

## استفاده از ماده PCM در جدار خارجی ساختمان های آموزشی به منظور افزایش

کیفیت فضا و کاهش مصرف انرژی مطالعه موردی:

(دبستان ۹ کلاسه در شهر مشهد)

فرامرز فدائی<sup>۱</sup>، پریا ایلدرآبادی<sup>۲\*</sup>

۱- عضو هیات علمی، موسسه آموزش عالی خراسان، مشهد

\*۲- عضو هیات علمی مدعو، موسسه آموزش عالی خراسان، مشهد.

ایمیل نویسنده مسئول Paria.ildarabadi@khorasan.ac.ir

fadaee.faramarz@khorasan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۸

### چکیده

جداره خارجی ساختمان به عنوان یکی از پارامترهای موثر بر تبادل حرارتی و میزان مصرف انرژی، همواره مورد بحث و بررسی بوده است. در این پژوهش با هدف کاهش مصرف انرژی و فراهم آوردن شرایط آسایش حرارتی افراد، تاثیر ماده PCM بر رفتار حرارتی جدار خارجی ساختمان های آموزشی مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی ها در قالب میزان نیاز افراد به سرمایش، گرمایش و میزان برق مصرفی در ساختمان ارائه شده است. همچنین به منظور ارزیابی شرایط آسایش حرارتی افراد از دو شاخصه ی آسایش PMV و PPD استفاده شده است. آنالیزها و شبیه سازی ها توسط نرم افزار الگوریتمیک گرس هاپر، پلاگین های هانی بی و لیدی باگ انجام پذیرفته است. نتایج پژوهش نشان می دهد که، با قرار گرفتن ماده PCM در بین جدار خارجی ساختمان در طول سال، میزان نیاز افراد به سرمایش 41.36 kWh/m<sup>2</sup>، گرمایش 44.77 kWh/m<sup>2</sup> و میزان برق مصرفی ساختمان 41.36 kWh/m<sup>2</sup> کاهش پیدا می کند، همچنین شرایط آسایش حرارتی افراد در محیط بهبود یافته و میزان رضایت مندی افراد از محیط افزایش یافته است.

### کلمات کلیدی:

"PCM"، "آسایش حرارتی"، "بهبود سازی مصرف انرژی"، "ساختمان های آموزشی"

## The use of PCM material on the walls of educational buildings to increase the quality of space and reduce energy consumption

(Case study: 9 classes in Mashhad)

Faramarz Fadaee<sup>1</sup>, Paria Ildarabadi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Khorasan Institute of Higher Education, Mashhad, Iran

<sup>2</sup>Khorasan Institute of Higher Education, Mashhad, Iran

Email Address: Paria.ildarabadi@Khorasan.ac.ir

fadaee.faramarz@khorasan.ac.ir

### Abstract

The wall in the building has always been discussed as one of the parameters affecting thermal exchange and energy consumption. The purpose of this research is to reduce energy consumption in buildings and to provide people with thermal comfort. Accordingly, the effect of PCM on the thermal behavior of the wall has been studied in educational buildings. These studies are presented in terms of cooling, heating and electric energy in the building. Also, PMV and PPD were used to assess the thermal comfort conditions. analyzes and simulations by Grasshopper, Honeybee and Ladybug plugins. The results of the research show that, with PCM, between the walls of the building during the year, the number of people requiring cooling is 41.36 kWh/m<sup>2</sup>, heating is 44.77 kWh/m<sup>2</sup>, and the building power consumption is 41.36 kWh/m<sup>2</sup>. Also, Improved thermal comfort and improved personal satisfaction.

### Keywords

"PCM", "Thermal comfort", "energy efficiency optimization", "educational buildings"

## ۱- مقدمه

رضایت دانش آموزان از کیفیت محیط، جدار خارجی یک دبستان ۹ کلاسه در شهر مشهد مورد ارزیابی قرار می گیرد.

## • فضای آموزشی

یادگیری، بخش مرکزی زندگی هر فرد است. محیط های یادگیری و آموزشی از عناصر مختلفی تشکیل شده اند که کنار هم می توانند باعث آموزش و یادگیری دانش آموزان شوند. مدرسه خانه دوم دانش آموزان است، پس باید بتواند به موازات تامین شرایط آموزشی دانش آموزان، شرایط محیطی و حرارتی مناسبی را نیز فراهم کند. امروزه مسئله صرفه جویی انرژی برای تامین آسایش افراد در ساختمان های آموزشی مورد توجه مهندسين قرار گرفته است، و کشورهای مختلف در آیین نامه های صرفه جویی انرژی، ضوابط و مقرراتی را تبیین کرده اند در پژوهش حاضر به منظور رسیدن به شرایط آسایش حرارتی افراد در محیط داخلی فضای آموزشی و احساس رضایت دانش آموزان از کیفیت محیط، جدار خارجی یک دبستان ۹ کلاسه در شهر مشهد مورد ارزیابی قرار می گیرد. مطالعه بر روی جدار خارجی ساختمان صورت می پذیرد، که می تواند موجب کاهش بار سرمایشی، گرمایش و نهایتاً کاهش مصرف انرژی در بنا شود، که آسایش حرارتی افراد را نیز در پی دارد.

• PCM<sup>۱</sup> - مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده به موادی گفته می شود که در درون خود قابلیت جذب و ذخیره پنهان انرژی گرمایی را دارند. ذخیره انرژی در این مواد بصورت تغییر فاز اتفاق می افتد، یعنی تغییر حالت از جامد به مایع و بالعکس. این مواد به هنگام تغییر فاز گرما را از محیط جذب کرده و یا به محیط پس می دهند. مواد تغییر فاز دهنده ای که برای ذخیره انرژی، در مترتال ها بکار می روند باید دارای گرمای نهان بالایی باشند (Gracia, 2019). کاربرد گرمای نهان ذخیره ساز انرژی به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مواد تغییر فاز دهنده بستگی دارد. PCM ها به عنوان یکی از ظرفیت های خاص ذخیره انرژی در مصارف گوناگون کاربرد دارند (Yasin et al., 2018 - Mondal, 2008). مواد تغییر فاز دهنده مقادیر زیادی از گرمای محیط را جذب خود می کند، اما این گرمای جذب شده را صرف افزایش دمای خود نمی کند بلکه این مقدار دما را صرف تغییر فاز خود کرده و طی این فرآیند دمای خود و محیط را ثابت نگه میدارد (Huang et al. 2013 - Stritih et al. 2018).

در طول تاریخ، ساختمان ها همواره متحمل تغییرات زیادی شده اند تا بتوانند نیازهای اجتماعی بشر را تامین کنند. افزایش جمعیت با ظهور آسمان خراش ها همراه بوده که به موازات آن، افزایش مصرف انرژی را به همراه داشته است. با این وجود، همچنان استفاده از منابع انرژی و سوخت های فسیلی باعث افزایش انتشار آلاینده ها به محیط می شود و اثرات مخرب زیست محیطی را در پی دارد. مصرف بالای انرژی در ساختمان ها از عمده ترین مشکلات کشورهای در حال توسعه است (Zheng et al. 2010 - خداکرمی و قبادی، ۱۳۹۵).

نرخ رشد مصرف حامل های انرژی طی سال های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۶ در جهان ۱/۹۸ درصد، و در ایران ۶/۳ درصد بوده است (سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور، ۱۳۹۰)، این آمار نشان می دهد که، نرخ رشد مصرف حامل های انرژی در ایران بیش از سه برابر جهانی بوده است (زارعی و همکاران، ۱۳۹۲). محدوده آسایش وضعیتی است که در آن حدود ۸۰ درصد مردم احساس راحتی کنند. بر این اساس شش فاکتور اصلی آسایش از جمله دمای هوا، رطوبت، تشعشع، جریان هوا، پوشش و سطح فعالیت افراد بر میزان آسایش حرارتی تاثیر گذار است (۱۳۹۴ کامیابی - Wu et al. 2019). در میان مولفه های مصرف انرژی در ساختمان، سیستم های گرمایشی و سرمایشی از جمله مصرف کنندگان عمده انرژی هستند. توجه به کاهش مصرف این مولفه ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است چرا که ۷۰٪ گاز طبیعی مصرفی کشور را به خود اختصاص می دهند (حیدری و جهانی نوق، ۱۳۹۳).

مصرف انرژی در بخش ساختمان ها حدود ۴۰ درصد از کل مصرف انرژی اکثر کشورهای جهان را، به خود اختصاص داده است (Ander Stephan, 2011)، بنابراین استفاده از مصالحی با ظرفیت حرارتی بالا در بهینه سازی مصرف سوخت بسیار موثر است. بدین منظور، توسعه و ارتقای فن آوری ها، سیستم ها، شیوه های کارآمد و مقرون به صرفه ضروری است (Berardi and Soudian, 2019).

جدار خارجی ساختمان ها مهم ترین اجزای ساختمان است که به منظور جداسازی محیط کنترل شده داخلی با محیط کنترل نشده خارج شناخته می شود. در مقوله ی کنترل حرارتی داخلی ساختمان، یکی از مهم ترین پارامترها برای دیوار خارجی مقاومت حرارتی آن است. در پژوهش حاضر به منظور رسیدن به شرایط آسایش حرارتی افراد در محیط داخلی فضای آموزشی و احساس

<sup>1</sup> Phase Change Material.

گرفته شده درون پاکت ها، از ماده تغییر فازدهنده پارافین<sup>۱</sup> در گروه مواد آلی است.

#### • پیشینه پژوهش های انجام شده

با توجه به افزایش مصرف انرژی برای گرم کردن و خنک سازی فضا، توجه به کاهش مصرف انرژی ساختمان، تامین آسایش حرارتی افراد در محیط و سیستم های ذخیره انرژی در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته است.

Saffari در سال ۲۰۱۷ پژوهشی برای کاهش مصرف انرژی ساختمان انجام داد. در این پژوهش، یک روش بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی توسط نرم افزار EnergyPlus و GenOpt انجام شده است. نتایج نشان می دهد که در شرایط آب و هوایی غالب، بهترین دمای ذوب PCM برای کاهش مصرف انرژی سالانه، نزدیک به حداکثر ۲۶ درجه سانتیگراد (دامنه ۲۴-۲۸ درجه سانتیگراد) است (Saffari, 2017).

در سال ۲۰۱۹ پژوهشی توسط Elarga و همکارانش انجام شد. این مطالعه یک الگوریتم بهینه سازی چند منظوره را برای یکپارچه سازی نوآورانه از ماژول های PV-PCM تهیه مجازی در ساختمان های نمای شیشه ای مورد مطالعه قرار داده است. هدف این مطالعه بهینه سازی پارامترهایی است که بیشترین تاثیر را بر عملکرد حرارتی و انرژی دارند. تجزیه و تحلیل بهینه سازی پارامترهایی مانند: جریان تهویه و برنامه زمانی (برای به دست آوردن بهترین ترکیب با عملکرد PCM و بارهای خارجی- داخلی)، را مورد بررسی قرار می دهد. نتایج پژوهش نشان می دهد که صرفه جویی در بارهای حرارتی برای بهترین شرایط آسایش در یک فرد به ۲۶٫۴٪ می رسد (Elarga et al., 2017).

مطالعه ای در سال ۲۰۱۹ در رابطه با سیستم دوجداره PCM انجام شد، که این سیستم قادر به افزایش شرایط راحتی حرارتی است، و مصرف انرژی را به حداقل می رساند. رفتار چنین سیستمی در پنج منطقه مختلف آب و هوایی با تاکید بر آب و هوای خشک و نیمه خشک، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که سیستم PCM دو لایه، شرایط راحتی حرارتی را از ۷۳٪ تا ۹۳٪ در آب و هوای خشک، و از ۶۳٪ تا ۷۵٪ در آب و هوای نیمه خشک افزایش می دهد. علاوه بر این، مصرف انرژی گرمایشی در آب و هوای خشک را ۱۷/۵٪ کاهش می دهد (Ahangari & Marefat, 2019).

مواد تغییر فاز دهنده بر اساس دمای تغییر فاز به سه دسته کلی یوتکتیک ها، هیدرات نمک و مواد آلی تقسیم میشوند (Ruolang et al. 2009 – Butala & Stritih, 2009).

- یوتکتیک ها نمک های محلول در آب هستند که دمای تغییر فاز آن ها کمتر از صفر درجه سانتیگراد است. شامل: مواد معدنی-معدنی، معدنی آلی و آلی-آلی هستند.

- هیدرات نمک، نمک های خاصی هستند که دمای تغییر فاز آن ها بالای صفر درجه سانتی گراد است. شامل: هیدرات های نمک و فلزات هستند.

- مواد آلی از زنجیره های بلند کربن و هیدروژن تشکیل شده اند، که دمای تغییر فاز آن ها بالای صفر درجه سانتیگراد است. شامل پارافین ها هستند.

استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در طراحی سیستم های ذخیره حرارت باید دارای خواص فیزیکی (چگالی بالا، تغییر حجم کم، تغییر فاز تجدیدپذیر)، شیمیایی (سازگار با مواد ساختاری سیستم مورد نظر، پایداری شیمیایی، عدم سمی بودن، عدم خطر احتراق)، حرارتی (انتقال حرارت خوب، دمای تغییر فاز مناسب)، سینتیکی (عدم فوق تبرید، نرخ تبلور کافی)، و اقتصادی (قابلیت بازیافت، قیمت مناسب، دسترسی آسان) باشد (Wang et al. 2009 – Yang et al. 2019).

با توجه به اینکه مواد تغییر فاز دهنده در طول دوره کاربرد خود در دو فاز مایع و جامد هستند، لذا باید در محفظه هایی قرار گیرند، تا این محفظه ها مانع از هدر رفت و جاری شدن فاز مایع آنها شود. مواد تغییر فاز دهنده در صنعت ساختمان در سه حالت میکروکپسول ها، پاکت های پلاستیکی حاوی مواد تغییر فاز دهنده و پانل های ساخته شده از پلی اتیلن وجود دارند (آرامی و مختاری یزدی، ۱۳۹۲).

#### • استفاده از ماده PCM در پژوهش حاضر

عوامل محیط کالبدی می توانند ابزاری مناسب برای ایجاد فضایی متعادل باشند. در پژوهش حاضر تاثیر ماده تغییر فاز دهنده در جدار خارجی ساختمان بر روند آسایش حرارتی افراد، و مصرف انرژی ساختمان مورد بررسی قرار می گیرد.

در این پژوهش از پاکت های حاوی مواد تغییر فاز دهنده استفاده می شود، که قابل دسترس و مقرون به صرفه هستند. این پاکت ها در فواصل بین جداره ها قرار می گیرند، و PCM در نظر

فضا)، نیز مدنظر گرفته شده است. به منظور تحلیل داده ها از استاندارد اشری<sup>۵</sup> (ASHRAE Standard)، به عنوان مرجع برای مطالعه شبیه سازی انرژی استفاده شده است، تحلیل ها و آنالیزهای نرم افزاری از این استاندارد تبعیت می کنند.

فرآیند پژوهش به این صورت است که ابتدا آنالیز حرارتی در حالت فعلی بنا انجام می شود، و سپس با در نظر گرفتن ماده تغییر فاز دهنده PCM در جدار خارجی ساختمان آنالیزها انجام می پذیرد. و در نهایت تحلیل ها بین دو حالت وضعیت پایه و با در نظر گرفتن PCM صورت می گیرد.

موارد مورد بررسی میزان نیاز به سرمایش، گرمایش و انرژی الکتریکی<sup>۶</sup> می باشد، که در دو وضعیت به صورت سالانه انجام می گیرد.

همچنین در ادامه بررسی ها دو شاخص راحتی حرارتی PMV<sup>۷</sup> (شرایط حالت پایدار) و PPD<sup>۸</sup> (درصد نارضایتی افراد در محیط)، نیز مورد ارزیابی قرار می گیرد. این دو عامل میزان رسیدن افراد به شرایط راحتی را مورد سنجش قرار می دهد، که در پژوهش حاضر در دو حالت، وضعیت فعلی و وضعیت با در نظر گرفتن PCM مورد سنجش قرار می گیرد.

#### • محدوده مورد مطالعه

نمونه مورد بررسی در این پژوهش دبستان ۹ کلاسه در شهر مشهد در نظر گرفته شده است. به منظور سادگی در حجم، انطباق با اکثر قطعات پیشنهادی برای ساخت دبستان و سرعت ساخت، این فرم بنا جزو متداول ترین فرم ساخت دبستان در شهر مشهد می باشد (اداره نوسازی مدارس شهر مشهد، ۱۳۹۶).

#### • مشخصات هندسی ساختمان

ساختمان مورد نظر در وسط حیاط قرار دارد، و از چهار طرف دارای باز شو می باشد. ساختمان دو طبقه بر روی همکف است، و بررسی ها در طبقه دوم ساختمان انجام می گیرد.

ورودی ساختمان از جبهه جنوب و قسمت میانی می باشد. مساحت کف ساختمان ۳۳۱/۵۶ مترمربع، و ارتفاع بنا تا سقف طبقه دوم ۱۱/۲۹ متر و با در نظر گرفتن فرم نمای ساختمان ۱۱/۸۰ متر می باشد. ارتفاع هر طبقه ۳/۲ متر و ضخامت سقف ۰/۳۵ است. شکل شماره ۱ پلان طبقه دوم دبستان، و مشخصات

پژوهشی درباره توسعه ویژگی های PCM مبتنی بر زیست کامپوزیت در ساختمان، توسط Boussaba و همکارانش در سال ۲۰۱۸ انجام پذیرفته است. این مطالعه با هدف ایجاد مواد جدید تغییر فاز کامپوزیتی، با استفاده از اجزای سازگار با محیط زیست و کم هزینه انجام شده است. نوعی PCM بر مبنای چربی نارگیل (TES) مورد مطالعه قرار گرفته، که در یک ماتریس کامپوزیتی آماده شده، و در آزمایشگاه از الیاف رس و سلولز گنجانیده شده است. نتایج حاصل از خصوصیات حرارتی نشان می دهد که کامپوزیت PCM آماده شده از TES به منظور ارتقاء اینرسی حرارتی در ساختمان ها مورد استفاده قرار می گیرد. (Boussaba et al., 2018).

پژوهشی از Elnajjar در سال ۲۰۱۷، تاثیر ساختار PCM ها را به منظور مدیریت حرارتی مورد بررسی قرار داده است. در این مطالعه یک روز در مقابل یک تحلیل هفت روزه توسط نرم افزار انجام شده، و در نهایت با توجه به رفتار چرخه PCM در مصالح ساختمانی مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد بر اساس تجزیه هفت روزه PCM نوع P116، با دمای ذوب ۴۷ درجه سانتیگراد بهترین عملکرد را از خود نشان می دهد (Elnajjar, 2017).

#### ۱- روش انجام تحقیق

در پژوهش حاضر گردآوری اطلاعات در چند بخش صورت می پذیرد، قسمتی مبتنی بر مطالعات اسنادی-کتابخانه ای (شامل مطالعه متون و مقالات انجام شده در حوزه آسایش حرارتی)، قسمتی از مطالعات در حوزه بهینه سازی مصرف انرژی در ساختمان و مطالعاتی در این حوزه که توسط نرم افزارهای شبیه سازی انجام گرفته اند، می باشد. قسمتی از پژوهش نیز آنالیز و شبیه سازی توسط نرم افزار می باشد و در نهایت تحلیل و بررسی انجام می پذیرد.

این پژوهش بر روی یک ساختمان آموزشی (دبستان ۹ کلاسه در شهر مشهد)، انجام می شود. ساختمان مورد نظر در نرم افزار راینو<sup>۱</sup> و گرس هاپر<sup>۲</sup> مدل سازی می شود، و فرآیند تحلیل و بررسی توسط پلاگین های الگوریتمیک هانی بی و لیدی باگ<sup>۳</sup> صورت می پذیرد. برای انجام پژوهش از داده های آب و هوایی شهر مشهد<sup>۴</sup> استفاده می شود. همچنین تعداد استفاده کنندگان از فضا و زمان های مورد استفاده در طول روز (زمان های اشغال

5 ASHRAE 55.

6 Cooling – Heating – Electric Energy.

7 Predicted Mean Vote.

8 Predicted Percentage of Dissatisfied.

1 Rhinoceros 6.

2 Grasshopper Software.

3 Honeybee & Ladybug Plugins.

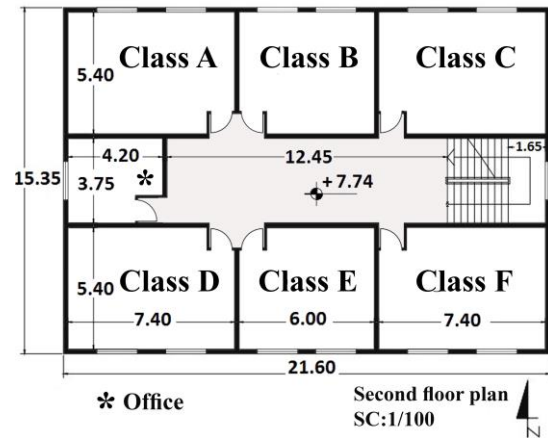
4 Epw & Stat Files – Mashhad.

فضاهای مورد بررسی، و شکل شماره ۲ نمای اصلی دبستان را نشان می دهد.

مشخصات حرارتی جدار خارجی در جدول شماره ۱، و ضخامت لایه ها در جدول شماره ۲ ذکر شده است. اشکال شماره ۳ و ۴ جزئیات جدار خارجی بنا را در وضعیت فعلی و با در نظر گرفتن PCM نشان می دهد.

جدول ۱- مشخصات حرارتی لایه های جدار خارجی ساختمان - به ترتیب از خارج به داخل ( Lee et al. 2018 - Fonseca et al. 2018 )

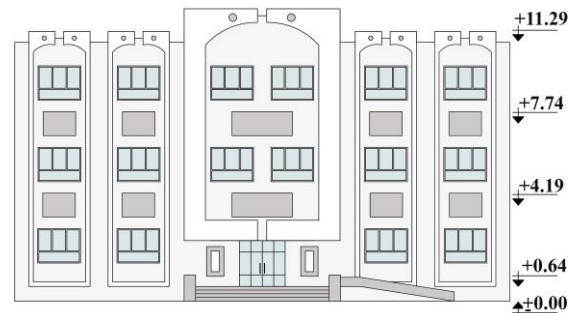
Material	Conductivity (W/m <sup>2</sup> K)	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Specific Heat (J/Kg <sup>o</sup> K)
Brickfacade	1	1900	840
Cement	0.29	1442	840
Brick	0.8	1600	840
Paraffin - PCM	0.21	760	1200
Brick	0.8	1600	840
Gypsum Soil	1.15	1000	840
Plaster	0.7	1300	1000



شکل ۱- پلان طبقه دوم دبستان- مشخصات فضاهای مورد بررسی

جدول ۲- ضخامت لایه های دیوار در وضعیت فعلی و با در نظر گرفتن PCM

Material	Thickness (m)	
	Base	PCM
Brickfacade	0.03	0.03
Cement	0.03	0.03
Brick	-	0.1
Paraffin - PCM	-	0.05
Brick	0.2	0.1
Gypsum Soil	0.025	0.025
Plaster	0.015	0.015



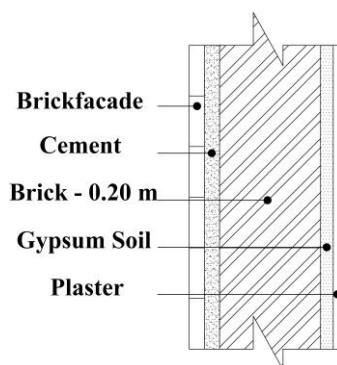
شکل ۲- نمای اصلی ساختمان

### • مشخصات حرارتی و جزئیات جدار خارجی ساختمان

هر کدام از مصالح ساختمانی دارای خواص ترموفیزیکی متفاوتی هستند. برای آنالیزها در این پژوهش ۳ خواص ترموفیزیکی مصالح از جمله هدایت حرارتی<sup>۱</sup>، چگالی<sup>۲</sup> و گرمای ویژه<sup>۳</sup> مورد استفاده قرار می گیرد. لایه های جدار خارجی ساختمان در حالت فعلی به ترتیب از خارج به داخل عبارتند از: آجر نما، سیمان، آجر، خاک گچ و گچ.

لایه های جدار خارجی با در نظر گرفتن PCM به ترتیب از خارج به داخل عبارتند از: آجر نما، سیمان، آجر، PCM، آجر، خاک گچ و گچ.

در این پژوهش لایه PCM به صورت پاکت های حاوی ماده تغییر فاز دهنده پارافین در نظر گرفته شده است. گرمای نهان پارافین که بعنوان PCM مورد ارزیابی قرار می گیرد 220 KJ/Kg است.



شکل ۳- لایه های جدار خارجی بنا - در وضعیت فعلی

1 Conductivity.  
2 Density.  
3 Specific Heat.

همچنین میانگین گروه سنی دانش آموزان ۹ سال در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- مفاهیم دامنه +۳ تا -۳ در PMV

ASHRAE thermal sensation scale	Sensation
+3	Hot
+2	Warm
+1	Slightly warm
0	Neutral
-1	Slightly cool
-2	Cool
-3	Cold

شاخصه ی PMV از روابط زیر قابل محاسبه است (نجفی و نجفی، ۱۳۹۱- ذوالفقاری، ۱۳۸۶- Matzarakis et al. 2007):  
(مفهوم عبارات معادلات در جدول شماره ۵ آورده شده است).

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) [(M-W) - H - E_c - E_{rec} - E_{rec}]$$

$$E = 3.05 * 10^{-3} (256 t_{sk} - 3373 - P_a) + E_{sw}$$

$$E_c = 3.05 * 10^{-3} [5733 - 6.99 * 9M - W) - P_a] + 0.42 (M - W - 58.15)$$

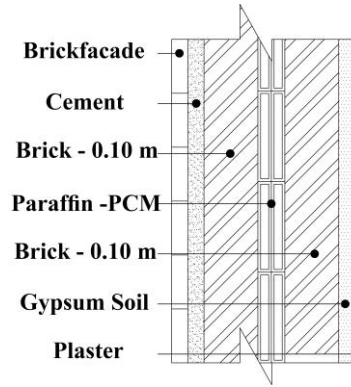
$$E_{rec} = 0.0014 M (34 - T_a)$$

$$E_{rec} = 1.72 * 10^{-5} M (5867 - P_a)$$

$$H = K_{cl} = t_{sk} - t_{cl} / I_{cl}$$

جدول ۵- مفهوم عبارات معادلات PMV

عبارت	تعریف	واحد
$C_{rec}$	تبادل حرارت همرفتی تعرق	$W/m^2$
$E_{rec}$	تبادل حرارت تبخیری تعریق	$W/m^2$
$E_c$	تبادل حرارت تبخیری در سطح پوست زمانیکه در حالت حرارتی خنثی قرار دارد	$W/m^2$
$I_{cl}$	تابش لباس به طور متوسط برای تمام بدن	$W/m^2$
$t_{cl}$	دمای سطح لباس	$^{\circ}C$
$t_{sk}$	دمای متوسط پوست	$^{\circ}C$
$M$	نرخ سوخت و ساز بدن	$W/m^2$
$W$	نیروی مکانیکی موثر	$W/m^2$
$e$	تبادل حرارت تبخیری در سطح پوست	$W/m^2$
$H$	تلفات حرارت خشک به صورت همرفت - هدایت و تابش	$W/m^2$
$P_a$	رطوبت - فشار بخار جزئی هوا	Pa
$T_a$	دمای هوا	$^{\circ}C$



شکل - لایه های جدار خارجی بنا - PCM

### • تعداد افراد استفاده کننده

در این پژوهش تعداد افراد استفاده کننده از فضا در ساعات مختلف روز در نظر گرفته شده است. به ازای هر مترمربع کف اتاق برای کلاس های درس (کلاس های ۲۰ نفره)، ۰/۰۵ فرد (یعنی در صورت حضور تمام دانش آموزان ۰/۱ فرد می شود)، در فضاهای اداری به ازای هر مترمربع کف اتاق ۰/۲۵ فرد (اتاق اداری ۴ نفره)، در نظر گرفته شده است. درصد حضور افراد به صورت ساعتی در تمام طول سال ثابت فرض شده است. جدول شماره ۳ درصد حضور افراد را به صورت ساعتی در طول سال نشان می دهد (در برنامه زمان بندی، بررسی در روزهای تعطیل و فصل تابستان انجام نگرفته است، و این روزها در پروسه آنالیز قرار نگرفته اند).

جدول ۳- درصد حضور افراد در فضا

Office	Class	Time
% 25	% 10	06:00 - 07:00
% 100	% 95	07:00 - 12:00
% 75	% 60	12:00 - 14:00
% 50	% 10	14:00 - 16:00
0	0	16:00 - 06:00

### • شرایط آسایش حرارتی و درصد ناراضیاتی افراد از محیط - PMV, PPD

استفاده کنندگان از محیط همواره سعی می کنند فضایی را فراهم آورند که حداکثر آسایش راحتی آنان را تامین کند. برای این منظور در شبیه سازی ها، دو مدل نرم افزاری PMV و PPD برای ارزیابی شرایط راحتی افراد مورد سنجش قرار می گیرند. این دو عامل به عنوان شاخص راحتی حرارتی شناخته می شوند و طبق استاندارد ASHRAE، PMV دامنه ای بین -3 تا +3 دارد، و PPD درصد ناراضیاتی آسایش افراد در محیط داخلی است. جدول شماره ۴ مفاهیم دامنه PMV را نشان می دهد. برای بررسی میزان آسایش و درصد ناراضیاتی فرض شده است که، کاربران محیط داخلی از لباس های مشابه استفاده می کنند، و وضعیت فیزیکی آن ها در حالت نشسته پشت میز است.

جدول ۶- میزان نیاز سرمایش، گرمایش و انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن PCM در جدار خارجی - سالانه

Zones (Yearly)	Cooling (kWh/m <sup>2</sup> )	Heating (kWh/m <sup>2</sup> )	Electric Energy (kWh/m <sup>2</sup> )
Class A	32.47	35.73	11.16
Class B	34.9	35.16	12.71
Class C	32.11	37.58	11.65
Class D	40.06	18.97	11.43
Class E	45.36	17.64	12.58
Class F	42.55	20.74	11.06
Office	54.17	30.44	12.34
Stairs	56.19	32.88	12.69
<b>Total</b>	<b>337.81</b>	<b>229.14</b>	<b>95.62</b>

جدول ۷- میزان PMV و PPD- در وضعیت فعلی بنا

Zones (Yearly)	PMV	PPD	
Class A	22 Dec	-2.13	%70
	22 Jun	1.13	%35
Class B	22 Dec	-2.09	%69
	22 Jun	1.11	%34
Class C	22 Dec	-2.14	%70
	22 Jun	1.13	%35
Class D	22 Dec	-1.84	%61
	22 Jun	1.15	%36
Class E	22 Dec	-1.79	%58
	22 Jun	1.14	%36
Class F	22 Dec	-1.83	%59
	22 Jun	1.15	%36
Office	22 Dec	-2.12	%69
	22 Jun	1.23	%41
Stairs	22 Dec	-2.1	%66
	22 Jun	1.32	%42

جدول ۸- میزان PMV و PPD- با در نظر گرفتن PCM

Zones (Yearly)	PMV	PPD	
Class A	22 Dec	-2.04	%66
	22 Jun	1.01	%33
Class B	22 Dec	-1.99	%65
	22 Jun	0.99	%33
Class C	22 Dec	-2.00	%66
	22 Jun	0.99	%33
Class D	22 Dec	-1.74	%57
	22 Jun	1.03	%33
Class E	22 Dec	-1.68	%57
	22 Jun	1.01	%33
Class F	22 Dec	-1.69	%57
	22 Jun	1.02	%33
Office	22 Dec	-1.98	%66
	22 Jun	1.12	%35
Stairs	22 Dec	-1.99	%66
	22 Jun	1.20	%41

شاخصه ی PPD برای پیش بینی درصد ناراضایتی افراد از محیط حرارتی تعیین شده توسط PMV شکل می گیرد. این شاخصه از طریق رابطه زیر محاسبه می شود (نجفی و نجفی، ۱۳۹۱- ذوالفقاری، ۱۳۸۶- Matzarakis et al. 2007):

$$PPD=100-95e^{-(0.03353 PMV4 + 0.2179 PMV2)}$$

معیار توصیه شده در استاندارد اشری برای PMV بین 0.5+ و - 0.5 می باشد، که میزان ناراضایتی افراد در این وضعیت کمتر از 15% است. در این پژوهش میزان PMV و PPD در دو روز سرد و گرم سال ۱ دی (22 December)، و ۱ تیر (22 June) مورد سنجش قرار می گیرند.

### ۳- نتایج

از دست دادن حرارت از طریق جداره های خارجی ساختمان و همچنین ورود گرمای ناخواسته دو عامل اصلی در بنا است که مستقیماً به بهره‌وری انرژی اثر می گذارد. ساختمان مورد بررسی ابتدا در حالت فعلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، و سپس با در نظر گرفتن ماده تغییر فاز دهنده پارافین مورد ارزیابی قرار گرفت.

#### • یافته های پژوهش در وضعیت فعلی و با در نظر گرفتن PCM در جدار خارجی ساختمان

میزان نیاز افراد به سرمایش و گرمایش در دو وضعیت پایه و PCM مورد تحلیل قرار گرفته است. و میزان انرژی الکتریکی مصرفی ناشی از سرمایش و گرمایش نیز برآورد شده است. در جداول شماره ۵ و ۶ این مقادیر در دو وضعیت بررسی آورده شده است.

برای ارزیابی آسایش حرارتی افراد در محیط داخلی میزان دو شاخصه ی PMV و PPD در دو حالت مورد سنجش قرار گرفته است. در جداول شماره ۷ و ۸ این ارزیابی ها در دو روز گرم و سرد سال آورده شده است.

جدول ۵- میزان نیاز سرمایش، گرمایش و انرژی الکتریکی در وضعیت فعلی جدار خارجی - سالانه

Zones (Yearly)	Cooling (kWh/m <sup>2</sup> )	Heating (kWh/m <sup>2</sup> )	Electric Energy (kWh/m <sup>2</sup> )
Class A	38.59	42.34	13.37
Class B	38.49	39.80	13.29
Class C	38.87	44.19	13.42
Class D	47.57	25.50	13.35
Class E	49.26	22.22	13.28
Class F	47.75	26.98	13.37
Office	58.69	35.40	13.31
Stairs	59.95	37.48	13.32
<b>Total</b>	<b>379.17</b>	<b>273.91</b>	<b>106.71</b>

#### ۴- نتیجه گیری

برای رسیدن به شرایطی پویا و مطلوب، ارائه راهکارهایی که بتواند شرایط آسایش افراد را در محیط داخلی فراهم آورد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ساختمان‌های منعطف بر پایه انرژی نیازمند تبیین الگوهای دقیق حرارتی هستند. پژوهش حاضر با هدف افزایش آسایش حرارتی ساکنان در محیط داخلی فضای آموزشی، و همچنین کاهش مصرف انرژی در ساختمان، ماده تغییر فاز دهنده (PCM) در جدار خارجی ساختمان را مورد بررسی قرار داده است. برای این بررسی از ماده تغییر فاز دهنده پارافین استفاده شده است، که در دسته مواد آلی، از زیرمجموعه های مواد تغییر فاز دهنده است.

بدین منظور با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در جدار خارجی ساختمان میزان آسایش حرارتی افراد و میزان برق مصرفی ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. به منظور فراهم آوردن شرایط آسایش حرارتی افراد دو عامل اصلی میزان نیاز به سرمایش (Cooling)، و میزان نیاز به گرمایش (Heating)، مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین با توجه به تغییرات میزان نیاز به سرمایش و گرمایش، میزان تغییرات برق مصرفی ساختمان (Electric Energy)، نیز مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه بررسی ها به منظور سنجش و ارزیابی آسایش حرارتی افراد در محیط داخلی از دو شاخصه ی PMV و PPD استفاده شده است. PMV میزان آسایش راحتی افراد، و PPD درصد نارضایتی افراد در محیط داخلی را مورد سنجش قرار می دهد.

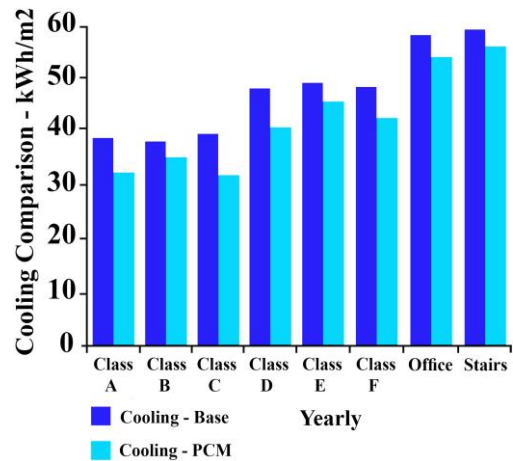
در این پژوهش از نرم افزار Rhinoceros 6 برای مدل سازی استفاده شده، و به منظور انجام شبیه سازی ها از نرم افزار الگوریتمیک Grasshopper - پلاگین های Honeybee و Ladybug استفاده شده است. همچنین از استاندارد ASHRAE به عنوان مرجع اطلاعات (به منظور سنجش و بررسی داده ها)، استفاده شده است.

به منظور فراهم آوردن شرایط آسایش حرارتی افراد باید میزان نیاز به گرمایش و سرمایش کاهش یابد، تا از شدت گرما و سرما کم شود و محیطی ایده آل تامین گردد. جدول شماره ۹ مقایسه سالانه بین نیاز به سرمایش، گرمایش و برق مصرفی را در طول سال نشان می دهد. با توجه به مقادیر و بررسی ها؛

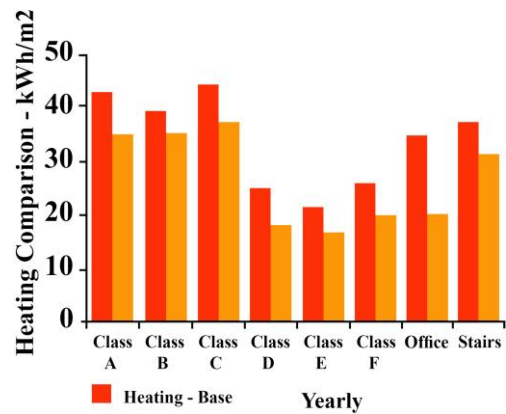
- میزان نیاز به سرمایش  $41.36 \text{ kWh/m}^2$
- میزان نیاز به گرمایش  $44.77 \text{ kWh/m}^2$

#### • مقایسه و بررسی

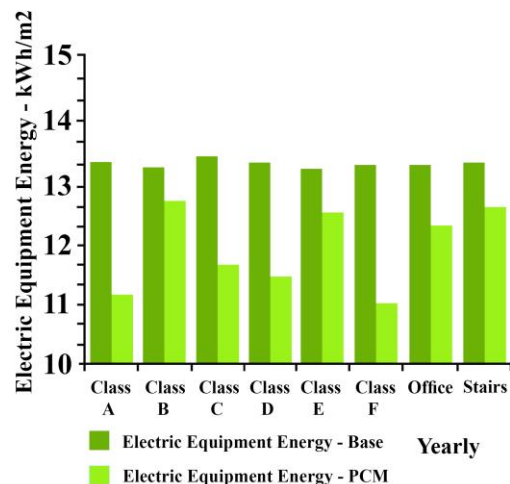
در پژوهش حاضر به منظور تامین آسایش حرارتی افراد و کاهش میزان برق مصرفی ساختمان، باید میزان نیاز افراد به سرمایش، گرمایش و برق مصرفی کاهش پیدا کند. با توجه به جداول شماره ۵ و ۶ در تمامی قسمت های مورد بررسی این مقادیر با در نظر گرفتن PCM کاهش یافته اند. در تصاویر شماره ۵، ۶ و ۷ تغییرات بصورت کیفی و نموداری نمایش داده شده است.



شکل ۵- تغییرات نیاز به سرمایش در فضاهای مورد بررسی

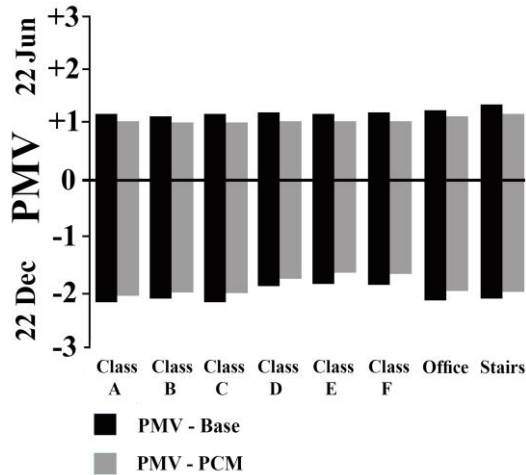


شکل ۶- تغییرات نیاز به گرمایش در فضاهای مورد بررسی

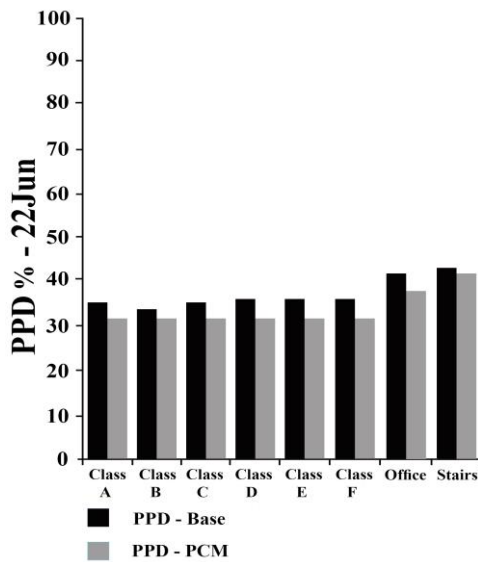


شکل ۷- تغییرات نیاز به برق مصرفی در فضاهای مورد بررسی

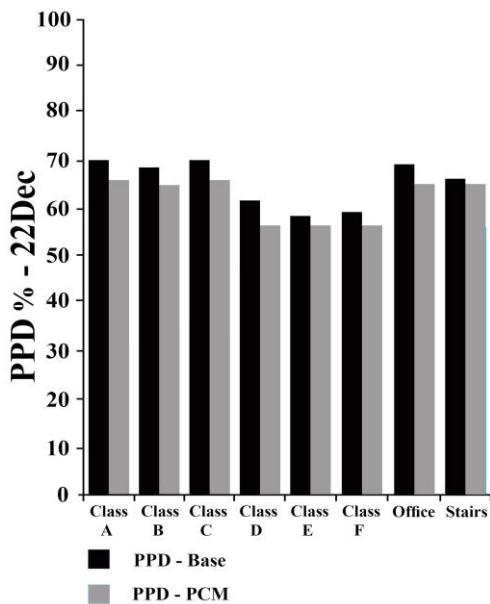




شکل ۹- تغییرات میزان PMV در فضاهای مورد بررسی - گرمترین و سردترین روز سال



شکل ۱۰- تغییرات میزان PPD در گرمترین روز سال

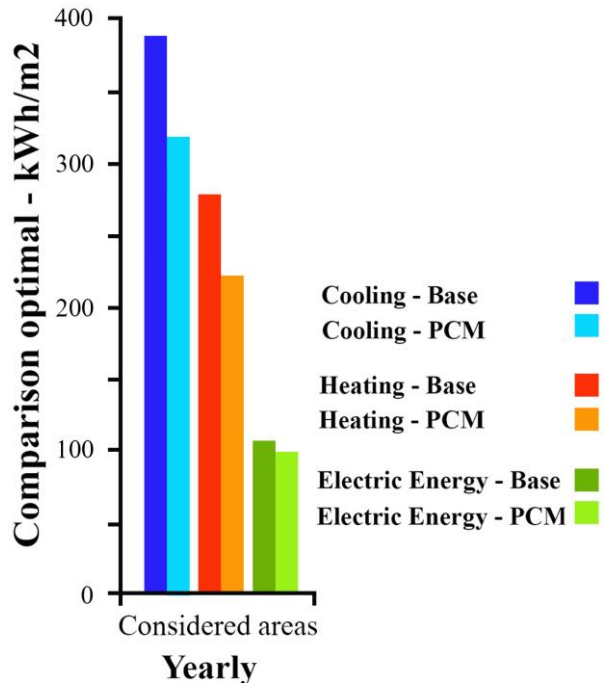


شکل ۱۱- تغییرات میزان PPD در سردترین روز سال

در طول سال کاهش یافته است. این میزان کاهش باعث کاهش در طول سال کاهش یافته است. این میزان کاهش باعث کاهش 10.55 kWh/m<sup>2</sup> برق مصرفی ساختمان می شود. در شکل شماره ۸ بصورت کیفی و نموداری این تغییرات نمایش داده شده است.

جدول ۹- مقایسه تغییرات نیاز به سرمایش، گرمایش و برق مصرفی - سالانه

Consumption (Yearly)	Cooling (kWh/m <sup>2</sup> )	Heating (kWh/m <sup>2</sup> )	Electric Energy (kWh/m <sup>2</sup> )
Base	379.17	273.91	106.71
By PCM	337.81	229.14	95.62
Consumption	41.36	44.77	10.55



شکل ۸- تغییرات نیاز به سرمایش، گرمایش و برق مصرفی در فضاهای مورد بررسی - سالانه

با توجه به تغییرات کاهش Cooling و Heating در فضاهای مورد بررسی، میزان تغییرات آسایش راحتی افراد بر اساس دو معیار سنجش PMV و PPD نیز کاهش پیدا کرده است. یعنی میزان PMV به شرایط راحتی نزدیک شده، و میزان PPD نیز کاهش پیدا کرده که معادل افزایش رضایت افراد از محیط داخلی است. در تصاویر شماره ۹، ۱۰ و ۱۱ میزان تغییرات PMV و PPD آورده شده است.

PCM ها جزو مصالح هوشمند هستند، در اثر تغییر فاز انرژی را جذب نموده و در سیکل بعدی با تغییر فاز معکوس انرژی را آزاد می کند. این تغییر فاز معمولاً با تبادل حجم بالای انرژی همراه است (گرمای نهان تغییر فاز). تبادل حجم بالای گرما به صورت خودکار و هوشمندانه همساز با طبیعت می باشد، و بر طبق تغییرات دمای محیط صورت می گیرد.

در نهایت می توان گفت ساختار ماده تغییر فاز دهنده پارافین به عنوان یک نمونه متریال توسعه یافته، با داده ها و اطلاعات مواد و مصالح ساختمان می تواند زمینه ای برای ارتقا و بهینه سازی سیستم ساختمان مورد استفاده قرار گیرد، که کاهش هزینه ها و بهره‌وری انرژی را به همراه دارد.

این پژوهش تاثیر متریال PCM پارافینی در جدار خارجی ساختمان را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که:

- ماده تغییر فاز دهنده PCM می تواند تاثیرات مثبتی در عملکرد حرارتی ساختمان در اقلیم های مختلف داشته باشد.
- PCM شرایط آسایش حرارتی افراد در محیط داخلی را بهبود می بخشد، و باعث افزایش رضایت افراد از محیط می شود.
- با در نظر گرفتن متریال PCM میزان استقامت حرارتی جدار خارجی افزایش یافته و مصرف انرژی ساختمان کاهش پیدا می کند.

## منابع

- اداره نوسازی مدارس، شهر مشهد، ۱۳۹۶.
- آرامی، ح، مختاری یزدی، م، ۱۳۹۲. ذخیره سازی انرژی در ساختمان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۶، شماره ۱، ص ۸۹-۱۰۲.
- آمار سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور، ۱۳۹۰.
- حیدری، ش، جهانی نوق، م، ۱۳۹۳. سازگاری حرارتی در معماری نخستین قدم در صرفه جویی مصرف انرژی، انتشارات دانشگاه تهران.
- خداکرمی، ج، قبادی، پ، ۱۳۹۵. بهینه سازی مصرف انرژی در یک ساختمان اداری مجهز به سیستم مدیریت هوشمند، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال ۶، شماره ۲، ص ۱۲-۲۳.
- ذوالفقاری، ح، ۱۳۸۶. تعیین تقویم زمانی مناسب برای گردش در تبریز با استفاده از شاخص های دمای معادل فیزیولوژی PET و متوسط نظرسنجی پیش بینی شده PMV، مجله پژوهش های جغرافیایی، شماره ۶۲، تهران.
- زارعی، م، خادمی زارع، ح، فخرزاد، م، ۱۳۹۲. بهینه سازی سید مصرف انرژی و خوشه بندی ساختمان های مسکونی با بهبود شبکه عصبی فازی با اوزان و معماری AHP، مجله پژوهش های مدیریت عمومی، سال ۶، شماره ۱۹، ص ۱۲۹-۱۵۲.
- کامیابی، س، ۱۳۹۴. کاربرد شاخص های آسایش حرارتی در طراحی مسکن پایدار (مطالعه موردی شهر تربت حیدریه)، مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات، دوره ۶، شماره ۲، ص ۲۱-۲۹.
- لطف عطا، آ، ۱۳۸۷. تاثیر عوامل محیطی بر یادگیری و رفتار در محیط های آموزشی (ابتدایی) در شهر، فصلنامه مدیریت شهری، شماره ۲۱، ص ۷۳-۹۰.
- نجفی، س. م. ع.، نجفی، نجمه، ۱۳۹۱. بررسی آسایش حرارتی با استفاده از روش های PMV و PPD (مطالعه موردی: بازار وکیل شیراز)، نشریه هفت حصار، سال ۱، شماره ۱، ص ۶۱-۷۰.
- Ahangari, M., Maerefat, M. 2019. An innovative PCM system for thermal comfort improvement and energy demand reduction in building under different climate conditions, Sustainable Cities and Society, Vol. 44, P. 120-129.
- André Stephan, R., Crawford, H., Myttenaere, K. D. 2011. Towards a more holistic approach to reducing the energy demand of dwellings, Procedia Engineering. Vol. 21, P. 1033-1041.
- ASHRAE Standard Thermal, Environmental, Conditions for Human Occupancy. 2019.
- Berardi, U., Soudian, S. 2019. Experimental investigation of latent heat thermal energy storage using PCMs with different melting temperatures for building retrofit, Energy and Buildings, Vol. 185, P. 180-195.
- Boussaba, L., Foufa, A., Makhlof, S., Lefebvre, G., Royon, L. 2018. Elaboration and properties of a composite bio-based PCM for an application in building envelopes, Construction and Building Materials, Vol. 185, P. 156-165.
- Butala, V., Stritih, U. 2009. Experimental investigation of PCM cold storage, Energy and buildings, Vol. 41, P. 354-359.

- Elarga, H., Dal Monte, A., Andersen, R. K., Benini, E. 2017. PV-PCM integration in glazed building. Co-simulation and genetic optimization study, *Building and Environment*, Vol. 126, P. 161-175.
- Elnajjar, E. 2017. Using PCM embedded in building material for thermal management: Performance assessment study, *Energy and Buildings*, Vol. 151, P. 28-34.
- Fonseca, A., Mayor, T. S., Campos, J. B. L. M. 2018. Guidelines for the specification of a PCM layer firefighting protective clothing ensembles, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 133, P. 81-96.
- Gracia, A. D. 2019. Dynamic building envelope with PCM for cooling purposes–Proof of concept, *Applied Energy*, Vol. 235, P. 245–1253.
- Huang, R., Wu, H., Cheng, P. 2013. A new lattice Boltzmann model for solid–liquid phase change, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 59, P. 295–301.
- Lee, A. D., Shepherd, P., Evernden, M. C., Metcalfe, D. 2018. Optimizing the architectural layouts and technical specifications of curtain walls to minimize use of aluminium, *Structures*, Vol. 13, P. 8-25.
- Matzarakis, A., Blazejczyk, K., Amelung, B. 2007. Climate, Thermal comfort and tourism, *Meteorological Institute, University of Freiburg, Germany*, P. 140-154.
- Mondal, S. 2008. Phase change materials for smart textiles – an overview, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, P. 1536-1550.
- Saffari, M., de Gracia, A., Fernández, C., Cabeza, L. F. 2017. Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings, *Applied Energy*, Vol. 202, P. 420-434.
- Stritih, U., Tyagi, V. V., Stropnik, R., Paksoy, H., Haghghat, F., Joybari, M. M. 2018. Integration of passive PCM technologies for net-zero energy buildings, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 41, P. 286–295.
- Wang, W., Yang, X., Fang, Y., Ding, j., Yan, j. 2009. Enhanced thermal conductivity and thermal performance of form – stable composite phase change materials by using B- Aluminum nitride, *Applied Energy*, Vol. 86, P. 1196-1200.
- Wu, D., Han, Z., Liu, Z., Zhang, H. 2019. Study on configuration optimization and economic feasibility analysis for combined cooling, heating and power system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 190, P. 91-104.
- Yang, L., Qiao, Y., Liu, Y., Zhang, X., Zhang, C., Liu, J. 2019. A kind of PCMs-based lightweight wallboards: Artificial controlled condition experiments and thermal design method investigation, *Building and Environment*, Vol. 144, P. 194-207.
- Yasin, M., Scheidemantel, E., Klinker, F., Weinläder, H., Weismann, S. H. 2019. Generation of a simulation model for chilled PCM ceilings in TRNSYS and VALIDATION with real scale building data, *Journal of Building Engineering*, Vol. 22, P. 372-382.
- Zhen, G., Youyin, J., Hongxia, H., Guohua, S., Xutao, Z. 2010. Developing a fuzzy analytic hierarchical process model for building energy conservation assessment, *Renewable Energy*, Vol. 35, P. 78-87.