



# ارزیابی تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در دیواره بادگیر بر بهبود عملکرد آن

(مورد پژوهی: اقلیم گرم و خشک شهر یزد)

سید حسین نشاط صفوی<sup>1</sup> و سید رحمان اقبالی<sup>2\*</sup>

تاریخ دریافت: 1400/02/09

تاریخ پذیرش: 1400/08/21

**چکیده:** بادگیر یکی از عناصر مهم معماری سنتی ایران است که به عنوان راهکاری غیر فعال به بهبود تهویه طبیعی در ساختمان کمک می‌کند. در این راستا به نظر می‌رسد استفاده از جرم حرارتی به ویژه روش گرمای نهان برای ذخیره انرژی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) می‌تواند به بهبود عملکرد بادگیر کمک کند. پژوهش حاضر نیز با هدف بررسی تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در دیواره بادگیر بر بهبود دمای هوا ساختمان انجام شده است. در راستای اهداف تحقیق نیز از روش شبیه‌سازی رایانه‌ای با کمک نرم‌افزار انرژی پلاس و همچنین اندازه‌گیری‌های میدانی (Experimental data) استفاده شده است. در نهایت نتایج نشان می‌دهد: دامنه نوسانات دمایی هوای داخل ساختمان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با دماهای ذوب مختلف (21, 24, 28, 30, 32) درجه سانتی‌گراد نسبت به حالت پایه (without PCM) کاهش یافته و به محدوده آسایش حرارتی ساکنین نزدیک‌تر شده و میانگین نوسانات دمای هوا در ماه‌های گرم از 28 به 23 درجه سانتیگراد کاهش یافته است. با مقایسه تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با نقاط ذوب مختلف، PCM با نقطه ذوب 28 درجه سانتی‌گراد تأثیر بیشتری بر کاهش دمای ساختمان داشته است. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با نقطه ذوب مناسب سبب افزایش ساعات تهویه طبیعی در ساختمان می‌شود. به گونه‌ای که مصرف انرژی الکتریکی نیز حدود 5 درصد کاهش یافته است.

**واژگان کلیدی:** مواد تغییر فاز دهنده (PCM)، بادگیر، تهویه طبیعی، مصرف انرژی، آسایش حرارتی.

<sup>1</sup> کارشناسی ارشد، معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

<sup>2</sup> دانشیار، معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران. (نویسنده مسئول)،

s.r.eghbali@arc.ikiu.ac.ir

## 1- مقدمه

توسعه فضاهای تولیدی و گسترش شهرها سبب افزایش تقاضای مصرف انرژی در همه سطوح شده است. افزایش تقاضای انرژی به معنای افزایش تولید و استفاده از منابع سوخت‌های فسیلی به عنوان یک منبع رایج طی سده گذشته است. افزایش تولید، استخراج و استفاده از منابع انرژی فسیلی سبب تخریب لایه ازن و آسیب‌های اساسی به چرخه‌های محیط زیست شده است. بنابراین استفاده از استراتژی‌های خلاقانه مبتنی بر راه حل‌های سازگار با محیط برای بهینه‌سازی عملکرد انرژی در ساختمان‌ها بسیار تأثیرگذار است. از سوی دیگر منابع رو به پایان سوخت‌های فسیلی، بسیاری را به فکر استفاده از منابع جایگزین انداخته است. در صنعت ساختمان نیز گرایش به راهکارهای تولید انرژی پاک و همسازی با اقلیم مدتی است که پررنگ شده است (Tronchin & Fabbri, 2008). این راهکارها در بخش‌های مختلف ساختمان بر اساس اقلیم و رویکرد سرمایشی یا گرمایشی غالب آن منطقه ارائه می‌شود. در این میان به علت اهمیت سرمایش در روزهای گرم سال به ویژه در اقلیم‌های گرم‌وخشک که در بیشتر روزهای سال نیاز به سرمایش در آن‌ها احساس می‌شود، راهکارهای ایجاد تهویه و کوران طبیعی هوا در فضا، به اشکال متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته است. از سویی استفاده از سیستم‌های غیر فعال انرژی می‌تواند در کاهش مصرف انرژی مؤثر شود. استفاده از بادگیرها به عنوان سیستمی غیر فعال به ویژه در بخش تهویه طبیعی در اقلیم گرم‌وخشک بسیار مورد توجه است. همچنین استفاده از راهکاری برای افزایش کارایی بادگیرها جهت بهبود تهویه طبیعی و آسایش حرارتی ساکنین به ویژه در اقلیم‌های گرم‌وخشک ایران می‌تواند نقش مؤثری در کاهش بار سرمایشی ساختمان، مصرف انرژی و آلودگی هوا داشته باشد. در حوزه ساختمان‌هایی با کارایی بالا، بادگیرها می‌توانند به عنوان یکی از اجزای اصلی و رویکرد خلاقانه برای کاهش مصرف انرژی و بهبود شرایط آسایش در نظر گرفته شوند. به علاوه توجه به موقعیت جغرافیایی یا منطقه‌ای خاص استفاده از بادگیرها نشان دهنده میزان تأثیرگذاری این عناصر بر آسایش حرارتی ساکنین ساختمان‌های این اقلیم است.

طبیعتاً گسترش این رویکرد منجر به کاهش وابستگی به سیستم‌های تهویه مطبوع مکانیکی، کاهش مصرف انرژی و در نتیجه کاهش انتشار آلاینده‌های هوا و مشکلات زیست‌محیطی نیز می‌شود. با وجود این ساختار قدیمی بادگیرها محدودیت‌های قابل توجهی نسبت به سیستم‌های تهویه مطبوع مکانیکی فعلی دارد، اما با پیشرفت علوم مواد و مصالح ساختمانی و ارائه مواد تغییر فاز دهنده توسط پژوهشگران، می‌توان از توان بالقوه تغییر فاز این مواد برای ذخیره انرژی حرارتی به منظور بهبود کارایی سیستم‌های غیر فعال به ویژه بادگیر استفاده کرد.

## 1-1- پیشینه پژوهش

برای فهم خلاء مطالعاتی پژوهش و نیز درک مفاهیم اولیه و مرتبط با آن، در زمینه موضوع پژوهش، به ویژه در بخش تهویه طبیعی، بادگیر و مواد تغییر فاز دهنده، پژوهش‌هایی در سراسر جهان انجام شده است که در این راستا می‌توان به موارد زیر در هر بخش اشاره کرد. منتظری و همکاران در سال 2018 میلادی (Montazeri & Montazeri, 2018)، ارزیابی دقیقی از تأثیر خروجی‌ها بر عملکرد تهویه یک ساختمان مجزا با استفاده از بادگیر را ارائه داده‌اند. ارزیابی بر مبنای سه شاخص عملکردی تهویه؛ نرخ جریان هوای شامل شده<sup>1</sup>، سن هوا<sup>2</sup> و بهره‌وری تغییر هوا<sup>3</sup> مطرح شد. در ادامه شبیه‌سازی CFD و اندازه‌گیری‌های تونل باد، نشان داده است که استفاده از خروجی‌های بسیار نزدیک به ورودی باد، نه تنها جریان هوای القا شده را افزایش نمی‌دهد، بلکه منجر به کاهش چشمگیر کیفیت هوا در داخل نیز می‌شود. به عبارت دیگر ترکیبی از بادگیر و پنجره یکنواخت نسبت به استفاده از بادگیرهای دوسویه که منجر به کمترین کیفیت هوا در محیط داخلی و بازده تغییر هوا می‌شوند، برتری ویژه‌ای دارند. از سویی نیز می‌توان به پژوهش جمعه‌زاده و همکاران در سال 2017 (Jomehzadeh et al., 2017) اشاره کرد که به ارزیابی تأثیر بادگیر بر کیفیت هوای داخل<sup>4</sup> و آسایش حرارتی<sup>5</sup> پرداخته‌اند. در این پژوهش با بررسی عملکرد انواع بادگیرها، تأثیر آن‌ها را بر نرخ جریان هوا، نرخ تعویض هوا، میزان کربن دی‌اکسید، تأثیر تعویض هوا و سن هوا مورد ارزیابی قرار دادند و میزان بهبود کیفیت هوای داخل و آسایش



هیزلبرگ در سال 2018 به کاربرد مواد تغییر فازدهنده جهت استفاده از خاصیت حرارتی آن‌ها در تهویه ساختمان‌ها پرداخته‌اند؛ به نحوی که در تابستان، در مد خنک‌سازی با تبدیل از حالت جامد به مایع حرارت را از محیط می‌گیرد و باعث خنک‌سازی هوای عبوری می‌شود و در شب هم در مد عکس با تبدیل شدن از حالت جامد به مایع با گرفتن سرمای محیط باعث گرم شدن هوای عبوری می‌شود. به علاوه استفاده از مواد تغییر فازدهنده در ساختمان سبب کاهش نوسانات دمایی می‌شود که این امر سبب افزایش آسایش حرارتی در ساختمان می‌شود (Gholamibozanjani & Farid, 2020). بنابراین می‌توان گفت که تهویه طبیعی، بادگیرها و استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در تحقیقات بسیار مورد بررسی قرار داده شده است اما در هیچ یک از آن‌ها به بررسی نقش انواع موارد تغییر فاز دهنده بر افزایش کارایی بادگیرها در اقلیم گرم‌وخشک ایران با اهداف مورد نظر در پژوهش حاضر پرداخته نشده است. این پژوهش نیز با هدف بررسی تأثیر استفاده از مواد تغییر فازدهنده با نقطه ذوب های متفاوت (21, 24, 28, 30, 32) در دیواره ورودی بادگیر بر کاهش بار سرمایشی ساختمان، افزایش آسایش حرارتی و تهویه طبیعی در اقلیم گرم‌وخشک ایران در شهر یزد، جهت رفع خلاء مطالعاتی در این زمینه انجام شده است. در راستای دست یابی به اهداف تحقیق از روش شبیه‌سازی رایانه‌ای با نرم‌افزار انرژی پلاس و نیز اندازه‌گیری‌های میدانی استفاده شده است. به نظر می‌رسد استفاده از مواد تغییر فازدهنده در دیواره بادگیر راهکار مناسبی برای افزایش کارایی بادگیرها باشد، به گونه‌ای که هم کارایی بادگیرها را زنده کند و هم پاسخگوی عملکرد مورد انتظار عصر خود باشد.

## 1-2- چارچوب نظری

### 1-2-1- تهویه طبیعی

تهویه طبیعی به عنوان یک راهکار غیر فعال علاوه بر بهبود شرایط آسایش حرارتی ساکنین سبب کاهش مصرف انرژی هم می‌شود. اساس سرمایش از طریق تهویه جابه‌جایی هواست که با افزایش قدرت تبخیر باعث ایجاد سرما می‌شود. در کاربردهای غیر فعال، حرکت هوا یا با

حرارتی را نشان می‌دهند. تان و دنگ نیز در سال 2017 میلادی (Tan & Deng, 2017) به بررسی توان بالقوه تهویه طبیعی ساختمان‌های مسکونی برای یک خانه معمولی در سه منطقه پرجمعیت آب و هوایی استرالیا پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داده است که آسایش حرارتی داخل ساختمان در تمام طول سال تنها با استفاده از تهویه طبیعی، به جز دوره‌های غیر استاندارد برای تهویه طبیعی، در تابستان داروین و زمستان ملبورن رخ می‌دهد. یافته‌های این مقاله می‌تواند برای بهبود درک پتانسیل تهویه طبیعی برای طراحی آگاهانه براساس انواع جریان‌ات هوا در شرایط آب‌وهوایی ساختمان‌های مسکونی استرالیا مفید واقع شود. همچنین می‌توان به پژوهش سلگی و همکاران (Solgi et al., 2019) در زمینه مطالعه پارامتریک مواد تغییر فازدهنده در تهویه شبانه اشاره کرد. این مطالعه، رفتار مواد تغییر فاز دهنده را در شرایط آب‌وهوایی متفاوت مورد ارزیابی قرار داده است. پژوهش مورد نظر رابطه میزان مواد تغییر فازدهنده با انتقال حرارت، جریان تهویه شبانه، میزان تغییرات دما، عایق حرارتی و ذخیره انرژی را نشان می‌دهد. روش این پژوهش بررسی تجربی مدل کالری متر در مقیاس واقعی و شبیه‌سازی عددی مواد تغییر فازدهنده در سه شرایط اقلیمی متفاوت است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که استفاده از این مواد بر عملکرد تهویه شبانه اقلیم استوایی هیچ تأثیری نداشته است اما با این وجود در اقلیم نیمه‌استوایی و گرم‌وخشک، تغییر ست‌پوینت ترموستات سرمایشی، به خوبی عایق حرارتی، نقش به‌سزایی در بهبود عملکرد تهویه شبانه دارد. از سوی دیگر یکی از روش‌های افزایش کارایی تهویه طبیعی استفاده از مواد تغییر فازدهنده است. در این راستا هو و هیزلبرگ در سال 2018 (Hu & Heiselberg, 2018) به کاربرد مواد تغییر فازدهنده جهت استفاده از خاصیت حرارتی آن‌ها در تهویه ساختمان‌ها پرداخته‌اند؛ به نحوی که در تابستان، در مد خنک‌سازی با تبدیل از حالت جامد به مایع حرارت را از محیط می‌گیرد و باعث خنک‌سازی هوای عبوری می‌شود و در شب هم در مد عکس با تبدیل شدن از حالت جامد به مایع با گرفتن سرمای محیط، شارژ می‌شود. در این راستا هو و

باد و یا با اثر دودکشی تأمین می‌شود. در سامانه‌های ترکیبی از پنکه برای کمک به جریان هوا استفاده می‌شود. تهویه با تخلیه هوای گرم و تعویض آن با هوای خنک‌تر خارج و نیز هدایت جریان هوا به سمت ساکنان با ترکیبی از جابه‌جایی و تبخیر، سبب ایجاد سرما می‌شود (Lechner, 2014). تهویه طبیعی یکی از روش‌هایی است که اگر شرایط اقلیمی اجازه دهد بهره‌وری دارد و به کاهش بار سرمایشی و افزایش کیفیت هوای داخل ساختمان کمک می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهد دامنه آسایش حرارتی در زمان استفاده از تهویه طبیعی گسترده‌تر از سیستم تهویه مطبوع استاندارد است (De Dear & Brager, 2002). نکته مهم در طراحی تهویه طبیعی در ساختمان دانش تهویه و پیش‌بینی دقیق جریان هوا و انتقال حرارت برای ایجاد نرخ تعویض هوای مناسب است. این پارامترها به اندازه دمای هوا تأثیرگذاری دارند (Zhai, 2014). این سیستم زمانی مؤثر است که دما و رطوبت داخلی بالاتر از مقادیر خارجی آن باشد. امروزه تهویه طبیعی به خاطر تأثیر بر کاهش مصرف انرژی در ساختمان بیشتر از گذشته مورد استفاده قرار می‌گیرد. تهویه طبیعی بر اساس نوع جریان به دو دسته تهویه طبیعی با جریان هوا و تهویه طبیعی با اثر دودکش تقسیم‌بندی می‌شود. قرارگیری بازشو در فضاها بسیار مهم و حیاتی است. به شکلی که موقعیت‌های قرارگیری بازشو بر میزان جریان، فشار و نرخ تهویه بسیار تأثیر گذار است (Evola & Popov, 2006).

### 1-2-2- بادگیر

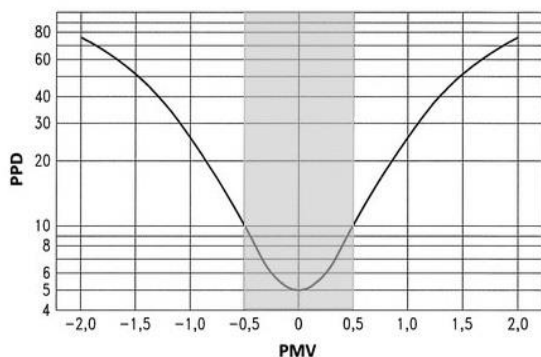
بادگیر یکی از اجزای بناهای سنتی ایران در اقلیم گرم-وخشک و گرم‌ومرطوب است که به عنوان یک سیستم سرمایشی ایستا، آسایش حرارتی را با استفاده از انرژی تجدیدپذیر باد فراهم می‌کند. این سازه نقش مهمی در تهویه طبیعی، آسایش حرارتی و بهبود کیفیت فضاهای داخلی ساختمان، بدون نیاز به وسایل تهویه مکانیکی-الکتریکی دارد که با ذخیره انرژی الکتریکی در طول ماه‌های گرم سال، به ایجاد یک شرایط پایدار منجر شده است (Reyes et al., 2013). طبق شکل 1 عملکرد بادگیر بدین صورت است که هوای مناسب را به داخل فضای مد نظر از جمله اتاق، سرداب یا آب انبار کانالیزه می‌کند. به

عنوان نمونه در حاشیه کویر بادگیری که بر بالای محراب مسجد قدیمی اردکان و مسجد جامع فیروزآباد لرستان قرار دارد باد مطلوب را برای ایجاد تهویه و خنکی به داخل فضای مسجد هدایت می‌کند. بر اساس پژوهش‌های انجام شده برای بهبود شرایط دمایی ساختمان‌های شهر یزد از بادگیر استفاده شده، تعداد این بادگیرها نسبت به سایر شهرهای ایران بیشتر است به همین خاطر یزد را شهر بادگیرها می‌نامند (Ahmadi, 2015). بادگیرها با کانالیزه کردن جریان هوا به داخل ساختمان سبب بهبود کاهش دما و در نتیجه ی آن سبب کاهش تقاضای بار سرمایشی می‌شود (Nejat et al., 2021). بادگیر به عنوان یک سیستم غیر فعال نقش قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی و بهبود آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل دارد (Goudarzi et al., 2021).

### 1-2-3- مواد تغییر فازدهنده (PCM)

مواد تغییر فازدهنده (PCM<sup>6</sup>) از مواد آلی یا معدنی تشکیل شده‌اند که به دلیل قابلیت تغییر فازشان می‌توانند انرژی حرارتی را در خود ذخیره کنند. همان‌طور که در شکل 2 مشاهده می‌شود، تغییر فاز این مواد از حالت جامد به مایع و در فاز بازگشت مایع به جامد است. این مواد می‌توانند فرآیند تغییر فاز را هزاران بار انجام دهند بدون اینکه اندکی از بازدهی آن‌ها کاسته شود (Demirbas, 2006). استفاده از مواد تغییر فازدهنده به عنوان یک راهکاری غیر فعال به تعدیل دمای محیط و کاهش بار سرمایشی ساختمان کمک می‌کند (Raj & Velraj, 2010). همچنین این مواد در بهبود کارایی انرژی و آسایش حرارتی در ساختمان‌ها قابل استفاده‌اند (Al-Saadi & Zhai, 2013). بنابراین کاربرد PCM می‌تواند ابزاری قدرتمند در طراحی ساختمان‌های صفر انرژی باشند (Bastani et al., 2014). استفاده از مواد تغییر فازدهنده سبب بهبود ویژگی‌های انتقال حرارت دیواره ساختمان می‌شود که به ذخیره بهتر انرژی در ساختمان کمک می‌کند (Solgi et al., 2019). استفاده از PCM همراه با تهویه طبیعی تأثیر قابل توجهی در بهره‌وری انرژی ساختمان دارد. استفاده از مواد تغییر فازدهنده متناسب با شرایط آب‌وهوایی و ویژگی‌های ساختمان سبب کارایی بیشتر مواد تغییر فاز دهنده و

PMV برای مشخص کردن پیش نیازهای لازم برای شرایط درونی استفاده می‌کند به طوری که لازم است حداقل 80٪ ساکنین از نظر دمایی رضایت داشته باشند (Khodakarami & Knight, 2008). شکل 3 محدوده و ارتباط دو شاخص PMV و PPD را نشان می‌دهد.

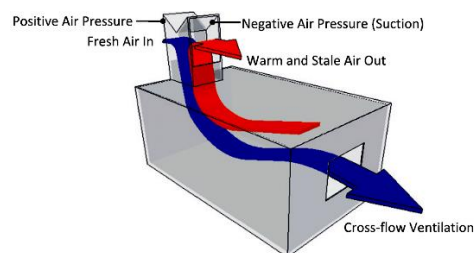


شکل 3- ارتباط متوسط آرا پیش بینی شده (PMV) و درصد ناراضیاتی پیش بینی شده (PPD) (Fabbri, 2015)  
**Fig. 3- Relationship between Predicted Average Votes (PMV) and Predicted Discontent Percentage (PPD)** (Fabbri, 2015)

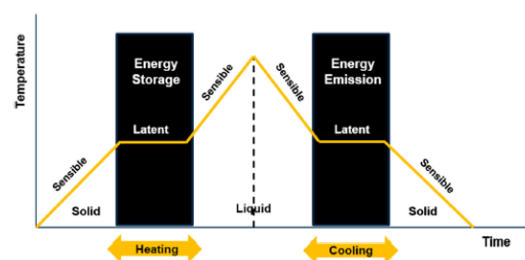
## 2- روش پژوهش

این پژوهش براساس مطالعات کتابخانه‌ای، برداشت داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار انجام شده است. به منظور اندازه‌گیری هر چه دقیق‌تر محاسبات، از نرم افزار Energy Plus به عنوان ابزار محاسبه، تحلیل و آنالیز استفاده شده است. به طور کلی این نرم‌افزار دارای ابزار تحلیلی در ارتباط با انرژی ساختمان است که در مقیاس‌های متفاوت قابل استفاده است. انرژی پلاس یک برنامه شبیه‌سازی انرژی ساختمان است که بار سرمایشی و گرمایشی، برای دستیابی به شرایط آسایش حرارتی، تهویه طبیعی و مصرف انرژی را محاسبه می‌کند. در این نرم‌افزار، شبیه‌سازی و محاسبه بر اساس ورودی‌هایی است که به صورت عددی وارد می‌شود. بر این اساس داده‌های مورد نیاز جهت استفاده از ابزارهای تحلیلی در نرم‌افزار Energy Plus شامل مشخصات کالبدی ساختمان نظیر؛ مساحت و فرم ساختمان، ارتفاع، جنس دیوارهای ساختمان، اطلاعات اقلیمی در زمینه بارش، تابش خورشیدی، دما، رطوبت، موقعیت جغرافیایی و بادهای

در نتیجه بهبود کارایی ساختمان می‌شود (Prabhakar et al., 2020).



شکل 1- جریان هوا در بادگیر و اتاق (Hosseini et al., 2016)  
**Fig. 1- Air flow diagram representing ventilation through a room with a wind catcher** (Hosseini et al., 2016)



شکل 2- تغییر دما طی فرآیند ذوب و انجماد (Du et al., 2018)  
**Fig. 2- Temperature change on the melting and freezing process** produced as it is from (Du et al., 2018)

## 1-2-4- آسایش حرارتی (PMV-PPD)

دو رویکرد برای سنجش آسایش حرارتی ارائه شده است. اولین رویکرد، رویکرد تعادل حرارتی است که توسط فننگر و با استفاده از معادلات تعادل گرمایی و مطالعات تجربی در خصوص دمای پوست برای تعریف آسایش در شرایط آزمایشگاهی ایجاد شده است. این رویکرد آسایش حرارتی را بر اساس شاخص PMV-PMV می‌سنجد. شاخص PMV بیانگر متوسط آرا پیش‌بینی شده و شاخص PPD بیانگر درصد پیش‌بینی شده ناراضیاتی است. در این مدل محدوده آسایش استاندارد، در یک مقیاس هفت نمره‌ای از سرد (-3) تا داغ (+3) ارزیابی می‌شود. صفر، مقدار ایده‌آل است که نشان دهنده خنثی بودن است و مقدار PMV بین بازه (+0.5) تا (-0.5) مناسب است (Schiavon et al., 2014). روش فننگر اساساً این مورد را بیان می‌کند که دمای محیط نباید با تغییر فصل تغییر کند. بلکه باید دما در طول سال یکی باشد. این امر موضع را اتخاذ می‌کند مبنی بر اینکه انسان‌ها نباید با دماهای متفاوت سازگاری پیدا کنند زیرا همیشه ثابت خواهد بود. استاندارد ASHRAE 55-2010 از مدل

غالب است. برای اعمال تأثیر مواد تغییر فازدهنده در معادلات انتقال حرارت از الگوریتم Difference Conduction Finite و برای محاسبه تهویه طبیعی در بادگیر از Airflow Network در انرژی پلاس استفاده شده است. همان‌گونه که اشاره شد، جهت ازبایی عملکرد بادگیر و تأثیر گذاری آن بر آسایش حرارتی ساکنین در فضای مورد نظر، باید شاخص‌های مورد نیاز برای تهویه طبیعی و سرمایش فضا در حالت؛ دیواره بادگیر بدون مواد تغییر فازدهنده (PCM) (Basic)، دیواره بادگیر پوشیده با مواد تغییر فازدهنده (PCM) در نقطه ذوب‌های مختلف (21, 24, 28, 30, 32) محاسبه، آنالیز و مقایسه می‌شود. بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای، پژوهش‌های پیشین و استفاده از تجربیات آن‌ها، اطلاعات آب‌وهوایی اقلیم گرم‌و‌خشک شهر یزد، اطلاعات مشخصات فیزیکی و ویژگی‌های حرارتی مواد تغییر فازدهنده (PCM) گردآوری شده است.

بر اساس مطالعات انجام شده و میزان دمایی شهر یزد بر نامه‌هایی برای استفاده از مواد تغییر فازدهنده (PCM) در نظر گرفته شده است. در این راستا مواد تغییر فازدهنده (PCM) با نقطه ذوب‌های متفاوت (21, 24, 28, 30, 32) درجه سانتی‌گراد، در سطوح مختلف بادگیر برای ارزیابی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این پژوهش از PCM‌های غیرآلی- هیدرات نمک استفاده شده است. میزان دمای شهر یزد، مبنای تأثیرگذار بر انتخاب مواد تغییر فازدهنده در شبیه‌سازی و آزمایش‌های انجام شده است و از اطلاعات اقلیمی سامانه انرژی پلاس که توسط گروه انرژی آمریکا گردآوری و تأیید شده، استفاده می‌شود. بادگیر مدل‌سازی شده در حالت پایه و با مواد تغییر فازدهنده (PCM) در شرایط آب‌وهوایی شهر یزد، شبیه‌سازی شده است. شهر یزد در طول جغرافیایی 54 و 24 درجه شرقی و طول جغرافیایی 31 و 54 درجه شمالی قرار گرفته است. این شهر یک اقلیم گرم‌و‌خشک با رطوبت و میزان متغیر دمای روزانه بالا به ویژه در طول تابستان دارد (Keshtkaran, 2011). مشخصات اقلیمی یزد در جدول 1 ارائه شده است.

## 2-1- اعتبار سنجی

طبق شکل 4 مدل تجربی یک زون حرارتی با ابعاد 8 متر طول  $6 \times 6$  متر عرض  $3 \times 3$  متر ارتفاع است که با بادگیری با ارتفاع 1.5 متر از سطح بام و بازشویی با ابعاد 1 متر عرض  $1 \times 1$  متر ارتفاع که پنجره خروجی زون با ابعاد 1 متر عرض  $1 \times 1$  متر ارتفاع در دیوار روبه بادگیر بر روی دیوار عرضی قرار گرفته است. ابعاد مدل ساخته شده به ترتیب 200 سانتی‌متر طول  $\times$  150 سانتی‌متر عرض  $\times$  75 سانتی‌متر ارتفاع است و ابعاد بادگیر نیز  $25 \times 37.5$  سانتی‌متر است و مدل با دولایه MDF و یک لایه عایق حرارتی بین آن‌ها ساخته شده. صفحات MDF با پیچ‌ومهره به هم وصل شدند و درز بین صفحات با پاشش فوم پوشش داده شد. در فرآیند برداشت داده‌های تجربی 4 حسگر داده‌های دمایی و رطوبت را ثبت کرده است.

2 حسگر در مدل قرار داده شد که محل قرارگیری حسگرها در شکل (4) مشخص شده است. 2 حسگر دیگر در محیط برای اندازه‌گیری دمای محیط استفاده شده است. این مدل بر اساس مدل تجربی بررسی شده توسط منتظری و همکاران (Montazeri & Montazeri, 2018) به دلیل نسبت و جانمایی مناسب ابعاد پنجره خروجی به بازشو ورودی بادگیر به فضای مورد تهویه و نسبت برابر بازشوها به یک دیگر که در میان مدل‌های بادگیر مورد ارزیابی در پژوهش ایشان نرخ جریان هوای مناسبی برای تهویه در فضای مورد نظر را داراست، انتخاب شده. در این مدل از PCM 24 درجه سانتی‌گراد در دیواره ورودی بادگیر با ضخامت 1 سانتی‌متر استفاده شده است. دمای محیط آزمایش با دمای محیط در فایل آب‌وهوایی مطابقت دارد و محیط خارجی برای شرایط مرزی دیواره در نرم‌افزار تعریف شده است.

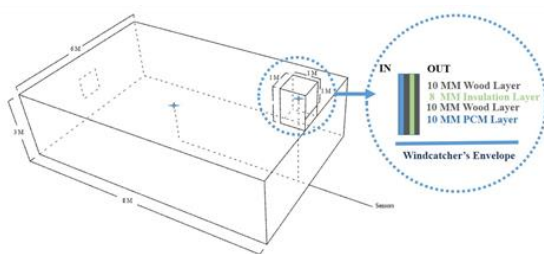
جهت انجام اعتبار سنجی نتایج، داده‌های دمایی تجربی و شبیه‌سازی بادگیر با وجود PCM 24 درجه سانتی‌گراد با یکدیگر مقایسه شد. در مدل مورد نظر ضخامت PCM مورد استفاده نیز 1 سانتی‌متر به‌عنوان ضخامت بهینه برای این نوع از PCM در نظر گرفته شد (Idota et al., 1997). محدوده آسایش حرارتی نیز طبق مبحث 19 مقررات ملی ساختمان 21 تا 28 درجه سانتی‌گراد است (Tilney et al., 1991). طبق شکل 5 چگونگی تغییرات

برابر 0.7 است که همبستگی زیادی دارد علاوه بر انحراف معیار 0.4 است و خطای استاندارد نیز 0.02 است که در محدوده قابل قبول (بین صفر تا 0.05) قرار دارد (Nasrollahi & Shokry, 2020). این نتایج بیانگر این مطلب است که روش کار و نتایج به دست آمده از تحقیق، از نظر علمی منطقی و قابل استناد است. جدول 2 نیز ویژگی‌های ساختاری لایه‌های دیواره‌های مختلف بادگیر در مدل تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

دمای هوای داخل اتاق در حالت با مواد تغییر فزاینده با نقطه ذوب 24 درجه، از نظر تجربی و شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده است. همبستگی داده‌های شبیه‌سازی و تجربی در آزمون پیرسون برای بازه 24 ساعته 0.46 است و میزان انحراف معیار میان هر دو دسته داده نیز 17٪ و میزان خطای استاندارد نیز 0.8٪ است. همبستگی داده‌های شبیه‌سازی و تجربی نیز در محدوده مورد نظر پژوهش یعنی ساعات اداری (8-17)

جدول 1- داده آب‌وهوایی میانگین ماهانه شهر یزد (1951-2010) (Yazd Meteorological Organization)  
 Tab. 1- Yazd Monthly Average Weather Data (1951-2010) (Yazd Meteorological Organization)

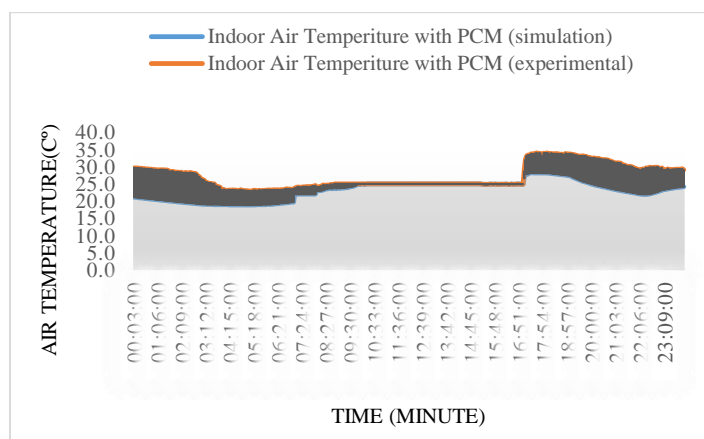
DEC	NOV	OCT	SEP	AGU	JUL	JUN	MAY	APR	MAR	FEB	JAN	Annual	
7.5	12.5	19.6	25.9	30	32	30.1	24.9	19.6	13.7	8.9	5.9	19.9	دما
50	38	27	19	17	17	18	25	32	37	44	54	31	رطوبت نسبی
14.3	20	27.7	34.3	38	39.5	37.8	32.3	26.6	20.6	15.7	12.3	26.6	حداکثر دما
0.7	14.30	11.5	17.6	22	24.5	22.4	17.6	12.5	6.9	2.1	-0.4	11.9	حداقل دما



شکل 4- جزئیات مدل شبیه‌سازی شده  
 Fig. 4- Details of the simulated model

جدول 2- مصالح به کار برده شده در هر یک از دیواره‌های مدل تجربی در شبیه‌سازی‌ها  
 Tab. 2- Materials used in each wall of the experimental model in simulations

واحد	1 <sup>st</sup> Layer	2 <sup>nd</sup> Layer	3 <sup>rd</sup> Layer	4 <sup>th</sup> Layer PCM-21	4 <sup>th</sup> Layer PCM-24	4 <sup>th</sup> Layer PCM-28	4 <sup>th</sup> Layer PCM-30	4 <sup>th</sup> Layer PCM-32
نام مترتال	Wood	Wall Insulation	Wood	PCM 21	PCM 24	PCM 28	PCM 30	PCM 32
Roughness	Medium Smooth (MS)	Medium Rough	MS	MS	MS	MS	MS	MS
Thickness	m	0.0254	3.37000000 E-02	0.0254	0.01	0.01	0.01	0.01
Conductivity	W/m-K	0.15	0.0432	0.15	0.54	0.54	0.54	0.51
Density	Kg/m <sup>3</sup>	608	91	608	1530	1530	1530	1530
Specific Heat	J/kg-K	1630	8.37000000 E+02	1630	2200	2200	2200	2200
Thermal Absorptance		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Solar Absorptance		0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
Visible Absorptance		0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7



شکل 5- مقایسه نتایج تغییرات دمای هوا در محیط داخلی بادگیر با PCM برای حالت شبیه‌سازی و تجربی در یک بازه زمانی 24 ساعته

Fig. 5- Comparison of the results of indoor air temperature changes with PCM for simulation and experimental mode over a 24-hour period

### 3- نتایج و بحث

در این بخش از تحقیق به بررسی داده‌ها و مقایسه مقادیر شبیه‌سازی بادگیر در حالت پایه و حالت بادگیر پوشیده شده با مواد تغییر فازدهنده با نقطه ذوب‌های مختلف (21, 24, 28, 30, 32) شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار انرژی پلاس پرداخته شده است. بنابراین در 6 برنامه با شرایط یکسان چگونگی تغییرات متغیرهایی همچون، شاخص‌های آسایش حرارتی، تقاضای انرژی سرمایشی، تغییرات دمای هوای داخل و ساعات استفاده تهویه طبیعی بررسی و ارزیابی شده است.

#### 3-1- نوسانات دمایی و ساعات استفاده از تهویه طبیعی، تحت تأثیر PCM در دیواره بادگیر

طبق بررسی‌های انجام شده در مبحث 19 مقررات ملی، محدوده دمایی آسایش حرارتی در شهر یزد بین 21 تا 28 درجه سانتی‌گراد است. در این تحقیق دمای هوای داخل برای ترموستات 28 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. به این منظور زمانی که دمای هوای خارج بیشتر از 28 درجه سانتی‌گراد شود پنجره‌های بادگیر بسته شده و از ورود هوای گرم به داخل فضا پیش‌گیری می‌کنند. از سویی نیز تا زمانی که دمای هوای بین 28 و 21 درجه سانتی‌گراد باشد، بازشوهای بادگیر باز هستند و به محض اینکه دمای هوای خارج کمتر از 21 درجه

سانتی‌گراد شود بازشوها بسته می‌شوند. همچنین در طول فصول گرم سال سیستم سرمایشی تهویه مطبوع و در فصول سرد سیستم گرمایشی فعال می‌شود. همین‌گونه، اگر دمای هوای داخل نیز بیشتر یا کمتر از محدوده آسایش حرارتی (21-28 درجه ترموستات) شود و دمای هوای خارج در محدوده آسایش باشد، بازشوهای بادگیر باز می‌شوند. بنابراین از زمانی که دمای هوای داخل خارج از محدوده آسایش حرارتی است و دمای هوای خارج در محدوده آسایش قرار دارد، بازشوهای بادگیر باز می‌شوند و با استفاده از تهویه طبیعی و گردش هوا به هم‌دما شدن و رسیدن دمای هوای داخل در محدوده آسایش حرارتی کمک می‌نمایند. این بازشوها می‌توانند تا زمانی که دمای هوای خارج در محدوده مناسب آسایش باشد، برای ایجاد جریان هوا در فضا، باز بمانند، از این رو افزایش ساعات بهره‌مندی از تهویه طبیعی موجب کاهش تقاضای بارسرمایشی نیز شوند. این گردش هوا در ساعات اداری (8 صبح تا 5 عصر) در نظر گرفته شده است. در طی شب نیز PCM ها شارژ می‌شوند و برای استفاده در طول روز بعدی و استفاده از خاصیت حرارتی‌شان، به حالت قبلی خود باز می‌گردند. لازم به ذکر است که PCM های مورد بررسی در این پژوهش از نوع PCM های غیر آلی هیدرات-نمکی با دمای ذوب (21, 24, 28, 30, 32) درجه سانتی‌گرادند.





شکل 8 نیز چگونگی تغییرات میانگین دمای ماهانه را برای هر PCM نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده شده، میانگین دمای ماهانه نسبت به حالت پایه با وجود استفاده از PCM‌هایی با نقطه ذوب‌های (21, 24, 28, 32) سانتی‌گراد یک روند کاهشی داشته است. در همه سناریوها دمای هوا به نسبت حالت پایه کاهش داشته است. همچنین در شکل 7 نیز میانگین دمای ماهای گرم سال داخل فضا برای هر PCM نشان شده است. داده‌های میانگین دمایی ماه‌های گرم سال برای PCM‌هایی با نقطه ذوب‌های 21, 24, 32 درجه سانتی-گراد در مرز محدوده آسایش حرارتی ساکنین قرار گرفته است اما داده‌های دمایی فضای داخلی با PCM‌هایی با نقطه ذوب‌های 28 و 30 درجه سانتی‌گراد در داخل محدوده آسایش قرار گرفته است و به صورت متعادل‌تری است. با توجه به نتایج به دست آمده از نظر تغییرات و نوسانات دمایی، می‌توان گفت که PCM 28 درجه سانتی‌گراد نسبت به سایر سناریوها به صورت متعادل-تری عمل کرده و شرایط آسایش حرارتی و تهویه طبیعی مناسب‌تری را فراهم آورده است. بنابراین استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با نقاط ذوب متفاوت که با تغییر دما رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهند و بر تغییرات بار سرمایشی، تغییرات دمایی، میزان رضایتمندی، استفاده از تهویه طبیعی و آسایش حرارتی ساکنین تأثیرگذار است. در جدول 3 و 4 نیز این محدوده نوسانات دمایی برای هر PCM با نقطه ذوب مختلف آورده شده است. همان‌گونه که پیداست در حالت بدون استفاده از PCM محدوده دمایی در یک میزان نسبتاً بالایی بوده است اما در صورت کاربرد PCM‌ها این محدوده به میزان قابل توجهی کاهش داشته است.

PCM‌های مورد بررسی بر اساس دمای ترموستات اتاق و محیط خارج، رفتار حرارتی متفاوتی را از خود نشان می‌دهند. از سویی با توجه به اینکه دمای هوا در ماه‌ها، روزها و ساعات مختلف شبانه روز در یک محدوده پیوسته قابل تغییر است، بنابراین در این بخش از پژوهش به بررسی تأثیر انواع PCM‌ها با نقاط ذوب مختلف بر دمای اتاق، تهویه طبیعی و مصرف انرژی در این محدوده و دامنه زمانی پرداخته شده است. در واقع مواد تغییر فازدهنده به دلیل خاصیت ذخیره حرارتی بالایی که دارند، مانند یک خازن عمل می‌کنند و سبب کاهش نوسانات دمایی در بازه زمانی مشابه در حالت بدون استفاده از مواد تغییر فازدهنده می‌شوند. بدین منظور ماده تغییر فازدهنده با نقطه ذوب مناسب به دست می‌آید. بنابراین در این بخش چگونگی و میزان تأثیرگذاری این مواد با نقطه ذوب‌های مختلف بر دمای هوای فضا مورد تهویه به وسیله بادگیر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مدت زمان استفاده از تهویه طبیعی با وجود این نوع از PCM‌ها به دست می‌آید. شکل 6 نتایج نوسانات دمایی برای PCM‌ها با نقطه ذوب‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است استفاده از PCM‌ها در طول شبانه روز موجب کاهش نوسانات و متعادل‌تر کردن دمای هوای فضا است. در طول ساعات اداری نیز استفاده از این مواد موجب رساندن دمای هوای داخل به محدوده آسایش حرارتی و استفاده حداکثری از تهویه طبیعی شده است. محدود بودن نظر با خط‌چین و رنگ صورتی نشان داده شده است. در واقع با استفاده از PCM‌ها ساعات استفاده از تهویه طبیعی افزایش یافته و این میزان در PCM با نقطه ذوب 28 درجه سانتی‌گراد به میزان بیشتری بوده است.

جدول 3- محدوده نوسانات دمایی برای هر PCM طبق شکل 5

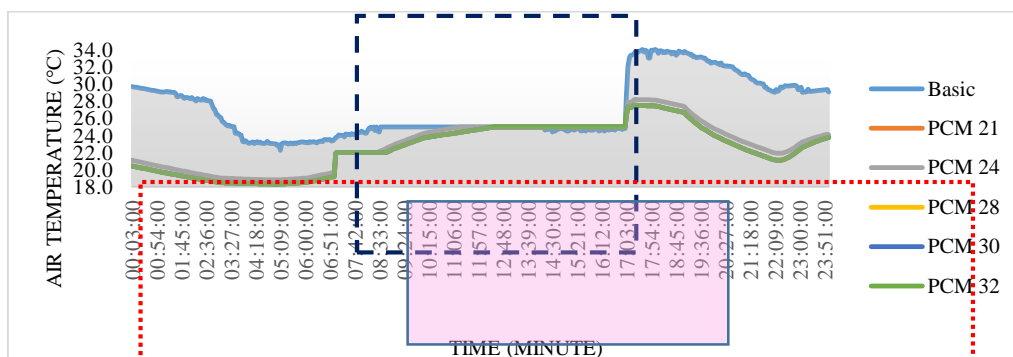
Tab. 3- Temperature fluctuation range for each PCM according to Figure 5

PCM-32	PCM-30	PCM-28	PCM-24	PCM-21	Basic	حالات گوناگون برای ارزیابی
18 - 27	18.5 - 27.5	18 - 28	19 - 28	18.5 - 28.5	22 - 34	محدوده تغییرات دمایی برای هر PCM در طول 24 ساعت

جدول 4- میانگین دمای ماهانه گرم سال برای PCM ها با نقطه ذوب های مختلف طبق شکل 6

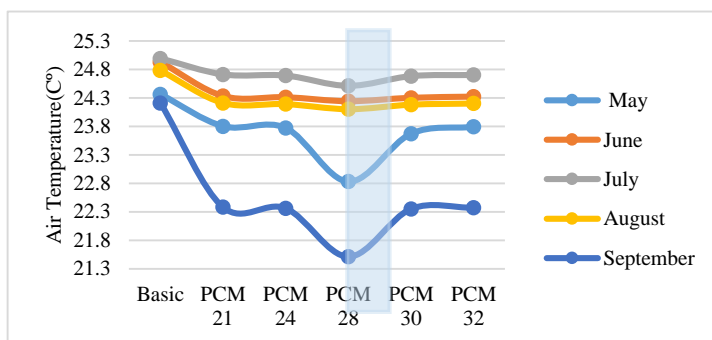
Tab. 4- Average monthly temperature in warm month of the year for PCMs with different melting points according to Figure 6

PCM-32	PCM-30	PCM-28	PCM-24	PCM-21	Basic	PCM میانگین دمای ماهانه برای هر
23.79	23.67	22.83	23.79	23.79	24.36	May
24.3	24.3	24.24	24.3	24.3	24.93	June
24.68	24.68	24.51	24.68	24.68	24.99	July
24.18	24.18	24.1	24.18	24.18	24.78	Aug
22.35	22.35	21.51	22.35	22.35	24.21	Sept



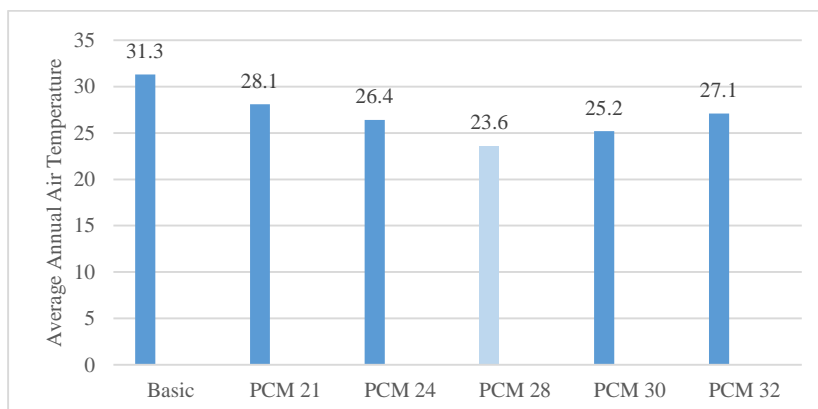
شکل 6- محدوده نوسانات دمای بادگیر با PCM های مختلف نسبت به حالت بدون PCM بادگیر (Basic)

Fig. 6- Range of temperature fluctuations for wildcatter with different PCM compared to the without-PCM wind catcher (Basic)



شکل 7- میانگین دمای ماه های گرم سال بادگیر با PCM ها مختلف نسبت به حالت بدون PCM بادگیر (Basic)

Fig. 7- Average monthly temperature in warm months for wildcatter with different PCMs compared to without-PCM windcatcher (Basic)



شکل 8- میانگین دمای هوای سالانه برای PCM ها مختلف نسبت به حالت بدون PCM بادگیر (Basic)

Fig. 8- Average annual air temperature for different PCM compared to the without-PCM wind catcher (Basic)



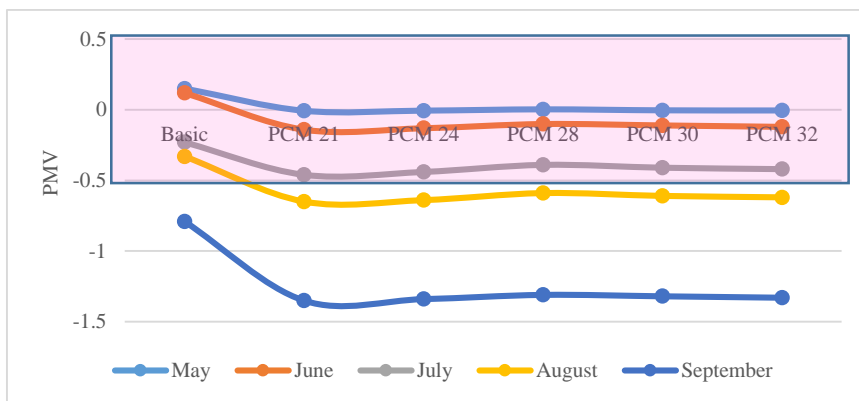
آسایش حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است، که این پارامتر به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.

### 3-3- بار سرمایشی

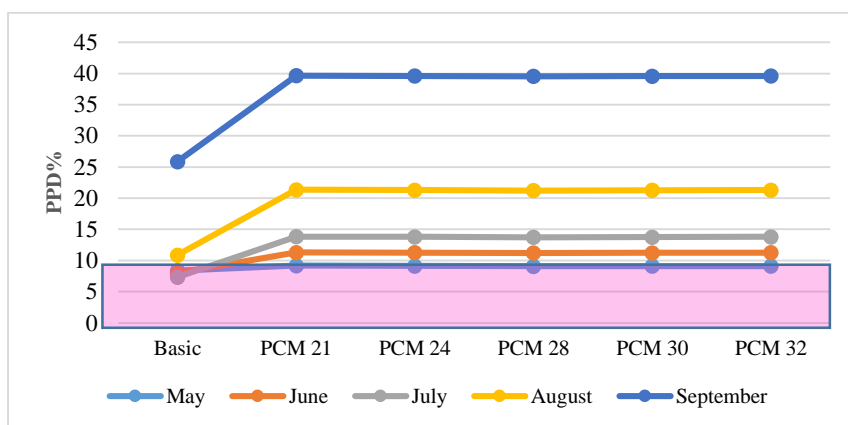
استفاده از مواد تغییر فازدهنده در بادگیر به دلیل کارایی خوب و بهبود عملکرد آن سبب کاهش تقاضای بار سرمایشی و در نتیجه آن کاهش مصرف انرژی می‌شود. با توجه به این که بخشی عظیمی از ایران دارای اقلیم گرم و خشک است استفاده از بادگیر به عنوان راهکاری برای بهبود تهویه طبیعی کمک شایانی به کاهش مصرف انرژی در زمان اوج درخواست مصرف می‌کند که سبب کاهش ساعات قطعی برق می‌شود. شکل 11 این تغییرات بار سرمایشی در طول روز را تحت تأثیر کاربرد PCMهای مختلف نشان می‌دهد. طبق شکل استفاده از PCMها موجب کاهش بار سرمایشی در طول روز شده است به این صورت که در از ساعت 13 تا 17 بار سرمایشی وجود داشته، در صورتی که در حالت بدون استفاده از PCM این محدوده از 10 تا 17 بوده است. همچنین علاوه بر کاهش ساعات نیاز به بار سرمایشی، میزان آن نیز در اثر کاربرد PCMها کاهش یافته است. از سویی همان‌گونه که در شکل 12 نیز مشخص شده، با نزدیک شدن دمای ذوب PCM به دمای اوج ترموستات یعنی 28 درجه سانتیگراد تأثیرگذاری PCM بر کاهش میانگین دمای ماه‌های گرم سال و کاهش تقاضای بار سرمایشی بیشتر می‌شود، بنابراین مجموع بار سرمایشی ماه‌های گرم سال مدل شبیه‌سازی شده از 3999 کیلووات ساعت به 3957 کیلووات ساعت در حال کاهش است. به علاوه با افزایش دمای ذوب PCM از 28 درجه سانتی‌گراد، مجموع بار سرمایشی ماه‌های گرم سال افزایش یافته است. بنابراین همان‌گونه که در جدول 5 نتایج نهایی داده‌های شبیه‌سازی نشان داده شده است، PCM با دمای ذوب 28 درجه سانتی‌گراد بهترین عملکرد را از نظر کاهش بار سرمایشی و تهویه طبیعی در طول ماه‌های گرم به ویژه در گرم‌ترین روزها و اوج مصرف انرژی در طی سال را داشته است. به گونه‌ای که استفاده از این نوع PCM توانسته است، میانگین دمای ماه‌های گرم سال را در محدوده آسایش قرار دهد.

### 3-2- شاخص‌های آسایش حرارتی (PMV-PPD)

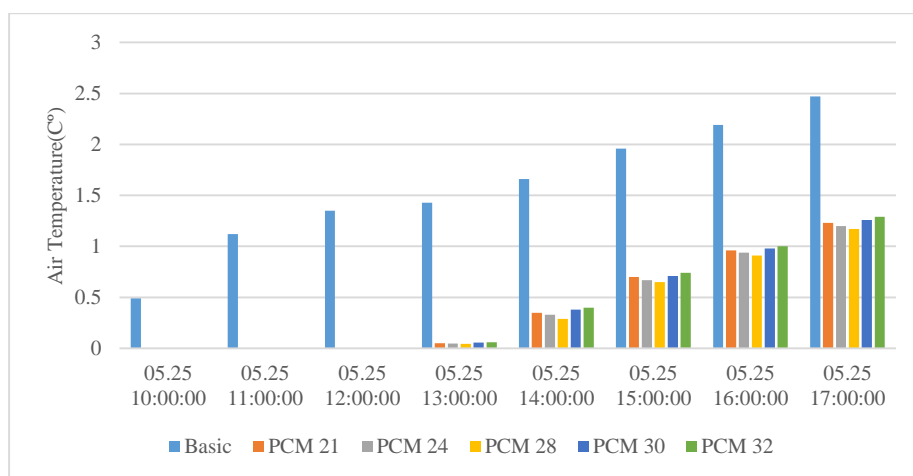
مواد تغییر فازدهنده با نقاط ذوب مختلف به دلیل رفتارهای حرارتی متفاوت در بازه‌های زمانی مختلف، هر یک موجب ایجاد مقادیر مختلفی از PMV و PPD شده‌اند. همان‌گونه که در شکل 10 و 9 مشخص است میزان PMV و PPD برای این مواد در طول ماه‌های گرم سال آورده شده است. همچنین محدوده تغییرات دمای ماه‌های گرم سال نیز به صورت خط‌چین سیاه در نمودار نشان داده شده است. میزان PMV در ماه‌های می، جون و جولای در محدوده مناسبی قرار گرفته اما در ماه‌های آگوست و سپتامبر این میزان از مرز 0.5- گذشته است. محدوده تغییرات سالانه آن نیز در بازه 0.2- تا 0.5- است. همچنین میزان PPD نیز از 5 تا 40 درصد را به خود اختصاص داده است. در ماه‌های می و جون در محدوده 10 درصد بوده که میزان قابل قبولی از درصد ناراضی است اما در سایر ماه‌ها این میزان تا حد زیادی افزایش داشته است. در بیان دلیل این تفاوت‌ها باید گفت که به خاطر رفتار حرارتی مختلف PCMها در آن زمان خاص مقادیر به دست آمده برای PMV و PPD متفاوت بوده است. البته شایان ذکر است که این دو شاخص با محدوده آسایش حرارتی ذکر شده در مقررات ملی ساختمان، معیار مناسبی برای سنجش کارایی بادگیر ناست. در ماه‌هایی از سال همچون سپتامبر و آگوست، میزان PPD در اثر استفاده از PCMهای مختلف 25 تا 40 درصد بوده است، این اتفاق به دلیل این است که در این ماه محدوده و ساعات استفاده از تهویه طبیعی بیشتر از ماه‌های دیگر همچون جولای است. به همین دلیل با افزایش ساعات استفاده از تهویه طبیعی، درصد ناراضی افراد به دلیل افزایش دامنه تغییرات دمایی در محدوده آسایش حرارتی یزد افزایش یافته است، اما در ماه‌های می، جون و جولای به دلیل کاهش ساعات استفاده از تهویه طبیعی، میزان PPD کاهش یافته و بیشترین تأثیر ایجاد آسایش حرارتی بر عهده سیستم تهویه مطبوع است. بنابراین برای رفع این مشکل در بخش قبلی میزان ساعات استفاده از تهویه طبیعی به عنوان شاخصی برای شرایط کارایی بادگیر و



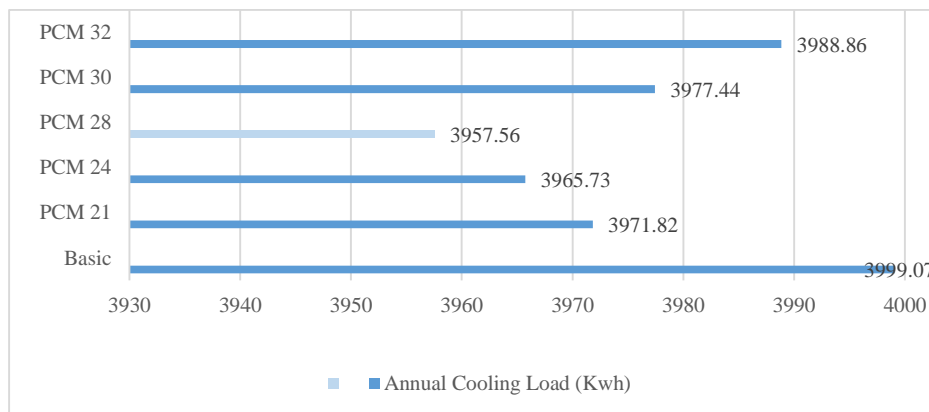
شکل 9- محدوده PMV در ماه های گرم سال برای PCM ها مختلف نسبت به حالت بدون PCM بادگیر (Basic)  
 Fig. 9- PMV range in warm months of the year for different PCM compared to without-PCM wind catcher (Basic)



شکل 10- PPD در ماه های گرم سال برای PCM ها مختلف نسبت به حالت بدون PCM بادگیر (Basic)  
 Fig. 10- PPD in the warm months for different PCM compared to the without-PCM wind catcher (Basic)



شکل 11- تغییرات بار سرمایشی در ساعات روز برای PCM ها مختلف نسبت به حالت بدون PCM بادگیر (Basic)  
 Fig. 11- Hourly cooling load changes for different PCM compared to without-PCM wind catcher (Basic)



شکل 12- تأثیر تغییر دمای ذوب PCM ها بر تقاضای بار سرمایشی ماه‌های گرم سال  
 Fig. 12- Impact of PCM melting temperature on annual cooling load

درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. همچنین در پژوهش حاضر با توجه به شرایط اقلیمی شهر یزد و بالا بودن دمای هوا، دامنه نوسانات دمایی 18 تا 28 درجه سانتی‌گراد محدوده مناسبی برای ساکنین است و میانگین نوسانات دمای هوای روزانه در حالت بدون وجود PCM، 28 درجه سانتی‌گراد و در حالت بهره‌مندی از PCM با دمای ذوب مناسب به 23 درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. به علاوه محدوده مناسب نوسانات دمایی در حالت بهره‌مندی از PCM مناسب سبب افزایش ساعات استفاده از تهویه طبیعی نسبت به حالت پایه دیده می‌شود. به علاوه در میان PCM ها با نقاط ذوب مختلف این تأثیرات در PCM با دمای ذوب 28 درجه سانتی‌گراد به میزان بهتر و بیشتری مشاهده شده است. همچنین موجب کاهش تقاضای بار سرمایشی و کاهش استفاده از سیستم تهویه مطبوع نیز شده است. به شکلی که با افزایش مدت زمان استفاده از تهویه طبیعی توانسته است بار سرمایشی را نزدیک به 5 درصد کاهش دهد. این امر خود موجب کاهش آلاینده‌های زیستی و افزایش کیفیت هوای محیط نیز می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در دیوارهای داخلی بادگیر، هم در محیط شبیه‌سازی و هم در محیط تجربی آزمایشگاهی موجب ارتقای عملکرد آن در اقلیم گرم و خشک و به تبع آن بهره‌مندی از منافع به دست آمده در تأمین آسایش حرارتی همراه با کاهش مصرف حامل‌های انرژی و پیامدهای منفی زیست‌محیطی آن است. به این ترتیب گام بعدی، آزمودن

جدول 5- مقایسه نتایج دمایی و بار سرمایشی در حالت پایه و در حالت استفاده از PCM با نقطه ذوب 28 درجه سانتی‌گراد

Tab. 5- Comparison of temperature and cooling load results baseline and PCM 28

مدل پایه	مدل با PCM 28	پارامترهای مؤثر
22	18	T(min)
28	24	T(av)
34	28	T(max)
-	5%	درصد کاهش

#### 4- نتیجه‌گیری

مقاله حاضر با هدف بررسی تأثیرات انواع مواد تغییر فاز دهنده با نقطه ذوب های (21, 24, 28, 30, 32) بر افزایش کارایی بادگیر، کاهش نوسانات دمایی محیط، ایجاد شرایط آسایش حرارتی، رضایت مندی ساکنین، افزایش ساعات استفاده از تهویه طبیعی و نیز کاهش بار سرمایشی انجام شده است. در این راستا از روش شبیه‌سازی رایانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس (Energy Plus) و نیز اندازه‌گیری‌های میدانی دمای هوا به کمک دستگاه دیتالاگر جهت اعتبار سنجی استفاده شده است. در نهایت با بررسی تأثیر دمای ذوب PCM ها بر تغییرات و نوسانات دمای هوای محیط باید گفت که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده موجب کاهش محدوده تغییرات دمایی شده است. به گونه‌ای که بدون وجود PCM محدوده تغییرات دمایی در طول شبانه روز 22 تا 34 درجه سانتی‌گراد بوده است اما به دلیل بهره‌گیری از PCM ها با دمای ذوب متفاوت این محدوده به 18 تا 28



Gholamibozanjani, G., & Farid, M. (2020). A comparison between passive and active PCM systems applied to buildings. *Renewable Energy*, 162, 112-123 .

Goudarzi, N., et al. (2021). Airflow and thermal comfort evaluation of a room with different outlet opening sizes and elevations ventilated by a two-sided wind catcher. *Journal of Building Engineering*, 37, 102112 .

Hosseini, S., et al. (2016). Evaluation of airflow and thermal comfort in buildings ventilated with wind catchers: Simulation of conditions in Yazd City ,Iran. *Energy for Sustainable Development*, 35, 7-24 .

Hu, Y., & Heiselberg, P. K. (2018). A new ventilated window with PCM heat exchanger—Performance analysis and design optimization. *Energy and Buildings*, 169, 185-194 .

Idota, Y., et al. (1997). Tin-based amorphous oxide: a high-capacity lithium-ion-storage material. *Science*, 276(5317), 1395-1397 .

Jomehzadeh, F., et al. (2017). A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 736-756 .

Keshtkaran, P. (2011). Harmonization between climate and architecture in vernacular heritage: A case study in Yazd, Iran. *Procedia Engineering*, 21, 428-438 .

Khodakarami, J., & Knight ,I. (2008). Required and current thermal conditions for occupants in Iranian hospitals. *HVAC&R Research*, 14(2), 175-193 .

Lechner, N. (2014). *Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects*: John wiley & sons.

Montazeri, H., & Montazeri, F. (2018). CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop wind-catchers: Impact of outlet openings. *Renewable Energy*, 118, 502-520 .

Nasrollahi, N., & Shokry, E. (2020). Parametric analysis of architectural elements on daylight, visual comfort, and electrical energy performance in the study spaces. *Journal of daylighting*, 7(1), 57-72 .

این راهکار در محیط واقعی و مقیاس یک به یک است تا پس از حصول اطمینان از نتایج مشابه، بتوان این با استفاده از این فناوری غیر فعال و به روز رسانی شده از میراث ارزشمند معماری سنتی ایران حفاظت و بهره برداری کرد.

### پی نوشت

- <sup>1</sup> Induced Airflow Rate
- <sup>2</sup> Age of Air
- <sup>3</sup> Air Change Efficiency
- <sup>4</sup> Indoor Air Quality
- <sup>5</sup> Thermal Comfort
- <sup>6</sup> Phase Change Material

### منابع

Ahmadi, M. (2015). An investigation on wind-catcher technology and its applicability in passive cooling. *Politecnico di Torino* .

Al-Saadi, S. N., & Zhai, Z. J. (2013). Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 659-673 .

Bastani, A., et al. (2014). Designing building envelope with PCM wallboards: design tool development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 554-562 .

De Dear, R. J., & Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34(6), 549-561 .

Demirbas, M. F. (2006). Thermal energy storage and phase change materials: an overview. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1(1), 95-85 .

Du, K., et al. (2018). A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. *Applied Energy*, 220, 242-273 .

Evola, G., & Popov, V. (2006). Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. *Energy and Buildings*, 38(5), 491-501 .

Fabbri, K. (2015). *The indices of feeling—predicted mean vote PMV and percentage people dissatisfied PPD Indoor Thermal Comfort Perception (pp. 75-125)*: Springer.



Solgi, E., et al. (2019). A parametric study of phase change material behaviour when used with night ventilation in different climatic zones. *Building and Environment*, 147, 327-336 .

Tan, Z., & Deng, X. (2017). Assessment of natural ventilation potential for residential buildings across different climate zones in Australia. *Atmosphere*, 8(9), 177 .

Tilney, N. L., et al. (1991). Chronic rejection—an undefined conundrum. *Transplantation*, 52(3), 389-398 .

Tronchin, L., & Fabbri, K. (2008). Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: Comparison between software simulations and operating rating simulation. *Energy and Buildings*, 40(7), 1176-1187 .

Zhai, Z. (2014). Computational fluid dynamics applications in green building design. *Computational Fluid Dynamics Applications in [1] Green Design*, 1-22 .

Nejat, P., et al. (2021). Passive cooling and natural ventilation by the windcatcher (Badgir): An experimental and simulation study of indoor air quality, thermal comfort and passive cooling power. *Journal of Building Engineering*, 41, 102436 .

Prabhakar, M., et al. (2020). Improving the energy efficiency of passive PCM system using controlled natural ventilation. *Energy and Buildings*, 228, 110483 .

Raj, V. A. A., & Velraj, R. (2010). Review on free cooling of buildings using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2819-2829 .

Reyes, V., et al. (2013). A study of air flow and heat transfer in building-wind tower passive cooling systems applied to arid and semi-arid regions of Mexico. *Energy and Buildings*, 66, 211-221 .

Schiavon, S., et al. (2014). Web application for thermal comfort visualization and calculation according to ASHRAE Standard 55. Paper presented at the Building Simulation.

