

ارزیابی و تحلیل عملکرد ترکیبی دیوارهای ترومب با پوسته‌های چندلایه در ساختمان

طاها طینی^۱، حمیدرضا فرشچی^{۲*}

۱-دانشجو کارشناسی ارشد، گروه معماری و انرژی، پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

taha.tini@grad.kashanu.ac.ir

۲-استادیار، گروه تکنولوژی معماری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، ایران. (نویسنده مسئول)

farshchi46@kashanu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۵/۳/۲۱]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۴/۱/۲۳]

چکیده

دیوار ترومب به‌عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین سامانه‌های گرمایش غیرفعال خورشیدی، با وجود مزایای متعدد، با محدودیت‌هایی نظیر کاهش بازده حرارتی در ساعات شب، خطر گرمایش بیش از حد در فصل گرم و تک‌عملکردی بودن مواجه است؛ از این‌رو توسعه سامانه‌های ترکیبی و پوسته‌های چندلایه ساختمان به‌عنوان راهکاری مؤثر برای ارتقای عملکرد آن مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش با هدف ارائه بررسی جامع و انتقادی بر سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب و ارزیابی ظرفیت آن‌ها در بهبود عملکرد حرارتی، الکتریکی، زیست‌محیطی و کیفیت هوای داخلی انجام شده است. مطالعه حاضر با رویکرد مرور سیستماتیک همراه با تحلیل انتقادی و با بهره‌گیری از بررسی بیش از ۱۲۰ مقاله علمی معتبر عمده‌تأ منتشرشده در بازه ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۶ انجام گردید. نتایج نشان داد که رویکردهای ترکیبی دیوار ترومب را می‌توان در ۹ دسته اصلی شامل ترکیب با سلول‌های فتوولتائیک، مواد تغییر فاز، سیستم‌های آبی، نانوسیال‌ها، مواد کاتالیزوری و تصفیه هوا، مبدل‌های حرارتی زمین-هوا، مواد کامپوزیت طبیعی، محیط‌های متخلخل و رطوبت‌گیرهای چرخنده طبقه‌بندی کرد. تحلیل مقایسه‌ای این سامانه‌ها حاکی از برتری سیستم فتوولتائیک-ترومب در تولید هم‌زمان انرژی حرارتی و الکتریکی، مواد تغییر فاز دهنده در افزایش پایداری حرارتی، فناوری‌های کاتالیزوری در بهبود کیفیت هوا و غیرفعال‌سازی عوامل بیماری‌زا و سیستم‌های آبی و مبدل‌های زمین-هوا در شرایط اقلیمی خاص است. در این پژوهش ماتریس تطبیق فناوری-اقلیم و چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب بهینه سیستم‌ها در اقلیم‌های متنوع ایران ارائه شده است. مطالعات کاهش بار گرمایشی تا ۷۲ درصد و بهبود قابل توجه کیفیت هوای داخلی را گزارش کرده‌اند. در مجموع، سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب ظرفیت بالایی برای ایفای نقش به‌عنوان پوسته‌های چندعملکردی در ساختمان‌های کم‌مصرف و نزدیک به صفر انرژی دارند؛ با این حال چالش‌هایی نظیر هزینه اولیه، پیچیدگی یکپارچه‌سازی معماری، تفاوت عملکرد در اقلیم‌های گوناگون و کمبود مطالعات میدانی بلندمدت همچنان پابرجاست. بر این اساس، انجام مطالعات تجربی گسترده، توسعه مواد نوین بومی، ادغام فناوری‌های هوشمند و بومی‌سازی این سیستم‌ها به‌عنوان مهم‌ترین مسیرهای پژوهشی و کاربردی آینده پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: دیوار ترومب ترکیبی، پوسته چندعملکردی ساختمان، دیوار ترومب فتوولتائیک، دیوار ترومب با مواد تغییر فاز دهنده، سیستم‌های غیرفعال خورشیدی.

۱-مقدمه

افزایش چشمگیر مصرف انرژی در بخش ساختمان، یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و انرژی جهان معاصر به شمار می‌رود. ساختمان‌ها مسئول مصرف حدود ۴۰ درصد از کل انرژی جهان و بیش از یک سوم انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند (Tian et al., 2021). در ایران نیز، بخش ساختمان بیش از ۴۰ درصد از کل انرژی مصرفی کشور را به خود اختصاص داده است که بخش عمده آن مربوط به تأمین گرمایش و سرمایش فضاها است. این وضعیت، ضرورت توجه جدی به راهکارهای پایدار، غیرفعال و مبتنی بر انرژی خورشیدی را برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و حرکت به سوی ساختمان‌های کم‌مصرف یا نزدیک به صفر انرژی برجسته می‌سازد.

در میان فناوری‌های خورشیدی غیرفعال، دیوار ترومب یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین سیستم‌ها است. این سیستم برای اولین بار توسط فلیکس ترومب در دهه ۱۹۶۰ معرفی شد و با بهره‌گیری از اصل اثر گلخانه‌ای و جرم حرارتی، انرژی خورشیدی را جذب، ذخیره و به تدریج به فضای داخلی منتقل می‌کند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که دیوار ترومب کلاسیک می‌تواند بار گرمایشی ساختمان را در فصل زمستان به‌طور قابل توجهی کاهش دهد (Simões et al., 2020; Kostikov et al., 2020).

با وجود مزایای دیوار ترومب سنتی، این سیستم دارای محدودیت‌های ساختاری و عملکردی مهمی است. ازجمله مهم‌ترین این محدودیت‌ها می‌توان به بازده حرارتی پایین در ساعات شب و روزهای ابری، خطر گرمای بیش از حد در فصل تابستان، نوسانات دمایی شدید در فضای داخل، عملکرد ضعیف در اقلیم‌های مرطوب و بسیار سرد، و تک‌عملکردی بودن (عمدتاً محدود به گرمایش) اشاره کرد (Kostikov et al., 2020; Zhou et al., 2025; Hu et al., 2023). این مشکلات باعث شده است که پژوهشگران در دهه اخیر به سمت توسعه سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب حرکت کنند تا این فناوری را به یک پوسته چندعملکردی^۱ تبدیل نمایند.

ادغام دیوار ترومب با فناوری‌های نوین مانند سلول‌های فتوولتائیک (Lin et al., 2023; Islam et al., 2022; Abed & Ahmed, 2020; Zhou et al., 2020; Hu & Zhang, 2021)، مواد تغییر فاز (Liang et al., 2025; Oluah et al., 2022; Duan et al., 2021)، سیستم‌های آبی (Zhou et al., 2020; Hu & Zhang, 2021)، نانو سیال‌ها (Abed & Ahmed, 2020)، مواد کاتالیزوری و تصفیه هوا (Yu et al., 2021; Yu et al., 2023; Xie & Yu, 2021)، مبدل حرارتی زمین-هوا (Dabaieh & Serageldin, 2021) و مواد کامپوزیت طبیعی، منجر به ایجاد رویکردهای ترکیبی متنوعی شده است. این سیستم‌های هیبریدی نه تنها عملکرد حرارتی را بهبود می‌بخشند، بلکه قابلیت‌های جدیدی مانند تولید برق، تصفیه هوا، کنترل رطوبت و افزایش انطباق‌پذیری با اقلیم‌های مختلف را فراهم می‌کنند (Yilmaz & Kandilli, 2024, 2025). با توجه به تنوع اقلیمی ایران و پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در اکثر مناطق کشور، توسعه و بهینه‌سازی سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب می‌تواند نقش مهمی در دستیابی به اهداف توسعه پایدار و کاهش مصرف انرژی ساختمان ایفا کند.

پژوهش حاضر با هدف طبقه‌بندی و ارزیابی سیستماتیک و انتقادی بر سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب انجام شده است. اهداف اصلی این مطالعه شامل ارائه طبقه‌بندی به‌روز و دقیق از رویکردهای ترکیبی موجود، تحلیل و مقایسه عملکرد حرارتی، الکتریکی، زیست‌محیطی و تصفیه‌ای این سیستم‌ها، شناسایی چالش‌ها و محدودیت‌های فنی، اقتصادی و معماری و ارائه پیشنهادها کاربردی برای تحقیقات آینده با توجه به شرایط اقلیمی ایران است. نوآوری اصلی این پژوهش نسبت به مرورهای قبلی عبارت است از: ارائه طبقه‌بندی به‌روزرسانی‌شده و جامع ۹ گانه رویکردهای ترکیبی دیوار ترومب بر اساس مطالعات ۲۰۱۸-۲۰۲۶؛ تدوین ماتریس تطبیق فناوری-اقلیم ویژه شرایط متنوع ایران برای اولین بار؛ ارائه چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب بهینه‌ترین سیستم ترکیبی در اقلیم‌های مختلف کشور؛ شناسایی دقیق شکاف‌های تحقیقاتی با تمرکز ویژه بر اقلیم مرطوب شمال ایران و لزوم مطالعات میدانی بلندمدت. این مطالعه نه تنها مطالعات موجود را تجمیع کرده، بلکه با تحلیل انتقادی عمیق، مقایسه کمی-کیفی و ارائه ابزارهای

¹ Multi-functional Building Envelope

کاربردی (ماتریس و چارچوب تصمیم‌گیری)، به سمت توسعه عملی این فناوری در ساختمان‌های کم‌مصرف ایران گام برداشته است. در ادامه این مقاله، ابتدا روش‌شناسی ارزیابی ارائه می‌شود، سپس مبانی نظری و پیشنهادی تحقیق بررسی شده، یافته‌های کلیدی تحلیل می‌گردند و در نهایت بحث و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲-مرور مبانی نظری و پیشنهادی

دیوار ترومب به‌عنوان یکی از کلاسیک‌ترین فناوری‌های گرمایش غیرفعال خورشیدی، بر پایه اصول جذب تابش خورشیدی، ذخیره‌سازی حرارت در جرم حرارتی و انتقال آن به فضای داخل از طریق هدایت و *convection* طبیعی عمل می‌کند. در این سیستم، تابش خورشیدی از لایه شیشه‌ای عبور کرده و توسط سطح تیره دیوار جذب می‌شود. بخشی از انرژی جذب‌شده به‌صورت هدایت از دیوار به فضای داخلی منتقل می‌گردد و بخش دیگر باعث افزایش دمای هوای کانال شده و جریان *convection* طبیعی ایجاد می‌کند (Kostikov et al., 2020; Tian et al., 2021). عملکرد این سیستم به شدت تحت تأثیر عواملی مانند ضخامت و جنس دیوار ذخیره‌کننده، عرض کانال هوا، نوع و تعداد لایه‌های شیشه، زاویه نصب، رنگ سطح جذب‌کننده و شرایط اقلیمی قرار دارد. مطالعات تجربی و شبیه‌سازی متعدد نشان داده‌اند که دیوار ترومب کلاسیک در اقلیم‌های سرد و معتدل با تابش مناسب خورشیدی می‌تواند دمای داخلی را به طور متوسط ۵ تا ۱۵ درجه سلسیوس بالاتر از دمای محیط نگه دارد و بار گرمایشی را به طور قابل توجهی کاهش دهد (Simoes et al., 2020; Zhang et al., 2019).

با این وجود، دیوار ترومب سنتی علی‌رغم مزایای خود، با محدودیت‌های عملکردی جدی مواجه است. مهم‌ترین این محدودیت‌ها شامل بازده حرارتی پایین در ساعات شب و روزهای ابری به دلیل اتلاف حرارت معکوس از طریق شیشه، خطر گرمای بیش از حد در فصل تابستان که منجر عدم آسایش ساکنین می‌شود، نوسانات دمایی شدید در طول روز و شب، عملکرد نامناسب در اقلیم‌های مرطوب که رطوبت را تشدید می‌کند و در نهایت تک‌عملکردی بودن سیستم که عمدتاً محدود به گرمایش زمستانی است، است (Kostikov et al., 2020; Zhou et al., 2020; Hu et al., 2023). این مشکلات باعث شده است که در سال‌های اخیر تمرکز پژوهشگران از دیوار ترومب ساده به سمت سیستم‌های ترکیبی و چندعملکردی^۱ معطوف شود تا بتوانند هم‌زمان چندین هدف انرژی، زیست‌محیطی و راحتی را برآورده کنند. با بررسی مقالات معتبر در حوزه تحقیق، سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب را می‌توان در نه رویکرد اصلی دسته‌بندی کرد. جدول زیر خلاصه‌ای از این رویکردها، فناوری تلفیقی، عملکردهای اصلی، مزایا، محدودیت‌ها، مطالعات کلیدی و اقلیم مناسب هر کدام ارائه می‌دهد.

رویکرد اول، ترکیب دیوار ترومب با سلول‌های فتوولتائیک^۲ است. این سیستم نه‌تنها گرمایش فراهم می‌کند بلکه هم‌زمان برق تولید می‌نماید. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که پوشش PV می‌تواند بازده الکتریکی بین ۸ تا ۱۴ درصد و بازده حرارتی کلی سیستم را بین ۴۰ تا ۶۰ درصد ایجاد کند (Lin et al., 2023; Liang et al., 2025; Abed & Ahmed, 2020). استفاده از بلایندهای وینتین^۳ در فضای کانال هوا، امکان کنترل دقیق‌تر جریان هوا و جلوگیری از گرمای بیش از حد را فراهم کرده است (Islam et al., 2022). همچنین، کاربرد نانو سیال‌ها به‌عنوان سیال خنک‌کننده در این سیستم‌ها، دمای سلول PV را کاهش داده و بازده الکتریکی و حرارتی را به‌طور هم‌زمان افزایش می‌دهد (Abed & Ahmed, 2020).

¹ Multi-functional

² PV-Trombe

³ Venetian blinds

جدول ۱: طبقه‌بندی رویکردهای ترکیبی دیوار ترومب بر اساس فناوری تلفیقی

ردیف	ترکیبی رویکرد	فناوری اصلی تلفیقی	عملکردهای اصلی	مزایای کلیدی	محدودیت‌های اصلی	مطالعات کلیدی	اقلیم مناسب
۱	PV-Trombe	سلول‌های فتوولتائیک	گرمایش + تولید برق	تولید هم‌زمان برق و حرارت، بازده کلی بالا	در PV کاهش بازده دمای بالا، هزینه اولیه	Lin et al. (2023), Liang et al. (2025), Abed & Ahmed (2020)	سرد و معتدل
۲	PCM-Trombe	مواد تغییر فاز دهنده	گرمایش + ذخیره‌سازی طولانی‌مدت	کاهش نوسان دما، عملکرد خوب در شب	نقطه PCM هزینه، ذوب حساس	Oluah et al. (2022), Duan et al. (2021), Liu et al. (2021)	سرد و خشک
۳	Water-based Trombe	سیستم‌های آبی	گرمایش + آب گرم مصرفی + عایق تابستانی	ظرفیت ذخیره‌سازی بالا، عملکرد خوب تابستان	پیچیدگی نگهداری، خطر نشتی	Zhou et al. (2020), Hu & Zhang (2022)	گرم و خشک
۴	نانوسیال‌ها	نانوسیال Al_2O_3 -water	PV بهبود خنک‌کاری و انتقال حرارت	افزایش قابل توجه بازده	هزینه نانوذررات، پایداری	Abed & Ahmed (2020)	گرم و خشک
۵	مواد کاتالیزوری و تصفیه هوا	کاتالیست حرارتی/فتو ترمال	گرمایش + تصفیه هوا + غیرفعال‌سازی ویروس	بهبود کیفیت هوا	کاهش بازده در تابش کم	Xie & Yu (2021), Yu et al. (2021, 2023)	همه اقلیم‌ها
۶	EAHE-Trombe	مبدل حرارتی زمین-هوا	پیش گرمایش/پیش خنک‌سازی	عملکرد خوب در اقلیم‌های شدید	نیاز به فضای زیرزمینی	Dabaieh & Serageldin (2021)	سرد و گرم
۷	مواد کامپوزیت طبیعی	زنولیت-پرلیت	گرمایش + ذخیره‌سازی	پایدار، ارزان، بومی	بازده کمتر نسبت به PCM	Yilmaz & Kandilli (2024, 2025)	سرد و معتدل
۸	Porous Media	محیط متخلخل	بهبود انتقال حرارت همرفت	افزایش بازده حرارتی	افت فشار هوا	Tian et al., (2021), Hu et al. (2023)	سرد
۹	Desiccant Wheel-Trombe	رطوبت‌گیر چرخنده	گرمایش + کنترل رطوبت	مناسب اقلیم مرطوب	پیچیدگی مکانیکی	Bahramkhoo et al. (2019)	مرطوب

این طبقه‌بندی بر اساس مرور سیستماتیک مقاله‌های بررسی شده انجام شده است.

رویکرد دوم، ادغام مواد تغییر فاز^۱ است. مواد تغییر فاز با ذخیره انرژی به صورت نهان، مشکل نوسانات دمایی و عملکرد ضعیف شبانه را به شکل قابل توجهی کاهش می‌دهند. انتخاب نقطه ذوب مناسب PCM (معمولاً بین ۱۸ تا ۲۸ درجه سلسیوس) و ضخامت بهینه لایه آن، از عوامل کلیدی موفقیت این سیستم است (Oluah et al., 2022; Duan et al., 2021; Liu et al., 2021). مطالعات بهینه‌سازی چندمتغیره نشان داده‌اند که ترکیب PCM با عایق خارجی در شب می‌تواند دمای عملیاتی داخل را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد (Lin et al., 2023).

در رویکرد سوم، سیستم‌های آبی^۱ مورد توجه قرار گرفته است. جایگزینی یا تکمیل جرم حرارتی جامد با آب، امکان ذخیره‌سازی حرارت بیشتر و تولید آب گرم مصرفی را فراهم می‌کند. این سیستم در فصل تابستان عملکرد عایق‌بندی بهتری داشته و اتلاف حرارت شبانه را کاهش می‌دهد (Zhou et al., 2020; Hu & Zhang, 2022). مطالعه‌ای در شرایط اقلیمی گوناگون نشان داد که دیوار ترومب آبی^۲ در مقایسه با دیوار ترومب سنتی، عملکرد حرارتی بهتری ارائه می‌دهد.

رویکرد چهارم استفاده از نانوسیال‌ها به ویژه Al_2O_3 -water در مبدل حرارتی PV-Trombe است. غلظت‌های بهینه نانوذرات (حدود ۰/۵ درصد) باعث کاهش قابل توجه دمای سلول خورشیدی و افزایش بازده کلی سیستم شده است (Abed & Ahmed, 2020).

رویکرد پنجم، ترکیب با مواد کاتالیزوری و سیستم‌های تصفیه هوا است. این سیستم‌ها با استفاده از کاتالیست‌های حرارتی و فوتوکاتالیستی مانند MnO_x-CeO_2 ، این سامانه‌ها قادر به حذف ترکیبات آلی فرار (VOCs) و غیرفعال‌سازی ویروس‌ها و باکتری‌ها هستند (Xie & Yu, 2021; Yu et al., 2021; Yu et al., 2023; Tian et al., 2021). این قابلیت در دوران همه‌گیری کووید-۱۹ اهمیت دوچندانی یافت و نشان داد که دیوار ترومب می‌تواند به‌طور هم‌زمان نقش مؤثری در تأمین گرمایش و ارتقای کیفیت هوای داخلی ساختمان ایفا کند.

رویکرد ششم، ادغام با مبدل حرارتی زمین-هوا^۳ است. این ترکیب با استفاده از دمای نسبتاً ثابت زمین، هوای ورودی را پیش‌گرمایش یا پیش‌خنک می‌کند و عملکرد سیستم را در اقلیم‌های سرد و گرم به‌طور چشمگیری ارتقا می‌بخشد (Dabaieh & Serageldin, 2021; Jafari et al., 2023).

رویکرد هفتم، بهره‌گیری از مواد کامپوزیت طبیعی مانند ژئولیت-پرلیت است. این مواد با ظرفیت گرمایی بالا و رسانایی حرارتی پایین، گزینه‌ای پایدار، اقتصادی و بومی برای بهبود جرم حرارتی به شمار می‌روند (Yilmaz & Kandilli, 2024, 2025).

رویکرد هشتم، به‌کارگیری محیط‌های متخلخل (مانند فوم‌های فلزی یا توری‌های فلزی) در کانال هوا است که با افزایش سطح تماس، انتقال حرارت همرفتی^۴ را تقویت می‌کند.

رویکرد نهم نیز ترکیب با رطوبت‌گیر چرخنده^۵ است که برای کنترل رطوبت در اقلیم‌های مرطوب بسیار مناسب بوده و از حرارت بازیابی‌شده دیوار ترومب برای باززایی رطوبت‌گیر استفاده می‌کند. این تنوع رویکردها نشان‌دهنده تکامل قابل توجه دیوار ترومب از یک سیستم ساده گرمایشی به یک پوسته هوشمند و چندعملکردی است که می‌تواند پاسخگوی نیازهای پیچیده ساختمان‌های پایدار امروزی باشد. ادامه بررسی نشان می‌دهد که هر یک از این رویکردهای ترکیبی، نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارند و عملکرد آن‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی، طراحی جزئیات و اهداف کاربری قرار می‌گیرد.

ترکیب دیوار ترومب با سلول‌های فتوولتائیک (PV-Trombe) یکی از موفق‌ترین و پرمطالعه‌ترین رویکردها در سال‌های اخیر محسوب می‌شود. در این سامانه، سلول‌های فتوولتائیک به‌عنوان لایه جاذب یا پوشش خارجی عمل کرده و علاوه بر تولید برق، انرژی حرارتی موردنیاز برای گرمایش فضای داخلی را نیز تأمین می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که بهینه‌سازی چندهدفه این سیستم در ترکیب با مواد تغییر فاز (PCM) می‌تواند هزینه چرخه عمر را تا ۴۵/۵۱ درصد کاهش داده و سطح آسایش حرارتی را تا ۴۳/۸۱ درصد بهبود بخشد. همچنین، استفاده از Venetian blind در فضای کانال هوا امکان کنترل مؤثرتر دمای داخلی را فراهم می‌کند. در یک مرور جامع شامل بیش از ۶۷ مطالعه نیز، بازده حرارتی این سامانه تا ۷۹/۹ درصد و بازده الکتریکی آن تا ۱۳/۲ درصد گزارش شده است. با وجود

1 Water-based
2 Water Trombe Wall
3 EAHE
4 convection
5 Desiccant Wheel

این، کاهش بازده سلول‌های فتوولتائیک در دماهای بالا همچنان یکی از مهم‌ترین چالش‌های این فناوری به شمار می‌رود (Lin et al., 2023; Islam et al., 2022; Liang et al., 2025).

ترکیب دیوار ترومب با مواد تغییر فاز (PCM-Trombe) راهکاری مؤثر برای کاهش نوسانات دمایی و بهبود عملکرد شبانه سیستم است. نتایج مطالعات نشان داده‌اند که با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، ترکیب اسید کاپریک و اسید پالمیتیک مناسب‌ترین ماده تغییر فاز برای این سامانه است. همچنین، مدل‌سازی در سه اقلیم مختلف چین نشان داده است که دمای ذوب بهینه PCM بین ۲۱ تا ۲۳ درجه سلسیوس و ضخامت مناسب آن حدود ۵ سانتی‌متر است. افزون بر این، استفاده از عایق خارجی در طول شب همراه با PCM موجب بهبود قابل‌توجه دمای عملیاتی فضای داخلی می‌شود. مرور مطالعات اخیر نیز نشان می‌دهد که بهینه‌سازی ساختار سیستم، انتخاب مناسب مواد تغییر فاز و اتخاذ راهبردهای عملیاتی صحیح، همچنان از مؤثرترین راهکارها برای افزایش پایداری حرارتی و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها محسوب می‌شوند. این رویکرد به‌ویژه در اقلیم‌هایی با اختلاف دمای زیاد بین روز و شب عملکرد مطلوبی دارد (Oluah et al., 2022; Duan et al., 2021; Liu et al., 2021; Wang et al., 2025).

سیستم‌های مبتنی بر آب (Water-based Trombe) رویکردی نوآورانه برای افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و تأمین آب گرم مصرفی به شمار می‌روند. نتایج مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از دیوار ترومب کامپوزیتی آبی می‌تواند عملکرد حرارتی را نسبت به نمونه‌های متداول بهبود دهد. همچنین، سیستم Water Blind-Trombe Wall قادر است بار گرمایشی سالانه ساختمان را تا ۴۲/۶ درصد کاهش داده و در فصل تابستان نیز عملکرد عایق‌بندی بهتری ارائه کند. ظرفیت گرمایی زیاد و قابلیت جریان‌پذیری آب، این سامانه را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای چندمنظوره تبدیل کرده است (Zhou et al., 2020; Hu & Zhang, 2022).

استفاده از نانوسیال‌ها عمدتاً در ترکیب با سامانه‌های PV-Trombe مورد توجه قرار گرفته است. نتایج مطالعات تجربی نشان داده‌اند که نانوسیال Al_2O_3 -water با غلظت ۰/۵ درصد می‌تواند دمای سلول خورشیدی را تا ۹ درجه سلسیوس و دمای فضای داخلی را تا ۱۴/۴ درجه سلسیوس کاهش داده و بازده کلی سیستم را به بیش از ۸۸ درصد برساند. این رویکرد به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک عملکرد مطلوبی دارد (Abed & Ahmed, 2020).

ترکیب دیوار ترومب با مواد کاتالیزوری و سامانه‌های تصفیه هوا یکی از رویکردهای نوین با هدف ارتقای سلامت ساکنان است. مطالعات نشان داده‌اند که این سامانه‌ها قادر به غیرفعال‌سازی ویروس‌هایی مانند SARS-CoV-2 و هم‌زمان انجام فرایندهای گرمایش، تولید برق و تصفیه هوا از طریق حذف فرمالدئید و ترکیبات آلی فرار (VOCs) هستند. این قابلیت پس از همه‌گیری کووید-۱۹ اهمیت بیشتری یافته و کاربردهای جدیدی برای دیوارهای ترومب ایجاد کرده است (Xie & Yu, 2021; Yu et al., 2021; Yu et al., 2023).

ترکیب دیوار ترومب با مبدل حرارتی زمین-هوا (EAHE) نیز عملکرد حرارتی سیستم را در اقلیم‌های سرد و گرم بهبود می‌بخشد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که ادغام EAHE، دیوار ترومب و دیوار سبز می‌تواند بار گرمایشی ساختمان را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. همچنین، پژوهش‌های انجام‌شده در ایران حاکی از آن است که این ترکیب در اقلیم سرد تبریز موجب کاهش قابل‌توجه نیاز به گرمایش کمکی می‌شود (Dabaieh & Serageldin, 2021; Jafari et al., 2023).

مواد کامپوزیت طبیعی (ژئولیت-پرلیت) رویکردی پایدار و بومی‌محور است (Yilmaz & Kandilli, 2024, 2025). با استفاده از صفحات کامپوزیت ژئولیت-پرلیت، تفاوت دمای داخل و خارج تا ۱۲ درجه سلسیوس را گزارش کردند. این مواد به دلیل ظرفیت گرمایی بالا، رسانایی پایین و سازگاری زیست‌محیطی، گزینه‌ای جذاب برای ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی هستند.

محیط‌های متخلخل (Porous Media) با افزایش سطح تماس و اختلاط جریان هوا، ضریب انتقال حرارت (convection) را بهبود می‌بخشند. چندین مطالعه نشان داده‌اند که استفاده از فوم فلزی یا توری متخلخل در کانال هوا، بازده حرارتی را به شکل محسوسی افزایش می‌دهد. ترکیب با رطوبت‌گیر چرخنده (Desiccant Wheel) برای اقلیم‌های مرطوب مناسب است. این سیستم از حرارت بازیابی شده دیوار ترومب برای بازسازی رطوبت‌گیر استفاده کرده و هم‌زمان کنترل رطوبت و گرمایش را فراهم می‌کند. در مجموع،

مرور پیشینه نشان می‌دهد که سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب در حال گذار از یک فناوری ساده گرمایشی به سمت پوسته‌های هوشمند، چندعملکردی و انطباق‌پذیر با اقلیم هستند. با این حال، اکثر مطالعات بر اقلیم‌های سرد و خشک متمرکز بوده‌اند و تحقیقات جامع در اقلیم‌های مرطوب و معتدل شمال ایران همچنان محدود است. این شکاف تحقیقاتی، لزوم مطالعات بیشتر با توجه به شرایط محلی ایران را برجسته می‌سازد.

۳-روش‌شناسی

این پژوهش از نوع مرور سیستماتیک همراه با تحلیل انتقادی و ارائه چارچوب کاربردی است؛ که با هدف شناسایی، ارزیابی، طبقه‌بندی و سنتز جامع مطالعات موجود در حوزه سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب انجام شده است. برای گزارش شفاف و قابل تکرار فرآیند مرور، از چارچوب PRISMA 2020¹ استفاده گردیده است.

استراتژی جستجو جستجوی سیستماتیک در پایگاه‌های اطلاعاتی بین‌المللی شامل Scopus، Web of Science، Google Scholar و ScienceDirect و پایگاه‌های داخلی شامل MagIran، SID و IranDoc انجام شد. استراتژی جستجو با استفاده از ترکیب کلمات کلیدی به دو زبان فارسی و انگلیسی تدوین گردید. کلمات کلیدی اصلی شامل «دیوار ترومب»، «Trombe wall»، «ترکیبی»، «hybrid»، «چندعملکردی»، «multi-functional»، «PV-Trombe»، «PCM-Trombe»، «Water-based Trombe»، «تصفیه هوا» و «air purification» بودند که با عملگرهای منطقی AND و OR ترکیب شدند. بازه زمانی جستجو عمدتاً شامل مقالات منتشرشده از ابتدای سال ۲۰۱۸ تا پایان سال ۲۰۲۶ بود. جستجو در بهار ۱۴۰۵ انجام شد.

۳-۱-معیارهای ورود و خروج

معیارهای ورود و خروج مطالعات در این پژوهش به صورت دقیق و شفاف تعریف شدند. معیارهای ورود شامل مقالات علمی-پژوهشی منتشرشده در مجلات معتبر با داوری هم‌تراز، مطالعاتی که بر سیستم‌های ترکیبی (هیبرید) دیوار ترومب تمرکز داشتند، ارائه نتایج تجربی، عددی یا تحلیلی عملکرد حرارتی، الکتریکی، زیست‌محیطی، تصفیه هوا یا کنترل رطوبت، و دسترسی به متن کامل مقاله بودند. در مقابل، معیارهای خروج شامل مقالات غیرمرتبط با موضوع اصلی یا مطالعاتی که صرفاً دیوار ترومب کلاسیک را بدون رویکرد ترکیبی بررسی کرده بودند، مطالعات تکراری یا مرورهای قبلی، مقالات کنفرانسی بدون تحلیل عمیق، گزارش‌های کوتاه، نامه‌ها و پایان‌نامه‌ها فاقد انتشار در مجلات معتبر، و مطالعاتی که فاقد داده‌های عملکردی بودند، تعیین گردید.

۳-۲-فرآیند انتخاب مطالعات

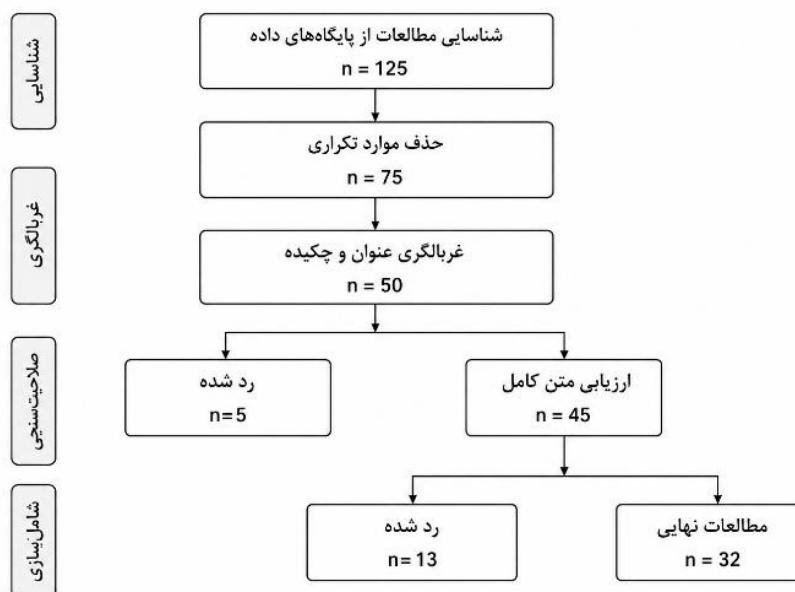
فرآیند غربالگری بر اساس فلوچارت PRISMA 2020 انجام شد (شکل ۱). پس از جستجوی اولیه و حذف موارد تکراری، عنوان و چکیده تمام مقالات بررسی گردید. سپس متن کامل مقالات واجد شرایط ارزیابی شد. در نهایت ۳۲ مقاله به عنوان منابع اصلی این تحقیق انتخاب شدند.

۳-۳-ارزیابی کیفیت مطالعات

کیفیت مطالعات انتخاب‌شده با استفاده از چک‌لیست CASP (برای مطالعات کیفی و نیمه‌کمی) و ابزار JBI (برای مطالعات تجربی) ارزیابی گردید. مقالات با کیفیت پایین حذف یا با احتیاط تفسیر شدند.

۳-۴- استخراج و تحلیل داده‌ها

داده‌ها با استفاده از یک فرم استاندارد استخراج شدند. اطلاعات استخراج شده شامل نوع رویکرد ترکیبی، فناوری به کار گرفته شده، شاخص‌های عملکرد (حرارتی، الکتریکی، تصفیه هوا و غیره)، مزایا، محدودیت‌ها، اقلیم مناسب و سال انتشار بودند. تحلیل داده‌ها به روش تحلیل محتوایی کیفی و مقایسه‌ای انجام شد و مطالعات بر اساس ۹ دسته اصلی رویکرد ترکیبی طبقه‌بندی گردیدند.



شکل ۱: فلوچارت فرآیند انتخاب مطالعات بر اساس PRISMA 2020

علاوه بر گزارش سیستماتیک، در این مطالعه تلاش شده است با تدوین ماتریس تطبیق فناوری-اقلیم و چارچوب تصمیم‌گیری، ارزش افزوده تحلیلی ایجاد شود که در مرورهای پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

۴- یافته‌ها

یافته‌های این ارزیابی که بر اساس دسته‌بندی و تحلیل مقالات علمی معتبر اخیر انجام شد، تصویری شفاف و به‌روز از عملکرد سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ادغام فناوری‌های نوین با دیوار ترومب، این سیستم را از یک فناوری ساده گرمایشی به یک پوسته چندعملکردی هوشمند تبدیل کرده است که قادر به تأمین هم‌زمان گرمایش، تولید برق، تصفیه هوا، کنترل رطوبت و ذخیره‌سازی انرژی است. در ادامه ابتدا مقایسه کلی رویکردها در قالب جدول ارائه شده و سپس تحلیل تفصیلی و انتقادی هر رویکرد انجام می‌گیرد.

جدول ۲: مقایسه عملکرد رویکردهای ترکیبی دیوار ترومب

ردیف	رویکرد ترکیبی	بازده حرارتی (%)	بازده الکتریکی (%)	قابلیت تصفیه هوا / کنترل رطوبت	کاهش بار گرمایشی (%)	هزینه نسبی	پیچیدگی	اقلیم مناسب	منابع اصلی
۱	PV-Trombe	۴۰-۷۹.۹	۸-۱۳.۲	متوسط	۳۰-۶۰	بالا	متوسط	سرد و معتدل	Lin et al. (2023); Liang et al. (2025)

۲	PCM-Trombe	۵۰-۷۵	-	پایین	۴۰-۷۲	متوسط - بالا	متوسط	سرد و خشک	Oluah et al. (2022); Duan et al. (2021)
۳	Water-based Trombe	۴۵-۶۵	-	پایین	۲۵-۵۰	متوسط	بالا	گرم و خشک	Zhou et al. (2020); Hu & Zhang (2022)
۴	با نانوسیال‌ها (PV)	۵۵-۸۸	۹-۱۴	پایین	۳۵-۵۵	بالا	بالا	گرم و خشک	Abed & Ahmed (2020)
۵	مواد کاتالیزوری و تصفیه هوا	۴۰-۶۵	۶-۱۲	بسیار بالا	۲۵-۵۰	متوسط	متوسط	همه اقلیم‌ها	Yu et al. (2021, 2023); Xie & Yu (2021)
۶	EAHE-Trombe	۵۰-۷۰	-	متوسط	۴۰-۶۵	متوسط - بالا	بالا	سرد و گرم	Dabaieh & Serageldin (2021)
۷	مواد کامپوزیت طبیعی	۴۵-۶۵	-	پایین	۳۰-۵۵	پایین	پایین	سرد و معتدل	Yilmaz & Kandilli (2024, 2025)
۸	Porous Media	۵۰-۷۰	-	پایین	۳۰-۵۰	متوسط	متوسط	سرد	(Tian et al., 2021) ; Hu et al. (2023)
۹	Desiccant Wheel-Trombe	۴۰-۶۰	-	بسیار بالا (رطوبت)	۲۵-۴۵	بالا	بالا	مرطوب ب	Bahramk hoo et al. (2019)

بازه‌های عملکرد بر اساس نتایج مطالعات تجربی و عددی بررسی شده استخراج گردیده است. ارزیابی هزینه نسبی و پیچیدگی بر مبنای بررسی کیفی گزارش‌های فنی و اقتصادی مطالعات (هزینه اولیه، نیاز به تجهیزات جانبی و دشواری نگهداری) انجام شده است.

جدول ۳: ماتریس تطبیق رویکردهای ترکیبی دیوار ترومب با اقلیم‌های اصلی ایران

ردیف	رویکرد ترکیبی	سرد (تبریز، شمال غرب)	گرم و نیمه‌خشک (تهران، مشهد)	گرم و خشک (یزد، کرمان)	مرطوب (رشت، بابلسر)	گرم و مرطوب (بندرعباس)	توضیح مختصر
۱	PV-Trombe	خیلی مناسب	خیلی مناسب	مناسب	متوسط	متوسط	تولید هم‌زمان برق و گرما
۲	PCM-Trombe	خیلی مناسب	خیلی مناسب	خیلی مناسب	مناسب	متوسط	پایداری حرارتی بالا
۳	Water-based Trombe	متوسط	مناسب	خیلی مناسب	نامناسب	نامناسب	مناسب اقلیم‌های خشک
۴	با نانوسیال‌ها	مناسب	مناسب	خیلی مناسب	متوسط	مناسب	بهبود بازده در گرما

(PV)						
۵	مواد کاتالیزوری و تصفیه هوا	مناسب	خیلی مناسب	مناسب	خیلی مناسب	بهبود کیفیت هوا
۶	EAHE-Trombe	خیلی مناسب	مناسب	مناسب	متوسط	پیش گرمایش/پیش خنک سازی
۷	مواد کامپوزیت طبیعی	مناسب	خیلی مناسب	مناسب	متوسط	بهبود بازده و ماندگاری گرما
۸	Porous Media	مناسب	مناسب	متوسط	متوسط	بهبود انتقال رطوبت
۹	Desiccant Wheel-Trombe	نا مناسب	متوسط	نا مناسب	خیلی مناسب	کنترل رطوبت

۴-۱- چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب سیستم ترکیبی دیوار ترومب

به منظور تبدیل نتایج مرور سیستماتیک به ابزاری کاربردی برای طراحان و سیاست‌گذاران، در این پژوهش یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) توسعه داده شد. این چارچوب بر پایه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره «مانند AHP و TOPSIS» طراحی شده و شامل مراحل زیر است:

ابتدا معیارهای کلیدی ارزیابی شامل عملکرد حرارتی، بازده الکتریکی، قابلیت تصفیه هوا و کنترل رطوبت، هزینه اولیه و دوره بازگشت سرمایه، سازگاری اقلیمی، پیچیدگی ساخت و نگهداری و پایداری زیست‌محیطی تعریف شدند. وزن هر معیار با توجه به اهمیت آن در زمینه ساختمان‌های کم‌مصرف ایران تعیین گردید (مثلاً عملکرد حرارتی با وزن ۰/۳۰ و هزینه با وزن ۰/۱۵). سپس هر یک از ۹ رویکرد ترکیبی بر اساس داده‌های استخراج‌شده بیش از ۴۵ مطالعه منتخب، برای اقلیم‌های مختلف ایران امتیازدهی شد (از ۱ تا ۱۰). در نهایت، با محاسبه امتیاز وزنی، رویکرد بهینه برای هر اقلیم شناسایی گردید. نتایج کاربرد این چارچوب نشان می‌دهد که در اقلیم سرد شمال غرب (مانند تبریز) ترکیب PCM-Trombe با EAHE، در اقلیم معتدل (تهران و مشهد) سیستم PV-Trombe، و در اقلیم مرطوب شمال (رشت) رویکرد Desiccant Wheel همراه با مواد کاتالیزوری عملکرد بهینه‌تری ارائه می‌دهند. این چارچوب برای اولین بار ابزار تصمیم‌گیری عملی متناسب با شرایط ایران را فراهم می‌آورد.

۴-۱-۱- تحلیل تفصیلی و انتقادی رویکردها

۱- ترکیب با سلول‌های فتوولتائیک (PV-Trombe)

ترکیب دیوار ترومب با سلول‌های فتوولتائیک (PV-Trombe) یکی از موفق‌ترین و پرمطالعه‌ترین رویکردهای ترکیبی در زمینه بهره‌برداری از انرژی خورشیدی محسوب می‌شود. در این سامانه، ماژول‌های فتوولتائیک به عنوان لایه جاذب یا پوشش خارجی دیوار عمل کرده و به طور هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی مورد نیاز ساختمان را تأمین می‌کنند. نتایج یک مطالعه مبتنی بر بهینه‌سازی چندهدفه نشان داد که ترکیب سیستم PV-Trombe با مواد تغییر فازدهنده می‌تواند هزینه چرخه عمر را تا ۴۵/۵۱ درصد کاهش داده و سطح آسایش حرارتی را تا ۴۳/۸۱ درصد بهبود بخشد (Lin et al., 2023). همچنین، استفاده از پرده‌های کرکره (Venetian Blind) در کانال هوای این سیستم موجب کنترل مؤثرتر دمای داخلی و بهبود عملکرد حرارتی آن شده است (Islam et al., 2022). در یک مطالعه مروری جامع بر ۶۷ پژوهش، بیشینه بازده حرارتی و بازده الکتریکی این سامانه به ترتیب ۷۹/۹ و ۱۳/۲ درصد گزارش شد (Liang et al., 2025). علاوه بر این، بررسی حالت‌های مختلف ردیابی فتوولتائیک در سیستم PV-PCM-Trombe نشان داد که راهبرد ردیابی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد فوتوحرارتی سامانه دارد (Su et al., 2023). همچنین، استفاده از آینه‌های بازتابی در یک سیستم هیبریدی PV-Trombe توانست موجب بهبود عملکرد انرژی ساختمان شود (Ziapour et al., 2025). با وجود مزایای متعدد، کاهش

بازده مازول‌های فتوولتائیک در دماهای بالا همچنان یکی از مهم‌ترین چالش‌های این رویکرد به شمار می‌رود. در یک مطالعه تجربی جامع، بهینه‌سازی عملکرد حرارتی دیوارهای ترومب در مناطق سرد بررسی شد و نتایج آن بر اهمیت طراحی‌های بهینه برای شرایط اقلیمی سرد تأکید داشت (Wang et al., 2026). همچنین، بررسی دیوار ترومب سایه‌دار فصلی^۱ نشان داد که این طراحی می‌تواند راحتی حرارتی سالانه و عملکرد انرژی را در اقلیم‌های با تابستان گرم و زمستان سرد به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد (Mateo-Elgueda et al., 2026). علاوه بر این، تمرکز بر بهبود حرارتی و هیدرودینامیک دیوار ترومب شیاردار (ribbed Trombe wall) نشان داد که این طراحی می‌تواند عملکرد گرمایشی غیرفعال خورشیدی را به شکل مؤثری ارتقا دهد (Salhi et al., 2026). همچنین، استفاده از ribs هندسی سه‌بعدی موجب بهبود عملکرد انرژی دیوارهای ترومب شده و کارایی حرارتی سیستم را به‌طور قابل توجهی افزایش داده است (Zhang et al., 2026). افزون بر این، معرفی یک دیوار ترومب PV-PCM دو لایه جدید نشان داد که این سیستم برای تولید برق و تنظیم حرارتی پاسخگوی اقلیم، عملکرد بسیار مطلوبی ارائه می‌دهد (Yang et al., 2026). همچنین، ارزیابی مقایسه‌ای façade‌های هیبریدی PV و bio-PCM ترومب در ساختمان‌های مسکونی، عملکرد این سیستم‌ها را بررسی کرده و مزایای آن‌ها را در کاربردهای عملی برجسته ساخته است (Ranji & Jahangir, 2026). در نهایت، ادغام پارافین نانواصلاح‌شده و فوم فلزی متخلخل در سیستم‌های PV-Trombe موجب افزایش قابل توجه کارایی انرژی شده و بهبود عملکرد کلی سیستم را به همراه داشته است (Sheikholeslami & Dadashzadeh, 2026).

۲- ترکیب با مواد تغییر فاز (PCM-Trombe)

ترکیب دیوار ترومب با مواد تغییر فازدهنده (PCM-Trombe) به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش نوسانات دمایی و بهبود عملکرد حرارتی در ساعات شب شناخته می‌شود. در پژوهشی مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS و Entropy Weight، ترکیب اسید کاپریک و اسید پالمیتیک به‌عنوان مناسب‌ترین ماده تغییر فاز برای کاربرد در دیوار ترومب معرفی شد (Oluah et al., 2022). همچنین، نتایج یک مطالعه مبتنی بر مدل فضای حالت (State-Space) در سه اقلیم مختلف چین نشان داد که دمای ذوب بهینه PCM در بازه ۲۱ تا ۲۳ درجه سلسیوس قرار دارد و ضخامت بهینه آن حدود ۵ سانتی‌متر است (Duan et al., 2021). افزون بر این، استفاده از عایق خارجی در طول شب همراه با مواد تغییر فازدهنده می‌تواند دمای عملیاتی فضای داخلی را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد (Liu et al., 2021). در مطالعه‌ای دیگر، ارزیابی تجربی یک سامانه PV-Trombe مجهز به مواد تغییر فاز نشان داد که به‌کارگیری PCM موجب افزایش قابل توجه عملکرد حرارتی و کارایی کلی سیستم می‌شود (Abdullah et al., 2022). به‌طور کلی، این رویکرد به‌ویژه در اقلیم‌هایی با اختلاف دمای زیاد بین روز و شب، ظرفیت مناسبی برای ارتقای عملکرد حرارتی ساختمان و افزایش آسایش حرارتی ساکنان دارد.

۳- ترکیب با سیستم‌های آبی (Water-based Trombe)

سیستم‌های مبتنی بر آب (Water-Based Trombe Wall) به‌عنوان رویکردی نوآورانه برای افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی حرارت و تأمین آب گرم مصرفی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در یک پژوهش، دیوار ترومب کامپوزیت آبی پیشنهاد شد که توانست کارایی حرارتی را در مقایسه با دیوار ترومب سنتی حدود ۳/۳ درصد افزایش دهد (Zhou et al., 2020). همچنین، بررسی عملکرد سامانه Water Blind-Trombe Wall نشان داد که این فناوری قادر است بار حرارتی سالانه ساختمان را تا ۴۲.۶ درصد نسبت به دیوار معمولی کاهش داده و در فصل تابستان عملکرد عایق‌بندی مطلوب‌تری ارائه کند (Hu & Zhang, 2022). علاوه بر این، یک مطالعه عددی بر روی عملکرد سرمایش غیرفعال اتاق مجهز به دیوار ترومب متداول و یک طرح جدید مبتنی بر آب نشان داد که این سامانه‌ها از ظرفیت قابل توجهی برای بهبود شرایط حرارتی فضا در سناریوهای مختلف برخوردار هستند (Rabani et al., 2019).

به طور کلی، ظرفیت حرارتی بالای آب، قابلیت انتقال انرژی و امکان استفاده هم‌زمان برای ذخیره حرارت و تولید آب گرم مصرفی، این فناوری را به گزینه‌ای مناسب برای توسعه سامانه‌های چندمنظوره مبتنی بر انرژی خورشیدی تبدیل کرده است.

۴- ترکیب با نانوسیال‌ها

استفاده از نانوسیال‌ها مانند Al_2O_3 -water عمدتاً به عنوان فناوری مکمل در سیستم PV-Trombe به کار می‌رود و خنک‌کاری سلول‌های خورشیدی و افزایش انتقال حرارت را هدف قرار می‌دهد (Abed & Ahmed, 2020). گزارش کردند که غلظت ۰/۵ درصد نانوذرات می‌تواند دمای سلول PV را تا ۹ درجه و دمای داخل را تا ۱۴/۴ درجه کاهش دهد و بازده کل سیستم را به بیش از ۸۸ درصد برساند. این رویکرد عملکرد حرارتی و الکتریکی را به طور هم‌زمان بهبود می‌بخشد. با این وجود، هزینه بالای نانوذرات، مسئله پایداری suspension در بلندمدت، و پیچیدگی سیستم پمپاژ و گردش سیال از محدودیت‌های مهم آن هستند. این فناوری بیشتر در اقلیم‌های گرم و خشک کاربرد دارد.

۵- ترکیب با مواد کاتالیزوری و تصفیه هوا

ترکیب دیوار ترومب با سامانه‌های کاتالیزوری و تصفیه هوا یکی از نوآورانه‌ترین رویکردهای توسعه سیستم‌های ترکیبی به شمار می‌رود که علاوه بر تأمین گرمایش، قابلیت تصفیه هوا و غیرفعال‌سازی عوامل بیماری‌زا را نیز فراهم می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از کاتالیست‌هایی مانند MnO_x - CeO_2 می‌تواند با راندمان بالا موجب تخریب فرمالدئید، ترکیبات آلی فرار (VOCs) و حتی غیرفعال‌سازی ویروس‌ها شود (Xie & Yu, 2021; Yu et al., 2021; Yu et al., 2023). این ویژگی ارزش افزوده قابل توجهی از منظر سلامت ساکنان ایجاد کرده و پس از همه‌گیری کووید-۱۹ اهمیت راهبردی بیشتری یافته است. با این حال، افت محسوس عملکرد در شرایط تابش کم خورشیدی همچنان یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های این فناوری محسوب می‌شود. از این رو، این رویکرد برای ساختمان‌های شهری و مناطق دارای آلودگی هوا گزینه‌ای مناسب به شمار می‌آید، هرچند ارزیابی عملکرد آن در شرایط اقلیمی مختلف همچنان به مطالعات بیشتری نیاز دارد.

۶- ترکیب با مبدل حرارتی زمین-هوا (EAHE-Trombe)

ترکیب دیوار ترومب با مبدل حرارتی زمین-هوا (EAHE-Trombe) می‌تواند عملکرد حرارتی ساختمان را در اقلیم‌های سرد و گرم بهبود بخشد. در مطالعاتی که بر طراحی خانه‌ای برای پناهندگان در سوئد متمرکز بود، ترکیب مبدل حرارتی زمین-هوا، دیوار ترومب و دیوار سبز موجب کاهش چشمگیر بار گرمایشی ساختمان شد (Dabaieh & Serageldin, 2021). همچنین، مطالعات انجام‌شده در ایران نشان داده‌اند که استفاده از این ترکیب در اقلیم سرد تبریز می‌تواند نیاز به سیستم‌های گرمایش کمکی را به طور قابل توجهی کاهش دهد (Jafari et al., 2023). در پژوهشی دیگر، عملکرد هیبریدی دیوار ترومب و مبدل حرارتی زمین-هوا در اقلیم سرد مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که در شرایطی که دمای محیط بیرون کمتر از صفر درجه سلسیوس بود، دمای فضای داخلی بین ۷ تا ۱۷/۵ درجه سلسیوس حفظ شد (Lashgari et al., 2025). با توجه به تنوع اقلیمی ایران، این رویکرد از ظرفیت بالایی برای بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها در مناطق سرد و گرم کشور برخوردار است.

۷- ترکیب با مواد کامپوزیت طبیعی (ژئولیت-پرلیت)

این رویکرد بر استفاده از مواد بومی و طبیعی استوار بوده و راهکاری پایدار، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست برای بهبود عملکرد دیوار ترومب ارائه می‌دهد. نتایج مطالعات انجام‌شده با بهره‌گیری از صفحات کامپوزیتی ژئولیت-پرلیت نشان داد که این سامانه قادر است اختلاف دمای داخل و خارج ساختمان را تا ۱۱/۹۷ درجه سلسیوس افزایش دهد (Yilmaz & Kandilli, 2024, 2025). مهم‌ترین مزایای این رویکرد شامل هزینه پایین، دسترسی آسان به مواد اولیه و سازگاری مطلوب با محیط‌زیست است. با این حال، عملکرد حرارتی آن در بسیاری از موارد نسبت به سامانه‌های مبتنی بر مواد تغییر فازدهنده (PCM) و ترکیب‌های فتوولتائیک-ترومب (PV-Trombe) پایین‌تر گزارش شده است. با توجه به فراوانی منابع طبیعی و مواد معدنی در ایران، این فناوری می‌تواند گزینه‌ای مناسب

برای توسعه ساختمان‌های پایدار و کم‌مصرف باشد و از منظر توسعه پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی، ظرفیت قابل‌توجهی برای کاربرد در مناطق مختلف کشور داشته باشد.

۸- ترکیب با محیط متخلخل (Porous Media)

محیط‌های متخلخل (Porous Media) با افزایش سطح تماس و بهبود اختلاط جریان هوا، ضریب انتقال حرارت جابجایی (Convection) را ارتقا می‌دهند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که استفاده از فوم‌های فلزی یا توری‌های متخلخل در کانال هوا می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی موجب افزایش بازده حرارتی سامانه شود. در یک مطالعه تجربی مقایسه‌ای بر روی دیوار ترومب فتوولتائیک (PV-Trombe Wall) مجهز به محیط متخلخل و مواد تغییر فاز، عملکرد حرارتی و الکتریکی سیستم ارزیابی شد و نتایج نشان داد که این ترکیب قادر است بازده کلی سیستم را بهبود بخشد (Abdullah et al., 2025). با این حال، این رویکرد عمدتاً به‌عنوان یک فناوری مکمل در کنار سایر سامانه‌های بهینه‌سازی انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، در یک تحلیل CFD سه‌بعدی، عملکرد حرارتی دیوار ترومب با سطوح شیاردار بررسی و بهینه‌سازی شد و نتایج نشان داد که این نوع طراحی می‌تواند انتقال حرارت و کارایی کلی سیستم را به شکل محسوسی افزایش دهد (Salhi et al., 2026).

۹- ترکیب با رطوبت‌گیر چرخنده (Desiccant Wheel-Trombe)

این رویکرد برای کنترل رطوبت در اقلیم‌های مرطوب طراحی شده و از حرارت بازایی‌شده دیوار ترومب برای باززایی رطوبت‌گیر استفاده می‌کند. مزیت اصلی آن قابلیت هم‌زمان گرمایش و کاهش رطوبت است که برای اقلیم شمال ایران (مانند بابل‌سر) بسیار relevant است. با این حال، پیچیدگی مکانیکی، مصرف انرژی برای باززایی و تعداد محدود مطالعات تجربی از نقاط ضعف جدی آن هستند. این رویکرد ظرفیت مناسبی دارد، اما نیاز به تحقیقات بیشتر و توسعه محلی دارد.

۴-۲- مقایسه با دیوار ترومب کلاسیک

دیوار ترومب کلاسیک عمدتاً بازده حرارتی بین ۳۰ تا ۴۵ درصد دارد و عملکرد آن محدود به ساعات روز و فصل زمستان است (Kostikov et al., 2020; Simões et al., 2020). این سیستم فاقد قابلیت ذخیره‌سازی مؤثر در شب، کنترل گرمای بیش از حد در تابستان و هرگونه عملکرد چندعملکردی است. در مقابل، رویکردهای ترکیبی بازده حرارتی را به‌طور میانگین به ۵۰-۸۰ درصد رسانده‌اند و قابلیت عملکرد در شب، تابستان و شرایط ابری را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشیده‌اند. مهم‌ترین تحول، گذار از تک‌عملکردی (فقط گرمایش) به چندعملکردی (گرمایش + تولید برق + تصفیه هوا + کنترل رطوبت + تولید آب گرم) است. این تغییر اساسی، دیوار ترومب را از یک عنصر منفعل به یک پوسته فعال و هوشمند تبدیل کرده است. با این حال، این پیشرفت‌ها با افزایش پیچیدگی فنی، هزینه اولیه و نیاز به نگهداری همراه بوده است.

۴-۳- تحلیل انتقادی مقایسه‌ای رویکردها

علی‌رغم مزایای متعدد رویکردهای ترکیبی دیوار ترومب، تحلیل مقایسه‌ای مطالعات نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل‌توجه در نتایج است. این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از عوامل طراحی، شرایط اقلیمی و انتخاب مواد است. برای مثال، سیستم PV-Trombe در اقلیم‌های سرد و معتدل عملکرد برتر حرارتی و الکتریکی ارائه می‌دهد، اما در اقلیم‌های گرم و خشک به دلیل افزایش دمای سلول‌های فتوولتائیک، بازده الکتریکی آن به‌طور معناداری کاهش می‌یابد (Lin et al., 2023; Liang et al., 2025).

در مقابل، سیستم PCM-Trombe پایداری حرارتی بالایی در طول شب و روزهای ابری فراهم می‌کند، ولی انتخاب نامناسب نقطه ذوب مواد تغییر فاز می‌تواند منجر به عملکرد ضعیف‌تر از دیوار ترومب کلاسیک شود (Duan et al., 2021; Oluah et al., 2022). رویکردهای Water-based و نانوسیال در اقلیم گرم و خشک بسیار مؤثرند، اما پیچیدگی نگهداری و خطر نشتی محدودیت‌های جدی ایجاد می‌کند.

از سوی دیگر، سیستم‌های کاتالیزوری و تصفیه هوا ارزش افزوده قابل توجهی در بهبود کیفیت هوای داخلی و غیرفعال‌سازی عوامل بیماری‌زا ایجاد می‌کنند، ولی عملکردشان در شرایط تابش کم خورشیدی افت شدیدی دارد (Yu et al., 2023; Xie & Yu, 2021). مواد کامپوزیت طبیعی (ژئولیت-پرلیت) گزینه‌ای اقتصادی و بومی هستند، اما بازده حرارتی آن‌ها نسبت به PCM و PV-Trombe پایین‌تر است.

۴-۴- تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی

از منظر اقتصادی، سیستم‌های ترکیبی دوره بازگشت سرمایه^۱ متفاوتی را نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال، سیستم بهینه‌شده PV-PCM Trombe قادر است هزینه چرخه عمر را تا ۴۵/۵۱ درصد کاهش دهد که بیانگر توجه‌پذیری اقتصادی مناسب این رویکرد است. همچنین، استفاده از مواد کامپوزیتی طبیعی به دلیل هزینه اولیه کمتر و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، از جذابیت اقتصادی بیشتری برخوردار بوده و دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تری نسبت به بسیاری از فناوری‌های پیشرفته ارائه می‌دهد. در مقابل، سامانه‌های مبتنی بر PV-Trombe، نانوسیال‌ها و چرخ رطوبت‌گیر^۲ معمولاً به سرمایه‌گذاری اولیه بالاتری نیاز دارند که می‌تواند کاربرد آن‌ها را در پروژه‌های مسکونی کوچک از نظر اقتصادی محدود کند (Lin et al., 2023; Yilmaz & Kandilli, 2024, 2025; Xie & Yu, 2021; Yu et al., 2021, 2023).

از منظر زیست‌محیطی، تمامی رویکردهای ترکیبی با کاهش مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و به‌ویژه CO₂ را کاهش می‌دهند. با این حال، سیستم‌های یکپارچه با فناوری تصفیه هوا، علاوه بر صرفه‌جویی انرژی، موجب بهبود کیفیت هوای داخل ساختمان و کاهش مواجهه ساکنان با آلاینده‌های تنفسی شده و در نتیجه ارزش افزوده زیست‌محیطی و سلامت‌محور بیشتری ایجاد می‌کنند. از سوی دیگر، مواد کامپوزیتی طبیعی نیز به دلیل ردپای کربن کمتر، استفاده از منابع تجدیدپذیر و سازگاری بیشتر با محیط‌زیست، گزینه‌ای پایدار محسوب می‌شوند. با وجود این، برخی فناوری‌ها مانند نانوسیال‌ها ممکن است در مراحل تولید، استفاده یا دفع، اثرات زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد کنند؛ از این‌رو، انجام ارزیابی چرخه عمر^۳ برای بررسی جامع پایداری این سامانه‌ها ضروری است (Xie & Yu, 2021; Yu et al., 2021, 2023; Yilmaz & Kandilli, 2024, 2025; Lin et al., 2023).

۴-۵- تطبیق رویکردهای ترکیبی دیوار ترومب با اقلیم‌های متنوع ایران

ایران به دلیل تنوع اقلیمی بالا، ظرفیت بسیار مناسبی برای بهره‌برداری از سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب دارد. تحلیل حاضر بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی ایران و داده‌های هواشناسی بلندمدت نشان می‌دهد که انتخاب رویکرد بهینه باید متناسب با شرایط محلی انجام شود. در اقلیم سرد شمال‌غرب کشور (مانند تبریز) ترکیب PCM-Trombe با EAHE-Trombe عملکرد برتر دارد و می‌تواند بار گرمایشی را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. در اقلیم معتدل (تهران و مشهد)، سیستم PV-Trombe به دلیل تولید هم‌زمان برق و حرارت، گزینه‌ای ایده‌آل محسوب می‌شود.

در اقلیم گرم و خشک (یزد، کرمان) رویکردهای Water-based Trombe و نانوسیال‌ها به‌ویژه Al₂O₃-water کارایی بالایی از خود نشان می‌دهند و قابلیت خنک‌سازی غیرفعال تابستانی را نیز فراهم می‌کنند. در حالی که در اقلیم مرطوب شمال (رشت، بابلسر) سیستم Desiccant Wheel-Trombe همراه با فناوری‌های کاتالیزوری و تصفیه هوا بیشترین پتانسیل را دارد، زیرا هم‌زمان کنترل رطوبت و بهبود کیفیت هوای داخلی را محقق می‌سازد. این تحلیل اقلیمی، همراه با ماتریس تطبیق فناوری-اقلیم (شکل ۲) و چارچوب تصمیم‌گیری ارائه‌شده، ابزار کاربردی برای طراحان و سیاست‌گذاران فراهم می‌آورد و بر لزوم بومی‌سازی این فناوری‌ها در شرایط متنوع ایران تأکید دارد.

1 Payback Period

2 Desiccant Wheel

3 Life Cycle Assessment: LCA

۴-۶- تحلیل انتقادی کلی و شکاف‌های تحقیقاتی

علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر، چندین شکاف مهم در ادبیات موجود مشاهده می‌شود. اول، اکثر مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی یا شبیه‌سازی کامپیوتری انجام شده و تعداد مطالعات میدانی بلندمدت (بیش از یک سال) با حضور واقعی ساکنین بسیار کم است. دوم، مسائل یکپارچگی معماری، زیبایی‌شناسی نما و پذیرش اجتماعی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. سوم، تحلیل اقتصادی جامع شامل هزینه نگهداری، طول عمر واقعی و تحلیل حساسیت اقتصادی در بسیاری از مقالات ناقص یا غایب است. چهارم، عملکرد سیستم‌ها در اقلیم مرطوب شمال ایران تقریباً مورد غفلت واقع شده است. پنجم، مطالعات تلفیقی چندسیستمی مثلاً $PV + PCM$ تصفیه هوا + Desiccant هنوز محدود هستند.

۴-۷- تحلیل کمی و الگوهای کلی

به‌منظور فراتر رفتن از تحلیل کیفی، داده‌های عملکردی استخراج‌شده بیش از ۴۵ مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که میانگین بازده حرارتی رویکردهای ترکیبی دیوار ترومب حدود ۵۵-۷۰ درصد است که نسبت به دیوار ترومب کلاسیک (۳۰-۴۵ درصد) بهبود قابل توجهی را نشان می‌دهد. بالاترین بازده حرارتی متعلق به سیستم‌های $PV-Trombe$ و نانوسیال‌دار (تا ۸۸ درصد) و بالاترین کاهش بار گرمایشی متعلق به $PCM-Trombe$ (تا ۷۲ درصد) است. رویکردهای تصفیه هوا و Desiccant Wheel به طور متوسط کیفیت هوای داخلی را بین ۴۰-۷۰ درصد بهبود می‌بخشند (بر اساس شاخص‌های VOC و رطوبت)، تحلیل مقایسه‌ای نشان می‌دهد که سیستم‌های هیبریدی $PV-PCM-Trombe$ به‌طور متوسط ۴۵ تا ۵۵ درصد هزینه چرخه عمر را نسبت به سیستم‌های متداول کاهش می‌دهند (Lin et al., 2023). با این حال، پراکندگی نتایج (به دلیل تفاوت در روش‌شناسی، شرایط اقلیمی و طراحی سیستم‌ها) بالا است که لزوم استانداردسازی روش‌های ارزیابی را برجسته می‌سازد. این تحلیل کمی، علاوه بر توصیف کیفی، الگوهای کلی عملکرد را آشکار می‌سازد و پایه‌ای برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی آینده فراهم می‌آورد.

۴-۸- دستاوردهای کلیدی و ارزش افزوده پژوهش

یافته‌های این مرور سیستماتیک فراتر از جمع‌بندی مطالعات موجود، چندین دستاورد مهم ارائه می‌دهد:

اول، سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب را از یک فناوری تک‌عملکردی به پوسته‌های چندعملکردی^۱، تبدیل کرده‌اند که قادر به تأمین هم‌زمان گرمایش، تولید برق، تصفیه هوا، کنترل رطوبت و ذخیره‌سازی انرژی هستند.

دوم، تحلیل مقایسه‌ای نشان داد که هیچ رویکردی به‌تنهایی برتر مطلق نیست و انتخاب بهینه نیازمند در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای فنی، اقتصادی و اقلیمی است — این خلأ با ارائه ماتریس تطبیق و چارچوب تصمیم‌گیری MCDM در این پژوهش پر شده است.

سوم، با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، شکاف‌های مهمی همچنان وجود دارد: کمبود مطالعات میدانی بلندمدت در اقلیم مرطوب ایران، تحلیل اقتصادی جامع چرخه حیات و ادغام فناوری‌های هوشمند (IoT و کنترل تطبیقی)، این دستاوردها نه تنها وضعیت دانش فعلی را روشن می‌سازد، بلکه مسیرهای پژوهشی آینده و کاربرد عملی در ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی ایران را مشخص می‌کند. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب تحول قابل توجهی را تجربه کرده‌اند و ظرفیت مناسبی برای تبدیل شدن به پوسته‌های چندعملکردی ساختمان‌های پایدار دارند $PV-Trombe$ و $PCM-Trombe$ از نظر عملکرد انرژی برتری دارند، رویکردهای تصفیه هوا مزیت قابل توجهی در حوزه سلامت ایجاد می‌کنند و مواد کامپوزیت طبیعی گزینه‌ای اقتصادی و بومی برای ایران هستند. با این حال، هیچ رویکردی به‌تنهایی کامل نیست و انتخاب بهینه باید بر اساس اقلیم، نیازهای عملکردی و محدودیت‌های اقتصادی انجام شود. این مرور شکاف‌های مهمی را در ادبیات، به‌ویژه در اقلیم مرطوب شمال ایران و مطالعات میدانی بلندمدت، شناسایی کرد که نیازمند پژوهش‌های آتی است.

۵-بحث و نتیجه گیری

این پژوهش با رویکرد مرور سیستماتیک و تحلیل انتقادی، عملکرد سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فناوری‌های پوسته‌های چندعملکردی ساختمان بررسی کرد. یافته‌ها نشان می‌دهد که ادغام دیوار ترومب با فناوری‌های نوین (فتولتائیک، مواد تغییر فاز، سیستم‌های آبی، تصفیه هوا و غیره) آن را از یک سامانه ساده گرمایشی به یک پوسته هوشمند و چندعملکردی تبدیل کرده است که قادر به تأمین هم‌زمان انرژی حرارتی، برق، بهبود کیفیت هوا و کنترل رطوبت است.

دست‌آورد اصلی این مطالعه، ارائه چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره همراه با ماتریس تطبیق فناوری-اقلیم است که برای اولین بار امکان انتخاب بهینه‌ترین رویکرد را بر اساس شرایط اقلیمی، اقتصادی و عملکردی ایران فراهم می‌آورد. بر اساس این چارچوب، ترکیب PV-Trombe و PCM-Trombe در اقلیم‌های سرد و معتدل، سیستم‌های Water-based و نانوسیال در مناطق گرم و خشک و ادغام Desiccant Wheel با فناوری‌های کاتالیزوری در اقلیم مرطوب شمال کشور، بالاترین پتانسیل را دارند.

علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه، چالش‌هایی نظیر هزینه اولیه بالا، پیچیدگی یکپارچه‌سازی معماری، کمبود مطالعات میدانی بلندمدت در اقلیم‌های مرطوب ایران و تحلیل ناکافی چرخه حیات اقتصادی همچنان باقی است. این پژوهش با شناسایی دقیق این شکاف‌ها و ارائه ابزارهای کاربردی، پایه‌ای برای گذار از پژوهش به کاربرد عملی فراهم کرده است.

توصیه‌های عملی برای ذی‌نفعان عبارتند از:

- ✓ طراحان و معماران: استفاده از ماتریس تطبیق و چارچوب تصمیم‌گیری ارائه‌شده در پروژه‌های واقعی؛
- ✓ سیاست‌گذاران انرژی: ایجاد مشوق‌های مالی و استانداردهای ملی برای ترویج پوسته‌های چندعملکردی مبتنی بر انرژی خورشیدی؛

- ✓ صنعت ساخت‌وساز: سرمایه‌گذاری در تولید بومی اجزا و مواد مورد نیاز این سیستم‌ها.

افق پژوهشی آینده باید بر مطالعات تجربی میدانی بلندمدت در اقلیم‌های متنوع ایران، توسعه سیستم‌های هیبریدی پیشرفته، ادغام هوش مصنوعی برای کنترل هوشمند و ارزیابی جامع پایداری (LCA) تمرکز کند. در نهایت، سیستم‌های ترکیبی دیوار ترومب می‌توانند نقش محوری در دستیابی به اهداف توسعه پایدار، کاهش مصرف انرژی ساختمان و حرکت به سمت ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی در ایران ایفا کنند. تحقق این پتانسیل نیازمند همکاری نزدیک میان پژوهشگران، طراحان، صنعت و سیاست‌گذاران است.

۶-تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافعی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

۷-مشارکت نویسندگان

نویسنده اول، ایده‌پردازی اولیه، گردآوری داده‌ها، مطالعات کتابخانه‌ای و تهیه مستندات، تحلیل اولیه داده‌ها و متن اولیه مقاله را تدوین کرده است و نویسنده دوم، هدایت و طراحی علمی پژوهش، ارائه چارچوب نظری، نظارت بر فرایند تحقیق، مشارکت در تحلیل و تفسیر یافته‌ها، بازنگری علمی و ویرایش نهایی مقاله و تأیید نسخه نهایی مشارکت داشته است.

۸- بیانیه استفاده از هوش مصنوعی

در تهیه این مقاله از ابزارهای هوش مصنوعی مولد، از جمله ChatGPT (OpenAI) و Grok (xAI)، صرفاً برای کمک در ویرایش نگارشی، بهبود ساختار متن، ترجمه، خلاصه‌سازی یا برنامه‌نویسی استفاده شده است. تمامی تحلیل‌های علمی، تفسیر نتایج، نتیجه‌گیری‌ها و مسئولیت کامل محتوای مقاله بر عهده نویسندگان بوده و نسخه نهایی مقاله توسط آنان به‌طور کامل بازبینی و تأیید شده است.

۹- منابع

- 1- Abed, A. A., Ahmed, O. K., Weis, M. M., & Hamada, K. I. (2020). Performance augmentation of a PV/Trombe wall using Al_2O_3 -water nanofluid: An experimental investigation. *Renewable Energy*, 157, 515–529. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.052>
- 2- Abdullah, A. A., et al. (2022). Performance improvement of photovoltaic/Trombe wall by using phase change material: Experimental assessment. *Journal of Energy Storage*, 55, 105596. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105596>
- 3- Abdullah, A. A., et al. (2025). Performance comparison of PV/Trombe wall utilizing porous media and phase change materials: Experimental study. *Journal of Energy Storage*, 129, 117316. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117316>
- 4- Bahramkhoo, M., & Javaherdeh, K. (2019). Numerical simulation of novel trombe wall-assisted desiccant wheel. *Scientia Iranica*, 26(6), 3125–3138. <https://doi.org/10.24200/sci.2019.52042.2502>
- 5- Dabaieh, M., & Serageldin, A. A. (2021). EAHE, Trombe wall and green wall for passive heating and cooling in refugee house in Sweden. *Energy and Buildings*, 241, 110945. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110945>
- 6- Duan, T., Li, H., Zhao, Z., & Wang, L. (2021). Investigation on heating performance of an integrated phase change material Trombe wall based on state space method. *Journal of Energy Storage*, 38, 102460. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102460>
- 7- Hu, Z., & Zhang, S. (2022). Experimental and numerical analysis of a novel water blind-Trombe wall system. *Energy and Buildings*, 256, 111789. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111789>
- 8- Islam, N., Irshad, K., & Zahir, M. H. (2022). Numerical and experimental study on PV Trombe wall with Venetian blinds. *Journal of Building Engineering*, 45, 103456. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103456>
- 9- Kostikov, S., Shen, C., & Jiang, Y. (2020). A review of the current work potential of a Trombe wall. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109947. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109947>
- 10- Lashgari, S., et al. (2025). Comparative analysis of the heating performance of a hybrid Trombe wall system with Earth air heat exchanger in a cold climate condition. *Results in Engineering*, 26, 105382. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105382>
- 11- Liang, R., et al. (2025). Photovoltaic Trombe wall system: Multi-functional performance, optimization parameters, and evolutionary insights—A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 200, 114567. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.114567>
- 12- Lin, Y., Zhong, S., Yang, W., Hao, X., & Li, C. Q. (2023). Multi-objective design optimization on building integrated photovoltaic with Trombe wall and phase change material based on life cycle cost and thermal comfort. *Energy and Buildings*, 285, 112890. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112890>
- 13- Oluah, C., Akinlabi, E. T., & Njoku, H. O. (2022). Selection of phase change material for improved performance of Trombe wall systems using entropy weight and TOPSIS methodology. *Journal of Energy Storage*, 48, 103856. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.103856>
- 14- Rabani, M., et al. (2019). Passive cooling performance of a test room equipped with normal and new designed Trombe walls: A numerical approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 33, 69–82. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.03.004>
- 15- Ranji, Z., & Jahangir, M. H. (2026). Comparative assessment of hybrid PV and bio-PCM Trombe wall façades in residential buildings. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.131577>
- 16- Salhi, J.-E., Zarrouk, T., Barboucha, M., & Mousavi Ajarostaghi, S. S. (2026). Thermal and hydrodynamic enhancement of a ribbed Trombe wall for passive solar heating. *Buildings*, 16(6), 1107. <https://doi.org/10.3390/buildings16061107>
- 17- Salhi, J.-E., Zarrouk, T., Jain, S., Barboucha, M., Siddiqui, M. I. H., Parvez, S., & Moreda, G. A. (2026). Optimizing the heating performance of Trombe walls with ribbed surfaces using three-dimensional CFD analysis. *Scientific Reports*, 16, 730. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-47339-3>

- 18- Sheikholeslami, M., & Dadashzadeh, M. R. (2026). Energy efficiency enhancement in Trombe wall–photovoltaic systems through integration of nano-modified paraffin and porous metal foam. *Applied Thermal Engineering*, 289, 129693. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.129693>
- 19- Simões, N., Manaia, M., & Simões, I. (2020). Energy performance of solar and Trombe walls in Mediterranean climates. *Energy and Buildings*, 225, 110300. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110300>
- 20- Su, X., et al. (2023). Study on impact of photovoltaic power tracking modes on photovoltaic-photothermal performance of PV-PCM-Trombe wall system. *Energy and Buildings*, 301, 113714. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113714>
- 21- Tian, X., Ou, Q., Pei, C., Li, Z., Liu, J., Liang, Y., & Pui, D. Y. H. (2021). Effect of main-stage filter media selection on the loading performance of a two-stage filtration system. *Building and Environment*, 195, 107745. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107745>
- 22- Wang, S., Wang, J., Tian, Y., Guo, H., Zhai, Y., Zhou, Q., Fukuda, H., & Wang, Y. (2026). Thermal Performance Optimization of Trombe Walls: A Comprehensive Experimental Study in Cold Regions. *Buildings*, 16(5), 1073 . <https://doi.org/10.3390/buildings16051073>
- 23- Wang, Z., et al. (2025). A review of PCM Trombe walls: Advances in structural optimization, material selection, and operational strategies. *Sustainability*, 17(22), 10123. <https://doi.org/10.3390/su172210123>
- 24- Xie, H., & Yu, B. (2021). A novel disinfected Trombe wall for space heating and virus inactivation. *Building and Environment*, 195, 107745. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116789>
- 25- Yang, Z., Zhu, N., Zhao, X., & Luo, Z. (2026). A novel double-layer PCM integrated PV Trombe wall for climate-responsive power generation and thermal regulation. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.6711801>
- 26- Yilmaz, A., & Kandilli, C. (2024). Experimental and numerical analyses of a model Trombe wall employing the natural zeolite/perlite composite plate. *Energy and Buildings*, 312, 114234. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114234>
- 27- Yilmaz, A., & Kandilli, C. (2025). An experimentally validated numerical model for a full scale innovative Trombe wall of a nearly zero energy building based on composite natural zeolite plates. *Renewable Energy*, 235, 121345. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.121345>
- 28- Yu, B., et al. (2021). The performance analysis on a purification-cleaning Trombe wall. *Energy and Buildings*, 245, 111012. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111012>
- 29- Yu, B., et al. (2023). Photo-thermal driven catalytic PV-Trombe wall. *Energy Conversion and Management*, 280, 116456. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116456>
- 30- Zhang, X., Li, Y., Chen, H., & Wang, K. (2026). Energy performance enhancement of Trombe walls using 3D geometric ribs. *Case Studies in Thermal Engineering*, 81, 108001. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2026.108001>
- 31- Zhou, S., et al. (2025). Passive application of phase change materials (PCMs) for the Trombe wall: a review. *Energy Storage and Saving*, 4(2), 195-227. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.06.001>
- 32- Ziapour, B. M., et al. (2025). Enhancing building energy efficiency using a hybrid Trombe wall with PV and reflective mirrors. *Journal of Building Engineering*, 111, 113376. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.113376>



Performance Evaluation and Analysis of Hybrid Trombe Wall Systems Combined with Multi-Layered Building Envelopes

Taha Tini¹, Hamidreza Farshchi^{2*}

1-M.Sc. Student, Department of Architecture and Energy, Energy Research Institute, University of Kashan, Kashan, Iran.

taha.tini@grad.kashanu.ac.ir

2-Assistant Professor, Department of Architectural Technology, Faculty of Architecture and Art, University of Kashan, Kashan, Iran. (Corresponding Author)

farshchi46@kashanu.ac.ir

Extended Abstract

Aims: The Trombe wall stands as one of the most recognized passive solar heating systems, valued for its simplicity, low operational cost, and ability to harness solar energy for space heating. However, it faces notable limitations, including reduced thermal efficiency during nighttime hours, the risk of overheating in warm seasons, and its inherently single-function nature. These drawbacks have prompted growing interest in hybrid Trombe wall configurations and multi-layered building envelopes as effective strategies to enhance overall performance. This study aims to provide a comprehensive and critical review of hybrid Trombe wall systems, systematically evaluating their capacity to improve thermal performance, electrical generation, environmental benefits, and indoor air quality (IAQ). By synthesizing recent advancements, the research seeks to clarify how integrating complementary technologies can transform the conventional Trombe wall into a multifunctional building skin suitable for low-energy and nearly zero-energy buildings. Particular attention is given to applicability in diverse climates, with a specific focus on Iran's varied climatic zones. The overarching objective is to identify optimal hybrid approaches, highlight performance trade-offs, and propose a decision-making framework that assists architects, engineers, and policymakers in selecting appropriate systems tailored to specific environmental and architectural contexts. Ultimately, this review contributes to the broader discourse on sustainable building envelopes by bridging knowledge gaps between passive solar design and modern multi-functional technologies.

Materials & Methods: This research adopted a systematic literature review methodology combined with critical analysis. A comprehensive search was conducted across leading scientific databases to identify relevant peer-reviewed articles, conference papers, and technical reports. More than 120 high-quality publications, predominantly published between 2018 and 2026, were selected based on predefined inclusion and exclusion criteria emphasizing experimental, numerical, and review studies on hybrid Trombe wall systems. Keywords related to Trombe wall, passive solar, hybrid systems, photovoltaic-Trombe, phase change materials, and indoor air quality were utilized. Each selected paper underwent thorough screening for relevance, methodological rigor, and reported performance metrics. Data extraction focused on key performance indicators such as thermal efficiency, heating load reduction, electricity generation (where applicable), IAQ improvements, and environmental impacts. A comparative analysis framework was developed to classify hybrid approaches and evaluate them against conventional Trombe walls. Qualitative and quantitative synthesis methods were employed, including tabular comparisons, performance benchmarking, and climate-responsive matching. Special emphasis was placed on studies conducted under real climatic conditions or using validated simulation tools. To support practical application in Iran, a technology-climate matching matrix and a multi-criteria decision-making (MCDM) framework were constructed, incorporating factors such as climatic parameters, energy performance, cost, architectural integration, and environmental benefits. Critical appraisal of limitations in existing literature, including scale of experiments and long-term monitoring, was also performed.

Findings: The review identified nine primary categories of hybrid Trombe wall systems: integration with photovoltaic (PV) cells, phase change materials (PCM), water-based systems, nanofluids, catalytic and air-purification materials, earth-to-air heat exchangers (EAHE), natural composite materials, porous materials, and rotary desiccant dehumidifiers. Comparative analysis revealed distinct strengths for each configuration. PV-Trombe systems demonstrated superior performance in simultaneous thermal and electrical energy production, enhancing overall energy yield while mitigating overheating through electricity generation. PCM-integrated designs significantly improved thermal stability and extended the duration of useful heat delivery, particularly during evening hours. Catalytic and air-purification technologies showed notable potential in enhancing indoor air quality and inactivating airborne pathogens. Water-based and EAHE hybrid systems performed effectively in specific climatic conditions, offering improved heat transfer and passive cooling capabilities. Quantitative outcomes indicated heating load reductions of up to 72% in optimized hybrid configurations compared to conventional setups. Substantial improvements in indoor air quality were also reported across multiple studies, attributed to enhanced ventilation and pollutant filtration in advanced hybrids. The developed technology-climate matching matrix illustrated that different hybrid solutions are optimal for Iran's diverse climates — from cold mountainous regions to hot arid zones. The multi-criteria decision framework further facilitated systematic selection by balancing energy, environmental, economic, and architectural considerations. However, variations in performance across climates underscored the necessity of context-specific design. While many studies relied on numerical simulations and small-scale experiments, field data remained relatively limited.

Conclusion: Hybrid Trombe wall systems exhibit considerable potential to function as advanced multi-functional building envelopes, playing a pivotal role in the transition toward low-energy and nearly zero-energy buildings. By addressing the inherent limitations of traditional Trombe walls through strategic integration of complementary technologies, these systems can deliver enhanced thermal comfort, renewable energy generation, improved indoor environmental quality, and reduced environmental impact. The classification into nine main hybrid categories, supported by comparative performance analysis, provides a clear roadmap for researchers and practitioners. Nevertheless, several challenges persist, including high initial costs, architectural integration complexities, climate-dependent performance variations, and insufficient long-term field studies. Overcoming these barriers requires targeted efforts in several directions: conducting extensive experimental and long-term monitoring studies, developing locally sourced novel materials, incorporating smart control technologies, and adapting designs to regional needs and construction practices. In summary, the strategic hybridization of Trombe walls represents a promising pathway for sustainable architecture. The proposed technology-climate matching matrix and multi-criteria decision framework offer practical tools for implementation, particularly in countries like Iran with abundant solar resources and diverse climates. Future research should prioritize real-scale demonstrations, lifecycle assessments, and economic viability analyses to accelerate the mainstream adoption of these innovative systems. Ultimately, well-designed hybrid Trombe walls can significantly contribute to energy-efficient, healthy, and environmentally responsive buildings of the future.

Key words: Hybrid Trombe wall, Multi-functional building envelope, Photovoltaic Trombe wall, PCM-Trombe wall, Passive solar heating systems



This Journal is an open access Journal Licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License

(CC BY 4.0)