



بررسی اثر حفره‌بندی بلوک بر میزان انتقال حرارت با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

علی شاه وردی قهفرخی^۱، علیرضا عرب سلغار^{۲*} و میثم محمدی^۳

^۱ کارشناس ارشد، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، ایران

^۲ دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، ایران

^۳ استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۳۰

چکیده

در این مطالعه، اثر اندازه و تعداد حفره‌های بلوک بتنی سبک وزن بر میزان اتلاف حرارت با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور به حداقل رساندن ساده‌سازی‌ها، انتقال حرارت ترکیبی جابجایی و تشعشع در حفره‌های بلوک بکار گرفته شده است که در آن‌ها هوا محبوس شده است؛ همچنین در جداره بلوک انتقال حرارت هدایت در نظر گرفته شد. جهت بررسی نحوه قرارگیری حفره‌های هوا در بلوک، دو قید هندسی در طراحی آن‌ها اعمال شد؛ در نتیجه، ۲۲ پیکربندی ممکن به دست آمد که در آن‌ها می‌بایستی حداقل دو و حداکثر نه حفره هوا وجود داشته باشد. به منظور شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت از روش دینامیک سیالات محاسباتی مبتنی بر روش حجم کنترل محدود استفاده گردید. انتقال حرارت طبیعی سه‌بعدی به صورت پایا با جریان آرام و تراکم ناپذیر در محفظه‌ها در نظر گرفته شد. به منظور بررسی عملکرد حرارتی بلوک‌ها، ضریب هدایت معادل تعیین و نتایج به صورت کانتورهای دما و سرعت ارائه گردیدند و در نهایت بهینه‌ترین پیکربندی‌های حفره‌های هوا از دیدگاه انتقال حرارت معرفی شدند. نتایج نشان می‌دهد که نحوه قرارگیری و اندازه حفره‌ها، تأثیر قابل توجهی در نرخ انتقال حرارت دارد؛ همچنین لحاظ کردن انتقال حرارت تشعشعی در حفره‌ها بسیار با اهمیت است.

کلمات کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی؛ انتقال حرارت؛ ضریب هدایت معادل؛ بلوک سبک بتنی؛ حفره.

Investigation of the Effect of Cavity Insertion in Brick on Heat Transfer Through Using Computational Fluid Dynamic Simulation

A. Shahverdi¹, A. Arab Solghar^{2*}, M. Mohammadi³

¹ Msc, Mech. Eng., Vali-e-Asr Univ., Rafsanjan, Iran.

² Assoc. Prof., Mech. Eng., Vali-e-Asr Univ., Rafsanjan, Iran.

³ Assis. Prof., Mech. Eng., Vali-e-Asr Univ., Rafsanjan, Iran.

Abstract

In this study, heat loss through light weight concrete bricks as a function of the size and number of bricks' cavities was examined via numerical simulation. To minimize the simplifications, conjugate convection and radiation heat transfer within the brick's cavities filled with air was considered. Also, in the solid of the brick, conduction heat transfer was taken into account. To assess the orientation of the cavities in the brick, two geometrical constrains were employed in the design of the bricks leading to 22 different layouts for which there should be at least two cavities and at most nine enclosures inside a brick. Computational fluid dynamic approaches based on finite volume method were used for the simulations. 3D natural heat transfer with incompressible laminar flow was assumed in the cavities under steady state conditions. To analyze and compare the results in terms of thermal characteristics, the equivalent coefficient of conduction heat transfer was defined. Also, the results were presented with isotherms and velocity contours. Finally, the best configurations of air cavities in the view point of heat transfer were found. The results demonstrate that the configuration and size of the cavities have profound impact on the rate of heat transfer. Also, considering radiation heat transfer in the cavities is rather important.

Keywords: CFD; Heat Transfer; Equivalent Conductivity; Lightweight Concrete Brick; Cavity.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی مانند، گاز، بنزین، زغال‌سنگ و ... موجب تغییرات زیاد آب و هوایی و گرمایش زمین شده‌اند؛ همچنین با توجه به اتمام سوخت‌های فسیلی در آینده نه‌چندان دور، کنار گذاردن این منبع انرژی اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. بر اساس اطلاعات و آمارهای انتشاری، در هر سال سیستم‌های سرمایش و گرمایشی ساختمان‌ها، سهم قابل‌توجهی از مصرف و اتلاف انرژی را به خود اختصاص می‌دهند. در ایران نه تنها در طراحی بارهای سرمایش و گرمایش دقت کافی به عمل نمی‌آید، بلکه پایین بودن بازده تجهیزات تهویه مطبوع و عدم استفاده از کاهنده‌های مصرف انرژی در ساختمان‌ها، باعث اتلاف دوچندان انرژی می‌شود. استفاده از عایق‌های مناسب، پنجره‌های دو و سه جداره و به‌کارگیری بلوک‌های استاندارد از جمله مواردی هستند که کمک قابل‌توجهی به کاهش مصرف انرژی می‌کند. ممکن است، برای بهینه‌سازی و نصب تجهیزات کاهنده مصرف انرژی، هزینه اولیه ساخت ساختمان اندکی افزایش پیدا کند، ولی در درازمدت این هزینه‌ها برگشت‌پذیر هستند.

بیشترین اتلاف‌های حرارت در ساختمان‌ها ناشی از دیوارهای جانبی، سقف و کف می‌باشند. در محاسبات مربوط به تعیین اتلاف حرارتی در فصل سرد و گرم سال، انتقال حرارت از طریق هدایت حرارتی از دیواره‌های ساختمان، جزء بارهای اصلی حرارتی محسوب می‌شوند. جهت کاهش این بار حرارتی، می‌بایستی مقاومت حرارتی دیوارهای ساختمان را بالا برد. یک‌راه ساده، مؤثر و اقتصادی، استفاده از لایه‌های هوا در بلوک‌های ساختمانی است. هوا که دارای ضریب انتقال حرارت هدایت کوچکی است، می‌تواند مانند یک‌لایه عایق درون بلوک عمل کرده و منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت شود؛ همچنین استفاده از بلوک‌های حفره‌دار باعث کاهش قابل توجه وزن ساختمان شده و هزینه ساخت را پایین می‌آورد. با توجه به اهمیت انتقال حرارت از دیواره‌های ساختمانی، تاکنون مطالعات زیادی در زمینه مدل‌سازی حفره‌ها با هندسه استاندارد انجام شده است. در مدل‌سازی اولیه حفره‌ها، انتقال حرارت جابجایی در حفره‌ها و هدایت حرارتی در جداره آن در نظر گرفته می‌شد [۱-۳]. در برخی از شبیه‌سازی‌ها اثر تشعشع سطوح بر انتقال حرارت جابجایی

در محفظه‌ها مورد بررسی قرار گرفت [۴، ۵] و نشان داده شد که تشعشع سطوح، اثر قابل‌توجهی بر توزیع دما و الگوی جریان دارد؛ همچنین نرخ انتقال حرارت در محفظه وابسته زیادی به ضریب صدور سطوح حرارتی دارد.

تعداد اندکی مطالعه در زمینه شبیه‌سازی انتقال حرارت در بلوک‌های توخالی (حفره‌دار) انجام شده است. لورنته و همکاران [۶]، یک آجر از جنس رس که یک حفره عمودی در وسط آن قرار داشت را با استفاده از یک مدل تحلیلی ساده مورد مطالعه قرار دادند. ال هزمی [۷]، انتقال حرارت هدایت-جابجایی در سه نوع از آجرهای رسی را با استفاده از نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی کردند. در یک شبیه‌سازی عددی توسط دیاز و همکاران [۸]، انتقال حرارت از پنج نمونه از بلوک‌های سبک وزن با اندازه‌های مختلف و با حفره‌هایی با شکل متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها این پنج هندسه را از نظر وزن و از نظر اندازه از دیدگاه کاهش دادن میزان انتقال حرارت مقایسه کردند. در یک تحلیل عددی دو بعدی آنتار [۹] 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 تحقیق، اندازه بلوک‌ها ثابت بود و تعدادی محفظه افقی با شکل‌های مختلف در بلوک گنجانده شده بود. نتایج او نشان داد که نرخ انتقال حرارت وابستگی قابل‌توجهی به ضریب صدور سطح حفره دارد؛ همچنین شکل و اندازه محافظ هوا تأثیر زیادی در میزان انتقال حرارت دارد. سان و فنگ [۱۰] 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 مسئله انتقال حرارت، توزیع بردارهای سرعت و توزیع دما را در بلوک‌های حفره‌دار نشان 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.

دیاز و همکاران [۱۱] در یک تحلیل عددی با استفاده از روش المان محدود به مقایسه رفتار حرارتی سه نوع ماده متفاوت مورد استفاده در سقف ساختمان‌ها پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن بلوک‌های بتنی، رسی و سبک وزن، رفتار

مدل‌سازی و بهینه‌سازی انتقال حرارت بلوک‌های سبک بتنی انجام شده است. در بیشتر تحقیقات گذشته، هندسه بلوک‌ها به صورت دو بعدی در نظر گرفته شده است و از نقش ارتفاع بلوک در رفتار حرارتی آن صرف‌نظر شده است؛ بنابراین در این پژوهش سعی شد تا تمامی پدیده‌های حاکم در انتقال حرارت از بلوک‌های سبک وزن بتنی لحاظ گردد و اثر تعداد، اندازه و جهت حفره‌های هوای بلوک مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد.

بدین منظور در این مطالعه، انتقال حرارت از بلوک‌های بتنی سبک وزن که از ترکیب ملات ماسه و سیمان به همراه پوکه صنعتی و یا معدنی ساخته می‌شوند و در سال‌های اخیر توسط پیمانکاران ساختمان، مورد استفاده فراوان قرار گرفته است. 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 گردیدند و نتایج به شکل کانتورهای دما و سرعت ارائه شدند.

۲- تشریح مسئله

در مطالعه حاضر، اثر تعداد، اندازه و جهت حفره‌های بلوک بر میزان انتقال حرارت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. بدین منظور برای مقایسه حالت‌های مختلف، دو قید در طراحی حفره‌های بلوک‌ها با اندازه هندسی ثابت لحاظ شد؛ (۱) ضخامت هر یک از جداره‌های بلوک ۳ cm در نظر گرفته شد؛ (۲) حداقل ضخامت حفره‌های هوا، ۲ cm لحاظ گردید. شایان ذکر است که معیار انتخاب این اندازه‌ها، مشورت با تولیدکنندگان این بلوک‌ها بوده است تا بلوک‌ها دارای استحکام کافی مکانیکی باشند و اندازه کوچک حفره‌ها مانعی در تولید آن‌ها ایجاد نکند؛ همچنین برای آنکه وزن بلوک مانعی برای ازدیاد بار مرده بر سازه ساختمان نباشد، حداکثر تعداد جداره‌های طولی بلوک چهار عدد لحاظ گردید. عرض، طول و ارتفاع بلوک سیمانی سبک مورد مطالعه به ترتیب ۲۰ cm، ۴۰ cm و ۲۰ cm است که اندازه‌های رایج در بازار ایران است؛ بنابراین با توجه به قیدهای طراحی، ۲۲ حالت حفره بندی ممکن برای این بلوک به دست آمد که مدل فیزیکی و سیستم مختصات مسئله مورد مطالعه در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند.

حرارتی بلوک‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند. در این تحقیق به منظور بررسی اثر حفره‌های هوا، شش هندسه در محاسبات لحاظ شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که بلوک با نه حفره هوا بهترین عملکرد از نظر بهینه بودن بار مرده ساختمان و رفتار حرارتی دارد.

سامبو و همکاران [۱۲]، با در نظر گرفتن یک محفظه دو بعدی با مانع‌های ضخیم طولی شرایط یک بلوک را تا حدودی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها در دیوارهای مانع، هدایت حرارتی و در فضای مابین جداره‌ها که هوا وجود داشت، انتقال حرارت جابجایی و تشعشع را در نظر گرفتند. آن‌ها همانند سایر مراجع نتیجه گرفتند که تشعشع سطوح نقش قابل توجهی بر رفتار حرارتی محفظه دارد؛ همچنین آن‌ها گزارش دادند که تعداد، فاصله و جنس مانع‌ها تأثیر قابل توجهی بر عملکرد حرارتی محفظه دارند.

بوکنیدیل و همکاران [۱۳]، در یک تحلیل عددی 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. هوانگ و همکاران [۱۴]، به بررسی عددی عملکرد حرارتی دیوارها با بلوک حفره‌دار که امکان ورود و خروج جریان هوای سرد و یا گرم در آن‌ها باشد پرداختند و نتیجه گرفتند که عواملی نظیر، سرعت و دمای هوای ورودی به بلوک و اندازه محفظه‌ها، تأثیر قابل توجهی بر کاهش نرخ انتقال حرارت از ساختمان و کاهش هزینه انرژی سرمایش و گرمایش ساختمان دارد.

ژانگ و یانگ [۱۵] اثر لایه هوا به عنوان یک عایق در نمای ساختمان را روی نرخ انتقال حرارت مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تأثیر پارامترهای هندسی لایه هوا و ضریب گسیل سطح را بر میزان نرخ اتلاف حرارت بررسی کردند و گزارش دادند که بسته به شرایط اقلیمی، بکار بردن لایه هوا به عنوان عایق در دیوار، سقف و پنجره‌های ساختمان می‌تواند نرخ انتقال حرارت را تا نزدیک ۴۰٪ کاهش دهد.

با توجه به مروری بر پژوهش‌های گذشته، می‌توان به این نتیجه رسید که تا به حال مطالعات اندکی در زمینه

معادله ممنتوم در جهت y:

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

معادله ممنتوم در جهت z:

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = g\beta(T - T_{ref}) + v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

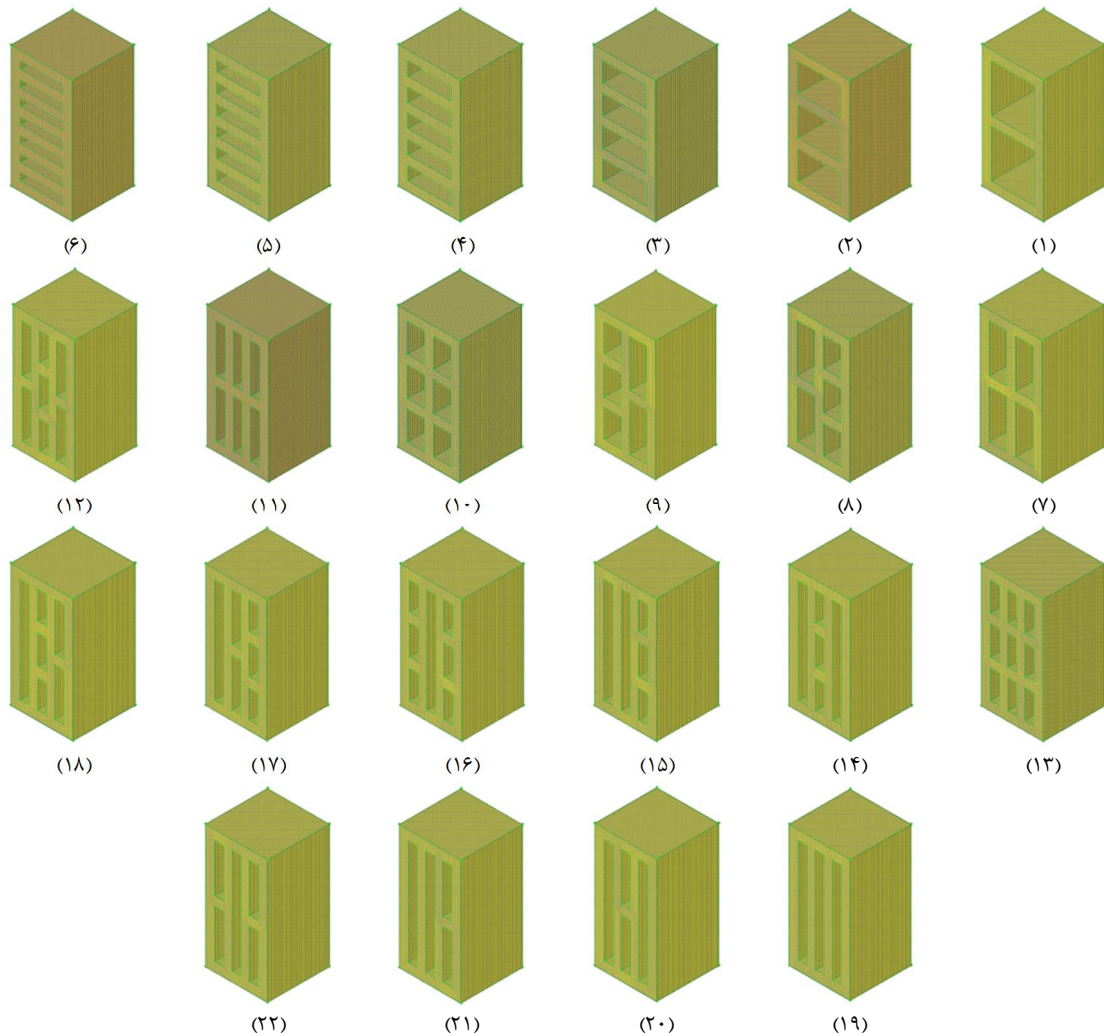
معادله انرژی حاکم بر جریان سیال که در آن اثر تشعشع سطوح نیز در نظر گرفته می‌شود به شکل زیر است:

در مدل‌سازی مسئله حاضر فرض می‌شود که درون محفظه‌های هوا انتقال حرارت جابجایی و تشعشع وجود دارد. بنابراین معادلات حاکم بر جریان هوا درون حفره‌ها به شرح ذیل است:
معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

معادله ممنتوم در جهت x:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$



شکل ۱- پیکربندی بلوک‌های مورد مطالعه

$$\begin{aligned}
 y = 0, \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} &= h_h(T_{\infty,h} - T_s) \\
 y = W, \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} &= h_c(T_s - T_{\infty,c}) \\
 x = 0, \quad \frac{\partial T_s}{\partial y} &= 0 \quad x = L, \quad \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0 \\
 z = 0, \quad \frac{\partial T_s}{\partial y} &= 0 \quad z = H, \quad \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0 \quad (10)
 \end{aligned}$$

در معادلات بالا L ، W و H به ترتیب طول، عرض و ارتفاع بلوک است. علاوه بر این، ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت سرد، $h_{\infty,h}$ ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت گرم، k_s ضریب هدایت حرارتی بلوک بتنی، $T_{\infty,c}$ دمای محیط سرد (بیرون از ساختمان) و $T_{\infty,h}$ دمای محیط گرم (داخل ساختمان) است. در شبیه‌سازی عددی تمامی خواص فیزیکی بلوک سیمانی و هوای محبوس در حفره‌ها به استثنای چگالی هوا ثابت فرض شدند. در جدول ۱ خواص فیزیکی مورد استفاده در محاسبات آورده شده است.

در محاسبات، دمای محیط سرد 263 کلوین و محیط گرم 298 کلوین لحاظ گردیدند؛ همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت سرد و گرم به ترتیب $23/0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ و $8/7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ در نظر گرفته شد. قابل ذکر است که روی دیوارهای حفره‌ها، شرط عدم لغزش و پایستگی انتقال انرژی اعمال شد.

جهت نشان دادن عملکرد حرارتی بلوک بتنی از ضریب هدایت حرارت معادل (k_{eq}) استفاده می‌شود که توسط رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

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

که W طول در جهت محور y (شکل ۲) است؛ همچنین q_w متوسط حرارت عبوری از بلوک است که با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

جدول ۱ - خواص ترمو فیزیکی بلوک بتنی و هوا [۱۶]

α	ε	$k(\text{W/m}\cdot\text{K})$	$C_p(\text{J/kg}\cdot\text{K})$	ρ (kg/m^3)	
-	-	0.0242	1007	1/225	هوا
0.02	0.89	0.73	1000	1100	بتن سبک

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho C_p} \nabla \cdot \mathbf{q}_r \quad (5)$$

که در رابطه‌های بالا، u ، v و w سرعت جریان سیال به ترتیب در جهت x ، y و z فشار جریان، T دمای سیال، ρ چگالی، ν ویسکوزیته سینماتیک، k ضریب انتقال حرارت هدایت، β ضریب انبساط حجمی سیال، T_{ref} دمای مرجع، g شتاب گرانش و q_r بردار شار تشعشعی است. دیورژانس شار حرارتی در معادله انرژی عبارت است از:

$$\nabla \cdot \mathbf{q} = k_a(4\pi I_b(\mathbf{r})) - \int_{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) d\Omega \quad (6)$$

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

$$(\mathbf{S} \cdot \nabla) I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = \beta_r \{ -I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) + (1 - \omega) I_b(\mathbf{r}) + \frac{\omega}{4\pi} \int_{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \varphi(\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{s}) d\Omega \} \quad (7)$$

شرط مرزی برای دیوارهای حفره به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 I(\mathbf{r}_w, \mathbf{s}) &= \varepsilon_w I_b \\
 &+ \frac{(1 + \varepsilon_w)}{\pi} \int_{n_w \cdot \mathbf{S} < 0} I(\mathbf{r}_w, \mathbf{s}) |n_w \cdot \mathbf{S}| d\Omega, \quad n_w \cdot \mathbf{S} > 0
 \end{aligned} \quad (8)$$

در معادله بالا ε_w ضریب صدور دیوارهای حفره است.

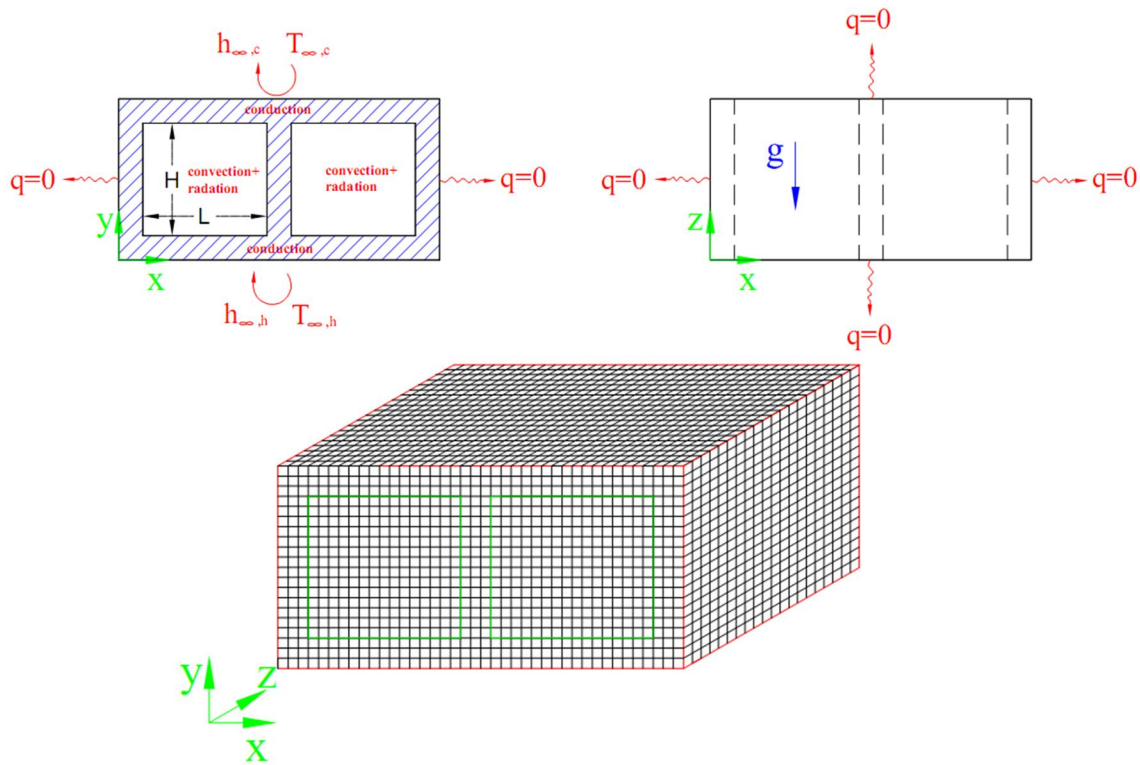
همچنین در جداره‌های بلوک تنها مکانیزم انتقال حرارت، هدایت حرارتی است. توزیع دما در جداره‌های بلوک از حل معادله (۹) به دست می‌آید:

$$\left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (9)$$

در رابطه بالا، T_s دمای قسمت جامد بلوک است.

جهت حل معادلات حاکم، فرض می‌شود که انتقال حرارت از بلوک، تنها از دیواره‌هایی که در معرض هوای آزاد می‌باشند انجام می‌گیرد و از انتقال حرارت از سایر جداره‌ها صرف‌نظر می‌شود (شکل ۲).

بنابراین شرایط مرزی برای حل معادله انرژی در قسمت جامد بلوک به صورت رابطه (۱۰) است:



شکل ۲- شرایط مرزی، شبکه‌بندی و سیستم مختصات مسئله

۳- روش شبیه‌سازی عددی

معادلات حاکم بر مسئله همراه با شرایط مرزی به روش اختلاف محدود بر اساس روش حجم کنترل با استفاده از نرم افزار فلوئنت حل شدند. برای آنکه معادلات به فرم جبری درآیند از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم استفاده شد. جهت حل همزمان معادلات جبری شده، از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. شرط همگرایی برای تمامی معادلات حاکم بر مسئله (بقای جرم، ممنتوم و انرژی) ۶-۱۰ در نظر گرفته شد. همگرایی زمانی حاصل می‌شود که مجهول محاسبه شده در دو تکرار متوالی به عدد ثابتی رسیده باشد. تعداد تکرار محاسبات، بسته به هندسه مورد مطالعه از ۶۹۰۰ تا ۷۵۰۰ تغییر می‌کند.

در مطالعه حاضر، از مش‌های شش وجهی با سازمان جهت شبکه‌بندی بلوک استفاده شد؛ همچنین بررسی استقلال حل از تعداد مش نیز صورت پذیرفت و بسته به هندسه مورد بررسی تعداد ۱۰۳۰۰۰ تا ۱۱۰۰۰۰ مش در شبکه‌بندی استفاده گردید.

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

در رابطه بالا دمای سطح بلوک در سمت سرد و گرم با استفاده از معادلات (۱۳-۱۴) به دست می‌آیند:

$$T_s(y=0) = \frac{1}{0.08} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^p A(i, 1, k) * T_s(i, 1, k) \quad (13)$$

$$T_s(y=L) = \frac{1}{0.08} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^p A(i, m, k) * T_s(i, m, k) \quad (14)$$

در معادلات بالا، A سطح مقطع هر کدام از مش‌ها و m و n و p تعداد نقاط به ترتیب در جهت x، y و z می‌باشند.

در ضمن راندمان عملکرد حرارتی نسبت به جرم برای هر بلوک به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود [۸]:

$$\eta_{th-mass} = \frac{100}{Mk_{eq}} \quad (15)$$

که در رابطه بالا M جرم بلوک است.

حداقل فاصله دیواره حفره‌ها از یکدیگر به دست آمد. جهت مدل‌سازی مسئله و اعمال شرایط واقعی، هندسه بلوک‌ها به صورت سه بعدی شبیه‌سازی گردید و تمامی مکانیزم‌های انتقال حرارت (هدایت، جابجایی و تشعشع) در محاسبه اتلاف حرارت از بلوک لحاظ گردیدند.

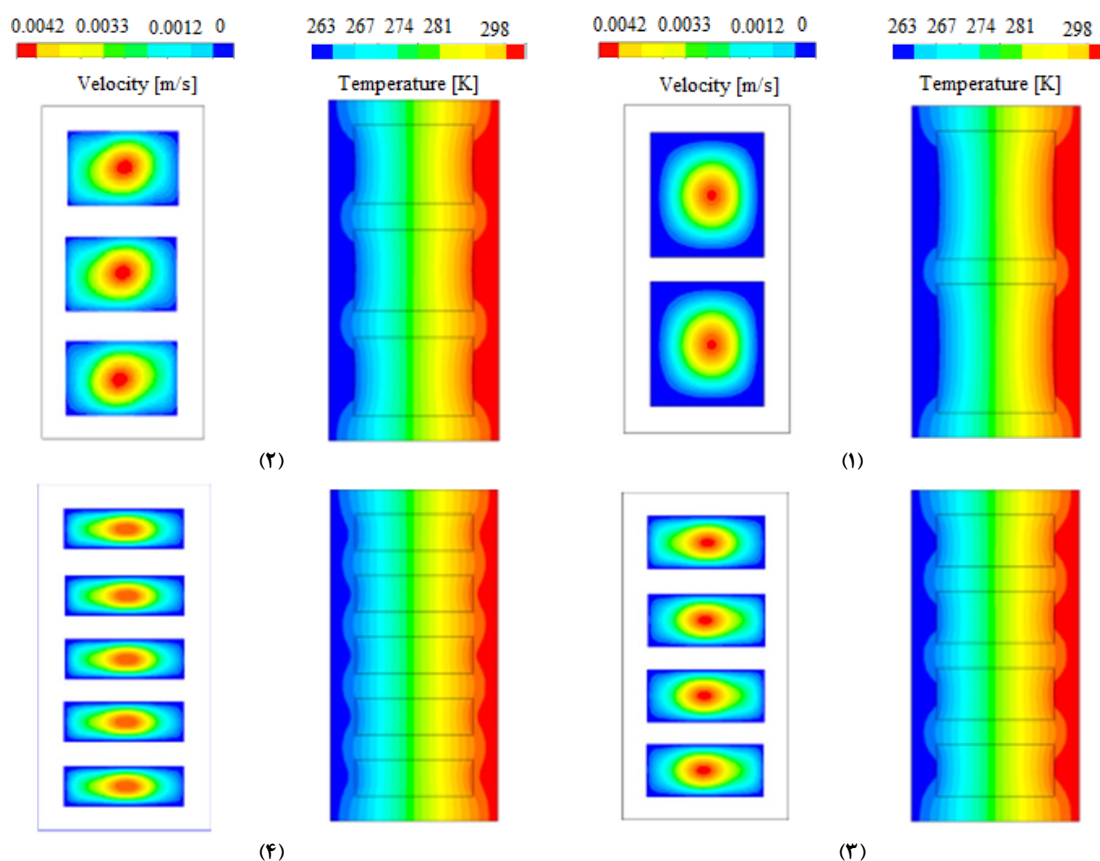
جدول ۲- مقایسه نوسلت متوسط روی دیواره گرم

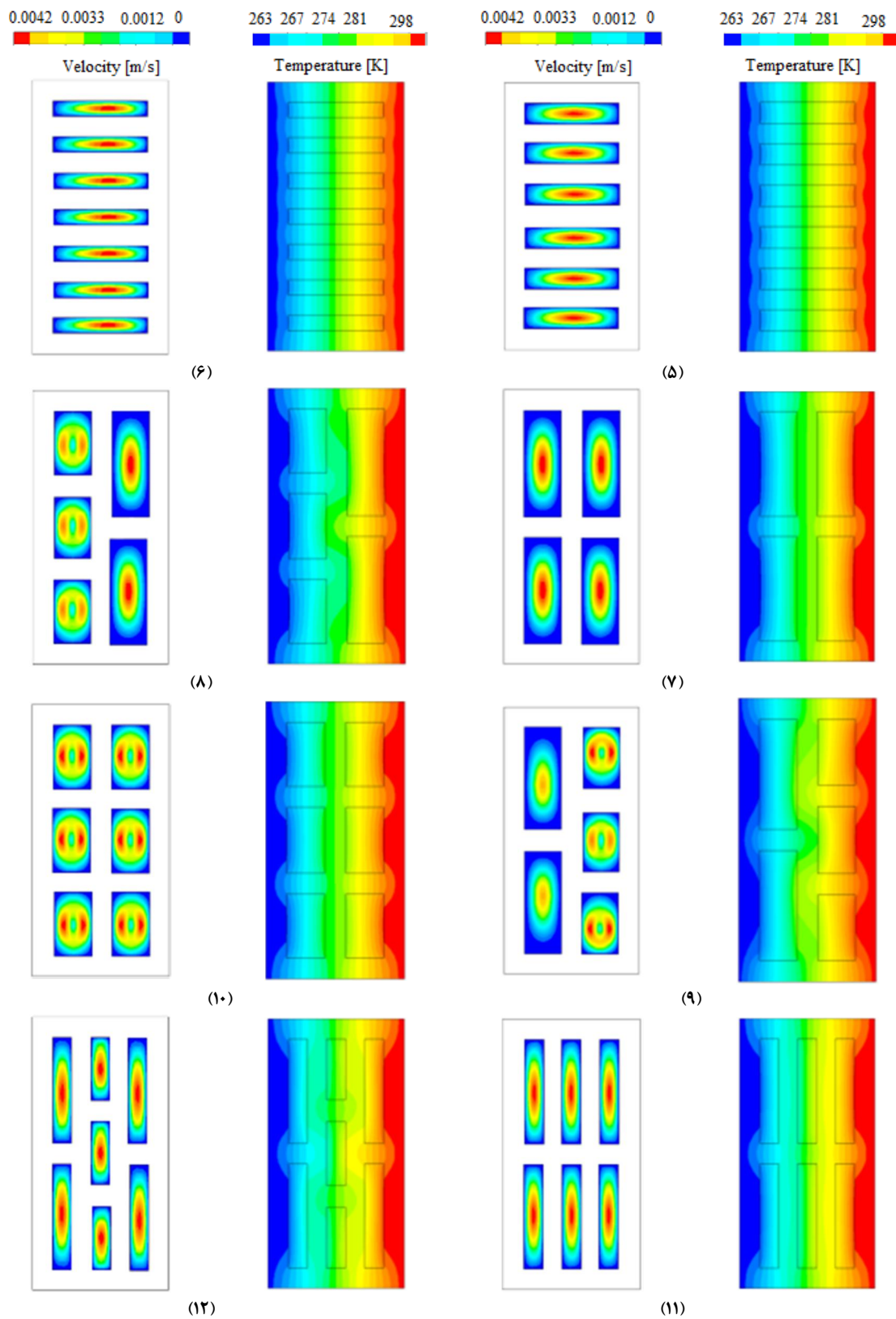
عدد رایلی	10^3	10^4
مطالعه حاضر	۱/۱۱۲	۲/۲۱۴
خانفر و همکاران [۱۷]	۱/۱۱۸	۲/۲۴۵
مارکاتوس و پریکلوس [۱۸]	۱/۱۰۸	۲/۲۰۱
دل وال [۱۹]	۱/۱۱۸	۲/۲۴۳

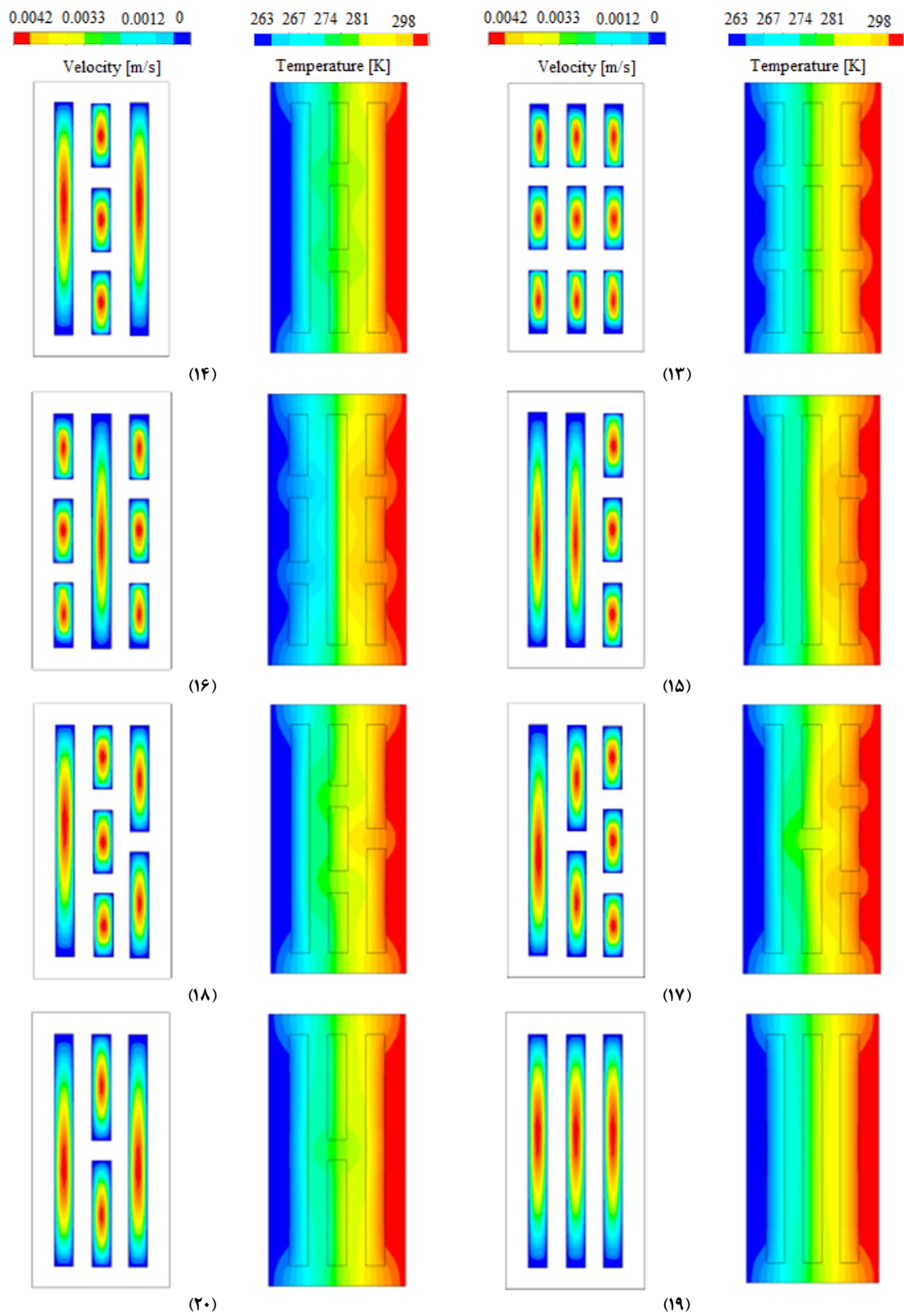
جهت بررسی صحت مدل در نحوه محاسبه عدد نوسلت متوسط، از محفظه مربعی شکل استاندارد همراه با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های عمودی در دو دمای مختلف سرد و گرم پر شده از هوا با عدد پرانتل ۰/۷ و عدد رایلی 10^3 و 10^4 استفاده گردید. جهت مقایسه، نتایج برای عدد نوسلت متوسط روی دیواره گرم در جدول ۲ با نتایج موجود در مراجع معتبر مقایسه شده است. از مقایسه داده‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود که مدل مطالعه حاضر دارای دقت قابل قبولی است.

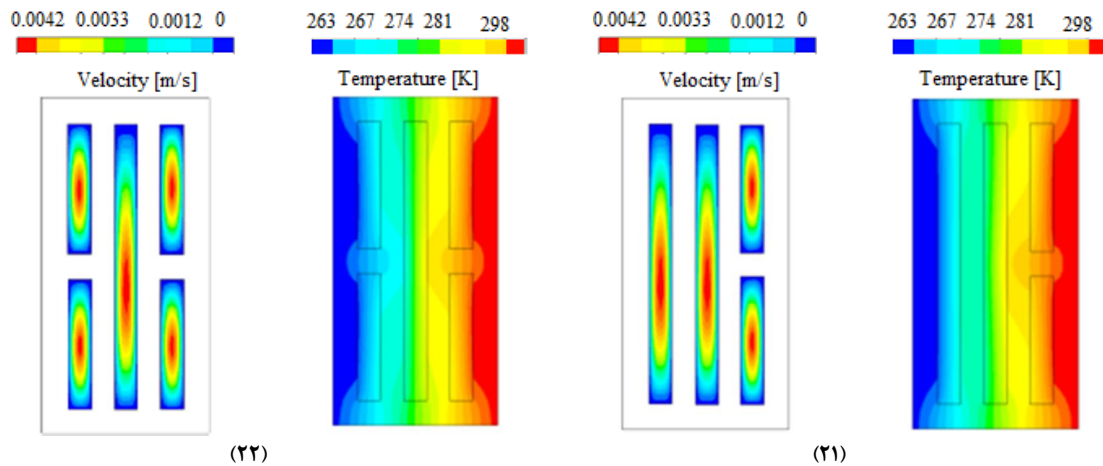
۴- نتایج و بحث

در مطالعه حاضر، به منظور ارائه بهترین طرح حفره‌بندی بلوک‌های بتنی جهت رسیدن به کمترین نرخ اتلاف حرارت از بلوک، ۲۲ حالت مختلف قرارگیری حفره‌ها با اندازه و تعداد متفاوت و با در نظر گرفتن دو قید ضخامت جداره بلوک و









شکل ۳- میدان دما و سرعت در حفره بندی های مختلف بلوک سبک بتنی

ضریب هدایت حرارتی هوا، مکانیزم های غالب انتقال حرارت در محافظ هوا، جابجایی و تشعشع است؛ بنابراین وجود حفره های هوا درون یک جامد، پخش حرارت در جامد را به صورت قابل توجهی تحت تأثیر قرار می دهد. نتیجتاً در یک بلوک بتنی همراه با حفره های هوا، فرآیند واقعی انتقال حرارت شامل هدایت حرارتی در قسمت جامد، انتقال حرارت جابجایی با جریان آرام درون محافظ و انتقال حرارت تشعشعی با امواج بلند بین دیوارهایی که حفره های هوا را تشکیل می دهند است.

در تحلیل حفره ها که با یک سیال نیوتنی مانند آب یا هوا پر شده اند و دارای دو دیواره عایق و دو دیواره سرد و گرم (دما ثابت) می باشند انتقال حرارت جابجایی خالص (در غیاب انتقال حرارت تشعشعی) در آن ها تابعی از دو پارامتر اصلی است: (۱) عدد رایلی جریان $(Ra_H = \rho g \beta (T_h - T_c) H^3 / \alpha' \nu)$ ؛ (۲) نسبت ظرفیت محفظه هوا (نسبت ضلع بزرگ به ضلع کوچک مستطیل). در واقع هرچه قدر عدد رایلی جریان بالاتر باشد (اساساً ناشی از بالاتر بودن اختلاف دما بین دو دیواره سرد و گرم محفظه) انتقال حرارت جابجایی درون محفظه افزایش می یابد و سهم هدایت حرارتی در محفظه کاهش می یابد، یعنی آنکه جمله اول در سمت راست معادله (۵) کوچک شده و حرارت بیشتر از طریق جابجایی از محفظه انتقال می یابد. در مطالعه حاضر، عدد رایلی در محافظ یک پارامتر کنترلی نمی باشد؛ زیرا با توجه به فرضیات مسئله، اختلاف دمای دیواره های حفره ها

در ابتدا جهت بررسی اثر تعداد و اندازه حفره ها بر عملکرد حرارتی بلوک میدان سرعت و دما در حفره بندی های مختلف مقایسه می شوند. در شکل ۳، خطوط دما ثابت و میدان جریان در هندسه های مختلف در مقطع میانی بلوک نشان داده شده است.

مقایسه نتایج شکل های ۳ نشان می دهد که در تمامی حفره بندی ها، نحوه تغییرات دما در راستای محور x، به صورت سینوسی است، بطوریکه با وارد شدن حفره ها در بلوک، تعداد اکسترموم ها نیز تغییر می کند. با توجه به کانتورهای دما، در قسمت جامد بلوک، گرادیان های دما بسیار بزرگ تر از این گرادیان ها در حفره های بلوک می باشند؛ این امر ناشی از اثر وجود جریان هوا درون حفره ها است.

همان گونه که از کانتورهای سرعت مشاهده می شود، در هر یک از حفره ها یک گردابه ساعتگرد تشکیل می شود. وجود این گردابه ها باعث چرخش جریان گرم درون حفره ها می شود که این امر به خودی خود موجب عدم خروج گرما به صورت مستقیم از حفره ها می شوند. دلیل دیگر در یکنواخت تر بودن خطوط همدمای درون حفره ها نسبت به قسمت جامد، پایین تر بودن ضریب هدایت حرارتی هوا نسبت به بلوک سبک بتنی است، بطوریکه اختلاف تقریباً ده برابری بین ضریب هدایت حرارتی هوا و بتن سبک (جدول ۱)، یکی از عوامل اصلی در یکنواخت تر بودن گرادیان های دما در حفره های هوا است.

آشکار است که انتقال حرارت در جامدات از طریق هدایت روی می دهد، از طرف دیگر، با توجه به پایین بودن

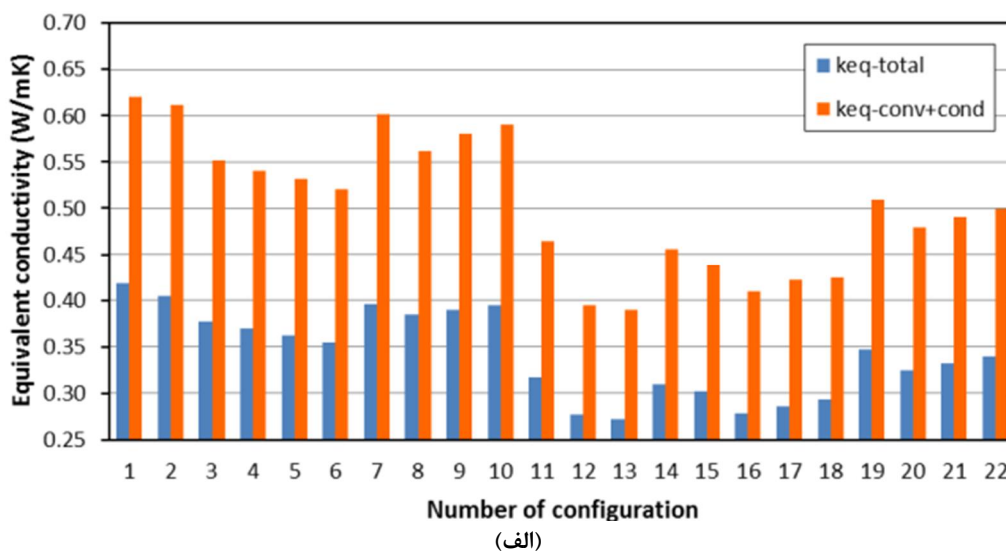
شکل ۴-الف، keq-total ضریب هدایت حرارتی معادل کل است که در بلوک بتنی انتقال حرارت هدایت، جابجایی و تشعشعی در نظر گرفته شده و حالتی است که در واقعیت روی می‌دهد، همچنین keq-cond+conv ضریب هدایت حرارتی معادل حالتی است که از انتقال حرارت تشعشعی در حفره‌ها صرف‌نظر شده است؛ همچنین در شکل ۴-ب خطای ناشی از عدم در نظر گرفتن هر کدام از مکانیزم‌های انتقال حرارت نسبت به حالت واقعی که تمام مکانیزم‌های انتقال حرارت مهم می‌باشد، برای هندسه‌های مختلف نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۴-ب مشاهده می‌شود، هنگامی که تنها هدایت حرارتی در بلوک لحاظ شود، مقدار خطای تعیین ضریب انتقال حرارت هدایت معادل بین ۴۱/۵۷٪ تا ۶۳/۶۴٪ برای هندسه‌های مختلف است، در حالتی که انتقال حرارت هدایت و جابجایی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت هدایت معادل لحاظ شوند، مقدار خطا بین ۴۲/۵۹٪ تا ۵۲/۰۲٪ است. نتایج نشان دهنده اهمیت لحاظ کردن انتقال حرارت تشعشعی در محفظه‌های بلوک بتنی است.

نتایج نشان داده شده در شکل ۴-الف مشخص می‌سازد که حفره بندی شماره ۱۳ و ۱ به ترتیب دارای کمترین ضریب هدایت حرارتی معادل کل (بیشترین مقاومت گرمایی) و بیشترین ضریب هدایت حرارتی (کمترین مقاومت گرمایی) معادل می‌باشند؛ بنابراین از دیدگاه به حداقل رساندن اتلاف حرارتی از ساختمان، حفره بندی شماره ۱۳ بهترین انتخاب ممکن است. انتخاب‌های بعدی از این دیدگاه، به ترتیب حفره بندی شماره ۱۲ و ۱۶ می‌باشند که اختلافی کمتر از ۵٪ با پیکربندی شماره ۱۳ دارند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که با وارد شدن ۹ حفره با اندازه یکسان با آرایش منظم در بلوک نسبت به بلوک بتنی سبک با دو حفره، میزان انتقال حرارت به مقدار قابل توجه ۶۷/۵۳٪ کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مقایسه پیکربندی‌های ۱۱ تا ۲۲ (که در تمامی آن‌ها در بلوک سه ردیف حفره طولی وجود دارد) آشکار می‌سازد که به‌عنوان یک اصل کلی هر چقدر حفره‌ها طول کمتری داشته باشند مقاومت حرارتی بلوک افزایش می‌یابد، بطوری که در میان بلوک‌ها با سه ردیف حفره طولی، بدترین گزینه حفره بندی شماره ۱۹ است که مقاومت حرارتی آن ۲۷/۵۷٪ از بلوک ۱۳ کمتر است. در ضمن، مقایسه بلوک‌های ۱۲، ۱۳ و

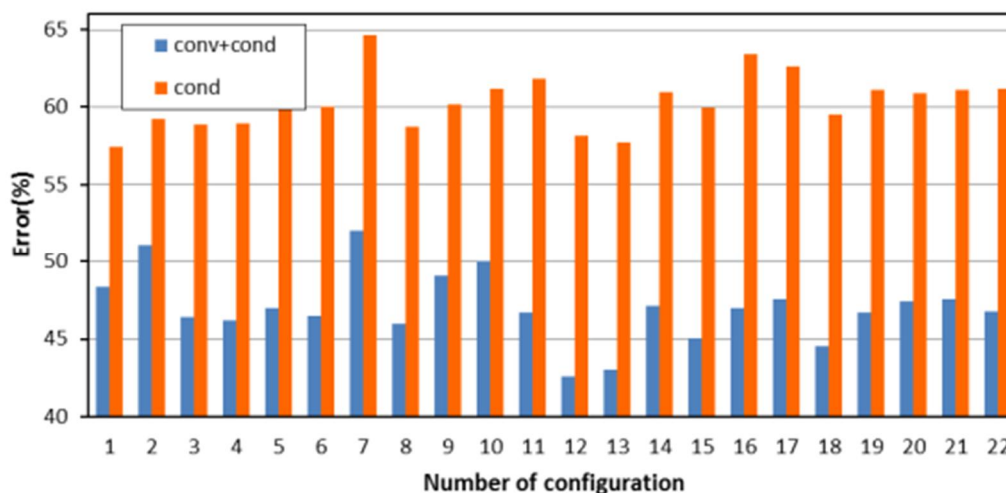
(ناشی از هندسه متفاوت حفره بندی‌ها و نتیجتاً توزیع متفاوت دما در سطوح مرزی هر حفره) و طول مشخصه حفره‌ها با یکدیگر متفاوت است، بنابراین برای آنکه بتوان انتقال حرارت جابجایی در کار حاضر را تحلیل کرد، باید به مشخصات هندسی حفره‌ها رجوع کنیم. اساساً محافظ هوا با توجه به جهت انتقال حرارت از نظر هندسی به سه دسته مربعی شکل (حفره بندی شماره ۱)، بلند (حفره بندی شماره ۱۹) و کم عمق یا کشیده (حفره بندی شماره ۶) تقسیم‌بندی می‌شوند. در صورتی که تحلیل انتقال حرارت در حفره‌ها با استفاده از روش آنالیز ابعادی صورت گیرد، مشخص می‌گردد که در محافظ مربعی شکل، ناشی از اختلاف دمای دیواره‌های محفظه، هدایت حرارتی مکانیزم غالب انتقال حرارت است. همچنین هنگامی که در جهت انتقال حرارت محفظه کشیده (کم عمق) شده باشد، مقدار سیالی که به‌واسطه لایه مرزی دما (که منتج به شناوری سیال شده) ناچیز بوده، نتیجتاً در این محافظ نیز انتقال حرارت بیشتر از طریق هدایت است. برخلاف این پدیده، در محافظ بلند، با توجه به طول بیشتر محافظ در جهت شناوری (گراتش)، به دلیل افزایش ضخامت لایه مرزی دما، مقدار سیال بیشتری درون محفظه از طریق شناوری جریان پیدا می‌کند و در این حالت، انتقال حرارت به‌واسطه جابجایی بزرگ‌تر از هدایت حرارتی است [۲۰-۲۲]. با توجه به بحث بالا می‌توان به این نتیجه رسید که انتقال حرارت در بلوک‌های بتنی را می‌توان با توجه به شکل حفره‌های هوا بهینه کرد. در مطالعه حاضر به‌منظور به حداقل رساندن انتقال حرارت از بلوک سبک بتنی، محافظ هوا به دو صورت افقی و یا عمودی با نسبت‌های مختلف ظرافت (AR) جایگذاری شدند.

در مطالعه حاضر، برای تشریح بهتر مسئله، حفره‌های که در راستای محور x (شکل ۲) قرار دارند (مانند بلوک ۱۹) حفره طولی و حفره‌های که در راستای محور y قرار دارند (مانند بلوک ۶) حفره عرضی نام‌گذاری می‌شوند؛ همچنین حفره‌ها با $AR > 5/5$ ، حفره‌های بسیار کشیده (مانند بلوک ۱۹)، حفره‌ها با $AR \leq 5/5$ کشیده و حفره‌هایی با $AR < 3/3$ ، متوسط نامیده می‌شوند.

برای مقایسه بهتر نتایج و اثر هندسه حفره‌ها روی میزان انتقال حرارت، در هر یک از حفره بندی‌های مطالعه حاضر، ضریب هدایت حرارت معادل محاسبه گردید. در



(الف)



(ب)

شکل ۴- الف) ضریب انتقال حرارت معادل بلوک سبک بتنی و ب) مقدار خطای ضریب انتقال حرارت هدایت معادل در حالت هدایت حرارتی خالص و هدایت و جابجایی حرارتی در مقایسه با حالت هدایت، جابجایی و تشعشع حرارتی

مابین بلوک ۸ و ۹ است که دارای هندسه مشابه می‌باشند و تنها اختلاف آن‌ها در جهت قرارگیری در سمت سرد و گرم ساختمان است، بطوریکه هدایت حرارتی بلوک ۸، ۱/۴۷٪ نسبت به بلوک ۹ کمتر است (در حفره بندی شماره ۸، دو حفره در سمت گرم ساختمان و سه حفره در سمت سرد است).

مقایسه نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که مقاومت حرارتی در هندسه‌هایی با حفره‌های طولی به‌مراتب بیشتر از بلوک‌هایی است که در آن‌ها حفره‌ها عرضی می‌باشند. این

۱۶ تا ۱۸ که به ترتیب بالاترین مقاومت حرارتی را دارند آشکار می‌سازد که هر چقدر حفره‌ها کوچک‌تر باشند و کشیدگی کمتری داشته باشند، عملکرد حرارتی بلوک افزایش می‌یابد.

همچنین مقایسه بلوک‌های ۲ تا ۶ نشان می‌دهد که هر چقدر تعداد حفره‌های عرضی بلوک افزایش یابد، ضریب هدایت حرارتی معادل نیز کاهش می‌یابد؛ بطوری‌که ضریب هدایت معادل بلوک ۶ به میزان ۱۸/۳۸٪ از بلوک ۲ کمتر است. نکته جالب دیگر که می‌توان به آن اشاره کرد، مقایسه

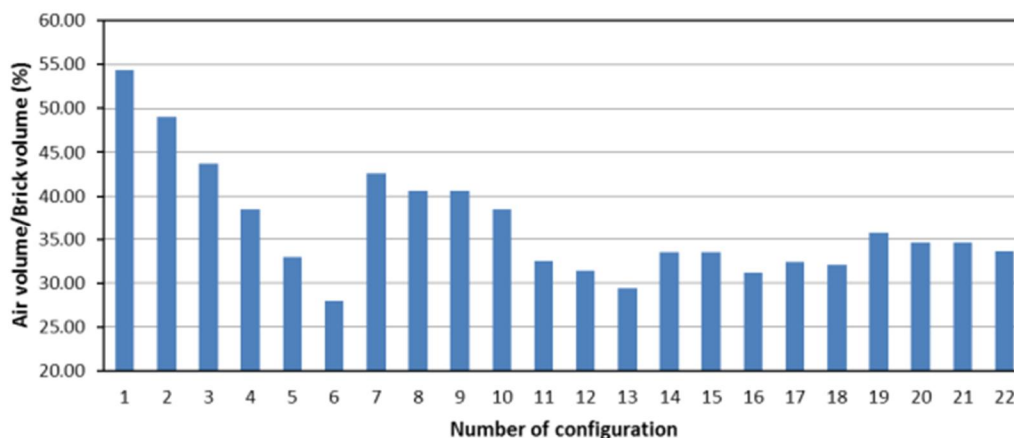
مقدار $۵۴/۳۰\%$ است. برخلاف تصور عمومی که هرچقدر حجم هوا در محفظه‌ای بیشتر باشد، به دلیل آنکه ضریب هدایت حرارتی پایین هوا است، آن محفظه عایق بهتری است، نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد، این باور عمومی لزوماً همیشه صحیح نمی‌باشد. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد، با آنکه حجم هوای محبوس شده در بلوک ۱۳، $۸۴/۲۸\%$ از بلوک ۱ کمتر است، مقاومت حرارتی‌اش $۵۳/۶۷\%$ افزایش یافته است؛ همچنین در بلوک ۶ که حجم هوای آن تنها $۱/۴۶\%$ کمتر از بلوک ۱۳ است، مقاومت حرارتی‌اش $۳۰/۵۱\%$ کمتر از بلوک ۱۳ است. دلایل این رفتار متفاوت حرارتی را می‌توان به اختلاف بین نحوه قرارگیری حفره‌ها در بلوک و تشعشع سطوح ارتباط داد.

شاید در نگاه اول به بلوک‌ها، تصور این باشد که با وارد کردن حفره‌های طولی بسیار کشیده و بنابراین ایجاد سدهای حرارتی بزرگ، بلوک ۱۹ بهترین عملکرد حرارتی را در میان بلوک‌ها داشته باشد و یا آنکه بلوک ۱۲ که دارای بی‌نظمی در چینش حفره‌ها است، به دلیل آنکه جریان حرارت باید مسیر طولانی‌تری را برای گذر از بلوک طی کند، مقاومت حرارتی بیشتری نسبت به بلوک ۱۳ داشته باشد؛ اما نکته آنجا است که انتقال حرارت در بلوک‌های حفره‌دار تنها از طریق هدایت و جابجایی آزاد انجام نمی‌شود، بلکه انتقال حرارت تشعشعی نقش قابل‌توجهی در تعیین میزان انتقال گرما دارد.

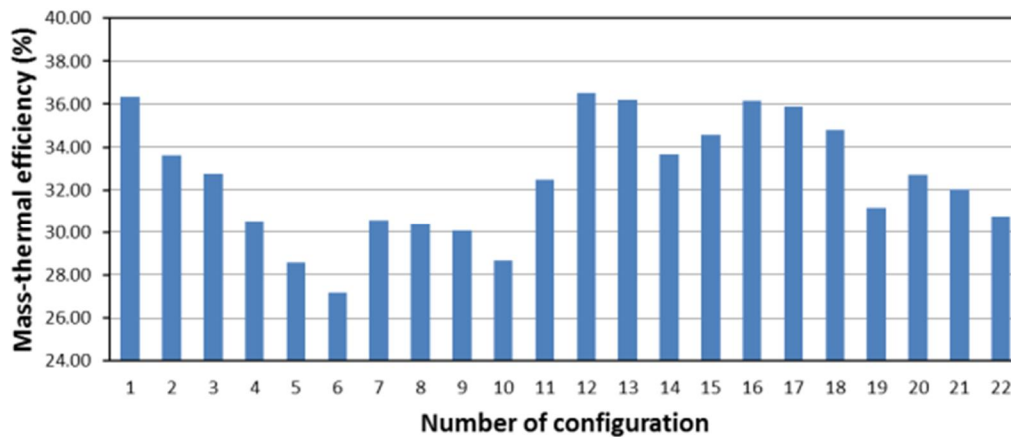
در شکل ۶ راندمان گرمی-حرارتی بر اساس معادله (۱۵) برای بلوک‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به ترتیب بلوک ۱۲ و ۶ دارای بالاترین و

مهم را می‌توان به نقش قابل‌توجه انتقال حرارت تشعشعی سطوح حفره‌ها در انتقال گرما دانست، بدین معنی که هر یک از حفره‌ها به‌مانند سپر تشعشعی عمل می‌کند؛ بنابراین اگر به هر تعداد بتوان حفره طولی در بلوک جایگذاری کرد، مقاومت حرارتی بلوک به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد، هرچند این موضوع از لحاظ عملی به دلیل مشکل بودن تولید این بلوک‌ها و افزایش قابل‌توجه وزن آن‌ها منطقی به نظر نمی‌رسد. علاوه بر این با توجه به شکل ۴، به‌طور کلی بلوک‌ها با حفره‌های کشیده عملکرد بهتری نسبت به حفره‌های بسیار کشیده دارد. به‌عنوان مثال مقاومت حرارتی بلوک ۱۹ با سه حفره بسیار کشیده، $۲۷/۵۷\%$ کمتر از بلوک ۱۳ با حفره‌های کشیده است. شایان ذکر است که در مطالعه حاضر، جهت بررسی نقش انتقال حرارت تشعشعی سطوح حفره‌ها در تعیین مقاومت گرمایی بلوک‌ها، برای تمامی هندسه‌ها در حالتی که از تشعشع سطوح حفره‌ها صرف‌نظر گردید، محاسبات مربوط به تعیین ضریب هدایت حرارتی معادل انجام شد. نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد، در صورتی‌که انتقال حرارت تشعشعی لحاظ نگردد، منجر به خطایی در محدوده $۴۲/۵۹\%$ برای بلوک ۱۲ تا $۵۱/۱۱\%$ برای بلوک ۲ می‌شود.

در شکل ۵ نسبت حجم حفره‌ها به حجم کل بلوک نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، کمترین حجم حفره‌های هوا مربوط به بلوک ۶ و ۱۳ است که در آن‌ها حجم هوا به ترتیب $۲۷/۹۸\%$ و $۲۹/۴۴\%$ است؛ همچنین بیشترین حجم هوا مربوط به بلوک ۱ به



شکل ۵- نسبت حجم هوا در حفره‌ها به حجم بلوک



شکل ۶- راندمان گرمی- حرارتی بلوک‌های سبک بتنی

حرارتی می‌گویند. مقایسه مواد مختلف ساختمانی نشان می‌دهد که اکثر آن‌ها دارای ظرفیت گرمایی ویژه تقریباً یکسانی هستند؛ بنابراین در شرایط یکسان، مصالح با جرم بیشتر قابلیت ذخیره‌سازی بیشتری دارند و از دیدگاه محاسبات تهویه مطبوع جهت تعیین ظرفیت دستگاه‌های تأمین بار حرارتی مطلوب‌تر می‌باشند (هرچند این دیدگاه در تناقض با معیارهای مهندسی زلزله است که در آن جرم ساختمان باید حداقل باشد)، بنابراین از نظر این دیدگاه بلوک ۱۳ بهترین گزینه است؛ زیرا هم دارای جرم قابل توجه و هم مقاومت حرارتی مناسب است. در پایان، یافتن بهترین بلوکی که دارای مقاومت مکانیکی کافی، مقاومت حرارتی بالا، ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی مناسب و جرم کم باشد، بسیار سخت است. با توجه به بحث بالا می‌توان به این نتیجه رسید که برای قضاوت و انتخاب صحیح بین مصالح مورد استفاده در ساختمان‌ها از دیدگاه صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌بایستی مطالعات و بررسی‌های بیشتری انجام شود تا بهترین مصالح و نه لزوماً پرهزینه‌ترین آن انتخاب گردند.

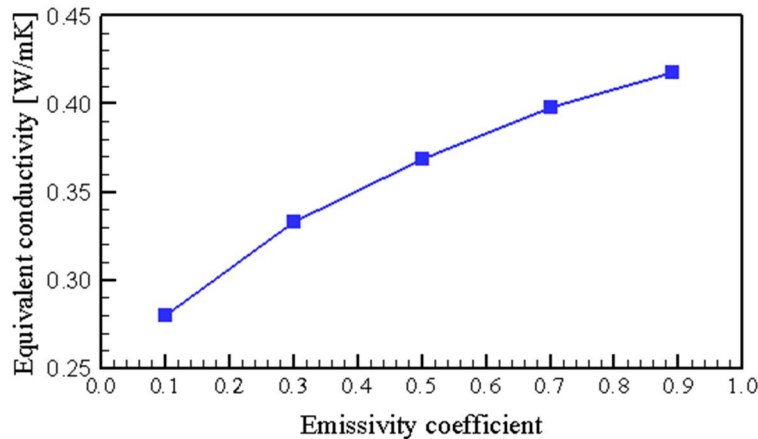
۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی عددی سه بعدی روی ۲۲ طرح‌بندی پیشنهادی از بلوک‌های سبک بتنی به منظور کاهش اتلاف حرارتی از ساختمان انجام پذیرفت. بدین منظور یک بلوک با اندازه ثابت در نظر گرفته شد و اثر تعداد، هندسه و جهت قرارگیری حفره‌های هوا جایگذاری شده درون بلوک مورد بررسی قرار گرفت. معادلات حاکم بر مسئله با استفاده

پایین‌ترین راندمان گرمی- حرارتی می‌باشند. نکته جالب توجه اینکه از منظر دیدگاه راندمان گرمی-حرارتی، بلوک ۱ دارای دومین راندمان برتر است؛ زیرا وزن این بلوک در مقایسه با سایر بلوک به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است و این باعث می‌شود که علی‌رغم بالا بودن ضریب هدایت حرارتی معادل، راندمان گرمی- حرارتی مناسبی داشته باشد.

به‌منظور بررسی اثر ضریب صدور تشعشعی دیوارهای حفره‌ها بر رفتار حرارتی بلوک‌های سبک بتنی، ضریب هدایت حرارتی معادل بلوک ۱ تحت مقادیر مختلف ضریب صدور تشعشعی به دست آمد. شکل ۷ نحوه تغییرات ضریب هدایت حرارتی معادل در مقابل ضرایب مختلف صدور تشعشعی سطح را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، با کاهش ضریب صدور تشعشعی دیواره‌های حفره‌ها، عملکرد حرارتی بلوک به طرز قابل توجهی بهبود می‌یابد؛ به نحوی که با کاهش ضریب صدور از ۰/۸۹ به ۰/۱، ضریب هدایت حرارتی معادل بلوک ۳۲/۹۴٪ کاهش می‌یابد. قابل ذکر است که ضریب صدور تشعشع یک سطح تابعی از پارامترهای مختلف نظیر دما، زبری، پاکیزگی و رنگ است؛ بنابراین تغییر هر یک از پارامترهای فوق، می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد حرارتی بلوک‌های سبک بتنی بگذارد.

نکته با اهمیت در ساختمان‌ها به‌منظور به حداقل رسانیدن مصرف انرژی، ذخیره‌سازی انرژی در آن‌ها است، یعنی هنگامی که بار سرمایی و یا گرمایی وارد به ساختمان به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد، بار سرمایش و گرمایش مورد نیاز ساختمان به بیشینه خود نرسد که به این مهم تأخیر



شکل ۷- تغییرات ضریب هدایت حرارتی معادل در برابر ضریب صدور سطوح حفره‌ها برای بلوک ۱

۴- قرارگیری حفره‌ها به صورت منظم عملکرد حرارتی بهتری نسبت به چینش نامنظم حفره‌ها دارد.
 ۵- بلوک ۱، ۱۲، ۱ و ۱۳ به ترتیب دارای بالاترین راندمان گرمی- حرارتی در میان هندسه‌های مورد بررسی است.

۶- ضریب صدور سطوح حفره تأثیر بسزایی در مقدار ضریب هدایت حرارتی معادل بلوک‌ها دارند.

۶- فهرست علائم

نسبت ظرافت	AR
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی	h
شتاب گرانش	g
فشار	P
جرم	M
عدد رایلی	Ra
مؤلفه‌های سرعت متوسط به ترتیب در جهت x, y, z	u, v, w
ظرفیت گرمایی	c_p
ضریب انتقال حرارت هدایت	k
شدت تشعشع	I
دما	T

از روش دینامیک سیالات محاسباتی منطبق به روش حجم کنترل حل شدند. به منظور بررسی دقیق انتقال حرارت از بلوک، هر سه مکانیزم انتقال حرارت (هدایت، جابجایی و تشعشع) درون حفره‌ها در نظر گرفته شد.

مهم‌ترین نتایج حاصل از کار حاضر به شرح ذیل است:

۱- ضریب هدایت حرارتی معادل بلوک‌ها وابستگی بسیار زیادی به انتقال حرارت جابجایی آزاد درون حفره‌ها و همچنین تشعشع سطوح حفره‌ها دارند؛ در صورتی که انتقال حرارت تشعشعی در محاسبات لحاظ نشود، نتایج به دست آمده برای تعیین ضریب هدایت حرارتی معادل بین ۴۲/۵۹٪ تا ۵۱/۱۱٪ در بلوک‌های مختلف بیشتر پیش‌بینی شدند.

۲- بهترین بلوک از نظر مقاومت حرارتی، بلوک ۱۳ می‌باشد به نحویکه ۵۳/۶۷٪ ضریب هدایت حرارتی آن نسبت به بلوک ۱ که دارای پایین‌ترین مقاومت حرارتی است کمتر است.

۳- حفره‌های یک بلوک مانند سپرهای تشعشعی عمل می‌کنند و مقدار انتقال حرارت را کاهش می‌دهند. میزان کاهش بستگی به ضریب ظرافت حفره و جهت قرارگیری آن‌ها در بلوک دارد. به‌طور کلی تأثیر حفره‌های طولی با نسبت ظرافت متوسط در کاهش ضریب هدایت حرارتی معادل بیشتر از سایر حفره‌ها است؛ همچنین استفاده از حفره‌های عرضی در بلوک توصیه نمی‌گردد.

۷- مراجع		
[1] Meyer B, Mitchell J, El-Wakil M (1982) The effect of thermal wall properties on natural convection in inclined rectangular cells. J Heat Trans-T ASME 104(1): 111-117.	گرما	q
[2] Kim D, Viskanta R (1984) Study of the effects of wall conductance on natural convection in differently oriented square cavities. J Fluid Mech 144: 153-176.	بردار شار تشعشی	q_r
[3] Kim D, Viskanta R (1985) Effect of wall heat conduction on natural convection heat transfer in a square enclosure. J Heat Trans-T ASME 107(1): 139-146.	مختصات فضای فیزیکی	x, y, z
[4] Akiyama M, Chong Q (1997) Numerical analysis of natural convection with surface radiation in a square enclosure. Numer Heat Tr A-Appl 32(4): 419-433.	ضریب پخش گرما	علائم یونانی α'
[5] Ramesh N, Venkateshan S (1999) Effect of surface radiation on natural convection in a square enclosure. J Thermophys Heat Tr 13(3): 299-301.	ضریب جذب تشعشی	α
[6] Lorente S, Petit M, Javelas R (1998) The effects of temperature conditions on the thermal resistance of walls made with different shapes vertical hollow bricks. Energ Buildings 28(3): 237-240.	ضریب صدور سطح	ε
[7] Al-Hazmy M (2006) Analysis of coupled natural convection-conduction effects on the heat transport through hollow building blocks. Energ Buildings 38(5) 515-521.	تابع فاز	φ
[8] Del Coz Díaz J (2007) Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method. Appl Therm Eng 27(8-9): 1445-1456.	چگالی	ρ
[9] Antar M A (2010) Thermal radiation role in conjugate heat transfer across a multiple-cavity building block. Energy 35(8): 3508-3516.	ضریب انبساط حجمی سیال	β
[10] Sun J, Fang L (2009) Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method. Int J Heat Mass Tran 52(23-24): 5598-5607.	زاویه فضایی	Ω
[11] Del Coz Díaz J (2010) A FEM comparative analysis of the thermal efficiency among floors made up of clay, concrete and lightweight concrete hollow blocks. Appl Therm Eng 30(17-18): 2822-2826.	راندمان	η
[12] Sambou V (2016) Modeling of the thermal performance of air-filled partitioned enclosures: Effects of the geometry and thermal properties. J Build Phys 39(4): 321-341.	ویسکوزیته سینماتیک	ν
[13] Boukendil M, Abdelbaki A, Zrikem Z (2017) Numerical simulation of coupled heat transfer through double hollow brick walls: Effects of mortar joint thickness and emissivity. Appl Therm Eng 125: 1228-1238.	جسم سیاه	زیرنویس b
	سرد	c
	هدایت حرارتی	$cond$
	جابجایی حرارتی	$conv$
	معادل	eq
	گرم	h
	مرجع	ref
	جامد	s
	دیوار	w
	جریان آزاد	∞
	گرمایی	th
	کلی	tot
	تشعشع حرارتی	rad

- [18] Markatos NC, Pericleous K (1984) Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity. *Int J Heat Mass Tran* 27(5): 755-772.
- [19] De Vahl Davis G (1983) Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution. *Int J Numer Meth Fl* 3(3): 249-264.
- [20] Bejan A (2013) *Convection heat transfer*. John Wiley & Sons.
- [21] Bejan A, Al-Homoud AA, Imberger J (1981) Experimental study of high-Rayleigh-number convection in a horizontal cavity with different end temperatures. *J Fluid Mech* 109: 283-299.
- [22] Kim SK, Kim SY, Choi YD (2002) Resonance of natural convection in a side heated enclosure with a mechanically oscillating bottom wall. *Int J Heat Mass Tran* 45(15): 3155-3162.
- [14] Huang J, Yu J, Yang H (2018) Effects of key factors on the heat insulation performance of a hollow block ventilated wall. *Appl Energ* 232: 409-423.
- [15] Zhang T, Yang H (2019) Heat transfer pattern judgment and thermal performance enhancement of insulation air layers in building envelopes. *Appl Energ* 250: 834-845.
- [16] Kanellopoulos G (2017) Numerical Analysis and Modelling of Heat Transfer Processes through Perforated Clay Brick Masonry Walls. *Procedia Environ Sci* 38: 492-499.
- [17] Khanafer K, Vafai K, Lightstone M (2003) Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. *Int J Heat Mass Tran* 46(19): 3639-3653.