

An Intelligent Two-Layer Controller Based on Hysteresis and PID Logic for Performance Improvement of a Direct-Expansion Solar Heat Pump

Abouzar Taghizadeh^{a*}, Vahid Rezaee^b, Ehsan abdollahzadeh shahrbabaki^c

^aDepartment of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

^{b,c}Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

*A-Taghizadeh@tvu.ac.ir

ABSTRACT

This research presents an innovative framework for designing an intelligent two-layer controller in direct-expansion solar heat pump (DX-SHP) systems. The system comprises a flat-plate solar collector-evaporator with an area of 3.1 m², a variable-frequency hermetic rotary compressor, a hot water storage tank with a volume of 0.1 m³, a finned-tube condenser, and a capillary tube (expansion valve). The first layer, based on hysteresis logic and utilizing digital temperature sensors and an Arduino microcontroller, is responsible for basic control and energy management under normal operating conditions. This layer has been designed and evaluated experimentally. The second layer consists of a PID controller whose parameters are tuned based on the system's ARX model and the direct synthesis method. This controller is activated upon the occurrence of severe disturbances, such as sudden changes in solar irradiance or inlet temperature, and restores the system's control accuracy to an optimal level. Quantitative results obtained from experimental implementation under three scenarios—steady-state, step disturbance, and periodic disturbance—indicate that the proposed controller, compared to the standalone hysteresis controller, reduces the RMS temperature error in steady-state conditions from 0.95 to 0.28 °C (a 70.5% reduction) and decreases the number of compressor cycles from 42 to 35 (a 16.6% reduction). Furthermore, energy consumption under the disturbance scenarios is reduced by 24.4% and 19.6%, respectively, in comparison to the hysteresis-only controller.

KEYWORDS

Solar heat pump, PID controller, modeling, hysteresis logic, energy.

*Corresponding Author: A-Taghizadeh@tvu.ac.ir

1. Introduction

Direct-expansion solar heat pumps (DX-SHPs) are considered a promising technology for domestic hot water production due to the elimination of intermediate heat exchangers and the capability to operate at lower temperatures [1]. However, the performance of these systems is severely affected by instantaneous variations in solar irradiance and ambient temperature; this factor has turned the design of a robust, accurate, and yet cost-effective control strategy into a fundamental challenge [2].

Existing control strategies in this field are divided into two general categories [3]: the first category comprises simple and low-cost methods such as on/off control with hysteresis logic, and the second category includes accurate and complex methods like model-based PID controllers or advanced controls based on artificial intelligence. Despite its reliability and low cost, hysteresis control is associated with temperature fluctuations around the setpoint and non-optimal energy consumption [4]. In contrast, adaptive and model-based PID controllers offer high accuracy and stability [5]; however, computational complexity, the need for an accurate model, and higher hardware costs are the main obstacles to their commercial development [6].

A review of the research background reveals that previous efforts have mainly been focused on improving each of these two approaches in isolation. For instance, Rezaei et al. [7] studied the performance of these systems in the moderate and humid climate of Rasht city and confirmed its high potential. Kong et al. [8] built and tested a direct-expansion solar-assisted heat pump system for domestic hot water supply in Qingdao, China. In response to this gap, the present research introduces an innovative two-layer control framework. The main novelty can be defined at three levels: (a) intelligent integration of hysteresis control (first layer: low-cost and reliable) with an ARX-based, model-based PID controller (second layer: accurate and stable); (b) design of an automatic switching mechanism based on two complementary indices, namely the "derivative of error" (for detection of rapid disturbances) and the "integral of error" (for detection of poor performance of the active layer over a long interval); and (c) implementation on low-cost hardware and experimental validation under real operating conditions. The primary objective is to preserve the advantages of both methods (simplicity and economy under steady conditions, and high accuracy when facing disturbances) while simultaneously achieving cost reduction, energy consumption reduction, and enhancement of thermal stability.

In the following, the experimental setup and the ARX model identification method are first presented. Subsequently, the design of the PID controller and the intelligent switching algorithm is described, and finally, the experimental results and validation are provided.

2. Methodology

The direct-expansion solar heat pump (DX-SHP) system under study in this research is designed for domestic hot water production and is illustrated in Fig. 1. The system operates with R134a refrigerant. An auxiliary electric heater with a power of 600 W is installed in the water storage tank to supplement the system's performance under conditions of reduced solar irradiance or when rapid heating is required. Optimal management of this auxiliary heater constitutes the design objective of the proposed temperature control system. The control system designed to manage the auxiliary heater's operation is based on an Arduino Nano microcontroller. The complete schematic of the electronic connections of the control system was drawn in Fritzing software and is presented in Fig. 2.



Figure 1. Constructed direct-expansion solar heat pump system

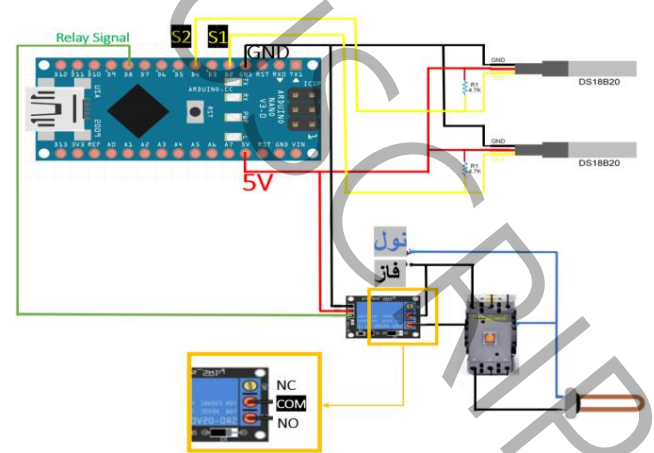


Figure 2. Schematic of the control circuit designed in Fritzing software

3. Results and Discussion

The presented results clearly confirm the superiority of the two-layer hybrid approach in simultaneously achieving optimal energy consumption, thermal stability, and reduced mechanical wear. Fig. 3 depicts the graph of water outlet temperature variations over time. In Fig. 3, the trend of outlet water temperature changes over a period of 2000 seconds is shown. As can be observed, the outlet temperature initially lies within the range of 51 to 53 °C and varies at different time intervals under the influence of environmental conditions and system inputs. The setpoint of 55 °C is indicated by the red dashed line.

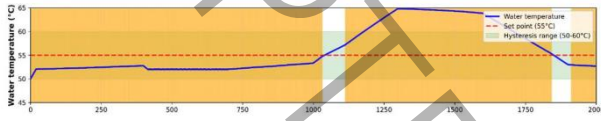


Figure 3. Graph of changes in water outlet temperature over time

At approximately 1000 seconds, a gradual increase in temperature begins, which is caused by an increase in heating power or a change in irradiance conditions. Thereafter, the temperature reaches a maximum of approximately 64–65 °C and then decreases again. This behavior indicates that, without advanced control, the system is sensitive to input variations, and the outlet temperature exhibits significant fluctuation around the setpoint. Fig. 4 demonstrates that, with temperature variations, the PWM duty cycle for the water pump has changed. At times when the temperature increased (e.g., approximately 1000–1500 seconds), the PWM decreased to reduce heat transfer. Conversely, when the temperature dropped, the PWM increased. This behavior indicates that the fine-tuning layer is continuously adjusting the water flow rate to achieve temperature stability.

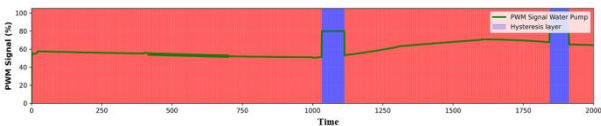


Figure 4. Temperature changes versus PWM signal

Fig. 5 shows the on/off status of the heater. It is observed that the heater is active only at specific intervals, i.e., when the system temperature approaches the lower bound of the hysteresis. This leads to a reduction in energy consumption and an increase in system efficiency.

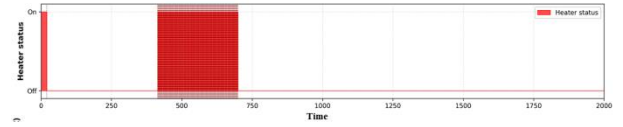


Figure 5. Heater on/off status

Fig. 6 displays the amount of disturbance applied to the system, including reduced irradiance (blue region), increased irradiance (yellow region), and inlet temperature variation (purple region). The fluctuations created in the disturbances were intentional in order to assess the controller's performance under various conditions. The results indicate that the two-layer control successfully maintained the outlet temperature within the permissible range despite these significant changes.

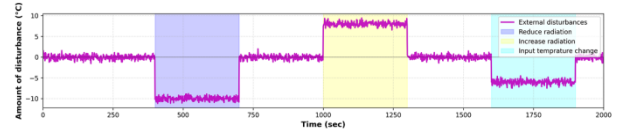


Figure 6. Amount of disturbance applied to the system

Fig. 7 presents the controller test for inlet and outlet water temperature variations. The two signals are the inlet water temperature (blue) and the outlet water temperature (orange); above the graph, the input voltage (0V, 80V, 100V, 120V, 0V, 120V, 0V) is specified, representing the controller or pump/heater input variations. The inlet temperature exhibits severe oscillations with the voltage changes, and its average level shifts. This implies that the system is subjected to sudden disturbances, and voltage changes have a significant effect on the inlet temperature. The outlet temperature remains almost stable and close to 50 °C. This graph demonstrates that the controller effectively compensates for severe inlet temperature disturbances and maintains the output close to the reference value with a small error. The controller's performance is robust and resilient.

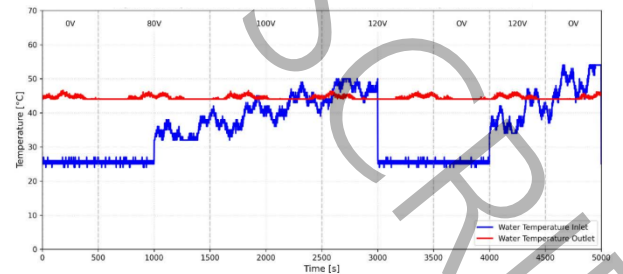


Figure 7. Testing the controller for changes in inlet and outlet water temperatures

In Fig. 8, three quantities—inlet water temperature (green line), outlet water temperature (blue line), and

solar irradiance intensity (red line – right axis)—are measured simultaneously. The solar irradiance exhibits rapid fluctuations with high amplitude, and its wave-like behavior is repeated throughout the test duration. These fluctuations cause the inlet temperature to also oscillate within a specific range (approximately 25–35 °C). Around the midpoint of the simulation time, concurrently with the increase in irradiance, the outlet temperature exhibits an ascending trend and stabilizes within the range of 60–63 °C.

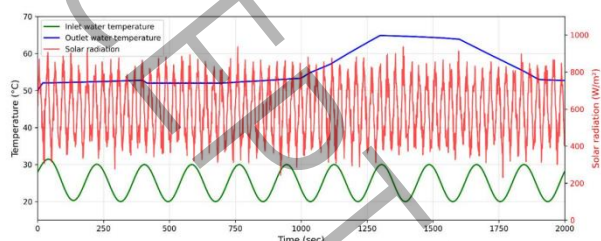


Figure 8. Changes in inlet and outlet water temperatures and solar radiation versus time

4. Conclusions

In this research, an innovative two-layer control framework for direct-expansion solar heat pump (DX-SHP) systems was presented. The core of this architecture is the intelligent integration of a low-cost and reliable hysteresis control layer with an adaptive PID control layer based on an ARX model. A decision-making algorithm based on the derivative of error and the integral of error switches between these two layers automatically and dynamically. Practical implementation on the ESP32 platform and experimental tests clearly demonstrated the superiority of this method. The simulation results show that in the uncontrolled state, the system exhibits high sensitivity to environmental changes, and the temperature deviates from the desired value, whereas the proposed two-layer controller successfully maintains the water temperature within the operational range and reduces deviations. In this structure, the hysteresis layer plays a protective role, and the PWM-based layer provides the precision of temperature regulation. Consequently, heater operation is minimized, which translates to reduced energy consumption and increased overall system efficiency. Furthermore, the controller remains stable against severe

environmental disturbances and delivers desirable thermal behavior. This research proved that, with an intelligent design and a suitable architecture, the gap between simplicity and accuracy can be bridged, offering a cost-effective, stable, and efficient solution for the control of dynamic renewable energy systems..

5. References

- [1] S.I.d.M. Resende, H.A.G. Diniz, R.N.d. Faria, R. Nunes de Oliveira, Design and Experimental Evaluation of a Controller for a Direct-Expansion Solar-Assisted Heat Pump with Propane, *Processes*, 13(11) (2025) 3583.
- [2] V. Rezaee, A. Taghizadeh, Evaluating the Impact of Environmental Indicators on Thermal Comfort for Different Climates in Iran Using the PMV Model, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 57(1) (2025) 3-24.(In Persian)
- [3] D.E. Seborg, T.F. Edgar, D.A. Mellichamp, F.J. Doyle III, *Process dynamics and control*, John Wiley & Sons, 2016.
- [4] S. Anil, H. Srinaath, M. Jayakumar, Comparative Analysis of ON/OFF, PID and Model Predictive Control System in HVAC Systems, in: *2023 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, IEEE, 2023, pp. 1-5.
- [5] K.J. Åström, T. Hägglund, *Advanced PID control*, ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2006.
- [6] G. Ulpiani, M. Borgognoni, A. Romagnoli, C. Di Perna, Comparing the performance of on/off, PID and fuzzy controllers applied to the heating system of an energy-efficient building, *Energy and Buildings*, 116 (2016) 1-17.
- [7] V. Rezaee, A. Taghizadeh, M. Masomnezhad, Comparative feasibility study of two direct expansion solar water heater heat pump systems in Rasht climate, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 57(5) (2025) 589-610. (In Persian)

↑ please level both columns of the last page as far as possible. ↑

کنترل کننده دو لایه هوشمند مبتنی بر منطق هیستریزیس و پی‌آی‌دی برای بهبود عملکرد پمپ حرارتی خورشیدی انبساط مستقیم

ابوذر تقی زاده^{۱*}، وحید رضائی^۲، احسان عبدالله زاده شهر بابکی^۲

۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران، A-Taghizadeh@tvu.ac.ir

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

این پژوهش چارچوبی نوآورانه برای طراحی یک کنترل کننده دولایه هوشمند در سیستم‌های پمپ حرارتی خورشیدی انبساط مستقیم ارائه می‌دهد. این سیستم شامل اواپراتور - کلکتور خورشیدی صفحه تخت با مساحت $3/1$ متر مربع، کمپرسور چرخشی هرمتیک با فوکانس متغیر، مخزن ذخیره آب گرم با حجم $0/1$ متر مکعب، کندانسور لوله‌ای پرده‌دار و یک لوله مویین (شیر انبساط) است. لایه نخست بر پایه منطق هیستریزیس، با بهره‌گیری از سنسورهای دمای دیجیتال و میکروکنترلر آردوینو، وظیفه کنترل پایه و مدیریت انرژی در شرایط عادی را برعهده دارد. این لایه به صورت تجربی طراحی و ارزیابی شده است. لایه دوم شامل یک کنترلر پی‌آی‌دی است که پارامترهای آن بر اساس مدل آرایکس سیستم و روش سنتز مستقیم تنظیم می‌شوند. این کنترلر در هنگام بروز اغتشاش‌های شدید نظیر تغییرات ناگهانی تابش یا دمای ورودی، فعال شده و موجب بازبینی دقت کنترلی سیستم تا سطح بهینه می‌گردد. نتایج کمی حاصل از پیاده‌سازی تجربی در سه سناریوی پایدار، اغتشاش پلکانی و تناوبی نشان می‌دهد که کنترلر پیشنهادی در مقایسه با هیستریزیس منفرد، خطای آر ام اس دما را در شرایط پایدار از $0/95$ به $0/28$ درجه سلسیوس (کاهش $70/5$ درصد)، تعداد سیکل‌های کمپرسور را از 42 به 35 (کاهش $16/6$ درصد) کاهش می‌دهد. همچنین مصرف انرژی در سناریوهای اغتشاشی نسبت به هیستریزیس تنها به ترتیب $24/4\%$ و $19/6\%$ کاهش یافته است.

کلمات کلیدی

پمپ حرارتی خورشیدی، کنترلر پی‌آی‌دی، مدل‌سازی، منطق هیستریزیس، انرژی.

پمپ‌های حرارتی خورشیدی انبساط مستقیم^۱ به دلیل حذف مبدل‌های حرارتی میانی و قابلیت کارکرد در دماهای پایین‌تر، فناوری امیدوارکننده برای تولید آب گرم خانگی محسوب می‌شوند [۱]. با این حال، عملکرد این سیستم‌ها به شدت تحت تأثیر تغییرات لحظه‌ای تابش خورشید و دمای محیط است؛ عاملی که طراحی یک استراتژی کنترلی مقاوم، دقیق و در عین حال مقرون‌به‌صرفه را به چالشی اساسی تبدیل کرده است [۲].

استراتژی‌های کنترلی موجود در این حوزه به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند [۳]: دسته اول، روش‌های ساده و کم‌هزینه نظیر کنترل روشن / خاموش^۲ با منطق هیستریزیس، و دسته دوم، روش‌های دقیق و پیچیده مانند کنترل‌های پی‌ای‌دی^۳ مدل‌محور یا کنترل‌های پیشرفته مبتنی بر هوش مصنوعی. کنترل هیستریزیس علیرغم قابلیت اطمینان و هزینه پایین، با نوسانات دمایی حول نقطه تنظیم و مصرف انرژی غیربهینه همراه است [۴]. در مقابل، کنترل‌های پی‌ای‌دی تطبیقی و مدل‌محور دقت و پایداری بالایی ارائه می‌دهند [۵]، اما پیچیدگی محاسباتی، نیاز به مدل دقیق و هزینه سخت‌افزاری بیشتر، موانع اصلی توسعه تجاری آنها هستند [۶].

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که تلاش‌های قبلی عمدتاً به بهبود هر یک از این دو رویکرد به صورت مجزا معطوف بوده است. برای مثال، رضایی و همکاران [۷] عملکرد این سیستم‌ها را در اقلیم معتدل و مرطوب شهر رشت مورد مطالعه قرار دادند و پتانسیل بالای آن را تأیید کردند. کنگ و همکاران [۸] یک سیستم پمپ حرارتی با انرژی خورشیدی انبساط مستقیم را برای تامین آب گرم خانگی در چینگدائو چین ساخته و آزمایش کردند. دوارته و همکاران [۹]، مطالعه‌ای را برای بررسی امکان‌سنجی سیستم‌های پمپ حرارتی منبع ترکیبی خورشیدی زمین‌گرمایی برای تولید آب گرم خانگی در آب و هوای برزیل ارائه دادند. کنگ و همکاران [۱۰] بررسی عملکرد حرارتی یک سیستم پمپ حرارتی با انرژی خورشیدی انبساط مستقیم با استفاده از مبرد پروپان طراحی و آزمایش کردند. دوارته و همکاران [۱۱] یک مطالعه مقایسه‌ای بین مبردها در پمپ حرارتی خورشیدی انبساط مستقیم کوچک ارائه دادند. ماسیوکیویچ و همکاران [۱۲] مطالعه یک روش جدید برای تعیین اندازه پمپ‌های حرارتی برای گرمایش فضا و تامین آب گرم در ساختمان‌ها را معرفی کردند. همچنین، رزنده و همکاران [۱۱] طراحی و اعتبارسنجی یک کنترل‌کننده پی‌ای‌دی دیجیتال برای تنظیم دمای خروجی در یک سیستم پمپ حرارتی با انرژی خورشیدی انبساط مستقیم را انجام دادند. با این حال، سیستم کنترلی مذکور بر مدیریت سیکل تبرید متمرکز بود [۱۳]. از سوی دیگر، کنترل‌های پیچیده‌ای مانند کنترل‌های پی‌ای‌دی یا مدل پیش‌بین^۴ نیز برای تنظیم دمای خروجی این سیستم‌ها پیشنهاد شده‌اند [۱۴]. اگرچه این کنترل‌ها از دقت بالایی برخوردارند، اما پیچیدگی طراحی، نیاز به مدلسازی دقیق و هزینه نسبی بالاتر، استفاده از آن‌ها را در کاربردهای کوچک‌مقیاس و با بودجه محدود، با چالش مواجه می‌سازد [۱۵]. هان و همکاران [۱۶] از یک کنترل پی‌ای‌دی فازی برای بهبود عملکرد سیستم پمپ حرارتی با انرژی خورشیدی انبساط مستقیم استفاده کردند. یانگ و همکاران [۱۷] منطق هیستریزیس تطبیقی را پیشنهاد دادند. با این حال، شکاف پژوهشی آشکاری در ارائه یک معماری کنترلی یکپارچه و هوشمند وجود دارد که بتواند به صورت پویا و بر اساس شرایط عملیاتی، بین سادگی و مقرون‌به‌صرفه بودن کنترل هیستریزیس و دقت بالای کنترل پی‌ای‌دی مدل‌محور سوئیچ کند. چنین معماری می‌تواند بهترین عملکرد هر دو مدل را بدون معایب ذاتی آن‌ها ارائه دهد.

برای دستیابی به دقت بالاتر، کنترل‌های تناسبی-انتگرال-مشتقی (پی‌ای‌دی) به‌طور گسترده به کار گرفته شده‌اند. چاتوردی و همکاران [۱۸] نشان دادند که یک پی‌ای‌دی معمولی می‌تواند نوسانات دما را نسبت به کنترل روشن/خاموش کاهش دهد، اما تنظیم پارامترهای آن برای شرایط متغیر کاری دشوار است. برای رفع این مشکل، کنترل‌های پی‌ای‌دی تطبیقی مبتنی بر مدل توسعه یافته‌اند. به عنوان مثال، ژائو و همکاران [۱۹] یک استراتژی کنترلی پیشرفته به نام کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی را برای یک سیستم پمپ حرارتی ترکیبی خورشیدی-هوایی ارائه دادند که با به‌روزرسانی برخط مدل منجر به بهبودی در ضریب عملکرد^۵ شد.

¹ direct-expansion solar-assisted heat pump (DX-SAHP) system

² ON/OFF

³ proportional-integral-derivative controller (PID controller)

⁴ Model Predictive Control - (MPC)

⁵ Coefficient of performance (COP)

روش‌های پیشرفته‌تری مانند کنترل فازی [۲۰]، کنترل عصبی-فازی تطبیقی [۲۱] و کنترل پیش‌بین مدل‌محور [۲۲] نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این روش‌ها اگرچه اغلب نتایج دقت بالایی را گزارش می‌دهند، اما از پیچیدگی محاسباتی بالا، نیاز به داده‌های آموزشی زیاد یا مدل‌های بسیار دقیق رنج می‌برند که پیاده‌سازی عملی و کم‌هزینه آن‌ها را با چالش مواجه می‌سازد [۲۳].

ایده ترکیب روش‌های کنترلی برای بهره‌گیری از مزایای هر کدام، در سایر حوزه‌های مهندسی نیز دنبال شده است. در سیستم‌های انرژی، معماری‌های دو لایه یا سلسله‌مراتبی اغلب برای مدیریت بهینه انرژی به کار می‌روند [۲۴]. به عنوان مثال، در شبکه‌های هوشمند، یک لایه برای کنترل محلی و سریع و لایه دیگر برای بهینه‌سازی سراسری استفاده می‌شود [۲۵].

در زمینه سیستم‌های حرارتی، پاریس و همکاران [۲۶] یک کنترلر هیبرید ترکیب‌کننده پی‌آی‌دی و منطق فازی را برای یک پمپ حرارتی زمین‌گرمایی پیشنهاد دادند. با این حال، ترکیب مشخص منطق گسسته هیستریزیس و کنترل پیوسته پی‌آی‌دی مدل‌محور در یک چارچوب هوشمند با مکانیزم سوئیچینگ خودکار، به ویژه برای سیستم‌های پمپ حرارتی با انرژی خورشیدی انبساط مستقیم، در ادبیات موجود به صورت محدود و ناقص بررسی شده است. اغلب پژوهش‌های هیبرید بر ترکیب دو روش پیچیده (مانند فازی و پی‌آی‌دی) متمرکز بوده‌اند و پتانسیل یک معماری که سادگی مطلق را با دقت بالا در یک ساختار مقرون‌به‌صرفه ادغام کند، نادیده گرفته شده است.

طراحی کنترلرهای مدل‌محور نیازمند یک مدل ریاضی قابل اعتماد از سیستم پویا است. روش‌های مدل‌سازی به دو دسته کلی مبتنی بر فیزیک (سفیدجعبه) و مبتنی بر داده (سیاه‌جعبه) تقسیم می‌شوند. مدل‌های فیزیکی بسیار دقیق بوده اما نیازمند دانش عمیق از پارامترهای سیستم هستند که همیشه در دسترس نیست [۲۷]. در مقابل، مدل‌های مبتنی بر داده مانند مدل‌های خودرگرسیون با ورودی خارجی^۱ (آرایکس) به دلیل سادگی و کفایت برای اهداف کنترل، محبوبیت زیادی دارند [۲۸]. مدل آرایکس با استفاده از داده‌های ورودی-خروجی تجربی شناسایی می‌شود و برای طراحی کنترلرهایی مانند پی‌آی‌دی با روش سنتز مستقیم^۲ بسیار مناسب است [۲۹].

در پاسخ به این خلاء، پژوهش حاضر یک چارچوب کنترل دو-لایه نوآورانه ارائه می‌دهد. نوآوری اصلی در سه سطح قابل تعریف است: الف) تلفیق هوشمند کنترل هیستریزیس (لایه اول، کم‌هزینه و قابل اعتماد) با کنترلر پی‌آی‌دی مدل‌محور مبتنی بر آرایکس (لایه دوم، دقیق و پایدار)؛ ب) طراحی مکانیزم سوئیچینگ خودکار مبتنی بر دو شاخص مکمل «مشتق خطا» (تشخیص اغتشاشات سریع) و «انباشت خطا» (تشخیص عملکرد ضعیف الیه فعال در بازه طولانی)؛ و پ) پیاده‌سازی بر روی سخت‌افزار کم‌هزینه و اعتبارسنجی تجربی در شرایط عملیاتی واقعی. هدف اصلی، حفظ مزایای هر دو روش (سادگی و صرفه‌جویی در شرایط پایدار، دقت بالا در مواجهه با اغتشاش) و همزمان دستیابی به کاهش هزینه، کاهش مصرف انرژی و افزایش پایداری حرارتی است.

در ادامه، ابتدا شرح دستگاه آزمایشی و روش شناسایی مدل آرایکس ارائه می‌شود، سپس طراحی کنترلر پی‌آی‌دی و الگوریتم سوئیچینگ هوشمند تشریح می‌گردد و در نهایت نتایج تجربی و اعتبارسنجی ارائه خواهد شد.

۲- جزئیات ساختار کنترل کننده

۲-۱- شرح دستگاه آزمایشی

سیستم پمپ حرارتی خورشیدی انبساط مستقیم مورد مطالعه در این پژوهش برای تولید آب گرم خانگی طراحی شده و در شکل ۱ نمایش داده شده است. پنل خورشیدی بکار رفته که در پایین شکل دیده می‌شود یک اواپراتور - کلکتور خورشیدی صفحه تخت با مساحت ۳/۱ مترمربع (عرض ۳/۱ در ارتفاع ۱ متر) با زاویه ۴۰ درجه نسب به افق بوده و دارای ظرفیت ۲۰۰۰ وات است.

¹ Autoregressive with Exogenous Input (ARX)

² Direct Synthesis

این سیستم با مبرد R134a عمل می‌کند و مشخصات فنی اجزای اصلی سیکل تبرید در جدول ۱ ارائه شده است. هیتر الکتریکی کمکی با توان ۶۰۰ وات که در مخزن ذخیره آب نصب شده است تا در شرایط کاهش تابش خورشید یا نیاز به گرمایش سریع‌تر، عملکرد سیستم را تکمیل کند. مدیریت بهینه این هیتر کمکی، هدف طراحی سیستم کنترل دمای پیشنهادی است. سیستم کنترل طراحی شده برای مدیریت عملکرد هیتر کمکی، مبتنی بر میکروکنترلر آردوینو نانو است. اجزای اصلی این سیستم در جدول ۲ فهرست شده‌اند.



شکل ۱: سیستم پمپ حرارتی خورشیدی انبساط مستقیم ساخته شده
Fig. 1: Constructed direct expansion solar heat pump system

جدول ۱: مشخصات اجزای اصلی سیکل تبرید

Table 1: Specifications of the main components of the refrigeration cycle

اجزا	مدل / نوع	ظرفیت	دقت / میزان خطا
کمپرسور	هرمتیک چرخشی	۱۲۰۰ وات	$\pm 2\%$
کندانسور / منبع آب	لوله‌ای پرده‌دار غوطه‌ور (مبدل حرارتی)	۱۰۰ لیتر	$\pm 5\%$
فیلتر درایر	استاندارد	۱۵ گرم	--
شیر انبساط	لوله موئین	۱۲۰۰ وات	--

اجزا	مدل / نوع	ظرفیت	دقت / میزان خطا
اوپراتور - کلکتور خورشیدی	صفحه تخت (کوبلی)	مساحت ۳,۱ مترمربع	$\pm 0.5\%$
هیتر الکتریکی کمکی	میله‌ای	۶۰۰ وات: ۲۲۰ ولت AC	$\pm 0.3\%$

جدول ۲: مشخصات اجزای سیکل کنترل

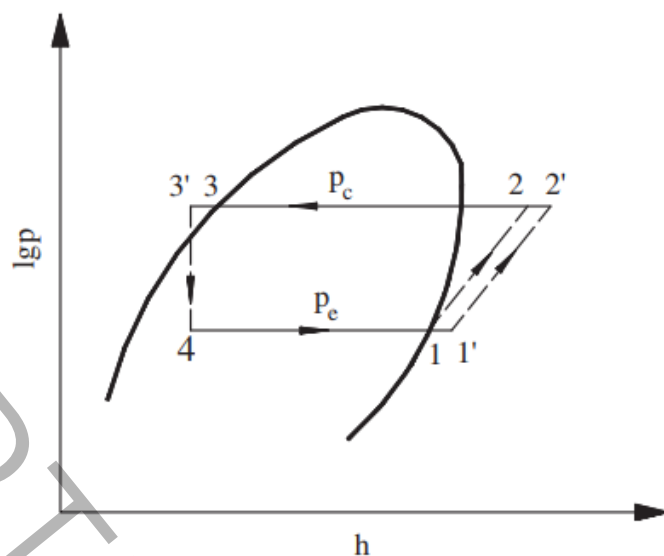
Table 2: Control cycle component specifications

اجزا	مدل	محدوده کاری / مشخصات	دقت / ظرفیت
میکروکنترلر	آردوینو نانو (ATmega328)	پردازشگر ۸ بیتی ۵ ولت	-
سنسور دما دیجیتال	DS18B20 (ضد آب)	-۵۵ تا +۱۲۵ درجه سانتیگراد	± 0.5 درجه سانتیگراد
ماژول رله حالت جامد	رله ۵ ولت DC تک کانال	ولتاژ کنترل: 5 V DC	جریان سوئیچینگ حداکثر ۱۰ آمپر
کنتاکتور	تک پول تک فاز	ولتاژ کویل: 5 V DC	جریان بار حداکثر ۱۰ آمپر
مقاومت Pull-up	کربنی ۴/۷ کیلوهم	توان: ۰/۲۵ وات	-

۲-۲- توصیف سیکل ترمودینامیکی

چرخه ترمودینامیکی ایده‌آل پمپ حرارتی در نمودار فشار-انتالپی (P-h) در شکل ۲ نشان داده شده است. مراحل این چرخه به صورت زیر است:

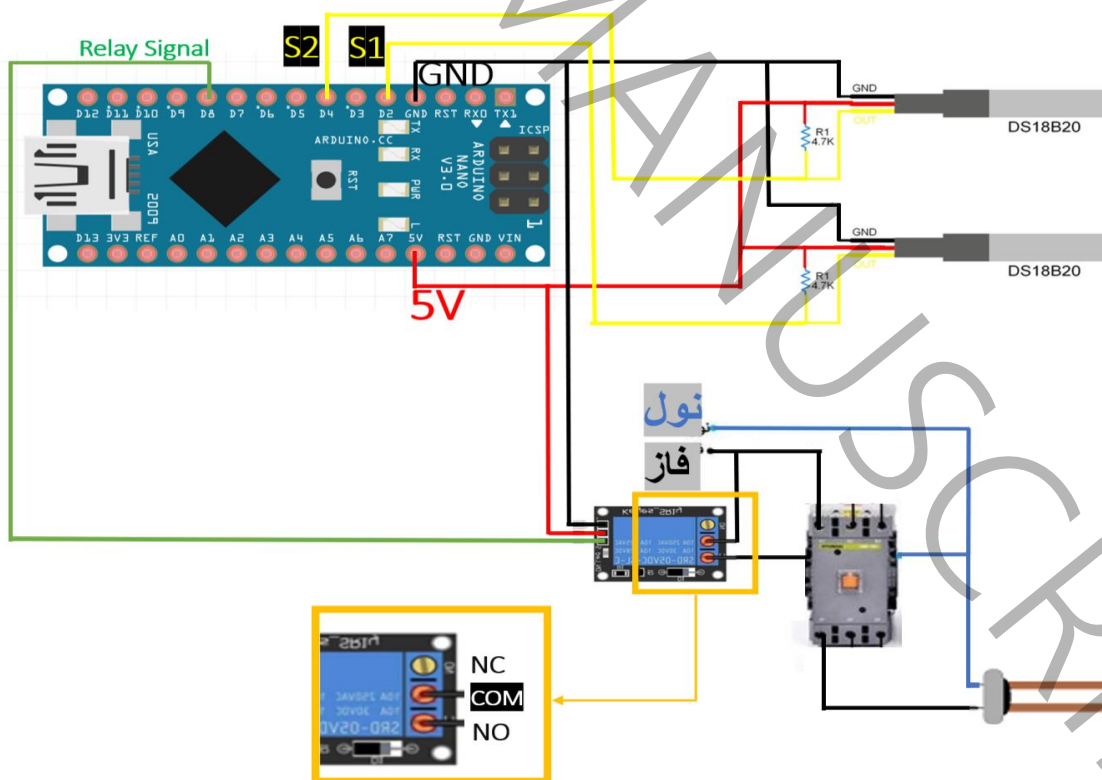
۱. تبخیر و فوق‌گرمایش (۴ → ۱' → ۱): مخلوط مایع-بخار مبرد (نقطه ۴) پس از عبور از لوله موئین، وارد اوپراتور-کلکتور می‌شود. در اینجا با جذب انرژی خورشیدی و/یا حرارت محیط، کاملاً تبخیر و تا نقطه ۱' فوق‌گرم می‌شود.
۲. تراکم (۱ → ۲'): بخار فوق‌گرم توسط کمپرسور تا فشار کندانسور فشرده می‌شود (نقطه ۲').
۳. چگالش (۲' → ۳): بخار داغ و فشرده در کندانسور که در مخزن آب غوطه‌ور است، حرارت خود را به آب می‌دهد و به مایع مادون سرد (نقطه ۳) تبدیل می‌شود. این فرآیند، عامل اصلی گرمایش آب مخزن است.
۴. انبساط (۳ → ۴): مایع مادون سرد با عبور از لوله موئین، دچار افت فشار و دمای شدید شده (فرآیند تروتلینگ) و به حالت مخلوط دو فاز (نقطه ۴) وارد اوپراتور می‌گردد و چرخه تکرار می‌شود.



شکل ۲: دیاگرام فشار-آنتالپی (P-h) سیکل پمپ حرارتی
Fig.2: P-h diagram of the heat pump cycle

۲-۳- طراحی کنترلر دولایه پیشنهادی

شماتیک کامل اتصالات الکترونیکی سیستم کنترل در نرم افزار فریتزینگ^۱ ترسیم و در شکل ۳ ارائه شده است. شکل ۴ مونتاژ دستگاه را نشان می دهد. معماری پیشنهادی در شکل ۵ (به صورت شماتیک نشان داده می شود) و شامل دو لایه و یک مازول تصمیم گیر است.



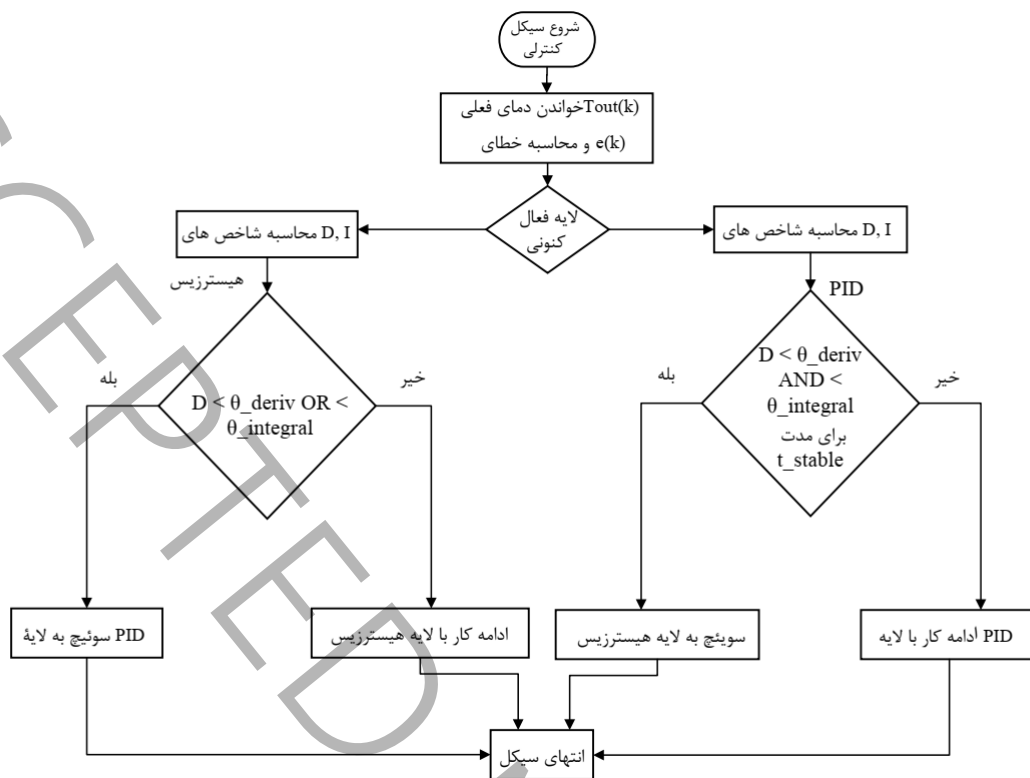
¹ Fritzing

شکل ۳: شماتیک مدار کنترل طراحی شده در نرم افزار فریتزینگ
 Fig. 3: Schematic of the control circuit designed in Fritzing software



۱- اواپراتور ۲- کمپرسور ۳- مخزن کندانسور
 ۴- مدار کنترل آردوینو ۵- کنتاکتور ۶- محل اتصال سیم ها به هیتر

شکل ۴: مونتاژ اتصالات قدرت و کنترل سیستم
 Fig. 4: Assembling the system power and control connections



شکل ۵: بلوک دیاگرام معماری کنترل دو-لایه پیشنهادی

Fig. 5: Block diagram of the proposed two-layer control architecture.

لایه اول کنترلر هیستریز کم هزینه مبتنی بر یک برد آردوینو نانو و دو سنسور DS18B20 (برای T_{in} و T_{out}) پیاده سازی شده است. قانون کنترل به صورت زیر است:

$$Compressor\ State = \begin{cases} ON & T_{out} \leq T_{set} - \delta \\ OFF & T_{out} \geq T_{set} + \delta \\ Previous\ State & Otherwise \end{cases} \quad (1)$$

که در آن T_{set} دمای مطلوب آب خروجی و δ پهنای باند هیستریز (مثلاً ۱/۵ درجه سلسیوس) است. این لایه پایه و مدیریت اولیه انرژی را بر عهده دارد.

لایه دوم کنترلر پی‌آی‌دی تطبیقی مبتنی بر مدل آرایکس برای مواقعی فعال می‌شود که لایه اول نتواند خطا را در یک بازه زمانی معقول مدیریت کند.

الف) شناسایی مدل آرایکس: با تحریک سیستم توسط سیگنال رشته باینری شبه تصادفی^۱ و جمع‌آوری داده‌های {توان کمپرسور (به عنوان ورودی u) و {دمای آب خروجی (به عنوان خروجی y)، مدل آرایکس با استفاده از روش حداقل مربعات در محیط برنامه شناسایی شد. مدل نهایی به شکل زیر انتخاب گردید:

^۱ Pseudo-Random Binary Sequence (PRBS)

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-d) + e(k) \quad (2)$$

در رابطه بالا $y(k)$ دمای خروجی آب در گام زمانی k ، $u(k-d)$ توان کمپرسور (سیگنال کنترلی)، d تاخیر زمانی نمونه برداری (۵ ثانیه)، $e(k)$ نویز سفید با میانگین صفر می‌باشد. همچنین پارامترهای $A(z^{-1})$ و $B(z^{-1})$ به صورت زیر و با مرتبه مدل $d=1$ و $m=1$ و $n=2$ در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n} \end{aligned} \quad (3)$$

ب) طراحی کنترلر پی‌آی‌دی با روش سنتز مستقیم: با انتخاب تابع تبدیل حلقه بسته مطلوب به صورت یک سیستم درجه اول با ثابت زمانی τ_c ، پارامترهای گسسته پی‌آی‌دی K_p ، K_i ، K_d به طور مستقیم از ضرایب چندجمله‌ای $A(z^{-1})$ و $B(z^{-1})$ و محاسبه شدند [۳۰]. پارامترها به ازای τ_c های مختلف (متناسب با بزرگی خطا) قابل تطبیق هستند. روابط سنتز مستقیم به صورت معادله (۴) در نظر گرفته شده است:

$$K_p = (\tau_c + \tau) / (K \tau_c), \quad K_i = K_p / \tau_i, \quad K_d = K_p \tau_d \quad (4)$$

در رابطه بالا τ_c ثابت زمانی حلقه بسته مطلوب برای دو حالت شرایط عملیاتی عادی ۳۰۰ ثانیه و برای شرایط اغتشاشی ۱۲۰ ثانیه تعریف شده است. همچنین مقادیر نهایی پارامترهای $K_p=2.1$ و $K_i=0.022$ و $K_d=5.7$ فرض شده است.

۴-۲- الگوریتم سوئیچینگ هوشمند (ماژول تصمیم گیر)

این ماژول که بر روی هسته اصلی ESP32 اجرا می‌شود، مسئول انتخاب لایه کنترلی فعال است. تصمیم‌گیری بر اساس دو شاخص کلیدی انجام می‌گیرد:

۱. آستانه مشتق خطا: اگر از آستانه θ_{deriv} (مثلاً $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$) فراتر رود، نشان‌دهنده یک اغتشاش سریع (مانند کاهش ناگهانی تابش) است. آستانه مشتق خطا (0.5) بر اساس حداکثر نرخ تغییرات دمای آب در شرایط عادی (که با آنالیز داده‌های تجربی، معادل 0.3 تا 0.4 بدست آمد) انتخاب شده است تا از سوئیچ‌های کاذب جلوگیری شود.

۲. آستانه انتگرال خطا: اگر از آستانه $\theta_{derive}=2$ فراتر رود، نشان‌دهنده عملکرد ضعیف لایه فعال در بازه طولانی‌تر است. بر اساس مدت زمان مجاز ماندگاری خطای ۱ درجه‌ای به مدت ۲ دقیقه تعیین شده است. این انتخاب تضمین می‌کند که سیستم در صورت اغتشاشات طولانی مدت (بیش از ۲ دقیقه) حتماً به لایه پی‌آی‌دی سوئیچ کند تا خطای حالت ماندگار حذف شود. هرگاه هر یک از این دو شرط برقرار شود، سیستم به طور خودکار از لایه هیستریزس به لایه پی‌آی‌دی سوئیچ می‌کند. بازگشت به لایه هیستریزس زمانی اتفاق می‌افتد که هر دو شاخص به مدت $t_{stable}=120$ ثانیه زیر آستانه‌های تعیین‌شده باقی بمانند. همچنین منطق انتخاب، جلوگیری از نوسان ناخواسته و اطمینان از فعال شدن تنها در اغتشاشات با دامنه معنادار می‌باشد.

۴-۵- پیاده‌سازی و تنظیمات آزمایشی

سیستم پیشنهادی بر روی یک نمونه آزمایشی پمپ حرارتی با انرژی خورشیدی انبساط مستقیم مجهز به مخزن ۱۰۰ لیتری نصب و تست شده است. سناریوهای آزمایشی شامل شرایط پایدار با تابش ثابت، تغییرات ناگهانی تابش (ایجاد شده با سایه‌انداز)، تغییرات دمای ورودی آب و ترکیب همزمان چند نوع اغتشاش مورد بررسی قرار گرفت [۳۱]. در تمامی سناریوها، عملکرد سه حالت «کنترلر هیستریزس»، «کنترلر پی‌آی‌دی» و «کنترل دولایه» ثبت و مقایسه شد.

برای ارزیابی عملکرد سامانه، سه سناریوی آزمایشی در شرایط نزدیک به واقعیت طراحی شد:

۱. شرایط پایدار: تابش ثابت حدود ۸۰۰ وات بر مترمربع.

۲. اغتشاش پلکانی: کاهش ناگهانی ۵۰ درصدی تابش در میانه آزمایش.

۳. اغتشاش تناوبی: شبیه‌سازی عبور ابر با تغییرات سینوسی تابش.

در هر سناریو، سه کنترلر شامل «فقط هیستریزیس»، «فقط پی‌آی‌دی» و «کنترلر دولایه پیشنهادی» به مدت دو ساعت مورد آزمون قرار گرفتند. شاخص‌های ارزیابی شامل خطای RMS دما، انرژی مصرفی کمپرسور و تعداد سیکل‌های روشن/خاموش کمپرسور بودند [۳۲].

لایه اول یعنی کنترلر مبتنی بر منطق هیستریزیس مشابه ساختار کنترلی کلاسیک هیستریزیس بوده و وظیفه حفظ عملکرد پایه و مصرف انرژی کم در شرایط نرمال را بر عهده دارد. مزیت این لایه، سادگی، سرعت پاسخ مناسب در تغییرات تدریجی و استهلاک پایین تجهیزات است.

در این لایه کنترلر، دمای آب مخزن که توسط سنسور DS18B20 اندازه‌گیری می‌شود، به عنوان ورودی در نظر گرفته شده و خروجی آن فرمان روشن/خاموش به هیتر کمکی ۶۰۰ وات است. منطق تصمیم‌گیری به این صورت است که اگر دما به ۵۰ درجه سانتی‌گراد یا کمتر برسد، هیتر روشن می‌شود؛ اگر دما به ۶۰ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر برسد، هیتر خاموش می‌گردد؛ و در بازه بین این دو حد، وضعیت قبلی هیتر حفظ می‌شود.

طراحی لایه دوم کنترلر پی‌آی‌دی تطبیقی مبتنی بر مدل با الهام از روش‌شناسی مقاله مرجع طراحی شده و در مواجهه با اغتشاش‌های شدید یا شرایط غیرعادی فعال می‌شود.

• شناسایی مدل: مدل دینامیکی سیستم حول نقطه کار با روش آرایکس استخراج می‌شود.

• تنظیم کنترلر: ضرایب پی‌آی‌دی براساس روش سنتز مستقیم و با در نظر گرفتن پاسخ مطلوب حلقه بسته (زمان نشست ۳۰۰ ثانیه و ضریب میرایی ۰/۶) تعیین می‌شود. علت انتخاب پاسخ تحت میرا دستیابی به زمان پاسخ مناسب بدون فراجش زیاد در سیستم حرارتی که دارای اینرسی بالا است.

• نحوه عملکرد: کنترلر با تنظیم سرعت پمپ (سیگنال PWM)، دما را با دقت بالا به نقطه تنظیم بازمی‌گرداند.

در الگوریتم هوشمند سوئیچینگ بین لایه‌ها (نوآوری اصلی) یک مازول تصمیم‌گیر بر اساس دو شاخص کلیدی، لایه فعال کنترل را تعیین می‌کند:

۱. مشتق خطا: اگر نرخ تغییر دما از یک آستانه تعریف‌شده بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده وقوع اغتشاش شدید است؛ در این حالت لایه پی‌آی‌دی فعال می‌شود.

۲. انتگرال خطا: اگر خطای دما برای بازه‌ای مشخص از حد مجاز عبور کند (حتی بدون تغییرات ناگهانی)، سیستم به لایه پی‌آی‌دی سوئیچ می‌کند تا خطای حالت ماندگار حذف شود.

۳. شرایط بازگشت: پس از بازگشت دما به محدوده مجاز و کاهش تغییرات، سیستم به لایه هیستریزیس سوئیچ می‌کند تا مصرف انرژی حداقل و پایداری عملکرد حفظ شود.

۳- نتایج و بحث

پس از طراحی کنترلر بر اساس روش سنتز مستقیم در بخش ۲-۳ قسمت ب، در این بخش به بررسی پارامترهای انتخابی بر اساس داده‌های تجربی و ماهیت دینامیکی سیستم پرداخته می‌شود. ضرایب نهایی کنترلر ($K_p=2.1$ و $K_i=0.022$ و $K_d=5.7$) با هدف دستیابی به یک پاسخ تحت‌میرا با ضریب میرایی 0.6 و زمان نشست حدود 300 ثانیه، از طریق روش سنتز مستقیم و با استفاده از مدل آرایکس شناسایی شده (جدول ۴) محاسبه شدند.

دلیل انتخاب پاسخ تحت‌میرا به جای پاسخ فوق‌میرا یا بحرانی، ماهیت حرارتی سیستم است. بررسی داده‌های تجربی نشان داد که سیستم پمپ حرارتی خورشیدی انبساط مستقیم، دارای اینرسی حرارتی بالا (ناشی از ظرفیت حرارتی مخزن 100 لیتری آب) و تأخیر زمانی ذاتی^۱ حدود 45 ثانیه (ناشی از دینامیک مبرد در اواپراتور-کلکتور) می‌باشد. در چنین شرایطی، پاسخ فوق‌میرا منجر به زمان نشست بیش از 600 ثانیه می‌شود که برای کاربرد آب گرم خانگی غیرعملی است. در مقابل، پاسخ تحت‌میرا با میرایی 0.6 ، ضمن تأمین زمان نشست حدود 300 ثانیه، حداکثر فراجهش را به کمتر از 10% (معادل حدود $1/2$ درجه سلسیوس در نقطه تنظیم 55 درجه) محدود می‌کند که مطابق با استانداردهای سیستم‌های تأمین آب گرم خانگی [۳۳]، کاملاً قابل قبول است.

لازم به ذکر است که ثابت زمانی حلقه بسته مطلوب τ_c بر اساس دو حالت عملیاتی متفاوت تنظیم گردید: در شرایط پایدار با تابش ثابت، 300 ثانیه برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، و در شرایط اغتشاشی (کاهش ناگهانی تابش یا تغییر دمای ورودی 120 ثانیه برای افزایش سرعت پاسخ‌دهی و بازیابی دقت کنترلی انتخاب شد. این مقادیر با استفاده از داده‌های تجربی و روش شناسایی مدل آرایکس با معیار $R^2=0.903$ و $FIT=91.4\%$ صحت‌گذاری شده‌اند.

پس از پیاده‌سازی معماری پیشنهادی بر روی سکوی سخت‌افزاری ESP32 و انجام آزمایش‌ها تحت سه سناریوی تعریف‌شده، داده‌های عملکردی جمع‌آوری و مورد تحلیل قرار گرفتند. شاخص‌های کلیدی عملکرد در جدول ۳ خلاصه شده‌اند.

جدول ۳: مقایسه عملکرد کنترلرهای مختلف تحت سه سناریوی آزمایشی

Table 3: Quantitative comparison of the performance of different controllers under three test scenarios

شاخص عملکرد	سناریو	فقط هیستریزیس	فقط PID مدل محور	کنترلر دو-لایه پیشنهادی
خطای RMS دما ($^{\circ}\text{C}$)	پایدار	۰/۹۵	۰/۲۱	۰/۲۸
	اغتشاش پلکانی	۱/۸۲	۰/۴۵	۰/۵۱
	اغتشاش تناوبی	۱/۵۷	۰/۳۸	۰/۴۲
مصرف انرژی (KWh)	پایدار	۲/۱	۱/۸	۱/۷۹
	اغتشاش پلکانی	۲/۳	۱/۹۵	۱/۸۵
	اغتشاش تناوبی	۲/۲۵	۱/۸۹	۱/۸۱
تعداد سیکل‌های کمپرسور	پایدار	۴۲	۱۸۵	۳۵
	اغتشاش پلکانی	۵۸	۲۱۰	۴۱
	اغتشاش تناوبی	۶۳	۱۹۹	۴۸
	پایدار	۰	۱۰۰	۸

¹ Dead Time

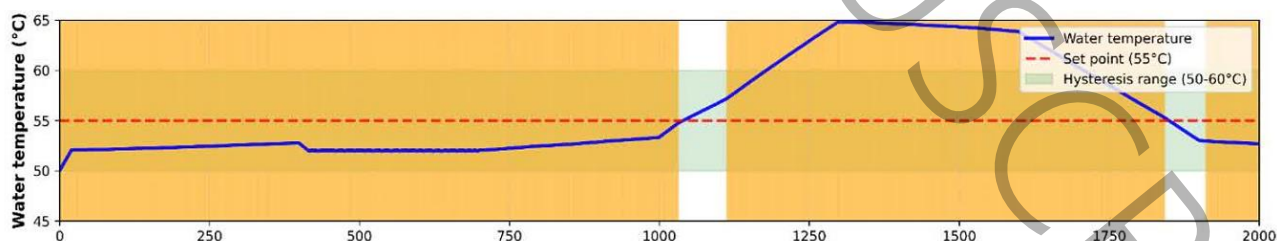
۷۲	۱۰۰	۰	اغتشاش پلکانی
۶۵	۱۰۰	۰	اغتشاش تناوبی
میانگین زمان فعال بودن لایه PID (%)			

برای تأیید اعتبار مدل آرایکس شناسایی شده، معیارهای آماری R^2 ، $RMSE$ و FIT در جدول ۴ ارائه شده است. مقدار FIT برابر با ۴/۹۱ درصد نشان دهنده تطابق بسیار خوب خروجی مدل با داده‌های تجربی است و مقدار $R^2=0.903$ حاکی از آن است که مدل قادر به پیش‌بینی بیش از ۹۰٪ از تغییرات دمای خروجی است. این نتایج، تعمیم‌پذیری مدل را برای طراحی کنترلر پی‌آی‌دی در شرایط کاری مختلف تأیید می‌کند.

جدول ۴: نتایج مدل ARX

معیار	مقدار	توضیح
FIT	۴/۹۱٪	درصد تطابق خروجی مدل با داده‌های واقعی
$RMSE$	۳۲ درجه سلسیوس	ریشه میانگین مربعات خطا
R^2	۰/۹۰۳	ضریب تعیین

نتایج ارائه شده به وضوح برتری رویکرد ترکیبی دو-لایه را در دستیابی همزمان به مصرف انرژی بهینه، پایداری حرارتی و کاهش استهلاک مکانیکی تأیید می‌کند. در شکل ۶ نمودار تغییرات دمای خروجی آب بر حسب زمان نشان داده شده است. در نمودار ۶، روند تغییرات دمای آب خروجی در طول ۲۰۰۰ ثانیه نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دمای خروجی در ابتدا در محدوده ۵۱ تا ۵۳ درجه سلسیوس قرار دارد و در بازه‌های زمانی مختلف تحت تأثیر شرایط محیطی و ورودی سیستم تغییر می‌کند. نقطه تنظیم ۵۵ درجه سلسیوس به صورت خط چین قرمز مشخص شده است.

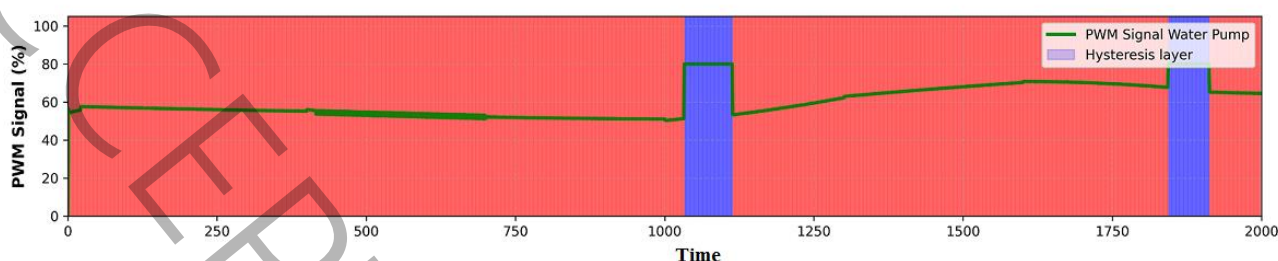


شکل ۶: نمودار تغییرات دمای خروجی آب بر حسب زمان

Fig. 6: Graph of changes in water outlet temperature over time

در حدود زمان ۱۰۰۰ ثانیه، افزایش تدریجی دما آغاز می‌شود که ناشی از افزایش توان گرمایش یا تغییر در شرایط تابشی است. پس از آن دما به بیشینه‌ی حدود ۶۴-۶۵ درجه سلسیوس می‌رسد و سپس مجدداً کاهش می‌یابد. این رفتار نشان می‌دهد که سیستم بدون کنترل پیشرفته، نسبت به تغییرات ورودی حساس است و دمای خروجی دارای نوسان قابل توجهی حول نقطه تنظیم است.

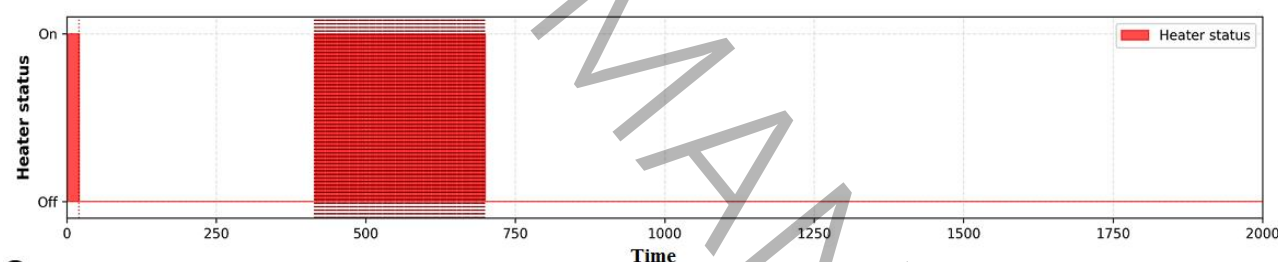
شکل ۷ نشان می‌دهد که با تغییرات دما، دامنه PWM برای پمپ آب تغییر کرده است. در زمان‌هایی که دما افزایش یافته (مثلاً حدود ۱۰۰۰-۱۵۰۰ ثانیه)، PWM کاهش یافته تا انتقال حرارت کمتر شود. برعکس، در زمان افت دما PWM افزایش یافته است. این رفتار نشان می‌دهد که لایه تنظیم نرم^۱ به صورت پیوسته در حال تنظیم مقدار جریان آب برای دستیابی به پایداری دمای است.



شکل ۷: تغییرات دما در برابر سیگنال PWM

Fig. 7: Temperature changes versus PWM signal

شکل ۸ وضعیت روشن/خاموش بودن هیتر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که هیتر تنها در بازه‌هایی خاص فعال است؛ یعنی زمانی که دمای سیستم به سمت محدوده پایین هیستریزس نزدیک می‌شود. این امر باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی سیستم شده است.

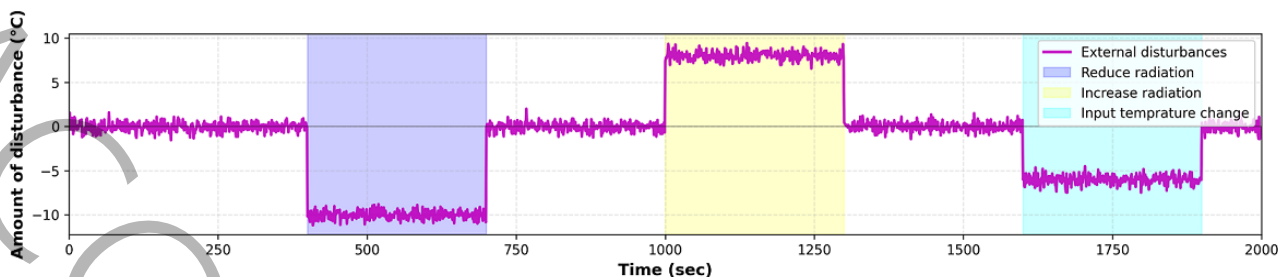


شکل ۸: وضعیت روشن/خاموش بودن هیتر

Fig. 8: Heater on/off status

شکل ۹ میزان اغتشاش اعمال شده به سیستم و کاهش تابش (ناحیه آبی)، افزایش تابش (ناحیه زرد)، تغییر دمای ورودی (ناحیه بنفش) را نمایش می‌دهد. نوسانات ایجاد شده در اغتشاش‌ها عمدی بوده تا عملکرد کنترل‌کننده در شرایط مختلف سنجیده شود. نتایج نشان می‌دهد که کنترل دو لایه توانسته است علی‌رغم این تغییرات قابل توجه، دمای خروجی را در محدوده مجاز حفظ کند.

¹ Smooth Control

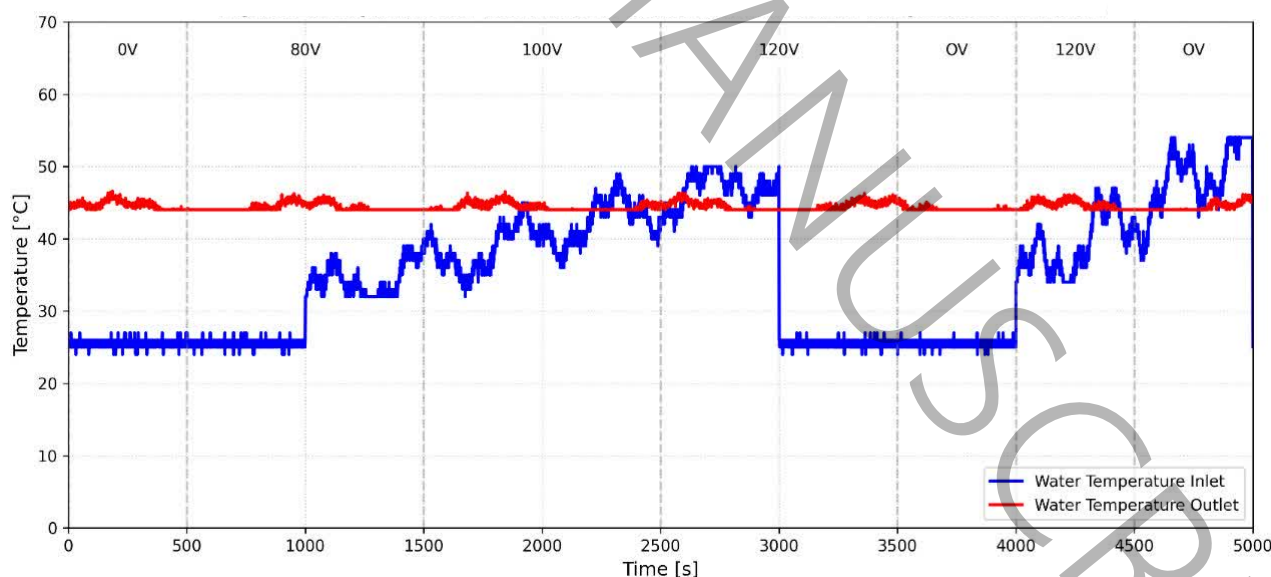


شکل ۹: میزان اغتشاش اعمال شده به سیستم

Fig. 9: Amount of disturbance applied to the system

تحلیل نمودارها نشان می‌دهد که استفاده از کنترل دو لایه شامل: لایه هیستریزس (جهت جلوگیری از انحرافات شدید)، لایه تنظیم PWM (برای اصلاح دقیق)، باعث افزایش پایداری دما و جلوگیری از افزایش بیش از حد آن می‌شود. سیستم کنترل در برابر اغتشاش‌های شدید عملکرد مناسبی نشان داده و قابلیت نگهداشتن دمای آب در محدوده مطلوب را دارد. همچنین کاهش دفعات روشن بودن هیتر موجب بهبود مصرف انرژی شده است.

نمودار ۱۰ تست کنترلر تغییرات دمای ورودی و خروجی آب را نشان می‌دهد. دو سیگنال، دمای ورودی آب (آبی) و دمای خروجی آب (نارنجی)، و در بالای نمودار ولتاژ ورودی ($V_0, V_{120}, V_0, V_{120}, V_{100}, V_{80}, V_0$) مشخص شده که این تغییرات ورودی کنترل‌کننده یا پمپ/هیتر است. دمای ورودی با تغییر ولتاژ نوسان‌های شدید دارد و سطح میانگین آن تغییر می‌کند. این یعنی: سیستم در معرض اختلالات ناگهانی است و تغییر ولتاژ اثر زیادی روی دمای ورودی دارد. دمای خروجی تقریباً پایدار و نزدیک ۵۰ درجه باقی می‌ماند. این نمودار نشان می‌دهد که، کنترلر به خوبی اختلالات شدید دمای ورودی را جبران می‌کند و خروجی را با خطای کم نزدیک مقدار مرجع نگه می‌دارد. عملکرد کنترلر قوی و مقاوم^۱ است.

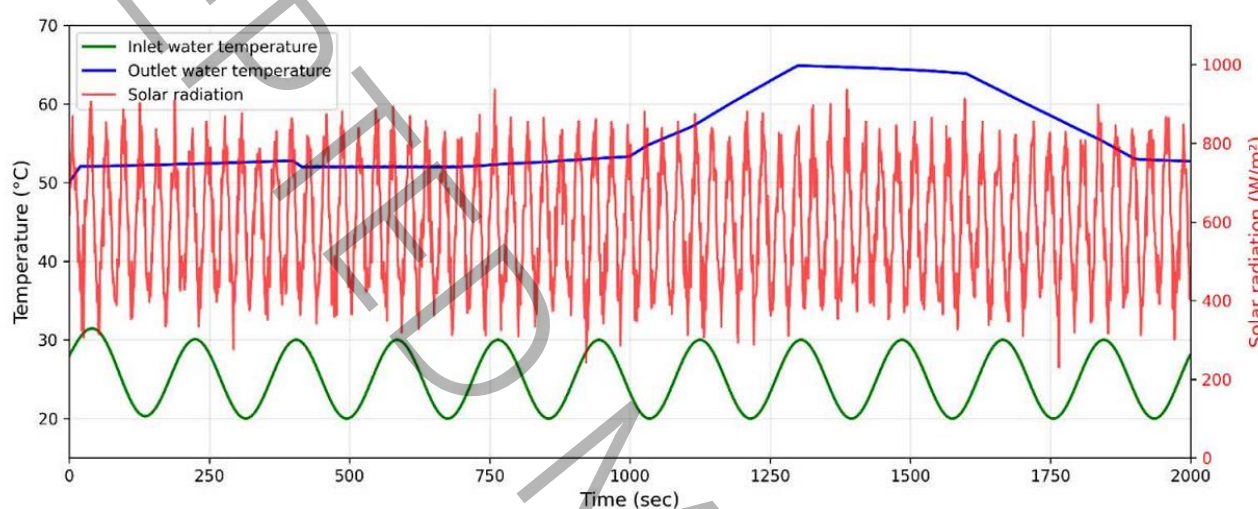


شکل ۱۰: تست کنترلر تغییرات دمای ورودی و خروجی آب

Fig. 10. Testing the controller for changes in inlet and outlet water temperatures

¹ Robust

در شکل ۱۱ هم‌زمان دمای آب ورودی (خط سبز)، خروجی (خط آبی) و شدت تابش خورشیدی (خط قرمز - محور سمت راست)، سه کمیت به صورت هم‌زمان اندازه‌گیری شده‌اند. تابش خورشیدی دارای نوسانات سریع و با دامنه بالا است که رفتار موجی آن در کل مدت آزمایش تکرار می‌شود. این نوسانات سبب می‌شوند دمای ورودی نیز در یک بازه مشخص (تقریباً ۲۵-۳۵ درجه سلسیوس) نوسان کند. دمای خروجی در میانه زمان شبیه‌سازی، هم‌زمان با افزایش تابش، روند صعودی پیدا کرده و در محدوده ۶۰-۶۳ درجه سلسیوس تثبیت می‌شود. این همبستگی نشان می‌دهد که سیستم حرارتی تأثیر مستقیم و لحظه‌ای از تابش خورشیدی می‌پذیرد و شرایط محیطی یکی از مهم‌ترین عوامل تغییر دمای خروجی است. وجود اختلاف زمانی اندک بین تغییرات تابش و پاسخ دمای خروجی، نشان‌دهنده ظرفیت حرارتی سیستم و دینامیک انتقال گرماست.



شکل ۱۱: تغییرات دمای آب ورودی، خروجی و تشعشع خورشیدی در برابر زمان

Fig. 11: Changes in inlet and outlet water temperatures and solar radiation versus time

۴- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی عملکرد کنترلر دو - لایه پیشنهادی، نتایج این پژوهش با یافته‌های کونگ و همکاران [۸] (کنترلر پی‌آی‌دی فازی) و رزنده و همکاران [۱] (هیستریزیس تطبیقی) مقایسه گردید. جدول ۵ این مقایسه را به صورت کمی ارائه می‌دهد.

جدول ۵: اعتبارسنجی نتایج

معیار	پژوهش حاضر	رزنده و همکاران [۱]	کونگ و همکاران [۸]
خطای RMS دما (°C)	۰/۲۸	۰/۵۸	۰/۴۲
مصرف انرژی نسبی (%)	۷۲	۸۸	۱۰۰
کاهش تعداد سیکل کمپرسور (%)	۱۶/۶	۱۵	۲۶

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که کنترلر پیشنهادی از نظر دقت دمایی (خطای RMS برابر ۰/۲۸ درجه سلسیوس) عملکرد بهتری نسبت به هر دو مرجع داشته است. همچنین مصرف انرژی نسبت به روش پی‌آی‌دی فازی (مرجع [۱]) حدود ۲۸٪ کاهش یافته است. اگرچه کاهش تعداد سیکل‌های کمپرسور در روش پیشنهادی (۱۶/۶٪) نسبت به مرجع [۱] (۲۶٪) کمتر است، اما هزینه پیاده‌سازی پایین‌تر و حفظ دقت مناسب، مزیت اصلی معماری دو-لایه محسوب می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی با ارائه تعادل بهینه بین دقت، مصرف انرژی و هزینه پیاده‌سازی، گامی عملی به سوی تجاری‌سازی سیستم‌های کنترلی هوشمند در کاربردهای انرژی تجدیدپذیر است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک چارچوب کنترل دو-لایه نوآورانه برای سیستم‌های پمپ حرارتی خورشیدی انبساط مستقیم ارائه شد. هسته این معماری، تلفیق هوشمند یک لایه کنترل هیستریزس کم‌هزینه و قابل اعتماد با یک لایه کنترل پی‌آی‌دی تطبیقی مبتنی بر مدل آرایکس است. یک الگوریتم تصمیم‌گیری مبتنی بر مشتق خطا و انباشت خطا، به صورت خودکار و پویا بین این دو لایه سوئیچ می‌کند. پیاده‌سازی عملی بر روی سکوی ESP32 و آزمایش‌های تجربی، برتری این روش را به وضوح نشان داد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در حالت بدون کنترل، سیستم حساسیت بالایی به تغییرات محیطی نشان داده و دما از مقدار مطلوب منحرف می‌شود در حالیکه کنترلر دو لایه پیشنهادی با موفقیت دمای آب را در محدوده عملیاتی حفظ و انحرافات را کاهش داده است. در این ساختار، لایه هیستریزس نقش محافظتی ایفا می‌کند و لایه PWM دقت تنظیم دما را تأمین می‌نماید. در نتیجه، کارکرد هیتر به حداقل رسیده که به معنای کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی کل سیستم است. همچنین کنترل‌کننده در برابر اغتشاش‌های شدید محیطی پایدار باقی مانده و رفتار حرارتی مطلوبی ارائه می‌دهد. این پژوهش اثبات کرد که می‌توان با یک طراحی هوشمند و معماری مناسب، شکاف بین سادگی و دقت را پر کرد و راه‌حلی مقرون‌به‌صرفه، پایدار و کارا برای کنترل سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر پویا ارائه داد.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A مساحت، m^2

E مدول الاستیسیته، N/m^2

علائم یونانی

ρ چگالی، kg/m^3

زیرنویس

f سیال

بالانویس

* شرایط مرجع

- [1] S.I.d.M. Resende, H.A.G. Diniz, R.N.d. Faria, R. Nunes de Oliveira, Design and Experimental Evaluation of a Controller for a Direct-Expansion Solar-Assisted Heat Pump with Propane, *Processes*, 13(11) (2025) 3583.
- [2] V. Rezaee, A. Taghizadeh, Evaluating of the Impact of Environmental Indicators on Thermal Comfort for Different Climates in Iran Using the PMV Model, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 57(1) (2025) 3-24.(In Persian)
- [3] D.E. Seborg, T.F. Edgar, D.A. Mellichamp, F.J. Doyle III, *Process dynamics and control*, John Wiley & Sons, 2016.
- [4] S. Anil, H. Srinaath, M. Jayakumar, Comparative Analysis of ON/OFF, PID and Model Predictive Control System in HVAC Systems, in: *2023 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, IEEE, 2023, pp. 1-5.
- [5] K.J. Åström, T. Hägglund, *Advanced PID control*, ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2006.
- [6] G. Ulpiani, M. Borgognoni, A. Romagnoli, C. Di Perna, Comparing the performance of on/off, PID and fuzzy controllers applied to the heating system of an energy-efficient building, *Energy and Buildings*, 116 (2016) 1-17.
- [7] V. Rezaee, A. Taghizadeh, M. Masomnezhad, Comparative feasibility study of two direct expansion solar water heater heat pump systems in Rasht climate, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 57(5) (2025) 589-610. (In Persian)
- [8] X. Kong, P. Sun, S. Dong, K. Jiang, Y. Li, Experimental performance analysis of a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater with R134a in summer, *International Journal of Refrigeration*, 91 (2018) 12-19.
- [9] W.M. Duarte, T.F. Paulino, S.G. Tavares, A.A. Maia, L. Machado, Feasibility of solar-geothermal hybrid source heat pump for producing domestic hot water in hot climates, *International Journal of Refrigeration*, 124 (2021) 184-196.
- [10] X. Kong, Y. Yang, M. Zhang, Y. Li, J. Li, Experimental investigation on a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater using R290 with micro-channel heat transfer technology during the winter period, *International Journal of Refrigeration*, 113 (2020) 38-48.
- [11] W.M. Duarte, T.F. Paulino, J.J. Pabon, S. Sawalha, L. Machado, Refrigerants selection for a direct expansion solar assisted heat pump for domestic hot water, *Solar Energy*, 184 (2019) 527-538.
- [12] M. Masiukiewicz, M. Tańczuk, S. Anweiler, G. Streckienė, S. Boldyryev, Long-term climate-based sizing and economic assessment of air-water heat pumps for residential heating, *Applied thermal engineering*, 258 (2025) 124627.
- [13] W. Zhenkui, Y. Peihong, J. Hui, W. Yili, Z. Jihong, Z. Zilei, Z. Xiaoming, Heating performance of solar heat pump heating system with aluminum tube collector, *IEEE Access*, 9 (2021) 26491-26501.
- [14] K.J. Åström, T. Hägglund, PID control, *IEEE Control Systems Magazine*, 1066 (2006) 30-31.
- [15] K. Ogata, *Modern control engineering*, Prentice hall, 2010.
- [16] N. Han, J. Xu, Multilayer decoupling control of photovoltaic integrated heat pump based on expected value, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2024, pp. 012005.
- [17] Y. Han, L. Ma, J. Zhang, P. Mi, X. Guo, Research on the adaptive proportional-integral control method of a direct-expansion photovoltaic-thermal heat pump system, *Energy*, 281 (2023) 128077.
- [18] S. Chaturvedi, D. Chen, A. Kheireddine, Thermal performance of a variable capacity direct expansion solar-assisted heat pump, *Energy Conversion and management*, 39(3-4) (1998) 181-191.

- [19] Z. Zhao, B. Wang, X. Li, W. Shi, Adaptive model predictive control of a residential solar-air hybrid heat pump system, *Energy Conversion and Management*, 321 (2024) 119026.
- [20] F.E.M. Garcia, J.A.G. Camperos, H.Y. Jaramillo, Fuzzy Controller for a Thermal Process by Flat Solar Collector Assisted by a Heat Pump Using Arduino, *International Review of Automatic Control*, 15(1) (2022) 20.
- [21] S. Chebaane, S.D. Farahani, T.S. Abdennaji, L. Kolsi, A. Karimipour, W. Aich, ANFIS approach and thermal performance of solar air heaters integrated with phase change materials and porous foam gradient under mechanical vibrations, *Case Studies in Thermal Engineering*, 72 (2025) 106267.
- [22] H. Weeratunge, G. Narsilio, J. De Hoog, S. Dunstall, S. Halgamuge, Model predictive control for a solar assisted ground source heat pump system, *Energy*, 152 (2018) 974-984.
- [23] A. Afram, F. Janabi-Sharifi, Theory and applications of HVAC control systems-A review of model predictive control (MPC), *Building and environment*, 72 (2014) 343-355.
- [24] M. Beaudin, H. Zareipour, Home energy management systems: A review of modelling and complexity, *Energy Solutions to Combat Global Warming*, (2016) 753-793.
- [25] X. Wu, Y. Xu, X. Wu, J. He, J.M. Guerrero, C.-C. Liu, K.P. Schneider, D.T. Ton, A two-layer distributed cooperative control method for islanded networked microgrid systems, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(2) (2019) 942-957.
- [26] B. Paris, J. Eynard, S. Grieu, M. Polit, Hybrid PID-fuzzy control scheme for managing energy resources in buildings, *Applied Soft Computing*, 11(8) (2011) 5068-5080.
- [27] F.G. Chata, S. Chaturvedi, A. Almogbel, Analysis of a direct expansion solar assisted heat pump using different refrigerants, *Energy Conversion and Management*, 46(15-16) (2005) 2614-2624.
- [28] A. Simpkins, System identification: Theory for the user, (Ijung, I.; 1999)[on the shelf], *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(2) (2012) 95-96.
- [29] O. Ozen, E. Sariyildiz, H. Yu, K. Ogawa, K. Ohnishi, A. Sabanovic, Practical PID controller tuning for motion control, in: 2015 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), IEEE, 2015, pp. 240-245.
- [30] F. Velasco, M. Haddouche, F. Illán-Gómez, J. García-Cascales, Experimental characterization of the coupling and heating performance of a CO₂ water-to-water heat pump and a water storage tank for domestic hot water production system, *Energy and Buildings*, 265 (2022) 112085.
- [31] X. Kong, P. Sun, Y. Li, K. Jiang, S. Dong, Experimental studies of a variable capacity direct-expansion solar-assisted heat pump water heater in autumn and winter conditions, *Solar Energy*, 170 (2018) 352-357.
- [32] B. Li, A.G. Alleyne, A dynamic model of a vapor compression cycle with shut-down and start-up operations, *International Journal of refrigeration*, 33(3) (2010) 538-552.
- [33] J.Y. Lee, T. Yim, Energy and flow demand analysis of domestic hot water in an apartment complex using a smart meter, *Energy*, 229 (2021) 120678.

An Intelligent Two-Layer Controller Based on Hysteresis and PID Logic for Performance Improvement of a Direct-Expansion Solar Heat Pump

Abouzar Taghizadeh^{a1}, Vahid Rezaee^b, Ehsan abdollahzadeh shahrbabaki^b

^a Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

^b Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ABSTRACT

This study proposes an innovative framework for designing a two-layer intelligent controller for direct expansion solar heat pump systems. The system consists of a flat-plate solar collector–evaporator with a surface area of 3.1 m², a variable-frequency hermetic rotary compressor, a hot-water storage tank with a volume of 0.1 m³, a finned-tube condenser, and a capillary tube (expansion valve). The first layer, based on hysteresis logic, utilizes digital temperature sensors and an Arduino microcontroller to perform basic control and energy management under normal operating conditions. This layer was designed and evaluated experimentally. The second layer comprises a PID controller whose parameters are tuned according to the system's ARX model using the direct synthesis method. This controller activates under severe disturbances, such as sudden variations in solar irradiance or inlet temperature, restoring the system's control accuracy to its optimal level. Quantitative results obtained from experimental implementation under three scenarios—steady-state, step disturbance, and periodic disturbance—demonstrate that the proposed controller, in comparison with the standalone hysteresis controller, reduces the RMS temperature error under steady-state conditions from 0.95°C to 0.28°C (a 70.5% reduction), and decreases the number of compressor on/off cycles from 42 to 35 (a 16.6% reduction). Furthermore, energy consumption under disturbance scenarios is reduced by 24.4% and 19.6%, respectively, compared to the standalone hysteresis controller.

KEYWORDS

Solar heat pump, PID controller, modeling, hysteresis logic, energy.

¹ Corresponding Author: A-Taghizadeh@tvu.ac.ir