

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۱۸

بررسی رفتار حرارتی انواع سقف‌های متداول در ساختمان‌ها با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی

علیرضا عرب سلغار^{۱*}، میلاد ربیعی^۲، افشین ایرانمنش^۳، محمد شفیع دهج^۴

^۱ دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران

a.arabsolghar@vru.ac.ir

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران

milad.rabiee@gmail.com

^۳ مربی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران

a.iranmanesh@vru.ac.ir

^۴ دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران

m.shafiey@vru.ac.ir

چکیده: در این مطالعه، اثر ساختار و نوع سقف‌های مختلف ساختمانی با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفت. سقف‌های مورد مطالعه شامل انواع تیرچه‌بلوک (بلوک سفالی، بلوک بتنی سبک، پلی‌استایرن) و دال یوبوت هستند که برای یک چشمه با دهانه ۶ متر و ۸ متر طراحی شده‌اند. به منظور شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت، از روش دینامیک سیالات محاسباتی مبتنی بر روش حجم کنترل استفاده شد. انتقال حرارت درون حفره‌های هوا از طریق جابه‌جایی آزاد و تشعشع صورت می‌گیرد و انتقال حرارت در قسمت جامد جداره‌ها از طریق هدایت انجام می‌شود. مدل‌سازی حرارتی سقف‌ها یک بار برای زمستان (جریان حرارت به سمت بالا) و یک بار برای تابستان (جریان حرارت رو به پایین) مورد بررسی قرار گرفت. انتقال حرارت طبیعی دوبعدی به صورت ناپایا با جریان آرام و تراکم‌ناپذیر در حفره‌ها در نظر گرفته شد. به منظور بررسی عملکرد حرارتی سقف‌های مختلف، ضریب هدایت معادل، فاکتور کاهش و اختلاف زمانی مطالعه شد. در نهایت، بهینه‌ترین نوع سقف از نظر انتقال حرارت و راندمان گرمی - حرارتی معرفی شد. نتایج نشان داد که سقف با بلوک پلی‌استایرن دارای کمترین ضریب هدایت حرارتی معادل است و سقف دال یوبوت بیشترین اتلاف حرارتی را در میان سقف‌های مورد مطالعه دارد.

واژه‌های کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، پوسته ساختمان، ضریب هدایت معادل، تأخیر زمانی.

۱. مقدمه

صرفه‌جویی در مصرف انرژی یکی از نکات حائز اهمیت در جهان امروز است. از سوی دیگر، سهم بخش ساختمان در مصرف انرژی کشورها قابل توجه است. طبق آمار وزارت انرژی کشورهای توسعه‌یافته، سیستم‌های حرارتی، سرمایش و تهویه هوا حدود ۵۰٪ از انرژی مصرفی ساختمان و ۲۰٪ از کل مصرف انرژی در آن کشورها را تشکیل می‌دهند [۱]. در ایران نیز بخش ساختمان حدود ۴۰٪ از کل مصرف انرژی کشور را به خود اختصاص می‌دهد [۲]. در محاسبات مربوط به تعیین اتلاف حرارتی در فصل گرم و سرد سال، انتقال حرارت از طریق هدایت حرارتی از سقف ساختمان، جزء بارهای اصلی حرارتی محسوب می‌شوند. با توجه به اهمیت انتقال حرارت از سقف‌های و دیوارهای ساختمان تاکنون مطالعات زیادی در زمینه انتقال حرارت از جداره‌های ساختمان انجام شده است.

دل کوز دیاز و همکاران [۳ و ۴] عملکرد حرارتی سقف‌هایی را که با بلوک‌های حفره‌دار مختلف ساخته شده‌اند، از خاک رس، بتن و بتن سبک بررسی کردند. آن‌ها تأثیر هندسه حفره‌های هوا را بر رفتار حرارتی سیستم سقف‌ها بررسی کردند و نتیجه گرفتند که انتخاب بهترین نوع بلوک بر اساس راندمان گرمی حرارتی و هدایت حرارتی معادل امکان‌پذیر است. در مطالعه دیگری توسط دل کوز دیاز و همکاران [۵] ویژگی‌های حرارتی بلوک‌های بتنی سبک وزن مورد استفاده در سقف‌ها از طریق روش اجزای محدود بررسی شدند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که از نظر راندمان گرمی حرارتی، بلوک با حفره‌های مشابه از نظر ابعاد عملکرد بهتری در مقایسه با بلوکی که دارای محفظه‌های هوا با ابعاد متفاوت است، دارد.

آرنت و همکاران [۶] اثر تعداد حفره در آجرهای توخالی را بر رفتار حرارتی دیوار با توجه به تأخیر زمانی، ضریب کاهش حرارتی، هدایت حرارتی و نفوذ حرارتی بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که مقادیر بهینه پارامترهای مورد مطالعه را می‌توان در یک آجر توخالی ساخته‌شده از مواد با هدایت کم، نسبت سطح حفره به کل سطح آجر از ۳۰٪ تا ۴۵٪ به دست آورد. ژای و همکاران [۷] در یک مطالعه تجربی و عددی عملکرد حرارتی دیوار بتنی پیش‌ساخته را بررسی کردند؛ آن‌ها تأثیر رابط هیبریدی، ضخامت لایه عایق و نوع عایق را بر ویژگی‌های حرارتی دیوارها مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که عملکرد دیوار با پوشاندن رابط با نایلون، کاهش رسانایی حرارتی اجزا، افزایش شکاف رابط

و عرض عایق افزایش می‌یابد. اوزالپ و همکاران [۸] به صورت عددی اثر دیوار و مواد عایق را بر مصرف انرژی، دوره بازگشت سرمایه و مقادیر ضریب صدور سطوح را بررسی کرده‌اند. همچنین اثرات رنگ پوشش بازتابنده سقف و عایق بر رفتار حرارتی بلوک‌های توخالی با دو و سه محفظه هوا توسط زامان و همکاران [۹] آنالیز شد. در این مطالعه، برای تولید هندسه از روش بلاک آف استفاده شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که پوشش بازتابنده سقف و عایق حرارتی در کاهش اتلاف حرارت از طریق سقف مؤثر است. محمود احمد و همکاران [۱۰] به بررسی انتقال حرارت همرفت و تشعشع از طریق بلوک‌های بتنی توخالی پرداختند و پس از حل تحلیلی با روش المان محدود نتیجه گرفتند که از طریق حفره‌های هوا می‌توان کاهش انتقال حرارت را تا ۱۰٪ رساند. تقفی و همکاران [۱۱] به بررسی و مقایسه عملکرد حرارتی دیوار خارجی با بلوک‌های سفالی رایج در ایران پرداختند و نتیجه گرفتند که بررسی عملکرد حرارتی سیستم‌های دیوار خارجی رایج، می‌تواند در بهبود و افزایش مقاومت حرارتی آن‌ها بسیار مؤثر باشد. افزایش مقاومت انتقال حرارت آجر با طولانی‌تر کردن مسیر پیموده‌شده توسط حرارت از سطح گرم به سرد آجر، از طریق بلوک سفالی یکی از مؤثرترین راه‌کارهاست؛ آن‌ها دریافتند که با طولانی کردن مسیر جریان حرارت، می‌توان مقاومت حرارتی را افزایش داد. استفاده از حفره‌های غیرمستطیلی و افزایش ارتفاع برای کاهش هدرفت انرژی قابل استفاده است. بهره‌گیری از حفره‌های غیرموازی به جای حفره‌های موازی، بهترین راه‌کارها برای جلوگیری از اتلاف انرژی است. سان فنگ و همکاران [۱۲] به تجزیه و تحلیل عددی نرخ انتقال حرارت برای طراحی بلوک‌های حفره‌دار پرداختند. این محققان وجود حفره‌های طولی و عرضی را در بلوک مورد بررسی قرار دادند؛ آن‌ها برای روشن‌تر شدن مسئله انتقال حرارت، توزیع بردارهای سرعت و توزیع دما را در بلوک‌های حفره‌دار را ارائه دادند و نتیجه گرفتند که با افزایش تعداد محفظه‌ها در جهت عرضی، همرفت طبیعی و تابش سطح کمتر می‌شود. آن‌ها پیشنهاد دادند افزایش تعداد محفظه‌ها در جهت موازی مطلوب‌تر است. انتار [۱۳] به مقایسه عملکرد حرارتی پنج نوع از بلوک‌های حفره‌دار پرداخت. دیوارهای بالا و پایین بلوک عایق فرض شد و دیوارهای چپ و راست دما ثابت در نظر گرفته شد. در این مطالعه، اندازه بلوک‌ها ثابت بود و تعدادی محفظه افقی با شکل‌های مختلف در بلوک گنجانده شد. نتایج او نشان داد که نرخ انتقال حرارت وابستگی

مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که برای داشتن دقت بهتر، لازم است تمام مکانیزم‌های انتقال حرارت در محاسبات لحاظ شوند.

با توجه به مروری بر پژوهش‌های گذشته، می‌توان به این نتیجه دست یافت که تابه‌حال مطالعه‌ای درباره‌ی مدل‌سازی و بهینه‌سازی انتقال حرارت از سقف‌های ساختمان با سیستم‌های مختلف تحت شرایط مرزی یکسان انجام نشده است. بنابراین با توجه به اهمیت صرفه‌جویی در مصرف انرژی در ساختمان‌ها و لزوم انتخاب بهترین و اقتصادی‌ترین گزینه در میان گزینه‌های موجود در کاهش انتقال حرارت از پوسته‌ی ساختمان، در این مطالعه انتقال حرارت از سقف‌های تیرچه‌بلوک با بلوک سفالی، بلوک بتنی سبک و بلوک پلی‌استایرن و سقف دال بتنی یوبوت که در بازار ایران رایج‌اند، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی شد. برای انجام محاسبات دقیق سه مکانیزم انتقال حرارت (هدایت، جابه‌جایی و تشعشع) در شبیه‌سازی عددی لحاظ گردید و سیستم‌های مختلف سقف از لحاظ ضریب هدایت حرارت معادل، فاکتور کاهش حرارت و اختلاف زمانی در رسیدن به شرایط حداکثر اتلاف حرارتی مورد مطالعه قرار گرفتند.

۲. تشریح مسئله

در این مطالعه، اثر مواد به‌کاررفته در انواع سقف‌ها، تعداد حفره‌های هوا در بلوک سقف‌ها و همچنین ساختار سقف‌های رایج در بازار ایران در چگونگی رفتار انتقال حرارت آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱). بنابراین سقف‌های تیرچه-بلوک، با انواع بلوک رایج در ایران (ساخته‌شده از خاک رس، بتن سبک و پلی‌استایرن) و سقف دال مجوف یوبوت از لحاظ عملکرد حرارتی با یکدیگر تحت شرایط برابر مقایسه شدند. همچنین برای بررسی اثر حفره‌های هوا، سه مدل از نحوه‌ی پیکربندی این محافظ مورد بررسی قرار گرفتند. در مطالعه حاضر به‌منظور بررسی شرایط بارگذاری مختلف، سقف‌ها برای دهانه ۶ متر و ۸ متر طراحی شده‌اند. در دهانه ۸ متر در سقف تیرچه‌بلوک، تیرچه‌ها به‌صورت دوتایی کنار هم قرار می‌گیرند. هندسه سقف‌های مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. به‌منظور رعایت ضوابط مبحث سوم مقررات ملی ساختمان، در تمامی هندسه‌ها از گچ‌برگ و یک لایه هوا به ضخامت پنج سانتی‌متر بین گچ‌برگ و دال سقف‌ها استفاده شده است. در شکل (۲)، جزئیات سیستم سقف‌های مختلف برای دهانه ۶ و ۸ متر نشان داده شده است، همچنین حفره‌های هوا در تمامی هندسه‌ها با رنگ سفید نشان داده شده است.

قابل توجهی به ضریب صدور سطح حفره دارد، همچنین شکل و اندازه حفره‌های هوا تأثیر زیادی در میزان انتقال حرارت دارد. بوکندیل و همکاران [۱۴] در یک تحلیل دوبعدی، انتقال حرارت در دسته‌ای از بلوک‌های توخالی را مدل‌سازی کردند که بین آن‌ها ملات سیمان است. آن‌ها اثر ضخامت لایه ملات و خواص تشعشعی سطح بلوک را برای مقادیر مختلف اختلاف دمای سمت سرد و گرم بلوک را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که بهترین ضخامت لایه ملات سیمان برای داشتن شرایط بهینه حرارتی، یک سانتی‌متر است. به‌تازگی شاهوردی و همکاران [۱۵] با بررسی ۲۲ مدل از حفره‌های هوا که می‌توان در یک بلوک بتنی با ابعاد استاندارد و با ضخامت جداره سه‌سانتی‌متری گنجانده، گزارش دادند که می‌توان انتقال انرژی از دیوار خارجی ساختمان را با بهینه‌سازی هندسه حفره‌های هوا کاهش داد؛ به‌نحوی که انتقال حرارت از بلوک بتنی سبک که بهترین عملکرد حرارتی را دارد، ۵۳٪ کمتر از بلوک با دو حفره است. همچنین آن‌ها در مدل‌سازی بلوک‌ها اثرات تشعشع سطوح محفظه‌های هوا را مورد بررسی قرار دادند.

اوکارچ و همکاران [۱۶] به تحلیل عددی و مدل‌سازی فرایندهای انتقال حرارت از طریق دیوارهای بلوک سیمانی حفره‌دار پرداختند. آن‌ها دو بلوک بتنی با سه حفره و شش حفره را مورد تحلیل عددی قرار دادند و نتیجه گرفتند که تشعشع حرارتی تأثیر بسیاری در افزایش انتقال حرارت درون حفره‌های هوا دارد. جنسل و همکاران [۱۷] اثر وجود لایه پلی‌استایرن درون حفره‌های میانی بلوک سبک بتنی را با استفاده از روش المان محدود بررسی کردند. در نوع خاصی از بلوک مدل‌سازی‌شده، حفره‌های هوای بسیار کوچکی نیز درون دیواره‌های بلوک لحاظ شده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که وجود لایه پلی‌استایرن، یک راه‌حل مطمئن و بصری برای کاهش انتقال حرارت از دیوارهای ساختمان است. در یک مطالعه دیگر، اوکارچ و همکاران [۱۸] به بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت از بلوک‌های معمول در کشور مراکش پرداختند و گزارش دادند که میزان انتقال حرارت از بلوک‌ها را می‌توان با افزایش تعداد لایه‌های هوا کاهش داد. در یک مطالعه عددی و تجربی در انتقال حرارت از بلوک‌های حفره‌دار، هولز و همکاران [۱۹] به مقایسه نتایج حاصل از پنج روش عددی با نتایج تجربی پرداختند؛ آن‌ها نتایج حاصل از مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی انتقال حرارت از بلوک را تحت حالت‌های مختلف انتقال حرارت، با نتایج تجربی



ب



الف

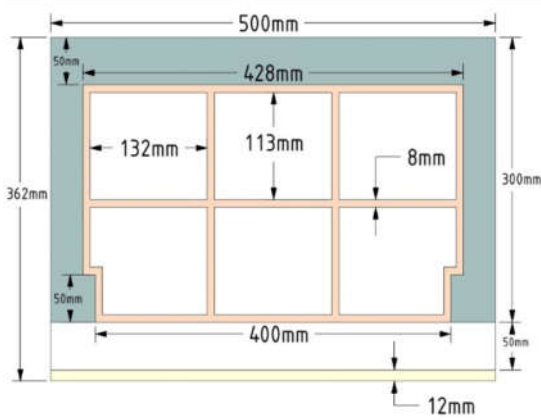


د

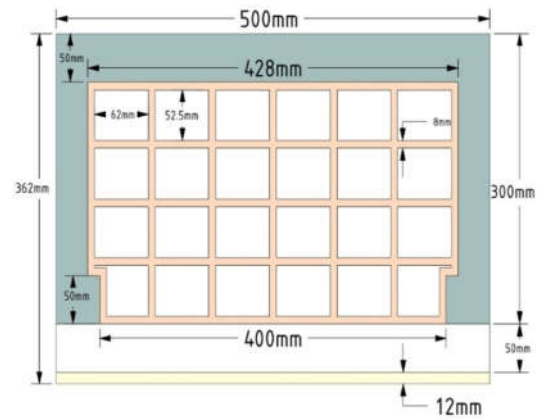


ج

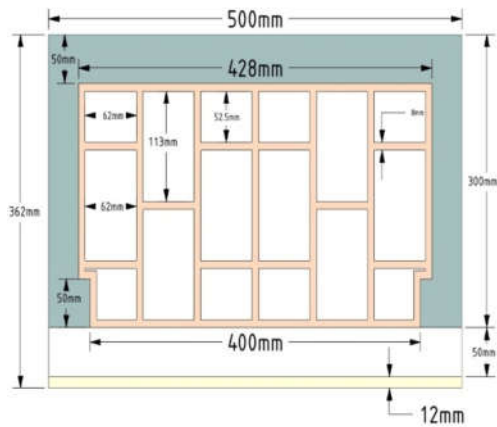
شکل (۱): سیستم سقف‌های متداول ساختمان در ایران: الف. تیرچه و بلوک سفالی؛ ب. تیرچه و بلوک پلی‌استایرن؛ ج. تیرچه و بلوک سبک بتنی؛ د. دال یوبوت



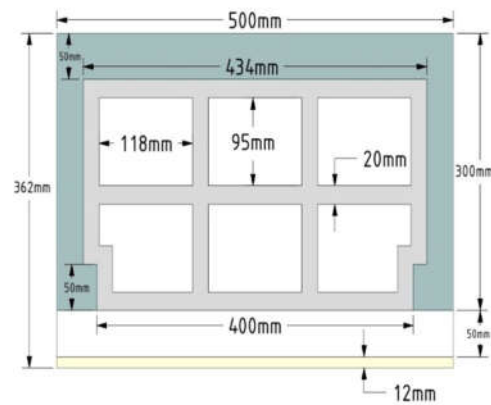
سقف تیرچه‌بلوک با بلوک سفالی دهانه ۶ متر (case1)



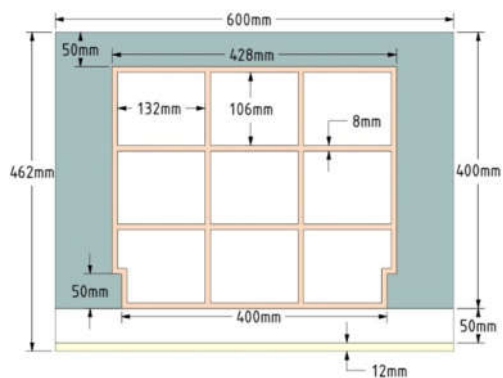
سقف تیرچه‌بلوک با بلوک سفالی دهانه ۶ متر (case2)



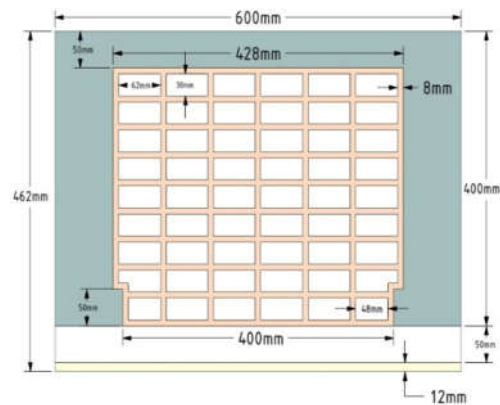
سقف تیرچه‌بلوک با بلوک سفالی دهانه ۶ متر (case3)



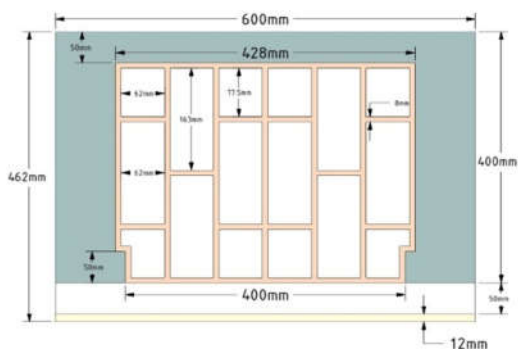
سقف تیرچه‌بلوک با بلوک بتنی سبک دهانه ۶ متر (case4)



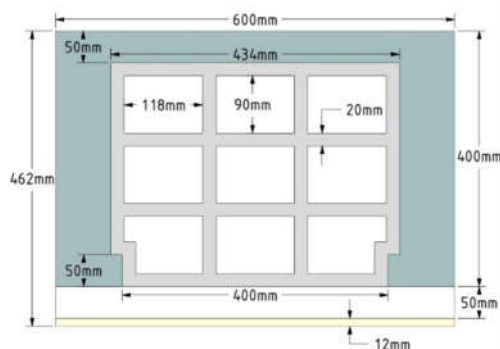
سقف تیرچه‌بلوک با بلوک سفالی دهانه ۸ متر (case5)



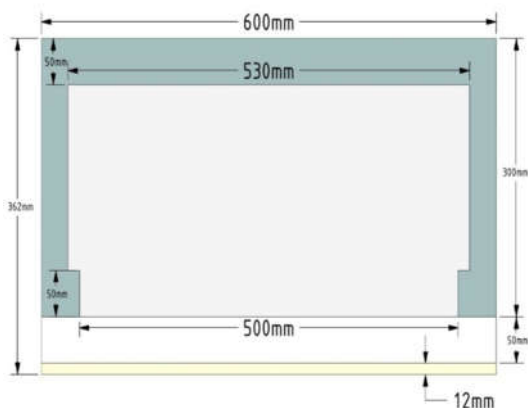
سقف تیرچه‌بلوک با بلوک سفالی دهانه ۸ متر (case6)



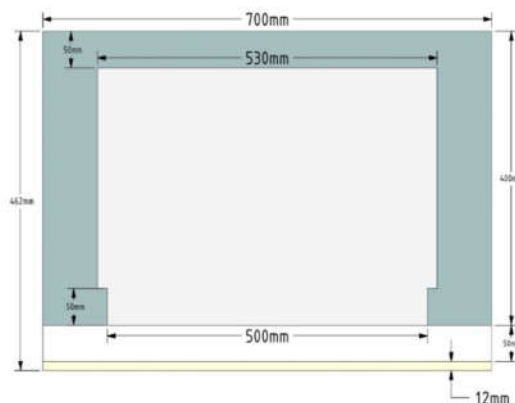
سقف تیرچه‌بلوک با بلوک سفالی دهانه ۸ متر (case7)



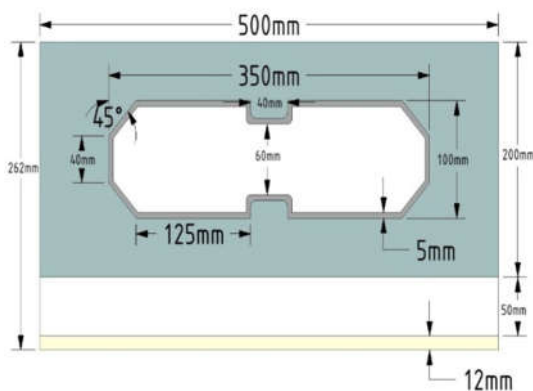
سقف تیرچه‌بلوک با بلوک بتنی سبک دهانه ۸ متر (case8)



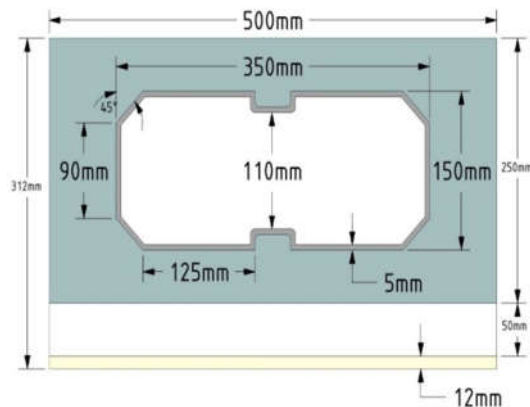
سقف تیرچه‌بلوک با پلی‌استایرن دهانه ۶ متر (case9)



سقف تیرچه‌بلوک با پلی‌استایرن دهانه ۸ متر (case10)



سقف دال یوبوت دهانه ۶ متر (case11)



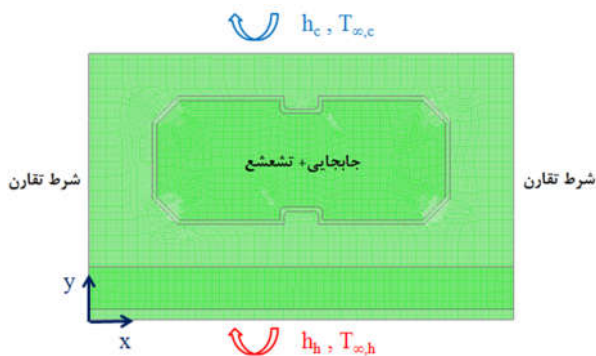
سقف دال یوبوت دهانه ۸ متر (case12)

شکل (۲): جزئیات هندسه سقف‌های مورد مطالعه برای دهانه ۶ متر و ۸ متر

$$\begin{aligned} y = 0, & \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = h_h(T_{\infty,h} - T_s) \\ y = H, & \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = h_c(T_s - T_{\infty,c}) \\ x = 0, & \quad \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0 \\ x = L, & \quad \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

همچنین شرایط مرزی در حالت جریان رو به پایین (تابستان)، برای حل معادله انرژی در قسمت جامد سقف به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} y = 0, & \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = h_c(T_s - T_{\infty,c}) \\ y = H, & \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = h_h(T_{\infty,h} - T_s) \\ x = 0, & \quad \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0 \\ x = L, & \quad \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$



شکل (۳): شرایط مرزی برای جریان رو به بالا (زمستان)

در معادلات رابطه (۹)، H و L به ترتیب طول و ارتفاع قسمت مدل‌سازی شده است. همچنین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محیط گرم و h_c ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محیط سرد، k_s ضریب هدایت حرارتی سطوح در $y = 0$ و $y = H$ است که در تمام هندسه‌ها سطح بالایی بتن و سطح پایینی گچ‌پرگ تعریف شده است. $T_{\infty,h}$ دمای محیط گرم که در حالت تابستانی دمای خارج از ساختمان است و در حالت زمستانی دمای محیط داخل ساختمان است. $T_{\infty,c}$ دمای محیط سرد که در حالت تابستانی دمای خارج از ساختمان است. در شبیه‌سازی عددی، تمامی خواص فیزیکی سقف‌ها و هوای محبوس در حفره‌ها با استثنای چگالی هوا ثابت فرض شدند. در جدول (۱) خواص فیزیکی مواد به کاررفته آورده شده است.

در مدل‌سازی مسئله حاضر فرض می‌شود که درون حفره‌های هوا انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشع وجود دارد. معادلات حاکم برای انتقال حرارت در محفظه‌های هوا توسط پایستگی جرم، مومنتوم و انرژی بیان می‌شود. برای جریان آرام، ناپایا و سیال تراکم‌ناپذیر معادلات حاکم به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{V} \cdot \nabla T = k \nabla^2 T - \frac{1}{\rho C_p} \nabla \cdot \vec{q}_r \quad (3)$$

که در آن، V میدان سرعت هوا در داخل حفره‌ها، p فشار هوا، T دمای هوا، k هدایت حرارتی، ρ چگالی هوا، C_p ظرفیت حرارتی ویژه و q_r بردار شار تابشی است. علاوه بر این، دیورژانس شار تابشی در معادله (۳) به صورت زیر بیان می‌شود [۲۰]:

$$\nabla \cdot \vec{q} = \kappa_a \left(4\pi I_b(\vec{r}) - \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) d\Omega \right) \quad (4)$$

در معادله بالا، k_a ضریب جذب، I شدت تشعشع در مکان و جهت بردار r و I_b شدت تشعشع جسم سیاه است. برای اینکه دیورژانس شار حرارتی هوا درون حفره‌ها محاسبه شود، معادله انتقال حرارت تشعشعی برای یک محیط خاکستری، جاذب و ساطع‌کننده به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} (\vec{s} \cdot \nabla) I(\vec{r}, \vec{s}) &= \beta_r \{-I(\vec{r}, \vec{s}) \\ &+ (1-\omega) I_b(\vec{r}) + \frac{\omega}{4\pi} \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \varphi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s}) d\Omega'\} \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن، β ضریب انبساط حجمی، φ تابع فاز و $d\Omega$ زاویه فضایی است. شرایط مرزی برای سطوح خاکستری به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} I(\vec{r}_w, \vec{s}) &= \varepsilon_w I_b(\vec{r}_w) \\ &+ \frac{(1-\varepsilon_w)}{\pi} \int_{n_w \cdot \vec{s}' < 0} I(\vec{r}_w, \vec{s}') |\vec{n}_w \cdot \vec{s}'| d\Omega', \quad n_w \cdot \vec{s}' > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

در اینجا ε_w ضریب صدور سطح حفره‌هاست.

همچنین در جداره‌های سقف و بلوک، تنها مکانیزم انتقال حرارت، هدایت می‌باشد که معادله انرژی آن به صورت زیر است:

$$\rho C_p \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla^2 T_s \quad (7)$$

که در آن، T_s دمای قسمت‌های جامد سقف است. شرایط مرزی در حالت جریان حرارت رو به بالا (زمستان)، به صورت رابطه (۸) به دست می‌آید (شکل ۳):

جدول (۱) خواص مواد به کاررفته در تحلیل عددی مسئله [۲۱]

$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$c_p (\frac{j}{kg.k})$	$k (\frac{w}{m.k})$	ϵ	α	
۲۳۰۰	۸۸۰	۱/۴	۰/۸۸	۰/۶	بتن
۱۵۰۰	۸۵۰	۰/۵۱	۰/۹۳	۰/۶۳	سفال
۸۰۰	۱۱۰۰	۰/۱۷	۰/۹	۰/۴۵	گچ برگ
۱۰۰۰	۹۰۰	۰/۳۵	۰/۸۹	۰/۶	بتن سبک
۹۵۰	۲۰۰۰	۰/۴	۰/۹۶	۰/۹	پلی اتیلن
۱۲	۱۲۱۰	۰/۰۲۷	۰/۹۱	۰/۰۷	پلی استایرن
۱/۲۲۵	۱۰۰۷	۰/۰۲۴۲	-	-	هوا
۷۸۵۴	۴۳۴	۶۰/۵	-	-	میلگرد

همچنین در جدول (۲)، دمای محیط داخل و خارج ساختمان (برای شهر کرمان) و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی روی سطوح داخل و خارج ساختمان در فصل تابستان و زمستان آورده شده است. با توجه به تعریف انتقال حرارت که جریان حرارت از قسمت گرم به سمت قسمت سرد منتقل می‌شود، می‌توان گفت که در فصل زمستان محیط داخل ساختمان محیط گرم و محیط خارج از ساختمان محیط سرد است؛ بنابراین انتقال حرارت به سمت پایین به بالا در جریان است و در فصل تابستان انتقال حرارت از بالا به پایین در جریان است، که این امر باعث می‌شود که ضریب انتقال حرارت روی سطح داخلی ساختمان در فصل زمستان و تابستان با هم متفاوت باشند.

جدول (۲): دمای هوای و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

بیرون و داخل [۲]				
حرارت	$T_{\infty,i} [K]$	$T_{\infty,e} [K]$	$h_e [W/m^2.K]$	$h_i [W/m^2.K]$
رو به بالا	۲۹۸	۲۶۳	۱۱/۱۱	۲۰/۰۰
رو به پایین	۲۹۸	۳۱۰	۵/۸۸	۲۰/۰۰

در جدول (۲)، $T_{\infty,i}$ و $T_{\infty,e}$ به ترتیب دمای محیط خارجی و دمای محیط داخلی ساختمان و h_e و h_i به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سطح خارج و داخل ساختمان است. برای نشان دادن عملکرد حرارتی بلوک بتنی از ضریب هدایت حرارت معادل (k_{eq}) استفاده می‌شود، که برای جریان حرارت به سمت بالا و به سمت پایین، به ترتیب توسط رابطه‌های زیر به دست می‌آید [۴]:

$$k_{eq} = H \frac{q_w}{T_s(y=0) - T_s(y=H)} \quad (10)$$

$$k_{eq} = H \frac{q_w}{T_s(y=H) - T_s(y=0)} \quad (11)$$

در معادله‌های بالا، H ضخامت سقف در جهت محور y یا ضخامت سقف است؛ همچنین q_w متوسط حرارت عبوری از سقف و جداره است که برای جریان حرارت رو به بالا و رو به

پایین، به ترتیب از طریق رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$q_w = \frac{h_h (T_{\infty,h} - T_s(y=0)) + h_c (T_s(y=H) - T_{\infty,c})}{2} \quad (12)$$

$$q_w = \frac{h_h (T_{\infty,h} - T_s(y=H)) + h_c (T_s(y=0) - T_{\infty,c})}{2} \quad (13)$$

در روابط بالا دمای سطح سقف و جداره‌ها در سمت سرد و

گرم با استفاده از معادلات زیر به دست می‌آید:

$$T_s(y=0) = \frac{1}{0.5} \sum_{i=1}^n l(i,1) * T_s(i,1) \quad (14)$$

$$T_s(y=H) = \frac{1}{0.5} \sum_{i=1}^n l(i,m) * T_s(i,m) \quad (15)$$

شایان ذکر است معادلات بالا برای حالت دوبعدی صادق است که در آن l طول هریک از مش‌ها و n و m تعداد نقاط به ترتیب در جهت x و y می‌باشد (شکل ۳). منظور از عدد ۰/۵ طول خط مفروض بر سطح سقف است که میانگین دما بر روی این خط محاسبه می‌شود. همچنین راندمان عملکرد حرارتی نسبت به جرم برای هر سقف مدل‌سازی شده به صورت زیر تعریف می‌شود [۵]:

$$\eta_{th-mass} = \frac{R_{tot}}{M} * 100 \quad (16)$$

$$R_{tot} = \frac{H}{k_{eq}} + \frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_c} \quad (17)$$

در معادلات بالا، M جرم کل سقف مدل‌سازی شده و R_{tot} مقاومت حرارتی کل است. به‌طور کلی، راندمان جرمی حرارتی، نسبت مقاومت حرارتی کل به جرم کل مدل‌سازی شده است. قابل ذکر است که هدف از مدل‌سازی جریان دوبعدی در حالت غیردائم یا متغیر نسبت به زمان به دست آوردن تأخیر زمانی و ضریب کاهش حرارتی است. تأخیر زمانی در ساختمان‌ها ناشی از جرم حرارتی ساختمان است. هرچه پوسته ساختمان ضخیم‌تر و مقاومت حرارتی بیشتری داشته باشد، عبور حرارت از آن مدت‌زمان بیشتری به طول می‌انجامد. مصالحی که مدت‌زمان بالایی برای تأخیر حرارتی دارند، دارای ویژگی‌هایی از قبیل ضریب هدایت حرارتی پایین، ظرفیت حرارتی ویژه بالا و چگالی زیاد هستند؛ از این خاصیت می‌توان در مناطقی استفاده کرد که نوسانات دمایی روزانه بالایی دارند. به ترتیب تأخیر زمانی و ضریب کاهش حرارتی را می‌توان از طریق روابط زیر به دست آورد:

$$time\ lag = t_{r_{i\ max}} - t_{r_{o\ max}} \quad (18)$$

$$decrement\ factor = \frac{T_{i\ max} - T_{i\ min}}{T_{o\ max} - T_{o\ min}} \quad (19)$$

در معادله‌های بالا، $T_{i\ max}$ و $T_{i\ min}$ به ترتیب بیشینه و کمینه دمای سطح داخل و $T_{o\ max}$ و $T_{o\ min}$ به ترتیب بیشینه و کمینه دمای

هوای بیرون هستند.

مدل مطالعه حاضر دارای دقت قابل قبولی است.

۳. شبیه‌سازی عددی

معادلات حاکم بر مسئله همراه با شرایط مرزی به روش اختلاف محدود بر اساس روش حجم کنترل، با استفاده از نرم‌افزار فلونت حل شدند. برای آنکه معادلات حاکم به فرم جبری درآیند، از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم استفاده شد. برای حل هم‌زمان معادلات جبری شده از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. در مطالعه حاضر، از مش‌های چهاروجهی با سازمان و بی‌سازمان بسته به انحنای مرزها و زاویه سطوح نسبت به یکدیگر، برای شبکه‌بندی بلوک استفاده شد. همچنین بررسی استقلال حل از تعداد مش، مطالعه مش‌بندی نیز صورت پذیرفت و اندازه ضلع هر مش در قسمت جامد ۲mm و اندازه هر ضلع مش در قسمت سیال ۱/۵mm انتخاب شد.

جدول (۳) مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مرجع [۴]

شماره هندسه	مطالعه حاضر	مرجع [۴]	درصد اختلاف %
بلوک بتنی	cf1	۰/۴۵۱۱	۰/۳۲۷۲
	cf2	۰/۴۰۲۷	۰/۷۴۲۲
	cf3	۰/۳۷۶۱	۰/۶۳۷۴
	cf4	۰/۴۴۸۰	۱/۴۲۲۹
	cf5	۰/۴۰۷۱	۱/۱۱۸۴
	cf6	۰/۳۸۶۳	۰/۸۰۴۵
بلوک سفالی	cf1	۰/۴۳۰۹	۱/۴۵۳۱
	cf2	۰/۳۷۰۶	۳/۸۲۳۶
	cf3	۰/۳۳۸۲	۶/۶۷۶۳
	cf4	۰/۴۱۸۲	۱/۵۷۶۷
	cf5	۰/۳۶۵۱	۴/۷۲۱۱
	cf6	۰/۳۳۴۵	۷/۷۰۹۴
بلوک سبک	cf1	۰/۴۰۲۴	۲/۸۳۹۶
	cf2	۰/۳۴۶۰	۴/۸۲۱۱
	cf3	۰/۳۱۴۳	۶/۲۷۲۰
	cf4	۰/۳۹۰۵	۲/۴۶۸۴
	cf5	۰/۳۴۱۱	۴/۵۰۸۷
	cf6	۰/۳۱۳۶	۶/۳۸۰۰

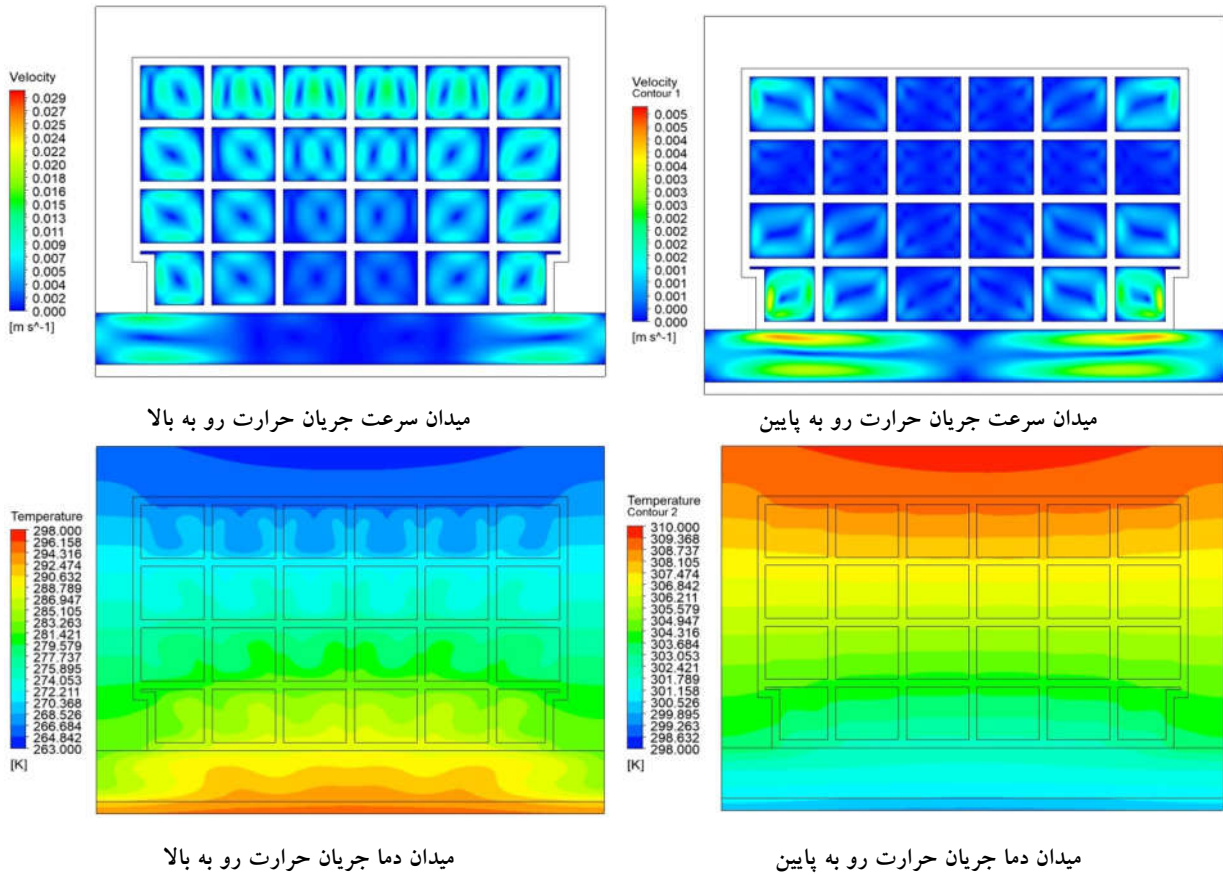
برای بررسی صحت مدل به‌کاررفته در مطالعه حاضر، هندسه‌های مورد بررسی در مرجع [۴] به‌طور کامل مدل‌سازی شدند. برای مقایسه، نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی هندسه‌ها برای ضریب هدایت حرارتی معادل در جدول (۳) آمده است. مقایسه داده‌ها نشان می‌دهد که حداکثر اختلاف بین نتایج مدل مطالعه حاضر با مرجع [۴]، ۷/۷٪ است. بنابراین می‌توان گفت

۴. نتایج

در مطالعه حاضر، به‌منظور معرفی بهترین ساختار و نوع سقف ساختمانی از منظر داشتن کمترین نرخ اتلاف حرارت از سقف، دوازده حالت مختلف یک بار برای جریان حرارت رو به بالا و یک بار برای جریان حرارت رو به پایین مورد بررسی قرار گرفت؛ همچنین برای مدل‌سازی مسئله و اعمال شرایط واقعی، تمامی مکانیزم‌های انتقال حرارت (هدایت، جابه‌جایی و تشعشع) در محاسبه اتلاف حرارت از سقف لحاظ شدند.

ابتدا برای بررسی عملکرد حرارتی سقف‌های مدل‌سازی‌شده، میدان سرعت و دما برای جریان حرارت رو به بالا و جریان حرارت رو به پایین برای یکی از موارد مورد مطالعه مقایسه می‌شود (شکل ۴). همان‌طور که از میدان سرعت و دمای جریان حرارت رو به بالا مشاهده می‌شود، هنگامی که سطح گرم در پایین سقف قرار دارد، هوای مجاور سطح پایینی حفره‌ها گرم شده و به‌طرف بالا حرکت می‌کند و بعد از آن مجاور سطح سرد در بالا قرار می‌گیرد؛ در نتیجه چگالی هوا افزایش یافته، مجدداً سیال به‌سمت پایین حرکت می‌کند که این امر باعث تشکیل گردابه درون حفره‌ها می‌شود؛ به این مکانیزم جابه‌جایی آزاد درون حفره‌ها گفته می‌شود. همچنین هنگامی که سطح گرم در بالا قرار دارد، با توجه به اینکه هوای گرم به‌دلیل چگالی کمتر به‌سمت بالا حرکت می‌کند، گردابه به‌مانند حالت جریان رو به بالا درون حفره‌ها تشکیل نمی‌شود؛ که این امر موجب می‌شود که انتقال حرارت درون حفره‌ها بیشتر از طریق هدایت حرارتی هوا و تشعشع صورت بگیرد. همان‌طور که از میدان سرعت مشخص است، سرعت در جریان رو به پایین بسیار کمتر از سرعت در جریان رو به بالاست. هرچه سرعت در حفره‌ها بیشتر باشد، نرخ انتقال حرارت نیز بیشتر است.

واضح است که انتقال حرارت در جامدات، تنها از طریق هدایت صورت می‌گیرد؛ از جهتی دیگر با توجه به پایین بودن ضریب هدایت حرارتی هوا، مکانیزم غالب انتقال حرارت در حفره‌های هوا، جابه‌جایی و تشعشع است. بنابراین وجود حفره‌های هوا درون یک جامد، پخش حرارت در جامد را به‌صورت چشمگیری تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. در نهایت در یک سقف در صورت وجود حفره‌های هوا، انتقال حرارت شامل هدایت حرارتی در قسمت جامد، انتقال حرارت جابه‌جایی با جریان آرام درون حفره‌ها و انتقال حرارت تشعشعی با امواج بلند بین سطوح دیواره‌های حفره هوا را تشکیل می‌دهند.

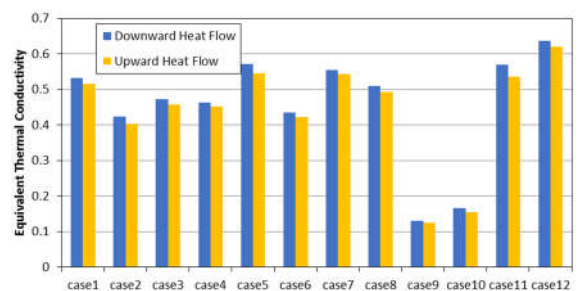


شکل (۴): توزیع میدان سرعت و دما برای سقف مورد مطالعه شماره ۲

با توجه به نتایج شکل (۵) می‌توان گفت که برای دهانه ۶ متر، سقف شماره ۹ دارای کمترین ضریب هدایت معادل و بیشترین مقاومت حرارتی در بین سقف‌های مورد مطالعه است. همچنین برای دهانه ۸ متر، سقف شماره ۱۰ دارای کمترین ضریب هدایت معادل و بیشترین مقاومت حرارتی است.

در اینجا به مقایسه سقف‌های موجود برای دهانه‌های ۶ متر و ۸ متر با توجه به سقف‌های شماره ۹ و ۱۰ که دارای کمترین ضریب هدایت معادل هستند پرداخته شده است. در بین سقف‌های شماره ۱ تا ۴ که همگی سقف‌های تیرچه‌بلوک با دهانه ۶ مترند، سقف شماره ۱ تا ۳ همگی با بلوک سفالی (پایه رسی) هستند و سیستم سقف شماره ۴ دارای بلوک بتنی سبک است. مقایسه سقف شماره ۱ و ۴ که تعداد حفره‌های هوا در آن‌ها برابر است، آشکار می‌سازد که با توجه به اینکه در سقف شماره ۴ ضخامت جداره‌های بلوک بیشتر است، در نتیجه حفره‌های هوا نسبت به سقف شماره ۱ کوچک‌تر است. همچنین جداره‌های بلوک سقف شماره ۴ ضریب هدایت کمتری نسبت به سقف شماره ۱ دارد؛ در نتیجه ضریب هدایت معادل شماره ۴ کمتر از شماره ۱ است؛ به‌گونه‌ای که در جریان حرارت رو به پایین

برای مقایسه کمی نتایج و میزان انتقال حرارت سقف‌های مختلف، ضریب انتقال حرارت هدایت معادل برای هر یک از موارد مورد مطالعه محاسبه شد. در شکل (۵)، ضریب انتقال حرارت هدایت معادل نمونه‌های مورد بررسی نشان داده شده است. در نگاه اول به نمودار ضریب هدایت معادل، این نکته توجه را جلب می‌کند که ضریب هدایت معادل جریان حرارت رو به پایین بیشتر از ضریب هدایت جریان حرارت رو به بالاست. دلیل این موضوع، دمای بالاتر جریان حرارت رو به پایین است که در نتیجه آن اثر تشعشع حرارتی سطح به سطح در جریان حرارت رو به پایین نسبت به جریان حرارت رو به بالا بیشتر می‌شود.



شکل (۵): ضریب انتقال حرارت هدایت معادل سقف‌های مورد

مطالعه

۸ سقف‌های تیرچه‌بلوک با دهانه ۸ مترند که در آن‌ها از دو تیرچه در کنار هم استفاده شده است. با توجه به افزایش ضخامت سقف برای دهانه ۸ متر، ضریب هدایت معادل آن‌ها نسبت به دهانه ۶ متر افزایش می‌یابد. با توجه به نکاتی که در بالا ذکر شد، سقف شماره ۶ دارای کمترین ضریب هدایت معادل بین سقف‌های ۵ تا ۸ است. با مقایسه ضریب هدایت معادل سقف‌های شماره ۵ و ۸ می‌توان گفت که ضریب هدایت معادل سقف شماره ۸ در جریان حرارت رو به بالا ۹/۵۶٪ و در جریان حرارت رو به پایین ۱۰/۸۵٪ نسبت به سقف شماره ۵ کمتر است. همچنین ضریب هدایت معادل بلوک ۶ نسبت به بلوک ۵ در جریان حرارت رو به بالا ۲۲/۷۱٪ و در جریان حرارت رو به پایین ۲۳/۸۵٪ کوچک‌تر است. مقایسه ضریب هدایت معادل سقف شماره ۶ و ۷ نشان می‌دهد که این ضریب بلوک ۷ نسبت به بلوک ۶ در جریان حرارت رو به بالا و رو به پایین، به ترتیب ۲۸/۶۸٪ و ۲۷/۴۰٪ بزرگ‌تر است. همچنین ضریب هدایت معادل سقف شماره ۷ در جریان حرارت رو به بالا ۰/۵۵٪ و در جریان حرارت رو به پایین ۲/۹۸٪ نسبت به بلوک ۵ کوچک‌تر است. با مقایسه ضریب هدایت معادل سقف‌های شماره ۵ و ۱۰ (در شکل ۵)، می‌توان نتیجه گرفت که این ضریب در بلوک ۵ در جریان حرارت رو به بالا ۳/۵۲ برابر و در جریان حرارت رو به پایین ۳/۴۳ برابر بزرگ‌تر از بلوک ۱۰ است.

سقف شماره ۱۱ و ۱۲ که در ایران به سقف دال یوبوت معروف است، از یک قالب توخالی از جنس پلی‌اتیلن در آن استفاده می‌شود. در سقف‌های یوبوت از طرح‌های مختلف قالب برای اجرای سقف استفاده می‌شود که در این مطالعه، نمونه با طرح خاصی از یک مکعب مستطیل بررسی شده است. مقایسه ضریب هدایت معادل سقف شماره ۱۱ با سقف شماره ۹ بیان می‌کند که در زمستان و تابستان، این ضریب در بلوک ۱۱ به ترتیب ۴/۲۹ و ۴/۳۷ برابر بزرگ‌تر از بلوک ۹ است. ضریب هدایت معادل سقف شماره ۱۲ در سیستم سقف یوبوت با دهانه ۸ متر در مقایسه با سقف شماره ۱۰ در جریان حرارت رو به بالا ۴/۰۰ برابر و در جریان حرارت رو به پایین ۳/۸۲ برابر بزرگ‌تر است. همچنین ضریب هدایت معادل در سقف شماره ۱۱ نسبت به شماره ۲ در جریان حرارت رو به بالا ۳۳/۰۵٪ و در جریان رو به پایین حدود ۳۵/۷۲٪ بزرگ‌تر است. بنابراین می‌توان گفت که در میان سقف‌های مورد مطالعه، سقف‌های دال یوبوت بدترین عملکرد را از نظر ضریب هدایت معادل دارند و بهترین عملکرد از این منظر متعلق به سقف‌های تیرچه با بلوک پلی‌استایرن است. عملکرد حرارتی ضعیف‌تر سقف‌های دال یوبوت نسبت به سایر سقف‌های مورد

و رو به بالا ضریب هدایت معادل سقف شماره ۴ به ترتیب، ۱۳/۰۴٪ و ۱۲/۰۵٪ کمتر از سقف شماره ۱ است.

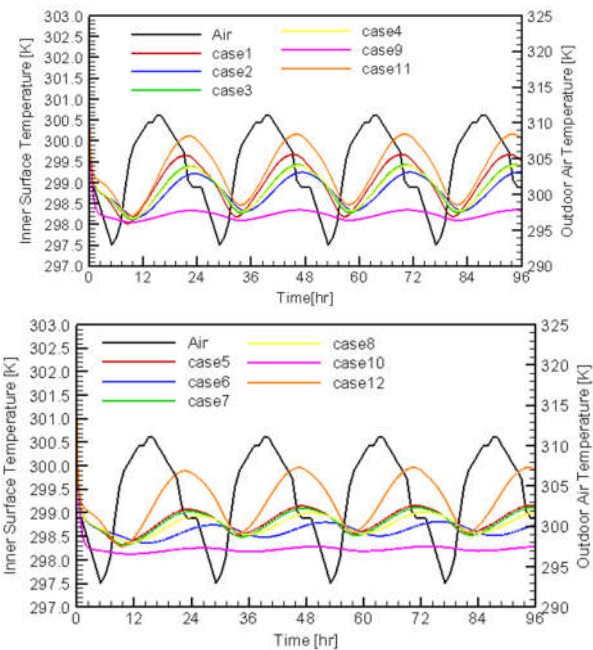
همچنین برای تعیین اثر تعداد حفره‌های هوا در یک حجم مساوی، با مقایسه حفره‌بندی در بلوک‌های سفالی شماره ۲ و ۳ با شماره ۱ متوجه می‌شویم که هرچه تعداد حفره‌های یک بلوک افزایش پیدا کند، متعاقباً ضریب هدایت معادل هم کاهش پیدا می‌کند. اما از معایب حفره‌بندی می‌توان به این نکته اشاره کرد که وزن بلوک در شرایطی که تعداد حفره‌ها زیاد باشد، افزایش پیدا می‌کند. افزایش تعداد حفره‌ها باعث می‌شود که ضریب هدایت معادل سقف شماره ۲ در جریان حرارت رو به پایین، ۲۰/۴۴٪ کمتر از سقف شماره ۱ باشد؛ همچنین ضریب هدایت معادل سقف شماره ۲ در جریان حرارت رو به بالا، ۲۱/۷۷٪ کمتر از سقف شماره ۱ است. در واقع اضافه شدن هر لایه هوا باعث افزایش مقاومت حرارتی تشعشعی می‌شود؛ بدین معنی که هر لایه هوا مانند یک سپر تشعشعی عمل می‌کند. از طرف دیگر، با افزایش تعداد حفره‌های هوا در یک هندسه، دیواره‌های محفظه هوا به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند؛ در نتیجه اثر اصطکاک سطوح بر روی جریان هوا داخل محفظه، متعاقباً میزان انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش می‌یابد.

مقایسه بلوک‌های ۲ و ۳ این حقیقت را آشکار می‌سازد که با توجه به اینکه تعداد حفره‌های دو بلوک در راستای محور X یکسان است، تعداد بیشتر محفظه‌های هوا در راستای محور Y در بلوک ۲ باعث افزایش مقاومت حرارتی ناشی از اثر دیواره بر روی سرعت سیال درون محفظه و در نتیجه، کاهش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود. در جریان حرارت رو به پایین و رو به بالا، ضریب هدایت معادل بلوک ۳ نسبت به بلوک ۲ به ترتیب، ۱۱/۴۸٪ و ۱۳/۵۳٪ افزایش می‌یابد.

مقایسه نتایج بلوک ۱ و بلوک ۹ نشان می‌دهد که ضریب هدایت معادل سقف شماره ۱ نسبت به سقف شماره ۹ به طرز چشمگیری بزرگ‌تر است، به طوری که این ضریب برای بلوک ۱ در جریان حرارت رو به بالا و رو به پایین به ترتیب، ۴/۱۲ و ۴/۰۷ برابر بزرگ‌تر از بلوک ۹ می‌باشد. می‌توان گفت ضریب هدایت حرارتی پایین پلی‌استایرن و همچنین فقدان حفره‌های هوا در بلوک پلی‌استایرن باعث می‌شود که حرارت صرفاً با مکانیزم هدایت حرارتی و بیشتر از طریق تیرچه‌ها انتقال یابد. بنابراین سقف شماره ۹ دارای کمترین ضریب هدایت معادل و بیشترین مقاومت حرارتی در بین سقف‌ها با دهانه ۶ متر است.

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، سقف‌های شماره ۵ تا

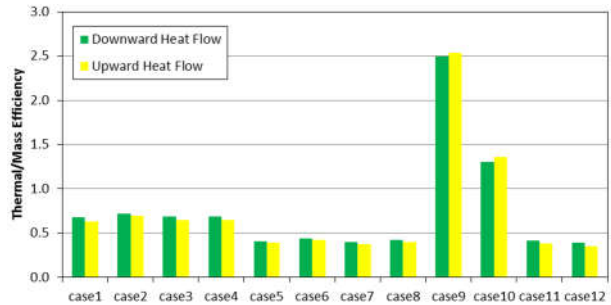
هدف به دست آوردن زمانی است که دمای سطح داخلی به اکسترم‌های خود می‌رسد و همچنین به دست آوردن اختلاف زمان بین اکسترم‌های دمای سطح داخلی و هوای آزاد است. شایان ذکر است که هر چه ماده چگالی و مقاومت حرارتی بیشتری داشته باشد، عبور حرارت از آن در مدت زمان بیشتری انجام می‌شود که در این صورت یک اختلاف زمانی بین لحظه حداکثر دمای هوای بیرون و حداکثر دمای سطح داخل به وجود می‌آید که به آن تأخیر حرارتی می‌گویند. مصالحی که در آن‌ها، تأخیر حرارتی بزرگ است، دارای ویژگی‌هایی از قبیل ضریب هدایت حرارتی پایین، ظرفیت حرارتی بالا و چگالی زیاد هستند. از این خاصیت می‌توان در مناطقی استفاده کرد که نوسانات دمایی روزانه بالایی دارند؛ در این صورت می‌توان ظرفیت تأسیسات تهویه مطبوع را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. در شکل (۸)، نتایج مربوط به تأخیر حرارتی و جرم حرارتی هریک از سیستم سقف‌های مورد بررسی آورده شده است.



شکل (۷): پروفیل دمای هوای بیرون و دمای سطح داخلی گچ‌برگ به‌عنوان تابعی از زمان

برای بررسی تأخیر حرارتی می‌توان به این نکته اشاره کرد که هرچه ضریب هدایت معادل سقف کمتر، ظرفیت حرارتی و جرم سقف بیشتر باشد، تأخیر حرارتی بیشتر است. با توجه به نتایج نشان داده‌شده در شکل (۷) و (۸)، سقف شماره ۲ دارای بیشترین تأخیر حرارتی در بین سقف‌های با دهانه ۶ متر است. همچنین با مقایسه سقف‌های ۱ تا ۴ مشاهده می‌شود که سقف شماره ۲ دارای بیشترین جرم و کمترین ضریب هدایت حرارتی معادل در بین سقف‌های ۱ تا ۴ است. با مقایسه نتایج بلوک ۱ و ۴ می‌توان گفت که تأخیر حرارتی

مطالعه، می‌تواند ناشی از بزرگ بودن محفظه‌های هوا در این سقف در مقایسه با سایر سیستم‌ها باشد. بزرگ بودن محفظه هوا باعث می‌شود که مکانیزم غالب انتقال حرارت جابه‌جایی در آن‌ها، از نوع آزاد-اجباری باشد، در صورتی که می‌توان گفت در محفظه‌ها با ابعاد کوچک تنها جابه‌جایی طبیعی وجود دارد. در شکل (۶)، راندمان جرمی-حرارتی سقف‌های مدل‌سازی شده نشان داده شده است. در کل می‌توان گفت هنگامی راندمان جرمی حرارتی بیشتر است که جرم سقف کمتر و مقاومت حرارتی آن بزرگ‌تر باشد.



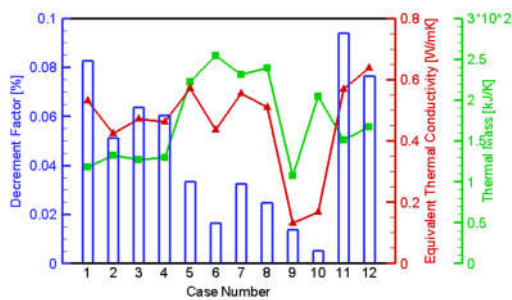
شکل (۶): راندمان جرمی حرارتی سیستم سقف‌های مختلف مورد مطالعه

با توجه به شکل (۶) مشخص است که سقف‌ها با دهانه ۶ متر راندمان جرمی حرارتی بزرگ‌تری نسبت به سقف‌ها با دهانه ۸ متر دارند؛ که این مهم ناشی از جرم کمتر سقف‌های دهانه ۶ متر است. با مقایسه راندمان جرمی حرارتی سقف‌های شماره ۱ و ۴ می‌توان گفت که راندمان جرمی حرارتی سقف شماره ۴ در جریان حرارت رو به بالا و رو به پایین به ترتیب ۲۰۵٪ و ۱۹۷٪ بیشتر از سقف شماره ۱ است. همچنین در خصوص راندمان جرمی حرارتی سقف‌های شماره ۱ و ۲ می‌توان گفت که راندمان سقف شماره ۲ به ترتیب در زمستان و تابستان، ۹۲۲٪ و ۵۸۶٪ بزرگ‌تر از سیستم سقف شماره ۱ است. با مقایسه نتایج سقف‌های شماره ۲ و ۳ آشکار می‌شود که راندمان جرمی حرارتی سقف شماره ۳ در جریان حرارت رو به بالا و رو به پایین به ترتیب ۶۶۴٪ و ۴۴۱٪ کمتر از سقف ۲ است.

از نکات قابل توجه این است که در میان سقف‌های مورد بررسی، سیستم سقف شماره ۹ دارای بیشترین راندمان جرمی حرارتی در بین سقف‌های با دهانه ۶ متر است، می‌توان به این نکته اشاره کرد که وزن کم و همچنین ضریب هدایت معادل پایین دلیل این موضوع است. این مهم برای سقف‌های با دهانه ۸ متر نیز صادق است.

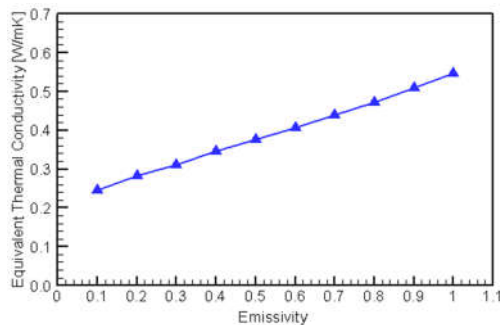
در شکل (۷)، پروفیل دمای هوای بیرون و پروفیل دمای سطح داخلی (فصل مشترک هوای داخل و گچ‌برگ) به‌عنوان تابعی از زمان نشان داده شده است. پروفیل دمای هوای بیرون برای چهار روز از سال از ۱۵ تا ۱۹ تیرماه سال ۱۳۹۸ برای شرایط شهر کرمان با توجه به داده‌های آب‌وهوایی سازمان هواشناسی به دست آمده‌اند. در اینجا،

سیستم سقف شماره ۱۱ دارای بدترین شرایط از لحاظ مقدار ضریب کاهش حرارتی است. با توجه به نتایج مربوط به ضریب هدایت حرارتی معادل، به‌عنوان یک اصل کلی می‌توان گفت که رابطه مستقیمی بین این ضریب و ضریب کاهش حرارتی وجود دارد، به‌طوری که برای بیشتر سقف‌هایی که این پارامتر کوچک است، ضریب کاهش حرارتی نیز کوچک می‌باشد. همچنین در میان سقف‌های با دهانه ۸ متر، سقف با بلوک پلی‌استایرن دارای بهترین شرایط از دیدگاه ضریب کاهش حرارتی است، درحالی‌که سیستم سقف یوبوت، بدترین مقدار ضریب کاهش حرارتی را دارد.



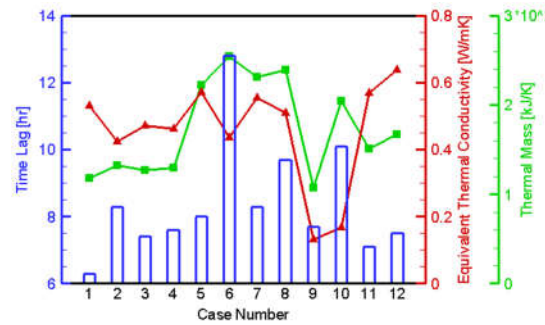
شکل (۹): ضریب کاهش حرارتی سیستم سقف‌های مختلف مورد مطالعه

برای تحلیل اثر ضریب صدور تشعشعی حفره‌ها، هندسه سقف شماره ۱ در جریان حرارت رو به بالا مورد بررسی قرار گرفت؛ بدین ترتیب که ضریب صدور تشعشع دیواره حفره‌ها را از مقدار ۰/۱ تا ۱/۰ با بازه ۰/۱ تغییر داده و نتایج برای ضریب هدایت حرارتی معادل به دست آمد. در شکل (۱۰)، تغییرات ضریب هدایت حرارتی معادل در مقابل ضرایب مختلف صدور تشعشعی دیواره بلوک سفالی نشان داده شده است. با توجه به نتایج شکل (۱۰)، می‌توان گفت با افزایش ضریب صدور تشعشعی دیواره حفره‌ها، ضریب هدایت حرارتی معادل زیاد می‌شود؛ به‌گونه‌ای که با افزایش ضریب صدور از ۰/۱ به ۱/۰، ضریب هدایت حرارتی معادل سقف ۲/۲۱ برابر افزایش می‌یابد. بنابراین مطلوب آن است که دیواره محفظه‌های هوا در سیستم سقف‌ها، دارای ضریب صدور تشعشعی پایینی باشند که در این صورت به‌مانند یک سپر تشعشعی عمل می‌کنند.



شکل (۱۰): تغییرات ضریب هدایت حرارتی معادل در برابر ضریب صدور دیواره حفره‌های سقف شماره ۱ در فصل زمستان

سقف شماره ۴، ۲۰/۶۳٪ بیشتر از سقف شماره ۱ است. در مقایسه سقف‌های ۲ و ۳ نیز جرم حرارتی و ضریب هدایت معادل تأثیر مستقیم در کمتر شدن تأخیر حرارتی سقف شماره ۳ دارند، به‌طوری که تأخیر حرارتی سقف شماره ۳، ۱۰/۸۴٪ کمتر از شماره ۲ است. همچنین مقایسه سیستم سقف شماره ۳ و ۱ نشان می‌دهد که تأخیر حرارتی سقف شماره ۳ نسبت به سقف شماره ۱، ۱۷/۴۶٪ بیشتر است.



شکل (۸): تأخیر زمانی سیستم سقف‌های مختلف مورد مطالعه

با مقایسه سقف شماره ۲ که دارای بیشترین تأخیر حرارتی در بین سقف‌های دهانه ۶ متر است، با سقف شماره ۹ که دارای کمترین ضریب هدایت معادل و کمترین جرم حرارتی در بین سقف‌های دهانه ۶ متر است، می‌توان به این نکات اشاره کرد که تأخیر حرارتی سقف شماره ۹ نسبت به سقف شماره ۲ حدود ۷/۲۳٪ کمتر است. سقف شماره ۱۱ یا سقف یوبوت، دارای بیشترین جرم حرارتی و بیشترین ضریب هدایت معادل در بین سقف‌ها با دهانه ۶ متر است، که جرم حرارتی آن در مقدار تأخیر حرارتی تأثیر مثبت دارد، اما ضریب هدایت معادل آن تأثیر منفی بر روی تأخیر حرارتی دارد؛ به‌طوری که در مقایسه با سقف شماره ۹، تأخیر حرارتی آن حدود ۸/۴۵٪ کمتر از سیستم سقف شماره ۹ است. همچنین با مقایسه با سقف شماره ۲ تأخیر حرارتی آن حدود ۱۶/۹٪ کمتر است. در سقف‌های با دهانه ۸ متر نیز نکات بالا صادق است. سقف شماره ۶ دارای بیشترین جرم حرارتی در بین سقف‌های دهانه ۸ متر است.

در تحلیل ضریب کاهش حرارتی می‌توان گفت که هرچه این پارامتر افزایش یابد، نوسانات دمای هوای بیرون بر روی توزیع دمای سطح داخل بیشتر تأثیرگذار می‌شود و هرچقدر این ضریب کاهش یابد، نوسانات دمای هوای بیرون بر روی دمای سطح داخل کمتر می‌باشد که این مهم مطلوب طراحی است. مقایسه نتایج برای ضریب کاهش حرارتی در شکل (۹) مشخص می‌کند که در میان سقف‌های با دهانه ۶ متر، سقف شماره ۹ که سقف تیرچه با بلوک پلی‌استایرن است، کوچک‌ترین مقدار ضریب کاهش حرارتی را دارد، درحالی‌که

۵. نتیجه گیری

در این مطالعه، به منظور تحلیل عملکرد حرارتی سیستم سقف‌های متداول در ایران، شبیه‌سازی عددی دوبعدی بر روی ۱۲ مدل متفاوت از سقف‌های ساختمانی انجام پذیرفت. برای بررسی اثر نوع حفره‌بندی محفظه‌های هوا، سه حالت مختلف در بلوک‌های سفالی که در آن‌ها تعداد حفره‌های هوا، نسبت ظرافت هندسی محفظه‌های هوا و چگونگی قرارگیری این حفره‌ها نسبت به یکدیگر (منظم و جابه‌جاشده) مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین برای بررسی اثر جنس بلوک‌های حفره‌دار بر رفتار حرارتی، بلوک سفالی با بلوک سبک بتنی تحت شرایط برابر از نظر شرایط مرزی، تعداد و نحوه قرارگیری حفره‌ها مقایسه شدند. به علاوه، به منظور بررسی اثر عرض دهانه سقف، دو دهانه با چشمه ۶ و ۸ متر، تحت شرایط واقعی شبیه‌سازی شدند و نتایج برای آن‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از این مطالعه به صورت زیر بیان می‌شوند:

۱. در میان سقف‌های با دهانه ۶ و ۸ متر، سقف تیرچه با بلوک پلی‌استایرن بهترین عملکرد را از منظر کوچک بودن ضریب هدایت حرارتی معادل داشتند؛ در این خصوص سقف دال یوبوت بزرگ‌ترین مقدار را در هر دو دهانه مورد بررسی قرار داد و از دیدگاه میزان اتلاف حرارت، دارای بدترین عملکرد است.

۲. از دیدگاه راندمان جرمی حرارتی، بهترین عملکرد مربوط به سقف‌ها با بلوک پلی‌استایرن است و سقف‌های دال یوبوت پایین‌ترین راندمان جرمی حرارتی را دارند. این راندمان برای دهانه ۶ متر در سیستم سقف با بلوک پلی‌استایرن و سقف یوبوت در زمستان به ترتیب ۲/۵۳ و ۰/۳۸ و برای تابستان ۲/۴۹ و ۰/۴۱ است. در میان سقف‌های تیرچه با بلوک سفالی و با بلوک سبک بتنی، راندمان جرمی حرارتی آن‌ها بسیار نزدیک به یکدیگرند.

۳. در تحلیل میزان تأخیر حرارتی می‌توان گفت که بهترین عملکرد مربوط به سقف تیرچه با بلوک سفالی با تعداد حفره‌های هوای زیاد و با اندازه کوچک (برای دهانه ۶ متر ۸/۳ ساعت و دهانه ۸ متر ۱۲/۸ ساعت) است. این پارامتر نقش بسزایی در تعیین ظرفیت دستگاه‌های تهویه مطبوع دارد؛ هرچند ذکر این نکته ضروری است که ظرفیت دستگاه‌های تهویه مطبوع در ابتدا تابعی از میزان اتلافات حرارتی از پوسته ساختمان است. از این منظر، مجدداً سقف‌های دال یوبوت دارای عملکرد خوبی نیستند.

۴. ضریب کاهش حرارتی، نسبت اختلاف اکسترم‌های دمای سطح داخلی به اختلاف اکسترم‌های دمای هوای بیرون است. بزرگ بودن این پارامتر نشان‌دهنده تأثیر زود هنگام نوسانات دمای

هوای بیرون بر روی تغییرات هوای داخل است. از این منظر، سقف‌ها با بلوک پلی‌استایرن دارای بهترین عملکرد و سقف دال یوبوت بدترین پاسخ است.

۵. مقایسه رفتار حرارتی سقف با دهانه ۶ و ۸ متر نشان داد که در اغلب پارامترهای مورد بررسی، با افزایش عرض دهانه سقف عملکرد حرارتی سقف کاهش می‌یابد. این مهم را می‌توان به اثر وجود پل‌های حرارتی ارتباط داد.

۶. ضریب صدور تشعشعی دیواره‌های حفره تأثیر بسزایی در میزان انتقال حرارت از سقف دارد. قابل ذکر است که افزایش ضریب صدور تشعشعی باعث افزایش هدایت حرارتی معادل می‌شود؛ بنابراین استفاده از مواد کم‌گسیل می‌تواند به مقدار قابل توجهی نرخ انتقال حرارت را کاهش دهد.

فهرست علائم

V	میدان سرعت
p	فشار
T	دما
k	ضریب هدایت حرارتی
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی
ρ	چگالی
C_p	ظرفیت حرارتی ویژه
q_r	بردار شار تابشی
k_a	ضریب جذب
I	شدت تشعشع
I_b	شدت تشعشع جسم سیاه
β	ضریب انبساط حجمی
φ	تابع فاز
$d\Omega$	زاویه فضایی
ε	ضریب صدور سطح حفره‌ها
α	ضریب جذب تشعشعی
T_{∞}	دمای محیط
k_{eq}	ضریب هدایت معادل
q_w	متوسط حرارت عبوری
M	جرم
R_{tot}	مقاومت حرارتی کل
$\eta_{th-mass}$	راندمان حرارتی نسبت به جرم
t	زمان
$T_{i \max}$	بیشینه دما سطح داخل ساختمان

$T_{o \min}$

کمینه دمای هوای بیرون

$T_{i \min}$

کمینه دمای سطح داخل ساختمان

$T_{o \max}$

بیشینه دمای هوای بیرون

مراجع

- [1] Fogiatto, M.A., Henrique dos Santos, G., and Reia Catelan, J.V., "Numerical Two-Dimensional Steady-State Evaluation of the Thermal Transmittance Reduction in Hollow Blocks", *Energies*, Vol. 12, No. 3, PP. 449, 2019.
- [2] The topic 19 of the national energy saving building regulations.
- [3] del Coz Díaz, J. J., Nieto, P. G., Hernández, J. D., and Sánchez, A. S., "Thermal design optimization of lightweight concrete blocks for internal one-way spanning slabs floors by FEM", *Energy and Buildings*, Vol. 41, pp. 1276-1287, 2009.
- [4] del Coz Díaz, J. J., Nieto, P. G., Hernández, J. D., and Rabanal, F. Á., "A FEM comparative analysis of the thermal efficiency among floors made up of clay, concrete and lightweight concrete hollow blocks", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp. 2822-2826, 2010.
- [5] del Coz Díaz, J. J., Nieto, P. G., and Pérez, L. D., Fernández, P. R., "Nonlinear thermal analysis of multi-holed lightweight concrete blocks used in external and non-habitable floors by FEM", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 533-548, 2011.
- [6] Arendt, K., Krzaczek, M., and Florczuk, J., "Numerical analysis by FEM and analytical study of the dynamic thermal behavior of hollow bricks with different cavity concentration", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, pp. 1543-1553, 2011.
- [7] Zhai, X., Wang, Y., and Wang, X., "Thermal performance of precast concrete sandwich walls with a novel hybrid connector", *Energy and Buildings*, Vol. 166, pp. 109-121, 2018.
- [8] Ozalp, C., Saydam, D. B., Çerçi, K. N., Hürdoğan, E., and Moran, H., "Evaluation of a sample building with different type building elements in an energetic and environmental perspective", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 115, pp. 109386, 2019.
- [9] Xamán, J., Cisneros-Carreño, J., Hernández-Pérez, I., Hernández-López, I., Aguilar-Castro, K. M., and Macias-Melo, E. V., "Thermal performance of a hollow block with/without insulating and reflective materials for roofing in Mexico", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 123, pp. 243-255, 2017.
- [10] Mahmoud, A. M., Ben-Nakhi, A., Ben-Nakhi, A., and Alajmi, R., "Conjugate conduction convection and radiation heat transfer through hollow autoclaved aerated concrete blocks", *Journal of Building Performance Simulation*, Vol. 5, No. 4, pp. 248-262, 2012.
- [11] Saghafi, M., and Hajizadeh, H., "Thermal performance of Common clay blocks external wall system in Iran", *HONAR-HA-YE-ZIBA MEMARI-VA-SHAHRSAZI*, Vol. 17, pp. 49-54, 2012.
- [12] Jiapeng, S., and Fang, L., "Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 23, pp. 5598-5607, 2009.
- [13] Antar, M.A., "Thermal radiation role in conjugate heat transfer across a multiple-cavity building block", *Energy*, Vol. 35, No. 8, pp. 3508-3516, 2010.
- [14] Boukendil, M., Abdelbaki, A., and Zrikem, Z., "Numerical simulation of coupled heat transfer through double hollow brick walls: Effects of mortar joint thickness and emissivity", *Appl Therm Eng*, Vol. 125, pp. 1228-123, 2017.
- [15] Shahverdi, A., Solghar, A.A., and Mohammadi, M., "Investigation of the effect of cavity insertion in brick on heat transfer through using computational fluid dynamic simulation", *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol.10, No. 2, pp. 267-283, 2020.
- [16] Ouakarrouch, M., El Azhary, K., Laaroussi, N., Garoum, M., and Feiz, A., "Three-dimensional numerical simulation of conduction, natural convection, and radiation through alveolar building walls", *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 11, pp. e00249, 2019.
- [17] Gencel, O., del Coz Díaz, J. J., Sutcu, M., Kocyigit, F., Rabanal, F. P., Alonso-Martínez, M., and Barrera, G. M., "Thermal performance optimization of lightweight concrete/EPS layered composite building blocks", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 42, No.4, pp. 1-14, 2021.
- [18] Ouakarrouch, M., Laaroussi, N., Garoum, M., and Hajji, A., "Thermal performances assessment and improvement of hollow concrete blocks commonly used in Morocco: Experimental and numerical approach", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 14, No. 10, pp. 101005, 2022.
- [19] Huelsz, G., Barrios, G., and Rojas, J., "Evaluation of heat transfer models for hollow blocks in whole-building energy simulations", *Energy and Buildings*, Vol. 202, pp. 109338, 2019.
- [20] Howell, J. R., Mengüç, M. P., Daun, K., and Siegel, R., *Thermal radiation heat transfer*, CRC press, Taylor & Francis Group, 2020.
- [21] Incropera, F., David, P., "Fundamentals of heat and mass transfer", United State, John Wiley & Sons, Inc, 2011.