

Assessment of thermal comfort in building with double-skin facades equipped with movable openings and phase-change materials during heat waves in Iran

Negin Aalami 

Postdoc Researcher, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran

Mahdieh Abravesh 

Assistant Professor, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran

(Corresponding Author)

E-Mail: abravesh@ut.ac.ir

Abstract

The rapid escalation of global temperatures and the increasing frequency, duration, and intensity of heatwaves have become defining environmental challenges of the 21st century. These phenomena pose severe risks to the liveability of cities and the health, productivity, and comfort of building occupants, particularly in regions characterized by arid and semi-arid climates with prolonged hot seasons. Rising ambient temperatures amplify the cooling demand in urban buildings, driving excessive electricity consumption, intensifying peak loads on national energy infrastructures, and indirectly contributing to further carbon emissions. Simultaneously, the reduction in outdoor thermal comfort exacerbates the urban heat island (UHI) effect, compounding the difficulty of maintaining habitable indoor environments through conventional mechanical systems. In response to these intertwined challenges, the field of architecture and building science has increasingly emphasized passive and adaptive design strategies that enhance thermal resilience without relying exclusively on energy-intensive systems. Among such strategies, innovations in the building envelope which mediates the most critical exchange of heat and air between interior and exterior environments are recognized as having the highest potential for impact. The double-skin façade (DSF), in particular, has emerged as a promising solution due to its ability to provide shading, facilitate natural ventilation, and regulate solar gain dynamically. However, conventional DSF systems often face significant drawbacks in hot climates: during periods of intense solar radiation, the air cavity between the two layers can overheat, turning into a heat trap and driving unwanted warm air into the occupied space when ventilation openings are activated. This phenomenon limits the DSF's cooling potential and can, paradoxically, increase indoor heat stress. To address this limitation, the present research introduces an adaptive movable DSF system integrated with Phase Change Materials (PCM) a hybrid passive strategy designed to absorb and store excess heat within the cavity during daytime and release it gradually during the cooler nighttime periods. PCM-based materials are well-documented for their high latent heat storage capacity, stability under repeated melting and solidification cycles, and compatibility with lightweight façade assemblies. By incorporating PCM panels into the ventilated cavity of a movable DSF, the system simultaneously enables thermal buffering and controlled shading, thereby mitigating the overheating of the air cavity and enhancing the effectiveness of nighttime natural ventilation. The primary objective of this study is to evaluate the thermal performance and comfort implications of such a hybrid DSF-PCM configuration under realistic heatwave conditions. The research adopts a parametric simulation approach, integrating advanced modelling tools including Rhinoceros 7, Grasshopper (with the Ladybug and Honeybee plugins), and EnergyPlus as the core thermal engine. This workflow allows seamless coupling between parametric geometry manipulation and high-resolution computational simulations. The simulation environment was designed to capture transient thermal behaviour under variable boundary conditions, representing the diurnal fluctuations typical of heatwave events. Five representative cities in southern Iran including: Ahvaz, Bandar Abbas, Zahedan, Bushehr, and Abadan were selected as case studies. These cities exhibit distinct climatic patterns but share the

characteristic of prolonged exposure to extreme summer temperatures and high solar intensity. Heatwaves were defined according to national meteorological thresholds as periods of three or more consecutive days with maximum daily temperatures ≥ 35 °C. For each city, the most recent meteorological data from 2024 (in EPW format) were employed to ensure that the simulations reflect the evolving climatic conditions of the region. The reference model represents a single-zone residential space with internal dimensions based on the dimensional criteria defined in Part 4 of the Iran National Building Regulations (INBR, 2016b). The south-facing façade was modelled as the only external heat exchange surface, while the other walls, the floor, and the ceiling were treated as adiabatic. The movable DSF module containing PCM panels is designed as a portable system that can be temporarily installed over the window during the onset of extreme heat events and removed during moderate conditions to maintain daylight access. The performance evaluation relies on two internationally standardized comfort indices: Predicted Mean Vote (PMV) and Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), as defined by ASHRAE Standard 55. These metrics allow the quantification of human thermal comfort based on operative temperature, humidity, air velocity, and mean radiant temperature. In parallel, transient thermal simulations were used to track variations in indoor air temperature, heat flux across the envelope, and cavity air temperature profiles throughout 24-hour heatwave cycles. The results indicate that integrating PCM into the movable DSF substantially improved the indoor thermal environment under all climatic conditions analysed. During daytime hours, the PCM layer absorbed significant amounts of latent heat, reducing the peak indoor operative temperature by an average of 2.5–3.2 °C compared with the base model without PCM. At night, as outdoor temperatures decreased, the stored heat was released gradually, which stabilized the thermal profile and reduced temperature swings. The combined shading and latent heat storage effects led to an average reduction in total cooling energy demand of approximately 22–28%, depending on the city and the intensity of the heatwave. Notably, the analysis revealed that while the movable shading component primarily reduced direct solar radiation and surface heat gain, the PCM layer was responsible for dampening temperature fluctuations within the façade cavity and maintaining more uniform indoor conditions. In addition, the results demonstrated the ability of the movable DSF to maintain acceptable daylight levels, as the PCM panels used were semi-translucent in their melted state, allowing diffuse light penetrate while reducing glare. From a broader perspective, these findings reinforce the importance of integrating smart materials with adaptive architectural envelopes in hot-climate design. The PCM–DSF system not only mitigates short-term thermal stress during extreme events but also contributes to long-term energy resilience by reducing peak cooling loads and supporting passive comfort maintenance. Its modular and portable nature further enhances its applicability for retrofitting existing buildings, offering a cost-effective strategy for upgrading thermal performance without major structural interventions. In conclusion, the study underscores that movable double-skin façades incorporating PCM represent a forward-looking, scalable solution for climate-adaptive architecture. By combining latent heat storage, dynamic shading, and natural ventilation, such systems enable buildings to better withstand and adapt to the escalating impacts of climate change.

Keywords: Heat wave, movable double skin facade, parametric simulation, phase change materials, thermal comfort

فصلنامه علمی نامه معماری و شهرسازی، ۱۸(۵۱)، ۴۵-۶۷

DOI: 10.30480/aup.2026.6255.2356

نوع مقاله: پژوهشی

ارزیابی آسایش حرارتی در ساختمان‌های با جدار ثانویه مجهز به بازشوهای متحرک و مواد تغییر فازدهنده در دوره‌های موج‌های گرمایی در ایران

نگین اعلمی 

پژوهشگر پسادکتری معماری، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مهديه آبروش 

استادیار گروه فناوری معماری، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

E-Mail: abravesh@ut.ac.ir

چکیده

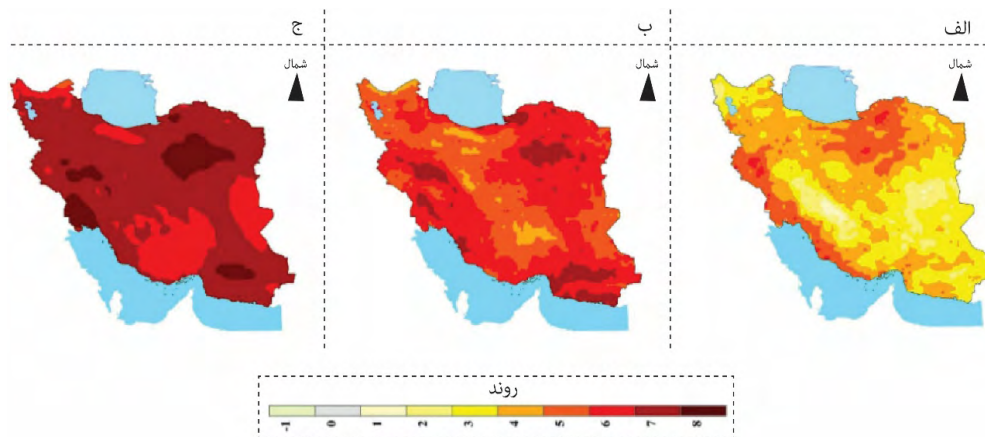
با افزایش دمای جهانی و گسترش موج‌های گرمایی، آسایش حرارتی ساکنان مناطق گرمسیر شهری با تهدید جدی مواجه شده است. در پاسخ به این چالش، بهره‌گیری از راهکارهای غیرفعال در طراحی معماری، به‌ویژه در نمای ساختمان، می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و بهبود شرایط حرارتی داخلی کمک کند. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد جدار ثانویه متحرک مجهز به مواد تغییر فازدهنده (PCM) در کاهش تنش حرارتی داخلی طی موج‌های گرما انجام شده است. با استفاده از شبیه‌سازی پارامتریک و براساس داده‌های اقلیمی سال ۱۴۰۳، پنج شهر گرمسیر ایران (اهواز، بندرعباس، زاهدان، بوشهر و آبادان) به‌عنوان نمونه انتخاب شدند. موج‌های گرما به‌صورت دوره‌های متوالی با دمای بیشینه روزانه برابر یا بالاتر از ۳۵ درجه سانتی‌گراد تعریف شده است. برای ارزیابی آسایش حرارتی، از شاخص‌های میانگین آرای پیش‌بینی‌شده (PMV) و درصد پیش‌بینی‌شده نارضایتی (PPD) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که جدار ثانویه مجهز به بازشوهای متحرک و مواد تغییر فاز دهنده در تمامی شهرها باعث بهبود محسوس تهویه طبیعی و کاهش شاخص‌های نارضایتی حرارتی گردیده است؛ به‌گونه‌ای که در بیش‌تر موارد، نارضایتی حرارتی به حدود ۲۰ درصد کاهش یافت که در چارچوب استاندارد ASHRAE 55 قرار دارد. یافته‌ها بر اهمیت تلفیق فناوری‌های نوین با طراحی اقلیم‌محور در ارتقای تاب‌آوری شهری و دستیابی به معماری پایدار در اقلیم‌های گرم تأکید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: موج گرمایی، جدار ثانویه متحرک، شبیه‌سازی پارامتریک، مواد تغییر فاز دهنده، آسایش حرارتی

مقدمه

رشد جمعیت و افزایش الگوهای مصرف از عوامل اصلی تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی محسوب می‌شوند. شواهد اقلیمی دهه‌های اخیر نشان می‌دهد که بسامد موج‌های سرمایی کاهش یافته و در مقابل، موج‌های گرمایی با روندی افزایشی رخ داده‌اند (Marx et al., 2021). برآوردها بیانگر افزایش میانگین دمای جهانی تا حدود ۱.۵ سانتی‌گراد در بازه ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۲ است (Fawzy et al., 2020).

بررسی‌های اقلیمی اخیر در ایران نشان می‌دهند که در مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی کشور، از جمله استان‌های خوزستان، هرمزگان، سیستان و بلوچستان و بوشهر، مواردی از موج‌های گرمایی شدید و طولانی‌مدت به ثبت رسیده است (Jangi et al., 2024). برای نمونه، شکل ۱ داده‌های سازمان هواشناسی ایران طی سال‌های ۱۳۵۱ تا ۱۴۰۲ را نشان می‌دهد که بیانگر موج گرمای بی‌سابقه در سال ۱۴۰۲ است. در این دوره رکورد دمایی چندین ایستگاه شکسته و در برخی شهرها دمای روزانه تا ۲۰ سانتی‌گراد بالاتر از میانگین بلندمدت ثبت شده است (Abadi et al., 2025). این نتایج حاکی از آن است که موج‌های گرما در ایران شدیدتر، زودتر آغاز شده، مدت طولانی‌تری ادامه یافته و با دماهای بالاتری همراه می‌شوند.



شکل ۱. نقشه‌های (الف): روند تغییرات فراوانی، (ب): مدت زمان، و (ج): شدت موج‌های گرمایی در ایران طی بازه زمانی ۱۳۵۱ تا ۱۴۰۲
منبع: Rezaee et al., 2025

تشدید گرمایش زمین و افزایش موج‌های گرما، ضرورت توجه به تغییر اقلیم و اجرای راهبردهای انرژی کارا و پاک را برجسته می‌سازد (Lobell & Field, 2007; Perkins & Alexander, 2013). در این راستا، رویکردهای اقلیمی در طراحی معماری می‌توانند با ایجاد آسایش حرارتی، به‌ویژه در ساختمان‌های پرتراکم، نقش پناهگاهی خنک را ایفا کرده و کیفیت زندگی را ارتقا دهند. همچنین این رویکردها با کاهش وابستگی به سامانه‌های سرمایشی، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند.

آسایش حرارتی در فضاهای داخلی تحت تأثیر عوامل متعددی نظیر دمای هوا، میزان رطوبت نسبی، دمای تابشی سطوح و سرعت جریان هوا قرار دارد. این متغیرها به‌صورت پیچیده‌ای با یکدیگر تعامل دارند و در شکل‌گیری ادراک حرارتی و حس آسایش ساکنان نقش مؤثری ایفا می‌کنند. در میان این عوامل، تهویه طبیعی نقش کلیدی دارد؛ چراکه با تسهیل تبادل هوای داخل و خارج، به تنظیم کیفیت و دمای هوای فضای داخلی کمک می‌کند (Taleghani et al., 2013). ورود هوای تازه بیرون و خروج هوای راکد درون ساختمان، از طریق تهویه طبیعی، می‌تواند به شکل قابل توجهی در حفظ شرایط مطلوب حرارتی مؤثر بوده و بر سلامت کاربران اثرگذار باشد. برای ارزیابی کمی آسایش حرارتی، مدل «میانگین آرای پیش‌بینی شده» (PMV) به همراه

شاخص «درصد پیش‌بینی شده ناراضیتی»^۲ (PPD) به کار گرفته می‌شود. این مدل‌ها با در نظر گرفتن عواملی چون دمای هوا، رطوبت و سرعت جریان هوا، درک بهتری از احساس حرارتی مورد انتظار کاربران و احتمال بروز ناراضیتی را فراهم می‌آورند. به کارگیری این شاخص‌ها، ابزاری مؤثر برای طراحی و مدیریت فضاهای داخلی به منظور ارتقای آسایش و رفاه کاربران محسوب می‌شود.

نماهای ساختمان ظرفیت بالقوه بالایی در مدیریت مصرف انرژی و تأمین آسایش حرارتی ساکنان دارد (Tong et al., 2021). یکی از محدودیت‌های اساسی عملکرد نماهای ساختمان، ناتوانی آن‌ها در پاسخگویی به شرایط متغیر اقلیمی و ترجیحات حرارتی کاربران است که به صورت پویا در طول روز و فصول تغییر می‌کنند. با این حال، طراحی مناسب پوسته‌های خارجی ساختمان می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری انرژی و ارتقای آسایش کاربران شود. از این منظر، نماهای واکنش‌گرا یا پاسخگو که در قالب نماهای دو پوسته معرفی می‌شوند این قابلیت را دارند که عملکرد خود را به صورتی متغیر، در طول زمان، براساس شرایط اقلیمی و نیازهای حرارتی ساکنان تنظیم کنند.

در این میان، استفاده از مواد تغییر فازدهنده^۳ به عنوان ذخیره‌ساز انرژی حرارتی^۴ یکی از کارآمدترین فناوری‌های غیرفعال در بخش مصالح ساخت در دهه‌های اخیر به شمار می‌رود. PCM‌ها قادرند با تغییر فاز در بازه دمایی معین، انرژی حرارتی را با چگالی بالا ذخیره کنند و در زمانی دیگر (هنگامی که شرایط گرمایی به تعادل رسید)، انرژی حرارتی را آزاد کرده و در اطراف خود تغییرات دمایی ایجاد کنند. این ویژگی منحصربه‌فرد به آن‌ها امکان می‌دهد تا در نقش جذب‌کننده گرمای خورشیدی برای کاهش بار سرمایشی یا جلوگیری از افزایش بیش‌ازحد دمای داخلی ایفای نقش کنند (Kitagawa et al., 2023). عملکرد PCM بدین صورت است که در هنگام افزایش دمای فضای بین‌دو جدار و عبور از نقطه ذوب ماده، گرمای خورشیدی را جذب کرده و در خود ذخیره می‌کند. با کاهش دمای فضای حفره، این انرژی ذخیره‌شده از طریق تهویه طبیعی آزاد می‌شود و تعادل حرارتی فضای داخلی را حفظ می‌کند. کاربرد PCM در جدار ثانویه متحرک ساختمان، در رده سامانه‌های نمای پاسخگو قرار می‌گیرد که امکان سازگاری با شرایط محیطی و بهبود هم‌زمان آسایش حرارتی و کارایی انرژی را فراهم می‌سازد (Aalami et al., 2026).

پژوهش‌های مختلفی در زمینه بررسی پدیده موج‌های گرمایی و آسایش حرارتی به عنوان مخاطره‌ای طبیعی در سال‌های اخیر انجام شده است. به عنوان مثال، لم^۵ و همکاران (2018) به اثرات تشدیدکننده موج‌های گرمایی در فضاهای داخلی فاقد تهویه مناسب اشاره کرده و بر ضرورت طراحی زمینه‌گرا و اقلیمی تأکید داشته است. مشکلات مرتبط با آسایش حرارتی افراد، اهمیت بهره‌گیری از مدل‌های مؤثر ارزیابی آسایش حرارتی را دوچندان می‌سازد. همچنین با تکیه بر مدل‌های بررسی آسایش حرارتی PMV و PPD که نخستین بار توسط فننگر^۶ (1973) معرفی شدند و در سناریوهای مرتبط با موج‌های گرمایی، ژو^۷ و همکاران (2020) و همکاران (2012) با استفاده از داده‌های اقلیم وضع موجود، محدودیت‌های استانداردهای آسایش حرارتی ایستارامورد بررسی قرار داده و بر ضرورت تدوین مدل‌های سازگار شونده با شرایط واقعی اقلیمی تأکید کرده‌اند. در خصوص پاسخگویی به این چالش‌ها، پیشرفت‌های قابل‌توجهی در راهبردهای طراحی غیرفعال و فناوری‌های پوسته ساختمانی و جدار ثانویه پاسخگو با هدف ارتقای آسایش حرارتی در دوره‌های موج گرما صورت گرفته است (Ji et al., 2021). در مرور راهکارهای سرمایش غیرفعال، به روش‌هایی نظیر سایه‌اندازی خورشیدی، بهبود عایق حرارتی و تقویت تهویه اشاره کرده که بدون نیاز به سامانه‌های مکانیکی، می‌توانند آثار گرما شدید را کاهش دهند. در این چارچوب، به کارگیری مواد PCM به عنوان یکی از روش‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی توجه بسیاری را به خود جلب کرده است (Santamouris et al., 2015). مزایای PCM را در ذخیره و آزادسازی انرژی در بازه‌های دمایی محدود شرح داده و نقش آن را در پایداری شرایط حرارتی فضای

داخلی مؤثر دانسته است. در همین راستا، اعلمی و همکاران (2026) نیز عملکرد سامانه‌های نمای پویا را بررسی کرده و نشان داده‌اند که طراحی نماهای دو پوسته به‌طور قابل توجهی موجب بهبود جریان هوا و کنترل تابش خورشیدی می‌شود. مجموعه این پژوهش‌ها مسیر رو به رشد به کارگیری سامانه‌های غیرفعال و انرژی‌کارا را در صنعت ساختمان نشان داده و بر لزوم به‌کارگیری آن‌ها در تاب‌آوری شهری تأکید می‌کند. بااین‌حال، مرور منابع موجود نشان می‌دهد که تاکنون هیچ مطالعه‌ای به‌طور خاص، تأثیر تلفیقی جدار ثانویه مجهز به PCM را بر عملکرد آسایش حرارتی در دوره‌های موج گرما مورد تحلیل قرار نداده و سازوکار مشخصی برای بررسی کارایی ساختمان‌ها در مواقع تشدید تنش‌های حرارتی تعریف نشده است.

این پژوهش با هدف کاهش مصرف انرژی و بهبود شرایط آسایش حرارتی، به دنبال بررسی رابطه میان آسایش حرارتی ساکنین و وقوع موج‌های گرمایی و بازتعریف سازوکاری محاسباتی در بررسی وضعیت حرارتی در طول مدت این موج‌های گرمایی است. همچنین هدف دیگر این مطالعه، ارزیابی کارایی جدار ثانویه متحرک به‌عنوان راهکاری غیرفعال در کاهش نارضایتی حرارتی و مقایسه آن با سناریوهایی است که فاقد چنین سامانه‌هایی‌اند. این مطالعه، پنج شهر گرمسیر ایران شامل اهواز، بندرعباس، زاهدان، بوشهر و آبادان را مورد بررسی قرار می‌دهد. برای دستیابی به این اهداف، از تحلیل جامع مبتنی بر تکنیک‌های پیشرفته محاسباتی بهره گرفته شده است؛ به‌طور مشخص، روش اجزای محدود هدایت حرارتی^۹ در ترکیب با ابزارهای طراحی پارامتریک سه‌بعدی مورد استفاده قرار گرفته است. با بررسی این ابعاد، پژوهش حاضر تلاش دارد دیدگاهی پایدار در خصوص اثربخشی مداخلات معماری در مدیریت آسایش حرارتی در شرایط رو به گسترش موج‌های گرمایی ارائه دهد و به تاب‌آوری ساختمان‌ها در زمان وقوع موج‌های گرمایی یاری رساند.

روش پژوهش

روش پژوهش در این تحقیق شامل دو مرحله اصلی است. در گام نخست، مدل پایه فضا به‌عنوان اتاقی با تهویه یک‌طرفه طراحی شد تا مبنای تمامی شبیه‌سازی‌ها برای ارزیابی آسایش حرارتی فراهم گردد. این مدل مرجع شرایط هندسی و حرارتی اتاق را مطابق با الزامات مبحث چهارم مقررات ملی ساختمان بازنمایی می‌کند. در گام دوم، سامانه پیشنهادی متحرک از طریق فرایند طراحی پارامتریک در محیط سه‌بعدی توسعه یافت. در این مرحله، جدار ثانویه به‌صورت پارامتریک تعریف و در ترکیب با لایه‌های PCM تعریف شدند تا عملکرد حرارتی نما در شرایط موج گرمایی شبیه‌سازی برای هر شهر به‌صورت جداگانه بررسی شود. کل فرایند مدل‌سازی، پیش‌پردازش، شبیه‌سازی حرارتی و تحلیل پس‌پردازش با استفاده از نرم‌افزارهای Grasshopper و Rhinoceros 7 در ترکیب با افزونه‌های انرژی‌کاری Ladybug Tools و موتور شبیه‌سازی EnergyPlus و همچنین پلاگین Python در محیط گرس‌هاپر در جهت تعریف رفتار حرارتی و شبیه‌سازی PCM انجام گرفت. این ترکیب نرم‌افزاری امکان اتصال مستقیم طراحی پارامتریک با شبیه‌سازی رفتار حرارتی و جریان هوا را فراهم ساخت. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت کمی از منظر شاخص‌های PMV و PPD در بازه زمانی وقوع موج‌های گرمایی تحلیل و مقایسه شدند.

مشخصات سامانه پیشنهادی

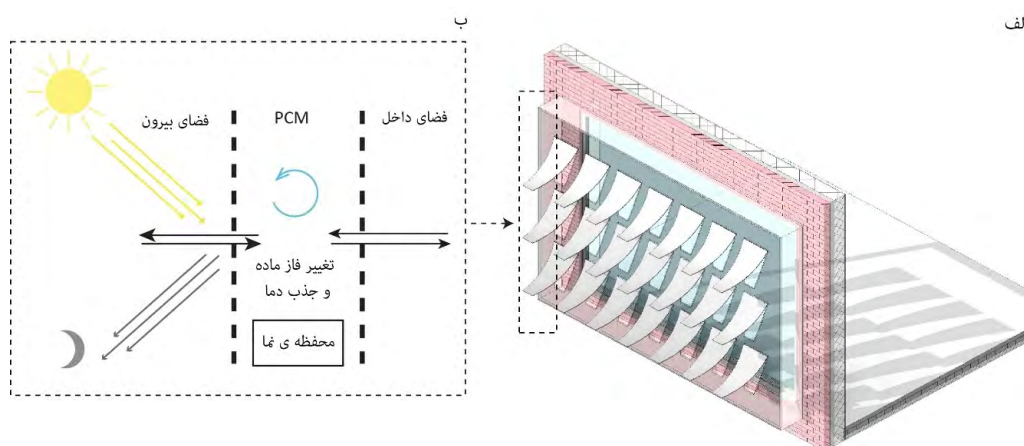
(شکل ۲، الف) شماتیک جدار ثانویه پاسخگو با بازشوهای متحرک با قابلیت جابه‌جایی را نشان می‌دهد که با PCM ترکیب شده تا عملکرد حرارتی سیستم را بهبود بخشد. نحوه آرایش و پیکربندی ورودی‌های هوا نقش کلیدی در کارایی این سامانه ایفا می‌کند. جدار ثانویه متحرک با قابلیت جابه‌جایی طراحی شده است

تا بتواند در دوره‌های خاص افزایش دمای محیط یا وقوع موج‌های گرمایی، بر روی یکی از پنجره‌های جنوبی فضا نصب گردد. در شرایط عادی که شدت تابش و دمای محیط در محدوده آسایش قرار دارد، سامانه از سطح نما جدا شده و پنجره امکان نورگیری مستقیم و تهویه طبیعی معمول را دارد.

این سامانه به صورت ماژولار و قابل جداسازی طراحی شده است. بدین معنا که پوسته دوم، شامل قاب متحرک و لایه PCM، به صورت واحدی مستقل بر روی نمای اصلی ساختمان نصب می‌شود و از طریق اتصالات مکانیکی خشک (نظیر ریل، بست‌های پیچی و سیستم‌های کلیپ‌شونده) به سازه نما متصل است. این رویکرد امکان نصب، جابه‌جایی و جداسازی سامانه را بدون ایجاد تغییرات دائمی در پوسته اصلی ساختمان فراهم می‌کند.

از منظر عملکردی، این قابلیت جداسازی پاسخ مستقیمی به تضادهای اقلیمی و نیازهای متغیر کاربران در فصول مختلف سال ارائه می‌دهد. در اقلیم‌های گرم، سامانه در دوره‌های موج گرمایی با هدف کاهش بار سرمایشی، جذب حرارت خورشیدی اضافی و بهبود تهویه طبیعی فعال می‌شود. در مقابل، در فصول معتدل یا سرد، که نیاز به حداکثر نور طبیعی و دریافت گرمای خورشیدی افزایش می‌یابد، سامانه می‌تواند به‌طور کامل یا جزئی از نما جدا شده یا به حالت غیرفعال درآید تا از کاهش نورگیری و افت گرمایش غیرفعال جلوگیری شود. از دیدگاه فنی، این انعطاف‌پذیری باعث می‌شود سامانه نه تنها به عنوان راهکار اقلیمی تک‌فصلی، بلکه به عنوان پوسته تطبیقی عمل کند که تعادل میان روشنایی، تهویه و کنترل حرارتی را در شرایط مختلف برقرار می‌سازد. علاوه بر این، طراحی مستقل سامانه، بدون آنکه نیاز به مداخله‌ای اساسی در نمای اصلی وجود داشته باشد، امکان به‌روزرسانی مصالح مانند تعویض نوع PCM یا تغییر هندسه بازشوها را در طول عمر ساختمان فراهم می‌کند.

از دیگر مشخصات ساختاری جدار ثانویه پیشنهادی می‌توان به ضلع مایل ذوزنقه‌ای راست به صورت شیب‌دار رو به پایین اشاره کرد. همچنین جدار ثانویه پیشنهادی در این پژوهش نمایی واکنش‌گرا است که قابلیت تنظیم عملکرد خود را براساس شرایط اقلیمی محیطی دارد. این امر به این سامانه اجازه می‌دهد تا در مواقع لزوم، تهویه طبیعی را با استفاده از بازشوهای خود آغاز یا متوقف کند. سازوکار حرکت در این نما از طریق هوشمندسازی بازشوهای نما است که در مواقع گرم سال و در هنگام قرارگیری بر روی پنجره، هوای بیرون را به داخل فضا هدایت می‌کند. در این صورت، دریچه‌های ورودی در صورت عبور گرمای خورشیدی از میانگین دمای روزهای گرم و وقوع موج گرمایی فعال شده، هوای بیرون وارد محفظه گردیده و تهویه طبیعی خودبه‌خود با عبور از جدار ثانویه در اتاق ایجاد می‌شود.



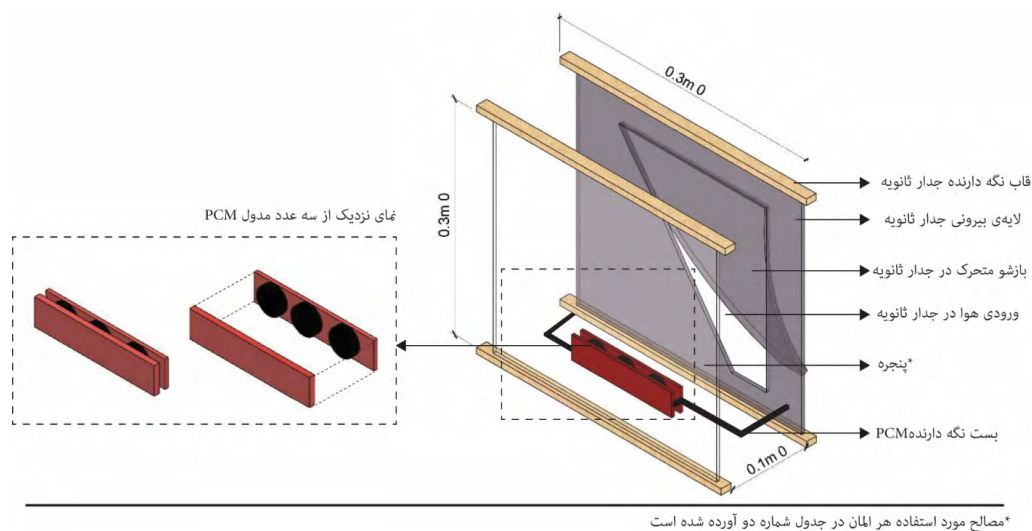
شکل ۲. طرح شماتیکی از جدار ثانویه پاسخگو، الف: جدار ثانویه با بازشوهای متحرک، ب: دیاگرام کارایی ماده PCM و ارتباط آن با جدار ثانویه پاسخگو

در (شکل ۲، ب) اجزای PCM به منظور جذب گرمای خورشیدی مازاد که در فضای حفره بین دو پوسته به دام افتاده طراحی شده‌اند و از انتقال این گرما به فضای داخلی مجاور جلوگیری می‌کنند. زمانی که دمای فضای حفره به زیر نقطه انجماد PCM برسد، گرمای ذخیره شده آزاد شده و از طریق روش‌های تهویه طبیعی یا مکانیکی از سیستم خارج می‌شود. در این رویکرد، آرایش طراحی شده ورودی‌ها، امکان ورود نسیم بیرونی به فضای حفره را فراهم می‌آورد. در ادامه، این فضا گرمای اضافی حفره را جذب کرده و باعث پیش‌سردسازی جریان هوا پیش از ورود به فضای داخلی می‌شود که این فرایندی در نهایت به کاهش نسبی دمای اتاق‌ها منجر خواهد شد. منظور از کاهش نسبی دمای اتاق، میزان افت دمای هوای داخلی در مقایسه با حالت پایه (مدل بدون جدار ثانویه و PCM) است که مقدار دقیق آن بسته به شهر و شدت موج گرمایی متفاوت خواهد بود.

سازوکار جدار ثانویه متحرک مجهز به PCM بر پایه تغییرات دمای هوای بیرونی طراحی شده است و در چرخه کامل ۲۴ ساعته‌ای عمل می‌کند. در طول روز به دلیل انباشت گرما در محفظه بین دو جدار در نماهای دوپوسته با بازشوهای متحرک (Aalami et al., 2024)، لایه PCM گرمای مازاد را جذب کرده و از انتقال مستقیم حرارت به فضای داخلی جلوگیری می‌نماید و انتقال هوای خنک از بیرون به داخل فضا از طریق پنجره صورت می‌گیرد. در شب، با کاهش دمای محیط بیرونی، این انرژی ذخیره شده، آزاد شده و از طریق تهویه طبیعی موجب برقراری تعادل حرارتی در فضای داخلی می‌شود.

مشخصات ماده تغییر فازدهنده (PCM) و نحوه استفاده از آن در جدار ثانویه

ماده تغییر فازدهنده PCM به کاررفته در این پژوهش غیرنورگذر و براساس مدل PCM‌های زیستی مقرون به صرفه و مدل معرفی شده بوسابا^{۱۴} (2018) طراحی و مدل سازی شده است. این کامپوزیت‌ها در قالب مدول‌هایی با ابعاد ۴۰×۴۰ سانتی متر و ضخامت مؤثر ۲۵ میلی متر در پایین ترین بخش ورودی‌های هوا و در مسیر جریان هوای عبوری در فضای بین دو جداره قرار گرفته‌اند تا حداکثر تماس حرارتی با جریان تهویه طبیعی فراهم شود (شکل ۳). ماده تغییر فازدهنده از نوع پارافینی آلی انتخاب گردیده است که دارای پایداری شیمیایی بالا، غیرخورنده، بی بو و سازگار با مصالح ساختمانی است. محدوده دمای ذوب و انجماد این ماده بین ۲۳ تا ۲۸ درجه سانتی گراد بوده و به گونه‌ای تعیین شده است که فرایند جذب و آزادسازی حرارت در محدوده دمای آسایش حرارتی ساکنان مطابق با استاندارد ASHRAE 55 انجام گیرد. ویژگی‌های ترموفیزیکی ماده شامل رسانایی حرارتی ۰/۲۵ W/m·K، چگالی ۸۵۰ kg/m³ و گرمای نهان ذوب تقریبی ۱۸۰ kJ/kg است. اتصال لایه‌های PCM به پوسته داخلی دوم نما از طریق قاب‌های آلومینیومی نازک با هدایت حرارتی بالا و درزبندی سیلیکونی انعطاف پذیر انجام شده است تا علاوه بر انتقال حرارت بهینه، امکان تعویض یا نگهداری دوره‌ای نیز فراهم گردد. این آرایش موجب می‌شود جدار ثانویه متحرک در چرخه ۲۴ ساعته با جذب حرارت در روز و آزادسازی آن در شب، تعادل حرارتی پایداری را در فضای داخلی ایجاد کند.



* مصالح مورد استفاده هر المان در جدول شماره دو آورده شده است

شکل ۳. طرح شماتیک از یک واحد جدار باز شونده نما و ارتباط آن با نحوه قرار گیری PCM

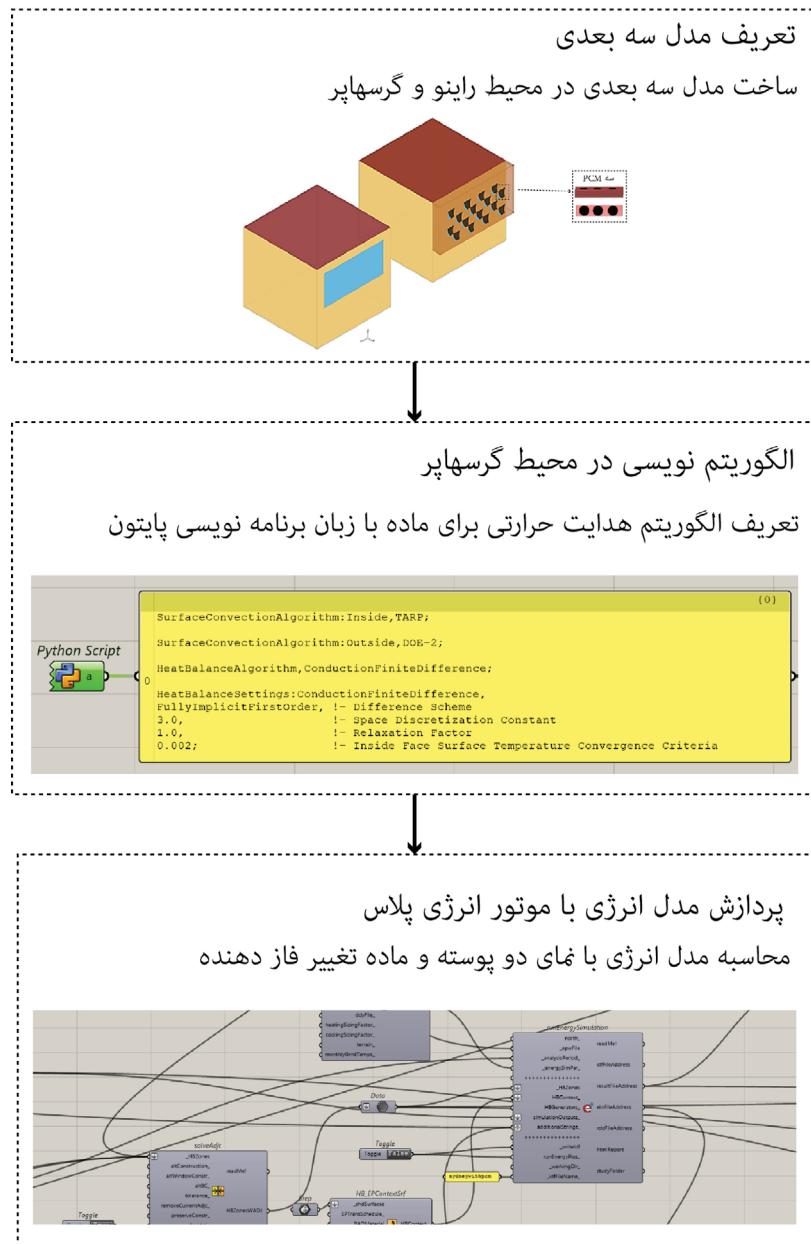
مدل سازی انرژی

مدل سه بعدی حرارتی این تحقیق در محیط سه بعدی نرم افزار راینو^{۱۱} و توسط افزونه گرس هاپر^{۱۲} به صورت پارامتریک ساخته شده است. مدل سازی نمای پاسخگو در محیط دسترسی آزاد گرس هاپر و نرم افزارهای انرژی آن که شامل ابزار لیدی باگ^{۱۳} است نقش مهمی در اتصال محیط برنامه نویسی گرس هاپر و نرم افزارهای پشتیبان آن مانند موتور انرژی پلاس^{۱۴} ورژن ۹٫۳٫۰ سال ۲۰۲۰، ترم^{۱۵} ورژن ۷٫۶٫۰ و ویندو^{۱۶} ورژن ۷٫۸ دارد (Loonen et al., 2017). استفاده از مجموعه طراحی انرژی لیدی باگ این امکان را می دهد که متغیرهای وابسته دما و رطوبت در فضای داخلی، بسته به تغییر موقعیت بازشوها و همچنین عملکرد مواد تغییر فاز دهنده محاسبه و بازیابی شوند که در این پژوهش، تمرکز بر روی متغیرهای مربوط به دما بوده است. در این صورت مدل انرژی می تواند تأثیر متغیرهای مستقل در این تحقیق مانند باز شدن بازشوها، وجود ماده تغییر فاز دهنده و حتی موقعیت قرارگیری ساختمان را در نظر گرفته و نسبت به آن میزان تغییر آسایش حرارتی را محاسبه نماید.

مدل سازی حرارتی و پارامتریک PCM نیاز به رابط کاربری میان محاسبه هدایت حرارتی و مدل سه بعدی دارد. وجود موتور انرژی پلاس به عنوان موتور پشتیبان در محیط گرس هاپر این امکان را می دهد تا با الگوریتم پایتون از روش اجزای محدود هدایت حرارتی و ادغام آن با انتالپی حرارتی میزان هدایت حرارتی در محفظه نما را محاسبه کرده و نتیجه محاسبه آن را به موتور انرژی پلاس داد. در نتیجه تغییرات دمایی در اقلیم مورد نظر تأثیر خود را بر روی ظرفیت حرارتی ماده در طول تغییر فاز و در نتیجه آن بر مؤلفه های آسایش حرارتی نشان می دهد. اولین مرحله در آماده سازی مدل حرارتی در این پژوهش، شامل طراحی سه بعدی جدار ثانویه در برگیرنده PCM به صورت پارامتریک بوده است. ماده PCM به صورت مدول های ۴۰×۴۰ سانتی متری در لبه های پایینی ورودی هوای جدار ثانویه و در مجاورت هوای ورودی محفظه طراحی شده است. به منظور دستیابی به بهینه ترین حالت عملکرد حرارتی، هر ورودی هوا به وسیله سه مدول PCM مجهز شده است.

در مرحله دوم، مدل انرژی اتاق برای هر پنج شهر به صورت مجزا نوشته شده است. این مرحله شامل تبدیل مدل سه بعدی به مدل انرژی است که مراحل انجام کار در شکل ۴ و داده های ورودی به نرم افزار در جدول ۱ آورده شده است. کد پایتون مربوط به ارتباط میان مدل اجزای محدود و موتور انرژی پلاس به صورت کامل

در پیوست الف ارائه شده است تا خوانندگان بتوانند آن را بازتولید و در محیط گرس هاپر مورد استفاده قرار دهند. در این خصوص، برای هر شهر یک مدل انرژی با طراحی جدار ثانویه ادغام شده با PCM و یک مدل انرژی بدون سیستم طراحی جدار ثانویه در نظر گرفته شده است که معیار مقایسه در ادامه پژوهش خواهد بود. به همین ترتیب تعداد بازه‌های زمانی^{۱۷} از ۶ به ۲۰ افزایش یافته است. گرچه این تنظیمات موجب افزایش قابل توجه در زمان اجرای شبیه‌سازی می‌شوند، اما با تقسیم‌بندی سطح‌ها براساس ضریب پخش حرارتی ماده و گام زمانی، امکان مدل‌سازی دقیق مواد خاص مانند PCM با مصالح با رسانایی حرارتی متغیر را فراهم می‌کنند. این تنظیمات به‌طور گسترده مورد اعتبارسنجی و تطابق تجربی قرار گرفته و انطباق قابل اطمینانی میان مدل عددی و داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده فراهم می‌سازند.



شکل ۴. گام‌های مدل‌سازی حرارتی ساختمان در طراحی نماهای جدار ثانویه ادغام شده با PCM

مشخصات مدل نمونه

فضای مورد مطالعه این پژوهش با داشتن کاربری مسکونی ابعاد داخلی برابر با ۳ متر (عرض) $\times$ ۳ متر (طول) $\times$ ۲/۸ متر (ارتفاع) و براساس مبحث چهارم مقررات ملی ساختمان ایران (INBR, 2022b) در نظر گرفته شده است. این ابعاد بر پایه ضوابط طراحی فضاهای قابل سکونت یک اتاق به عنوان جعبه‌ای زیستی تعیین شده‌اند، به گونه‌ای که عمق اتاق از ۲.۵ برابر ارتفاع سقف تجاوز نکند. بنابراین، طول ۳ متر برای فضایی ترکیبی شامل نشیمن، غذاخوری و آشپزخانه در نظر گرفته شده که حداقل ارتفاع سقف آن ۲/۸ متر و نسبت سطح پنجره به دیوار^{۱۸} ۳۰ درصد در نظر گرفته شده است. تهویه طبیعی از طریق بازشوهایی تأمین می‌شود که حداقل ۵٪ از مساحت کف فضا را پوشش دهند. جدول ۱ مشخصات کامل اتاق و پارامترهای پیش فرض مدل انرژی را ارائه می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات طراحی بررسی موردی پژوهش و پارامترهای ورودی به مدل انرژی

پارامتر	شرح
کاربری ساختمان	مسکونی - گروه الف و ب براساس مبحث چهارم مقررات ملی ساختمان ایران (INBR, 2022b)
ارتفاع اتاق	۲/۸ متر
طول اتاق	۳ متر
عرض اتاق	۳ متر
ارتفاع از زمین	۱ متر
ضخامت دیوار خارجی	۰/۱ متر
اندازه بازشو	۲*۲/۴
اندازه بارهای داخلی	براساس قبول مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان ایران (INBR, 2022a)
بار تجهیزات	W/m ² ۶/۸
نرخ تعویض هوا	m ³ /s-m ² ۰/۰۲
نرخ نفوذ هوا	cfm/sf ۰/۴
تعداد کاربران فضا	۴ نفر
سیستم HVAC	Ideal Air Load
حداکثر دمای مجاز داخلی برای تهویه طبیعی	۲۵

در مدل حرارتی حاضر، کلیه سطوح جانبی شامل دیوارهای شرقی، غربی، شمالی، کف و سقف، به صورت آدیاباتیک در نظر گرفته شده‌اند تا تبادل حرارت صرفاً از طریق دیوار جنوبی (محل استقرار جدار ثانویه و پنجره اصلی) مورد بررسی قرار گیرد. مشخصات فیزیکی جدارهای جنوبی و لایه‌های تشکیل دهنده آن در جدول ۲ ارائه شده است.

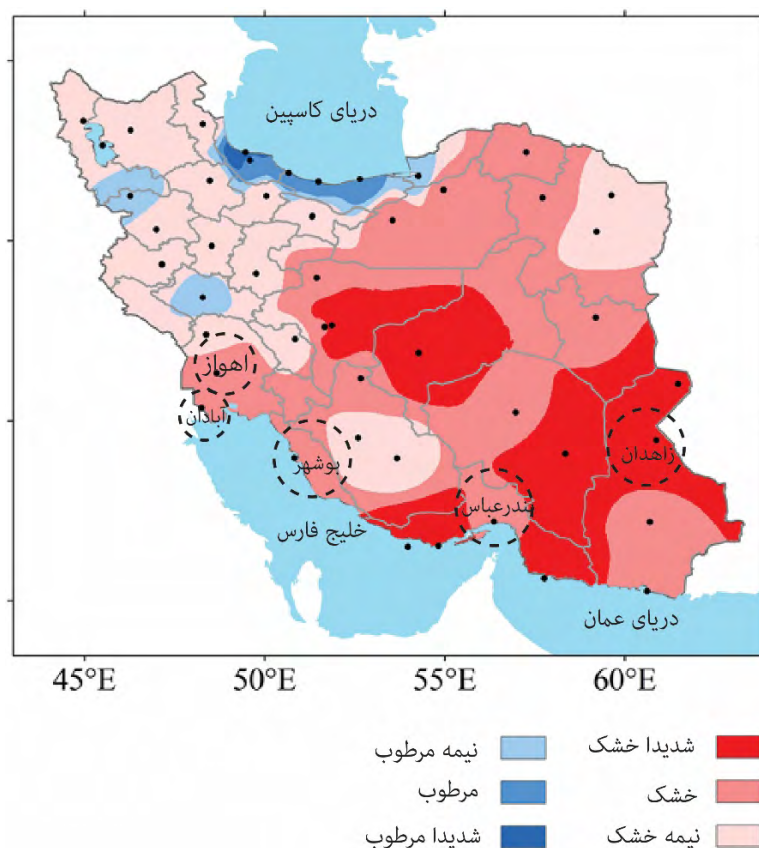
جدول ۲. مشخصات فیزیکی پنجره و جدارهای جنوبی

نوع جدار	مشخصات لایه‌های جدار	عبوردهی مرئی (Tvis)	ضریب جذب حرارت خورشیدی (SHGC)	ضریب انتقال حرارت کل U (W/m²·K)
پنجره	شیشه دوجداره (با گاز میان پر یا بدون آن) با قاب فلزی با گسست حرارتی یا قاب چوبی/ پلیمری (PVC, UPVC)	۰/۷۸	۰/۶۲	۲/۸۰
قاب و لایه بیرونی جدار ثانویه	قاب و پنل آلومینیومی	۰/۱۰	۰/۳۵	-
دیوار جنوبی	گچ داخلی آجر توخالی سفالی عایق حرارتی پلی یورتان اندود سیمانی خارجی	ضریب هدایت حرارتی λ (W/m·K)		۰/۴۲
		۰/۳۵		
		۰/۷۰		
		۰/۰۳		
		۰/۹۰		

شهرهای مورد مطالعه

پنج شهر واقع در مناطق اقلیمی گرم و خشک / گرم و مرطوب ایران به عنوان نمونه‌های مطالعاتی انتخاب شده‌اند. این انتخاب براساس داده‌های اقلیمی دسته‌بندی شده در شکل ۵ صورت گرفته که با استفاده از روش خوشه‌بندی وارد، اقلیم‌های ایران را بر پایه میانگین بارش‌های ماهانه و سالانه در طی سال‌های ۱۳۵۵-۱۳۹۲ طبقه‌بندی کرده است.

شهر اهواز، واقع در جنوب غرب ایران و در حاشیه رودخانه کارون، در منطقه اقلیمی خشک^{۱۹} قرار دارد. این منطقه دارای تابستان‌هایی بسیار گرم و زمستان‌هایی معتدل بوده و یکی از گرم‌ترین نقاط کشور محسوب می‌شود. بندرعباس در سواحل شمالی دریای عمان قرار دارد و با توجه به رطوبت بالا و دمای زیاد، در منطقه اقلیمی نیمه‌خشک^{۲۰} یا مرطوب محلی قرار می‌گیرد. ویژگی بارز این منطقه، ترکیب گرما و رطوبت بالای تابستان است که شرایط آسایش حرارتی را پیچیده‌تر می‌سازد. شهر زاهدان که در شرق کشور و در مجاورت مناطق کویری قرار گرفته، در طبقه‌بندی اقلیمی، در منطقه خشک و در مرز مجاورت با منطقه فوق‌العاده خشک^{۲۱} دیده می‌شود. دمای بالا در روز و اختلاف دمای محسوس با شب، از ویژگی‌های اقلیمی شاخص این منطقه است. بوشهر، دیگر شهر ساحلی در حاشیه خلیج فارس نیز در ناحیه نیمه‌خشک قرار دارد. رطوبت نسبی بالا، دمای متوسط بسیار زیاد در تابستان و تابش خورشیدی شدید، از مشخصه‌های اقلیمی آن است. در نهایت، آبادان، واقع در جنوب استان خوزستان و نزدیک مرز ایران و عراق، در ناحیه خشک با گرایش به فوق‌العاده خشک طبقه‌بندی می‌شود. این شهر نیز همانند اهواز، دماهای بالای تابستان و شدت تابش فراوان را تجربه می‌کند. این تقسیم‌بندی اقلیمی و موقعیت جغرافیایی شهرهای منتخب، زمینه‌ساز بررسی دقیق‌تر عملکرد جدار ثانویه مجهز به PCM در مواجهه با شرایط گرمایی حدی در مناطق مختلف ایران خواهد بود.



شکل ۵. نقشه مناطق اقلیمی ایران بر پایه روش خوشه بندی وارد، با استفاده از میانگین بارش ماهانه و سالانه در ۵۰ ایستگاه زمینی طی دوره ۱۳۵۵-۱۳۹۲

منبع: Alizadeh-Choobari & Najafi, 2017

جدول ۳. مشخصات اقلیمی، بارش و دمای موج های گرمایی در پنج شهر ایران

شهر	ایستگاه هواشناسی مرجع	رده بندی اقلیمی براساس میحث ۱۹ انرژی ساختمان	رده بندی اقلیمی کوپن-گایگر	منطقه اقلیمی براساس خوشه بندی وارد	میانگین بارش سالانه (میلی متر)	دوره موج گرما (نمونه سال ۱۴۰۲)	دمای بیشینه در موج گرما (°C)
اهواز	اهواز	0B	بیابانی گرم	خشک	۲۱۳	تیر (۱۷-۲۰)	۵۰٫۱
بندرعباس	بندرعباس	0B	بیابانی مرطوب	نیمه خشک	۱۸۰	مرداد (۴-۷)	۴۶٫۲
زاهدان	زاهدان	2B	بیابانی سرد	خشک / فوق العاده خشک	۱۰۳	تیر (۲۵-۲۸)	۴۲٫۰
بوشهر	بوشهر	1B	بیابانی گرم مرطوب	نیمه خشک	۲۶۵	مرداد (۱۰-۱۳)	۴۷٫۵
آبادان	ماهشهر	0B	بیابانی گرم	خشک	۱۵۰	تیر (۱۵-۱۷)	۵۱٫۰

منبع: Jangi et al., 2024

با هدف تحلیل شدت موج‌های گرمایی به‌عنوان داده‌های پایه مورد نیاز در مدل‌سازی انرژی، جدول 3 مشخصات پنج شهر ایران را از نظر اقلیم‌شناسی، بارندگی سالانه و شرایط دمایی در طول دوره‌های گرمای شدید ارائه می‌دهد. براساس طبقه‌بندی کوپن - گایگر و دسته‌بندی اقلیمی مبحث 19، تمامی این شهرها در محدوده اقلیم بیابانی گرم^{۲۲} قرار دارند؛ با این تفاوت که شهرهایی مانند بندرعباس و بوشهر به دلیل مجاورت با دریا، رطوبت نسبی بالاتری دارند و در رده اقلیم‌های نیمه‌خشک مرطوب طبقه‌بندی شده‌اند. مقادیر دمای بیشینه ثبت‌شده در موج‌های گرمایی سال ۱۴۰۲ نشان می‌دهد که شهرهایی نظیر آبادان و اهواز با دماهای بالای ۵۰ درجه سانتی‌گراد، جزو داغ‌ترین مناطق کشور محسوب می‌شوند. این درحالی است که میزان بارش سالانه در تمامی شهرهای مورد بررسی کم‌تر از ۳۰۰ میلی‌متر است که نشانگر کمبود رطوبت مطلق و پتانسیل بالا برای افزایش تنش حرارتی در فضای داخلی ساختمان‌هاست.

شاخص‌های آسایش: برآورد PMV و PPD

محاسبه PMV

به‌منظور سنجش تأثیر جدار ثانویه متحرک بر آسایش حرارتی کاربران در طول دوره‌های موج گرما، این پژوهش از شاخص‌های PMV و PPD که توسط فنگر معرفی شده‌اند، بهره گرفته است. این دو شاخص، دیدگاه‌های مکملی را در ارزیابی آسایش حرارتی ارائه می‌دهند: شاخص PMV حس حرارتی متوسط افراد را در مقیاسی هفت‌درجه‌ای از ۳- (خیلی سرد) تا ۳+ (خیلی گرم) پیش‌بینی می‌کند، درحالی‌که شاخص PPD درصد افرادی را که احتمالاً احساس نارضایتی حرارتی خواهند داشت، برآورد می‌کند. شاخص PMV براساس موازنه حرارتی بین بدن انسان و محیط پیرامون آن محاسبه می‌شود و متغیرهای زیر را در نظر می‌گیرد:

- دمای هوا (T_a) و دمای میانگین تابشی سطوح (T_{cl}) که به‌صورت دمای عملیاتی^{۲۳} در نظر گرفته می‌شوند؛
- سرعت جریان هوا (v_a) در ناحیه اشغال‌شده؛
- رطوبت نسبی (RH)؛
- نرخ متابولیک (M) که برای فعالیت‌های کم‌تحرك در نظر گرفته شده است؛
- پوشش لباس (I_{cl}) که برای لباس معمولی تابستانه برابر با ۰.۶ (clo) فرض شده است.

این ورودی‌ها در قالب مدل شش پارامتری مطابق با استاندارد ISO 7730 پردازش می‌شوند تا مقدار شاخص PMV به‌دست آید. جدول 4 پارامترهای ثابت مدل آسایش حرارتی را که در تمامی شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد.

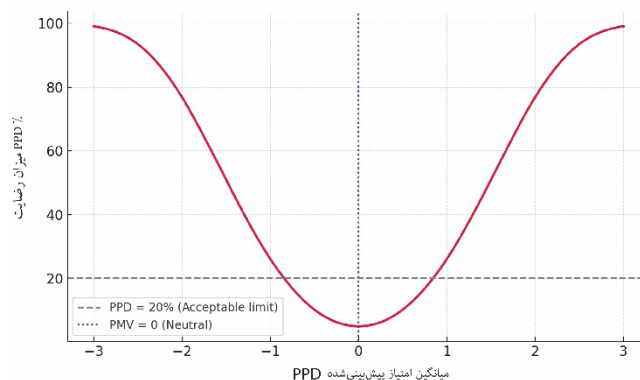
جدول ۴. مقادیر داده‌های آسایشی در پژوهش

پارامتر	واحد	میزان	نماینه
نرخ متابولیک	met	۱	M
پوشش	clo	۰.۶	Lcl
سرعت جریان هوا	m/s	۰.۲-۰.۱	v_a
رطوبت نسبی	%	۵۰	RH
دمای عملکردی	C°	براساس محاسبات رایانشی	T _{op}

محاسبه PPD

پس از محاسبه شاخص PMV، مقدار PPD از طریق رابطه شناخته شده‌ای به دست می‌آید که در معادله ۱ (Fanger, 1973) نمایش داده شده است:

شکل ۶ منحنی نظری PMV-PPD را براساس رابطه‌ی نمایی استاندارد 55 ASHRAE نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، حتی انحرافات اندک از وضعیت خنثی ($PMV = 0$) به سرعت منجر به افزایش درصد نارضایتی حرارتی می‌شود. در این مطالعه، شاخص PPD به‌عنوان معیاری برای تبدیل مقادیر شبیه‌سازی شده PMV به سطح پذیرش کاربران مورد استفاده قرار گرفته است؛ به‌طوری‌که مقدار $PPD \leq 20\%$ به‌عنوان آستانه قابل قبول آسایش حرارتی مطابق با استانداردهای 55 ASHRAE و EN 16798-1 در نظر گرفته شده است.



شکل ۶. منحنی نظری PMV-PPD براساس رابطه نمایی استاندارد 55 ASHRAE

بحث و تحلیل نتایج

این بخش به ارائه یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های حرارتی رفتاری جدار ثانویه متحرک و تأثیر آن بر آسایش حرارتی و مصرف انرژی ساختمان در پنج شهر ایران می‌پردازد. تمرکز اصلی بر ارزیابی تأثیر جدار ثانویه متحرک مجهز به PCM بر آسایش حرارتی ساکنان در شرایط موج گرمایی است. شاخص‌های میانگین آرای پیش‌بینی شده (PMV) و درصد پیش‌بینی شده نارضایتی (PPD) به‌عنوان معیارهای اصلی برای تحلیل آسایش درون ساختمانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این شاخص‌ها امکان بررسی کمی میزان رضایت حرارتی کاربران در شرایط دمایی حدی را فراهم می‌سازند. مطابق با روش ارائه شده در بخش‌های مشخصات مدل نمونه و شهرهای مورد مطالعه تحلیل‌ها بر مبنای بازه زمانی ۹:۰۰ تا ۱۸:۰۰ عصر یعنی ساعات اوج بار حرارتی که ساکنان بیش‌ترین مواجهه با گرما را در فضاهای داخلی و در طول دوره موج گرمایی تجربه می‌کنند انجام شده‌اند. مقایسه نتایج حاصل از نمای عادی (فاقد جدار ثانویه و PCM) با حالتی از ساختمان با جدار ثانویه متحرک مجهز به PCM، امکان بررسی دقیق نقش این سامانه در کاهش نارضایتی حرارتی و بهبود شرایط آسایش در هر شهر را فراهم می‌سازد. نتایج ارائه شده در ادامه به کاهش بار سرمایشی در صورت وجود سامانه دو جداره طراحی شده نیز می‌پردازد.

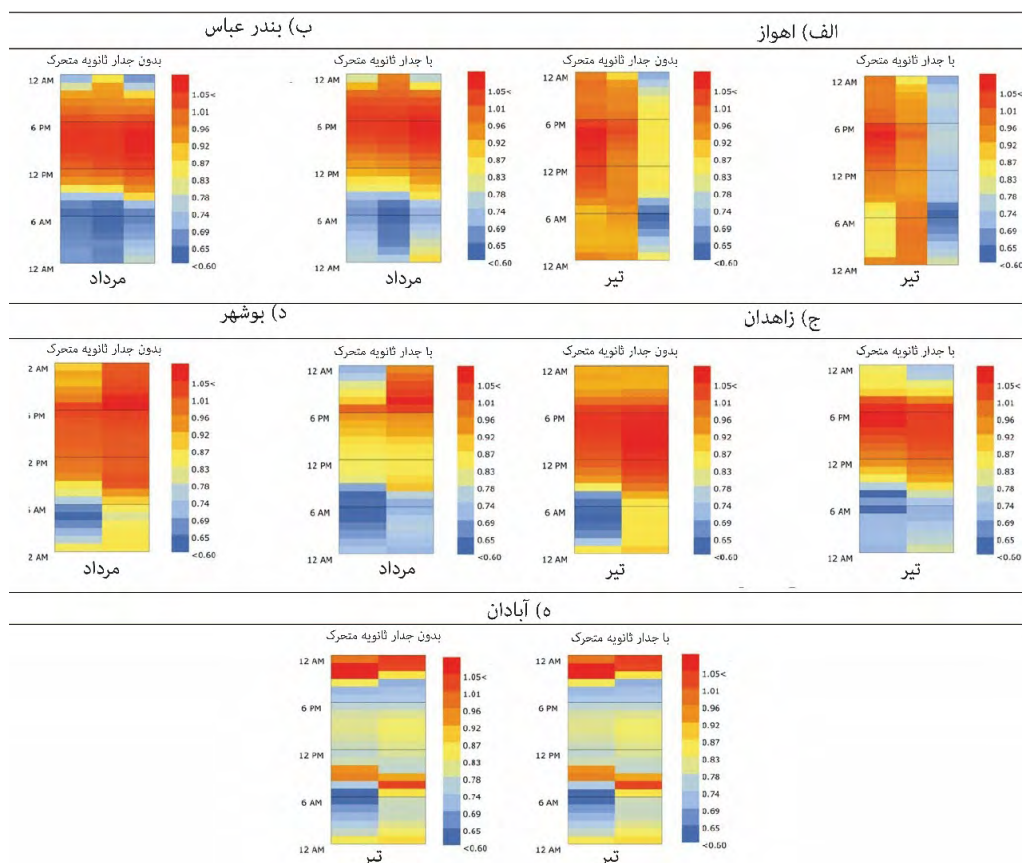
تأثیر نمای پیشنهادی بر شاخص حرارتی PMV

مقایسه شاخص PMV در دو سناریوی «با» و «بدون» جدار ثانویه متحرک مجهز به PCM برای پنج شهر

مورد مطالعه در شکل ۷ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حضور این سامانه موجب بهبود محسوس در گردش هوا و در پی آن، ارتقای شرایط آسایش حرارتی در ساعات اوج گرما شده است.

اثر جدار ثانویه متحرک در شهر اهواز، با اقلیم گرم و خشک و دمای اوج بیش از ۵۰ درجه، بیش از سایر شهرها مشهود است (شکل ۷، الف). در بازه موج گرمایی ثبت شده بین ۱۷ تا ۲۰ تیر، اعمال سامانه پیشنهادی منجر به کاهش شاخص PMV از مقدار $+1.4$ به $+1.15$ در ساعت ۱۷:۰۰ گردید. همچنین، در ساعت ۱۳:۰۰، مقدار PMV از $+1.2$ به $+1.0$ کاهش یافت.

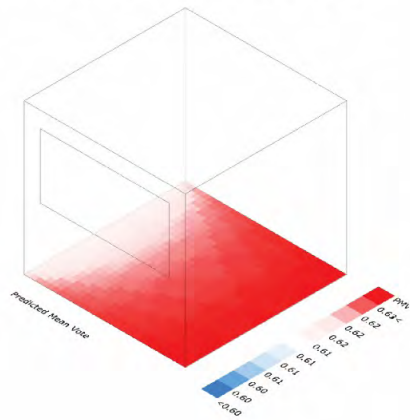
در شهر بندرعباس با اقلیم گرم و مرطوب و رطوبت نسبی بالا، اگرچه شدت گرما نسبت به اهواز کم‌تر است، اما ترکیب دما و رطوبت اثرگذار است (شکل ۷، ب). در موج گرمایی مرداد ماه، با اعمال جدار ثانویه، شاخص PMV در ساعت ۱۴:۰۰ از $+1.05$ به $+0.92$ کاهش یافت، که نشان‌دهنده بهبود شرایط آسایشی در شرایط رطوبت بالا است. در زاهدان که با اقلیم گرم و خشک کوهستانی و اختلاف دمای زیاد شب و روز مشخص می‌شود، بیش‌ترین بهبود در ساعات میانی روز مشاهده شد (شکل ۷، ج). در بازه ۲۵ تا ۲۸ تیر ماه، شاخص PMV در ساعت ۱۲:۰۰ از $+0.86$ به $+0.75$ کاهش یافت. شهر بوشهر نیز که دارای اقلیم گرم و مرطوب خلیجی است، در دوره موج گرمایی مرداد، کاهش متوسط PMV حدود ۰.۱ واحد را نشان داد (شکل ۷، د). به‌طور خاص در ساعت ۱۵:۰۰، مقدار PMV از $+1.02$ به $+0.90$ کاهش یافت که بیانگر تأثیر تهویه طبیعی و جذب گرمای PCM در تعادل دمای داخلی است. در نهایت، در آبادان، که موج گرمایی آن در تیر ماه با دمای ثبت شده بیش از ۵۱ درجه رخ داد، بیش‌ترین اثر جدار ثانویه بین ساعات ۱۱:۰۰ تا ۱۵:۰۰ مشاهده شد (شکل ۷، ه). در این بازه، شاخص PMV تا ۰.۲ واحد کاهش یافت که در محدوده‌های بسیار گرم، به‌ویژه برای ساعات بحرانی موج گرمایی، بهبود قابل توجهی مشاهده می‌شود.



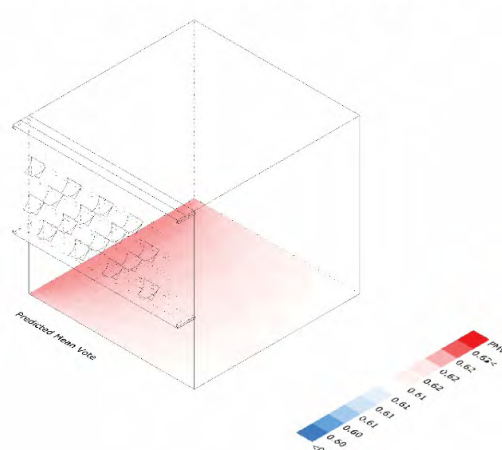
شکل ۷. تأثیر جدار ثانویه طراحی شده بر شاخص PMV در دوره‌های موج گرما برای شهرهای منتخب ایران. مقایسه نقشه آسایش: جدار ثانویه با بازشوهای متحرک طراحی شده با PCM در برابر حالت بدون PCM در شرایط موج گرما

جهت بررسی دمای سطوح براساس نمودار PMV برای شهر اهواز که دارای یکی از گرم‌ترین اقلیم‌های منطقه است، تحلیل دمای سطوح در صورت وجود نمای طراحی شده و مقایسه آن با حالت بدون جدار ثانویه متحرک انجام گرفته است (شکل ۸). نتایج تحلیل شاخص PMV در دمای سطوح برای این شهر نشان می‌دهد که در حالت بدون جدار ثانویه، مقدار PMV عمدتاً در محدوده مثبت و نزدیک به +۲ قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده شرایط بسیار گرم و عدم آسایش حرارتی است. با این حال، اضافه کردن جدار ثانویه موجب کاهش محسوس PMV شده و آن را به بازه آسایش حرارتی (بین ۰/۵- تا ۰/۵+) نزدیک می‌کند. این بهبود نه تنها کاهش دمای فضای داخلی را در پی دارد، بلکه از نفوذ مستقیم تابش خورشید جلوگیری کرده و شرایط محیط زیستی مطلوب‌تری را برای ساکنان فراهم می‌آورد. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که جدار ثانویه با کاهش بار حرارتی و ارتقای آسایش حرارتی، به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در طراحی پایدار ساختمان‌های مناطق گرم ایران به شمار می‌رود.

بررسی PMV بدون جدار ثانویه متحرک به همراه PCM



بررسی PMV با جدار ثانویه متحرک به همراه PCM



شکل ۸. مقایسه PMV دو حالت با جدار ثانویه متحرک به همراه PCM و بدون آن در شهر اهواز در طول موج گرمایی

تأثیر نمای پیشنهادی بر شاخص حرارتی PPD

باتوجه به تأثیر نمای پیشنهادی بر شاخص حرارتی PPD می‌توان دریافت اجرای جدار ثانویه متحرک بهبودی قابل قبولی در رضایت حرارتی در طول دوره‌های گرمای شدید ایجاد کرده است که این امر با کاهش درصد نارضایتی پیش‌بینی شده (PPD) ساکنین در هر پنج شهر ایران مشهود است. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، میانگین مقادیر PPD در طول ساعات اوج شدت موج‌های گرمایی در سناریوی با جدار ثانویه در مقایسه با حالت مرجع (بدون جدار ثانویه) به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. این مقادیر با استفاده از مدل آسایش که در قسمت قبل معرفی گردیده در محیط نرم‌افزار مدل‌سازی شده و با فرض سطح فعالیت استاندارد داخلی (۱.۲ مت) و عایق لباس (۰.۷ کلو) به دست آمده‌اند. روند مشاهده شده در جدول ۵ نشان می‌دهد که تمامی پنج شهر اهواز، بندرعباس، زاهدان، بوشهر و آبادان با اعمال سیستم جدار ثانویه متحرک کاهش قابل توجهی در میانگین PPD در ساعات اوج شدت گرمایی تجربه کرده‌اند. این بهبود در شهرهای اهواز، زاهدان و آبادان که دمای اوج بیرونی و شدت تابش خورشیدی در طول دوره گرمای شدید بیش‌تر بوده، بارزتر است. در این موارد، جدار ثانویه درصد نارضایتی را به میزان ۲۵ تا ۲۶ درصد کاهش داده و نارضایتی حرارتی را تقریباً به نصف رساند. بندرعباس نیز کاهش محسوسی را ثبت کرده است، به‌طوری‌که PPD از ۴۸ درصد به ۲۲ درصد کاهش یافت. شایان ذکر است، حتی در شرایط اقلیمی نسبتاً متعادل‌تر بوشهر، جدار ثانویه طراحی شده درصد نارضایتی را از ۴۲ درصد به ۱۸ درصد رساند که این امر بر اثربخشی آن، حتی در محیط‌هایی که کم‌تر در معرض موج‌های شدید گرمایی‌اند، تأکید می‌کند. این کاهش‌های مداوم در مناطق اقلیمی مختلف، منعکس‌کننده قابلیت‌های تعدیل غیرفعال مناسب جدار ثانویه متحرک شامل PCM است.

جدول ۵. مقایسه میزان PPD در حالت بدون جدار ثانویه متحرک و با جدار ثانویه در طول موج‌های گرمایی پنج شهر ایران

شهر	PPD مرجع (بدون جدار ثانویه) (%)	PPD با جدار ثانویه (%)	کاهش مطلق (%)	بهبود نسبی (%)
اهواز	۵۰	۲۵	۲۵	۵۰

شهر	PPD مرجع (بدون جدار ثانویه) (%)	PPD با جدار ثانویه (%)	کاهش مطلق (%)	بهبود نسبی (%)
بندرعباس	۴۸	۲۲	۲۶	۵۴٫۲
زاهدان	۴۶	۲۰	۲۶	۵۶٫۵
بوشهر	۴۲	۱۸	۲۴	۵۷٫۱
آبادان	۴۵	۱۹	۲۶	۵۷٫۷

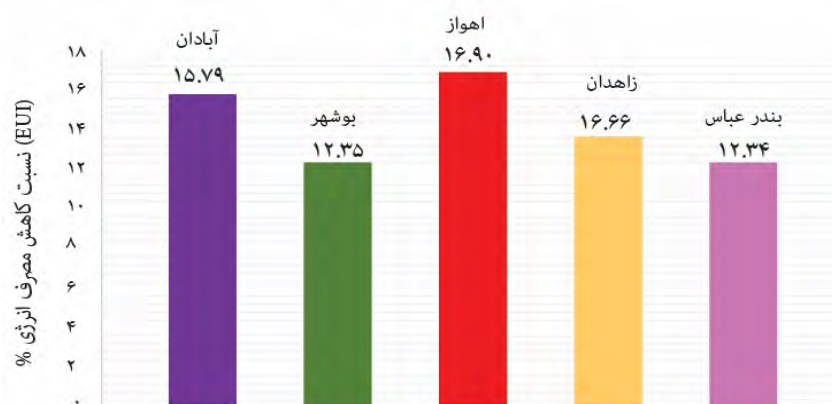
کاهش شدت مصرف انرژی

شاخص شدت مصرف انرژی^{۲۴} به عنوان معیاری کلیدی برای سنجش بهره‌وری انرژی در طراحی و عملکرد ساختمان شناخته می‌شود. نتایج مربوط به کاهش شدت مصرف انرژی برای پنج شهر منتخب ایران که در نتیجه استفاده از جدار ثانویه طراحی شده در شکل ۹ ارائه شده است. لازم به ذکر است که منظور از کاهش شدت مصرف انرژی در این تحقیق کاهش مصرف انرژی برای سرمایش، روشنایی و تجهیزات در فضای داخلی ساختمان است.

نسبت کاهش مصرف انرژی (با عنوان EUI R %) براساس اختلاف بین مقدار مصرف انرژی در حالت مرجع (بدون استفاده از نمای متحرک مجهز به PCM) و حالت پیشنهادی (با استفاده از نمای متحرک و PCM) محاسبه شده است. این اختلاف طبق معادله ۲ (Nambiar et al., 2023) به صورت درصد در شکل ۹ آورده شده است:

$$\text{EUI R \%} = 100 * \frac{E_{\text{EUI, reference}} - E_{\text{EUI, proposed}}}{E_{\text{EUI, reference}}} \quad \text{معادله ۲}$$

کاهش میزان مصرف انرژی



شکل ۹. نمودار شدت کاهش مصرف انرژی در اثر استفاده از جدار ثانویه متحرک در پنج شهر ایران

همان طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، بیش‌ترین میزان کاهش در شدت مصرف انرژی مربوط به شهرهای آبادان و اهواز است که به ترتیب معادل ۱۶٫۹۰٪ و ۱۵٫۷۹٪ کاهش نشان می‌دهند. این موضوع را می‌توان به تقاضای هم‌زمان برای سرمایش و ظرفیت بالای جذب و رهائش حرارت توسط PCM در این اقلیم‌ها نسبت

داد. در مقابل، شهرهای زاهدان، بوشهر و بندرعباس به ترتیب با کاهش‌های ۱۳.۶۶٪، ۱۲.۳۵٪ و ۱۲.۳۴٪ عملکرد پایین‌تری در کاهش EUI داشته‌اند. در این شهرها، سهم عمده مصرف انرژی به سرمایه‌گذاری اختصاص دارد و گرمایش به‌ویژه در فصل سرد سال تقریباً نقش اندکی دارد یا قابل چشم‌پوشی است. این نتایج نشان می‌دهند که کارایی جدار ثانویه متحرک مجهز به PCM در کاهش مصرف انرژی، بیش‌تر در مناطقی که نوسانات دمای شبانه‌روزی یا تقاضای ترکیبی برای سرمایش و گرمایش وجود دارد، نمایان‌تر است.

نتیجه‌گیری

به دلیل افزایش دمای هوا و به دنبال آن، شدت گرفتن و طولانی‌تر شدن موج‌های گرمایی در ایران و جهان، سلامت ساکنین به خطر افتاده و مصرف انرژی به‌طور بی‌سابقه‌ای رو به افزایش است. این پژوهش با هدف ارزیابی کارایی جدار ثانویه متحرک مجهز به مواد تغییر فازدهنده PCM در بهبود آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی در شرایط موج‌های گرمایی، در پنج شهر گرمسیر ایران انجام شده است. با توجه به شدت بالای تابش خورشیدی، رطوبت نسبی متفاوت و تفاوت در الگوهای نوسان دمای شبانه‌روزی میان این شهرها، نتایج به دست آمده تصویر روشنی از عملکرد جدار ثانویه و متحرک در مواجهه با اقلیم‌های گرم و خشک ارائه می‌دهد.

یافته‌ها نشان دادند که استفاده از جدار ثانویه متحرک مجهز به PCM موجب کاهش معنادار شاخص میانگین آرای پیش‌بینی شده (PMV) در تمامی شهرهای مورد بررسی شده است. در ساعات اوج گرما، مقدار شاخص PMV در هر پنج شهر به محدوده قابل قبول ($PPD \leq 20$) طبق استاندارد ASHRAE 55 نزدیک شده و برای دو شهر، در این بازه قرار گرفت. این کاهش به‌ویژه در شهرهای اهواز و آبادان که بار حرارتی بسیار بالایی را در تابستان تجربه می‌کنند، چشم‌گیر بود. در شهرهایی با رطوبت بالاتر مانند بندرعباس و بوشهر، تأثیر PCM بر آسایش حرارتی وابسته به بهینه‌سازی تهویه طبیعی بوده احساس راحتی حرارتی بیش‌تر مشخص بود.

همچنین در زمینه کاهش مصرف انرژی که در نتیجه استفاده از سیستم جدار ثانویه، تحلیل‌های صورت گرفته بر روی بار حرارتی ۲۴ ساعته نشان داد که استفاده از PCM در جدار ثانویه منجر به کاهش محسوس نیاز سرمایشی در روزهای گرم تابستان گردیده است. در شهر زاهدان، با توجه به دامنه بالای تغییرات دمای روز و شب، PCM علاوه بر کاهش نیاز سرمایشی در روز، به کاهش گرمایش در شب نیز کمک کرده است. در مقابل، در شهرهایی مانند بوشهر و بندرعباس که گرمای مداوم و رطوبت بالا مانع از تهویه مؤثر می‌شود، کارایی سیستم بیش‌تر در ساعات ابتدایی روز و پس از غروب ظاهر شده است. مطابق با نتایج تحلیل شدت مصرف انرژی، بیش‌ترین کاهش EUI مربوط به آبادان (۱۶.۹٪) و اهواز (۱۵.۷۹٪) بود، در حالی که در شهرهایی نظیر زاهدان، بوشهر و بندرعباس کاهش در محدوده ۱۲ تا ۱۳.۵٪ باقی ماند. این تفاوت عملکرد را می‌توان به ویژگی‌های اقلیمی خاص هر منطقه نسبت داد؛ در مناطقی که علاوه بر بار سرمایشی، نیاز به گرمایش شبانه نیز وجود دارد، اثر PCM در تعادل‌سازی دمای داخلی بیش‌تر مشهود است.

دستاوردهای دیگر این پژوهش که در خصوص توسعه و معرفی سازوکار محاسباتی نوین رایانه‌ای برای شبیه‌سازی عملکرد حرارتی مواد PCM در بستر جدار ثانویه متحرک بوده نیز ارائه شده است. این روش، با بهره‌گیری از ابزارهای شبیه‌سازی دینامیک حرارتی و پارامترهای اقلیمی واقعی، امکان پیش‌بینی دقیق پاسخ حرارتی سیستم را در مواجهه با موج‌های گرمایی فراهم می‌سازد. قابلیت این مدل در تلفیق داده‌های محیطی، ویژگی‌های فیزیکی PCM و هندسه نما، آن را به ابزاری قابل اعتماد برای ارزیابی سناریوهای مختلف طراحی

تبدیل کرده است. این روش می‌تواند به‌طور گسترده توسط شرکت‌های ساختمانی، دفاتر طراحی معماری و پژوهشگران حوزه انرژی ساختمان مورد استفاده قرار گیرد تا کارایی حرارتی PCM را در شرایط واقعی اقلیمی پیش‌بینی کرده و تصمیم‌گیری‌های بهینه‌تری در مراحل طراحی و انتخاب مصالح انجام دهند. این رویکرد، گامی مؤثر در جهت تلفیق فناوری‌های هوشمند با راهکارهای معماری اقلیم‌محور به‌شمار می‌رود.

در نهایت می‌توان گفت براساس نتایج این پژوهش، ادغام فناوری‌های غیرفعال مانند PCM در طراحی نماهای واکنش‌گرا می‌تواند رویکردی مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود آسایش حرارتی در اقلیم‌های گرم ایران باشد. با این حال، تأکید بر طراحی اقلیم‌محور ضروری است؛ چراکه کارایی این سامانه‌ها وابسته به ویژگی‌های اقلیمی، جهت‌گیری بنا، میزان تهویه طبیعی و بازشوهای قابل کنترل است.

در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که جدار ثانویه متحرک مجهز به PCM پتانسیل بالایی برای کاربرد در طراحی‌های معاصر در مناطق گرم ایران برای مواجهه با دوره‌های گرمایی شدید و بالا بردن تاب آوری شهری دارد. در این پژوهش، بازشوهای متحرک صرفاً به‌عنوان ورودی‌های ثابت جریان هوا مدل‌سازی شده‌اند و جهت‌گیری و زاویه باز شدن آن‌ها در الگوی جریان هوای درون فضای دوپوسته بررسی نشده است؛ این موضوع به‌عنوان یکی از محدودیت‌های پژوهش حاضر بوده و می‌تواند به‌عنوان محور مطالعات آینده در نظر گرفته شود.

باتوجه به محدودیت‌های موجود در این پژوهش پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده از سامانه طراحی شده با مواد تغییر فاز دهنده، آنالیزهای نور و گردش هوا با شرایط مرزی تعریف شده در این پژوهش انجام گردد. همچنین می‌توان عملکرد سامانه تعریف شده در این پژوهش را در بازه‌های زمانی دیگر سال خارج از محدوده دوره‌های موج‌های گرمایشی و شب‌هنگام نیز بررسی نمود. در نهایت بررسی چرخه زیست و هزینه سامانه‌های نمای متحرک مجهز به مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند به‌عنوان تحقیقات بعدی در نظر گرفته شود.

پیوست الف - کد پایتون مورد استفاده در مدل‌سازی حرارتی

کد پایتون مورد استفاده در این پژوهش برای برقراری ارتباط میان مدل اجزای محدود هدایت حرارتی و موتور شبیه‌سازی EnergyPlus به‌صورت فایل پیوست ارائه شده است. این کد در محیط Grasshopper-Python (GhPython) توسعه یافته و شامل مراحل محاسبه رسانش حرارتی، تعریف خواص ترموفیزیکی PCM، و انتقال داده‌ها به موتور انرژی است. خوانندگان علاقه‌مند می‌توانند فایل کد را از پیوست مقاله دریافت نموده و با اجرای آن در محیط Rhinoceros 7 / Grasshopper روند مدل‌سازی عددی و محاسبات حرارتی پژوهش را بازتولید نمایند.

پی‌نوشت‌ها

1. Predicted Mean Vote (PMV)
2. Predicted Percentage of Dissatisfaction (PPD)
3. Phase Change Material (PCM)
4. Thermal Energy Storage (TES)
5. Lam
6. Fanger
7. Zhou
8. Gao
9. Conduction Finite Element Method (ConFEM)

10. Boussaba
11. Rhino 3D software
12. Grasshopper plugin
13. Ladybug tools
14. Energy plus
15. THERM
16. Window
17. Timesteps
18. Window To Wall Ratio (WWR)
19. Dry
20. Semi dry
21. Extremely dry
22. BWh
23. Operative Temperature
24. Energy Use Intensity (EUI)

فهرست منابع

- Aalami, N., Maqsood, T., Bhuiyan, M. A., Abravesh, M., & Zhang, G. (2026). Optimizing bio-based phase change materials in operable façade cavities to enhance cooling energy efficiency. *Journal of Building Engineering*, 119, 115230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2026.115230>
- Aalami, N., Maqsood, T., Bhuiyan, M. A., & Zhang, G. (2024). Development of operable modular louvers Sited in a single-sided ventilated room through 3D parametric optimization. *Building and Environment*, 266, 112134. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112134>
- Abadi, A. R. S., Kazemi, A. F., & Hamzeh, N. H. (2025). Analysis of heat waves in Iran: Patterns, trends, and characteristics in frequency, intensity, and duration (1980-2024). *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(4), 105-124. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2025.387456.1007655>
- Alizadeh-Choobari, O., & Najafi, M. S. (2017). Extreme weather events in Iran under a changing climate. *Climate Dynamics*, 50(1-2), 249–260. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3602-4>
- Boussaba, L., Foufa, A., Makhoulf, S., Lefebvre, G., & Royon, L. (2018). Elaboration and properties of a composite bio-based PCM for an application in building envelopes. *Construction and Building Materials*, 185, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.098>
- Fanger, P. O. (1973). Assessment of man's thermal comfort in practice. *Occupational and Environmental Medicine*, 30(4), 313–324. <https://doi.org/10.1136/oem.30.4.313>
- Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 2069–2094. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>
- Gao, C., Kuklane, K., Wang, F., & Holmér, I. (2012). Personal cooling with phase change materials to improve thermal comfort from a heat wave perspective. *INDOOR AIR*, 22(6), 523–530. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2012.00778.x>
- INBR. (2022a). Energy Conservation. In I. N. B. Regulations (Ed.).
- INBR. (2022b). General Building Requirements In I. N. B. Regulations (Ed.).
- Jangi, M. R., Zarrin, A., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2024). Intensifying heatwave trends in Iran based on observational data using excess heat factor (EHF). *Natural Hazards*, 120(2), 2073–2090.
- Ji, C., Choi, M., Hong, T., Yeom, S., & Kim, H. (2021). Evaluation of the effect of a building energy efficiency certificate in reducing energy consumption in Korean apartments. *Energy and buildings*, 248, 111168. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111168>
- Kitagawa, H., Asawa, T., Del Rio, M. A., Kubota, T., & Trihamdani, A. R. (2023). Thermal energy

- simulation of PCM-based radiant floor cooling systems for naturally ventilated buildings in a hot and humid climate. *Building and Environment*, 238, 110351. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110351>
- Lam, C. K. C., Gallant, A. J. E., & Tapper, N. J. (2018). Perceptions of thermal comfort in heatwave and non-heatwave conditions in Melbourne, Australia. *Urban Climate*, 23, 204–218. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.006>
 - Lobell, D. B., & Field, C. B. (2007). Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2(1), 014002.
 - Loonen, R. C. G. M., Favoino, F., Hensen, J. L. M., & Overend, M. (2017). Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades. *Journal of Building Performance Simulation*, 10(2), 205–223. <https://doi.org/10.1080/19401493.2016.1152303>
 - Marx, W., Haunschild, R., & Bornmann, L. (2021). Heat waves: A hot topic in climate change research. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(1-2), 781–800. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03758-y>
 - Nambiar, C. C., Hart, R., Rosenberg, M. I., & Rosenberg, S. I. (2023). End-use analysis of ASHRAE standard 90.1-2019. *ASHRAE Journal*, 65(PNNL-SA-174690).
 - Perkins, S., & Alexander, L. (2013). On the Measurement of Heat Waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>
 - Rezaee, A., Goodarzi, M. R., Etemadfar, H., & Alavizadeh, M. (2025). A copula-based framework for assessing heat wave extremes and probability of occurrence in Iran: Implications for climate change. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 39, 2461–2477. <https://doi.org/10.1007/s00477-025-02979-1>
 - Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A., & Kolokotsa, D. (2015). On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. *Energy and buildings*, 98, 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.052>
 - Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., & Van Den Dobbelsteen, A. (2013). A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.050>
 - Tong, S., Wen, J., Wong, N. H., & Tan, E. (2021). Impact of facade design on indoor air temperature and thermal comfort in residential buildings in the tropical climate. *Energy and Buildings*, 243, 110972. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110972>
 - Zhou, X., Carmeliet, J., Sulzer, M., & Derome, D. (2020). Energy-efficient mitigation measures for improving indoor thermal comfort during heat waves. *Applied energy*, 278, 115620. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115620>

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Journal of Architecture and Urban Planning. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



نحوه ارجاع به این مقاله

اعلمی، نگین و آبروش، مهدیه (۱۴۰۵). ارزیابی آسایش حرارتی در ساختمان‌های با جدار ثانویه مجهز به بازشوهای متحرک و مواد تغییر فازدهنده در دوره‌های موج‌های گرمایی در ایران. فصلنامه علمی نامه معماری و شهرسازی، ۱۸ (۵۱)، ۴۵–۶۷.

DOI: 10.30480/aup.2026.6255.2356

URL: https://aup.journal.art.ac.ir/article_1564.html