‌ترین منبع حرارتی تجدیدپذیر شناخته می‌شود [۱۳]. لیکن پیچیدگی مدیریت زنجیره تأمین [۱۴] و انتشار آلاینده‌های محلی ممکن است مناسب بودن آن را در مناطق پرتراکم محدود کند[۱۵]، زیرا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیری که تولید دی‌اکسیدکربن آن‌ها صفر می‌باشد، مورد نیاز است.

۳-پمپ‌های حرارتی می‌توانند از منابع انرژی با دمای پایین مانند هوای محیط، زمین و چاه‌های زمین‌گرمایی بهره‌برداری کنند و گرما را در دمای بالاتر فراهم کنند. زمانی که این سیستم‌ها به‌صورت معکوس عمل کنند، می‌توانند نیازهای سرمایشی را نیز تأمین کنند که به دلیل گرمایش جهانی اهمیت بیشتری پیدا کرده است [۱۶]. افزون بر این، پمپ‌های حرارتی به‌راحتی می‌توانند با منابع انرژی تجدیدپذیر محلی ترکیب شوند و مستقیماً از برق تولیدی تغذیه شوند. به‌این‌ترتیب هزینه انرژی نیز کهش می‌یابد [۱۷].

در دهه‌های اخیر پژوهشگران توجه زیادی به سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی معطوف کرده‌اند[۱۸]. اگرچه معمولاً از پنل‌های حرارتی نسل اول (تولید برق یا حرارت) استفاده می‌شود، استفاده از این فناوری به دلیل توانایی جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی در تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی، در حال گسترش است [۱۹].

برق تجدیدپذیر تولیدشده توسط جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی می‌تواند مستقیماً توسط پمپ حرارتی مصرف شود و در مواقعی که تولید برق جمع‌کننده‌های مذکور کافی نیست، پمپ حرارتی می‌تواند از شبکه برق استفاده کند. گرمای بازیافت شده توسط جمع‌کننده نیز می‌تواند مستقیماً برای مصارف خانگی به کار رود و یا به پمپ حرارتی منتقل شود. در حالت دوم، پمپ می‌تواند در دمای بالاتری عمل کند و این امر مزایای قابل‌توجهی را ازنظر بازده کلی سیستم به همراه دارد.

علاوه بر این، سیستم ادغام‌شده پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی نه تنها یک راه‌حل بسیار رقابتی محسوب می‌شود، بلکه یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای دستیابی به استانداردهای ساختمان‌های تقریباً بدون انرژی در مناطق با اقلیم معتدل و با نیازهای گرمایشی و سرمایشی است [۲۰-۲۴].

علی‌رغم نقش امیدوارکننده‌ای که سیستم ادغام‌شده مورداشاره می‌تواند در کربن‌زدایی بخش ساختمان ایفا کند، هیچ مطالعه مروری مشخصی در این خصوص صورت نگرفته است. این سیستم‌ها که به‌طور حاشیه‌ای در مطالعات مروری موردبررسی قرار گرفته‌اند، بیشتر بر ترکیب شناخته‌شده و مستند پمپ‌های حرارتی با جمع‌کننده‌های حرارتی خورشیدی نسل اول که قبلاً در خصوص آن‌ها توضیح داده

شده است، تمرکز داشته‌اند. به‌طوری‌که جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی اغلب در بررسی‌ها نادیده گرفته شده‌اند.

هدف از این مقاله ارائه‌ی دیدگاهی جامع و کامل از سیستم ادغام‌شده پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی می‌باشد. بعلاوه پیکربندی‌های مختلف در این سیستم نیز مورد تحلیل و بحث قرار گرفته‌اند.

۲- پمپ حرارتی با صفحات خورشیدی نسل اول

یک پمپ حرارتی، گرما را از نقطهٔ دما پایین به نقطهٔ دما بالا منتقل می‌کند و برای انجام این کار به نیروی محرکه نیاز دارد[۲۵]. این نیرو می‌تواند مکانیکی، الکتریکی و یا حرارتی باشد. پمپ‌های حرارتی معمولاً بر اساس سیکل تبرید تراکمی بخار کار می‌کنند.

یک پمپ حرارتی به‌عنوان بخشی از سیستم گرمایش و سرمایش مرکزی، از هوای بیرون برای گرم کردن فضا در زمستان و خنک کردن آن در تابستان استفاده می‌کند. این سیستم در تأمین نیازهای حرارتی ساختمان‌ها رواج بیشتری دارد [۲۶ و ۲۷]. مطالعات نشان داده‌اند که سیستم‌های تبرید تراکمی بخار نتایج بهتری در بخش اقتصادی [۲۹]، انرژی [۳۰] و صرفه‌جویی [۲۸] نسبت به سیستم‌های گرمایشی سنتی مانند دیگ‌های آب گرم و پکیج‌ها دارند [۳۱].

عوامل زیادی بر عملکرد پمپ‌های حرارتی تأثیر می‌گذارند؛ اما مهم‌ترین عامل، تفاوت دمایی بین تبخیر و میعان است. منابع گرمای محیطی مانند هوای بیرون و زمین اغلب در دماهای پایین در دسترس هستند که می‌توانند بر عملکرد پمپ حرارتی تأثیر بگذارند. در این راستا بهره‌برداری از انرژی خورشیدی جالب‌توجه می‌شود. مطالعات زیادی بر روی روش‌های ترکیب سیستم‌های پمپ حرارتی و سیستم‌های خورشیدی با عنوان "ادغام" به پمپ‌های حرارتی از طریق بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، چه به‌صورت برق و چه به‌صورت انرژی حرارتی، مورد بررسی قرار داده‌اند[۳۲-۳۴]. برق فتوولتائیک می‌تواند نیاز کمپرسور را تأمین کند که خود معمولاً با جریان متناوب تغذیه می‌شود؛ بنابراین یک اینورتر DC/AC بین سیستم فتوولتائیک و دستگاه نیاز است [۳۵ و ۳۶].

اگرچه برخی از نویسندگان سیستم فتوولتائیک و پمپ حرارتی را به‌عنوان "ادغام پمپ حرارتی با انرژی خورشیدی" طبقه‌بندی می‌کنند [۳۷ و ۳۸]، بیشتر مطالعات سیستم‌های مذکور را به‌عنوان ترکیب فناوری‌های خورشیدی حرارتی (مانند سیستم‌های خورشیدی حرارتی نسل اول و جمع‌کننده‌های خورشیدی فتوولتائیک حرارتی) و پمپ‌های حرارتی می‌شناسند [۳۹-۴۱].

در سیستم‌های مذکور ، انرژی خورشیدی چه به‌طور مستقل و چه در ترکیب با سایر منابع محیطی، به‌عنوان منبع حرارتی برای دستگاه استفاده می‌شود و حرارت با دمای بالاتری را نسبت به سایر منابع فراهم می‌کند. دمای تبخیر بالاتر باعث کاهش مصرف برق و افزایش عملکرد پمپ حرارتی می‌شود [۴۲] و همچنین استخراج گرما از جمع کننده‌های خورشیدی را بهبود می‌بخشد [۴۳]. علاوه بر این، ادغام پمپ‌های حرارتی و فناوری‌های خورشیدی امکان غلبه بر بسیاری از محدودیت‌های فنی سیستم‌های حرارتی خورشیدی مستقل را فراهم می‌آورد (مانند وابستگی به آب‌وهوا و در دسترس بودن خورشید [۴۴]، تلفات گرمایی بالا، کارایی پایین و دشواری در رسیدن به دمای بالای تأمین در زمستان).

اولین مفهوم "ادغام پمپ حرارتی با انرژی خورشیدی" توسط اسپورن و امبروز در سال ۱۹۵۵ پیشنهاد شد [۴۵] و بعدها در دهه ۱۹۷۰ توجه به این فناوری افزایش یافت.سپس فرصت‌های مختلف برای گرم کردن آب برای استفاده‌های خانگی و سایر تأسیسات کم‌دما مورد بررسی قرار گرفت [۴۶]. مزایای ترکیب پمپ‌های حرارتی و سیستم‌های خورشیدی، مانند عملکرد خوب در دمای پایین و نیاز کمتر به یخزدایی دستگاه، به‌طور واضح بیان‌شده است[۴۷ و ۴۸]. پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی نیز می‌توانند از افزایش دمای تبخیر بهره‌مند شوند [۴۹]. مساحت جمع کننده‌های خورشیدی، ظرفیت ذخیره‌سازی و طراحی بهینه اجزای مختلف بر عملکردهای سیستم به‌طور مستقیم تأثیر می‌گذارد. [۵۰]. معرفی کمپرسورهای با سرعت متغیر باعث تطابق بهتر بین پمپ حرارتی و انرژی‌های خورشیدی تحت شرایط آب‌وهوایی مختلف می‌شود [۵۱]، بعلاوه پیشرفت‌های صنعت مبردها نیز به بهره‌وری این سیستم کمک می‌کند [۵۲ و ۵۳]. پیکربندی‌های سیستم‌های پمپ حرارتی خورشیدی می‌توانند بسته به نحوه یکپارچه‌سازی جمع کننده‌های خورشیدی و پمپ‌های حرارتی، متفاوت باشند. معروف‌ترین آن‌ها پیکربندی موازی است. این پیکربندی به‌دلیل سادگی و قابلیت اطمینان بیشتر در اتصالات هیدرولیکی، طراحی و بهینه‌سازی، برای سیستم‌هایی با پیچیدگی کمتر مناسب می‌باشد. سیستم‌های دو منبع، زمانی که انرژی خورشیدی با یک منبع حرارتی دیگر ترکیب می‌شود، به‌عنوان گزینه‌ای امیدوارکننده شناخته‌شده‌اند [۵۴] و تحقیقات بیشتری برای بررسی عملکردهای بالا و صرفه‌جویی‌های انرژی آن‌ها انجام شده است.[۵۵]

۳- پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی

اصلی در دمای عملیاتی به‌ویژه در عرض‌های جغرافیایی بالا و در فصل زمستان مواجه هستند [۵۸]. به‌طوری‌که این سیستم به‌تنهایی قادر به تأمین تمام تقاضای گرمایی نیست[۵۹].

ترکیب جمع کننده‌های خورشیدی هیبریدی با پمپ‌های حرارتی امکان تأمین نیازهای حرارتی را با استفاده از انرژی خورشیدی فراهم کرده است [۶۰]. پمپ‌های حرارتی می‌توانند از انرژی حرارتی تولیدشده توسط جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی برای تأمین تقاضای انرژی ساختمان استفاده کنند. بعلاوه برق تولیدی توسط جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی می‌تواند انرژی کمپرسور پمپ حرارتی را تأمین کند [۶۱] که به سهم خود مصرف انرژی اولیه را نیز کاهش می‌دهد. در این سیستم و در این حالت، سهم انرژی تجدیدپذیر تولیدشده و مصرف شده در محل افزایش می‌یابد؛ که منافع زیادی در کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن دارد. درعین‌حال، خنک‌سازی فعال سلول‌های جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی عملکردهای هر دو سیستم را نسبت به سیستم‌های جداگانه بهبود می‌بخشد [۶۲] و صرفه‌جویی‌هایی در مصرف برق شبکه را به همراه دارد [۶۳].

همان‌طور که بسیاری از مطالعات در دهه اخیر نشان داده‌اند،سیستم پمپ حرارتی با جمع کننده‌های ترکیبی ، بهبود قابل‌توجهی در عملکرد انرژی کلی نسبت به سیستم‌های نسل اول که از جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی اولیه و پمپ‌های حرارتی استفاده می‌کنند، ایجاد می‌کند [۶۴ و ۶۵]. روسی و همکاران [۶۶] مقایسه‌های مختلفی را انجام دادند و نتایج بهتری را در بهره‌وری الکتریکی پمپ حرارتی با کمک جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی نسبت به سیستم پمپ‌های حرارتی با کمک انرژی خورشیدی با صفحه‌های نسل اول به دست آوردند[۶۷ و ۶۸]. همچنین نشان داده شده است که ترکیب جمع کننده‌های خورشیدی هیبریدی با پمپ‌های حرارتی امکان صرفه‌جویی در انرژی اولیه را نسبت به سیستم‌های نسل اول فراهم می‌کند [۶۹ و ۷۰].

پمپ‌های حرارتی با کمک صفحات خورشیدی نسل اول یک فناوری مستند و شناخته‌شده است. بسیاری از مطالعات مروری بر این سیستم تمرکز دارند. هیچ یک از این مقالات مروری به‌طور خاص بر ادغام پمپ‌های حرارتی و جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی در یک سیستم واحد تمرکز ندارند.

مقاله مروری حاضر به بررسی پیکربندی‌های مختلف ادغام سیستم پمپ‌های حرارتی و جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی برای کاربردهای ساختمانی می‌پردازد. توجه به پمپ‌های حرارتی برای گرمایش و سرمایش و کاربرد آن در ساختمان‌ها به‌عنوان کارآمدترین و قابل‌اجراترین فناوری برای سیستم‌های ساختمانی بسیار حائز اهمیت است. دیاگرام شکل ۱، تقسیم‌بندی انواع سیستم‌های حاصل از ادغام را نشان می‌دهد. در سیستم‌های انبساط مستقیم جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی به‌عنوان تبخیرکننده پمپ حرارتی عمل می‌کنند، در حالی‌که در سیستم‌های انبساط غیرمستقیم یک مبدل حرارتی بین جمع کننده‌های ترکیبی و پمپ حرارتی قرار می‌گیرد. همچنین پیکربندی‌های منبع تک‌گانه، که در آن انرژی خورشیدی تنها منبع گرمایی برای پمپ حرارتی است، و سیستم‌های دو منبعی که در آن یک منبع گرمایی دیگر همراه با انرژی خورشیدی استفاده می‌شود، مورد بررسی قرارگرفته‌اند[۷۱-۷۵].

شکل ۱: دیاگرام تقسیم‌بندی ادغام پمپ حرارتی و جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی

۴- شاخص‌های عملکرد

در این بخش، شاخص‌های اصلی عملکرد که در مطالعات برای توصیف سیستم‌های ادغام شده پمپ‌های حرارتی و کلکتورهای خورشیدی هیبریدی استفاده می‌شوند[۷۶]، توضیح داده شده‌اند. عملکرد سیستم مذکور به‌طورمعمول بر اساس خروجی الکتریکی و حرارتی آن ارزیابی می‌شود[۷۷]. کارایی الکتریکی یک ماژول خورشیدی طبق فرمول ۱ به سهمی از تابش خورشیدی که به برق تبدیل می‌شود، مربوط است:

$$\eta_{el}=\frac{P_{el}}{G_t\ A_c} \qquad (۱)$$

که در آن η_{el} کارآیی الکتریکی ماژول؛ P_{el} توان الکتریکی تولیدشده توسط ماژول [وات]؛ Gt تابش خورشیدی کل برخورد کرده به ماژول [وات/مترمربع] و Ac مساحت جمع‌کننده در معرض آفتاب [مترمربع] است.

کارآیی حرارتی جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی به‌صورت مشابه با جمع‌کننده‌های حرارتی معمولی و طبق فرمول ۲ محاسبه می‌شود:

$$\eta_{el}=\frac{\dot{Q}_{hp}}{G_t\ A_c}=\frac{\rho\dot{V}c\ (T_{out}-T_{in})}{G_t\ A_c} \qquad (۲)$$

$\dot{Q}_{hp}$ مقدار تابش خورشیدی جذب‌شده توسط سیال موردنظر می‌باشد که به‌صورت تفاوت توان حرارتی سیال در خروجی و ورودی

جمع‌کننده بیان می‌شود. ρ چگالی، V نخ جریان حجمی و c ظرفیت حرارتی ویژه سیال است، Tin و $Tout$ به ترتیب دماهای ورودی و خروجی سیال هستند.

عملکرد پمپ حرارتی نیز به‌طورکلی از طریق ضریب عملکرد ارزیابی می‌شود که طبق فرمول ۳ به‌صورت نسبت نرخ جریان حرارتی تولیدشده توسط پمپ حرارتی $\dot{Q}_{hp}$ به توان الکتریکی جذب‌شده P_{el} می‌باشد:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{hp}}{P_{el}} \quad (۳)$$

به‌طور مشابه، عملکرد چیلرها و پمپ‌های حرارتی که به‌صورت معکوس عمل می‌کنند، معمولاً از طریق نسبت بازده انرژی (EER) اندازه‌گیری می‌شود که به‌عنوان نسبت نرخ جریان حرارتی استخراج‌شده توسط چیلر $\dot{Q}_{ch}$ به توان الکتریکی جذب‌شده P_{el} می‌باشد:

$$EER = \frac{\dot{Q}_{ch}}{P_{el}} \quad (۴)$$

عملکرد روزانه، ماهانه و فصلی سیستم‌های ادغام‌شده پمپ‌های حرارتی و جمع‌کننده‌های ترکیبی با در نظر گرفتن برآیند شاخص‌های فوق‌الذکر در طول دوره موردنظر، قابل ارزیابی می‌باشد.

۵- سیستم‌های انبساط مستقیم

سیستم‌های پمپ حرارتی با انبساط مستقیم اولین نوع از پیکربندی‌هایی هستند که توسط بسیاری از محققان در طول سال‌ها به‌عنوان ترکیبی از جمع کننده‌های حرارتی خورشیدی نسل اول و پمپ‌های حرارتی توسعه‌یافته و بررسی‌شده‌اند [۸۲-۸۰]. پمپ حرارتی خورشیدی با انبساط مستقیم ساده‌ترین پیکربندی است که عمدتاً برای تولید آب گرم مصرفی به کار می‌رود [۸۳]. در سیستم‌های پمپ حرارتی خورشیدی با جمع کننده‌های ترکیبی با انبساط مستقیم ، یک یا چند جمع کننده به‌عنوان تبخیرکننده پمپ حرارتی عمل می‌کنند و انرژی خورشیدی را برای دستگاه فراهم می‌نمایند. مبرد پمپ حرارتی درون جمع کننده تبخیرکننده، جریان می‌یابد و در طی فرآیند تغییر فاز، گرما را استخراج می‌کند.

مطالعات تحقیقاتی در مورد سیستم‌های پمپ حرارتی خورشیدی با جمع‌کننده‌های ترکیبی با انبساط مستقیم، به‌صورت تک منبع و دو منبع، در ادامه توضیح داده شده است، جزئیات مهم‌ترین مطالعات تحقیقاتی در جدول ۱ خلاصه شده است

۵-۱- سیستم پمپ حرارتی خورشیدی با جمع‌کننده‌های ترکیبی با انبساط مستقیم تک منبع خورشیدی

سیستم پمپ حرارتی خورشیدی با جمع کننده‌های ترکیبی با انبساط مستقیم تک منبع، ساده‌ترین و کاربردی‌ترین روش مورداستفاده برای گرمایش آب است. در این پیکربندی، جمع کننده هیبریدی تنها منبع انرژی برای دستگاه است (شکل ۲). این سیستم می‌تواند آب گرم را در سطوح دمای مختلف تولید کند و بسته به طراحی سیستم، برای گرمایش فضا یا تولید آب گرم مصرفی کاربرد دارد.[۸۴]

ایتو و همکاران [۸۵] از نخستین کسانی بودند که یک سیستم پمپ حرارتی خورشیدی با جمع کننده‌های ترکیبی با انبساط مستقیم، مبتنی بر یک جمع کننده هیبریدی بهینه‌شده را برای گرمایش آب ارائه دادند که خود بر اساس یک مطالعه تحقیقاتی قبلی بود. در تحقیقی دیگر [۶۳] یک سیستم پمپ حرارتی خورشیدی با جمع کننده‌های ترکیبی با انبساط تک منبع را برای گرمایش آب مدل‌سازی و شبیه‌سازی شد تا توزیع دما در طول تبخیرکننده ارزیابی شود. این مدل سپس برای شبیه‌سازی عملکردها تحت شرایط اقلیمی مختلف مانند تبت [۸۶] و هنگ کنگ [۸۷] به‌کار گرفته شد و با بهبود مناسب جمع کننده‌های ترکیبی ،منجر به عملکردهای امیدوارکننده سیستم گردید. ژانگ و همکاران [۸۸] نسلی جدید از لوله حرارتی حرکتی را برای کمک به سیستم پمپ حرارتی برای تولید آب گرم خانگی معرفی کردند. ژو و همکاران [۸۹] از یک جمع کننده هیبریدی میکرو کانال به‌عنوان تبخیرکننده در سیستم مورد اشاره برای تولید آب گرم با عملکرد خوب استفاده کردند و در یک آزمایش تجربی یک‌هفته‌ای در چین شمالی، ضریب عملکرد میانگین سیستم ۴/۷ ثبت گردید. تحلیل‌های بیشتر با یک مدل عددی مناسب [۹۰] منجر به بهینه‌سازی سیستم از نظر کارایی (۱۴/۵٪ کارایی الکتریکی و ۵۹/۷٪ کارایی حرارتی) و ضریب عملکرد تا ۵/۲ [۹۱] شد. لیانگ و همکاران [۹۲] یک سیستم میکرو کانال جمع کننده‌های ترکیبی تهویه شده کدر که قادر به کاهش جریان حرارتی از ساختمان بود، را با یک سیستم مستقیم برای تولید آب گرم با عملکرد خوب تحت شرایط آزمایشی واقعی ترکیب کردند.

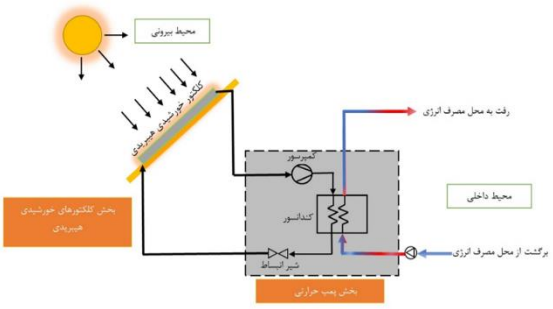
جدول ۱: مطالعات سیستم‌های پمپ حرارتی خورشیدی با جمع کننده‌های ترکیبی با انبساط مستقیم

سال	مطالعه	اثر مفید	عملکردها	منبع حرارتی	نوع داده	نویسنده
۲۰۰۵	عددی	گرمایش آب ، گرمایش	max COP: 10.4، avg: 5.4	فقط خورشیدی	آزمایش ۱ روزه	ایتو[۸۴]
۲۰۰۸	تجربی	گرمایش آب ، گرمایش و سرمایش	max COP: 8.84، avg: 6.4	خورشیدی و هوا	آزمایش ۱ روزه	جی و همکاران[۱۰۰]
۲۰۰۹	عددی	گرمایش آب	average COP: 4.8	فقط خورشیدی	شبیه‌سازی ۱ ساله	جی و همکاران[۶۳]
۲۰۱۰	تجربی	گرمایش آب ، گرمایش و سرمایش	COP: 2.75-2.85	فقط خورشیدی	آزمایش ۲ ساعته	شو و همکاران[۱۰۱]
۲۰۱۱	عددی	گرمایش آب	COP: 3.32-4.01	فقط خورشیدی	آزمایش ۷ روزه	فو و همکاران[۱۰۳]
۲۰۱۲	عددی	گرمایش آب	COP: 7.01-7.49، avg: 7.09	فقط خورشیدی	آزمایش ۷ روزه	تسای[۱۰۷]
۲۰۱۸	تجربی	گرمایش آب	COP: 3.1-5.6، avg: 4.7	فقط خورشیدی	آزمایش ۱ روزه	ژو و همکاران[۸۹]
۲۰۱۹	تجربی	گرمایش آب	COP: 3.03-3.57، avg: 3.66	فقط خورشیدی	تحلیل پارامتری	ژانگ و همکاران[۸۸]
۲۰۱۹	عددی	گرمایش آب	COP: 2.66 با ۱۰۰۰ W/m²	خورشیدی و هوا	شبیه‌سازی ماهیانه	کای و همکاران[۷۰]
۲۰۲۰	عددی	گرمایش آب	COP: 4.84-7.03، avg: 5.94	فقط خورشیدی	شبیه‌سازی ماهیانه	عمار و همکاران[۹۶]
۲۰۲۰	عددی	گرمایش آب	average COP: 3.10	خورشیدی و هوا	شبیه‌سازی ماهیانه	لی و همکاران[۹۴]
۲۰۲۱	عددی	گرمایش آب	average COP: 2.37	فقط خورشیدی	آزمایش ۱ روزه	لی و همکاران[۸]
۲۰۲۱	عددی	گرمایش و سرمایش	COP: 6.16، avg: EER: 2.8	فقط خورشیدی	آزمایش ۱ روزه	ژو و همکاران[۹۷]
۲۰۲۱	تجربی	گرمایش و سرمایش	EER: 19.3-5	فقط خورشیدی	آزمایش ۱ روزه	لیانگ و همکاران[۹۸]
۲۰۲۱	عددی	گرمایش و سرمایش	avg COP: 7.4	فقط خورشیدی	تحلیل پارامتری	لیانگ و همکاران [۹۸]
۲۰۲۱	تجربی	آب داغ	COP: 6.4	خورشیدی و زمین	آزمایش ۱ روزه	جیمز و همکاران [۹۴]
۲۰۲۱	عددی	گرمایش آب	COP: 1.78-3.69	خورشیدی و هوا	تحلیل پارامتری	یائو و همکاران [۱۰۹]

کنترل فرکانس کمپرسور در سیستم پمپ حرارتی خورشیدی با جمع کننده‌های ترکیبی با انبساط مستقیم اهمیت زیادی دارد. لی و همکاران [۹۳] یک روش کنترل یکپارچه را برای تنظیم فرکانس عملکرد کمپرسور طبق تابش زمان واقعی توسعه دادند. استراتژی کنترل پیشنهادی بهبودهای قابل‌توجهی در تولید برق فتوولتائیک و ضریب عملکرد سیستم نشان داد. جیمز و همکاران [۹۴] نیز بر کاهش تبادل برق با شبکه تمرکز کردند و با استفاده از یک کمپرسور دارای درایو فرکانس متغیر کنترل‌شده با بازخورد که می‌تواند طبق بار موجود کار کند، نتایج خوبی را از نظر کارایی انرژی به‌دست آوردند.

سیستم‌های پمپ حرارتی خورشیدی با جمع کننده‌های ترکیبی با انبساط مستقیم تک منبع معمولاً برای تولید آب گرم استفاده می‌شوند. لیکن، مثال‌های کمی از جمع کننده‌های ترکیبی که به‌عنوان کندانسور در شب عمل می‌کنند، در منابع علمی وجود دارد. چن و همکاران [۹۵ و ۹۶] سیستمی را آزمایش کردند که در آن جمع کننده‌های ترکیبی تبخیرکننده در شب به‌عنوان کندانسور عمل و آب سرد را برای نیازهای روزانه ذخیره می‌کنند. به‌طور مشابه، ژو و همکاران [۹۷] یک سیستم پمپ حرارتی خورشیدی با جمع

کننده‌های ترکیبی با انبساط مستقیم تک منبع را آزمایش کردند که قادر به ذخیره‌سازی در شب بود [۹۸ و ۹۹].

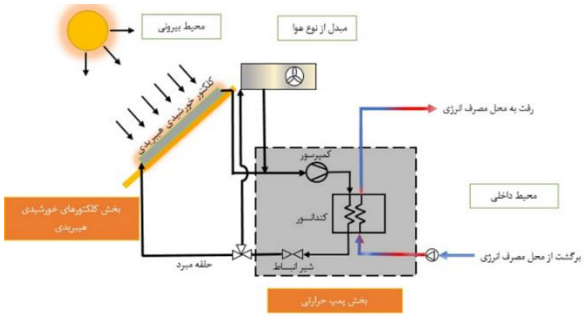


شکل ۲: سیستم پمپ حرارتی خورشیدی با جمع‌کننده‌های ترکیبی با انبساط مستقیم تک منبع خورشیدی

۵-۲- سیستم پمپ حرارتی با جمع کننده‌های خورشیدی هیبریدی با انبساط مستقیم دو منبع خورشیدی و هوا

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است،سیستم‌های پمپ حرارتی و جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط مستقیم ممکن است از یک منبع حرارتی دوم نیز بهره ببرند که به‌صورت موازی با جمع کننده خورشیدی ترکیبی عمل می‌کند. زمانی که انرژی خورشیدی برای راه‌اندازی دستگاه کافی نباشد، وجود یک منبع حرارتی اضافی که معمولاً هوا است، عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد. براساس شکل مذکور ، مسیر مبرد جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی به‌صورت موازی با مبدل حرارتی از نوع هوا نصب می‌شود. ظرفیت تبخیر هر مبدل حرارتی، به دمای تبخیرکننده‌ها، دمای محیط و میزان دریافت گرما بستگی دارد. زمانی که انرژی خورشیدی فراوان باشد، بخش بیشتری از مبرد در طرف جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی تبخیر می‌شود.

جی و همکاران [۱۰۰] تکامل سیستم پمپ حرارتی با جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط مستقیم با یک منبع را که قبلاً توصیف‌شده بود، پیشنهاد کردند. به‌نحوی‌که یک تبخیرکننده هوا به‌صورت موازی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی نصب گردد تا سیستم را زمانی که تابش ضعیف است، تقویت کند و قادر به تأمین تمام نیازهای حرارتی ساختمان، از جمله سرمایش ، گرمایش فضا و آب گرم مصرفی باشد. فانگ [۱۰۱] به‌صورت تجربی یک سیستم پمپ حرارتی با جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط مستقیم را بررسی کرد که قادر است سرمایش ، گرمایش فضا و آب گرم مصرفی را در حالت‌های مختلف عملیاتی بسته به بار و شرایط تأمین کند. [۱۰۲]. فو و همکاران [۱۰۳] از یک مبدل حرارتی از نوع جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی استفاده کردند که به‌صورت موازی با مبدل حرارتی از نوع هوا خنک نصب شده است تا از بهترین منبع حرارتی، بسته به شرایط آب‌وهوایی، بهره‌برداری کند. علاوه بر این، تولید آب گرم مصرفی می‌تواند فقط توسط جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی، زمانی که تابش خورشیدی فراوان است، اتفاق بیفتد. یک سیستم مشابه به‌صورت تجربی توسط لی و سان [۱۰۴] آزمایش شد، که شامل یک جمع کننده خورشیدی ترکیبی ترکیب‌شده با یک پمپ حرارتی برای گرمایش آب بود که از طریق شبیه‌سازی‌های مؤلفه‌های تعیین‌کننده بهینه‌سازی شد [۱۰۵]. عملیات موازی این دو سیستم اجازه می‌دهد تا آب گرم در شرایط مختلف تابش خورشیدی، تأمین شود[۱۰۶].



شکل ۳: سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط مستقیم دو منبع خورشیدی و هوا

۶- سیستم‌های انبساط غیرمستقیم

در پیکربندی سیستم گرمایشی پمپ حرارتی با جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم، مبدل حرارتی هیبریدی با تبخیرکننده پمپ حرارتی هم‌راستا نیست[۱۰۷]. درواقع، سیال مبرد در مبدل هیبریدی منبسط نمی‌شود، بلکه یک مبدل حرارتی واسط بین مدار خورشیدی و مدار مبرد قرار می‌گیرد[۱۰۸]. مبدل‌های خورشیدی هیبریدی و پمپ حرارتی اساساً از یکدیگر جدا هستند، که این امر اجازه می‌دهد سیستم عملکردی انعطاف‌پذیرتری داشته باشد [۱۰۹]. یک سیستم ذخیره‌سازی آب ممکن است بین مدار خورشیدی و مدار پمپ حرارتی برای کاهش وابستگی به در دسترس بودن لحظه‌ای انرژی خورشیدی به کار رود[۱۱۰]. مطالعات تحقیقاتی در مورد پمپ حرارتی با جمع کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم، چه تک‌منبع و چه دو منبع، در زیر شرح داده شده است، جزئیات هر یک از این مطالعات تحقیقاتی در جدول ۲ خلاصه شده است.

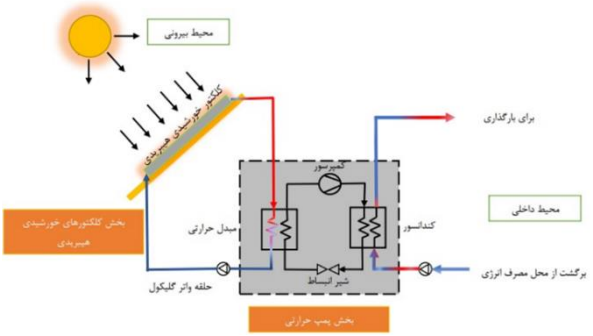
جدول ۲: مطالعات سیستم‌های پمپ حرارتی خورشیدی با کلکتورهای هیبریدی با انبساط غیر مستقیم

سال	مطالعه	اثر مفید	عملکردها	نوع داده	منبع حرارتی	نویسنده
۲۰۰۵	عددی	گرمایش آب و گرمایش فضا	COP: 2.59-2.71، میانگین COP: 4.3	شبیه‌سازی ۱۰ ساله	فقط خورشیدی	باکر و همکاران [۵۷]
۲۰۱۲	عددی	گرمایش آب	میانگین COP: 4.3	شبیه‌سازی ۱ ساله	فقط خورشیدی	بای و همکاران[۱۱۶]
۲۰۱۳	عددی	گرمایش آب و گرمایش فضا	عامل عملکرد فصلی (SPF): 4.5، COPبالا: ۷.۸۷	آزمایش ۱ ساله	خورشیدی و هوا	برتران و همکاران[۱۲۸]
۲۰۱۴	عددی و تجربی	گرمایش آب	COP: 2.74تا ۵.۹۸، avg: 4.08	شبیه‌سازی ۱ ساله	خورشیدی	ژنگ و همکاران [۱۴]
۲۰۱۵	عددی	گرمایش آب	COP: 3.72	شبیه‌سازی ۱ ساله	فقط خورشیدی	وانگ و وشیدی[۱۵]
۲۰۱۶	عددی	گرمایش آب و گرمایش و سرمایش فضا	COPماهانه: ۳.۴۸	شبیه‌سازی ۱ ساله	خورشیدی و هوا	پاتروگاد و همکاران[۱۳۴]
۲۰۱۶	عددی	گرمایش آب	COP: 2.63-5.05	شبیه‌سازی ۱ ساله	فقط خورشیدی	آرت و همکاران[۲۳]
۲۰۱۷	عددی	گرمایش آب	COP: 2.68-2.91، avg: 2.77	آزمایش ۱ ساله	فقط خورشیدی	کی و همکاران [۱۱۵]
۲۰۱۸	عددی و تجربی	گرمایش آب	COP: 2.99-3.08، ER: 229-345	آزمایش ۱ ساله	فقط خورشیدی	چن و همکاران[۱۱۵]
۲۰۱۹	عددی و تجربی	گرمایش آب	COPغیرخطی: ۳.۰۲، COP شبیه‌سازی‌شده: ۲.۵۳	شبیه‌سازی پارامتری	خورشیدی و هوا	بزنغت و همکاران [۱۹]
۲۰۱۹	عددی و تجربی	گرمایش آب	میانگین سالانه COP: 3.56	شبیه‌سازی ۱ ساله	خورشیدی و هوا	سیمونتی و همکاران[۱۲۶]
۲۰۱۹	عددی	گرمایش آب	COP: 5.30	شبیه‌سازی ۱ ساله	خورشیدی و هوا	دل آمو [۱۱۷]
۲۰۱۹	عددی	گرمایش آب	COP: 2.3تا ۳.۴	شبیه‌سازی ۹ ماهه	خورشیدی و هوا	ساکلریس و آکاپولوس [۱۳۵]
۲۰۱۹	تجربی	گرمایش آب	COP: 3.36-4.8، avg: 4.2	آزمایش ۱ ساله	فقط خورشیدی	دامنرند و ماندی [۱۳۱]
۲۰۲۰	تجربی	گرمایش آب و گرمایش فضا	میانگین سالانه COP: 3.6-4.8	آزمایش ۱ ساله	فقط خورشیدی	نارانجو-مندوزا و همکاران [۱۴۱]
۲۰۲۰	عددی	گرمایش فضا	COP: 3.13-4.15	شبیه‌سازی ۱ ساله	فقط خورشیدی	کی و همکاران [۱۲۰]
۲۰۲۰	عددی	گرمایش فضا	COP: 4.2تا ۴.۶	شبیه‌سازی پارامتری	فقط خورشیدی	کنگ و همکاران [۱۲۱]
۲۰۲۰	عددی	گرمایش فضا	COP: 4.2تا ۴.۶	شبیه‌سازی پارامتری	فقط خورشیدی	اوهانگل و همکاران [۱۲۲]

۶-۱- سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های ترکیبی با انبساط غیرمستقیم تک‌منبع خورشیدی

سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم تک‌منبع خورشیدی، تکامل‌یافته سیستم پمپ حرارتی خورشیدی با جمع‌کننده‌های ترکیبی با انبساط مستقیم است [۱۸] [۴۰]. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی یک جریان مایع از آب خالص یا مخلوطی از آب و مایع ضدیخ را گرم می‌کند و این گرما را از طریق یک تبخیرکننده آب به گاز به دستگاه منتقل می‌گردد. ضعف‌های عملکردی مربوط به ناپایداری شرایط آب‌وهوایی باوجود مبدل حرارتی واسط بین مبدل‌های خورشیدی و پمپ حرارتی کاهش می‌یابد. استفاده از یک مبدل حرارتی بین دستگاه و حلقه جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی به بهبود مدیریت سیستم کمک می‌کند.

محققان مختلف به‌طور تجربی سیستم‌های پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم تک‌منبع را تحلیل کرده‌اند. زانگ و همکاران [۱۱۱] یک سیستم جدید پمپ حرارتی خورشیدی ترکیبی توسعه دادند که شامل یک مبدل حرارتی ترکیبی بود و گرمای موردنیاز پمپ حرارتی را برای تولید آب گرم به‌طور غیرمستقیم تأمین می‌کرد. یک مدل مجازی به نویسندگان این امکان را داد که اجزای سیستم را طراحی و اندازه‌گیری کنند و اثر پارامترهای عملیاتی مختلف را بر عملکردهای انرژی ارزیابی کنند. علاوه بر این، نویسندگان تمام چرخه عمر سیستم را تحلیل کردند تا مقایسه اقتصادی و زیست‌محیطی با سیستم‌های متداول در شرایط اقلیمی مختلف را انجام دهند [۱۱۲]. دانمند و همکاران [۱۱۳] عملکرد سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم تک‌منبع را برای تولید آب گرم مصرفی از طریق شبیه‌سازی‌های عددی [۱۱۴] مطالعه کردند. مطالعات عددی مختلفی از این سیستم‌ها جهت اندازه‌گیری بهینه و اثر پارامترهای سیستم و شرایط محیطی بر عملکردها را بررسی شدند [۱۱۵]. نرم‌افزار انسیس فلوئنت معمولاً برای طراحی مقدماتی [۱۱۶]، ارزیابی عملکرد در شرایط عملیاتی مختلف [۱۱۷ و ۱۱۸] و بهینه‌سازی سیستم [۱۱۹] مورداستفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های ریاضی مختلف معمولاً برای تحلیل اقتصادی پارامتریک [۱۲۰-۱۲۲] استفاده می‌شوند.

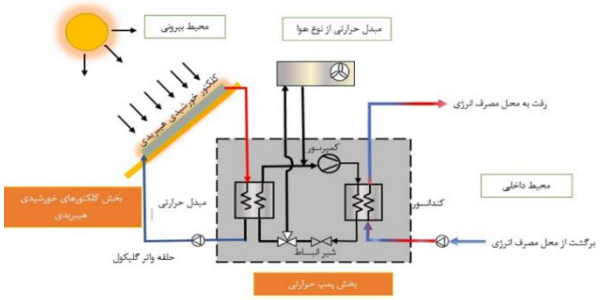


شکل ۴: سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم تک‌منبع خورشید

۶-۲- سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های ترکیبی با انبساط غیرمستقیم دو منبع

سیستم‌های پمپ حرارتی خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم با دو منبع یک تکامل بسیار جالب از سیستم‌های تک‌منبع هستند. در این سیستم‌ها، از یک منبع گرمایی دوم، مانند هوای بیرونی یا زمین، به‌طور موازی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی استفاده می‌شود. این دستگاه به‌طور واقعی با دو مبدل حرارتی مختلف تجهیز می‌گردد و معمولاً مبدل‌های خورشیدی ترکیبی به‌عنوان یک منبع انرژی اضافی برای پمپ حرارتی عمل می‌کنند. این پیکربندی می‌تواند گرمایش، سرمایش و آب گرم مصرفی را تأمین کند و برای طیف وسیعی از شرایط اقلیمی مناسب است.

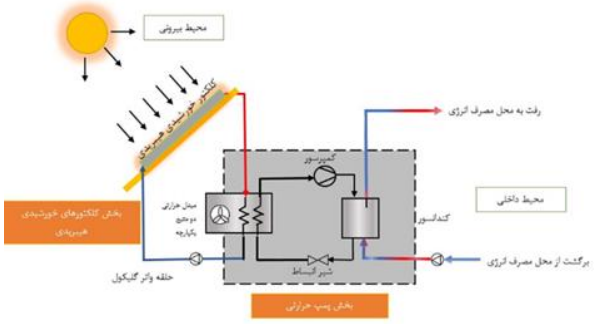
همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در صورت استفاده از پمپ حرارتی همراه با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی انبساط غیرمستقیم، دو منبع حرارتی معمولاً به‌طور موازی با مدار مبرد پمپ حرارتی نصب می‌شوند. همان‌طور که کو همکاران [۱۲۳] آزمایش کرده‌اند منبع دوم این امکان را فراهم می‌آورد که دستگاه حتی در صورت نبود یا کمبود تابش خورشید کار کند و این امر وابستگی به انرژی خورشیدی را کاهش می‌دهد، توسط بسگنی و همکاران [۱۹] پیشنهاد شده است که وجود یک منبع گرمایی مستقل اضافی به پمپ حرارتی این امکان را می‌دهد که به‌صورت معکوس عمل کند و در حالت سرمایش نیز کار کند، نویسندگان یک مطالعه پارامتریک انجام دادند تا تعداد بهینه جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی، براساس مقدار ذخیره‌سازی را پیدا کنند [۶۸] و سپس یک سیستم پمپ حرارتی همراه با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی غیرمستقیم با دو منبع را توسعه دادند که قادر به تأمین گرمایش، سرمایش و آب گرم مصرفی به‌صورت هم‌زمان است.



شکل ۵: سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم دو منبع خورشیدی و هوا

یکی دیگر از گزینه‌های موجود برای استفاده از پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم دو منبع، استفاده از یک مبدل حرارتی با دو روش انتقال حرارت با جریان هوا و آب می‌باشد که در یک محفظه یکپارچه قرار دارند که در شکل ۶ نشان داده شده است [۱۲۴] و قادر است از دو منبع حرارتی مختلف استفاده کند. وانگ و همکاران [۱۲۴] از جمله اولین نفرات بودند که از مبدل تبخیرکننده با دو منبع حرارتی ترکیبی برای گرمایش آب استفاده کردند. این سیستم مجهز به یک مبدل تبخیرکننده نوآورانه است که قادر به استخراج انرژی از جریان آب گلیکول در مدار جمع‌کننده‌های

خورشیدی ترکیبی و جریان هوا است. طبق گفته نویسندگان، توجه خاصی به مدیریت دمای عملکرد لازم است، زیرا دمای بالاتر جریان آب ممکن است عملکرد را کاهش دهد. لانگ و همکاران [۱۲۵] تأثیر دماهای جریان هوا و آب را بر عملکرد سیستم موردبررسی قرار دادند و افزایش عملکرد یک پمپ حرارتی دو منبع یکپارچه را نسبت به پمپ حرارتی با منبع هوایی معمولی کمیّت‌سازی کردند. سیمونتی و همکاران [۱۲۶] یک سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم دو منبع نوآورانه را که با یک مبدل تبخیر دو منبع یکپارچه ساخته‌شده بود، به‌طور تجربی آزمایش کردند و تا ۱۴٪ افزایش عملکرد نسبت به پمپ‌های حرارتی با منبع هوایی به دست آوردند.

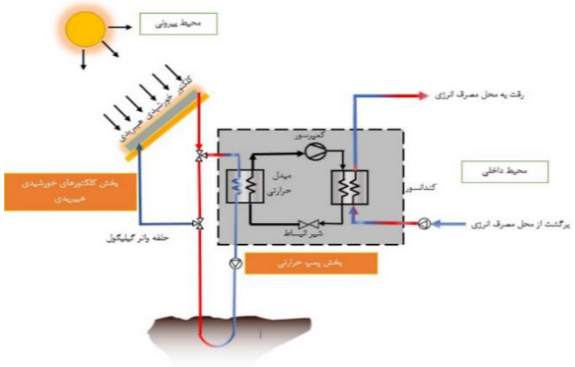


شکل ۶: سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم دو منبع با مبدل یکپارچه آب‌وهوا

جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی همچنین می‌توانند با مبدل حرارتی زمین‌گرمایی ترکیب شوند. ترکیب پمپ حرارتی و فناوری‌های حرارتی خورشیدی و منابع زمین‌گرمایی یک راه‌حل بسیار جذاب است، به‌ویژه در کشورهای شمالی که سیستم‌های منابع زمین‌گرمایی به‌صرفه‌تر از فناوری‌های مبتنی بر هوا هستند که در دماهای پایین عملکرد مناسبی ندارند [۱۲۷]. جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی ترکیب‌شده با پمپ‌های حرارتی منابع زمین‌گرمایی دو مزیت را به همراه دارند:

۱) بهبود کارایی جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی به دلیل پایین بودن دما و افزایش ضریب عملکرد به دلیل دمای تبخیر بالاتر [۱۲۸ و ۱۲۹].

۲) در محل‌هایی که تعداد استفاده از مبدل‌های حرارتی از نوع زمین‌گرمایی زیاد باشد این امر باعث استخراج گرمای زیاد و پیوسته از زمین می‌شود که این عامل دمای متوسط زمین را کاهش می‌دهد. [۱۳۰].



شکل ۷: سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم دو منبع با مبدل زمین‌گرمایی در مدار یکسان

اولین مطالعات در مورد جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی و پمپ‌های حرارتی منابع زمین به دهه ۸۰ میلادی برمی‌گردد، زمانی که نخستین تحلیل‌ها در مورد پیکربندی‌های مختلف مبدل حرارتی زمین‌گرمایی و پمپ‌های حرارتی خورشیدی ارائه شد [۱۳۲]. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است. تحقیقات زیادی در مورد پمپ‌های حرارتی منابع زمین انجام شد و به‌ویژه با استفاده از جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی می‌تواند به یک مدار زمین‌گرمایی در سمت تبخیرکننده یک پمپ حرارتی متصل شود، توسط باکار و همکاران [۵۷] در برخی موارد، مدار خورشیدی نیاز به پر شدن با مخلوط‌های ضدیخ دارد که نیاز به یک مبدل حرارتی واسط برای جداسازی مدارهای خورشیدی و زمین‌گرمایی دارد. چندین نویسنده برای بررسی ترکیب جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی و پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی از ابزارهای عددی استفاده کرده‌اند. نرم‌افزار فلوئنت انسیس در این زمینه برای تخمین عملکرد پمپ‌های حرارتی به دلیل وجود جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی در شرایط جوی مختلف [۱۲۸ و ۱۳۳ و ۱۲۹ و ۱۳۶] و همچنین برای تعریف پیکربندی بهینه سیستم [۱۲۷ و ۱۳۵, ۱۳۷] به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. روش آنالوژی ترموالکتریکی به‌عنوان استراتژی مدل‌سازی چنین سیستم‌هایی، به‌طور مؤثر برای تجزیه‌وتحلیل فرآیندهای انتقال حرارت استفاده شده است. بااین‌حال، این روش برخی محدودیت‌ها را در تجزیه‌وتحلیل کمی سیستم‌های حرارتی پیچیده نشان داده است [۱۳۸]. اخیراً، وانگ و همکاران [۱۳۹] نشان دادند که روش جریان حرارتی یک راه‌حل بهینه برای مدل‌سازی پمپ‌های حرارتی دو تبخیرکننده با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی و منبع زمین‌گرمایی است. استراتژی کنترل عملکرد مبتنی بر مدل توسط شیا و همکاران [۱۴۰] پیاده‌سازی شد که یک مدل تطبیقی و الگوریتم ژنتیک را برای تعیین تنظیمات کنترل بلادرنگ ترکیب کرده است.

۷- ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی

تحلیل‌های اقتصادی سیستم‌های پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی در مقایسه با سیستم‌های متعارف تهویه مطبوع نیازمند بررسی جامع هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های عملیاتی و تعمیرات، بازده انرژی و دوره بازگشت سرمایه است. مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه هزینه‌های اولیه‌ها به دلیل نیاز به تجهیزات اضافی مانند جمع‌کننده‌های خورشیدی و سیستم‌های ذخیره‌سازی ۳۰-۵۰٪ بیشتر از سیستم‌های متعارف است، اما این سیستم‌ها می‌توانند ۴۰-۶۰٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی کنند [۱۴۱]. در مناطق با تابش خورشیدی مناسب، این صرفه‌جویی می‌تواند هزینه‌های اضافی را در بازه ۵-۸ سال جبران کند. روش‌های تحلیل مالی مانند محاسبه ارزش فعلی خالص و نرخ بازده داخلی نشان می‌دهند که در بلندمدت (۱۰-۱۵ سال) ازنظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر هستند[۱۴۲]. عوامل جغرافیایی و اقلیمی نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی و مقرون‌به‌صرفه بودن سیستم‌های جمع‌کننده خورشیدی هیبرید با پمپ حرارتی دارند. در مناطقی با میانگین تابش خورشیدی بالای ۴/۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در روز، این سیستم‌ها می‌توانند تا ۷۰٪ از نیاز گرمایشی ساختمان را تأمین کنند[۱۴۳]. از سوی دیگر، در مناطق با آب‌وهوای ابری یا عرض‌های جغرافیایی بالا، کارایی سیستم کاهش‌یافته و ممکن است نیاز به سیستم پشتیبان باشد که هزینه‌ها را افزایش می‌دهد [۱۴۴]. قیمت انرژی محلی نیز تأثیر مستقیمی دارد؛ در مناطقی با قیمت بالای برق یا گاز طبیعی، دوره بازگشت سرمایه سیستم جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با پمپ حرارتی کوتاه‌تر می‌شود. تحلیل‌های حساسیت نشان می‌دهند که هر ۱۰٪ افزایش در قیمت حامل‌های انرژی، می‌تواند دوره بازگشت سرمایه را تا ۱/۵ سال کاهش دهد [۱۴۵]. هزینه‌های تعمیر و نگهداری سیستم جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با پمپ حرارتی معمولاً ۱۵-۲۰٪ کمتر از سیستم‌های متعارف است، زیرا اجزای متحرک کمتری دارند و در برابر نوسانات قیمت سوخت مصون‌تر هستند[۱۴۶]. بااین‌حال، نیاز به نیروی کار متخصص برای نصب و راه‌اندازی می‌تواند هزینه‌های اولیه را در برخی مناطق افزایش دهد. از دیدگاه چرخه عمر سیستم جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با پمپ حرارتی نه تنها ازنظر اقتصادی بلکه ازنظر زیست‌محیطی نیز برتری دارند.

۸- بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این مطالعه، سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط مستقیم به دلیل ساختار ساده‌تر، پیچیدگی کمتر و هزینه پایین‌تر، گزینه مناسبی برای گرم کردن آب محسوب می‌شود، بعلاوه عدم وجود مبدل حرارتی واسط، باعث می‌گردد جمع کننده خورشیدی ترکیبی به‌عنوان یک اواپراتور به‌صورت یکپارچه با سیستم عمل کند. لیکن، به این دلیل که تغییرات به وجود آمده در میزان تابش می‌توانند به دلیل عدم تطابق با سرعت کمپرسور و تغییر فاز مبرد، بر عملکرد کلی سیستم تأثیر بگذارند، این سیستم در برابر تغییرات تابش خورشیدی آسیب‌پذیرتر می‌باشد؛ بنابراین، استراتژی‌های کنترل پیچیده در شرایط جوی ناپایدار و همچنین استفاده از کمپرسور با سرعت متغیر ضروری می‌باشد. در این سیستم با توجه به اینکه جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی به‌عنوان اواپراتور عمل می‌کنند تبخیر مبرد در داخل آن‌ها نیاز به استفاده از هرگونه مخلوط ضدیخ را حذف می‌کند که این امر به افزایش ضریب انتقال حرارت منجر می‌شود و در نتیجه تلفات حرارتی به محیط کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، توجه ویژه‌ای لازم است تا از دماهای عملیاتی بسیار پایین جلوگیری شود، چرا که این شرایط ممکن است منجر به یخ‌زدگی جمع‌کننده، تشکیل رطوبت، کاهش عملکرد و یا حتی آسیب دائمی شود. در این راستا، انتخاب یک مبرد مناسب که بتواند نیازهای جمع‌کننده خورشیدی و پمپ حرارتی را به‌طور رضایت‌بخش برآورده کند، مسئله‌ای حیاتی است که خود باعث کند شدن روند گسترش سیستم‌های انبساط مستقیم شده است[۵۳].

یک محدودیت دیگر برای سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط مستقیم تک منبعی، تولید سرمایش با معکوس کردن چرخه پمپ حرارتی است، زیرا جمع‌کننده خورشیدی قادر به تخلیه گرما به محیط در طول روز نمی‌باشد. به‌طورکلی، سادگی ساخت و هزینه پایین، این سیستم‌ها را به یک فناوری جالب برای کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی در محیط‌های خانگی، جایی که نیاز به سرمایش محدود است، تبدیل کرده است. بااین‌حال، معایب زیاد آن‌ها، به‌ویژه عملکرد ضعیف در شرایط جوی ناپایدار، دلیل کاهش توجه به این سیستم‌ها بوده است.

سیستم‌های پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم راه‌حلی گسترده برای رفع بسیاری از مشکلات مربوط به سیستم‌های انبساط مستقیم از جمله فرآیند ناپایدار تغییر فاز، شرایط متغیر آب‌وهوایی و دمایی، عملکرد نوسانی و خطر ورود

مبرد مایع به کمپرسور ارائه می‌دهند، پیکربندی این روش امکان چیدمان انعطاف‌پذیرتری را برای اجزای سیستم فراهم می‌کند و استفاده از ذخیره‌سازی حرارتی برای انرژی خورشیدی یا مدیریت بار را ممکن می‌سازد. مزیت اصلی سیستم‌های پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم جذب گرمای پایدارتر از منبع خورشیدی است، زیرا مبرد در یک مبدل حرارتی آب به گاز تحت شرایط پایدارتر نسبت به انبساط مستقیم داخل جمع کننده خورشیدی ترکیبی تبخیر می‌شود که به وابستگی کمتر به شرایط آب‌وهوایی منجر می‌گردد. علاوه بر این، وجود مبدل حرارتی واسط، خطوط تبرید را کوتاه‌تر می‌کند، مقدار مبرد موردنیاز را کاهش می‌دهد و منافع اقتصادی و زیست‌محیطی را به همراه دارد. پیکربندی انبساط غیرمستقیم همچنین اجازه می‌دهد که از یک منبع حرارتی دوم به‌طور مستقل یا هم‌زمان بهره‌برداری شود. سیستم‌های دو منبعی پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط غیرمستقیم در مناطقی با نیازهای سرمایشی بالا، مناسب‌ترین راه‌حل هستند و می‌توانند تمامی نیازهای حرارتی ساختمان را پوشش دهند.

ازنظر عملکرد، تحقیقات تجربی در مورد سیستم‌های پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط مستقیم ضریب عملکرد متوسط بین ۲/۷ تا ۷ را بسته به شرایط عملیاتی و معمولاً در آزمایش‌های یک یا چند روزه در شرایط محیطی مطلوب ثبت کرده‌اند. این نتایج به‌طور میانگین از سیستم‌های انبساط غیرمستقیم که ضریب عملکرد متوسط بین ۲/۳ تا ۴/۵ را طبق مطالعات ذکرشده گزارش کرده‌اند، بالاتر است. این اطلاعات نشان‌دهنده پتانسیل سیستم‌های انبساط مستقیم ازنظر عملکرد است، اما کمبود داده‌های تجربی بلندمدت احتمالاً به دلیل ناپایداری ذاتی عملکرد در شرایط مختلف محیطی است که کاربردهای آن‌ها را محدود می‌کند. کمپرسورهای با سرعت متغیر به‌ویژه در سیستم‌های انبساط مستقیم ترجیح داده می‌شوند، درحالی‌که انتخاب مبرد مناسب عمدتاً تحت تأثیر پیکربندی سیستم (انبساط مستقیم یا غیرمستقیم)، شرایط عملیاتی (دمای تبخیر و تقطیر) و دلایل زیست‌محیطی قرار دارد. R410a و R134a رایج‌ترین مبردها برای کاربردهای مسکونی کوچک و متوسط هستند، اما حذف تدریجی مبردهای هیدروفلوئوروکربن در سال‌های آینده، تحقیقات را به سمت مبردهای طبیعی مانند پروپان و دی‌اکسید کربن سوق می‌دهد.

استفاده از یک منبع حرارتی دیگر به همراه انرژی خورشیدی برای تضمین عملکرد مداوم سیستم ضروری است و امکان تأمین نیازهای سرمایشی در اقلیم‌های معتدل و گرم را فراهم می‌کند. مبدل‌های حرارتی مبتنی بر هوا به‌راحتی می‌توانند با سیستم‌های پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط مستقیم ادغام شوند، زیرا انعطاف‌پذیری و هزینه کم آن‌ها این فناوری را برای اقلیم‌های گرم و معتدل و همچنین برای پروژه‌های نوسازی ایده‌آل می‌سازد. جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی و پمپ‌های حرارتی مبتنی بر زمین‌گرمایی یک راه‌حل مناسب برای کشورهای سردتر هستند، جایی که سیستم‌های پمپ حرارتی زمینی نسبت به فناوری‌های مبتنی بر هوا ازلحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر هستند.

آخرین جزء کلیدی در سیستم‌های پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط مستقیم، ذخیره‌سازی انرژی است که برای عملکرد صحیح سیستم و کاهش عدم تطابق بین پروفایل تولید انرژی خورشیدی و پروفایل بار ساختمان حیاتی است. در این راستا، ذخیره‌سازی‌های انرژی حرارتی آب به‌طور گسترده در سیستم‌های پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با انبساط مستقیم استفاده می‌شوند که اهمیت آن‌ها را هم در سمت منبع و هم در سمت مصرف‌کننده تأیید می‌کند. هنگامی‌که ذخیره‌سازی‌های حرارتی آب بین جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی و پمپ حرارتی قرار می‌گیرند، می‌توانند پایداری تأمین گرمای خورشیدی، تولید انرژی خورشیدی و عملکردهای پمپ حرارتی را افزایش دهند. از طرف دیگر، ذخیره‌سازی‌های حرارتی آب در سمت مصرف‌کننده به افزایش خودمصرف انرژی خورشیدی کمک کرده و تعداد چرخه‌های شروع و توقف پمپ حرارتی را محدود می‌کند. ذخیره‌سازی‌های الکتروشیمیایی به‌طور گسترده‌ای در سمت جریان مستقیم سیستم‌های جمع‌کننده‌های خورشیدی برای افزایش خودمصرف برق استفاده می‌شوند،

در نتیجه، در خصوص قوانین طراحی خاص سیستم پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی، تحلیل انجام شده نشان می‌دهد که تعریف معیارهای اندازه‌گیری مرجع دشوار است، زیرا شرایط اقلیمی و بارهای ساختمانی تأثیر زیادی بر نسبت توان پمپ حرارتی، مساحت جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی و اندازه ذخیره‌سازی‌ها دارند. به‌طورکلی، این امر پذیرفته شده است که مساحت جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی باید به‌گونه‌ای تعریف شود که بار حرارتی ساختمان را در ماه‌هایی که بیشترین تابش خورشیدی وجود دارد، پوشش دهد تا از تولید آب گرم اضافی جلوگیری شود. اندازه پمپ حرارتی باید به‌طور جداگانه بر اساس بار حرارتی پیک ساختمان تعریف شود، بدون

در نظر گرفتن سهم جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی تا از عملکرد صحیح سیستم حتی در شرایط کمبود تابش خورشیدی اطمینان حاصل شود. فناوری و اندازه بهینه ذخیره‌سازی انرژی باید مطابق با اهداف طراحی انتخاب شود. پیشنهاد می‌شود. برای به حداکثر رساندن بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، بهتر است که ذخیره‌سازی‌های حرارتی در مدار خورشیدی برای نیازهای مستقیم مصرف‌کننده (ذخیره‌سازی آب گرم مصرفی) یا برای استفاده پمپ حرارتی (منبع حرارتی) استفاده شوند.

۹- نتیجه‌گیری‌ها و چشم‌اندازهای آینده

سیستم‌های پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی یک راه‌حل بسیار جالب برای طراحی ساختمان‌های انرژی نزدیک به صفر محسوب می‌شوند، زیرا قادرند تمام نیازهای حرارتی ساختمان را با سهم بالایی از انرژی‌های تجدیدپذیر پوشش دهند. ادغام جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی و پمپ‌های حرارتی عملکرد را بهبود می‌بخشد، بهره‌برداری از انرژی خورشیدی و همچنین بهره‌وری پمپ‌های حرارتی را افزایش می‌دهد.

در میان چندین پیکربندی موجود سیستم‌های پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی، سیستم‌های غیرمستقیم دو منبع به‌عنوان امیدوارکننده‌ترین راه‌حل برای پوشش نیازهای حرارتی کامل ساختمان (یعنی گرمایش، سرمایش و آب گرم مصرفی) شناخته می‌شوند. این سیستم‌ها تکامل‌یافته سیستم‌های تک‌منبع و انبساط مستقیم هستند، بدون معایب اصلی که کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. علاوه بر این، استفاده از جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی ازنظر انرژی و هزینه یک راه‌حل بسیار جالب به نظر می‌رسد. همچنین، ذخیره‌سازی‌های حرارتی آب برای گرمایش مستقیم جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی و مقاصد گرمایشی و سرمایشی ساختمان و سیستم‌های کنترل پیشرفته هماهنگ با بار، امکان دستیابی به سطوح بالای عملکرد و قابلیت اطمینان را فراهم می‌آورد. این موضوع با پیچیدگی سیستم هم‌راستا است که درنهایت بر هزینه کلی تأثیر می‌گذارد. بااین‌حال، تعداد کمی از نویسندگان تحلیل هزینه کامل ارائه داده‌اند که مقایسه راه‌حل‌های مختلف از منظر اقتصادی را دشوار می‌سازد. انجام تحلیل‌های اقتصادی دقیق برای ارزیابی مناسب بهره‌وری هزینه سیستم‌های پمپ حرارتی با جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی نسبت به راه‌حل‌های متعارف سیستم‌های تهویه مطبوع ضروری است، حتی اگر عملکرد کلی آن‌ها امیدوارکننده باشد و تحقیقات علمی همچنان درزمینه یکپارچه‌سازی زیرسیستم‌ها، تکنیک‌های ساخت و منطق کنترل پیشرفت کند.

علاوه بر این، نیاز به تلاش‌های بیشتری برای افزایش سطح آمادگی فناوری پمپ‌های حرارتی دو منبع و جمع‌آورنده‌های جمع‌کننده‌های خورشیدی ترکیبی با لایه‌بندی بین اجزا مستقیم وجود دارد تا عملکرد آن‌ها بهینه‌شده و هزینه‌ها کاهش یابد. بعلاوه، نیاز به آزمایش‌های تجربی بیشتری برای نشان دادن عملکرد واقعی سیستم کامل در ساختمان‌های مطالعه شده واقعی وجود دارد. همچنین مقایسه معیارهای مختلف اندازه‌گیری سیستم بر اساس شرایط آب‌وهوایی و بارهای ساختمان ضروری است. در همین حال، تلاش اضافی در توسعه ابزارهای خاص که قادر به مدل‌سازی مناسب هر جزء سیستم و خود سیستم به‌عنوان یک کل باشند، نیز موردنیاز است.

۱۰- منابع

[1] IEA, *Transitions to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050*, 2013.

[2] *Buildings*, 2017. [Online]. Available: Accessed on Aug. 19, 2020.

[3] European Parliament and the Council, "Directive 2012/27/EU on the energy efficiency," *Journal of the European Union*, 2012.

[4] European Parliament and the Council, "Directive 2002/91/EC on the energy performance of buildings," *Journal of the European Union*, 2002.

[5] I. Shemshadi, "Modeling and Optimization of Microgrid Networks Using Renewable Energy Sources," *Front. Health Inform.*, vol. 13, no. 8, pp. 2927–2937, 2024. [Online]. Available: doi: 10.52783/fhi.vi.1994

[6] W. Weiss, *Solar Heat Worldwide: Global Market Development and Trends in 2019*, 2019.

[7] IEA-PVPS, *Snapshot of Global PV Markets 2021*, 2021.

[8] J.-C. Hadorn, *Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings*, Wilhelm Ernst & Sohn, 2015.

[9] D. Fischer and H. Madani, "On heat pumps in smart grids: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, pp. 342–357, 2017. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.rser.2016.11.182

[10] EHPA, *European Heat Pump Market and Statistics Report 2019*, 2019.

[11] *Tracking Buildings 2020*. [Online]. Available: Accessed on Apr. 28, 2021.

[12] I. Beausoleil-Morrison, B. Kemery, A. D. Wills, and C. Meister, "Design and simulated performance of a solar-thermal system employing seasonal storage for providing the majority of space heating and domestic hot water heating needs to a single-family house in a cold climate," *Sol. Energy*, vol. 191, pp. 57–69, 2019. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.solener.2019.08.034

[13] IEA, *Renewables 2020: Analysis and Forecast to 2025*, 2020.

[14] A. Akgül and S. U. Seçkiner, "Optimization of biomass to bioenergy supply chain with tri-generation and district heating and cooling network systems," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 137, p. 106017, 2019. [Online]. Available: doi:. 10.1016/j.cie.2019.106017

[15] P. Caputo, G. Ferla, and S. Ferrari, "Evaluation of environmental and energy effects of biomass district heating by a wide survey based on operational conditions in Italy," *Energy*, vol. 174, pp. 1210–1218, 2019. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.energy.2019.03.073

[16] International Energy Agency, *The Future of Cooling: Opportunities for Energy-Efficient Air Conditioning*, 2018.

[17] W. Stanek, T. Simla, and W. Gazda, "Exergetic and thermo-ecological assessment of heat pump supported by electricity from renewable sources," *Renew. Energy*, vol. 131, pp. 404–412, 2019. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.renene.2018.07.084

[18] M. S. Buker and S. B. Riffat, "Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 399–413, 2016. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.rser.2015.10.157

[19] G. Besagni, L. Croci, R. Nesa, and L. Molinaroli, "Field study of a novel solar-assisted dual-source multifunctional heat pump," *Renew. Energy*, vol. 132, pp. 1185–1215, 2019. [Online]. Available: doi. 10.1016/j.renene.2018.08.076

[20] R. S. Kamel and A. S. Fung, "Modeling, simulation and feasibility analysis of residential BIPV/T + ASHP system in cold climate – Canada," *Energy Build.*, vol. 82, pp. 758–770, 2014. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.081

[21] N. Sommerfeldt and H. Madani, "In-depth techno-economic analysis of PV/thermal plus ground source heat pump systems for multi-family houses in a heating dominated climate," *Sol. Energy*, vol. 190, pp. 44–62, 2019. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.solener.2019.07.080

[22] G. Hailu, P. Dash, and A. S. Fung, "Performance evaluation of an air source heat pump coupled with a building-integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system under cold climatic conditions," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1913–1918, 2015. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.370

[23] N. Aste, C. D. Pero, F. Leonforte, and R. S. Adhikari, "Energy and economic assessment of a hybrid solar assisted heat pump system," in *Proc. Int. Conf. Clean Electr. Power (ICCEP)*, 2015, pp. 110–114. [Online]. Available: doi: 10.1109/ICCEP.2015.7177609

[24] A. Ramos, M. A. Chatzopoulou, I. Guarracino, J. Freeman, and C. N. Markides, "Hybrid photovoltaic-thermal solar systems for combined heating, cooling and power provision in the urban environment," *Energy Convers. Manage.*, vol. 150, pp. 838–850, 2017. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.enconman.2017.03.024

[25] X. Zhai, M. Qu, Y. Li, and R. Wang, "A review for research and new design options of solar absorption cooling systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4416–4423, 2011. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.rser.2011.06.016

[26] M. Aprile, T. Toppi, M. Guerra, and M. Motta, "Experimental and numerical analysis of an air-cooled double-lift NH_3-H_2O absorption refrigeration system," *Int. J. Refrig.*, vol. 50, pp. 57–68, 2015. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.10.018

[27] M. Alobaid, B. Hughes, J. K. Calautit, D. O'Connor, and A. Heyes, "A review of solar driven absorption cooling with photovoltaic thermal systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 728–742, 2017. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.rser.2017.03.081

[28] R. Scoccia, T. Toppi, M. Aprile, and M. Motta, "Absorption and compression heat pump systems for space heating and DHW in European buildings: Energy, environmental and economic analysis," *J. Build. Eng.*, vol. 16, pp. 94–105, 2018. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.jobe.2017.12.006

[29] F. Reda et al., "Comparison of solar assisted heat pump solutions for office building applications in northern climate," *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 1392–1417, 2020. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.renene.2019.09.044

[30] F. Calise, M. D. d'Accadia, R. D. Figaj, and L. Vanoli, "A novel solar-assisted heat pump driven by photovoltaic/thermal collectors: Dynamic simulation and thermoeconomic optimization," *Energy*, vol. 95, pp. 346–366, 2016. [Online]. Available: doi:10.1016/j.energy.2015.11.071

[31] M. Noro and R. Lazzarin, "Solar cooling between thermal and photovoltaic: An energy and economic comparative study in the Mediterranean conditions," *Energy*, vol. 73, pp. 453–464, 2014. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.energy.2014.06.035

[32] N. Aste, R. Adhikari, C. D. Pero, and F. Leonforte, "Multi-functional integrated system for energy retrofit of existing buildings: A solution towards NZEB standards," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 2811–2817, 2017. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.608

[33] N. Aste, P. Scudo, R. Fedrizzi, C. Del Pero, and F. Leonforte, "Energy retrofit of residential buildings: A multifunctional toolkit," in *Proc. Int. Conf. Clean Electr. Power (ICCEP)*, 2017, pp. 62–67.

[34] F. Aguilar, D. Crespí-Llorens, and P. Quiles, "Environmental benefits and economic feasibility of a photovoltaic assisted heat pump water heater," *Sol. Energy*, vol. 193, pp. 20–30, 2019. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.solener.2019.09.032

[35] E. Zanetti, M. Aprile, D. Kum, R. Scoccia, and M. Motta, "Energy saving potentials of a photovoltaic assisted heat pump for hybrid building heating system via optimal control," *J. Build. Eng.*, vol. 27, p. 100854, 2020. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.jobe.2019.100854

[36] S. Poppi, N. Sommerfeldt, C. Bales, H. Madani, and P. Lundqvist, "Techno-economic review of solar heat pump systems for residential heating applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 22–32, 2018.

[37] G. Nouri, Y. Noorollahi, and H. Yousefi, "Solar assisted ground source heat pump systems: A review," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 163, 2019.

[38] X. Wang et al., "A systematic review of recent air source heat pump (ASHP) systems assisted by solar thermal, photovoltaic and photovoltaic/thermal sources," *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 2472–2487, 2020.

[39] R. Kamel, A. Fung, and P. R. H. Dash, "Solar systems and their integration with heat pumps: A review," *Energy Build.*, vol. 87, pp. 395–412, 2015.

[40] Z. Wang et al., "Comprehensive review on the development of SAHP for domestic hot water," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 871–881, 2017.

[41] M. Mohanraj, Y. Belyayev, S. Jayaraj, and A. Kaltayev, "Research and developments on solar assisted compression heat pump systems - a comprehensive review (part a: modeling and modifications)," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 83, pp. 90–123, 2018. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.rser.2017.08.022

[42] E. Bellos and C. Tzivanidis, "Energetic and financial sustainability of solar assisted heat pump heating systems in Europe," *Sustainable Cities Soc.*, vol. 33, pp. 70–84, 2017.

[43] M. Y. Haller, E. Bertram, R. Dott, T. Afjei, F. Ochs, and J.-C. Hadorn, "Review of component models for the simulation of combined solar and heat pump heating systems," *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 611–622, 2012. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.egypro.2012.11.071

pump using different refrigerants," *Energy Convers. Manage.*, vol. 46, no. 15–16, pp. 2614–2624, 2005.

[54] T. Freeman, J. Mitchell, and T. Audit, "Performance of combined solar-heat pump systems," *Sol. Energy*, vol. 22, no. 2, pp. 125–135, 1979. [Online]. Available: doi: 10.1016/0038-092X(79)90096-3

[55] K. Kaygusuz and T. Ayhan, "Experimental and theoretical investigation of combined solar heat pump system for residential heating," *Energy Convers. Manage.*, vol. 40, no. 13, pp. 1377–1396, 1999. [Online]. Available: doi: 10.1016/S0196-8904(99)00026-6

[56] R. Dott, A. Genkinger, and T. Afjei, "System evaluation of combined solar & heat pump systems," *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 562–570, 2012. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.egypro.2012.11.066

[57] M. Bakker, H. Zondag, M. Elswijk, K. Strootman, and M. Jong, "Performance and costs of a roof-sized PV/thermal array combined with a ground coupled heat pump," *Sol. Energy*, vol. 78, no. 2, pp. 331–339, 2005.

[58] M. Noro and R. M. Lazzarin, "Hybrid photovoltaic-thermal heat pump systems: energy and economic performance evaluations in different climates," *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 76–83, 2018. [Online]. Available: doi: 10.1093/ijlct/ctx022

[59] N. Aste, F. Leonforte, and C. D. Pero, "Design, modeling and performance monitoring of a photovoltaic-thermal (PVT) water collector," *Sol. Energy*, vol. 112, pp. 85–99, 2015.

[60] A. Miglioli, "Energy assessment and monitoring of a novel photovoltaic-thermal collector designed for solar-assisted heat pump systems," *IET Renew. Power Gener.*, 2020.

[61] H.-L. Tsai, "Modeling and validation of refrigerant-based PVT-assisted heat pump water heating (PVTA-HPWH) system," *Sol. Energy*, vol. 122, pp. 36–47, 2015.

[62] T. Chow, K. Fong, G. Pei, J. Ji, and M. He, "Potential use of photovoltaic-integrated solar heat pump system in Hong Kong," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 8, pp. 1066–1072, 2010. [Online].

[44] P. J. Axaopoulos and E. D. Fylladitakis, "Performance and economic evaluation of a hybrid photovoltaic/thermal solar system for residential applications," *Energy Build.*, vol. 65, pp. 488–496, 2013. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.enbuild.2013.06.027

[45] P. Sporn and E. Ambrose, "The heat pump and solar energy," in *Proc. World Symp. Applied Solar Energy*, Phoenix, US, 1955.

[46] A. Moreno-Rodriguez, N. Garcia-Hernando, A. Gonzalez-Gil, and M. Izquierdo, "Experimental validation of a theoretical model for a direct-expansion solar-assisted heat pump applied to heating," *Energy*, vol. 60, pp. 242–253, 2013.

[47] I. Sakai, M. Takagi, K. Terakawa, and J. Ohue, "Solar space heating and cooling with bi-heat source heat pump and hot water supply system," *Sol. Energy*, vol. 18, no. 6, pp. 525–532, 1976. [Online]. Available: doi: 10.1016/0038-092X(76)90071-2

[48] M. Chandrashekar, N. Le, H. Sullivan, and K. Hollands, "A comparative study of solar assisted heat pump systems for Canadian locations," *Sol. Energy*, vol. 28, no. 3, pp. 217–226, 1982. [Online]. Available: doi: 10.1016/0038-092X(82)90160-8

[49] M. Haller et al., "Solar and heat pump systems - summary of simulation results of the IEA SHC Task 44/HPP Annex 38," in *11th Int. Energy Agency Heat Pump Conf.*, 2014.

[50] J. MacArthur, W. Palm, and R. Lessmann, "Performance analysis and cost optimization of a solar-assisted heat pump system," *Sol. Energy*, vol. 21, no. 1, pp. 1–9, 1978.

[51] S. Chaturvedi, D. Chen, and A. Kheireddine, "Thermal performance of a variable capacity direct expansion solar-assisted heat pump," *Energy Convers. Manage.*, vol. 39, no. 3–4, pp. 181–191, 1998.

[52] W. Aziz, S. Chaturvedi, and A. Kheireddine, "Thermodynamic analysis of two-component, two-phase flow in solar collectors with application to a direct-expansion solar-assisted heat pump," *Energy*, vol. 24, no. 3, pp. 247–259, 1999.

[53] F. G. Chata, S. Chaturvedi, and A. Almogbel, "Analysis of a direct expansion solar assisted heat

Available: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.01.013

[63] J. Ji, K. Liu, T. T. Chow, G. Pei, W. He, and H. He, "Performance analysis of a photovoltaic heat pump," *Appl. Energy*, vol. 85, no. 8, pp. 680–693, 2008. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.apenergy.2008.01.003

[64] W. Deng and J. Yu, "Simulation analysis on dynamic performance of a combined solar/air dual source heat pump water heater," *Energy Convers. Manage.*, vol. 120, pp. 378–387, 2016. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.enconman.2016.04.102

[65] J. Yao, H. Xu, Y. Dai, and M. Huang, "Performance analysis of solar assisted heat pump coupled with build-in PCM heat storage based on PV/T panel," *Sol. Energy*, vol. 197, pp. 279–291, 2020. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.solener.2020.01.002

[66] C. Rossi, M. De Rosa, V. Bianco, F. Scarpa, and L. Tagliafico, "Comparison between different photovoltaic solar-assisted heat pumps (PVT-SAHP) configurations with retrofitted photovoltaic panels," *Energy Procedia*, vol. 10, pp. 329–340, 2014.

[67] G. Emmi, A. Zarrella, and M. De Carli, "A heat pump coupled with photovoltaic thermal hybrid solar collectors: a case study of a multi-source energy system," *Energy*, vol. 151, pp. 386–399, 2017.

[68] L. Croci, L. Molinaroli, and P. Quaglia, "Dual source solar assisted heat pump model development, validation and comparison to conventional systems," *Energy Procedia*, vol. 140, pp. 408–422, 2017. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.153

[69] R. Simonetti, L. Moretti, L. Molinaroli, and G. Manzolini, "Energetic and economic optimization of the yearly performance of three different solar assisted heat pump systems using a mixed integer linear programming algorithm," *Energy Convers. Manage.*, vol. 206, p. 112446, 2020. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.enconman.2019.112446

[70] J. Cai, J. Ji, Y. Wang, F. Zhou, and B. Yu, "A novel PV/T-air dual source heat pump water heater system: dynamic simulation and performance characterization," *Energy Convers. Manage.*, vol. 148, pp. 635–645, 2017.

[71] X. Zhang, X. Zhao, J. Shen, X. Hu, X. Liu, and J. Xu, "Design, fabrication and experimental study of a solar photovoltaic/loop-heat-pipe based heat pump system," *Sol. Energy*, vol. 97, pp. 551–568, 2013.

[72] K. Chua, S. Chou, and W. Yang, "Advances in heat pump systems: a review," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 12, pp. 3611–3624, 2010.

[73] Z. M. Amin and M. Hawlader, "A review on solar assisted heat pump systems in Singapore," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 26, pp. 286–293, 2013.

[74] P. Omojaro and C. Breitkopf, "Direct expansion solar assisted heat pumps: a review of applications and recent research," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 33–45, 2013.

[75] T. Yang and A. K. Athienitis, "A review of research and developments of building-integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 66, pp. 886–912, 2016. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.rser.2016.07.011

[76] N. Sommerfeldt and H. Madani, "Review of solar PV/thermal plus ground source heat pump systems for European multi-family houses," in *Proc. EuroSun 2016*, 2016, pp. 1–12. [Online]. Available: doi: 10.18086/eurosun.2016.08.15

[77] M. Mohanraj, Y. Belyayev, S. Jayaraj, and A. Kaltayev, "Research and developments on solar assisted compression heat pump systems - a comprehensive review (part-b: applications)," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 83, pp. 124–155, 2018. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.rser.2017.08.086

[78] G.-H. Shi, L. Aye, D. Li, and X.-J. Du, "Recent advances in direct expansion solar assisted heat pump systems: a review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 109, pp. 349–366, 2019. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.rser.2019.04.044

[79] R. Lazzarin, "Heat pumps and solar energy: a review with some insights in the future," *Int. J.*

assisted heat pump/loop heat-pipe (PV-SAHP/LHP) system," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 52, no. 1, p. 012017, 2017.

[89] J. Zhou et al., "Experimental investigation of a solar driven direct-expansion heat pump system employing the novel PV/micro-channels-evaporator modules," *Appl. Energy*, vol. 178, pp. 484–495, 2016.

[90] J. Zhou et al., "Numerical simulation and experimental validation of a micro-channel PV/T modules based direct-expansion solar heat pump system," *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 1992–2004, 2020. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.renene.2019.07.049

[91] J. Zhou et al., "Theoretical and experimental study of a novel solar indirect-expansion heat pump system employing mini channel PV/T and thermal panels," *Renew. Energy*, vol. 151, pp. 674–686, 2020. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.renene.2019.11.054

[92] R. Liang et al., "Experiment research of solar PV/T cogeneration system on the building façade driven by a refrigerant pump," *Energy*, vol. 161, pp. 744–752, 2018. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.energy.2018.07.189

[93] S. Li, H. He, K. Dong, and L. Sheng, "Research on real-time integrated control method of PV-SHAHPWH," *Sol. Energy*, vol. 182, pp. 213–224, 2019. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.solener.2019.02.049

[94] A. James, M. Srinivas, M. Mohanraj, A. K. Raj, and S. Jayaraj, "Experimental studies on photovoltaic-thermal heat pump water heaters using variable frequency drive compressors," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 45, p. 101152, 2021. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.seta.2021.101152

[95] H. Chen and P. Wei, "Numerical study on a novel photovoltaic/thermal heat pump system," *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 547–553, 2011. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.egypro.2011.10.074

[96] A. A. Ammar et al., "Performance study on photovoltaic/thermal solar-assisted heat pump *Refrig.*, vol. 116, pp. 146–160, 2020. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.03.031

[80] N. Aste, C. Del Pero, and F. Leonforte, "Water flat plate PV-thermal collectors: a review," *Sol. Energy*, vol. 102, pp. 98–115, 2014. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.solener.2014.01.025

[81] Y. Kuang and R. Wang, "Performance of a multi-functional direct-expansion solar assisted heat pump system," *Sol. Energy*, vol. 80, no. 7, pp. 795–803, 2006. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.solener.2005.06.003

[82] J. Fernández-Seara, C. Piñeiro, J. A. Dopazo, F. Fernandes, and P. X. Sousa, "Experimental analysis of a direct expansion solar assisted heat pump with integral storage tank for domestic water heating under zero solar radiation conditions," *Energy Convers. Manage.*, vol. 59, pp. 1–8, 2012. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.enconman.2012.01.018

[83] O. Kara, K. Ulgen, and A. Hepbasli, "Exergetic assessment of direct-expansion solar-assisted heat pump systems: review and modeling," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 5, pp. 1383–1401, 2008. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.rser.2006.12.001

[84] S. Ito, N. Miura, and Y. Takano, "Studies of heat pumps using direct expansion type solar collectors," *J. Sol. Energy Eng. ASME*, vol. 127, no. 1, pp. 60–64, 2005.

[85] S. Ito, N. Miura, J. Q. Wang, and M. Nishikawa, "Heat pump using a solar collector with photovoltaic modules on the surface," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 119, no. 2, pp. 147–151, 1997. [Online]. Available: doi: 10.1115/1.2887894

[86] L. Keliang et al., "Performance study of a photovoltaic solar assisted heat pump with variable-frequency compressor – a case study in Tibet," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2680–2687, 2009.

[87] T. T. Chow et al., "Modeling and application of direct-expansion solar-assisted heat pump for water heating in subtropical Hong Kong," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 643–649, 2010.

[88] T. Zhang, G. Pei, Q. Zhu, and J. Ji, "Experimental study of a novel photovoltaic solar-

[97] C. Zhou et al., "Experimental investigation on the tri-generation performance of roll-bond photovoltaic thermal heat pump system during summer," *Energy Convers. Manage.*, vol. 184, pp. 91–106, 2019. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.028

[98] R. Liang et al., "Characteristics analysis of the photovoltaic thermal heat pump system on refrigeration mode: an experimental investigation," *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 2450–2461, 2020. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.renene.2019.08.045

[99] S. Lu, J. Zhang, R. Liang, and C. Zhou, "Refrigeration characteristics of a hybrid heat dissipation photovoltaic-thermal heat pump under various ambient conditions on summer night," *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 2524–2534, 2020. [Online]. Available: doi: 10.1016/j.renene.2019.06.179

[100] J. Ji et al., "Experimental study of photovoltaic solar assisted heat pump system," *Sol. Energy*, vol. 82, no. 1, pp. 43–52, 2008.

[101] G. Fang, H. Hu, and X. Liu, “Experimental investigation on the photovoltaic-thermal solar heat pump air-conditioning system on water-heating mode,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 34, no. 6, pp. 736–743, 2010.

[102] H. Hu, R. Wang, and G. Fang, “Dynamic characteristics modeling of a hybrid photovoltaic-thermal heat pump system,” *Int. J. Green Energy*, vol. 7, no. 5, pp. 537–551, 2010, doi: 10.1080/15435075.2010.515446.

[103] H. Fu, G. Pei, J. Ji, H. Long, T. Zhang, and T. Chow, “Experimental study of a photovoltaic solar-assisted heat-pump/heat-pipe system,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 40, pp. 343–350, 2012.

[104] H. Li and Y. Sun, “Operational performance study on a photovoltaic loop heat pipe/solar assisted heat pump water heating system,” *Energy Build.*, vol. 158, pp. 861–872, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.075.

[105] H. Li and Y. Sun, “Performance optimization and benefit analyses of a photovoltaic loop heat pipe/solar assisted heat pump water heating system,” *Renew. Energy*, vol. 134, pp. 1240–1247, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.09.055.

[106] G. Xu, S. Deng, X. Zhang, L. Yang, and Y. Zhang, “Simulation of a photovoltaic/thermal heat pump system having a modified collector/evaporator,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 11, pp. 1967–1976, 2009.

[107] H.-L. Tsai, “Design and evaluation of a photovoltaic/thermal-assisted heat pump water heating system,” *Energies*, vol. 7, no. 5, pp. 3319–3338, 2014.

[108] S. Lu, R. Liang, J. Zhang, and C. Zhou, “Performance improvement of solar photovoltaic/thermal heat pump system in winter by employing vapor injection cycle,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 155, pp. 135–146, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.038.

[109] J. Yao, S. Zheng, D. Chen, Y. Dai, and M. Huang, “Performance improvement of vapor-injection heat pump system by employing PVT collector/evaporator for residential heating in cold climate region,” *Energy*, vol. 219, p. 119636, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119636.

[110] S. Sterling and M. Collins, “Feasibility analysis of an indirect heat pump assisted solar domestic hot water system,” *Appl. Energy*, vol. 93, pp. 11–17, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.05.050.

[111] X. Zhang, X. Zhao, J. Xu, and X. Yu, “Characterization of a solar photovoltaic/loop-heat-pipe heat pump water heating system,” *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 1229–1245, 2013.

[112] X. Zhang, J. Shen, P. Xu, X. Zhao, and Y. Xu, “Socio-economic performance of a novel solar photovoltaic/loop-heat-pipe heat pump water heating system in three different climatic regions,” *Appl. Energy*, vol. 135, pp. 20–34, 2014.

[113] M. Dannemand, B. Perers, and S. Furbo, “Performance of a demonstration solar PVT assisted heat pump system with cold buffer storage and domestic hot water storage tanks,” *Energy system*," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 136, pp. 79–87, 2018.

tropical climate area," *J. Energy Storage*, vol. 30, p. 101507, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101507.

[122] M. A. Obalanlege et al., "Performance assessment of a hybrid photovoltaic-thermal and heat pump system for solar heating and electricity," *Renew. Energy*, vol. 148, pp. 558–572, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.061.

[123] M. Qu et al., "Experimental study on the operating characteristics of a novel photovoltaic/thermal integrated dual-source heat pump water heating system," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 94, pp. 819–826, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.126.

[124] G. Wang et al., "Experimental study on a novel PV/T air dual-heat-source composite heat pump hot water system," *Energy Build.*, vol. 108, pp. 175–184, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.08.016.

[125] J. Long et al., "Heat transfer performance of an integrated solar-air source heat pump evaporator," *Energy Convers. Manage.*, vol. 184, pp. 626–635, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.01.094.

[126] R. Simonetti, L. Molinaroli, and G. Manzolini, "Experimental and analytical study of an innovative integrated dual-source evaporator for solar-assisted heat pumps," *Sol. Energy*, vol. 194, pp. 939–951, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.10.070.

[127] R. Lazzarin and M. Noro, "Photovoltaic/thermal (PV/T)/ground dual source heat pump: Optimum energy and economic sizing based on performance analysis," *Energy Build.*, vol. 211, p. 109800, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109800.

[128] E. Bertram, J. Glembin, and G. Rockendorf, "Unglazed PVT collectors as additional heat source in heat pump systems with borehole heat exchanger," *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 414–423, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.11.049.

[129] K. E. Varney and M. M. Vahdati, "Simulations of a photovoltaic-thermal ground source heat pump system," *Proc. ICE Eng. Sustain.*, vol. 168, no. 1, pp. 28–37, 2015, doi: 10.1680/ensu.14.00013.

Build., vol. 188–189, pp. 46–57, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.12.042.

[114] M. Dannemand, I. Sifnaios, Z. Tian, and S. Furbo, “Simulation and optimization of a hybrid unglazed solar photovoltaic-thermal collector and heat pump system with two storage tanks,” *Energy Convers. Manage.*, vol. 206, p. 112429, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112429.

[115] H. Chen et al., “Performance study of heat-pipe solar photovoltaic/thermal heat pump system,” *Appl. Energy*, vol. 190, pp. 960–980, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.145.

[116] Y. Bai, T. Chow, C. Ménézo, and P. Dupeyrat, “Analysis of a hybrid PV/thermal solar-assisted heat pump system for sports center water heating application,” *2012*.

[117] A. D. Amo, A. Martínez-Gracia, A. A. Bayod-Rújula, and M. Cañada, “Performance analysis and experimental validation of a solar-assisted heat pump fed by photovoltaic-thermal collectors,” *Energy*, vol. 169, pp. 1214–1223, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.117.

[118] R. Braun et al., “System design and feasibility of trigeneration systems with hybrid photovoltaic-thermal (PVT) collectors for zero energy office buildings in different climates,” *Sol. Energy*, vol. 196, pp. 39–48, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2019.12.005.

[119] A. Del Amo, A. Martínez-Gracia, T. Pintanel, A. Bayod-Rújula, and S. Torné, “Analysis and optimization of a heat pump system coupled to an installation of PVT panels and a seasonal storage tank on an educational building,” *Energy Build.*, vol. 226, p. 110373, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110373.

[120] Y. Cui, J. Zhu, S. Zoras, Y. Qiao, and X. Zhang, “Energy performance and life cycle cost assessments of a photovoltaic/thermal assisted heat pump system,” *Energy*, vol. 206, p. 118108, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118108.

[121] R. Kong, T. Deethayat, A. Asanakham, and T. Kiatsiriroat, "Performance and economic evaluation of a photovoltaic/thermal (PV/T)-cascade heat pump for combined cooling, heat and power in

156, pp. 384–390, 2020, doi: 10.1016/j.cherd.2020.02.010.

[139] Y. Wang et al., "Modeling and operation optimization of an integrated ground source heat pump and solar PVT system based on heat current method," *Sol. Energy*, vol. 218, pp. 492–502, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.03.003.

[140] L. Xia et al., "A model-based optimal control strategy for ground source heat pump systems with integrated solar photovoltaic thermal collectors," *Appl. Energy*, vol. 228, pp. 1399–1412, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.097.

[141] Y. Zhang, L. Chen, and H. Liu, "Carbon footprint assessment of hybrid heating systems in cold climates," *J. Clean. Prod.*, vol. 401, p. 136752, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.136752.

[142] K. Klein, R. J. Braun, and J. W. Mitchell, "Comprehensive lifecycle cost analysis of residential heat pump systems," *Appl. Energy*, vol. 285, p. 116342, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116342.

[143] R. Huang, W. Liu, and X. Chen, "Geographic performance variability in solar thermal systems: A global meta-analysis," *Sol. Energy*, vol. 231, pp. 408–419, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2021.12.011.

[144] S. S. Bertsch, B. Müller, and T. Schmidt, "Performance analysis of hybrid solar heat pumps in different climatic regions," *Renew. Energy*, vol. 165, pp. 237–250, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.11.042.

[145] X. Li, Y. Wang, and Q. Zhang, "Sensitivity and scenario analysis of hybrid energy system economics," *Energy Policy*, vol. 175, p. 113478, 2023, doi: 10.1016/j.enpol.2022.113478.

[146] L. Wang, A. D. Smith, and P. Jones, "Comparative analysis of maintenance costs between conventional and renewable HVAC systems," *HVAC&R Res.*, vol. 27, no. 3, pp. 215–228, 2021, doi: 10.108010789669.2021.1889924.

[130] K. E. Varney and M. M. Vahdati, "Photovoltaic and solar-assisted ground-source heat pump systems," *Proc. ICE Eng. Sustain.*, vol. 166, pp. 32–45, 2013.

[131] F. Reda, "Long term performance of different SAG-SHP solutions for residential energy supply in Finland," *Appl. Energy*, vol. 144, pp. 31–50, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.059.

[132] J. Andrews, "Photovoltaic technology for renewable electricity production: Towards net zero energy buildings," *4th ASME Solar Energy Div. Conf.*, 1981.

[133] S. Bae and Y. Nam, "Comparison between experiment and simulation for the development of a tri-generation system using photovoltaic-thermal and ground source heat pump," *Energy Build.*, vol. 231, p. 110623, 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110623.

[134] S. A. Putrayudha et al., "A study of photovoltaic/thermal (PVT)-ground source heat pump hybrid system by using fuzzy logic control," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 89, pp. 578–586, 2015.

[135] E. I. Sakellariou et al., "PVT based solar assisted ground source heat pump system: Modelling approach and sensitivity analyses," *Sol. Energy*, vol. 193, pp. 37–50, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.09.044.

[136] G. Emmi et al., "A dynamic analysis of a SAG-SHP system coupled to solar thermal collectors and photovoltaic-thermal panels under different climate conditions," *Energy Convers. Manage.*, vol. 213, p. 112851, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112851.

[137] M. Abu-Rumman, M. Hamdan, and O. Ayadi, "Performance enhancement of a photovoltaic thermal (PVT) and ground-source heat pump system," *Geothermics*, vol. 85, p. 101809, 2020, doi: 10.1016/j.geothermics.2020.101809.

[138] W. Shao et al., "Heat current model of solid granule cooling processes in moving packed beds and its applications," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol.