



Comparison of Thermal Behavior of Southern Trombe Walls with Different Geometrical Components in Ahwaz Corridor Spaces

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Rahaei O.^{*1} PhD,

Rezaei Zadeh A.² MSc

How to cite this article

Rahaei O, Rezaei Zadeh A. Comparison of Thermal Behavior of Southern Trombe Walls with Different Geometrical Components in Ahwaz Corridor Spaces. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(10):2521-2531.

¹Department of Architecture, School of Architecture and Urban Design, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

²Department of Architectural Engineering, School of Technical and Engineering, Institute for Higher Education ACECR Khuzestan, Ahwaz, Iran

*Correspondence

Address: Iran, Tehran, Lavizan, Shahid Shabanloo Street. Postal Code: 16785-163

Phone: +98 (21) 22970123

Fax: +98 (21) 22970123

o.rahaei@sru.ac.ir

Article History

Received: December 21, 2019

Accepted: August 21, 2020

ePublished: October 21, 2020

ABSTRACT

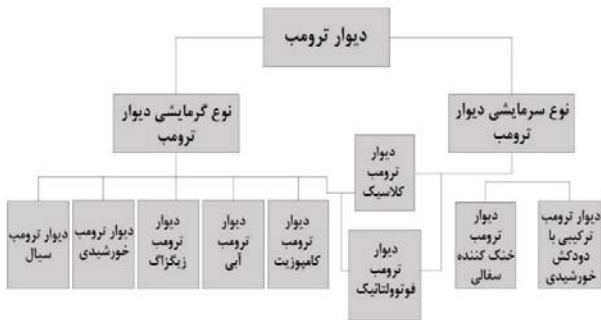
Nowadays, the efficient use of solar energy for optimal use in the building industry has become one of the concerns of designers and builders. Studies show that by properly designing the exterior walls of the building, the amount of solar energy absorption can be managed for the building. Ahwaz is a tropical city that needs mechanical cooling most of the year. However, it has five cold months, with 3 months of use of heating systems to provide residents with thermal comfort. Therefore, the thrombus wall has been considered in this study. The aim of this study is to investigate and compare the thermal behavior of thrombus walls with different shapes in the sunny (south) walls of corridor spaces in Ahwaz. Research method is a hybrid method that incorporates empirical research strategies, simulation, and case research. On this basis, after experimental observations and field investigations on real samples, a general pattern was obtained and numerical calculations of the simulations were performed with CTF method after validation and reliability with Energy Plus software. In this study, by studying the sunroof wall (south side) of a default corridor space, five general compositions of the thrombus wall with the same conditions have been simulated and evaluated. The results have shown that in order to manage energy absorption, the geometry of the thrombus wall is of special importance and its chess pattern performs better than other models. At the end, some suggestions have been made.

Keywords Trombe Wall; Thermal Performance; Sunroof Wall; Energy Plus

CITATION LINKS

[1] Effect of fenestration geometrical factors on building energy ... [2] Thermal performance of building under two ideal heating ... [3] Analysis of atrium pattern, Trombe wall and solar greenhouse ... [4] A review on the application of Trombe wall system ... [5] Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical ... [6] Trombe walls in low-energy buildings: Practical ... [7] Optimizing energy and environmental performance of passive ... [8] Effect of an absorptive coating on solar energy storage ... [9] Review of passive solar heating and cooling ... [10] Effect of solar storage wall on the passive solar heating ... [11] Natural ventilation of houses by a Trombe wall under the climatic conditions in ... [12] A numerical study of Trombe wall for enhancing stack ventilation ... [13] Optimum design of Trombe wall system in Mediterranean ... [14] New wall quality and natural ... [15] Heat transfer analysis of a Trombe wall with ... [16] Optimizing the energy function of non-populated walls on ... [17] A comparative performance study of some thermal ... [18] Modular panels with heating and cooling ... [19] Numerical analysis of heat transfer in a passive ... [20] The comparison of Trombe wall systems ... [21] Parameters that affect the performance of Trombe ... [22] Numerical study on thermal behavior of classical or ... [23] Influence of constructive and operating parameters ... [24] Empirical analysis and numerical influence the size and location of the valve Trombe wall ... [25] The thermal rehabilitation of the building blocks in the cold climate in Iran by taking advantage of features ... [26] Thermal analysis research program reference ... [27] Lawrence Berkeley ... [28] Comprehensive room transfer functions for efficient calculation of the transient heat transfer processes in ... [29] The role of extensive green roofs in sustainable ... [30] Ilam city climate comfort based on biological indicators ... [31] Determining the thermal comfort range of the building in Ahwaz based on ... [32] Natural convection in sealed glazing units: A ... [33] Free convection heat transfer across inclined air ... [34] 15099:2003-Thermal performance of windows, doors ... [35] Sensitivity analysis of energy consumption with respect to ... [36] Determination of thermal comfort in dry ...

معرفی و در سال ۱۹۵۷ توسط فلیکس ترومب و ژاک میشل توسعه داده شد. در سال ۱۹۶۷، در ادیلو، فرانسه، ترومب و میشل اولین خانه را با استفاده از دیوار ترومب ساختند. این دیوار، شامل یک پیکربندی ساده است که برای گرم کردن فضای داخل با استفاده از جذب انرژی خورشید توسط دیوار ترومب طراحی شده است. شکل ۱ طبقه بندی عمومی دیوار ترومب را نشان می‌دهد.



شکل ۱) طبقه بندی دیوار ترومب [4]

دیوار ترومب به منظور کنترل طبیعی دمای هوای بخشی از فضاهای داخلی ساختمان (در این مطالعه راهروهای جنوبی مورد نظر است) استفاده می‌شود تا بتوان علاوه بر ایجاد سطح قابل قبولی از آسایش حرارتی، از هزینه‌های ناشی از گرمایش ساختمان کم کرد. به همین منظور با توجه به مطالعات میدانی که صورت گرفت مشخص شد در اهواز می‌توان دمای محیط داخلی را در ماه‌های سرد سال بدون نیاز به وسایل مکانیکی نظیر بخاری‌های برقی و گازی، به صورت کاملاً طبیعی و با استفاده از دیوار ترومب به حد مطلوب آسایش حرارتی رساند و با استفاده از دیوار ترومب مصرف انرژی در پنج ماه از سال را کاهش داد. ضمن اینکه در فصول گرم سال نیز به راحتی عملکرد آن تغییر می‌کند و تبدیل به سایه‌انداز می‌شود که البته در این پژوهش به آن پرداخته نشده است. به منظور مقایسه رفتار حرارتی دیوار ترومب، هندسه‌های مختلفی مورد آزمایش قرار گرفته است. مقایسه مدل‌های شبیه‌سازی شده با یکدیگر نشان دادند که توجه به هندسه دیوار ترومب از اهمیت زیادی برخوردار است که می‌تواند تاثیر زیادی بر عملکرد حرارتی آن داشته باشد.

در سال‌های اخیر مقوله دیوار ترومب مورد توجه پژوهشگران بسیاری بوده است. کروگر و همکاران در مطالعه‌ای به اندازه‌گیری در دو فضا به ابعاد ۲۵ و ۵ متر مکعب که به طور خاص برای آزمایش سیستم دیوار ترومب تحت شرایط نیمه گرمسیری طراحی شده بود، پرداختند [5]. طبق مطالعات ترسلینی و پلس، می‌توان ۲۳٪ انرژی حرارتی ساختمان را در طول سال توسط دیوار ترومب فراهم نمود [6]. همچنین طبق یافته‌های بوجیک و همکاران، ساختمان‌های دارای دیوار ترومب توانایی ذخیره انرژی سالیانه در حدود ۲۳٪ در حین عملکرد گرمایشی را دارد [7]. نوچوکو و اوکونکو طی تحقیقاتی دست یافتند که جذب و ظرفیت

مقایسه رفتار حرارتی دیوارهای ترومب جنوبی با ترکیبات متفاوت هندسی در فضاهای راهرویی شهر اهواز

امید رهایی* PhD

گروه معماری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، تهران، ایران

آیه رضاییزاده MSc

گروه مهندسی معماری، دانشکده فنی و مهندسی، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران

چکیده

امروزه استفاده موثر از انرژی خورشیدی در راستای مصرف بهینه در صنعت ساختمان به یکی از دغدغه‌های طراحان و سازندگان بدل شده است. مطالعات نشان می‌دهند که با طراحی صحیح جداره‌های خارجی ساختمان، می‌توان میزان جذب انرژی خورشیدی را برای ساختمان مدیریت نمود. اهواز شهر گرمسیری است که در بیشتر طول سال نیاز به سرمایش مکانیکی دارد. با این حال پنج ماه سرد دارد که در سه ماه آن استفاده از سیستم‌های گرمازا جهت تامین آسایش حرارتی ساکنان الزامی است. لذا دیوار ترومب مورد توجه این پژوهش قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی و مقایسه رفتار حرارتی دیوارهای ترومب با ترکیبات شکلی متفاوت در جداره‌های آفتاب‌گیر (جنوبی) فضاهای راهرویی در شهر اهواز است. روش تحقیق، یک روش ترکیبی است که راهبردهای تحقیق تجربی، شبیه‌سازی و پژوهش موردی را درگیر می‌نماید. بر این اساس و پس از مشاهدات تجربی و تحقیقات میدانی بر روی نمونه‌های واقعی، یک الگوی کلی به دست آمد و محاسبات عددی شبیه‌سازی‌ها با روش CTF پس از اثبات روایی و پایایی، با نرم‌افزار انرژی پلاس انجام شد. در این پژوهش با مطالعه بر روی جدار آفتاب‌گیر (ضلع جنوبی) یک فضای راهرویی پیش‌فرض، پنج ترکیب کلی دیوار ترومب با شرایط یکسان شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده است که به منظور مدیریت جذب انرژی، هندسه دیوار ترومب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و نمونه شطرنجی آن، نسبت به مدل‌های دیگر عملکرد بهتری دارد. در خاتمه نیز پیشنهاداتی ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: دیوار ترومب، عملکرد حرارتی، جدار آفتاب‌گیر، انرژی پلاس

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

*نویسنده مسئول: o.rahaei@sru.ac.ir

مقدمه

نماهای خارجی در ساختمان به منظور دسترسی به نور روز و دید، اهمیت فراوانی دارند [1]. همچنین انتقال حرارت در جدار خارجی ساختمان، به تراکم آن، ظرفیت حرارتی و هدایت حرارتی مربوط است [2]. سیستم‌های خورشیدی غیرفعال، انرژی خورشیدی را ذخیره می‌کنند و بدون استفاده از ابزارهای مصرف انرژی مانند پمپ‌ها یا کنترل‌کننده‌ها، می‌تواند در زمان نیاز مورد استفاده قرار گیرد [3]. یکی از راه‌های ایجاد گرمایش استفاده از دیوار ترومب است که با جذب انرژی خورشید گرمای فضای داخل را تامین خواهد نمود. مفهوم دیوار ترومب توسط مورس در قرن نوزدهم

در عمق ۲/۵ سانتی‌متری کانال عبور هوا گزارش شده است [23].
خالصی‌دوست و همکاران نیز به تحلیل تجربی و عددی تاثیر اندازه و محل دریچه‌های دیوار ترومب با استفاده از مواد تغییر فاز پرداخته است [24]. لازم به ذکر است که در بیشتر پژوهش‌های ذکرشده، روش محاسبه (Conduction Transfer Functions; CFT) و نرم‌افزار انرژی‌پلاس مورد استفاده قرار گرفته است. توجه به هندسه دیوار ترومب با اینکه بر عملکرد آن بسیار تاثیرگذار است ولی تاکنون مورد توجه پژوهشگران قرار نگرفته که در این پژوهش به مقایسه رفتارهای مختلف دیوار ترومب در هندسه‌های متفاوت پرداخته خواهد شد.

روش حل

روش حل، با توجه به ماهیت بین رشته‌ای آن یک روش ترکیبی است؛ در مرحله اول با استفاده از یک راهبرد تجربی، متغیرهای تاثیرگذار مورد نظر شناسایی و مدل‌های تحقیق، بررسی شدند. ساختار کالبدی جداره آفتاب‌گیر (جنوبی) فضای راهرویی به‌عنوان متغیر مستقل، و عملکرد حرارتی دیوار ترومب به‌عنوان متغیر وابسته مورد مطالعه قرار گرفتند. به‌منظور بررسی دمای داخلی نمونه موردی، از دماسنج Victor مدل VC10C+ با درصد خطا مثبت و منفی یک درجه سانتی‌گراد استفاده شد. مشاهدات تجربی نشان داد که دیوار ترومب می‌تواند عملکرد حرارتی فضاهای راهرویی جامعه آماری را کنترل نماید. جامعه آماری انتخابی تمامی فضاهای راهرویی دارای یک جداره آفتاب‌گیر (جنوبی) را در اهواز شامل می‌شود. یک فضای راهرویی در اهواز که یک ضلع آن رو به جنوب و آفتاب‌گیر بود نیز به‌عنوان یک نمونه موردی تصادفی از این جامعه آماری انتخاب شد. در مرحله بعد به‌منظور تحلیل داده‌ها و نیز مداخله در معماری، از روش شبیه‌سازی استفاده شد (مطابق ادبیات موضوع). شبیه‌سازی‌ها با روش محاسبه CTF و با نرم‌افزار انرژی‌پلاس نسخه ۸/۲ صورت گرفته‌اند. عملکرد نرم‌افزار انرژی‌پلاس بر پایه مشخصات ساختمان شامل ساختار فیزیکی، معرفی سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی آن با استفاده از داده‌های آب‌وهوایی سالانه ساعت‌به‌ساعت محل استقرار ساختمان (شهر مورد نظر)، می‌تواند اطلاعات مربوط به دما و همچنین بار سرمایش و گرمایش را مورد شبیه‌سازی و آنالیز قرار دهد و همچنین با تعریف محدوده‌ای به‌عنوان محدوده آسایش می‌تواند محاسبات را انجام دهد [25]. برای محاسبات انتقال حرارت همرفتی سطح داخلی از روش TARP نرم‌افزار استفاده شده که براساس الگوریتم تهیه‌شده توسط وائتون است [26]. همچنین از روش DOE-2 برای محاسبات مربوط به انتقال حرارت همرفتی سطح خارجی استفاده شده است [27].

جزئیات حل با نرم‌افزار

برای محاسبه دقیق میزان انتقال حرارت در جدارهای داخلی و خارجی دیوار ترومب از روش CTF نرم‌افزار انرژی‌پلاس استفاده شده است. این روش در شرایط موجود که تعداد لایه‌های جدار

ذخیره‌سازی دیوار ترومب را می‌توان با استفاده از یک پوشش با قدرت جذب بالاتر بهبود بخشید [8]. براساس بررسی چان و همکاران دیوار ترومب توانایی ذخیره انرژی و گرمایش اتاق در طول مدت شب را دارد [9]. مطالعات نشان می‌دهد که بهترین جهت برای خانه با سقف صاف، جهت شمال- جنوب است که در این حالت بیشترین دما داخل اتاق ایجاد شده و برای خانه با سقف مثلثی بهترین جهت شرق- غرب است [10].

خداری و همکاران برای جذب بهتر تابش خورشید و ذخیره آن در مناطق گرم و مرطوب، رنگ سیاه را برای دیوار مناسب می‌دانند [11]. طبق یافته‌های لیپینگ و آنگویی با افزایش میزان شدت تابش خورشید، میزان دبی جرمی افزایش می‌یابد [12]. در پژوهشی دیگر، که ضخامت دیوار ترومب ۲۰ سانتی‌متر بود و سطح آن با مواد جاذب سیاه‌رنگ پوشانده شد، مشخص شد میزان انرژی ذخیره‌شده با افزایش نسبت مساحت دیوار ترومب به کل دیوار جنوبی ساختمان قابل افزایش است [13]. سیستم پیشنهادی قیابکلو، شامل یک دیوار آجری خاص است که بین دو سطح شیشه (پنجره) محصور شده است. یک لوله آب به‌صورت افقی روی بالاترین ردیف آجرها قرار می‌گیرد تا عمل رطوبت‌زنی از طریق نازل‌های روی لوله آب به‌صورت قطره‌ای یا اسپری روی آجرها انجام پذیرد [14]. ربانی و همکاران در یزد به تجزیه و تحلیل انتقال حرارت دیوار ترومب با طراحی کانال طراحی پرداخته‌اند. هدف اصلی بررسی تاثیر نوع انتقال حرارت بر تغییرات دما در پشت دیوار ترومب و جذب در طول روز بود [15].

طبق یافته‌های سخندان سرخابی و خان‌محمدی در زمستان چنان چه یکی از جبهه‌های آفتاب‌گیر به‌دلایلی مانند باد نامطلوب قابلیت ایجاد سطوح شیشه‌خور را نداشته باشد، گرمای طبیعی ساختمان مختل خواهد شد [16]. در پژوهشی دیگر، یک لایه ۴ سانتی‌متری نمک هیدریدشده در مقایسه با لایه بتن ۲ و دیوار پارافینی یک سانتی‌متری، دما را داخل اتاق با کمترین تغییرات دمایی در شرایط مطلوب حفظ می‌کند [17].

ابوالحسنی و همکاران، پانلی جهت نصب در نمای ساختمان طراحی کردند. پانل مدولار نمای ساختمان با قابلیت گرمایش و سرمایش، در زمستان از آب به‌عنوان جرم حرارتی استفاده نمود و عملکردی همچون دیوار ترومب داشت و در فصل تابستان با حذف جرم حرارتی و بهره‌گیری از سرمایش تبخیری، به خنک‌سازی فضای داخل کمک نمود [18]. طبق نتایج پژوهش چین و لیو، میزان متخلخل‌بودن، جنس و موقعیت جاذب در محفظه و رسانایی لایه‌های جاذب از عوامل تاثیرگذار بر روی دمای اتاق است [19]. در طول شب برای سیستم دیوار ترومب با شیشه دوجداره دمای داخل اتاق بالاتر از حالت شیشه تک‌داره است [20]. کاملی فاصله مناسب بین دیوار ترومب و جدار شیشه‌ای را بین ۱۸ تا ۲۰ سانتی‌متر عنوان نموده است [21]. دیوارهای ترومب ترکیبی در مقایسه دیواره‌های ترومب سنتی در شرایط آب‌وهوایی سرد و یا ابری، عملکرد بهتری دارند [22] و حداکثر بهره‌وری دیوار خورشیدی

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_1}{dt} \\ \frac{dT_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} - \frac{hA}{C} & \frac{1}{RC} \\ \frac{1}{RC} & -\frac{1}{RC} - \frac{hA}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{hA}{C} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

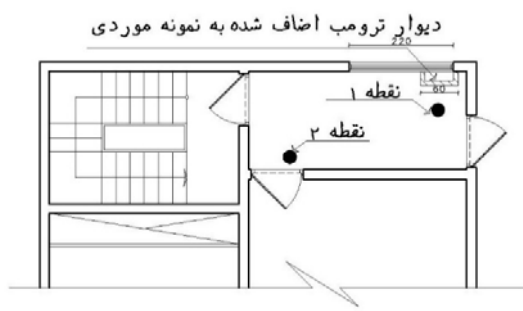
$$\begin{bmatrix} q_i'' \\ q_0'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -h \\ h & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & h \\ -h & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0 \\ T_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها در نمونه موردی که یک فضای راهرویی در طبقه دوم یک ساختمان مهمان‌پذیر خصوصی، واقع در منطقه سپیدار اهواز، با یک جدار آفتاب‌گیر جنوبی که دارای یک پنجره شیشه‌ای بود (شکل‌های ۲ و ۳)، آزمون تجربی انجام شد. پنجره مذکور (آزمون) به ابعاد $2 \times 2/5$ متر است که بخشی از آن به ابعاد $1/9 \times 0/6$ متر، به کمک یک تیغه بنایی، تبدیل به دیوار ترومب غیرتهویه‌شونده شده بود. به این صورت که ابتدا یک قاب فلزی به ابعاد $1/9 \times 0/6$ متر و عمق 10 سانتی‌متر ساخته شد و درون یک تیغه آجری 10 سانتی‌متری قرار داده شد. سپس سمت رو به پنجره تیغه به رنگ مشکی جهت جذب انرژی خورشید درآمد و سمت رو به اتاق آن سفید شد که در شکل ۲ مشخص است. جهت قرارگیری دماسنج در محفظه دیوار ترومب دریاچه‌ای کوچک به ابعاد 15×10 سانتی‌متر در وسط تیغه (ارتفاع 10 سانتی‌متری از کف اتاق) پیش‌بینی شد. دو نقطه دیگر نیز مطابق شکل ۳ (داخل فضای راهرویی)، در تراز $1/2$ متری از کف اتاق و به فاصله 50 سانتی‌متری از دو دیوار مجاور فرض شدند تا دمای داخلی نیز اندازه‌گیری شود.



شکل ۲) دیوار ترومب در نمونه موردی



شکل ۳) پلان نمونه موردی

زیاد است سرعت بالایی جهت محاسبه ارایه می‌کند. CTF به معنی توابع انتقال هدایت است. توابع انتقال هدایت یک روش کارآمد برای محاسبه شار حرارتی سطح است. به همین دلیل این روش نیاز به دانستن دما و میزان جریان حرارتی مقطع داخلی جدار را از بین می‌برد. روش اساسی مورد استفاده در محاسبات انرژی‌پلاس برای CTF به عنوان روش فضای حالت شناخته می‌شود [28]. یکی دیگر از رایج‌ترین روش‌های قدیمی، تغییرات لاپلاس برای رسیدن به راه‌حل استفاده شده است. روش لاپلاس در بلاست (BLAST) مورد استفاده قرار گرفت. سیستم فضای حالت اولیه توسط معادلات ماتریس خطی زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{d[x]}{dt} = [A][x] + [B][u] \quad (1)$$

$$[y] = [C][x] + [D][u] \quad (2)$$

که در آن x یک بردار متغیر حالت، u بردار ورودی، y بردار خروجی، t زمان، A ، B ، C و D ماتریس ضریب هستند. از طریق استفاده از جبر ماتریسی، بردار متغیر حالت را می‌توان از سیستم معادلات حذف کرد و بردار خروجی می‌تواند مستقیماً به بردار ورودی و بردارهای زمان ورودی و خروجی مربوط باشد.

این فرمول را می‌توان برای حل معادله هدایت حرارتی گذرا با استفاده از یک شبکه اختلاف محدود بر روی لایه‌های مختلف در عنصر ساختمان مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. در این حالت، متغیرهای حالت، درجه حرارت پایه هستند. درجه حرارت محیط (داخلی و خارجی) ورودی و شار حرارت حاصل از آن در هر دو سطح خروجی است. بنابراین، نمایش فضای حالت با متغیرهای متناهی محدود، به صورت زیر است:

$$\frac{d \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix}}{dt} = [A] \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} T_i \\ T_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} q_i'' \\ q_0'' \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} + [D] \begin{bmatrix} T_i \\ T_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در آن T_1 ، T_2 ، ...، T_{n-1} ، T_n درجه حرارت متفاوت گره، n تعداد گره‌ها، T_i و T_0 درجه حرارت محیط داخلی و خارجی و q_0'' و q_i'' شار حرارتی (خروجی مورد نظر) هستند.

سیم [28] نشان می‌دهد که برای یک صفحه یک‌لایه ساده با دو گره داخلی و همرفت در هر دو طرف معادلات اختلاف محدود حاصل از طریق رابطه‌های زیر است:

$$C \frac{dT_1}{dt} = hA(T_0 - T_1) + \frac{T_2 - T_1}{R} \quad (5)$$

$$C \frac{dT_2}{dt} = hA(T_i - T_2) + \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (6)$$

$$q_i'' = h(T_i - T_2) \quad (7)$$

$$q_0'' = h(T_1 - T_0) \quad (8)$$

که در اینجا R و C از طریق معادلات زیر به دست می‌آیند. A ناحیه سطحی است که در معرض دماهای محیطی قرار دارد.

$$R = \frac{\ell A}{kA}, \quad (9-الف)$$

$$C = \frac{\rho c_p \ell A}{2} \quad (9-ب)$$

در قالب ماتریس به صورت زیر است:

ماه از سال را در برمی‌گیرد (اردیبهشت تا مهرماه) و در چهار ماه (خرداد، تیر، مرداد و شهریور) شرایط بسیار سخت آب‌وهوایی حاکم است (جدول ۳). لذا استفاده از وسایل مکانیکی و تهویه مطبوع در این ماه‌ها ضروری است. طبق نمودار گتر و رو [29] سه ماه سرد سال در اهواز (آذر، دی، بهمن) وجود دارد و دی‌ماه با میانگین دمای ۱۱ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان سردترین ماه سال به‌شمار می‌رود.

جدول ۲ دمای هوای ثبت‌شده در دو حالت پنجره باز و بسته در نقطه یک از شکل ۳ (واحدها برحسب درجه سانتی‌گراد هستند)

ساعت	روز	دما با پنجره بسته	دما با پنجره باز
۱۳	چهارم	۲۸	۲۶
۱۵	ششم	۲۷	۲۶
۱۷	ششم	۲۶	۲۴
۱۲	هفتم	۲۹	۲۵
۱۴	هفتم	۲۷	۲۶
۱۵	هفتم	۲۸	۲۴
۱۳	هشتم	۲۶	۲۳

جدول ۳ درجه‌بندی ضرایب آسایش ماه‌های مختلف در شهر اهواز [31] (اعداد برحسب درجه سانتی‌گراد هستند)

ماه‌های سال	دمای موثر
فروردین	۲۳/۲۵
اردیبهشت	۳۰/۴۰
خرداد	۴۳/۷۳
تیر	۳۵/۹۹
مرداد	۳۴/۹۶
شهریور	۳۰/۸۶
مهر	۲۵/۴۶
آبان	۱۷/۹۵
آذر	۱۳/۲۵
دی	۱۱/۹۸
بهمن	۱۳/۸
اسفند	۱۷/۳۹

تعریف مساله و مدل سازی ریاضی دیوار ترومب

از الگوریتم دیوار ترومب به‌منظور مدل‌سازی جابه‌جایی در منطقه دیوار ترومب، یعنی فاصله هوایی بین سطح دیوار ذخیره‌سازی و شیشه بیرونی استفاده می‌شود. این الگوریتم، ضرایب انتقال هوا را در یک حفره عمودی (غیرتهویه‌شونده) باریک ایجاد می‌کند. این ضرایب انتقال حرارت تنها تفاوت بین یک منطقه معمولی و یک دیوار ترومب هستند. بقیه تعادل حرارتی ناحیه به‌عنوان مثال، تابش خورشیدی، تابش موج بلند بین سطوح و غیره مشابه است. عدد ناسلت بیان‌کننده نرخ انتقال حرارت به‌صورت همرفتی است که فرمول آن در رابطه ۱۲ نشان داده شده است [31].

$$Nu = hcl/k \rightarrow hc = kNu/L \quad (12)$$

همچنین عدد ناسلت با عدد رایلی (متناسب با نیروی شناوری) و عدد پراتنل (بیان‌کننده تاثیر ویژگی‌های ذاتی سیال در انتقال حرارت) در ارتباط مستقیم است.

دماسنج از طریق یک آویز سقفی (به‌منظور حذف خطای انسانی) در این نقاط (شکل ۳) نصب شد و پس از ثابت‌شدن، داده‌ها خوانده شدند. بدین ترتیب آزمون دماسنجی در یک دوره آزمون ۱۰ روزه درون دیوار ترومب (از طریق دریچه آزمون) و نیز نقاط مشخص‌شده در شکل ۳، انجام شد. این آزمون در روزهای ۱۵ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۷ حدود ساعت ۱۰ صبح انجام شد. نتایج آن به شرح جدول ۱ است. میانگین داده‌ها در نرم‌افزار انرژی‌پلاس با استفاده از فایل اطلاعات آب‌وهوایی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اندازه‌های به‌دست‌آمده و محاسبه درصد خطای حاصل از داده‌های تجربی و شبیه‌سازی، میزان خطای به‌دست‌آمده ۳/۵۱٪ بود که طبق استاندارد اشری مقدار خطای ساعتی زیر ۱۰٪ مجاز است.

جدول ۱ دماهای ثبت‌شده در ۱۰ روز آزمون و در نقاط آزمون (شکل ۳) (واحدها برحسب درجه سانتی‌گراد هستند)

روزهای انجام‌شده	نقطه یک	نقطه ۲	محفظه درون دیوار ترومب
اول	۱۸	۱۷	۴۰
دوم	۲۲	۲۲	۴۵
سوم	۲۲	۲۱	۴۴
چهارم	۲۳	۲۲	۵۱
پنجم	۲۰	۲۰	۴۷
ششم	۲۳	۲۲	۵۰
هفتم	۲۶	۲۴	۵۳
هشتم	۲۲	۲۱	۴۹
نهم	۲۱	۱۹	۴۸
دهم	۱۹	۱۸	۴۲

بنابراین طبق اعتبارسنجی به‌دست‌آمده صحت نتایج شبیه‌سازی تایید می‌شود و سایر مدل‌ها با همین روش شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین آزمون‌های تجربی مطابق جدول ۲ در ساعات دیگر روز در همان روزهای آزمون انجام پذیرفت. داده‌ها نشان دادند که استفاده از دیوار ترومب طی ساعات ۸ صبح تا ۱۷ بعدازظهر نوسانات دمایی ایجاد می‌نماید و در بعضی از ساعات دمای هوا بالاتر از حد آسایش می‌رسد که با بازکردن پنجره در آن ساعت دمای هوا به حد متعادل‌تری درآمده است (جدول ۲). همچنین دمای هوای داخل بدون در نظر گرفتن دیوار ترومب و صرفاً با قرارگیری پنجره در جهت تابش مستقیم آفتاب به سختی و تنها در چندین ساعت در برخی روزها می‌تواند به حد قابل قبول آسایش حرارتی برسد. در حالی که با اضافه‌شدن دیوار ترومب در تمام ساعات گرمای مطبوعی به‌دست آمده بود.

گتر و رو جدولی به نام جدول بیوکلیماتیک (شاخص زیست‌اقلیمی) پیشنهاد نمودند [29]. آنها ثابت کردند رابطه دمای خشک هوا و احساس وضعیت گرمایی، محسوس‌تر از رابطه دمای موثر و وضعیت گرمایی است [30]. *حویزووی* و *مرشدی* [31] براساس روش گتر و رو می‌گویند فصل گرم در اهواز، طولانی و حدود شش

جدول ۴) معرفی مصالح مورد استفاده در دیوار ترومب

مصالح	ضخامت (cm)	چگالی (kg/m ³)	ضریب هدایت حرارتی (w/m-k)
آجر	۲۰	۲۰۰۰	۰/۸۹
صفحه جذب	۰/۱۶	۸۹۰۶/۲۶	۳۹۲/۶۱
شیشه ساده (لایه داخلی و خارجی)	۰/۲۵	-	۰/۹
گاز آرگون	۰/۳	-	-
فاصله هوایی	۲۰	-	-

در اقلیم‌هایی که زمستان در این مناطق معتدل است، ویژگی‌های خاصی از قبیل عایق‌بندی پشت دیوارهای ترومب ممکن است تاثیر زیادی بر عملکرد سیستم نداشته باشد [5]. به همین دلیل استفاده از عایق بر روی سطح رو به راهروی دیوار ترومب صرف نظر شده است. استفاده بهینه از یک پرده نازک جاذب حرارت بر روی سطح خارجی دیوار ترومب احتمالاً سرعت انتقال گرما به محوطه را افزایش خواهد داد [8]. ضمناً مدل‌های شبیه‌سازی شده مطابق جدول ۵ معرفی می‌شوند. لازم به ذکر است که این مدل‌ها پس از آزمون‌های متعدد به‌دست آمده‌اند.

جدول ۵) معرفی مدل‌ها و تصاویر آنها (اعداد برحسب متر مربع هستند)

ابعاد هر دیوار ترومب	شکل خارجی	شکل داخلی
۳/۵×۲ مدل: ساده		
۳/۵×۵ مدل: عمودی		
۳/۵×۲ مدل: افقی		
۳/۲۰×۵ مدل: عمودی منحنی		
۰/۸۷۵×۰/۸۷۵ مدل: شطرنجی		

تفسیر و تحلیل نتایج

شبیه‌سازی‌ها بر مبنای مشاهدات تجربی در دوره ۱۰ روزه آزمون (از ۱۵ تا ۲۵ دی، طبق پژوهش موردی) انجام شده است. طبق نمودار ۱ بالاترین میزان دمای بیرون در ساعات ۱۴ تا ۱۶ بعد از ظهر است که میانگین دما در این ساعات ۱۱ درجه سانتی‌گراد است. همچنین پایین‌ترین میزان دمای بیرون مربوط به ساعات ۵ تا ۸ صبح است که میانگین آن به ۳ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که در این ساعات دیوار ترومب شطرنجی با میانگین ۱۷ درجه سانتی‌گراد توانسته است ۱۴ درجه اختلاف دما در این ساعات را به وجود بیاورد. همچنین راهرو در دیوار ترومب شطرنجی در ساعات گرم (۱۴ تا

$$Nu=f(Ra,Pr) \quad (13)$$

عدد رایلی براساس فاصله شکاف هوا (L) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RaL = \frac{g\beta(T_1-T_2)L^3}{\nu} \quad (14)$$

برای حفره‌های عمودی، مانند دیوارهای ترومب، همبستگی براساس رابطه رایت [32] استفاده می‌شود. رابطه ۱۵ برای یک حفره عمودی در نظر گرفته شده است [32,33]:

$$Nu_1 = 0.0673838 Ra^{1/3} \quad 5E4 < Ra < 1E \quad (15)$$

$$Nu_1 = 0.028154 Ra^{0.4134} \quad 1E4 < Ra < 5E4 \quad (16)$$

$$Nu_1 = 1 + 1.7596678E-10 Ra^{2.2984755} \quad Ra \leq 1E4 \quad (17)$$

$$Nu_2 = 0.242(Ra/a)^{0.272} \quad (18)$$

$$Nu = \text{Max}(Nu_1, Nu_2) \quad (19)$$

ضریب همرفت خالص از سطحی به سطح دیگر در نرم‌افزار انرژی‌پلاس به شرح زیر است:

$$h_{net} = K(Nu/L) \quad (20)$$

ضریب همرفت اعمال‌شده به هر دیوار به‌طور جداگانه و در واقع در تعادل گرمایی منطقه به‌صورت رابطه ۲۱ استفاده می‌شود:

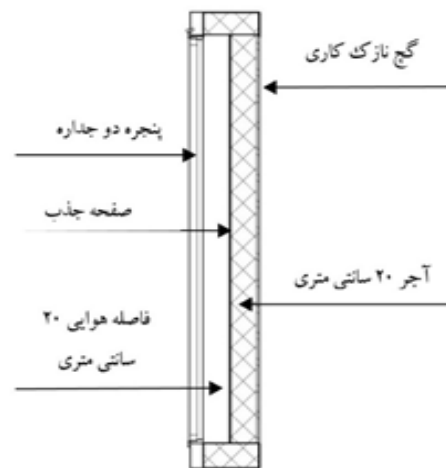
$$h_c = 2h_{net} \quad (21)$$

ضریب هدایت خالص، شار حرارتی کل حفره را تعیین می‌کند که در رابطه ۲۲ نشان داده شده است.

$$q'' = h_c \cdot net (T_1 - T_2) \quad (22)$$

هندسه مساله

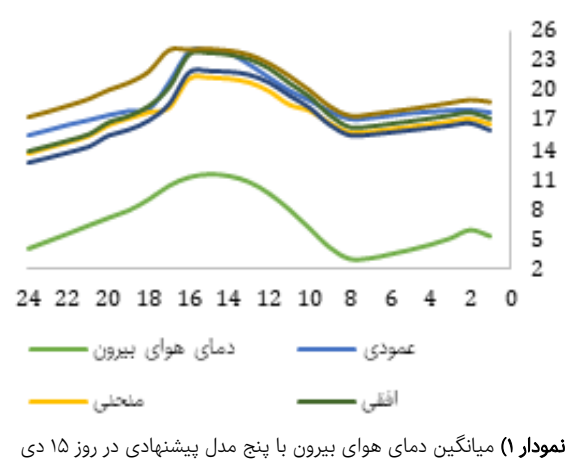
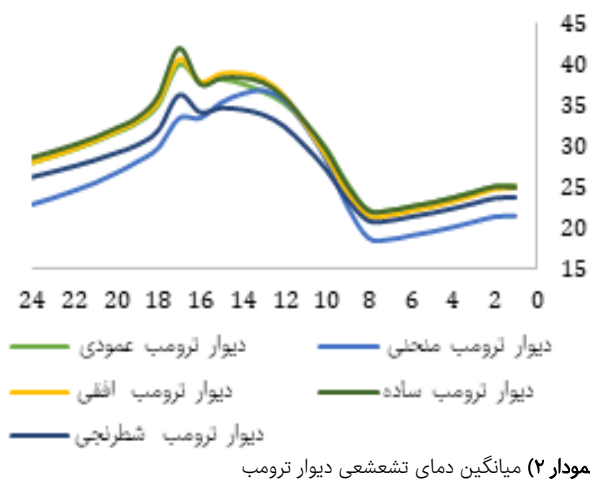
یک راهرو با اندازه ۲×۸ و ارتفاع ۳/۵ متر مربع (مشابه راهروهایی که در جامعه آماری و پژوهش موردی بوده است) به‌عنوان مدل شبیه‌سازی‌شده در نظر گرفته شده است. در این ناحیه نسبت پنجره به دیوار (Window-to-Wall Ratio; WWR) در تمام مدل‌ها در بازه ۴۰٪ است [34] و شرایط کاملاً یکسانی از جهت تامین روشنایی و مصرف انرژی و تاثیرگذاری بر سرمایه‌ش و گرمایش در تمام مدل‌ها وجود دارد. مصالح استفاده‌شده در مدل‌های مورد نظر در شکل ۴ و جدول ۴ معرفی شده است.



شکل ۴) جزئیات دیوار ترومب مورد پژوهش

ساعت ۱۰ صبح تا ۱۶ بعدازظهر دمای تشعشعی آن با سه مدل دیگر برابر خواهد شد و طی این ساعات دیوار ترومب شطرنجی پایینترین میزان دما را ارائه نموده است. این درحالی است که طی تغییر ساعت، از ساعت ۱۶ بعدازظهر دوباره دیوار ترومب منحنی کمترین میزان دمای تشعشعی را خواهد داشت. در کل ۲۴ ساعت، در ساعت ۱۷ بعدازظهر بالاترین دما تشعشعی با ۴۲ درجه سانتیگراد متعلق به دیوار ترومب ساده است. با توجه به داده‌ها سه مدل دیوار ترومب (عمودی، افقی، ساده) که سطح آنها به صورت یکپارچه امتداد یافته است دمای تشعشعی بالاتری نسبت به دو مدل دیگر ارائه داده‌اند. با توجه به آنکه در دیوار ترومب منحنی دیوارها نسبت به یکدیگر عقب و جلو شده‌اند بر میزان جذب تابش آن تاثیر گذاشته و باعث شده عملکرد پایینی نسبت به چهار مدل دیگر داشته باشد. به بیان دیگر می‌توان گفت قرارنگرفتن سطوح در یک راستا (با علم بر آنکه مانعی برای جذب تابش در مقابل هیچ کدام از سطوح نباشد) بر عملکرد جذب تاثیرگذار خواهد بود و می‌تواند میزان جذب را کاهش دهد.

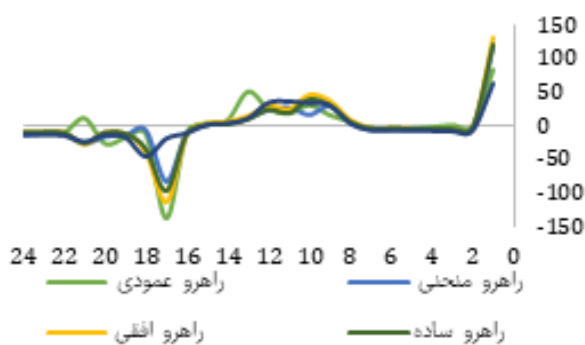
۱۶) با دیوار ترومب عمودی و افقی توانسته است به یک دما دست یابد که با میانگین ۲۳ درجه سانتیگراد نسبت به دمای بیرون ۱۲ درجه اختلاف دمایی را ایجاد نموده‌اند. راهرو دیوار ترومب ساده در ساعات سرد (۵ تا ۸ صبح)، کمترین میزان دما را داشته است که با میانگین ۱۵ درجه سانتیگراد تنها ۲ درجه اختلاف دما با راهرو دیوار ترومب شطرنجی داشته است. این درحالی است که دیوار ترومب ساده در ساعات بین ۹ صبح تا ۱۷ بعدازظهر نسبت به راهرو دیوار ترومب منحنی با ۵/۰ درجه اختلاف دما توانسته است در این ساعات عملکرد بالاتری داشته باشد. با توجه به عملکرد دیوارها می‌توان به این نتیجه رسید در یک نسبت برابر هر چه تعداد دیوارهای جذب نسبت به سطح بیشتر باشد عملکرد بالاتری خواهد داشت که به این معنی است با رعایت نسبت ۴۰٪ در تمام مدل‌ها دیوار ترومب شطرنجی با تعداد بیشتر صفحه جذب و کوچکترین میزان سطح، عملکرد بالاتری نسبت به دیوار ترومب ساده با کمترین تعداد صفحه جذب و بزرگترین سطح داشته است.



اما در دمای تشعشعی راهرو طبق نمودار ۳، تا ساعت ۸ صبح راهرو دیوار ترومب شطرنجی نسبت به سایرین بالاترین دمای تشعشعی را دارد. همچنین از ساعت ۸ تا ۱۱ صبح دمای تشعشعی آن با راهرو دیوار ترومب افقی و عمودی به یک میزان دما می‌رسد، سپس طی ساعات ۱۲ تا ۱۸ بعدازظهر دما در راهرو دیوار ترومب افقی به بالاترین حد خود می‌رسد و دوباره از ساعت ۱۹ به بعد راهرو دیوار ترومب شطرنجی بالاترین میزان دمای تشعشعی را خواهد داشت. همان طور که بیان شد تعداد صفحه جذب بر عملکرد دما تاثیرگذار خواهد بود، با علم بر این مساله و مقایسه مدل‌ها مشخص شد در دمای تشعشعی راهرو، نحوه قرارگیری دیوارها تاثیرگذارتر از سایر موارد است که می‌تواند ناشی از زاویه تابش خورشید باشد. قرارگیری به صورت افقی عملکرد بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد.

از لحاظ میزان دمای تشعشعی هر دو منطقه راهرو و دیوار ترومب مورد بررسی قرار گرفتند. دمای تشعشعی در واقع گرمایی است که از طریق تابش انتقال می‌یابد و به طور کلی تشعشع در اجسامی که با یکدیگر تفاوت دمایی دارند صورت می‌گیرد و از جسم گرم به جسم سرد انتقال می‌یابد. طبق نتایج در نمودار ۲ دیوار ترومب ساده از ساعت یک بامداد تا ۱۱ ظهر دمای تشعشعی ثابتی با دیوار ترومب عمودی داشته است و بین ساعات ۱۲ تا ۱۵ بعدازظهر دیوار ترومب افقی توانسته است نسبت به سایرین بالاترین دما را داشته باشد. در ساعت ۱۶ بعدازظهر هر سه دیوار ترومب ساده، عمودی و افقی به یک میزان دما دست می‌یابند و سپس بعد از آن در ساعت ۱۷ به بعد دیوار ترومب ساده از دو مدل دیگر دمای بالاتری را خواهد داشت. همچنین دیوار ترومب منحنی که در ساعات یک بامداد تا ۹ صبح پایینترین دمای تشعشعی را داشته است از

از لحاظ ذخیره انرژی نوسانات بسیار زیادی در مدل‌ها ایجاد شده است که در بین آنها راهرو دیوار ترومب شطرنجی توانسته است نسبت به سایر مدل‌ها کمترین نوسان را در طی یک روز داشته باشد. طبق نمودار ۵ بیشترین نرخ ذخیره‌سازی در ساعت یک بامداد در راهرو دیوار ترومب افقی انجام شده است. همچنین کاهش ذخیره انرژی در ساعت ۱۷ بعدازظهر در راهرو دیوار ترومب عمودی صورت گرفته است. دیوار ترومب عمودی نسبت به سایر مدل‌ها از نوسانات بیشتری برخوردار بوده است. طبق نمودار در ساعت بین یک تا ۲ بامداد مدل‌ها اُفت قابل توجهی داشته‌اند ولی در ساعات بین ۲ بامداد تا ۷ صبح میزان نرخ ذخیره به‌صورت کاملاً ثابت باقی مانده است. طبق نتایج در روز (اواسط صبح تا اواخر بعدازظهر) ذخیره بیشتری نسبت به شب صورت گرفته است.

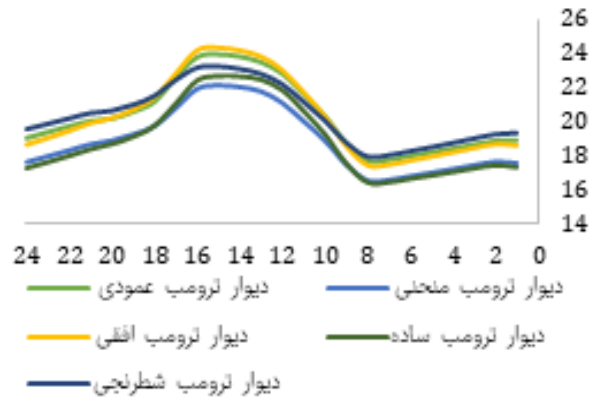


نمودار ۵) نرخ ذخیره سازی انرژی

همچنین میزان حجم چگالی مدل‌ها در نمودار ۶ بررسی شده است. طبق آن دیوار ترومب شطرنجی به‌ترتیب با ۱۳۶۸۳۴، ۱۲۳۸۲۲ و ۱۴۹۳۴۱ متر مکعب در دی، بهمن و آذرماه بالاترین میزان حجم چگالی را داشته است و دیوار ترومب ساده با حجم چگالی ۱۱۹۹۹۹، ۱۰۸۳۱۸ و ۱۳۰۸۲۰ متر مکعب در دی، بهمن و آذرماه کمترین حجم چگالی را دارد. بررسی چگالی از این نظر دارای اهمیت است که هوای گرم‌شده به‌دلیل اختلاف چگالی (نیروهای شناوری) به سمت بالا حرکت کرده و در صورت تعبیه دریچه در بالای دیوار می‌توان باعث خروج آن شد.



نمودار ۶) میانگین حجم چگالی



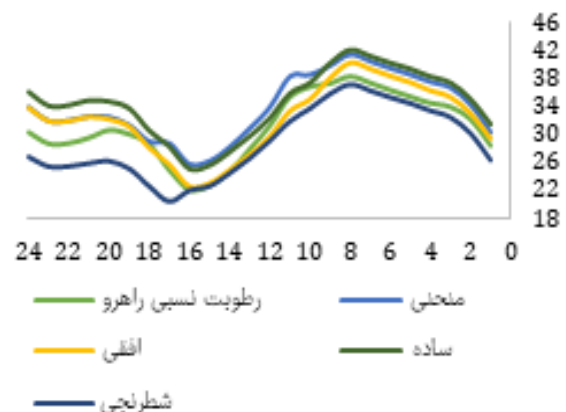
نمودار ۳) میانگین دمای تشعشی راهرو

با دانستن دمای تر و خشک و فشار هوا می‌توان رطوبت نسبی را با استفاده از رابطه ۲۳ به‌دست آورد. این رابطه به‌صورت پیش‌فرض توسط نرم‌افزار انرژی‌پلاس محاسبه می‌شود و داده‌های عددی آن به‌صورت خروجی به‌دست می‌آید.

$$[PSW - (TA-TW) (PA-PS)]/1547/ 6 - \quad (23)$$

$$1,478TW] RH / PSW$$

از نظر رطوبت نسبی طبق نمودار ۴ راهرو در دیوار ترومب ساده تا اواسط ساعت ۹ صبح بیشترین میزان رطوبت نسبی را داشته است که این میزان در ساعت ۸ صبح بالاترین میزان را با ۴۱٪ نسبت به دیگر ساعات داشته است. از ساعت ۸ صبح به بعد به‌صورت قابل توجهی تمام مدل‌ها با اُفت رطوبت نسبی مواجه خواهند شد که بین ساعت ۱۵ تا ۱۷ بعدازظهر به کمترین میزان خود می‌رسد که در ساعت ۱۷ راهرو در دیوار ترومب شطرنجی با ۲۰٪ پایین‌ترین میزان رطوبت نسبی را خواهد داشت. دیوار ترومب ساده بالاترین و دیوار ترومب شطرنجی پایین‌ترین درصد رطوبت نسبی را به خود اختصاص داده‌اند. بین ساعت ۱۰ صبح تا ۱۷ بعدازظهر راهرو در دیوار ترومب منحنی نسبت به مدل ساده و سایر مدل‌ها در بالاترین درصد قرار خواهد گرفت. این در حالی است که طبق استاندارد گتر و رو، محدوده رطوبت نسبی ۳۰ تا ۶۵٪ است [35].



نمودار ۴) میانگین رطوبت نسبی

به سایرین بیشتر بوده و حجم نفوذ دیوار ترومب عمودی و ساده با میزان حجم برابر با یکدیگر در سه ماه مورد بررسی کمترین بوده است.



نمودار ۸) میانگین حجم نفوذ راهرو

همان گونه که در نمودار ۹ نشان داده شده است در سه ماه مورد بحث نرخ ذخیره سازی انرژی در مقایسه با سایر مدل‌ها در دیوار ترومب شطرنجی بیشتر بوده است که نشان‌دهنده بهتر عمل کردن این دیوار در این مورد است



نمودار ۹) نرخ ذخیره سازی انرژی

نتیجه‌گیری

به منظور مقایسه رفتار حرارتی دیوار ترومب با هندسه‌های متفاوت در سه ماه سرد سال برای اقلیم گرم و خشک اهواز، پنج نوع دیوار ترومب پیشنهاد و بررسی شده است. تمامی مدل‌ها با شرایط کاملاً یکسان و فقط تغییر در نوع دیوار جنوبی در نرم‌افزار انرژی پلاس شبیه‌سازی شده‌اند. با شبیه‌سازی نمونه‌های مورد نظر مشخص شد دیوارهای ترومب علاوه بر نوع متداول و ساده‌ای که رایج بوده است می‌تواند با بهترین عملکرد در حالت‌های خاص و هندسه مختلف نیز قرار بگیرد و صرفاً ایجاد یک دیوار ساده ملاک نیست. از این رو می‌توان با استفاده از مدل‌های پیشنهادی علاوه بر کارایی مورد نظر و تامین نور، بر زیبایی نمای ساختمان نیز افزود. طبق بررسی‌ها در نمودار ۱ مشخص شد از نظر دما راهرو در دیوار ترومب شطرنجی

تأثیر جدابودن محفظه‌های دیوارهای ترومب از یکدیگر بر سطح دمای داخلی

با توجه به جدابودن محفظه‌های دیوارهای ترومب از یکدیگر برای مقایسه عملکرد و میزان حرارت سطح داخلی دیوارها، ابتدا به صورت کلی میانگین مجموع دیوارهای ترومب در هر مدل جداگانه گرفته شده سپس به مقایسه هر کدام از پنج مدل در سه ماه دی، بهمن و آذر با یکدیگر پرداخته می‌شود. با توجه به نمودار ۷ دیوارهای ترومب ساده با مجموع میانگین $39/8$ ، $41/4$ و $34/9$ درجه به ترتیب در دی، بهمن و آذرماه بالاترین میزان دمای سطح داخلی را نسبت به سایر مدل‌های دیوار ترومب به خود ارایه داده است. با این حال با توجه به دمای بالایی که سطح داخلی دیوارهای این مدل داشته، اما میانگین دمای راهرو با این نوع دیوار در سه فصل عملکرد پایین‌تری نسبت به سایر مدل‌ها داشته است. اما دمای سطح داخلی دیوار ترومب شطرنجی در دی، بهمن و آذر به ترتیب $35/7$ ، $43/22$ و $32/3$ درجه سانتی‌گراد بوده است که با توجه به نمودار با اختلاف بسیار ناچیز برابر با دیوار ترومب منحنی است ولی از نظر دمای راهرو دیوار شطرنجی بالاترین دما را نسبت به سایرین داشته است.



نمودار ۷) میانگین دمای سطح داخلی دیوارها

تأثیر تعداد پنجره‌ها در میزان حجم نفوذ راهرو

با فرض بر اینکه دمای راهرو هر هشت بار در ساعت تعویض خواهد شد، شبیه‌سازی‌ها صورت گرفته است. با توجه به نتایج در نمودار ۸، حجم نفوذ راهرو در دیوار ترومب شطرنجی در دی‌ماه 162209 کیلوگرم است که بالاترین میزان حجم نفوذ را داشته است همچنین این مدل در دو ماه دیگر بهمن با حجم نفوذ 144821 و آذر با 175859 کیلوگرم همچنان بیشترین میزان حجم نفوذ را به خود اختصاص داده است. طبق نتایج هر چه هوای دیوار ترومب و راهرو دفعات بیشتری در ساعت با یکدیگر مخلوط شوند دمای راهرو را افزایش می‌دهد ولی با بالا بردن میزان تعویض هوای راهرو نتیجه مطلوب دست خواهد یافت. این شرایط برای هر پنج مدل به صورت ثابت در نظر گرفته شد که با توجه به نتایج و نوع چیدمان پنجره‌ها حجم نفوذ راهرو در دیوار ترومب شطرنجی نسبت

منابع مالی: کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تامین شده است.

فهرست علائم

Nu	عدد ناسلت
Ra	عدد رایلی
A	نسبت ابعاد حفره
K	ضریب هدایت هوا
L	ضخامت هوا
x	برداری متغیر حالت
u	برداری ورودی
t	زمان
n	تعداد گره‌ها
Ti	درجه حرارت محیط داخلی
To	درجه حرارت محیط خارجی
A	ناحیه سطحی
TA	دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)
TW	دمای تر (درجه سانتی‌گراد)
PA	فشار جو (Kpa)
PS	فشار بخار آب در دمای خشک (Kpa)
PSW	فشار بخار آب در دمای تر (Kpa)

منابع

- 1- Ghosh A, Neogi S. Effect of fenestration geometrical factors on building energy consumption and performance evaluation of a new external solar shading device in warm and humid climatic condition. *Solar Energy*. 2018;169:94-104.
- 2- Zhuang Z, Guo W, Ye H, Fan R. Thermal performance of building under two ideal heating patterns. *Procedia Engineering*. 2017;205:3615-3622.
- 3- Modirrousta S, Boostani H. Analysis of atrium pattern, Trombe wall and solar greenhouse on energy efficiency. *Procedia Engineering*. 2016;145:1549-1556.
- 4- Hu Z, He W, Ji J, Zhang S. A review on the application of Trombe wall system in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;70:976-987.
- 5- Kruger E, Suzuki E, Matoski A. Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location. *Energy and Buildings*. 2013;66:364-372.
- 6- Torcellini P, Pless S. Trombe walls in low-energy buildings: Practical experiences. *World Renewable Energy Congress*, 29-3 August-September, Denver, United States. Golden: National Renewable Energy Laboratory. 2004.
- 7- Bojic M, Johannes K, Kuznik F. Optimizing energy and environmental performance of passive Trombe wall. *Energy and Buildings*. 2014;70:279-286.
- 8- Nwachukwu NP, Okonkwo WI. Effect of an absorptive coating on solar energy storage in a Trombe wall system. *Energy and Buildings*. 2008;40(3):371-374.
- 9- Chan HY, Riffat SB, Zhu J. Review of passive solar heating and cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14(2):781-789.
- 10- Hassanain AA, Hokam E, Mallick TK. Effect of solar storage wall on the passive solar heating constructions. *Energy and Buildings*. 2011;43(2-3):737-747.
- 11- Khedari J, Kaewruang S, Pratinthong N, Hirunlabh J. Natural ventilation of houses by a Trombe wall under the climatic conditions in Thailand. *International Journal of*

بالاترین دما و عملکرد را نسبت به سایرین و همچنین راهرو در دیوار ترومب ساده کمترین دما و عملکرد را نسبت به سایرین داشته است. طبق استاندارد گنر و رو شرایط آسایش حرارتی نیازمندی‌ها در محدوده ۲۱ تا ۲۷/۷ درجه سانتی‌گراد است [36] که طبق آن در ماه‌های مورد بررسی، نزدیک‌ترین حالت به این استاندارد، دیوار ترومب شطرنجی است.

در ادامه بررسی‌ها مشخص شد دیوار ترومب ساده با اینکه دمای سطح داخلی بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته اما در انتقال حرارت نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد کمتری را داشته است. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد صرفاً در نظر گرفتن دمای بالای سطح داخلی دیوار نمی‌تواند ملاک خوبی برای بهتری بودن انتقال حرارت باشد. این در حالی است که دیوار ترومب شطرنجی با اختلاف ۴ تا ۵ درجه در هر ماه نسبت به دیوار ترومب ساده از نظر انتقال حرارت موفق‌تر بوده است.

همان گونه که در نمودار ۹ نشان داده شد، در سه ماه مورد بحث نرخ ذخیره‌سازی انرژی در هر سه ماه در مقایسه با سایر مدل‌ها در دیوار ترومب شطرنجی بیشتر بوده است که نشان‌دهنده بهتر عمل کردن این دیوار در این مورد است. در حالی که با توجه به نمودار ۵ و نتایج به دست آمده از آن مشخص شد دیوار راهرو در دیوار ترومب شطرنجی کمترین نوسان را نسبت به سایر مدل‌ها داشته است که این امر ممکن است موجب بهتر عملکرد آن نسبت به سایر مدل‌ها باشد. از طرفی با توجه به نمودار ۸ میزان حجم نفوذ در راهرو دیوار ترومب شطرنجی نسبت به سایرین بیشتر و در دیوار ترومب ساده کمتر بوده است که با توجه به تعداد پنجره‌های موجود در این دو مدل چندان دور از انتظار نیست. راهرو در دیوار ترومب شطرنجی نسبت به سایرین پنجره‌های بیشتری دارد و این در حجم نفوذ آن تاثیرگذار خواهد بود. طبق آنچه در نتایج آمده است مشخص شد، هندسه دیوار می‌تواند تاثیرات بسیاری بر عملکرد حرارت، نفوذ و ذخیره‌سازی در داخل ساختمان ایجاد نماید. پیشنهاد می‌شود در ماه‌های گرم سال از کرکره‌های متحرک جهت جلوگیری از جذب بیش از حد انرژی خورشید و همچنین جهت تهویه و تنظیم هوا با در نظر گرفتن درجه‌هایی در قسمت بالا و پایین محفظه‌های شطرنجی با بهره‌گیری از عملکرد دودکش خورشیدی به صورت کاملاً هدفمند از این سیستم بهره‌مند شد که این خود نیازمند پژوهش‌های متعدد است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی حاصل فعالیت نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده آنها است.

تعارض منافع: مقاله برگرفته از پایان‌نامه آیه رضایی‌زاده است و مولفین هیچ گونه تعارض منافی با فرد یا گروه دیگری ندارند.

سهم نویسندگان: امید رهایی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ آیه رضایی‌زاده (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/ نگارنده بحث (۵۰٪).

- thermal rehabilitation of the building blocks in the cold climate in Iran by taking advantage of features Trombe wall. Iranian Architectural Studies. 2015;(8):107-118. [Persian]
- 26- Walton GN. Thermal analysis research program reference manual [Report]. Gaithersburg: National Bureau of Standards; 1983, 198316.
- 27- Lawrence Berkeley Laboratory. DOE2.1E-053 source code [Internet]. Berkeley: Lawrence Berkeley Laboratory (LBL); 1994 Unknown Cited & Cite.
- 28- Seem JE, Klein SA, Beckman WA, Mitchell JW. Comprehensive room transfer functions for efficient calculation of the transient heat transfer processes in buildings. Journal of Heat Transfer. 1989; 111(2):264-273.
- 29- Getter KL, Rowe DB. The role of extensive green roofs in sustainable development. Hort Science. 2006;41(5):1276-1285.
- 30- Ahmadi H, Shaemi A. Ilam city climate comfort based on biological indicators, physical spatial planning. 2012;1(1). [Persian]
- 31- Hovizavi H, Morshedi J. Determining the thermal comfort range of the building in Ahvaz based on bioclimatic indicators. 3rd Scientific Research Conference on New Horizons in Geography and Architecture and Urban Planning of Iran, 16 June 2016, Tehran, Iran. Tehran: Association for the Development and Promotion of Basic Sciences and Technologies; 2016. [Persian]
- 32- Wright JL, Sullivan HF. Natural convection in sealed glazing units: A review. ASHRAE Transactions. 1989;95:592-603.
- 33- Hollands KGT, Unny TE, Raithby GD, Konick L. Free convection heat transfer across inclined air layers. Journal of Heat Transfer. 1976;98(2):189-193.
- 34- ISO. 15099:2003-Thermal performance of windows, doors, and shading devices-detailed calculations [Internet]. Geneva: International Organization for Standardization; 2003 Unknown Cited. Available from: <https://www.iso.org/standard/26425.html>
- 35- Sohrabi H, Ghadimi M, Haji Mollaali Kenny A. Sensitivity analysis of energy consumption with respect to window-to-wall ratio in a residential building, in temperate and humid climates (case study: Ramsar city). First National Technology Conference Advanced in Engineering and Environment, 24 February 2019, Tehran, Iran. Tehran: Iranian Association of Environmental Specialists; 2019. [Persian]
- 36- Sadeghi Ravesh MH, Tabatabaei SM. Determination of thermal comfort in dry climates. Identity City. 2009;3(4):39-46. [Persian]
- Ambient Energy. 1999;20(2):85-94.
- 12- Liping W, Angui L. A numerical study of Trombe wall for enhancing stack ventilation in buildings. The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, 6-8 September 2006, Geneva, Switzerland. Unknown Publisher City: Energy Technologies Area; 2006.
- 13- Jaber S, Ajib S. Optimum design of Trombe wall system in Mediterranean region. Solar Energy. 2011;85(9):1891-1898.
- 14- Ghayabklo Z. New wall quality and natural cooling, Sofeh. 2011;21(4). [Persian]
- 15- Rabani M, Kalantar V, Rabani M. Heat transfer analysis of a Trombe wall with a projecting channel design. Energy. 2017;134:943-950.
- 16- Sokhandan Sorkhabi Z, Khanmohammadi MA. Optimizing the energy function of non-populated walls on sunny fronts. City Identity. 2015;9(23):73-82. [Persian]
- 17- Khalifa AJN, Abbas EF. A comparative performance study of some thermal storage materials used for solar space heating. Energy and Buildings. 2009;41(4):407-415.
- 18- Abolhassani N, Saghafi MJ, Mohammad Kari B, Fayaz R. Modular panels with heating and cooling systems. Modares Mechanical Engineering. 2016;6(1):31-41. [Persian]
- 19- Chen W, Liu W. Numerical analysis of heat transfer in a passive solar composite wall with porous absorber. Applied Thermal Engineering. 2008;28(11-12):1251-1258.
- 20- Koyunbaba BK, Yilmaz Z. The comparison of Trombe wall systems with single glass, double glass and PV panels. Renewable Energy. 2012;45:111-118.
- 21- Kameli H. Parameters that affect the performance of Trombe wall using computational fluid dynamics simulation. Iranian Journal of Energy. 2015;17(4):101-117. [Persian]
- 22- Shen J, Lassue S, Zalewski L, Huang D. Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls. Energy and Buildings. 2007;39(8):962-974.
- 23- Dragicevic S, Lambic M. Influence of constructive and operating parameters on a modified Trombe wall efficiency. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011;11(4):825-838.
- 24- Khalesi Doost A, Khani M, Abedini Esfahlani A. Empirical analysis and numerical influence the size and location of the valve Trombe wall using phase-change material (PCM). Journal of Mechanical and Vibration Engineering. 2014;5(3):19-25. [Persian]
- 25- Abolhassani N, Mohammadkari B, Fayaz R. The