Journal of Structural and Construction Engineering, 12(03), 2025, pp. 144-163

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Heat transfer through a wall with a lattice structure filled with phase change materials

Susan khosroyar[1]*

1- Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Islamic Azad University, Quchan, Iran

ABSTRACT

The excessive increase in the price and amount of energy consumption in different countries and the increasing importance of preserving the environment and non-renewable energy sources have prompted researchers to provide solutions to save energy consumption in various fields by explaining new methods. One of the things that has attracted the attention of researchers these days is the use of phase change materials in the field of construction materials. This is despite the fact that there has not been extensive research in this field in Iran.

In this project, we intend to investigate the effect of using these materials on the heat transfer rate of a wall in four different conditions for one year. The first state is the rate of heat transfer from the wall without phase change materials, the second state is the rate of heat transfer from the wall with phase change materials, the third state is the rate of heat transfer from the wall with phase change materials with BCC lattice structure and the fourth state is the rate of heat transfer from the wall with FCC lattice structure phase change materials. This research was done with the help of Energy Plus and Design Builder software. The result of this research indicates that the most optimal possible mode is when using phase change materials with FCC structure and this lattice structure causes a significant reduction in energy consumption per year.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 19 May 2024
Revise Date: 28 August 2024
Accept Date: 29 September 2024

Keywords:
energy
phase change materials
heat transfer
building materials
simulation

doi: 10.22065/jsce.2024.474184.3499

*Corresponding author: Susan khosroyar
Email address: susankhosroyar@yahoo.com

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

انتقال حرارت از یک دیوار با سازه لتیس پر شده از مواد تغییر فاز دهنده

سوسن خسرویار[1*]

۱- دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران

چکیده

افزایش بی رویه قیمت و میزان مصرف انرژی در کشورهای مختلف و اهمیت روزافزون حفظ محیط زیست و منابع انرژی تجدید ناپذیر، پژوهشگران را بر آن داشته تا با تبیین شیوه های نوین، راهکارهایی به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی در حوزه های گوناگون ارائه دهند. یکی از مواردی که این روزها بیش از پیش مورد توجه پژوهشگران قرارگرفته است، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در حوزه مواد و مصالح ساختمانی است. این در حالی است که در ایران تحقیقات گسترده ای پیرامون این حوزه صورت نگرفته است. در طرح حاضر بنا داریم تا تاثیر استفاده از این مواد را در میزان انتقال حرارت یک دیوار در چهار حالت مختلف به مدت یک سال بررسی نماییم. حالت اول میزان انتقال حرارت از دیوار بدون مواد تغییر فاز دهنده، حالت دوم میزان انتقال حرارت از دیوار با مواد تغییر فاز دهنده، حالت سوم میزان انتقال حرارت از دیوار با مواد تغییر فاز دهنده با ساختار لتیسی BCC و حالت چهارم میزان انتقال حرارت از دیوار با مواد تغییر فاز دهنده با ساختار لتیسی FCC. این پژوهش با کمک نرم افزار Energy Plus و Design Builder انجام پذیرفته است. نتیجه این پژوهش بیانگر این است که بهینه ترین حالت ممکن، موقع استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با ساختار FCC می باشد و این ساختار لتیسی باعث کاهش چشمگیر میزان مصرف انرژی در سال می گردد.

کلمات کلیدی: انرژی، مواد تغییر فاز دهنده، انتقال حرارت، مصالح ساختمان، شبیه سازی

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/jsce.2024.474184.3499
۱۴۰۳/۰۳/۲۹	۱۴۰۳/۰۵/۰۷	۱۴۰۳/۰۷/۰۸	۱۴۰۳/۰۷/۰۸	۱۴۰۴/۰۳/۳۱	doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2024.474184.3499

[*]نویسنده مسئول: سوسن خسرویار

پست الکترونیکی: susankhosroyar@yahoo.com

۱- مقدمه

دنیای امروز، مصرف انرژی و مبحث انتقال حرارت اعضا ساختمان یکی از چالش های اصلی در بسیاری از کشورها است [۱]. هر روزه کشورها به دنبال یافتن راه حل های جدیدی برای صرفه جویی در مصرف انرژی های تجدید پذیر و عدم هدر رفت این انرژی هستند. در زمینه ساخت و ساز، بهره وری حداکثری از انرژی یکی از اصلی ترین دغدغه های سازندگان است[۲]. به طور کلی به دلیل افزایش گازهای گلخانه ای و CO_2 که توسط فعالیت های مختلف انسانی تولید می شود، دمای کره زمین در حال افزایش است[۳]. انتشار CO_2 باید در سال ۲۰۵۰ بیش از ۶۰ درصد در بخش ساختمان کاهش یابد تا گرمایش جهانی به حدود ۲ درجه سانتیگراد کاهش یابد. این مهم با استفاده از مصالح و تکنیک های پیشرفته در حوزه ساختمان سازی و بازسازی موثر بناها قابل دسترس است [۴]. قابل ذکر است که کیفیت و مصرف انرژی توسط ساختار مواد و نوع آنها به عنوان عناصر تأثیرگذار در محدود کردن اثرات گرمایشی و سرمایشی ساختمان در نظر گرفته شده است [۵].

میزان انرژی ارسال شده توسط خورشید که توسط زمین دریافت می گردد در مقایسه با انرژی مورد نیاز جهانی ۱۰۰۰۰ برابر بیشتر تخمین زده می شود. انسان ها به منظور بهره مندی حداکثر از این انرژی، توانسته اند با اختراع مواد تغییر فاز دهنده[۱] گام های موثری در کاهش مصرف انرژی بردارند [۶]. دامنه استفاده از تغییر فاز دهنده بسیار گسترده بوده تا آنجایی که می توان در کف، سقف و حتی دیوارچینی از این ماده استفاده نمود. کاربرد این مواد جذب و ذخیره انرژی و آزاد سازی آن در زمان تغییر دما است [۷]. این امر به طور قابل توجهی تقاضای انرژی بخش های ساختمان را کاهش می دهد و همچنین بار گرمایش و سرمایش را در ساعات اوج مصرف به حداقل می رساند [۸]. شیوه ی کار تغییر فاز دهنده بدین گونه است که با افزایش دما اجزای شیمیایی آن شروع به جداشدن از یکدیگر نموده و با تغییر حالت از جامد به مایع گرما را جذب می نمایند [۹]. حال اگر دما کاهش یابد، مواد تغییر فاز دهنده از حالت مایع به جامد تبدیل می گردند [۱۰]. این مواد برای استفاده مطلوب نیازمند ساختارهای شبکه ای[۲] می باشند. میزان شکل پذیری فلزات به تفاوت در ساختار شبکه آنها بستگی دارد. در حالی که شبکه FCC[۳] بیشترین شکل‌پذیری و شبکه BCC[۴] دارای شکل‌پذیری است که بین سایر سازه‌ها قرار دارد[۱۱].

آکیبر و همکاران[۵] در پژوهشی در سال ۲۰۱۶ روش های استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در پوشش های خنک کننده ساختمان را بررسی نمودند. آنها از مواد تغییر فاز دهنده های آلی و معدنی در پوشش های ساختمانی شامل دیوارها، کف ها، سقف ها و پنجره ها استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده ها تاثیر بسزایی در حفظ سرما در ساختمان دارد [۱۲]. صفری و همکاران[۶] در سال ۲۰۱۷ طی مطالعه ای با استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی، نشان دادند که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده نقش بسزایی در عدم برون رفت سرما از داخل ساختمان دارد. همچنین آنان دریافتند که استفاده از نرم افزار های شبیه ساز، کمک شایانی به مطالعاتی آینده در مورد مواد تغییر فاز دهنده ها خواهد نمود [۱۳]. هیر و همکاران[۷] در سال ۲۰۱۵ دریافتند که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده نقش موثری در کاهش ضریب انتقال حرارت دارد[۱۴]. سویافانی و همکاران[۸] در سال ۲۰۱۶ به بررسی نقش مواد تغییر فاز دهنده با ساختار شبکه ای (لتیس) در سیستم های گرمایشی و سرمایشی پرداختند که مشخص گردید، مواد تغییر فاز دهنده قادر به کاهش مصرف انرژی و نوسانات دما، جابجایی بارهای اوج انرژی خنک کننده و کاهش مصرف انرژی می باشد[۱۵]. علیزاده و همکاران[۹] در سال ۲۰۱۶ در قالب یک پژوهش عملیاتی به بررسی عملکرد ساختار شبکه ای مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان های تجاری پرداختند. آنها نتیجه گرفتند

[1] PCM
[2] Lattice
[3] Face Centered Cubic
[4] body-centered cubic
[5] Akeiber et al.
[6] Saffari et al.
[7] Heier et al.
[8] Souayfane et al.
[9] Alizadeh et al.

که این ساختارها باعث بهبود الگوی مصرف و در نهایت کاهش هزینه های اقتصادی ناشی از مصرف انرژی می گردد [۱۶]. عمرانی و همکاران[10] در سال ۲۰۱۸ پی بردند که ساختارهای متفاوت مواد تغییر فاز دهنده شبکه ای نتایج متفاوتی دارد. نتایج حاصله نشان داد که میزان برون رفت انرژی در انواع مختلف شبکه ها متفاوت است [۱۷]. یوکی وانگ و همکاران[11] در سال ۲۰۲۲ در بررسی استفاده از ساختار لتیسی یا سیستم نگهداری قاب فلزی در سد به نتایج جالب توجهی دست یافتند. آن ها دریافتند که انواع مختلفی قاب فلزی در تونل ها مورد استفاده قرار می گیرند که بسته به نوع بار وارده بر سیستم نگهداری و حساسیت تونل از آنها استفاده می شود. در تونل انحراف آب سد مخزنی به علت لیتولوژی و طرز قرار گیری لایه ها در مقاطعی که احتمال ریزش وجود داشت و توده سنگ در آن مقاطع دارای زمان خود پایداری کمتری بود از لتیس فلزی دو تکه استفاده شد که هم از نظر صرفه اقتصادی و هم از نظر بالا بردن سرعت اجرا ارجحیت بیشتری نسبت به قاب با مقطع H بود. بطور میانگین زمان لازم جهت نورد، آماده سازی، نصب و کار گذاری قاب فلزی با مقطع H، 2.5 برابر آماده سازی و نصب و اجرای لتیس می باشد. اجرای خم و شکل گیری لتیس نیازی به وجود دستگاه نورد در کارگاه نداشته و التیسها بروی شابلون و توسط نیروی انسانی به راحتی خم و توسط ساپورت ها به هم جوش می شوند. اصولا به کارگیری قاب های فلزی سنگین، در یک تونل کوچک، مشکلاتی را در خصوص خم کردن آنها، به وجود می آورد. در این حالت، بر اساس قانون سرانگشتی عملی، قاب های فلزی با مقطع H یا I را فقط تا شعاعی برابر با ۱۴ برابر عمق مقطع می توان خم کرد. این مشکل در شکل بالا نشان داده شده است. در این شکل نحوه خم شدن قاب فلزی سنگین، با مقطع H مشخص می گردد. علیرغم وجود صلب کننده های موقتی، کمانش قابل توجهی در بال داخلی قاب فلزی وجود دارد. به همین منظور قبل از اینکه قاب های فلزی بتوانند به درون تونل بروند، به کارهای اضافه دیگری نیاز خواهند داشت که از این منظر نیز سیستم نگهدارنده التیس بر سیستم نگهدارنده قاب فلزی رجحان دارد[۱۸].

برای کاربردهای تجاری و صنعتی، مواد تغییر فاز دهنده باید داخل یک پوشش آب بندی شده قرار گیرند، این مواد را می توان به صورت صفحه لوله و یا گرد، با پوششی از جنس پلی اتیلن بسته بندی نمود [۱۹]. زاهدی و همکاران در پژوهشی به بررسی روشهای ذخیره ی انرژی حرارتی در ساختمان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. در این تحقیق، پس از معرفی مواد تغییر فاز دهنده و چگونگی عملکرد آنها، به نکاتی در ارتباط با چگونگی کاربرد آن در ساختمان و نتایج موثر آن در کاهش مصرف انرژی سرمایش و گرمایش ساختمان پرداخته شده است. در صورت انتخاب نوع صحیح این ماده براساس اقلیم منطقه، تغییرات دمایی منطقه و متناسب با فصل، می توان بدون استفاده از تجهیزات مکانیکی و تنها با استفاده از قابلیت های فیزیکی این مواد، کاهشی ۲۰ درصدی در انرژی مصرفی ساختمان داشت [۲۰]. اخیرا دانشمندان سوئیسی موفق به ساخت نوعی از شیشه های دو جداره شده اند که علاوه بر اینکه نوع این شیشه ها خاص است، در فواصل بین دو پانل شیشه ای از مواد تغییر فاز دهنده نیز استفاده شده است شیشه سمت بیرون در این پانل دو جداره مجهز به یک فیلتر منشوری درخشان است که اشعه های خورشید با زاویه بالا را بازتاب نموده و اشعه های با زاویه کوچک را از خود عبور می دهد. این فیلتر در واقع نوعی ابزار کنترلی است که سبب می شود اشعه های خورشید تابستان که زاویه بالایی دارند در بیرون ساختمان بمانند ولی اشعه های خورشید زمستان که زاویه کمی دارند به داخل ساختمان راه بیابند. مواد تغییر فاز دهنده ای که در بین فواصل این صفحات شیشه ای به کار رفته است، در حین تابش خورشید به یک مایع شفاف تبدیل می شود و زمانی که تابش خورشید از بین می رود، مجددا به حالت جامد برمی گردد. این پدیده به حفظ گرما و گرمتر ماندن درون ساختمان کمک می کند. حتی در زمانهایی که این مواد در حالت جامد است، بازهم مقادیری از نور به داخل راه می یابد که سبب روشن تر شدن فضا می شود [۲۱]. یکی از ظرفیت های مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی خورشیدی در ساختمان هایی است که قابلیت جمع آوری انرژی خورشیدی با استفاده از گردآورنده های خورشیدی را دارا هستند. در صورت استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در چنین سیستم هایی، می توان حجم بالایی از انرژی خورشیدی را در طول ساعات روز ذخیره نموده و در طول ساعات شب از همین انرژی برای گرمایش استفاده نمود [۲۲].

مواد تغییر فاز دهنده در محفظه های نازکی که با آرایش صفحه ای روی هم قرار گرفته اند، نگهداری می شوند و سپس سیال انتقال حرارت از بین این صفحات و در تماس غیر مستقیم با این مواد حرکت می کند. روش کار در این سیستم ها بدین صورت است که

[10] Omrany et al.

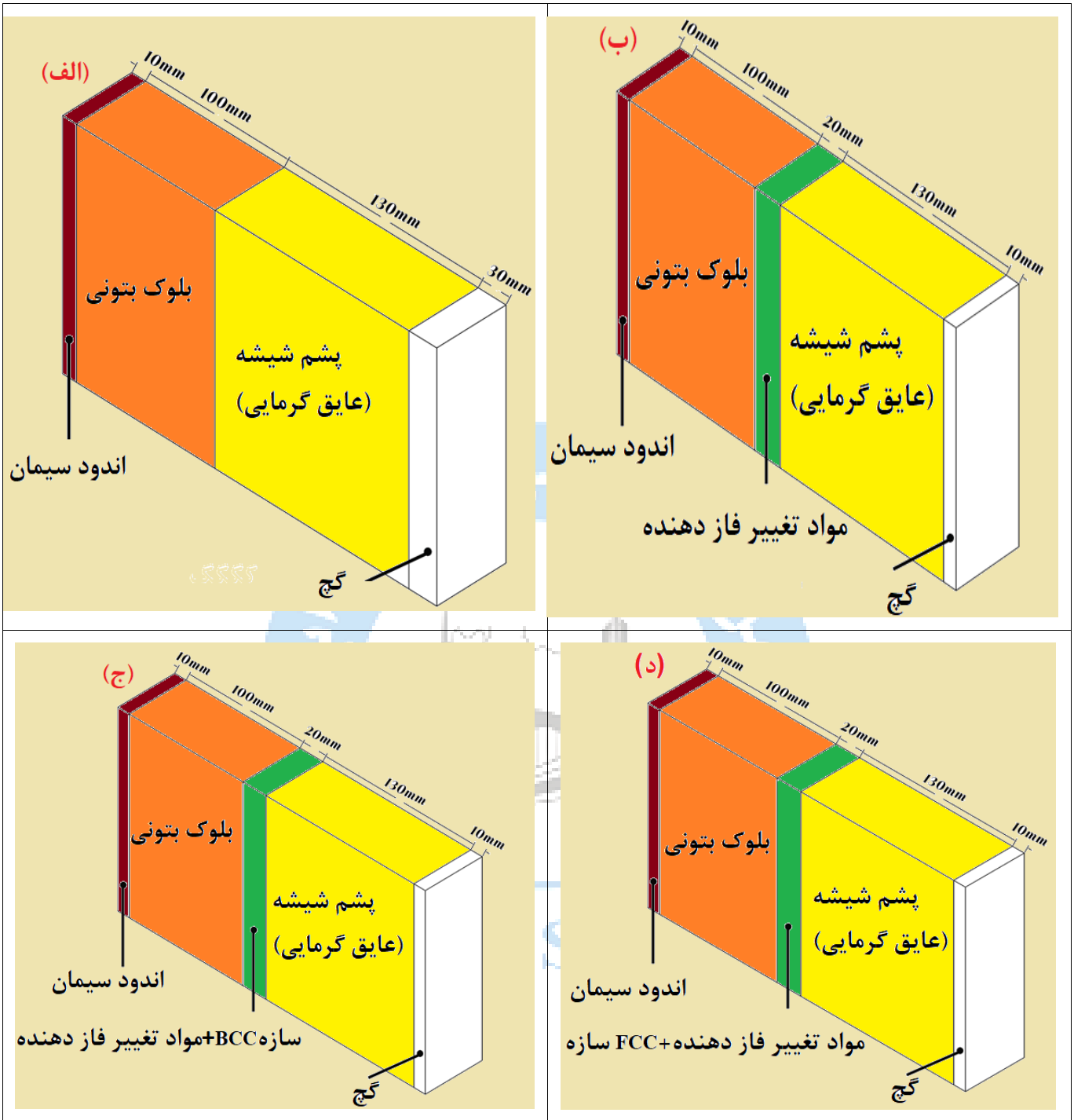
[11] YukeWang et al.

انرژی جمع آوری شده توسط گردآورنده ها در روز موجب گرم شدن سیال انتقال حرارت (معمولا آب می شود. سپس آب گرم شده گرمای خود را به صفحات حاوی ماده تغییر فاز دهنده تحویل می دهد و ماده مذکور این گرما را در قالب گرمای نهان دریافت نموده و آن را صرف تغییر فاز خود از جامد به مایع می نماید. در طول ساعات شب، آب سرد جایگزین آب گرم درون سیستم می شود. مواد تعبیر فاز دهنده نیز به دلیل کاهش دما، فرایند انتقال فاز خود را به صورت برعکس (از مایع به جامد) طی می کند و لذا حجم گرمای دریافتی در طول روز را به آب سرد پس داده و سبب گرم شدن آب می شود. سپس از آب گرم حاصل جهت گرمایش ساختمان استفاده می شود. برای افزایش کارایی چنین سیستمهایی، نیاز به تکنیک هایی است که فرایند انتقال حرارت بین ماده تغییر فاز دهنده و سیال انتقال گرما را به حداکثر برساند و اکثر مطالعات نیز در همین زمینه صورت گرفته است [۲۳]. بنابر نتایج شبیه سازی در یک پژوهش [۲۴]، مقدار ۷۰ کیلوگرم از یک ماده تغییر فاز دهنده خاص که در سیستم ذخیره انرژی خورشیدی به کار رفته باشد، می تواند برای گرمایش یک ساختمان در شب کفایت نماید. این نکته بیانگر حجم کمتر مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده نسبت به سایر مواد مورد استفاده در سیستم های قدیمی است که به دلیل دانسیته بالای جذب گرما در نقطه انتقال فاز ماده تغییر فاز دهنده است. گزارش شده که اگر از مواد تغییر فاز دهنده در این سیستمها استفاده شود، حجم مواد مورد نیاز تقریبا یک چهارم نسبت به وضعیت استفاده از انباره سنگی و یک دوم نسبت به حالت استفاده از آب خواهد بود. پیپو و همکارانش در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که در صورت کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در ساختمان و با در نظر گرفتن نوع اقلیم، می توان انتظار ۵ تا ۲۰ درصد ذخیره مستقیم انرژی را داشت[۲۵].

از آنجایی که در ایران تحقیقات گسترده ای پیرامون این حوزه صورت نگرفته است. در طرح حاضر بنا داریم تا استفاده از این مواد را در مصالح ساخت دیواره های یک ساختمان بررسی نماییم. همچنین پژوهش پیرامون استفاده از ساختار لتیسی با مواد پرکننده مواد تغییر فاز دهنده در مصالح ساختمانی در هیچ یک از پژوهش های داخلی انجام نشده و پژوهش حاضر بدلیل استفاده از این ساختار در نوع خود متفاوت و جدید می باشد. بدین منظور در ابتدا یک دیوار بدون مواد تغییر فاز دهنده و سپس همان دیوار با مواد تغییر فازدهنده و در گام سوم دیوار با مواد تغییر فاز دهنده و ساختار لتیسی BCC و نهایتاً همان دیوار با ساختار لتیسی FCC مدل سازی گردیده و در هریک از چهار حالت ذکر شده به بررسی میزان انتقال حرارت آنها پرداخت شده است. این مدل سازی توسط نرم افزار Energy Plus و Design Builder صورت گرفته است.

۲- بیان مسئله و معادلات حاکم

در این تحقیق (مطابق شکل ۱) ابتدا یک دیوار بدون مواد تغییر فازدهنده و سپس همان دیوار با مواد تغییر فاز دهنده و در گام سوم دیوار با مواد تغییر فاز دهنده و ساختار لتیسی BCC و نهایتاً همان دیوار با ساختار لتیسی FCC مدل سازی گردیده و در هریک از چهار حالت ذکر شده به بررسی میزان انتقال حرارت آنها پرداخت شده است. این مدل سازی توسط نرم افزار Energy Plus و Design Builder صورت گرفته است. برای تحلیل و بررسی میزان تاثیر حالت ها و مواد تغییر فازدهنده مختلف در دیوار هدف ابتدا فضای نمونه تعریف می¬شود. بدین منظور یک دیوار در شهر مشهد انتخاب شده است و نتایج در نرم افزار Design builder اخذ شده است. همچنان که ذکر گردید دیوار مورد نظر واقع در اقلیم شهرستان مشهد می¬باشد که مشخصات آب و هوای شهرستان مشهد از بانک اطلاعاتی نرم افزار Energy plus اخذ شده است.



شکل ۱: فیزیک مورد مطالعه الف) دیوار بدون مواد تغییر فازدهنده. ب) دیوار با مواد تغییر فازدهنده و بدون ساختار لتیسی. ج) دیوار با مواد تغییر فازدهنده با ساختار BCC. د) دیوار با مواد تغییر فازدهنده با ساختار FCC

در این پژوهش هدف انتقال گرما در دیوارهای لتیسی میباشد. برای اولین بار معادلات موسوم به RATS(sekliw,4383) در انتقال گرمایی دیوار چند لایه به روش انتقال تک بعدی بررسی شد.

$C_p\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(k\frac{\partial T}{\partial x})$	(۱)

برای دیوارهای لتیسی از مقدار مقاومت ما بین لایه های مختلف صرف نظرمیشود .برای محاسبه تاثیر گرمای نهان مدل مواد تغییر فازدهنده در برنامه پیش فرض دهی میگردد. ولر و همکارانش مدلی برای مواد تغییر فاز دهنده را با استفاده از معادله مرجع غیر خطی در معادلات حاکم نشان دادند که این معادله به ترتیب زیر می باشد[۲۶].

$C_p\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)-L\rho_{pcm}\frac{\partial g_1}{\partial x})$	(۲)

که در معادله ۲ ρ_{pcm} چگالی ماده تغییر فاز دهنده و g_1 مقدار جزئی فاز مایع می باشد. تغییرفاز از حالت جامد به مایع در یک محدوده دمایی رخ میدهد و مقدار مواد تغییر فاز دهنده در هر فاز یک تابعی از دما خواهد بود که معادلات آن به ترتیب زیرمی‌باشد:

$g_1=F(T) \quad , \quad 0\le g_1\le 1 \quad , \quad g_1=\begin{cases}1 & \text{مایع}\\ 0 & \text{جامد}\end{cases}$	(۳)

در معادلات بالا تابع F نمایش دهنده شکلی است که بوسیله معادله (۱) پدید آمده است که این شکل در شکل۱ نشان داده است[۲۷] برای دیوار مرکب حاوی مواد تغییر فاز دهنده خواص مواد یعنی ρ جزو خصوصیات میانگین در نظر گرفته می‌شود که از معادله های زیر بدست می‌آیند:

$\rho_c=(1-W_{pcm})\rho_{gyp}+W_{pcm}\left(\rho_{pcm1g1}+\rho_{pcms}(1-g_1)\right)$	(۴)
$C_{pc}=(1-W_{pcm})c_{pgyp}+W_{pcm}\left(C_{pcm1g1}+C_{pcms}(1-g_1)\right)$	(۵)

در معادلات (۵-۴) W_{pcm} نشانگر مقدار جرمی ماده تغییر فاز دهنده در لایه مرکب دیوار و c_{pgyp} گرمای ویژه گچ می باشد. رسانایی گرمایی دیوار مرکب مواد تغییر فاز دهنده توسط معادله ماکسول در فاز جامد پیوسته بدست می آید [۲۸] فرمول شماره (۶) در زیر نمایش داده می شود.

$K_C=K_{gyp}(1+\frac{3\,\varphi}{\left(\frac{K_{pcm}+2K_{gyp}}{K_{pcm}-K_{gyp}}\right)-\varphi}$	(۶)

که در آن K_{pcm} رسانایی گرمایی ماده تغییر فاز دهنده و K_{gyp} رسانایی گرمایی گچ می باشد. عملیات های خاصی برای تداخل بین قسمت های تغییر فاز دهنده و غیر تغییر فاز دهنده در دیوارلتیسی مورد نیاز است. اگر ماده تغییر فاز دهنده در لایه دوم وارد تغییر فاز شود، پس تعادل انرژی در نقطه درگیری برابر است با:

$-k\frac{\partial T}{\partial x}\Big\vert x_1 Layer_1=-k\frac{\partial T}{\partial x}\Big\vert x_1 Layer_1$	(۷)

زمانی که تغییر فاز رخ می دهد تعادل انرژی به صورت زیر در می آید:

$-k\frac{\partial T}{\partial x}\Big\vert x_1 Layer_1=L\rho_{pcm}\frac{\partial g_1}{\partial t}-k\frac{\partial T}{\partial x}\Big\vert x_1 Layer_2$	(۸)

سطح داخلی در $x=x_3$ در هر دو مورد تابش و جابه جایی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۳- حل عددی معادلات حاکم

نرم افزار Energy plus از دو روش برای حل معادله انتقال گرمای دیوارهای لتیسی استفاده می‌کند روش توابع انتقال گرمایی و روش تفاضل محدود که روش اول درحالت‌هایی که از مواد تغییر فاز دهنده استفاده نمی شود، بهره گرفته می‌شود ولی در حالت‌هایی که در دیوار از مواد تغییر فاز دهنده استفاده می شود روش دوم جوابگو خواهد بود. در این پژوهش به دلیل استفاده از دیوارهای لتیسی حاوی مواد تغییر فاز دهنده، از روش دوم استفاده می کنیم.

مدل های نرم افزارEnergy plus تقریبا درهمه جنبه های خود برنامه از اصول تعادل گرمایی پیروی می کند. چنانکه قبلا اشاره شد شبیه سازی سطح ساختارهای ساختمان توسط توابع رسانایی انتقالی استخراج شده از روش بلاست محاسبه می شوند. اما این روش محدودیت های خاص و معمول خود مانند کارایی فقط برای مواد با خواص ثابت و مقادیر ثابت برخی پارامترها را دارا می باشد و همچنین این روش نتایجی برای سطوح داخلی تولید نمی کند. وقتی تحلیل های انرژی به سمت مدل سازی های پیشرفته سازه ها مانند مواد تغییر فاز دهنده می رود بایستی از روش های اساسی حل به سمت روش های دیگری که قابلیت حل مسایل را داشته باشد حرکت کرد. بنابرین روش تفاضل محدود رسانایی و الگوریتم حل به روش تفاضل محدود در Energy plus ایجاد شده است. این روش جایگزین روش حل توابع رسانایی گرمایی نشده است اما برای مواردی که کاربران مواد تغییر فاز دهنده یا مواد با ضریب رسانایی متغیر را شبیه سازی می کنند کارا می باشد. در اینجا از روش معادله دیفرانسیلی ضمنی همراه با تابع آنتالپی دما برای محاسبه مواد تغییر فاز دهنده استفاده می شود. فرمول ضمنی برای گره های داخلی در زیر نشان داده شده است.

$C_p\Delta\rho_x\frac{T_{i+1}^{j+1}-T_i^{j+1}}{\Delta t}=(\frac{1}{2})\left[\left(K_w\frac{T_{i+1}^{j+1}-T_i^{j+1}}{\Delta x}+K_E\frac{T_{i-1}^{j+1}-T_i^{j+1}}{\Delta x}\right)+(K_w\frac{T_{i+1}^{j}-T_i^{j}}{\Delta x}+K_E\frac{T_{i-1}^{j}-T_i^{j1}}{\Delta x})\right]$	(۹)
$h_i=HTF(T_i)$	(۱۰)

در معادله بالا HTF تابع دما –آنتالپی می‌باشد که اطلاعات آن باید توسط کاربر وارد نرم افزار شود (با انتخاب نوع ماده تغییر فاز دهنده). چون روش حل به صورت ضمنی می باشد روش گاوس– سیدل برای بروز رسانی دماهای گره های جدید در سازه ها برای بهبود پایداری بیشتر معادله به کار گرفته می شود. حلقه تکرار گاوس – سیدل یک حل کننده داخل حلقه ای می باشد و برای هر سطح، تشکیل حلقه لازم است. این حلقه معمولا به ۹۱ تکرار محدود می شود و بعد از سی تکرار جواب را ارائه می نماید .اما زمانی که مجموع گره های دمایی بین آخرین خواسته و خواسته کنونی تغییر می کند با نرمالیزه کردن به بوسیله جمع مقادیر دما ها که کمتر از ۰.۰۰۰۰۰۱ می باشد، زودتر حاصل میگردد. این شعاع هم گرایی به صورت معمول پس از سه تکرار به دست می آید ولی به استثنای مواد تغییر فاز دهنده که وقتی شبیه سازی آن ها صورت می گیرد دو یا سه تکرار بیشتر می طلبد. در مواقعی که مواد تغییر فاز دهنده، تغییر فاز می دهند اگر تعداد تکرار برای رسیدن به مقدار شعاع هم گرایی مورد نیاز افزایش یابد یک فاکتور داخلی به صورت اتوماتیک وارد شده و در بسیاری از موارد تعداد تکرار را به کمتر از۱۰می رساند. نرم افزار Energy plus از تکرارهای جداگانه برای سطوح خارجی در مقابل تمام تغییرات تعادل گرمایی سطح داخلی استفاده می کند تا بتواند تغییرات موج بلند تابشی را نیز به درستی حل کند.

۴- نتیجه گیری

برای تحلیل و بررسی میزان تاثیر حالت ها و مواد تغییر فازدهنده مختلف در دیوار هدف ابتدا فضای نمونه تعریف می‌شود. بدین منظور یک دیوار در شهر مشهد انتخاب شده است و نتایج در نرم افزار Design builder اخذ شده است. همچنان که ذکر گردید دیوار مورد نظر

واقع در اقلیم شهرستان مشهد می‌باشد که مشخصات آب و هوای شهرستان مشهد از بانک اطلاعاتی نرم افزار Energy plus اخذ شده است. به منظور بررسی و پژوهش در این طرح در ابتدا یک دیوار بدون مواد تغییر فاز دهنده و سپس همان دیوار با مواد تغییر فازدهنده و در گام سوم دیوار با مواد مواد تغییر فاز دهنده و ساختار لتیسی BCC و نهایتاً همان دیوار با ساختار لتیسی FCC مدل سازی گردیده و در هریک از چهار حالت ذکر شده به بررسی میزان انتقال حرارت آنها پرداخت شده است. این مدل سازی توسط نرم افزار Energy Plus و Design Builder صورت گرفته است.

۴-۱- نمونه دیوار اول: دیوار بدون مواد تغییر فازدهنده

در این چیدمان که در شکل ۱ قسمت (الف) طرحی از این چیدمان ترسیم شده است، نحوه قرار گیری مصالح مختلف نشان داده شده است. .همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود در خارجی ترین لایه دیوار اندود سیمان و بعد از آن بلوک سیمانی و سپس عایق پشم شیشه و در نهایت محصولات گچ یا پلاستر قرار گرفته شده است. در این ترکیب و لایه بندی ضخامت هرکدام از لایه ها مشخص گردیده است که واحد آن بر حسب میلی مترمی‌باشد. در جدول ۱ ترتیب قرار گیری لایه ها از بیرونی ترین لایه به داخلی ترین لایه این چیدمان با مشخصات مواد آن آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات مواد مختلف در لایه های چیدمان اول

نام لایه	نام مصالح	ضخامت (m)	رسانایی گرمایی (w/mK)	چگالی (Kg/m^3)
۱	اندود سیمان	۰.۰۱	۰.۹۵	۱۸۰۰
۲	بلوک بتنی	۰.۱	۰.۹۵	۱۸۰۰
۳	پشم شیشه (عایق گرمایی)	۰.۱۳	۰.۳۲۰	۳۰
۴	گچ	۰.۰۳	۰.۳	۹۰۰

۴-۲- نمونه دیوار دوم: دیوار با مواد تغییر فازدهنده و بدون ساختار لتیسی

در این حالت ماده تغییر فازدهنده در قسمت خارجی دیوار یعنی بعد از اندود سیمان و بلوک قرار می‌گیرد و در این حالت نزدیک تر به خارجی ترین لایه می‌باشد. عایق که در فضای نمونه ما پشم شیشه انتخاب شده است با ۱۳۰میلی متر ضخامت در داخلی ترین لایه قرار گرفته است. این حالت به عنوان حالت دوم مورد مطالعه در این تحقیق قرار می‌گیرد. شکل ۱ قسمت (ب) به صورت طرحواره نحوه قرار گیری مواد در این حالت را نشان می دهد. در جدول ۱ ترتیب قرار گیری لایه ها از بیرونی ترین لایه به داخلی ترین لایه این چیدمان با مشخصات مواد آن آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات مواد مختلف در لایه های چیدمان دوم

نام لایه	نام مصالح	ضخامت (m)	رسانایی گرمایی (w/mK)	چگالی (Kg/m^3)
۱	اندود سیمان	۰.۰۱	۰.۹۵	۱۸۰۰
۲	بلوک بتنی	۰.۱	۰.۹۵	۱۸۰۰
۳	پشم شیشه (عایق گرمایی)	۰.۱۳	۰.۳۲۰	۳۰
۴	مواد تغییر فاز دهنده	۰.۰۲	۰.۲	۸۸۰
۵	گچ	۰.۰۳	۰.۳	۹۰۰

۳-۴- نمونه دیوار سوم: دیوار با مواد تغییر فازدهنده با ساختار BCC

در این حالت ماده تغییر فازدهنده با ساختار لتیسی BCC در قسمت خارجی دیوار یعنی بعد از اندود سیمان و بلوک قرار می‌گیرد و در این حالت نزدیک تر به خارجی ترین لایه می‌باشد. عایق که در فضای نمونه ما پشم شیشه انتخاب شده است با ۱۳۰میلی متر ضخامت در داخلی ترین لایه قرار گرفته است. این حالت به عنوان حالت سوم مورد مطالعه در این تحقیق قرار میگیرد. شکل ۱ قسمت (ج) به صورت طرحواره نحوه قرار گیری مواد در این حالت را نشان می دهد. در جدول ۳ ترتیب قرار گیری لایه ها از بیرونی ترین لایه به داخلی ترین لایه این چیدمان با مشخصات مواد آن آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات مواد مختلف در لایه های چیدمان سوم

نام لایه	نام مصالح	ضخامت (m)	رسانایی گرمایی (w/mK)	چگالی (Kg/m^3)
۱	اندود سیمان	۰.۰۱	۰.۹۵	۱۸۰۰
۲	بلوک بتنی	۰.۱	۰.۹۵	۱۸۰۰
۳	پشم شیشه (عایق گرمایی)	۰.۱۳	۰.۳۲۰	۳۰
۴	مواد تغییر فاز دهنده همراه با ساختار BCC	۰.۰۲	۰.۱۵	۹۲۰
۵	گچ	۰.۰۳	۰.۳	۹۰۰

۴-۴- نمونه دیوار چهارم: دیوار با مواد تغییر فازدهنده با ساختار FCC

در این حالت ماده تغییر فازدهنده با ساختار لتیسی FCC در قسمت خارجی دیوار یعنی بعد از اندود سیمان و بلوک قرار می‌گیرد و در این حالت نزدیک تر به خارجی ترین لایه می‌باشد. عایقی که در فضای نمونه ما پشم شیشه انتخاب شده است با ۱۳۰میلی متر ضخامت در داخلی ترین لایه قرار گرفته است. این حالت به عنوان حالت چهارم مورد مطالعه در این تحقیق قرار می گیرد. شکل ۱ قسمت (د) به صورت طرحواره نحوه قرار گیری مواد در این حالت را نشان می دهد. در جدول ۴ ترتیب قرار گیری لایه ها از بیرونی ترین لایه به داخلی ترین لایه این چیدمان با مشخصات مواد آن آورده شده است.

جدول ۴: مشخصات مواد مختلف در لایه های چیدمان چهارم

نام لایه	نام مصالح	ضخامت (m)	رسانایی گرمایی (w/mK)	چگالی (Kg/m^3)
۱	اندود سیمان	۰.۰۱	۰.۹۵	۱۸۰۰
۲	بلوک بتنی	۰.۱	۰.۹۵	۱۸۰۰
۳	پشم شیشه (عایق گرمایی)	۰.۱۳	۰.۳۲۰	۳۰
۴	مواد تغییر فاز دهنده همراه با ساختار FCC	۰.۰۲	۰.۱۰	۹۸۰
۵	گچ	۰.۰۳	۰.۳	۹۰۰

۴-۵ مواد تغییر فاز دهنده

از بین مواد تغییر فازدهنده هایی که وجود دارد، در طرح حاضر Bio PCM انتخاب گردیده است زیرا این مواد هم دارای خصوصیات خوبی در مقایسه با سایرین هستند و هم خاصیت اشتعال پذیری ندارند و هم بصورت‌های مختلف برای اقلیم های مختلف در دماهای ذوب متفاوت تولید می‌شوند. بسیاری از کشورهای مدرن ازجمله کشوربریتانیا این مواد را در ساختمان های خود تایید نموده اند و در مقالات و تحقیقات اخیر نیز این مواد مورد تایید محققان قرار گرفته اند .در این بخش ضمن معرفی انواع مختلف Bio PCMها، خصوصیات آنها ذکر شده است. مواد تغییر فازدهنده ها به بخش ارگانیک و غیر ارگانیک تقسیم بندی می‌شوند که در بخش ارگانیک این مواد به دلیل گرمای نهان بالا و هزینه کمتر و پایداری بیشتر و عدم خوردگی بسیار پر کاربردترمی‌باشند. مواد ارگانیک خود نیز به دودسته پارافینی و غیر پارافینی تقسیم می‌شوند.

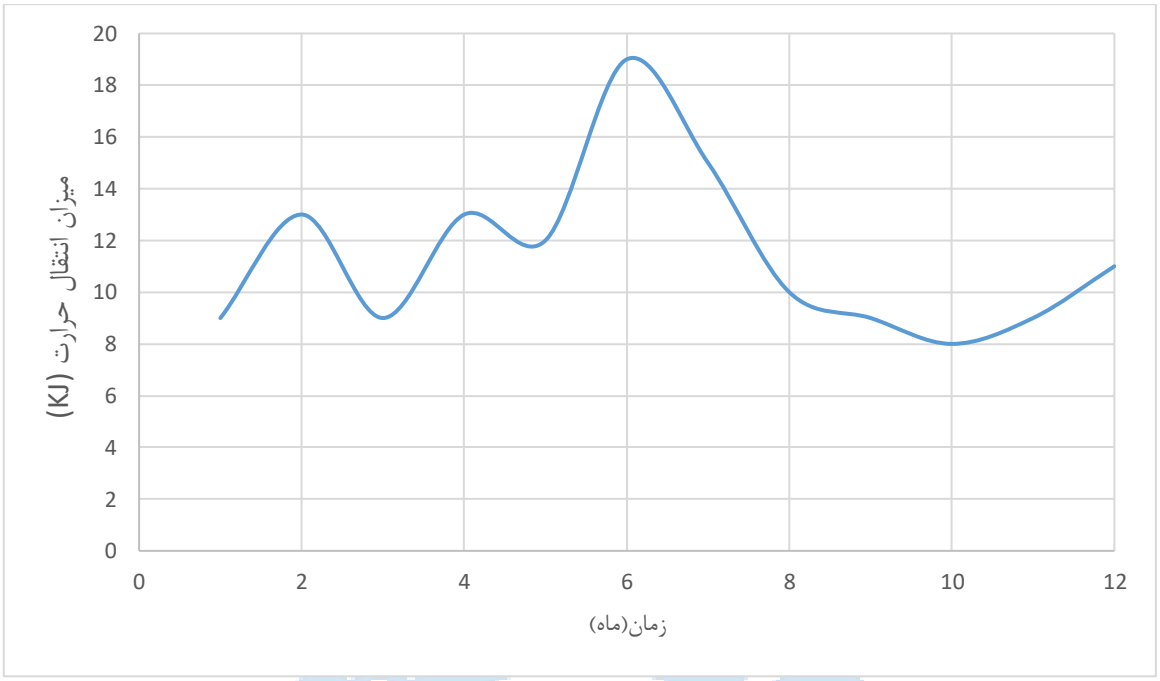
Bio PCM از جمله مواد غیر پارافینی به شمارمیرود که از روغن گیاهی غنی شده سویا و یا روغن پالم ساخته می‌شوند مواد تغییر فازدهنده Bio PCM که از خانواده اسیدهای چرب می‌باشند، گستره دمایی بسیار بالایی دارند وتقریبا همه آب و هوای جهان را شامل می-شوند. این مواد دارای ظرفیت گرمای نهان ۲۴۸هستند. در سال ۲۰۱۴چونگ و همکارانش با مطالعه و مقایسه یک ماده تغیر فازدهنده پارافینی و Bio PCM ها نتیجه گرفتند که مواد تغییر فازدهنده غیر پارافینی Bio PCM عملکرد بسیار بهتری از خود نشان می دهند. آنها طی ازمایش های متفاوت عملی این موضوع را اثبات نمودند[۲۹]. از این رو با توجه به تحقیقات گسترده ای که صورت گرفته است میتوان ادعا نمود مواد تغییر فازدهنده Bio PCM عملکرد بسیار بهتری دارند و اشتعال پذیری مواد پارافینی را نیز ندارند که این خود نیز برای ساختمان ها امتیاز بسیار بزرگی می‌باشد. این مواد دارای شرایط نصب بسیار آسان بوده و به راحتی در چیدمان های مختلف میتوان بعد از بلوک آنها را نصب و استفاده کرد. حال با توجه به استانداردها در این تحقیق در هرکدام از نمونه ها میزان انتقال حرارت بررسی می گردد.

۵-نتایج وبحث

در این مرحله با ترسیم فضای نمونه در نرم افزار نتایج بدست می‌آید. برای این کار ابتدا حالت بدون استفاده از مواد تغییر فاز دهنده را مورد بررسی قرار داده شده است و سپس هر حالت به صورت جداگانه نگارش گردیده و به ترتیب شکل‌های مربوط به هرکدام بدست آمده است. لازم به توضیح است این شکل‌ها و نمودارها میزان انتقال حرارت در دیوارها را نشان می‌دهد. باتحلیل این نمودارها میتوان به نقش مواد تغییر فازدهنده و نوع ساختار آنها درکاهش مصرف انرژی پی برد. طبق نمودارهای حاصله، عملکرد دیوارها با حضور مواد تغییر فازدهنده بسیار بهتر و کاهش مصرف انرژی صورت گرفته است. نتایج بررسی میزان انتقال حرارت دیوار نمونه در چهارحالت ذکر شده در بالا به مدت یک سال در ادامه نگارش شده است.

۵-۱- نتایج حالت اول

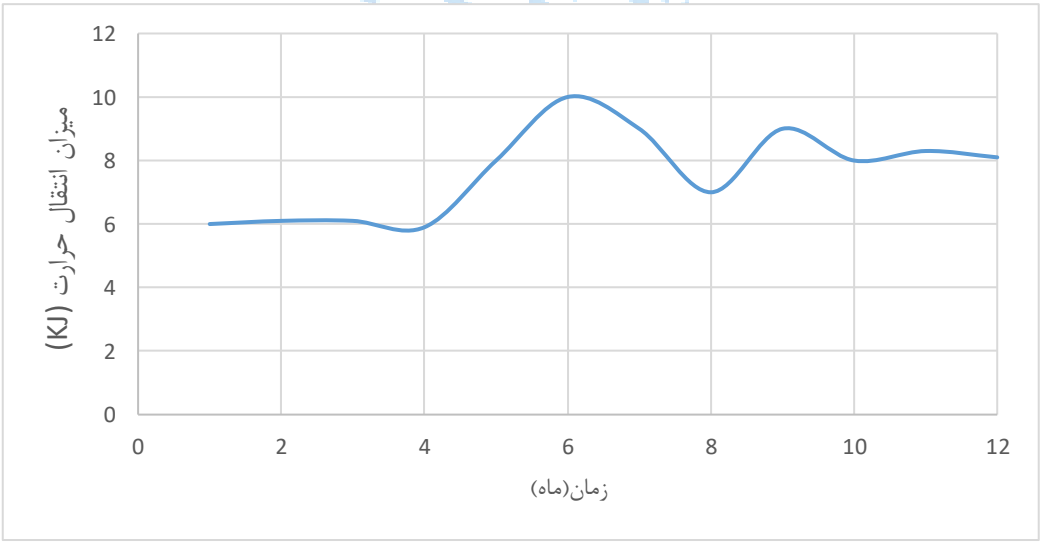
در شکل ۲ با توجه به اینکه هیچگونه ماده PCM در طرح در نظر گرفته نشده است، میزان انتقال حرارت در بالاترین حد خود قرار دارد. البته در برخی از روزهای سال این دیوار عملکرد بهتری نسبت به سایرین داشته است. علت این امر که در ماه ششم میلادی رخ داده است، گرمای هوا و تولید بیش از حد گرما و پدیده بیش گرمایش می‌باشد که این پدیده جزو نگرانی های استفاده از مواد تغییر فازدهنده در مناطق گرمسیری به شمارمی‌رود.



شکل(۲): نتایج حالت اول

۲-۵- نتایج حالت دوم

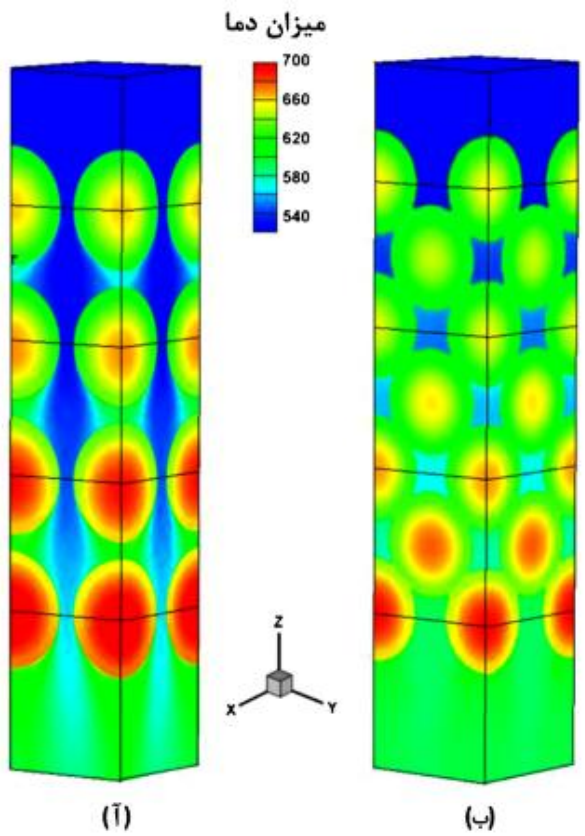
در شکل ۳ وجود ماده تغییر فاز دهنده تاثیر مناسبی بر کاهش میزان انتقال حرارتی داشته است و نسبت به حالت اول میزان انتقال حرارتی کمتری در سال دارد. اما باز هم در ماه ششم شاهد پدیده پیش گرمایش هستیم.



شکل (۳): نتایج حالت دوم

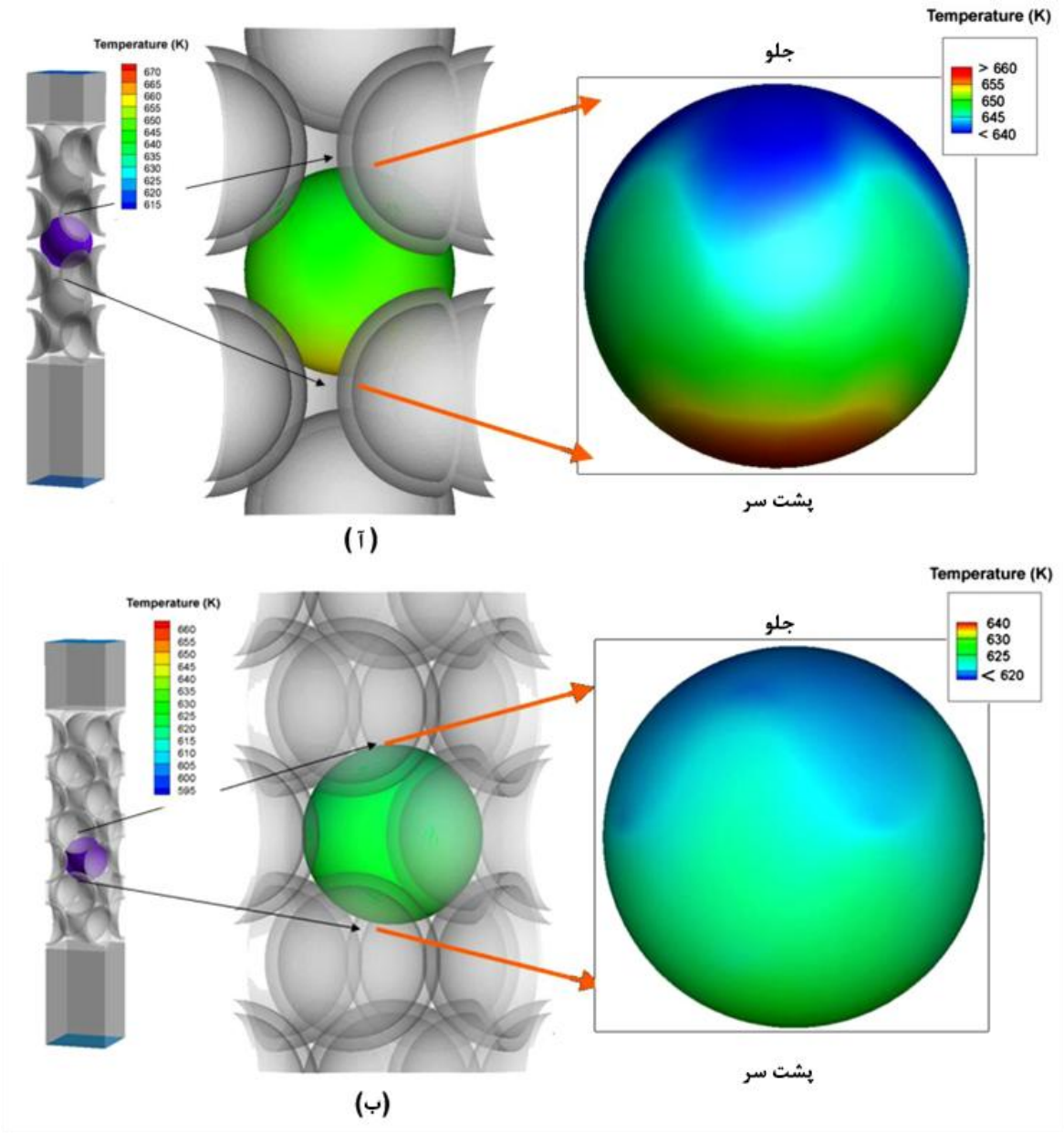
۳-۵- نتایج حالت سوم و چهارم

همانطور که به وضوح در شکل (۴) نشان داده شده است، ساختار پرتراکم تر در شبکه FCC باعث می گردد تا انتقال حرارت در این ساختار به طور یکنواخت تر صورت بگیرد. همچنین شایان ذکر است که عدد Nu یا همان ناسلت در سطح دور اتم های تشکیل دهنده رو به ناحیه منافذ بیشتر و در سطح اطراف ناحیه تماس کمتر پیش‌بینی می‌شود. این ویژگی ها در هر دو نوع آرایش، به ویژه در شبکه BCC نشان داده شده است. علاوه بر این، کمترین ضریب انتقال حرارت در نقطه تماس بین دو اتم همسایه به دلیل عدم انتقال حرارت پیش‌بینی می‌شود. با این حال، انتظار می‌رود حداکثر ضریب انتقال حرارت در نزدیکی تقاطع اتم ها رخ دهد، زیرا ساختار پر تراکم تر در آنجا دیده می شود. قابلیت انتقال حرارت بالاتر در اتم های PCM با چیدمان FCC به دلیل شبکه فشرده تر بیشتر آشکار می شود. سپس پیش‌بینی می‌شود که دمای درون اتم ها در یک شبکه FCC کمتر از دمای یک شبکه BCC می باشد. جدا شدن جریان انتقال دما منجر به انتقال حرارت پایین و به طور همزمان دمای سطح بالاتر می شود. اختلاف دمای بالاتر بین مکان های جلو و عقب برای اتم ها در یک آرایش BCC نیز در مقایسه با اتم ها در آرایش FCC در شکل (۴) مشخص است. این نتیجه پیش‌بینی‌شده نشان می‌دهد که مشخصه ناهمسانگرد کمتری در انتقال حرارت در یک شبکه FCC نشان داده می‌شود که به دلیل فشرده‌تر بودن و در نتیجه تراکم بیشتر آن است.

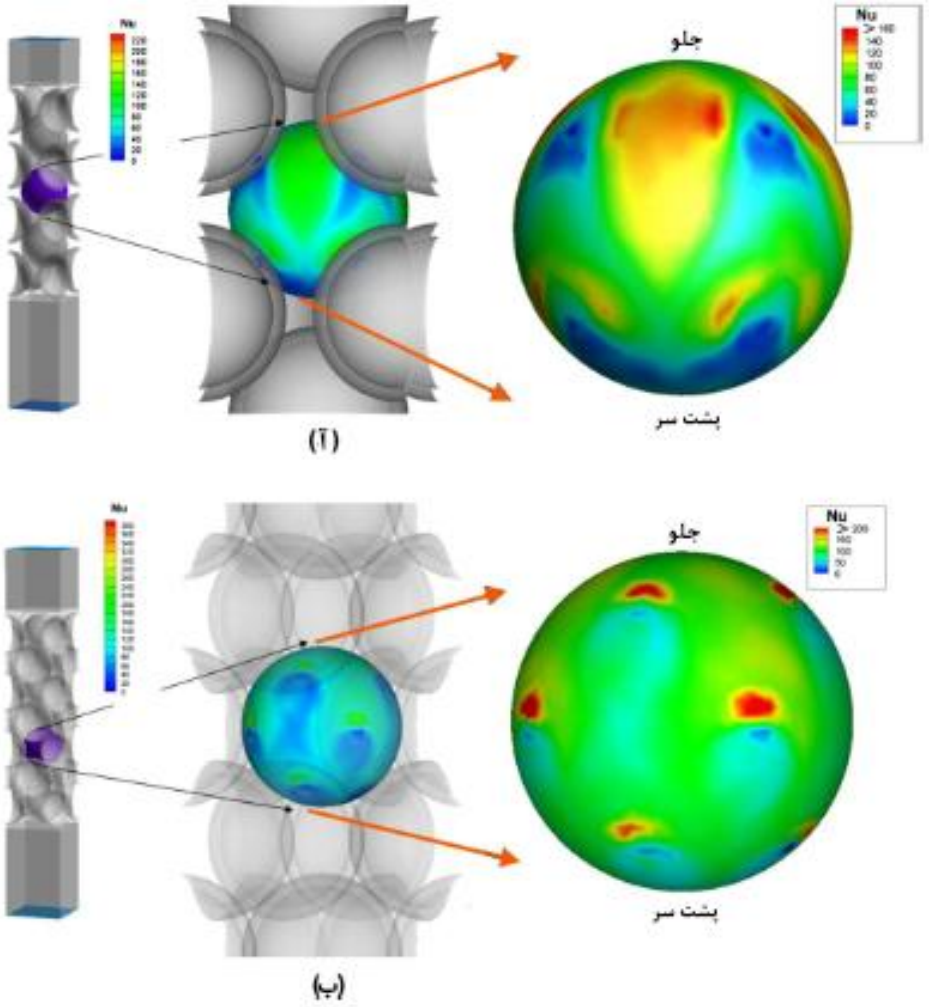


شکل(۴): میزان انتقال حرارت در قسمت PCM با ساختار BCC (آ) و ساختار FCC (ب)

توزیع عدد نانسلت در شکل(۶) بر روی یک اتم انتخاب شده برای هر دو آرایش می تواند بحث بالا را تایید کند. همانطور که در شکل(۶) قسمت آ نشان داده شده است، عدد ناسلت (منطقه زرد) بیشتر در قسمت جلوی اتم پیش‌بینی می‌شود و عدد ناسلت کمتر (منطقه آبی) نشان داده شده است. با این حال، این روند به وضوح بر روی یک اتم در آرایش FCC نشان داده نمی شود زیرا تراکم زیاد این ساختار مانع از این مهم و نهایتاً منجر به توزیع یکنواخت تر قابلیت انتقال حرارت (یعنی توزیع عدد ناسلت) می شود. همچنین شایان ذکر است که عدد نانسلت در سطح اتم رو به ناحیه منافذ بیشتر و در سطح اطراف ناحیه تماس کمتر پیش‌بینی می‌شود. این ویژگی ها در هر دو نوع آرایش، به ویژه در شبکه BCC نشان داده شده است. علاوه بر این، کمترین ضریب انتقال حرارت در نقطه تماس بین دو اتم همسایه به دلیل عدم انتقال حرارت جابجایی پیش‌بینی می‌شود. با این حال، انتظار می‌رود حداکثر ضریب انتقال حرارت در نزدیکی تقاطع اتم ها رخ دهد، زیرا اختلاط آشفته‌تر و جریان ثانویه بالاتر در آنجا اتفاق می‌افتد.

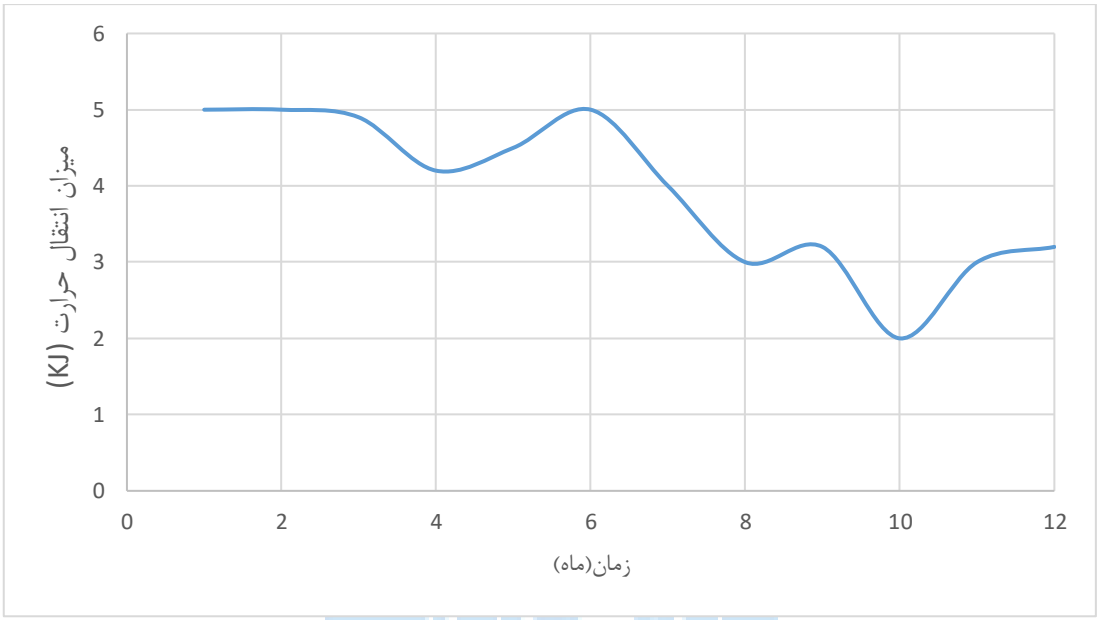


شکل(۵): تفاوت پخش دما در یک اتم مشخص PCM با ساختار BCC (ب) و ساختار FCC (آ)

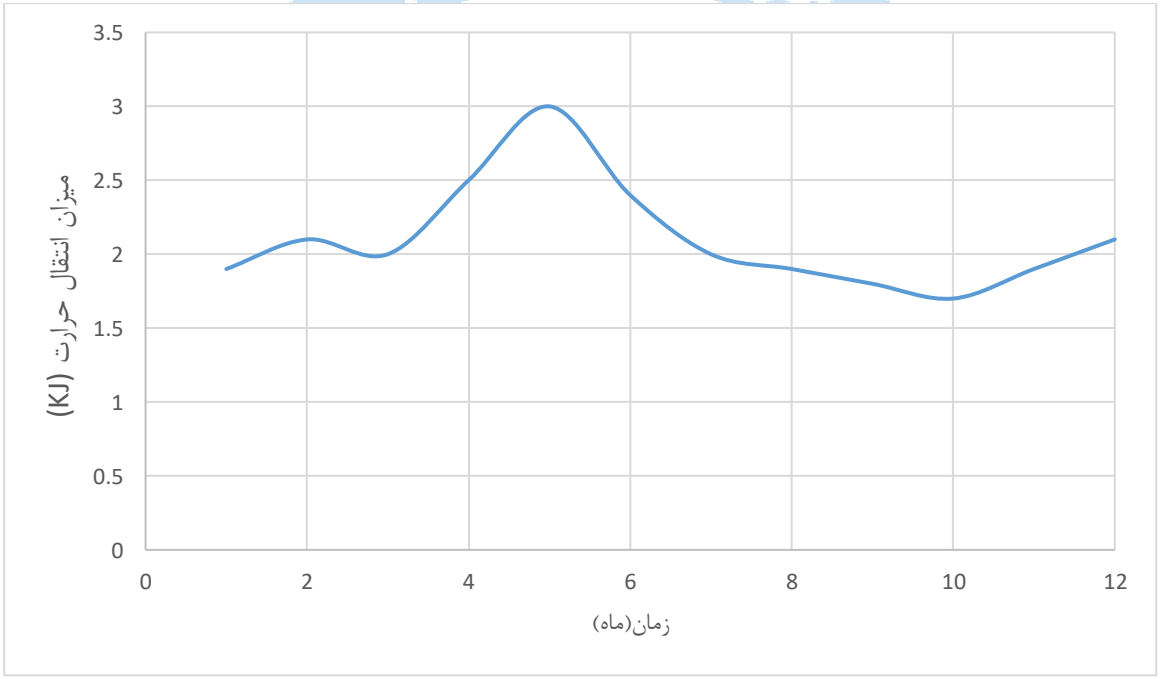


شکل(۶): مقدار عدد نانسلت یک اتم مشخص با ساختار BCC (آ) و ساختار FCC (ب)

وجود ساختارهای لتیسی تاثیر بسزایی در کاهش میزان انتقال حرارت در سال دارد و بیش گرمایش در فصل تابستان در این نوع ساختارها بسیار کمتر است. هردو ساختار BCC و FCC تاثیر بسیار خوبی در کاهش مصرف انرژی دارند. با توجه به شکل های (۷) و (۸) ملاحظه می گردد که ساختار لتیسی FCC نسبت به ساختار لتیسی BCC در کاهش مصرف انرژی تاثیر بیشتر و عملکرد بهتری دارد. این مهم می توان به علت نوع چیدمان اتم های آن باشد. همچنین در ساختار FCC و BCC خبری از پدیده بیش گرمایش (عملکرد منفی مواد تغییر فازدهنده در گرما دهی بیش از حد ساختمان در فصل تابستان) نیست. همچنین در تمام فصول و روزهای سال صرفه جویی در مصرف انرژی حاصل می‌شود و تغییر بسیار زیادی در این حالت نسبت به حالت بدون استفاده از مواد تغییر فازدهنده در مصرف انرژی وجود دارد.

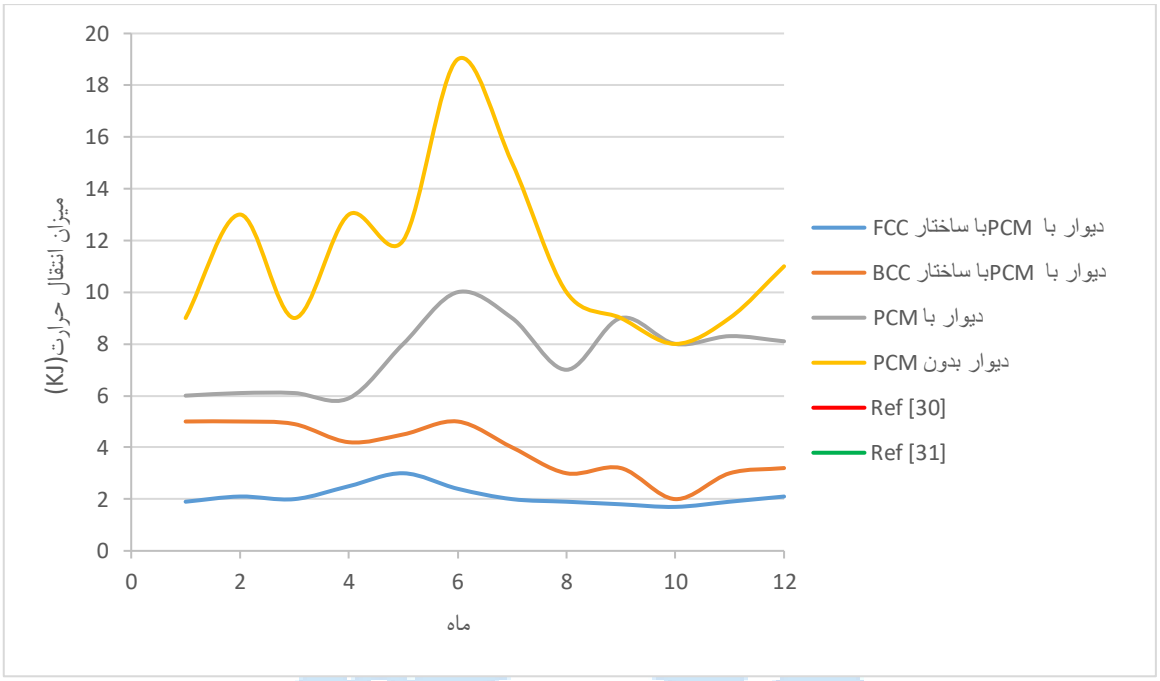


شکل(۷): نتایج حالت سوم



شکل(۸): نتایج حالت سوم

نتایج حاصله از این پژوهش در شکل (۹) مشخص گردیده است. نتایج حاصل از ایـن پـژوهش بـا نتـایج پـژوهش روکـس و همکـاران [۳۰] و لیانگ و همکارن [۳۱] در یک راستا می باشد.



شکل (۹): مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج مراجع دیگر

۶- نتیجه گیری

از نتایج تحلیل های بدست آمده که به صورت نمودار ارائه شده اند میتوان نتیجه گرفت که مواد تغییر فازدهنده با هر چیدمان و حالتی و هر نوعی در کاهش مصرف انرژی می‌تواند موثر واقع گردد و تاثیر زیادی در کاهش مصرف انرژی دارد. اما بررسی چیدمان های مختلف و ساختار های لتیسی متفاوت از جمله BCC و FCC نشان داده شد که چیدمان و ساختار مواد تغییر فازدهنده نقش بسزایی در عملکرد و تاثیر مواد تغییر فازدهنده در صرفه جویی انرژی دارد. در حالت دوم که مواد تغییر فازدهنده معمولی بدون ساختار لتیسی مورد بحث قرار گرفت، مشخص گردید که پدیده پیش گرمایش وجود دارد اما با بهره مندی از ساختاری های لتیسی BCC و FCC شاهد حذف این پدیده خواهیم بود. با بررسی دقیق تر در حالت سوم و چهارم با توجه به ساختار اتمی FCC نتایج نشان داد که این ساختار در کاهش مصرف انرژی تاثیر بیشتر و عملکرد بهتری دارد. این مهم می توان به علت نوع چیدمان اتم های آن باشد.

مراجع

[1] Lai, C.-m. and C.-m. Chiang, How phase change materials affect thermal performance: hollow bricks. Building Research & Information, 2006. 34(2): p. 118-130.
[2] Pagkalos, C., et al., Evaluation of water and paraffin PCM as storage media for use in thermal energy storage applications: A numerical approach. International Journal of Thermofluids, 2020. 1: p. 100006.
[3] Wang, C., et al., An experimental study on applying PCMs to disaster-relief prefabricated temporary houses for improving internal thermal environment in summer. Energy and Buildings, 2018. 179: p. 301-310.
[4] Kośny, J., D.W. Yarbrough, and W. Miller, Use of PCM enhanced insulation in the building envelope. Journal of Building Enclosure Design, 2008. 2008: p. 8.
[5] Lee, K.O., M.A. Medina, and X. Sun, On the use of plug-and-play walls (PPW) for evaluating thermal enhancement technologies for building enclosures: Evaluation of a thin phase change material (PCM) layer. Energy and Buildings, 2015. 86: p. 86-92.

[6] Weinläder, H., F. Klinker, and M .Yasin, PCM cooling ceilings in the Energy Efficiency Center—passive cooling potential of two different system designs. Energy and Buildings, 2016. 119: p. 93-100.
[7] Laaouatni, A., et al., Thermal building control using active ventilated block integrating phase change material. Energy and Buildings, 2019. 187: p. 50-63.
[8] Wang, X., et al., Research on temperature dependent effective thermal conductivity of composite-phase change materials (PCMs) wall based on steady-state method in a thermal chamber. Energy and buildings, 2016. 126: p. 408-414.
[9] Vickers, N.J., Animal communication: when i'm calling you, will you answer too? Current biology, 2017. 27(14): p. R713-R715.
[10] Castell, A., et al., Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. Energy and buildings, 2010. 42(4): p. 534-540.
[11] Akeiber, H., et al., A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. 60: p. 1470-1497.
[12] Saffari, M., et al., Passive cooling of buildings with phase change materials using whole-building energy simulation tools: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. 80: p. 1239-1255.
[13] Heier, J., C. Bales, and V. Martin, Combining thermal energy storage with buildings–a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. 42: p. 1305-1325.
[14] Souayfane, F., F. Fardoun, and P.-H. Biwole, Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. Energy and buildings, 2016. 129: p. 396-431.
[15] Alizadeh, M. and S. Sadrameli, Development of free cooling based ventilation technology for buildings: Thermal energy storage (TES) unit, performance enhancement techniques and design considerations–A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews :٥٨ .٢٠١٦ ,p. 619-645.
[16] Omrany, H., et al., Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: A comprehensive review. Renewable and sustainable energy reviews, 2016. 62: p. 1252-1269.
[17] Wang, Y., et al., Stability evaluation of earth-rock dam reinforcement with new permeable polymer based on reliability method. Construction and Building Materials, 2022. 320: p. 126294.
[18] Goshayeshi, H.R. and S.S. Adibi Toosi, Experimental investigation of stepped solar still with external condenser and heat energy storage. Journal of Mechanical Engineering, 2020. 50(3): p. 195-203.
[20] Jain, L. and S. Sharma, Phase change materials for day lighting and glazed insulation in buildings. J. Eng. Sci. Technol, 2009. 4: p. 322-327.
[21] IP, K. Solar thermal storage with phase change materials in domestic buiildings. in CIB World congress. Gävle, Sweden 7-12 june. 1998.
[22] Farid, M.M., et al., A review on phase change energy storage: materials and applications. Energy conversion and management, 2004. 45(9-10): p. 15.١٦١٥-٩٧
[23] Castello´ n, C., et al. Improve thermal comfort in concrete buildings by using phase change material. in Energy Sustainability. 2007.
[24] Peippo, K., P. Kauranen, and P. Lund, A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating. Energy and buildings, 1991. 17(4): p. 259-270.
[25] Voller, V.R., C. Swaminathan, and B.G.J.I.j.f.n.m.i.e. Thomas, Fixed grid techniques for phase change problems: a review. 1990. 30(4): p. 875-898.
[26] Fang, Y. and M.A.J.J.o.A.I. Medina, Proposed modifications for models of heat transfer problems involving partially melted phase change processes. 2009. 6(9): p. 1-20.
[27] Bird, R., W .Stewart, and E. Lightfoot, Transport Phenomena, 2nd Edn. New York, NY: John Wilwe & Sons. 2007, Inc.
[28] Kousksou, T., et al., DSC study and computer modelling of the melting process in ice slurry. 2006. 448(2): p. 123-129.
[29] Thorpe, D., Sustainable home refurbishment: The Earthscan expert guide to retrofitting homes for efficiency. 2010: Routledge.
[30] Frédéric Kuznik, Joseph Virgone, Jean-Jacques Roux, Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation, Energy and Buildings, Volume ٤٠, Issue .٢
[31] liang Dong, Bai Wandong, Investigating the effect of element shape of the face-centered cubic lattice structure on the flow and endwall heat transfer characteristics in a rectangular channel. International Journal of Heat and Mass Transfer, 153