

نشریه علمی نامه معماری و شهرسازی، ۱۷(۴۴)، ۵-۲۱

DOI: 10.30480/AUP.2024.4501.1981

نوع مقاله: پژوهشی

## بررسی کارایی دیوار ترومب فتوولتاییک در ساختمان‌های مسکونی مشهد\*

هدی اصدقی

کارشناس ارشد معماری و انرژی، گروه فناوری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران  
(نویسنده مسئول مکاتبات)

E-mail: hodaasdaghi@gmail.com

ریمایا فیاض

استاد گروه فناوری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران

### چکیده

در سالیان اخیر ترکیب‌های جدیدی از سامانه‌های غیرفعال به منظور افزایش کارایی آن‌ها معرفی شده‌اند. هدف از تحقیق حاضر بررسی عملکرد دیوار ترومب فتوولتاییک در ساختمان‌های مسکونی مشهد است که با استفاده از شبیه‌سازی انرژی، توسط نرم‌افزار انرژی پلاس صورت گرفت. دیوار ترومب آجری و بتنی با سطح پوشش فتوولتاییک در سه جایگاه متفاوت، فاصله هوایی و دریچه‌های متفاوت برای کل سال بررسی شد. متغیرها به صورت یکپارچه شبیه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که برای اتاقی به حجم ۱۲۰ مترمکعب با دیوار ترومب شش مترمربعی آجری و بتنی و سطح دریچه ۱۸ درصد، فاصله هوایی ۰/۰۵ متر و سطح پوشش چهار مترمربع از صفحات فتوولتاییک (حدود ۶۶ درصد از دیوار ترومب)، گرمای دریافتی، تولید برق و آسایش حرارتی افزایش یافت و مقدار آن به ترتیب، ۲۵۷۶۵۲/۳، ۳۰۷۹۶۳/۶ کیلوژول و در ماه اکتبر، شرایط آسایش حرارتی، سرد ارزیابی شد. دمای سطح داخلی صفحات فتوولتاییک و گرمای دریافتی ناشی از همرفت داخلی از پایین به بالای دیوار ترومب افزایش یافت. بهترین محل استقرار صفحات فتوولتاییک روی دیوار خازن در مقایسه با قرارگیری در روی شیشه و در فاصله هوایی در اوقات سرد سال پیشنهاد شد، در حالی که برای اوقات گرم، این موضوع برعکس است.

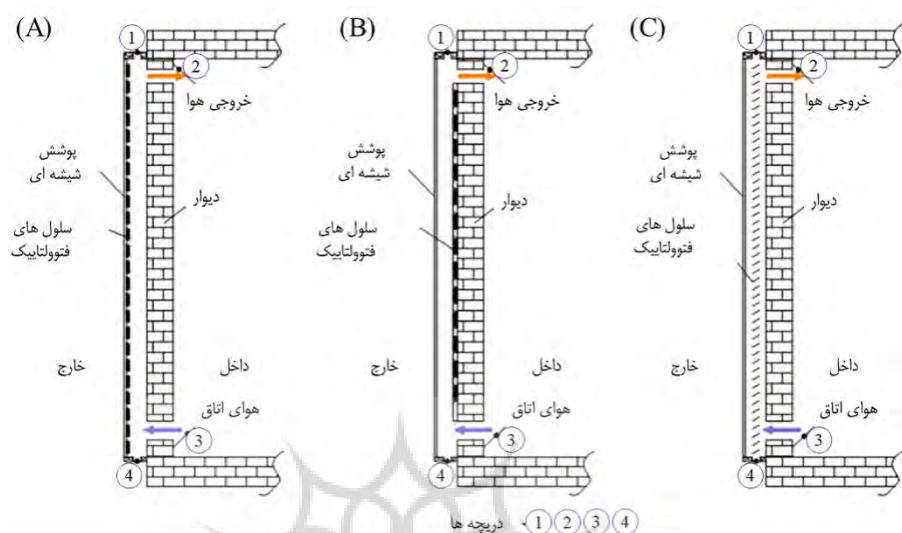
**کلیدواژه‌ها:** سامانه‌های غیرفعال خورشیدی، دیوار ترومب، دیوار ترومب فتوولتاییک، آسایش حرارتی، انرژی پلاس

\* این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد هدی اصدقی، با عنوان «طراحی دیوار ترومب بهینه در ساختمان‌های مسکونی کوتاه مرتبه در مشهد» است که با راهنمایی دکتر ریمایا فیاض، در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه هنر ایران انجام شده است.

## مقدمه

در نتیجه توسعه سریع اقتصادی، افزایش جمعیت جهان و بهبود استانداردهای زندگی منابع انرژی‌های تجدید ناپذیر در آینده کاهش خواهد یافت. گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر یک راه مؤثر برای حل این مشکل است. یکی از راه‌های ساده و ارزان برای استفاده از انرژی‌های خورشیدی و همچنین کاهش مصرف انرژی، در ساختمان‌ها استفاده از دیوار ترومب است که هم‌زمان دارای عملکرد تهویه و گرمایش است. فناوری فتوولتاییک برای کاهش مصرف انرژی و گازهای گلخانه‌ای و بهبود آسایش حرارتی می‌تواند با ساختمان‌ها به صورت‌های متفاوت ترکیب شود. دیوار ترومب فتوولتاییک نه تنها عملکرد تولید برق، گرمایش فضا و تهویه دارد بلکه زیبایی ساختمان را افزایش می‌دهد (Ahmed *et al.*, 2019, 14-26; Romero *et al.*, 2018, 65-80). برای بهره‌وری از انرژی حرارتی تولید شده توسط سلول‌های فتوولتاییک، می‌توان یک سیال را در پشت سلول‌های فتوولتاییک گردش داد تا سیال گرم شود، بنابراین خنک‌کنندگی فتوولتاییک و بهبود بازده الکتریکی ممکن می‌شود. ارشاد و همکاران (Irshad *et al.*, 2015, 624-629) با تغییر سرعت جریان هوا مدل شبیه‌سازی شده اتاق دیوار ترومب فتوولتاییک را ارائه دادند. نتایج نشان داد که اثر قابل توجهی از سرعت جریان هوا بر عملکرد دیوار ترومب فتوولتاییک تا مقادیر مشخصی وجود دارد و پس از آن ثابت می‌ماند و هیچ تغییری در هر سه نوع دیوار ترومب فتوولتاییک تحت بررسی نشان داده نمی‌شود. در پژوهشی شبیه‌سازی عددی از جریان هوا در دیوار ترومب فتوولتاییک (BIPV-TW<sup>1</sup>) انجام شد و نتایج نشان داد که سرعت جریان هوا تقریباً در یک روند خطی با ارتفاع کانال افزایش می‌یابد (Xu & Su, 2013, 1537-1541). اثر سرعت جریان جرم بر عملکرد دیوار ترومب فتوولتاییک با شرایط همرفت آزاد با پارامترهای دیگر از جمله: اندازه کانال، مصالح شیشه‌ای، پوشش جاذب، تابش و ارتفاع کانال در ارتباط است. مطالعه عبدالله و همکاران با چهار اقدام خنک‌کنندگی سلول‌ها انجام شد و دریافته‌اند استفاده از مبدل حرارتی به نسبت سایر اقدامات (بدون خنک‌کننده، با هوا، با آب و ترکیبی از آب و هوا) اثر بیشتری دارد (Abdullah *et al.*, 2022a, 101273-101283). دیوار ترومب با فتوولتاییک در فاصله هوایی در چین توسط لین و همکاران انجام شد و دریافته‌اند که بازده الکتریکی و حرارتی به ترتیب، ۱۲ و ۳۸/۲ درصد بوده است (Lin *et al.*, 2019, 47-57). مطالعه (Abdullah *et al.*, 2022b, 100706-100716) نشان داد که استفاده از آینه‌های بازتابنده و فن‌های جریان مستقیم منجر به بهینه‌سازی راندمان الکتریکی و حرارتی دیوار ترومب فتوولتاییک می‌شود. در پژوهش ارشاد و همکاران (Irshad *et al.*, 2022, 101958-101971) در اقلیم نیمه‌خشک با مطالعات دینامیک سیالات نشان داده شد که هنگام استفاده از صفحات فتوولتاییک در فاصله هوایی بار حرارتی اتاق به نسبت اتاق با دیوار ترومب معمولی کاهش می‌یابد. برونو و همکاران با مقایسه دو روش شبیه‌سازی با نرم‌افزار ترنسپس و نسبت بار خورشیدی نشان دادند که میانگین خطای بین ۰/۷ و ۱/۴ درصد است که اعتبار روش پیشنهادی را نشان می‌دهد و کمک می‌کند عملکرد انرژی دیوار ترومب فتوولتاییک در شرایط واقعی در مکان‌های مختلف به دست آورد (Bruno *et al.*, 2022, 328-343). براساس یک تحقیق افزایش سطح سلول‌های مات فتوولتاییک یکپارچه شده با سطح‌های شفاف این امکان را برای تولید برق بیشتر فراهم می‌کند، اما دریافت خورشیدی را کاهش می‌دهد (Fung & Yang, 2008, 341-350). بنابراین باید تعادلی بین روشنایی، دریافت حرارت و تولید برق ایجاد شود. مطالعات نشان می‌دهد که تنها ۲۰ درصد انرژی خورشیدی بر خوردی بر سلول‌های فتوولتاییک به برق تبدیل می‌شود و ۸۰ درصد مابقی به گرما تبدیل می‌شود که دمای سلول‌های فتوولتاییک را افزایش می‌دهد (Jie *et al.*, 2007, 1544-1552). در پژوهشی، از سلول خورشیدی سیلیکونی کریستال (c-Si) در سطح شیشه دیوار ترومب استفاده شد و نتایج نشان داد که بازده حرارتی کم است، زیرا سلول خورشیدی اجازه عبور نور خورشید از دیواره را نمی‌دهد. علاوه بر این، یک

رابطه تقریبی خطی بین دما و عرض داخلی، با یک محدوده مشخص شده از دیوار ترومب فتوولتاییک پیشنهاد شده است. باین حال، دمای داخلی پیش بینی شده، برای حداکثر عرض دیوار ترومب، از نظر آسایش حرارتی داخل کافی نیست (Ji et al., 2007, 431). سه حالت قرارگیری صفحات فتوولتاییک در دیوار ترومب در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱. سه مدل از دیوار ترومب - (A):  $BIPVGTW^2$  - (B):  $BIPVMTW^3$  - (C):  $BIPVBTW^4$

برگرفته از: Hu et al., 2017, 81-93

تاکنون پژوهشی در مورد استفاده از دیوار ترومب فتوولتاییک در ساختمان های مسکونی شهر مشهد با اقلیم سرد و خشک صورت نگرفته در حالی که با پیشرفت فناوری، لازم است این سامانه ها، بررسی و کارایی آن ها در این اقلیم و اقلیم های مشابه بهینه سازی شود. در این پژوهش صفحات فتوولتاییک با دو سطح پوشش متفاوت در دو اتاق مسکونی متداول در شهر مشهد با دیوار ترومب با مصالح بتن و آجر و سطوح متفاوت دریچه ها و فاصله هوایی در نظر گرفته شد. در اینجا، برای هر دو اوقات گرم و سرد سال شبیه سازی ها انجام شده است. نوع شیشه در همه حالات ثابت در نظر گرفته شده است. در حالی که در مقالات پیشین، متغیرها به صورت جداگانه شبیه سازی شده اند، بدین معنی که فقط (فاصله هوایی و ...) مدنظر بوده، در این مقاله، با توجه به شرایط مرزی و انتقال حرارت، متغیرها (شامل فاصله هوایی و ...) به صورت یکپارچه تغییر داده و شبیه سازی شدند.

### پیشینه تحقیق

در حال حاضر، روش های معمول صرفه جویی در مصرف انرژی برای بهبود هوای محیط داخلی و کاهش مصرف انرژی در تهویه مطبوع، استفاده از تهویه طبیعی و انرژی های تجدیدپذیر است (Rabani et al., 2017, 943-950). انرژی های تجدیدپذیر می تواند انرژی های پاک فراهم سازد و همچنین گرمایش جهانی را بهبود دهد (Romero et al., 2018, 65-80). در یک تحقیق عملی، برای تمامی سال در شرایط اقلیمی هنگ کنگ، دیوار ترومب فتوولتاییکی در ساختمان نصب کردند و دریافتند که دمای داخل در فصل تابستان  $2/9$  درجه سیلسیوس کاهش داشته است که  $50$  درصد بیشتر از دیوار متداول بود. در طول زمستان، دیوار ترومب فتوولتاییک  $32$

درصد گرمای تلف شده را کاهش داده بود و ۶۹ درصد گرمای به دست آمده را نسبت به دیوار متداول کاهش داده بود (Peng et al., 2013, 646-656). در تحقیقی دیگر در ترکیه، عملکرد دیوار ترومب فتوولتاییک با پنل‌های فتوولتاییک مات با سلول‌های نیمه‌شفاف بررسی شد و نتایج نشان داد که بازده حرارتی به ۲۷ درصد رسید و بازده الکتریکی، به دلیل سلول‌های فتوولتاییک نیمه شفاف ناکارآمد کمتر از ۵ درصد کاهش پیدا کرد (Koyu- nbaba & Yilmaz, 2012, 111-118). اسلام و همکاران با شبیه‌سازی و انجام آزمایش، در آب‌وهوای نیمه‌خشک، در فاصله‌ی هوایی صفحات فتوولتاییک را قرار دادند و دریافتند که گرمای حاصل با سایبان معمولی ۱/۳۳ برابر بیشتر از سایبان فتوولتاییک است و دمای سایبان فتوولتاییک ۴/۷ درجه‌ی سیلسیوس از سایبان معمولی کمتر است (Islam et al., 2021, 119542-119557). در مطالعه‌ی کلانتری و بهبهانی‌نیا با مدل‌سازی گذرا، دیوار ترومب فتوولتاییک با مواد تغییر فاز دهنده مطالعه شد که با تابش خورشید در طول روز و گرم شدن دیوار، مواد تغییر فاز دهنده در دمای ذوب خود شروع به ذوب شدن می‌کنند و در ساعات بعدی با منجمد شدن، این انرژی را به حفره هوا بر می‌گرداند. در پایین و بالای دیوار ترومب دریاچه‌هایی تعبیه شده و زمانی که دمای هوا در حفره هوا بیشتر از دمای داخل اتاق باشد، باز می‌شوند و با به وجود آمدن گردش هوا، هوای گرم از حفره هوا وارد اتاق می‌شود. مقدار برق حاصل و دمای اتاق، بررسی و محاسبه شد (کلانتری و بهبهانی‌نیا، ۱۳۹۴). مطالعه‌ی فرنود و زرنندی نشان داد که دمای اتاق با دیوار ترومب فتوولتاییک کمتر است و ارزش زیبایی‌شناسی بالاتری دارد (فرنود و زرنندی، ۱۳۹۴، ۷-۸). مطالعه‌ی لین و همکاران (Lin et al., 2021, 101277-101291) جهت بهینه‌سازی دیوار ترومب فتوولتاییک با مواد تغییر فاز دهنده براساس هزینه‌ی چرخه‌ی عمر و آسایش حرارتی توسط روش مونت کارلو انجام شد و نشان داده شد که سطح آسایش حرارتی ۴۳ درصد بهبود یافت.

**تأثیر دریاچه‌ی هوا:** در تحقیقی اثر دریاچه‌ی هوا بر عملکرد دیوار ترومب فتوولتاییک را مطالعه کردند و مشخص شد زمانی که نسبت سطح دریاچه‌ی هوا به سطح مقطع کانال از ۰/۷ بیشتر باشد، دما برای عرض‌های مختلف، ثابت باقی ماند (Ji et al., 2007, 431-437). ارشاد و همکاران (Irshad et al., 2015, 624-629) تلاش کردند تا عملکرد یک ساختمان را با دیوار ترومب فتوولتاییک افزایش دهند و مشخص شد که دیوار ترومب فتوولتاییک پارامترهای مختلفی دارد که باعث بهبود کارایی آن می‌شود از جمله دمای سلول، اندازه‌ی دریاچه، رنگ، عایق، ضخامت، مصالح دیوار و شیشه. بهترین اندازه‌ی مناسب دیوار ترومب فتوولتاییک ۳۷ درصد اندازه‌ی دیوار اتاق است. علاوه بر این، رنگ تیره به‌عنوان بهترین انتخاب، در نظر گرفته شد، زیرا می‌تواند انرژی حرارتی زیادی را برای جلوگیری از انتقال حرارت معکوس جذب کند.

**تأثیر فاصله‌ی هوایی:** فاصله‌ی بین صفحه‌ی فتوولتاییک و دیوار تأثیر مهمی بر عملکرد حرارتی دیوار ترومب فتوولتاییک دارد. تأثیر ضخامت فاصله‌ی هوایی بر میزان تهویه و انتقال حرارت از طریق محاسبات در کانال دیوار ترومب فتوولتاییک بررسی شده است. نسبت بهینه‌ی مناسب این فاصله (عرض به ارتفاع) برای طراحی دیوار ترومب، برابر با ۰/۲ بود. با افزایش عرض این فاصله تا ۰/۴ متر، بهبودی در افزایش بازده الکتریکی سلول فتوولتاییک به وجود آمد (Xu and Su, 2013, 1537-1541).

**تأثیر عایق حرارتی:** در این زمینه، جی و همکاران (Ji et al., 2007, 431-437) ثابت کردند که استفاده از عایق حرارتی می‌تواند به‌طور قابل توجهی عملکرد حرارتی دیوار ترومب فتوولتاییک را بهبود می‌بخشد اما عملکرد الکتریکی را کمی کاهش می‌دهد.

**اثر ضریب چینش (Packing factor):** ضریب چینش به‌عنوان نسبت سطح سلول خورشیدی به کل سطح ماژول تعریف می‌شود. از نقطه نظر طراحی، ماژول‌های فتوولتاییک باید ضریب چینش بالایی داشته باشند تا میزان تولید انرژی را افزایش دهند (Hegazy, 2000, 861-881). در پژوهشی، اثر ضریب چینش یک فتوولتاییک

نیمه‌شفاف مطالعه شد و از انواع مختلف سلول‌های خورشیدی برای ساخت دیوار ترومب فتوولتاییک استفاده کردند (Vats et al., 2012, 1-4). کاهش دمای ماژول فتوولتاییک به دلیل کاهش ضریب چینش مورد توجه قرار گرفت که باعث افزایش کارایی الکتریکی آن می‌شود. علاوه بر این، مشاهده شد کاهش ضریب چینش منجر به افزایش دمای اتاق می‌شود. توصیه می‌شود که مقادیر بهینه ضریب چینش و جذب به ترتیب، ۰/۴ و ۰/۲۵ باشد (Taffesse et al., 2016, 265-273).

**اثر نسبت پوشش (Coverage ratio):** به معنی نسبت سطح فتوولتاییک به سطح شیشه است. کاهش قابل توجهی در ظرفیت گرمایش خورشیدی دیوار ترومب با پوشش فتوولتاییک در شیشه دیوار ترومب ایجاد شد. به ترتیب، ۷ و ۱۷ درصد از بازده حرارتی ناشی از ۳۳/۴ و ۱۰۰ درصد پوشش فتوولتاییک کاهش می‌یابد. اگر شیشه کاملاً با سلول فتوولتاییک پوشانده شده باشد، باعث کاهش تابش خورشید می‌شود و ممکن است برای تأمین گرمایش کافی نباشد. در نتیجه، دمای هوا در کانال کمتر از دمای اتاق بود (Sun et al., 2011, 224-231). با این وجود، پوشش سلول‌های فتوولتاییک با خروجی الکتریکی آن مقایسه شده است. جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2008, 2491-2498) نتیجه گرفتند که با افزایش نسبت پوشش، بازده حرارتی و دمای اتاق دیوار ترومب فتوولتاییک کاهش می‌یابد، اما قدرت الکتریکی و کارایی کل دیوار ترومب فتوولتاییک افزایش می‌یابد. علاوه بر این، بازده الکتریکی سلول خورشیدی کاهش یافته است اما اثر نسبت پوشش بر روی بازده الکتریکی کمتر از ۰/۵ درصد است.

**اثر ذخیره گرما:** ویژگی دیوار ترومب کلاسیک ظرفیت زیاد ذخیره گرمای آن است که باعث کاهش اتلاف گرما می‌شود. در تحقیقی دیوار ترومب فتوولتاییک در یک اتاق دریچه‌دار با ذخیره گرما مطالعه شد. نتایج نشان داد که اتاق دریچه‌دار با دیوار ترومب فتوولتاییک و ذخیره حرارت به‌طور قابل توجهی درجه حرارت داخلی را افزایش می‌دهد (Ji et al., 2007, 431-437). در همان زمان، میانگین روزانه بازده الکتریکی این سامانه براساس اندازه‌گیری‌های تجربی حدود ۱۰/۴ درصد بود. با این حال، ساختمان‌های معمولی از مصالح مختلف غیر از بتن ساخته شده‌اند. بنابراین، عملکرد دیوار ترومب فتوولتاییک با مصالح مختلف به تحقیقات تجربی و نظری بیشتری نیاز دارد.

با استفاده از دیوار ترومب فتوولتاییک دمای اتاق، گرمای حاصل و بازده الکتریکی پنل‌ها کمتر می‌شود. دمای پنل‌ها افزایش یافته و برای تولید الکتریسیته بیشتر، باید، ضریب چینش افزایش یابد. فاصله هوایی بیشتر به معنی کاهش گرمای حاصل و افزایش بازده پنل‌ها است.

### روش پژوهش

این تحقیق از نوع کاربردی است. پژوهش با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای و شبیه‌سازی نرم‌افزاری انجام شده است. در این پژوهش مدل سه‌بعدی اتاق با نرم‌افزار راینو (Rhinceros - نسخه 6) ساخته شده است. شبیه‌سازی انرژی با استفاده از پلاگین‌های هانی بی لگسی (Honeybee Legacy - نسخه 0.0.66) و لیدی باگ لگسی (Ladybug Legacy - نسخه 0.0.69) و نرم‌افزار انرژی پلاس (نسخه 22.1.0) انجام شده است. خروجی نهایی شبیه‌سازی‌ها با نرم‌افزار انرژی پلاس (EnergyPlus) است. از آنجایی که شبیه‌سازی برای کل سال است و میانگینی از گرما، دما و برق تولیدی مدنظر است، بنابراین، شبیه‌سازی در حالت پایدار صورت گرفته است.

### اقلیم مشهد

شهر مشهد در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه شمالی، ارتفاع از سطح دریا ۹۹۴ متر و در دسته‌بندی اقلیمی کوپن

در رده سرد و خشک استپی (BSK) قرار دارد (رضیئی، ۱۳۹۶، ۴۳۹-۴۱۹). در این پژوهش شبیه‌سازی با استفاده از فایل آب‌وهوایی مشهد با فرمت epw از سایت (URL1) دانلود شد. اعتبارسنجی داده‌ها در شکل (۲) آمده است. میانگین ماهانه دما در جدول (۱) آمده است.



شکل ۲. اعتبارسنجی داده‌ها

جدول ۱. میانگین ماهانه دما در مشهد

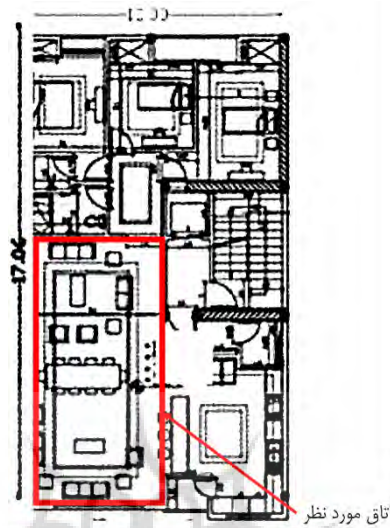
Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	July	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan	ماه
۳	۸	۱۴	۲۱	۲۶	۲۷	۲۵	۲۰	۱۴	۸	۴	۲	دما به سیلسیوس

برگرفته از URL1

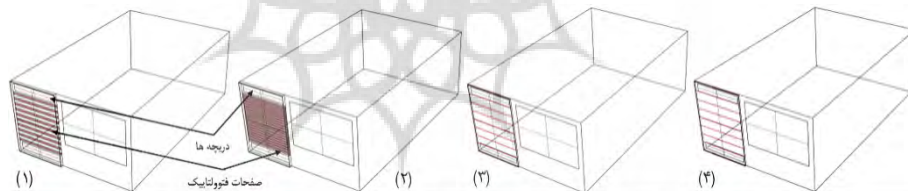
## شبیه‌سازی

اتاقی به ابعاد پنج در هشت به ارتفاع سه متر در نظر گرفته شده است که ابعاد اتاق با توجه به مقاله شمعی و سبزواری (شمعی و سبزواری، ۱۴۰۰، ۵-۶) برای یک فضای پذیرایی مدنظر است که جهت‌گیری آن به سمت جنوب است. شکل (۳) ابعاد متداول یک خانه مسکونی متداول میان‌مرتبته مشهد را نشان می‌دهد. پنجره اتاق فاقد سایبان و دارای شیشه تک‌لایه است. پنجره اتاق به ابعاد ۲/۶ در ۱/۸ متر است. دیوارهای شرقی، غربی و شمالی اتاق اول (با دیوار ترومب آجری) و دوم (با دیوار ترومب بتنی)، به همراه کف به صورت بی‌دررو است. سیستم‌های کمکی سرمایش و گرمایش اتاق خاموش فرض شدند. دیوار ترومب دو متر از عرض اتاق را دربرمی‌گیرد. دیوار ترومب در اتاق اول و دوم به ترتیب، آجر و بتن به ضخامت ۲۰ سانتیمتر است. ابعاد دریچه‌ها ۱۸ درصد سطح دیوار (با توجه به مقاله کایا و همکاران (Kaya et al., 2021, 224-234) به عرض و ارتفاع ۰/۳ و ۱/۸ متر است. در حالت بعدی ابعاد دریچه‌ها با توجه به مقاله لیپینگ و آنگوری (Liping & Anguri, 2006) سه بیستم (3/20) ارتفاع دیوار یعنی به عرض و ارتفاع ۱/۵ در ۰/۳ متر در نظر گرفته می‌شود. فاصله هوایی ۰/۱ (در مرحله اول) و ۰/۰۵ (در مرحله دوم) متر در نظر گرفته می‌شود. شیشه در دیوار ترومب تک‌لایه و با ضریب انتقال حرارت ۵/۸ W/m<sup>2</sup>.K (مبحث ۱۹، ۱۳۹۹، ۲۱۹-۲۱۰) است. اشکال (۴ و ۵) به ترتیب، مدل شبیه‌سازی شده و مقطعی از آن را نشان می‌دهد. مشخصات مصالح در جدول (۲) آمده است. جنس ماژول‌ها کریستال سیلیکون (c-Si) و بازده سلول‌های فتوولتاییک و اینورتر، ۰/۹ در نظر گرفته شده است. صفحات فتوولتاییک مانند شکل (B-1) (BIPVMTW) روی دیوار ترومب قرار گرفته‌اند. در مرحله بعد جایگاه صفحات

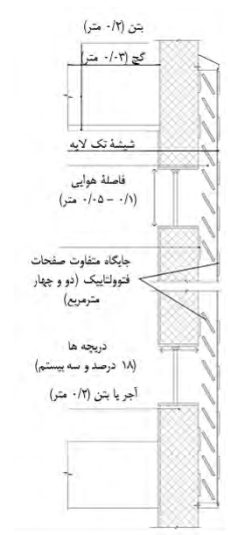
در موقعیت A (BIPVGTW) و C (BIPVBTW) قرار می‌گیرد. در واقع مراحل انجام شبیه‌سازی مطابق شکل (۶) است. مرحله زمانی ۶۰، توزیع خورشیدی «Full exterior and Interior»، برنامه زمانی اشغال و روشنایی مطابق پیوست پنج مبحث ۱۹، دریچه‌ها به صورت «Air Wall» تعریف شد. بخشی از شبیه‌سازی در شکل (۷) آمده است.



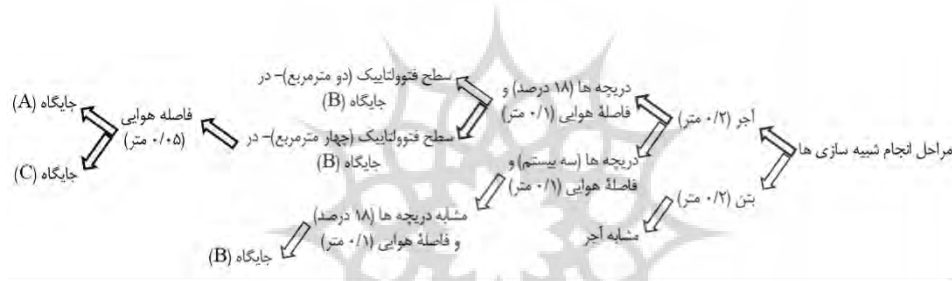
شکل ۳. ابعاد متداول ساختمان مسکونی میان مرتبه در مشهد برگرفته از: شمعی و سبزواری، ۱۴۰۰، ۵-۶



شکل ۴. (۱): سطح دریچه ۱۸ درصد، فاصله هوایی ۰/۱ متر و سطح دو مترمربعی از صفحات فتوولتاییک در جایگاه B (BIPVMTW) - (۲): سطح دریچه ۱۸ درصد، فاصله هوایی ۰/۱ متر و سطح چهار مترمربعی از صفحات فتوولتاییک در جایگاه B (BIPVMTW) - (۳): فاصله هوایی ۰/۰۵ متر، سطح دریچه ۱۸ درصد و چهار مترمربع فتوولتاییک در جایگاه C (BIPVBTW) - (۴): فاصله هوایی ۰/۰۵ متر، سطح دریچه ۱۸ درصد و چهار مترمربع از فتوولتاییک در جایگاه A (BIPVGTW)



شکل ۵. مقطعی از دیوار ترومب فتوولتائیک



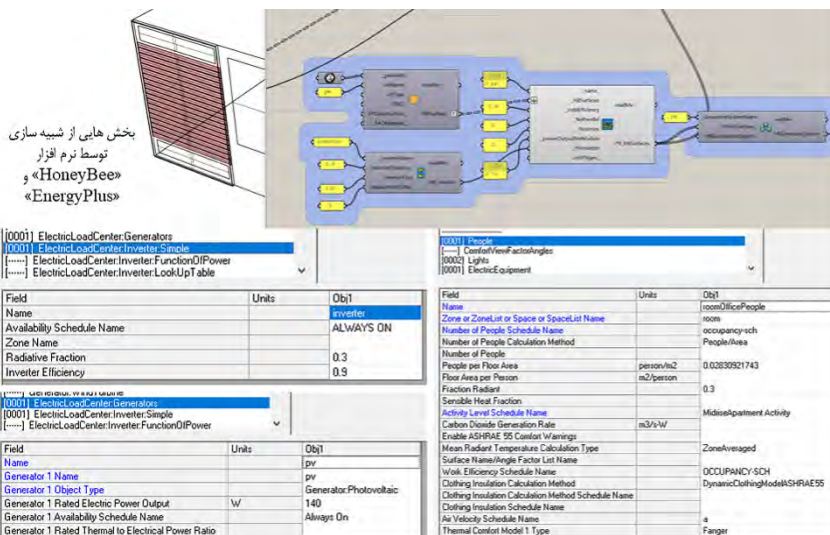
شکل ۶. مراحل انجام شبیه سازی ها

جدول ۲. مشخصات مصالح اتاق و دیوار ترومب

میزان زبری	ضریب انتقال حرارت مؤثر (W/m.K)	وزن مخصوص خشک (kg/m <sup>3</sup> )	گرمای ویژه (J/kg.K)	ضخامت (m)	مصالح	دیوارها
زبر	۲/۳	۲۴۰۰	۱۰۰۰	۰/۲	بتن	لایه بندی سقف
نرم	۰/۵۷	۱۳۰۰	۹۵۰	۰/۰۳	گچ	اتاق اول و دوم
زبر	۰/۷۲	۲۰۰۰	۸۰۰	۰/۲	آجر	لایه بندی دیوار
نرم	۰/۵۷	۱۳۰۰	۹۵۰	۰/۰۳	گچ	ترومب اتاق اول
زبر	۲/۳	۲۴۰۰	۱۰۰۰	۰/۲	بتن	لایه بندی دیوار
نرم	۰/۵۷	۱۳۰۰	۹۵۰	۰/۰۳	گچ	ترومب اتاق دوم

برگرفته از: مبحث ۱۹، ۱۳۹۹، ۲۱۹-۲۱۰





شکل ۷. قسمت هایی از شبیه سازی توسط نرم افزار «HoneyBee» و «EnergyPlus»

## نتایج شبیه سازی

شبیه سازی برای کل سال انجام شده است، بنابراین، در نتیجه از ساعت هشت صبح تا چهار بعد از ظهر باز و در بقیه شبانه روز بسته هستند. با توجه به میانگین ماهانه دما در مشهد، اوقات سرد از ماه اکتبر تا آوریل در نظر گرفته شده است. گرمای دریافتی ناشی از همرفت از سطح داخلی دیوار ترومب است. میزان تولید برق با سطح دو و چهار مترمربعی ۹۸۷۷۳۲ کیلوژول (۲۷۴/۳۷ کیلووات ساعت) و ۱۹۷۵۴۸۲ کیلوژول (۵۴۸/۷۴ کیلووات ساعت) است. چنانچه زاویه صفحات به ۳۰ درجه (در جایگاه C با توجه به مقاله طاهری و همکاران (طاهری و همکاران، ۱۳۹۲) برای زاویه بهینه صفحات در مشهد) تغییر پیدا کند، میزان تولید برق ۲۸۲۰۰۵۲ کیلوژول (۷۸۳/۳۴ کیلووات ساعت) می شود که می توان برای تأمین آب گرم مصرفی استفاده کرد. دمای سطح داخلی صفحات فتوولتاییک بیشتر از قسمت هایی است که این صفحات را ندارند. دمای سطح داخلی صفحات فتوولتاییک و گرمای دریافتی ناشی از همرفت داخلی از پایین به بالای دیوار ترومب افزایش می یابد. گرمای دریافتی با دیوار ترومب بتنی بیشتر از آجری است. در اتاق دوم با سطح دریچه ۱۸ درصد و دو متر مربع از صفحات فتوولتاییک گرمای دریافتی بیشتر از اتاق اول است. با دیوار ترومب بتنی و سطح دریچه سه بیستم (3/20) و چهار متر مربع از صفحات فتوولتاییک میزان گرمای دریافتی کاهش می یابد. در اتاق اول گرمای دریافتی با سطح دریچه سه بیستم و چهار متر مربع از صفحات فتوولتاییک میزان گرمای دریافتی از حالت سطح دریچه ۱۸ درصد و دو متر مربع از صفحات فتوولتاییک کمتر است. هرچقدر پوشش صفحات فتوولتاییک روی دیوار ترومب بیشتر شود، گرمای دریافتی و دمای اتاق کمتر خواهد شد. سطح دریچه بیشتر، گرمای دریافتی بیشتری به اتاق می دهد و دمای اتاق افزایش می یابد. دمای اتاق با سطح دریچه ۱۸ درصد در بعضی از ماه ها افزایش می یابد در حالی که این موضوع برای سطح دریچه سه بیستم متفاوت است و دمای میانگین در بعضی از ماه ها کاهش می یابد. دمای میانگین اتاق با سطح فتوولتاییک چهار متر مربع تفاوت چندانی در میانگین دما با سطح دو متر مربعی از این صفحات ندارد. میزان برق تولیدی با سطح بیشتر این صفحات افزایش می یابد، بنابراین، با توجه به گرمای دریافتی حالت های مختلف، سطح بیشتر دریچه ها و صفحات فتوولتاییک بیشتر پیشنهاد می شود، یعنی، اتاق اول با سطح ۱۸ درصدی دریچه ها و چهار مترمربع از

صفحات فتوولتاییک و برای اتاق دوم با سطح ۱۸ درصدی از دریچه‌ها و چهار مترمربع از صفحات فتوولتاییک. سطح دریچه‌ها تأثیر بیشتری در گرمای دریافتی نسبت به پوشش فتوولتاییک دارد. با کم شدن فاصله هوایی گرمای دریافتی بیشتر می‌شود، یعنی دیوار ترومب آجری یا بتنی با سطح دریچه ۱۸ درصد، فاصله هوایی ۰/۰۵ متر و سطح فتوولتاییک چهار متر مربع بیشترین گرما را به اتاق می‌دهد. دمای اتاق به‌طور میانگین در دیوار ترومب آجری و بتنی، سطح ۱۸ درصد از دریچه‌ها و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر و چهار متر مربع از صفحات، در جایگاه C کمتر از جایگاه A و B است، اما در جایگاه B دمای اتاق از دو جایگاه دیگر بیشتر است. بنابراین، به‌ترتیب، جایگاه B، A و C از صفحات فتوولتاییک در اوقات سرد سال پیشنهاد می‌شود. در واقع، به‌ترتیب، در جایگاه C، A و B، صفحات فتوولتاییک دریافت تابش خورشیدی به دیوار ترومب را کاهش می‌دهند و مانند یک سایبان برای دیوار عمل می‌کنند، بنابراین، برای اوقات گرم، به‌ترتیب گفته شده، صفحات فتوولتاییک پیشنهاد می‌شود. آسایش حرارتی با شاخص PMV در اتاق دوم بهتر از اتاق اول است. جدول (۳) میزان گرمای دریافتی برای حالت‌های مختلف اتاق را نشان می‌دهد. کمترین و بیشترین گرمای دریافتی به‌ترتیب، برای اتاق اول، ۲۴۰۶۷۸/۵۸۰ و ۲۹۰۲۹۸/۴۰۰ کیلوژول است که به‌ترتیب، مربوط به دریچه سه بیستم، چهار متر مربع از صفحات فتوولتاییک و دریچه با سطح ۱۸ درصد، دو متر مربع از صفحات فتوولتاییک می‌باشد و برای اتاق دوم، ۲۸۵۷۱۲/۱۸۷ و ۳۳۵۱۸۴/۴۸۷ کیلوژول است که به‌ترتیب مربوط به سطح دریچه سه بیستم، چهار متر مربع از صفحات فتوولتاییک و سطح دریچه ۱۸ درصد و دو متر مربع از صفحات فتوولتاییک است. جداول (۴ و ۵) دمای میانگین اتاق و سطح داخلی دیوار ترومب و صفحات فتوولتاییک را نشان می‌دهد. در اوقات سرد و گرم سال، بیشترین و کمترین دما، در ماه آوریل و سپتامبر اتفاق افتاده است و مقدار آن به‌ترتیب، ۲۷/۶۸ و ۳۲/۷۵ درجه سلسیوس است که به‌ترتیب، مربوط به جایگاه‌های B و C می‌شود. دمای اتاق در ماه دسامبر به‌ترتیب جایگاه A، B و C برابر، ۹/۴۰، ۹/۴۸ و ۹/۴۱ درجه سلسیوس است. جدول (۶) آسایش حرارتی را براساس شاخص PMV نشان می‌دهد. برای اتاق اول و دوم در اوقات سرد و گرم سال، به‌ترتیب، ماه اکتبر و جولای بهترین شرایط آسایش را از نظر شاخص PMV را دارند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی

جدول ۳. میزان گرمای دریافتی به کیلوژول در اوقات سرد سال

دیوار ترومب	میزان پوشش صفحات فتوولتائیک	گرمای دریافتی برای اوقات سرد (kJ)	دیوار ترومب	میزان پوشش صفحات فتوولتائیک	گرمای دریافتی برای اوقات سرد (kJ)
اتاق اول با دیوار ترومب متداول آجری و سطح دریچه ۱۸ درصد	-	۲۸۹۴۵۳/۴۴۵	اتاق دوم با دیوار ترومب متداول بتنی و سطح دریچه ۱۸ درصد	-	۳۳۱۹۵۰/۲۶۴
اتاق اول با سطح دریچه ۱۸ درصد	دو متر مربع- جایگاه B	۲۹۰۲۹۸/۴۰۰	اتاق دوم با سطح دریچه ۱۸ درصد	چهار متر مربع- جایگاه B	۳۰۷۵۵۳/۶۸۵
	چهار متر مربع- جایگاه B	۲۵۴۷۸۶/۲۴۸		دو متر مربع- جایگاه B	۲۹۳۹۳۷/۱۴۳
اتاق اول با سطح دریچه	چهار متر مربع- جایگاه B	۲۴۰۶۷۸/۵۸۰	اتاق دوم با سطح دریچه	چهار متر مربع- جایگاه B	۲۸۵۷۱۲/۱۸۷
	دو متر مربع- جایگاه B	۲۵۵۴۹۴/۱۹۱		دو متر مربع- جایگاه B	۲۹۳۹۳۷/۱۴۳
اتاق اول با دیوار ترومب متداول آجری و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر	-	۳۱۱۵۷۸/۲۱۶	اتاق دوم با دیوار ترومب متداول بتنی و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر	-	۳۴۸۱۳۸/۲۰۲
اتاق اول با سطح دریچه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر	چهار متر مربع- جایگاه B	۲۵۷۶۵۲/۳۳۱	اتاق دوم با سطح دریچه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر	چهار متر مربع- جایگاه B	۳۰۷۹۶۳/۶۷۸

جدول ۴. میانگین دمای اتاق به سیلسیوس

ماه (اوقات سرد)	دمای اتاق اول با دیوار ترومب متداول آجری، سطح دریچه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر	دمای اتاق اول با سطح دریچه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر- چهار متر مربع فتوولتائیک- جایگاه B	جایگاه C	جایگاه A	دمای اتاق دوم با دیوار ترومب متداول بتنی، سطح دریچه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر	دمای اتاق دوم با سطح دریچه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر- چهار متر مربع فتوولتائیک- جایگاه B	جایگاه C	جایگاه A
Jan	۱۱/۵۶	۱۱/۵۶	۱۱/۴۸	۱۱/۴۷	۱۱/۷۵	۱۱/۷۵	۱۱/۶۷	۱۱/۶۶
Feb	۱۳/۸۹	۱۳/۸۹	۱۳/۸۱	۱۳/۸۲	۱۳/۹۸	۱۳/۹۸	۱۳/۹۰	۱۳/۹۱
Mar	۱۷/۵۱	۱۷/۵۱	۱۷/۴۳	۱۷/۴۵	۱۷/۵۶	۱۷/۵۶	۱۷/۴۸	۱۷/۵۱
Apr	۲۷/۶۸	۲۷/۶۸	۲۷/۵۹	۲۷/۶۳	۲۷/۵۹	۲۷/۵۹	۲۷/۴۸	۲۷/۵۴
Oct	۲۵/۳۱	۲۵/۳۱	۲۵/۲۲	۲۵/۲۴	۲۵/۴۰	۲۵/۴۰	۲۵/۳۱	۲۵/۳۳
Nov	۱۴/۹۴	۱۴/۹۴	۱۴/۸۶	۱۴/۸۶	۱۵/۱۲	۱۵/۱۲	۱۵/۰۵	۱۵/۰۵
Dec	۹/۵۱	۹/۴۸	۹/۴۱	۹/۴۰	۹/۷۵	۹/۷۵	۹/۶۶	۹/۶۵

جایگاه A	جایگاه C	دمای اتاق دوم با سطح درجه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر - چهار متر مربع فتوولتاییک - جایگاه B	دمای اتاق دوم با دیوار ترومب متداول بتنی، سطح درجه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر	جایگاه A	جایگاه C	دمای اتاق اول با سطح درجه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر - چهار متر مربع فتوولتاییک - جایگاه B	دمای اتاق اول با دیوار ترومب متداول آجری، سطح درجه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر	ماه (اوقات گرم)
۳۳/۹۴	۳۳/۸۸	۳۳/۹۷	۳۳/۹۷	۳۴/۱۵	۳۴/۱۱	۳۴/۱۷	۳۴/۱۷	May
۳۸/۴۲	۳۸/۳۵	۳۸/۴۴	۳۸/۴۴	۳۸/۶۹	۳۸/۶۵	۳۸/۷۱	۳۸/۷۱	Jun
۴۱/۶۸	۴۱/۶۰	۴۱/۷۰	۴۱/۷۰	۴۱/۹۵	۴۱/۹۰	۴۱/۹۶	۴۱/۹۷	Jul
۳۶/۳۱	۳۶/۲۴	۳۶/۳۳	۳۶/۳۳	۳۶/۴۰	۳۶/۳۶	۳۶/۴۱	۳۶/۴۱	Aug
۳۲/۷۵	۳۲/۷۱	۳۲/۸۰	۳۲/۸۰	۳۲/۷۸	۳۲/۷۵	۳۲/۸۱	۳۲/۸۱	Sep

جدول ۵. میانگین دمای سطح داخلی دیوار ترومب و صفحات فتوولتاییک به سیلسیوس

ماه (اوقات سرد)	دمای سطح اتاق اول با سطح درجه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر - چهار متر مربع فتوولتاییک - جایگاه B	دمای سطح داخلی صفحات فتوولتاییک	دمای سطح اتاق دوم با سطح درجه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر - چهار متر مربع فتوولتاییک - جایگاه B	دمای سطح داخلی صفحات فتوولتاییک
Jan	۶/۴۲	۷/۳۱	۵/۴۷	۶/۵۴
Feb	۷/۷۸	۸/۵۱	۶/۹۵	۷/۸۳
Mar	۱۱/۳۴	۱۱/۹۴	۱۰/۶۸	۱۱/۴۱
Apr	۱۸/۹۳	۱۹/۲۹	۱۸/۴۸	۱۸/۹۴
Oct	۱۸/۹۶	۱۹/۶۷	۱۸/۰۵	۱۸/۹۲
Nov	۱۱/۰۹	۱۱/۹۰	۱۰/۱۱	۱۱/۱۰
Dec	۶/۰۱	۶/۸۸	۵/۱۶	۶/۱۹
ماه (اوقات گرم)	دمای سطح اتاق اول با سطح درجه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر - چهار متر مربع فتوولتاییک - جایگاه B	دمای سطح داخلی صفحات فتوولتاییک	دمای سطح اتاق دوم با سطح درجه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر - چهار متر مربع فتوولتاییک - جایگاه B	دمای سطح داخلی صفحات فتوولتاییک
May	۲۴/۲۹	۲۴/۳۵	۲۴/۴۰	۲۴/۴۵
Jun	۲۸/۸۷	۲۸/۸۴	۲۹/۰۳	۲۸/۹۸
Jul	۳۱/۴۳	۳۱/۴۴	۳۱/۵۹	۳۱/۵۹
Aug	۲۷/۸۳	۲۸/۰۸	۲۷/۷۴	۲۸/۰۱
Sep	۲۳/۳۹	۲۳/۸۰	۲۳/۰۹	۲۳/۵۳

جدول ۶. آسایش حرارتی با شاخص PMV

ماه (اوقات سرد)	اتاق اول با سطح دریچه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر - چهار متر مربع فتوولتاییک - جایگاه B	اتاق دوم با سطح دریچه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر - چهار متر مربع فتوولتاییک - جایگاه B	ماه (اوقات گرم)	اتاق اول با سطح دریچه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر - چهار متر مربع فتوولتاییک - جایگاه B	اتاق دوم با سطح دریچه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر - چهار متر مربع فتوولتاییک - جایگاه B
Jan	-۶/۰۸	-۶/۰۳	May	-۰/۴۲	-۰/۴۸
Feb	-۵/۵۷	-۵/۵۴	Jun	۰/۹۱	۰/۸۳
Mar	-۴/۵۷	-۴/۵۶	Jul	۱/۹۳	۱/۸۴
Apr	-۲/۳۴	-۲/۳۷	Aug	۰/۱۲	۰/۱۰
Oct	-۳/۰۰	-۲/۹۷	Sep	-۰/۹۷	-۰/۹۷
Nov	-۵/۸۱	-۵/۷۶	-	-	-
Dec	-۶/۸۲	-۶/۷۶	-	-	-

## بحث

مطالعه هو و همکاران (Hu et al., 2017, 81-93) برای اتاقی به ابعاد ۳/۸ در ۳/۹ به ارتفاع ۲/۶ متر و سطح دیوار ترومب آجری یک در ۲/۱۰ متر با فاصله هوایی ۰/۲۵ متر، ابعاد دریچه‌ها ۰/۴ در ۰/۱۲ متر، سه جایگاه از صفحات (مطابق شکل ۱) را در آب‌وهوای چین در نظر گرفتند. اتاق فاقد پنجره بود. در ماه‌های تابستان (جون، جولای، آگوست و سپتامبر) و زمستان (دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس) دریچه‌ها در طول روز و شب به ترتیب، بدین صورت باز و بسته هستند: ۱ و ۳ باز، ۲ و ۴ بسته، ۱ و ۴ بسته هستند؛ با زاویه ۳۰ درجه از صفحات به ترتیب، در ماه دسامبر مقدار گرما ۸۸/۸ کیلووات ساعت بر متر مربع (۳۱۹۶۸۰ کیلوژول) بود و مقدار برق تولیدی برای کل سال برابر ۱۱۳/۲۳ کیلووات ساعت (۴۰۷۶۲۸ کیلوژول) بود و بیشترین دمای اتاق در دسامبر به ترتیب، برای جایگاه A، B و C، سه، پنج و ۱۱ درجه سیلسیوس بود و دمای سطح برای ماه جولای به ترتیب جایگاه‌ها، هشت، ده و هفت درجه سیلسیوس بود. در این مطالعه با سطح شش متر مربعی از دیوار ترومب، در ماه دسامبر، دریچه‌ها از هشت صبح تا چهار بعد از ظهر باز هستند و بقیه شبانه روز بسته هستند. با زاویه ۳۰ درجه و چهار متر مربع از این صفحات، سطح دریچه ۱۸ درصد و فاصله هوایی ۰/۰۵ متر، مقدار گرمای دریافتی به ترتیب، برای آجر، ۴۶۳۲۳/۸۷۶ کیلوژول (یعنی حدود ۴۴۸۲/۹۵ کیلوژول در سه روز از ماه دسامبر) بود که با مطالعه هو و همکاران ۲۷۳۳۵۶ کیلوژول (درصد اختلاف، ۱۴/۴ درصد) متفاوت است. مقدار برق تولیدی با زاویه ۳۰ درجه در کل سال برابر ۲۸۲۰۰۵۲ کیلوژول (درصد اختلاف، ۱۴/۴ درصد) است. دمای اتاق در ماه دسامبر، به ترتیب جایگاه‌ها برابر، ۹/۴۰، ۹/۴۸ و ۹/۴۱ درجه سیلسیوس است. دمای سطح اتاق و فتوولتاییک در جایگاه B، به ترتیب در ماه در ماه جولای ۳۱/۴۳ و ۳۱/۴۴ درجه سیلسیوس است. مطالعه لین و همکاران (Lin et al., 2019, 47-57) برای اتاقی به ابعاد ۳/۸ در ۳/۹ به ارتفاع ۲/۶ متر و سطح دیوار ترومب ۱/۷ در ۰/۹ متر، ابعاد دریچه‌ها ۰/۸ در ۰/۸ متر، دو جایگاه A و C با سلول‌های مونوکریستال سیلیکون مورد بررسی قرار گرفت. در روز از ساعت ۹

صبح تا ۴ بعد از ظهر، دریچه‌های داخلی باز و در شب، بسته هستند. گرمای به دست آمده در سه روز از ماه دسامبر با جایگاه C و A، به ترتیب، برابر ۳۵/۷۴ و ۲۶/۴۹ مگاژول (۳۵۷۴۰ و ۲۶۴۹۰ کیلوژول) بود. در این مطالعه با جایگاه A از صفحات در ماه دسامبر، ۵۴۸۷۹/۳۲۶ کیلوژول گرما (یعنی حدود ۵۳۱۰/۹۰ کیلوژول در سه روز) حاصل می‌شود. در جایگاه C و A به ترتیب، ۳۱۲۵۷ و ۲۱۱۷۹ کیلوژول (درصد اختلاف به ترتیب، ۱۲/۵ و ۲۰ درصد) با مطالعه لین و همکاران تفاوت دارد و کمتر است. علت اختلافات می‌تواند به دلیل شرایط شبیه‌سازی و اقلیم متفاوت باشد.

## نتیجه‌گیری

با پیشرفت فناوری، لازم است، تجهیزات کارا شوند، بنابراین، در این پژوهش عملکرد یک دیوار ترومب فتوولتاییک در ساختمان مسکونی متداول مشهد مورد بررسی قرار می‌گیرد. اتاقی به حجم ۱۲۰ مترمکعب مدنظر است، که این ابعاد با توجه به ابعاد متداول یک فضای نشیمن در ساختمان‌های مسکونی میان‌مرتبه در مشهد انتخاب شده است. ابتدا دو اتاق با دیوار ترومب آجری و بتنی به ضخامت ۲۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد، سپس، ابعاد دریچه‌ها (۱۸ درصد سطح دیوار ترومب و سه‌بیستم (3/20) ارتفاع دیوار ترومب) و سطح پوشش متفاوت صفحات فتوولتاییک در جایگاه B (BIPVMTW) (دو و چهار متر مربع) در نظر گرفته شد، در مرحله بعدی با ثابت نگه داشتن سطح دریچه‌ها (۱۸ درصد سطح دیوار ترومب) و تغییر فاصله هوایی (۰/۱ و ۰/۰۵ متر) شبیه‌سازی انجام شد، سپس، دو جایگاه از صفحات فتوولتاییک A (BIPVGTW) و C (BIPVBTW) در نظر گرفته شد. سیستم‌های کمکی خاموش فرض شدند. دریچه‌ها در دیوار ترومب از ساعت ۸ صبح تا ۴ بعد از ظهر باز و در بقیه شبانه‌روز بسته هستند. نتایج نشان می‌دهد که گرمای دریافتی با دیوار ترومب بتنی بیشتر از آجری است. هرچقدر پوشش صفحات فتوولتاییک روی دیوار ترومب بیشتر شود، گرمای دریافتی و دمای اتاق کمتر خواهد شد. سطح دریچه بیشتر، گرمای دریافتی بیشتری به اتاق می‌دهد و دمای اتاق افزایش می‌یابد، بنابراین، وضعیت دریچه‌ها با ۱۸ درصد سطح از دریچه‌ها با سه‌بیستم ارتفاع بهتر است. با کم شدن فاصله هوایی گرمای دریافتی بیشتر می‌شود. گرمای دریافتی با اتاق با دیوار ترومب آجری و بتنی به ضخامت ۲۰ سانتیمتر، سطح دریچه ۱۸ درصد، فاصله هوایی ۰/۰۵ متر و شیشه تک‌لایه از بقیه حالات بیشتر است و مقدار آن به ترتیب، برابر ۲۵۷۶۵۲/۳۳۱ و ۳۰۷۹۶۳/۶۷۸ کیلوژول است. از آنجایی که میزان تولید برق با افزایش صفحات، بیشتر است، بنابراین، سطح چهار متر مربعی از این صفحات پیشنهاد می‌شود که مقدار آن برابر ۵۴۸/۷۴ کیلووات ساعت (۹۸۷۷۳۲ کیلوژول) است. صفحات فتوولتاییک روی دیوار خازن B) نسبت به روی شیشه A) یا در فاصله هوایی C) از نظر گرمای دریافتی، آسایش حرارتی و تولید برق برتری دارد. بنابراین، به ترتیب، جایگاه B، A و C از صفحات فتوولتاییک در اوقات سرد سال پیشنهاد می‌شود، در حالی که این موضوع برای اوقات گرم سال برعکس است. آسایش حرارتی در اتاق دوم با دیوار ترومب بتنی وضعیت بهتری نسبت به اتاق اول با دیوار ترومب آجری دارد، به طوری که در ماه اکتبر به ترتیب، ۳/۰۰- و ۲/۹۷- است. دمای سطح داخلی صفحات فتوولتاییک بالاتر از قسمت‌های بدون این صفحات است. دمای سطح داخلی صفحات فتوولتاییک و گرمای دریافتی ناشی از همرفت داخلی از پایین به بالای دیوار ترومب افزایش می‌یابد. می‌توان برای کاهش دمای سطح داخلی صفحات فتوولتاییک و افزایش بازدهی آن و عملکرد بهتر دیوار ترومب از مواد تغییر فاز دهنده استفاده کرد، بنابراین، مطالعه درباره پل فتوولتاییک با مواد تغییر فاز دهنده<sup>۵</sup> در دیوار ترومب و بهینه‌سازی آن و مطالعات تجربی در آینده پیشنهاد می‌شود.

## پی‌نوشت‌ها

1. BIPV-TW= Building Integrated Photo Voltaic- Trombe Wall
2. BIPVGTW= Building Integrated Trombe Wall with Photo Voltaic cells on the outer Glass
3. BIPVMTW= Building Integrated Trombe Wall with Photo Voltaic cells on a Massive wall
4. BIPVBTW= Building Integrated Trombe Wall with Photo Voltaic cells on Blind slats
5. Phase Change Material

## منابع

- رضی، طیب (۱۳۹۶). منطقه‌بندی اقلیمی ایران به روش کوپن- گایگر و بررسی جابه‌جایی مناطق اقلیمی کشور در سده بیستم. فیزیک زمین و فضا، ۴۳ (۲)، ۴۱۹-۴۳۹.
- شمعی، فائزه و باقری سبزواری، هادی (۱۴۰۰). گونه‌شناسی خانه‌های بافت جدید شهر مشهد. هفتمین کنگره سالانه بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران. <https://civilica.com/doc/1374443>.
- طاهری، زهرا، عباسپور فرد، محمدحسین، طیبسی‌زاده، محمد، و ابوترابی زارچی، حسین (۱۳۹۲). تعیین شیب و جهت بهینه نصب سیستم‌های خورشیدی در شهر مشهد. دومین همایش ملی انرژی‌های نو و پاک، همدان. <https://civilica.com/doc/277102>.
- فرنود، فاطمه و محمودی زرنندی، مهناز (۱۳۹۴). معرفی سیستم دیوار ترومب فتوولتائیک با هدف کارکرد گرمایش بهینه ساختمان. اولین همایش ملی توسعه پایدار شهری، تهران.
- کلانتری، محسن و بهبهانی‌نیا، علی (۱۳۹۳). مدل‌سازی گذرای دیوار ترومب فتوولتائیک همراه با ذخیره‌سازی توسط مواد تغییر فازدهنده. رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث نوزدهم، صرفه‌جویی در مصرف انرژی (۱۳۹۹). (ویرایش چهارم). تهران: وزارت راه و شهرسازی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، دفتر تدوین مقررات ملی ساختمان.
- Abdullah, A.A., Attulla, F.S., Ahmed, O. K., & Algburi, S. (2022a). Effect of cooling method on the performance of PV/Trombe wall: Experimental assessment. *Thermal Science Engineering Progress*, 30, 101273-101283. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101273>.
- Abdullah, A.A., Atallah, F.S., Algburi, S., & Ahmed, O.K. (2022b). Impact of a reflective mirrors on photovoltaic/trombe wall performance: Experimental assessment. *Results in Engineering*, 16, 100706-100716. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100706>.
- Ahmed, O.K., Hamada, K.I., & Salih, A.M. (2019). Enhancement of the performance of Photovoltaic/Trombe wall system using the porous medium: an experimental and theoretical study. *Energy*, 171, 14-26. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.001>.
- Bruno, R., Bevilacqua, P., Cirone, D., Perrella, S., & Rollo, A.A. (2022). Calibration of the Solar Load Ratio Method to Determine the Heat Gain in PV-Trombe Walls. *Energies*, 15(1), 328-343. <https://doi.org/10.3390/en15010328>.
- Fung, T.Y.Y., & Yang, H. (2008). Study on the thermal performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic glazings. *Energy and Buildings*. 40(3), 341-350. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.002>.
- Hegazy, A. (2000). Comparative study of the performance of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy Conversion and Management*, 41(8), 861-881. [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00136-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00136-3).
- Hu, Z. He, W. Ji, J. Hu, D. Lv, S. Chen, H. Shen, Z. (2017). Comparative study on the annual

- performance of three types of building integrated photovoltaic (BIPV) Trombe wall system. *Applied Energy*, 194, 81-93. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.018>.
- Irshad, K., Algarni, S., Islam, N., Rehman, S., Zahir, M.H., Pash, A.A., & Pillai, S.N. (2022). Parametric analysis and optimization of a novel photovoltaic trombe wall system with venetian blinds: Experimental and computayional study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 34, 101958-101971. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101958>.
  - Irshad, K., Habib, k., & Thirumalaiswamy, N. (2015). Performance evaluation of PV-Trombe wall for sustainable building development. *Procedia CIRP*, 26, 624-629. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.116>.
  - Islam, N., Irsha, K., Zahir, M. H., & Islam, S. (2021). Numerical and experimental study on the performance of a photovoltaic Trombe wall system with venetian blinds. *Energy*, 218, 119542-119557. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119542>.
  - Jiang, B., Jie, J., & Yi, H. (2008). The influence of PV coverage ratio on the thermal and electrical performance of photovoltaic-Trombe wall. *Renewable Energy*, 33(11), 2491-2498. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.001>.
  - Jie, J., Hua, Y., Wei, H., Gang, P., Jiangping, L.C., & Bin, J. (2007). Modeling of a novel Trombe wall with PV cells. *Building and Environment*, 42(3), 1544-1552. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.01.005>.
  - Ji, J., Yi, H., He, W., & Pei, G. (2007). PV-Trombe wall design for buildings in composite climates. *Journal of Solar Energy Engineering*, 129(4), 431-437. <https://doi.org/10.1115/1.2770751>.
  - Lin, Y., Ji, J., Zhou, F., Ma, Y., Luo, K., & Lu. X. (2019). Experimental annumerical study on the performance of a built-middle PV Trombe wall system. *Energy and Buildings*, 200, 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.042>.
  - Lin, Y., Zhong, S., Yang, W., Hao, X., & Li, C.Q. (2021). Multi-objective design optimization on building integrated photovoltaic with Trombe wall and phase change material based on life cycle cost and thermal comfort. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101277-101291. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101277>.
  - Kaya, E.S., Aksel, M., Yigit, S., & Acikara, T. (2021). A numerical study on the effect of vent/wall area ratio on Trombe wall thermal performance. *Engineering Sustainability*, 174(5), 224-234. <https://doi.org/10.1680/jensu.20.00064>.
  - Koyunbaba, K.B., & Yilmaz, Z. (2012). The comparison of Trombe wall systems with single glass, double glass, and PV panels. *Renewable Energy*, 45, 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.02.026>.
  - Liping, W., & Anguri, L. (2006). A numerical study of Trombe wall for enhancing stack ventilation in buildings. *The 23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Geneva.
  - Peng, J., Lu, l., Yang, H., & Han, J. (2013). Investigation on the annual thermal performance of a photovoltaic wall mounted on a multi-layer façade. *Applied Energy*, 112, 646-656.
  - Rabani, M., Kalantar, V., & Rabani, M. (2017). Heat transfer analysis of a Trombe wall with a projecting channel design. *Energy*, 134, 943-950. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.066>.
  - Romero, R.L., Sanchez, R.J., Guerrero, D.M., Molina, F.J.L., & Alvarez, D.S. (2018).



Mitigating energy poverty: potential contributions of combining PV and building thermal mass storage in low-income households. *Energy Conversion Management*, 173, 65-80. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.058>.

- Sun, W., Ji, j., Lou, C., & He, W. (2011). Performance of PV-Trombe wall in winter correlated with south façade design. *Applied Energy*, 88(1), 224-231. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.002>.
- Taffesse, F., Verma, A., Singh, S., & Tiwari, G.N. (2016). Periodic modeling of the semi-transparent photovoltaic thermal-Trombe wall (SPVT-TW). *Solar Energy*, 135, 265-273. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.044>.
- Vats, K., Mishra, R.K., & Tiwari, A. (2012). A comparative study for a building integrated semi-transparent photovoltaic thermal (BISPV) system integrated into the roof with and without duct. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 2, 1-4.
- Xu, X., & Su, Y. (2013). Modeling of natural ventilation in the built-in photovoltaic-Trombe wall. *Applied Mechanics and Materials*, 448-453, 1537-1541. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.448-453.1537>.
- URL1 : [Climate.onebuilding.org/WMO\\_Region\\_2\\_Asia/IRN\\_Iran/index.html](http://Climate.onebuilding.org/WMO_Region_2_Asia/IRN_Iran/index.html).

#### COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Journal of Architecture and Urban Planning. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



نحوه ارجاع به این مقاله  
اصدقی، هدی و فیاض، ریما (۱۴۰۳). بررسی کارایی دیوار ترومب فتوولتائیک در ساختمان‌های مسکونی مشهد. نشریه علمی نامه معماری و شهرسازی، ۱۷ (۴۴)، ۵-۲۱.

DOI: 10.30480/AUP.2024.4501.1981

URL: [http://aup.journal.art.ac.ir/article\\_1347.html](http://aup.journal.art.ac.ir/article_1347.html)

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
رتال جامع علوم انسانی

## A study on the performance of photovoltaic Trombe wall in Mashhad residential buildings

**Hoda Asdaghi**

M. A. in Architecture and Energy, Department of Architectural Technology, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran (Corresponding Author)

**Rima Fayaz**

Professor, Department of Architectural Technology, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran

### Abstract

Recently, new combinations of passive solar systems are introduced to enhance their performance. Trombe wall is one of the popular passive solar systems which has been studied in different forms and in combination with various materials. The aim of the current research is to investigate the Trombe photovoltaic wall in residential buildings in Mashhad. The study was carried out using energy simulation by Energy Plus software. The vents of the Trombe wall are open from eight in the morning to four in the afternoon and closed for the rest of the day. Brick and concrete Trombe walls with photovoltaic coating panels are studied in three different positions, with varying air gaps, and different vents over the whole of a year. The variables are simulated in an integrated way. First, two rooms with 20-centimeter-thick brick and concrete Trombe walls were considered. Then, the dimensions of the vents (18% of the Trombe wall surface and 3/20 of the Trombe wall height), air gap (0.1 meters) and with different photovoltaic coverages (two and four square meters) were attached on the mass wall. In the next stage, by keeping the size of the vents fixed (18% of the surface of the Trombe wall) and changing the air gap (0.05 meters) the simulation was performed. Subsequently, the performance of photovoltaic panels on the glass and in the air gap were simulated. The dimensions of the room have been selected according to the dimensions of a living room in a typical residential building in Mashhad. The results show that for a room with a volume of 120 cubic meters with brick and concrete Trombe wall and 18% vent area, an air gap of 0.05 meters, and a coverage area of four square meters of photovoltaic panels, the received heat, electricity production, and thermal comfort significantly increase. The amount of received heat and electricity production are 257652.3, 307963.6, and 1975482 kilojoules, respectively. In October, thermal comfort was rated as cold. The heat received by the concrete Trombe wall is more than that of the brick one. As the coverage of the photovoltaic panels on the Trombe wall increased, the received heat and the temperature of the room decreased. Conversely, the greater the surface of the vents, the more heat is received in the room and the temperature of the room increases. The temperature of the inner surface of the photovoltaic panels and the heat received due to internal convection increases from bottom to the top of the Trombe wall. Photovoltaic panels on the massive wall perform better than those on the glass or in the air gap in terms of received heat, thermal comfort and electricity production. Therefore, it is suggested that photovoltaic panels be positioned on the massive wall, outer glass, and blind slats, respectively during the cold period of the year, while it would be the opposite for the hot period of the year.

**Keywords:** Passive solar systems, Trombe wall, photovoltaic Trombe wall, thermal comfort, EnergyPlus