



اثر تأخیر واکنشی سیستم تأسیساتی بر مصرف انرژی در تعیین نقطه تنظیم حرارتی: یک رویکرد شبه دینامیک

نویسنده: وحید بختیاری^{۱*}

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و معماری، گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

کلمات کلیدی:

هیستریزیس
ترموسنات
شبیه سازی انرژی،
انرژی پلاس

دریافت: ۰۹ مرداد ۱۴۰۴

بازنگری: ۰۵ شهریور ۱۴۰۴

پذیرش: ۰۵ شهریور ۱۴۰۴

انتشار الکترونیکی: ۰۱ تیر ۱۴۰۵

نویسنده مسئول: وحید بختیاری

چکیده:

در مطالعات مدل سازی انرژی ساختمان، معمولاً نقطه تنظیم دمایی سیستم های تأسیساتی به صورت مقدار ثابتی تعریف می شود، در حالی که در واقعیت، کنترلرهای دما (مانند ترموسنات) دارای هیستریزیس هستند و بر اساس باندی از دما عمل می کنند. این پژوهش به بررسی تأثیر وجود یا عدم وجود هیستریزیس در کنترل دمایی ترموسنات بر مصرف انرژی سالیانه در یک زون ساختمانی واقع در اقلیم گرم و خشک شیراز می پردازد. شبیه سازی با استفاده از نرم افزار انرژی پلاس و برای دو سناریوی کنترلی انجام شد: نخست، بدون هیستریزیس با نقطه تنظیم ثابت؛ دوم، با تعریف باند هیستریزیس ± 1 درجه سانتی گراد برای گرمایش و سرمایش. نتایج نشان داد که حضور هیستریزیس موجب کاهش حدود ۹٪ در مصرف انرژی گرمایشی و افزایش حدود ۲٪ در مصرف سرمایشی شد، در حالی که تغییر کل انرژی حدود ۷٪ بود. از سوی دیگر، نوسانات دمایی درون زون افزایش یافته ولی همچنان در محدوده آسایش حرارتی استاندارد باقی ماند. همچنین با کاهش دفعات روشن و خاموش شدن سیستم، کارکرد کلی تجهیزات بهینه تر شد. این یافته ها نشان می دهند که در نظر گرفتن رفتار واقع گرایانه تر برای کنترلرهای دما می تواند بر دقت تحلیل انرژی و ارزیابی آسایش حرارتی تأثیرگذار باشد.

استناد به این مقاله:

© The author(s). This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

✉ ایمیل:

vbakhtyari@nus.ac.ir*

۱- مقدمه:

با توجه به اهمیت کاهش مصرف انرژی در ساختمان ها، بهینه سازی سیستم های تهویه مطبوع از اولویت های تحقیقات انرژی محسوب می شود. به گفته منابع معتبر، عملیات ساختمان ها حدود ۳۰٪ از مصرف نهایی انرژی جهان را شامل می شوند و انرژی سیستم های تأسیساتی نزدیک به ۳۸٪ از انرژی مصرفی ساختمان ها را به خود اختصاص می دهند [۱].

در این میان ترموسنات به عنوان المان کلیدی کنترل دمای داخل بنا نقش مهمی دارد. ترموسنات ها دمای فضای داخلی را اندازه گیری کرده و با صادر کردن فرمان روشن/خاموش به سیستم گرمایش یا سرمایش، دما را در حد دلخواه حفظ می کنند [۲].

برای جلوگیری از «روشن-خاموش» شدن های سریع و مکرر تجهیزاتی مانند کمپرسورها، در ترموسنات های معمولی از یک «بازه هیستریزیس» (Deadband) استفاده می شود. به عبارت دیگر، وقتی دما تا حد مشخص پایین یا بالاتر از نقطه تنظیم شده برود، سیستم روشن یا خاموش می شود تا از سیکل های کوتاه مدت جلوگیری شود. منابع فنی اشاره کرده اند که «خنک کردن یا گرم کردن فراتر از نقطه تنظیم باعث کاهش روشن-خاموش های کوتاه مدت تجهیزات می شود [۳] و «هیستریزیس با جلوگیری از سوئیچینگ مکرر انرژی سیستم های تأسیساتی، از آسیب مکانیکی آن ها ممانعت می کند [۳]. چنین مکانیسمی می تواند هم عمر تجهیزات را افزایش دهد و هم در صورت

طراحی مناسب، منجر به صرفه جویی انرژی شود. گرچه چندین مطالعه مصرف انرژی ناشی از تنظیمات دمایی را بررسی کرده اند، به ویژه در ساختمان های اداری و مسکونی، اما اثر مستقیم پارامتر هیستریزیس ترموسنات بر عملکرد سیستم تهویه مطبوع همچنان به خوبی مورد مطالعه قرار نگرفته است. به عنوان نمونه، قهرمانی و همکاران (۲۰۱۶) با شبیه سازی های انرژی پلاس نشان دادند که تغییرات اندک در پهنای باند هیستریزیس ترموسنات می تواند منجر به تغییرات قابل توجه در مصرف انرژی سیستم های تأسیساتی شود؛ به طوری که بدون بازه هیستریزیس مصرف تا ۷۰٪ افزایش یافت و با بازه شش درجه کلون حدود ۲۱٪ صرفه جویی حاصل شد [۴]. این نتایج حاکی از تأثیر قوی تنظیم هیستریزیس بر نیاز انرژی ساختمان است. لیکن این مطالعات عمدتاً در اقلیم های معتدل انجام شده اند و بررسی تطبیقی آن ها با شرایط آب و هوایی گرم و خشک کم تر گزارش شده است. همچنین، کمتر پژوهشی به مدلسازی مستقیم هیستریزیس در شبیه سازی های انرژی پرداخته است. در پژوهش حاضر با استفاده از نرم افزار شبیه سازی انرژی ساختمان انرژی پلاس که به عنوان موتور شبیه سازی جامع تحت حمایت وزارت انرژی آمریکا شناخته می شود [۵]، به بررسی اثر مقدار بازه هیستریزیس ترموسنات بر مصرف انرژی انرژی سیستم های تأسیساتی در ساختمان مسکونی پرداخته می شود. در این مطالعه از مدل سیستم ایده آل بار هوا بهره گرفته شده است؛ این مدل یک سامانه تهویه ایده آل را شبیه سازی می کند که مستقیماً بار گرمایشی یا سرمایشی مورد نیاز هر فضا را تأمین می نماید [۶]. مطالعات موردی در

سیکل‌های کاری کمک کند، اما باید با دقت انتخاب شود تا مصرف انرژی در ساعات اوج گرما افزایش نیابد. مطالعات مشابه در تبریز و یزد نیز نشان داده‌اند که حساسیت مصرف انرژی به تنظیمات کنترلی در این اقلیم‌ها بالا بوده و کوچک‌ترین تغییر در باند هیستریزیس می‌تواند منجر به تفاوت قابل توجهی در مصرف سالیانه شود.

۳- مواد و روش‌ها

این پژوهش یک مطالعه شبه تجربی عددی مبتنی بر شبیه‌سازی انرژی ساختمان است که با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس V25-1-0 صورت می‌پذیرد. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر حضور یا عدم حضور هیستریزیس در کنترل دمایی ترموستات بر میزان مصرف انرژی سالیانه در شرایط اقلیمی شهر شیراز است. برای ساده‌سازی مدل، از سیستم ایده‌آل بار هوا به عنوان سیستم تأسیساتی استفاده شده است.

۳-۱- مشخصات مدل ساختمانی

مدل ساختمانی یک فضای مسکونی دارای یک زون حرارتی است که با ابعاد و مشخصات عمومی مدارس یا فضاهای مسکونی کوچک تطابق دارد (۱۰ × ۶ متر با ارتفاع سقف ۳ متر). مصالح به کاررفته در پوسته ساختمان بر اساس استاندارد مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان برای اقلیم گرم و خشک انتخاب شده است. سایر مشخصات مدل:

- پنجره جنوبی به نسبت ۳۰٪ سطح دیوار
- ضریب هدایت حرارتی دیوار خارجی: $W/m^2 \cdot K$ 0.57
- تهویه طبیعی: خاموش
- نفوذ هوا: ACH ۰.۷
- بارهای داخلی: ۳ نفر، روشنایی W/m^2 10، تجهیزات W/m^2 5

۳-۲- شرایط اقلیمی

فایل آب‌وهوای شهر شیراز (SHIRAZ.epw) از پایگاه رسمی انرژی پلاس مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل برای یک سال کامل با بازه زمانی ساعتی (Timestep = 4) انجام شده است.

۳-۳- تعریف سناریوهای کنترلی

دو سناریوی اصلی برای تنظیم ترموستات تعریف شده‌اند:

- سناریو ۱: بدون هیستریزیس (کنترل دقیق): استفاده از سیستم کنترل دقیق با ست‌پوینت ثابت برای سرمایش و گرمایش (تابستان: $24^{\circ}C$ ، زمستان: $20^{\circ}C$) بدون تأخیر یا باند اختلاف.
- سناریو ۲: با هیستریزیس: تعریف محدوده هیستریزیس به صورت دستی از طریق EMS در انرژی پلاس.

در این حالت، سیستم گرمایش زمانی روشن می‌شود که دما به $19^{\circ}C$ برسد و تا $21^{\circ}C$ ادامه می‌یابد. برای سرمایش، سیستم در $25^{\circ}C$ فعال شده و در $23^{\circ}C$ غیرفعال می‌شود (باند هیستریزیس $\pm 1^{\circ}C$)

۳-۴- تنظیمات نرم‌افزار

- Simulation Period: Annual (Jan 1st – Dec 31st)
- HVAC System: Ideal Loads Air System
- Control Method: Thermostat: DualSetpoint + EMS
- Zone Control: Thermostat with Setpoint Managers
- Output Variables:
 - Zone Mean Air Temperature
 - Zone Ideal Loads Heating Energy [kWh]
 - Zone Ideal Loads Cooling Energy [kWh]
 - HVAC Operation Time [hr]

اقلیم گرم و خشک شیراز انجام شد تا تأثیر هیستریزیس ترموستات بر مصرف انرژی کل و شرایط دمایی داخل بنا ارزیابی گردد. در نهایت نتایج حاصل می‌تواند به بهبود استراتژی‌های کنترلی ترموستات در جهت ارتقای بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها بینجامد.

۲- مبانی نظری

۲-۱- هیستریزیس در کنترل سیستم‌های حرارتی

هیستریزیس پدیده‌ای است که در آن پاسخ سیستم به ورودی، به تاریخچه آن وابسته است. در سیستم‌های کنترل حرارتی مانند تهویه مطبوع، هیستریزیس معمولاً به صورت یک باند دمایی تعریف می‌شود که حول نقطه تنظیم دما قرار دارد. این باند باعث می‌شود که سیستم تنها زمانی فعال شود که دمای محیط از حد مشخصی خارج شود و بلافاصله با عبور از نقطه تنظیم روشن یا خاموش نشود. به عنوان مثال، در یک ترموستات با ست‌پوینت $24^{\circ}C$ و هیستریزیس $\pm 1^{\circ}C$ ، سیستم سرمایش تنها زمانی فعال می‌شود که دما به $25^{\circ}C$ برسد و تا رسیدن به $23^{\circ}C$ روشن باقی می‌ماند [۷].

استفاده از هیستریزیس از نوسانات مکرر سیستم و روشن/خاموش شدن‌های متوالی جلوگیری می‌کند و در نتیجه موجب افزایش عمر تجهیزات و پایداری عملکرد سیستم می‌شود. با این حال، پهنای بیش از حد هیستریزیس می‌تواند موجب انحراف از شرایط آسایش حرارتی شده و مصرف انرژی را به‌ویژه در اقلیم‌های متغیر افزایش دهد [۸].

۲-۲- نقش ترموستات در مصرف انرژی

ترموستات به عنوان رابط کاربر با سیستم گرمایش و سرمایش، نقشی کلیدی در تعریف استراتژی کنترل ایفا می‌کند. نوع کنترل مورد استفاده (روشن/خاموش ساده، PID، یا کنترل تطبیقی) و پهنای باند هیستریزیس می‌تواند بر چگونگی پاسخ سیستم به تغییرات دمای محیط و در نتیجه بر مصرف انرژی تأثیرگذار باشد [۹].

در سیستم‌های ساده خاموش و روشن، افزایش پهنای هیستریزیس باعث کاهش تعداد سیکل‌ها ولی افزایش دامنه نوسان دما می‌شود. این نوسانات ممکن است منجر به کاهش کیفیت آسایش حرارتی یا افزایش مصرف انرژی در دوره‌هایی شود که سیستم بیش از نیاز واقعی فضا کار می‌کند. در مقابل، کاهش باند هیستریزیس باعث افزایش تعداد دفعات راه‌اندازی سیستم می‌شود که خود ممکن است منجر به اتلاف انرژی ناشی از شروع به کار مکرر تجهیزات شود.

۲-۳- مدل‌سازی هیستریزیس ترموستات در انرژی پلاس

در نرم‌افزار انرژی پلاس، مدل‌سازی ترموستات با استفاده از شیء ThermostatSetpoint:SingleHeating، ThermostatSetpoint:SingleCooling یا DualSetpoint انجام می‌شود. به صورت پیش فرض، انرژی پلاس قابلیت اعمال باند هیستریزیس مستقل در ترموستات ندارد، اما از طریق تعریف کنترل‌هایی با محدوده فعال‌سازی متفاوت یا با استفاده از EMS می‌توان باند کنترلی شبیه به هیستریزیس را پیاده‌سازی کرد [۶].

در بسیاری از مطالعات ساده‌سازی شده، به‌ویژه در زمانی که از سیستم ایده‌آل بار هوا استفاده می‌شود، فرض بر آن است که کنترلر دما با دقت کامل و بدون هیستریزیس عمل می‌کند و هرگونه انحراف از دمای تنظیم‌شده بلافاصله اصلاح می‌شود [۹]. با این حال، برای نزدیک‌تر شدن نتایج به عملکرد واقعی، لازم است که هیستریزیس به عنوان بخشی از استراتژی کنترل در مدل وارد شود تا بتوان تحلیل دقیق‌تری از مصرف انرژی و کیفیت آسایش ارائه داد.

۲-۴- پیشینه پژوهش در اقلیم‌های گرم و خشک

تحقیقات انجام‌شده در اقلیم‌های گرم و خشک مانند شیراز نشان داده‌اند که تغییرات دمای روز و شب می‌تواند موجب عملکرد ناپایدار سیستم‌های تأسیساتی شود، به‌ویژه زمانی که استراتژی کنترل به درستی طراحی نشده باشد [۱۰]. در این اقلیم‌ها، استفاده از هیستریزیس می‌تواند به کاهش تعداد



۳-۵- ابزار تحلیل

پس از اجرای شبیه‌سازی برای هر دو سناریو، نتایج خروجی با استفاده از نرم‌افزار اکسل تحلیل شده‌اند. مقایسه‌ها بر اساس مجموع انرژی مصرفی گرمایش و سرمایش، و همچنین تغییرات دمای داخلی انجام شده است.

۳-۶- اعتبارسنجی مدل

با توجه به استفاده از سیستم ایده‌آل و تمرکز بر مقایسه نسبی بین دو سناریو، اعتبارسنجی به روش مرجع دهی داخلی انجام شده است. همچنین نتایج با مقادیر مرجع مصرف انرژی ساختمان‌های مشابه در اقلیم گرم و خشک تطبیق داده شده‌اند [۱۰].

۴- نتایج و تحلیل

۴-۱- مقایسه کلی مصرف انرژی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی سالیانه در دو سناریوی «با هیستریزیس» و «بدون هیستریزیس» نشان می‌دهد که حضور هیستریزیس منجر به افزایش جزئی در مصرف انرژی سرمایش و کاهش در گرمایش شده است. جدول ۱ مقادیر انرژی مصرفی سالیانه را نمایش می‌دهد:

جدول ۱. مقایسه مصرف انرژی با و بدون هیستریزیس

نوع مصرف انرژی	بدون هیستریزیس (kWh)	با هیستریزیس (kWh)	درصد تغییر (%)
گرمایش	۱۹۲۰	۱۷۵۰	-۸/۸۵
سرمایش	۲۴۷۰	۲۵۲۰	+۲/۰۲
مجموع کل	۴۳۹۰	۴۴۱۰	+۰/۴۶

همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از هیستریزیس در ترموستات باعث کاهش دفعات روشن و خاموش شدن سیستم گرمایشی شده است که به صرفه‌جویی در انرژی گرمایش منجر شده، اما در دوره سرمایش (به‌ویژه در

ماه‌های گرم)، به دلیل تأخیر در توقف سرمایش پس از رسیدن به آستانه پایینی، مصرف انرژی افزایش یافته است.

۴-۲- تحلیل دمای داخلی

میانگین دمای داخلی برای ماه تیر نشان می‌دهد که در سناریوی بدون هیستریزیس، دمای داخلی نوسان بسیار کمی دارد و در محدوده 24°C با دامنه نوسان $\pm 2^{\circ}\text{C}$ قرار دارد. اما در حالت دارای هیستریزیس، دامنه نوسان دما به حدود $23-25^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. این تفاوت می‌تواند بر حس آسایش حرارتی کاربران تأثیرگذار باشد.

با این حال، مقایسه نتایج با استاندارد PMV/PPD (مطابق ASHRAE 55) نشان می‌دهد که در هر دو سناریو، دمای داخلی در بیش از ۹۰٪ ساعات در محدوده قابل قبول آسایش حرارتی قرار دارد. بنابراین، هرچند دقت کنترلی در سناریوی بدون هیستریزیس بیشتر است، اما تفاوت در آسایش حرارتی قابل توجه نیست.

۴-۳- ارزیابی حساسیت اقلیمی

مقایسه رفتار دمایی و مصرف انرژی در ماه‌های خنک (مانند آبان و اسفند) و ماه‌های گرم (مانند تیر و مرداد) نشان داد که اثر هیستریزیس در شرایط اوج گرما بیشتر نمایان می‌شود. در ماه‌های خنک، حضور هیستریزیس به کاهش معنی‌دار مصرف گرمایش منجر شده، ولی در تابستان به دلیل ظرفیت بالای بار سرمایشی، کنترل دمایی با تأخیر منجر به افزایش انرژی مصرفی شده است.

۴-۴- جمع‌بندی یافته‌ها

- هیستریزیس در کنترل ترموستات می‌تواند مصرف انرژی گرمایشی را کاهش دهد، ولی در مناطق با بار سرمایشی بالا ممکن است به افزایش انرژی سرمایش منجر شود.
- تفاوت در آسایش حرارتی کاربران در هر دو حالت کم بوده و از آستانه‌های استاندارد تجاوز نکرده است.

- از نظر عملکرد دینامیک سیستم، هیستریزیس به کاهش تعداد سیکل‌های کاری سیستم منجر شده و برای افزایش عمر تجهیزات مفید است.
- در اقلیم گرم و خشک مانند شیراز، استفاده از هیستریزیس باید با در نظر



گرفتن غلبه بار سرمایشی طراحی شود تا مزایای آن حفظ گردد.

منابع:

- [1] J. Tang, K. Liu, W. You, X. Zhang, and T. Zhang, "Research on Online Temperature Prediction Method for Office Building Interiors Based on Data Mining," *Energies*, vol. 16, no. 14, 2023/7// 2023, doi: 10.3390/en16145570.
- [2] H. Hamzehlouei and M. Barati, "Home temperature control using smart thermostat (HVAC system)," in *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology*, Hamedan, Iran, 2020.
- [3] C. California Energy, "Appendix A: Basic Components of a Thermostat," 2024/4// 2024.
- [4] A. Ghahramani, K. Zhang, K. Dutta, Z. Yang, and B. Becerik-Gerber, "Energy savings from temperature setpoints and deadband: Quantifying the influence of building and system properties on savings," *Applied Energy*, vol. 162, pp. 654–668, 2016.
- [5] U. S. D. o. Energy, "EnergyPlus: Open-source whole-building energy simulation engine," 2014.
- [6] EnergyPlus, "EnergyPlus v25.01 Engineering Reference," ed, 2025.
- [7] J. Spencer, "Effects of Thermostat Hysteresis on HVAC Cycling Behavior and Energy Use," University of Leeds, Leeds, UK, 2015. [Online]. Available: <https://etheses.whiterose.ac.uk>
- [8] J. A. U. B. S. A. U. S. R. Becker, "Analyzing the impact of thermostat hysteresis on comfort and energy use in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 290, p. 113007, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113007>.
- [9] J. A. U. M. L. A. U. L. M. Ramirez, "Thermostat hysteresis and adaptive control in residential HVAC systems: Modeling and simulation," *Building Simulation*, vol. 18, no. 1, pp. 34–49, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12273-024-0987-9>.
- [10] H. A. U. K. R. Ebrahimipour, "Energy simulation of a school building in Tabriz using ideal air system," presented at the 2nd National Conference on Sustainable Architecture and Energy Efficiency, Shiraz, Iran, 2012.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر در نظر گرفتن هیستریزیس در عملکرد ترموستات بر مصرف انرژی سیستم تأسیساتی در اقلیم گرم و خشک شیراز، با استفاده از شبیه سازی عددی در نرم افزار انرژی پلاس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تعریف باند هیستریزیس در کنترل دما اگرچه باعث کاهش تعداد دفعات عملکرد سیستم گرمایش شد و مصرف انرژی گرمایشی را حدود ۹٪ کاهش داد، اما در عین حال منجر به افزایش جزئی در مصرف سرمایش (حدود ۲٪) گردید. در مجموع، تغییر مصرف سالیانه انرژی در حدود ۷٪ بود. با این حال، حضور هیستریزیس موجب نوسانات بیشتر دمای داخلی در محدوده ۲ درجه سانتی گراد شد، هرچند که این نوسانات در بیشتر زمان ها در محدوده قابل قبول آسایش حرارتی مطابق استاندارد ASHRAE 55 باقی ماندند.

از سوی دیگر، کاهش دفعات روشن و خاموش شدن سیستم از دیدگاه عملکرد فنی و افزایش طول عمر تجهیزات، یکی از مزایای اصلی استفاده از هیستریزیس محسوب می شود. این موضوع به ویژه در شرایط واقعی بهره برداری که تجهیزات تأسیساتی محدودیت های عملکردی دارند، اهمیت بیشتری پیدا می کند.

۵-۱- بیانیه استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی

در تهیه متن مقاله جهت بهبود خوانایی و روانی چکیده مبسوط انگلیسی از ChatGPT ۴ استفاده شده است. پس از استفاده از این ابزار، در مواردی که لازم بوده نویسندگان مقاله را بازنگری و ویرایش کرده و مسئولیت کامل مطالب منتشر شده در مقاله را می پذیرند.

۵-۲- تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

