

The effect of non-steady state thermal indices of building walls on energy consumption

Case study: A residential house in hot and dry climate of Birjand

Fahimeh Nazari

M. A. in Architecture, Department of Architecture, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran

Mohammad Farrokhzad

Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran (Corresponding Author)

Aliakbar Heidari

Associate Professor, Department of Architectural Technology, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran

Abstract

According to global primary energy consumption statistics, buildings significantly contribute to energy consumption, with an observed annual increase in this regard. As a consequence, buildings are responsible for greenhouse gas emissions and climate change. Therefore, it is essential to mitigate adverse environmental effects by reducing energy consumption. Heat transfer through the walls of buildings plays a crucial role in this context, and thermal performance significantly affects both energy consumption and the thermal comfort of indoor spaces. Since heat transfer through the walls is closely related to variations in indoor temperature, outdoor temperature, and the materials used in construction, it directly influences both cooling and heating loads. This study aims to achieve optimal performance by identifying the thermal behavior of materials to reduce energy consumption via external walls. Consequently, an understanding of the performance of materials in exterior walls is essential to measure their physical behavior in response to changes in outdoor temperature. To reduce energy consumption, two parameters—decrement factor and time lag—can create significant thermal inertia. However, there are many non-steady-state thermal indices, such as thermal transmittance, volumetric specific heat, and surface factor, and the impact of each on building energy consumption has been investigated through calculations. The non-steady-state thermal indices of walls depend on two important factors: material type and wall thickness. The study results indicate that wall thickness has a greater effect than the type of material used in the wall. The material type can lead to significant differences in the numerical values of indices such as volumetric specific heat, thermal admittance, thermal transmittance, time lag, and time lead. Increasing wall thickness reduces thermal indices such as thermal transmittance, decrement factor, and time lag (surface factor) while increasing the time lag (decrement factor). Thermal admittance, surface factor, and time lead show no significant relationship with wall thickness. Additionally, by designing a residential unit in the hot-dry climate of Birjand (Iran), the effects of each non-steady-state thermal index on energy consumption were simulated. The results indicated that indices such as thermal transmittance, thermal admittance, and volumetric specific heat have direct effects on cooling and heating energy consumption; an increase in these three parameters leads to higher cooling and heating energy consumption in buildings. Conversely, indices such as surface factor, time lag, and time lead negatively affect cooling and heating energy consumption, with their increase resulting in reduced annual energy consumption. However, the decrement factor and time lag have no significant effect on building energy consumption, with their correlations being weak and negligible. The annual energy consumption of buildings in this climate can be reduced by using materials with good thermal insulation properties. The simulation results indicate that the lowest annual heating and cooling energy consumption is associated with buildings constructed from AAC blocks, 3D concrete panels, and Perlite blocks. In contrast, the highest energy consumption occurs when using precast concrete, Liper blocks, or various types of clay bricks in the external walls.

Keywords: Architectural design, non-steady state thermal conditions, thermal indices of walls, thermal conductivity, building energy consumption

فصلنامه علمی نامه معماری و شهرسازی، ۱۷(۴۶)، ۹۸-۱۲۱

DOI: 10.30480/AUP.2025.5476.2185

نوع مقاله: پژوهشی

اثر شاخص‌های ناپایدار حرارتی جداره‌های ساختمانی بر میزان مصرف انرژی بررسی موردی: خانه مسکونی در اقلیم گرم و خشک بیرجند*

فهیمة نظری

کارشناسی ارشد معماری، دانشکده مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

محمد فرخ‌زاد

دانشیار گروه مهندسی معماری، دانشکده مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران (نویسنده مسئول مکاتبات)

E-Mail: m.farrokhzad@gu.ac.ir

علی اکبر حیدری

دانشیار گروه فناوری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران

چکیده

انتقال حرارت از طریق جداره‌های ساختمان‌ها سهم زیادی در میزان مصرف انرژی دارند و عملکرد حرارتی آن‌ها در برقراری آسایش حرارتی فضاها مؤثر است. انتقال حرارت جداره‌ها به‌طور مستقیم بر میزان بار حرارتی ساختمان تأثیرگذار است. در این پژوهش تلاش شده که بتوان با تشخیص رفتار حرارتی مصالح در کاهش مصرف انرژی از طریق جداره‌های خارجی، به عملکرد مطلوبی دست یافت. در شرایط ناپایدار حرارتی شاخص‌های متعددی چون ضریب انتشار حرارت، گرمای ویژه حجمی و ضریب سطح وجود دارند که با محاسبات، اثر هرکدام بر میزان مصرف انرژی ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که ضخامت مؤثرتر از نوع مصالح به کار رفته در جداره است. پذیرش حرارتی، ضریب سطح و زمان انتقال حرارت به هوای داخل، با ضخامت جداره ارتباط محسوسی ندارند. همچنین، با طراحی واحد مسکونی در اقلیم بیرجند، اثرات هر یک از شاخص‌های ناپایدار حرارتی در میزان مصرف انرژی شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های ضریب انتشار حرارت، پذیرش حرارتی و گرمای ویژه حجمی، اثرات مستقیم و ضریب سطح، زمان تأخیر تابشی آن و زمان انتقال حرارت به هوای داخل اثرات معکوسی بر میزان مصرف انرژی سرمایش و گرمایش دارند. شاخص‌های ضریب کاهش و زمان تأخیر آن، اثر محسوسی بر مصرف انرژی ساختمان نداشته‌اند.

کلیدواژه‌ها: طراحی معماری، شرایط ناپایدار حرارتی، شاخص‌های حرارتی جداره‌ها، هدایت حرارتی، مصرف انرژی ساختمان

* این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد معماری فهیمة نظری با عنوان «طراحی واحد مسکونی در شرایط ناپایدار حرارتی جداره‌های خارجی ساختمان در اقلیم گرم و خشک بیرجند» است که با راهنمایی دکتر محمد فرخ‌زاد و مشاوره دکتر علی اکبر حیدری در گروه معماری دانشکده مهندسی دانشگاه گلستان انجام شده است.

مقدمه

با به‌کارگیری راهکارهای طراحی اقلیمی و عملکرد صحیح اجزای ساختمان‌ها می‌توان میزان مصرف انرژی را کاهش داد. لذا هدف از پژوهش‌های مرتبط، ساخت بناهایی است که در مناطق مختلف اقلیمی، شرایط مطلوبی را در جهت آسایش حرارتی ساکنان توأم با کاهش مصرف انرژی فراهم کند. در طی سال‌های گذشته، جهان شاهد افزایش جمعیت و ازدیاد شهرنشینان بوده که باعث شده هر ساله مصرف انرژی افزایش یابد و البته سهم بسزایی را بخش ساختمان به خود اختصاص داده که نهایتاً باعث تولید گازهای گلخانه‌ای و تغییر اقلیم خواهد شد (Heravi & Qaemi, 2014; Ferrara et al., 2014). طراحی اقلیمی به‌عنوان راهکاری جهت دستیابی به آسایش حرارتی است که استفاده از تجهیزات گرمایشی، سرمایشی و مصرف انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی را به حداقل رسانده است (افصحی پور، ۱۴۰۰). در هر صورت راه‌حل‌های مناسبی در راستای صرفه‌جویی انرژی پیشنهاد می‌شود تا با به‌کارگیری انرژی‌های طبیعی علاوه بر مهیا کردن آسایش حرارتی، بتوان میزان مصرف انرژی را کاهش داد. این اهمیت طراحی اقلیمی ساختمان به‌ویژه در مناطق گرم‌وخشک، توجه بیشتری را می‌طلبد. مواد و مصالح مصرفی و نوع استفاده از آن‌ها در جداره‌های خارجی نقش مؤثری در این مسئله ایفا خواهد نمود (پوردیبهیمی و گسیلی، ۱۳۹۴).

سؤال‌های این پژوهش به شرح زیر هستند:

سؤال اصلی:

۱. شاخص‌های حرارتی جداره‌های خارجی ساختمان در شرایط ناپایدار حرارتی چه تأثیری بر مصرف انرژی آن دارد؟

سؤال‌های فرعی:

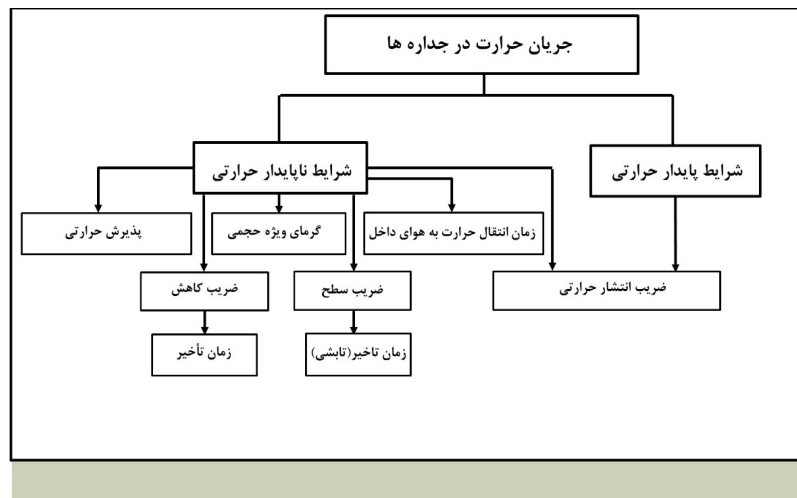
۱. جزئیات مناسب در طراحی جداره‌های خارجی جهت به حداقل رساندن مصرف انرژی در شرایط ناپایدار حرارتی در اقلیم گرم‌وخشک کدام است؟
۲. عملکرد هریک از شاخص‌های تأثیرگذار در شرایط ناپایدار حرارتی جداره‌های خارجی ساختمان در معماری اقلیم گرم‌وخشک چه می‌باشد؟ ویژگی‌ها و مشخصات هریک از مصالح در این اقلیم چیست؟

فرضیه‌های پژوهش:

با انتخاب صحیح مواد، مصالح و جزئیات برای جداره‌های خارجی بنا، در اقلیم گرم‌وخشک بیرجند می‌توانیم در شرایط ناپایدار حرارتی موجبات آسایش ساکنین بنا را با حداقل مصرف انرژی تأمین کنیم. از شاخص‌هایی که در شرایط ناپایدار حرارتی برای درک بهتر رفتار حرارتی جداره‌ها تعیین شده است، ضریب کاهش^۱ و زمان تأخیر^۲ مصالح مختلف، ضخامت‌ها و ترکیب‌های مصالح در جداره‌های ساختمان، بیشتر از موارد دیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضریب کاهش تعیین‌کننده میزان کاهش انرژی انتقالی توسط جداره ساختمان می‌باشد که این امر به ضخامت دیوار و ظرفیت ویژه‌ی حرارتی مصالح مصرفی در جداره ساختمان بستگی خواهد داشت. زمان تأخیر نیز مدت زمانی است که در آن، انرژی جذب شده از یک سطح دیوار به سطح دیگر آن انتقال می‌یابد. این کمیت نیز به ضخامت، هدایت حرارتی^۳ و ظرفیت ویژه گرمایی^۴ مصالح مصرف شده در جداره بستگی دارد. ضخامت مصالح از دیدگاه زمان تأخیر و ضریب کاهش امری قطعی و مهم است و بیشتر مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

راه‌های انتقال حرارت در جداره‌های ساختمان از طریق هدایت^۵، همرفت^۶ و تابش^۷ است. در بحث محاسبات انتقال حرارت از طریق هدایت، دو روش مورد توجه قرار می‌گیرد: ۱- شرایط پایدار حرارتی^۸ - ۲- شرایط ناپایدار حرارتی^۹

رفتارهای حرارتی شرایط پایدار در زمان‌هایی اتفاق می‌افتد که دمای محیط داخل و خارج ساختمان ثابت هستند و در محیط طبیعی کمتر مشاهده می‌شود و بیشتر میزان و نوع انتقال انرژی حرارتی جداره‌ها را تعیین می‌نماید (فرخ‌زاد، ۱۳۸۴). حاصل مقادیر به دست آمده از این شرایط، جهت تعیین ضریب هدایت حرارت مصالح به کار می‌رود، و لیکن برای تحلیل و محاسبات عملکردهای حرارتی مواد و مصالح در دیوار به تنهایی معیار مطلوبی نمی‌باشد (فرخ‌زاد، ۱۳۸۴؛ کوئینگزبرگر، ۱۳۶۸). طبق شکل (۱) انتقال حرارت در شرایط پایدار تنها با یک مشخصه ضریب انتشار حرارت^{۱۰} از جداره ساختمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. اما در شرایط ناپایدار، هشت شاخص حرارتی به تفکیک محاسبه می‌شود (فرخ‌زاد، ۱۳۸۴؛ پوردیهیمی، ۱۳۷۲). در شرایط ناپایدار، محاسبات و بررسی، رفتارهای حرارتی جداره‌ها، نزدیک به واقعیت بوده و وضعیت طبیعی ساختمان را نشان می‌دهد. تغییرات عوامل اقلیمی بر شرایط ناپایدار تأثیرگذارند، که به شدت بر سطوح خارجی اثر می‌گذارند. رفتارهای حرارتی سطوح خارجی ساختمان، تحت تأثیر تغییرات دمای خارجی و ویژگی‌های فیزیکی مصالحی که در جداره‌های ساختمان استفاده می‌شود، قرار می‌گیرد (فرخ‌زاد، ۱۳۸۴؛ پوردیهیمی، ۱۳۷۲). تأثیر آن بر روی یک ساختمان به این صورت است که در فصول گرم، حرارت از محیط خارج به داخل ساختمان جابه‌جا می‌شود، مقداری ذخیره می‌شود و در شب، عکس این عمل اتفاق خواهد افتاد. دو کمیتی که این تغییرات دوره‌ای را مشخص می‌کند، زمان تأخیر و ضریب کاهش است (کوئینگزبرگر، ۱۳۶۸؛ پوردیهیمی، ۱۳۷۲) و در مطالعات تجربی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر مطالعه این دو پارامتر، ضریب سطح^{۱۱} نیز اهمیت بالایی را داراست. بنابراین انتخاب عناصری با زمان تأخیر مناسب برای طراح مهم تلقی می‌شود (فرخ‌زاد، ۱۳۸۴؛ کوئینگزبرگر، ۱۳۶۸). در جدول (۱) تعاریف هشت شاخص حرارتی ناپایدار به تفکیک بیان شده است. در مراحل مختلف مطالعات حرارتی ساختمان، ضخامت‌ها، مصالح و ترکیبات مصالح در جداره‌های گوناگون ساختمان در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۱. شاخص‌های شرایط پایدار و ناپایدار حرارتی جداره‌های ساختمان

جدول ۱. شاخص‌های حرارتی شرایط ناپایدار جداره خارجی

ردیف	شاخص حرارتی	واحد	تعاریف شاخص‌های حرارتی ناپایدار حرارتی جداره‌های ساختمان
۱	ضریب انتشار حرارت	$(W/m^2 \cdot K)$	مقدار سرعت انتشار حرارت سطح از جداره به هوای خارج را نشان می‌دهد و با افزایش هدایت حرارتی مصالح، انتقال حرارت بین ذرات بسیار سریع‌تر اتفاق می‌افتد.
۲	ضریب کاهش	"-	نسبت نوسان حداکثر دمای سطحی داخلی و خارجی از متوسط دمای روزانه تلقی می‌شود. این مقادیر انرژی درون جداره را تعیین می‌کند.
۳	زمان تأخیر (ضریب کاهش)	(hour)	زمانی که انرژی حرارتی از سطحی به سطح دیگر انتقال یابد را زمان تأخیر می‌گویند و در نتیجه ضریب کاهش و زمان تأخیر معکوس یکدیگر عمل می‌کنند.
۴	گرمای ویژه حجمی ^{۱۲}	$(J/m^3 \cdot K)$	مقدار حرارت ذخیره شده در مصالحی که در جداره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد را نشان می‌دهد.
۵	ضریب سطح	"-	تعیین کننده قابلیت انتشار انرژی سطوح داخلی به درون فضا می‌باشد. کمیت آن از نسبت متوسط میزان قابلیت انتشار سطحی به متوسط میزان قابلیت جذب سطحی دیوار به دست می‌آید.
۶	زمان تأخیر ^{۱۳} (ضریب سطح)	(hour)	مدت زمان برگرداندن تمامی انرژی حرارتی که دیوار به روش تابش به سطوح اطراف خود انتقال می‌دهد.
۷	پذیرش حرارتی ^{۱۴}	$(W/m^2 \cdot K)$	تعیین کننده بارزترین تبادل انرژی گرمایی بین جداره داخلی و هوای درون ساختمان است.
۸	زمان انتقال حرارت به هوای داخل ^{۱۵}	(hour)	زمان انتقال حرارت به هوای داخل، مدت زمانی است که برای تغییر یک درجه‌ی سانتیگراد دمای هوا نسبت به دمای متوسط هوا، در طی ۲۴ ساعت بین سطح جداره و هوای داخل از طریق همرفت صورت می‌گیرد.

منبع: کوئینگزبرگر، ۱۳۶۸؛ پوردیهیمی، ۱۳۷۲؛ CIBSE, 2006

جدول ۲. معادلات و روش‌های محاسبات شاخص‌های حرارتی

روش‌های محاسبات شاخص‌های حرارتی جداره ساختمان	نام‌گذاری
$U = \frac{1}{R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_a + R_{se}} \quad (1)$	π = عدد پی (۳/۱۴) L = ضخامت مصالح (m)
$P = \left(\frac{\pi \times L^2 \times \rho \times C}{86400 \times \lambda} \right)^{0.5} \quad (2)$	ρ = جرم حجمی ($\frac{J}{m^3}$) c = ظرفیت گرمایی ویژه ($\frac{J}{kg \cdot K}$)
$m_1 = \cosh(P + iP) = 1/2[(e^P + e^{-P}) \cos P + i(e^P - e^{-P}) \sin P] \quad (3)$	λ = ضریب هدایت حرارتی ($\frac{W}{m \cdot K}$)
$m_2 = \frac{L \times \sinh(P + iP)}{(P + iP)} = \frac{L \times [(e^P - e^{-P}) \cos P + (e^P + e^{-P}) \sin P - i(e^P - e^{-P}) \cos P + i(e^P + e^{-P}) \sin P]}{4\lambda P} \quad (4)$	f = ضریب کاهش φ = زمان تأخیر (ضریب کاهش)
$m_3 = \frac{(P + iP) \times \sinh(P + iP)}{L} = \frac{\lambda \times P \times [(e^P - e^{-P}) \cos P - (e^P + e^{-P}) \sin P + i(e^P - e^{-P}) \cos P + i(e^P + e^{-P}) \sin P]}{2L} \quad (5)$	ψ = زمان تأخیر (ضریب سطح) F = ضریب سطح U = ضریب انتشار حرارت Y = پذیرش حرارتی ω = زمان انتقال حرارت به داخل
در دیواره‌هایی که تنها از یک مصالح تشکیل شده است، از رابطه زیر استفاده می‌نماییم: $\begin{bmatrix} t_1 \\ q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_{si} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \\ m_3 & m_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & R_{se} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} t_0 \\ q_0 \end{bmatrix} \quad (6)$ چنانچه، در جداره بیش از یک مصالح استفاده شود می‌توان از معادله زیر استفاده شود: $\begin{bmatrix} t_1 \\ q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_{si} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \\ m_3 & m_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_1 & n_2 \\ n_3 & n_1 \end{bmatrix} \times \dots \times \begin{bmatrix} 1 & R_{se} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} t_0 \\ q_0 \end{bmatrix} \quad (7)$	t_0 = دمای اولیه t_1 = دمای ثانویه q_0 = جریان حرارت اولیه q_1 = جریان حرارت ثانویه R_{si} = مقاومت حرارتی لایه هوای داخلی R_{se} = مقاومت حرارتی لایه هوای خارجی e = عدد نپر (۲/۷۱۸۲) i = $(\sqrt{-1})$
$Y_c = \frac{M_4}{M_2} \quad Y = Y_c \quad (2) \quad (7) \quad \omega = \frac{12}{\pi} \times \arctan \left(\frac{\text{Im}(Y_c)}{\text{Re}(Y_c)} \right) \quad (8)$	
$f = f_c \quad f_c = \frac{1}{U \times M_2} \quad (9) \quad \varphi = \frac{12}{\pi} \times \arctan \left(\frac{\text{Im}(f_c)}{\text{Re}(f_c)} \right) \quad (9)$	
$F_c = 1 - R_{si} \times y_c \quad F = F_c \quad (11) \quad \psi = \frac{12}{\pi} \times \arctan \left(\frac{\text{Im}(f_c)}{\text{Re}(f_c)} \right) \quad (10)$	

منبع: CIBSE, 2006

براساس بررسی‌های انجام‌شده توسط پژوهشگران این حوزه، ساختمان‌ها درصد مشخصی از انرژی اولیه جهان را به خود اختصاص می‌دهند (Toure et al., 2019). بنابراین کاهش مصرف انرژی یک ضرورت متروقی برای آینده به شمار می‌رود (Toure et al., 2019; Mounir et al., 2014). استفاده از مواد و مصالح نوین یکی از اقداماتی است که در سال‌های اخیر هم برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و هم مصرف کم انرژی مورد توجه قرار گرفته است (Toure et al., 2019; Thongtha et al., 2014). البته با افزایش اینرسی حرارتی پوسته ساختمان، نیز می‌توان اولین گام مؤثر در کاهش مصرف انرژی را برداشت. در شرایط ناپایدار، شاخص ضریب کاهش و زمان تأخیر دو پارامتری هستند که اینرسی حرارتی یک ماده را مشخص می‌کنند (Thongtha et al., 2014). طبق پژوهشی تونگتا و همکاران یک دیوار بتن سبک اتوکلاو شده را با یک دیوار بتن سبک اتوکلاو شده با افزودن رسوب شکر مقایسه و مقادیر ضریب کاهش و زمان تأخیر آن را بررسی کردند. ضایعات رسوب شکر در ترکیب مواد اولیه تولید بتن، اثرگذار بوده و آزمایش‌های گسترده نشان از عملکرد مناسب در استحکام فشاری

بیشتر نسبت به بتن معمولی و یک زمان تأخیر طولانی دارد. نتایج نشان داد بتن توانمند شده با مقدار بهینه رسوب شکر نیز زمان انتشارموج گرما از سطوح بیرونی جداره به داخل را گسترش داد و تأخیر زمانی به دست آمده نیز، متناسب با ضخامت دیواره است، درحالی‌که ضریب کاهش با ضخامت دیواره رابطه معکوس دارد (Thongtha et al., 2014). جین و همکاران طبق آزمایشاتی این دو شاخص حرارتی را در یک دیوار مورد بررسی قرار دادند و پژوهش آن‌ها نشان داد که این دو پارامتر تأثیر بسزایی را در انتقال حرارت ایفا می‌کنند. همچنین تأثیر ضخامت دیوار را با هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی بر زمان تأخیر و ضریب کاهش ارزیابی کردند که افزایش ضخامت دیوار باعث افزایش زمان تأخیر و نزول ضریب کاهش شد (Jin et al., 2011). محاسبه زمان تأخیر و ضریب کاهش چندین دیوار با سطوح خارجی روشن یا تیره توسط رویوو و همکاران نیز مورد بررسی قرار گرفت، آن‌ها نتیجه گرفتند که زمان تأخیر و ضریب کاهش به رنگ سطح دیوار خارجی وابستگی دارد (Ruivo et al., 2013). تأثیر جذب خورشید بر زمان تأخیر و ضریب کاهش دیوارهای مختلف توسط آسم بررسی شده است. نتایج نشان داد که افزایش جذب خورشیدی از ۰ به ۱ باعث کاهش ضریب کاهش و افزایش زمان تأخیر برای همه جهت‌گیری‌های دیوار می‌شود. آسم نیز این دو پارامتر حرارتی (ضریب کاهش و زمان تأخیر) را در یک جداره بتنی اتوکلاو شده، ارزشیابی نمود (Assem, 2011). شیک و ستی نتایج تجربی تأثیرات رطوبت و دمای هوای محیط بر خواص حرارتی سنگ‌های لاتریت را که قابل استفاده در سواحل جنوب غربی هند می‌باشد مورد تحلیل قرار دادند. همچنین تأثیر ضخامت خانه‌های دیوار سرخ را بر زمان تأخیر و ضریب کاهش بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت دیوار، ضریب کاهش کم شده و زمان تأخیر با هر مقدار رطوبت نسبی افزایش می‌یابد (Shaik & Talanki Puttaranga Setty, 2016). فتحی‌پور و همکاران نیز زمان تأخیر و ضریب کاهش مواد ساختمانی مختلف که معمولاً در ایران مورد استفاده قرار می‌گیرند را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که ضخامت و نوع مصالح ساختمانی تأثیر قابل توجهی بر زمان تأخیر و ضریب کاهش دیوار دارند (Fathipour & Hadidi, 2017).

سناکانتار و آسان در پژوهشی نشان دادند که خواص ترموفیزیکی دیوار اثر بسیار عمیقی بر زمان تأخیر و ضریب کاهش دارد و آن‌ها زمان محاسبه شده و مقادیر آن را به دست آوردند (Asan & Sancaktar, 1998). همچنین، طبق بررسی‌های انجام شده، یافتند که خصوصیات حرارتی مصالح می‌تواند بر ضریب کاهش و زمان تأخیر مؤثر باشد. آن‌ها زمان تأخیر و ضریب کاهش را برای مصالح غیرشفاف محاسبه نمودند و نتایج نشان داد، ضخامت و نوع مصالح نقش مؤثری در ضریب کاهش و زمان تأخیر ایفا می‌کند (Asan & Sancaktar, 1998). بار حرارتی که بر روی سطح خارجی یک دیوار اتفاق می‌افتد، به دلیل تماس با هوای محیط، تابش خورشیدی و غیره، ترکیبی پیچیده از هدایت حرارتی و ذخیره‌سازی حرارتی در دیوار را علاوه بر تابش داخلی آن تنظیم می‌کند. افزایش حرارت در یک ساختمان از طریق هدایت، همرفت و تابش با زمان تغییر می‌کند. بنابراین رفتار حرارتی آن را می‌توان با استفاده از یک مدل گذرا پیش‌بینی کرد. در تحلیل رفتار حرارتی گذرای سازه‌های ساختمانی، مقاومت حرارتی و ظرفیت حرارتی از پارامترهای مهم در نظر گرفته شده است. ظرفیت حرارتی به توانایی ماده برای ذخیره گرما مربوط است. دیواره‌های خارجی به‌عنوان خازن‌های حرارتی از طریق جذب حرارت و ذخیره‌سازی روزانه و سپس دفع گرمای شبانه عمل می‌کنند. یک موج حرارتی از سطح خارجی به سطح داخلی ساختمان حرکت می‌کند و دامنه آن وابسته به تابش خورشید و جابه‌جایی بین سطح خارجی ساختمان و هوای محیط است (Omidvar & Rasti, 2014; Asan & Sancaktar, 1998). در پژوهشی نیز محاسبات برای هشت ضخامت متفاوت هر ماده و اثرات و ضخامت و نوع مواد در زمان تأخیر و ضریب کاهش مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که ضخامت ماده و نوع ماده تأثیر بسیار عمیقی بر زمان تأخیر و ضریب کاهش دارند.

اثر ضخامت مصالح بر زمان تأخیر و ضریب کاهش کاملاً قطعی است (Asan, 2000; Asan, 1998). کونتولون و ایورمورفوپولو، عوامل مؤثر در ضریب کاهش و زمان تأخیر، همچون نوع و قرارگیری دیوار و ضرایب جذب حرارت را مورد بررسی قرار دادند، که نحوه جهت‌گیری دیوار و اثر آن بر این دو پارامتر تأثیرات بسزایی را خواهد داشت (شریفی و قبادیان، ۱۳۹۶; Kontoleon & Eumorfopoulou, 2008). در معماری بومی منطقه گرم‌وخشک ایران، دیوارهای قطور با جرم حرارتی زیاد تا حدود زیادی می‌توانستند تعدیل‌کننده شرایط حرارتی و رطوبتی محیط خارج باشند و شرایط آسایش را برای ساکنان تأمین کنند. حال آنکه در معماری امروز، مصالحی چون بلوک سفالی، بلوک لیکا و بتن سبک گازی (هبلکس) جایگزین مصالحی همچون، خشت و آجر شده‌اند که در مواردی با عایق‌های حرارتی ترکیب شده و ساختارهای نازک‌تری را در جداره خارجی تشکیل می‌دهند (شقایق، ۱۳۹۲). همچنین در پژوهشی تأثیرات خواص حرارتی ماده و ضریب انتقال حرارتی سطوح خارجی بر ضریب کاهش و زمان تأخیر مورد بررسی قرار گرفته، و البته انتقال بار حرارتی سطوح داخلی ساختمان نیز توسط تنام و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت (Netam et al., 2020). طبق یک مطالعه، با بررسی عملکرد حرارتی دیوارها در یک اقلیم مرطوب گرمسیری با استفاده از پارامترهای زمان تأخیر و ضریب کاهش، یک مدل عددی با استفاده از روش تفاضل محدود با فرمول بندی ضمنی برای چهار ساختار دیوار مختلف با ضخامت یکسان انجام شد که شامل یک دیوار سیمانی بتنی، دیوار بتنی توخالی، دیوار گلی و دیوار ساندرد بودند. شبیه‌سازی در ماه‌های آگوست و مارس انجام شد که به ترتیب بیشترین و کمترین تابش خورشیدی و دمای محیط را داشتند. نتایج نشان داد که زمان تأخیر بسته به نوع آرایش دیوار، بین ۲ تا ۴ ساعت برای دیوارهای شمال، جنوب و شرق و بین ۲ تا ۳ ساعت برای دیواره غربی متغیر است. ضریب کاهش نیز به ترتیب بین ۰.۲۰۵ تا ۰.۲۹۰، ۰.۲۲۰ تا ۰.۳۲۷، ۰.۲۱۳ تا ۰.۳۱۲ و ۰.۲۱۳ تا ۰.۳۱۰ برای غرب، شرق، شمال و جنوب در ماه آگوست متغیر بود. در حالی که در ماه مارس بین ۰.۲۰۳ تا ۰.۲۸۰، ۰.۲۰۳ تا ۰.۲۸۱، ۰.۲۰۳ تا ۰.۲۸۳ و ۰.۱۹۹ تا ۰.۲۷۶ برای همین جهت متغیر بود (Quagraine et al., 2020). لذا ضخامت پوشش و جذب خورشید بر زمان تأخیر و ضریب کاهش مؤثر است که در این راستا در پژوهشی، یک سلول آزمایشی با حجم ۱ متر مکعب با ماده‌ای که معمولاً در ساخت وساز سنگال استفاده می‌شود، ساخته شد. دمای هوای محیط داخل و خارج سلول تست و تابش مستقیم خورشید اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که ضریب کاهش با ضخامت جداره کاهش می‌یابد در حالی که زمان تأخیر به صورت خطی افزایش می‌یابد (Toure et al., 2020).

به نظر می‌رسد انتخاب مصالح، از نظر شاخص‌های حرارتی پایدار و ناپایدار بر طراحی ساختمان با انرژی کارآمد تأثیر گذار خواهد بود. لذا هدف این پژوهش بررسی مصالح و خواص فیزیکی آن بر مصرف انرژی بناهاست، تا مناسب‌ترین مصالح کاربردی در جداره‌ها مشخص شود.

ویژگی‌های حرارتی ناپایدار تاکنون تنها به صورت تئوری مطرح شده است و به اثر آن‌ها بر میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها پرداخته نشده است. تلاش بر این است که با مطالعه شاخص‌های ناپایدار حرارتی به ارائه راهکارهای مناسب انتخاب مصالح در جهت کاهش مصرف انرژی، و با تأکید بر پاسخگویی مسائل اقلیمی در راستای تأمین آسایش حرارتی ساکنین در اقلیم گرم‌وخشک بیرجند پرداخته شود.

منطقه مورد مطالعه

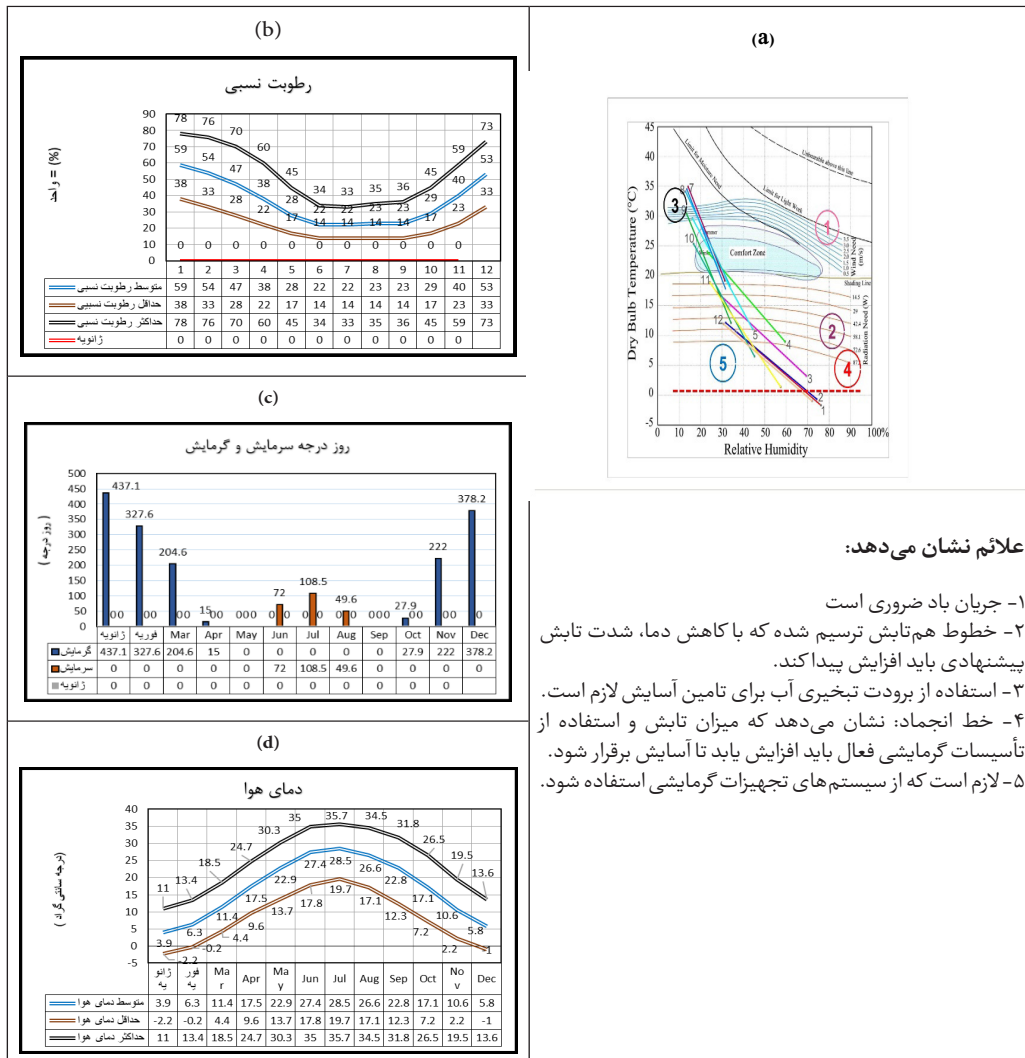
خراسان جنوبی یکی از استان‌های شرق ایران است و مرکز آن، شهر بیرجند است. مساحت این استان ۱۵۱۱۹۳ کیلومتر مربع بوده و سومین استان پهناور ایران محسوب می‌شود. براساس سرشماری سال ۱۳۹۵، جمعیت آن برابر با ۷۶۸۸۹۸ نفر است. بیرجند بزرگ‌ترین شهر استان است که سایت طراحی پروژه این پژوهش در آن قرار دارد.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی شهر بیرجند در استان خراسان جنوبی ایران

داده‌های اقلیمی بیرجند، طبق دوره‌های زمانی تابستان و زمستان و براساس سازمان هواشناسی کشور و بانک داده‌های متئونورم استخراج شده است که در ادامه به تحلیل نمودارهای حاصل از این داده‌ها پرداخته می‌شود.

طبق شکل (۳) با توجه به تحلیل‌ها در این منطقه، (d) نوسان دما در طول سال زیاد است به گونه‌ای که از ۲- درجه تا ۳۶+ درجه سانتیگراد متغیر است، زمستان‌های سرد که دما به زیر صفر درجه نیز می‌رسد و به دلیل نزدیکی به مناطق کویری، تابستان‌ها گرم است. فصل گرم بیرجند معمولاً طولانی بوده و ماه‌های خرداد و تیر و مرداد را در برمی‌گیرد، ایام سرد سال شامل ماه‌های آذر، دی و بهمن است. (b) متوسط رطوبت نسبی در ماه‌های سال حدود ۳۸ درصد می‌باشد. (c) نیاز گرمایی و سرمایی سالانه (روز - درجه) بیرجند: به ترتیب نیمه سرد و معتدل است.

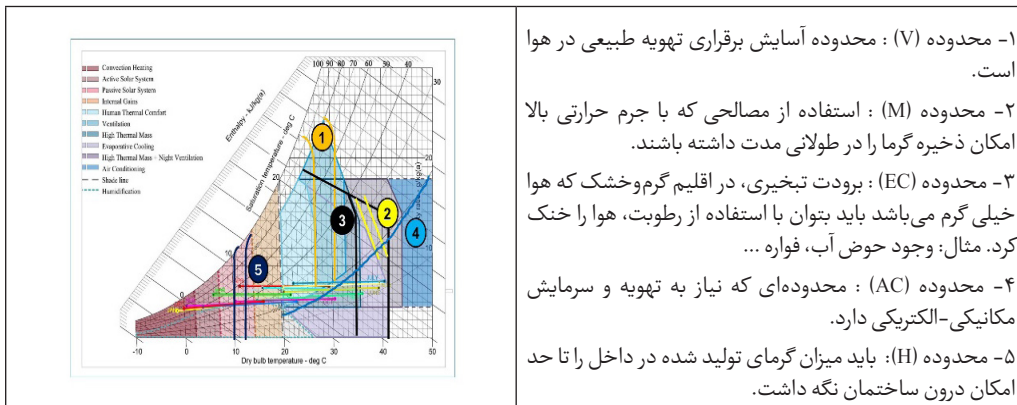


شکل ۳ (a). نمودار زیست اقلیمی اولگی. (b) رطوبت نسبی. (c) روز-درجات سرمایش و گرمایش. (d) دمای هوا (بیرجند)

علائم نشان می دهد:

- ۱- جریان باد ضروری است
- ۲- خطوط هم تابش ترسیم شده که با کاهش دما، شدت تابش پیشنهادی باید افزایش پیدا کند.
- ۳- استفاده از برودت تبخیری آب برای تامین آسایش لازم است.
- ۴- خط انجماد: نشان می دهد که میزان تابش و استفاده از تأسیسات گرمایشی فعال باید افزایش یابد تا آسایش برقرار شود.
- ۵- لازم است که از سیستم های تجهیزات گرمایشی استفاده شود.

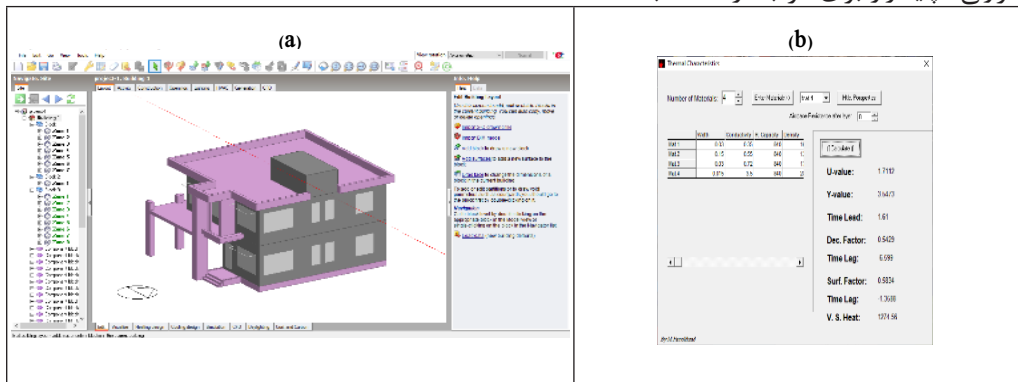
نمودار زیست اقلیمی گیونی، در ارائه راهبردهای طراحی اقلیمی معماری دارای نکات مثبت و مهمی است. این نمودار، براساس نمودار سایکرومتریک تهیه شده است که ۴ شاخصه اصلی آب و هوایی را نشان می دهد (طاهباز، ۱۳۹۶): ۱. دمای هوای خشک ۲. رطوبت مخصوص (نسبت مخلوط) ۳. دمای هوای تر ۴. رطوبت نسبی. شکل ۴ داده های ماهانه هواشناسی بیرجند را روی نمودار زیست اقلیمی گیونی نشان می دهد.



شکل ۴. نمودار زیست اقلیمی گیونی

روش تحقیق

روش تحقیق در مطالعه حاضر توصیفی، تحلیلی و مبتنی بر مطالعات اسنادی و کتابخانه‌ای و شبیه‌سازی رایانه‌ای است. این پژوهش به منظور بررسی ارتباط میان شاخص‌های حرارتی ناپایدار جداره‌ها و میزان مصرف انرژی ساختمان انجام شده است. لذا ابتدا این شاخص‌ها برای تعدادی از مصالح متداول کاربردی در دیوارهای خارجی محاسبه شده و پس از شبیه‌سازی مصرف انرژی ساختمان در هر یک، رابطه همبستگی میان تغییرات هر شاخص با میزان مصرف انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل (۵a) مشاهده می‌شود، محاسبات حرارتی یک مدل ساختمانی مینا با کاربری مسکونی، تک واحدی (۴ نفر) با زیربنای ۱۸۰ مترمربع و جهت‌گیری شرقی-غربی، طی مدلسازی و شبیه‌سازی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر^{۱۶} انجام شده است. در ادامه به بررسی تأثیر نوع و ضخامت مصالح در شرایط ناپایدار حرارتی جداره‌های ساختمان و مصرف انرژی پرداخته می‌شود و سعی شده پیش‌فرض‌ها تا حد ممکن به واقعیت نزدیک باشد. همچنین مطابق شکل (۵b) - نرم‌افزاری با زبان ویژوال بیسیک^{۱۷} نوشته شده تا به عنوان ابزار محاسباتی، شاخص‌های حرارتی ناپایدار را برای هر جداره محاسبه کند.



شکل ۵. (a) نرم‌افزار دیزاین بیلدر (b) نرم‌افزار تعیین شاخص‌های حرارتی

جدول (۳) متغیرهای مستقل پژوهش را جهت شبیه‌سازی میزان مصرف انرژی ساختمان مدل شده، نشان می‌دهد. بدیهی است به جز مصالح به کار رفته در دیوارهای خارجی سایر این پارامترها در فرایند تحقیق ثابت فرض شده‌اند تا بتوان اثر تغییرات مصالح دیوارها را به‌طور دقیق بر مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی سالانه مورد بررسی قرار داد.

جدول ۳. متغیرهای پژوهش در نرم افزار شبیه ساز دیزاین بیلدر (Code No. 19)

ردیف	متغیرهای ثابت پژوهش	مقادیر متغیرهای پیش فرض در مدلسازی ساختمان مینا	
۱	موقعیت	منبع داده های آب و هوایی	فرمت
		بانک داده های متئونورم	epw
۲	کاربری	مسکونی	تک واحدی (ویلايي)
۳	جهت گیری	کشیدگی شرقی - غربی (نمای اصلی رو به جنوب)	
۴	برنامه تأسیسات برقی و مکانیکی	تابستان - سرمایش (درجه سانتیگراد)	زمستان - گرمایش (درجه سانتیگراد)
		Set back: ۲۵ Set point: ۲۸	Set back: ۱۲ Set point: ۱۸
۵	بازشوها	جنس پنجره و شیشه	پرشده از گاز آرگون
		(بیویی وی سی) دوجداره	ضخامت ۱۳ میلی متر
۶	ساخت (سازه)	سقف بام	سقف میانی طبقات کف
		موزاییک + ایزوگام + دال بتنی با تیرچه + لایه گچ	دال بتنی با تیرچه + لایه گچ
۷	سیستم سرمایش و گرمایش	سوخت سیستم سرمایشی	سوخت سیستم گرمایشی
		(گاز طبیعی)	(تأسیسات برقی و مکانیکی)

شبیه سازی و محاسبات

به منظور ارزیابی عملکرد حرارتی جداره خارجی در میزان مصرف انرژی، ابتدا جزئیات دیوار خارجی به شرح جدول (۴) تعیین شد:

جدول ۴. لایه های دیوار

لایه های دیوار از داخل به خارج			
۱- اندود گچ رنگ آمیزی شده	۲- مصالح مورد مطالعه	۳- ملات ماسه و سیمان	۴- سنگ نما (گرانیت)

در مرحله بعد ۱۴ نوع متداول از مصالح مورد مطالعه با ضخامت ۱۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد. مشخصات حرارتی این مصالح به همراه مصالح اندود و نما که در محاسبات بعدی استفاده شده، در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵. ویژگی‌های حرارتی مصالح مورد ارزیابی (متغیرهای مستقل قابل تغییر پژوهش)

ردیف	مشخصات فنی مصالح	λ (W/m.K)	C (J/Kg.K)	ρ (Kg/m ³)
۱	اندود گچ	۲,۲۸	۸۴۰	۱۶۸۰
۲	ملات ماسه و سیمان	۰,۷۲	۸۴۰	۱۷۶۰
۳	سنگ نما (گرانیت)	۳,۵	۸۴۰	۲۸۸۰
۴	بلوک سیمانی	۱,۱۵	۸۴۰	۲۴۰۰
۵	بلوک سفالی	۰,۵۵	۸۴۰	۱۳۵۰
۶	بلوک سفالی فوم دار	۰,۵۵	۸۴۰	۱۳۵۰
	فوم پلی استایرن	۰,۰۴	۱۵	
۷	بلوک AAC ^{۱۸}	۰,۱۷	۱۰۰۰	۷۰۰
۸	بلوک CLC ^{۱۹}	۰,۲	۱۰۰۰	۶۵۰
۹	بلوک لیکا ^{۲۰}	۰,۲۳	۱۰۰۰	۹۰۰
۱۰	آجر فشاری	۰,۸۴	۸۰۰	۱۷۰۰
۱۱	آجر یازلی	۰,۷۲	۸۴۰	۱۳۰۰
۱۲	تریدی پنل	۱,۱۵	۸۴۰	۲۴۰۰
	فوم پلی استایرن	۰,۰۳۸	۱۴۰۰	۱۵
۱۳	والکریت ^{۲۱}	۰,۱۵۷	۸۴۰	۶۰۰
۱۴	بلوک پرلیت	۰,۱۵	۸۴۰	۳۰۰
۱۵	وال اسپید ^{۲۲}	۰,۲۰۷	۱۳۹۰,۶	۲۵
۱۶	بلوک پیش ساخته بتنی	۱,۹	۸۴۰	۲۳۰۰
۱۷	بلوک لیبر	۱,۵۲	۸۴۰	۱۷۰۰

محاسبات شاخص‌های حرارتی ناپایدار ۱۴ جداره با مصالح متداول انتخاب شده با استفاده از نرم افزار برنامه نویسی شده، انجام شد و نتایج آن در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ۶. محاسبه و مشخصات شاخص‌های حرارتی جداره‌های پیشنهادی

VSH	T.L (S.F)	S.F	T.L (D.F)	D.f	Time Lead	Y	U	شاخص حرارتی	ردیف
گرمای ویژه حجمی	زمان تأخیر (ضریب سطح)	ضریب سطح	زمان تأخیر (ضریب کاهش)	ضریب کاهش	زمان انتقال به حرارت داخل	پذیرش حرارتی	ضریب انتشار حرارت	مصالح سفت‌کاری	
۱۸۹۰,۵	۱,۱۳	۰,۵	۶,۹۳	۰,۴۲	۱,۰۳	۳,۹	۲,۲۶	بلوک سیمانی	۱
۱۳۰۲,۵	۱,۳	۰,۶	۶,۷	۰,۵	۱,۶	۳,۶	۱,۷۱	بلوک سفالی	۲
۱۲۰۳,۶	۱,۷	۰,۶	۷,۶	۰,۴۷	۱,۹۷	۳,۷۶	۰,۹۵	بلوک سفالی فوم‌دار	۳
۱۰۱۳,۲	۱,۵	۰,۷	۸,۱	۰,۵	۲,۴	۳,۲	۰,۸۴	بلوک AAC	۴
۹۷۹,۸	۱,۵	۰,۷	۷,۳	۰,۵	۲,۴	۳,۲	۰,۹۴	بلوک CLC	۵
۱۱۴۶,۵	۱,۴	۰,۶	۸,۱۴	۰,۴۷	۲,۱	۳,۳	۱,۰۳	بلوک لیکا	۶
۱۴۵۳,۲	۱,۲	۰,۵	۶,۴	۰,۵	۱,۳	۳,۷	۲,۰۳	آجر فشاری	۷
۱۲۷۴,۵	۱,۳	۰,۵	۶,۰۹	۰,۵	۱,۴	۳,۵	۱,۹۰	آجر پازلی	۸
۱۳۶۳,۳	۱,۹	۰,۵	۷,۹	۰,۳۷	۱,۸	۴,۱	۰,۵	تریدی پنل	۹
۸۸۲,۵	۱,۵	۰,۷	۷,۱	۰,۶	۲,۶	۳,۱	۰,۷۹	والکریت	۱۰
۷۱۴,۵۶	۱,۴	۰,۷۶	۵,۴۱	۰,۷۵	۲,۹۸	۲,۹۳	۰,۷۶	بلوک پرلیت	۱۱
۱۴۲۵,۱	۱,۰۴	۰,۶	۴,۱۴	۰,۸۵	۱,۵	۳,۱۲	۲,۳	وال اسپید	۱۲
۱۸۳۴,۵	۱,۰۷	۰,۵	۶,۰۶	۰,۵	۰,۹	۴,۰	۲,۵	بلوک پیش‌ساخته بتنی	۱۳
۱۴۹۸,۵	۱,۱۶	۰,۵	۶,۷	۰,۵	۱,۰۹	۳,۸	۲,۴	بلوک لیپر	۱۴

لازم به ذکر است که برای عملکرد مطلوب مصرف انرژی ساختمان، لازم است شرایط مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان در طراحی جداره‌ها در نظر گرفته شود. بدین منظور، مبحث ۱۹ پیشنهاد می‌دهد که یا عایق‌کاری حرارتی جداره‌های بیرونی انجام شود و یا از مصالح سفت‌کاری به صورت عایق همگن استفاده شود. طبیعتاً در عمل، به‌کارگیری مصالح عایق همگن در دیوارها ساده‌تر از اجرای یک لایه عایق حرارتی بر روی دیوارهای سنتی است. بنابراین در این پژوهش تلاش شد که با جمع‌بندی مصالح نوین متداول در ساختمان که به‌عنوان عایق همگن هم محسوب می‌شوند، مقایسه مطلوب در عملکرد حرارتی به انجام برسد. مصالح انتخاب شده به جز موارد ۱، ۲، ۷ و ۸ عایق همگن محسوب می‌شوند.

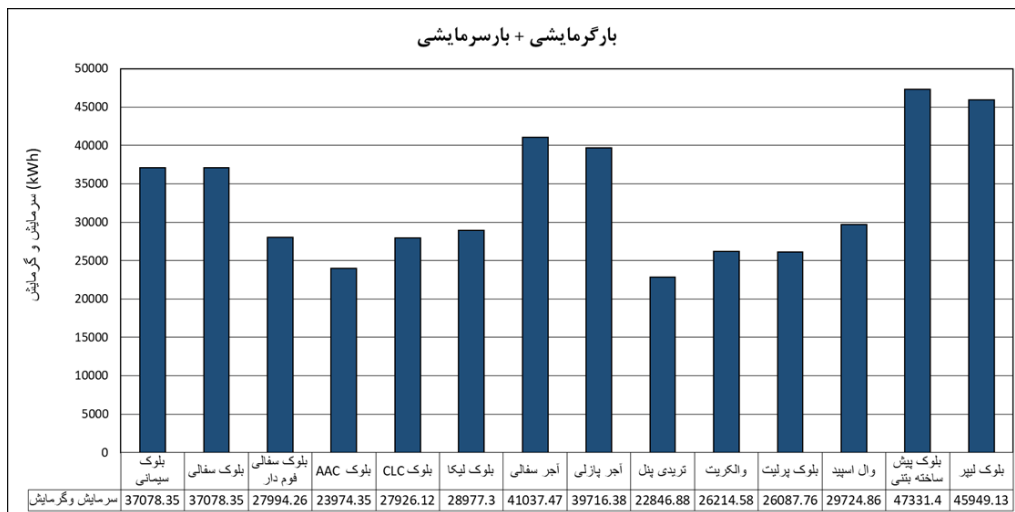
به‌منظور بررسی عملکرد مصالح مورد مطالعه در انرژی مصرفی ساختمان و محاسبه دقیق نیازهای سرمایه‌ی و گرمایشی، از مدل‌سازی یک نمونه ساختمان مسکونی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر استفاده شد. شبیه‌سازی

انرژی این ساختمان میزان مصرف انرژی در فصول گرم و سرد سال را مشخص می‌کند. در هر مرحله از شبیه‌سازی، شاخص‌های حرارتی یکی از ۱۴ مصالح ذکر شده به‌عنوان جزئیات جداره‌های خارجی تعریف شد تا ضمن به دست آمدن میزان مصرف انرژی در سال، نتایج به دست آمده تحلیل و مقایسه شود. شرایط آب‌وهوایی در شبیه‌سازی، داده‌های شهر بیرجند در اقلیم گرم و خشک بیابانی ایران تعریف شده که این داده‌ها از بانک متئونورم به دست آمد. سایر متغیرهای اولیه شبیه‌سازی مطابق یک ساختمان مسکونی معمول تعریف شده و در ۱۴ مرحله شبیه‌سازی ثابت بوده و تغییر نکرده است.

نتایج تحقیق

مصرف انرژی سالانه

شکل (۶) مجموع بار سرمایش و گرمایش سالانه ۱۴ نمونه شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. کمترین مصرف انرژی سالانه مربوط به نمونه مدل‌سازی شده با دیوار تریدی پنل و پس از آن دیوار با بلوک AAC است. بیشترین میزان مصرف نیز متعلق به مدل‌های ساخته شده با دیوار بلوک لیپر و بتن پیش‌ساخته است.



شکل ۶. نمودار مجموع بار سرمایشی و گرمایشی برای مصالح تعریف شده برحسب kWh

شاخص‌های حرارتی ناپایدار

تحلیل و مقایسه هشت شاخص حرارتی جداره‌ها با محاسبات عددی برای هر ۱۴ مصالح انجام شد که در ادامه به بررسی و تحلیل هرکدام از این شاخص‌های حرارتی پرداخته می‌شود.

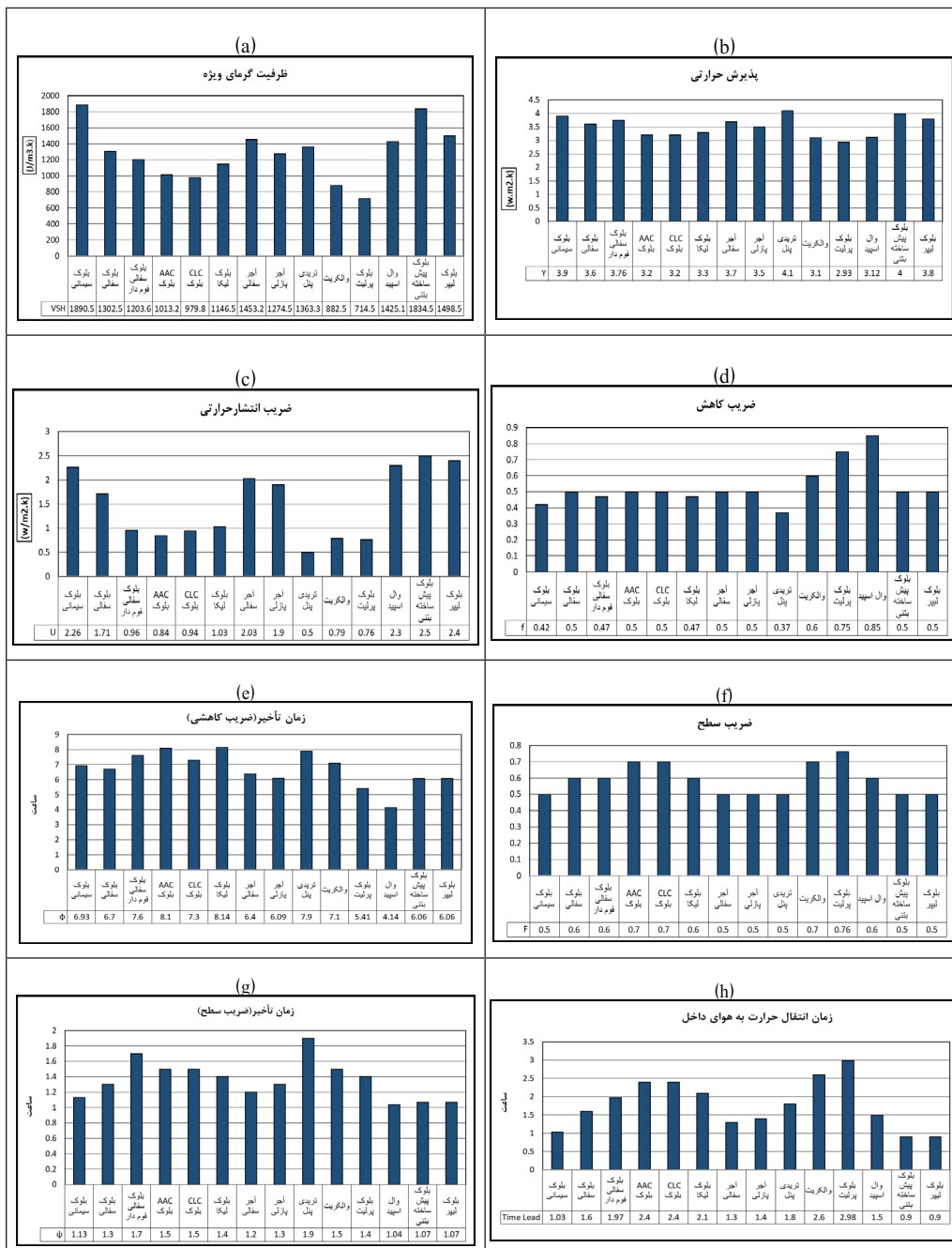
هرچه مقادیر گرمای ویژه حجمی بیشتر باشد حرارت با سرعت کمتری از محیط بیرون به فضای داخل انتشار پیدا می‌کند. مطابق شکل (۷- a)، دیوار بلوک سیمانی با میزان $1890.5 \text{ K} \cdot \text{J}/\text{m}^3$ و دیوار پیش‌ساخته بتنی با میزان $1834.5 \text{ K} \cdot \text{J}/\text{m}^3$ بالاترین ضریب گرمای ویژه حجمی را نسبت به دیگر دیوارها داشته‌اند و دیوارهای با بلوک پرلیت و والکریت به ترتیب با مقادیر $714.5 \text{ K} \cdot \text{J}/\text{m}^3$ و $882.5 \text{ K} \cdot \text{J}/\text{m}^3$ کمترین گرمای ویژه حجمی را نشان می‌دهند. پذیرش حرارتی در واقع نشان دهنده میزان قابلیت تبادل حرارت میان سطح داخلی جداره و دمای هوای محیط می‌باشد، به نحوی که دمای هوا را به میزان یک درجه سانتیگراد نسبت به مقدار متوسط آن تغییر دهد، و هرچه مقدار لایه‌ی مجاور هوای داخل از مصالح سنگین تشکیل شده باشد پذیرش حرارتی

بزرگتر خواهد بود. مطابق شکل (۷- b)، دیوار تریدی پنل با مقدار 4.1 K.W/m^2 و بلوک پیش ساخته بتنی با مقدار 4.7 K.W/m^2 بیشترین پذیرش حرارتی را دارند و دیوارهای با بلوک پرلیت و والکریت با مقادیر 2.93 K.W/m^2 و 3.1 K.W/m^2 کمترین پذیرش حرارتی را به خود اختصاص می‌دهند.

ضریب انتشار حرارت، توانایی انتقال حرارت در شرایط پایدار است. لذا هرچه بیشتر باشد، جداره حرارت بیشتری را از خود عبور می‌دهد. مطابق شکل (۷- c)، کمترین ضریب انتشار حرارت متعلق به دیوارهای تریدی پنل با مقدار 0.5 K.W/m^2 و بلوک پرلیت با مقدار 0.76 K.W/m^2 است که نشان می‌دهد این دو مصالح عایق مناسبی برای جلوگیری از انتقال حرارت هستند. بیشترین میزان ضریب انتشار حرارت نیز مربوط به دیوارهای بتن پیش ساخته و بلوک لیپر با مقادیر 2.5 K.W/m^2 و 2.4 K.W/m^2 است. ضریب کاهش از عوامل مهم در کاهش جریان حرارت انتقالی از میان مصالح دیوار است. این ضریب هرچه کمتر باشد نشان دهنده آن است که جداره مقدار کمتری از انرژی حرارتی دریافتی را به روش هدایت از خود عبور می‌دهد. طبق شکل (۷- d)، کمترین مقادیر ضریب کاهش متعلق به دیوارهای تریدی پنل و بلوک سیمانی با اعداد 0.37 و 0.42 بوده و بیشترین ضریب کاهش در دیوارهای وال اسپید و بلوک پرلیت با مقادیر 0.85 و 0.75 مشاهده می‌شود.

زمان تأخیر با ضریب کاهش رابطه معکوس دارد؛ یعنی هرچه ضریب کاهش کمتر باشد، زمان تأخیر جداره افزایش می‌یابد. هرچه زمان تأخیر بیشتر باشد؛ ماندگاری جریان حرارت درون جداره بیشتر بوده و انتقال آن از یک سو به سوی دیگر در مدت زمان بیشتری اتفاق می‌افتد. طبق شکل (۷- e)، بیشترین زمان تأخیر مربوط به دیوارهای با بلوک لیکا و بلوک AAC با مقادیر ۸ ساعت و ۸ دقیقه و ۸ ساعت و ۶ دقیقه است. کمترین زمان تأخیر متعلق به دیوار وال اسپید با ۴ ساعت و ۸ دقیقه و بلوک پرلیت با ۵ ساعت و ۲۵ دقیقه است.

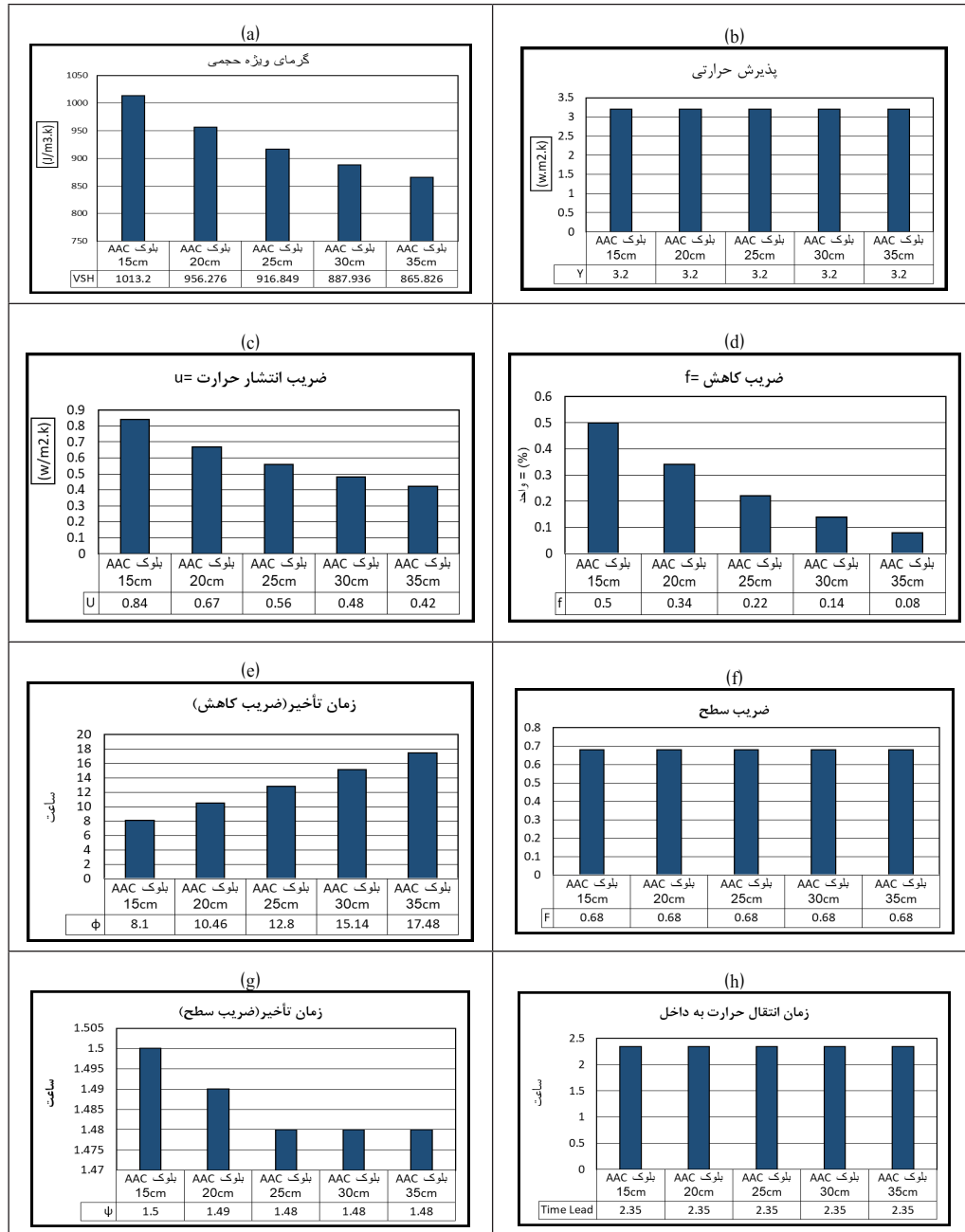
ضریب سطح نشان دهنده میزان انتشار حرارت جداره از طریق تابش است و هرچه بیشتر باشد بدان معنی است که جداره کمتر به عنوان جاذب انرژی حرارتی عمل می‌کند و خاصیت بازتابش بالایی دارد. مطابق شکل (۷- f)، کمترین ضریب سطح متعلق به دیوارهای تریدی پنل، آجر پازلی، آجر فشاری، بلوک پیش ساخته بتنی و بلوک سیمانی با مقدار 0.5 و بیشترین ضریب سطح مربوط به دیوارهای با بلوک پرلیت با مقدار 0.76 و بلوک CLC و بلوک AAC با مقدار 0.7 است. نزدیک بودن مقادیر ضریب سطح نمونه‌های مورد مطالعه بدان دلیل است که مصالح به کار رفته به عنوان نازک‌کاری داخلی بیشترین اثر را در این ضریب دارند و لذا چون مصالح گچ در تمام جداره‌ها مشترک است، ضریب سطح نیز اختلاف چندانی را نشان نمی‌دهد. زمان تأخیر مرتبط با ضریب سطح نشان دهنده مدت زمان بازتابش حرارت جذب شده در جداره به محیط است. مطابق شکل (۷- g)، بیشترین زمان تأخیر تابشی متعلق به دیوار تریدی پنل با ۱ ساعت و ۵۴ دقیقه و بلوک سفالی فوم دار با ۱ ساعت و ۴۲ دقیقه است. همچنین کمترین زمان تأخیر مربوط به دیوار وال اسپید با ۱ ساعت و ۲ دقیقه و دیوار بتن پیش ساخته و بلوک لیپر با ۱ ساعت و ۴ دقیقه می‌باشد. مدت زمانی که برای تغییر یک درجه‌ی سانتیگراد دمای هوا نسبت به دمای متوسط هوا، در طی ۲۴ ساعت بین سطح جداره و هوای داخل از طریق همرفت صورت می‌گیرد را زمان انتقال حرارت به هوای داخل گفته و هرچه بیشتر باشد نشان دهنده آن است که انتقال حرارت بسیار کندتر اتفاق می‌افتد. مطابق شکل (۷- h)، بیشترین زمان انتقال متعلق به دیوار بلوک پرلیت با ۲ ساعت و ۵۸ دقیقه و دیوار والکریت با ۲ ساعت و ۳۶ دقیقه می‌باشد. کمترین زمان انتقال حرارت به هوای داخل، در دیوارهای بلوک لیپر و بتن پیش ساخته با ۵۴ دقیقه مشاهده شده است.



شکل ۷. شاخص‌های حرارتی ناپایدار جداره (a) گرمای ویژه حجمی، (b) پذیرش حرارتی، (c) ضریب انتشار حرارت، (d) ضریب کاهش، (e) زمان تأخیر (ضریب کاهش)، (f) ضریب سطح، (g) زمان تأخیر ضریب سطح، (h) زمان انتقال حرارت به هوای داخل.

براساس تحلیل‌هایی که در ارتباط با شاخص‌های حرارتی ناپایدار انجام شد مشخص شد در بعضی از این شاخص‌ها دامنه اعداد به دست آمده در جداره‌ها نزدیک به هم بوده و تفاوت چندانی نداشتند. مقایسه بین این ۱۴ مصالح با هم در یک ضخامت مشخص ۱۵ سانتیمتر و نماهای درونی و بیرونی ثابت، تأثیرات و نتایج متفاوتی را نشان نمی‌دهد. به همین دلیل در مرحله بعدی این تحقیق یکی از مصالح (بلوک AAC) با ضخامت‌های ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ بررسی شد تا اثر تغییر ضخامت جداره در تحلیل شاخص‌های حرارتی مورد ارزیابی قرارگیرد (شکل ۸). نتایج نشان می‌دهد که

ضخامت جداره نسبت به جنس مصالح در بعضی از شاخص‌های حرارتی ناپایدار تأثیرگذارتر است.



شکل ۸. شاخص‌های حرارتی دیوار با بلوک AAC. (a) گرمای ویژه حجمی. (b) پذیرش حرارتی. (c) ضریب انتشار حرارت. (d) ضریب کاهش. (e) زمان تأخیر (ضریب کاهش). (f) ضریب سطح. (g) زمان تأخیر (ضریب سطح). (h) زمان انتقال حرارت به هوای داخل.

در این تحلیل دیوار با بلوک AAC با ۵ ضخامت متفاوت بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد، که تأثیر تغییر ضخامت مصالح در برخی شاخص‌ها قابل توجه است. شکل (۸) نمودار هر کدام از شاخص‌های حرارتی بلوک AAC با تغییر ضخامت را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۸-a, ۸-b, ۸-c, ۸-d) با افزایش ضخامت جداره، گرمای ویژه حجمی، ضریب انتشار

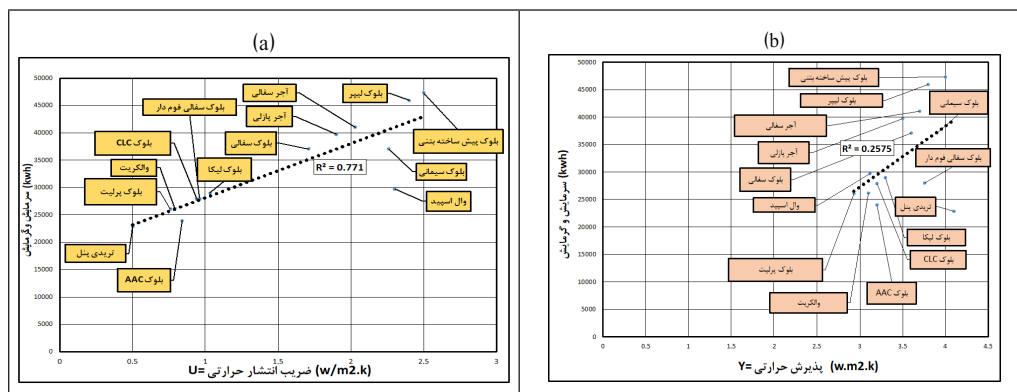
حرارت، ضریب کاهش و زمان تأخیر تابشی کاهش می‌یابد. طبق شکل (۸-۱)، با افزایش ضخامت دیوار، زمان تأخیر افزایش قابل توجهی می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که دیوار با ضخامت ۳۵ سانتیمتر نسبت به دیوار با ضخامت ۱۵ سانتیمتر، افزایش زمان تأخیری حدود ۹ ساعت را نشان می‌دهد. اما طبق شکل (۸-۱، ۸-۲ و ۸-۳)، نتایج نشان می‌دهد پذیرش حرارتی، زمان انتقال حرارت به هوای داخل و ضریب سطح ارتباطی به ضخامت جداره ندارند.

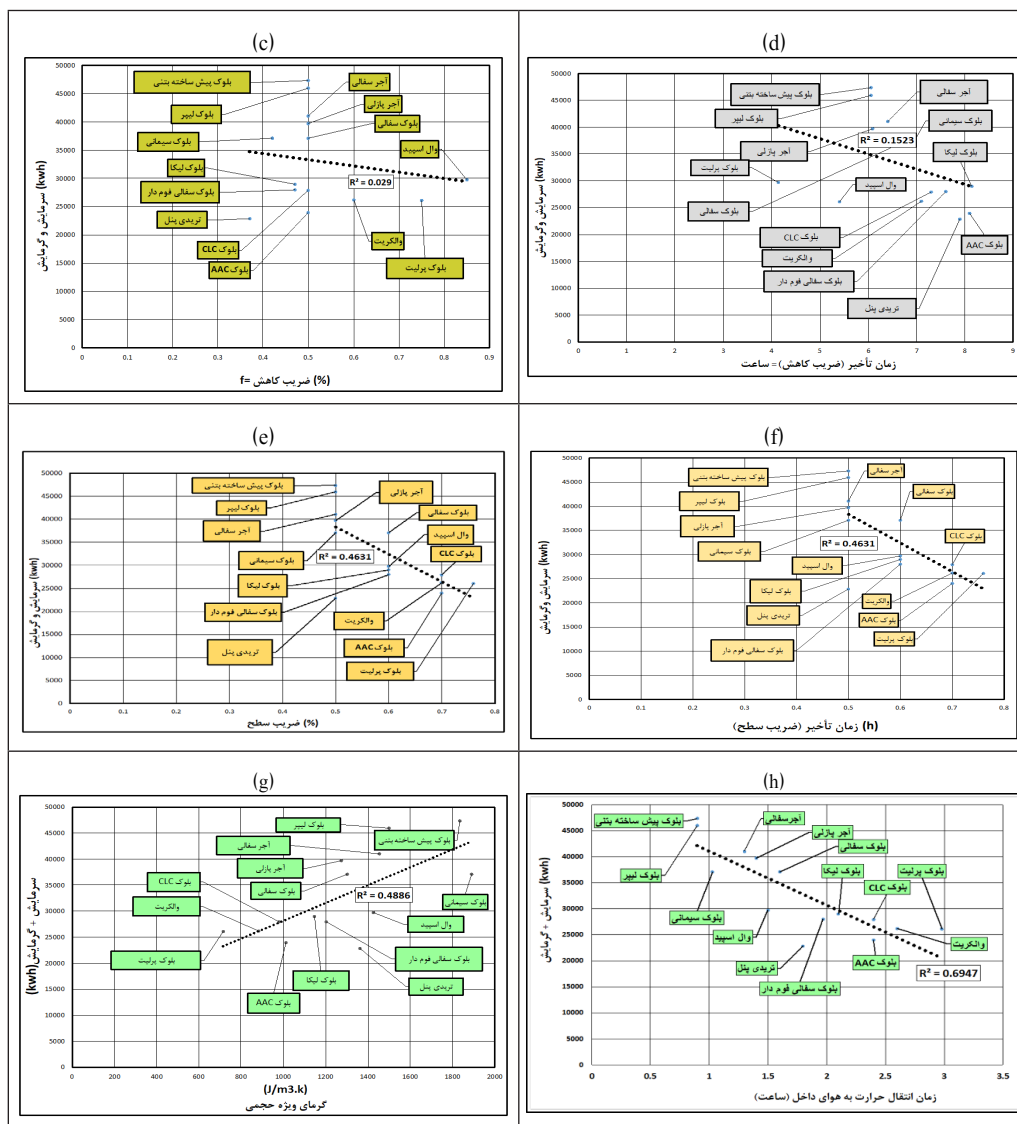
رابطه شاخص‌های حرارتی ناپایدار با مصرف انرژی

به منظور ارزیابی اثر شاخص‌های حرارتی ناپایدار بر میزان مصرف انرژی، همبستگی هریک از شاخص‌ها با مجموع مصرف انرژی گرمایش و سرمایش سالانه مورد ارزیابی قرار گرفت.

شکل (۹-۱)، نشان می‌دهد که ضریب انتشار حرارت و میزان مصرف انرژی سالانه رابطه مستقیم دارند. ضریب تعیین این دو ۰٫۷۸ است که نشان می‌دهد هرچه ضریب انتشار حرارت جداره‌ها بیشتر باشد مصرف انرژی سرمایش و گرمایش افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۹-۲)، پذیرش حرارتی و میزان مصرف انرژی سالانه رابطه مستقیم ولی ضعیفی دارند به‌گونه‌ای که ضریب تعیین آن ۰٫۲۵ است. شکل (۹-۳)، نشان می‌دهد که ضریب کاهش رابطه قابل توجهی با مجموع انرژی مصرفی سالانه ندارد؛ زیرا ضریب تعیین آن ۰٫۲۹ به دست آمده است. شکل (۹-۴)، رابطه معکوس میان زمان تأخیر و مجموع مصرف انرژی سالانه را نشان می‌دهد که ضریب تعیین بالایی نداشته و حدود ۰٫۱۵ است. اما در مجموع افزایش زمان تأخیر می‌تواند موجب کاهش مصرف انرژی در ساختمان شود.

شکل (۹-۵)، رابطه معکوس میان ضریب سطح و مصرف انرژی سرمایش و گرمایش سالانه را نشان می‌دهد. ضریب تعیین این رابطه ۰٫۴۶ بوده و می‌توان نتیجه گرفت که ویژگی‌های تابشی جداره‌های ساختمان به شکل قابل قبولی بر میزان مصرف انرژی اثرگذارند. در شکل (۹-۶)، رابطه معکوس زمان تأخیر تابشی و مصرف انرژی سالانه ساختمان مشاهده می‌شود. ضریب تعیین آن ۰٫۴۶ است. بنابراین با افزایش زمان تأخیر ضریب سطح، میزان مصرف انرژی سرمایش و گرمایش ساختمان کاهش می‌یابد. طبق شکل (۹-۷)، رابطه مستقیم میان گرمای ویژه حجمی و مصرف انرژی سرمایش و گرمایش ساختمان وجود دارد که ضریب تعیین آن ۰٫۴۸ به دست آمده است. لذا افزایش جرم حرارتی در جداره‌های خارجی ساختمان‌ها در این اقلیم می‌تواند منجر به افزایش مصرف انرژی سالانه شود. شکل (۹-۸)، رابطه معکوس بین زمان انتقال حرارت به هوای داخل و مصرف انرژی سرمایش و گرمایش ساختمان را نشان می‌دهد، ضریب تعیین این دو متغیر ۰٫۶۹ است که نشان می‌دهد کاهش زمان انتقال حرارت به هوای داخل بر میزان مصرف انرژی تأثیر قابل قبولی را به همراه دارد.





شکل ۹. همبستگی میزان مصرف انرژی سالانه با (a) ضریب انتشار حرارت (b) ضریب پذیرش حرارتی (c) ضریب کاهش (d) زمان تأخیر (e) ضریب سطح (f) زمان بازتابش (g) ظرفیت گرمای ویژه (h) زمان انتقال حرارت به هوای داخل.

بحث

این پژوهش در سه مرحله انجام گرفته است. در مرحله اول، ۱۴ نوع از مصالح متداول جهت ساخت دیوارهای خارجی انتخاب شد و با در نظر گرفتن ضخامت ثابت برای جداره‌ها، شاخص‌های حرارتی ناپایدار آن‌ها محاسبه شد. در مرحله دوم با طراحی یک ساختمان مسکونی در اقلیم گرم‌وخشک شهر بیرجند، ضمن شبیه‌سازی انرژی این ساختمان با شرایط مساوی و ۱۴ جداره مختلف خارجی، میزان مصرف انرژی سرمایش و گرمایش سالانه آن به دست آمد. در مرحله سوم ارتباط میان شاخص‌های حرارتی ناپایدار و میزان مصرف انرژی سالانه ساختمان مورد مطالعه، تحلیل و بررسی شد.

مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این مطالعه به شرح ذیل است:

۱. شاخص‌های حرارتی ناپایدار جداره‌ها به دو عامل مهم بستگی دارند: جنس مصالح و ضخامت جداره.

در شاخص‌هایی چون گرمای ویژه حجمی، ضریب انتشار حرارت، زمان تأخیر و زمان انتقال حرارت به هوای داخل، جنس مصالح می‌تواند تفاوت‌های قابل توجهی را به وجود آورد. در شاخص‌هایی همچون ضریب انتشار حرارت، ضریب کاهش، زمان تأخیر و زمان تأخیر تابشی، ضخامت مصالح اثرات چشمگیری دارند، درحالی‌که ضخامت مصالح در شاخص‌هایی مانند زمان انتقال حرارت به هوای داخل و ضریب سطح هیچ تأثیری ندارد. لازم به ذکر است که پژوهش‌های گذشته اثر چشمگیر نوع و ضخامت مصالح به کار رفته در دیوارها را بر شاخص‌های ضریب کاهش و زمان تأخیر نشان داده‌اند که نتایج تحقیق حاضر را تأیید می‌کند؛ از جمله تونگنا و همکاران (2014)، جین و همکاران (2011)، رویوو و همکاران (2013)، شیک و سنی (2016)، فتحی‌پور و همکاران (2017)، سنکاکتار و آسان (1998)، تنام و همکاران (2020)، تور و همکاران (2019). لکن هیچ پژوهشی درخصوص سایر شاخص‌های ناپایدار همچون پذیرش حرارتی، ضریب سطح و زمان تأخیر آن بدین شکل انجام نشده است.

۲. میان شاخص‌های ضریب انتشار حرارت و گرمای ویژه حجمی با میزان مصرف انرژی سالانه رابطه مستقیم وجود دارد و با افزایش این دو، مصرف انرژی سرمایش و گرمایش ساختمان افزایش می‌یابد. شاخص‌هایی چون ضریب سطح و زمان تأخیر آن، رابطه معکوس با مصرف انرژی داشته و با افزایش آن‌ها، مصرف انرژی سالانه کاهش می‌یابد. رابطه مستقیم میان پذیرش حرارتی با مصرف انرژی و رابطه معکوس ضریب کاهش و زمان تأخیر با میزان مصرف انرژی گرمایش و سرمایش، چندان قابل توجه نیست و میزان همبستگی آن‌ها ضعیف و قابل صرف نظر است. در مطالعات گذشته نمونه‌ای مشابه برای ارزیابی ارتباط میان شاخص‌های حرارتی ناپایدار و میزان مصرف انرژی ساختمان مشاهده نشد که بتوان نتایج آن را با دستاوردهای پژوهش اخیر مقایسه کرد.

۳. مصرف انرژی سالانه ساختمان در این اقلیم با به‌کارگیری مصالحی که عایق حرارتی مناسبی هستند کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کمترین مصرف انرژی سرمایش و گرمایش سالانه متعلق به ساختمانی است که با بلوک AAC، تری‌دی پنل و بلوک پرلیت ساخته شده است. بیشترین مصرف انرژی زمانی است که در دیوارهای خارجی از بلوک پیش‌ساخته بتنی، بلوک لیبر یا انواع آجرهای رسی استفاده شده باشد. بررسی طیف وسیعی از انواع مصالح کاربردی در جداره‌های ساختمان به شکلی که در این پژوهش به انجام رسید، در تحقیقات گذشته وجود ندارد؛ هرچند که افرادی چون کواگرین و همکاران (2020)، شقایق (۱۳۹۲)، فرخ‌زاد (۱۳۸۴)، پوردیهیمی و گسیلی (۱۳۹۴) به‌طور محدود شاخص‌های ناپایدار تعدادی از مصالح را مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

در پایان لازم به ذکر است که پژوهشگرانی چون آسم (2011)، تور و همکاران (2020)، کواگرین و همکاران (2020) به بررسی اثر تابش خورشید بر شاخص‌های ناپایدار جداره‌ها پرداخته‌اند و کواگرین تأثیر آرایش دیوارها، جهت‌گیری و تغییر فصول را نیز بر تغییرات ضریب کاهش و زمان تأخیر مورد مطالعه قرار داده است. با توجه به اهداف تحقیق حاضر، موارد اخیر در مسیر پژوهش مطالعه نشدند که توصیه می‌شود در تحقیقات آتی به‌طور خاص مورد ارزیابی قرار گیرند.

نتیجه‌گیری

همان‌طور که مشاهده شد، در این پژوهش ۱۴ مصالح کاربردی متداول در اجرای سفت‌کاری دیوارهای بیرونی ساختمان‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. محاسبات شاخص‌های مختلف حرارتی نتایج قابل توجهی را نشان داد. این ۱۴ دیوار، دارای ضرایب انتشار حرارتی بسیار متنوعی هستند که نشان می‌دهد مقاومت حرارتی آن‌ها در

برابر انتقال حرارت به روش هدایت در دامنه بزرگی متغیر است؛ مثلاً از یک سو ترییدی پنل با ضریب انتشار حرارت $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ و نیز بلوک پرلیت با $0.76 \text{ W/m}^2\text{K}$ از جمله عایق‌های حرارتی بهینه هستند، از سوی دیگر وال اسپید، بلوک لیپر و بلوک پیش‌ساخته بتنی به‌ترتیب با ضریب انتشار حرارت $2/3$ ، $2/4$ و $2/5 \text{ W/m}^2\text{K}$ به‌عنوان دیوارهایی با مقاومت حرارتی بسیار اندک محسوب می‌شوند. همچنین گرمای ویژه حجمی به‌عنوان شاخص ظرفیت حرارتی دیوار دارای تنوع بالایی از $882/5 \text{ J/m}^2\text{K}$ برای والکریت تا $1890/5 \text{ J/m}^2\text{K}$ برای بلوک سیمانی است. این درحالی‌ست که برخی شاخص‌های ناپایدار حرارتی چون پذیرش حرارتی، ضریب کاهش، ضریب سطح و زمان تأخیر مربوط به ضریب سطح در همه نمونه‌ها تغییرات اندکی را نشان می‌دهند. تصور نه چندان صحیحی وجود دارد که چنانچه ظرفیت حرارتی یک جداره زیاد باشد، مدت زمان انتقال حرارت درون آن طولانی خواهد شد. نتایج محاسبات پژوهش حاضر این گزاره را نقض می‌کند؛ چراکه مصالحی مانند بلوک لیکا، بلوک AAC، ترییدی پنل، بلوک سفالی فوم‌دار و والکریت با بالاترین زمان تأخیرهایی از $8/14$ تا $7/1$ ساعت دارای مقادیر گرمای ویژه حجمی بسیار متنوعی از $882/5$ تا $1363/3 \text{ J/m}^2\text{K}$ هستند. مرحله دوم شبیه‌سازی با دینظر گرفتن ضخامت‌های متنوع در دیوار بیرونی، نشان داد که عامل ضخامت مصالح، اثرات قابل توجهی در تعیین برخی از شاخص‌های حرارتی ناپایدار دارد و درواقع شاخص‌هایی که با تغییر مصالح، تفاوت‌های اندکی را در محاسبات اولیه نشان دادند، با تغییر ضخامت، به شکل چشمگیری افزایش یا کاهش پیدا کردند. شبیه‌سازی مصرف انرژی سرمایه‌ش و گرمایش سالانه برای ساختمان مسکونی در اقلیم گرم‌وخشک در شرایط ۱۴ نوع مصالح مختلف دیوارهای بیرونی، بهترین مصالح کاربردی در کاهش مصرف انرژی را نشان داد. ترییدی پنل، بلوک AAC، بلوک پرلیت، والکریت، بلوک CLC، بلوک سفالی فوم‌دار، بلوک لیکا و وال اسپید به ترتیب بهینه‌ترین مصالح با پایین‌ترین مصرف انرژی سالانه هستند. درمقابل بلوک پیش‌ساخته بتنی، بلوک لیپر، آجر سفالی، آجر پازلی، بلوک سفالی و بلوک سیمانی مصالح نامناسبی با بیشترین مصرف انرژی سالانه می‌باشند. اختلاف مصرف انرژی به‌گونه‌ای است که مثلاً ساختمان ساخته‌شده با بلوک پیش‌ساخته بتنی 107% بیشتر از ساختمان بنا شده با ترییدی پنل مصرف انرژی دارد.

مرحله سوم پژوهش، ارتباط میان شاخص‌های ناپایدار حرارتی و مصرف انرژی سالانه را مورد ارزیابی قرار داد. در این بررسی ملاحظه شد که شاخص‌هایی همچون ضریب انتشار حرارت و گرمای ویژه حجمی رابطه مستقیمی با مصرف انرژی سالانه دارند آن‌گونه که با افزایش یکی، دیگری نیز افزایش می‌یابد. همچنین شاخص‌هایی مانند زمان انتقال حرارت به هوای داخل، ضریب سطح و زمان تأخیر آن رابطه معکوسی با میزان مصرف انرژی دارند چنانچه با افزایش آن‌ها، مصرف انرژی کاهش می‌یابد.

پی‌نوشت‌ها

1. Decrement Factor
2. Time Lag (decrement factor)
3. Thermal Conductivity
4. Specific heat capacity
5. Conduction
6. Convection
7. Radiation
8. Steady State Condition
9. Non Steady State Condition
10. Thermal Transmittance
11. Surface Factor

12. Volumetric Specific Heat
13. Time Lag (surface factor)
14. Thermal Admittance
15. Time Lead
16. Design Builder (version 6.1.0.006)
17. Visual Basic (version 6)
18. Autoclaved Aerated Concrete
19. Cellular Lightweight Concrete
20. Light Expanded Clay Aggregate
21. Wall Crete
22. Wall speed

منابع

- پوردیهیمی، شهرام و گسیلی، بهرام (۱۳۹۴). بررسی شناسه‌های حرارتی جداره‌های پوسته خارجی بنا (مطالعه موردی: مناطق روستایی اردبیل). مسکن و محیط روستا، ۳۴ (۱۵۰)، ۵۳-۷۰.
- پوردیهیمی، شهرام (۱۳۷۲). جریان انتقال ناپایدار (۱). صغه، ۱ (۳)، ۱۶-۲۷.
- فرخ‌زاد، محمد (۱۳۸۴). جریان انتقال ناپایدار حرارتی در جداره‌ها. درس ویژه دو، گروه دکتری معماری. دانشگاه شهید بهشتی.
- کوئینگزبرگر، اتو (۱۳۶۸). راهنمای طراحی اقلیمی (مترجم: مرتضی کسمایی). تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- شقایق، محمد (۱۳۹۲). مطالعه رفتار حرارتی مصالح رایج در ساخت دیوار مطالعه موردی: ساختمان‌های مسکونی شهر تهران. معماری و شهرسازی (هنرهای زیبا)، ۱۱۸ (۱)، ۶۹-۷۸.
- افصحی پور، مریم (۱۴۰۰). ارزیابی نقش عناصر اقلیمی بر معماری و بهینه‌سازی انرژی در مناطق گرم‌وخشک. کنفرانس ملی به سوی شهرسازی و معماری دانش بنیان.
- طاهباز، منصوره (۱۳۹۶). دانش اقلیمی طراحی معماری. تهران: دانشگاه شهید بهشتی.
- شریفی، مهدی و قبادیان، وحید (۱۳۹۶). بررسی تأثیر خصوصیات فیزیکی پوسته‌های ساختمان‌ها بر زمان تأخیر و ضریب کاهش انتقال حرارت (نمونه موردی: ساختمان‌های بلندمرتبه شهر همدان). فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۹ (۴)، ۷۸-۱۶۷.
- Omidvar, A., & Rasti, B. (2014). Effect of moisture content of building materials on thermal performance of exterior building walls. *Modares Mechanical Engineering*, 13(10), 152-156
- Asan, H. (1998). Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 28(3), 299-305.
- Asan, H. (2000). Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view. *Energy and Buildings*, 32(2), 197-203.
- Asan, H., & Sancaktar, Y. S. (1998). Effects of Wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 28(2), 159-166.
- Assem, E. O. (2011). Correlating thermal transmittance limits of walls and roofs to orientation and solar absorption. *Energy and Buildings*, 43(11), 3173-3180.
- CIBSE (2006). *Environmental design*. London: Chartered Institution of Building Services Engineers.
- Fathipour, R., & Hadidi, A. (2017). Analytical solution for the study of time lag and decrement factor for building walls in climate of Iran. *Energy*, 134, 167-180
- Ferrara, M., Fabrizio, E., Virgone, J., & Filippi, M. (2014). A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly Zero Energy Buildings. *Energy and Buildings*, 84, 442-457.
- Heravi, G., & Qaemi, M. (2014). Energy performance of buildings: The evaluation of design and construction measures concerning building energy efficiency in Iran. *Energy and Buildings*, 75, 456-464.

- Jin, X., Zhang, X., Cao, Y., & Wang, G. (2011). Thermal performance evaluation of the wall using heat flux time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 47, 369–374.
- Kontoleon, K. J. Ā., & Eumorfopoulou, E. A. (2008). The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region. *Renewable Energy*, 33(7), 1652–1664.
- Mounir, S., Maaloufa, Y., Cherki, A. B., & Khabbazi, A. (2014). Thermal properties of the composite material clay/granular cork. *Construction and Building Materials*, 70, 183–190.
- Netam, N., Sanyal, S., & Bhowmick, S. (2020). A Mathematical Model Featuring Time Lag and Decrement Factor to Assess Indoor Thermal Conditions in Low-income-group House. *Journal of Thermal Engineering*, 6(2), 114–127.
- Quagraine, K. A., Ramde, E. W., Fiagbe, Y. A. K., & Quansah, D. A. (2020). Evaluation of time lag and decrement factor of walls in a hot humid tropical climate. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20, 100758.
- Ruivo, C. R., Ferreira, P. M., & Vaz, D. C. (2013). On the error of calculation of heat gains through walls by methods using constant decrement factor and time lag values. *Energy and Buildings*, 60, 252–261.
- Shaik, S., & Talanki Puttaranga Setty, A. B. (2016). Influence of ambient air relative humidity and temperature on thermal properties and unsteady thermal response characteristics of laterite wall houses. *Building and Environment*, 99, 170–183.
- Thongtha, A., Maneewan, S., Punlek, C., & Ungkoon, Y. (2014). Investigation of the compressive strength, time lags and decrement factors of AAC-lightweight concrete containing sugar sediment waste. *Energy and Buildings*, 84, 516–525.
- Toure, P. M., Dieye, Y., Gueye, P. M., Faye, M., & Sambou, V. (2020). Influence of envelope thickness and solar absorptivity of a test cell on time lag and decrement factor. *Journal of Building Physics*, 43(4), 338–350.
- Toure, P. M., Dieye, Y., Gueye, P. M., Sambou, V., Bodian, S., & Tiguampo, S. (2019). Experimental determination of time lag and decrement factor. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00298.

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

نظری، فهیمه؛ فرخزاد، محمد و حیدری، علی اکبر (۱۴۰۳). اثر شاخص‌های ناپایدار حرارتی جداره‌های ساختمانی بر میزان مصرف انرژی گرم‌وخشک بیرجند. فصلنامه علمی نامه معماری و شهرسازی، ۱۷(۴۶)، ۹۸–۱۲۱.



DOI: 10.30480/aup.2025.5476.2185

URL: https://aup.journal.art.ac.ir/article_1400.html