

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

دینامیک سیالات محاسباتی

علیرضا عرب سلغار^{1*}، میلاد ربیعی²، افشین ایرانمنش³، محمد شفیعی دهج⁴

^{1*}دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران، a.arabsolghar@vru.ac.ir

²کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران، milad.rabiee@gmail.com

³مربی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران، a.iranmanesh@vru.ac.ir

⁴دانشیار، 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 تیرچه بلوک (بلوک سفالی، بلوک بتنی سبک، پلی‌استایرن) و دال یوبوت می‌باشند که برای یک چشمه با دهانه 6 متر و 8 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 جابجایی آزاد و تشعشع صورت می‌گیرد و انتقال حرارت در قسمت جامد جداره‌ها از طریق هدایت انجام می‌شود. مدل‌سازی حرارتی سقف‌ها یک‌بار برای زمستان (جریان حرارت به سمت بالا) و یک‌بار برای تابستان (جریان حرارت رو به پایین) مورد بررسی قرار گرفت. انتقال حرارت طبیعی دو بعدی به‌صورت ناپایا با جریان آرام و تراکم ناپذیر در حفره‌ها در نظر گرفته شد. به منظور بررسی عملکرد حرارتی سقف‌های مختلف، ضریب هدایت معادل، فاکتور کاهش و اختلاف زمانی مطالعه گردید. در نهایت بهینه‌ترین نوع سقف از نظر انتقال حرارت و راندمان جرمی-حرارتی معرفی شد. نتایج نشان داد که سقف با بلوک پلی‌استایرن دارای کمترین ضریب هدایت حرارتی معادل می‌باشد و سقف دال یوبوت بیشترین اتلاف حرارتی را در میان سقف‌های مورد مطالعه دارد.

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

1. مقدمه

انرژی کشور را به خود اختصاص می‌دهد [2]. در محاسبات مربوط به تعیین اتلاف حرارتی در فصل گرم و سرد سال، انتقال حرارت از طریق هدایت حرارتی از سقف ساختمان، جز بارهای اصلی حرارتی محسوب می‌شوند. با توجه به اهمیت انتقال حرارت از سقف‌های دیوارهای ساختمان تاکنون مطالعات زیادی در زمینه انتقال حرارت از جداره‌های ساختمان انجام شده است.

دل کوز دیاز و همکاران [3 و 4] عملکرد حرارتی سقف‌هایی را که با بلوک‌های حفره‌دار مختلف ساخته شده از خاک رس، بتن و بتن

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 توسعه یافته، سیستم‌های حرارتی، سرمایش و تهویه هوا حدود 50٪ از انرژی مصرفی ساختمان و 20٪ از کل مصرف انرژی در آن کشورها را تشکیل می‌دهند [1]. در ایران نیز بخش ساختمان حدود 40٪ از کل مصرف

سبک بررسی کردند. آن‌ها تأثیر هندسه حفره‌های هوا را بر رفتار حرارتی سیستم سقف‌ها بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که انتخاب بهترین نوع بلوک بر اساس راندمان جرمی حرارتی و هدایت حرارتی معادل امکان‌پذیر است. در مطالعه دیگری توسط دل کوز دیاز و همکاران [5] 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 جرمی 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 [6] 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 ساخته شده از مواد با هدایت کم، نسبت سطح حفره به کل سطح آجر از 30% تا 45% بدست آورد. ژای و همکاران [7] در یک مطالعه تجربی و عددی عملکرد حرارتی دیوار بتنی پیش ساخته 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 [8] 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 زمان و همکاران [9] 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 [10] به بررسی انتقال حرارت همرفت و تشعشع از طریق بلوک‌های بتنی توخالی پرداختند. آن‌ها پس از حل تحلیلی با روش المان محدود نتیجه گرفتند که از طریق حفره‌های هوا، می‌توان کاهش انتقال حرارت را تا

10% رساند. ثقفی و همکاران [11] 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 پیموده شده توسط حرارت از سطح گرم به سرد آجر، از طریق بلوک سفالی یکی از مؤثرترین راه‌کارها است و آن‌ها دریافتند که با طولانی کردن مسیر جریان حرارت، می‌توان مقاومت حرارتی را افزایش داد. استفاده از حفره‌های غیر مستطیلی و افزایش ارتفاع برای کاهش هدر رفت انرژی قابل استفاده است. بهره‌گیری از حفره‌های غیر موازی بجای حفره‌های موازی، بهترین راه‌کارها برای جلوگیری از اتلاف انرژی است. سان فنگ و همکاران [12] به تجزیه و تحلیل عددی نرخ انتقال حرارت برای طراحی بلوک‌های حفره‌دار پرداختند. این محققین وجود حفره‌های طولی و عرضی را در بلوک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای روشن‌تر شدن مسأله 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 [13] 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 قابل توجهی به ضریب صدور سطح حفره دارد، همچنین شکل و اندازه حفره‌های هوا تأثیر زیادی در میزان انتقال حرارت دارد. بوکندیل و همکاران [14] در یک تحلیل دو بعدی، 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. اخیراً، شاهرودی

و همکاران [15] با بررسی 22 مدل از حفره‌های هوا که می‌توان در یک بلوک بتنی با ابعاد استاندارد و با ضخامت جداره سه سانتیمتری گنجانده گزارش دادند که می‌توان انتقال انرژی از دیوار خارجی ساختمان را با بهینه‌سازی هندسه حفره‌های هوا کاهش داد به نحوی که انتقال حرارت از بلوک بتنی سبک که دارای بهترین عملکرد حرارتی است 53٪ کمتر از بلوک با دو حفره می‌باشد. همچنین آن‌ها در مدل‌سازی بلوک‌ها اثرات تشعشع سطوح محفظه‌های هوا را مورد بررسی قرار دادند.

اوکارچ و همکاران [16] به تحلیل عددی و مدل‌سازی فرآیندهای 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. آن‌ها نتیجه گرفتند که تشعشع حرارتی تأثیر قابل توجهی در افزایش انتقال حرارت درون حفره‌های هوا دارد. جنسل و همکاران [17] اثر وجود لایه پلی‌استایرن درون حفره‌های میانی بلوک سبک بتنی را با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار دادند. در نوع خاصی از بلوک مدل‌سازی شده، حفره‌های هوای بسیار کوچکی نیز درون دیواره‌های بلوک لحاظ شده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که وجود لایه پلی‌استایرن، یک راه‌حل مطمئن و به‌صرفه برای کاهش انتقال حرارت از دیوارهای ساختمان می‌باشد. در یک مطالعه دیگر، اوکارچ و همکاران [18] به بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت از بلوک‌های معمول در کشور مراکش پرداختند. آن‌ها 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 [19] به مقایسه نتایج حاصل از پنج روش عددی با نتایج تجربی پرداختند. آن‌ها نتایج حاصل از مدل‌های یک بعدی و دو بعدی انتقال حرارت از بلوک را تحت حالت‌های مختلف انتقال حرارت را با نتایج تجربی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که جهت 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 تا به حال مطالعه‌ای در رابطه با 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 پوسته ساختمان، در این مطالعه انتقال حرارت از سقف‌های تیرچه بلوک با بلوک سفالی، بلوک بتنی سبک و بلوک پلی‌استایرن و سقف دال بتنی یوبوت که در بازار ایران رایج هستند، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی شد. برای انجام محاسبات دقیق سه مکانیزم انتقال حرارت (هدایت، جابجایی 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.

2. تشریح مسأله

در این مطالعه، اثر مواد بکار رفته 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 1). بنابراین سقف‌های تیرچه- بلوک، با انواع بلوک رایج در ایران (ساخته شده 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 نحوه پیکربندی این محافظ مورد بررسی قرار گرفتند. در مطالعه حاضر به منظور بررسی شرایط بارگذاری مختلف، سقف‌ها برای دهانه 6 متر و 8 متر طراحی شده‌اند. در دهانه 8 متر در سقف تیرچه بلوک، تیرچه‌ها به صورت دوتایی کنار هم قرار می‌گیرند. هندسه سقف‌های مورد مطالعه در شکل 1 نشان داده شده است. به منظور رعایت ضوابط مبحث سوم مقررات ملی ساختمان، در تمامی هندسه‌ها از گچ برگ و یک لایه هوا به ضخامت پنج سانتیمتر بین گچ برگ و دال سقف‌ها استفاده شده است. در شکل 2، جزئیات سیستم سقف‌های مختلف برای دهانه 6 و 8 متر

نشان داده شده است، همچنین حفره‌های هوا در تمامی هندسه‌ها با رنگ سفید نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

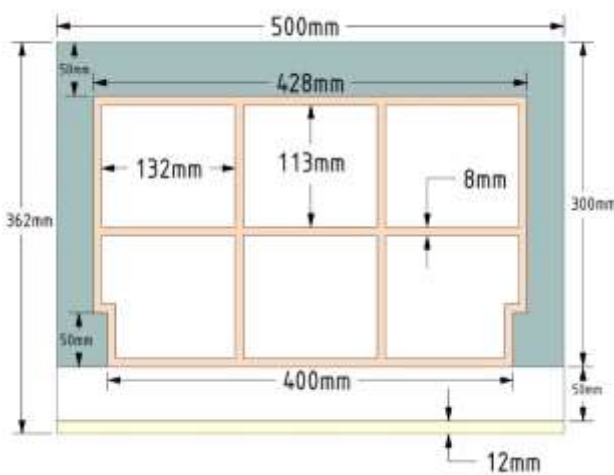


(د)

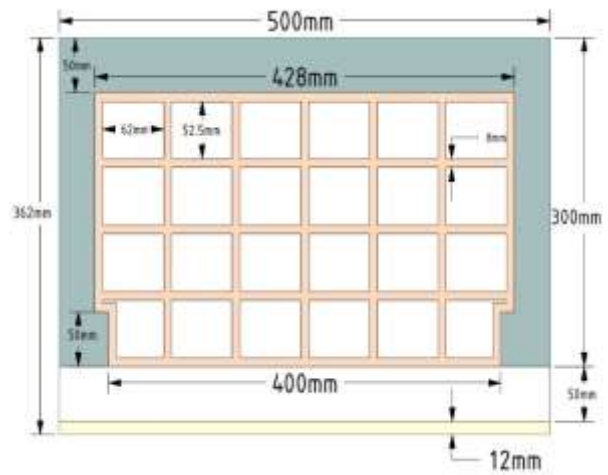


(ج)

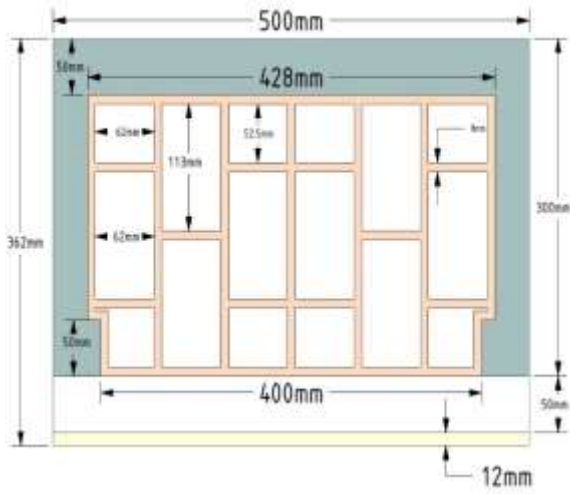
شکل (1) سیستم سقف‌های متداول ساختمان در ایران؛ (الف) تیرچه و بلوک سفالی، (ب) تیرچه و بلوک پلی‌استایرن، (ج) تیرچه و بلوک سبک بتنی، (د) دال یوبوت



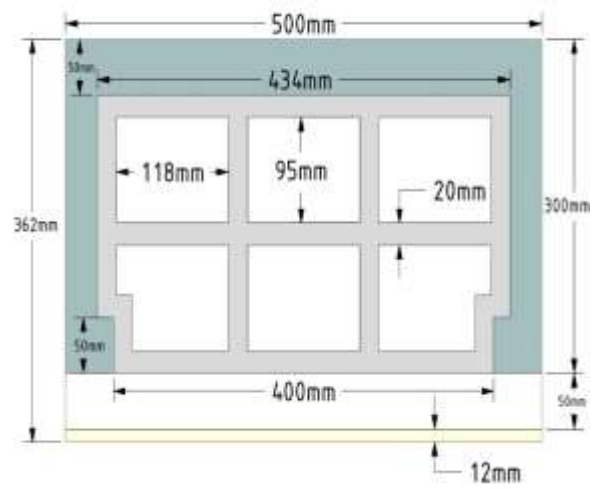
سقف تیرچه بلوک با بلوک سفالی دهانه 6 متر (case1)



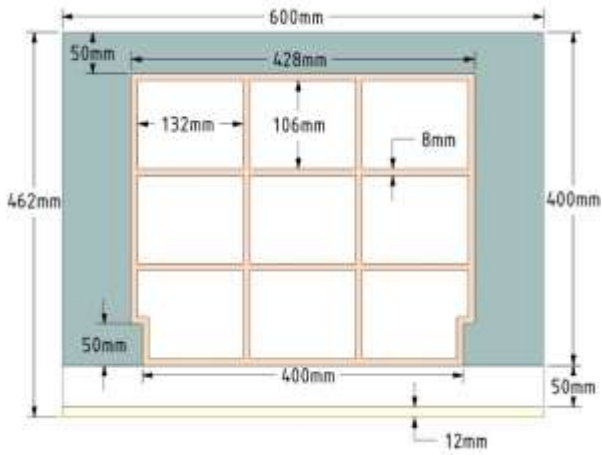
سقف تیرچه بلوک با بلوک سفالی دهانه 6 متر (case2)



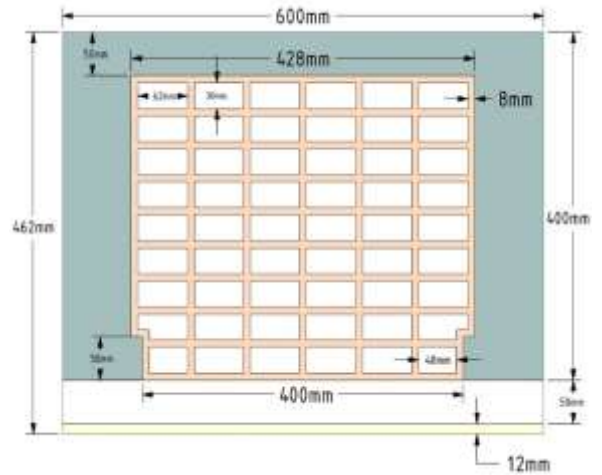
سقف تیرچه بلوک با بلوک سفالی دهانه 6 متر (case3)



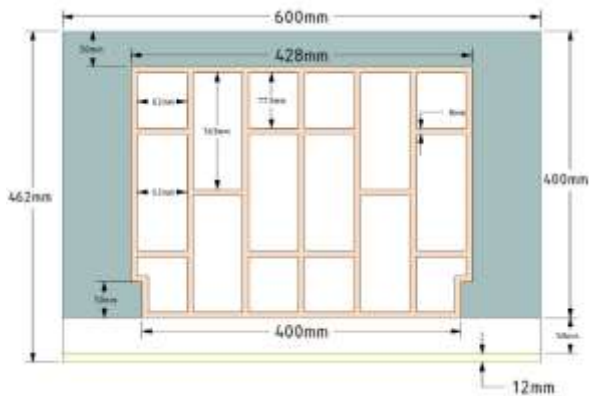
سقف تیرچه بلوک با بلوک بتنی سبک دهانه 6 متر (case4)



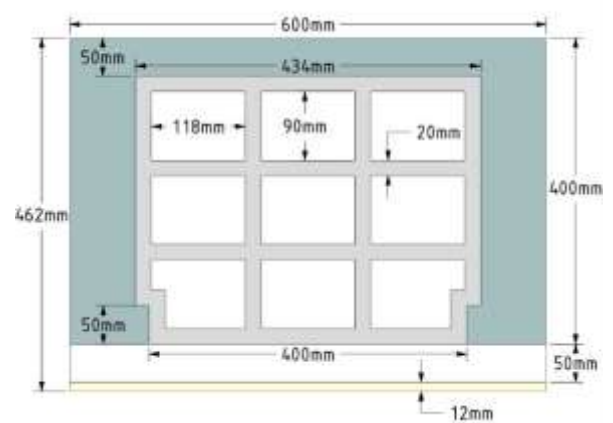
سقف تیرچه بلوک با بلوک سفالی دهانه 8 متر (case5)



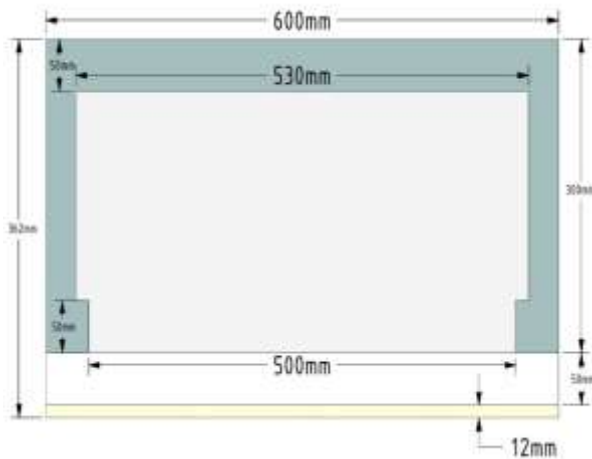
سقف تیرچه بلوک با بلوک سفالی دهانه 8 متر (case6)



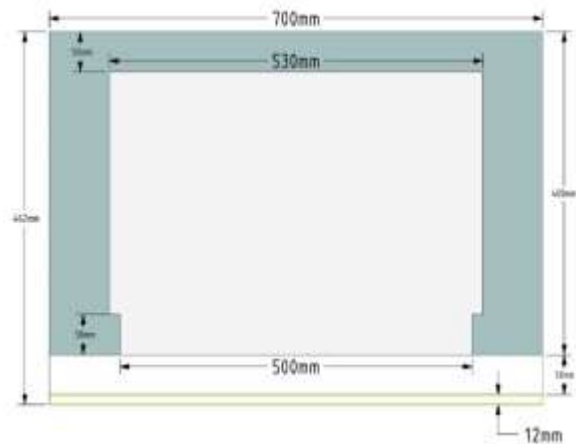
سقف تیرچه بلوک با بلوک سفالی دهانه 8 متر (case7)



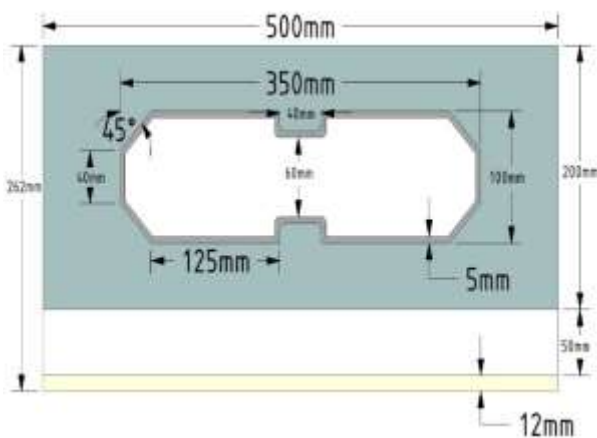
سقف تیرچه بلوک با بلوک بتنی سبک دهانه 8 متر (case8)



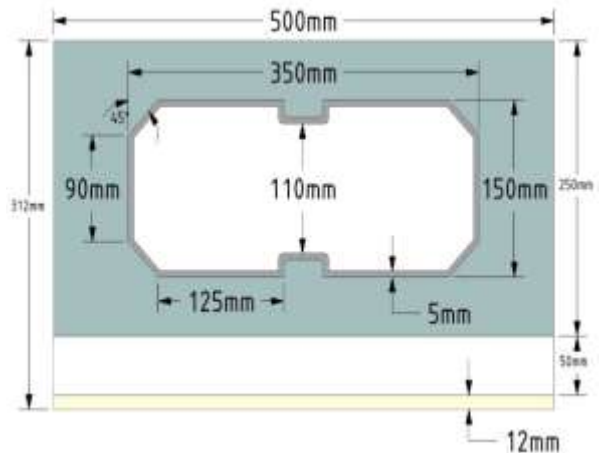
سقف تیرچه بلوک با پلی استایرن دهانه 6 متر (case9)



سقف تیرچه بلوک با پلی استایرن دهانه 8 متر (case10)



سقف دال یوبوت دهانه 6 متر (case11)



سقف دال یوبوت دهانه 8 متر (case12)

شکل (2) جزئیات هندسه سقف‌های مورد مطالعه برای دهانه 6 متر و 8 متر

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

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

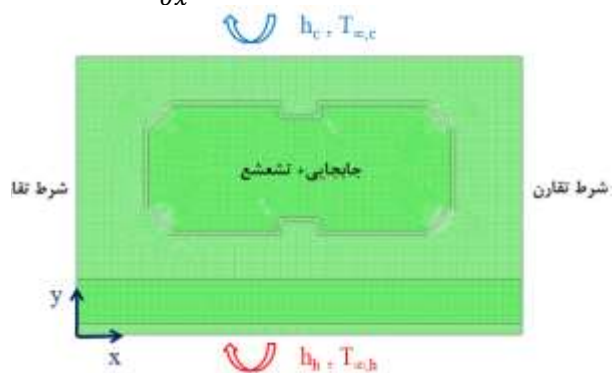
که در آن V میدان سرعت در داخل حفره‌ها، p فشار هوا، T دمای هوا، k هدایت حرارتی، ρ چگالی هوا، C_p ظرفیت حرارتی ویژه و q_r بردار شار تابشی است. علاوه بر این، دیورژانس شار تابشی در معادله (3) به صورت زیر بیان می‌شود [20]:

در مدل‌سازی مسأله حاضر فرض می‌شود که درون حفره‌های هوا انتقال حرارت جابجایی و تشعشع وجود دارد. معادلات حاکم برای انتقال حرارت در محفظه‌های هوا توسط پایداری جرم، مومنتوم و انرژی بیان می‌شود. برای جریان آرام، ناپایا و سیال تراکم ناپذیر معادلات حاکم به صورت زیر نوشته می‌شود:

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

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 (3) شرایط مرزی برای جریان رو به بالا (زمستان)

در معادلات بالا L و H به ترتیب طول و ارتفاع قسمت مدل سازی شده است. همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی محیط گرم و h_c ضریب انتقال حرارت جابجایی 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 گچ برگ 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 داخل ساختمان و در حالت زمستانی دمای خارج از ساختمان است. در شبیه سازی عددی تمامی خواص فیزیکی سقف‌ها و هوای محبوس در حفره‌ها با استثنای چگالی هوا ثابت فرض شدند. در جدول 1 خواص فیزیکی مواد بکار رفته آورده شده است.

جدول (1) خواص مواد بکار رفته در تحلیل عددی مسأله [21]

ρ ($\frac{kg}{m^3}$)	c_p ($\frac{j}{kg.k}$)	k ($\frac{w}{m.k}$)	ε	α
-----------------------------	----------------------------	-------------------------	---------------	----------

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

در معادله بالا، κ_a ضریب جذب، I شدت تشعشع در مکان و جهت بردار \vec{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، جذب و ساتع کننده به شکل زیر نوشته می‌شود:

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

در رابطه بالا، β_r ضریب انبساط حجمی، φ تابع فاز و $d\Omega$ زاویه فضایی می‌باشد. 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 حفره‌ها می‌باشد.

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 زیر می‌باشد (شکل 3):

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

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

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

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 بدست 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 دو بعدی صادق است که در آن l طول هرکدام از مش‌ها و n و m تعداد نقاط به ترتیب در جهت x و y می‌باشد (شکل 3). منظور از عدد 0/5 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 [5]:

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

2300	880	1/4	0/88	0/6	بتن
1500	850	0/51	0/93	0/63	سفال
800	1100	0/17	0/9	0/45	گچ برگ
1000	900	0/35	0/89	0/6	بتن سبک
950	2000	0/4	0/96	0/9	پلی اتیلن
12	1210	0/027	0/91	0/07	پلی استایرن
1/225	1007	0/0242	-	-	هوا
7854	434	60/5	-	-	میلگرد

همچنین در جدول 2، دمای محیط داخل و خارج ساختمان (برای شهر کرمان) و ضریب انتقال حرارت جابجایی 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 می‌باشد، 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 (2) دمای هوای و ضریب انتقال حرارت جابجایی بیرون و داخل [2]

حرارت	$T_{\infty,i}$ [K]	$T_{\infty,e}$ [K]	h_e [$W/m^2.K$]	h_i [$W/m^2.K$]	ت
رو به بالا	298	263	11/11	20/00	ت
رو به پایین	298	310	5/88	20/00	ت

که در جدول 2، $T_{\infty,i}$ 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 جابجایی سطح خارج و داخل ساختمان می‌باشد. جهت 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 بدست می‌آید [4]:

و اندازه ضلع هر مش در قسمت جامد 2mm و اندازه هر ضلع مش در قسمت سیال 1/5mm انتخاب گردید.

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

در معادلات بالا، M جرم کل سقف مدل‌سازی شده و R_{tot} مقاومت حرارتی کل می‌باشد. به‌طور کلی راندمان گرمی حرارتی، نسبت مقاومت حرارتی کل به جرم کل مدل‌سازی شده است. قابل ذکر است که هدف از مدل‌سازی جریان دو بعدی در حالت غیر دائم یا متغیر نسبت به زمان بدست آوردن تأخیر زمانی و ضریب کاهش حرارتی است. تأخیر زمانی در ساختمان‌ها ناشی از جرم حرارتی ساختمان است. هر چه پوسته ساختمان ضخیم‌تر و مقاومت حرارتی بیشتری داشته باشد، عبور حرارت از آن مدت زمان بیشتری به طول می‌انجامد. مصالحی که دارای مدت زمان بالایی برای تأخیر حرارتی هستند 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 بدست آورد:

$$time\ lag = t_{T_i\ max} - t_{T_o\ max} \quad (18)$$

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

در معادله بالا، $T_{i\ min}$ و $T_{i\ max}$ به ترتیب بیشینه و کمینه دمای سطح داخل و $T_{o\ min}$ و $T_{o\ max}$ به ترتیب بیشینه و کمینه دمای هوای بیرون می‌باشند.

3. شبیه‌سازی عددی

معادلات حاکم بر مسأله همراه با شرایط مرزی به روش اختلاف محدود بر اساس روش حجم کنترل با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت حل شدند. برای آنکه معادلات حاکم به فرم جبری درآیند، از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم استفاده شد. جهت حل هم‌زمان معادلات جبری شده از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. در مطالعه حاضر، از مش‌های چهار وجهی با سازمان و بی‌سازمان بسته به انحنای مرزها و زاویه سطوح نسبت به یکدیگر، جهت شبکه‌بندی بلوک استفاده گردید. همچنین بررسی استقلال حل از تعداد مش، مطالعه مش‌بندی نیز صورت پذیرفت

جدول (3) مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مرجع [4]

شماره هندس	مطالعه حاضر	مرجع [4]	درصد اختلاف %
cf1	0/4511	0/4526	0/3272
cf2	0/4027	0/3997	0/7422
cf3	0/3761	0/3737	0/6374
cf4	0/4480	0/4545	1/4229
cf5	0/4071	0/4118	1/1184
cf6	0/3863	0/3895	0/8045
cf1	0/4309	0/4248	1/4531
cf2	0/3706	0/3570	3/8236
cf3	0/3382	0/3171	6/6763
cf4	0/4182	0/4108	1/5767
cf5	0/3651	0/3496	4/7211
cf6	0/3345	0/3115	7/7094
cf1	0/4024	0/3913	2/8396
cf2	0/3460	0/3310	4/8211
cf3	0/3143	0/2957	6/2720
cf4	0/3905	0/3802	2/4684
cf5	0/3411	0/3273	4/5087
cf6	0/3136	0/2984	6/3800

برای بررسی صحت مدل بکار رفته در مطالعه حاضر، هندسه‌های مورد بررسی در مرجع [4] به‌طور کامل مدل‌سازی شدند. جهت مقایسه، نتایج بدست آمده از مدل‌سازی هندسه‌ها برای ضریب هدایت حرارتی معادل در جدول 3 آمده است. مقایسه داده‌ها نشان می‌دهد که حداکثر اختلاف بین نتایج مدل مطالعه حاضر با مرجع [4]، 7/7٪ می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت مدل مطالعه حاضر دارای دقت قابل قبولی است.

4. نتایج

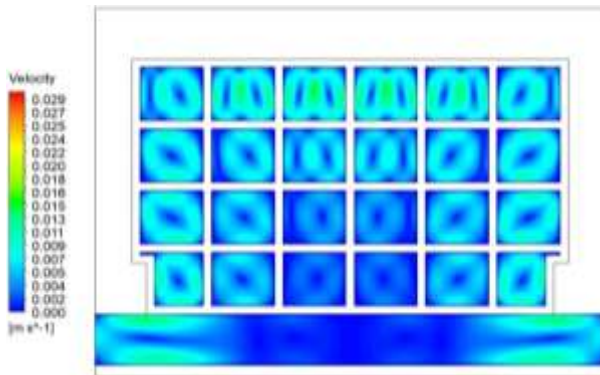
در مطالعه حاضر، به منظور معرفی بهترین ساختار و نوع سقف ساختمانی از منظر داشتن کمترین نرخ اتلاف حرارت از سقف، دوازده

حرکت می‌کند، گردابه به مانند 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 بالا است. هرچه سرعت در حفره‌ها بیشتر باشد، نرخ انتقال حرارت نیز بیشتر می‌باشد.

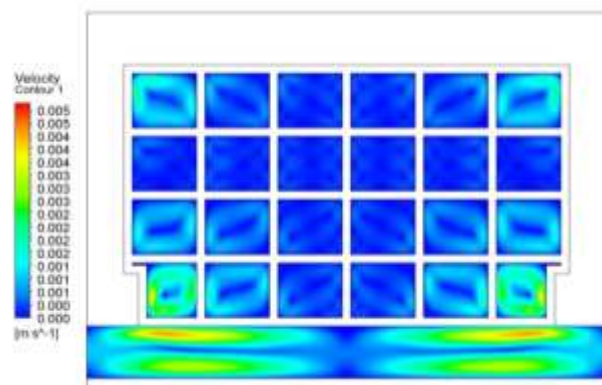
واضح است که انتقال حرارت در جامدات تنها از طریق هدایت صورت می‌گیرد، از جهتی دیگر با توجه به پایین بودن ضریب هدایت حرارتی هوا، مکانیزم غالب انتقال حرارت در حفره‌های هوا، جابجایی و تشعشع است، بنابراین وجود حفره‌های هوا درون یک جامد، پخش حرارت در جامد را به صورت قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نهایت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

حالت مختلف یک‌بار برای جریان حرارت رو به بالا و یک‌بار برای جریان حرارت رو به پایین مورد بررسی قرار گرفت، همچنین جهت مدل‌سازی مسأله و اعمال شرایط واقعی، تمامی مکانیزم‌های انتقال حرارت (هدایت، جابجایی و تشعشع) در محاسبه اتلاف حرارت از سقف لحاظ گردیدند.

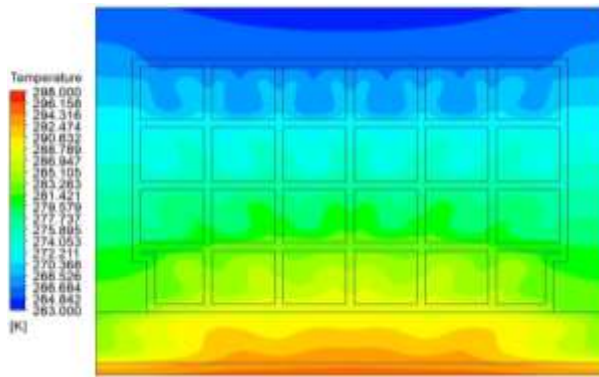
ابتدا جهت بررسی عملکرد حرارتی سقف‌های مدل‌سازی شده، میدان سرعت و دما برای جریان حرارت رو به بالا و جریان حرارت رو به پایین برای یکی از موارد مورد مطالعه، مقایسه می‌شود (شکل 4). همان‌طور که از میدان سرعت و دمای جریان حرارت رو به بالا مشاهده می‌شود، هنگامی که سطح گرم در پایین سقف قرار دارد، هوای مجاور سطح پایینی حفره‌ها گرم شده و به طرف بالا حرکت می‌کند و بعد از آن مجاور سطح سرد در بالا قرار می‌گیرد در نتیجه چگالی هوا افزایش یافته و مجدداً سیال به سمت پایین حرکت می‌کند که این امر باعث تشکیل گردابه درون حفره‌ها می‌شود، که به این مکانیزم جابجایی آزاد درون حفره‌ها گفته می‌شود. همچنین هنگامی که سطح گرم در بالا قرار دارد، با توجه به اینکه هوای گرم به دلیل چگالی کمتر به سمت بالا



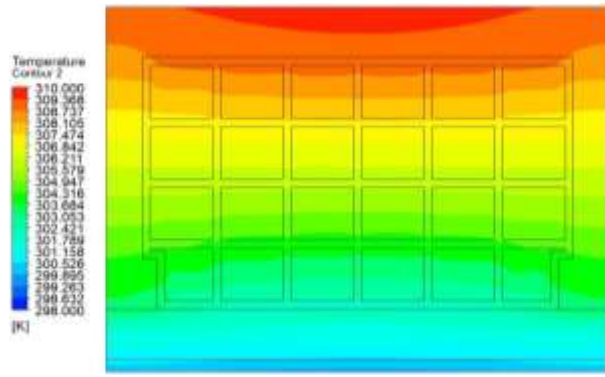
میدان سرعت جریان حرارت رو به بالا



میدان سرعت جریان حرارت رو به پایین

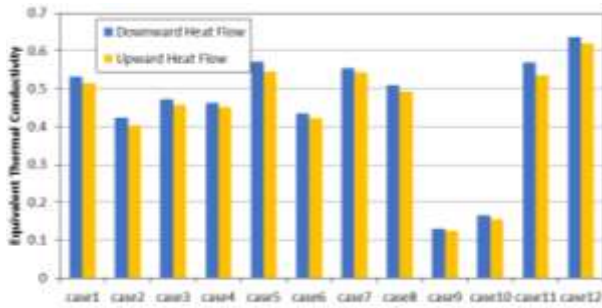


میدان دما جریان حرارت رو به بالا



میدان دما جریان حرارت رو به پایین

شکل (4) توزیع میدان سرعت و دما برای سقف مورد مطالعه شماره 2



شکل (5) ضریب انتقال حرارت هدایت معادل سقف‌های مورد مطالعه

حال به مقایسه سقف‌های موجود برای دهانه‌های 6 متر و 8 متر با توجه به سقف‌های شماره 9 و 10 که دارای کمترین ضریب هدایت معادل هستند می‌پردازیم. در بین سقف‌های شماره 1 تا 4 که همگی سقف‌های تیرچه بلوک با دهانه 6 متر هستند، سقف شماره 1 تا 3 همگی با بلوک سفالی (پایه رسی) می‌باشند و سیستم سقف شماره 4 دارای بلوک بتنی سبک است. مقایسه سقف شماره 1 و 4 که تعداد حفره‌های هوا در آن‌ها برابر است، آشکار می‌سازد، که با توجه به اینکه در سقف شماره 4 ضخامت جداره‌های بلوک بیشتر است، در نتیجه حفره‌های هوا نسبت به سقف شماره 1 کوچک‌تر است. همچنین جداره‌های بلوک سقف شماره 4 ضریب هدایت کمتری نسبت به سقف

برای مقایسه کمی نتایج و میزان انتقال حرارت سقف‌های مختلف، ضریب انتقال حرارت هدایت معادل برای هر کدام از موارد مورد مطالعه محاسبه شد. در شکل 5 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 بالا است. 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.

با توجه به نتایج شکل 5 می‌توان گفت که برای دهانه 6 متر، سقف شماره 9 دارای کمترین ضریب هدایت معادل و بیشترین مقاومت حرارتی در بین سقف‌های مورد مطالعه می‌باشد. همچنین برای دهانه 8 متر، سقف شماره 10 دارای کمترین ضریب هدایت معادل و بیشترین مقاومت حرارتی می‌باشد.

شماره 1 دارد، در نتیجه ضریب هدایت معادل شماره 4 کمتر از شماره 1 است. به گونه‌ای که، در جریان حرارت رو به پایین و رو به بالا ضریب هدایت معادل سقف شماره 4 به ترتیب، 04/13٪ و 05/12٪ کمتر از سقف شماره 1 است.

همچنین برای تعیین اثر تعداد حفره‌های هوا در یک حجم مساوی، با مقایسه حفره‌بندی در بلوک‌های سفالی شماره 2 و 3 با شماره 1 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 2 در جریان حرارت رو به پایین، 44/20٪ کمتر از سقف شماره 1 باشد، همچنین ضریب هدایت معادل سقف شماره 2 در جریان حرارت رو به بالا، 77/21٪ کمتر از سقف شماره 1 است. در واقع اضافه شدن هر لایه هوا باعث افزایش مقاومت حرارتی تشعشعی می‌شود بدین معنی که هر لایه هوا به 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 جابجایی کاهش می‌یابد.

مقایسه بلوک‌های 2 و 3 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 2 باعث افزایش مقاومت حرارتی ناشی از اثر دیواره بر روی سرعت سیال درون محفظه و بالطبع آن کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود. در جریان حرارت رو به پایین و رو به بالا، ضریب هدایت معادل بلوک 3 نسبت به بلوک 2 به ترتیب، 48/11٪ و 53/13٪ افزایش می‌یابد.

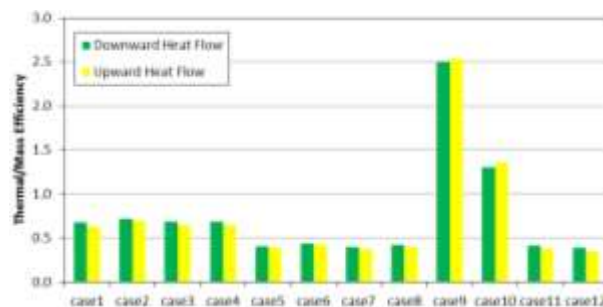
مقایسه نتایج بلوک 1 و بلوک 9 نشان می‌دهد که ضریب هدایت معادل سقف شماره 1 نسبت به سقف شماره 9 به طرز چشمگیری بزرگ‌تر است. بطوریکه این ضریب برای بلوک 1 در جریان حرارت رو به بالا و رو به پایین به ترتیب، 12/4 و 07/4 برابر بزرگ‌تر از بلوک

9 می‌باشد. می‌توان گفت ضریب هدایت حرارتی پایین پلی‌استایرن و همچنین عدم وجود حفره‌های هوا در بلوک پلی‌استایرن باعث می‌شود که حرارت صرفاً با مکانیزم هدایت حرارتی و بیشتر از طریق تیرچه‌ها انتقال می‌یابد. بنابراین سقف شماره 9 دارای کمترین ضریب هدایت معادل و بیشترین مقاومت حرارتی در بین سقف‌ها با دهانه 6 متر می‌باشد.

همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است، سقف‌های شماره 5 تا 8 سقف‌های تیرچه بلوک با دهانه 8 متر می‌باشند که در آن‌ها از دو تیرچه در کنار هم استفاده شده است. با توجه به افزایش ضخامت سقف برای دهانه 8 متر، ضریب هدایت معادل آن‌ها نسبت به دهانه 6 متر افزایش می‌یابد. با توجه به نکاتی که در بالا ذکر شد، سقف شماره 6 داری کمترین ضریب هدایت معادل بین سقف‌های 5 تا 8 می‌باشد. با مقایسه ضریب هدایت معادل سقف‌های شماره 5 و 8 می‌توان گفت که ضریب هدایت معادل سقف شماره 8 در جریان حرارت رو به بالا 56/9٪ و در جریان حرارت رو به پایین 85/10٪ نسبت به سقف شماره 5 کمتر می‌باشد. همچنین ضریب هدایت معادل بلوک 6 نسبت به بلوک 5 در جریان حرارت رو به بالا 71/22٪ و در جریان حرارت رو به پایین 85/23٪ کوچک‌تر است. مقایسه ضریب هدایت معادل سقف شماره 6 و 7 نشان می‌دهد که این ضریب بلوک 7 نسبت به بلوک 6 در جریان حرارت رو به بالا و رو به پایین به ترتیب 68/28٪ و 40/27٪ بزرگ‌تر است. همچنین ضریب هدایت معادل سقف شماره 7 در جریان حرارت رو به بالا 55/0٪ و در جریان حرارت رو به پایین 98/2٪ نسبت به بلوک 5 کوچک‌تر است. با مقایسه ضریب هدایت معادل سقف‌های شماره 5 و 10 در شکل 5، می‌توان نتیجه گرفت که این ضریب در بلوک 5 در جریان حرارت رو به بالا 52/3 برابر و در جریان حرارت رو به پایین 43/3 برابر بزرگ‌تر از بلوک 10 است.

سقف شماره 11 و 12 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 جهت اجرای سقف استفاده می‌شود که در این مطالعه، نمونه با طرح خاصی از یک مکعب

مستطیل مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه ضریب هدایت معادل سقف شماره 11 با سقف شماره 9 بیان می‌کند که در زمستان و در تابستان، این ضریب در بلوک 11 به ترتیب $4/29$ و $4/37$ برابر بزرگ‌تر از بلوک 9 می‌باشد. ضریب هدایت معادل سقف شماره 12 در سیستم سقف یوبوت با دهانه 8 متر در مقایسه با سقف شماره 10 در جریان حرارت رو به بالا $4/00$ برابر و در جریان حرارت رو به پایین $3/82$ برابر بزرگ‌تر است. همچنین ضریب هدایت معادل در سقف شماره 11 نسبت به شماره 2 در جریان حرارت رو به بالا $33/05\%$ و در جریان رو به پایین حدود $35/72\%$ بزرگ‌تر می‌باشد. 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 می‌باشد. عملکرد حرارتی ضعیف‌تر سقف‌های دال یوبوت نسبت به سایر سقف‌های مورد 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 جابجایی در آن‌ها، از نوع آزاد- اجباری باشد، در صورتیکه می‌توان گفت در محفظه‌ها با ابعاد کوچک تنها جابجایی طبیعی وجود دارد. در شکل 6، 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.



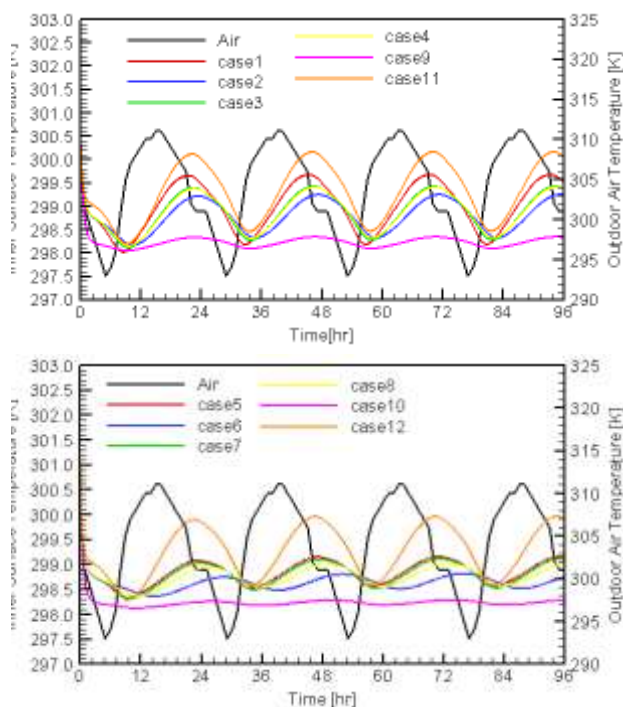
شکل (6) راندمان جرمی حرارتی سیستم سقف‌های مختلف مورد مطالعه

با توجه به شکل 6 مشخص است که سقف‌ها با دهانه 6 متر راندمان جرمی حرارتی بزرگ‌تری نسبت به سقف‌ها با دهانه 8 متر دارند، که این مهم ناشی از جرم کمتر سقف‌های دهانه 6 متر می‌باشد. با مقایسه راندمان جرمی حرارتی سقف‌های شماره 1 و 4 می‌توان گفت که راندمان جرمی حرارتی سقف شماره 4 در جریان حرارت رو به بالا و رو به پایین به ترتیب $2/05\%$ و $1/97\%$ بیشتر از سقف شماره 1 است. همچنین در رابطه با راندمان جرمی حرارتی سقف‌های شماره 1 و 2 می‌توان گفت که راندمان سقف شماره 2 به ترتیب در زمستان و تابستان، $9/22\%$ و $5/86\%$ بزرگ‌تر از سیستم سقف شماره 1 است. با مقایسه نتایج سقف‌های شماره 2 و 3 آشکار می‌شود که راندمان جرمی حرارتی سقف شماره 3 در جریان حرارت رو به بالا و رو به پایین به ترتیب $6/64\%$ و $4/41\%$ کمتر از سقف 2 است.

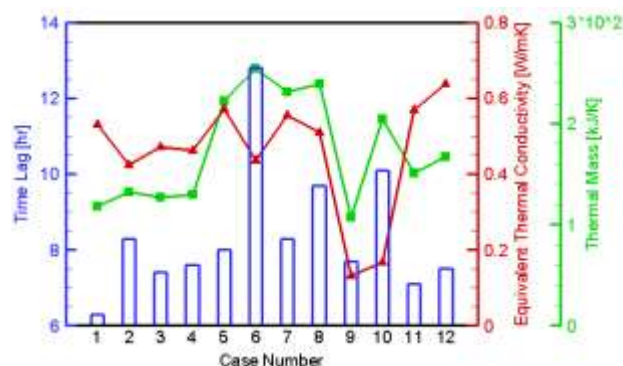
از نکات قابل توجه این است که در میان سقف‌های مورد بررسی، سیستم سقف شماره 9 دارای بیشترین راندمان جرمی حرارتی در بین سقف‌های با دهانه 6 متر است، می‌توان به این نکته اشاره کرد که وزن کم و همچنین ضریب هدایت معادل پایین دلیل این موضوع است. این مهم برای سقف‌های با دهانه 8 متر نیز صادق است.

در شکل 7، پروفیل دمای هوای بیرون و پروفیل دمای سطح داخلی (فصل مشترک هوای داخل و گچ برگ) به‌عنوان تابعی از زمان نشان داده شده است. پروفیل دمای هوای بیرون برای چهار روز از سال از 15 تا 19 تیرماه سال 1398 برای شرایط شهر کرمان با توجه به داده‌های آب و هوایی سازمان هواشناسی بدست آمده‌اند. در اینجا، هدف بدست آوردن زمانی است که دمای سطح داخلی به اکسترم‌های خود می‌رسد و همچنین بدست آوردن اختلاف زمان بین اکسترم‌های دمای سطح داخلی و هوای آزاد می‌باشد. 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 داخلی به وجود می‌آید که به آن تأخیر حرارتی می‌گویند. مصالحی که در آن‌ها، تأخیر حرارتی بزرگ است دارای ویژگی‌هایی از قبیل ضریب هدایت

سیستم سقف شماره 9 است. همچنین با مقایسه با سقف شماره 2 تأخیر حرارتی آن حدود 16/9٪ کمتر است. در سقف‌های با دهانه 8 متر نیز نکات بالا صادق است. سقف شماره 6 دارای بیشترین جرم حرارتی در بین سقف‌های دهانه 8 متر می‌باشد.



شکل (7) پروفیل دمای هوای بیرون و دمای سطح داخلی گچ برگ به‌عنوان تابعی از زمان



شکل (8) تأخیر زمانی سیستم سقف‌های مختلف مورد مطالعه

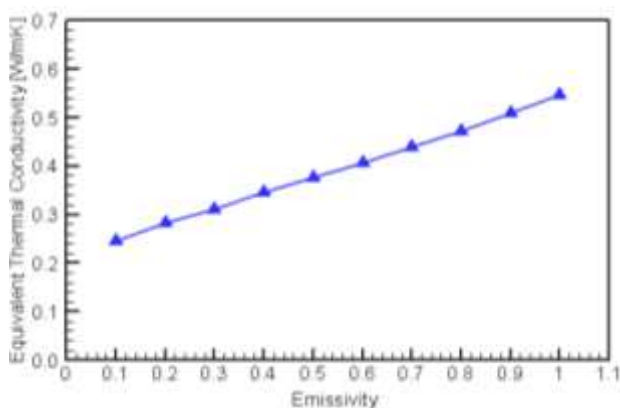
حرارتی پایین، ظرفیت حرارتی بالا و چگالی زیاد هستند، از این خاصیت می‌توان در مناطقی استفاده کرد که نوسانات دمایی روزانه بالایی دارند، در این صورت می‌توان ظرفیت تأسیسات تهویه مطبوع را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. در شکل 8، نتایج مربوط به تأخیر حرارتی و جرم حرارتی هرکدام از سیستم سقف‌های مورد بررسی آورده شده است.

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 داده شده در شکل 7 و 8، سقف شماره 2 دارای بیشترین تأخیر حرارتی در بین سقف‌های با دهانه 6 متر است. همچنین با مقایسه سقف‌های 1 تا 4 مشاهده می‌شود که سقف شماره 2 دارای بیشترین جرم و کمترین ضریب هدایت حرارتی معادل در بین سقف‌های 1 تا 4 می‌باشد. با مقایسه نتایج بلوک 1 و 4 می‌توان گفت که تأخیر حرارتی سقف شماره 4، 20/63٪ بیشتر از سقف شماره 1 می‌باشد. در مقایسه سقف‌های 2 و 3 نیز جرم حرارتی و ضریب هدایت معادل تأثیر مستقیم در کمتر شدن تأخیر حرارتی سقف شماره 3 دارند، بطوریکه تأخیر حرارتی سقف شماره 3، 10/84٪ کمتر از شماره 2 است. همچنین مقایسه سیستم سقف شماره 3 و 1 نشان می‌دهد که تأخیر حرارتی سقف شماره 3 نسبت به سقف شماره 1، 17/46٪ بیشتر است.

با مقایسه سقف شماره 2 که دارای بیشترین تأخیر حرارتی در بین سقف‌های دهانه 6 متر است با سقف شماره 9 که دارای کمترین ضریب هدایت معادل و کمترین جرم حرارتی در بین سقف‌های دهانه 6 متر است، می‌توان به این نکات اشاره کرد که تأخیر حرارتی سقف شماره 9 نسبت به سقف شماره 2 حدود 7/23٪ کمتر است.

سقف شماره 11 یا سقف یوبوت، دارای بیشترین جرم حرارتی و بیشترین ضریب هدایت معادل در بین سقف‌ها با دهانه 6 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، بطوریکه در مقایسه با سقف شماره 9، تأخیر حرارتی آن حدود 8/45٪ کمتر از

بدست آمد. در شکل 10، تغییرات ضریب هدایت حرارتی معادل در مقابل ضرایب مختلف صدور تشعشعی دیواره بلوک سفالی نشان داده شده است. با توجه به نتایج شکل 10، می توان گفت با افزایش ضریب صدور تشعشعی دیواره حفره ها، ضریب هدایت حرارتی معادل زیاد می شود، به گونه ای که با افزایش ضریب صدور از 0/1 به 1/0، ضریب هدایت حرارتی معادل سقف 2/21 برابر افزایش می یابد. بنابراین مطلوب آن است که دیواره محفظه های هوا در سیستم سقف ها، دارای ضریب صدور تشعشعی پایینی باشند که در این صورت به مانند یک سپر تشعشعی عمل می کنند.

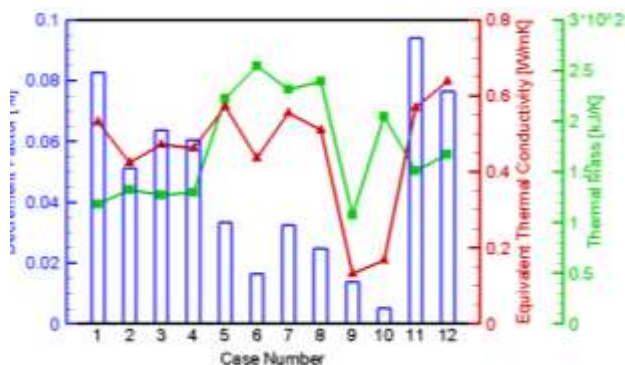


شکل (10) تغییرات ضریب هدایت حرارتی معادل در برابر ضریب صدور دیواره حفره های سقف شماره 1 در فصل زمستان

5. نتیجه گیری

در این مطالعه، به منظور تحلیل عملکرد حرارتی سیستم سقف های متداول در ایران، شبیه سازی عددی دو بعدی بر روی 12 مدل متفاوت از سقف های ساختمانی انجام پذیرفت. جهت بررسی اثر نوع حفره بندی محفظه های هوا، سه حالت مختلف در بلوک های سفالی که در آنها تعداد حفره های هوا، نسبت ظرافت هندسی محفظه های هوا و چگونگی قرارگیری این حفره ها نسبت به یکدیگر (منظم و جابجا شده) مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین جهت بررسی اثر جنس بلوک های حفره دار بر رفتار حرارتی، بلوک سفالی با بلوک سبک بتنی تحت شرایط برابر از نظر شرایط مرزی، تعداد و نحوه قرارگیری حفره ها مقایسه گردیدند. بعلاوه، به منظور بررسی اثر عرض دهانه سقف، دو دهانه با

در تحلیل ضریب کاهش حرارتی می توان گفت که هر چه، این پارامتر افزایش یابد، نوسانات دمای هوای بیرون بر روی توزیع دمای سطح داخل بیشتر تأثیرگذار می شود و هرچقدر این ضریب کاهش یابد نوسانات دمای هوای بیرون بر روی دمای سطح داخل کمتر می باشد که این مهم مطلوب طراحی است. مقایسه نتایج برای ضریب کاهش حرارتی در شکل 9 مشخص می کند که در میان سقف های با دهانه 6 متر، سقف شماره 9 که سقف تیرچه با بلوک پلی استایرن می باشد دارای کوچک ترین مقدار ضریب کاهش حرارتی است، در حالی که سیستم سقف شماره 11 دارای بدترین شرایط از لحاظ مقدار ضریب کاهش حرارتی است. با توجه به نتایج مربوط به ضریب هدایت حرارتی معادل، به عنوان یک اصل کلی می توان گفت که رابطه مستقیمی بین این ضریب و ضریب کاهش حرارتی وجود دارد بطوریکه، برای بیشتر سقف هایی که این پارامتر کوچک است ضریب کاهش حرارتی نیز کوچک می باشد. همچنین در میان سقف های با دهانه 8 متر، سقف با بلوک پلی استایرن دارای بهترین شرایط از دیدگاه ضریب کاهش حرارتی است در حالیکه سیستم سقف یوبوت دارای بدترین مقدار ضریب کاهش حرارتی است.



شکل (9) ضریب کاهش حرارتی سیستم سقف های مختلف مورد مطالعه

برای تحلیل اثر ضریب صدور تشعشعی حفره ها، هندسه سقف شماره 1 در جریان حرارت رو به بالا مورد بررسی قرار گرفت، بدین ترتیب که ضریب صدور تشعشعی دیواره حفره ها را از مقدار 0/1 تا 1/0 با بازه 0/1 تغییر داده و نتایج برای ضریب هدایت حرارتی معادل

چشمه 6 و 8 متر، تحت شرایط واقعی شبیه‌سازی شدند و نتایج برای آن‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از این مطالعه به‌صورت زیر بیان می‌گردند:

1- در میان سقف‌های با دهانه 6 و 8 متر، سقف تیرچه با بلوک پلی‌استایرن بهترین عملکرد را از منظر کوچک بودن ضریب هدایت حرارتی معادل داشتند، در این مورد سقف دال یوبوت بزرگ‌ترین مقدار را در هر دو دهانه مورد بررسی داشت و از دیدگاه میزان اتلاف حرارت، دارای بدترین عملکرد می‌باشد،

2- 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 شش متر در سیستم سقف با بلوک پلی‌استایرن و سقف یوبوت در زمستان به ترتیب 2/53 و 0/38 و برای تابستان 2/49 و 0/41 می‌باشد. در میان سقف‌های تیرچه با بلوک سفالی و با بلوک سبک بتنی، راندمان جرمی حرارتی آن‌ها بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشند.

3- 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 شش متر 8/3 ساعت و دهانه هشت متر 12/8 ساعت) می‌باشد. 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 می‌باشد. از این منظر، مجدداً سقف‌های دال یوبوت دارای عملکرد خوبی نمی‌باشند.

4- ضریب کاهش حرارتی که نسبت اختلاف اکسترم‌های دمای سطح داخلی به اختلاف اکسترم‌های دمای هوای بیرون می‌باشد. بزرگ بودن این پارامتر نشان دهنده تأثیر زود هنگام نوسانات دمای هوای بیرون بر روی تغییرات هوای داخل می‌باشد. از این منظر، سقف‌ها با بلوک پلی‌استایرن دارای بهترین عملکرد و سقف دال یوبوت بدترین پاسخ می‌باشد.

5- مقایسه رفتار حرارتی سقف با دهانه 6 و 8 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.

6- 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 و اختصارات

V	میدان سرعت
p	فشار
T	دما
k	ضریب هدایت حرارتی
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی
ρ	چگالی
C_p	ظرفیت حرارتی ویژه
q_r	بردار شار تابشی
ka	ضریب جذب
I	شدت تشعشع
I_b	شدت تشعشع جسم سیاه
β	ضریب انبساط حجمی
φ	تابع فاز
$d\Omega$	زاویه فضای
ε	ضریب صدور سطح حفره‌ها
α	ضریب جذب تشعشعی
T_∞	دمای محیط
keq	ضریب هدایت معادل
q_w	متوسط حرارت عبوری
M	جرم

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., Alajmi, R., "Conjugate conduction convection and radiation heat transfer through hollow autoclaved aerated concrete blocks." Journal of Building Performance Simulation, Vol. 5(4), pp. 248-262, 2012.

[11] Saghafi, M., 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., Fang, L., "Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method." International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52(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., 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., 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., 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., Kocuyigit, F., Rabanal, F. P., Alonso-Martínez, M., 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., 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., 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., 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.

R_{tot}	مقاومت حرارتی کل
$\eta_{th-mass}$	راندمان حرارتی نسبت به جرم
t	زمان
Ti max	بیشینه دمای سطح داخل ساختمان
Ti min	کمینه دمای سطح داخل ساختمان
To max	بیشینه دمای هوای بیرون
To min	کمینه دمای هوای بیرون

مراجع

[1] Fogiatto, M.A., Henrique dos Santos, G., 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] مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان صرفه جویی در مصرف انرژی

[3] del Coz Díaz, J. J., Nieto, P. G., Hernández, J. D., 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., 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., 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., 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., 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., & 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., Macias-Melo, E.

Investigation of Thermal Behavior of Different Common Roofing Systems in the Building Using Computational Fluid Dynamic Method

Alireza Arab Solghar^{1,*}, Milad Rabiei², Afshin Iranmanesh³, Mohammad Shafiei Dahej

¹Associate Professor, Department of mechanical engineering, Vali-e-Asr univeristy, Rafsanjan, Iran, a.arabsolghar@vru.ac.ir.

²MSc, Department of mechanical engineering, Vali-e-Asr univeristy, Rafsanjan, Iran.

³Instructor, Department of civil engineering, Vali-e-Asr univeristy, Rafsanjan, Iran.

⁴Associate Professor, Department of mechanical engineering, Vali-e-Asr univeristy, Rafsanjan, Iran.

Abstract: In this study, the influence of type and structure of different roofing systems were investigated using computational fluid dynamic method. The considered roofing systems include beam and block types (clay brick, light weight concrete block, polystyrene) and Uboot slab which were designed for 6m and 8m span. To simulate the fluid flow and heat transfer, the computational fluid dynamic method was employed based on control volume scheme. Heat transfer inside air cavities is carried out via free convection and radiation while heat transfers via conduction within solid walls. The thermal simulation of the roofing systems was analyzed for both summer (downward heat flow) and winter (upward heat flow). Two dimensional natural heat transfer was considered to be transient with laminar and incompressible flow inside cavities. To assess the thermal performance of the flooring systems, equivalent thermal conductivity, decrement factor and time lag were studied. Finally, the best roofing system was introduced in terms of heat transfer and thermal mass efficiency. The results showed that the roof with polystyrene block has the lowest value of equivalent thermal conductivity and Uboot system has the highest heat loss among the studied cases.

Keywords: CFD, building envelope, equivalent thermal conductivity, heat lag.

Investigation of Thermal Behavior of Different Common Roofing Systems in the Building Using Computational Fluid Dynamic Method

Alireza Arab Solghar^{1,*}, Milad Rabiei², Afshin Iranmanesh³, Mohammad Shafiei Dahej

¹Associate Professor, Department of mechanical engineering, Vali-e-Asr univeristy, Rafsanjan, Iran, a.arabsolghar@vru.ac.ir.

²MSc, Department of mechanical engineering, Vali-e-Asr univeristy, Rafsanjan, Iran.

³Instructor, Department of civil engineering, Vali-e-Asr univeristy, Rafsanjan, Iran.

⁴Associate Professor, Department of mechanical engineering, Vali-e-Asr univeristy, Rafsanjan, Iran.

Extended Abstract

Introduction: In the past decades, significant energy consumption of fossil fuels has damaging impacts on the atmosphere. Building energy consumption currently takes 40% of total energy use. Also, heating, cooling and ventilation of the buildings are responsible for 35% of total energy consumption of the buildings and approximately 40% of total direct and indirect CO₂ emissions. Therefore, reduction of energy loss through walls, roofs and windows and improving the performance of air conditioning systems are the key solutions in lowering energy use. In this study, the influence of different roofing systems which are commonly used in Iran on thermal behavior of the building's envelope are examined. The results were presented based on the equivalent thermal conductivity, heat lag and decrement factor.

Materials and methods:

To assess the impact of the buildings' roofing systems, common type of roofing available in Iran market were employed, namely, beam with clay, light weight concrete and polystyrene block, and Uboot system. Furthermore, different air cavities were inserted into clay block to study the impact of air containers size and orientations on thermal characteristics of the roofing system. To analyses the effect of the span, two different of roof's span were considered in the computations. The spans were assumed to be 6m and 8m. Also, to have fair comparison among the systems, similar boundary conditions were used in the calculation, which it was assumed that the indoor temperature is kept constant at 25C and outdoor temperature is varied with time. In order to decrease the computational time, the symmetrical boundary conditions were imposed for each geometry. For the cases with air container, convection and radiation heat transfer is considered. Moreover, conduction heat transfer was modeled in solid materials. Structural and unstructured meshes were used for the discretization depending on the curvature of the solid's boundaries.

Result:

The present results were compared against available numerical method and good agreement was found. From the numerical computations, it can be stated that when the numbers of air containers increase, the equivalent thermal conductivity decreases, this can be due to the impacts of the cavity's walls on the decelerating the flow field and also on the thermal radiation transfer which is lowered as the walls acts like a radiation shield. Moreover, for the roof with polystyrene block, the lowest value of the equivalent thermal conductivity was obtained. This might be due to the fact that thermal bridges are considerably

removed in this type of the roofing system. To compare the impact of block materials, clay and light weight concrete were considered in the computations. It was found that under similar conditions, the light weight concrete showed lower value of the equivalent thermal conductivity versus the block made of clay; this could be due to two main factors, first, smaller thermal conductivity of the light weight concrete against the clay, and second, smaller air cavities for the case with the light weight concrete. The worst case among the studied systems is Uboot roofing, in terms of the equivalent thermal conductivity. The present results displayed that the equivalent thermal conductivity of Uboot roofing system is almost four times larger than those of the polystyrene block in both winter and summer. Another important parameter for the energy consumption of the buildings and the capacity of air conditioning systems is time lag, which represents the delay time between the maximum outdoor temperature and the maximum cooling/ heating load. From the present results, it can be stated that the roofing system with the clay block having the highest number of air cavities gives the maximum delay time which is favorable. This is due to the lower value of the equivalent thermal conductivity and heavier weight of the block being compared with the other roofing systems. Apparently, as the thermal conductivity decreases, the heat loss through the roof drops, also the heavier weight of the block brings higher heat capacity which causes to store more energy inside the body and to lose less energy with time. Finally, thermal-mass efficiency is an important factor to describe the thermal characteristics of the buildings' envelope. As it is expected, the roofing system with polystyrene block gives the best thermal-mass efficiency. Because this system yields the lowest value of equivalent thermal conductivity and mass. As the equivalent thermal conductivity decrease, the thermal resistance increases, so this is desirable in the buildings, which consequently decreases the energy consumption of the buildings as well as the reduction of capacity of the air conditioning systems.

Discussion and Conclusion

In this study, the differential governing equations of the conjugate heat transfer of air enclosures and the solid materials were numerically solved through ANSYS FLUENT software using the finite volume method. The findings of the present work showed that as thermal conductivity of the material of the roofing system decreases, the overall heat transfer coefficient decreases. The roofing system with polystyrene block gives the lowest values of the equivalent thermal conductivity for both 6m and 8m span. Moreover, Uboot roofing system has the worst thermal characteristics in terms of the equivalent thermal conductivity. It is recommended that to decrease the charge of energy for cooling and heating of the building and to lower the initial cost for buying air conditioning equipment, the equivalent thermal conductivity and the thermal-mass efficiency of the buildings' envelope is analyzed prior to the construction.

Keywords: CFD, building envelope, equivalent thermal conductivity, heat lag.