

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۲/۰۸/۰۱

مریم فخاری^۱، شاهین حیدری^۲، ریما فیاض^۳

عوامل مؤثر بر تهویه غیرفعال دودکش خورشیدی (نمونه موردی: شهر اصفهان)^۴

چکیده

تهویه غیرفعال روشی کم‌مصرف از لحاظ انرژی است که می‌تواند هوای نامطلوب داخل را از ساختمان خارج کند. یکی از روش‌های تهویه غیرفعال استفاده از دودکش خورشیدی است که در یک کانال هوا، با استفاده از انرژی خورشید و با کمک پدیده اثر دودکشی تهویه فضاها را مجاور، تأمین می‌شود. در این پژوهش ابتدا عوامل مؤثر بر کارایی دودکش خورشیدی از جمله مصالح، عرض دیوار جاذب، مساحت خروجی هوا از دودکش بررسی شد. سپس تأثیر تعداد طبقات بر نرخ تهویه مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت در یک جدول مساحت فضاها را که در طبقات مختلف دودکش خورشیدی قادر به تأمین نیاز تهویه آن است، ارائه شد. همچنین عملکرد دودکش خورشیدی در فصول سرد سال بررسی شد. به دلیل رایج نبودن ساخت دودکش‌های خورشیدی، امکان دسترسی به نمونه‌های اجرا شده وجود ندارد، از این رو شبیه‌سازی کامپیوتری مدل‌ها، در نرم‌افزار انرژی پلاس به‌عنوان روش جایگزین برای مطالعات میدانی انتخاب شد. مدل‌های دودکش خورشیدی متصل به یک ساختمان اداری هفت طبقه در اقلیم گرم و خشک شهر اصفهان در روز ۲۱ تیرماه به‌عنوان نماینده یک روز گرم و ماه‌های گرم به‌صورت میانگین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع دودکش خورشیدی، قدرت تهویه آن را بالا می‌برد. همچنین مناسب‌ترین مصالح و ابعاد بهینه دیوار جاذب، ورودی و خروجی هوا نیز مشخص شد.

کلیدواژه‌ها: دودکش خورشیدی، تهویه غیرفعال، شبیه‌سازی انرژی، نرم‌افزار انرژی پلاس.

^۱ کارشناس ارشد معماری و انرژی، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، استان تهران، شهر تهران (نویسنده مسئول)
E-mail: maryamfakhari@ut.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، استان تهران، شهر تهران
E-mail: shahin_heidari@yahoo.com

^۳ استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، استان تهران، شهر تهران
E-mail: fayaz@art.ac.ir

^۴ این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد مریم فخاری با عنوان «بررسی اثر دودکش خورشیدی در کاهش بار حرارتی ساختمان‌های اداری در شهر اصفهان» به‌راهنمایی دکتر شاهین حیدری (استاد راهنمای اول) و دکتر ریما فیاض (استاد راهنمای دوم) در دانشکده معماری دانشگاه تهران است.

مقدمه

رشد مصرف انرژی در جوامع امروزی علاوه بر تشدید خطر اتمام سریع منابع فسیلی، جهان را با تغییرات تهدیدآمیزی مواجه نموده است؛ از این رو، در برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌گذاری‌های بین‌المللی، در راستای توسعه پایدار جهانی، بهره‌گیری هرچه بیشتر از منابع تجدیدپذیر و انرژی‌های پایدار اهمیت و جایگاه ویژه‌ای یافته است. بخش قابل ملاحظه‌ای از مصرف انرژی در بخش ساختمان و برای سرمایش، گرمایش و تهویه صورت می‌گیرد. از این رو استفاده از راهکارهای مناسب به منظور کاهش مصرف انرژی، به‌ویژه در ساختمان‌هایی با استفاده مداوم، به حفظ منابع موجود کمک قابل توجهی می‌کند. استفاده از سیستم‌های غیرفعال در ساختمان نه تنها این مشکل را برطرف می‌کند بلکه گامی مهم در جهت کاهش مصرف انرژی و آلودگی‌های محیط زیست است.

سیستم‌های غیرفعال خورشیدی به سیستم‌هایی اطلاق می‌شود که انرژی خورشیدی را بدون استفاده از انرژی ثانویه جمع‌آوری و ذخیره می‌کنند تا در زمان مناسب مورد استفاده قرار گیرد. با این شیوه، اجزای مختلف ساختمان به‌طور هم‌زمان انتظارات مطرح در زمینه معماری، تأمین ایستایی و ایمنی و بهینه‌سازی مصرف انرژی را در یک ساختمان برآورده می‌کند. زمانی که گردآوری انرژی و کاهش هزینه‌های تجهیزات و اجرا، جزء اولویت‌های اصلی طراحی محسوب شوند، این سیستم‌ها در بین دیگر سیستم‌های خورشیدی کارآمدترین خواهند بود (گیلانی، کاری، ۱۳۹۰).

دودکش خورشیدی یک سیستم غیرفعال خورشیدی برای تأمین تهویه با استفاده از اثر دودکشی است. دودکش خورشیدی شبیه به دودکش‌های متداول است با این تفاوت که دیوار رو به جنوب آن شیشه‌ای است و در واقع از شیشه، حفره و دیواره حجیم برای جذب انرژی خورشیدی تشکیل شده است. پرتوهای خورشید از شیشه عبور می‌کنند و جذب سطح دیواره جذب شده و هوای داخل دودکش را گرم می‌کنند. هوا با گرم شدن و کاهش تراکم طبق اثر دودکشی بالا می‌رود. این حرکت به بالا یک نیروی رانشی ایجاد می‌کند و باعث می‌شود که هوای زیرین از داخل اتاق جایگزین آن شود. بدین ترتیب تهویه طبیعی افزایش می‌یابد و باعث خروج آلودگی هوا از فضای داخل می‌شود (Miyazaki et al, 2006).

در ساعات روز دیواره جذب به‌عنوان ذخیره حرارت عمل می‌کند و باعث می‌شود عملکرد دودکش خورشیدی در ساعات طولانی پس از غروب هم ادامه داشته باشد و یا حتی صرفاً برای تهویه شبانه استفاده شود که این امر در اقلیم گرم و خشک کاربرد زیادی دارد (Pantavou et al, 2011).

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تهویه دودکشی اختلاف دمایی داخل و خارج است. در تابستان اختلاف دمایی داخل و خارج زیاد نیست، در نتیجه بهره‌مندی از اثر شناوری در دودکش معمولی که از قوانین تهویه دودکشی استفاده می‌کند، کافی نخواهد بود. با استفاده از دودکش خورشیدی اختلاف دمایی کافی با به حداکثر رساندن جذب خورشیدی به‌وجود می‌آید. ترکیب تابش و همرفت در دودکش خورشیدی منجر به حرکت قابل توجه هوا و در نتیجه افزایش تهویه می‌شود (Kha-nal et al, 2011). در ساختمان‌های اقلیم گرم و خشک در ساعات‌های تابش و برای جلوگیری از دریافت مستقیم و ورود گرد و غبار به‌داخل، پنجره‌ها معمولاً بسته هستند. بنابراین استفاده از دودکش خورشیدی می‌تواند تهویه مورد نیاز فضاها را فراهم نماید. از آنجا که وجود یک دودکش خورشیدی بر روی دیواره مقاومت حرارتی را افزایش می‌دهد، نه تنها از طریق تهویه، بلکه به‌وسیله کاهش دریافت و اتلاف گرما از طریق هدایت در دیواره‌ها نیز بر روی بار حرارتی ساختمان اثر می‌گذارد.

مزایای دودکش خورشیدی نسبت به تهویه طبیعی عبوری عبارتند از: (۱) حفظ حریم ساکنین زیرا تهویه عبوری به دلیل باز بودن پنجره، دید به فضای داخل را کنترل نمی‌کند؛ (۲) ایجاد آسایش حرارتی با حرکت هوای کمتر در فضای داخلی در حالی که تهویه عبوری باعث ایجاد سروصدا می‌شود و در صورت بالا رفتن سرعت هوای داخل به بیش از $m/s1$ ، شرایط غیرقابل تحملی به وجود می‌آید؛ (۳) دور نگه داشتن عوامل ناخواسته همچون گردوغبار، آلودگی و سروصدای خارج که ممکن است از بازشوها و روزنها وارد شود؛ (۴) افزایش آسایش حرارتی در طول شب‌های خشک و سرد و بدون باد تابستان که تهویه عبوری قدرت کمتری از حد لازم دارد. بنابراین دودکش خورشیدی یک سیستم تهویه طبیعی است که باعث ذخیره انرژی و کاهش هزینه‌ها می‌شود (Koronaki, 2012).

پیشینه تحقیق

کاربردهای دودکش‌های خورشیدی، محققان زیادی را به خود جلب کرده تا پارامترهایی را که تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آن دارند، کشف کنند. محققان بسیاری در مورد کاربرد دودکش‌های خورشیدی به اشکال گوناگون در بهبود تهویه طبیعی، به صورت نظری، عددی و مشاهداتی تحقیق کرده‌اند. روش‌های تحقیق شامل اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی کمیت‌هایی مثل دما و الگوهای جابه‌جایی هوا با استفاده از تکنیک‌های متفاوت و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و مطالعات تجربی است. اولین مطالعه بر روی دودکش‌های خورشیدی توسط بنسال و همکارانش در سال ۱۹۹۳ انجام شد. آنها با کمک یک مدل ریاضی برای وضعیت دائمی، افزایش پتانسیل تهویه را ضمن استفاده از دودکش خورشیدی در صورتی که سیستم به‌خوبی طراحی شده باشد، اثبات کردند (Bansal et al, 1994).

خداری و همکارانش نیز انواع مختلف دودکش‌های خورشیدی را با استفاده از مدل‌های آنالیزی بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که دودکش‌های خورشیدی در تولید جریان هوا بسیار مؤثرند. در صورت استفاده از دودکش خورشیدی، دمای اتاق به دلیل تهویه طبیعی ایجاد شده توسط دودکش خورشیدی، نزدیک به دمای محیط است. عملکرد دودکش خورشیدی در ساختمان‌های اداری با تهویه مطبوع نیز به صورت مشاهداتی مورد بررسی قرار گرفت و این نتیجه حاصل شد که در صورت استفاده از دودکش خورشیدی مصرف روزانه الکتریسیته دستگاه‌های تهویه کاهش می‌یابد (Khedari et al, 2000). ساندافورن و بوندیت به صورت آزمایشی تأثیر دودکش خورشیدی را بر افزایش تهویه هوای داخل همراه با بام مرطوب و بدون بام مرطوب بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که دودکش خارجی بسته به دمای محیط و میزان تابش خورشیدی، می‌تواند دمای داخل را ۱ تا ۳/۵ درجه کاهش دهد (Sudaporn, Bundit, 2009). جاستین و همکاران بر روی دودکش خورشیدی متصل به بام تحقیق کرده‌اند. نتایج نشان داده است که با دودکش خورشیدی روی بام، زمانی که اختلاف دمای داخل و خارج زیاد است، جریان هوا با کمک قدرت ترموسیفون بیشتر می‌شود. همچنین به این نتیجه رسیدند که تأثیر اختلاف دمای داخل و خارج، بیشتر از ضخامت عایق است (Justin et al, 2013).

آفونسو و الیویرا نشان دادند که افزایش جاذب حرارتی، جریان را در طول روز کاهش می‌دهد، اما باعث افزایش جریان در طول شب می‌شود. آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از عایق، کارایی سیستم را بالا می‌برد و ضخامت ۵ سانتی‌متر برای عایق کافی است (Afonso, Oliveira, 2000). چاروت و همکارانش نشان دادند که با افزودن جرم حرارتی، سرعت هوا در ساعات شب افزایش می‌یابد.

همچنین استفاده از دودکش خورشیدی در طول روز ۲۵ درصد افزایش سرعت هوا به همراه دارد (Charvat et al, 2004). راکش و چنگوانگ با بررسی عددی جریان هوا در دودکش خورشیدی نشان دادند که نرخ کلی جریان جرمی هوا در یک دودکش خورشیدی با دیوار عمودی، به شدت تحت تأثیر جریان معکوس و دمای هوا در خروجی کانال است (Rakesh, Chengwang, 2012).

میازاکی و همکارانش به بررسی عملکرد یک دودکش خورشیدی در یک ساختمان اداری تحت اقلیم توکیو ژاپن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با توجه به تهویه طبیعی ناشی از دودکش خورشیدی انرژی مورد نیاز روزانه در حدود ۹۰٪ در ماه ژانویه و در ماه فوریه کاهش یافت و این کاهش در طول سال در حدود ۵۰٪ بود (Miyazaki, 2006).

کروناکی سه دودکش خورشیدی متداول با کانال متصل به دیوار جاذب و دودکش خورشیدی با کانال مستطیل شکل و دو سطح شیشه‌ای را در نرم‌افزار انرژی پلاس بررسی کرد. نتایج نشان داد که قدرت سرمایش شبانه در دودکش خورشیدی با ارتفاع ۳ متر و عرض دیوار ۰/۱ متر و حفره هوایی ۰/۲ متر، بسته به موقعیت و جهت‌گیری در مدل اول رو به جنوب از ۲/۲۷ MJ/m-day تا ۱۰/۰ MJ/m-day و برای مدل سوم و مدل دوم ۱۴/۷ MJ/m-day رو به غرب است. مدل دوم رو به غرب نرخ جریان هوایی معادل ۹۸٪ بیشتر از مدل اول رو به جنوب ایجاد می‌کند (Koronaki, 2012).

بیان مسئله

به منظور استفاده بهینه از دودکش‌های خورشیدی، باید بررسی و مطالعه لازم برای تعیین بهترین گزینه صورت گیرد. عواملی همچون مصالح، ابعاد دیوار جاذب و ورودی و خروجی تأثیر زیادی بر قدرت تهویه دودکش خورشیدی دارند. اما مسئله این است که مناسب‌ترین مصالح و ابعاد بهینه برای دیوار جاذب و خروجی هوا از دودکش خورشیدی کدام است؟ علاوه بر آن تأثیر تعداد طبقات بر نرخ تهویه چگونه است و مساحت فضاهایی که دودکش خورشیدی در طبقات مختلف قادر به تأمین نیاز تهویه آن است، چقدر است؟ آیا دودکش خورشیدی در فصول سرد سال کمکی به کاهش بار حرارتی ساختمان می‌کند؟

روش تحقیق

برای بررسی عملکرد حرارتی دودکش خورشیدی سه روش مشاهداتی، شبیه‌سازی و محاسباتی وجود دارد. اما امکان دسترسی به دودکش خورشیدی ساخته شده وجود ندارد، بنابراین امکان اندازه‌گیری دماهای حقیقی در نمونه‌های واقعی، میسر نیست. به همین منظور شبیه‌سازی کامپیوتری، به عنوان روش جایگزین انتخاب شده است. شبیه‌سازی کامپیوتری محیطی مجازی را به منظور بررسی جزء به جزء رفتار حرارتی اجزای ساختمان فراهم می‌آورد. استفاده از نرم‌افزارهای محاسبات عددی پیشرفته، روش جایگزین مناسبی برای مطالعات مشاهداتی است. در این روش، امکان ساخت هرگونه بنایی در هر شرایط اقلیمی در محیط مجازی وجود دارد و نتایج به دست آمده نیز هیچگونه محدودیت عددی و زمانی ندارند (مسندی و حیدری، ۱۳۷۹).

در این تحقیق شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار انرژی پلاس^۱ نسخه ۲۰۱۰ انجام شده است. انرژی پلاس، نرم‌افزار شبیه‌سازی قدرتمندی است که بدون هیچ واسطه گرافیکی از آن به منظور شبیه‌سازی

ساختمان و در زمینه مدل کردن مقدار انرژی به کار رفته در ساختمان استفاده می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی هم به صورت عددی و هم نمودار قابل ارائه هستند. ابتدا مدل‌ها در نرم‌افزار اکوتکت^۲ به عنوان واسط گرافیکی شبیه‌سازی شدند و سپس هندسه مدل‌ها برای انجام محاسبات، به نرم‌افزار انرژی پلاس منتقل شد. اطلاعات مربوط به مصالح استفاده شده در نرم‌افزار، برگرفته از استاندارد اشری است (ASHREA Standard 55).

فرضیات

در فرآیند ورود داده‌های اولیه استفاده شده برای شبیه‌سازی، فرضیاتی در نظر گرفته شده است که تا حتی‌الامکان به شرایط واقعی نزدیک باشد. این فرضیات شامل طرح معماری، مصالح و ابعاد فضاها و موقعیت ورودی و خروجی هوا به فضاهای اصلی و دودکش خورشیدی است. طرح معماری شامل یک دودکش خورشیدی متصل به ساختمان اداری فرضی هفت طبقه است. ابعاد اتاق‌ها در مدل‌های شبیه‌سازی شده، 8×6 متر و با ارتفاع $2/7$ متر است که به یک دودکش خورشیدی متصل هستند. یک ورودی هوا برای هر اتاق به ابعاد $2 \times 1/3$ متر در نظر گرفته شده است. ورودی هوا به دودکش از طریق یک دریچه به ارتفاع $0/5$ متر، به عرض $1/5$ متر و به فاصله $0/3$ متر از کف در هر طبقه است.

عمق دودکش خورشیدی ۲ متر و ارتفاع آن ۱ متر بالاتر از سقف آخرین طبقه یعنی ۲۲ متر فرض شده است. برای تعیین عرض بهینه جهت دیوار جاذب و مساحت خروجی هوا از دودکش خورشیدی، عرض دیوار جاذب به ترتیب $0/5$ ، 1 ، $1/5$ و 2 متر و مساحت بازشوی خروجی به ترتیب $0/5$ ، 1 ، 2 و 4 مترمربع در نظر گرفته شده است. خروجی هوا از دودکش برای رسیدن به حداکثر کارایی در بالاترین قسمت دودکش در نظر گرفته شده است.

پوشش کف‌ها بتنی است و بام از بتن و یک لایه عایق تشکیل شده است. دیوار پوسته خارجی به ترتیب از خارج به داخل از 10 سانتی‌متر بتن همراه با 5 سانتی‌متر عایق تشکیل شده است و دیوار حد فاصل بین اتاق و دودکش که به عنوان جاذب عمل می‌کند از داخل به خارج به ترتیب، از 5 سانتی‌متر عایق و 10 سانتی‌متر بتن تشکیل شده است. خصوصیات مصالح استفاده شده در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح

مصالح	ضخامت [m]	ضریب هدایت حرارت $[W/m \cdot K]$ (λ)	وزن مخصوص $[kg/m^3]$	ظرفیت گرمایی ویژه $[J/kg \cdot K]$
عایق پلی استایرن	۰/۰۵	۰/۰۲۳	۳۲	۱۲۱۰
بتن	۰/۱۰	۱/۷۵	۲۳۰۰	۹۰۰
آجر	۰/۱۰	۰/۷	۱۹۲۰	۷۹۰
فولاد	۰/۰۲	۴۵/۲۸	۷۸۲۴	۵۰۰
آلومینیوم	۰/۰۲	۲۲۱	۲۷۴۰	۸۹۰

منبع: استاندارد اشری

جدول ۲. مشخصات شیشه‌ها

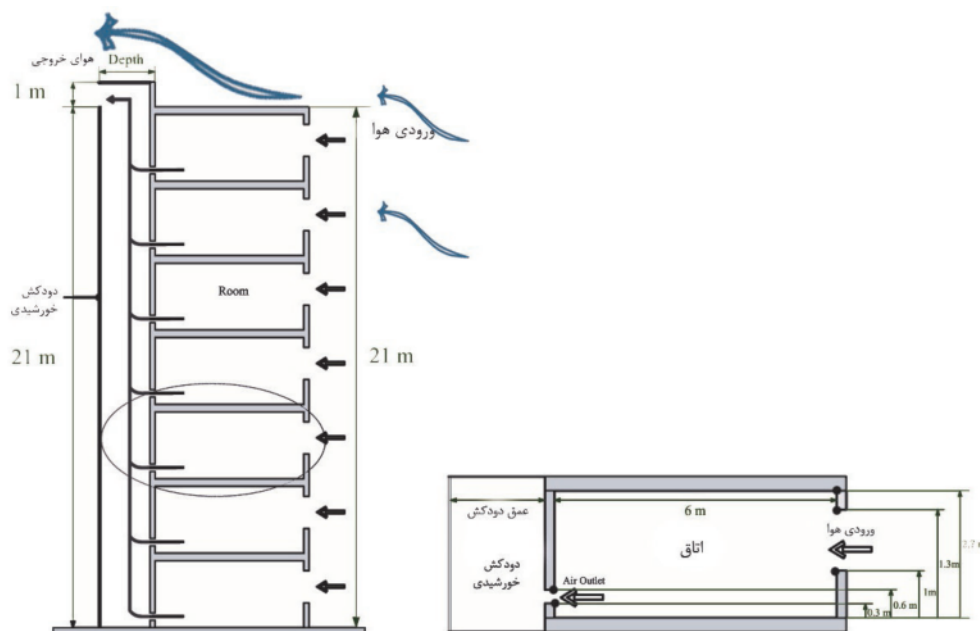
ضریب هدایت حرارت (λ) [W/m. K]	ضریب ضریب رؤیت	ضریب انعکاس پشت به اشعه	ضریب انعکاس رو به اشعه	ضریب انتقال	ضخامت [mm]	شیشه
۰/۹	۰/۸۵	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۶۳	۳	بی‌رنگ کم‌گسیل
۰/۹	۰/۹۱۳	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹	۰/۸۹۹	۳	کم‌آهن
۰/۹	۰/۱۴	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۶۳	۶	انعکاسی با پوشش فولاد ضد زنگ ۱۴٪ بی‌رنگ
۰/۹	۰/۸۹۸	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۸۳	۳	بی‌رنگ

منبع: استاندارد اشری

خروجی هوا از دودکش خورشیدی در جبهه رو به شمال قرار گرفته است و باد غالب منطقه از سمت جنوب‌غربی است. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار، احتمال برگشت هوا به داخل دودکش خورشیدی زیاد نیست (شکل ۱).

شبیه‌سازی

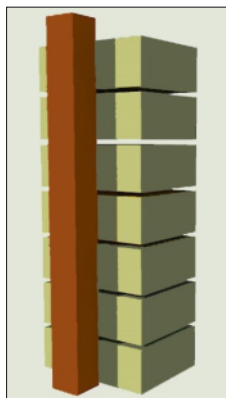
برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار انرژی‌پلاس استفاده شده است. انرژی‌پلاس یک برنامه قدرتمند آنالیز انرژی و شبیه‌سازی حرارتی است که بر اساس داده‌های ورودی توسط استفاده‌کننده، خروجی‌های متفاوتی را ارائه می‌دهد. ابتدا مدل اصلی از ساختمان هفت طبقه و دودکش خورشیدی قرار گرفته در جبهه جنوبی ساختمان شبیه‌سازی شد (شکل ۱).



شکل ۱. مسیر حرکت هوا

منبع: نگارندگان

مدل‌های مختلف با ابعاد متفاوت خروجی هوا، دیوار جاذب و مصالح شبیه‌سازی شدند. شبیه‌سازی‌ها در یک روز نمونه در فصل گرم (۳۱ تیرماه) انجام شد. بر اساس داده‌های آب‌وهوایی نرم‌افزار انرژی‌پلاس برای شهر اصفهان (URL 1)، متوسط دمای هوا در ساعات اداری در این روز ۳۳ درجه سلسیوس، سرعت باد در محیط ۱/۸ متر بر ثانیه و تابش خورشیدی ۶۵۰ وات بر مترمربع است. شکل ۲ مدل فرضی را نشان می‌دهد.

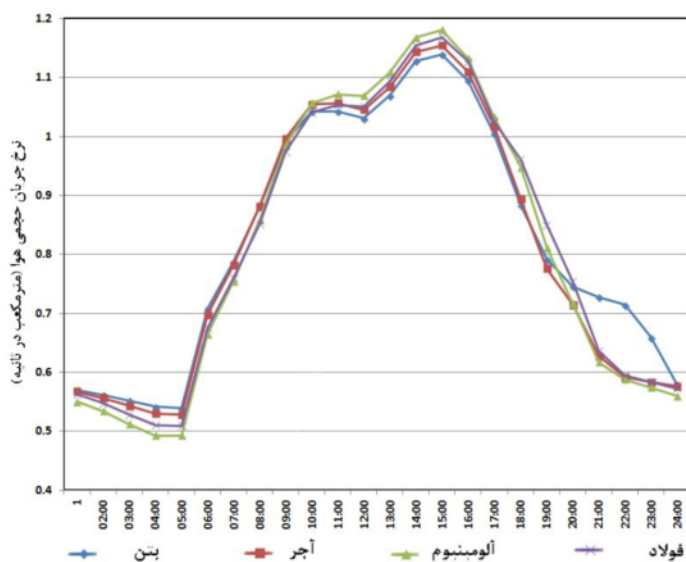


شکل ۲. مدل شبیه‌سازی شده

منبع: نگارندگان

تأثیر جنس دیوار جاذب بر روی نرخ تهویه

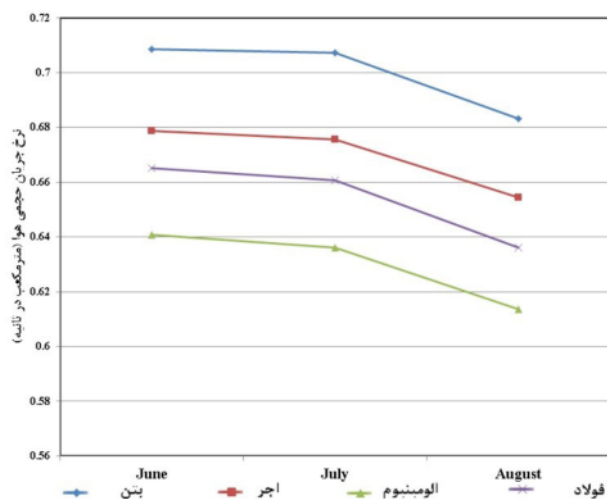
به‌منظور بررسی تأثیر مصالح دیوار جاذب بر نرخ جریان هوا، مطابق جدول ۱ مصالح آجر، بتن، آلومینیوم و فولاد برای دیواره داخلی دودکش خورشیدی انتخاب شد. شکل ۳ تأثیر این مصالح را بر نرخ جریان جمعی هوا نشان می‌دهد.



شکل ۳. جریان جمعی هوا با مصالح مختلف در سطح جاذب در ۳۱ تیرماه

منبع: نگارندگان

همان‌طور که در شکل فوق مشخص است، در طول روز بیشترین میزان تهویه در دیوار جاذب با مصالح آلومینیوم است پس از آن فولاد، آجر و بتن دارند. مصالح فلزی به دلیل انعکاس تابش خورشیدی به داخل دودکش در ساعاتی که تابش خورشیدی وجود دارد، تأثیر بیشتری بر نرخ جریان هوا می‌گذارد. اما در طول شب نرخ تهویه ایجاد شده به کمک دیوار جاذب بتنی بیشترین میزان را دارد و پس از آن آجر، فولاد و آلومینیوم است. این امر به دلیل خاصیت جرم حرارتی مصالح استفاده شده است. بدین ترتیب که قابلیت ذخیره حرارتی و بازپس دادن آن در ساعاتی که تابش وجود ندارد، باعث افزایش کارایی دودکش خورشیدی در ساعات شب با کمک مصالح با جرم حرارتی بالا می‌شود. نمودار زیر جریان حجمی هوا را در ماه‌های گرم (ژوئن، جولای و آگوست)، نشان می‌دهد.



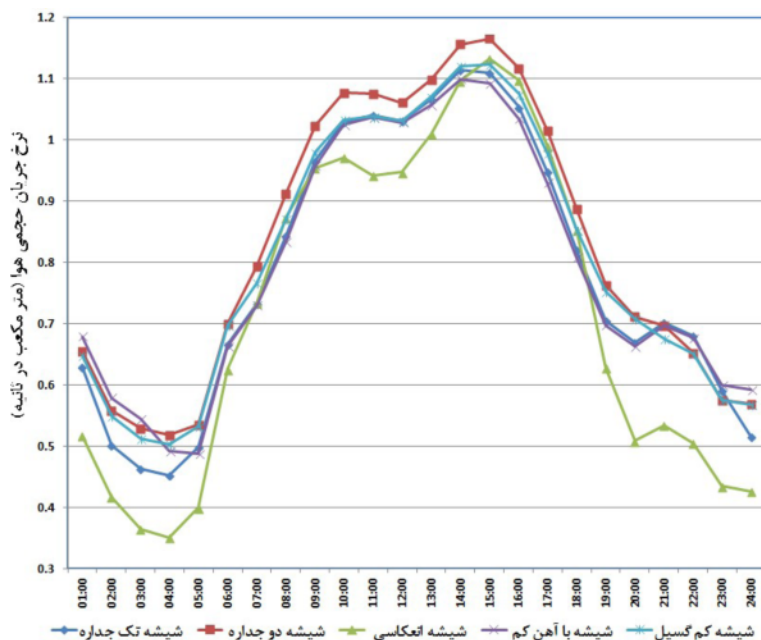
شکل ۴. جریان حجمی هوا با مصالح مختلف در سطح جاذب در ماه‌های گرم

منبع: نگارندگان

میانگین ماهیانه نرخ تهویه ایجاد شده به کمک دیوار جاذب بتنی بیشترین میزان را دارد و پس از آن آجر، فولاد و آلومینیوم است و همان‌طور که ذکر شد، این امر به دلیل خاصیت جرم حرارتی مصالح استفاده شده است.

تأثیر جنس شیشه بر روی نرخ تهویه

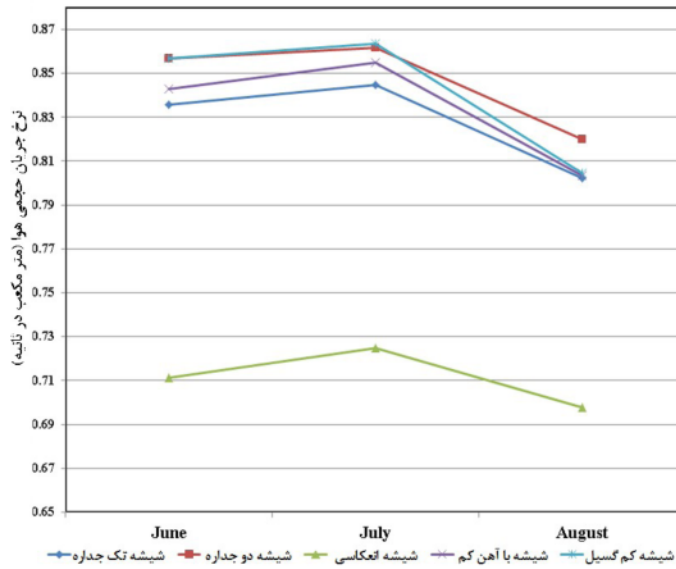
از دیگر عوامل مؤثر بر عملکرد دودکش خورشیدی، جنس شیشه است. شیشه‌های مختلف ضرایب انعکاس، انتقال و هدایت متفاوتی دارند. برای بررسی تأثیر هر کدام از این ضرایب بر عملکرد دودکش خورشیدی، پنج شیشه مختلف انتخاب شد که عبارتند از شیشه تک‌جداره ۳ میلی‌متری، دوجداره، شیشه با آهن کم (به علت وجود آهن کمتر انتقال حرارت بیشتر است)، شیشه کم‌گسیل و شیشه انعکاسی. مشخصات هر یک از این شیشه‌ها در جدول ۲ بیان شده است.



شکل ۵. جریان حجمی کلی هوا در شیشه‌های مختلف در ۳۱ تیرماه

منبع: نگارندگان

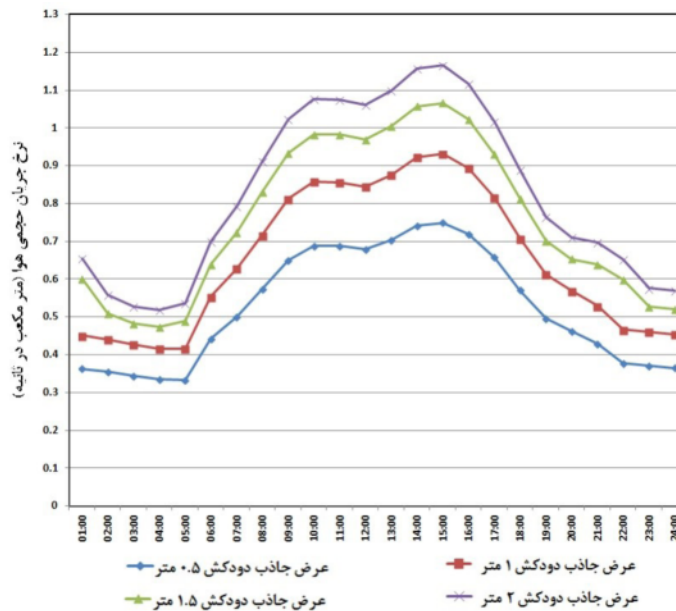
همان‌طور که در شکل ۵ نیز مشخص است، نرخ جریان حجمی هوا در این شیشه‌ها در ساعات روز به ترتیب عبارتند از: شیشه دو جداره، شیشه کم‌گسیل، شیشه معمولی، شیشه با آهن کم و شیشه انعکاسی. در میان این پنج شیشه، شیشه‌های دو جداره (لایه شیشه بی‌رنگ، ۱۳ میلی‌متر گاز آرگن و یک لایه شیشه بی‌رنگ) بهترین نوع شیشه در بین شیشه‌های ذکر شده برای دودکش‌های خورشیدی است. نرخ جریان حجمی هوا در این شیشه‌ها به دلیل پایین بودن ضریب هدایت، از شیشه‌های دیگر بیشتر است. ضریب هدایت در شیشه‌های دیگر با هم برابر است اما نرخ جریان هوا در آنها متفاوت است. دلیل این امر تفاوت در ضرایب انتقال حرارت و انعکاس این شیشه‌ها است. ضریب انعکاس شیشه‌های انعکاسی بسیار زیاد است. به همین دلیل این شیشه‌ها نرخ جریان حجمی هوا را به شدت کاهش می‌دهند. ضریب انعکاس شیشه معمولی و شیشه با آهن کم، تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارند. ضریب انتقال حرارت به ترتیب در شیشه‌های با آهن کم و شیشه‌های معمولی و شیشه‌های کم‌گسیل بیشتر است. بدین ترتیب ضریب انتقال حرارت کمتر و ضریب انعکاس بیشتر شیشه دودکش خورشیدی، منجر به کاهش نرخ جریان حجمی هوا می‌شود. لازم به ذکر است این تحلیل‌ها مربوط به شیشه‌هایی با مشخصات ذکر شده است و چنانچه شیشه‌هایی از این نوع با ضرایب متفاوت استفاده شود، ممکن است نتایج تغییر کند. شکل ۶ جریان حجمی هوا با شیشه‌های مختلف را در ماه‌های گرم (ژوئن، جولای و آگوست) نشان می‌دهد.



شکل ۶. جریان حجمی هوا با شیشه‌های مختلف در ماه‌های گرم
منبع: نگارندگان

تأثیر عرض دیوار جاذب بر نرخ تهویه

دیوار جاذب یکی از عوامل مؤثر بر نرخ تهویه است. برای بررسی تأثیر ابعاد دیوار جاذب بر نرخ جریان حجمی کلی در دودکش خورشیدی، عرض دیوار جاذب به ترتیب ۱/۵، ۱، ۰/۵، ۲ متر در نظر گرفته شده است. شکل ۷ تأثیر تغییرات عرض دودکش خورشیدی را بر نرخ کلی جریان حجمی نشان می‌دهد.

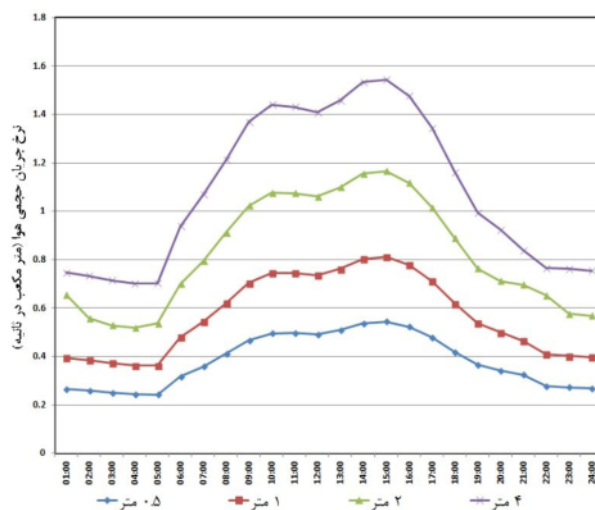


شکل ۷. نرخ جریان حجمی هوا با ابعاد متفاوت دیوار جاذب
منبع: نگارندگان

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، با افزایش عرض دیوار جاذب نرخ جریان حجمی هوا بیشتر می‌شود، اما این تغییرات خطی نیست. نرخ حجمی هوا در عرض دیوار جاذب معادل ۱ متر حدود $1/24$ برابر عرض $0/5$ است با افزایش عرض دیوار جاذب از ۱ به $1/5$ متر نرخ جریان حجمی هوا $1/16$ برابر می‌شود و عرض ۲ متر دیوار جاذب نرخ جریان حجمی معادل $1/09$ برابر عرض $1/5$ متر ایجاد می‌کند.

تأثیر مساحت بازشوی خروجی بر نرخ تهویه

مساحت بازشوی خروجی نیز از عوامل تأثیرگذار بر نرخ تهویه است. برای بررسی تأثیر ابعاد دیوار جاذب بر نرخ جریان حجمی کلی در دودکش خورشیدی، مساحت بازشو به ترتیب $0/5$ ، ۱، ۲ و ۴ مترمربع در نظر گرفته شده است.



شکل ۸. نرخ جریان حجمی هوا با مساحت خروجی متفاوت

منبع: نگارندگان

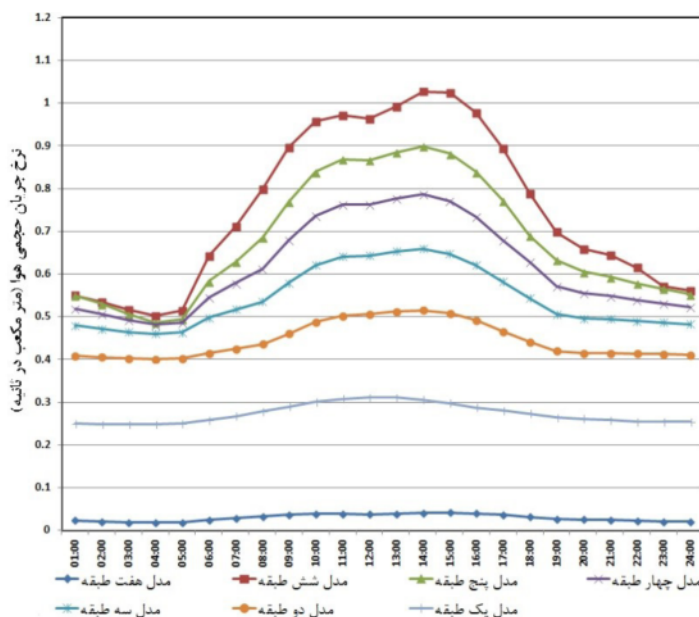
همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، هرچه مساحت خروجی دودکش خورشیدی بزرگ‌تر باشد، نرخ جریان حجمی کلی که از دودکش خارج می‌شود بیشتر می‌شود. بنابراین بهتر است تا حد امکان، مساحت خروجی را بیشتر کرد.

تأثیر تعداد طبقات بر نرخ جریان هوا

تاکنون بررسی‌ها بر مبنای یک ساختمان هفت‌طبقه بود. برای بررسی نرخ جریان هوا در ساختمان‌هایی با تعداد طبقات کمتر، شش مدل دیگر در نرم‌افزار انرژی پلاس شبیه‌سازی شدند. در این شش مدل، نسبت بهینه ارتفاع برای دودکش خورشیدی معادل $H/11$ در نظر گرفته شده است (فخاری، ۱۳۹۰). بنابراین عمق و ارتفاع دودکش خورشیدی در مدل‌های مختلف به ترتیب زیر است، در ضمن در شکل ۹ مقایسه نرخ جریان حجمی هوا در این مدل‌ها آمده است:

- مدل شش طبقه: ارتفاع دودکش خورشیدی ۱۹ متر و عمق آن $1/7$ متر
- مدل پنج طبقه: ارتفاع دودکش خورشیدی ۱۶ متر و عمق آن $1/45$ متر

- مدل چهار طبقه: ارتفاع دودکش خورشیدی ۱۳ متر و عمق آن ۱/۱۸ متر
- مدل سه طبقه: ارتفاع دودکش خورشیدی ۱۰ متر و عمق آن ۰/۹ متر
- مدل دو طبقه: ارتفاع دودکش خورشیدی ۷ متر و عمق آن ۰/۶۳ متر
- مدل یک طبقه: ارتفاع دودکش خورشیدی ۴ متر و عمق آن ۰/۳۶ متر



شکل ۹. نرخ جریان حجمی کلی هوا در ساختمان‌های یک تا هفت طبقه

منبع: نگارندگان

طبق شکل ۹ هرچه تعداد طبقات ساختمان بیشتر باشد، نرخ جریان حجمی کلی هوا (مجموع نرخ جریان تمام طبقات) بیشتر می‌شود. این در حالتی است که نسبت بهینه ارتفاع به عمق دودکش حفظ شده باشد.

با استفاده از رابطه (۱) می‌توان بر اساس تعداد استاندارد دفعات تعویض هوا در ساعت (طبق استاندارد اشرفی) مساحت فضاهایی را که دودکش خورشیدی در هر مدل و در هر طبقه قادر به تأمین تهویه آن است، بر اساس نرخ جریان حجمی هوا که از هر طبقه وارد دودکش خورشیدی می‌شود و همچنین نرخ جریان حجمی هوا را که در نهایت در هر مدل از دودکش خورشیدی خارج می‌شود، به دست آورد.

$$\text{ACH} = \frac{q \cdot 3600}{V} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن:

ACH: تعداد دفعات تعویض هوا در ساعت (بار در ساعت)

Q: جریان حجمی هوا (m³/s)

V: حجم فضا (m³)

جدول (۳) مساحت‌هایی را نشان می‌دهد که دودکش‌های خورشیدی در ساختمان‌های یک تا هفت طبقه و در هر طبقه قادر به تأمین تعویض هوای مورد نیاز آن است.

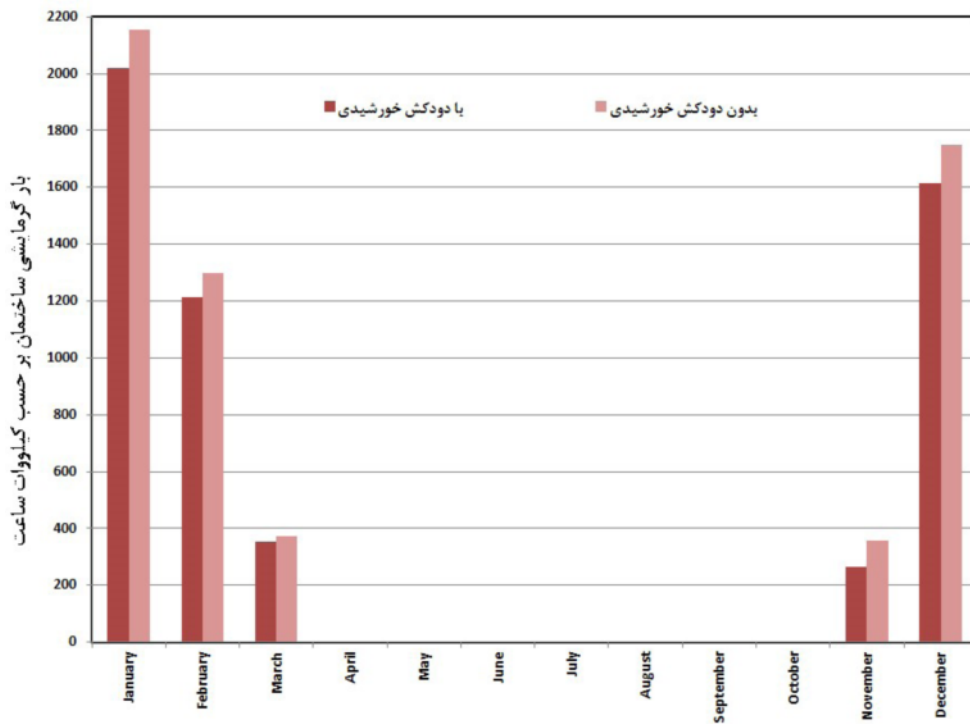
جدول ۳. مساحت فضاهایی که دودکش خورشیدی تهویه آن را تأمین می‌کند

مدل یک طبقه [m ²]	مدل دو طبقه [m ²]	مدل سه طبقه [m ²]	مدل چهار طبقه [m ²]	مدل پنج طبقه [m ²]	مدل شش طبقه [m ²]	مدل هفت طبقه [m ²]	طبقه
۹۹/۵	۷۱/۶	۶۱/۸	۴۸/۰۸	۳۶	۲۴/۴۰	۱۲/۸۱	طبقه اول
-	۷۶/۹۵	۶۹/۲۷	۵۶/۹۲	۴۵/۷۶	۳۵/۶۹	۲۵/۶۲	طبقه دوم
-	-	۷۶/۲۲	۶۵/۷۵	۵۵/۸۱	۴۷/۱۲	۳۸/۴۳	طبقه سوم
-	-	-	۷۴/۵۸	۶۵/۸۶	۵۸/۵۵	۵۱/۲۴	طبقه چهارم
-	-	-	-	۷۵/۶۲	۷۱/۲۱	۶۴/۰۵	طبقه پنجم
-	-	-	-	-	۸۱/۸۹	۷۶/۸۶	طبقه ششم
-	-	-	-	-	-	۸۹/۶۷	طبقه هفتم
۹۹/۵	۱۶۳/۷۸	۲۰۷/۴۱	۲۴۵/۳۴	۲۷۹/۰۸	۳۱۸/۸۸	۳۵۸/۶۹	مجموع

منبع: نگارندگان

عملکرد دودکش خورشیدی در فصول سرد

در فصول سرد با بستن ورودی‌های هوا از فضاهای اصلی به دودکش خورشیدی، یک زون گرم در مجاورت فضاهای اصلی ایجاد می‌شود و باعث کاهش بار گرمایش ساختمان می‌شود. شکل ۱۰ بار گرمایش ساختمان اداری هفت طبقه با ابعاد بهینه دودکش خورشیدی را قبل و بعد از استفاده از دودکش خورشیدی نشان می‌دهد.



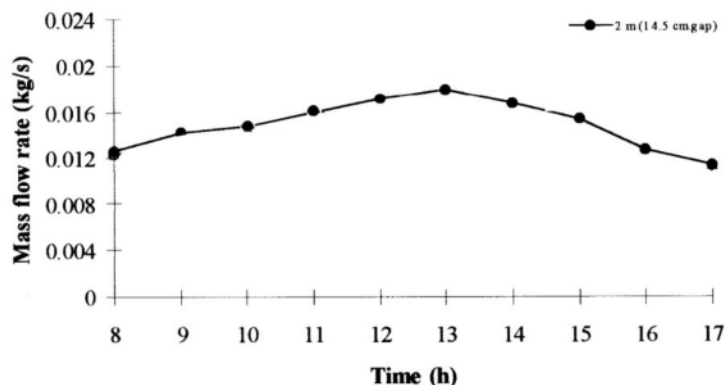
شکل ۱۰. بار گرمایش ساختمان

منبع: نگارندگان

بار گرمایشی سالانه این ساختمان برابر ۵۹۲۱ کیلووات ساعت است. استفاده از دودکش خورشیدی، این مقدار را به ۴۸۳۲/۰۶ کیلووات ساعت کاهش می‌دهد. بدین ترتیب دودکش خورشیدی با ابعاد بهینه بار گرمایش ساختمان را ۱۸/۵۲ درصد کاهش می‌دهد.

اعتبارسنجی شبیه‌سازی

برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی، از نتایج مشاهداتی ارائه شده (Hirunlabh et al, 1999) استفاده شده است. مدل مشاهداتی آنان یک دودکش خورشیدی با عمق ۱۴/۵ سانتی‌متر و عرض ۱ متر و ارتفاع ۲ متر است که به قسمت جنوبی اتاقی با ابعاد ۳/۳۵×۴/۴۵ متر و ارتفاع ۲/۶۸ متر متصل است. مصالح استفاده شده در جداره‌های اتاق، تخته چن‌دلا و تخته گچی^۲ است. پوشش سقف از موزاییک بتنی^۳ با ابعاد ۱/۵×۴۲×۳۳ سانتی‌متر است. کف از تخته چن‌دلا و تیر بتنی تشکیل شده است. دیوار جاذب دودکش خورشیدی از یک صفحه از جنس روی، عایق و تخته چن‌دلا به ضخامت ۰/۷، ۲۵ و ۴ میلی‌متر ساخته شده است. ضخامت شیشه استفاده شده در دودکش خورشیدی ۴ میلی‌متر است. دو ورودی هوا از اتاق به دودکش خورشیدی با ابعاد ۵×۲۵ سانتی‌متر در قسمت پایینی دودکش خورشیدی تعبیه شده است. دو خروجی هوا با همین ابعاد در قسمت بالا قرار دارد. مدلی با ارتفاع ۲ متر برای دودکش خورشیدی به ترتیب در ۷ و ۱۲ ماه دسامبر در شهر بانکوک اندازه‌گیری شدند (Hirunlabh et al, 1999). شکل ۱۱ نتایج مشاهداتی را بر اساس نرخ جریان جرمی هوا از ساعت ۸ تا ۱۵ نشان می‌دهد (Hirunlabh et al, 1999).

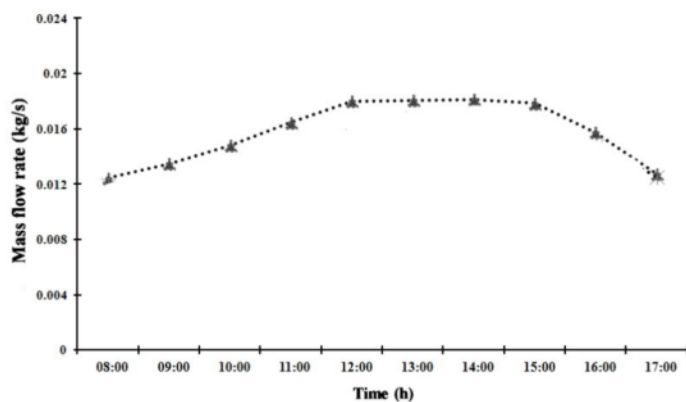


Hourly variations of air mass flow rate in MSW with 2 m height and gaps: 14.5 cm (12 December 1996).

شکل ۱۱. نرخ جریان جرمی هوا (ساعتی) در مدل مشاهداتی دودکش خورشیدی

منبع: Hirunlabh et al, 1999

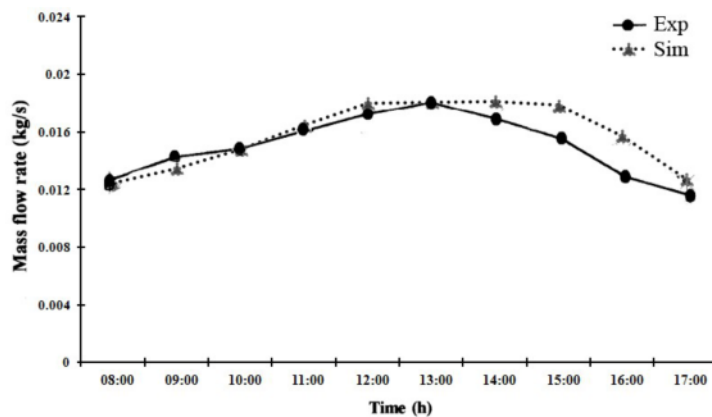
یک مدل از دودکش و اتاق متصل به آن بر اساس اطلاعات مربوط به مدل مشاهداتی فوق و داده‌های آب‌وهوایی شهر بانکوک (برگرفته از سایت انرژی‌پلاس) در نرم‌افزار انرژی‌پلاس شبیه‌سازی شد. شکل زیر نتایج شبیه‌سازی مدل فوق را با ارتفاع ۲ متر برای دودکش خورشیدی در ۱۲ دسامبر نشان می‌دهد.



***12 December 2m (0.14m air gap) Thermal Chimney Total Mass Flow Rate [kg/s](Hourly)

شکل ۱۲. نرخ جریان جرمی هوا (ساعتی) در مدل شبیه‌سازی شده دودکش خورشیدی
منبع: نگارندگان

شکل ۱۳ نتایج شبیه‌سازی و مشاهداتی دودکش خورشیدی با ارتفاع ۲ متر و عمق ۰/۱۴ سانتی‌متر را در روز ۱۲ دسامبر با هم مقایسه می‌کند.



12 December 2m (0.14m air gap) Thermal Chimney Total Mass Flow Rate [kg/s](Hourly)

شکل ۱۳. مقایسه بین مدل شبیه‌سازی و مدل مشاهداتی در دودکش خورشیدی به ارتفاع ۲ متر
منبع: نگارندگان

همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف بین مدل مشاهداتی و مدل شبیه‌سازی شده، کم است و بدین ترتیب نتایج شبیه‌سازی قابل استناد است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر جنس دیوار جاذب و شیشه، عرض دیوار جاذب و مساحت خروجی هوا بر عملکرد دودکش خورشیدی بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در طول روز بیشترین میزان تهویه در دیوار جاذب با مصالح آلومینیوم است و پس از آن فولاد، آجر و بتن قرار دارند. مصالح فلزی به دلیل انعکاس تابش خورشیدی به داخل دودکش در ساعاتی که تابش خورشیدی وجود دارد، تأثیر بیشتری بر نرخ جریان هوا می‌گذارد و برای استفاده به عنوان جاذب حرارتی مناسب هستند. اما در طول شب نرخ تهویه ایجاد شده به کمک دیوار جاذب بتنی بیشترین میزان را دارد و پس از آن آجر، فولاد و آلومینیوم است. میانگین نرخ تهویه ماهیانه نیز به همین ترتیب است که این امر به دلیل خاصیت جرم حرارتی مصالح استفاده شده اتفاق می‌افتد. نرخ جریان حجمی هوا در بین پنج شیشه با مشخصات ذکر شده، در شیشه دوجداره بیشترین مقدار است و پس از آن، شیشه کم‌گسیل، شیشه معمولی، شیشه با آهن کم و شیشه انعکاسی قرار دارند. با افزایش عرض دیوار جاذب و مساحت خروجی دودکش خورشیدی نرخ جریان حجمی کلی که از دودکش خارج می‌شود بیشتر می‌شود. در فصول سرد نیز دودکش خورشیدی کارآیی مناسبی دارد. بدین ترتیب که با بستن ورودی‌های هوا از فضاهای اصلی به دودکش خورشیدی، یک زون گرم در مجاورت فضاهای اصلی ایجاد می‌شود و باعث کاهش بار گرمایش ساختمان می‌شود. دودکش خورشیدی با ابعاد بهینه می‌تواند بار گرمایش ساختمان را تا ۱۸/۵۲ درصد کاهش دهد.

پی‌نوشت‌ها

1. EnergyPlus
2. Ecotect
3. Plywood and gypsum plate
4. CPAC Monier concrete tiles

منابع

- گیلانی، سارا و کاری، محمد (۱۳۹۰) «بررسی عملکرد گرمایشی گلخانه‌های خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی اقلیم سرد نمونه موردی: شهر اردبیل»، *نشریه فنی مهندسی مدرس، مکانیک، دوره ۱۱، شماره ۲، تابستان، ۱۴۷-۱۵۷*.
- مسندی، مریم و حیدری، شاهین (۱۳۸۹) «شبیه‌سازی بام‌ها، راهکار بررسی دقیق تأثیرات دمایی در محیطی مجازی»، *نشریه هنرهای زیبا، معماری و شهرسازی، شماره ۴۲، تهران*.
- فخاری، مریم (۱۳۹۰) *بررسی اثر دودکش خورشیدی در کاهش بار حرارتی ساختمان‌های اداری در شهر اصفهان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد انرژی معماری، دانشکده معماری، دانشگاه تهران*.

- Afonso, C. & Oliveira A. (2000) "Solar chimneys: simulation and experiment," *Energy Building*, 32, 71-9.
- ASHRAE Standard 55, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- Bansal, N.K., Mathur, R. & Bhandari, M.S. (1994) "A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings," *Building and Environment*, 3, 373-377.
- Charvat P., Jicah, M. & Stetina J. (2004) *Solar chimneys for ventilation and passive cooling. Denver (USA)*, World Renewable Energy Congress.
- DeBlois, Justin C., Bilec, Melissa M. & Schaefer, Laura A. (2013) "Design and zonal building energy modeling of a roof integrated solar chimney," *Renewable Energy*, 52, 241-250.
- EnergyPlus; Version 6.0.0.023: The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory: COPYRIGHT, 1998-2010.
- Hirunlabh, J., Kongduang, W., Namprakai, P. & Khedari, J. (1999) "Study of natural ventilation of houses by ametallic solar wall under tropical climate," *Renewable Energy* 18, 109-119.
- Khedari, Joseph; Boonsri, Boonlert & Hirunlabh. Jongjit (2000) "Ventilation impact of a solar chimney on indoor temperature fluctuation and air change in a school building", *Energy and Building*, 32, 89-93.
- Koronaki, I. P. (2013) "The impact of configuration and orientation of solar thermosyphonic systems on night ventilation and fan energy savings," *Energy and Buildings*, 57, 119-131.
- Miyazaki, T., Akisawa, A. & Kashiwagi, T. (2006) "The effects of solar chimneys on thermal load mitigation of office buildings under the Japanese climate," *Renewable Energy*, 31, 987-1010.
- Pantavou, K., Theocharatos, G., Mavrakis, A. & Santamouris. M. (2011) "Evaluating thermal comfort conditions and health responses during an extremely hot summer in Athens," *Building and Environment*, 46, 339-344.
- Rakesh, Khanal & Chengwang, Lei (2011) "Review Solar chimney-A passive strategy for natural ventilation," *Energy and Buildings*, 43, 1811-1819.
- Rakesh, Khanal & Chengwang, Lei (2012) "Flow reversal effects on buoyancy induced air flow in a solar chimney," *Solar Energy*, 86, 2783-2794.
- Sudaporn, C. & Bundit, L. (2009) "Utilization of cool ceiling with roof solar chimney in Thailand: The experimental and numerical analysis," *Renewable Energy*, 34, 623-633.
- URL1: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>