تحلیل حرارتی یک ساختمان نمونه با دیوارهای حاوی مواد تغییرفازدهنده برای شهر تهران

مجید سبزپوشانی*، سید حسین موسوی[1]

*نویسنده مخاطب: استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان ـ ایران، spooshan@kashanu.ac.ir

[1]دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان ـ ایران

Archive of SID

چکیده

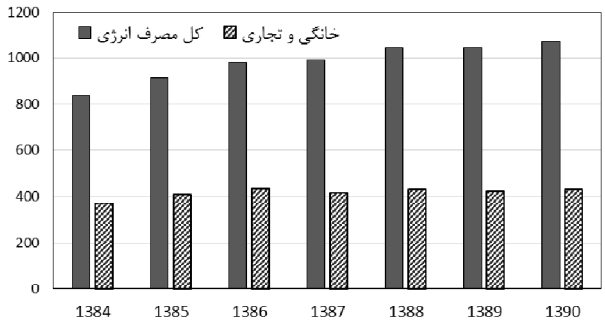
در تحقیق حاضر به تحلیل حرارتی یک اتاقک پیش‌ساخته نمونه با دیوارهای حاوی مواد تغییرفازدهنده پرداخته شده است. برای این منظور، معادلات حاکم شامل معادلات بقای انرژی برای دیوارها و معادله تعادل دمایی اتاق منفصل شده و سپس یک برنامه عددی به زبان فرترن بر اساس روش اختلاف محدود ضمنی تهیه شد. شبیه‌سازی با گام زمانی ۶۰ ثانیه برای بازه زمانی یک سال برای شهر تهران انجام گرفت. با استفاده از نتایج حل عددی تأثیر پارامترهای مختلف، از جمله دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده، ضخامت لایه ماده تغییرفازدهنده و نرخ تعویض هوای اتاق، بر روی دمای اتاق و ذخیره‌سازی گرمای درون اتاق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با استفاده از مواد تغییرفازدهنده می‌توان نوسانات دمای اتاق را تا ۳ درجه سلسیوس کاهش داد. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که برای فصول گرم ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب بالاتر (۲۸ درجه سلسیوس) مناسب‌تر است در حالی‌که برای فصول سرد بهتر است ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب کمتر (۲۲ درجه سلسیوس) انتخاب شود.

واژه‌های کلیدی: ماده تغییرفازدهنده، تحلیل حرارتی ساختمان، ذخیره‌سازی گرما، کاهش مصرف انرژی

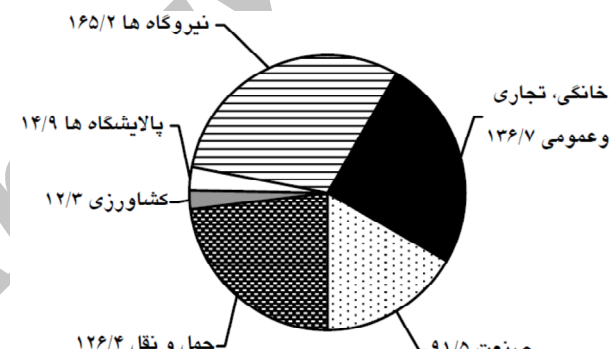
www.SID.ir

مقدمه

افزایش روزافزون گازهای گلخانه‌ای، محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و بالا رفتن قیمت سوخت، از مهمترین انگیزه‌های تلاش برای استفاده بهینه از منابع مختلف انرژی و همچنین استفاده از منابع جدید انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. با توجه به شکل ۱ حدود ۴۰٪ از کل مصرف انرژی ایران را مصارف خانگی و تجاری تشکیل می‌دهد. این آمار نشان می‌دهند که سهم انرژی تولیدی از سوخت‌های فسیلی (گازوئیل، گاز طبیعی و ذغال سنگ) از کل انرژی تولید شده در ایران حدود ۹۷٪ است. شکل ۲ نشان‌دهنده این است که بخش خانگی و تجاری به‌تنهایی مسئول ۲۵٪ از تولید گاز کربن دی‌اکسید به طور مستقیم می‌باشد. البته با درنظر گرفتن این واقعیت که ۳۰٪ از برق تولید شده در نیروگاه‌ها صرف مصارف خانگی و تجاری می‌شود، سهم واقعی بخش خانگی و تجاری از تولید کربن دی‌اکسید حدود ۳۵٪ می‌باشد [۱].



شکل ۱. مصرف سالانه انرژی در ایران (میلیون بشکه معادل نفت خام) [۱]



شکل ۲. میزان انتشار CO_2 از بخش‌های مختلف انرژی در سال ۱۳۹۰ (میلیون تن) [۱]

این آمار خود نشان‌دهنده اهمیت بسیار زیاد یافتن راه‌هایی برای کاهش مصرف و افزایش بازده و همچنین استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور است. در صورت بی‌توجهی و ادامه روند کنونی، عواقب ناگوار اقتصادی و زیست‌محیطی در انتظار کشور خواهد بود. آلودگی روزافزون هوای شهرهای بزرگ کشور، تصویری روشن از چشم‌انداز نگران‌کننده آینده و هشداری جدی برای تغییر وضعیت فعلی تولید و مصرف انرژی در ایران است.

با توجه به مصرف بالای انرژی در ساختمانها، تلاشهای زیادی برای کاهش و بهینه مصرف نمودن سوختهای فسیلی در ساختمان انجام شده است. ابراهیم‌پور و کریمی واحد [۲] با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس مصرف انرژی یک ساختمان

Archive of SID

www.SID.ir

آموزشی را در تبریز به‌دست آوردند و نشان دادند که می‌توان با انجام تغییرات مختلف جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در این ساختمان، میزان مصرف سالانه انرژی را تا ۴۰ درصد کاهش داد.

یکی از گزینه‌های افزایش بازده انرژی، توسعه سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی می‌باشد که به‌اندازه یافتن منابع جدید انرژی مهم است. یکی از روش‌های مؤثر برای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در ساختمان، استفاده از مواد تغییرفازدهنده می‌باشد. در این روش، از یک ماده تغییرفازدهنده با خواص مناسب (گرمای نهان ذوب بالا و دمای ذوب در محدوده مورد نیاز) در اجزاء مختلف ساختمان استفاده می‌شود. ماده تغییرفازدهنده بر اساس مکانیزم جذب یا آزاد شدن گرما هنگام تغییر فاز، انرژی گرمایی را در خود ذخیره و به هنگام نیاز آزاد می‌سازد و بدین طریق نوسانات دمایی هوای ساختمان را کم‌تر می‌کند. استفاده از مواد تغییرفازدهنده به‌عنوان ذخیره‌ساز گرما در ساختمان‌ها، یکی از کاربردهای اولیه مورد مطالعه در زمینه مواد تغییرفازدهنده بوده است. اولین گزارش‌ها در مورد کاربرد مواد تغییرفازدهنده مربوط می‌شود به مطالعاتی که توسط تلکس [۳] در سال ۱۹۷۵ و لین [۴] در سال ۱۹۸۶ در زمینه گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها انجام گرفت. این مطالعات، آغازی بود برای توسعه سیستم-های ذخیره‌سازی انرژی که یکی از راه‌حل‌های ممکن برای مشکل عدم تناسب عرضه و تقاضای انرژی می‌باشد. ابهت [۵]، لورش و همکاران [۶] و فرید [۷] لیست جامعی از مواد مناسب برای ذخیره‌سازی گرمای نهان را با پوشش طیف گسترده‌ای از دماهای ذوب گزارش نموده‌اند.

شبیه‌سازی انرژی ساختمان کمک می‌کند تا ظرفیت ذخیره‌سازی گرما توسط سیستم‌های حاوی مواد تغییرفازدهنده را بتوان تخمین زد. به عنوان نمونه می‌توان به مطالعه عددی انجام شده توسط دارکوا و اوکالاقان [۸] اشاره نمود که در آن کاربرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه از دو نوع لایه تغییرفازدهنده با درصد وزنی مشابه استفاده شده است. نوع اول از لایه‌ای به ضخامت ۱۰ میلی‌متر از گچ و ۲ میلی‌متر ماده تغییرفازدهنده لایه-ای مسطح تشکیل شده بود. نوع دوم از لایه‌ای به ضخامت ۱۲ میلی‌متر تشکیل شده از مخلوط گچ و ماده تغییرفازدهنده بود. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از ماده تغییرفازدهنده لایه‌ای مسطح نازک برای متعادل‌سازی دمای اتاق در شب مفیدتر است و دمای اتاق را در شب به میزان ۱۷٪ بیشتر از لایه مخلوط ماده تغییرفازدهنده و گچ افزایش می‌دهد.

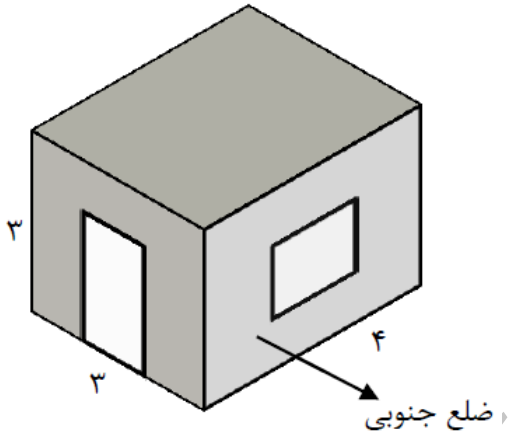
در این تحقیق به تحلیل حرارتی یک ساختمان نمونه با دیوارهای حاوی مواد تغییرفازدهنده در شرایط اقلیمی تهران پرداخته شده است. روش عددی مورد استفاده در این مطالعه، بر مبنای دسته سوم مطالعات عددی در این زمینه است که مورد اشاره قرار گرفت؛ یعنی حل معادله حرارت یک‌بعدی در دیوارها و معادله تعادل انرژی در یک اتاق. در این روش با استفاده از یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن، بر اساس روش اختلاف محدود ضمنی، انتقال حرارت و دمای ساختمان برای مدت یک سال محاسبه شده و تأثیر پارامترهای مختلف در استفاده از ماده تغییرفازدهنده به منظور کاهش مصرف انرژی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

هندسه مسئله

همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده، ساختمان نمونه مورد بررسی در این تحقیق، از یک اتاقک پیش‌ساخته (کانکس) به طول ۴، عرض ۳ و ارتفاع ۳ متر تشکیل شده است. بر روی ضلع جنوبی این اتاقک، پنجره‌ای ساخته شده از شیشه دوجداره به طول ۲ متر و ارتفاع ۱/۵ متر و بر روی ضلع غربی آن دری آلومینیمی به طول ۱ متر و ارتفاع ۲ متر وجود دارد.

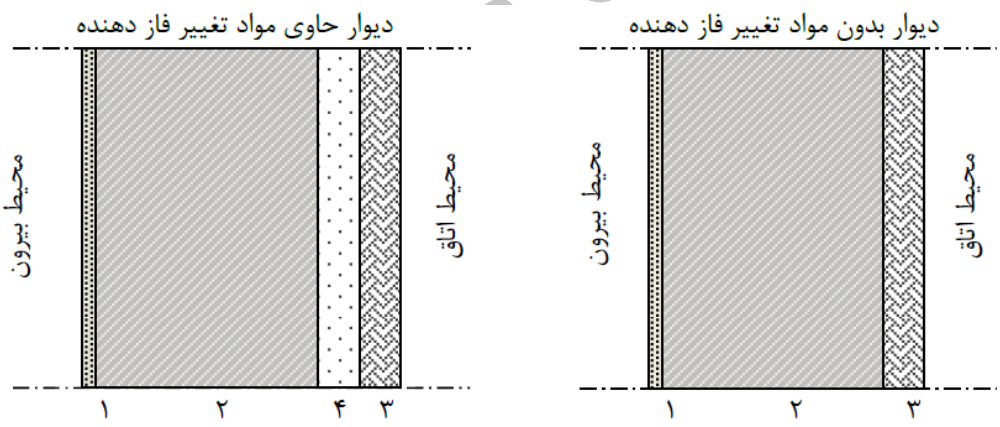
Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۳- شمای ساختمان نمونه مورد مطالعه

ساختار دیوارهای این ساختمان در شکل ۴ نشان داده شده است. چنانچه در شکل مشخص است، دیوارهای معمولی از سه لایه ورق فولاد گالوانیزه، فوم پلی استایرن (عایق) و پوشش PVC تشکیل شده‌اند. در دیوارهای حاوی ماده تغییرفازدهنده، لایه حاوی این ماده بین دو لایه فوم پلی استایرن و پوشش PVC قرار می‌گیرد. خصوصیات ترموفیزیکی مواد به‌کار رفته در دیوارهای این ساختمان در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۴- ساختار دیوارهای ساختمان: (۱) ورق فولاد گالوانیزه ۰/۵ میلیمتری، (۲) فوم پلی استایرن ۴۰ میلیمتری، (۳) پوشش PVC ۵ میلیمتری، (۴) ماده تغییرفازدهنده

جدول ۱- خصوصیات ترموفیزیکی مواد به‌کار رفته در دیوار ساختمان

ماده	(	(	)
ورق فولاد گالوانیزه	۷۸۳۰	۵۰۰	۴۵/۳
فوم پلی استایرن	۱۰۰	۱۳۸۰	۰/۰۴۷
پوشش PVC	۱۳۰۰	۹۰۰	۰/۱۵
ماده تغییرفازدهنده	۷۸۵ (جامد)	۱۴۱۰ (جامد)	۰/۱۹ (جامد)
	۷۴۹ (مایع)	۱۸۰۰ (مایع)	۰/۱۸ (مایع)

www.SID.ir

معادلات حاکم

برای ساده‌سازی فرآیند حل، معادلات حاکم با توجه به فرضیات زیر بیان می‌گردند[۸]:

۱. معادله انتقال حرارت درون تمامی دیوارها، سقف و کف ساختمان، یک‌بعدی در نظر گرفته می‌شود.
۲. تمامی خواص ترموفیزیکی مصالح ساختمانی، به‌جز گرمای ویژه ماده تغییرفازدهنده، ثابت در نظر گرفته می‌شوند.
۳. از انتقال حرارت جابجایی آزاد در فاز مایع ماده تغییرفازدهنده و پدیده فوق‌سرمایش هنگام فرآیند انجماد صرف‌نظر می‌شود.
۴. دمای هوای اتاق در کل حجم اتاق یکسان در نظر گرفته می‌شود، به عبارت دیگر دمای هوای اتاق به یک نقطه (گره) اختصاص داده می‌شود.
۵. از انتقال حرارت تشعشعی داخل اتاق صرف‌نظر می‌گردد.

معادله پخش گرما، معادله حاکم بر انتقال حرارت درون دیوارها می‌باشد. این معادله که معادله گرما نیز نامیده می‌شود، به صورت زیر بیان می‌شود:

ρ (۱)

که در آن، H بیانگر آنتالپی، K ضریب هدایت حرارتی ، T دما ، x متغیر مکان و t متغیر زمان است:

H (۲)

در معادلات فوق، j نمایانگر شماره لایه است. c_p گرمای ویژه است. برای دیوارهای حاوی ماده تغییرفازدهنده، در صورتی که ماده تغییرفازدهنده در حالت تک‌فاز باشد، از مقادیر مربوط به فاز جامد یا مایع استفاده می‌کنیم و در صورتی که ماده تغییرفازدهنده در حالت دوفازی باشد، مقادیر چگالی، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه ماده تغییرفازدهنده به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

ρ

k

c (۳)

که در عبارت فوق h_f گرمای نهان ذوب و T_f دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده می‌باشد.

برای سطوح خارجی دیوارها و سقف که با هوای خارج در تماس هستند، شرط مرزی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

((۴)

که در آن i شماره دیوار است. برای سطح خارجی کف اتاقک که با زمین در تماس است، شرط مرزی عایق در نظر گرفته می‌شود:

k (۵)

برای سطوح داخلی دیوارها، سقف و کف که با هوای داخل اتاق در تماس هستند، از معادله زیر برای تعریف شرط مرزی استفاده می‌شود:

h (۶)

Archive of SID

www.SID.ir

$q_{r,out}$ در معادله (۴) نشان‌دهنده کل شار حرارتی تشعشعی وارده به سطوح خارجی می‌باشد که شامل تشعشع مستقیم و دیفیوز خورشیدی و تشعشع انعکاسی زمین می‌باشد.

برای شروع فرآیند حل عددی، شرط اولیه به صورت زیر تعریف می‌شود:

T (۷)

معادله بقای انرژی برای هوای داخل اتاق به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

ρ (۸)

در معادله فوق ρ_a و $c_{p,a}$ به‌ترتیب چگالی و ظرفیت گرمای ویژه هوای درون اتاقک می‌باشند و V_R حجم اتاق است. $Q_{w,i}$ نرخ انتقال حرارت جابجایی بین هوای درون اتاقک و هر یک از سطوح داخلی دیوارها، سقف و کف می‌باشد:

Q (۹)

همچنین Q_L نرخ انتقال حرارت ناشی از تهویه هوای اتاق است:

Q (۱۰)

که در آن ACH نرخ تعویض هوای اتاق بر ساعت است.

Q_{win} و Q_{door} نرخ انتقال حرارت عبوری از پنجره و در می‌باشند:

Q (۱۱)

Q (۱۲)

در معادلات فوق U_{win} و U_{door} ضرایب کلی انتقال حرارت پنجره و در می‌باشند که برای پنجره برابر با ۳/۶۹ $\mathrm{W/m^2{}^\circ C}$ و برای در برابر با ۶/۸۱ $\mathrm{W/m^2{}^\circ C}$ در نظر گرفته شده‌اند [۹].

شار حرارتی تشعشعی وارد شده به اتاق از طریق پنجره ($Q_{r,win}$)، با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

Q (۱۳)

در عبارت فوق i شماره دیواری که پنجره روی آن قرار دارد (دیوار جنوبی)، می‌باشد و τ_{win} ضریب عبور شیشه پنجره است که برابر با ۰/۸ در نظر گرفته شده است.

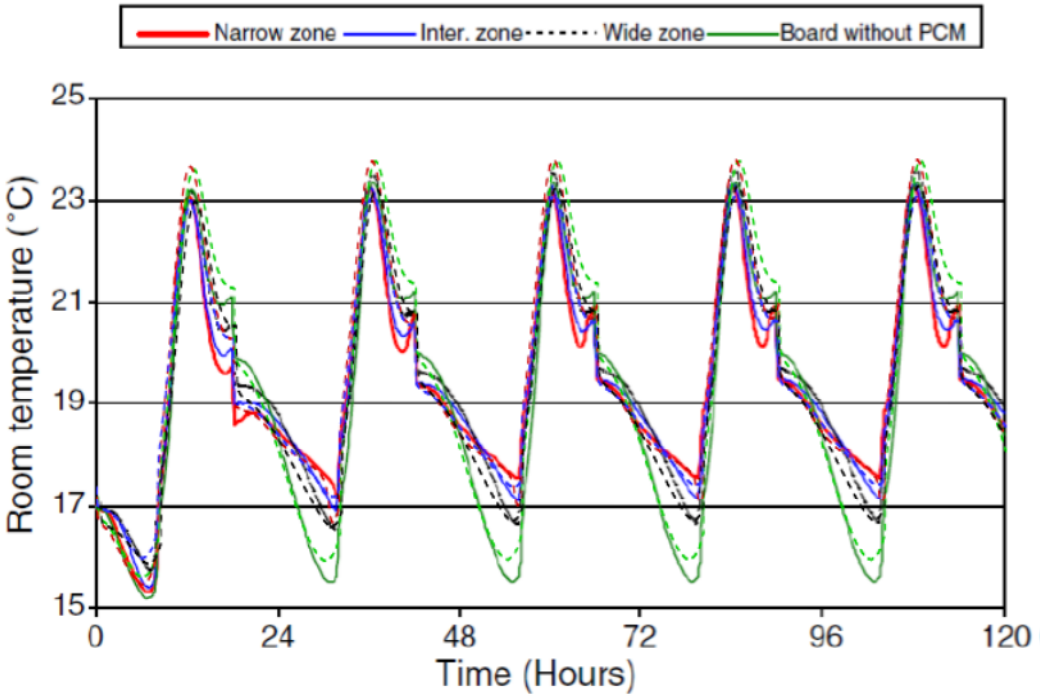
اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری و انتخاب شبکه مناسب

به‌منظور اعتبارسنجی برنامه عددی، نتایج به‌دست آمده از این برنامه با نتایج مطالعه عددی صورت گرفته توسط دارکوا و اوکالاقان [۸] مقایسه شده است. هندسه مسئله مورد بررسی در این مقاله، اتاقی به طول ۴، عرض ۳ و ارتفاع ۲/۵ متر است که دارای یک پنجره به طول ۱/۵ و ارتفاع ۱ متر در ضلع شمالی می‌باشد. دیوارهای این ساختمان شامل یک لایه آجر، یک لایه گچ و در سطح داخلی یک صفحه تخت مواد تغییرفازدهنده می‌باشد. با اعمال پارامترها و شرایط تعریف شده در مطالعه دارکوا و اوکالاقان، شبیه‌سازی با استفاده از برنامه عددی توسعه یافته انجام گردید. شکل ۵ دمای اتاق با استفاده از نتایج برنامه عددی توسعه یافته (منحنی‌های خط‌چین) را با نتایج حاصل از مطالعه عددی فوق‌الذکر (منحنی‌های کامل) مقایسه می‌کند. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، حداکثر اختلاف موجود بین نتایج برنامه عددی توسعه یافته و نتایج حاصل از حل عددی دارکوا و اوکالاقان حدود ۴٪ می‌باشد و می‌توان نتیجه گرفت که بین نتایج این دو برنامه عددی انطباق خوبی وجود دارد.

برای انتخاب شبکه مناسب، نمودار دما بر حسب عرض دیوار برای ۶ شبکه متفاوت با ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ گره برای دیوار فاقد مواد تغییرفازدهنده بررسی شده و شبکه یکنواختی با ۳۵۰ گره برای تمامی محاسبات عددی در نظر گرفته شده است.است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۵- مقایسه دمای هوای اتاق محاسبه شده با استفاده از برنامه عددی توسعه یافته (منحنی‌های خط‌چین) و نتایج حاصل از مطالعه دارکوا و اوکالاقان [۸] (منحنی‌های کامل)

بحث و بررسی نتایج

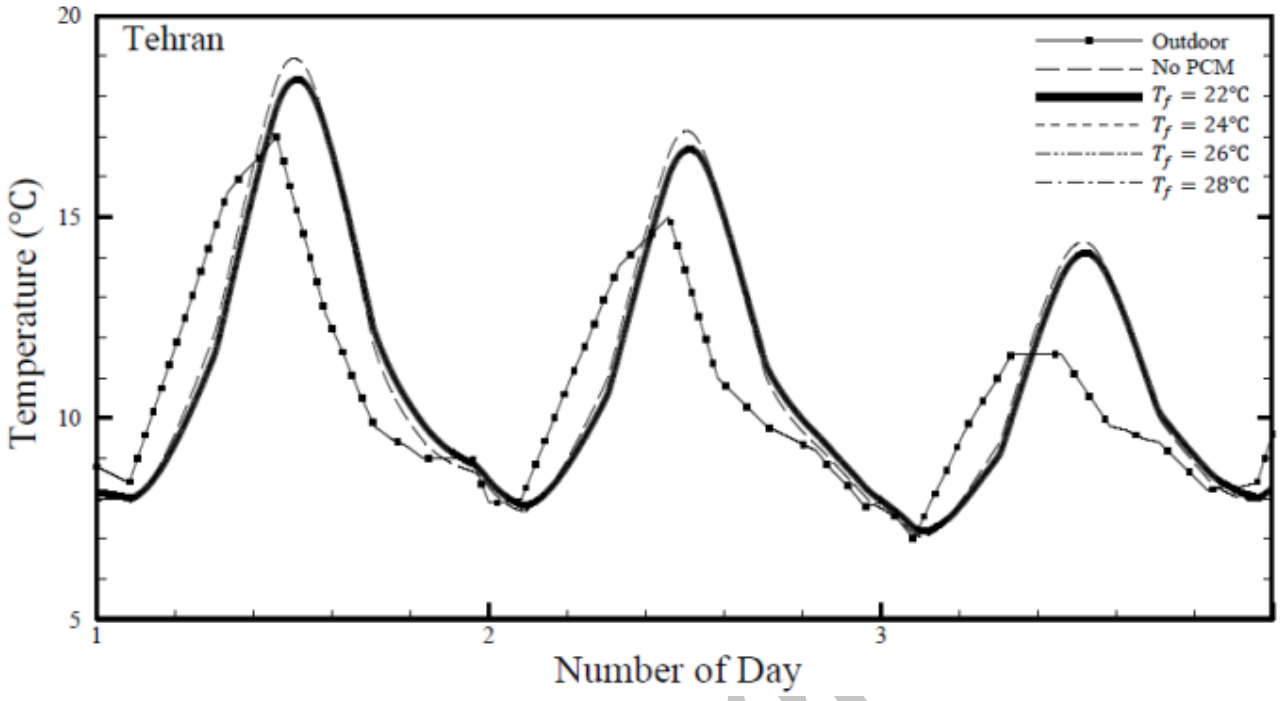
تأثیردمای ذوب ماده تغییرفازدهنده بر دمای هوای اتاق

برای بررسی میزان تأثیر این پارامتر بر دمای هوای اتاق، چهار دمای ذوب متفاوت ۲۲، ۲۴، ۲۶ و ۲۸ درجه سلسیوس برای ماده تغییرفازدهنده در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی عددی، برای ساختمانی در شهر تهران که تنها در دیوار جنوبی آن ماده تغییرفازدهنده وجود دارد با استفاده از مقادیر فوق برای دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده برای کل سال صورت گرفت.

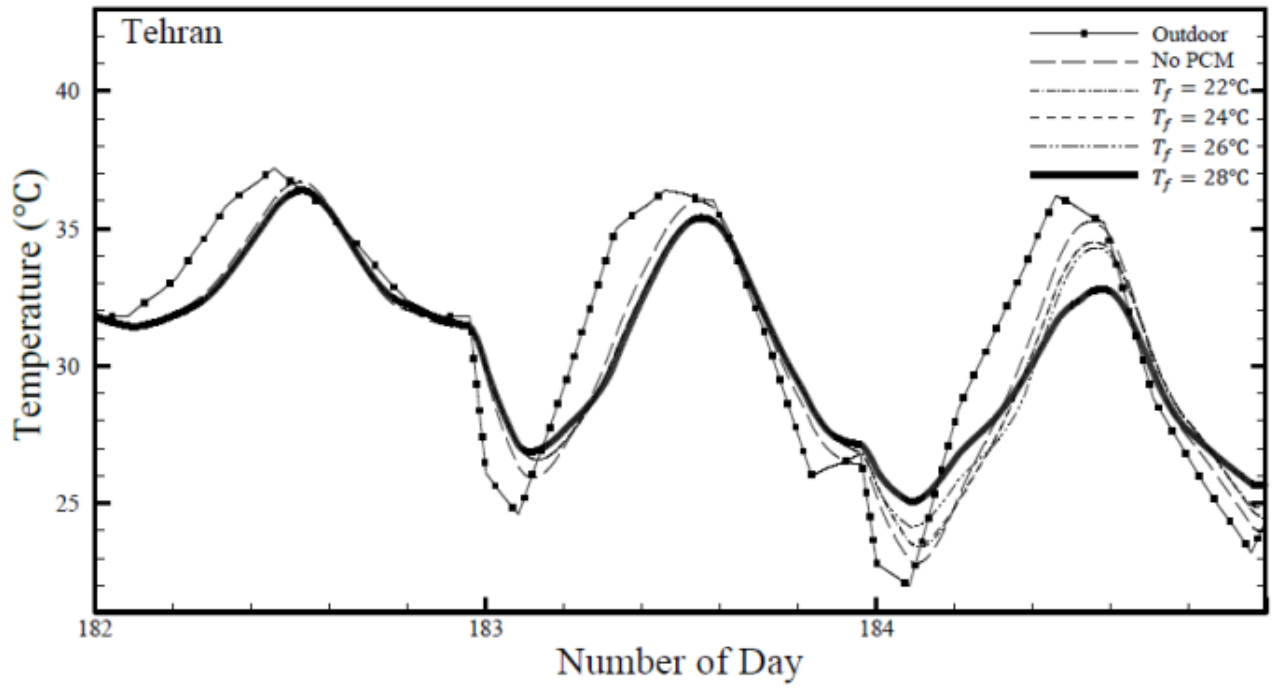
در شکل ۶ تغییرات دمای محیط و همچنین دمای هوای اتاق در حالت‌های بدون استفاده از مواد تغییرفازدهنده و با استفاده از مواد تغییرفازدهنده با دماهای ذوب متفاوت، برای دو فصل زمستان (اول تا سوم ژانویه) و تابستان (اول تا سوم ژولای)، برای شهر تهران نشان داده شده است. با توجه به این شکل، دمای هوای تهران در سه روز ابتدایی زمستان، بین ۷ تا ۱۷ درجه سلسیوس می‌باشد. بهترین حالت مربوط به استفاده از ماده تغییرفازدهنده برای این شهر و در این بازه زمانی، استفاده از ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب ۲۲ درجه سلسیوس است که در صورت استفاده از این ماده تغییرفازدهنده می‌توان حداقل دمای اتاق را تا حدود ۰/۱ درجه سلسیوس افزایش داد. همچنین با توجه به این شکل، دمای هوای تهران در سه روز ابتدایی تابستان بین ۲۲ تا ۳۷ درجه سلسیوس است و در این بازه زمانی، بهترین حالت مربوط به استفاده از ماده تغییرفازدهنده، استفاده از ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب ۲۸ درجه سلسیوس می‌باشد. در صورت استفاده از این ماده تغییرفازدهنده، می‌توان حداکثر دمای اتاق را تا حدود ۳ درجه سلسیوس کاهش داد.

Archive of SID

www.SID.ir



(الف)



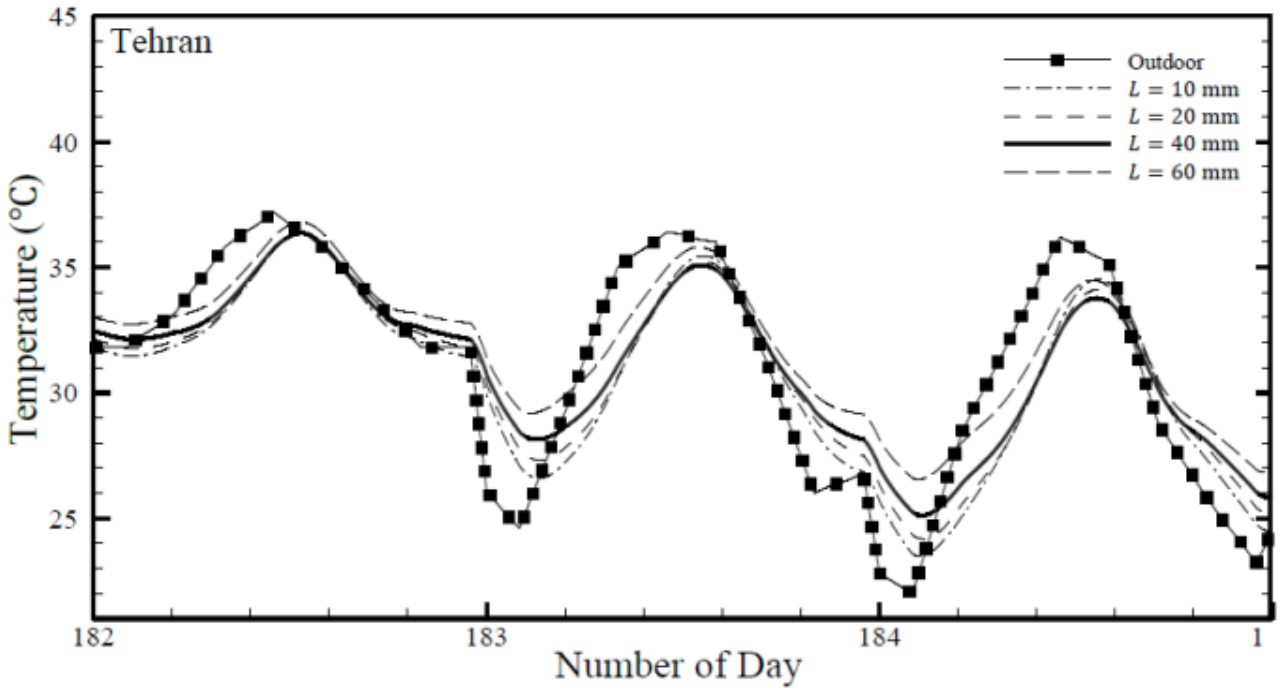
(ب)

شکل ۶- تغییرات دمای محیط و دمای هوای اتاق در حالت‌های بدون استفاده از مواد تغییرفازدهنده و با استفاده از مواد تغییرفازدهنده با دماهای ذوب متفاوت برای شهر تهران برای الف) زمستان و ب) تابستان

www.SID.ir

تأثیر ضخامت لایه ماده تغییرفازدهنده بر دمای هوای اتاق

شکل ۷ نشان‌دهنده تغییرات دمای محیط و دمای هوای اتاق برای ضخامت‌های مختلف لایه ماده تغییرفازدهنده می‌باشد. شبیه‌سازی برای شهر تهران و در ۳ روز نخست تابستان انجام شده است. برای بررسی تأثیر ضخامت ماده تغییرفازدهنده، سایر پارامترهای تأثیرگذار بر شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده‌اند. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، استفاده از لایه ضخیم‌تر ماده تغییرفازدهنده در دیوار، باعث کاهش بیشتر نوسانات دمای هوای اتاق می‌گردد. اما با افزایش ضخامت لایه به ۶۰ میلی‌متر، با وجود اینکه نوسانات دمای هوای اتاق کاهش یافته، دمای هوای بیشینه اتاق نسبت به حالت استفاده از لایه‌های با ضخامت کمتر بیشتر است و همچنین میانگین دمای اتاق نیز افزایش یافته است. با توجه به اینکه هدف از کاربرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان، افزایش آسایش و کاهش هزینه انرژی مورد نیاز برای گرمایش و سرمایش ساختمان است، در این حالت افزایش ضخامت لایه ماده تغییرفازدهنده تأثیر نامطلوبی خواهد داشت.



شکل ۷- تغییرات دمای محیط و دمای هوای اتاق برای ضخامت‌های مختلف لایه ماده تغییرفازدهنده

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به تحلیل حرارتی یک ساختمان نمونه با دیوارهای حاوی مواد تغییرفازدهنده در شهر تهران پرداخته شد. ساختمان مورد مطالعه از یک اتاقک پیش‌ساخته (کانکس) تشکیل شده است. تأثیر استفاده از مواد تغییرفازدهنده در دیوارهای این ساختمان نمونه مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی پارامترهای مختلف تأثیرگذار، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی را می‌توان خلاصه نمود:

SID
www.SID.ir

۱. استفاده از مواد تغییرفازدهنده در دیوارهای ساختمانی منجر به کاهش نوسانات دمای هوای اتاق و افزایش آسایش گرمایی می‌شود.
۲. دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده باید با توجه به پارامترهای محیطی انتخاب شود. بهتر است دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده در فصول گرم بیشتر از دمای ذوب در فصول سرد باشد.
۳. به دلیل نوسانات دمایی شدیدتر در تابستان، معمولاً تأثیر کاربرد ماده تغییرفازدهنده در تابستان چشمگیرتر از کاربرد آن در زمستان می‌باشد. با توجه به این موضوع، اگر امکان تعویض ماده تغییرفازدهنده در فصول مختلف ساختمان وجود نداشته باشد، بهتر است از ماده تغییرفازدهنده مخصوص فصول گرم، یعنی ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب بیشتر (۲۸ درجه سلسیوس) در دیوارهای ساختمان استفاده شود.
۴. ضخامت بیشتر لایه ماده تغییرفازدهنده لزوماً به معنای تأثیر بهتر استفاده از این مواد به‌منظور ذخیره‌سازی گرما نیست. به‌علاوه، ضخامت بیشتر موجب افزایش هزینه و کاهش کارایی سیستم ذخیره‌سازی انرژی می‌گردد. بنابراین لازم است یک مقدار بهینه برای ضخامت لایه ماده تغییرفازدهنده انتخاب گردد.
۵. با استفاده مناسب از مواد تغییرفازدهنده درون دیوارهای اتاقک مورد بررسی، می‌توان نوسانات دمای هوای اتاق را تا ۳ درجه سلسیوس کاهش داد.

مراجع

[۱] وزارت نیرو، *ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۰*، معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، ۱۳۹۰.
[۲] ابراهیم‌پور عبدالسلام، کریمی واحد یوسف، "روش‌های مناسب بهینه‌سازی مصرف انرژی در یک ساختمان دانشگاهی در تبریز"، *مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۲ (شماره ۴)، ۱۳۹۱، ص‌ص ۹۱-۱۰۴.
[3] Telkes M., “Thermal storage for solar heating and cooling”, *Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings*, Charlottesville (Virginia, USA), 1975.
[4] Lane G.A., Solar Heat Storage: Latent Heat Material, *Technology*, CRC Press (Florida, USA), vol. II, 1986.
[5] Abhat A., “Low temperature latent heat thermal energy storage. Heat storage materials”, *Solar Energy*, Vol. 30, 1983, pp. 313–332.
[6] Lorsch H.G., Kauffman K.W., Denton J.C., “Thermal energy storage for heating and air conditioning, future energy production system”, *Heat and Mass Transfer Proceedings*, Vol. 1, 1976, pp. 69–85.
[7] Farid M.M., “A review on energy storage with phase changes”, *Proceedings of Chicago/Midwest Renewable Energy Workshop*, Chicago (USA), 2001.
[8] Darkwa K., Callaghan P. O, “Simulation of phase change drywalls in a passive solar building”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, No. 8–9, 2006, pp. 853–858.
[۹] مجتبی طباطبایی، *محاسبات تأسیسات ساختمان*، چاپ پانزدهم، انتشارات روزبهان، ۱۳۹۰.

Archive of SID
www.SID.ir