

مطالعه المان محدود رفتار انتقال گرما در آجرهای حفره‌دار تولید شده با استفاده از چاپگرهای سه‌بعدی ساختمانی

محسن فلاح*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان، تبریز، ایران، mfallah@azaruniv.ac.ir

چکیده

با توجه به اینکه شکل و چیدمان حفره‌های آجر، تأثیر زیادی بر میزان انتقال گرمای نفوذی به داخل ساختمان دارد، بنابراین لازم است که مدل‌های مختلف این حفره‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در تحقیق حاضر، به ارائه ساختار جدیدی برای سلول‌های آجر ساختمانی پرداخته شده و تأثیر شکل و ابعاد حفره‌ها بر عملکرد گرمایی آن با استفاده از روش المان محدود و روش پاسخ سطح رویه (RSM) مطالعه شده است. پارامترهای ورودی شامل مشخصات هندسی حفره‌ها بوده و عبور گرما به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شده است. به منظور حداقل کردن پارامتر انتقال گرما، روش RSM و المان محدود به صورت همزمان استفاده شده است. معادلات انتقال گرمای سه‌بعدی به صورت پایا و در نظر گرفتن سه مکانیزم انتقال گرمای رسانشی، همرفتی و تابشی حل، و توزیع دما و ضریب رسانایی گرمایی تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت جداره یا با افزایش ارتفاع حفره و به طور کلی با افزایش محیط حفره می‌توان مقاومت گرمایی بلوک‌ها را افزایش داد. نتایج نشان می‌دهد که در بین طرح‌های بررسی شده، بهترین عملکرد گرمایی مربوط به نمونه HB-10 با U-value برابر ۱/۹۵ می‌باشد که بهبود ۹۷٪ نسبت به آجر بدون حفره پیدا کرده است.

واژه‌های کلیدی: بلوک حفره‌دار، چاپگر سه‌بعدی، انتقال گرما، روش المان محدود، روش پاسخ رویه سطح.

Finite element study of heat transfer in hollow 3D printed construction bricks

M. Fallah

Mechanical Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Abstract

The shape and arrangement of holes in bricks has a great effect on the rate of penetration heat transfer in the building. In the present study, a new structure has been proposed for building brick cells and the effect of the shape and dimensions of the cavities on its thermal performance has been studied using the finite element method and the surface response method (RSM). The input parameters include the geometric characteristics of the cells and the heat transfer performance is considered as the response variable. In order to minimize the heat transfer parameter, the RSM method and the finite element are used simultaneously. The three-dimensional heat transfer equations are solved by considering the three mechanisms of conduction heat transfer, convection and radiation, and temperature distribution and heat transfer coefficient are obtained. The results show that by increasing the thickness of cells and the length of the cell and in general by increasing the perimeter of the cells, the thermal resistance of the blocks can be increased. The results show that among the studied designs, the best thermal performance is related to HB-10 sample with U-value equal to 1.95 which has improved 97% compared to brick without cavity.

Keywords: Hollow block, 3D printer, heat transfer, finite element method, surface response method.

۱- مقدمه

بیشترین اتلاف‌های گرما در ساختمان‌ها ناشی از دیوارهای جانبی، سقف و کف می‌باشند. در محاسبات مربوط به تعیین اتلاف گرمایی در فصل سرد و گرم سال، انتقال گرما از طریق رسانش از دیواره‌های ساختمان، جزء بارهای اصلی گرمایی محسوب می‌شوند [۲]. جهت کاهش این بار گرمایی، می‌بایستی مقاومت گرمایی دیوارهای ساختمان را بالا برد. یک راه ساده، مؤثر و اقتصادی، استفاده از لایه‌های هوا در بلوک‌های ساختمانی و همچنین استفاده از مواد نوین مهندسی مانند انواع بتن‌ها و ملات‌های سیمانی [۳-۵] و نانومواد است [۶-۹]. هوا که دارای ضریب انتقال گرمای پایینی است، می‌تواند مانند یک لایه عایق درون بلوک عمل کرده و منجر به کاهش نرخ انتقال گرما شود؛ همچنین استفاده از بلوک‌های حفره‌دار باعث کاهش قابل توجه وزن ساختمان شده و هزینه ساخت را پایین می‌آورد.

با توجه به اهمیت انتقال گرم از دیوارهای ساختمانی، تاکنون مطالعات زیادی در زمینه مدل‌سازی حفره‌ها با هندسه‌های استاندارد انجام شده است. با توسعه چاپگرهای سه‌بعدی انواع دلخواه حفره‌ها را می‌توان ایجاد نمود و از این لحاظ تأثیر هندسه حفره‌ها بر عملکرد

در کنترل گرمای داخل ساختمان، یکی از مهمترین پارامترها برای دیوار خارجی، مقاومت گرمایی آن است. با مطرح شدن بحث بحران انرژی و افزایش قیمت حامل‌های انرژی، روش‌های مختلفی برای افزایش مقاومت گرمایی دیوارها ارائه شده است. یکی از راهکارهای جدید که در چند سال اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است، استفاده از سازه‌های ساخته شده با استفاده از چاپگرهای سه‌بعدی می‌باشد که به دلیل مزایایی از جمله وزن پایین، راحتی و سرعت اجرای بالا، مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱]. بنابراین لازم است که مطالعاتی در زمینه عملکرد گرمایی با هدف بهینه‌نمودن انتقال گرما انجام گیرد. پیش فرض تحقیق این است که با بهینه‌سازی صرفاً هندسه آجر متخلخل می‌توان به مقاومت گرمایی بالاتری در آنها دست یافت. به همین منظور در این پژوهش سعی بر این بوده است با مطالعه هندسه مختلف حفره‌ها، هندسه جدیدی برای آجرهای بنایی قابل ساخت با استفاده از چاپگرهای سه‌بعدی ارائه شده و میزان انتقال گرما در آنها بررسی شود.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mfallah@azaruniv.ac.ir

گرمایی قابل ملاحظه خواهد بود [۱۰-۱۱]. با توجه به زمان بر بودن انجام تست‌های تجربی، استفاده از مدل‌های المان محدود در زمینه‌های مختلف توسعه زیادی پیدا کرده است [۹، ۱۳-۱۶]. در مدل‌سازی اولیه عملکرد گرمایی دیوارهای ساختمان‌ها، انتقال گرمای همرفت در حفره‌های بلوک و انتقال گرمای رسانشی در جداره آن در نظر گرفته می‌شود [۱۷-۱۹]. Sassine و همکاران [۲۰]، با استفاده از تست‌های تجربی و روش عددی انتقال گرمای بلوک بتنی سوراخ‌دار را مطالعه کردند. Al-Hazmy [۲۱]، انتقال گرمای رسانش-همرفت در آجرهای رسی را با استفاده از نرم‌افزار Fluent شبیه‌سازی کردند. Sun و فنگ [۲۲] به تحلیل عددی نرخ انتقال گرما در بلوک‌های حفره‌دار پرداختند. آنها وجود حفره‌های طولی و عرضی را در بلوک بررسی کرده و برای روشن‌تر شدن مسئله انتقال گرما، 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. بر اساس نتایج آنها افزایش تعداد محفظه‌ها در جهت موازی مطلوب‌تر است. در شبیه‌سازی عددی انجام شده توسط Diaz و همکاران [۲۳]، انتقال گرما از پنج نمونه از بلوک‌های سبک وزن با اندازه‌های مختلف و با حفره‌هایی با شکل متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. آنها میزان انتقال گرمای این پنج هندسه را از نظر وزن و اندازه مقایسه کردند. در یک تحلیل عددی دوبعدی، Antar [۲۴] به مقایسه عملکرد گرمایی پنج نوع از بلوک‌های حفره‌دار پرداخت. نتایج او نشان داد که نرخ انتقال گرما وابستگی قابل توجهی به ضریب صدور سطح حفره دارد؛ همچنین شکل و اندازه محافظ هوا تأثیر زیادی در میزان انتقال گرما دارد. Diaz و همکاران [۲۵] با استفاده از روش المان محدود به مقایسه رفتار گرمایی سه نوع ماده متفاوت مورد استفاده در سقف ساختمان‌ها پرداختند. در این تحقیق به منظور بررسی اثر حفره‌های هوا، شش هندسه در محاسبات لحاظ شد. آنها نتیجه گرفتند که بلوک با نه عدد حفره هوا بهترین عملکرد از نظر بهینه بودن بار مرده ساختمان و رفتار گرمایی دارد. Huang و همکاران [۲۶]، به بررسی عددی عملکرد گرمایی دیوارها با بلوک حفره‌دار که امکان ورود و خروج جریان هوای سرد و یا گرم در آنها باشد پرداختند. Alghamdi و Alharthi [۲۷] با استفاده از مدل المان محدود سه‌بعدی عملکرد گرمایی دیوارهای آجری از جنس رس را مطالعه کردند. Jamal و همکاران [۲۸] به بررسی انتقال گرمای کوپل همرفت آزاد، همرفت و تابش سطحی از دیوارهای آجری حفره‌دار پرداختند. Ouakarrouch و همکاران [۲۹] با استفاده از مدل‌سازی المان محدود سه‌بعدی به بررسی انتقال گرما در دیوارهای alveolar پرداختند. Suntharalingam و همکاران [۳۰] اتلاف انرژی در دیوارهای بتنی چاپگر سه‌بعدی را به صورت عددی بررسی کردند. آنها ۳۲ حالت مختلف را شبیه‌سازی کردند و انتقال گرمایی دیوارهای را مقایسه کردند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که بدون در نظر گرفتن هندسه سطح مقطع دیوار با افزایش ضخامت دیواره، اتلاف گرمایی کاهش می‌یابد. Boukendil و همکاران [۱۹]، در یک تحلیل عددی دو بعدی، انتقال گرما در دسته‌ای از بلوک‌های توخالی که بین آنها ملات سیمان است را مدل‌سازی کردند. آنها اثر ضخامت لایه ملات و خواص تابشی 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 گرمایی یک سانتیمتر است. Sambucci و Valente [۳۱] به بررسی عملکرد گرمایی و مشخصات مکانیکی آجرهای ساخته شده با استفاده از چاپگر سه‌بعدی پرداختند. آنها در ساخت آجرها از ذرات بازیافتی تایرها استفاده کردند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که با استفاده از هندسه مناسب برای حفره‌های آجرها می‌توان مقاومت گرمایی را در حدود ۳۰ درصد بهبود بخشید. Jamal و همکاران [۳۲] رفتار انتقال گرمای گذرا در سه نوع بلوک حفره‌دار را با استفاده از روش عددی مطالعه کردند. Suntharalingam و همکاران [۳۳] مقاومت دیوارهای بتنی تولید شده با استفاده از چاپگر سه‌بعدی با حالت‌های مختلف حفره‌ها را در برابر شرایط آتش‌سوزی به صورت عددی مطالعه کردند.

با مروری بر پژوهش‌های گذشته، می‌توان به این نتیجه رسید که هر چند مطالعات محدودی در زمینه مدل‌سازی و بهینه‌سازی انتقال گرمای بلوک‌های بتنی انجام شده است، ولی دستیابی به مشخصات گرمایی مناسب برای آجرهای چاپگر سه‌بعدی نیاز به تحقیقات زیادی می‌باشد. وجود حفره‌ها و ساخت حجم متخلخل بدون چاپگر سه‌بعدی بسیار دشوار است، از این رو یک آجر با تخلخل مناسب می‌تواند ضمن داشتن عملکرد گرمایی مطلوب، وزن کمتر و مقاومت بالایی را دارا باشد تا در برابر بارهای زمین‌لرزه‌ای نیز عملکرد مناسب‌تری داشته باشد. بدین منظور، در این پژوهش به ارائه هندسه جدید برای آجرهای حفره‌دار ساخته شده با چاپگر سه‌بعدی پرداخته شده است. با در نظر گرفتن سه پدیده انتقال گرمای رسانشی، همرفت و تابشی، اثر تعداد و اندازه حفره‌های هوای بلوک بر عملکرد گرمایی این نوع آجرها با استفاده از روش المان محدود مطالعه شده است. برای انجام محاسبات دقیق، سه مکانیزم انتقال گرما در شبیه‌سازی لحاظ و نتایج به شکل کانتورهای دما ارائه شدند. در ادامه، به منظور بهینه‌سازی ابعادی سلول‌ها جهت دستیابی به مقاومت گرمایی بالا، از روش RSM استفاده شده و با در نظر گرفتن مشخصات هندسی سلول‌ها به عنوان پارامترهای ورودی و مقاومت گرمایی به عنوان پارامتر پاسخ، مشخصات بهینه ساختار حفره تعیین شده است.

۲- بیان مسئله

در مطالعه حاضر، ساختار جدیدی برای بلوک‌های حفره‌دار ساخته شده با چاپگر سه‌بعدی (3DPHB) ارائه شده و اثر تعداد و اندازه حفره‌های بلوک بر میزان انتقال گرما و عملکرد گرمایی مطالعه شده است. بدین منظور برای مقایسه حالت‌های مختلف، دو قید در طراحی حفره‌های بلوک‌ها با اندازه هندسی ثابت لحاظ شده؛ (۱) ضخامت هر یک از جداره‌های حفره‌ها برابر 2mm در نظر گرفته شده (۲) حداقل طول حفره‌های 1 cm در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که معیار انتخاب این اندازه‌ها، در نظر گرفتن استحکام مکانیکی کافی و محدودیت قطر نازل چاپگر سه‌بعدی می‌باشد. همچنین، عرض، طول و ارتفاع 3DPHB مورد مطالعه به ترتیب 10cm، 20cm و 4cm است که اندازه‌های رایج در بازار ایران است.

¹ 3D-Printed Hollow Brick

۱-۲- مشخصات هندسی حفره

در این تحقیق با الهام گرفتن از ساختار لانه زنبوری موجود در طبیعت و جهت دستیابی به آجر سبک وزن، شکل آجر به گونه‌ای طراحی شده است که دارای حفره‌های چندوجهی می‌باشد، این حفره‌ها هوا را در بین خود حبس می‌کند و با توجه به ساختار کلی آن که یک حجم متخلخل را تشکیل می‌دهد، امکان انتقال گرما به واسطه‌ی وجود حفره‌ها کاهش پیدا می‌کند. یکی دیگر از دلایل انتخاب حفره چندوجهی این است که مقطع حفره‌ها امکان افزایش انتقال فشار بیشتر را دارد، یعنی می‌توان با استفاده از آن مقاومت فشاری بیشتر یا بالاتر نسبت به آجرهای معمولی را به دست آورد. در شکل ۱ هندسه بلوک جدید نشان داده شده است. مطابق شکل سه پارامتر H ، t و d بر ابعاد آن تأثیرگذار بوده و در نتیجه عملکرد گرمایی آجر تولید شده با استفاده از این نوع حفره‌ها نیز تابع این سه متغیر خواهد شد.

جدول ۱- محدوده و مقادیر هندسی پارامترهای مورد بررسی

Parameter	-1	0	1
H (cm)	3	6.5	10
t (cm)	0.2	0.35	0.5
d (cm)	1	2	3

جدول ۲- ماتریس طراحی برای مدل‌سازی پارامترهای هندسی (ابعاد به سانتی‌متر)

Sample ID.	H	t	d	Sample ID.	H	t	d
HB-00	0.00	0.00	0.00	HB-15	10	0.50	2.10
HB-01	10	0.33	2.10	HB-16	4.5	0.33	3.00
HB-02	7.5	0.33	1.20	HB-17	5	0.50	2.10
HB-03	3.5	0.17	1.20	HB-18	10	0.17	1.20
HB-04	5	0.17	1.20	HB-19	5	0.33	1.20
HB-05	7.5	0.17	3.00	HB-20	4	0.50	1.20
HB-06	5	0.50	3.00	HB-21	5	0.33	2.10
HB-07	10	0.33	1.20	HB-22	5	0.50	1.20
HB-08	10	0.50	3.00	HB-23	7.5	0.33	2.10
HB-09	5	0.33	3.00	HB-24	3.5	0.5	1.50
HB-10	3.5	0.50	2.10	HB-25	4.5	0.33	2.10
HB-11	7.5	0.50	1.20	HB-26	10	0.17	3.00
HB-12	3.5	0.50	3.00	HB-27	5	0.17	2.10
HB-13	10	0.33	3.00	HB-28	5	0.17	3.00
HB-14	10	0.17	2.10	HB-29	6.25	0.22	1.50

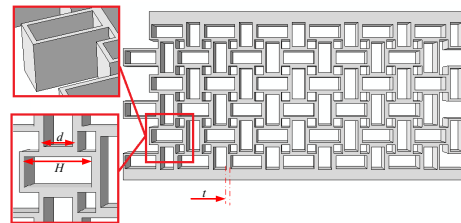
۲-۴- مدل‌سازی المان محدود

نرم‌افزار ABAQUS یک نرم‌افزار المان محدود با کاربردهای گسترده می‌باشد که برای شبیه‌سازی مسائل فیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق از روش حل انتقال گرمای پایا به منظور بررسی تأثیر اندازه حفره‌های بلوک بر عملکرد گرمایی 3DPHB تحت بررسی و بهینه‌سازی عملکرد گرمایی آن استفاده شده است. این روش امکان بررسی اثرات گرمایش و سرمایش را در اجزای مختلف مانند دیوارهای ساختمان بر اساس معادله انتقال گرما به فرم زیر فراهم می‌سازد:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = \mathbf{Q} \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی، c_p ظرفیت گرمایی ویژه و \mathbf{Q} منبع گرمایی می‌باشد.

در این تحقیق با الهام گرفتن از ساختار لانه زنبوری موجود در طبیعت و جهت دستیابی به آجر سبک وزن، شکل آجر به گونه‌ای طراحی شده است که دارای حفره‌های چندوجهی می‌باشد، این حفره‌ها هوا را در بین خود حبس می‌کند و با توجه به ساختار کلی آن که یک حجم متخلخل را تشکیل می‌دهد، امکان انتقال گرما به واسطه‌ی وجود حفره‌ها کاهش پیدا می‌کند. یکی دیگر از دلایل انتخاب حفره چندوجهی این است که مقطع حفره‌ها امکان افزایش انتقال فشار بیشتر را دارد، یعنی می‌توان با استفاده از آن مقاومت فشاری بیشتر یا بالاتر نسبت به آجرهای معمولی را به دست آورد. در شکل ۱ هندسه بلوک جدید نشان داده شده است. مطابق شکل سه پارامتر H ، t و d بر ابعاد آن تأثیرگذار بوده و در نتیجه عملکرد گرمایی آجر تولید شده با استفاده از این نوع حفره‌ها نیز تابع این سه متغیر خواهد شد.



شکل ۱- هندسه حفره جدید ارائه شده

۲-۳- پیش‌بینی مدل با استفاده از RSM و مشخصات

نمونه‌های تحت بررسی

محققان در سال‌های اخیر به این نتیجه رسیده‌اند که طراحی پارامترها با استفاده از آزمایشات تجربی و روش سعی و خطا بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر می‌باشد. در این میان، تحلیل المان محدود به مهندسين کمک کرد که بسیاری از هزینه‌ها و محدودیت‌ها را در این فرآیند کاهش داده و با تغییر پارامترهای گوناگون در محیط نرم‌افزاری نظیر ABAQUS، یک محیط آزمایش ارزان قیمت در اختیار داشته باشند. از سوی دیگر، طراحی آزمایشات نقش کلیدی در برنامه‌ریزی آزمایشات تجربی و تحلیل‌های المان محدود دارد. این مسأله که کدام پارامترها دارای اثر بسیار مهم، کدام دارای اثر متوسط و تغییر کدام پارامترها در فرآیند بی‌اثر و قابل چشم‌پوشی می‌باشد، بسیار حائز اهمیت است. بنابراین هدف طراحی آزمایشات تعیین اثر متقابل چندین پارامتر به صورت هم‌زمان بر روی خروجی فرآیند می‌باشد. روش‌های موسوم به طراحی آزمایش جایگزین خوبی برای روش‌های پیشین هستند [۳۴-۳۶]. در این روش‌ها مجموعه‌ای از آزمایش‌ها طراحی می‌شوند که در آنها متغیرهای ورودی به طور برنامه‌ریزی شده، تغییر داده می‌شوند و تأثیر آنها روی خروجی یا پاسخ تعیین می‌گردد. بدین ترتیب پارامترهای مؤثر در خروجی تعیین می‌گردند و مشخص می‌شود که کدام یک از پارامترها به تنهایی در پاسخ مؤثرند و کدام یک در ترکیب باهم روی خروجی اثر می‌گذارند [۳۴].

در این تحقیق، طراحی مدل توسط روش RSM با طراحی بهینه D-optimal صورت می‌پذیرد تا وابستگی پاسخ‌ها برحسب پارامترهای هندسی مشخص گردد. در این مدل دو متغیر پاسخ شامل ضریب انتقال گرما و مقاومت گرمایی آجر در نظر گرفته شده است و همچنین

$$\begin{aligned}
 u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\
 u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\
 u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g\beta(T - T_{ref}) + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)
 \end{aligned} \quad (۴)$$

به منظور حل معادلات فوق، شرایط مرزی بر روی تمام سطوح باید تعریف شود. با در نظر گرفتن سه مکانیزم انتقال گرمای رسانشی، همرفت و تابشی شرایط مرزی حاکم بر 3DPHB در شکل ۵ نشان داده شده است. شرایط مرزی حاکم بر سطح خارجی آجر که در معرض بار خورشید و انتقال گرمای همرفت طبیعی است به صورت زیر می‌باشد:

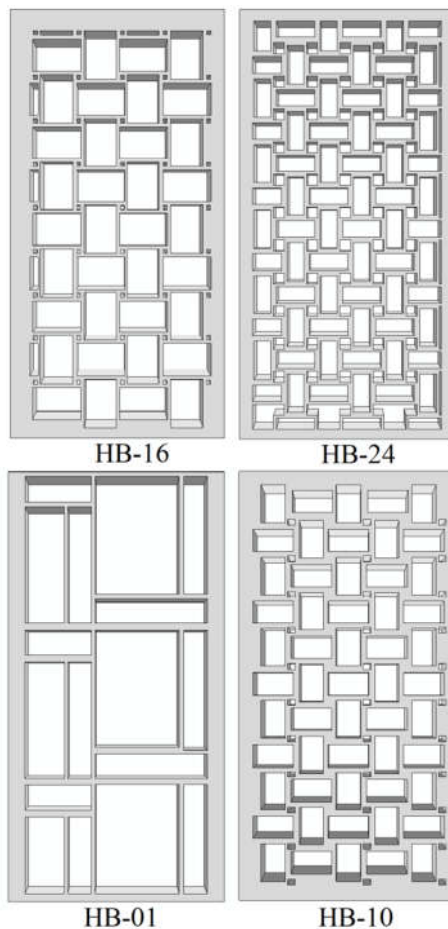
$$\begin{aligned}
 z = 0: -k \frac{\partial T}{\partial z} &= q''_{solar} + q''_{conv.} + q''_{rad.} \\
 &= q''_{solar} + h_{out}(T_{out} - T) + \varepsilon\sigma(T_{out}^4 - T^4)
 \end{aligned} \quad (۵)$$

به طور مشابه، برای سطح داخلی آجر می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned}
 z = W: -k \frac{\partial T}{\partial z} &= q''_{conv.} + q''_{rad.} \\
 &= h_{int}(T_{int} - T) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_{int}^4)
 \end{aligned} \quad (۶)$$

که در معادلات بالا، W عرض آجر، h_{int} ضریب انتقال گرمای همرفت سمت سرد، h_{out} ضریب انتقال گرمای همرفت سمت گرم، k ضریب رسانایی گرمایی آجر، T_{out} دمای بیرون ساختمان و T_{int} دمای داخل ساختمان است. سایر شرایط مرزی مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است.

دمای بیرون ۳۱۵ کلوین و محیط گرم ۲۹۳ کلوین لحاظ گردیده است. همچنین، ضریب انتقال گرمای محیط بیرون و داخل به ترتیب $23 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ و $8.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ در نظر گرفته شده است. سایر مشخصات گرمایی و مکانیکی در جدول ۳ آمده است. جنس آجر از ملات گچی ANETO که در چاپگرهای سه‌بعدی مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد، انتخاب شده است. به منظور مش‌بندی آجر و هوای داخل حفره‌ها از المان‌های هرمی شکل ده گرهی غیرخطی C3D10T استفاده شده است. به منظور اطمینان از استقلال از مش؛ تعداد مناسب المان‌ها پس از بررسی همگرایی مش تعیین شده است. در شکل ۴ تغییرات شار گرمایی حداکثر نمونه HB-10 به ازای تعداد مختلف المان‌ها نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد المان‌ها، شار گرمایی به مقدار 0.4 همگرا می‌شود و به ازای تعداد المان‌های بیشتر از ۴۳۲۰۰۰، نتایج تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. بر این اساس، مدل المان محدود نهایی با استفاده از ۴۳۲۰۸۶ المان تشکیل شده است.



شکل ۲- مدل هندسی برخی از نمونه‌های تحت بررسی

در مسائل پایه، دما با زمان تغییر پیدا نمی‌کند و اولین جمله در معادله (۱) ناپدید می‌شود. در مدل‌سازی مسئله حاضر فرض می‌شود که داخل حفره‌های با هوا پر شده و درون محفظه‌ها انتقال گرمای همرفتی وجود دارد. بنابراین، معادلات حاکم بر جریان هوا درون حفره‌های به صورت زیر می‌باشد:

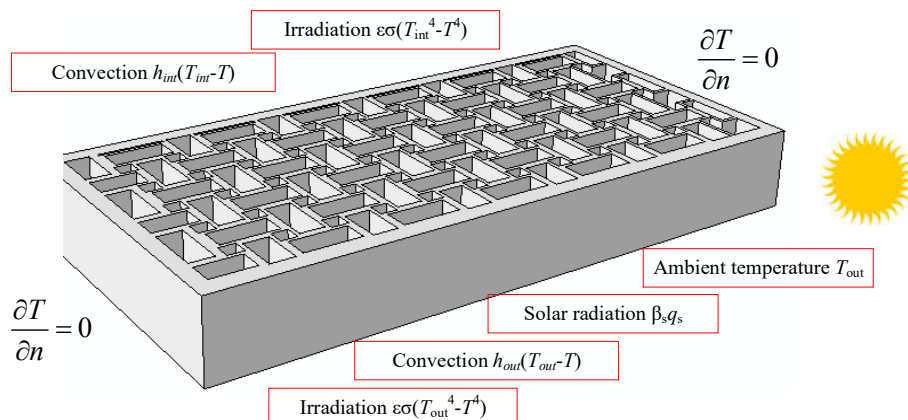
معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (۲)$$

تنها مکانیزم انتقال گرما در جداره‌های بلوک انتقال گرمای رسانشی بوده و توزیع دما در جداره‌های بلوک از حل معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (۳)$$

علاوه بر این، معادلات ممنتوم به صورت زیر می‌باشند:

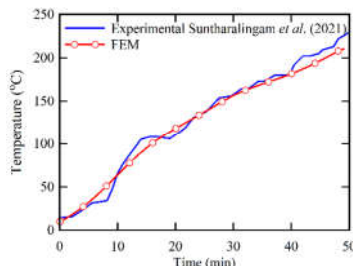


شکل ۳- شرایط مرزی انتقال گرما در آجر

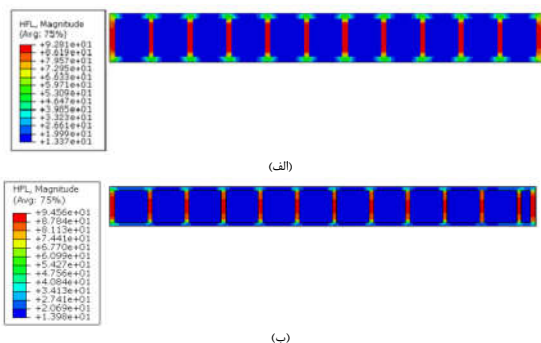
جدول ۳- خواص ترموفیزیکی ملات آجر و هوا

	Density, ρ (kg/m ³)	Specific heat, C_p (J/kg.K)	Thermal conductivity, k (W/m.K)	ϵ	Thermal coefficient
Air	1.225	1.007	0.0242	-	
ANETO - White Porcelain	1523	1080	0.253	0.9	$59.2 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

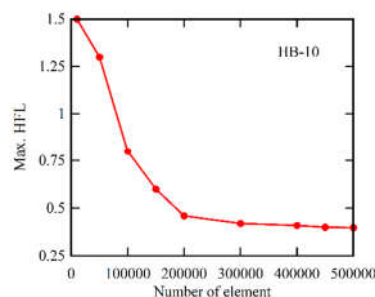
شده در مرجع مذکور، در شکل ۶ نتایج شار گرمایی به دست آمده از تحقیق آنها با شار گرمایی به دست آمده از تحقیق حاضر مقایسه شده است. حداکثر شار گرمایی به دست آمده از تحقیق حاضر و مرجع [۲۹] به ترتیب برابر 94.6 و 92.8 به دست می‌آید. بر این اساس، روش المان محدود مورد استفاده در تحیق حاضر همخوانی قابل قبولی با نتایج مرجع [۳۰] دارد.



شکل ۵- تغییرات دمای آجر بر حسب زمان به دست آمده از نتایج مدل المان محدود تحقیق حاضر و نتایج تجربی مرجع [۳۷]



شکل ۶- (الف) توزیع شار گرمایی در آجر ساخته شده با چاپگر سه بعدی تحقیق [۳۰] و (ب) نتایج المان محدود تحقیق حاضر برای آجر مورد بررسی در تحقیق [۳۰]



شکل ۴- بررسی استقلال از شبکه برای مدل HB-10

۳- بررسی نتایج

۳-۱- صحت‌سنجی نتایج

به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل المان محدود از نتایج تست‌های تجربی Suntharalingam و همکاران [۳۷] استفاده شده است. آنها در مطالعه خود به بررسی تأثیر هندسه حفره بر عملکرد گرمایی نوع خاصی از آجرهای ساخته شده به روش چاپگر سه‌بعدی پرداختند. در سازه تحت بررسی توسط آنها یک وجه از آجر در معرض شرایط دما بالا قرار داشته و با استفاده از ترموکوپل‌های دقیق دمای سطوح مختلف بر حسب زمان ثبت شده است. جهت فراهم آوردن امکان مقایسه نتایج، آجر با هندسه و مشخصات مکانیکی مشابه مرجع مذکور شبیه‌سازی شده و در شکل ۵ تغییرات زمانی دمای سطح پشت آجر به دست آمده از تحلیل عددی حاضر با نتایج مرجع [۳۷] مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS با دقت مناسبی می‌توان تحلیل‌های انتقال گرما را شبیه‌سازی نمود. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر خطای بین نتایج مدل المان محدود و نتایج تجربی در حدود ۱۳ درصد می‌باشد که قابل قبول می‌باشد. در یک مقایسه کیفی دیگر، نتایج با نتایج Suntharalingam و همکاران [۳۰] مقایسه می‌شود. با در نظر گرفتن هندسه C2₁₀₀ و مشخصات هندسی و مکانیکی ذکر

۳-۲- نتایج مدل المان محدود

نتایج به دست آمده با استفاده از روش المان محدود به منظور مطالعه تأثیر ابعاد حفره‌ها بر عملکرد گرمایی 3DPHB جدید ارائه شده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به منظور بررسی عملکرد گرمایی 3DPHB نتایج برحسب پارامترهای ضریب انتقال گرمایی (U-value (W/m²K) و ضریب رسانایی گرمایی معادل λ_{equiv} ارائه می‌شود. محاسبه این پارامترها بر اساس معادلات زیر می‌باشد:

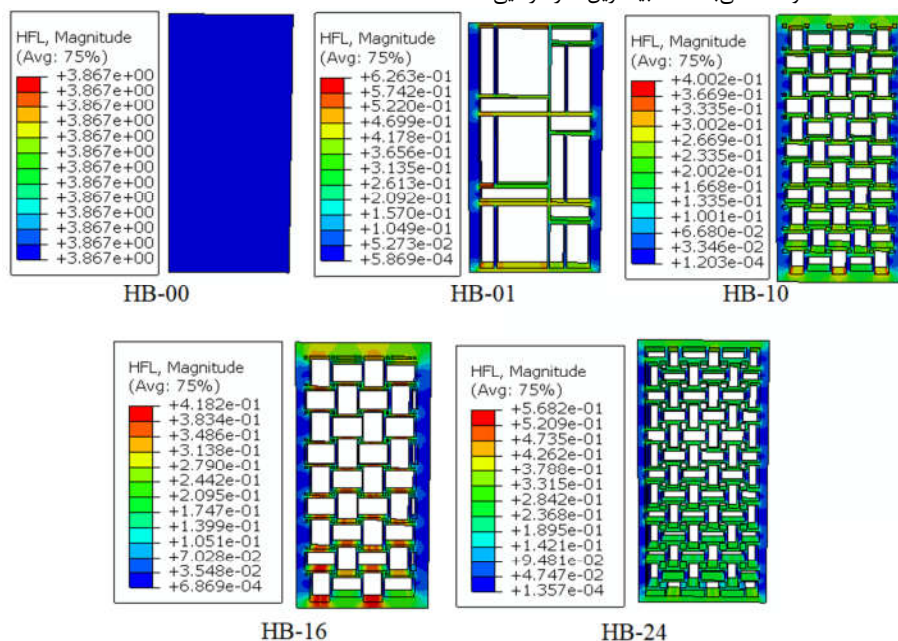
$$\lambda_{equiv} = \frac{QW}{T_{int} - T_{out}} \quad (7)$$

$$U\text{-value} = \frac{Q}{A_s \Delta T} \quad [W/m^2K] \quad (8)$$

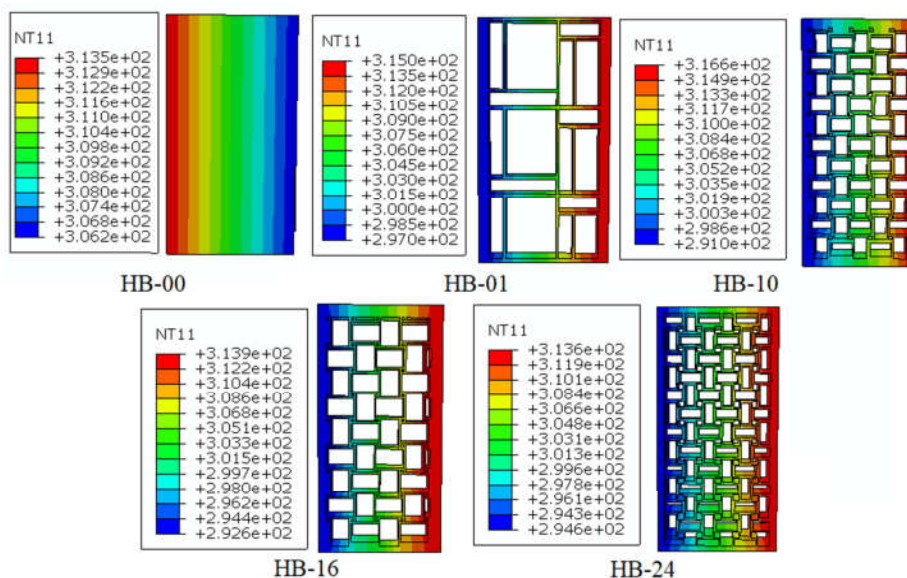
که در آن Q شار گرمایی میانگین [W/m²], W ضخامت آجر [m], A_s مساحت سطح کل انتقال گرما، T_{int} و T_{out} به ترتیب دمای میانگین حالت پایای سطوح داخلی و خارجی آجر می‌باشند. U-value رابطه عکسی با عملکرد گرمایی آجر دارد؛ اگر U-value کمتر باشد، نشان می‌دهد که عملکرد گرمایی دیوار بهتر است.

در ابتدا جهت بررسی اثر تعداد و اندازه حفره‌ها بر عملکرد گرمایی 3DPHB شار گرمایی ایجاد شده در نمونه‌های مختلف مقایسه می‌شوند. در شکل ۷ شار گرمایی ایجاد شده در نمونه‌های HB-01، HB-10، HB-16 و HB-24 برای مثال نشان و با نتایج آجر بدون حفره (NB-00) مقایسه شده است. بر اساس نتایج مشاهده می‌شود که شار گرمایی ایجاد شده در نمونه‌های HB-01، HB-10، HB-16 و HB-24 به ترتیب برابر 0.63، 0.40، 0.41 و 0.57 می‌باشد که بیشترین شار گرمایی

مربوط به نمونه HB-01 و کمترین شار گرمایی مربوط به نمونه HB-10 می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که اندازه حفره‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد گرمایی آجر ارائه شده دارد و بنابراین با تعیین مناسب ابعاد حفره‌ها، می‌توان مشخصات بهینه آجر ارائه شده را تعیین نمود. جهت بررسی تأثیر ابعاد حفره‌ها بر عملکرد گرمایی، توزیع دمای حالت پایای نمونه‌های مختلف، در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که در حالت عدم وجود حفره $\Delta T = 7.3K$ می‌باشد در صورتی که وجود حفره باعث افزایش قابل توجهی در این اختلاف دما می‌شود و برای نمونه HB-10 برابر $\Delta T = 25.6K$ می‌باشد که در حدود 3.4 برابر بیشتر از مقدار متناظر آجر بدون حفره می‌باشد. این امر نشان دهنده تأثیر مطلوب وجود حفره‌های هوا بر بهبود عملکرد گرمایی و افزایش مقاومت گرمایی این نوع آجرها می‌شود. واضح است که انتقال گرما در جامدات از طریق رسانش روی می‌دهد و از طرف دیگر، با توجه به پایین بودن ضریب رسانایی گرمایی هوا، مکانیزم‌های غالب انتقال گرما در حفره‌های شامل هوا، همرفت و تابشی است. بنابراین، وجود حفره‌های هوا درون آجر، پخش گرما در آجر را به صورت قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه در یک آجر همراه با حفره‌های هوا، فرآیند واقعی انتقال گرما شامل رسانش گرما در قسمت جامد، انتقال گرمای همرفت با جریان لایه‌ای درون حفره‌ها و انتقال گرمای تابشی با امواج بلند بین دیوارهایی که حفره‌های هوا را تشکیل می‌دهند، می‌باشد.

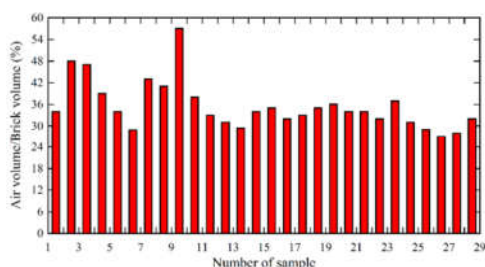


شکل ۷- شار گرمایی ایجاد شده در نمونه‌های HB-01، HB-10، HB-16 و HB-24



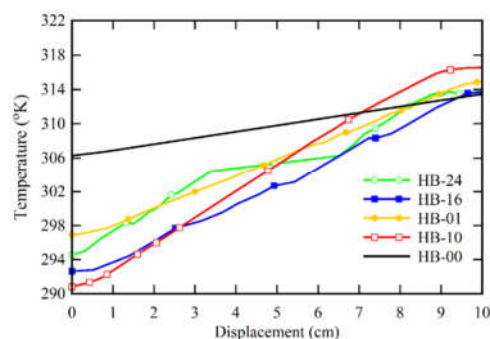
شکل ۸- توزیع دمای حالت پایا در نمونه‌های HB-00، HB-01، HB-10، HB-16 و HB-24

بهترین عملکرد گرمایی مربوط به نمونه HB-10 با U-value برابر 1.95 می‌باشد که بهبود 97% نسبت به آجر بدون حفره پیدا کرده است. اختلاف دمای به دست آمده برای این نمونه برابر 23.7K می‌باشد. پس از آن نمونه‌های HB-16، HB-27، HB-17 به ترتیب با مقادیر U-value برابر 2.76، 2.816 و 3.20 W/m²K دارای بهترین عملکرد گرمایی می‌باشند. در شکل ۱۰ نسبت حجم حفره‌ها به حجم کل بلوک نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، کمترین حجم حفره‌های هوا مربوط به بلوک HB-06 و HB-13 است که در آنها حجم هوا به ترتیب 28.9% و 29.4% است. همچنین، بیشترین حجم هوا مربوط به بلوک HB-09 بوده که برابر 54.7% می‌باشد. بر خلاف تصور عمومی که هر چقدر حجم هوا در محفظه‌های بیشتر باشد، به دلیل پایین بودن ضریب رسانایی گرمایی پایین هوا آن محفظه عایق‌تری است، نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که این باور عمومی لزوماً همیشه صحیح نمی‌باشد. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد، با آنکه حجم هوای محبوس در نمونه HB-13 در حدود 82% کمتر از آجر HB-09 است، مقدار U-value در حدود 37% افزایش یافته است. همچنین در آجر HB-06 که حجم هوای آن تنها 1.4% کمتر از آجر HB-13 است، U-value در حدود 14% بیشتر از آجر HB-13 می‌باشد. دلایل این رفتار متفاوت گرمایی را می‌توان به نحوه قرارگیری حفره‌ها و نظم چیدمان آنها و همچنین تابش سطوح ارتباط داد.



شکل ۹- نسبت حجم هوا در حفره‌ها به حجم بلوک

در شکل ۹ تغییرات دما در راستای ضخامت آجر به ازای حالت‌های مختلف تحت بررسی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات دمای نواحی نزدیک به جدارهای داخلی و خارجی به صورت خطی بوده و سپس در نواحی میانی به شدت دچار تغییرات می‌شود. که این امر به دلیل وجود سه مکانیزم متفاوت انتقال گرما و وجود اختلاف در سرعت انتشار آنها می‌باشد. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که نمونه HB-10 دارای بیشتر اختلاف دما بوده و مقدار U-value در این حالت برابر 318.5 به دست می‌آید. بنابراین، در صورت تعیین مناسب ابعاد حفره‌ها، مقاومت انتقال گرمای آجر افزایش یافته و در نتیجه ضمن دست‌یابی به آجر سبک وزن، می‌توان از اتلاف انرژی در ساختمان‌ها جلوگیری نمود.



شکل ۸- نمودار تغییرات دمای در راستای ضخامت آجر به ازای حالت‌های مختلف

با توجه به اینکه یکی از اهداف تحقیق حاضر دست‌یابی به مشخصات بهینه به منظور دست‌یابی به عملکرد گرمایی مناسب برای 3DPHB می‌باشد، بنابراین در جدول ۴ مقادیر اختلاف دما، شار گرمایی عبوری، U-value واحد سطح و رسانایی گرمایی معادل واحد ضخامت برای هندسه‌های مختلف که جزئیات آنها در جدول ۳ آورده شده است، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بین طرح‌های بررسی شده،

جدول ۴- مقادیر اختلاف دما، شار گرمایی عبوری، U-value واحد سطح و ضریب رسانایی گرمایی معادل واحد ضخامت برای هندسه‌های مختلف

Sample ID.	T_{max} (K)	T_{min} (K)	ΔT (K)	Heat Flux	U-value (W/m ² K)	Improvement (%)	λ_{equiv}
HB-00	313.54	306.23	7.31	3.87	66.18	--	0.53
HB-01	315.05	297.04	18.01	0.63	4.37	93.39	0.03
HB-02	313.52	299.92	13.60	0.70	6.46	90.24	0.05
HB-03	314.56	300.12	14.44	3.01	26.06	60.63	0.21
HB-04	315.39	294.86	20.53	0.68	4.11	93.78	0.03
HB-05	316.71	299.50	17.21	0.69	4.99	92.45	0.04
HB-06	313.35	296.62	16.73	0.58	4.33	93.45	0.03
HB-07	316.56	294.76	21.80	0.70	4.04	93.90	0.03
HB-08	317.74	294.09	23.65	0.78	4.14	93.75	0.03
HB-09	315.46	296.44	19.02	0.79	5.17	92.18	0.04
HB-10	316.63	291.03	25.60	0.40	1.95	97.05	0.02
HB-11	317.08	295.75	21.33	0.74	4.33	93.45	0.03
HB-12	314.23	302.91	11.32	1.94	21.42	67.63	0.17
HB-13	313.25	295.24	18.00	0.54	3.75	94.34	0.03
HB-14	313.33	299.33	14.00	0.70	6.24	90.58	0.05
HB-15	316.22	303.22	13.00	1.65	15.87	76.03	0.13
HB-16	313.96	292.64	21.32	0.42	2.46	96.28	0.02
HB-17	317.77	294.06	23.71	0.61	3.21	95.15	0.03
HB-18	316.18	296.61	19.57	0.70	4.47	93.25	0.04
HB-19	313.18	297.18	16.00	0.75	5.84	91.17	0.05
HB-20	312.16	297.16	15.00	0.76	6.32	90.45	0.05
HB-21	315.56	298.18	17.38	0.69	4.93	92.55	0.04
HB-22	314.72	294.46	20.26	0.67	4.13	93.76	0.03
HB-23	315.14	293.14	22.00	0.67	3.79	94.28	0.03
HB-24	313.68	294.68	19.00	0.56	3.68	94.43	0.03
HB-25	314.12	298.12	16.00	0.75	5.87	91.13	0.05
HB-26	313.12	300.12	13.00	0.76	7.33	88.93	0.06
HB-27	315.08	295.08	20.00	0.45	2.81	95.75	0.02
HB-28	314.99	298.99	16.00	0.66	5.18	92.17	0.04
HB-29	315.09	296.20	18.89	0.67	4.42	93.32	0.04

۳-۲- پیش‌بینی مدل با استفاده از RSM

با توجه به نتایج RSM، رابطه ریاضی بین دو متغیر پاسخ و سه

$$\lambda_{equiv} = 2.02 + 6.33H - 15.91t + 9.99d + 4.2Ht \quad (9)$$

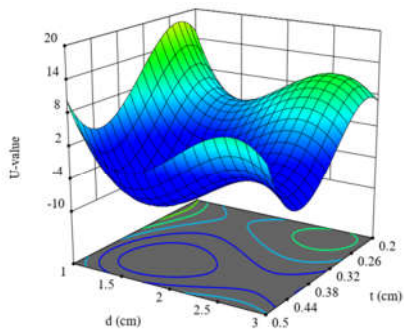
$$+ 0.819Ht + 0.9981td + 12.17H^2 + 5.45t^2 + 6.24d^2$$

$$\lambda_{equiv} = 0.0202 + 0.0474H - 0.1495t + 0.0895d + 0.0331Ht \quad (10)$$

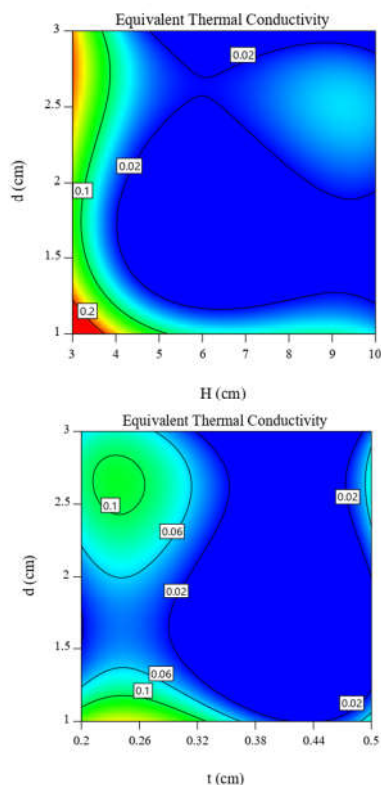
$$+ 0.0072td + 0.1006H^2 + 0.0496t^2 + 0.0514d^2$$

با توجه به روابط فوق می‌توان U-value و ضریب رسانایی گرمایی

معادل 3DPHB ارائه شده را به ازای مقادیر دلخواه ابعاد هندسی حفره آجر تعیین نمود.



به منظور دستیابی به فهم بیشتر در مورد تأثیر پارامترها بر عملکرد گرمایی آجر ارائه شده، در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نتایج به دست آمده از RSM برای دو متغیر پاسخ U-value و ضریب رسانایی گرمایی معادل نشان داده شده است. در شکل ۱۱ پاسخ سطح برای U-value برحسب تابعی از ابعاد هندسی حفره آجر نشان داده شده است. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که دو پارامتر t و d بیشترین تأثیر را بر U-value دارند. مشاهده می‌شود که به منظور دستیابی به کمترین U-value پارامترهای هندسی حفره مستقل از هم نبوده و به ازای محدوده مشخصی از هر یک از این پارامترها می‌توان کمترین مقدار U-value را تعیین نمود. با توجه به این نتایج می‌توان دریافت که کمترین مقدار U-value مربوط به حفره با ابعاد $H=2.2$ mm، $t=1.4$ mm و $d=14$ mm می‌باشد و مقدار آن برابر 2.35 می‌باشد. چنین نتایجی را می‌تواند با توجه به شکل ۱۲ در مورد تأثیر مشخصات هندسی حفره بر ضریب انتقال گرمایی معادل آجر مشاهده نمود. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود با افزایش d و کاهش دو پارامتر t و H ، ضریب انتقال گرمایی معادل کاهش می‌یابد و می‌توان مقادیر بهینه را با توجه به این نمودارها تعیین نمود. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که حفره با ابعاد هندسی $H=2.2$ mm، $d=8$ mm و $t=3$ mm دارای کمترین ضریب هدایت گرمایی معادل کل (بیشترین مقاومت گرمایی) و حفره با ابعاد هندسی $H=4$ mm، $t=2.5$ mm و $d=20$ mm دارای بیشترین ضریب رسانایی گرمایی معادل کل (کمترین مقاومت گرمایی) می‌باشد. بنابراین از دیدگاه به حداقل رساندن اتلاف گرمای ساختمان، حفره بندی HB-I بهترین انتخاب ممکن است.

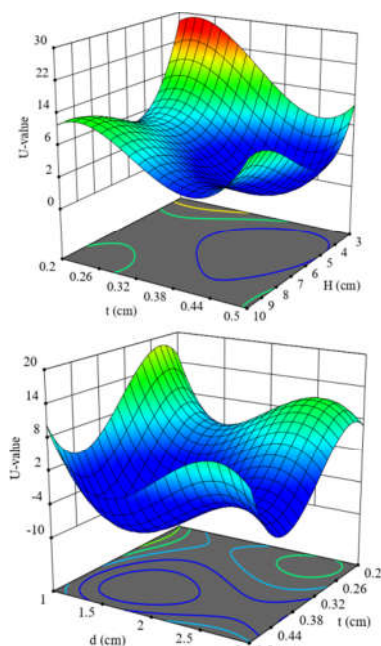


شکل ۱۲- تأثیر ابعاد هندسی حفره بر روی ضریب رسانایی گرمایی معادل آجر 3DPHB

در ادامه به منظور بررسی آنالیز حساسیت یک مدل پیش‌بینی کننده بر مبنای RSM ارائه و مقادیر بهینه حفره تعیین گردید. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که عملکرد گرمایی آجر متخلخل ارائه شده بستگی زیادی به ابعاد هندسی حفره‌ها دارد و بر خلاف تصور عمومی که هر چقدر حجم هوا در محفظه‌ای بیشتر باشد، به دلیل پایین بودن ضریب رسانایی گرمایی پایین هوا آن محفظه عایق بهتری است، نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که این باور عمومی لزوماً همیشه صحیح نمی‌باشد. علاوه بر این، حفره‌های یک آجر مانند سپرهای تابشی عمل می‌کنند و مقدار انتقال گرما را کاهش می‌دهند. میزان کاهش بستگی به ابعاد حفره‌ها و نحوه چیدمان آنها در آجر دارد. مشاهده می‌شود که کمترین مقدار U-value مربوط به حفره با ابعاد $H=35$ mm، $t=5$ mm و $d=21$ mm می‌باشد و مقدار آن برابر 1.95 می‌باشد.

۵- مراجع

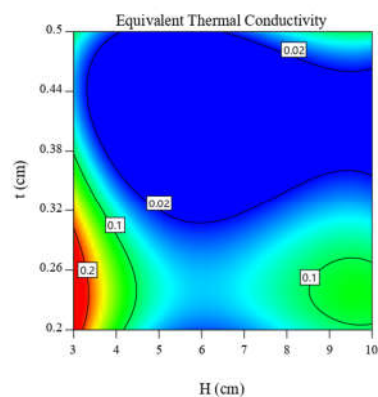
- [1] Zhang J., Wang J., Dong S., Yu, X., Han B., A review of the current progress and application of 3D printed concrete. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Vol. 125, No.3, pp. 105-133, 2019.
- [2] Garg V., Mathur J., Bhatia A., Building energy simulation: A workbook using designbuilder™. 2020: CRC Press.
- [3] Syed M., Moeini M., Okumus P., Elhami-Khorasani N., Ross B. E., Kleiss M. C. B., Analytical study of tessellated structural-architectural reinforced concrete shear walls. *Engineering Structures*. Vol. 244, No. 6, pp. 112-138, 2021.
- [4] Eslami E., Zhou L., Yun H.-B., Noncontact Absolute Stress Measurement for UHPC Using Raman



شکل ۱۱- پاسخ سطح برای U-value برحسب تابعی از ابعاد هندسی حفره آجر

۴- نتیجه گیری

وجود حفره در آجر می‌تواند ضمن کاهش وزن باعث افزایش مقاومت گرمایی گردد و در نتیجه سبب جلوگیری از اتلاف انرژی در ساختمان‌ها گردد. همچنین، امکان ایجاد هر نوع حفره با استفاده از چاپگرهای سه‌بعدی وجود دارد. بنابراین، در این تحقیق به ارائه آجر متخلخل جدیدی پرداخته شد. سوراخ‌های آجر به صورت مستطیلی در نظر گرفته شده و اثر پارامترهای هندسی حفره بر روی عملکرد گرمایی آن مطالعه شد. بدین منظور یک آجر با اندازه ثابت در نظر گرفته شد و با در نظر گرفتن سه مکانیزم انتقال گرمای رسانشی، همرفت و تابشی و با استفاده از روش المان محدود اثر تعداد و هندسه حفره‌ها بر روی پارامترهای U-value و ضریب رسانایی گرمایی معادل مطالعه شد.



- [21] Al-Hazmy M. M., Analysis of coupled natural convection-conduction effects on the heat transport through hollow building blocks. *Energy and Buildings*. Vol. 38, No. 5, pp. 515-521, 2006.
- [22] Sun J., Fang L., Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 52, No. 23-24, pp. 5598-5607, 2009.
- [23] del Coz Díaz J., Nieto P. G., Biempica C. B., Gero M. P., Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method. *Applied thermal engineering*. Vol. 27, No. 8-9, pp. 1445-1456, 2007.
- [24] 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.
- [25] del Coz Díaz 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, No. 17-18, pp. 2822-2826, 2010.
- [26] Huang, J., Yu, J., Yang, H., Effects of key factors on the heat insulation performance of a hollow block ventilated wall. *Applied Energy*. Vol. 232, No. pp. 409-423, 2018.
- [27] Alghamdi A. A., Alharthi H. A., Multiscale 3D finite-element modelling of the thermal conductivity of clay brick walls. *Construction and Building Materials*. Vol. 157, No. pp. 1-9, 2017.
- [28] Jamal B., Boukendil M., El moutaouakil L., Abdelbaki A., Zrikem Z., Numerical investigation of combined heat transfer through hollow brick walls. *The European Physical Journal Plus*. Vol. 135, No. 10, pp. 813, 2020.
- [29] 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. 34-42, 2019.
- [30] Suntharalingam, T., Upasiri, I., Gatheeshgar, P., Poologanathan, K., Nagaratnam, B., Santos, P., Rajanayagam, H., Energy Performance of 3D-Printed Concrete Walls: A Numerical Study. *Buildings*. Vol. 11, No. 10, pp. 432-445, 2021.
- [31] Sambucci M., Valente M., Thermal Insulation Performance Optimization of Hollow Bricks Made up of 3D Printable Rubber-Cement Mortars: Material Properties and FEM-based Modelling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1044, No. 1, pp. 34-42, 2021.
- [32] Jamal B., Boukendil M., El Moutaouakil L., Abdelbaki A., Zrikem Z., Thermal analysis of hollow clay bricks submitted to a sinusoidal heating. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 45, pp. 7399-7403, 2021.
- [33] Suntharalingam T., Gatheeshgar P., Upasiri I., Poologanathan K., Nagaratnam B., Rajanayagam H., Navaratnam S., Numerical Study of Fire and Energy Performance of Innovative Light-Weight 3D Printed Concrete Wall Configurations in Modular Building System. *Sustainability*. Vol. 13, No. 4, pp. 2314-2326, 2021.
- [34] Freddi A., Salmon M., *Design of Experiment*, in *Design Principles and Methodologies*. 2019, Springer. p. 127-158.
- [35] Park, G.-J., Design of experiments. *British Medical Journal* Vol. 23, pp. 309-391, 2007.
- [36] Condra, L., Reliability improvement with design of experiment. 2001: CRC Press.
- [37] Suntharalingam T., Gatheeshgar P., Upasiri I., Poologanathan K., Nagaratnam B., Corradi M., Nuwanthika D., Fire performance of innovative 3D printed concrete composite wall panels-A Numerical Study. *Case Studies in Construction Materials*. Vol. 15, pp. e00586, 2021.
- [5] Yun H. B., Eslami E., Zhou L., Noncontact stress measurement from bare UHPC surface using Raman piezospectroscopy. *Journal of Raman Spectroscopy*. Vol. 49, No. 9, pp. 1540-1551, 2018.
- [6] Esmacili J., Andalibi K., Investigation of the effects of nano-silica on the properties of concrete in comparison with micro-silica. *International Journal of Nano Dimension*. Vol. 3, No. 4, pp. 321-328, 2013.
- [7] Esmacili J., Andalibi K., Gencil O., Mechanical characteristics of experimental multi-scale steel fiber reinforced polymer concrete and optimization by Taguchi methods. *Construction and Building Materials*. Vol. 313, No. pp. 125500, 2021.
- [8] Esmacili J., Aghdam O. R., Andalibi K., Kasaei J., Gencil O., Experimental and numerical investigations on a novel plate anchorage system to solve FRP debonding problem in the strengthened RC beams. *Journal of Building Engineering*. Vol. 45, pp. 103413, 2022.
- [9] Altas, E., Khosravi, F., Gokkaya, H., Maleki, V. A., Akinay Y., Ozdemir O., Bayraktar O., Kandas H., Finite element simulation and experimental investigation on the effect of temperature on pseudoelastic behavior of perforated Ni-Ti shape memory alloy strips. *Smart Materials and Structures*. Vol. 31, No. 2, pp. 025031, 2022.
- [10] Han Y., Yang Z., Ding T., Xiao J., Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 278, pp. 123884, 2021.
- [11] He Y., Zhang Y., Zhang C., Zhou H., Energy-saving potential of 3D printed concrete building with integrated living wall. *Energy and Buildings*. Vol. 222, pp. 110110, 2020.
- [12] Tian X., Zhou K., 3D printing of cellular materials for advanced electrochemical energy storage and conversion. *Nanoscale*. Vol. 12, No. 14, pp. 7416-7432, 2020.
- [13] Ghaderi M., Maleki V. A., Andalibi K., Retrofitting of unreinforced masonry walls under blast loading by FRP and spray on polyurea. *Cumhuriyet Science Journal*. Vol. 36, No. 4, pp. 462-477, 2015.
- [14] Ghaderi M., Ghaffarzadeh H., Maleki V. A., Investigation of vibration and stability of cracked columns under axial load. *Earthquakes and Structures*. Vol. 9, No. 6, pp. 1181-1192, 2015.
- [15] Esmacili J., Andalibi K., Gencil O., Maleki F. K., Maleki V. A., Pull-out and bond-slip performance of steel fibers with various ends shapes embedded in polymer-modified concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 271, pp. 121531, 2021.
- [16] Vahidi Pashaki P., Pouya M., Maleki V. A., High-speed cryogenic machining of the carbon nanotube reinforced nanocomposites: Finite element analysis and simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. Vol. 232, No. 11, pp. 1927-1936, 2018.
- [17] Bondareva N. S., Sheremet M. A., Influence of phase change material melting point and its location on heat and mass transfer in a brick. *Journal of Energy Storage*. Vol. 42, No. pp. 23-32, 2021.
- [18] Pichler, M., Haddadi, B., Jordan, C., Harasek, M., Modeling the effective thermal conductivity of hollow bricks at high temperatures. *Construction and Building Materials*. Vol. 309, pp. 123-140, 2021.
- [19] Boukendil M., Abdelbaki A., Zrikem Z., Numerical simulation of coupled heat transfer through double hollow brick walls: Effects of mortar joint thickness and emissivity. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 125, pp. 1228-1238, 2017.
- [20] Sassine E., Cherif Y., Dgheim J., Antczak E., Experimental and Numerical Thermal Assessment of Lebanese Traditional Hollow Blocks. *International Journal of Thermophysics*. Vol. 41, No. 4, pp. 47-59, 2020.