https://doi.org/10.22034/jrenew.2026.233278

سال سیزدهم، شماره اول، بهار و تابستان 1405، ص ص 46- 52

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: 1403/03/09

تاریخ پذیرش: 404/06/13

بررسی تاثیر مواد تغییر فاز دهنده دردیوار ترومب بر میزان بهره‌وری انرژی ساختمان (مورد پژوهی: ساختمان بانک تجارت شبعه دانشگاه زنجان- اقلیم سرد و خشک)

مهرداد بغدادی [1] ، حسین مدی [2]، مریم آزموده [3*]، نجمه ماستری فراهانی [4]

1- کارشناسی ارشد، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

2- دانشیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

3- استادیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

4- گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

* قزوین، ۳۴۱۴۸۹۶۸۱۸، azmoodeh@arc.ikiu.ac.ir

چکیده

امروزه استفاده از انرژی خورشید، یکی از راهکارهای کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها است. از شیوه‌های کاربردی در این زمینه، استفاده از دیوارهای ترومب است. هدف از انجام این پژوهش تعیین راهکار بهبود عملکرد حرارتی دیوار ترومب، آسایش حرارتی فضای داخلی ساختمان و کاهش بار سرمایش و گرمایش در تمام فصول، با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده است. روش انجام این پژوهش شبه تجربی با استفاده از شبیه‌سازی یک پروژه واقعی، در محیط نرم افزار دیزاین بیلدر، بر روی دو نوع دیوار ترومب سنتی و با مواد تغییر فاز دهنده، یک نمونه واقعی در اقلیم سرد وخشک بوده است. از بررسی‌های صورت گرفته می‌توان دریافت که دیوار بتنی به ضخامت ۳۰ سانتی متر با مقاومت حرارتی (متر مربع-کلوین بر وات) ۰/65 با زمان تاخیر 7 ساعت و 12 دقیقه، بهترین نوع دیوار ترومب سنتی است؛ که مصرف گرمایش، سرمایش و انرژی اولیه را به ترتیب به میزان حدود ۲۰، 14 و 8 درصد کاهش می‌دهد. در دیوار ترومب ترکیبی، با مواد تغییر فاز دهنده می‌توان میزان گرمایش، سرمایش و انرژی اولیه را به ترتیب 51، 11 و 15 درصد کاهش داد. این نتیجه به کارایی بالای مواد تغییرفازدهنده در دیوار ترومب در کاهش بار گرمایشی اشاره دارد. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند آسایش حرارتی فضای داخلی ساختمان را بهبود می‌بخشد و مصرف انرژی را در مقایسه با دیوار ترومب سنتی در تمام سال کاهش می‌دهد.

کلیدواژگان: دیوار ترومب، تغییر فاز دهنده، سرد و خشک، بهره وری انرژی

Investigating the effect of phase change material in Trombe wall on the energy efficiency of the building (Study case: Building of Tejarat Bank Shabea, University of Zanjan - cold and dry climate)

Mehrdad Baghdadi [1], Hossein Medi [2], Maryam Azmoodeh [3*] ,Najmeh Mastari-Farahani [4]

1- Master of Science, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- Associate professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3- Assistant professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

4- Department of Architecture and Urban Planning, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

* P.O.B. 3414896818 Qazvin, Iran, azmoodeh@arc.ikiu.ac.ir

Received: 29 May 2024 Accepted: 04 August 2025

Abstract

Today, the use of solar energy is one of the most effective strategies for reducing energy consumption in buildings. Among the practical approaches in this field is the use of Trombe walls. The purpose of this study is to identify methods for improving the thermal performance of Trombe walls, enhancing indoor thermal comfort, and reducing heating and cooling loads throughout the year by incorporating phase change materials (PCMs). This research employs a quasi-experimental method, using the DesignBuilder software to simulate a real case study in a cold and dry climate, comparing two types of Trombe walls: a traditional Trombe wall and one integrated with PCMs. The results indicate that a 30 cm thick concrete wall with a thermal resistance of 0.65 (square meter kelvin per watt) and a time lag of 7 hours and 12 minutes represents the optimal configuration for a traditional Trombe wall, reducing heating, cooling, and primary energy consumption by approximately 20%, 14%, and 8%, respectively.In the hybrid Trombe wall with phase change materials, the heating, cooling, and primary energy consumption were reduced by 51%, 11%, and 15%, respectively. These findings highlight the high efficiency of PCMs in Trombe walls in reducing heating loads. Incorporating phase change materials can enhance indoor thermal comfort and reduce energy consumption throughout the year compared to traditional Trombe walls.

Keywords: Trombe wall, phase change material, cold and dry climate, energy efficiency

Authors retain the copyright and full publishing rights. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

1- مقدمه

امروزه با توجه به افزایش جمعیت، مصرف انرژی افزایش یافته‌است [1]. افزایش جمعیت و تقاضا برای انرژی منجر به انتشار آالینده‌های سمی در هوا شده‌است که بر روی آن محیط اطراف و نیز سلامت انسان تاثیر می‌گذارد[2]. طبق اعلام آژانس بین‌المللی انرژی، از پرمصرف‌ترین بخش‌های انرژی در جهان بخش مسکونی، تجاری و عمومی است [3]. توسعه پایدار نیازمند تعاملات پایدار و سازنده انسان با محیط دست‌ساز انسان می‌باشد [4]. سیستم‌های خورشیدی غیرفعال مصرف انرژی گرمایش سالانه ساختمان‌ها را تا 25 درصد کاهش می‌دهد [5]. تلاش برای ایجاد آسایش حرارتی در محیط خارجی با کمک تکنیک‌ها مختلف طراحی منظر، اهمیت ویژه‌ای دارد [6]. در طراحی سیستم‌های خورشیدی غیرفعال در تابستان، باید در حد امکان از ورود انرژی گرمایی خورشید به ساختمان جلوگیری شود. به عکس، در زمستان باید انرژی گرمایی خورشید را وارد ساختمان کرد [7].

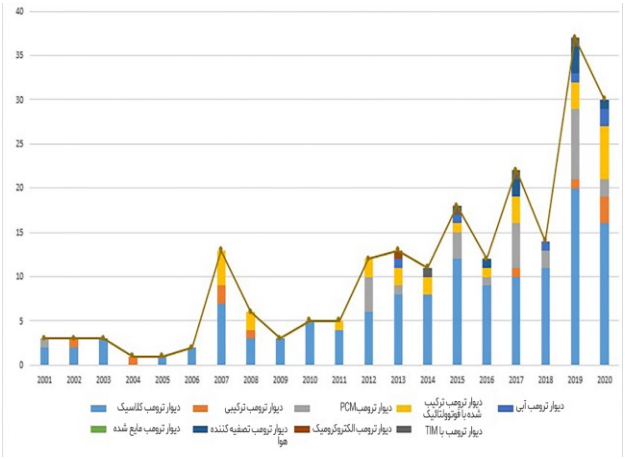
یکی از محبوب‌ترین راهکارهای استفاده از انرژی خورشیدی غیرفعال، کاهش مصرف انرژی ساختمان، ذخیره انرژی حرارتی و آزاد کردن آن به‌هنگام نیاز، دیوارهای ترومب[1] است. سال‌هاست که دیوارهای ترومب سنتی در ساختمان‌ها استفاده می‌شود. دیوار ترومب سنتی، دیواری با جرم حرارتی بالا و یک جداره شیشه‌ای با یک لایه هوا است. استفاده از دیوار ترومب میزان مصرف انرژی ساختمان را تا 30٪ کاهش می‌دهد [8]. طبق پژوهش‌های گذشته دیوارهای ترومب سنتی سه عیب عمده دارند. اولین عیب، کم بودن مقاومت حرارتی آن است. در طول شب یا روزهای ابری، شار حرارتی منتقل شده از داخل به خارج، منجر به اتلاف حرارتی بیش از حد ساختمان می‌شود [9]. دوم اینکه حرارت منتقل شده در دیوارهای ترومب به دلیل متغییر بودن شدت تابش خورشید نامشخص است [10]. سومین عیب سنگین بودن دیوار ترومب سنتی است [11]. این نقص با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده سبک می‌تواند بهبود یابد. انتخاب مصالح یک عامل کلیدی و موثر بر عملکرد هر سیستمی است [12]. امروزه محققان به منظور بهبود عملکرد حرارتی دیوار ترومب در تمام فصول، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PMC[2]) دو لایه را به جای مواد ذخیره کننده پیشنهاد داده‌اند. مواد تغییر فاز دهنده به دلیل گرمای نهان بسیار زیاد، دمای ذوب پایین و عدم تغییر دما به هنگام تغییر فاز دادن، موجب کاهش نوسانات دمای داخل در زمستان و بهبود گرمای فضای داخلی در تابستان می‌شوند [13]. بنابراین، دیوار ترومب با مواد تغییر فاز دهنده در مقایسه با دیوار ترومب سنتی، آسایش حرارتی فضای داخلی ساختمان را بهبود می‌بخشد و بار سرمایش و گرمایش را در کل سال کاهش می‌دهد. مواد تغییر فاز دهنده انرژی را ذخیره کرده و دما را در یک محدوده ثابت تثبیت می‌کند. دیوار ترومب با مواد تغییرفاز دهنده دو مزیت نسبت به دیوار ترومب سنتی دارد: 1- جرم حرارتی بالا و کاهش بار مرده 2- خاصیت شفاف بودن مواد تغییر فاز دهنده و عدم مانع برای ورود نور روز به داخل فضا و دید به خارج.

یکی از اولین تحقیقات در مورد اثر بخشی دیوار ترومب با مواد تغییر فاز دهنده توسط بوردو انجام شد [14]. وی دریافت که یک دیوار بتنی 15 سانتی‌متری می‌تواند با یک دیوار 3/5 سانتی‌متری مواد تغییر فاز دهنده جایگزین شود و عملکرد مشابه داشته‌باشد. استریتیه و نواک دیوار خورشیدی با موم پارافین ارائه‌داده‌اند که برای تهویه ساختمان در نظر گرفته‌شده‌بود [15]. انرژی خورشیدی جذب شده توسط مواد تغییر فاز دهنده با راندمان 79٪ برای گرم کردن هوای تهویه شده ساختمان استفاده شده است. انیشی و همکاران [16]، فیوریتو [17]، کارا و کورنوک[18]، در مورد دیوار ترومب ترکیب شده با مواد تغییر فاز دهنده تحقیق کرده‌است. زالوسکی و همکاران [19]، آزمایشی با دیوار ترومب در فرانسه انجام داده‌اند. برای اندازه‌گیری کارایی سیستم جدید، دیواری با بتن و مواد تغییر فاز دهنده (نمک هیدراته)، جایگزین دیوار بتنی شده‌است. نتایج نشان داده است که گرما می‌تواند با تاخیر زمانی دو ساعت و 40 دقیقه آزاد شود. مطالعه شبیه سازی انجام شده توسط ربانی و همکاران [20]، نشان داده‌است که یک دیوار ترومب ساخته شده از موم پارافین می‌تواند آسایش حرارتی بیشتری را در مقایسه با سایر مواد فراهم کند. لی و لیو [21]، ویژگی دودکش خورشیدی یک دیوار ترومب با مواد تغییر فاز دهنده را بررسی کرده‌اند. آنها دریافته‌اند که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده باعث افزایش مدت زمان استفاده از دودکش خورشیدی (به ویژه در شب) می‌شود. کولاییتس و همکاران [22]، با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی عددی و تجربی، رفتار حرارتی یک دیوار ترومب را که به آن مواد تغییر فاز دهنده اضافه شده‌است، بررسی کرده‌اند. نتایج هر دو روش نشان داده است و نشان‌داده‌است که تولید انرژی گرمایی ماهانه سیستم ممکن است تا 4 کیلووات ساعت در مترمربع افزایش یابد. برتو و دیگران [23]، یک دیوار غیر فعال خورشیدی نیمه شفاف با آئروژل سیلیس و آجرهای شیشه‌ای پر شده از ماده تغییر فاز دهنده یوتکتیک[3] را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داده‌است که اتلاف گرما از طریق سیستم کم شده‌است، در حالی که گرما و نور زیاد شده‌است. گوارینو و همکاران [24]، استفاده از یک دیوار ذخیره ساز حرارتی با مواد تغییر فاز دهنده را در دیوار ترومب که در جبهه جنوبی قرار دارد، بررسی کرده‌اند. مطالعات تجربی و عددی نشان می‌داده است که سیستم ذخیره‌سازی با مواد تغییر فاز دهنده در آب و هوای سرد در طول سال موثر است. سیستم ذخیره‌سازی قادر است تابش خورشیدی جذب شده را پس از 6-8 ساعت آزاد کرده و بنابراین بر تقاضای گرمایش و کاهش نوسانات دمای روزانه تأثیر مثبت دارد. لئانگ و همکاران [25]، یک دیوار ترومب ترکیبی با مواد تغییرفازدهنده را بررسی کرده‌اند. آن‌ها یک دیوار ترومب کلاسیک بتنی را با یک دیوار ترومب که با مواد تغییر فاز دهنده ترکیب شده‌است، مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان داده‌است که ظرفیت حرارتی دیوار ترومب توسط مواد تغییر فاز دهنده بهبود یافته‌است. علاوه بر این، نتایج نشان داده‌است که یک دیوار ترومب با مواد تغییر فاز دهنده 4 سانتی‌متر، زمان تاخیر آن، 4 برابر بیشتر از دیوار ذخیره ساز بتنی 15 سانتی‌متر است. واتز و همکاران [26]، بر روی یک نمای دو پوسته که از یک دیوار ترومب قابل تنظیم و شفاف ساخته شده‌است، مطالعه کرده‌اند. نوع جدید دیوار ترومب که با مواد تغییر فاز دهنده و عایق آئروژل ساخته شده است و شبیه سازی نشان داده است که تقاضای انرژی گرمایی یک خانوار هلندی را 25-30٪ کاهش می‌دهد. طبق مطالعات ژو و همکاران [27]، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در دیوار ترومب در واقع می‌تواند عملکرد

[1] T-Wall
[2]. phase change material

[3] . مخلوطی از مواد با نسبت ثابت است که در یک درجه حرارت واحد ذوب می‌شود و منجمد می‌شود که کمتر از نقاط ذوب مواد سازنده جداگانه یا مخلوط دیگری از آنها است،

حرارتی آن را بهبود بخشد، اما به دلیل اینکه مواد تغییر فاز دهنده فقط یک دمای تغییر فاز دارند، آن‌ها فقط در یک فصل فعال کاربرد دارند. بیشتر آن‌ها در حال حاضر فقط در زمستان مورد مطالعه قرار می‌گرفته‌اند. ژو و همکاران [28]، برای رفع مشکل تک فصلی بودن دیوار ترومب با مواد تغییر فاز دهنده، آن‌ها مطالعه‌ای بر روی دیوار ترومب جدید با ادغام دو لایه مواد تغییر فاز دهنده انجام داده‌اند که مناسب برای تمام فصول می‌باشد و عملکرد حرارتی در مقایسه با دیوار ترومب سنتی بهتر می‌باشد. یو و همکاران[29] براساس دیوار ترومب کلاسیک سه دیوار ترومب هیبریدی خورشیدی شبیدار جدید پیشنهاد دادند که کارکرد دیوار ترومب را بهینه می‌کرد. دونگ و همکاران [30] به‌جای دیوارهای عظیم در دیوارهای ترومب کلاسیک، صفحه‌های جاذب را بین شیشه و دیوار انبار قرار دادند و صفحات جاذب توسط سه شیشه دوجداره از چپ، راست و جلو احاطه می‌شدند. دوان و همکاران[12]، ربانی و همکاران[32] و مایتافیدز و همکاران [33] نیز مطالعه مشابه با دونگ و همکاران انجام داده‌اند.



شکل 1 خلاصه‌ای از تحقیقات دیوار ترومب[1] (منبع نگارندگان)

هدف پروژه پیش رو طراحی بهینه دیوار ترومبی است که علاوه بر داشتن کارایی دیوار ترومب سنتی مشکلات آن را نیز برطرف کرده‌باشد. از این رو استفاده از ترکیب مواد تغییرفازدهنده که به جای دیوار سنگین با جرم حرارتی بالا علاوه بر کاهش وزن جداره، سطحی شفاف برای عبور نور روز به وجود آورد؛ پیشنهاد می‌شود. در همین راستا در این پژوهش به دنبال پاسخگویی به این پرسش‌های زیر هستیم:

- چه پارامترهایی بر دیوار ترومب تاثیر دارد؟
- ابعاد دریچه‌های بیرونی و داخلی چه تاثیری عملکرد دیوار ترومب دارند؟
- جنس جدار دیوار ترومب چه تاثیری عملکرد دیوار ترومب دارند؟
- بهترین نوع مواد تغییر فاز دهنده برای اقلیم شهری مانند زنجان کدام است؟
- بین دیوار ترومب سنتی، ترکیبی و ترکیب شده با مواد تغییر فاز دهنده کدام مناسب‌تر است؟

در این پژوهش با بررسی تأثیر جایگزینی انواع مواد تغییرفازدهنده به جای دیواری با جرم حرارتی بالا در دیوار ترومب در یک ساختمان کوچک مقیاس طراحی‌شده در شهر مورد مطالعه یعنی زنجان، راهکار مناسبی برای افزایش کارایی دیوار ترومب ارائه شده‌است تا در نهایت به ارائه الگویی متشکل از مواد تغییرفازدهنده برای استفاده در دیوار ترومب بیانجامد. به‌گونه‌ای که هم بتواند استفادهٔ مجدد از دیوار ترومب را احیا کند و هم پاسخگوی عملکرد و معماری مورد انتظار عصر خود باشد. از سوی دیگر این پژوهش با بررسی برخی از جنبه‌های استفاده از مواد تغییرفازدهنده در دیوار ترومب؛ می‌تواند زمینه ساز مطالعات آتی برای دیگر جنبه‌های استفاده از این مواد در آسایش حرارتی سایر ساختمان‌ها نیز باشد.

2- مواد و روش‌ها

روش تحقیق این پژوهش شبه تجربی و بر پایه شبیه‌سازی اثرات حاصل از بکارگیری دیوار ترومب پیشنهادی پژوهش است. طبق آخرین نقشه پهنه‌بندی اقلیمی کشور، استان زنجان دارای اقلیم معتدل و سرد با تابستان‌های گرم و خشک می‌باشد. ساختمان مورد مطالعه بانک تجارت شعبه دانشگاه زنجان در محوطه دانشگاه است. سطح زیر بنای آن ۲۰۹/1 متر مربع می‌باشد و دارای 8 ریز فضا می‌باشد که شامل فضای بانک، اتاق بایگانی، آبدارخانه، اتاق سرور، اتاق پشت ای تی ام، راهرو، سرویس، موتورخانه، اتاق امانات می‌باشد.

شکل 2 ساختمان بانک تجارت دانشگاه زنجان

در ساختمان مورد مطالعه، طبق داده‌های مبحث 19، دماهای تنظیمی در فصل گرم و سرد، برنامه زمان‌بندی استفاده از ساختمان، تاسیسات،

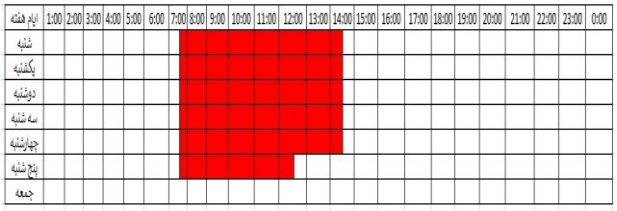
[1] ScienceDirect, SpringerLink, Taylor & Francis Online, SAGE Journals, Wiley Online Library, and MDPI

روشنایی،تجهیزات اداری و تهویه مطبوع استفاده شده‌است و این داده‌ها در قسمت‌های مختلف نرم‌افزار به کار گرفته شده و ساختمان به طور کامل شبیه سازی شده‌است. میزان انرژی اولیه محاسبه شده برای ساختمان مربوط به انرژی مصرفی برای گرمایش، سرمایش، آبگرم مصرفی و روشنایی می‌باشد. البته در مدلسازی انرژی تاثیر حرارتی تجهیزات در نظر گرفته شده‌است، ولی میزان مصرف انرژی این تجهیزات در مصرف انرژی ساختمان لحاظ نمی‌شود. داده‌های ساختمان مورد مطالعه در جدول 1 به طور خلاصه آمده‌است و در شکل 3 برنامه فیزیکی حضور کارکنان بانک که با توجه به ساعت کاری بانک در ایران تنظیم شده‌است وتعداد کارکنان این مجموعه 12 نفر می‌باشد.

جدول 1 داده‌های ساختمان مورد مطالعه

نوع داده طراحی	داده طراحی	توضیحات
دمای تنظیمی:		مبحث 19 مقررات ملی ساختمان
سیستم گرمایشی اول[1]	°C20	
سیستم گرمایشی دوم[2]	°C15	
سیستم سرمایشی اول[3]	°C 28	
سیستم سرمایشی دوم[4]	°C32	
برنامه زمان بندی ساختمان	بهره‌برداری کاربری اداری	
چگالی توان تجهیزات اداری	38/5 w/m²	طبق برداشت اطلاعات میدانی
آبگرم مصرفی	Lit/day-person 5/36	
چگالی روشنایی	13/62 w/m²	طبق نقشه الکتریکی
مقاومت حرارتی دیوار خارجی	1/99 m²-k/w	طبق نقشه معماری
ضریب انتقال حرارت پنجره‌ها	3/۰9 w/m2-k	طبق نقشه معماری
ضریب بهره گرمایی خورشیدی (SHGC)	0/۵۰۳	طبق نقشه معماری
مقاومت حرارتی سقف	1/632 m²-k/w	طبق نقشه معماری
راندمان دیگ سیستم گرمایش	٪ 84	طبق نقشه مکانیکی
ضریب عملکرد[5] چیلر سیستم سرمایش	3	طبق نقشه مکانیکی
تعداد طبقات	1/5 طبقه	طبق نقشه معماری

[1]. Heating Set-Point
[2]. Heating Set-Back
[3]. Cooling Set-Point
[4]. Cooling Set-Back
[5]. COP: Coefficient of Performance



شکل 3 برنامه فیزیکی حضور افراد در بانک

3- یافته‌ها

در این بخش از پژوهش، ابتدا ساختمان وضع موجود در نرم‌افزار دیزاین بیلدر شبیه‌سازی و میزان مصرف انرژی آن بدست آمده و در ادامه تغییراتی بر روی ساختمان صورت گرفته و بااضافه کردن سه مدل از انواع دیوار ترومب (سنتی، ترکیبی و با مواد تغییر فاز دهنده) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌است. دیزاین بیلدر توانایی مدل‌سازی سیستم‌های تهویه طبیعی و مکانیکی، محاسبه محدوده آسایش حرارتی، میزان ورود و خروج انرژی از قسمت‌ها و اجزا مختلف ساختمان را دارد. همچنین نتایج شبیه‌سازی برای کل سال یا برای یک ماه خاص یا یک روز معین و حتی به صورت ساعتی قابل استخراج و استفاده است و این نتایج برای کل ساختمان، یک طبقه خاص و یا یک، تک فضای ساختمان قابل استفاده می‌باشد. موتور شبیه‌سازی این نرم افزار، انرژی پلاس می‌باشد.

3-1 جنس دیوار ترومب سنتی

در این بخش 5 نوع از متریال‌های دیوار ترومب سنتی متداول با هم مورد بررسی قرار گرفته‌اند که این دیوارهایی با جرم حرارتی بالا می‌باشند و زمان تاخیر آن‌ها نیز با هم متفاوت می‌باشد. طبق نمودار زیر متریال دیوار نوع سوم که دیوار بتنی به ضخامت ۳۰ سانتی متر می‌باشد و مقاومت حرارتی آن (متر مربع-کلوین بر وات) ۰/65 و زمان تاخیر آن 7 ساعت و 12 دقیقه می‌باشد بهترین نوع دیوار ترومب سنتی می‌باشد که میزان مصرف گرمایش، سرمایش و انرژی اولیه به ترتیب حدود ۲۰، 14 و 8 درصد کاهش می‌دهد.

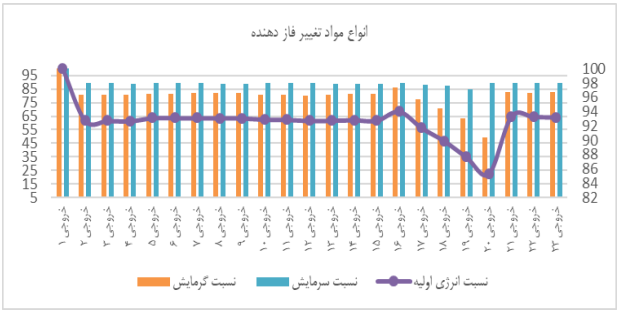
شکل 4 نتایج جنس دیوار ترومب سنتی

جدول2 نتایج جنس دیوار ترومب سنتی

خروجی	توضیحات	گرمایش	سرمایش	انرژی اولیه	نسبت گرمایش	نسبت سرمایش	نسبت انرژی اولیه
خروجی 1	وضع موجود	20602/28	/59 5642	/21 413	100	100	100
خروجی 2	TW-3	16687/62	/64 4936	382	81	87/49	92/45
خروجی 3	TW-4	16588/24	/33 4923	/28 381	80/52	87/25	92/27
خروجی 4	Bank tejarat-TW 30-Clay Brick	16286/7	/2 4930	/96 379	79/05	87/37	91/95
خروجی 5	TW-5	16560/79	/46 4922	/16 381	80/38	87/24	92/24
خروجی 6	TW-6	16831/06	/27 4945	/83 382	81/69	87/64	92/65

3-2 جنس دیوار ترومب ترکیب شده با مواد تغییر فاز دهنده

در این بخش 22 متریال مختلف مواد تغییرفازدهنده مورد بررسی قرار گرفته است که مواد تغییرفازدهنده به دلیل اینکه می‌تواند انرژی حرارتی بیشتری را در حجم نسبتاً کمی ذخیره کند و همچنین سبک تر از مصالح ساختمانی معمولی هستند. علاوه بر این، انرژی ذخیره شده در مواد تغییرفازدهنده، سریع‌تر به فضا منتقل می‌شود. مواد تغییر فاز دهنده به‌دلیل نیمه شفاف بودن می‌توانند هم تور طبیعی را وارد ساختمان کنند و همچنین دید به فضای بیرون رو هم محدود نمی‌کنند که در تصویر زیر نشان داده‌شده‌است.

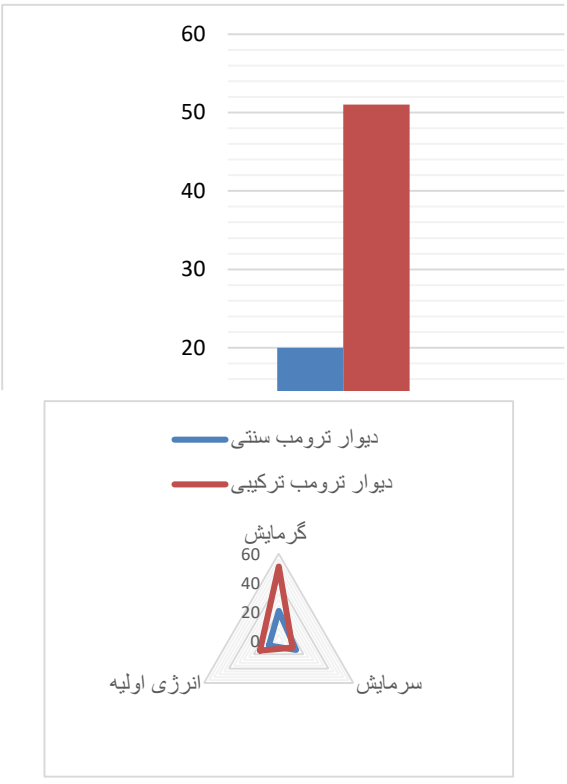


شکل 5 نتایج انواع مواد تغییر فاز دهنده

جدول 3 نتایج انواع مواد تغییر فاز دهنده

خروجی	توضیحات	گرمایش	سرمایش	انرژی اولیه	نسبت گرمایش	نسبت سرمایش	نسبت انرژی اولیه
خروجی 1	وضع	/28 20602	/59 5642	/21 413	100	100	100
خروجی 2	نوع 1	/7 16598	/86 5032	/27 383	/57 80	/19 89	/86 92
خروجی 3	نوع 2	/46 16590	/15 5013	/2 383	/53 80	/16 89	/74 92
خروجی 4	نوع 3	/84 16653	/55 5001	/98 382	/83 80	/64 88	/69 92
خروجی 5	نوع 4	/53 16827	/31 5057	/8 384	/68 81	/63 89	/12 93
خروجی 6	نوع 5	/91 16838	/67 5054	/81 384	/73 81	/58 89	/13 93
خروجی 7	نوع 6	/97 16884	/22 5040	/77 384	/96 81	/32 89	/12 93
خروجی 8	نوع 7	/48 16917	/77 5026	/69 384	/11 82	/09 89	93/1
خروجی 9	نوع 8	/77 16921	/94 5023	/66 384	/14 82	/04 89	/09 93
خروجی 10	نوع 9	/2 16670	/93 5049	/92 383	/91 80	89/5	/91 92
خروجی 11	نوع 10	/35 16661	/98 5046	/82 383	/87 80	/44 89	/89 92
خروجی 12	نوع 11	/49 16551	/53 5041	/2 383	/34 80	/35 89	/74 92
خروجی 13	نوع 12	/29 16633	/31 5025	/3 383	/74 80	/06 89	/76 92
خروجی 14	نوع 13	/8 16753	/38 5010	/62 383	/32 81	88/8	/84 92
خروجی 15	نوع 14	/53 16717	/7 5002	/31 383	/14 81	/66 88	/76 92
خروجی 16	نوع 15	/57 17688	/39 5035	/53 388	/86 85	/24 89	/03 94

17	خروجی	نوع	/21	/97	/09	77/2	/33	/74
		16	15905	4983	379		88	91
18	خروجی	نوع	/82	/43	/62	/53	/43	/93
		17	14529	4933	371	70	87	98
19	خروجی	نوع	/9	/38	/22	/37	/07	/66
		18	13055	4800	362	63	85	87
20	خروجی	نوع	/32	/77	/73	49/5	/26	/36
		19	10198	5036	352		89	85
21	خروجی	نوع	/48	/91	/72	/49	/74	/35
		20	16994	5063	385	82	89	93
22	خروجی	نوع	/1	/57	/46	/31	/67	/28
		21	16957	5059	385	82	89	93
23	خروجی	نوع	/73	/89	/26	/43	/35	/24
		22	16981	5041	385	82	89	93



شکل 6 مقایسه نتایج دیوار ترومب سنتی و ترکیبی

از بررسی‌ها صورت گرفته می‌توان دریافت که دیوار بتنی به ضخامت ۳۰ سانتی متر با مقاومت حرارتی (متر مربع-کلوین بر وات) ۰/65 و زمان تاخیر 7 ساعت و 12 دقیقه، بهترین نوع دیوار ترومب سنتی است؛ که مصرف گرمایش، سرمایش و انرژی اولیه را به ترتیب به میزان حدود ۲۰، 14 و 8 درصد کاهش می‌دهد. در دیوار ترومب ترکیبی، با مواد تغییرفازدهنده می‌توان میزان گرمایش، سرمایش و انرژی اولیه را به ترتیب 51، 11 و 15 درصد کاهش داد. این نتیجه به کارایی بالای مواد تغییرفازدهنده در دیوار ترومب در کاهش بار گرمایشی اشاره دارد.

4- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش جمعیت جهان و استفاده از سوخت‌های فسیلی که موجب آسیب‌های جدی به محیط زیست می‌شود، هدف از این پژوهش بررسی دیوار ترومب به عنوان یکی از راهکارهای غیر فعال خورشیدی بوده است. طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی ساختمان بانک تجارت دانشگاه زنجان توسط نرم افزار دیزاین بیلدر و بررسی سه نوع دیوار ترومب مورد استفاده، نشان داده‌شد که دیوار ترومب ترکیب شده با مواد تغییر فاز دهنده میزان مصرف گرمایش را تا ۵۰ درصد کاهش داده است و همچنین میزان مصرف سرمایش ساختمان را نیز حدود 11 درصد کاهش داده است و در نتیجه انرژی اولیه ساختمان را حدود 15 درصد کاهش می‌دهد که نسبت به دو دیوار ترومب دیگر عملکرد بهتری دارد.

5- منابع:

[1] L. Mokhtari, S. H. Kariminia, and M. Kianersi, Typology of general form and relative compactness of residential buildings in Tehran from the perspective of climatic performance and optimization of energy consumption, *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*, Vol. 11, No. 4, pp. 60–78, 2021. (in Persian)

[2] G. H. Shams and M. Moshari, Health and post-corona: Air filtration through building skins as biological membranes, *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*, Vol. 11, No. 4, pp. 44–59, 2021. (in Persian)

[3] E. Van Bueren, H. van Bohemen, and H. Visscher, *Sustainable Urban Environments: An Ecosystems Approach*, 2012.

[4] M. Moulaii, N. Jodeyri Heidari, and K. H. Hemati, Contemporization of historic houses and sustainable tourism development; Case study: Arbab-Hormuz Mansion in Tehran, *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*, Vol. 11, No. 2, pp. 49–65, 2021. (in Persian)

[5] D. Talukdar, C. G. Li, and M. Tsubokurra, Investigation on optimization of the thermal performance for compressible laminar natural convection flow in open-ended vertical channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 134, pp. 794–806, 2019.

[6] M. Rezaee and A. Shahcheraghi, Effect of planting system of Iranian garden on thermal comfort of open spaces; Case study: Jahan Nama Shiraz Garden, *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*, Vol. 11, No. 3, pp. 1–15, 2021. (in Persian)

[7] H. Omrany, A. Ghaffarian Hoseini, A. H. Ghaffarian Hoseini, K. Raahemifar, and J. Tookey, Application of wall systems for improving the energy efficiency in buildings: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 62, pp. 1252–1269, 2016.

[8] Z. Hu, W. He, J. Ji, and S. Zhang, A review on the application of Trombe wall system in building, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 76, pp. 976–987, 2017.

[9] S. Li, N. Zhu, P. Hu, F. Lei, and R. Deng, Numerical study on thermal performance of PCM Trombe wall, in: *Proceedings of the 10th International Conference on Applied Energy (ICAE2018)*, Hong Kong, 2018, *Energy Procedia*, Vol. 152, pp. 22–25.

[10] Z. Hu, W. He, D. Hu, S. Lv, L. Wang, J. Ji, H. Chen, and J. Ma, Design, construction and performance testing of a PV blind-integrated Trombe wall module, *Applied Energy*, Vol. 203, pp. 643–656, 2017.
[11] D. Zou, X. Ma, X. Liu, P. Zheng, and Y. Hu, Thermal performance enhancement of composite phase change material (PCM) using graphene and carbon nanotubes as additives for the potential application in lithium-ion power battery, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 129, pp. 33–41, 2018.
[12] S. Duan, C. Jing, and Z. Zhao, Energy and exergy analysis of different Trombe walls, *Energy and Buildings*, Vol. 126, pp. 517–523, 2016.
[13] A. Abdeen, A. Serageldin, M. Ibrahim, A. El-Zafarany, Sh. Ookawara, and R. Murata, Experimental, analytical, and numerical investigation into the feasibility of integrating a passive Trombe wall into a single room, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 159, pp. 751–768, 2019.
[14] L. E. Bourdeau, Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage, in: *Proceedings of the 5th National Passive Solar Conference*, Amherst, Mass., Oct. 1980, pp. 19–26.
[15] U. Stritih and P. Novak, Solar heat storage wall for building ventilation, *Renewable Energy*, Vol. 8(1–4), pp. 268–271, 1996.
[16] J. Onishi, H. Soeda, and M. Mizuno, Numerical study on a low energy architecture based upon distributed heat storage system, *Renewable Energy*, Vol. 22(1–3), pp. 61–66, 2001.
[17] F. Fiorito, Trombe walls for lightweight buildings in temperate and hot climates: Exploring the use of phase-change materials for performance improvement, *Energy Procedia*, Vol. 30, pp. 1110–1119, 2012.
[18] A. Kurnuc and Y. Ali, Performance of coupled novel triple glass and phase change material wall in the heating season: An experimental study, *Energy and Buildings*, Vol. 86, pp. 2432–2442, 2012.
[19] L. Zalewski, A. Joulin, S. Lassue, Y. Dutil, and D. Rousse, Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material, *Solar Energy*, Vol. 86(1), pp. 208–219, 2012.
[20] M. Rabani, V. Kalantar, A. K. Faghih, M. Rabani, and R. Rabani, Numerical simulation of a Trombe wall to predict the energy storage rate and time duration of room heating during the non-sunny periods, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 49(10), pp. 1395–1404, 2013. (in Persian)
[21] Y. Li and S. Liu, Experimental study on thermal performance of a solar chimney combined with PCM, *Applied Energy*, Vol. 113, pp. 172–178, 2014.
[22] D. I. Kolaitis, R. Garay Martinez, and M. A. Founti, An experimental and numerical simulation study of an active solar wall enhanced with phase change materials, *Journal of Facade Design and Engineering*, Vol. 3(1), pp. 71–80, 2015.
[23] Y. Berthou, P. H. Biwole, P. Achard, H. Sallée, M. Tantot-Neirac, and F. Jay, Full-scale experimentation on a new translucent passive solar wall combining silica aerogels and phase change materials, *Solar Energy*, Vol. 115, pp. 733–742, 2015.
[24] F. Guarino, A. Athienitis, M. Cellura, and D. Bastien, PCM thermal storage design in buildings: Experimental studies and applications to solaria in cold climates, *Applied Energy*, Vol. 185, pp. 95–106, 2017.
[25] E. Leang, P. Tittelein, L. Zalewski, and S. Lassue, Numerical study of a composite Trombe solar wall integrating microencapsulated PCM, *Energy Procedia*, Vol. 123, pp. 1009–1014, 2017.
[26] Y. Wattez, T. Cosmatu, M. Tenpierik, M. Turrin, F. Heinzelmann, L. Brotas, and F. Nicol, Renewed Trombe wall passively reduces energy consumption, in: *Proceedings of Passive and Low Energy Architecture (PLEA) 2017*, Edinburgh, 2017. Available online.
[27] G. Zhou and M. Pang, Experimental investigations on thermal performance of phase change material–Trombe wall system enhanced by delta winglet vortex generators, *Energy*, Vol. 83, pp. 758–769, 2015.
[28] N. Zhu, P. Liu, P. Hu, F. Liu, and Z. Jiang, Modeling and simulation on the performance of a novel double shape-stabilized phase change materials wallboard, *Energy and Buildings*, Vol. 107, pp. 181–190, 2015.
[29] B. Yu, J. Hou, W. He, S. Liu, Z. Hu, J. Ji, and H. Chen, The performance analysis of a novel hybrid solar gradient utilization photocatalytic-thermal-catalytic Trombe wall system, *Energy*, Vol. 174, pp. 420–435, 2019.
[30] J. Dong, Z. Chen, L. Zhang, Y. Cheng, S. Sun, and J. Jie, Experimental investigation on the heating performance of a novel designed Trombe wall, *Energy*, Vol. 168, pp. 728–736, 2019. DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.125.
[31] M. Rabani, V. Kalantar, A. A. Dehghan, and A. K. Faghih, Empirical investigation of the cooling performance of a new designed Trombe wall in combination with solar chimney and water spraying system, *Energy and Buildings*, Vol. 102, pp. 45–57, 2015. (in Persian)
[32] C. K. Mytafides, A. Dimoudi, and S. Zora, Transformation of a university building into a zero energy building in Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, Vol. 155, pp. 98–114, 2020.