تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۲
تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۴/۳۰

سینا معماریان[۱]، بهروز محمدکاری[۲]، ریما فیاض[۳]، سمیه اسدی[۴]

بررسی تأثیر مواد تغییرفازدهنده بر طول دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی در ساختمان‌های مسکونی[۵]

چکیده

محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش مصرف انرژی از نگرانی‌های پیش روی جوامع امروزی است. از آنجا که بخش قابل توجهی از مصرف انرژی کشور در ساختمان‌های مسکونی برای فراهم آوردن آسایش حرارتی مصرف می‌شود، تاکنون تلاش زیادی برای بهبود شرایط آسایش فضای داخل با مصرف انرژی کمتر انجام شده است. تأثیر جرم حرارتی در کاهش مصرف انرژی ساختمان و افزایش آسایش حرارتی از موضوعات مورد بررسی در این خصوص است. در این زمینه جرم حرارتی نوینی تحت عنوان مواد تغییرفازدهنده (PCM) در ساختمان‌سازی به‌ویژه سبک‌سازی و بلندمرتبه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تحقیق با محدود کردن مطالعه رفتاری در بازهٔ زمانی دورهٔ گذر فصلی بهاری و پاییزی در ساختمان‌های مسکونی در شهر تهران سعی در به حداکثر رساندن کاهش مصرف انرژی و عدم وابستگی به تأسیسات مکانیکی جهت کاهش استهلاک تأسیسات در دوره گذر فصلی دارد. در این زمینه اثر مواد تغییرفازدهنده (PCM) با نقطه ذوب مختلف ۲۱، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۲۹ درجه سلسیوس به‌وسیله نرم‌افزار انرژی‌پلاس (نسخه ۸) شبیه‌سازی و تأثیر آنها بر دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده ماده تغییرفازدهنده (PCM) با دمای ذوب ۲۹ درجه سلسیوس، سبب کاهش مصرف انرژی سالانه و افزایش طول دوره گذر فصلی نسبت به کل سال با میزان نرخ تهویه طبیعی ۵ ach می‌شود و در نهایت ۳۸ روز در دوره گذر بهاری و ۲۹ روز در دوره گذر پاییزی با مصرف انرژی صفر کیلووات ساعت روزانه منجر به عدم کارکرد سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: دوره گذر فصلی، جرم حرارتی، مواد تغییرفازدهنده (PCM)، تهویه طبیعی، مصرف انرژی.

[۱] کارشناس ارشد معماری و انرژی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، استان تهران، شهر تهران (نویسنده مسئول مکاتبات)
E-mail: sina.memarian@yahoo.com

[۲] استادیار فیزیک ساختمان، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، استان تهران، شهر تهران
E-mail: kari@bhrc.ac.ir

[۳] دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، استان تهران، شهر تهران
E-mail: fayaz@art.ac.ir

[۴] استادیار دانشکده مهندسی معماری، دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا
E-mail: asadi@engr.psu.edu

[۵] این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد سینا معماریان با عنوان «بررسی عوامل مؤثر بر طول دوره گذر فصلی در ساختمان‌های مسکونی» در دانشگاه هنر تهران به راهنمایی دکتر ریما فیاض و دکتر بهروز محمدکاری و مشاوره دکتر سمیه اسدی است.

مقدمه

امروزه بهره‌وری انرژی ساختمان از مهم‌ترین اهداف سیاست انرژی در سطوح منطقه‌ای، ملی و بین‌المللی است (Pérez-Lombard *et al.*, 2008). ساختمان‌ها یکی از بخش‌های پیشروی مصرف انرژی هستند. به‌عنوان مثال با توجه به آمار ارائه شده اتحادیه اروپا سهم بخش ساختمان در حدود ۴۰٪ از کل انرژی مصرفی و تقریباً ۴۰٪ از انتشار گازهای گلخانه‌ای CO_2 است (Diakaki *et al.*, 2008). این سهم مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای با توجه به افزایش استاندارد زندگی و نیاز آسایشی افراد و به‌طور عمده برای گرمایش و سرمایش است. در روش‌های ناپایدار ساختمان‌ها به‌صورت فزاینده‌ای وابسته به سیستم‌های فعال برای تأمین آسایش حرارتی داخلی هستند که باعث افزایش انرژی مصرفی و همچنین افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و لذا باعث افزایش هزینه در دوره بهره‌برداری ساختمان می‌گردد. کاهش مصرف انرژی و بهبود صرفه‌جویی انرژی در ساختمان‌ها در ترویج بهره‌وری انرژی و پایداری ساختمان امری حیاتی است.

کاهش مصرف انرژی در کنار فراهم کردن آسایش حرارتی اهمیت زیادی دارد. در خانه‌های خورشیدی و خانه‌هایی با مصرف انرژی کم[1] عوامل مختلفی وجود دارند که در این زمینه تأثیرگذار هستند. از مهم‌ترین عوامل در طراحی این دسته از ساختمان‌ها «ذخیره‌سازی انرژی حرارتی» است. ذخیره‌سازی انرژی حرارتی می‌تواند به دو صورت گرمای محسوس (جرم حرارتی متداول در ساختمان) و گرمای نهان (مواد تغییرفازدهنده[2]) صورت گیرد. ذخیره گرمای نهان برپایه جذب یا آزادسازی گرما زمانی است که ماده مورد استفاده برای ذخیره انرژی حرارتی دچار فرایند تغییر فاز مثلاً از جامد به مایع یا مایع به گاز و مانند آن شود. استفاده از سیستم‌های ذخیره گرمای نهان توسط مواد تغییرفازدهنده (PCM) به‌علت داشتن چگالی بالای انرژی و عملکرد نقطه‌ای تغییر فاز در دمای ثابت بسیار سودمندتر از روش گرمای محسوس است (امامی‌فر، ۱۳۹۳).

عبارت «دوره گذر» در زمینه‌ها و رشته‌های مختلفی از جمله علوم مربوط به هواشناسی، ورزشی، معماری، علوم تغذیه، محیط زیست و... مورد استفاده قرار می‌گیرد. دوره گذر به معنای انتقال و گذر از دوره و حالتی خاص به دوره و حالت خاصی دیگر است. مثلاً در رشته مربوط به هواشناسی، دوره گذر فصلی درک فرآیندها و بازخوردهای اقلیمی و ارتباط و اتصال چرخه آب با پوشش گیاهی است. به‌وسیله این عوامل، ناظران با نگاهی هوشمندانه می‌توانند تجربیات خود از فصل‌ها را به فرآیندهای کلیدی تغییر اقلیمی مانند بازخورد بخار آب، برف-یخ و درک نقش متمایز سه فاز متفاوت آب (یخ، مایع و بخار) در تعادل سطح انرژی در فصول مختلف ارتباط دهند. دوره گذر فصلی گاهی اوقات به‌واسطه تغییرات سریع آب‌وهوایی هفته به هفته محسوس نیست، اما اغلب در بسیاری از سال قابل مشاهده و درک است. با وجود این فرآیندهای اقلیمی اساسی به‌طور کلی، حتی به‌وسیله بسیاری از دانشمندان زمینه جو و اتمسفر و پیش‌بینی‌کنندگان آب‌وهوا به خوبی درک نشده‌اند (Betts, 2011).

با توجه به تغییرات اقلیمی رخ داده در این بازه زمانی، در ساختمان نیز بازخوردهایی از محیط اطراف با اختلاف دمایی متعادل‌تر نسبت به محیط خارج رخ می‌دهد (ساختمان به‌عنوان پوسته سوم پس از بدن انسان و پوشش ظاهری هر شخص جایگاه ویژه‌ای دارد). معمولاً این دوره در انتقال و گذر از فصل زمستان (سرما) به فصل بهار (گرما) و همچنین فصل تابستان (گرما) به فصل پاییز (سرما) است و شدت و میزان تغییرات دما، طول و زمان وقوع دوره گذر فصلی با توجه به اقلیم‌های مختلف کاملاً متفاوت است. به نظر می‌رسد که استفاده از سیستم‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (گرمای نهان) می‌تواند

باعث افزایش طول دوره گذر در اقلیم‌های مختلف و کاهش مصرف انرژی در بازه‌های مختلف زمانی در طول سال شود. حتی ممکن است تغییرات ناگهانی دما در این دوره تأثیر چندانی بر عملکرد مواد تغییرفازدهنده (PCM) و در نهایت دوره گذر فصلی نداشته باشد.

پیشینه تحقیق

تحقیق در زمینه مواد تغییرفازدهنده برای ذخیره‌سازی انرژی به سال ۱۹۴۰ میلادی برمی‌گردد، اما آن زمان استفاده از این مواد زیاد مورد توجه قرار نگرفت. از اوایل دهه ۱۹۷۰ با مطرح شدن بحران انرژی، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه مواد تغییرفازدهنده و بهینه‌سازی خواص و کاربردهای مختلف در سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی صورت گرفته است (Frank, 2001). با توجه به ساخت‌وسازهای امروزی و رویکرد سبک‌سازی در ساختمان‌های بلندمرتبه، معمولاً این‌گونه ساختمان‌ها با کمبود جرم حرارتی مواجه هستند. جرم حرارتی باعث کاهش نوسانات دمایی می‌شود، بنابراین یکی از راهکارها برای محدود کردن این نوسانات استفاده از مواد تغییرفازدهنده (PCM) است.

از عمده‌ترین پژوهش‌ها، پژوهش فنگ و همکاران در زمینه مقایسه خصوصیات حرارتی دیوار معمولی و دیوار حاوی مواد تغییرفازدهنده است. نتایج این پژوهش نشان از کاهش ۱ تا ۲ درجه سانتی‌گراد دما نسبت به دمای داخل در مقایسه با دیوار معمولی دارد (Feng *et al.*, 2011). یکی از پارامترهای بسیار مهم و تأثیرگذار در عملکرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان، دمای ذوب آنهاست به این معنی که دمای ذوب مناسب مواد تغییرفازدهنده باید کمی بالاتر از متوسط دمای اتاقی باشد که PCM در آن به‌کار رفته است. دمای ذوب ایده‌آل در حدود ۲ درجه سلسیوس بالاتر از متوسط دمای هوای اتاق است (Zhang et al., 2006). اتول و همکاران در مروری بر تحقیقات صورت گرفته، عنوان می‌کنند که مواد تغییرفازدهنده که دمای ذوب آن‌ها در بازه دمایی ۲۰–۳۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند ظرفیت لازم را برای تأمین آسایش حرارتی دارند (Sharma *et al.*, 2009) و برای ساختمان‌های سبک در شهر فونیکس ایالت آریزونا، PCM با دمای ذوب بین ۲۳ تا ۲۷ درجه سلسیوس برای حداکثر ذخیره‌سازی انرژی مناسب است (Muruganan–tham et al., 2010). کاربرد ماده تغییرفازدهنده در سطوح داخلی اتاق می‌تواند بین زمان بیشینه مصرف انرژی و زمان بیشینه بار گرمایی اتاق در شبانه‌روز، فاصله زمانی ایجاد کند (Shilei *et al.*, 2006).

عملکرد حرارتی جدارهای ساختمانی و موقعیت جرم حرارتی در جداره جهت افزایش جرم حرارتی و کاهش اوج نوسانات مهم است. موقعیت بهینه لایه نازک PCM تحت تأثیر خصوصیات حرارتی PCM و شرایط محیطی است. هنگامی که دمای نهان ذوب، دمای ذوب PCM و ضخامت PCM افزایش می‌یابد، بهتر است این ماده نزدیک به سطح خارجی دیوار باشد و هنگامی که دمای سطح داخلی افزایش می‌یابد نزدیک به سطح داخلی قرار گیرد (Jin et *al.*, 2016). با توجه به جزئیات اجرایی متفاوتی که از PCM در سیستم‌ها و تجهیزات ساختمانی استفاده می‌شود وینلادر و همکاران به بررسی تأثیر سیستم سرمایش سقفی به همراه PCM پرداختند که PCM در دو حالت پایین و بالای سیستم سرمایشی قرار گرفته بود و به این نتیجه رسیدند که قرارگرفتن PCM در قسمت پایین ارتباط و کارایی بهتری بین اتاق و PCM برقرار می‌کند هرچند که انرژی مصرفی در دو دیتیل پیشنهادی برای دمای ۲۶ درجه برابر است (Weinläder *et al.*, 2016). سقف به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل انتقال حرارت در ساختمان مورد بررسی قرار گرفته و جزئیات اجرایی جدید جهت کاهش انرژی مصرفی ساختمان و همچنین بهبود آسایش حرارتی داخل و کاهش اثرات جزایر حرارتی ارائه شده است. در این پژوهش PCM را در لوله‌های پلی‌اتیلن در سقف

قرار داده‌اند که نتایج در مقایسه با سقف معمولی نشان می‌دهد که سقف در شرایط جدید تأثیر خوبی در کاهش حداکثر دما و نوسانات دمایی دارد (Lu *et al.*, 2016). همچنین PCM ترکیبی (PCM–دیوار) در یک اتاقک به ابعاد ۲/۹۱×۳/۸۶×۳/۲۵ متر در سه فصل با یک دیوار معمولی در زمینه میزان مصرف انرژی مورد مقایسه قرار گرفت که باعث کاهش ۲۴/۳۲٪ در بار سرمایی در شرایط تابستانی و در زمستان ۱۰٪– ۳۰٪ در بار گرمایی می‌شود (Wang *et al.*, 2016).

آیین و کاری در پژوهشی به بررسی تأثیر تخته‌های گچی PCM در ساختمان‌هایی با اینرسی حرارتی بالا پرداخته‌اند که با توجه به انتخاب دمای ذوب مناسب مواد تغییرفازدهنده (PCM) برای هر اقلیم، موجب کاهش ۱۲ درصدی بار گرمایشی در تبریز، کاهش ۲۹ درصدی بار سرمایشی و ۳۸ درصدی بار گرمایشی در یزد و کاهش ۱۵ درصدی بار سرمایشی در بندر عباس می‌گردد (آیین و همکاران، ۱۳۹۲). سلگی و همکاران به بررسی تأثیر تهویه شبانه بر PCM در ساختمان‌های اداری شهر یزد پرداختند که PCM ۲۷ درجه در تلفیق با تهویه شبانه بهترین عملکرد را دارا است. براساس کار آنها PCM ۲۷ درجه به همراه نرخ تهویه ۱۵ حجم در ساعت باعث کاهش ۴۷٪ مصرف انرژی در تابستان می‌شود (سلگی و همکاران، ۱۳۹۳). با توجه به مباحث و موضوعات بررسی شده مربوط به مواد تغییرفازدهنده (PCM) در ادامه به تحقیقاتی اشاره می‌شود که از جنبه‌های مختلف به بررسی دوره گذر فصلی با تأکید بر آسایش حرارتی در فضای باز و داخل ساختمان پرداخته‌اند.

قویدل و احمدی به بررسی شرایط آسایش در شهر تبریز براساس استاندارد اشری–۵۵ [۳] برای افرادی که با لباس مناسب در هوای آزاد قدم می‌زنند پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که بیشترین میزان ساعات آسایش اقلیمی در ماهای اوت و ژوئیه و سپتامبر بوده و کمترین مقدار آن در ماه‌های نوامبر، دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس متمرکز است. نسبت ساعات آسایش اقلیمی تبریز به ساعات عدم آسایش اقلیمی عددی بالغ بر ۱۷/۷ درصد است، یعنی ۸۲/۳ درصد مواقع برای ایجاد شرایط آسایش نیاز به انرژی و هزینه‌های گزاف است (قویدل و همکاران، ۱۳۹۲). حیدری و غفاری نیز به بررسی تعیین محدوده آسایش حرارتی برای شهر تبریز پرداختند و نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد در ماه‌های آذر تا بهمن برای گرمایش باید از تجهیزات مکانیکی فعال در کنار تجهیزات غیرفعال استفاده شود و در ماه اسفند در طول روز بجز ساعات ظهر نیز همواره به استفاده از تجهیزات مکانیکی نیاز است (حیدری و همکاران، ۱۳۸۹). نیاز به تغییر در سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی در دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی معمولاً تصمیم دشواری است. این کار اغلب با تغییر در سیستم‌های حرارتی آسایش تأمین می‌شود، ولی چندین ساعت بعد در روز یا در شب با توجه به گذر بهاری یا پاییزی نیاز به تغییر در گرمایش یا سرمایش است. متأسفانه تغییر در سیستم‌های تأسیساتی (سرمایش به گرمایش یا برعکس) در ساختمان‌های بزرگ کاری وقتگیر است که نیازمند تغییر در بسیاری از شیرها و دریچه‌ها، تنظیم مجدد کنترل، گرفتن هوا از سیستم‌ها، شروع و متوقف کردن پمپ‌ها و ... است. با توجه به حجم زیاد کار برای تغییرات لازمه، یک‌بار که این اتفاق می‌افتد، ساکنان ساختمان باید با تصمیم اتخاذ شده تا وقتی تغییرات معکوس در بهار یا پاییز رخ می‌دهد، به زندگی ادامه دهند! (URL1: etown.edu).

تحقیقات و مطالعات صورت گرفته در زمینه مواد تغییرفازدهنده (PCM) عمدتاً مربوط به یک دوره سالانه، استفاده و تلفیق جزئیات مختلف ساختمانی و استفاده در کنار سایر تجهیزات فعال یا غیرفعال بوده است و تأثیر عناصر و عوامل مختلف ساختمانی بر دوره گذر فصلی و مشکلات مربوطه در این دوره به‌صورت مشخص مورد بحث قرار نگرفته و یا در بخشی از مقالات به‌صورت مختصر اشاراتی کلی به آن

شده است. با توجه به موارد و مشکلات فوق یکی از راهکارها برای مقابله با مشکلات این دوره استفاده از مواد تغییرفازدهنده (PCM) مناسب در ساختمان است که باعث کاهش وابستگی ساختمان به سیستم‌های تأسیساتی در این دوره می‌گردد. به این ترتیب می‌توان با تغییرات و نوسانات حرارتی این دوره مقابله کرد و مدت زمان طول دوره گذر فصلی را افزایش داد. در این پژوهش با بررسی تأثیر مواد تغییرفازدهنده (PCM) بر دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی تلاش بر این است که بتوان با تصمیمات درست در روند طراحی و دوره عمر ساختمان تا حد ممکن مشکلات مربوط به این دوره را به حداقل رساند.

پرسش‌های تحقیق

تحقیق پیش‌رو بر آن است که با انجام شبیه‌سازی مواد تغییرفازدهنده (PCM) به سؤالات زیر پاسخ دهد:

- طول دوره گذر فصلی در ساختمان‌هایی با سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (PCM) و بدون آن چه مدت است؟
- انواع مواد تغییرفازدهنده (PCM) چه مدت طول دوره گذر فصلی را افزایش می‌دهند؟
- نقطه ذوب پیشنهادی PCM برای بهترین عملکرد حرارتی جهت کاهش مشکلات موجود در این دوره چیست؟
- تأثیر تهویه طبیعی بر عملکرد PCM و مدت زمان طول دوره گذر فصلی چگونه است؟

روش تحقیق

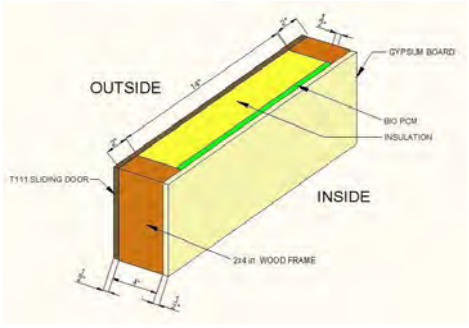
به منظور پاسخگویی به سؤالات تحقیق، در هر مرحله از روند پیشبرد مطالعات، روش‌ها و ابزارهای مختلف تحقیق، همچون مطالعات کتابخانه‌ای و شبیه‌سازی رایانه‌ای مصرف انرژی با نرم‌افزار انرژی‌پلاس[۴] (نسخه ۸) به‌کار گرفته شد. از عمده دلایل انتخاب این نرم‌افزار، قدرتمند بودن موتور تحلیل، در دسترس بودن اطلاعات معتبر آب‌وهوایی و همچنین قابلیت شبیه‌سازی مواد تغییرفازدهنده در نرم‌افزار است. تجزیه و تحلیل داده‌ها نیز با استفاده از استدلال منطقی انجام گرفته است.

مهم‌ترین پرسشی که ممکن است درباره به‌کارگیری نرم‌افزارهای شبیه‌ساز انرژی در طراحی ساختمان به ذهن خطور نماید، اعتبارسنجی و دقت این نرم‌افزارها در محاسبات مصرف انرژی در مقایسه با میزان واقعی آن است (CIBSE, 1999). بدین منظور روند اعتبارسنجی مدل PCM در نرم‌افزار انرژی‌پلاس با استفاده از داده‌برداری تجربی که در سال ۲۰۰۸ در دانشگاه آریزونا انجام شد، صورت گرفته است (شکل ۱). ابتدا اتاقک‌های ساخته شده در دانشگاه آریزونا در نرم‌افزار انرژی پلاس شبیه‌سازی شد و با استفاده از اطلاعات اقلیمی شهر فونیکس (URL3: eere) نتایج شبیه‌سازی با نتایج برداشت میدانی مقایسه گردید. با توجه به ضریب مجذور داده برابر با ۰/۹۲ می‌توان به اعتبار مدل استفاده شده (شکل‌های ۳و ۴) برای مواد تغییرفازدهنده (PCM) در نرم‌افزار انرژی‌پلاس پی‌برد.

برای برداشت میدانی در ایالت آریزونای آمریکا در شهر فونیکس (اقلیم گرم و خشک) دو اتاقک به ابعاد ۴/۸۷۶ × ۳/۶۵۷ × ۲/۴۳۶ متر ساخته شد که یکی دارای مواد تغییرفازدهنده (PCM) و دیگری بدون مواد تغییرفازدهنده (PCM) است. اندازه‌گیری‌ها به مدت یک‌سال انجام شد. دیوار اتاقک شمالی (شکل ۲) از خارج به داخل از چوب، عایق پلی‌استایرن، مواد تغییرفازدهنده (BioPCM)، و تخته گچی بوده و اتاقک جنوبی با همان جزئیات بدون لایه مواد تغییرفازدهنده است. کنترل دمای داخل نیز به‌وسیله پمپ حرارتی و در محدوده ۲۰/۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس صورت می‌گیرد (Murugananthamet *al.*, 2010).

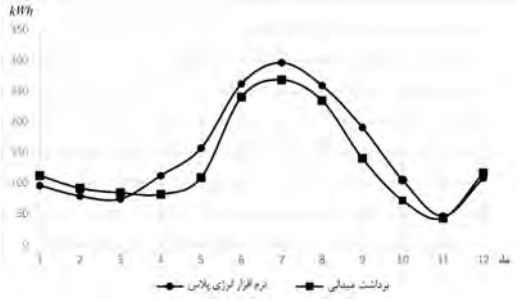
شکل ۱. اتاقک ساخته شده برای برداشت میدانی

منبع: Muruganantham *et al*., 2010

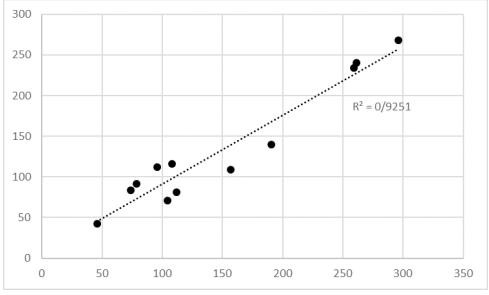


شکل ۲. مقطع عرضی دیوار اتاقک شمالی

منبع: Muruganantham *et al*., 2010



شکل ۳. برداشت میدانی و شبیه‌سازی نرم‌افزار انرژی‌پلاس



شکل ۴. ضریب مجذور داده اطلاعات برداشت میدانی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری

مشخصات مواد تغییر فازدهنده BioPCM استفاده شده در مطالعات میدانی در جدول (۱) آورده شده است. همچنین، مشخصات PCM پایه پارافین متداول، GR27 مورد استفاده در تحقیقات هوانگ (Huang *et al*., 2006) در مقایسه با آب نشان داده شده است. باید اشاره نمود که BioPCMها به شکل صفحات پیوسته تولید نمی‌شوند، بلکه به‌صورت بلوک‌های کوچک مجزا ساخته می‌شوند (شکل ۵).

جدول ۱. مقایسه مشخصات فیزیکی- حرارتی PCM، BioPCM پایه پارافین و آب

توضیحات	BioPCM	GR27	آب
دمای ذوب (°C)	۲۹	۲۸	۰
چگالی (kg/m^3)	۸۶۰	۷۱۰	۱۰۰۰
ظرفیت گرمایی (kJ/kg.°C)	۱/۹۷	۱/۱۲۵	۴/۱۷۹
گرمای نهان (kJ/kg)	۲۱۹	۷۲	۳۳۴
نقطه ذوب (°C)	۱۸۴	–	۱۰۰
ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	۰/۲	۰/۱۵	۰/۶

منبع: Muruganantham *et al*., 2010

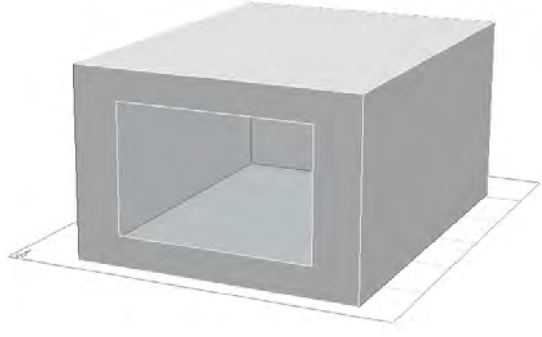
شکل ۵. BioPCM استفاده شده در دیوارها

منبع: Muruganantham *et al.*, 2010

در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر مواد تغییرفازدهنده با نقطه ذوب متفاوت در دوره گذر فصلی پرداخته شده است. با استفاده از مواد تغییرفاز دهنده با نقطه ذوب متفاوت، بهترین گزینه برای شهر تهران با توجه به تأثیر بر مصرف انرژی و میزان طول دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی انتخاب شد. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار اکوتکت[5] نسخه ۲۰۱۱ انجام گرفت و محاسبات مربوط به بار گرمایشی و سرمایشی به کمک نرم‌افزار انرژی‌پلاس نسخه ۸ صورت گرفت.

ویژگی‌های مدل پایه

با توجه به مرحله اعتبارسنجی نرم‌افزار انرژی‌پلاس و نزدیک بودن نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری میدانی با مقدار خطای قابل قبول، یک اتاقک به ابعاد اتاقک ساخته شده در دانشگاه آریزونا (بدون سقف شیروانی) با سطح پنجره و میزان درصد بهینه شیشه پنجره در شهر تهران در نظر گرفته شد. اتاقک مورد نظر مکعب‌مستطیلی با طول و عرض ۳/۶۵ × ۴/۸۷ متر و ارتفاع ۲/۴۳ متر با جهت‌گیری پنجره به سمت جنوب است (شکل ۶) که ابعاد مورد نظر به میانگین ابعاد اتاق خواب یک ساختمان مسکونی در تهران بسیار شباهت دارد (فیاض، ۱۳۸۷). شرایط مرزی جداره‌های اطراف اتاقک در تماس با شرایط محیطی بیرون بوده و در جبهه جنوبی پنجره‌ای به اندازه ۲۵ درصد مساحت سطح مفید داخلی به ابعاد ۱/۶۴ × ۲/۵ متر (ابعاد بهینه برای شهر تهران) در نظر گرفته شده است (فیاض، ۱۳۸۷). پنجره مورد استفاده دارای شیشه دوجداره است و جزئیات پنجره، کف و سقف اتاقک در همه حالات یکسان در نظر گرفته شد.



شکل ۶. مدل شبیه‌سازی شده

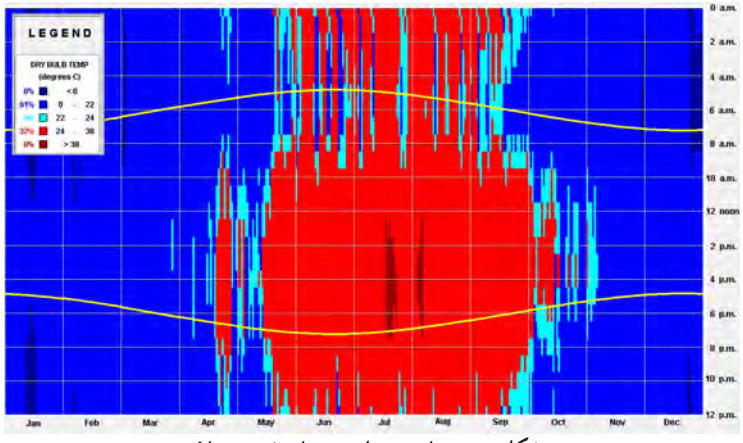
در فرایند شبیه‌سازی زون مربوطه به‌صورت کنترل شده است. گرمایش و سرمایش این زون با سیستم ترموستات با دمای تنظیم[۶] ۲۰ درجه سلسیوس برای اوقات سرد سال و ۲۸ درجه سلسیوس برای اوقات گرم سال کنترل می‌شود (مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۹، ۵۲). مصالح به‌کار رفته در دیوارهای خارجی به ترتیب از خارج به داخل، تخته سیمانی، عایق پلی‌استایرن (XPS)، مواد تغییرفازدهنده (PCM) و تخته گچی است. در جدول ۲ مشخصات مصالح به‌کار رفته آمده است و مشخصات فنی مواد تغییرفازدهنده ۲۱ تا ۲۹ درجه از شرکت BioPCM گردآوری شده است (URL2: Phasechange). مصالح مورد استفاده در سقف از خارج به داخل به ترتیب عایق رطوبتی، بتن، عایق پلی‌استایرن (XPS)، مواد تغییرفازدهنده (PCM) و تخته گچی و مصالح مورد استفاده در کف از خارج به داخل به ترتیب بتن، عایق پلی‌استایرن (XPS)، مواد تغییرفازدهنده (PCM) و لایه سیمانی است. مواد تغییرفازدهنده (PCM) مورد استفاده از شرکت BioPCM با نقطه‌های ذوب ۲۱، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۲۹ است که در تمامی حالات لایه‌های جدار ثابت فرض شد و تنها نقطه ذوب ماده تغییر پیدا کرد.

جدول ۲. مشخصات مصالح به‌کار رفته در مدل شبیه‌سازی شده

مصالح /مشخصات	ضریب هدایت حرارت [W/m.K]	وزن مخصوص خشک [kg/m³]	ظرفیت گرمایی ویژه [J/kg.K]	ضخامت [m]
تخته سیمانی	۰/۶۵	۱۸۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۱
عایق پلی استایرن (XPS)	۰/۰۴۱	۲۸	۱۲۱۰	۰/۰۵
مواد تغییرفازدهنده (PCM)	۰/۲	۲۳۵	۱۹۷۰	۰/۰۱
تخته گچی	۰/۲۵	۹۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۱
بتن	۲/۳	۲۴۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۱
عایق رطوبتی	۰/۲۳	۱۱۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۰۵

منبع: مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران

اطلاعات آب‌وهوایی در شبیه‌سازی، مربوط به سایت انرژی‌پلاس بوده (URL3: eere) و با استفاده از داده‌های ۱۵ ساله شهر تهران از ایستگاه مهرآباد تنظیم شده است. در شکل ۷ نمودار هم‌دمایی این داده‌های آب‌وهوایی با استفاده از نرم‌افزار کلایمت کانسالتنت[۷] ترسیم شده است. با توجه به این شکل محدوده دارای رنگ آبی روشن، ۲۲ تا ۲۴ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد و تقریباً می‌توان محدوده دوره گذر را به‌صورت کلی مشاهده کرد. در روند شبیه‌سازی بر روی این محدوده از سال تمرکز شده است و به‌صورت دقیق‌تر تأثیر جرم حرارتی بر این دوره مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۷. نمودار هم‌دمایی روزانه شهر تهران

منبع: URL4: Climate Consultant

جدول ۳. مشخصات اقلیمی شهر تهران

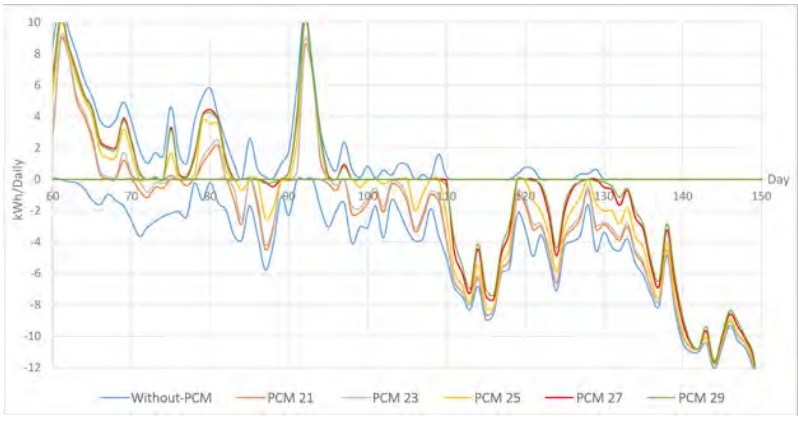
نام شهر (ایستگاه)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا [m]	روز درجات گرمایشی [°C–days]	روز درجات سرمایشی [°C–days]	دمای متوسط سالانه [°C]
تهران (مهرآباد)	۳۵° ۴۱′	۵۱° ۲۰′	۱۱۹۰/۸	۱۷۴۱	۹۰۸	۱۷/۴

منبع: URL5: chaharmahalmet

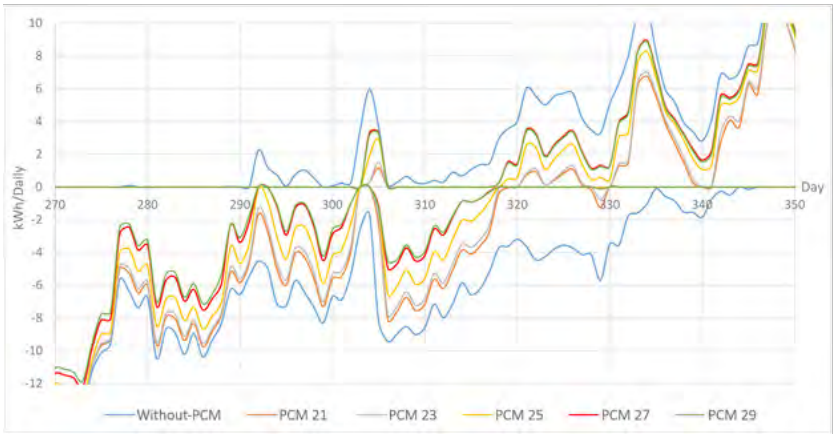
شبیه‌سازی

ابتدا مدل‌سازی اتاق نمونه در نرم‌افزار اکوتکت نسخه ۲۰۱۱ صورت گرفت و سپس با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس نسخه ۸ و در نظر گرفتن داده‌های اقلیمی شهر تهران خروجی‌های عددی بار حرارتی سالانه مدل به‌دست آمد. با توجه به موقعیت قرارگیری دوره گذر بهاری در بین فصل زمستان و بهار و دوره گذر پاییزی بین فصل تابستان و پاییز نمودارها براساس تقویم میلادی ترسیم شد.

برای بررسی شرایط و محدود کردن بازه زمانی دوره گذر فصلی نمودارها با استفاده از میزان انرژی مصرفی با توجه به دمای تنظیم در نظر گرفته شده (۲۰ و ۲۸ درجه، طبق مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان) به‌دست آمد و رفتار حرارتی PCM با نقطه ذوب متفاوت با توجه به بهترین حالت انرژی مصرفی نسبت به کل سال و تعداد روزهای افزایش یافته در طول دوره گذر فصلی مشخص شده است.

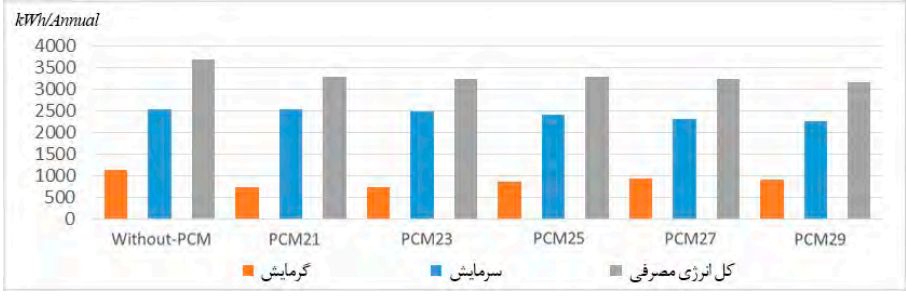


شکل ۸. میزان مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی در دوره گذر فصلی بهاری، بدون تهویه طبیعی

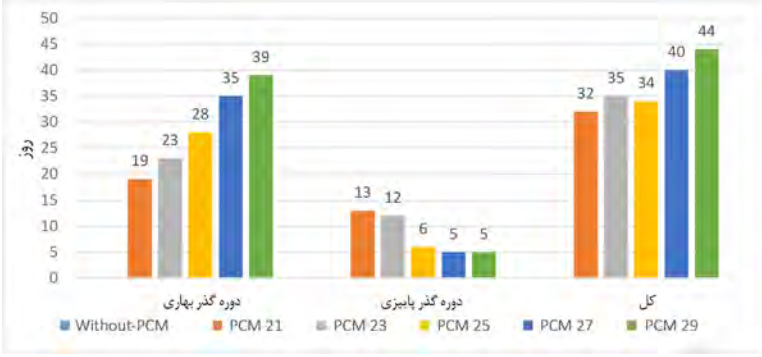


شکل ۹. میزان مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی در دوره گذر فصلی پاییزی، بدون تهویه طبیعی

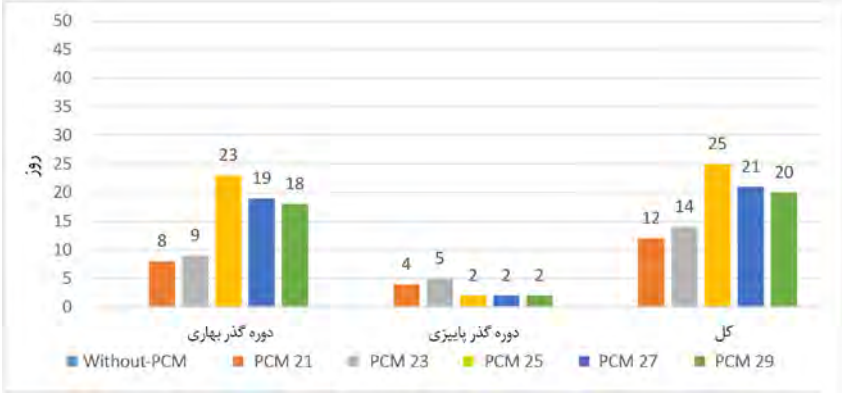
با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود که تعداد روزهای نزدیک به مصرف انرژی صفر کیلووات ساعت روزانه در گذر بهاری به مراتب بیشتر از گذر پاییزی است و از لحاظ طول دوره، گذر بهاری (حدود ۷۰ روز) در محدوده زمانی بیشتری از سال نسبت به دوره گذر پاییزی (حدود ۴۵ روز) برای حالت بدون تهویه طبیعی اتفاق می‌افتد. با مقایسه نمودار با و بدون PCM می‌توان به تأثیر این مواد در این دوره از سال پی برد. شدت نوسانات مصرف انرژی با توجه به دو نمودار فوق در دوره گذر پاییزی بیشتر از دوره گذر بهاری است.



شکل ۱۰. میزان مصرف انرژی سالانه، بدون تهویه طبیعی



شکل ۱۱. میزان تأثیر PCM بر طول دوره گذر فصلی تا میزان مصرف kWh ۰/۵ روزانه، بدون تهویه طبیعی



شکل ۱۲. میزان تأثیر PCM بر طول دوره گذر فصلی تا میزان مصرف kWh . روزانه، بدون تهویه طبیعی

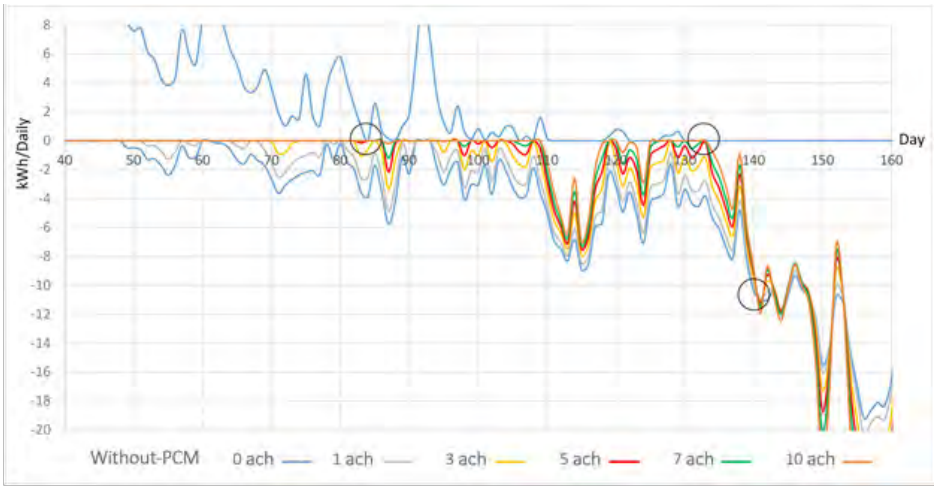
با توجه به شکل‌های ۸ تا ۱۲ با در نظر گرفتن شرایط بدون تهویه طبیعی، PCM25 با تعداد ۲۵ روز (۲۳ روز در دوره گذر بهاری و ۲ روز در دوره گذر پاییزی) یا ۶/۸ درصد کل سال با مصرف انرژی صفر کیلووات ساعت روزانه بهترین عملکرد را در بین سایر PCMها دارد، و در صورت لحاظ کردن مصرف انرژی ۰/۵ کیلووات ساعت در محدوده دوره گذر فصلی، PCM29 بیشترین تعداد روز (۴۴ روز یا ۱۲٪ اوقات سال) با مصرف انرژی کم را دارد. این میزان مصرف انرژی به‌وسیله سیستم‌های غیرفعال قابل تأمین است و می‌توان این محدوده را نیز جزء دوره گذر فصلی حساب کرد.

تأثیر تهویه طبیعی بر مواد تغییرفازدهنده (PCM)

در اقلیم گرم و خشک تهران می‌توان از تهویه طبیعی برای کاهش بار سرمایشی استفاده کرد و این امکان در دوره گذر فصلی آسایش بیشتری به همراه خواهد داشت. برای شرایط تهویه، مقدار متفاوت نرخ تهویه (ach ۰، ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰) با دبی ثابت در نظر گرفته شد. با توجه به شرایط حاکم بر دوره گذر فصلی با استفاده سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و تهویه طبیعی می‌توان بخش قابل توجهی از کاهش مصرف انرژی در ساختمان را در این دوره با مشکلات کمتری نسبت به سایر اوقات از سال فراهم کرد.

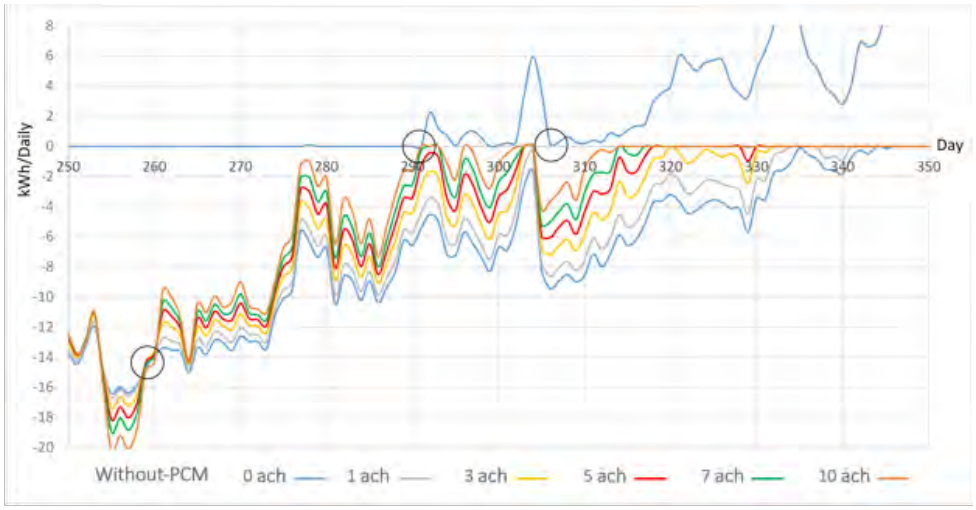
در ادامه شبیه‌سازی برای اوقات گرم سال (بار سرمایشی) و با در نظر گرفتن تهویه طبیعی انجام شد. در اوقات سرد سال نرخ تهویه صفر و فقط در طول کل سال میزان نشت هوای ۱ ach برای کل ساختمان در نظر گرفته شد.

در شکل‌های ۱۳ تا ۱۸ رفتار حرارتی متفاوت مواد تغییرفازدهنده (PCM) برای شرایط بدون PCM ، PCM21 و PCM29 در دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی برای نرخ‌های متفاوت تهویه ach ۰، ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰ نشان داده شده است.



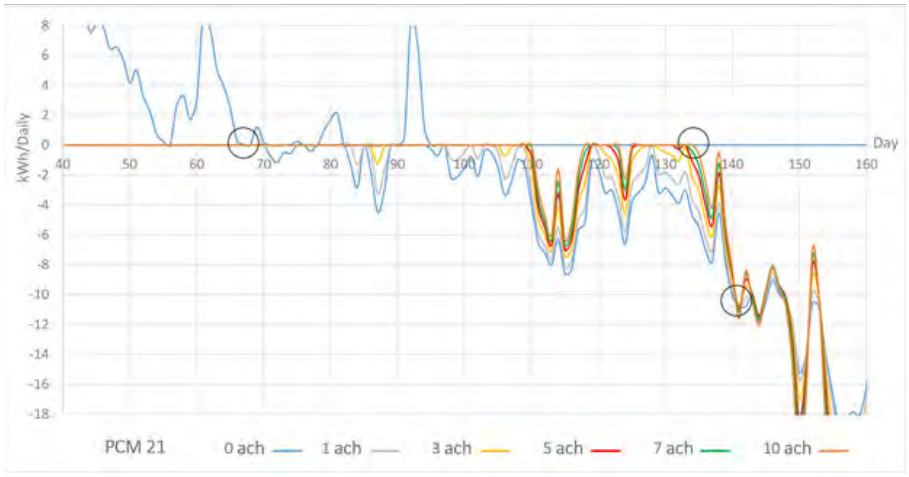
شکل ۱۳. تأثیر تهویه طبیعی بر دوره گذر بهاری، بدون PCM، تهویه طبیعی با میزان نرخ‌های تهویه ۰، ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰ ach

با توجه به شکل ۱۳ اولین تاریخ شروع دوره گذر بهاری برای حالت بدون PCM با تهویه ۱۰ ach در اوایل فروردین ماه است که با توجه به اینرسی بسیار ناچیز ساختمان رفتار حرارتی پویای ساختمان از بین می‌رود و ساختمان به‌صورت آنی عمل می‌کند. به این معنی که سیستم گرمایشی بلافاصله پس از سیستم سرمایشی شروع به کار خواهد کرد و بالعکس. گرمایش فوراً شروع شده و این دوره با نوسانات شدید دمایی و مصرف انرژی و عدم آسایش حرارتی همراه خواهد بود. در اواخر اردیبهشت ماه با وجود تمامی نوسانات دمایی به سمت فصل گرم تابستان پیش می‌رود. نقطه تغییر رفتار حرارتی اثر تهویه در اوایل خردادماه دیده می‌شود که از این تاریخ به بعد تهویه با اثر منفی خود باعث افزایش مصرف انرژی سرمایشی خواهد شد (به سمت گرمای تابستان پیش می‌رود).



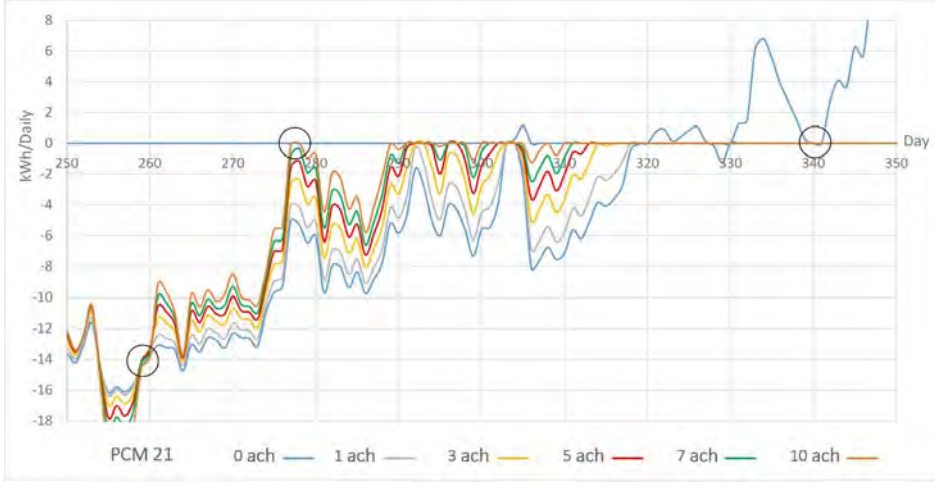
شکل ۱۴. تأثیر تهویه طبیعی بر دوره گذر پاییزی، بدون PCM، تهویه طبیعی با میزان نرخ‌های تهویه ۰، ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰ ach

در شکل ۱۴ نقطه تغییر رفتار حرارتی اثر تهویه در اواخر شهریور ماه دیده می‌شود که از این تاریخ به بعد تهویه با اثر مثبت خود باعث کاهش مصرف انرژی سرمایشی می‌شود به این معنی که گرمای تابستان در حال کاهش است و استفاده از تهویه طبیعی کارآیی دارد. باید به این نکته توجه کرد که قبل از این تاریخ در بازه‌های زمانی کوتاهی تهویه تأثیر مثبتی بر رفتار حرارتی و در جهت کاهش مصرف انرژی دارد ولی مجدداً برخی اوقات تأثیر تهویه منفی می‌شود. در این جداره بدون جرم حرارتی (PCM) اولین تاریخ با مصرف انرژی (kWh/Daily) ۰ با تهویه ۱۰ ach در اواخر مهرماه است که در همان تاریخ دوره گرمایش بلافاصله شروع می‌شود و در حقیقت با نبود جرم حرارتی دوره گذر در ساختمان از بین می‌رود.



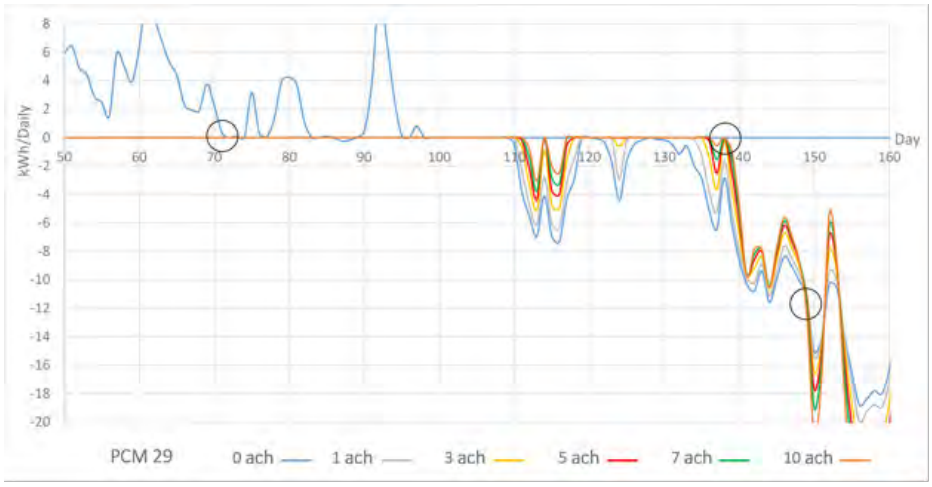
شکل ۱۵. تأثیر تهویه طبیعی بر دوره گذر بهاری، PCM21، تهویه طبیعی با میزان نرخ‌های تهویه ۰، ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰ ach

در دوره گذر بهاری (شکل ۱۵) اولین تاریخ شروع دوره گذر با تهویه ۱۰ ach در اواسط اسفندماه است و در اواخر اردیبهشت‌ماه دوره گذر فصلی به اتمام رسیده و به سمت نقطه تغییر رفتار حرارتی پیش می‌رود. نقطه تغییر رفتار حرارتی اثر تهویه در اوائل خردادماه است که از این تاریخ به بعد تهویه با اثر منفی خود باعث افزایش مصرف انرژی سرمایشی می‌شود.



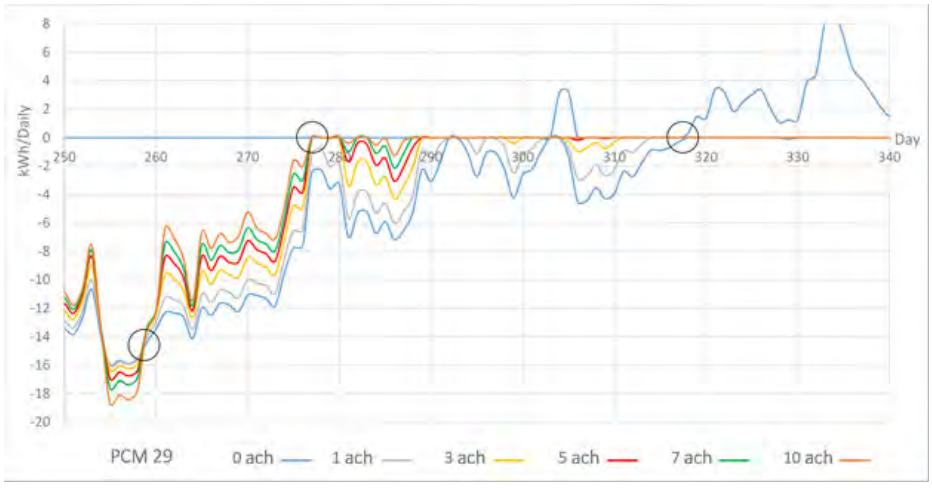
شکل ۱۶. تأثیر تهویه طبیعی بر دوره گذر پاییزی، PCM21، تهویه طبیعی با میزان نرخ‌های تهویه ۰، ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰

با PCM21، (شکل ۱۶) نقطه تغییر رفتار حرارتی اثر تهویه در اواخر شهریورماه و اولین تاریخ با مصرف انرژی صفر کیلووات ساعت روزانه با نرخ تهویه ach ۱۰ در اواسط مهرماه دیده می‌شود و نوسانات مصرف انرژی نسبت به تابستان کمتر است. در اواسط آذرماه با چند روز مصرف انرژی صفر کیلووات ساعت روزانه دوره گذر پاییزی پایان می‌یابد و وارد فصل سرما می‌شود. از نمودار PCMهای مختلف به‌خوبی می‌توان به تأثیر چشمگیر نرخ‌های متفاوت تهویه طبیعی بر کاهش مصرف انرژی در این دوره پی برد.



شکل ۱۷. تأثیر تهویه طبیعی بر دوره گذر بهاری، PCM29، تهویه طبیعی با میزان نرخ‌های تهویه ۰، ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰ ach

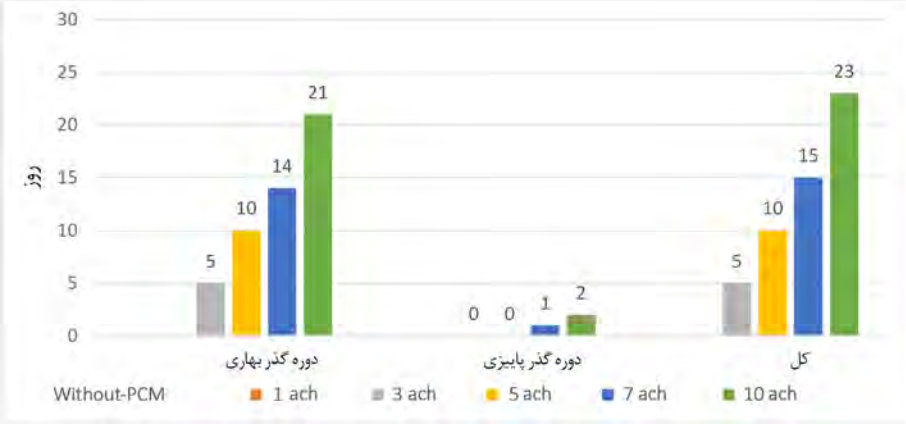
با PCM29 شروع دوره گذر بهاری از اواخر اسفند ماه و پایان دوره در اواخر اردیبهشت ماه است که با مقایسه نمودارها می‌توان تأثیر زیاد تهویه بر این نوع PCM و افزایش تعداد روزهای با مصرف انرژی صفر را دید. نقطه تغییر رفتار حرارتی اثر تهویه در اوایل خردادماه است که با توجه به اثر بسیار مثبت تهویه و نقطه ذوب ماده تغییرفازدهنده، PCM29 باعث جابه‌جایی زمان وقوع دوره گذر فصلی به بهترین حالت ممکن گردیده است.



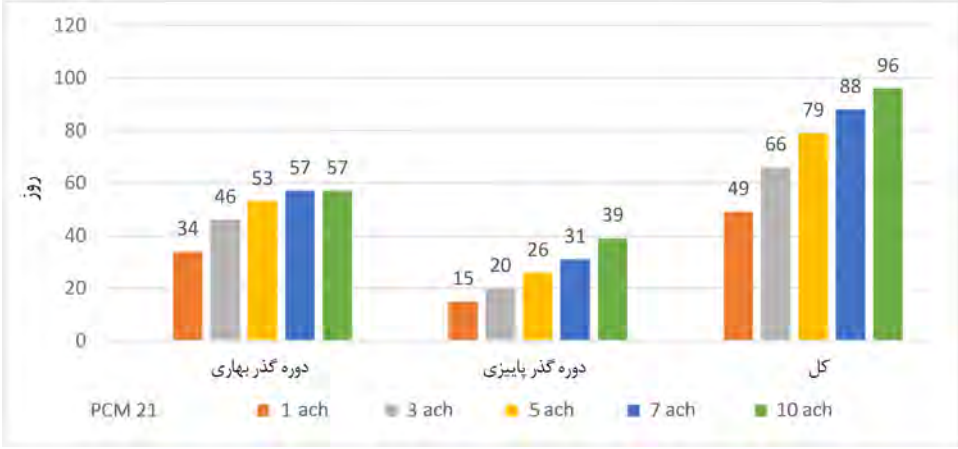
شکل ۱۸. تأثیر تهویه طبیعی بر دوره گذر پاییزی، PCM29، تهویه طبیعی با میزان نرخ‌های تهویه ۰، ۱، ۳، ۵، ۷، ۱۰ ach

شروع دوره در PCM با نقطه ذوب ۲۹ برای نرخ تهویه ach ۱۰ در اواسط مهرماه و پایان آن با یک پیوستگی مطلوب در اواسط آبان‌ماه است. نقطه تغییر رفتار حرارتی اثر تهویه در اواخر شهریورماه بوده که از این تاریخ به بعد تأثیر تهویه در جهت کاهش مصرف انرژی خواهد بود. به‌طور کلی یکی از اهداف استفاده از تهویه طبیعی در ساختمان‌های مسکونی، نزدیک شدن هرچه بیشتر روزهای ابتدایی یا پایانی دوره گذر فصلی به نقطه تغییر رفتار حرارتی اثر تهویه است. هرچه اولین روز شروع دوره گذر پاییزی به این نقطه نزدیکتر شود بر افزایش این دوره تأثیر بیشتری خواهد داشت. در دوره گذر بهاری هرچه روز پایانی دوره گذر به نقطه تغییر رفتار حرارتی نزدیکتر شود، اثر تهویه بیشتر و طول دوره افزایش خواهد یافت. نقطه تغییر رفتار حرارتی، حدوداً در اواخر شهریور ماه برای شروع دوره گذر فصلی پاییزی و در اوایل خردادماه برای پایان دوره گذر فصلی بهاری است.

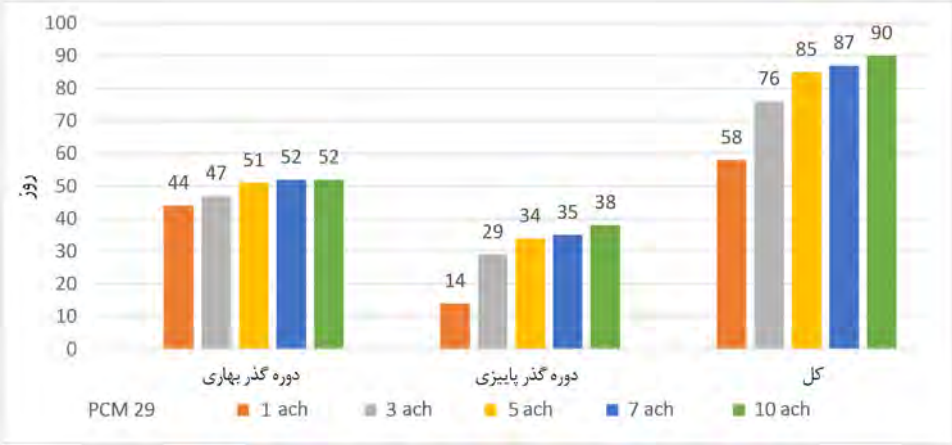
با توجه به شکل‌های ۱۷ و ۱۸ می‌توان منسجم‌ترین دوره گذر فصلی از لحاظ میزان نوسانات را به‌واسطه تأثیر ترکیبی تهویه و PCM مشاهده کرد. تأثیر تهویه ach ۵، ۷ و ۱۰ تا حدودی مشابه است و تأثیر یکسانی بر طول این دوره فصلی دارند.



شکل ۱۹. میزان تأثیر تهویه طبیعی با نرخ تعویض هوای متفاوت بر افزایش تعداد روز دوره گذر فصلی در کل سال با میزان مصرف تا kWh ۰/۵ روزانه، بدون PCM



شکل ۲۰. میزان تأثیر تهویه طبیعی با نرخ تعویض هوای متفاوت بر افزایش تعداد روز دوره گذر فصلی در کل سال با میزان مصرف تا kWh ۰/۵ روزانه، با PCM 21



شکل ۲۱. میزان تأثیر تهویه طبیعی با نرخ تعویض هوای متفاوت بر افزایش تعداد روز دوره گذر فصلی در کل سال با میزان مصرف تا kWh ۵/۰ روزانه، با PCM 29

در اینجا از بین نتایج و نمودارهای متعدد این پژوهش فقط سه حالت بدون PCM، با PCM21 و PCM29 که رفتار حراتی خاص‌تری در این دوره داشتند مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفتند.

با توجه به شکل ۱۹ افزایش میزان نرخ تهویه طبیعی در جدار بدون PCM باعث افزایش تعداد روزهای دوره گذر فصلی می‌شود. به علت اینرسی حرارتی بسیار کم جدار در دوره گذر پاییزی، تأثیر زیادی بر تعداد روزهای دوره گذر دیده نمی‌شود، اما در گذر بهاری به دلیل شرایط دمایی بیرون و تأثیر تهویه یک روند صعودی برای حالت بدون PCM وجود دارد. به‌طور کلی تهویه طبیعی ach ۱۰ باعث افزایش ۲۳ روز نسبت به حالت ach ۱، بر طول دوره گذر فصلی می‌شود.

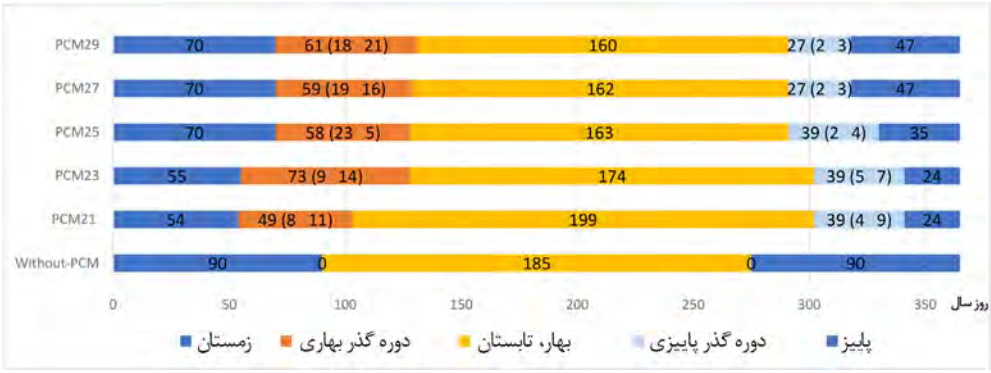
در مورد PCM21، با توجه به دوره گذر بهاری و انتقال از سرما به گرما، نرخ تهویه طبیعی تأثیر چندانی بر عملکرد PCM و میزان مصرف انرژی ندارد. با توجه به شکل ۲۰ و تشابه اثر نرخ تهویه ach ۷ و ۱۰ میزان تهویه ach ۷ مناسب است. در دوره گذر پاییزی افزایش نرخ تهویه باعث افزایش طول دوره می‌گردد و این روند صعودی است. در نهایت برآیند تأثیر تهویه در دوره‌های گذر، تأثیری صعودی در کل سال دارد و تهویه طبیعی با نرخ ach ۱۰ نسبت به ach ۱، ۴۷ روز به طول دوره گذر می‌افزاید. در PCMهای با نقطه ذوب پایین تهویه طبیعی باعث افزایش طول دوره می‌شود، یعنی هرچه نرخ تهویه بیشتر باشد، تعداد روزهای دوره گذر بیشتر خواهد شد.

در مورد PCM29 میزان تأثیر نسبت به حالت PCM21 درجه در نرخ تهویه ach ۵ در دوره گذر بهاری بیشتر و در دوره گذر پاییزی کمتر است (شکل ۲۱). در نرخ‌های تهویه متفاوت ach ۵، ۷، ۱۰ تغییر چشمگیری در تعداد روزهای افزایش یافته دیده نمی‌شود ولی در نرخ‌های تهویه پایین‌تر (ach ۱، ۳) میزان افزایش تعداد روزهای دوره گذر فصلی پاییزی تقریباً دو برابر است و رابطه متقابلی با گذر از گرما به سرما دارد و باعث افزایش عملکرد PCM می‌شود. تهویه طبیعی با نرخ تهویه ach ۱۰ نسبت به ach ۱، ۳۲ روز به طول دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی می‌افزاید.

تفسیر نتایج

با توجه به نتایج شبیه‌سازی نمودارهای سالانه (شکل‌های ۲۲ تا ۲۷) موقعیت دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی (شروع از اوایل زمستان با تقویم میلادی) به‌دست آمد. در دوره‌های گذر فصلی بهاری و پاییزی

دو عدد در داخل پرانتز وجود دارد که عدد سمت چپ تعداد روز با مصرف انرژی صفر کیلووات ساعت روزانه و عدد سمت راست تعداد روزهای تا ۰/۵ کیلووات ساعت روزانه مصرف انرژی است. سایر اعداد طول دوره‌های مختلف سال و بازه زمانی دوره گذر فصلی (شروع و پایان، اولین و آخرین روز با مصرف انرژی کمتر از ۰/۵ کیلووات ساعت روزانه) است که به‌خوبی تأثیر تهویه طبیعی و PCM با نقطه ذوب متفاوت را نشان می‌دهد.

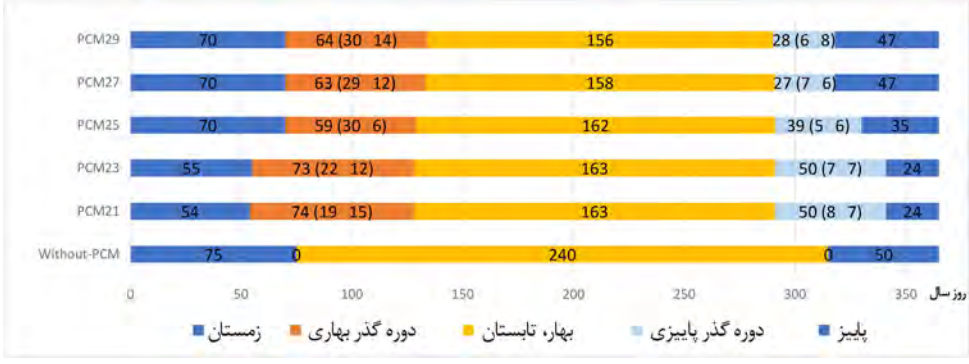


شکل ۲۲. طول و موقعیت دوره گذر فصلی در سال، تا ۰/۵ kWh روزانه مصرف انرژی، بدون تهویه

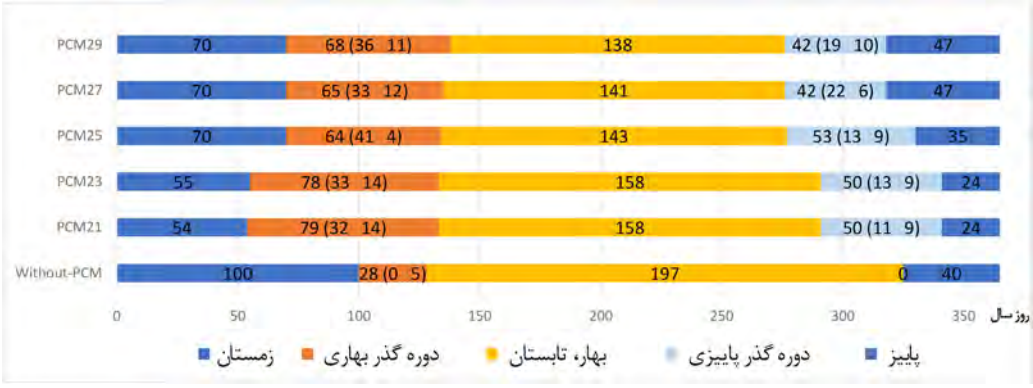
بدون اعمال تهویه طبیعی، دوره گذر فصلی در اتاقک بدون جرم حرارتی حذف می‌شود و این امر به تأثیر بسیار زیاد جرم حرارتی اشاره دارد. زمان وقوع دوره برای PCMهای مختلف در طول سال متفاوت است که در دوره گذر بهاری PCM25 با تعداد ۲۵ روز با مصرف صفر کیلووات ساعت روزانه، بیشترین تأثیر را بر افزایش طول دوره برای حالت بدون تهویه طبیعی داشته است و مواد تغییرفازدهنده (PCM) با نقطه ذوب متفاوت به ترتیب زیر در افزایش تعداد روز با مصرف انرژی صفر کیلووات ساعت تأثیرگذار هستند:

PCM25> PCM27> PCM29

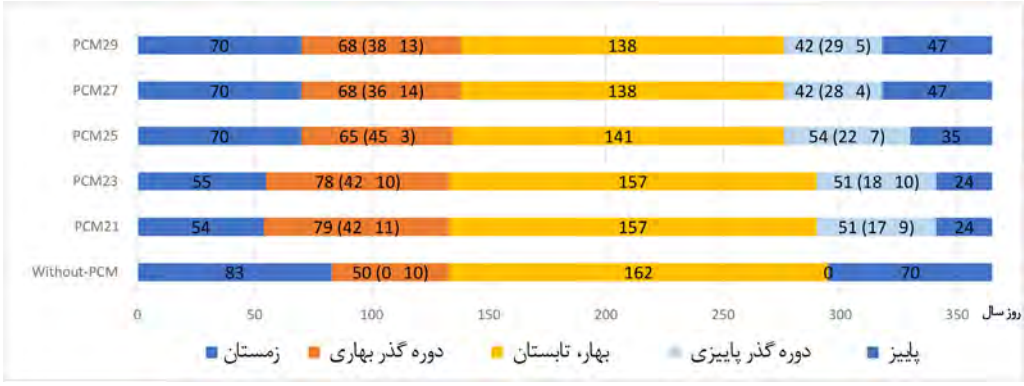
PCM25 با توجه به نوسانات دمایی در دوره گذر فصلی، شرایط مناسب‌تری برای عملکرد حرارتی و افزایش تعداد روز با مصرف صفر کیلووات ساعت روزانه دارد. در خصوص مصرف ۰/۵ کیلووات ساعت روزانه PCM 29 با ۴۴ روز بهترین عملکرد را دارد.



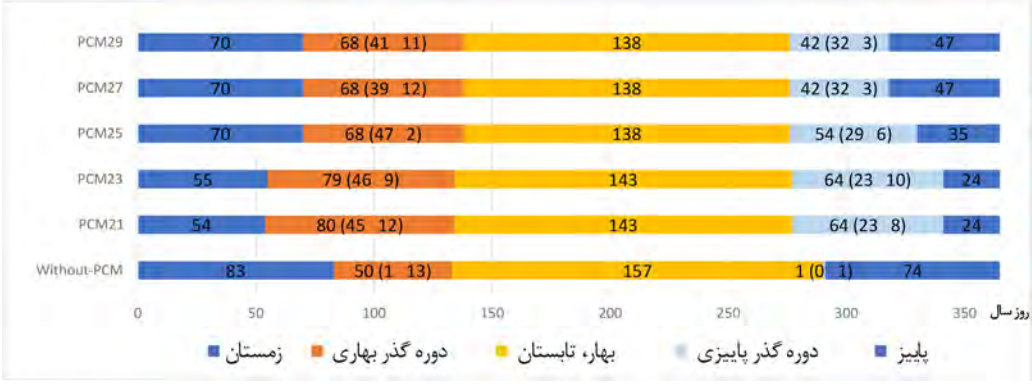
شکل ۲۳.طول و موقعیت دوره گذر فصلی در سال، تا ۰/۵ kWh روزانه مصرف انرژی، با نرخ تهویه ۱ ach



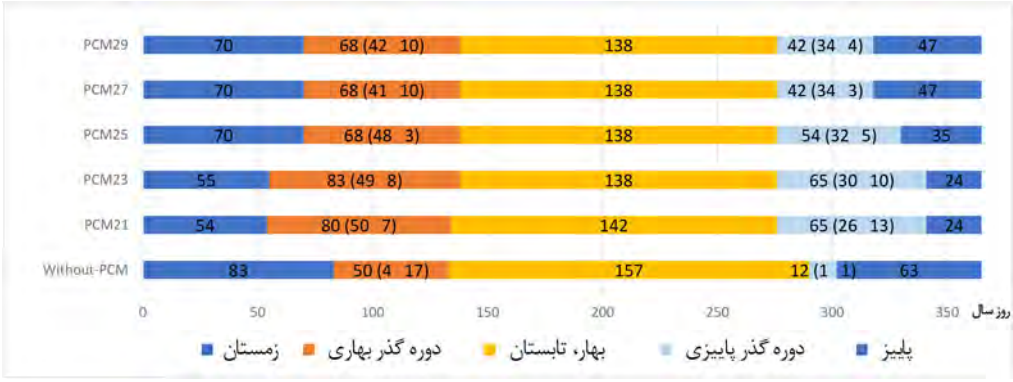
شکل ۲۴. طول و موقعیت دوره گذر فصلی در سال، تا kWh ۰/۵ روزانه مصرف انرژی، با نرخ تهویه ach ۳



شکل ۲۵. طول و موقعیت دوره گذر فصلی در سال، تا kWh ۰/۵ روزانه مصرف انرژی، با نرخ تهویه ach ۷



شکل ۲۶. طول و موقعیت دوره گذر فصلی در سال، تا kWh ۰/۵ روزانه مصرف انرژی، با نرخ تهویه ach ۷



شکل ۲۷. طول و موقعیت دوره گذر فصلی در سال، تا kWh ۰/۵ روزانه مصرف انرژی، با نرخ تهویه ach ۱۰

- با افزایش نرخ تهویه، طول دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و با نرخ تهویه ach ۷ و ۱۰، طول دوره از لحاظ زمان شروع و پایان به ثبات می‌رسد و تأثیری بر جابه‌جایی زمان شروع و پایان این دوره ندارد.
- با توجه به ماهیت شرایط تهویه طبیعی، با افزایش نرخ تهویه در این دوره، در زمان پایان دوره گذر فصلی بهاری و شروع دوره گذر پاییزی به ثباتی نسبی خواهد رسید که جهت تصمیم‌گیری صحیح در مورد تأسیسات ساختمانی و زمان تغییر سیستم گرمایش به سرمایش و بالعکس در دوره گذر فصلی و کاهش مشکلات موجود قابل توجه است.
- نرخ تهویه طبیعی ach ۱، ۳ و ۵ اغلب با طراحی صحیح و جهت‌گیری مناسب ساختمان در جهت باد مطلوب و تعیین مکان ساختمان‌ها نسبت به یکدیگر قابل دستیابی است (رازجویان، ۱۳۸۶، ۸۶) و در نتیجه اثر تهویه برای خنک‌سازی فضای داخل قابل توجه خواهد بود. مثلاً برای PCM29 و تهویه ach ۳ نسبت به حالت ach ۱ طول دوره تا ۱۸ روز افزایش می‌یابد.
- PCM25 در دوره گذر بهاری تا نرخ تهویه ach ۷ بهترین تأثیر را در افزایش تعداد روزهای دوره گذر با مصرف انرژی صفر کیلووات ساعت روزانه دارد و با نرخ تهویه ach ۱۰ مواد تغییرفازدهنده با نقطه ذوب پایین‌تر به دلیل اصلاح رفتار حرارتی با توجه به نقطه ذوب پایین و گرم بودن هوا تأثیرگذارتر می‌شوند. با توجه به نقطه ذوب پایین هرچه نرخ تهویه افزایش یابد طول دوره گذر افزایش می‌یابد، اما این نرخ تهویه در ساختمان‌های مسکونی خیلی مناسب نیست.
- با افزایش نرخ تهویه (ach ۱۰) میزان تأثیر دمای ذوب PCM29 در این دوره از سال به حداقل می‌رسد و نقطه ذوب ماده تغییرفازدهنده (PCM) همراه با تهویه بر طول دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی تفاوت زیادی ایجاد نمی‌کند.
- PCM27 و PCM29 در دوره گذر پاییزی بیشترین تأثیر را دارد و تقریباً میزان تأثیر یکسانی با PCM27 در این دوره دارد، ولی با توجه به کاهش مصرف انرژی بیشتر PCM29 گزینه مناسب‌تری برای گذر پاییزی است.
- میزان تأثیر تهویه طبیعی بر جزئیات بدون PCM در طول گذر پاییزی بسیار ناچیز است و در دوره گذر بهاری مؤثرتر است و روند صعودی دارد.
- میزان تأثیر تهویه طبیعی بر PCM21 در گذر بهاری تا نرخ ach ۵ قابل قبول و در نرخ ach ۷ و ۱۰ بسیار ناچیز است. این روند در گذر پاییزی صعودی است.

- میزان تأثیر تهویه طبیعی بر PCM29 برای گذر بهاری و پاییزی تا نرخ ۵ ach مطلوب است و بیشتر از آن تأثیر قابل توجهی وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

دوره گذر فصلی در ساختمان‌های مسکونی باعث مشکلات زیادی در سیستم‌های تأسیساتی و آسایش حرارتی در ساختمان‌های مسکونی می‌گردد. با توجه به تأثیر جرم حرارتی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در شرایط داخلی ساختمان، تأثیر این عامل مهم در دوره گذر فصلی در شهر تهران برای افزایش طول دوره گذر فصلی و کاهش مشکلات مربوط به دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی بررسی شد.

در این زمینه جرم حرارتی نوینی تحت عنوان مواد تغییرفازدهنده (PCM) که بر پایه گرمای نهان ذوب عمل می‌کنند در سبک‌سازی و ساختمان‌های بلندمرتبه به‌کار می‌رود. این تحقیق با محدود کردن مطالعه در بازه زمانی دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی در ساختمان‌های مسکونی در اقلیم گرم و خشک (شهر تهران) به بررسی رفتار حرارتی مواد تغییرفازدهنده (PCM) در این دوره پرداخته شد. در این زمینه اثر مواد تغییرفازدهنده (PCM) با نقطه ذوب مختلف ۲۱، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۲۹ درجه سلسیوس به‌وسیله نرم‌افزار انرژی‌پلاس (نسخه ۸) شبیه‌سازی شد و تأثیر آنها بر دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی مورد بررسی قرار گرفت. اعتبارسنجی مدل PCM در نرم‌افزار انرژی پلاس به‌وسیله یک کار میدانی در دانشگاه آریزونا که به مدت یک سال داده‌برداری شده بود، صورت گرفت.

با توجه به نتایج به‌دست آمده ماده تغییرفازدهنده (PCM) با دمای ذوب ۲۹ درجه سلسیوس، با کاهش ۱۵٪ مصرف انرژی و افزایش ۲۰٪ طول دوره نسبت به کل سال با نرخ تهویه طبیعی ach ۵، بیشترین تأثیر را بر کاهش مصرف انرژی و افزایش طول دوره گذر فصلی بهاری و پاییزی دارد و می‌تواند در کاهش مشکلات مربوط به این دوره و کارکرد تأسیسات تأثیر بسزایی داشته باشد. در صورت استفاده از این نوع PCM، زمان شروع دوره گذر بهاری ۲۲ اسفندماه تا ۲۹ اردیبهشت و گذر پاییزی ۱۳ مهرماه تا ۱۴ آبان خواهد بود که با ۳۸ روز در دوره گذر بهاری و ۲۹ روز در دوره گذر پاییزی با مصرف انرژی صفر کیلووات ساعت روزانه باعث کاهش مشکلات حرارتی و عدم آسایش حرارتی و کارکرد سیستم‌های تأسیساتی در ساختمان می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

1. Low energy building
2. Phase Change Material (PCM)
3. ASHRAE Standard 55–2004
4. EnergyPlus
5. Ecotect
6. Setpoint
7. Climate Consultant

فهرست منابع

- آیین، سمیرا، خداکرمی، جمال، و محمدکاری، بهروز (۱۳۹۲). «بررسی تأثیر تخته‌های گچی حاوی مواد تغییرفازدهنده (PCM) در عملکرد حرارتی ساختمان‌هایی با اینرسی حرارتی بالا»، دانشگاه ایلام.
- امامی‌فر، آرمین (۱۳۹۳). «بررسی روش‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی»، اولین همایش ملی مدیریت انرژی‌های نو و پاک.
- حیدری، شاهین، و غفاری جباری، شهلا (۱۳۸۹). «تعیین محدودهٔ زمانی آسایش حرارتی برای شهر تبریز»، *مهندسی مکانیک مدرس*، ۴.
- رازجویان، محمود (۱۳۸۶). *آسایش در پناه باد*، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، چاپ دوم.
- سلگی، ابراهیم، محمدکاری، بهروز، حسینی، بهشید، و فیاض، ریما (۱۳۹۳). «بهینه‌سازی جرم حرارتی موجود در سیستم تهویه شبانه»، دانشگاه هنر تهران.
- فیاض، ریما (۱۳۸۷). «تعیین سطح بهینه بازشوهای شفاف در ساختمان‌های مسکونی برای پهنه‌بندی‌های اقلیمی مختلف ایران»، طرح پژوهشی دانشگاه هنر تهران.
- قویدل رحیمی، یوسف، و احمدی، محمود (۱۳۹۲). «برآورد و تحلیل زمانی آسایش اقلیمی شهر تبریز»، *مجله جغرافیا و توسعه*، ۳۳.
- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۹). *مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث نوزدهم صرفه جویی در مصرف انرژی*، ویرایش سوم.
- مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (۱۳۷۱). *فراورده‌ها و مصالح ساختمانی - خواص حرارتی، رطوبتی مقادیر طراحی دجدول‌بندی شده*، چاپ اول.

- Betts, A. K. (2011). *Seasonal climate transitions in New England,* Royal meteorological society.
- Diakaki. C., Grigoroudis. E, & Kolokotsa. D. (2008). "Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings", *Energy and Buildings,* 40, 1747–1754.
- Feng. L., Zhao. W., Zheng. J., Frisco. S., Song. P., & Li. X (2011). "The shape-stabilized phase change materials composed of polyethylene glycol and various mesoporous matrices", *Solar Energy Materials and Solar Cells.*
- Frank. B. (2001). "Phase change material for space heating and cooling", University of South Australia, Sustainable Energy Center, Presentation.
- Guide A: Environmental design – CIBSE (1999). Chartered Institution of Building Services Engineers, London.
- Huang, M.J., Eames, P.C., & Hewitt, N.J. (2006). "The application of a validated numerical model to predict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building", *Solar Energy Materials & Solar Cells,* 90, 1951-1960.
- Jin, X., Medina, M.A., & Zhang, X. (2016). "Numerical analysis for the optimal location of a thin PCM layer in frame walls", *Applied Thermal Engineering,* 103, 1057–1063.
- Lu, S., Chen, Y., Liu, S., & Kong, X. (2016). "Experimental research on a novel energy efficiency roof coupled withPCM and cool materials", *Energy and Buildings,* 127, 159–169.
- Muruganantham, K., Phelan, P., Horwath, P., Ludlam, D., & Mcdonald, T. (2010). "Experimental investigation of a bio-based phase-change material to improve building energy performance", *ASME.*
- Muruganantham, K., Phelan, P., Lee, T., & Reddy, A. (2010). "Application of Phase Change Material in Buildings: Field Date vs: EnergyPlus Simulation", Arizona state university.

- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J, Pout, C. (2008). "A review on buildings energy consumption information", *Energy and Buildings,* 40 (3), 394–398.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., & Buddhi, D. (2009). "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 13, 318–345.
- Shilei, L., Neng, Z., & Guohui, F. (2006). "Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter". *Energy and Building,* 38, 18–24.
- Wang, X., Yu, H., Mei Z., & Lu L. (2016). "Experimental assessment on the use of phase chang materials (PCMs)-bricks in the exterior wall of a full-scale room", *Energy Conversion and Management,* 120, 81–89.
- Weinläder, H., Klinker, F., & Yasin, M. (2016). "PCM cooling ceilings in the Energy Efficiency Center—passive cooling potential of two different system designs", *Energy and Buildings,* 119, 93–100.
- Zhang, Y.P., Lin, K.P., Yang, R., Di, H.F., & Jiang, Y. (2006). "Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings", *Energy and Building,* 38, 1262–9.
- URL1:https://etown.edu/offices/facilities-management/files/air-conditioning%20to%20heat%20transition.pdf
- URL2:http://phasechange.com/
- URL3:http://apps1.eere.energy.gov/
- URL4:http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/request-climate-consultant.php
- URL5: http://www.chaharmahalmet.ir/