

بررسی عددی تأثیر پوشش با عایق‌کننده‌های سرامیکی در یک محفظه با سیستم گرمایش از کف

علی‌اکبر عظمتی^{۱*}، حسین حسینی^۲، مرتضی ادیب‌کیا^۳

^۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران

ali_azemati@yahoo.com

^۲ استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران

pedram465@yahoo.com

^۳ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

mortars.adibkia@yahoo.com

چکیده: در این مقاله، شبیه‌سازی میدان جریان و توزیع دما در یک اتاق همراه با عایق‌کننده‌های معدنی با سیستم گرمایش از کف مورد بررسی قرار گرفته است. هوای داخل محفظه، تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده و برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ (RNG) و برای انتقال حرارت تشعشی از مدل تشعشی DO استفاده می‌شود. برای حل معادلات حاکم از الگوریتم پیزو استفاده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، بهترین وضعیت قرارگیری عایق در صورت استفاده از سیستم گرمایش از کف در جداره خارجی ساختمان است. مشاهده شد که پوشش حاوی میکروذرات سرامیکی نسبت به پوشش رنگ معمولی در فصل زمستان ۱۸٪ صرفه‌جویی در مصرف انرژی دارد. همچنین تأثیر پوشش با عایق‌کننده‌های سرامیکی در جدار خارجی به‌همراه سیستم گرمایش از کف در اقلیم‌های مختلف آب‌وهوایی بررسی و مطالعه شده است. با در نظر گرفتن شرایط آسایش حرارتی داخل فضا مشاهده شد که اقلیم‌های گرم و مرطوب، گرم و خشک و معتدل و مرطوب شرایط آسایش حرارتی بهتری را نسبت به اقلیم‌های دیگر برای ساکنان فراهم می‌کنند و کمترین میزان مصرف انرژی مربوط به اقلیم گرم و مرطوب است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، عایق‌کننده‌های سرامیکی، کاهش مصرف انرژی، گرمایش از کف.

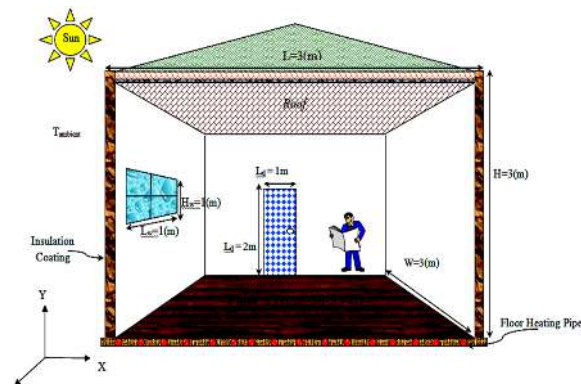
* نویسنده مسئول

۱. مقدمه

محدودیت منابع تأمین انرژی و وابستگی زندگی مدرن به انواع مختلف انرژی باعث شده تا بهینه‌سازی مصرف انرژی به یکی از چالش‌های عمده قرن تبدیل شود. یکی از این دستاوردها، استفاده از عایق برای کاهش مصرف انرژی و تأمین شرایط آسایش حرارتی است. استفاده از عایق مناسب با توجه به اوضاع اقلیمی هر منطقه همواره یکی از مشکلات بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌هاست [۱-۴]. اودا و همکاران عملکرد رنگ‌های مقاوم در برابر حرارت، برای صرفه‌جویی انرژی در زمستان را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که در صورت استفاده از این نوع رنگ‌ها، مقدار حرارت عبوری از دیواره‌ها ۱۶٪ کمتر از رنگ‌های متداول است [۵]. جین و پیاداک بحث استفاده از مواد بازتابنده در ساختمان‌ها برای کاهش بار سرمایی را مطرح کردند. با توجه به مطالعات انجام شده در هنگام استفاده از این مواد، ۱۲ درجه سانتی‌گراد کاهش دما و ۴۰٪ صرفه‌جویی در انرژی مشاهده گردید [۶]. استفاده از مواد بازتابنده در ساختمان‌ها توسط هرناندز و همکاران در سال ۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که استفاده از این موارد باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود [۷]. های‌چم و همکاران استفاده از آجرهای پر شده با PCM (مواد تغییر فازی) برای بهبود اینرسی حرارتی ساختمان‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. نوع ماده تغییر فاز برای قرارگیری آن در جدار و مقدار آن برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که ماده PCM وارد شده در منافذ آجرها به‌طور قابل ملاحظه‌ای اینرسی حرارتی آجر را بهبود می‌بخشد و در کاهش حرارت تلف‌شده نقش مؤثری دارد [۸]. لی و همکاران استفاده از اینرسی حرارتی یک ساختمان را برای تغییر بار خنک‌کنندگی در ساختمان‌های تجاری مورد بررسی قرار دادند [۹]. دی‌ماسی و همکاران ویژگی‌های رنگ‌های سفید اکریلیکی برای استفاده در صنایع ساختمانی، خودروسازی و لوازم خانگی را مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد که استفاده از این نوع رنگ‌ها می‌تواند باعث خنک‌تر شدن سطح بام گردد [۱۰]. آسیونه و همکاران در مقاله دیگری استفاده از پوشش‌های با بازتابش و ضریب نشر بالا بر روی عملکرد انرژی ساختمان‌ها در هوای مدیترانه را مورد بررسی قرار دادند [۱۱].

[۱۳]. آکسوی با مدل‌سازی عددی پارامترهای مربوط به ضخامت عایق و هزینه تمام‌شده برای بهبود مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی دریافت که استفاده از عایق‌های حرارتی از ۱۹٪ تا ۷۸٪ با توجه به ضخامت عایق، مصرف انرژی را کاهش می‌دهد و همچنین زمان بازگشت سرمایه از حدود ۱/۶۹ تا ۲/۸۹ سال است [۱۴]. لی و همکاران با بررسی و مدل‌سازی حرارتی یک اتاق با استفاده از روش تحلیل معکوس، تخمین صحیحی از گرادیان دما در لایه مرزی ارائه کردند [۱۵].

با توجه به مرور منابع انجام‌شده، تحقیقات زیادی درباره شبیه‌سازی انواع عایق‌ها با سیستم‌های مختلف انجام شده است. همچنین درباره مدل‌سازی جداره‌ها و تأثیر آن‌ها بر کاهش مصرف انرژی و بالا بردن شرایط آسایش حرارتی نیز تحقیقاتی صورت گرفته است. ولی تاکنون در مورد بررسی تأثیر عایق‌های سرامیکی بر سیستم گرمایش از کف به‌صورت سه‌بعدی در اقلیم‌های مختلف کشور تحقیق و بررسی خاصی شکل نگرفته است. لذا برای بررسی توزیع دما و انتقال حرارت از یک مدل سه‌بعدی استفاده شده است. هدف از کار حاضر، بررسی و مقایسه میزان شار حرارتی و مصرف انرژی در دو حالت دیوار (با پوشش میکروذرات سرامیکی و دیوار با پوشش رنگ اکریلیک) در یک محفظه سه‌بعدی است. همچنین شرایط آسایش داخل فضا با استفاده از سیستم گرمایش از کف در حالت‌های مختلف آب‌وهوایی و با تغییر شرایط مرزی مورد بررسی و مطالعه قرار خواهد گرفت.



شکل (۱): نمایی از هندسه مسئله و مقادیر عددی

۲. روش حل عددی و شرایط مرزی

۱.۲. مدل‌سازی

در این تحقیق، یک اتاق با سیستم گرمایش از کف مورد مطالعه قرار گرفته و میدان جریان و انتقال حرارت با شرایط مرزی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده، مدل مورد نظر یک اتاق با ابعاد ۳×۳×۳ متر می‌باشد که با استفاده از نرم

جدول (۲): مقادیر ضرایب انتقال حرارت کل [۱۲]

دیوارها	سقف	کف	ضریب انتقال حرارت جداره
W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	
۰/۴۳۴۷	۰/۲۶۸۲	۰/۵۶۷۸	بدون پوشش
۰/۲۲۶۲	۰/۱۷۱۱	۰/۵۶۷۸	همراه با پوشش ذرات معدنی در هر دو جداره
۰/۲۹۷۸	۰/۲۰۸۶	۰/۵۶۷۸	همراه با پوشش معدنی در یک جداره
۰/۴۰۹۷	۰/۲۵۸	۰/۵۶۷۸	همراه با پوشش رنگ اکریلیک در دو جداره
۰/۴۲۱۸	۰/۲۶۳۱	۰/۵۶۷۸	همراه با پوشش رنگ اکریلیک در یک جداره

۲.۲. روش عددی

با توجه به مغشوش بودن جریان و کوچک بودن عدد ماخ، جریان هوا غیرقابل تراکم در نظر گرفته شده است. برای تعیین میدان سرعت و میدان دما، معادلات حاکم بر جریان تراکم‌ناپذیر، دائم و سه‌بعدی در مختصات کارتزین شامل معادله پیوستگی، معادلات مومنتم، معادلات تلاطم و معادله انرژی که از طریق ترم نیروی شناوری به یکدیگر کوپل می‌باشند، باید به طریق مناسبی حل شوند. برای این منظور از نرم‌افزار فلونت استفاده شده است. همچنین به دلیل اختلاف دمای کم، برای در نظر گرفتن اثرات نیروی شناوری و وابستگی معادلات جریان و انرژی، از مدل اصلاح‌شده (RNG) k-ε استفاده شده است. استفاده از این مدل باعث افزایش دقت در جریان‌های مغشوش می‌شود. با توجه به اینکه جریان نزدیک دیواره در لایه مرزی در این مدل حائز اهمیت است، استفاده از آن می‌تواند به همگرایی کمک کند. همچنین به دلیل اینکه محدودیت‌های مدل شناخته شده است، بیشترین استفاده را برای حل این نوع از مسائل عددی دارد [۱۷]. برای گسسته‌سازی معادلات حاکم (شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و معادلات تلاطم) از روش اختلاف پیشرو مرتبه دوم و برای جداسازی فشار نیز از روش پرستو^۳ استفاده شده است. در این روش، گرادیان فشار در جداره‌ها در نظر گرفته می‌شود زیرا جریان در نزدیکی جداره‌ها برای ما حائز اهمیت است. همچنین استفاده از مدل پرستو گرادیان فشار را در لایه مرزی محاسبه می‌کند.

یکی از محدودیت‌های الگوریتم‌های سیمپل و سیمپل سی، آن است که پس از حل معادله فشار، مقادیر سرعت جدید و دبی‌های مربوط به آن در تعادل مومنتوم صدق نمی‌کند، در نتیجه محاسبات باید تا زمانی که تعادل برقرار شود تکرار گردد. برای بهبود کارایی این محاسبات و برای حل معادلات منفصل‌شده از الگوریتم پیزو^۴ استفاده شده است. همچنین برای حل معادلات مومنتوم و فشار در حالت پایا و برای گام‌های زمانی زیاد الگوریتم پیزو نسبت به سایر الگوریتم‌ها

افزار انسیس ورک بنچ^۱ ایجاد شده و هندسه مسئله نیز در آن نشان داده شده است. همچنین معادلات حاکم بر جریان با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت^۲ مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت.

با در نظر گرفتن یک شهر نمونه از هر اقلیم و به دست آوردن مشخصات آب‌وهوایی و دمای آن شهر از نشریات معتبر هواشناسی و با نوشتن موازنه انرژی بین محیط داخل و خارج و به دست آوردن دمای سطح داخلی جداره‌ها برای شبیه‌سازی از شرط مرزی دما ثابت استفاده شده است. برای مدل‌سازی و بررسی توزیع دما، لازم است در ابتدا دمای سطوح داخلی محاسبه شود. با استفاده از یک کد کامپیوتری بر اساس انجام موازنه انرژی برای هر یک از سطوح مدل، دمای سطح داخلی دیواره‌ها برای نمونه‌های مختلف به دست می‌آید. در این موازنه، خواص مواد سرمایی برای جداره‌ها در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی انجام‌شده از شرط مرزی جابه‌جایی همراه با تابش حرارتی در مرزها استفاده شده است. به این صورت که در دیواره‌های جانبی، سقف و کف ضریب انتقال حرارت کلی به دست آمده و دمای هوای اتاق، دمای جریان آزاد در نظر گرفته شده است. بدین منظور با توجه به جزئیات مصالح به کاررفته در جداره‌ها و فیلم هوای خارج، ضریب انتقال حرارت متناظر با هر دیواره به دست آمده است [۱۶]. بر اساس جزئیات ارائه‌شده در مرجع [۱۲]، ضرایب انتقال حرارت کلی جداره‌های مختلف محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده است. سایر فرضیات مسئله و خواص فیزیکی هوا (گرمای ویژه، لزجت دینامیکی، ضریب هدایت حرارتی، ضریب انبساط حرارتی و چگالی) در دمای ۳۰۰ K در نظر گرفته شده که در جدول (۱) نشان داده شده است. گفتنی است که نتایج برای سیستم گرمایش کفی با دمای ۳۳ °C و دمای طرح خارج زمستانی برای شهر تهران ۵ °C- می‌باشد.

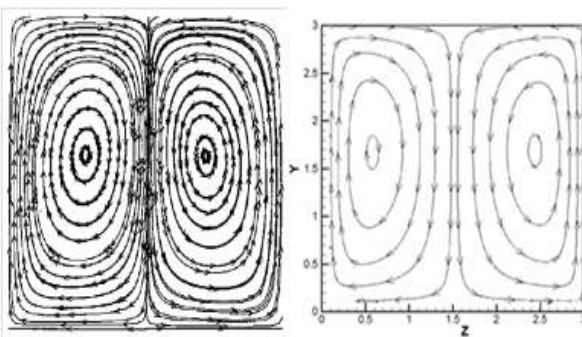
جدول (۱): مقادیر استفاده شده در مدل‌سازی [۱۲]

عنوان	مقدار
دمای سطح کف اتاق با سیستم گرمایش از کف (T _{fth})	۲۹-۳۳ °C
دمای زمین (T _g)	۱۸ °C
دمای دیوار رنگ‌آمیزی‌شده با رنگ سفید اکریلیک (T _A)	۲۴ °C
گرمای ویژه هوا (C _p)	۱۰۰۶/۴۳ (J/kg.k)
ضریب پخش حرارتی هوا (α)	۳×۱۰ ^{-۵} (m ² /s)
مقاومت حرارتی پوشش همراه با ذرات معدنی برای ضخامت ۴۰۰ میکرون (R _{insulated})	۱/۰۶۵ (m ² K /W)
مقاومت حرارتی رنگ اکریلیک (R _{Acrylic})	۰/۰۷۴۴ (m ² K /W)
ضریب جذب رنگ سفید اکریلیک (α)	۰/۲۵
ضریب جذب میکروذرات سرمایی (α)	۰/۱۹

3. Presto
4. PISO

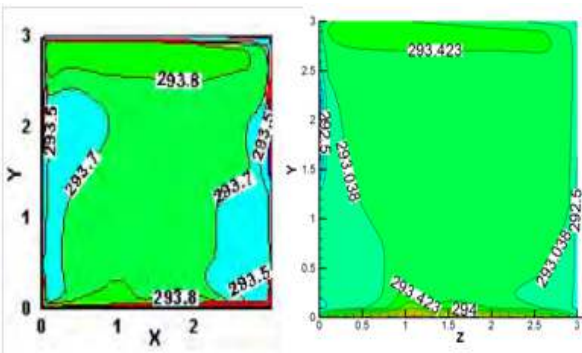
1. Ansys Workbench
2. Ansys Fluent

جریان شکل مرجع [۱۶] مورد مقایسه قرار داده می‌شود. همان طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست‌آمده دارای تطابق خوبی می‌باشد. همچنین خطوط هم‌دمای مرجع [۱۶] نیز مدل‌سازی شد و همان طور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد، نتایج خطوط هم‌دمای کار حاضر در مقایسه با مرجع مذکور از تطابق قابل قبولی برخوردار است.



الف. مدل حاضر ب. مدل ستاری [۱۶]

شکل (۲): خطوط سرعت جریان در اتاق



الف. مدل حاضر ب. مدل ستاری [۱۶]

شکل (۳): خطوط هم‌دما در اتاق

۳. بحث و بررسی نتایج

نتایج مدل‌سازی برای هوای داخل اتاق و میدان جریان سیال، میدان دما و تأثیر پوشش رنگ معمولی و رنگ معدنی حاوی میکروذرات سرامیکی در حالت‌های مختلف با تغییر شرایط مرزی از جمله تغییر دمای محیط به‌علت تشعشع خورشید و طول و عرض جغرافیایی در اقلیم‌های مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به اهمیت وجود دمای آسایش در اتاق، توزیع دما را با شرایط مرزی مختلف به دست آمده و آن‌ها را مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند.

مناسب‌تر است و استفاده از الگوریتم پیزو باعث کاهش هزینه‌های محاسباتی می‌شود [۱۸ و ۱۹].

شدت تابش نور خورشید و زاویه تابش با توجه به موقعیت و طول و عرض جغرافیایی محل در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در شبیه‌سازی با نرم‌افزار فلونت از شرط مرزی دما ثابت استفاده شده است، برای به‌دست‌آوردن دماهای فوق، فرض شده که از شیشه پنجره تشعشع عبور نمی‌کند چون برای تابش‌هایی در محدوده طول موج‌های بین صفر تا $4 \mu\text{m}$ ، شیشه به‌صورت یک محیط شفاف عمل می‌کند و در طول موج‌های بیشتر از آن به‌صورت جسم کدر عمل می‌کند. بنابراین فرض کدر بودن پنجره و تشابه آن با دیوار می‌تواند از دیدگاه تشعشع حرارتی، فرض معقولی باشد. همچنین با توجه به اینکه ضخامت نوری کمتر از یک می‌باشد و همچنین به‌واسطه اختلاف دمای کم از مدل تشعشعی DO استفاده شده است [۱۸ و ۱۹].

۳.۲. شبکه‌بندی هندسه مورد نظر

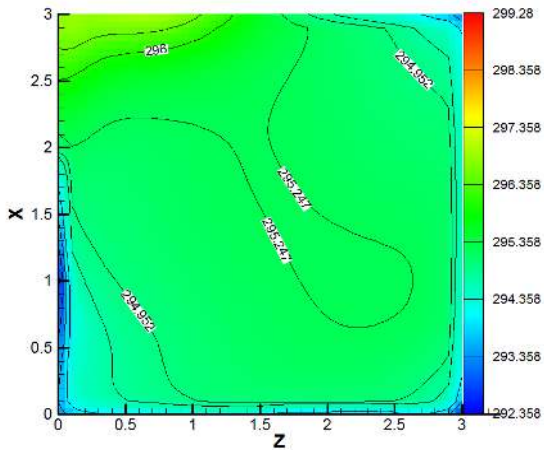
برای اطمینان استقلال جواب‌ها از تعداد شبکه و یافتن تعداد نقاط بهینه، شبکه‌های متفاوتی برای مدل‌سازی مورد آزمایش قرار گرفته و شار حرارتی آن‌ها با هم مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی نمونه با شبکه‌های مختلف در جدول (۳) آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود، از تعداد نقاط شبکه با تراکم 212400 به بالا، جواب‌ها تقریباً یکسان است و خطای کمتر از 5% دارد. بنابراین با توجه به بحث اقتصادی بودن از ریز کردن بیش از حد شبکه صرف‌نظر می‌شود. همچنین با توجه به اینکه هندسه مورد نظر ساده است، از شبکه‌بندی یکنواخت استفاده شده و با توجه به اهمیت انتقال حرارت در مرزهای جامد (دیوارها)، اندازه شبکه در کنار دیوارها را ریزتر و از شبکه تطبیقی استفاده می‌شود.

جدول (۳): مقایسه بار حرارتی و عدد ناسلت با افزایش تعداد نقاط شبکه

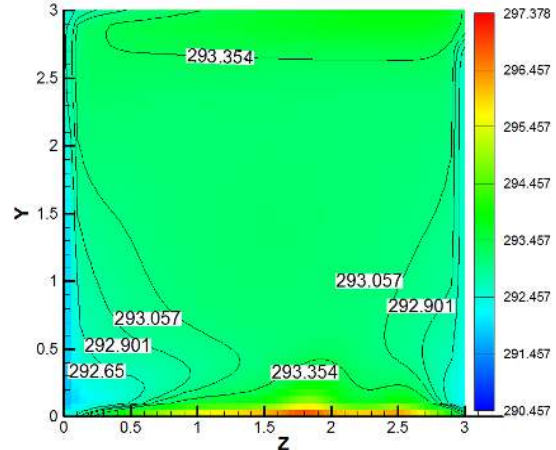
ردیف	تعداد المان روی هر ضلع	تعداد نقاط شبکه	بار حرارتی کل (W)	عدد ناسلت (Nu)
۱	$20 \times 20 \times 20$	۸۳۸۱	۲۴۵۴	۱۳۶/۱۱
۲	$30 \times 30 \times 30$	۲۷۵۳۴	۲۳۸۵	۱۵۶/۲۳
۳	$40 \times 40 \times 40$	۶۴۵۱۴	۲۰۷۳	۱۹۷/۶۵
۴	$50 \times 50 \times 50$	۱۲۶۳۰۲	۱۹۸۷	۲۱۹/۵۲
۵	$60 \times 60 \times 60$	۲۱۲۴۰۰	۱۴۲۲	۲۴۷/۳۴
۶	$65 \times 65 \times 65$	۲۷۴۴۳۳	۱۴۵۲	۲۴۷/۲۴

۲.۴. بررسی اعتبار و صحت نتایج

برای اعتبارسنجی، ابتدا هندسه مرجع [۱۶] را با شرایط مرزی مورد نظر مدل‌سازی نموده و سپس خطوط جریان به‌دست‌آمده با خطوط

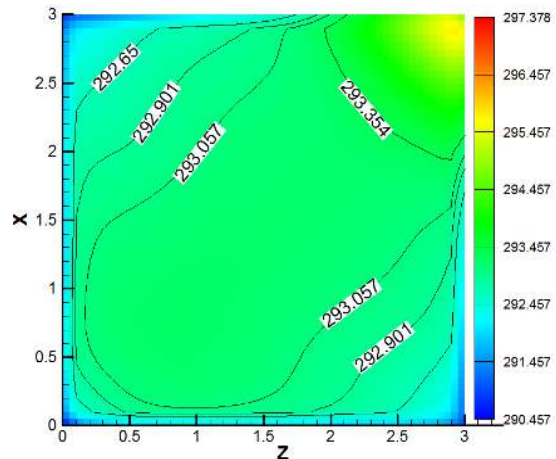


شکل (۷): خطوط هم‌دما در مقطع طولی (XZ, Y=1.5 m) در پوشش خارجی رنگ میکروذرات سرامیکی استفاده شده

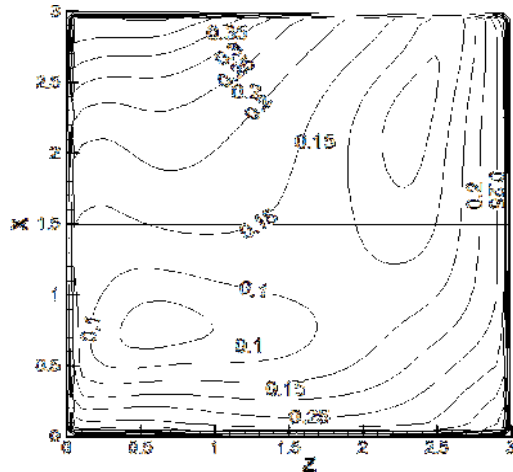


شکل (۸): خطوط هم‌دما در مقطع طولی (YZ, X=1.5 m) از پوشش رنگ آکرلیکی استفاده شده

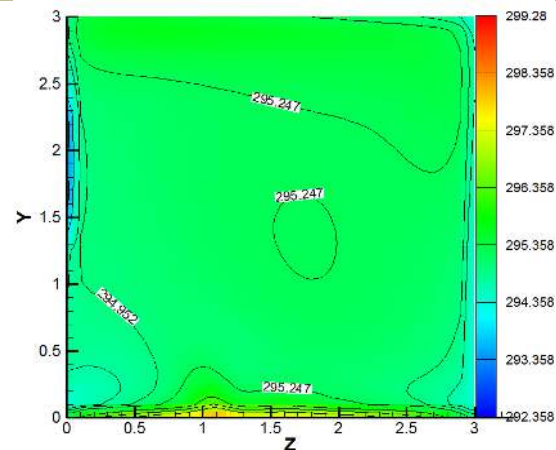
همان طور که در شکل های (۴)، (۵)، (۶) و (۷) مشاهده می‌شود، نتایج در جداره خارجی بین پوشش رنگ آکرلیک و پوشش حاوی میکروذرات سرامیکی نشان‌دهنده این است که با توجه به یکسان بودن شرایط محیطی، تفاوت دمایی در حدود ۲ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. این تفاوت دمایی حاکی از میزان بازتاب بیشتر حرارت دیوار با پوشش معدنی است که به‌طور قابل ملاحظه‌ای جلوی تلفات حرارتی دیوار را گرفته است. همان طور که در شکل (۶) و (۷) دیده می‌شود، استفاده از عایق با میکروذرات سرامیکی در دیواره خارجی اتاق باعث افزایش محدوده دمای آسایش در مرکز اتاق شده و مصرف انرژی را به میزان قابل توجهی نیز کاهش می‌دهد.



شکل (۹): خطوط هم‌دما در مقطع طولی (XZ, Y=1.5 m) از پوشش رنگ آکرلیکی استفاده شده



شکل (۱۰): میدان سرعت جریان در حالی که در دیوار خارجی از پوشش رنگ میکروذرات سرامیکی استفاده شده (XZ, Y=1.5 m)



شکل (۱۱): خطوط هم‌دما در مقطع طولی (YZ, X=1.5 m) پوشش خارجی از رنگ میکروذرات سرامیکی استفاده شده

جدول (۴): نرخ انتقال حرارت کل در حالت‌های مختلف پوشش جداره‌ها

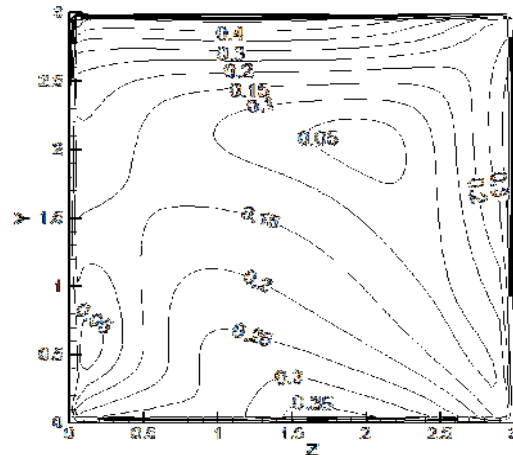
انتقال حرارت تابشی از کف (W)	انتقال حرارت کل از کف (W)	پوشش	
		هر دو جداره	پوشش میکروذرات سرامیکی
۶۹۷/۱۲	۱۳۰۶/۸	هر دو جداره	پوشش میکروذرات سرامیکی
۷۰۸/۱۲	۱۲۵۵/۰۹	جدارۀ خارجی	پوشش رنگ آکرلیک
۷۶۳/۲۳	۱۴۷۸/۷۶	جدارۀ داخلی	پوشش رنگ آکرلیک
۷۱۰/۷۲	۱۵۰۶/۸۶	هر دو جداره	بدون پوشش
۸۲۳/۶	۱۵۳۶/۹	جدارۀ خارجی	
۷۸۰/۴۵	۱۶۳۶/۴۳	جدارۀ داخلی	
۱۱۲۴/۹۶	۱۸۲۱/۵		

میزان شار حرارتی به‌دست‌آمده در شرایط مرزی مختلف در جدول (۴) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمترین تلفات حرارتی به‌ترتیب برای حالت استفاده از پوشش در دو طرف جداره و جدارۀ خارجی است. و با توجه به بحث اقتصادی بودن بهتر است از پوشش در جدارۀ خارجی استفاده شود. همچنین استفاده از پوشش همراه با ذرات سرامیکی نسبت به پوشش آکرلیک ۱۸٪ و استفاده از پوشش همراه با میکروذرات سرامیکی نسبت به حالت بدون پوشش حدود ۳۱٪ صرفه‌جویی انرژی دارد و در تمام حالت‌ها بیشترین سهم انتقال حرارت مربوط به انتقال حرارت تشعشعی است.

جدول (۵): نرخ انتقال حرارت کل در حالت‌های مختلف پوشش جداره‌های خارجی

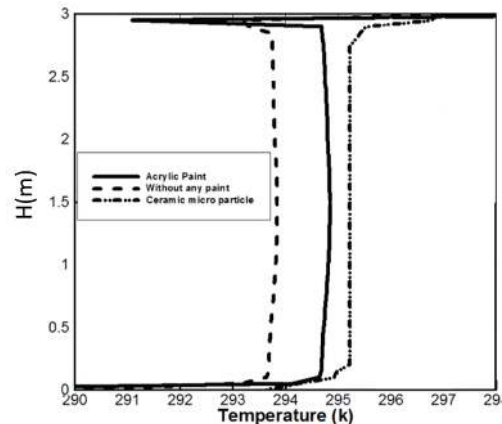
انتقال حرارت تابشی از کف (W)	انتقال حرارت کل از کف (W)	پوشش
۷۰۸/۱۲	۱۲۵۵/۰۹	ذرات سرامیکی در دیواره خارجی
۸۲۳/۶	۱۵۳۶/۰۹	پوشش آکرلیک در دیواره خارجی
۱۲۲۴/۹۶	۱۸۲۱/۵	دیواره بدون پوشش
٪۱۳	٪۱۸	کاهش مصرف انرژی در پوشش میکروذرات سرامیکی نسبت به پوشش آکرلیک
٪۳۷	٪۳۱	کاهش مصرف انرژی در پوشش میکروذرات سرامیکی نسبت به دیوار بدون پوشش

با توجه به تنوع اقلیمی و اهمیت بررسی آسایش حرارتی، مدل مورد نظر را با فرض استفاده از سیستم گرمایش از کف در دمای ۲۹°C و استفاده از پوشش همراه با میکروذرات سرامیکی در جدارۀ خارجی و با اعمال شرایط آب‌وهوایی مختلف به‌عنوان شرط مرزی، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته و نتایج آن در شکل (۱۱) ارائه شده است.



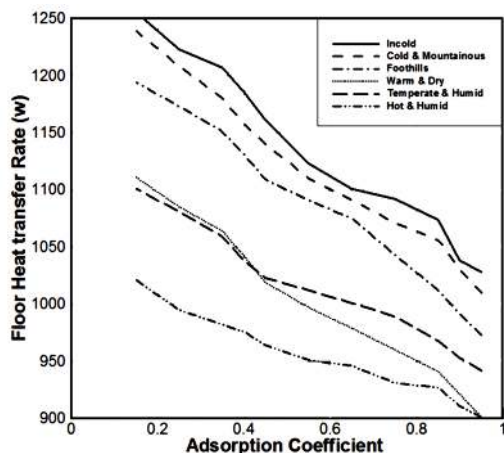
شکل (۹): میدان سرعت جریان در حالتی که در دیوار خارجی از پوشش رنگ میکروذرات سرامیکی استفاده شده (X=1.5 m, YZ)

شکل‌های (۸) و (۹) نیز نشان‌دهنده میزان سرعت هوای داخل اتاق می‌باشد که به‌طور متوسط ۰/۱۸ m/s است. این سرعت در مرکز اتاق به ۰/۱۵ m/s می‌رسد و در مقایسه با مرجع [۲۰] برای ایجاد شرایط آسایش و رفاه ساکنان، مقدار مناسبی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گردابه‌های ایجادشده به‌علت وجود پنجره در دیوارۀ غربی اتاق بوده که مرکز آن متمایل به دیواره‌های شرقی و شمالی است. همچنین میزان سرعت هوا در مرکز اتاق به‌خاطر کاهش گرادیان دما، پایین می‌باشد و به‌علت رشد لایۀ مرزی سیال در کنار دیواره‌های اتاق و تراکم هوا در آن نواحی، سرعت هوا بیشتر است.

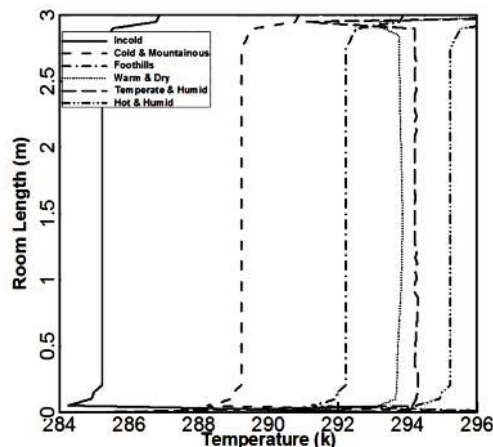


شکل (۱۰): مقایسه تأثیر انواع پوشش بر دمای اتاق

در شکل (۱۰) نتایج برای حالت‌های مختلف جدارۀ بدون پوشش، جدارۀ با پوشش رنگ آکرلیک و جدارۀ با پوشش رنگ حاوی میکروذرات سرامیکی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از رنگ حاوی میکروذرات سرامیکی، دمای مرکز اتاق به شرایط آسایش نزدیک‌تر است.



شکل (۱۲): تأثیر ضریب جذب در اقلیم‌های مختلف آب‌وهوایی بر بار حرارتی کل



شکل (۱۱): پروفیل دمای عمودی در وسط اتاق در اقلیم‌های مختلف آب‌وهوایی مختلف

۴. نتیجه‌گیری

با استفاده از عایق‌کننده‌های معدنی در جداره‌های یک اتاق در حالت سه‌بعدی، نحوه توزیع دما، جریان هوا و همچنین میزان مصرف انرژی با استفاده از سیستم گرمایش از کف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. مشخص شد که بهترین وضعیت قرارگیری پوشش‌ها در جدار خارجی ساختمان است. همچنین مشاهده شد که پوشش حاوی میکروذرات سرامیکی به‌عنوان یک عایق حرارتی عمل نموده و استفاده از پوشش همراه با میکروذرات سرامیکی نسبت به پوشش آکرلیک (رنگ معمولی) در فصل زمستان ۱۸٪ صرفه‌جویی در مصرف انرژی دارد. در صورتی که مقایسه بین دیوار با پوشش همراه با ذرات سرامیکی و دیوار بدون هیچ گونه پوششی رنگی انجام شود، میزان صرفه‌جویی انرژی در فصل زمستان ۳۱٪ است. بررسی تأثیر استفاده از این پوشش در اقلیم‌های مختلف آب‌وهوایی مختلف نشان داد که بیشترین مصرف انرژی در اقلیم‌های سرد بوده و با استفاده از رنگ‌های تیره با ضریب جذب بالا در اقلیم سرد مصرف انرژی ۱۵٪ کاهش می‌یابد. در صورت استفاده از پوشش‌های رنگ حاوی میکروذرات سرامیکی همراه با استفاده از سیستم گرمایش از کف با دمای کف 29°C ، شرایط آسایش حرارتی برای اقلیم‌های گرم و مرطوب، گرم و خشک و معتدل و مرطوب فراهم می‌شود و کمترین میزان مصرف انرژی مربوط به اقلیم گرم و مرطوب است.

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، در اقلیم‌های معتدل و مرطوب، گرم و مرطوب و گرم و خشک دمای داخل اتاق در محدوده شرایط آسایش حرارتی قرار گرفته ولی در اقلیم‌های سرد و سرد و کوهستانی دما پایین‌تر از شرایط آسایش است.

جدول (۶): نرخ انتقال حرارت کل در اقلیم‌های مختلف آب‌وهوایی مختلف

اقلیم‌ها	نرخ انتقال حرارت کل از کف (W)
سرد	۱۴۳۱/۸
سرد و کوهستانی	۱۲۹۳/۲
معتدل	۱۲۵۵/۹
گرم و خشک	۱۱۴۳/۶
معتدل و مرطوب	۱۰۴۷/۷
گرم و مرطوب	۹۸۷/۵

همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن دمای آسایش حرارتی داخل اتاق، کمترین میزان مصرف انرژی مربوط به اقلیم‌های گرم و مرطوب و معتدل و مرطوب است. برای بررسی تأثیر ضریب جذب در کاهش مصرف انرژی، ضریب جذب‌ها را در شرایط آب‌وهوایی مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار داده و نتایج آن در شکل (۱۲) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب جذب در پوشش جدار بیرونی اتاق میزان بار حرارتی کل و در نتیجه، مصرف انرژی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود در اقلیم‌های گرم‌تر، تأثیر ضریب جذب این نوع عایق‌کننده‌های سرامیکی بیشتر است.

- [1] Tatsidjodoung, P., Pierr, L.S. and Luo, L., "A Review of Potential Materials for Thermal Energy Storage in Building Applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 18, pp. 327–349, 2013.
- [2] Parameshwaran, R., Kalaiselvam, S., Harikrishnan, S. and Elayaperumal, A., "Sustainable Thermal Energy Storage Technologies for Buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 2394-2433, 2012.
- [3] Heier, J., Bales, C. and Martin, V., "Combining Thermal Energy Storage with Buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 1305-1325, 2015.
- [4] Soares, N., Costa, J.J., Gaspar, A.R. and Santos, P., "Review of Passive PCM Latent Heat Thermal Energy Storage Systems towards Buildings' Energy Efficiency", *Energy and Buildings*, Vol. 59, pp. 82-103, 2013.
- [5] Oda, T., Yamanaka, K., Kawakami, M., "Evaluation of the Energy-Saving Performance of Heat-Resistant Paint", *Science Journal of Energy Engineering*, Vol. 2(5), pp. 53-57, 2014.
- [6] Jain, M. and Pathak, K.K., "Cooling the Building Using Strategies by Implementing Reflective Material to Reduce Cooling Load", *Asian Journal of Science and Technology*, Vol. 07, pp. 3862-3873, 2016.
- [7] Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Xamán, J., Zavala-Guillén, I., Arce, J. and Simá, E., "Thermal Performance of Reflective Materials Applied to Exterior Building Components—A Review", *Energy and Buildings*, Vol. 80, pp. 81–105, 2014.
- [8] Hichem, N., Noureddine, S., Nadia, S. and Djamil, D., "Experimental and Numerical Study of a Usual Brick Filled with PCM to Improve the Thermal Inertia of Buildings", *Energy Procedia*, Vol. 36, pp. 766–775, 2013.
- [9] Li, W., Yang, L., Ji, Y. and Xu, P., "Estimating Demand Response Potential Under Coupled Thermal Inertia of Building and Air-Conditioning System", *Energy and Buildings*, Vol. 182, pp. 19-29, 2019.
- [10] De Masi, R.F., Ruggiero, S. and Vanoli, G.P., "Acrylic White Paint of Industrial Sector for Cool Roofing Application: Experimental Investigation of Summer Behavior and Aging Problem under Mediterranean Climate", *Solar Energy*, Vol. 169, pp. 468–487, 2018.
- [11] Ascione, F. and De Masi, R.F., Santamouris, M., Ruggiero, S., Vanoli, G. P., "Experimental and Numerical Evaluations on the Energy Penalty of Reflective Roofs during the Heating Season for Mediterranean Climate", *Energy*, Vol. 144, pp. 178-199, 2018.
- [12] Azemati, A.A., Hosseini, H., Shirkavand, B. and Tajarrod, A.S., "Thermal Modeling of Mineral Insulator in Paints for Energy Saving", *Energy and Buildings*, Vol. 40, pp. 109-114, 2013.
- [13] Azemati, A.A., Hossieni, H. and Shirkavand, B., "Review the Coating of Building in Different Climates Iran and Compared with Mineral Coating of View of Saving Energy", in *The Third International Conference on Heating, Ventilating and Air Conditioning*, Tehran, Iran, 2012.
- [14] Teoman Aksoy, U., "Numerical Analysis for Energy Savings of Different Oriented and Insulated Walls in the Cold Climate of Turkey – Simulation-Based Study", *Energy and Buildings*, Vol. 50, pp. 243-250, 2012.
- [15] Lei, L., Wang, S. and Zhang, T., "Inverse Determination of Wall Boundary Convective Heat Fluxes in Indoor Environments Based on CFD", *Energy and Buildings*, Vol. 73, pp. 130-136, 2014.
- [16] Sattari, S. and Farhanieh, B., "A Parametric Study on Radiant Floor Heating System Performance", *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 1617-1626, 2006.
- [17] Omri, M. and Galanis, N., "Numerical Analysis of Turbulent Natural Convection in a Cavity", 13th Int. Heat Transfer Conference, Sydney, Australia; 2006.
- [18] Khorasanizadeh, H., Sheikhzadeh, G.A., Azemati, A.A. and Shirkavand Hadavand, B., "Numerical Study of Air Flow and Heat Transfer in a Two-Dimensional Enclosure with Floor Heating", *Energy and Buildings*, Vol. 78, pp. 98–104, 2014.
- [19] Holman, J.P., "Heat Transfer", pp. 22-89, New York: McGraw-Hill, 2009.
- [20] Yu, H., "Economic Analysis of Low Temperature Radiant Floor Heating System", *ASHRAE Transactions*, Vol. 104, pp. 1350-1355, 1998.