بهسازی حرارتی جدار ساختمان‌های موجود در اقلیم سرد در ایران با بهره‌گیری از ویژگی‌های دیوار ترومب *

نوشین ابوالحسنی **
بهروز محمدکاری ***
ریما فیاض ****

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱۸

چکیده

هدف از انجام این پژوهش، ارائهٔ راهکاری برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های موجود در اقلیم سرد ایران است. در راهکار پیشنهادی، یک پوستهٔ دوم در سمت خارجی جدار جنوبی در بخش‌های غیر نورگذر نصب می‌شود و دیوار موجود به یک دیوار ترومب تبدیل می‌شود. در این روش، جدار رو به آفتاب، به رنگ مشکی رنگ‌آمیزی و شیشه‌ای در مقابل آن نصب می‌شود تا یک فاصلهٔ هوایی محفوظ ایجاد شود. جدار حاصل علاوه بر کاهش تلفات حرارتی ناشی از افزایش مقاومت کلی آن، امکان جذب و ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی را فراهم می‌آورد و نوسان دمای هوای داخل اتاق را در طول روز کاهش می‌دهد. این راهکار به‌سبب سادگی و سهولت اجرا و همچنین ساختار شکلی و فضایی معماری و نوع مصالح رایج در ساخت‌وسازهای اقلیم سرد ایران، علاوه بر بناهای شهری، امکان استفاده در ابنیهٔ روستایی را نیز دارد. در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی عملکرد این سامانه، ابتدا یک مدل نمونه تعیین شده و جدار رو به آفتاب آن، در سه حالت بدون‌عایق، باعایق و با جزئیات پیشنهادی، در نظر گرفته شده و با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی انرژی‌پلاس، بارهای گرمایشی محاسبه شد. نتایج، کاهش قابل‌توجه بار گرمایشی را در مقایسه با جدار بدون عایق نشان داد. همچنین مشخص شد جدار پیشنهادی در مقایسه با عایق‌کاری، کارایی بهتری دارد. به‌منظور بررسی شرایط از نظر آسایش حرارتی، دمای خشک و دمای متوسط تشعشعی فضای داخل به‌وسیلهٔ همین نرم‌افزار پیش‌بینی شد. نتایج حاکی از کاهش معنادار بازه زمانی، مستلزم گرمایش و تعدیل دمای داخل در شرایط حاد آب‌وهوایی بود. عملکرد سامانهٔ پیشنهادی، در یک ساختمان موجود نیز شبیه‌سازی شد که نتایج اخیر با نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مدل نمونه مطابقت داشت.

کلیدواژه‌ها

ویژگی دیوار ترومب، بهسازی، بهینه‌سازی حرارتی، گرمایش غیرفعال، اقلیم سرد.

* این مقاله مستخرج از پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد نگارندهٔ اول با موضوع «طراحی نمای ساختمان اداری با بهره‌گیری از ویژگی‌های دیوار ترومب (در اقلیم سرد)» به راهنمایی آقایان دکتر محمدجواد ثقفی و خانم دکتر ریما فیاض و مشاورهٔ دکتر بهروز محمدکاری در دانشکده معماری پردیس هنرهای زیبای دانشگاه تهران است.

** کارشناس ارشد انرژی و معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، نویسنده مسئول، n_ abolhasani@ut.ac.ir
*** استادیار عمران ـ فیزیک ساختمان، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
**** دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر تهران

پرسش‌های پژوهش

۱. بهره‌گیری از ویژگی‌های دیوار ترومب در بهسازی حرارتی ساختمان‌های موجود، چه تأثیری بر بار گرمایش ساختمان و آسایش حرارتی ساکنان در اقلیم سرد ایجاد می‌کند؟

۲. موازنهٔ جریان حرارت در جدار رو به آفتاب به‌ازای جزئیات متفاوت آن چگونه است؟

مقدمه

هم‌زمان با رشد جمعیت در جهان، نیاز به انرژی افزایش یافته است. کشورها به‌دنبال روش‌های جدید تأمین انرژی با هدف کاهش مصرف سوخت فسیلی هستند تا از یک طرف اهداف توسعهٔ پایدار ازجمله کاهش تبعات زیست‌محیطی و از طرف دیگر، کاهش هزینه‌های دورهٔ بهره‌برداری را محقق نمایند. مطابق داده‌های ترازنامه انرژی ایران، در سال ۱۳۹۰، سهم بخش ساختمان (خانگی، عمومی و تجاری) از کل مصرف نهایی انرژی در کشور، برابر ۳۶ درصد بوده است (ترازنامهٔ انرژی ایران ۱۳۹۲) که اهمیت این بخش را در مصرف انرژی در سطح کلان نشان می‌دهد.

کشور ایران ظرفیت بسیاری در زمینهٔ کاربرد انرژی خورشیدی دارد. بنابراین، به‌کارگیری راهبردهای غیرفعال خورشیدی کمک قابل توجهی به کاهش مصرف انرژی می‌کند. بخش اعظم انرژی مصرفی در بخش ساختمان، صرف گرمایش و سرمایش و تأمین آسایش حرارتی می‌شود. در اقلیم سرد کاهش بار گرمایش، از نظر اقتصادی و امنیت تأمین انرژی و کاهش آلودگی زیست‌محیطی در اولویت قرار می‌گیرد. به‌علاوه، با توجه به سهم اندک ساختمان‌های در حال‌ساخت، در مقایسه با ساختمان‌های موجود، ارائهٔ راه‌حل‌های ساده و اقتصادی، برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های موجود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

عایق‌کاری حرارتی یکی از رایج‌ترین اقداماتی است که در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی، در پروژه‌های بهسازی ساختمان‌های موجود باید انجام شود. این اقدام در پروژه‌های نوسازی دارای توجیه اقتصادی بسیار قوی است، ولی در ساختمان‌های موجود، با توجه به لزوم تجدید نازک‌کاری یا نماکاری و هزینه‌های اجرای بالا باعث می‌شود که توجیه اقتصادی عایق‌کاری حرارتی کم‌رنگ شود. درنتیجه، در پروژه‌های بهسازی، باید به‌دنبال راه‌حل‌هایی بود که ساده و کم‌هزینه و درعین‌حال اثربخش باشند. درضمن، امکان پیاده‌سازی آن بر روی تعداد زیادی از ساختمان‌ها باید فراهم باشد. موضوع مهم دیگری که باید در انتخاب راه‌حل‌های بهسازی مدّنظر قرار گیرد، این است که استفاده از عایق حرارتی در «جبههٔ رو به آفتاب» ساختمان (جبههٔ جنوبی ساختمان در نیمکرهٔ شمالی)، اگرچه از انتقال حرارت از داخل فضا به محیط خارج می‌کاهد (مطلوب در اوقات سرد سال)، هم‌زمان انتقال حرارت ناشی از تابش خورشید به داخل را نیز کاهش می‌دهد (نامطلوب در فصل سرد). بنابراین، در طراحی جدار جنوبی با این چالش مواجه می‌شویم که در اوقات سرد سال، تأثیر کدام‌یک از دو عامل انتقال حرارت و بهرهٔ گرمایی خورشید در مجموع بیشتر است. لذا در این پژوهش، استفاده از ویژگی‌های دیوار خورشیدی موسوم به دیوار ترومب، به‌منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی حرارتی، از طریق افزایش جذب انرژی خورشیدی و هم‌زمان افزایش مقاومت حرارتی، پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفته است.

دیوار ترومب برای اولین بار در سال ۱۹۵۰، توسط مخترعی فرانسوی به نام فیلیکس ترومب در آزمایشگاهی در نیومکزیکو ساخته شد. پس از آن، سایر پژوهشگران با روش‌های مختلف، به بهبود کارایی دیوار ترومب پرداخته و ابعاد بهینهٔ اجزای مختلف آن را به‌دست آوردند؛ برای مثال، عرض بهینهٔ فاصلهٔ هوایی در دیوار ترومب تهویه‌شونده یک‌دهم ارتفاع دیوار است و بهترین تناسبات دریچهٔ داخلی، سه‌بیستم ارتفاع دیوار است (ابوالحسنی ۱۳۹۲).

برخی دیگر همچون آروید چل و همکاران نشان دادند با استفاده از دیوار ترومب، دمای اتاق بین ۲۲.۸ تا ۱۸.۵ درجهٔ سانتی‌گراد قرار می‌گیرد که باعث برقراری شرایط بهینه می‌شود (Chel, Nayak, and Kaushik 2008).

همچنین ستازی و همکاران، رفتار حرارتی یک ساختمان مسکونی با دیوار ترومب و ساختمانی دیگر با دیوار معمولی را مورد بررسی قرار داده و راهکارهای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و آسایش حرارتی آن‌ها را در اقلیم مدیترانه‌ای در طول تابستان و زمستان بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد ساختمان دارای دیوار ترومب حدود ۱۲.۲ درصد در انرژی مورد نیاز برای گرمایش در مقایسه با دیوار سنتی صرفه‌جویی کرده است (Stazi, Mastrucci, and Di Perna 2011).

در این مطالعه، استفاده از انرژی خورشیدی، به‌عنوان یک منبع اولیهٔ انرژی و تجدیدپذیر برای گرمایش غیرفعال، از طریق ترکیب دیوار ترومب غیرتهویه‌شونده (دریافت غیرمستقیم تابش) با پنجره (دریافت مستقیم تابش و تأمین روشنایی) محقق شده است. برخلاف اکثر پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه، ازجمله موارد مورد اشاره در بالا، در راه حل پیشنهادی تحقیق حاضر، دیوار موجود بدون تخریب یا تغییرات ساختاری و صرفاً با افزودن اجزایی ساده، به دیوار ترومب تبدیل می‌شود. جدار حاصل ضمن جذب انرژی خورشیدی، به‌دلیل مقاومت حرارتی لایهٔ هوا، تلفات حرارتی را کاهش می‌دهد.

خصوصیات بناهای اقلیم سرد، ازجمله ارتفاع کم اتاق‌ها و قطر زیاد دیوارها، شرایط را برای استفاده از این جدار مناسب می‌سازد. قطر زیاد دیوارها به جلوگیری از تبادل حرارتی بین داخل و خارج بنا کمک می‌کند. همچنین، ازآنجایی‌که دیوارها از مصالح بنایی ساخته می‌شوند، به‌عنوان منبع ذخیرهٔ حرارتی عمل می‌کند و در طی روز که در اثر تابش آفتاب گرم می‌شود، همچنان گرمای خود را تا شب حفظ کرده و به تعدیل دمای داخل کمک می‌کند. به‌منظور سهولت در گرمایش، به‌ویژه در مناطق روستایی، سعی می‌شود از فضاهای بزرگ اجتناب شود. گرم کردن فضاهای نسبتاً کوچک همچنان در اغلب نقاط کوهستانی کشور، مشکل و فضای اتاق‌ها غالباً سرد است و اهل خانه مجبورند برای گرم شدن به کرسی پناه ببرند (قبادیان ۱۳۸۷).

روشن است که اجرای این روش بهسازی، نه تنها در ساختمان‌های رایج در مناطق شهری مناطق سردسیر کشور، در مناطق روستایی کشور نیز می‌تواند دارای توجیه فنی–اقتصادی قوی باشد. در مناطق روستایی، «اقتصاد و صرفه‌جویی» در شکل کلی سکونتگاه نقش تعیین‌کننده‌ای دارد و روستاییان به‌دنبال بهره‌برداری دقیق و صحیح و صرفه‌جویانه از منابع تحت اختیار خود هستند (حاجی‌زاده و زرگر ۱۳۸۸).

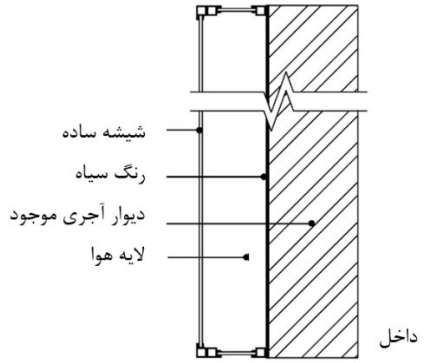
در ادامهٔ این نوشتار، به تشریح ساختار و چگونگی عملکرد این سامانه پرداخته می‌شود. همچنین، نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل فرضی و نیز ارزیابی کارایی جدار در یک ساختمان واقعی در اقلیم سرد، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۱. جزئیات و مکانیزم عملکرد جدار

راهکار پیشنهادی در این پژوهش، تبدیل دیوار موجود به نوعی دیوار ترومب است که در آن، دیوار جنوبی ساختمان با یک پوشش سیاه مات رنگ‌آمیزی می‌شود و یک سطح شیشه‌خور با فاصلهٔ هوایی مناسب از دیوار نصب می‌شود تا جدار فوق به‌عنوان یک خازن حرارتی عمل کند. شمای کلی این ساختار در شکل (۱) ترسیم شده است. دیوار ترومب به‌صورتی کارآمد، امکان استفاده از گرمای خورشید را فراهم می‌کند. انتقال گرمای ذخیره‌شده در این دیوار در طول روز، به‌دلیل وجود لایهٔ هوای ساکن و همچنین عدم امکان عبور تابش فروسرخ از شیشه، در طول شب به‌کندی صورت می‌گیرد.

در دیوار ترومب مورد بحث در این پژوهش، حرارت فقط از طریق رسانش از دیوار سنگین به داخل منتقل می‌شود و هیچ‌گونه دریچه و دمنده برای تهویهٔ لایهٔ هوای دیوار ترومب در نظر گرفته نشده است (دیوار ترومب غیرتهویه‌شونده) تا سادگی، دوام و کارایی جدار در بلندمدت حفظ شود و از مواجهه با پیچیدگی‌های فنی در مراحل ساخت، بهره‌برداری و نگهداری اجتناب شود. به این نوع دیوار، دیوار خورشیدی یا دیوار حرارتی نیز گفته می شود (Saadatian et al. 2012). در این نوع دیوار، حرارت تا هنگام غروب در دیوار ذخیره می‌شود و با توجه به تأخیر زمانی دیوار، پس از غروب خورشید، شروع به گسیل گرما می‌کند. تأخیر زمانی دیوار بستگی به ضریب هدایت حرارت

معادل، ظرفیت حرارتی و ضخامت آن دارد. باید توجه کرد که سطوح داخلی دیوارها به‌هیچ‌وجه نباید پوشیده شوند و قرار دادن مبلمان و تابلو و نظایر آن، اثربخشی سیستم را به‌صورت جدی تحت‌الشعاع قرار می‌دهد.



تصویر ۱: جزئیات جدار پیشنهادی

تصویر ۲: مدل نمونه با جدار متعارف، عایق‌بندی‌شده و جدار پیشنهادی

در این سامانه، پرتوهای خورشید با طول موج کوتاه ناشی از حرارت بالای سطح خورشید از شیشه عبور می‌کند و بخش عمدهٔ آن توسط سطح تیرهٔ دیوار (با ضریب جذب بالا) جذب می‌شود. افزایش دمای دیوار (ناشی از جذب تابش)، گسیل گرما از سطح داخلی دیوار و همچنین انتقال حرارت ناشی از جریان هوا (همرفت) به فضای کنترل‌شده داخل را به‌دنبال دارد. از طرفی دیگر، افزایش دمای سطح خارجی دیوار، در اثر دریافت تابش خورشید، موجب شدت یافتن گسیل امواج فروسرخ با طول موج بلند می‌شود. ازآنجایی‌که شیشه نسبت به امواج فروسرخ کدر است، امکان خروج انرژی ساطع‌شده از دیوار (به طرف خارج) به‌طور محسوسی محدود می‌شود. شیشه نیز به نوبهٔ خود و با توجه به نسبت اختلاف دمای آن با هوای محفظه و هوای بیرون، مقداری از انرژی حرارتی خود را به هوای داخل برمی‌گرداند. در صورتی که دمای شیشه از دمای هوای محفظه بالاتر باشد، آن را گرم می‌کند و مابقی، از طریق تبادل با هوا و تابش به سطوح بیرون تلف می‌شود. باید توجه کرد که جرم حرارتی دیوار با ذخیره‌سازی انرژی جذب‌شده، مانع افزایش زیاد دمای سطح شده و میزان گسیل انرژی حرارتی را کاهش می‌دهد. به این ترتیب، جرم حرارتی جدار تأثیر زیادی بر کارایی آن دارد (Mazria 1979; Chen 2011).

بازتابش پرتوهای خورشید از روی سطح شیشه- همچنین پرتوهای جذب‌شده به شیشه- به هنگام ورود به محفظه، تلفات حرارتی ناشی از گرم شدن شیشه، نفوذ هوا به داخل محفظه و پل‌های حرارتی پیرامون محفظه (امتداد دیوار)، عوامل اصلی تلفات حرارتی هستند که با کنترل آن، می‌توان عملکرد آن را بهبود بخشید.

دیوار ترومب، به‌ویژه در شرایطی که جرم حرارتی ساختمان کم است، سبب می‌شود نوسان دمایی در فضای مجاور آن کاهش یابد و اثرپذیری دمای داخل از شرایط حاد بیرونی کاهش یابد (Chen 2011). کارایی این دیوار عمدتاً به جنس، ضخامت و رنگ سطح دیوار بستگی دارد. استفاده از شیشهٔ کم‌گسیل به‌طور محسوسی کارایی دیوار ترومب را افزایش می‌دهد (ابوالحسنی ۱۳۹۲)، ولی ازآنجایی‌که دسترسی به شیشه ساده در مقایسه با نوع کم‌گسیل آسان‌تر است، در ارزیابی‌ها، از استفاده از آن صرف‌نظر کردیم.

۲. ارزیابی کارایی جدار

در این پژوهش، به منظور ارزیابی کارایی جدار، از شبیه‌سازی نرم‌افزاری استفاده شد. با درنظرگرفتن تمام شرایط، به‌ویژه صحت و اعتبار نتایج حاصل از الگوریتم‌های محاسباتی، نرم‌افزار انرژی‌پلاس برای شبیه‌سازی انتخاب شد. انرژی‌پلاس بر پایهٔ مشخصات ساختمان شامل ساختار فیزیکی، ساکنان، سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی آن و

همچنین داده‌های آب‌وهوایی سالانهٔ ساعت‌به‌ساعت محل استقرار ساختمان، می‌تواند بارهای سرمایش و گرمایش را به‌منظور حفظ دما یا محدودهٔ آسایش حرارتی خاصی در بنا محاسبه کند و دمای هوا و سطوح فضاهای ساختمان را براساس مشخصات ساختمان و سیستم‌های مکانیکی آن و شرایط آب‌وهوایی محل استقرار ساختمان، در هر زمان سال پیش‌بینی نماید (EnergyPlus Engineering Document 2013).

۲.۱. مفروضات

در این مطالعه، یک اتاق رو به آفتاب (رو به جنوب در نیمکرهٔ شمالی) به ابعاد ۳×۴×۵ متر از ساختمانی فرضی در نرم‌افزار انرژی‌پلاس نسخهٔ ۸ مدل‌سازی شد (شکل ۲). کف، سقف و دیوارها، به‌جز دیوار جنوبی، در مجاورت با فضای داخل و بی‌دررو در نظر گرفته شد. داده‌های آب‌وهوایی شهر تبریز به‌عنوان یک اقلیم سرد برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. در جدار جنوبی یک پنجره با شیشهٔ دوجداره به ابعاد ۱×۱ متر تعبیه شد. (مطابق شکل ۲)

سه حالت متفاوت برای جدار جنوبی در نظر گرفته و شبیه‌سازی شد. در حالت اول که آن را جدار متعارف می‌نامیم، جدار جنوبی از آجر توپر با چگالی ۱۲۸۰ kg/m3 و ضریب هدایت حرارت معادل ۱.۰ W/m.K به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و بدون عایق در نظر گرفته شد. در حالت دوم، براساس مصالح رایج در بازار کشور ایران و بنا بر مشخصات تعریف‌شده در مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان، عایق پلی‌استایرن منبسط با جرم مخصوص ۳۵ Kg/m۳ و ضریب هدایت حرارتی ۰.۰۳۹ W/m.K (مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان ایران ۱۳۸۸) به ضخامت ۵ سانتی‌متر در سمت داخلی دیوار آجری در نظر گرفته شد. در حالت سوم که آن را جدار پیشنهادی می‌نامیم، جدار ۲۰ سانتی‌متری آجری، با رنگ مشکی با ضرایب جذب و گسیل ۰.۹۸۱ (Beckman and Duffie 1980) در سطح خارجی و یک فاصلهٔ هوایی ۲۰ سانتی‌متری و در نهایت، یک لایهٔ شیشهٔ ساده به ضخامت ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد. جزئیات فوق، ۳.۸۰ متر از ۵ متر عرض جدار خارجی را به ارتفاع ۳ متر می‌پوشاند.

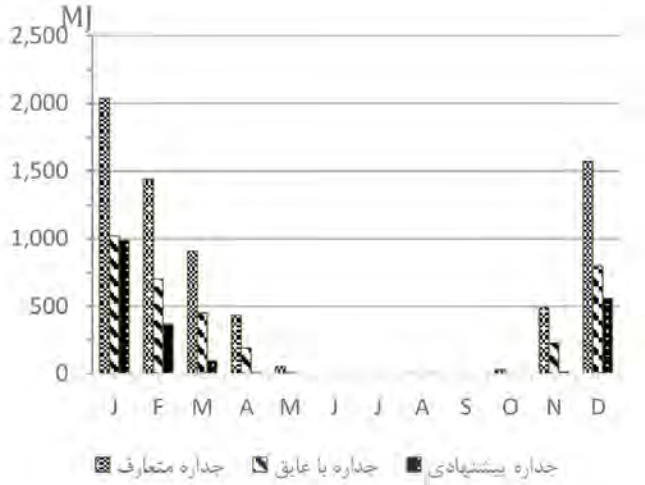
بار گرمایش مدل نمونه برای دستیابی به دمای ۱۸درجه و تعویض هوای نیم بار در ساعت، در حالات مختلف جدار جنوبی، به‌عنوان معیاری برای مقایسه و ارزیابی کمّی حالات مختلف جدار جنوبی محاسبه شد. همچنین، برای بررسی شرایط فضای داخل از نظر آسایش حرارتی، بدون درنظرگرفتن تجهیزات کمکی، نمودارهای دمای خشک هوای داخل و دمای متوسط تشعشعی به‌عنوان عوامل اساسی در این زمینه استخراج شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با درنظرگرفتن شرایط فوق، در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲.۲. بار گرمایش

با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار انرژی‌پلاس، بار گرمایش ماهانهٔ مدل نمونه در هر سه حالت مفروض برای جدار جنوبی، محاسبه و نمودار مذکور مطابق نمودار ۱ ترسیم شد. با استناد به این داده‌ها مشاهده می‌شود در صورت استفاده از جدار متعارف، در نیمی از سال نیاز به گرمایش وجود دارد. بار گرمایش در سه ماه از سال، به میزان چشمگیری بیش از سه ماه دیگر فصل سرد است. در صورت استفاده از عایق حرارتی، به میزان محسوسی از بار گرمایش کاسته می‌شود، اما همچنان در شش ماه از سال نیاز به گرمایش وجود دارد.

این در حالی است که در صورت استفاده از جدار پیشنهادی، تنها در چهار ماه از سال، نیاز به گرمایش وجود دارد. از این چهار ماه، در یک ماه بار گرمایش بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. در سه ماه دیگر، وضعیت به مراتب از هر دو حالت پیشین بهتر است. در سردترین ماه سال (ژانویه)، به‌علت افزایش تلفات ناشی از اختلاف دمای زیاد جدار با هوای بیرون، کارایی عایق و جدار پیشنهادی بسیار به‌هم نزدیک می‌شود.

براساس این شبیه‌سازی، درمجموع، بار گرمایش سالانه، در صورت استفاده از جدار متعارف، برابر ۶۹۷۳ مگاژول می‌شود که با استفاده از عایق، ۵۱ درصد از میزان آن کاسته شده و به ۳۴۰۷ مگاژول می‌رسد. این در حالی است که در صورت استفاده از جدار پیشنهادی، ۷۱ درصد از بار حرارتی نمونه کاسته و مقدار آن به ۲۰۴۲ مگاژول کاهش می‌یابد که ازجمله مهم‌ترین علل آن، چنان‌که پیش‌تر نیز اشاره شد، استفاده از انرژی تابشی خورشید و هم‌زمان کاهش تلفات حرارتی جدار مذکور است. به این موارد با جزئیات بیشتری پرداخته خواهد شد، اما پیش از آن لازم است به بررسی شرایط دمایی هوای داخل بپردازیم.



نمودار ۱: بار گرمایشی مدل نمونه در صورت استفاده از ۳ نوع جدار مورد بررسی

۲.۳. آسایش حرارتی

دستیابی به آسایش حرارتی به چندین عامل بستگی دارد: ۱. دمای خشک و دمای متوسط تشعشعی؛ ۲. دمای مؤثر؛ ۳. رطوبت نسبی؛ ۴. سرعت و شدت کوران هوا؛ ۵. لباس و پوشش؛ ۶. شرایط محیطی نظیر دمای سطوح و دمای پنجره‌ها، سن فرد، سازگاری فرد با محیط و گرادیان عمودی دما (حیدری و غفاری جباری ۱۳۸۹).

به غیر از عوامل وابسته به دما، همهٔ عوامل دیگر، در سه حالت بررسی شده در این پژوهش، دارای شرایطی یکسان یا حداقل مشابه هستند، نظیر پوشش، سن و...، یا دارای تأثیر ناچیزی بر آسایش حرارتی می‌باشند، نظیر رطوبت (همان). بنابراین در این مطالعه، به‌منظور مقایسهٔ شرایط آسایش حرارتی، دمای هوای داخل و متوسط دمای تشعشعی به‌عنوان معیار برای مقایسه، انتخاب و محاسبه شدند و بنا بر ضرورت بحث مورد استناد قرار می‌گیرند.

در نمودار ۲، نوسان دما برای ۲۴ ساعت شبانه‌روز در اول دی ماه مشاهده می‌شود. در این روز، درحالی‌که متوسط دمای هوا ۱٫۹ درجهٔ سلسیوس است، دمای هوای داخل با جدار متعارف ۶٫۴ و جدار عایق‌شده ۶٫۰ درجه می‌شود. اما این مقدار، در صورت استفاده از جدار پیشنهادی به ۱۴درجه می‌رسد که به محدودهٔ دمای آسایش نزدیک‌تر است. علاوه بر این، میانگین روزانهٔ دمای سطح داخلی جدار در حالت متعارف و همچنین با عایق، برابر ۶٫۸ و ۶٫۲ درجهٔ سلسیوس است، اما در حالت استفاده از جدار پیشنهادی، مقدار این کمیت به ۱۶٫۵ درجه می‌رسد. با افزایش دمای سطح داخلی دیوار، از میزان تشعشع سطح بدن انسان به محیط کاسته شده و امکان دستیابی به آسایش حرارتی در دماهای پایین‌تر فراهم می‌شود. این امر- دستیابی به شرایط آسایش در دمای پایین‌تر- به‌تنهایی می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش انتقال حرارت از جدارها و تهویه و همچنین کاهش مصرف انرژی در ساختمان داشته باشد (حیدری ۱۳۸۷).

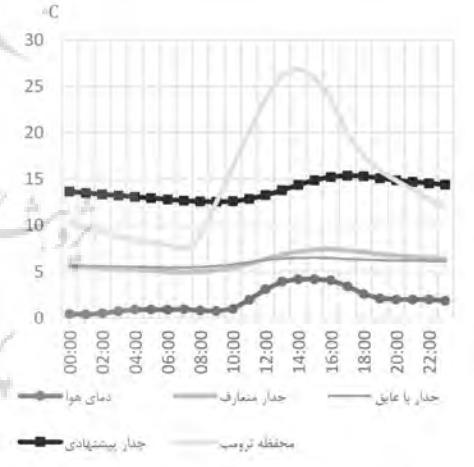
با وجود نوسان زیاد دمای هوای فضای داخل در طی شبانه‌روز- ناشی از تابش آفتاب در روز و اتلاف حرارت در شب- جرم حرارتی بالای ناشی از کاربرد مصالح سنگین باعث می‌شود نوسان روزانهٔ دما بسیار کاهش یابد. دمای محفظهٔ ترومب در طول روز به ۲۶٫۸ درجه می‌رسد و در شب تا ۷٫۶ درجه کاهش می‌یابد. با وجود این، دمای هوای داخل اتاق در صورت عدم استفاده از سیستم گرمایشی، فقط در بازهٔ دمایی ۱۲٫۶ تا ۱۵٫۴ درجه سلسیوس نوسان می‌کند. همچنین، چنان‌که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، دمای محفظهٔ ترومب در ساعات قبل از ۸:۳۰ و بعد از ۱۹:۰۰ از دمای اتاق پایین‌تر است. این بدان معناست که جریان حرارت در این بازه زمانی، از داخل به بیرون است، بنابراین استفاده از عایق متحرک می‌تواند باعث افزایش بازدهی این سامانه شود، گرچه ممکن است موجب بروز

پیچیدگی‌هایی در اجرا و بهره‌برداری از این سامانه شود. به همین دلیل، در ارزیابی کارایی جدار، از آن صرف‌نظر کردیم.

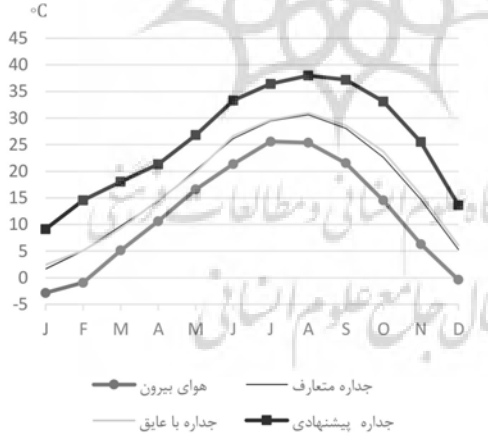
نمودار ۳ دمای خشک هوای بیرون و داخل را در حالت‌های سه‌گانهٔ این پژوهش، به‌صورت متوسط ماهانه نمایش می‌دهد. چنان‌که در بخش قبل گفته شد، در ۶ ماه از سال، نیاز به گرمایش وجود دارد؛ در ماه‌های مذکور، متوسط دمای هوای بیرون برابر ۳٫۰ درجه و متوسط دمای هوای داخل، در صورت استفاده از جدار متعارف و جدار باعایق، به‌ترتیب ۸٫۵ و ۸٫۸ درجه است. در همین بازه زمانی، متوسط دمای هوای داخل مدل نمونه در حالت جدار پیشنهادی، برابر ۱۷٫۱ درجهٔ سلسیوس است. به‌عبارت دیگر، جدار پیشنهادی باعث می‌شود متوسط ماهانه دمای هوای داخل در مقایسه با دیوار عایق‌شده و دیوار متعارف، بیش از ۸ درجه و در مقایسه با هوای بیرون، ۱۴٫۱ درجه بالاتر باشد.

در ارزیابی کارایی عایق حرارتی با توجه به ارقام ارائه‌شده در بالا، توجه به این نکته اهمیت بسیار دارد که به‌علت دمای پایین هوای داخل- ناشی از خاموش بودن سیستم گرمایشی- عایق حرارتی نمی‌تواند تأثیر زیادی در دمای هوای داخل داشته باشد. بدیهی است که تنها در صورت اختلاف دمای قابل توجه در دو طرف، عایق حرارتی توجیه اقتصادی خواهد داشت.

در جدار پیشنهادی، سطح خارجی دیوار در مجاورت هوای محبوس در محفظه قرار دارد. با مقایسهٔ منحنی‌های دمایی محفظه و هوای بیرون، واضح است که خطر بروز میعان، در این جدار به میزان قابل توجهی کمتر از دو حالت دیگر است (بختیاری و دیگران ۱۳۸۸). حداقل دمای سطح خارجی جدار در روز اول دی، ۱۴٫۳ درجهٔ سلسیوس برآورده می‌شود، حال آنکه این عامل درخصوص جدار متعارف، ۳٫۵ درجهٔ سلسیوس است. بروز پدیدهٔ میعان در جدار، باعث ایجاد مشکلات بهداشتی، تخریب مصالح و افزایش تلفات حرارتی در آن می‌شود. بنابراین پیشگیری از این خطر، دارای اهمیت بوده و در تصمیم‌گیری دربارهٔ جدار ساختمان، عاملی تعیین‌کننده است.



نمودار ۲: نوسان دمای ساعتی در روز ۲۱ دسامبر (اول دی)



نمودار ۳: میانگین ماهانهٔ دمای هوای بیرون و اتاق در سه حالت جدار متعارف، باعایق و پیشنهادی

۲.۴. بیش گرمایش

نکتهٔ قابل توجه در نمودار، دمای بیش از حد هوای داخل در فصل تابستان است که به آستانهٔ ۴۰ درجه نیز می‌رسد، درحالی‌که دمای هوا حداکثر به ۲۵ درجه و دمای هوای داخل در صورت استفاده از جدار متعارف یا جدار باعایق، حداکثر به ۳۰ درجه می‌رسد. با توجه به کارایی بالای جدار در فصل سرد، گرم شدن بیش از حد در فصل گرم، چندان هم دور از انتظار نیست. بنابراین برای حفظ آسایش ساکنان ساختمان در زمان‌هایی غیر از فصل سرد، باید تدابیری

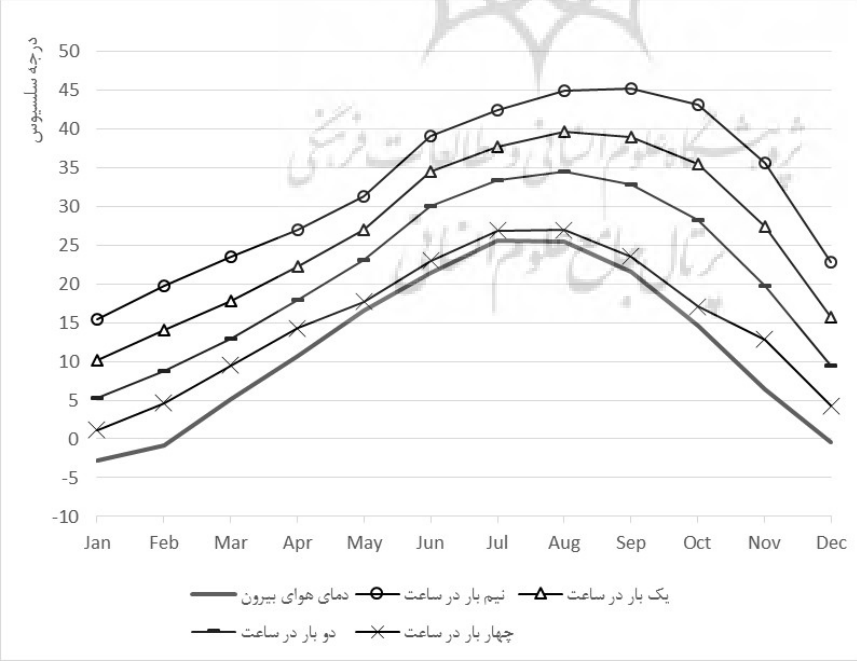
اندیشیده شود. در ادامه به بررسی راهکارهایی برای مرتفع نمودن این مشکل می‌پردازیم.

پیشگیری از گرم‌شدن بیش از حد هوای داخل، در این پژوهش به دو طریق مورد بررسی قرار می‌گیرد: افزایش دفعات تعویض هوا و سایه‌اندازی بر روی جدار.

در شرایطی که میزان تهویهٔ فضا افزایش می‌یابد، استفاده از دمای متوسط تشعشعی در مقایسه با دمای هوا، برای ارزیابی آسایش حرارتی، معیار مناسب‌تری است. برای بررسی تأثیر تعویض هوا، دمای متوسط تشعشعی اتاق با جدار پیشنهادی، در سه حالت نیم، یک و دو بار و چهار بار تعویض هوا در ساعت، با روش شبیه‌سازی به‌کمک نرم‌افزار انرژی‌پلاس، محاسبه و با دمای هوای داخل در حالت استفاده از جدار متعارف با تعویض هوای نیم بار در ساعت و همچنین با دمای هوای بیرون مقایسه شد.

همان‌طور که در نمودار ۴ مشخص است، با افزایش دفعات تعویض هوا، دمای هوای داخل به دمای هوای بیرون نزدیک‌تر می‌شود. با این حال، در مقایسه با جدار متعارف، همواره دمای متوسط تشعشعی اتاق بالاتر خواهد بود؛ برای مثال، دو بار تعویض هوا در ساعت، ۵ درجه دما را کاهش می‌دهد، اما همچنان نسبت به جدار متعارف، ۵ درجه افزایش دما داریم. بنابراین این راهکار، امکان حل مشکل گرم‌شدن بیش از حد را به‌طور کامل فراهم نخواهد کرد.

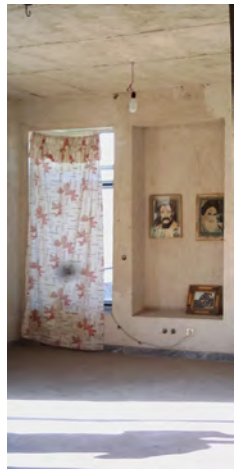
بدیهی است در صورت سایه‌اندازی روی جدار، مسئلهٔ گرم شدن بیش از حد ناشی از جدار پیشنهادی، به‌طور کامل برطرف خواهد شد. داده‌های حاصل از شبیه‌سازی نیز این امر را تأیید کرد. مکانیزم سایه‌اندازی ممکن است به‌صورت هوشمند و براساس دمای هوای داخل یا خارج انجام شود، ولی این امر با سادگی و در دسترس بودن- از اهداف این پژوهش- منطبق نیست. با توجه به نمودار ۱ در ماه‌های می تا اکتبر، نیاز گرمایشی محسوسی وجود ندارد، لذا می‌توان از عملکرد گرمایشی جدار پیشنهادی به‌طور کامل صرف‌نظر کرد. به این منظور با پوشاندن سطح شیشه، بر روی دیوار سایه‌اندازی می‌شود و فاصلهٔ هوایی در جدار پیشنهادی، نقش یک عایق را ایفا می‌کند. در سایر ایام سال که ممکن است تنها ساعاتی از روز دما بیش از حد آسایش باشد و گرم شدن بیش از حد به‌صورت مقطعی و کوتاه رخ دهد، می‌توان با افزایش میزان تهویهٔ هوای داخل، شرایط آسایش حرارتی را فراهم کرد.



نمودار ۴: تأثیر دفعات تعویض هوا بر دمای خشک اتاق

۳. بررسی کارایی جدار در ساختمان واقعی

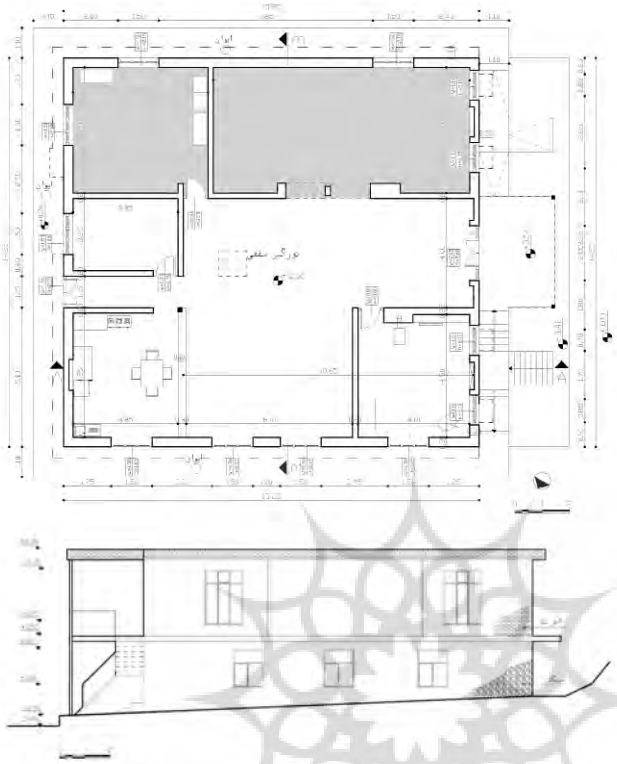
برای سنجش کارایی جزئیات پیشنهادی در یک ساختمان واقعی، یک ساختمان موجود در اقلیم سرد انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس، رفتار حرارتی آن شبیه‌سازی شد. ساختمان مورد بررسی، از میان شماری از ساختمان‌هایی انتخاب شد که در یکی از پروژه‌های تحقیقاتی بنیاد مسکن، در مناطق روستایی اقلیم‌های مختلف کشور برداشت شده است. (بنیاد مسکن انقلاب اسلامی ۱۳۸۵) شکل ۳ فضای داخلی و نمای خارجی و شکل ۴ پلان و نمای این ساختمان روستایی را نشان می‌دهد.



تصویر ۳: بنای روستایی در اردبیل (بنیاد مسکن انقلاب اسلامی ۱۳۸۵)

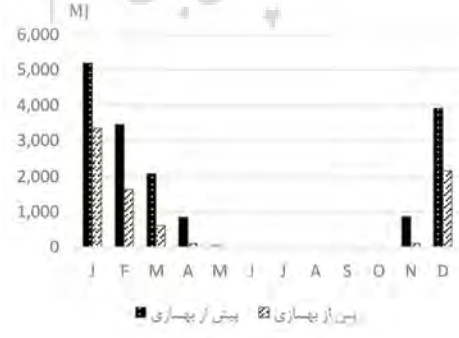
ابعاد کلی این دو اتاق، ۱۵×۴٫۲ متر است. برای دیوار خارجی دو اتاق جنوبی (رو به آفتاب) این ساختمان، دیوار ترومب غیرتهویه‌شونده مطابق جزئیات پیشنهادی در این پژوهش، به طول ۷٫۵ متر و ارتفاع ۳ متر در نظر گرفته شد. در خانه‌های روستایی اقلیم سرد، کوچ فصلی در داخل خانه صورت می‌گیرد؛ یعنی در فصل سرد، بیشتر از فضاهای رو به آفتاب واقع در جبهۀ جنوبی استفاده می‌شود و در فصل گرم سال، فعالیت‌های روزانه عمدتاً در اتاق‌های جبهۀ شمالی جریان دارد. به همین منظور در پژوهش حاضر، صرفاً دو اتاق جنوبی ساختمان یادشده با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس شبیه‌سازی شد.

ابتدا بار گرمایشی محاسبه شد. چنان‌که در نمودار ۵ مشاهده می‌شود، با اعمال تغییرات پیشنهادی در جدار موجود، بار گرمایشی به‌صورت چشمگیری کاهش می‌یابد و جز در چهار ماه، در سایر ایام سال تقریباً برابر صفر است. به‌عبارت دیگر، فصل گرمایش دو ماه کوتاه‌تر می‌شود و درمجموع، بار گرمایش سالانه، در صورت انجام بهسازی با روش پیشنهادی، به میزان ۵۱ درصد کاهش یافته و از ۱۶۳۹۰ مگاژول به ۷۹۶۰ مگاژول تنزل می‌یابد. میزان کاهش بار در ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس، به‌ترتیب برابر ۴۵، ۳۶، ۵۳ و ۷۰ درصد است.



تصویر ۴: پلان و نمای ساختمان موجود

مطابق نمودار ۶، در ماه‌های نوامبر تا آوریل (معادل آبان تا فروردین) دمای متوسط هوای داخل پس از بازسازی، از ۱۰,۰ به ۱۴,۸ درجهٔ سلسیوس افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، دمای متوسط هوای داخل در ماه آگوست (مرداد) به ۳۵ درجه نیز می‌رسد. در این صورت، سایه‌اندازی بر روی جدار برای حفظ آسایش حرارتی ساکنان ضروری است. هرچند به‌علت کوچ فصلی در داخل ساختمان و عدم استفاده از فضای مجاور جدار جنوبی، می‌توان صرفاً با تهویه و تعویض هوا، تاحدّی مشکل گرم شدن بیش از حد را حل کرد.



نمودار ۵: بار گرمایش اتاق‌های جنوبی پیش و پس از بهینه‌سازی

نمودار ۶: متوسط دمای ماهانهٔ اتاق‌های جنوبی پیش و پس از بهینه‌سازی

نتیجه‌گیری

در این مقاله، به‌منظور کاهش بار حرارتی در ساختمان‌های موجود در اقلیم سرد، جزئیاتی برای جدار رو به آفتاب پیشنهاد شد. در جزئیات پیشنهادی، با اعمال تغییراتی جزئی، شامل رنگ‌آمیزی جدار به رنگ سیاه، قرار دادن لایه‌ای شیشهٔ محافظ و ایجاد یک فاصلهٔ هوایی محبوس، جدار موجود را می‌توان به‌سادگی و با هزینه‌ای اندک، به یک دیوار ترومب غیرتهویه‌شونده تبدیل کرد، بدون آنکه به تغییرات ساختاری یا تخریب جدار نیازی وجود داشته باشد. این روش، ضمن سادگی مکانیزم، همه‌جا در دسترس و قابل اجراست و نیاز به مصالح گران‌قیمت، فناوری‌های پیشرفته و مهارت‌های تخصصی برای طراحی و اجرا ندارد.

در شبیه‌سازی مدل نمونه با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس، نشان داده شد که بار گرمایی در اتاق‌های جنوبی در مقایسه با حالت دیوار متعارف و حتی عایق‌کاری‌نشده، به مراتب کمتر است، به‌گونه‌ای که نیازهای حرارتی را در چند ماه از فصل سرد، به‌کلی برطرف می‌کند و نیاز گرمایی تنها در دو یا در نهایت سه ماه و با شدتی کمتر مطرح است. عایق‌کاری حرارتی باعث کاهش ۵۱ درصدی در بار گرمایی مدل نمونه شد، درحالی‌که با استفاده از جزئیات پیشنهادی، ۷۱ درصد از مقدار بار حرارتی ـ در مقایسه با حالت جدار جنوبی بدون عایق و دیوار ترومب ـ کاسته شد. در ماه‌های معتدل و به‌خصوص گرم سال، جدار پیشنهادی می‌تواند موجب گرم شدن بیش از حد شود. درنتیجه، در ماه‌های می تا اکتبر (اردیبهشت تا مهر) که مطابق شبیه‌سازی، نیازهای گرمایشی وجود ندارد، سطح شیشه پوشیده می‌شود تا سایه ایجاد شود، در این صورت مقاومت حرارتی لایهٔ هوا همچنان باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود. علاوه بر این، خارج از این بازه زمانی، ممکن است به‌صورت مقطعی و در ساعاتی از روز، پدیدهٔ گرم‌شدن بیش از حد رخ دهد که با افزایش تهویه و ورود هوای تازه قابل کنترل است.

برخلاف عایق‌کاری حرارتی که باعث کاهش دمای سطح جدار در سمت رو به بیرون آن می‌شود، جدار با جزئیات پیشنهادی، همواره دمای بالاتری دارد و باعث کاهش خطر بروز میعان در جدار می‌شود. این امر علاوه بر پیشگیری از معضلات بهداشتی ناشی از رطوبت در مصالح ساختمانی، باعث حفظ کیفیت مصالح ساختمانی و پیشگیری از افت مقاومت حرارتی آن نیز می‌شود.

ازآنجایی‌که ارائهٔ راهکاری عملی و در دسترس برای بهسازی ساختمان‌های موجود در اقلیم سرد مدّنظر بود، از هر عاملی که باعث ایجاد پیچیدگی فنی، اجرایی و کاربردی می‌شود، پرهیز شد. بنابراین پوشش‌های انتخابی برای سطح دیوار، شیشه‌های کم‌گسیل، سایه‌اندازی هوشمند و عایق متحرک در ارزیابی عملکرد جدار پیشنهادی لحاظ نشد، هرچند همهٔ این موارد، به نوبهٔ خود می‌توانند باعث بهبود کارایی جدار شوند.

به‌هرحال، بررسی جنبه‌های مختلف، کارایی مناسب جزئیات پیشنهادی را تأیید می‌کند. با استفاده از راهکار مذکور، می‌توان با کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، ضمن حفظ محیط‌زیست، از منابع باارزش انرژی حفاظت کرد.

پی‌نوشت‌ها

1. UNVENTED TROMBE WALL
2. LOW-E
3. ENERGYPLUS
4. ADIABATIC
5. DRY-BULB
6. MEAN RADIANT TEMPERATURE
7. OVERHEATING

منابع

ـ ابوالحسنی، نوشین. ۱۳۹۲. *طراحی نمای ساختمان اداری با بهره‌گیری از ویژگی‌های دیوار ترومب (در اقلیم سرد)*، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران.

ـ بختیاری، سعید، محمدتقی رضایی حریری، ناهید خدابنده، فرهنگ طهماسبی، ریما فیاض، بهروز محمدکاری، سهراب ویسه و جعفر هدایتی. ۱۳۸۸. *اصول و روش‌های عایق‌کاری حرارتی براساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان (صرفه‌جویی در مصرف انرژی)*. تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، وزارت راه، مسکن و شهرسازی.

ـ بنیاد مسکن انقلاب اسلامی مدیریت مسکن روستایی، *بررسی روش‌ها و معیارهای صرفه‌جویی در مصرف انرژی ساختمان مسکن روستایی*، شهریور ۱۳۸۵.

ـ *ترازنامهٔ انرژی ایران*. ۱۳۹۲. تهران: معاونت امور برق و انرژی وزارت نیرو.

ـ حاجی‌زاده، اکبر و ابراهیم زرگر. ۱۳۸۸. *درآمدی بر شناخت معماری روستایی ایران*. تهران: مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه شهید بهشتی. چاپ پنجم.

ـ حیدری، شاهین. ۱۳۸۷. *برنامه‌ریزی انرژی در ایران با تکیه بر بخش ساختمان*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

ـ حیدری، شاهین و شهلا غفاری جباری. ۱۳۸۹. تعیین محدودهٔ زمانی آسایش حرارتی برای شهر تبریز. مهندسی مکانیک مدرس: ۳۸.

ـ قبادیان، وحید. ۱۳۸۷. *بررسی اقلیمی ابنیه سنتی ایران*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

ـ *مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان ایران*. ۱۳۸۸. دفتر امور مقررات ملی ساختمان. تهران: معاونت امور ساختمان و مسکن، وزارت راه، مسکن و شهرسازی.

- Beckman, William A., و John A. Duffie. 1980. Solar engineering of thermal processes: John Wiley and Sons.

- Chel, Arvind, JK Nayak, and Geetanjali Kaushik. 2008. "Energy conservation in honey storage building using Trombe wall." Energy and Buildings no. 40 (9):1643-1650.

- Chen, C Julian. 2011. Physics of solar energy. New Jersey: John Wiley & Sons.

- EnergyPlus Engineering Document. The US Department of Energy 2013 [accessed on 18/03/2014. Available from http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_documentation.cfm.

- Mazria, Edward. 1979. Passive solar energy book. Emmaus, PA., United States: Rodale Press.

- Saadatian, Omidreza, K Sopian, CH Lim, Nilofar Asim, and MY Sulaiman. 2012. "Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development." Renewable and Sustainable Energy Reviews no. 16 (8):6340-6351.

- Stazi, Francesca, Alessio Mastrucci, و Costanzo Di Perna. 2011. Experimental and Numerical Study on the Performance of Solar Walls in Mediterranean Climates. Paper read at World Renewable Energy Congress.