

# بررسی و مقایسه عملکرد حرارتی دیوار خارجی با بلوک های سفالی رایج در ایران\*

محمد جواد ثقفی<sup>۱</sup>، مجید حاجی زاده\*\*<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>استاد دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

<sup>۲</sup>کارشناس ارشد انرژی و معماری، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۹/۹، تاریخ پذیرش نهایی: ۹۱/۲/۲)

## چکیده

تأثیر مقاومت حرارتی دیوارهای خارجی ساختمان بر میزان کاهش و بهینه سازی میزان مصرف انرژی مورد نیاز برای گرمایش و سرمایش بناها امروزه بر کسی پوشیده نیست. شناخت و بررسی عملکرد حرارتی سیستم های دیوار خارجی رایج، می تواند در بهبود و افزایش مقاومت حرارتی آنها بسیار موثر باشد. بنابراین سیستم بلوک سفالی حفره دار که در جهان و به خصوص ایران بسیار رایج شده است، مورد بررسی حرارتی قرار گرفته است. ابتدا به پژوهش های انجام شده بر روی تأثیر هندسه بلوک های سفالی بر روی میزان انتقال حرارت، اشاره شده و همچنین میزان تأثیر هر یک از سه حالت انتقال حرارت یعنی هدایت، همرفت و تشعشع بررسی شده است. سپس سه نوع از رایج ترین بلوک های سفالی مورد استفاده در این سیستم دیوار خارجی، در نرم افزار فلوئنت شبیه سازی شده اند و مشخصات کمی و کیفی حرارتی آنها استخراج و با هم مقایسه شده اند که نتایج، نشانگر تأثیر چشمگیر هندسه ی بلوک ها بر مقاومت حرارتی آنهاست. در انتها نیز با تحلیل نتایج بدست آمده راهکارهایی جهت طراحی بلوک های سفالی بهینه ارائه شده است. افزایش مقاومت انتقال حرارت آجر با طولانی ترین کردن راه پیموده شده توسط حرارت از سطح گرم به سطح سرد آجر از طریق بدنه بلوک سفالی یکی از موثرترین راهکارهاست.

## واژه های کلیدی

سیستم دیوار خارجی، انتقال حرارت، بلوک سفالی، هدایت، همرفت، بهینه سازی مصرف انرژی.

\*این مقاله تحت حمایت شرکت بهینه سازی مصرف سوخت نگاشته شده است.

\*\*نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۱۲۷۶۴۸۱۶، نمابر: ۰۵۱۳۸۹۶۳-۰۲۱، E-mail: majidhajizadeh@ut.ac.ir

## مقدمه

و سهل‌الاجرا بودن، مورد استفاده فراوان قرار گرفته است. در ایران نیز امروزه بخش عمده ساخت و سازها با همین سیستم انجام می‌شود. بنابراین لازم است که مطالعاتی در زمینه عملکرد حرارتی با هدف بهینه نمودن هر چه بیشتر آنها از نقطه نظر انتقال حرارت انجام گیرد. پیش فرض تحقیق این است که با بهینه سازی صرفاً هندسه بلوک‌های سفالی مجوف می‌توان به مقاومت حرارتی بالاتری در آنها دست یافت. به همین منظور در این پژوهش سعی بر این بوده است با مطالعه گونه های مختلف شکلی، تاثیر هندسه بلوک های سفالی در میزان انتقال حرارت بررسی شود.

دیوار خارجی ساختمان‌ها به عنوان مهم‌ترین اجزای ساختمان برای جداساختن محیط کنترل شده داخلی ساختمان‌ها با محیط کنترل نشده بیرون شناخته می‌شوند. در موضوع کنترل حرارتی داخل ساختمان، یکی از مهم‌ترین پارامترها برای یک دیوار خارجی مقاومت حرارتی آن است. همواره در طول سال‌های اخیر به ویژه پس از دهه هفتاد میلادی که با بحران انرژی روبرو شدیم، روش‌هایی برای افزایش مقاومت حرارتی دیوارها ارائه شده اند که گاه با اقبال روبرو شده اند و گاه اینطور نبوده است. یکی از این راهکارها بلوک سفالی مجوف است که به دلیل مزایایی که دارد، از جمله سبک بودن و ارزان

## ۱- پیشینه‌ی تحقیق

ضخامت حفره تاثیر زیادی بر میزان کاهش شار حرارتی نفوذی ندارد (معرفت و دیگران، ۱۳۸۵).

## ۲- سیستم بلوک سفالی در ایران

در سال‌های اخیر، صنعت ساختمان با افزایش تولید بلوک‌های سفالی سبک روبه‌رو بوده است. آجرها و بلوک‌های با ۳۰ تا ۵۰ درصد سوراخ را آجرها و بلوک‌های توخالی می‌نامند. چنین محصولاتی، بلوک‌های ساختمانی مورد مصرف در دیوارهای نازک و بلوک‌های توخالی سقفی را در بر می‌گیرد. این بلوک‌ها به منظور کاهش وزن مرده بنایی، در دیوارهای خارجی و جداکننده‌ها مصرف می‌شوند.

بلوک‌های سفالی منفرد، هنگامی که توسط ملات به یکدیگر متصل می‌شوند، مجموعاً به عنوان بلوک‌کاری یا به عبارت دیگر بنایی بلوکی نامیده می‌شوند. عموماً بلوک‌های دیواری، گچ‌کاری یا اندود می‌شوند. البته در بعضی موارد، بلوک‌ها دارای اندازه و شکل منظم و ظاهری مناسب هستند و برای دیوارسازی بدون اندود مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابعاد و شکل هندسی بلوک‌های تولیدی در ایران و دیگر کشورها از تنوع بالایی برخوردار است. حفره‌ها در اکثر موارد خالی باقی می‌مانند، ولی در بعضی موارد، در زمان تولید، تمامی یا بخشی از حفره‌ها با یک عایق حرارتی یا یک ماده با ضریب هدایت حرارت اندک پر می‌شود. در ساخت و سازهای متداول، بندهای افقی بین بلوک‌ها می‌تواند با ملات معمولی (با ضخامت حدود ۱۰ میلی‌متر) یا ملات‌های با چگالی و یا ضخامت کمتر در نظر گرفته می‌شود.

بدیهی است نوع ملات مورد استفاده باید با بلوک همخوانی داشته باشد، تا دیوار به صورتی یکپارچه و همگن عمل کند. در صورتی که مشخصات بلوک و شرایط اجرا مطلوب باشد، ضخامت بند تا حدود ۶ میلی‌متر نیز می‌تواند کاهش یابد. در جهت افقی، فاصله بین بلوک‌ها می‌تواند به صورت سرتاسری یا موضعی با ملات پر شود، یا خالی بماند (کاری و ویسه، ۱۳۸۷).

مطالعات نظری و تجربی به وضوح نشان داده‌اند که هندسه‌ی سوراخ‌ها نقشی کلیدی در تعیین مشخصات فیزیکی، مکانیکی بلوک‌های سفالی دارند. در زمینه انتقال حرارت، تحقیقات متعددی انجام شده که به نتایجی تعیین کننده منجر شده اند و در حال حاضر در کشورهای صنعتی، بلوک‌های سفالی مخصوصی تولید می‌شوند که جویگویی کلیه انتظارات از بعد انتقال حرارت و صرفه جویی در مصرف انرژی می‌باشند.

### تحقیقات انجام شده:

Lorente et al. در سال ۱۹۹۵ انتقال حرارت در بلوک های سفالی حفره دار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج برای یک حفره با اندازه ۲۵\*۸۸\*۵،۵ سانتی متر که در دو سطح ۸،۸ و ۲۵ آن اختلاف دما (۵ تا ۲۰ درجه) وجود دارد و سایر سطوح آدیاباتیک می‌باشند، نشان داد که مقدار انتقال حرارت تشعشعی ۵۰ درصد، انتقال حرارت همرفتی ۲۵ درصد و سهم هدایت نیز ۲۵ درصد کل انتقال حرارت می‌باشد (Lorente et al., 1996, 2).

B.lalacarriere - B.lartigue - F.monchoux در سال ۲۰۰۲ انتقال حرارت در بلوک های سفالی حفره دار عمودی را به وسیله نرم افزار Fluent بررسی کردند و در دو حالت، با فرض نبودن همرفت یا وجود همرفت همراه با هدایت، بررسی‌ها انجام شد (در هر دو حالت از اثر تشعشع صرفه نظر شد). در این تحقیق پارامترهای هندسی یک بلوک با حفره توخالی بر میزان ضریب انتقال در اختلاف دماهای متفاوت حرارت به شرح زیر بررسی شده است.

۱- با افزایش ضخامت حفره میزان شار حرارتی نفوذی کاهش می‌یابد.

۲- با افزایش ارتفاع حفره نیز شار حرارتی کاهش می‌یابد.

۳- با کاهش اختلاف دما میزان شار حرارتی نفوذی کاهش می‌یابد.

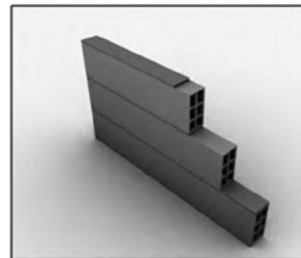
در حفره‌های کوچک افزایش ضخامت حفره، خیلی مفیدتر از افزایش ارتفاع می‌باشد ولی در حفره‌های بزرگ افزایش ارتفاع یا

### ۳- شبیه سازی در نرم افزار فلوئنت [FLUENT]

نرم افزار فلوئنت، نرم افزار علمی معتبری است که غالباً در پژوهش های دقیق رشته های مهندسی مثل مکانیک سال هاست مورد استفاده قرار می گیرد و در بین متخصصین از مقبولیت برخوردار است. دو نمونه پژوهشی که در بخش پیشینه تحقیق به آنها اشاره شد نیز از این نرم افزار برای انجام محاسبات بهره گرفته اند. ویژگی منحصر به فرد آن نسبت به نرم افزارهای مشابه مثل ANSYS امکان مطالعه و بررسی سیالات در این نرم افزار با دقت بالاست که در پژوهش به دلیل اینکه حفره های هوای محبوس درون بلوک های سفالی مورد بررسی قرار گیرد و نقش آنها در انتقال حرارت سنجیده شود، از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

در این پژوهش، ۳ نوع از رایج ترین بلوک های سفالی در ایران در قالب سیستم دیوار (همراه با ملات و اندودها) در نرم افزار فلوئنت ۱۳ (۲۰۱۱) به صورت ۳ بعدی شبیه سازی شده اند. مدل مورد نظر در هر سه مورد از ۴ عدد بلوک تشکیل شده است که با ملات ماسه سیمان به ضخامت ۱ سانتی متر به هم متصل شده اند. اندود درونی از ۱٫۵ سانتی متر گچ خاک و نیم سانتی متر گچ نهایی و اندود بیرونی از دو سانتی متر ملات سیمانی تشکیل شده است. در هر ۳ مدل دمای هوای داخل، ۲۵ درجه سانتی گراد و دمای هوای بیرون، ۵ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است. مشخصات حرارتی محاسبات (ضریب هدایت حرارتی و ضریب تابش) همه مصالح از مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران برگرفته شده است. عوامل مداخله گر مانند اندودهای درونی و بیرونی و ضخامت لایه بدنه بلوک ها، همگی در هر سه مدل ثابت و یکسان در نظر گرفته شده اند تا به صورت ویژه هندسه خود بلوک ها در مقایسه با هم مورد سنجش قرار گیرد. هر مدل ۳ بار محاسبه شده است. بار نخست اثر تابش و همرفت نادیده گرفته شده اند و بار دوم فقط اثر تابش نادیده گرفته شده است و بار سوم هر سه اثر بررسی شده اند. بدین طریق سهم هر یک از این سه راه در انتقال حرارت بدست آمده است.

#### آ- بررسی رفتار حرارتی دیوار با بلوک سفالی ۱۰ سانتی متری افقی با ۶ حفره



تصویر ۱- دیوار با بلوک سفالی ۱۰ سانتی متری با ۶ حفره.

هدایت: در بررسی رفتار حرارتی این دیوار مشخص شد که جداره های افقی بلوک و همچنین ملات افقی بین دو بلوک، مستقیماً

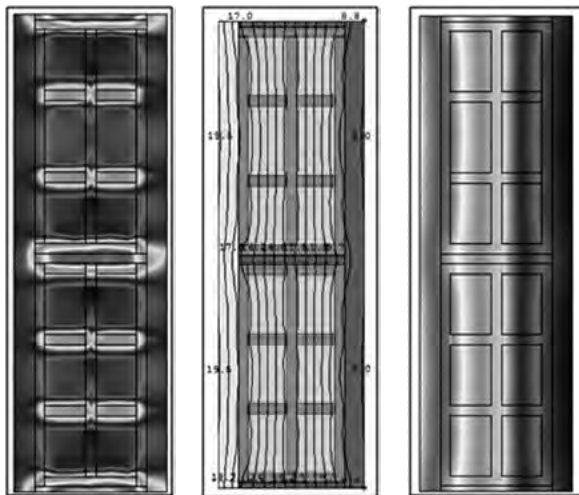
سطح گرم بلوک را به سطح سرد آن متصل می کنند و چون نسبتاً طول کوتاهی نیز دارند، همانطور که در تصویر ۱ و جدول ۱ دیده می شود، شار حرارتی آنها نسبت به بخش های دیگر دیوار حدود ۳ برابر است و به عنوان پل حرارتی عمل می کنند. براساس محاسبات ۴۵ درصد انتقال حرارت در این مدل از سطح گرم دیوار به سطح سرد آن از طریق هدایت صورت گرفته است.

جدول ۱- مشخصات عددی بدست آمده از دیوار با بلوک سفالی ۱۰ سانتی متری با ۶ حفره.

[m <sup>2</sup> .k/w]	۰٫۴	مقاومت حرارتی
[C]	۱۹٫۵۸	دمای سطح داخلی
[C]	۷٫۹۱	دمای سطح خارجی
[W/m <sup>2</sup> ]	۱۰۰	حداکثر شار حرارتی
[W/m <sup>2</sup> ]	۳۳	حداقل شار حرارتی
[cm]	۱۴	ضخامت
[mm/s]	۳۸	حداکثر سرعت هوا

**همرفت:** همانطور که در شکل ۳ دیده می شود، اختلاف حرارت در راستای انتقال حرارت بین سطوح داخلی حفره ها حدود ۵ درجه است و میزان همرفت هوای داخل حفره نیز تابعی از اختلاف حرارت بین این سطوح می باشد. همانطور که در تصویر ۵ دیده می شود، هوای محبوس داخل حفره با حداکثر سرعت ۳۸ میلی متر بر ثانیه درون حفره گردش می کند که این سرعت بیشینه در جوار دو سطح با حداکثر اختلاف روی می دهد. سهم همرفت در انتقال حرارت در این دیوار ۲۵ درصد است.

**تابش:** میزان انتقال حرارت از طریق تابش، تابعی از اختلاف حرارت سطوح داخلی حفره و زاویه قرارگیری این سطوح نسبت به هم هستند، که در این بلوک سطوح کاملاً روبروی هم هستند. تابش ۳۰ درصد از حرارت را از سطح گرم به سطح سرد منقل می کند.

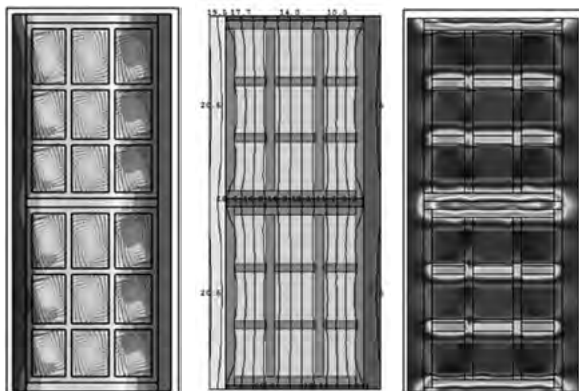


تصویر ۲- پروفیل رنگی هم دمایی.  
تصویر ۳- پروفیل خطوط هم دمایی.  
تصویر ۴- پروفیل شار حرارتی.

همانطور که جدول ۱ نشان می دهد، دمای سطح داخلی ۱۹٫۵ درجه است، یعنی با دمای هوای داخل (دمای آسایش) که ۲۵ در نظر گرفته شده است ۵٫۵ درجه اختلاف دارد و در زمستان بار گرمایی زیادی را بر ساختمان تحمیل می کند. دمای سطح بیرونی

تقریباً ثابت است، باعث شده که اختلاف دمای سطوح داخلی حفره‌ها که در راستای عمود بر جهت انتقال حرارت قرار گرفته‌اند کاهش یابد (تصویر ۹). میزان همرفت و تابش تابعی از اختلاف حرارت سطوح هستند، در نتیجه سهم همرفت و تابش در انتقال حرارت در بلوک ۹ حفره‌ای نسبت به بلوک ۶ حفره‌ای کاهش یافته است. مطابق تصویر ۱۰، سرعت چرخش هوا در داخل حفره‌ها ۲۲ میلی‌متر بر ثانیه است که نسبت به بلوک ۶ حفره‌ای ۱۶ میلی‌متر بر ثانیه کاهش یافته است. در نتیجه سهم هدایت نسبت به بلوک قبلی پررنگ تر است و همانطور که اشاره شد با وجود افزایش طول جداره‌ها، حداکثر شار حرارتی نسبت به بلوک قبلی ثابت مانده و حداقل شار حرارتی افزایش یافته است. سهم همرفت در انتقال حرارت ۲۰ درصد و سهم تابش ۲۵ درصد است.

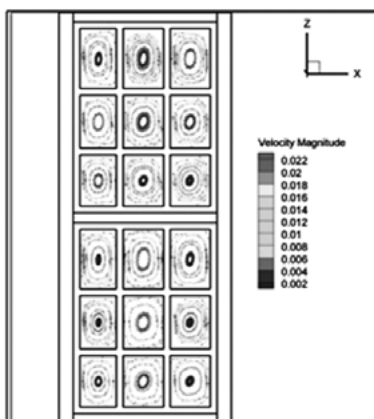
با دقت در نمودار ۱ تغییرات دما در ضخامت دیوار نقش حرکت چرخشی هوای محبوس در حفره‌ها را در انتقال حرارت مشاهده می‌کنیم. نمودار خطی تغییرات دما در مقطع یکی از جداره‌های بلوک را نشان می‌دهد. در این مقطع حرارت تنها از جرم بلوک عبور می‌کند. نمودار سینوسی دوم تغییرات دما از مقطع میانی بلوک را نشان می‌دهد که از جداره‌های عمودی و حفره‌های هوا عبور کرده است و حرکت چرخشی هوای حامل گرما را به تصویر کشیده است.



تصویر ۱۰ - پروفیل هم دمای رنگی.

تصویر ۹ - پروفیل خطوط هم دمای

تصویر ۸ - پروفیل شار حرارتی.



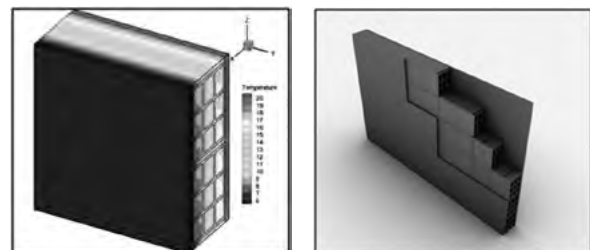
تصویر ۱۱ - سرعت حرکت هوا در داخل حفره‌ها بر اساس متر بر ثانیه.

دیوار ۷،۹۱ است که ۲،۹۱ از دمای هوای بیرون که در شبیه‌سازی ۵ درجه در نظر گرفته شده است، بیشتر است و این به معنای اتلاف زیاد حرارت داخل ساختمان است.



تصویر ۵ - سرعت حرکت هوا در حفره‌ها بر اساس متر بر ثانیه.

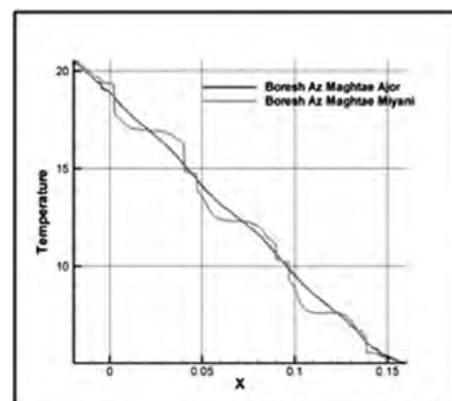
## ب- بررسی رفتار حرارتی دیوار با بلوک سفالی ۱۵ سانتی متری با ۹ حفره



تصویر ۶ - دیوار با بلوک سفالی ۱۵ سانتی متری با ۹ حفره.

تصویر ۷ - هم دمای در مدل ۳ بعدی.

هدایت: در این بلوک نسبت به بلوک قبلی طول جداره‌هایی که مستقیماً از سطح سرد به سطح گرم کشیده شده‌اند، بیشتر است و همچنین طول ملات افقی بین دو بلوک، ولی با این حال با توجه به جدول ۲ می‌بینیم که حداکثر شار حرارتی برابر با بلوک قبلی است و حداقل شار حرارتی نسبت به بلوک قبلی حدود ۲،۵ برابر شده است. علت در دو بخش همرفت و تابش بررسی می‌شود. ۵۵ درصد انتقال حرارت در این دیوار از طریق هدایت است.



نمودار ۱ - نمودار تغییرات دما در ضخامت دیوار.

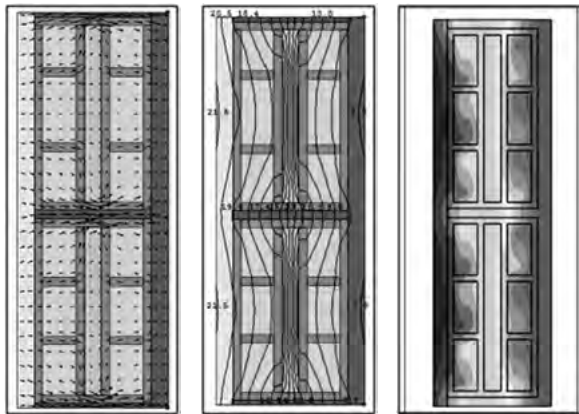
تابش و همرفت: از آنجا که در بلوک ۹ حفره‌ای ۲ جداره میانی در راستای عمود بر جهت انتقال حرارت داریم ولی محیط حفره‌ها

جدول ۳- مشخصات عددی بدست آمده از دیوار با بلوک سفالی ۱۲ سانتی متری با عایق حرارتی ۲ سانتی متری میانی.

[m <sup>2</sup> .k/w]	۰.۶۰	مقاومت حرارتی
[C]	۲۱.۶۸	دمای سطح داخلی
[C]	۶.۷۳	دمای سطح خارجی
[W/m <sup>2</sup> ]	۱۴۵	حداکثر شار حرارتی
[W/m <sup>2</sup> ]	۱۰	حداقل شار حرارتی
[cm]	۱۶	ضخامت
[mm/s]	۲۴	حداکثر سرعت هوا

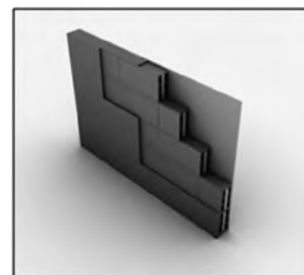
جدول ۲- مشخصات عددی بدست آمده از دیوار با بلوک سفالی ۱۵ سانتی متری با ۹ حفره.

[m <sup>2</sup> .k/w]	۰.۴۹	مقاومت حرارتی
[C]	۲۰.۵۸	دمای سطح داخلی
[C]	۷.۳۷	دمای سطح خارجی
[W/m <sup>2</sup> ]	۹۰	حداکثر شار حرارتی
[W/m <sup>2</sup> ]	۸۲	حداقل شار حرارتی
[cm]	۱۹	ضخامت
[mm/s]	۲۲	حداکثر سرعت هوا



تصویر ۱۴- پروفیل هم دمایی. تصویر ۱۵- پروفیل خطوط هم دمایی. تصویر ۱۶- بردارهای انتقال حرارت.

### ج- بررسی رفتار حرارتی دیوار با بلوک سفالی ۱۲ سانتی متری همراه با عایق حرارتی ۲ سانتی متری داخلی

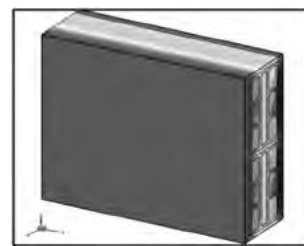


تصویر ۱۲- دیوار با بلوک سفالی ۱۲ سانتی متری همراه با عایق حرارتی ۲ سانتی متری داخلی.

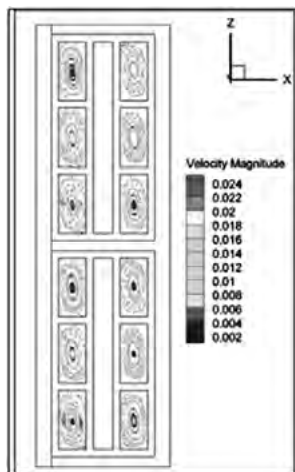
حرارت از سطح گرم به سطح سرد هدایت است. همرفت ۱۵ درصد و تابش ۱۵ درصد حرارت را انتقال می دهند.

هدایت: با توجه به توضیحات بالا، نقش پررنگ هدایت از طریق چاربه ها و ملات افقی میان بلوک ها مشخص می شود و همانطور که در جدول ۳ مشخص است شار حرارتی حداکثر حدود ۵۰ درصد بیشتر از دو حالت قبلی است و هدایت سهم ۷۰ درصدی در انتقال حرارت دارد.

با دقت در نمودار ۲ که تغییرات دما در ضخامت دیوار را نشان می دهد، افت ناگهانی و شدید دما در محدوده ۲ سانتی متری میانی را که عایق حرارتی قرار دارد را مشاهده می کنیم.



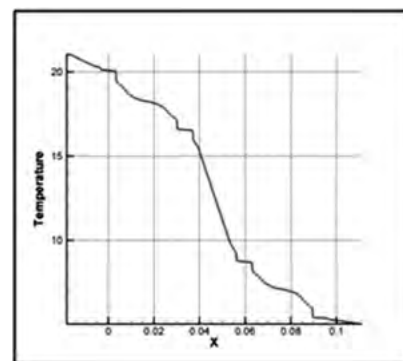
تصویر ۱۳- همدمایی در مدل ۳ بعدی.



تصویر ۱۸- سرعت حرکت هوا در داخل حفره ها.



تصویر ۱۷- پروفیل شار حرارتی.



نمودار ۲- نمودار تغییرات دما در ضخامت دیوار.

تابش و همرفت: قرارگرفتن عایق حرارتی پلی استایرن به ضخامت ۲ سانتی متر در میانه بلوک سفالی، به طور کامل ارتباط نیمه‌ی گرم و سرد بلوک سفالی از طریق تابش و همرفت را قطع کرده است. اگرچه در حفره های دو طرف تابش و همرفت وجود دارد و مطابق تصویر ۱۸ هوا با سرعت ۲۴ میلی متر بر ثانیه درون حفره ها چرخش می کند ولی تنها راه باقی مانده، انتقال

## نتیجه

- استفاده از حفره‌های غیرمستطیلی به منظور کاهش انتقال حرارت تابشی: چون سطوح مستطیل با هم موازی هستند تاثیر تابش و همرفت را به بیشترین حالت خود می‌رسانند، بنابراین استفاده از مقاطعی که سطوح روبروی هم آن غیر موازی باشند در افزایش مقاومت حرارتی موثر خواهند بود.

- در نظر گرفتن سوراخ‌های کوچک در جهت جریان حرارت به منظور کاهش یا حذف جریان همرفت.

- افزایش طول بلوک‌ها سبب کاهش تعداد درزهای عمودی بین بلوک‌ها در دیوار می‌شود. این درزها به عنوان پل حرارتی عمل می‌نمایند.

- کاهش ضریب گسیل و جذب سطوح به منظور کاهش انتقال حرارت از طریق تابش بین سطوح داخلی حفره‌ها.

- کاهش اختلاف دمای بین سطوح: در این راستا، مؤثرترین اقدام افزایش تعداد حفره‌ها در جهت جریان حرارت است.

با تحلیل نتایج بدست آمده از محاسبات بالا و مقایسه آنها با هم، پیشنهادات زیر به منظور طراحی و ساخت بلوک‌های سفالی بهینه از نقطه نظر مقاومت حرارتی ارائه می‌شود.

- افزایش مقاومت انتقال حرارت آجر با طولانی‌ترین کردن راه پیموده شده توسط حرارت از سطح گرم به سطح سرد آجر از طریق بدنه بلوک سفالی.

- کاهش تعداد و ضخامت جدارهای عرضی بین سطوح: چون این جداره‌ها مستقیماً سطوح سرد و گرم را به هم وصل می‌کنند به صورت پل حرارتی عمل می‌کنند. بنابراین برای رسیدن به مقاومت حرارتی بیشتر باید تا حد امکان حذف یا کم شوند.

- افزایش تعداد ردیف سوراخ‌ها (جهت افزایش دیوارهای حفاظ تابشی): هر چه جداره‌های عمودی که نقش حفاظ تابشی را دارند بیشتر شوند سبب کوچک‌تر شدن حفره‌ها نیز می‌شوند که از نقش همرفت در انتقال حرارت می‌کاهند. البته نباید سبب سنگین شدن زیاد بلوک سفالی گردند.

## فهرست منابع

محمدکاری، بهروز و ویسه، سهراب (۱۳۸۷)، سیستم دیوار خارجی با بلوک سفالی نوین، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، چاپ اول، تهران.

معرفت، مهدی و ابراهیم پور، عبدالسلام و محمدکاری، بهروز (۱۳۸۵)، بررسی تاثیر هندسه حفره آجر بر روی میزان انتقال حرارت نفوذی به داخل ساختمان، پنجمین همایش بهینه سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران.

Lorente, S. and Petit, M and Javelas, R(1996), Simplified analytical mode for thermal transfer in vertical hollow brick, *Energy and building*, Vol 24.