

بررسی عملکرد گرمایشی و سرمایشی انواع دیوار ترومب و کاربرد آن در ساختمان ها با رویکرد کاهش مصرف انرژی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸

کد مقاله: ۸۲۶۰۲

سهیلا عبدی زاده^{۱*}، فرهاد احمدنژاد^۲

چکیده

بخش عمده‌ای از کل انرژی اولیه توسط ساختمان‌ها در گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع استفاده می‌شود. سیستم‌های گرمایش و سرمایش معمول علاوه بر هزینه اجرایی، بر نیاز انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن مؤثرند. در این راستا، دیوارهای ترومب به دلیل توانایی بالقوه آن‌ها برای مقابله با بحران زیست‌محیطی و انرژی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مطالعه، با هدف بررسی انواع دیوار ترومب به لحاظ عملکرد گرمایشی و سرمایشی و همچنین عوامل مؤثر در طراحی دیوار ترومب همچون پارامترهای طراحی دیوار ترومب (خصوصیات شیشه، مساحت دیوار ترومب، ویژگی‌های دیوار حجیم، دستگاه‌های سایه‌انداز، عمق کانال)، پارامترهای ساختمان (مصالح ساختمانی، تأثیرات پنجره) و پارامترهای سایت (تابش خورشیدی و جهت‌گیری، سرعت و جهت باد) با توجه به مزایا و معایب هر کدام، انجام شد. در ادامه، شاخص‌های ارزیابی مختلف از دیدگاه انرژی، محیط‌زیست و اقتصادی ارائه شد تا مرجعی برای استفاده طراحان در زمینه طراحی غیرفعال باشد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که دیوارهای ترومب در حفاظت از محیط‌زیست و انرژی، دارای عملکرد مطلوبی هستند که به تفصیل در بخش نتیجه‌گیری ارائه شده است.

واژگان کلیدی: دیوار ترومب، راهکار غیرفعال، صرفه‌جویی انرژی، سرمایش و گرمایش، راندمان دیوار ترومب.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد معماری و انرژی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول)

so.abdizadeh@tabriziau.ac.ir

۲- استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران
* این مقاله مستخرج از پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد سهیلا عبدی‌زاده با عنوان "طراحی خوابگاه دانشجویی دانشگاه هنر اسلامی تبریز با رویکرد تأثیرگذاری راهکارهای غیرفعال بر میزان مصرف انرژی" و با راهنمایی آقای دکتر فرهاد احمدنژاد در گروه معماری و شهرسازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز انجام شده است.

به موازات رشد جمعیت جهان، مصرف انرژی و مسائل زیست‌محیطی امروزه یک نگرانی فزاینده و جهانی است. طبق اعلام شورای جهانی انرژی، تقاضای انرژی اولیه تا سال ۲۰۵۰ دوبرابر خواهد شد. بخش ساختمان بیشترین مصرف انرژی را در جهان دارد. بخش عمده‌ای از این انرژی برای گرمایش، تهویه و سیستم‌های تهویه مطبوع استفاده می‌شود که با تنظیم رطوبت و دما، آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل خانه را فراهم می‌کنند. برای همین، امروزه انتظار می‌رود ساختمان‌ها، به طراحی کارآمد انرژی و سازگار با محیط‌زیست دست یابند و از انرژی‌های تجدیدپذیر (به‌ویژه انرژی خورشیدی) به‌جای انرژی‌های فسیلی برای تأمین گرمایش و سرمایش، استفاده کنند [Abbassi et al, 2014; World Energy Council, 2013]. در این راستا، ادغام سیستم‌های خورشیدی غیرفعال در ساختمان‌ها یکی از راهکارهای توسعه پایدار است که به طور فزاینده‌ای استفاده از آن‌ها توسط مقررات بین‌المللی توصیه می‌شود. تکنیک‌های غیرفعال خورشیدی قادر به کاهش ۲۵ درصدی تقاضای گرمایش سالانه هستند. از بین راهکارهای مختلف مانند دودکش‌های خورشیدی، بام‌های خورشیدی [Li et al, 2022] و غیره، دیوارهای ترومب که با عنوان دیوار ذخیره‌ساز حرارتی و دیوارهای گرمایش خورشیدی نیز شناخته می‌شوند، قابلیت هماهنگی ارتباط بین انسان و محیط طبیعی را داشته و به دلیل مزایایی همچون ساختار ساده، راندمان بالا، هزینه‌های روزمره صفر و غیره بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین، برای سازگاری با محیط‌زیست استفاده از دیوار ترومب در ساختمان می‌تواند مصرف انرژی ساختمان را تا ۳۰ درصد کاهش دهد. به‌عنوان مثال، مطالعه‌ای با ادغام دیوار ترومب در ساختمان، به صرفه‌جویی در انرژی گرمایشی به میزان ۱۶/۳۶ درصد دست یافت [Sady et al, 2023; Briga-Sá et al, 2014].

هرچند مطالعات در رابطه با دیوار ترومب گسترده است، اما اغلب آن‌ها صرفاً به پارامترهای محدودی در طراحی و کاربرد دیوار ترومب تمرکز داشته‌اند؛ لذا مطالعه حاضر، ضمن آشنایی با انواع ترومب و مزایا و معایب هر یک از آن‌ها، به طور جامعی عوامل مؤثر در طراحی دیوار ترومب را همچون پارامترهای طراحی دیوار ترومب (خصوصیات شیشه، مساحت دیوار ترومب، ویژگی‌های دیوار حجیم، دستگاه‌های سایه‌انداز، عمق کانال)، پارامترهای ساختمان (مصالح ساختمانی، تأثیرات پنجره) و پارامترهای سایت (تابش خورشیدی و جهت‌گیری، سرعت و جهت باد) به روش توصیفی و با استناد بر مطالعات کتابخانه‌ای مورد بررسی قرار داد.

۲- مبانی نظری

۲-۱- انواع دیوار ترومب

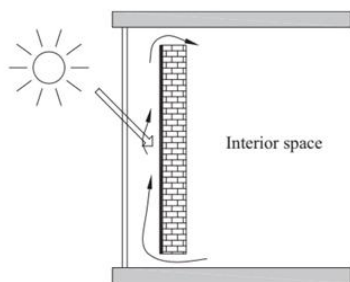
با گذشت زمان، تغییراتی در دیوارهای ترومب به‌منظور بهبود کارایی آن‌ها انجام شده است. دیوارهای ترومب بر اساس عملکردهای اصلی آن‌ها، به دو نوع دیوار ترومب مبتنی بر گرمایش^۱ و دیوار ترومب مبتنی بر سرمایش^۲ طبقه‌بندی می‌شوند. به‌طور کلی، هفت ساختار مختلف از انواع دیوار ترومب مبتنی بر گرمایش شامل دیوار ترومب کلاسیک^۳ (CTW)، دیوار ترومب کامپوزیت یا دیوار ترومب-میشل^۴ (TMW)، دیوار ترومب آبی^۵ (WTW)، دیوار ترومب زیگزاگی^۶ (ZTW)، دیوار ترومب خورشیدی شفاف^۷ (STW)، دیوار ترومب سیال^۸ (FTW) و دیوار ترومب فتوولتائیک^۹ (PVTW) می‌شوند. همچنین، سه ساختار مختلف از انواع دیوار ترومب مبتنی بر سرمایش شامل دیوار سرمایش تخییری سرامیکی^{۱۰} (CECW)، دیوار ترومب با طراحی جدید در ترکیب با دودکش خورشیدی^{۱۱} (SCTW) و دیوار ترومب کلاسیک با دیوار ترومب فتوولتائیک برای حالت عملکرد سرمایشی، می‌شود [Wang et al, 2020].

۲-۱-۱- انواع دیوار ترومب مبتنی بر گرمایش

مفهوم دیوار ترومب در قرن ۱۹ توسط مورس^{۱۲} ثبت و توسط فلیکس ترومب و ژاک میشل^{۱۳} در سال ۱۹۵۷ توسعه و رواج یافت. در سال ۱۹۶۷ نیز اولین خانه با استفاده از دیوار ترومب در فرانسه ساخته شد. این دیوار با ساختاری ساده، برای انباشت گرمای خورشیدی و تأمین گرمایش فضای داخلی طراحی شده است که به دیوار ترومب کلاسیک یا استاندارد معروف است. سطح

- 1- Heating-based type of Trombe wall
- 2- Cooling-based type of Trombe wall
- 3- Classic Trombe wall (CTW)
- 4- Composite Trombe wall or Trombe-Michel wall (TMW)
- 5- Water Trombe wall (WTW)
- 6- Zigzag Trombe wall (ZTW)
- 7- Solar trans-wall (STW)
- 8- Fluidized Trombe wall (FTW)
- 9- Photovoltaic Trombe wall (PVTW)
- 10- Ceramic evaporative cooling wall (CECW)
- 11- Trombe wall in combination with solar chimney (SCTW)
- 12- Morse
- 13- Félix Trombe and Jacques Michel

بیرونی دیوار ترومب برای افزایش میزان جذب، به رنگ تیره بوده و دارای شیشه در بیرونی‌ترین لایه آن است. یک فاصله هوایی، دیوار را از شیشه جدا می‌کند (شکل ۱).



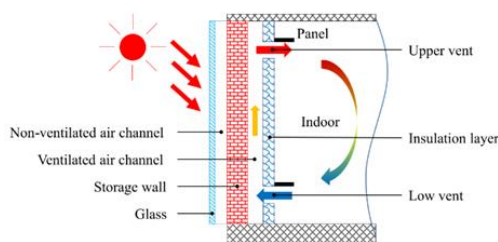
شکل ۱- دیوار ترومب کلاسیک برای گرمایش در زمستان [Dimassi and Dehmani, 2017].

دیوار ترومب کلاسیک تشعشعات خورشیدی ایجاد شده ناشی از اثر گلخانه‌ای را توسط دیوار حجیم (مصالح با ظرفیت حرارتی بالا) جذب و ذخیره می‌کند. بخشی از این حرارت، از طریق فرایند رسانش به داخل اتاق منتقل می‌شود. در همین حال، هوای سرد بیرونی از طریق دریچه پایینی دیوار وارد فضای مابین دیوار و شیشه شده، توسط دیوار گرم و از طریق اثر بویانسی به سمت بالا جریان می‌یابد. این هوای گرم شده از طریق دریچه بالایی دیوار مجدداً به داخل ساختمان باز می‌گردد.

بدین ترتیب، تبادل حرارت بین دیوار ترومب با محیط داخلی از طریق تابش و تهویه انجام شده توسط دریچه‌ها صورت می‌گیرد. از معایب این نوع دیوار ترومب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. پدیده ترمو سیفون معکوس: کاهش دمای اتاق در نتیجه ورود مجدد هوای سرد از طریق دریچه پایینی به داخل، به دلیل سردتر بودن دیوار خازن نسبت لایه هوای تهویه شده (به‌ویژه در طی شب و فصول سرد).
۲. ارزش زیبایی‌شناختی پایین [Dimassi and Dehmani, 2017; Wang et al, 2020].

نوع دیگری از دیوار ترومب مبتنی بر گرمایش با عنوان دیوار ترومب کامپوزیت یا دیوار ترومب میشل برای افزایش مقاومت حرارتی دیوار ترومب کلاسیک و کنترل ملزومات آن معرفی و توسعه یافته است. این نوع دیوار از چندین لایه مختلف شامل یک لایه شفاف بیرونی، یک لایه هوای بسته، یک دیوار خازن، یک لایه هوای تهویه شده و در نهایت یک لایه عایق حرارتی، تشکیل شده است (شکل ۲).



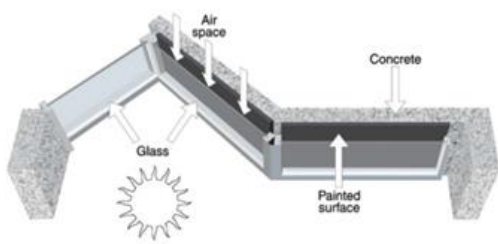
شکل ۲- دیوار ترومب کامپوزیت [Wang et al, 2020]

لایه شفاف بیرونی، تابش خورشیدی دریافت شده را به سمت داخل گسیل کرده و باعث می‌شود دیوار خازن بخشی از این حرارت را جذب کرده و در اثر پدیده گلخانه‌ای گرم شود. این انرژی حرارتی قادر است از طریق رسانش توسط دیوار خازن از سمت خارج به داخل منتقل شود. در ادامه، این انرژی حرارتی می‌تواند درحالی‌که از پدیده جریان ترموسیفن هوای بین دیوار خازن و دیوار عایق استفاده می‌کند، از طریق همرفت منتقل شود. بخشی از انرژی حرارتی نیز از طریق رسانش به اتاق منتقل می‌شود.

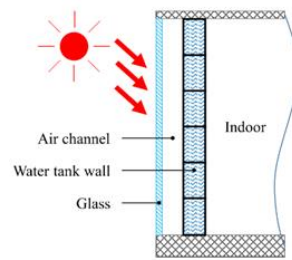
در نتیجه، تقریباً تمام انرژی از طریق تهویه لایه هوا در اختیار ساختمان قرار می‌گیرد. به دلیل مقاومت حرارتی بالای این طرح (وجود لایه عایق حرارتی و لایه‌های هوا)، شار حرارتی اندکی از داخل به بیرون انتقال می‌یابد. علاوه بر این، کاربران قادر به کنترل میزان گرمایش از طریق تنظیم جریان هوا خواهند بود. اما این سیستم نمی‌تواند مانع جریان معکوس ترموسیفون موجود در دیوار ترومب کلاسیک شود؛ لذا، به مکانیزمی برای جلوگیری از آن نیاز دارد [Zhu et al, 2022].

دیوار ترومب آبی، روش دیگری برای کاهش اتلاف حرارتی دیوار ترومب کلاسیک است که در آن آب به‌عنوان خازن حرارتی به‌جای مصالح ساختمانی مانند بتن، آجر، خشت و سنگ استفاده شده است (شکل ۳). به دلیل بالا بودن گرمای ویژه آب از مصالح ساختمانی، دمای سطح آب به‌اندازه این مصالح بالا نرفته و در نتیجه گرمای کمتری از طریق شیشه بازتاب می‌شود. با این حال، نگهداری آب بسیار دشوارتر از مصالح صلب است و به همین خاطر گسترش آن محدود شده است [Charqui et al, 2022; Wang et al, 2021].

دیوار ترومب زیگزاگی که از سه بخش تشکیل شده است، نوع دیگری از دیوار ترومب مبتنی بر گرمایش می‌باشد که برای کاهش دریافت حرارتی مازاد و خیرگی در روزهای آفتابی طراحی شده است (شکل ۴). یک بخش رو به جنوب است و دو بخش دیگر روبه‌داخل زاویه داده شده‌اند و یک دیوار به شکل V را ایجاد می‌کنند. قسمت رو به جنوب شرقی، پنجره‌ای برای تأمین گرما و نور در سرمای اول صبح، زمانی که گرمایش سریع نیاز است، دارد. در مقابل دیوار ترومب V شکل، دیوار ترومب کلاسیک قرار دارد که گرما را برای توزیع مجدد در ساعات سرد شب ذخیره می‌کند.



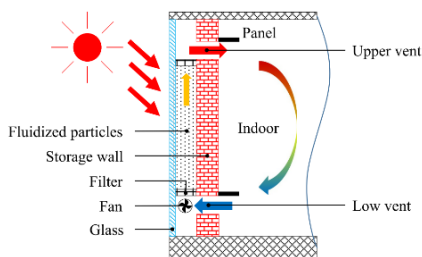
شکل ۴- دیوار ترومب زیگزاگی [Saadatian et al, 2012].



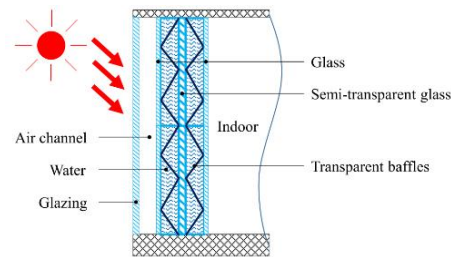
شکل ۳- دیوار ترومب آبی [Wang et al, 2020].

دیوار ترومب خورشیدی شفاف، نوع خلاقانه دیگری از دیوارهای ترومب مبتنی بر گرمایش است (شکل ۵). یک دیوار شفاف مدولار که علاوه بر گرمایش، روشنایی فضای مسکونی را نیز تأمین می‌کند؛ بنابراین، با ایجاد دسترسی بصری به داخل فضا، نقش زیبایی‌شناختی نیز ایفا می‌کند. این دیوارها تشکیل شده از یک محفظه بسته آب بین دو قاب شیشه هستند که توسط یک قاب فلزی نگه داشته می‌شوند. یک صفحه جاذب نیمه شفاف بین دو قاب موازی شیشه قرار گرفته است. تابش خورشیدی دریافتی تا حدی توسط آب و صفحه شیشه‌ای نیمه شفاف جذب می‌شود. بقیه تابش عبور داده شده، هم باعث گرمایش و هم روشنایی موردنیاز فضای داخلی می‌شود؛ بنابراین، این نوع دیوار از هم از سیستم جذب مستقیم و هم سیستم جذب غیرمستقیم استفاده می‌کند و برای مکان‌هایی که دمای روز در آن‌ها بالا است، مناسب است. انتقال حرارت از طریق همرفت، عیب اصلی این سیستم است که می‌توان با نصب تیغه‌های شفاف آن را برطرف کرد [Wang et al, 2021; Saadatian et al, 2012].

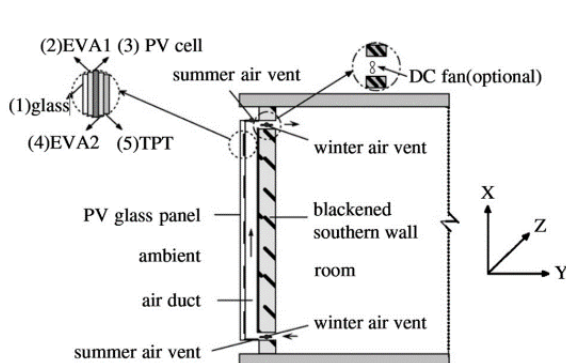
دیوار ترومب سیال، نوعی دیوار ترومب مبتنی بر گرمایش بوده و بر اساس دیوار کلاسیک ترومب است (شکل ۶). در این سیستم، فضای خالی بین دیوار ترومب و پوشش شیشه‌ای توسط ذرات فوق جاذب با دانسیته پایین پر شده است. انرژی خورشیدی دریافتی توسط این ذرات، از طریق فن هوا جریان به داخل خانه منتقل می‌شود. دو فیلتر در بالا و پایین کانال هوا از ورود ذرات فوق جاذب به فضای داخلی جلوگیری می‌کند. این نوع از دیوار ترومب نسبت به دیوار ترومب کلاسیک به دلیل تماس مستقیم هوا با ذرات فلوئیدایز شده، کارا تر است.



شکل ۶- دیوار ترومب سیال [Wang et al, 2020].



شکل ۵- دیوار ترومب شفاف [Wang et al, 2020].



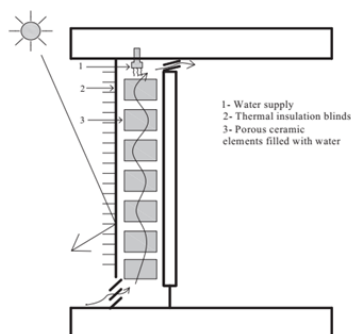
شکل ۷- دیوار ترومب فتوولتائیک با فن DC [Jie et al, 2007]

نوع دیگری از دیوار ترومب مبتنی بر گرمایش با ادغام سلول‌های خورشیدی با دیوار ترومب کلاسیک معرفی شده که به دیوار ترومب فتوولتائیک معروف است (شکل ۷). دیوار ترومب فتوولتائیک علاوه بر گرمایش فضا، انرژی الکتریسیته تولید کرده و ارزش زیبایی‌شناختی بیشتری به ارمغان می‌آورد. پوشش فتوولتائیک روی شیشه، توانایی گرمایش خورشیدی دیوار ترومب را کاهش می‌دهد؛ با این حال، این نوع دیوار ترومب برق تولید می‌کند که در مقایسه با انرژی حرارتی از ارزش بالایی برخوردار است [Sun et al, 2011; Jie et al, 2007].

۲-۱-۲- انواع دیوار ترومب مبتنی بر سرمایش

مفاهیم سرمایش غیرفعال برای ساختمان‌ها را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

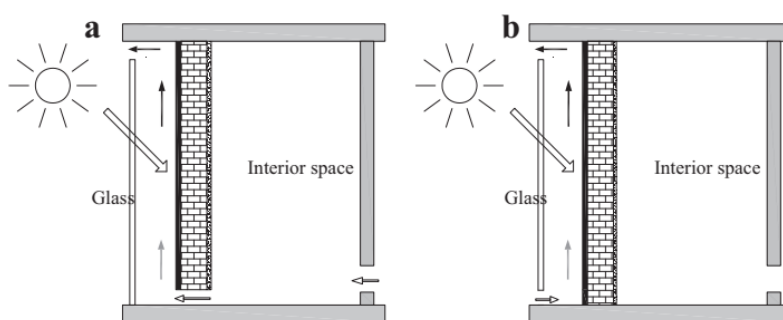
۱. کاهش حرارت خورشیدی و همرفتی ورودی از طریق جهت‌گیری، سایه‌اندازی توسط ساختمان‌های مجاور، گیاهان و نماهای پیش‌آمده طرح‌دار، سطوح منعکس‌کننده و در پناه بودن از بادهای گرم.
۲. کاهش انتقال حرارت از طریق عایق حرارتی و لایه‌های هوا.
۳. افزایش اتلاف حرارتی توسط تابش: مساحت سطوح زیاد و عناصر متحرک.
۴. افزایش اتلاف حرارتی توسط همرفت: مدیریت باد در فضای باز، تهویه طبیعی داخلی، تهویه اجباری داخلی، تونل-های هوای زمینی با جریان آب.
۵. افزایش اتلاف حرارتی توسط تبخیر: سرمایش هوای داخل و خارج، سرمایش سطوح ساختمان.



شکل ۸- دیوار سرمایش تبخیری سرامیکی [Melero et al, 2011].

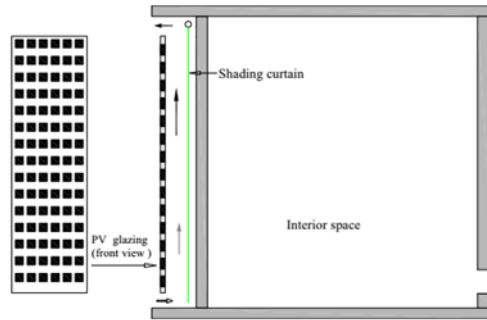
با توجه به مفاهیم ۱ و ۵، اولین نوع دیوار ترومب مبتنی بر سرمایش، دیوار سرمایش تبخیری سرامیکی است (شکل ۸). این دیوار از یک پرده عایق حرارتی انعکاسی خارجی برای جلوگیری از جذب مستقیم خورشیدی و عنصر سرامیکی متخلخل پر شده با آب تمیز در دیوار داخلی استفاده می‌کند. ورودی هوای بیرونی از طریق شکاف‌هایی در قسمت پایین فاصله هوایی و خروجی هوا از قسمت بالایی آن به داخل اتاق است. در فصل تابستان این فاصله هوایی به‌عنوان محفظه خنک‌کننده برای کاهش دمای هوای خارج از طریق سرمایش تبخیری عمل می‌کند [Melero et al, 2011].

دومین نوع دیوار ترومب مبتنی بر سرمایش بر اساس عملکرد دودکش خورشیدی توسعه یافته است. به بیان دقیق‌تر، این نوع دیوار ترومب ابتکار جدیدی نبوده و تنها یکی دیگر از حالت‌های عملکردی دیوار ترومب مبتنی بر گرمایش است. اگرچه برای اقلیم معتدل، زمانی که دمای بیرون کمتر از دمای داخلی است، این نوع دیوار به‌عنوان تهویه طبیعی عمل می‌کند (شکل ۹ a) ولی برای اقلیم گرم، زمانی که دمای بیرون بالاتر از دمای داخلی است، به‌عنوان عایق حرارتی عمل کرده و دریافت حرارت اتاق را کاهش می‌دهد (شکل ۹ b).



شکل ۹- نوع دوم حالت عملکرد دیوار ترومب مبتنی بر سرمایش (a) حالت تهویه طبیعی (b) حالت عایق حرارتی

باتوجه به مفهوم ۲ و ۴، هر دو حالت عملکردی می‌توانند سرمایش غیرفعال را برای فضای داخلی فراهم کنند. باین وجود، این نوع دیوار ترومب مبتنی بر سرمایش از نظر معماری جذاب نیست و ارزش زیبایی‌شناختی ندارد. در این نوع دیوار ترومب به دلیل عدم کنترل تأمین انرژی توسط دیوار خازن، احتمال وقوع بیش‌گرمایی در فصل تابستان وجود دارد. برای تأمین آسایش حرارتی و ارزش زیبایی‌شناختی، از پانل‌های فتوولتائیک و دستگاه‌های سایه‌انداز در نوع دوم دیوار ترومب سرمایشی استفاده می‌شود که خود نیز حالت عملکردی دیگری از دیوار ترومب فتوولتائیک در تابستان است (شکل ۱۰) [Ji et al, 2007; Peng et al, 2013].



شکل ۱۰- دیوار ترومب فتوولتائیک برای حالت عملکرد سرمایشی

ربانی و همکاران در مطالعه‌ای تجربی نوع دیگری از دیوار ترومب طراحی شده جدید در اقلیم گرم و خشک ارائه کردند که ترکیبی از دیوار ترومب و دودکش خورشیدی است. این طرح خلاقانه معایب اصلی دو سیستم قبلی را رفع کرد: عدم کاربرد دیوار ترومب در نیمی از سال و ناتوانی دودکش خورشیدی در ایجاد جریان هوا در ساعات پایانی روز. علاوه بر این، برخلاف دیوار ترومب کلاسیک که سطح جاذب، تابش خورشیدی را فقط از یک جهت دریافت می‌کند، در این طرح جدید کانال تعبیه شده در دیوار ترومب امکان دریافت تابش خورشیدی توسط سطح جاذب را از سه جهت شرق، جنوب و غرب فراهم می‌کند که دمای کانال و جریان هوای داخل آن افزایش پیدا کند. همچنین برای کاهش دمای هوا و افزایش رطوبت داخل اتاق، از دو دریچه ورودی هوای تازه مجهز به سیستم پاشش آب استفاده شده است. باتوجه به نتایج مطالعه تجربی، استفاده از سیستم پاشش آب، بازده حرارتی سیستم را تقریباً ۳۰ درصد افزایش می‌دهد [Rabani et al, 2015].

۲-۲- عوامل مؤثر در طراحی دیوار ترومب

دیوارهای ترومب به‌عنوان یک فناوری معماری پایدار با استفاده از انرژی خورشیدی برای گرمایش و سرمایش در مناطق مختلف اقلیمی در نظر گرفته می‌شوند. جهت دستیابی به راندمان بالا در دیوار ترومب، برخی از عوامل مؤثر در طراحی این سیستم در ساختمان همچون پارامترهای طراحی دیوار ترومب (خواص شیشه لایه بیرونی، مساحت دیوار ترومب، ویژگی‌های دیوار حجیم، دستگاه‌های سایه‌انداز، عمق کانال)، پارامترهای ساختمان (مصالح ساختمانی، تأثیرات پنجره) و پارامترهای سایت (تابش خورشیدی و جهت‌گیری، سرعت و جهت باد) باید در نظر گرفته شود.

۲-۲-۱- پارامترهای طراحی دیوار ترومب

الف) خصوصیات شیشه

خصوصیات شیشه همچون مواد، ضخامت و تعداد لایه‌های آن، نه تنها بر میزان تابش خورشیدی که منعکس، جذب یا منتقل می‌شود، تأثیرگذار است، بلکه بر اتلاف حرارتی بین فضای مابین و محیط بیرونی نیز مؤثر است [Stazi et al, 2012 a]؛ لذا، توجه بر ویژگی‌های شیشه در مرحله طراحی ضرورت دارد. در طی فصول سرد، تعداد مطلوب لایه‌های شیشه در طراحی دیوار ترومب به شرایط اقلیمی محل ساختمان بستگی دارد. بر اساس مطالعه انجام شده در ترکیه، شیشه تک‌جداره عملکرد دیوار ترومب را در طول روز به دلیل داشتن قابلیت انتقال تابش خورشیدی بالاتر بهبود می‌بخشد. با این حال، طبق مطالعه‌ای در ایتالیا، نصب شیشه‌های دوجداره باعث کاهش بیشتر نیاز به انرژی گرمایش در زمستان می‌شود، زیرا شیشه دوجداره با تلفات حرارتی کمتر، تأثیر قابل توجهی بر دریافت گرمای خورشیدی ندارد [Stazi et al, 2012 a; Stazi et al, 2012 b]. به طور مشابه، مطالعه‌ای دیگر نشان داد که استفاده از شیشه دوجداره پر شده با آرگون در اقلیم مالزی از نظر صرفه‌جویی در هزینه انرژی سرمایشی و انتشار کربن‌دی‌اکسید به لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است.

از نظر ترکیبات شیشه، یک پوشش شیشه‌ای کم گسیل^۱ بر روی شیشه اسپندرال^۲ به‌منظور کاهش اتلاف حرارت تابشی به بیرون، معرفی شد. همچنین، یک مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی در فرانسه برای بررسی تأثیر ترکیبات شیشه بر عملکرد دیوار ترومب انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از شیشه‌های دوجداره کم گسیل، انرژی خورشیدی بیشتری را برخلاف شیشه‌های دوجداره استاندارد ذخیره می‌کند [Irshad and Habib, 2014].

1- Low-e
2- Spandrel

ب) مساحت دیوار ترومب

یک مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی در تونس با هدف ارزیابی تأثیر مساحت دیوار ترومب بر عملکرد انرژی انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش مساحت دیوار ترومب باعث کاهش تقاضای انرژی گرمایشی می‌شود [Abbassi et al, 2014]. مطالعه دیگری از طریق شبیه‌سازی در یک اقامتگاه معمولی مجهز به سیستم دیوار ترومب در اردن انجام شد. در این مطالعه، تأثیر نسبت مساحت دیوار ترومب (α)، درصد مساحت دیوار ترومب به کل مساحت دیوار جنوبی را بر گرمایش ساختمان از دیدگاه حرارتی و اقتصادی با استفاده از معیار هزینه چرخه عمر بررسی شد. محققین دریافتند که در ابتدا با افزایش α ، درصد صرفه‌جویی در انرژی گرمایشی افزایش می‌یابد (هنگامی که α برابر با ۲۰ درصد است، حدود ۲۲/۳ درصد در انرژی گرمایشی سالانه صرفه‌جویی می‌شود). با این حال، زمانی که α از ۳۷ درصد فراتر رفت، درصد صرفه‌جویی در انرژی تقریباً ثابت ماند؛ بنابراین، نسبت مساحت بهینه دیوار ترومب ۳۷ درصد بود که منجر به ۳۲/۱ درصد صرفه‌جویی در انرژی گرمایشی شد [Jaber and Ajib, 2011].

ج) خصوصیات دیوار حجیم

طبق مطالعات انجام شده، دیوار حجیم مهم‌ترین جزء در دیوار ترومب است. ضخامت، مصالح و لایه عایق از پارامترهای این دیوار محسوب می‌شود. مطالعه‌ای برای ارزیابی رفتار دیوار حجیم با ضخامت‌های ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ سانتی‌متر انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در طی فصول سرد و تهویه دیوار ترومب، با افزایش ضخامت دیوار حجیم، دریافت حرارتی افزایش می‌یابد؛ در صورتی که، برای دیوار ترومب بدون تهویه، دریافت حرارت با افزایش ضخامت کاهش می‌یابد. با افزایش ضخامت دیوار، مدت‌زمان بیشتری لازم است تا حرارت به فضای داخل برسد که این امر منجر به عدم آسایش حرارتی برای ساکنان می‌شود. با این حال، ضخامت ناکافی هم منجر به نوسان دمایی اتاق در محدوده وسیعی می‌شود [Nelson, 2011]. در این راستا، ضخامت بهینه برای دیوار ترومب بتنی بین ۳۰ الی ۴۰ سانتی‌متر پیشنهاد شده است. در تأیید این نتیجه، در مطالعه دیگر نیز ضخامت بهینه حدود ۳۵ سانتی‌متر برای دیوار آجری سفالی و ۳۷ سانتی‌متر برای دیوار آجری، ۳۵-۴۰ سانتی‌متر برای دیوار بتنی کم مقاومت و ۴۰-۴۵ سانتی‌متر برای دیوار بتنی پر مقاومت حاصل شد [Stazi et al, 2012 a].

از نظر انتخاب مصالح دیوار ترومب، مطالعه‌ای در هر دو مرحله (قبل و حین استفاده از دیوار ترومب) بر روی سه مصالح دیوار (بتن، آجر و بتن اتوکلاو شده) انجام گرفت. با در نظر گرفتن هر دو مرحله، بهترین عملکرد کلی با استفاده از دیوار با بلوک‌های بتنی اتوکلاو شده به دست آمد که یک‌چرخه تولید را با اثرات زیست‌محیطی کم و عملکرد انرژی بالا در حین استفاده از دیوار ترومب ترکیب می‌کند [Stazi et al, 2012 a]. مطالعه دیگری با هدف بهینه‌سازی مصالح دیوار حجیم در ضلع جنوبی خانه‌ای در فرانسه نشان داد که هسته بتنی در دیوار ترومب نسبت به هسته آجر سفالی برای همان ضخامت از انرژی سالانه کمتری استفاده می‌کند [Bojić et al, 2014]. علاوه بر این، با بررسی اثرات مواد خشتی مختلف مشخص شد که این مواد باعث کارایی متفاوتی در دیوارهای ترومب می‌شوند. افزایش وزن و حجم دیوارهای ترومب، با وجود افزایش ظرفیت ذخیره حرارتی آن‌ها، منجر به افزایش بار مرده ساختمان می‌شود که این امر از دیدگاه مهندسان سازه یک مشکل تلقی می‌گردد.

استفاده از مواد تغییرفازدهنده^۱ به‌عنوان بستر ذخیره حرارتی، می‌تواند راهکاری برای حل این مسئله باشد [Pielichowska and Pielichowski, 2014] که اولین بار در سال ۱۹۷۸ توسط تلکس^۲ و همکاران در دیوار ترومب استفاده شد. PCM قابلیت ذخیره انرژی زیاد در حجم نسبتاً کم را داشته و سبک‌تر از مصالح ساختمانی معمول است. از طرفی، انرژی ذخیره شده در آن نسبت به دیوار بتنی می‌تواند سریع‌تر به اتاق انتقال یابد [Fiorito, 2012]. این امر برای خانه‌های مسکونی که نیازمند استفاده از انرژی ذخیره شده در طی شب هستند، یک نقص تلقی می‌شود. نتایج مطالعه انجام شده در مورد مدت‌زمان گرمایش اتاق در روزهای غیر آفتابی برای مصالح مختلف دیوار ترومب نشان داد که دیوار ترومب ساخته شده از موم پارافین می‌تواند اتاق را در مقایسه با سایر مواد، حدود ۹ ساعت گرم‌تر نگه دارد.

نتایج مطالعه‌ای مشابه، بیانگر افزایش مدت‌زمان استفاده از دودکش خورشیدی به‌ویژه در شب با استفاده از PCM بود [Li and Liu, 2014]. انواع مختلف PCM واکنش حرارتی متفاوتی بر روی دیوار ترومب نشان داده‌اند. یک مطالعه عددی برای یک اتاق گرم شده توسط دیوار ترومب رو به جنوب با مواد ذخیره‌سازی مختلف (بتن، موم پارافین و نمک هیدراته) در عراق، انجام شد. دو نوع PCM (موم پارافین و نمک هیدراته) در کپسول‌های مسی با نسبت طول به قطر ۰/۷۶ کپسوله شدند. نتایج نشان داد که دیوار ذخیره‌سازی با نمک هیدراته (ضخامت ۸ سانتی‌متر) در مقایسه با موم پارافین (ضخامت ۵ سانتی‌متر) کمترین تغییر را در جایی که دمای اتاق در حدود دمای آسایش ۲۰ درجه سانتی‌گراد در حال نوسان بود، داشت [Khalifa and Abbas, 2009].

علاوه بر این، تغییرات موقعیت متفاوت PCM در لایه خارجی دیوار، بر کارایی دیوار ترومب مؤثر است. در این راستا، در مطالعه‌ای موقعیت بهینه PCM در پنج اقلیم مختلف مورد بررسی قرار گرفت [Fiorito, 2012]. علاوه بر این، مواد مورد استفاده

1- Phase change material (PCM)
2- Telkes

برای دیوار حجیم باید قابل توجه باشد که به نظر می‌رسد تکنیکی جهت افزایش انتقال حرارت بر روی ظرفیت جذب و ذخیره‌سازی دیوار ترومب است. در نهایت، عایق حرارتی بر روی دیوارهای حجیم، راه‌حلی برای نقص دیوار ترومب کلاسیک (مقاومت حرارتی کم و اتلاف حرارت در شب) در نظر گرفته می‌شود [Krüger et al, 2013]. مطالعات نشان داده‌اند که عایق حرارتی هم در زمستان و هم در تابستان، کارایی دیوار ترومب فتوولتائیک را بهبود می‌بخشد [Ji et al, 2007]. به‌علاوه، نتایج مطالعه انجام شده بر روی نوع بهبودیافته دیوار ترومب کامپوزیت با دیواره داخلی و محفظه عایق شده، نشان داد که عایق می‌تواند کارایی دیوار ترومب کامپوزیت را افزایش دهد [Zhu et al, 2022].

د) دستگاه‌های سایه‌انداز

اتلاف حرارت در شب‌های زمستان و دریافت گرمای بیش از حد در تابستان، دو نقصی هستند که کاربرد دیوار ترومب را محدود می‌کنند. دستگاه‌های سایه‌انداز همچون پرده‌های سایه‌انداز، پنجره کرکره‌ای، پیش‌آمدگی و کنسول به‌عنوان تکنیکی ساده برای رفع این مشکلات نامطلوب در نظر گرفته می‌شوند [Hong et al, 2015; Stazi et al, 2012 b; Ji et al, 2007]. در مطالعه‌ای نشان داده شد که استفاده از دیوار ترومب بدون عایق در تابستان به‌هیچ‌عنوان مطلوب نیست [Stazi et al, 2012 b]. مطالعه دیگری توسط همین محققین نشان داد که استفاده ترکیبی از کنسول و کرکره‌های غلتکی می‌تواند به کارایی بهینه دیوار ترومب در تابستان منجر شود [Stazi et al, 2012 c].

همچنین یک مطالعه تجربی انجام شده در شب زمستانی نشان داد که استفاده از سایه‌انداز در ورودی، راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد حرارتی دیوار ترومب است. استفاده از دستگاه‌های سایه‌انداز در فصول مختلف سال باید تنظیم شود. در فصول سرد، دستگاه‌های سایه‌انداز برای برخورد تابش بیشتر به دیوار ترومب، باید در طول روز برداشته شوند؛ درحالی‌که در تابستان این عمل برعکس است. در این راستا، مطالعه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی بر روی دیوارهای ترومب اجرا شده در ساختمان انجام شد. هر دیوار ترومب با جهت جنوب غربی با یک کنسول خورشیدی ۱/۵ متری ترکیب شد (با پیش‌فرض متحرک بودن این کنسول‌ها؛ اعمال کنسول در تابستان و حذف آن در زمستان). نتایج شبیه‌سازی، کاهش قابل‌توجه انرژی سرمایشی موردنیاز سالانه را نشان داد [Soussi et al, 2013].

اخیراً در چین، یک دیوار ترومب با پرده کرکره‌ای که از عملکرد اضافی در فصول مختلف جلوگیری می‌کند، مورد مطالعه قرار گرفت که دو طرف آن با لایه انتخابی پوشانده شده بود. در تابستان، سمت پوشیده شده با لایه انعکاسی برای جلوگیری از بیش‌گرمایی به سمت بیرون می‌چرخد؛ درحالی‌که در زمستان، سمت دیگر پرده کرکره‌ای که دارای لایه‌ای با قابلیت جذب بالاست، به‌منظور جذب بیشتر تابش خورشیدی برخوردار می‌گردد. به‌پرده‌ها، به سمت بیرون چرخانده می‌شود. میزان تابش خورشیدی جذب شده را می‌توان با کنترل زاویه پرده کنترل کرد. در ادامه، با مقایسه دیوار ترومب با و بدون پرده کرکره‌ای از طریق شبیه‌سازی نشان دادند که دیوار ترومب دارای پرده کرکره‌ای در مقایسه با دیوار ترومب کلاسیک، شرایط آسایش بهتری را در ساختمان فراهم می‌کند. علاوه بر این، نتایج حاکی از این بود که دیوار ترومب با پرده کرکره‌ای در زمستان برای مکان‌هایی که در طول روز تحت تصرف هستند؛ مانند مراکز خرید، مدارس و ساختمان‌های اداری مناسب‌تر است [He et al, 2015]. این محققین در مطالعه دیگری بر روی دیوار ترومب با هدف تعیین مکان ثابت بهینه پرده‌ها، به این نتیجه رسیدند که فاصله ۹ سانتی‌متری بین شیشه و پرده برای کانال ورودی هوا به عرض ۱۴ سانتی‌متر مطلوب است [Hong et al, 2015].

ه) عمق کانال

در طراحی دیوار ترومب، در نظر گرفتن کانالی مابین لایه شیشه‌ای و دیوار حجیم خارجی، ضرورت دارد [Dragičević and Lambic, 2011]. با افزایش عمق کانال تا حد معین، میانگین دمای هوا در کانال کاهش یافته و سپس جریان برگشتی در اطراف خروجی دیوار ترومب رخ می‌دهد. علاوه بر این، منجر به ضخامت ناکافی دیوار حجیم می‌شود که مشکلات سازه‌ای به همراه دارد [Hong et al, 2015]. مطالعات نشان می‌دهد که اثر عمق کانال بر نرخ جریان جرمی پیچیده است. این امر، علاوه بر ارتفاع دیوار ترومب، به ابعاد ورودی و خروجی هوا نیز بستگی دارد که بر هدررفت آن تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، برای اندازه ورودی و خروجی ثابت با عرض ۱۰ سانتی‌متر، نرخ جریان تحت‌تأثیر عمق کانال قرار نگرفت. همچنین مشخص شد که نسبت بهینه عمق کانال به ارتفاع، در بیشتر موارد حدود ۱۰ به ۱ است [Liping and Angui, 2006]. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از شبیه‌سازی عملکرد حرارتی سالانه یک دیوار فتوولتائیک و با هدف بررسی تأثیر عمق کانال، انجام شد. نتایج نشان داد که عمق کانال نه تنها بر بار سرمایشی و بار گرمایشی در تابستان و زمستان تأثیر می‌گذارد، بلکه بر دمای ماژول‌های فتوولتائیک نیز مؤثر است. همچنین دریافتند که عمق بهینه برای کانال دیوار فتوولتائیک رو به جنوب می‌تواند ۶ سانتی‌متر در هنگام کنگ بر حسب ارتفاع ۳/۶ متر دیوار ترومب فتوولتائیک باشد [Peng et al, 2013]. به نظر می‌رسد که عمق کانال بر روی دیوار ترومب بدون تهویه، تأثیر زیادی ندارد. در این راستا، مطالعه‌ای بر روی ساختمانی با ترکیب دیوارهای ترومب بدون تهویه با پنجره‌های جذب مستقیم انجام شد. بین

دیوار خارجی و شیشه، سه فاصله مختلف به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تغییر فاصله بین دیوار خارجی و شیشه تأثیر چندانی بر هوای داخل و دمای سطح داخلی ندارد [Yilmaz and Kundakci, 2008].

۲-۲-۲- پارامترهای ساختمان

الف) مصالح و مواد ساختمانی

یکی از پارامترهای مؤثر بر رفتار حرارتی ساختمان با دیوار ترومب، مصالح ساختمانی به کاررفته در پوسته ساختمان است. از راهکارهای رایج برای این منظور، استفاده از مواد با اینرسی حرارتی و سطح عایق بالا است. در این راستا، در مطالعه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی در تونس، عملکرد دیوار ترومب را در پوسته‌های مختلف ساختمان مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از دیوار ترومب در یک ساختمان عایق کاری شده، می‌تواند نیازهای گرمایشی را تا حد زیادی کاهش دهد [Abbassi et al, 2014]. مطالعه عددی دیگری در ایتالیا با هدف تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی رفتار دیوار ترومب با تغییر عایق در ساختمان انجام شد. نتایج نشان داد که عملکرد کلی انرژی با افزایش سطح عایق، افزایش می‌یابد. مجموع انرژی گرمایش و سرمایش فصلی مورد نیاز برای پوسته معمولی و دارای عایق به ترتیب برابر با ۳۸ و ۲۹ کیلووات‌ساعت بر مترمربع بود [Stazi et al, 2012 c].

ب) تأثیرات پنجره

پدیده ترموسیفون جریان هوای داخل ساختمان را از بالا به پایین القا می‌کند؛ با این حال، وجود پنجره باعث می‌شود تا تابش خورشیدی به طور مستقیم به کف داخلی یا دیوارهای مجاور آن برخورد کرده و باعث گرم شدن این عناصر گردد. این امر منجر به جریان هوا از پایین به بالا می‌شود. در نتیجه جریان هوا در اتاق نسبت به حالت بدون پنجره تغییر می‌کند. در این راستا، مطالعه‌ای در چین با و بدون پنجره در نمای جنوبی ساختمان، راندمان حرارتی دیوار ترومب فتوولتائیک را تحت تأثیر قرار دهد. نتایج به دست آمده حاکی از این بود که میانگین بازده روزانه برای این نوع دیوار در ساختمان بدون پنجره و با پنجره به ترتیب ۲۱/۴ و ۱۵/۷ درصد است [Sun et al, 2011; Jie et al, 2007]. این بدان معناست که در صورت وجود پنجره، راندمان حرارتی نسبی ۲۷ درصد کاهش می‌یابد [Sun et al, 2011]. اگرچه نتایج نشان داد که عدم وجود پنجره می‌تواند کارایی بالاتری داشته باشد، اما پنجره‌ها علاوه بر تأمین نور روز، قادر به فراهم کردن ارتباط بصری نیز هستند.

۲-۲-۳- پارامترهای سایت

الف) تابش خورشیدی و جهت‌گیری

سطح تابش خورشیدی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد جریان هوا در کانال دیوار ترومب شناسایی شده است. مطالعه انجام شده بر روی تأثیر سطوح مختلف تابش خورشیدی به دیوار ترومب نشان داد که نرخ جریان هوا برای شار حرارتی ۷۰۰ وات بر مترمربع کمی بیشتر از شارهای حرارتی ۶۰۰ و ۵۰۰ وات بر مترمربع است [Li and Liu, 2014]. به طور مشابه، بررسی تجربی انجام شده در مورد انتقال حرارت و نرخ جریان جرمی در دیوار ترومب، تأیید کرد که نرخ جریان جرمی از طریق کانال تابعی از مجرای ورودی گرما است [Burek and Habeb, 2007]. به‌طور کلی، کارایی دیوار ترومب با افزایش سطح تابش خورشیدی افزایش می‌یابد. بازده دیوار ترومب نه تنها به سطح تابش خورشیدی بستگی دارد، بلکه تحت تأثیر جهت‌گیری نیز است. در نیمکره شمالی، خورشید در زمستان از تقریباً از جنوب شرق و غرب و در تابستان تقریباً از شمال شرق و غرب طلوع و غروب می‌کند. این زاویه جزئی، به زمان سال و فاصله ناظر از استوا بستگی دارد. در نیمکره جنوبی، همه این جهات برعکس است؛ بنابراین، در نیمکره شمالی مطلوب‌ترین جهت برای دیوارهای ترومب، جهت‌های جنوب، جنوب شرقی و جنوب غربی است؛ در حالی که در نیمکره جنوبی، جهت مناسب برای دیوار ترومب، شمال، شمال شرق و شمال غرب است [Krüger et al, 2013]. در این راستا، مطالعه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی در یک ساختمان اداری در تونس (نیمکره شمالی)، سه جهت (غرب، جنوب غربی و شمال غربی) را برای طراحی دیوار ترومب بررسی کرد. نتایج نشان داد که کل نیازهای گرمایشی داخل ساختمان برای جهت جنوب غربی تقریباً ۴۶۹/۶ کیلووات‌ساعت، برای جهت جنوب غربی ۱۳۶۴ کیلووات‌ساعت و برای جهت شمال غربی ۱۸۰۰ کیلووات‌ساعت می‌رسد [Soussi et al, 2013]. علاوه بر این، در مرحله طراحی دیوار ترومب، باید به سایه‌اندازی توسط محیط اطراف و خود ساختمان در شهرهای بسیار متراکم توجه شود.

ب) سرعت و جهت باد

علاوه بر تابش خورشیدی، سرعت و جهت باد، محرک طبیعی کلیدی برای رفتار حرارتی و جریان هوای دیوار ترومب است. به‌طور کلی، ضریب اتلاف حرارتی شیشه و فشار باد با سرعت و جهت باد مرتبط است که عمدتاً بر راندمان حرارتی و نرخ تهویه

دیوار ترومب تأثیر می‌گذارد. باتوجه به مطالعات، راندمان حرارتی دیوار ترومب با افزایش سرعت باد افزایش یافته و سرعت باد را از صفر تا ۵ متر بر ثانیه تغییر می‌دهد؛ درحالی‌که، مقدار بازده برای سرعت باد بیشتر از ۵ متر بر ثانیه ثابت می‌ماند [Dragičević and Lambic, 2011]. مطالعات در رابطه با تأثیر سرعت و جهت باد بر میزان تهویه دیوار ترومب محدود است. در مطالعه‌ای، تأثیر سرعت هوای محیط بر عملکرد دیوار ترومب با دودکش خورشیدی در مناطق استوایی بررسی شد که نتایج حاصله استفاده از دودکش خورشیدی با سرعت هوای محیطی صفر را پیشنهاد کرد [Tan and Wong, 2014].

۲-۳- شاخص‌های ارزیابی

برای ارزیابی عملکرد سیستم دیوار ترومب در شرایط عملکردی مختلف، شاخص‌های بسیاری نظارت یا محاسبه می‌شوند. به-طور کلی، می‌توان آن‌ها را از سه منظر انرژی (دمای اتاق، صرفه‌جویی در بار گرمایش و سرمایش [Soussi et al, 2013])، راندمان حرارتی [Hong et al, 2015]، تعویض هوا در ساعت و نرخ جریان جرمی [Khanal and Lei, 2015]، زیست-محیطی (انتشار کربن دی‌اکسید) و اقتصادی (دوره بازگشت سرمایه) طبقه‌بندی کرد [Bojić et al, 2014].

۳- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که دیوارهای ترومب در حفاظت از محیط‌زیست و حفظ انرژی، عملکرد مطلوبی ارائه می‌دهند. در مطالعه حاضر، به بررسی کارکردهای اصلی دیوار ترومب که به دو نوع عمده دیوار ترومب مبتنی بر گرمایش و سرمایش تقسیم می‌شوند، پرداخته شد. همچنین هر دو نوع دیوار ترومب که ساختار متفاوتی دارند، باتوجه به مزایا و معایب هر کدام بررسی شد. در ادامه به پارامترهای مؤثر در طراحی دیوار ترومب، ساختمان و سایت به تفصیل بیان شدند. نتایج اصلی در طراحی دیوار ترومب به شرح زیر است:

۱. اگرچه، افزایش مساحت دیوار ترومب، کارایی آن را افزایش می‌دهد؛ ولی منجر به محدود شدن مساحت کل دیوار جنوبی می‌گردد. مساحت بهینه ۳۷ درصد پیشنهاد شد.
۲. مصالح و ضخامت دیوار، نقش مهمی در کارایی ذخیره‌سازی حرارت و ظرفیت رهاسازی آن دارد. هرگونه مصالح با ظرفیت حرارتی بالا را می‌توان در ساخت دیوار ترومب بکار گرفت. باین‌حال، استفاده از مواد سبک و با ظرفیت ذخیره‌سازی بالا در حجم نسبتاً کم مانند PCM ارجح‌تر است. به لحاظ ضخامت دیوار، دیوارهای ترومب بتنی ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متری در بسیاری از اقلیم‌ها عملکرد خوبی نشان داده‌اند. استفاده از عایق حرارتی روی دیوار حجیم به‌عنوان راهکاری برای جبران نقص دیوار ترومب کلاسیک پیشنهاد شده است.
۳. خصوصیات شیشه همچون ترکیبات و تعداد جداره‌های آن به طور قابل‌توجهی بر عملکرد دیوارهای ترومب تأثیر می‌گذارد. باین‌حال، انتخاب شیشه به متغیرهای زیادی از جمله طول و عرض جغرافیایی پروژه بستگی دارد. به طور معمول، شیشه دوجداره کم گسیل پیشنهاد شد.
۴. عمق کانال عمده‌تاً به مقاومت جریان کمک می‌کند. این‌نه‌تنها به ارتفاع دیوار ترومب، بلکه به ابعاد ورودی و خروجی هوا نیز بستگی دارد. علاوه بر این، ایمنی سازه باید در طراحی عمق کانال در نظر گرفته شود؛ چراکه، عمق بیش از حد منجر به ضخامت ناکافی دیوار حجیم می‌شود. دستگاه‌های سایه‌انداز می‌توانند عملکرد دیوار ترومب را کنترل کرده و برخی از نقایص را رفع کنند.
۵. همانند عایق حرارتی روی دیوارهای حجیم، عایق‌بندی مناسب پوسته ساختمان عملکرد خوبی ارائه داد. تابش خورشید می‌تواند مستقیماً از طریق پنجره به کف داخلی یا دیوارهای مجاور آن برخورد کند، بنابراین در طراحی پنجره‌ها باید اندازه و موقعیت آن‌ها نسبت به دیوار ترومب در نظر گرفته شود.
۶. سطح تابش خورشیدی تأثیر مهمی در ایجاد جریان هوا در کانال دیوار ترومب داشته و کارایی آن با افزایش تابش خورشیدی، بیشتر می‌شود. علاوه بر این، برای ساختمانی با دیوارهای ترومب واقع در نیمکره شمالی، نمای جنوبی (با تغییرات ۴۵ درجه) مؤثرترین جهت‌گیری در جذب بهره خورشیدی است.
۷. سرعت و جهت باد با ضریب اتلاف حرارتی و فشار باد مرتبط است. اگر سرعت باد کم باشد، عملکرد دیوار ترومب بهتر است که باید تحقیقات بیشتری در این زمینه صورت پذیرد.
۸. در نهایت، برای ارزیابی عملکرد دیوارهای ترومب، شاخص‌های زیادی از منظر انرژی، محیط‌زیست و اقتصادی رواج یافته است که بایستی شاخص مناسبی برای ارزیابی عملکرد دیوار ترومب باتوجه به هدف استفاده از آن انتخاب کرد.

1. Abbassi, F. Dimassi, N., and Dehmani, L. (2014). Energetic study of a Trombe wall system under different Tunisian building configurations. *Energy Build.* 80: 302–8.
2. Bojić, M. Johannes, K., and Kuznik, F. (2014). Optimizing energy and environmental performance of passive Trombe wall. *Energy and Buildings.* 70: 279-86.
3. Briga-Sá, A. Martins, A. Boaventura-Cunha, J. Lanzinha, J.C. Paiva, A. (2014). Energy performance of Trombe walls: adaptation of ISO 13790: 2008 (E) to the Portuguese reality. *Energy Build.* 74: 111–9.
4. Burek, S.A., and Habeb, A. (2007). Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Walls. *Energy and buildings.* 39 (2): 128-35.
5. Charqui, Z. El Moutaouakil, L. Boukendil, M. Hidki, R. (2022). Numerical study of heat transfer in a tall, partitioned cavity confining two different fluids: Application to the water Trombe wall. *International Journal of Thermal Sciences.* 171: 107266.
6. Dimassi, N., and Dehmani, L. (2017). Performance comparison between an improved and a classical Trombe wall: An experimental study. *Journal of Building Physics.* 40 (4): 372-95.
7. Dragičević, S., and Lambic, M. (2011). Influence of constructive and operating parameters on a modified Trombe wall efficiency. *Archives of Civil and Mechanical Engineering.* 11 (4): 825-38.
8. Fiorito, F. (2012). Trombe walls for lightweight buildings in temperate and hot climates. Exploring the use of phase-change materials for performances improvement. *Energy Procedia.* 30: 1110-9.
9. He, W. Hu, Z. Luo, B. Hong, X. Sun, W. Ji, J. (2015). The thermal behavior of Trombe wall system with venetian blind: an experimental and numerical study. *Energy Build.* 06 078.
10. Hong, X. He, W. Hu, Z. Wang, C. Ji, J. (2015). Three-dimensional simulation on the thermal performance of a novel Trombe wall with venetian blind structure. *Energy and Buildings.* 89:32-8.
11. Irshad, K. Habib, K., and Thirumalaiswamy, N. (2014). Energy and cost analysis of photo voltaic trombe wall system in tropical climate. *Energy Procedia.* 50:71-8.
12. Jaber, S., and Ajib, S. (2011). Optimum design of Trombe wall system in mediterranean region. *Solar Energy.* 85 (9): 1891-8.
13. Jie, J. Hua, Y. Gang, P. Bin, J. Wei, H. (2007). Study of PV-Trombe wall assisted with DC fan. *Building and Environment.* 42 (10): 3529-39.
14. Ji, J. Yi, H. He, W. Pei, G. (2007). PV-trombe wall design for buildings in composite climates. *J Sol Energy Eng.* 129 :431.
15. Khalifa, A.J., and Abbas, E.F. (2009). A comparative performance study of some thermal storage materials used for solar space heating. *Energy and Buildings.* 41 (4): 407-15.
16. Khanal, R., and Lei, C. (2015). A numerical investigation of buoyancy induced turbulent air flow in an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation. *Energy and Buildings.* 93: 217-26.
17. Krüger, E. Suzuki, E., and Matoski, A. (2013). Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location. *Energy and Buildings.* 66: 364-72.
18. Li, Q. Fan, J., and Huang, J. (2022). Regional Adaptability Analysis of Solar Roof Utilization Technologies in China. *Applied Sciences.* 12 (6): 2792.
19. Li, Y., and Liu, S. (2014). Experimental study on thermal performance of a solar chimney combined with PCM. *Applied Energy.* 114: 172-8.
20. Liping, W., and Angui, L. (2006). A numerical study of Trombe wall for enhancing stack ventilation in buildings. In *The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture.* 6-8.
21. Melero, S. Morgado, I. Neila, F.J., and Acha, C. (2011). Passive evaporative cooling by porous ceramic elements integrated in a Trombe wall. *Architecture & sustainable development.* 2: 267.
22. Nelson, V.C. (2011). *Introduction to renewable energy.* CRC press.
23. Peng, J. Lu, L. Yang, H., and Han, J. (2013). Investigation on the annual thermal performance of a photovoltaic wall mounted on a multi-layer façade. *Applied energy.* 112: 646-56.
24. Pielichowska, K., and Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in materials science.* 65: 67-123.
25. Rabani, M. Kalantar, V. Dehghan, A.A., and Faghieh, A.K. (2015). Empirical investigation of the cooling performance of a new designed Trombe wall in combination with solar chimney and water spraying system. *Energy and Buildings.* 102: 45-57.

26. Saadatian, O. Sopian, K. Lim, C.H. Asim, N., and Sulaiman, M.Y. (2012). Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16 (8): 6340-51.
27. Sady, H. Rashidi, S., and Rafee, R. (2023). Application of different Trombe wall solutions on the reduction of energy load and sustainable development in an eco-resort residential building in Binalood region with a cold and dry climate. *Environmental Science and Pollution Research*. 1:1-8.
28. Soussi, M. Balghouthi, M., and Guizani, A. (2013). Energy performance analysis of a solar-cooled building in Tunisia: Passive strategies impact and improvement techniques. *Energy and Buildings*. 67 :374-86.
- 29 a. Stazi, F. Mastrucci, A., and Munafò, P. (2012). Life cycle assessment approach for the optimization of sustainable building envelopes: An application on solar wall systems. *Building and Environment*. 58: 278-88.
- 30 b. Stazi, F. Mastrucci, A., and di Perna, C. (2012). The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: an experimental and numerical study. *Energy and Buildings*. 47: 217-29.
- 31 c. Stazi, F. Mastrucci, A., and di Perna, C. (2012). Trombe wall management in summer conditions: an experimental study. *Sol Energy*. 86: 2839-51.
32. Sun, W. Ji, J. Luo, C., and He, W. (2011). Performance of PV-Trombe wall in winter correlated with south façade design. *Applied Energy*. 88 (1): 224-31.
33. Tan, A.Y., and Wong, N.H. (2014). Influences of ambient air speed and internal heat load on the performance of solar chimney in the tropics. *Solar Energy*. 102: 116-25.
34. Wang, D. Hu, L. Du, H. Liu, Y. Huang, J. Xu, et al. (2020). Classification, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics of Trombe walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 124: 109772.
35. Wang, X. Xi, Q., and Ma, Q. (2021). A review of current work in research of Trombe walls. *InE3S Web of Conferences 2021 (Vol. 248, p. 03025)*. EDP Sciences.
- 36 World Energy Concil. (2013). world energy issues monitor.
37. Yilmaz, Z., and Kundakci, A.B. (2008). An approach for energy conscious renovation of residential buildings in Istanbul by Trombe wall system. *Building and Environment*. 43 (4): 508-17.
38. Zhu, Y. Zhang, T. Ma, Q., and Fukuda, H. (2022). Thermal performance and optimizing of composite trombe wall with temperature-controlled DC fan in winter. *Sustainability*. 14 (5): 3080.