

## بهینه‌سازی ساختمان مجهز به نمای دو پوسته، ماده تغییر فازدهنده، سقف سبز، و فتوولتائیک و بررسی اثرات محیط زیستی و اقتصادی آن

سبحان ایزدپناه<sup>۱</sup>

فریور فاضل پور<sup>\*</sup>

[f\\_fazelpour@azad.ac.ir](mailto:f_fazelpour@azad.ac.ir)

محمد افتخاری یزدی<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۲۹

### چکیده

**زمینه و هدف:** با عنایت به اهمیت و ضرورت کاهش مصرف انرژی در کشور، روش‌های متفاوتی به منظور نیل به این هدف در ساختمان معرفی و مورد بررسی محققان قرار گرفته است، استفاده توامان از پنل‌های فتوولتائیک، سقف سبز و مواد تغییر فازدهنده و نمای دو پوسته، منجر به کاهش تقریباً ۷۰٪ مصرف انرژی می‌شود، با توجه به این نکته در این تحقیق هدف بهینه‌سازی حالات استفاده از فناوری‌های بالا با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی می‌باشد.

**روش بررسی:** در این تحقیق بهینه‌سازی نوع و نحوه‌ی به‌کارگیری مواد تغییر فازدهنده در دیوار خارجی و بام سبز، با هدف کاهش توامان بار سرمایشی و گرمایشی برای نخستین مرتبه در ساختمان مجهز به فناوری‌های یاد شده انجام پذیرفته، از الگوریتم ژنتیک در سه شرایط آب هوایی گرم و خشک استپی در عرض جغرافیایی میانی، گرم و خشک کویری و آب و هوای معتدل و مرطوب، استفاده شده است. روش انجام این تحقیق، بهینه‌سازی با کمک نرم‌افزار دیزاین بیلدر است که در سال ۱۴۰۲ انجام و نهایی شده است و نتایج از منظر محیط زیستی و اقتصادی بررسی شدند.

**یافته‌ها:** در نتیجه‌ی این اقدام به ترتیب ۹، ۶ و ۹ پاسخ بهینه برای شهرهای تهران با آب و هوای گرم و خشک استپی، یزد با آب و هوای کویری و آمل با آب و هوای معتدل و مرطوب حاصل شده که بیشترین میزان صرفه‌جویی انرژی ۷۰/۹٪ برای آب و هوای معتدل مرطوب بوده است.

۱- گروه مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- گروه مهندسی سیستم انرژی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. \* (مسوول مکاتبات)

۳- گروه مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

**بحث و نتیجه‌گیری:** با در نظر گرفتن آنالیز اقتصادی و اثرات محیط زیستی دو حالت بهینه نسبت به سایر گزینه‌ها ارجحیت داشته که عبارتند از: ۱- استفاده از ماده تغییر فازدهنده، RT31 در بین لایه‌های آهک و آجر در دیوار خارجی ساختمان مسکونی واقع در شرایط آب و هوایی گرم و خشک استپی در عرض جغرافیایی میانی ۲- استفاده از ماده تغییر فازدهنده، RT26 در بین لایه‌های آهک و آجر در دیوار خارجی ساختمان مسکونی واقع در شرایط آب و هوایی گرم و خشک کویری

**واژه‌های کلیدی:** بهینه سازی مصرف انرژی؛ سقف سبز؛ ماده تغییر فازدهنده؛ نمای دو پوسته؛ فتوولتاییک.

# **Optimization of a building equipped with double skin façade, phase change materials, green roof, and photovoltaic with evaluation of their economic and environmental aspects**

**Sobhan Izadpanah**<sup>1</sup>

**Farivar Fazelpour**<sup>2\*</sup>

[f\\_fazelpour@azad.ac.ir](mailto:f_fazelpour@azad.ac.ir)

**Mohammad Eftekhari yazdi**<sup>3</sup>

Admission Date: January 10, 2024

Date Received: October 21, 2023

## **Abstract**

**Background and Objective:** Considering the importance and necessity of energy saving in Iran, different methods have been introduced and examined in order to achieve this goal in the building section. simultaneous use of photovoltaic panels, green roofs, phase-change materials and double-skin facades, can lead to almost 70% Energy saving. considering this fact, it is important to optimize the use of the above technologies, with analyzing their economic and environmental aspects.

**Material and Methodology:** In this research, the optimization of PCM types and PCM location in external wall and green roof layers, with the objective of cooling and heating load reduction, for the first time in a building equipped with the aforementioned technologies, was carried out using the genetic algorithm. Three climate condition of Iran consist of Hot arid (steppe-dry mid-latitude and Desert biome-dry tropical) and mild-humid climate was selected. The study was conducted using Design Builder software version 6.1.5.2.

**Findings:** As a result, 9, 9 and 6 optimal solutions were calculated for Tehran with steppe-dry mid-latitude climate, Yazd with Desert biome-dry tropical climates, and Amol with mild-humid climate respectively. The highest amount of energy saving of 70.9% has been achieved for mild-humid climate.

**Discussion and Conclusion:** Considering the economic analysis and environmental effects, two following solutions are suggested 1- using RT31 PCM between brick and plaster layers of external wall of the building located in steppe-dry mid-latitude climate 2- using, RT26 Between brick and plaster layers of external wall of the building in desert biome-dry tropical climate.

**Keywords:** Energy Optimazation; Double Skin Façade, Phase Change Material, Green Roof, Photovoltaics.

---

1- Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. \* (Corresponding Author)

3- Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

## مقدمه

مسئله مصرف برق در کشور ایران به خصوص در سالیان اخیر با توجه به افزایش قطعی برق از اهمیت فراوانی برخوردار بوده است، بخش عمده این افزایش قطعی برق به دلیل افزایش مصرف در بخش ساختمانی به خصوص در فصل تابستان و افزایش درخواست بار سرمایشی مورد نیاز می‌باشد. بدین منظور ضرورت دارد با نگاهی مجدد به فناوری‌های کاهش مصرف انرژی در ساختمان، راه‌حل‌های بهینه معرفی و به کار گرفته شود. از جمله فناوری‌های پیشنهادی، استفاده از مواد تغییر فازدهنده در ساختمان است. این مواد با عنایت به توانایی جابه‌جایی ساعات اوج مصرف برق (۱) می‌توانند راه‌حل مناسبی برای برون رفت از وضعیت فعلی باشند، برای نمونه استفاده از این مواد در نماهای دوجداره تهویه شونده (۵-۲) به طور کامل عملکرد حرارتی ساختمان را بهبود بخشیده است. نخستین نکته در خصوص استفاده از این مواد، انتخاب ماده تغییر فازدهنده مناسب است (۶، ۷)، بدین منظور در تحقیقات بسیاری پارامترهای تاثیر گذار بر عملکرد این مواد (۸، ۹) بررسی و با ترکیبات جدید آن معرفی شده‌اند (۱۴-۱۰). جایگاه استقرار این مواد در ساختمان از جمله مسائلی بوده که تا کنون مورد بررسی، تحقیق و تحلیل قرار گرفته است، استقرار این مواد در سقف ساختمان تا ۱۲/۶٪ ذخیره‌ی سرمایش را افزایش داده است (۱۵). همچنین بررسی اثر استفاده از این مواد در سقف به همراه لایه‌ی هوای تهویه نشده (۱۶، ۱۷) بهبود آسایش حرارتی ساکنان را نشان داده است.

نکته‌ی دیگر در برخورد با مواد تغییر فازدهنده، نحوه‌ی استفاده از این مواد به ویژه در مصالح و اجزای ساختمان نظیر شیشه و دیوار و ..... است. برای مثال (۱۸) با اضافه کردن ماده تغییر فازدهنده به شیشه دوجداره، اثر جابه‌جایی پیک بار سرمایشی و خواص عایق حرارتی سیستم، به خصوص در تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد کشور چین افزایشی است و حرارت ورودی به ساختمان در یک روز آفتابی تا ۱۸/۳٪ کاهش می‌یابد. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در بین جدارهای پنجره دوجداره به خصوص در تابستان اثر قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی در ساختمان دارد. آزادسازی گرمای نهان این مواد در شب‌های

تابستان بسیار قابل توجه بوده و در نتیجه ممکن است به علت ذوب کامل این مواد حالت بیش گرمایش در ساختمان ایجاد کند، (۱۹، ۲۰)، در تحقیقی در سال ۲۰۱۷ (۲۱) نشان داده شد که بازسازی ساختمان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند خطرات ناشی از تنش حرارتی داخلی ساختمان را به طور موثر کاهش دهد. از انواع دیگر کاربرد مواد تغییر فازدهنده در ساختمان استفاده از آن‌ها در مصالح ساختمانی نظیر بتن (۲۲، ۲۳) و یا به صورت کامپوزیت سیمانی می‌توان نام برد (۲۴).

همچنین مشخص شده است که استفاده از یک لایه فتوولتائیک و یک لایه از مواد تغییر فازدهنده در نمای ساختمان ماهانه ۲۰ تا ۳۰٪ بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان را کاهش می‌دهد (۲۵). یکی از موارد مهم در استفاده از مواد تغییر فازدهنده وابستگی عملکرد این مواد به تغییرات آب و هوایی است، محمد اهنگری و مهدی معرفت در سال ۲۰۱۸ (۲۶) به منظور ارتقای آسایش حرارتی و مصرف انرژی در ساختمان، ماده تغییر فاز دهنده دو لایه را پیشنهاد کردند و نتایج نشان داد که استفاده از طرح پیشنهادی، زمان رسیدن اتاق به آسایش حرارتی را در مناطق خشک از ۷۳٪ تا ۹۳٪ و در مناطق نیمه مرطوب از ۶۳٪ تا ۷۵٪ افزایش می‌دهد. همچنین مصرف انرژی حرارتی در مناطق خشک تا ۱۷/۵٪ و در مناطق مرطوب تا ۱۰/۴٪ کاهش می‌یابد.

سقف‌های سبز یک راه‌حل مناسب برای افزایش حفظ آب باران و بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌های جدید و موجود می‌باشند. مزیت‌های اصلی سقف سبز صرفه‌جویی انرژی و منافع زیست‌محیطی آن‌هاست (۲۹-۲۷). بررسی اثر استفاده از سقف سبز در یک مکان عمومی (۳۰) مشخص کرد که میزان صرفه‌جویی مصرف انرژی در ساختمان با استفاده از سقف سبز، به حالت اولیه ساختمان بدون استفاده از آن، وابسته می‌باشد. از جمله پارامترهایی که بر میزان کاهش بار سرمایشی ناشی از وجود سقف سبز تاثیر گذار است می‌توان به شرایط آب و هوایی و میزان استفاده از عایق حرارتی در ساختمان نام برد. ژینگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ (۳۱) به صورت تجربی به بررسی

تحقیق و مشکلات تحقیقات موجود و مسیرهای تحقیقات آینده بیان و مشخص شد که این فناوری یک استراتژی موثر برای تولید انرژی پاک در مقیاس ساختمانی است. با این حال، هنوز چالش‌های مختلفی وجود دارند که مانع از اجرای این بام‌ها در مقیاس بزرگ می‌شوند، از جمله هزینه‌های اولیه بالا، داده‌های تجربی محدود و عدم آگاهی در مورد مزایای بلند مدت. این چالش‌ها را می‌توان از طریق طراحی مقرون‌به‌صرفه جدید بام‌های فتوولتاییک سبز و اتخاذ مناسب‌ترین مواد، که می‌توانند در یک دوره طولانی‌تر به طور موثرتری عمل کنند، برطرف نمود.

بر اساس نتایج تحقیقات (۳۸) استفاده از مواد تغییر فازدهنده در لایه‌ی درونی سقف بتنی تا ۵۷٪ بار حرارتی کمتری را نسبت به سقف معمولی در طول سردترین و گرم‌ترین روز در شرایط اقلیم آب و هوایی گرم کشور مکزیک ایجاد می‌کند. همچنین ارزیابی تاثیر پارامترهایی نظیر جهت، ارتفاع و نوع ساختمان در عملکرد حرارتی ساختمان تجهیز شده با مواد تغییر فازدهنده در سال ۲۰۲۱ (۳۹) مشخص کرد که انتخاب جهت و ارتفاع مناسب با هدف کاهش مصرف انرژی به ویژگی‌های تابش خورشید در محل استقرار ساختمان، جهت و سرعت باد وابسته است. علاوه بر این، پارامترهای مورد اشاره، بر عملکرد حرارتی ماده تغییر فازدهنده‌ی مورد استفاده در ساختمان نیز موثر می‌باشند.

در ادامه بررسی پیشینه تحقیق مشخص گردید، تحقیقات بسیاری به منظور بهینه‌سازی پارامترهای موثر در عملکرد حرارتی ساختمان انجام شده، اما تاکنون بهینه‌سازی ساختمان با مشخصات مدنظر در این تحقیق انجام نشده است (۴۰-۵۵). با عنایت به نتایج آنالیز حرارتی ساختمان مجهز به بام سبز، ماده تغییر فازدهنده، نمای دو پوسته و فتوولتاییک (۵۶)، هدف در این تحقیق، بهینه‌سازی دو هدفه ساختمانی مسکونی با شرایط یاد شده، به منظور کاهش بار سرمایشی و گرمایشی مورد نیاز برای نخستین مرتبه بوده است که ضمن بررسی اثرات محیط زیستی و آنالیز اقتصادی، بهترین گزینه در بین راه‌حل‌های پیشنهادی معرفی شده است.

عملکرد حرارتی سقف و دیوار سبز در مناطقی با آب و هوای سرد و مرطوب در فصل زمستان پرداختند، نتایج نشان داد که در حالت عدم وجود گرمایش با استفاده از دیوار و سقف سبز دمای داخل ساختمان افزایش می‌یابد. در مقاله‌ای در سال ۲۰۲۱ (۳۲) عملکرد حرارتی بام سبز در شرایط آب و هوایی مادون قطبی مورد بررسی قرار گرفت، که بر اساس نتایج این مقاله، مشخص گردید که تاثیر حرارتی استفاده از سقف سبز در صرفه‌جویی مصرف انرژی در ساختمانی با عایق‌کاری (با کیفیت و شدت بالا) در شرایط آب و هوایی مادون قطبی پایین است.

نمای شیشه‌ای و شفاف، نمای مورد علاقه بسیاری از معماران در سرتاسر دنیا است، اما استفاده از این نماها عامل افزایش مصرف انرژی می‌شود، لذا محققان در تلاش‌اند با ارائه طرح‌های مبتکرانه مصرف انرژی در ساختمان‌ها با نمای شفاف را کاهش دهند (۳۳، ۳۴) در سال ۲۰۱۷ طرح جدیدی پیشنهاد گردید، در این طرح در بین نمای دوجداره شیشه‌ای از کرکره‌ای استفاده شد که پره‌های این کرکره مجهز به سیستم فتوولتاییک بوده است، مشخص شد طرح پیشنهادی می‌تواند از ۱۲/۱۶ تا ۲۵/۵۷٪ درصد مصرف انرژی را در مقایسه با نمای دوجداره معمولی کاهش دهد.

در سال ۲۰۲۰ (۳۵) در کشور استرالیا با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی استوایی ساوانا و نیمه استوایی و اقیانوسی در یک ساختمان اداری به بررسی استفاده هم‌زمان از نمای دو پوسته و سیستم فتوولتاییک پرداخته شده و با مقایسه حالت‌های عملیاتی مختلف، مشخص شد که نمای دوپوسته با تهویه طبیعی و سلول خورشیدی پروسکایت، می‌تواند پیکربندی بهینه‌ای باشد که به بالاترین میزان صرفه‌جویی دست می‌یابد. میزان کل صرفه‌جویی سالانه انرژی به ترتیب در داروین، سیدنی و کانبرا با شرایط آب و هوایی استوایی ساوانا و نیمه استوایی و اقیانوسی در مقایسه با فن‌آوری‌های سنتی به میزان ۳۴/۱٪، ۸۶٪ و ۱۰۶٪ رسید.

در سال ۲۰۲۰ (۳۶، ۳۷) در مقاله‌ای بعد از بررسی جامع ۱۴۵ مقاله تحقیقاتی مرتبط با بام‌های فتوولتاییک سبز، مزایای بام‌های فتوولتاییک سبز از شش دیدگاه مختلف، چالش‌های

## روش بررسی

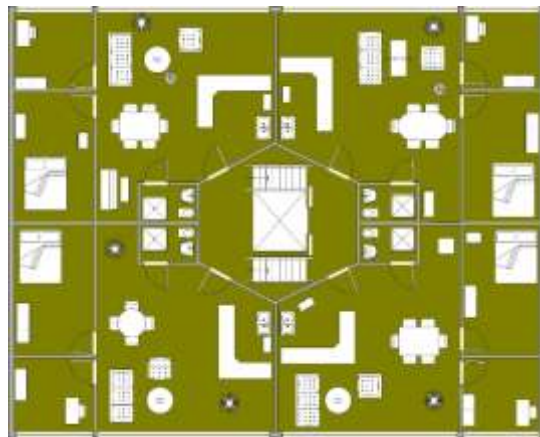
در این تحقیق با در نظر گرفتن یک ساختمان مسکونی به مساحت بنای ۱۱۹۵ متر مربع با انجام بهینه‌سازی دو هدفه به منظور کاهش توامان بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان مجهز به فناوری‌های معرفی شده، راه‌حل‌های بهینه مشخص و سپس با در نظر گرفتن المان‌های محیط زیستی و اقتصادی بهترین گزینه انتخاب و به تحلیل نتایج پرداخته شده است. در انجام بهینه‌سازی‌ها از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. بهینه‌سازی‌ها بر اساس فلوجارت شکل ۱ در سال ۱۴۰۲ انجام و اجرایی شده است. مشخصه‌ها و جزییات متریکال و مصالح منتخب در دیوار، سقف و کف ساختمان در جدول ۱ ارائه شده است. طراحی ساختمان یاد شده در نرم افزار دیزاین بیلدر بر اساس طرح دو بعدی شکل ۲ - الف اجرا شده است، طرح سه

بعدی ساختمان در شکل ۳- ب نمایش داده شده است. شبیه‌سازی قسمت فتووالتاژیک ساختمان بر اساس اطلاعات مندرج در جدول ۲ و بام سبز طراحی شده بر اساس داده‌های مورد استفاده در مرجع (57) بوده که اطلاعات آن در جدول ۳ ارائه شده، اجرایی شده است. سه شهر تهران، یزد و آمل انتخاب شده‌اند (شکل ۳). جهت اخذ اطلاعات مربوط به داده‌های آب و هوایی تهران و یزد از اطلاعات کتابخانه نرم‌افزار دیزاین بیلدر استفاده شده است و جهت حصول اطلاعات آب و هوایی شهر آمل از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مترونوم استفاده گردید، اطلاعات یاد شده در جدول ۴ ارائه شده است. ، با عنایت به تعدد استفاده از داده‌های یاد شده در مقالات معتبر ایرانی و بین‌المللی، استفاده از این اطلاعات قابل توجیه است

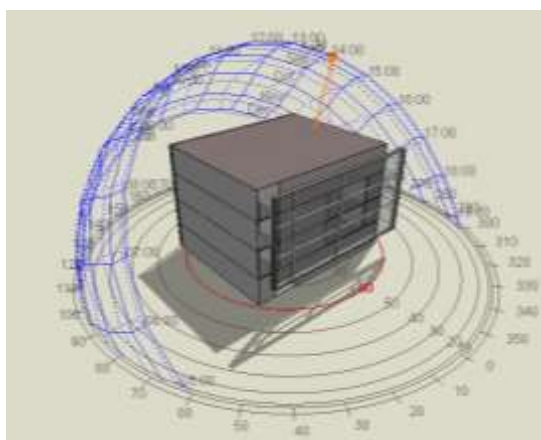
## جدول ۱- مصالح به کار رفته

Table1. Construction material

| کف ساختمان              |            |                      | سقف معمولی ساختمان      |            |                 | دیوار خارجی ساختمان     |            |                   |
|-------------------------|------------|----------------------|-------------------------|------------|-----------------|-------------------------|------------|-------------------|
| U (W/m <sup>2</sup> -K) | ضخامت (cm) | مصالح                | U (W/m <sup>2</sup> -K) | ضخامت (cm) | مصالح           | U (W/m <sup>2</sup> -K) | ضخامت (cm) | مصالح             |
| ۰/۲                     | ۳۳/۳       | مجموع اجزای کف       | ۰/۶                     | ۳۱/۵       | مجموع اجزای سقف | ۳/۱                     | ۱۵/۵       | مجموع اجزای دیوار |
| ۰/۳                     | ۱۳/۳       | فوم فرمالدهید و اوره | ۵/۲                     | ۷          | گراول           | ۱۷۵/۴                   | ۲          | تراورتن           |
| ۱۱/۳                    | ۱۰         | بتن ریخته‌گری        | ۱۷                      | ۱          | قیر             | ۱۱۴/۹                   | ۱          | سیمان             |
| ۵/۸                     | ۷          | شمشه کف              | ۰/۸                     | ۲۰         | بتن سقف         | ۹/۱                     | ۱۱         | آجر               |
| ۲۱۶۶۶/۷                 | ۳          | کفپوش تخته‌ای        | ۳۶                      | ۲          | سیمان           | ۵۰                      | ۱          | گچ                |
|                         |            |                      | ۱۶/۷                    | ۱/۵        | ۱۶/۷            | ۱/۵                     | ۰/۵        | گچ سفیدکاری       |



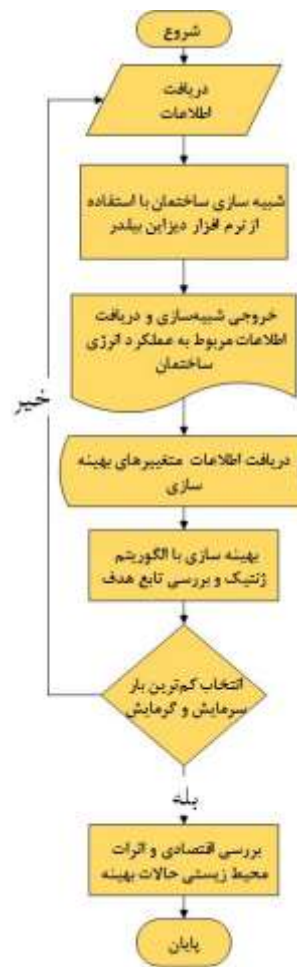
(الف)



(ب)

شکل ۲- طراحی (الف) دو بعدی (ب) سه بعدی ساختمان

Figure 2. a) 2D b)3D design of building



شکل ۱- فلوچارت بهینه‌سازی

Figure1. Optimization diagram

جدول ۲- اطلاعات سیستم فتوولتاییک

Table 2. Properties of the PV module

| Monocrystalline                |     |
|--------------------------------|-----|
| Total solar transmission(SHGC) | ۰/۷ |
| Direct Solar /transmission     | ۰/۶ |
| Light Transmission             | ۰/۷ |
| U-Value (W/m2-K)               | ۱/۹ |

## جدول ۳- مشخصات بام سبز (57)

Table3. Construction material used in Green Roof (57)

| (W/m <sup>2</sup> -K) U | ضخامت (cm) | مصالح مورد استفاده |                     |
|-------------------------|------------|--------------------|---------------------|
| ۰/۴                     | ۵۸/۵       |                    | مجموع اجزای بام سبز |
| ۲                       | ۲۰         | پوشش گیاهی         |                     |
| ۵/۲                     | ۱۰         | خاک                |                     |
| ۳/۲                     | ۴          | کائوچوی طبیعی      |                     |
| ۱۷                      | ۱          | قیر خالص           |                     |
| ۳۶                      | ۲          | ملات سیمانی        |                     |
| ۰/۸                     | ۲۰         | دال بتنی           |                     |
| ۲                       | ۱/۵        | گچ                 |                     |

## جدول ۴- اطلاعات آب و هوایی شهرهای منتخب

Table 4. Information of selected Cities Climate condition

| شهر   | نوع اقلیم آب و هوایی                   | Atmospheric Pressure (Pa) | Wind Direction (°) | Wind Speed (m/s) | Diffuse Horizontal Solar (kWh) | Direct Normal Solar (kWh) | Outside Dew-Point Temperature (C°) | Outside Dry-Bulb Temperature (C°) |
|-------|--|---------------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| تهران | گرم و خشک استپی در عرض جغرافیایی میانی | ۸۷۹۳۹/۶                   | ۱۴۵/۸              | ۲/۷              | ۱۰۵۹/۶                         | ۱۷۹۹/۵                    | ۱/۶                                | ۱۷/۳                              |
| یزد   | گرم و خشک کویری                        | ۸۷۵۸۶/۱                   | ۱۲۳/۹              | ۲/۴              | ۱۲۱۲/۴                         | ۱۳۴۶/۱                    | -۱/۸                               | ۱۹/۲                              |
| آمل   | معتدل و مرطوب                          | ۹۹۵۸۶/۸                   | ۱۸۰/۶              | ۱/۲              | ۸۱۶/۴                          | ۸۹۳/۱                     | ۱۳/۵                               | ۱۷/۱                              |

## ۱-۲- اعتبار سنجی

شد که با استناد به این بررسی، صحت شبیه‌سازی در دیزاین بیلدر تایید و در ادامه سایر شبیه‌سازی‌ها بر این اساس انجام و اجرایی شد (شکل ۴).

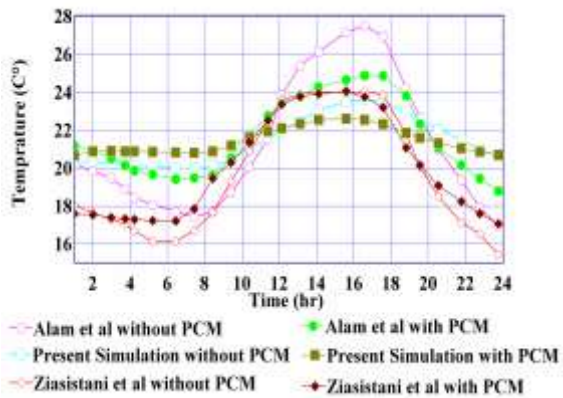
با عنایت به نتایج دو تحقیق پیشین (۵۸) و (۵۹)، به منظور اعتبارسنجی و ارزیابی صحت شبیه‌سازی‌ها در نرم افزار دیزاین بیلدر، اتاقی به مساحت ۱۶ متر مربع با کمک دیزاین بیلدر شبیه‌سازی شد. با مقایسه‌ی نتایج، خطای بسیاری کمی مشاهده





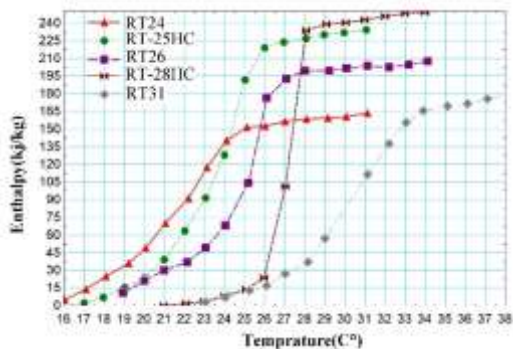
شکل ۳- موقعیت جغرافیایی شهرهای منتخب

Figure3. Location of selected Cities



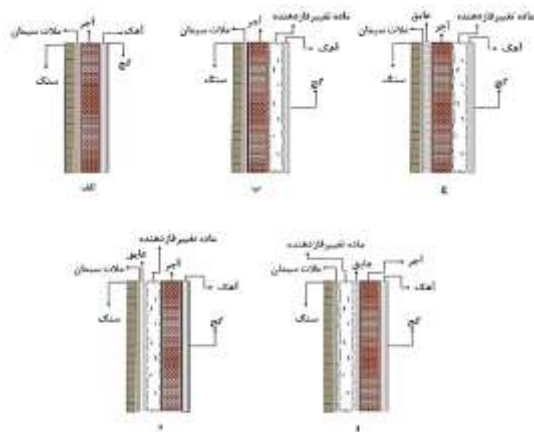
شکل ۴- اعتبارسنجی

Figure 4. Validation

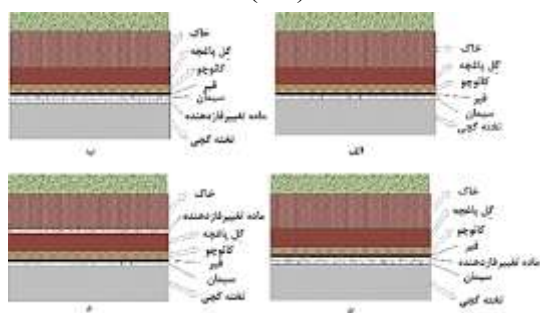


شکل ۵- نمودار آنتالپی به دما مواد تغییر فاز دهنده

Figure5. PCM enthalpy-temperature curves



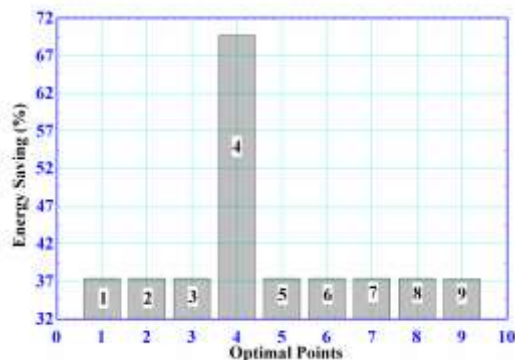
(الف)



(ب)

شکل ۶- الف) انواع دیوار ب) انواع سقف سبز پیشنهادی

Figure 6. a)External wall types b)Green roof types



شکل ۷- کاهش مصرف انرژی در پاسخ‌های بهینه تهران

Figure7. Energy saving of Tehran optimal solution

## ۲-۲- بهینه‌سازی

توامان بارسرمایشی و گرمایشی مورد نیاز ساختمان با کمک الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی انجام شده است. هدف دستیابی به بهترین گزینه از منظر متغیرهایی شامل: نوع ماده تغییر فاز دهنده، استفاده یا عدم استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در دیوار

در این تحقیق یک ساختمان مجهز به پنجره‌های فتوالتاییک و نمای دو پوسته در بخش شمالی و جنوبی ساختمان که با استفاده از بام سبز و مواد تغییر فاز دهنده از منظر عملکرد انرژی ارتقا یافته، مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه به منظور کاهش

## یافته‌ها

در این مقاله بهینه‌سازی دوده‌دهنده به منظور دستیابی به کم‌ترین میزان بار سرمایشی و گرمایشی برای نخستین مرتبه در یک ساختمان مسکونی مجهز به پنل فتوولتائیک، نمای دو جداره، دیوارها با ماده تغییر فازدهنده و بام سبز، صورت پذیرفته، در ادامه با درج نتایج، پاسخ‌های حالات بهینه بررسی و ارزیابی شده‌اند. بهینه‌سازی با کمک دیزاین بیلدر ورژن ۲، ۵، ۱، ۶ انجام شد، بیشترین تعداد نسل‌ها در بهینه‌سازی ۲۰ و بیشترین اندازه‌ی هر نسل در بهینه‌سازی، ۱۰۰ بوده است، فرآیند هر مرتبه بهینه‌سازی به مدت سه الی چهار روز در سیستم Core i5 با سی پی یوی m ۲۴۳۰ با رم ۴ گیگابایتی، انجام شده است. پس از اتمام بهینه‌سازی ساختمان در هر یک از شهرها، نتایج با ساختمان مسکونی با شرایط عادی مقایسه شده (جدول ۵) و در ادامه ارزیابی و بررسی نتایج به دست آمده ارائه شده است.

خارجی و سقف ساختمان، محل استقرار ماده تغییر فاز دهنده در دیوار خارجی و سقف ساختمان، استفاده یا عدم استفاده توامان از مواد تغییر فازدهنده و عایق حرارتی در دیوار ساختمان، بوده است. به منظور بررسی نوع ماده تغییر فازدهنده مواد تغییر فاز دهنده صنعتی که در شکل ۵ نمودار آنالیزی و دمای آن‌ها ارائه شده است مورد ارزیابی قرار گرفتند (۶۰). متغییر بعدی، استفاده یا عدم استفاده از ماده تغییر فازدهنده در دیوار خارجی و محل استقرار این مواد در بین اجزای دیوار خارجی ساختمان می‌باشد، بر این اساس و به منظور ارزیابی این متغییر، چینش اجزای دیوار بر اساس ۵ طرح پیشنهادی که در شکل ۶-الف نشان داده شده است، بررسی شدند. سقف سبز مورد استفاده در ساختمان در ۴ حالت مورد ارزیابی قرار گرفته که این حالات در شکل ۶-ب نشان داده شده است، در این حالات استفاده و عدم استفاده از مواد تغییر فازدهنده در سقف سبز و محل استقرار این مواد در بین اجزای سقف مدنظر بوده است.

## جدول ۵- مشخصات حرارتی ساختمان مسکونی شبیه‌سازی شده (حالت پایه)

Table 5. Sample building's internal gain (Base scenario)

| شهر   | بار سرمایشی (kWh) | بار گرمایشی (kWh) | انرژی مصرفی (kWh) | تولید برق (kWh) |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| تهران | ۱۹۸۵۴۰/۷          | ۷۲۰۵۷/۸           | ۵۹۱۴۵۲            | ۷۲/۱            |
| یزد   | ۲۱۶۸۸۶/۹          | ۵۸۹۳۲/۹           | ۵۶۳۳۹/۲           | ۶۴/۹            |
| آمل   | ۱۴۹۳۷۹/۹          | ۶۹۳۱۱/۶           | ۵۲۹۶۶۹/۳          | ۴۸/۳            |

## ۱- تهران

در پی بهینه‌سازی در شهر تهران، نُه نقطه‌ی بهینه حاصل شد که مشخصات، بار سرمایشی و گرمایشی مورد نیاز، کل انرژی مصرفی و میزان کربن‌دی‌اکسید تولیدی در شرایط یاد شده در جدول ۶ ارائه شده است. بررسی پاسخ‌های حالات بهینه نشان می‌دهد، برای دیوار خارجی ساختمان، دیوار بدون ماده تغییر فازدهنده و استقرار این ماده در بین لایه‌های ملات سیمانی و عایق پیشنهاد نشده است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که از منظر کاهش بار سرمایش و گرمایش ساختمان واقع در تهران، این دو طرح مناسب نمی‌باشند.

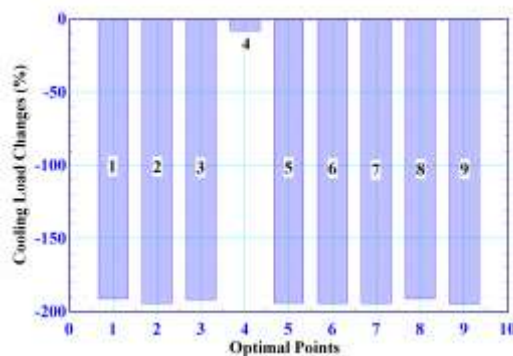
اشکال ۷، ۸-الف و ۸-ب مقایسه‌ی پاسخ‌های حالات بهینه با یکدیگر به ترتیب از منظر صرفه‌جویی مصرف انرژی، کاهش بار

گرمایشی و تغییرات بار سرمایشی را نشان می‌دهند، بیشترین میزان صرفه‌جویی انرژی ۶۹/۷٪ (پاسخ شماره ۴) می‌باشد، از منظر کاهش بار گرمایشی به طور کلی همه‌ی پاسخ‌های بهینه تاثیر مثبتی (تا ۹۲/۳٪ کاهش بار گرمایشی) را ایجاد کرده‌اند، اما در خصوص بار سرمایشی (شکل ۸-ب) همه‌ی پاسخ‌ها تاثیر منفی داشته و در اکثر حالات بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان ۱/۵ تا ۲ برابر بیشتر شده است، لذا از بین پاسخ‌ها، گزینه‌ی مطلوب‌تر می‌تواند گزینه‌ای با اثر منفی کمتر در بار سرمایشی مورد نیاز باشد (پاسخ شماره ۴).

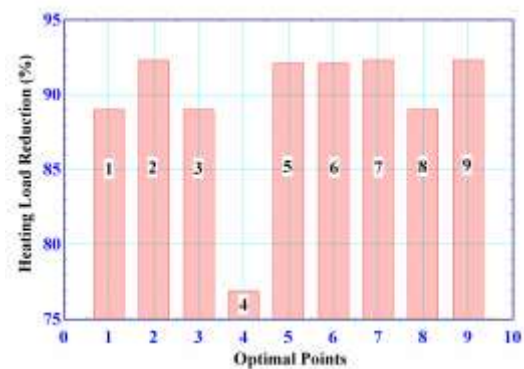
## جدول ۶- حالات بهینه تهران

Table 6. Tehran optimal solutions

| ردیف | نوع ماده تغییر فازدهنده | سقف | دیوار خارجی | بار سرمایشی (kWh) | بار گرمایشی (kWh) | انرژی مصرفی (kWh) | کربن دی اکسید (kg) |
|------|-------------------------|-----|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| ۱    | RT24                    | ج   | ب           | ۵۷۷۸۹۴/۲          | ۷۹۰۸/۵            | ۳۶۹۹۸۴/۴          | ۱۷۶۱۰۷/۴           |
| ۲    | RT24                    | ب   | ج           | ۵۸۴۱۲۴/۴          | ۵۵۷۱/۳            | ۳۷۰۴۱۹/۱          | ۱۷۷۷۰۸/۷           |
| ۳    | RT-28HC                 | د   | ب           | ۵۷۸۹۰۷/۷          | ۷۸۹۸/۲            | ۳۷۰۵۳۳/۶          | ۱۷۶۴۴۶             |
| ۴    | RT31                    | الف | ج           | ۲۱۴۰۰۶/۴          | ۱۶۶۴۹/۹           | ۱۷۹۳۶۹/۲          | ۵۵۸۳۵/۴            |
| ۵    | RT-25HC                 | ج   | د           | ۵۸۴۰۰۰/۸          | ۵۶۶۷/۱            | ۳۷۰۴۷۵/۷          | ۱۷۷۶۹۰/۶           |
| ۶    | RT31                    | ب   | د           | ۵۸۴۰۳۰/۵          | ۵۶۶۱/۴            | ۳۷۰۴۸۴/۸          | ۱۷۷۶۹۹/۲           |
| ۷    | RT26                    | ج   | ج           | ۵۸۴۰۹۵/۹          | ۵۵۷۶/۶            | ۳۷۰۴۱۰/۱          | ۱۷۷۷۰۰/۴           |
| ۸    | RT26                    | ب   | ب           | ۵۷۷۹۲۵            | ۷۹۰۲/۳            | ۳۶۹۹۹۳/۶          | ۱۷۶۱۱۶/۳           |
| ۹    | RT31                    | د   | ج           | ۵۸۵۱۲۴/۲          | ۵۵۶۸/۱            | ۳۷۰۹۶۹/۷          | ۱۷۸۰۴۴/۴           |



(ب)



(الف)

شکل ۸- الف: کاهش بار گرمایشی (ب) تاثیر پاسخ‌های بهینه بر روی بار سرمایشی در تهران

Figure8. a) Heating b) Cooling load changes of Tehran optimal solutions

## ۳-۲- یزد

در جدول ۷ ارائه شده است. با عنایت به نتایج، ماده تغییر فازدهنده RT31 با دمای تغییر فاز بالا پیشنهاد مناسبی برای شرایط آب و هوایی یزد شده نمی‌باشد.

بخشی زیادی از اقلیم آب و هوای ایران دارای آب و هوای گرم و خشک کویری می‌باشد، شهر یزد با شرایط آب و هوایی یاد شده در این تحقیق مدنظر قرار گرفته، نتایج بهینه‌سازی در این شهر منجر به استخراج نه راه‌حل بهینه گردید که مشخصات این نقاط

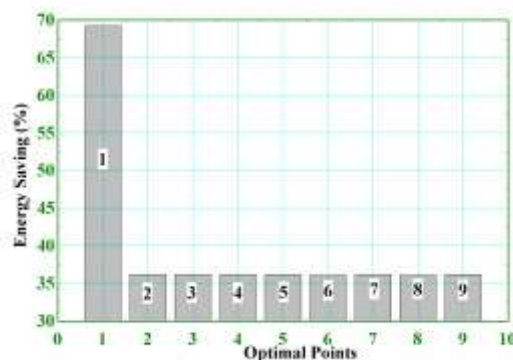
جدول ۷- حالات بهینه یزد

Table7. Yazd optimal solutions

| ردیف | نوع ماده تغییر فازدهنده | سقف | دیوار خارجی | بار سرمایشی (kWh) | بار گرمایشی (kWh) | انرژی مصرفی (kWh) | تولید کربن دی‌اکسید (kg) |
|------|-------------------------|-----|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|
| ۱    | RT26                    | الف | ج           | ۲۱۱۶۶۸/۴          | ۱۳۲۸۰/۹           | ۱۷۳۴۲۹/۸          | ۵۸۴۹۴/۴                  |
| ۲    | RT-28HC                 | ب   | ب           | ۵۶۳۴۰۲/۱          | ۶۲۸۴/۵            | ۳۵۹۶۴۶/۵          | ۱۷۵۱۲۳/۳                 |
| ۳    | RT-25HC                 | د   | ب           | ۵۶۴۴۵۵/۹          | ۶۲۸۰/۵            | ۳۵۹۳۹۵/۸          | ۱۷۵۴۷۷/۱                 |
| ۴    | RT-25HC                 | ج   | د           | ۵۶۷۰۵۲/۹          | ۴۵۸۴/۸            | ۳۵۹۴۷۱/۵          | ۱۷۶۰۰۳/۳                 |
| ۵    | RT-28HC                 | ج   | ج           | ۵۶۷۱۱۵/۵          | ۴۴۹۴/۱            | ۳۵۹۳۸۷/۴          | ۱۷۶۰۰۲/۱                 |
| ۶    | RT24                    | د   | ج           | ۵۶۸۲۰۹/۲          | ۴۴۸۵/۶            | ۳۶۰۲۲۶/۶          | ۱۷۶۳۶۸/۲                 |
| ۷    | RT-28HC                 | ب   | د           | ۵۶۷۰۷۶/۶          | ۴۵۷۹/۳            | ۳۵۹۴۷۷/۷          | ۱۷۶۰۱۰                   |
| ۸    | RT-28HC                 | ب   | ج           | ۵۶۷۱۴۲/۶          | ۴۴۸۸/۹            | ۳۵۹۹۸۳/۸          | ۱۷۶۰۱۰                   |
| ۹    | RT-28HC                 | ج   | ب           | ۵۶۳۳۷۸/۶          | ۶۲۹۰/۷            | ۳۵۹۶۴۱/۳          | ۱۷۵۱۱۶/۹                 |

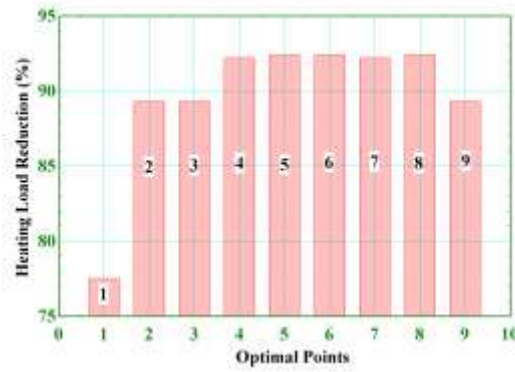
ب) در مقایسه با سایر راه‌حل‌های مستخرج این شرایط تاثیرگذاری کمتری داشته است. با رجوع به شکل ۱۰-الف، مشاهده می‌شود که همه‌ی گزینه‌های موجود تاثیر مثبتی در کاهش بار گرمایشی ساختمان، دارند و در ۸ حالت بیش از ۸۵٪ و در ۵ حالت بیش از ۹۰٪ کاهش بار گرمایشی ایجاد شده، از طرفی با توجه به اقلیم گرم و خشک کویری در شهر یزد، کاهش بار سرمایشی بیشتر مورد توجه است. در میان همه نقاط بهینه تنها یک گزینه باعث کاهش بار سرمایشی و در نتیجه کاهش ۶۹٪/۲ مصرف انرژی شده است (پاسخ شماره ۱). لذا این پاسخ، راه‌حل مناسب‌تری برای این شهر می‌باشد.

در خصوص دیوار خارجی ساختمان، عدم استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در آن و جایگذاری این مواد در بین لایه‌های ملات سیمانی و عایق حرارتی در بین هیچ یک از راه‌حل‌های مستخرج برای این شهر مشاهده نمی‌شود، لذا همانند تهران می‌توان این گونه استنباط کرد که این دو طرح، مناسب شرایط آب و هوایی گرم و خشک کویری در ساختمان با شرایط معرفی شده در این تحقیق نمی‌باشند. در شکل ۹ بیشترین میزان صرفه‌جویی انرژی (پاسخ شماره ۱) ۶۹٪/۲ بوده است. در این حالت از ماده تغییر فازدهنده در بام سبز استفاده نشده است. استفاده از شرایط یاد شده منجر به بیشترین تاثیرگذاری مثبت در کاهش بار سرمایشی (شکل ۱۰-الف) شده است، اما از منظر بار گرمایشی (شکل ۱۰-

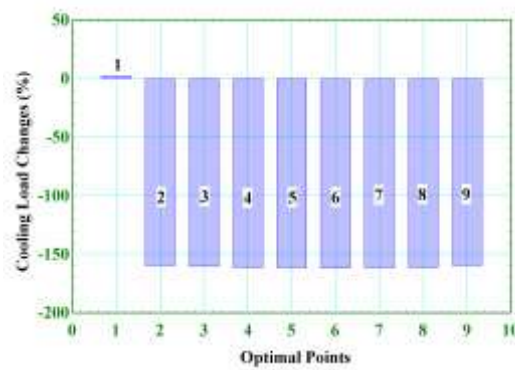


شکل ۹- میزان صرفه‌جویی مصرف انرژی در حالات بهینه یزد

Figure9. Energy saving of Yazd optimal solutions



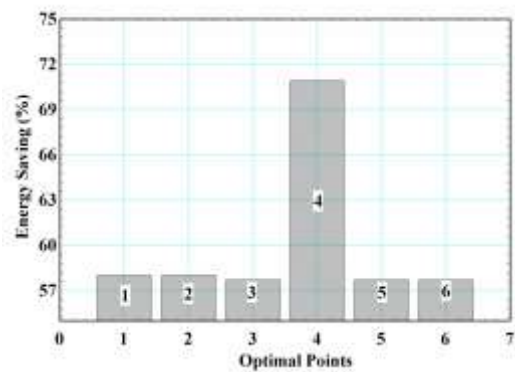
(الف)



(ب)

شکل ۱۰-الف: کاهش بار گرمایشی (ب) تاثیر پاسخ‌های بهینه بر روی بار سرمایشی در یزد

Figure10. a) Heating b) Cooling load changes of Yazd optimal solutions



شکل ۱۱- میزان صرفه جویی مصرف انرژی در پاسخ‌های بهینه آمل

Figure11. Energy saving of Amol optimal solutions

۳-۳- آمل

تعریف شده در این تحقیق، منجر به استخراج شش پاسخ حالت بهینه شده است، پاسخ‌های مستخرج در جدول ۸ نشان داده شده‌اند، با استناد به نقاط یاد شده می‌توان گفت اجرای ماده

به عنوان سومین تنوع آب و هوایی، شهر آمل واقع در استان مازندران با شرایط آب و هوایی معتدل و مرطوب، در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت، بهینه‌سازی ساختمان منتخب با شرایط

وضعیت از ماده تغییر فازدهنده RT-25HC در دیوار خارجی ساختمان استفاده شده است، در مقایسه با سایر حالات پیشنهادی این حالت تاثیر کمتری در کاهش بار گرمایشی داشته، اما بر روی بار سرمایشی تاثیر منفی کمتری دارد.

تغییر فازدهنده در لایه‌های درونی نزدیک به محیط داخلی ساختمان مناسب‌تر است و مواد تغییر فازدهنده RT-24 و RT-28HC برای این شهر پیشنهاد نمی‌شوند. بیشترین میزان صرفه‌جویی انرژی در شرایط عدم استفاده از ماده تغییر فازدهنده در بام سبز و به میزان ۷۰/۹٪ می‌باشد (شکل ۱۱) که در این

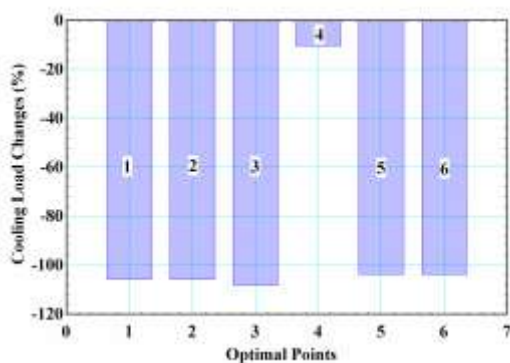
### جدول ۸- حالات بهینه محاسبه شده برای آمل

Table 8. Amol optimal solutions

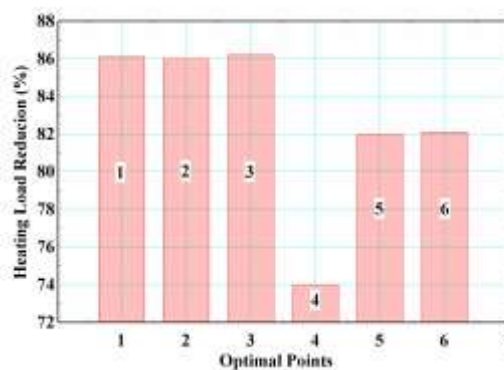
| تولید کربن<br>دی‌اکسید (kg) | انرژی مصرفی<br>(kWh) | بار گرمایشی<br>(kWh) | بار سرمایشی<br>(kWh) | دیوار<br>خارجی | سقف | نوع ماده تغییر<br>فازدهنده | ردیف |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|-----|----------------------------|------|
| ۱۰۰۰۲۷/۳                    | ۲۲۲۳۲۰/۴             | ۹۶۵۸/۵               | ۳۰۷۶۳۶/۱             | ج              | ب   | RT31                       | ۱    |
| ۱۰۰۰۳۰/۹                    | ۲۲۲۳۶۳/۵             | ۹۷۰۸/۳               | ۳۰۷۶۱۶/۷             | ج              | ج   | RT31                       | ۲    |
| ۱۰۱۱۷۸/۶                    | ۲۲۴۱۱۸               | ۹۵۵۵/۲               | ۳۱۱۱۳۸/۲             | ج              | د   | RT31                       | ۳    |
| ۵۴۰۸۶                       | ۱۵۴۰۵۹/۴             | ۱۸۰۰۶/۳              | ۱۶۵۰۸۵/۴             | ج              | الف | RT-25HC                    | ۴    |
| ۹۹۵۸۱/۹                     | ۲۲۴۰۹۲/۲             | ۱۲۴۴۴/۶              | ۳۰۴۴۵۶/۸             | ب              | ج   | RT26                       | ۵    |
| ۹۹۵۷۱/۵                     | ۲۲۴۰۲۸/۵             | ۱۲۳۸۴/۵              | ۳۰۴۴۶۳/۳             | ب              | ب   | RT31                       | ۶    |

که بالای ۸۵٪ کاهش بار گرمایشی را ایجاد می‌کنند. البته این گزینه‌ها بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان را بیش از دوبرابر افزایش داده‌اند. (شکل ۱۲-ب). با توجه به شکل ۱۲-ب در بین پاسخ‌های حالات بهینه، کلیه‌ی پاسخ‌های رفتار مشابهی در کاهش بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان داشته‌اند و همگی موجب افزایش بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان شده‌اند.

ضمن بررسی شکل ۱۲-الف و ب مشخص شده که کلیه‌ی پاسخ‌های بهینه تاثیر مثبتی بر کاهش بار حرارتی داشته و این پاسخ‌ها عامل افزایش بار برودتی بوده‌اند، لذا در صورتی که تاثیر منفی در بار برودتی در بین حالات بهینه کاهش یابد، راه‌حل بهینه یاد شده می‌تواند عامل کاهش بیشتر مصرف انرژی باشد (شکل ۱۱). اگر فقط از منظر کاهش بار گرمایشی ساختمان به پاسخ‌های بهینه توجه شود، سه گزینه مناسب وجود خواهد داشته



(ب)



(الف)

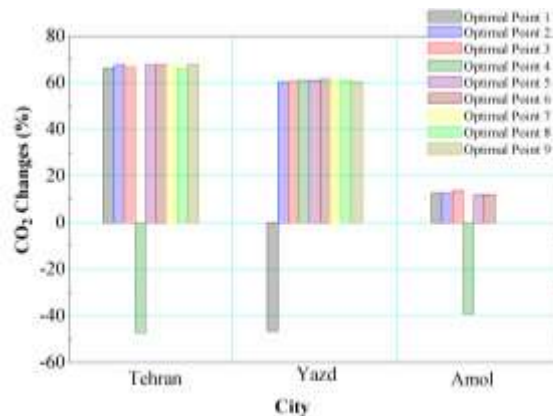
شکل ۱۲-الف: کاهش بار گرمایشی ب) تاثیر پاسخ‌های بهینه بر روی بار سرمایشی در آمل

Figure 12. a) Heating b) Cooling load changes of Amol optimal solutions

## ۳-۴- اثرات زیست محیطی

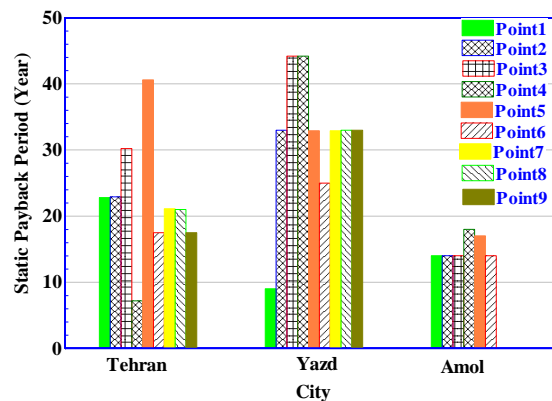
در میان حالات بهینه معرفی شده تنها ۳ پاسخ موجبات کاهش تولید این گاز را فراهم کرده‌اند، این پاسخ‌ها بیشترین میزان صرفه‌جویی انرژی را به همراه داشته‌اند، لذا این گونه استنباط می‌شود که میزان اثرگذاری بر تولید گاز کربن دی‌اکسید و کاهش مصرف انرژی در شرایط تعریف شده در این مقاله نسبت مستقیمی دارند.

به منظور ارزیابی اثرات محیط زیستی، تولید کربن دی‌اکسید به عنوان شاخص بررسی این اثرات انتخاب شد، نتایج در جداول ۶، ۷ و ۸ ارائه شده است. با مقایسه حالات بهینه در شهرهای آمل، تهران و یزد، کم‌ترین میزان کربن دی‌اکسید تولیدی سالانه در شرایط آب و هوایی مستقر در آمل تجربه شد. از طرفی مشاهده می‌شود که اکثریت نقاط بهینه اثر منفی در میزان کربن دی‌اکسید تولیدی داشته و عامل افزایش این گاز بوده‌اند. (شکل ۱۳)



شکل ۱۳- میزان اثرگذاری هریک از راه‌حل‌های بهینه بر تولید گاز کربن دی‌اکسید

Figure13. Impact of optimal solutions on annual CO<sub>2</sub> production



شکل ۱۴- بازگشت سرمایه استاتیک حالات بهینه مستخرج

Figure14. Static pay pack of optimal solutions

## ۳-۵- آنالیز اقتصادی

سرمایه‌گذاری تقسیم بر درآمد سال اول ناشی از صرفه‌جویی انرژی ذخیره شده، جابجا و یا تولید شده محاسبه می‌شود. در تحلیل بازگشت سرمایه، واحد اندازه‌گیری تعداد سال‌هایی است که به "بازپرداخت" هزینه سرمایه‌گذاری اختصاص می‌یابد. پروژه‌ها با دوره‌های بازپرداخت کوتاه‌مدت، خطرات کمتری دارند.

به منظور بررسی و ارزیابی اقتصادی حالات بهینه مستخرج در شبیه‌سازی‌ها و ارزیابی‌های صورت گرفته از روش تحلیل بازگشت سرمایه استفاده شده است، دوره بازگشت سرمایه، حداقل زمانی است که برای بازیابی هزینه‌های سرمایه‌گذاری لازم است. دوره بازگشت سرمایه برای یک سیستم انرژی به صورت کل هزینه



پس از انجام محاسبات مربوط به ارزیابی اقتصادی حالات بهینه نتایج مربوط به این ارزیابی در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. با عنایت به این نکته که معمولاً پنل‌های فتوولتاییک طول عمری بین ۲۵ تا ۳۰ دارند و مواد تغییر فزاینده نیز تقریباً ۱۰۰۰۰ سیکل را می‌توانند طی کنند، (۶۰) لذا از منظر اقتصادی بسیاری از گزینه‌های بهینه مطرح نمی‌باشند، با وجود این برای تهران حالت بهینه شماره ۴ پس از تقریباً ۷ سال بازگشت سرمایه داشته و در یزد نیز حالت شماره ۱ پس از ۹ سال بازگشت سرمایه داشته است.

روش بازگشت سرمایه اغلب به عنوان یک راهنمای تقریبی برای ارزیابی مقرون‌به‌صرفه بودن یک سرمایه‌گذاری استفاده می‌شود. اگر دوره بازگشت سرمایه به میزان قابل‌توجهی کم‌تر از عمر سیستم مورد انتظار باشد، پروژه به احتمال زیاد مقرون‌به‌صرفه است. در ارزیابی اقتصادی مورد استفاده در این مقاله با استناد به مبالغ مورد اشاره در جدول ۹ که از مقالات معتبر استخراج شده است و با تکیه بر معادله ۱ (۶۱) که بازگشت سرمایه استاتیک را نشان می‌دهد، نتایج حاصل شده‌اند.

$$SPP = \frac{C_{investment}}{S} \quad (1)$$

### جدول ۹- مبالغ مورد استفاده و منابع مستخرج

Table 9. Using prices and its references

| ردیف | ماده فزاینده | قیمت  | واحد              | منبع | توضیحات فناوری   | تعداد | واحد              | قیمت  | ردیف    |
|------|--------------|-------|-------------------|------|--|-------|-------------------|-------|---------|
| ۱    | RT22HC       | ۸۷۵۹  | \$/m <sup>3</sup> | (۶۰) | هزینه اجرای بام سبز  | ۱     | \$/m <sup>2</sup> | ۹     | (۶۲)    |
| ۲    | RT24         | ۵۵۹۷  | \$/m <sup>3</sup> | (۶۰) | هزینه سرمایه‌گذاری و اجرای نمای دو پوسته با پنجره‌ی فتوولتاییک | ۲     | \$/m <sup>2</sup> | ۲۰۰   | (۶۳-۶۵) |
| ۳    | RT25HC       | ۱۰۸۶۸ | \$/m <sup>3</sup> | (۶۰) | متوسط جهانی تعرفه قیمت برق                                     | ۳     | \$/KWh            | ۰/۰۵۸ | (۶۳)    |
| ۴    | RT26         | ۵۰۵۸  | \$/m <sup>3</sup> | (۶۰) |  |       |                   |       |         |
| ۵    | RT28HC       | ۷۷۸۴  | \$/m <sup>3</sup> | (۶۰) |  |       |                   |       |         |
| ۶    | RT31         | ۳۹۹۰  | \$/m <sup>3</sup> | (۶۰) |  |       |                   |       |         |

### بحث و نتیجه‌گیری

یاد شده ۴- تصمیم‌گیری در خصوص استفاده یا عدم استفاده از ماده تغییر فزاینده در دیوار و سقف ساختمان با شرایط پیش‌بینی شده در تحقیق ۵-آنالیز اقتصادی و بررسی اثرات محیط زیستی حالات بهینه در ساختمان با شرایط یاد شده. به منظور انجام شبیه‌سازی و بهینه‌سازی از نرم‌افزار دیزاین بیلدر استفاده شده است، هدف بهینه‌سازی کاهش توان بار سرمایشی و گرمایشی و متغیرهای مورد بررسی شامل: نوع و محل استقرار ماده تغییر فزاینده در دیوار و بام سبز، استفاده یا عدم استفاده از این مواد و استفاده یا عدم استفاده‌ی توان از عایق حرارتی و مواد تغییر فزاینده در دیوار، می‌باشد. نتایج از منظر ارزیابی عملکرد حرارتی و مصرف انرژی، محیط زیستی و

در این مقاله برای نخستین مرتبه بهینه‌سازی دو هدفه در ساختمان مسکونی مجهز به نمای دو پوسته و فتوولتاییک، دیوارهای خارجی مجهز به ماده تغییر فزاینده و بام سبز انجام شده است. برخی از نوآوری‌های این تحقیق عبارتند از: ۱- بهینه‌سازی ساختمانی مسکونی با ترکیب استفاده از دیوار ارتقایافته با ماده تغییر فزاینده، بام سبز، فتوولتاییک و پنجره و نمای دو پوسته، با هدف کاهش بار سرمایشی و گرمایشی ۲- انتخاب حالت بهینه محل استقرار ماده تغییر فزاینده در دیوار و سقف ساختمان مجهز به دیوار ارتقایافته با این مواد، بام سبز، فتوولتاییک و نمای دو پوسته ۳- انتخاب ماده تغییر فزاینده مناسب مستند بر نتایج بهینه در ساختمان مجهز به فناوری‌های

- بر اساس نتایج بهینه‌سازی و از منظر عملکرد حرارتی و برودتی و محیط زیستی، در شرایط آب و هوایی معتدل و مرطوب (شهر آمل)، مناسب‌ترین پاسخ بهینه، استفاده از ماده تغییر فازدهنده‌ی RT25-HC، در بین لایه‌های آهک و آجر در دیوار ساختمان بوده، در حالی که از منظر اقتصادی هیچ گزینه‌ای نسبت به سایرین ارجحیت ندارد.
  - بیشترین میزان صرفه‌جویی انرژی در بین شهرهای منتخب مربوط به آب و هوای معتدل و مرطوب و برابر با ۷۰/۹٪ می‌باشد.
  - محل استقرار مواد تغییر فاز دهنده در دیوار یا سقف و شرایط آب و هوایی در انتخاب نوع این مواد، بسیار اثرگذار است.
  - در بین حالات بهینه، میزان اثرگذاری بر کاهش بار سرمایشی، تاثیر بیشتری در صرفه‌جویی انرژی ساختمان دارد.
  - بر اساس نتایج بهینه‌سازی، متغیرهای تعریف شده عموماً اثر منفی در کاهش بار سرمایشی و اثر مثبت در کاهش بار گرمایشی و مصرف انرژی داشته‌اند.
  - کاهش مصرف انرژی و کاهش دی اکسید کربن تولیدی، ارتباطی مستقیم دارند.
- اقتصادی بررسی شده‌اند، از نقطه نظر انرژی، میزان اثرگذاری در کاهش بار سرمایشی و گرمایشی و صرفه‌جویی مصرف انرژی در یک دوره یک ساله، در خصوص اثرات محیط زیستی اثرگذاری بر میزان تولید کربن دی اکسید سالانه، مدنظر قرار گرفته‌اند و آنالیز اقتصادی بر اساس تحلیل بازگشت سرمایه استاتیک انجام شده است. کلیه‌ی مراحل شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و آنالیزهای اقتصادی در سه شهر تهران، یزد و آمل تکرار و برای شهرهای مورد بررسی به ترتیب نه، نه و شش نقطه بهینه استخراج شده است. بر اساس نتایج تحقیقات به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت:
- بر اساس نتایج بهینه‌سازی و ارزیابی اقتصادی و محیط زیستی، در شرایط آب و هوایی گرم و خشک استی در عرض جغرافیایی میانی (شهر تهران)، مناسب‌ترین پاسخ بهینه استفاده از ماده تغییر فازدهنده‌ی RT31، در بین لایه‌های آهک و آجر در دیوار خارجی ساختمان است.
  - بر اساس نتایج بهینه‌سازی و ارزیابی اقتصادی و محیط زیستی، در شرایط آب و هوایی گرم و خشک کویری (شهر یزد)، مناسب‌ترین پاسخ حالت بهینه استفاده از ماده تغییر فازدهنده‌ی RT26، در بین لایه‌های آهک و آجر در دیوار خارجی ساختمان، است.

### فهرست علائم و اختصارات

|  |                  |
|--|------------------|
| هزینه سرمایه‌گذاری اضافی مرتبط با وآوری‌های پیشنهادی     | $C_{investment}$ |
| ماده تغییر فاز دهنده                                     | PCM              |
| درآمد حاصل از صرفه‌جویی در مصرف انرژی و تولید الکتریسیته | $S$              |
| ضریب انتقال نور خورشید                                   | SHGC             |
| بازگشت سرمایه استاتیک                                    | SPP              |
| $C^{\circ}$ دما،   | T                |
| ساعت در طول یک شبانه روز،                                | Time             |
| $W/m^2-K$ ضریب انتقال حرارت،                             | U                |

- surplus thermal energy storage. *Applied Energy*. 2015.
9. Guohui Feng KH, Hailun Xie, Huixing Li, Xin Liu, Shibo Liu, Chihong Cao. DSC test error of phase change material (PCM) and its influence on the simulation of the PCM floor. *Renewable Energy*. 2015:1-6.
  10. Xiangfei Kong PJ, Chengqiang Yao, Yun Liu. Experimental study on thermal performance of phase change material passive and active combined using for building application in winter. *Applied Energy*. 2017;206:293-302.
  11. Heqing Tian LD, Xiaolan Wei, Suyan Deng, Weilong Wang, Jing Ding. Enhanced thermal conductivity of ternary carbonate salt phase change material with Mg particles for solar thermal energy storage. *Applied Energy*. 2017;204:525-30.
  12. Zongtao Li YW, Baoshan Zhuang, Xuezhi Zhao, Yong Tang, Xinrui Ding, Chen K. Preparation of novel copper-powder-sintered frame/paraffin form-stable phase change materials with extremely high thermal conductivity. *Applied Energy*. 2017.
  13. Haiyue Yang YW, Qianqian Yu, Guoliang Cao, Rue Yang, Jiaona Ke, Xin Di, Feng Liu, Wenbo Zhang, Chengyu Wang. Composite phase change materials with good reversible thermochromic ability in delignified wood substrate for thermal energy storage. *Applied Energy*. 2018;212:455-64.
  14. Guanghui Leng GQ, Zhu Jiang, Guizhi Xu, Yue Qin, Chun Chang, Yulong Ding. Micro encapsulated & form-stable phase change materials for high

## References

1. Frédéric Kuznik JV. Experimental assessment of a phase change material for wall building use. *Applied Energy*. 2009;86:2038-46.
2. Yilin Li JD, Georgios Kokogiannakis. Heat transfer analysis of an integrated double skin façade and phase change material blind system. *Building and Environment*. 2017.
3. Alvaro de Gracia LN, Albert Castell, Álvaro Ruiz-Pardob, Servando Álvarez, Cabeza LF. Experimental study of a ventilated facade with PCM during winter period. *energy and buildings*. 2013;58:324-32.
4. Alvaro de Graciaa LN, Albert Castell, Álvaro Ruiz-Pardob, Servando Álvarez LFC. Thermal analysis of a ventilated facade with PCM for cooling applications. *energy and buildings*. 2013;65:508-15.
5. Alvaro de Gracia LN, Albert Castell, Dieter Boer, Luisa F. Cabeza. Life cycle assessment of a ventilated facade with PCM in its air chamber. *Solar Energy*. 2014;104:115-23.
6. Liene Kancane RV, Andra Blumberga. Modeling of building envelope's thermal properties by applying phase change materials. *energy Procedia*. 2016;95:175-80.
7. Kun Du JC, Zhonghua Wang, Yupeng Wu, Hao Liu. A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. *Applied Energy*. 2018;220:242-73.
8. Saman Nimali Gunasekara RP, Justin Ningwei Chiu, Viktoria Martin. Polyols as phase change materials for

21. sayanthan Ramakrishnan XW, Jay Sanjayan, John Wilson. Thermal performance of buildings integrated with phase change materials to reduce heat stress risks during extreme heatwave events. *Applied Energy*. 2017.
22. Antonella D'Alessandro ALP, Claudia Fabiani, Filippo Ubertini, Luisa F. Cabeza, Franco Cotana. Multifunctional smart concretes with novel phase change materials: Mechanical and thermo-energy investigation. *Applied Energy*. 2018;212:1448-61.
23. Amine Laaouatni NM, Rachid Bennacer, Mohamed El Omari, Mohammed El Ganaoui. Phase change materials for improving the building thermal inertia. *Energy Procedia*. 2017;139:744-9.
24. Sayanthan Ramakrishnan XW, Jay Sanjayan, John Wilson. Thermal performance assessment of phase change material integrated cementitious composites in buildings: Experimental and numerical approach. *Applied Energy*. 2017.
25. Hagar Elarga FG, Angelo Zarrella, Andrea Dal Monte, Ernesto Benini. Thermal and electrical performance of an integrated PV-PCM system in double skin façades: A numerical study. *Solar Energy*. 2016;136:112-24.
26. Mohamad Ahangari MM. An innovative PCM system for thermal comfort improvement and energy demand reduction in building under different climate conditions. *sustainable Cities and Society*. 2018.
27. Mingfang Tang XZ. Experimental study of the thermal performance of an extensive green roof on sunny summer temperature thermal energy storage. *Applied Energy*. 2018;217:212-20.
15. Anna Laura Pisello VLC, Franco Cotana. Dynamic thermal-energy performance analysis of a prototype building with integrated phase change materials. *Energy Procedia*. 2015;81:82-8.
16. Stfephane Guichard FM, Dimitri Bigot, Bruno Malet-Damour, Karim Beddiar, Harry Boyer .A complex roof incorporating phase change material for improving thermal comfort in a dedicated test cell. *Renewable Energy*. 2017;101:450-61.
17. Pere Llorach-Massana JP, Joan Rieradevall, J. Ignacio Montero. Analysis of the technical, environmental and economic potential of phase change materials (PCM) for root zone heating in Mediterranean greenhouses. *Renewable Energy*. 2017;103:570-81.
18. Kecheng Zhong SL, Gaofeng Sun, Shanshan Li, Xiaosong Zhang. Simulation study on dynamic heat transfer performance of PCM-filled glass window with different thermophysical parameters of phase change material. *energy and buildings*. 2015;106:87-95.
19. Shuhong Li GS, Kaikai Zou, Xiaosong Zhang. Experimental research on the dynamic thermal performance of anovel triple-pane building window filled with PCM. *Sustainable Cities and Society*. 2016;27:15-22.
20. Changyu Liu YW, Yongjian Zhu, Dong Li, Lingyong Ma. Experimental investigation of optical and thermal performance of aPCM-glazed unit for building applications. *energy and buildings*. 2018;158:794-800.

- with photovoltaic blinds. *Applied Energy*. 2017;199:281-93.
34. Chao Chen HL, Zhiqiang (John) Zhai, Yin Li, Fengguang Yang, Fengtao Han, Shen Wei. Thermal performance of an active-passive ventilation wall with phase change material in solar greenhouses. *Applied Energy*. 2018;216:602-12.
  35. Siliang Yang AC, Aldo Di Carlo, Deo Prasad, Alistair Sproul, Francesco Fiorito. Performance assessment of BIPV/T double-skin façade for various climate zones in Australia: Effects on energy consumption. *Solar Energy*. 2020;199:377-99.
  36. Muhammad Shafique XL, Jian Zuo. Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations, and trends. *Solar Energy*. 2020;202:485-97.
  37. Piero Bevilacqua RB, Natale Arcuri. Green roofs in a Mediterranean climate: Energy performances based on in-situ experimental data. *Renewable Energy*. 2020;152:1414-30.
  38. J. Xamán AR-A, I. Zavala-Guillén, I. Hernández-Pérez, J. Arce, D., Saucedo. Thermal performance analysis of a roof with a PCM-layer under Mexican weather conditions. *Renewable Energy*. 2020;149:773-85.
  39. Ji Hun Park UB, Seong Jin Chang, Seunghwan Wi, Yujin Kang, Sumin Kim. Energy retrofit of PCM-applied apartment buildings considering building orientation and height. *Energy*. 2021;222:119877.
  40. Liu Y, Ming H, Luo X, Hu L, Sun Y. Timetabling optimization of classrooms and self-study rooms in university teaching buildings based on the building controls virtual test bed days. *Applied Energy*. 2019;242:1010-21.
  28. Wan Iman Wan Mohd Nazi YW, Haisheng Chen, Xinjing Zhang, Anthony Paul Roskilly. Passive Cooling Using Phase Change Material and Insulation for High rise Office Building Tropical Climate. *Energy Procedia*. 2017;142:2295-302.
  29. Stefano Cascone FC, Antonio Gagliano, Gaetano Sciuto. A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. *Building and Environment*. 2018;136:227-39.
  30. Caterina Gargari CB, Fabio Fantozzi, Carlo Alberto Campiotti. Simulation of the thermal behaviour of a building retrofitted with a green roof: optimization of energy efficiency with reference to italian climatic zones. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2016;8:628-36.
  31. Qingwei Xing XH, Yaolin Lin , Hang Tan , Ke Yang. Experimental Investigation on the Thermal Performance of a Vertical Greening System with Green Roof in Wet and Cold Climates during Winter. *energy and buildings*. 2019;183:105-17.
  32. Jutta Schade SL, Joel Lönnqvist. The thermal performance of a green roof on a highly insulated building in a sub-arctic climate. *Energy and buildings*. 2021;241:110961.
  33. Yongqiang Luo LZ, Xiliang Wang, Lei Xie, Zhongbing Liu, Jing Wu, Yelin Zhang, Xihua He. A comparative study on thermal performance evaluation of a new double skin façade system integrated

- and integration of building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system in northern housing. *Building Simulation*. 2021;14(5):1467-86.
48. Lin Y, Yang W. An ANN-exhaustive-listing method for optimization of multiple building shapes and envelope properties with maximum thermal performance. *Frontiers in Energy*. 2021;15(2):550-6.
49. Tian S, Su X, Shao X, Wang L. Optimization and evaluation of a solar energy, heat pump and desiccant wheel hybrid system in a nearly zero energy building. *Building Simulation*. 2020;13(6):1291-303.
50. Zhao J, Du Y. Multi-objective optimization design for windows and shading configuration considering energy consumption and thermal comfort: A case study for office building in different climatic regions of China. *Solar Energy*. 2020;206:997-1017.
51. Ameer M, Kharbouch Y, Mimet A. Optimization of passive design features for a naturally ventilated residential building according to the bioclimatic architecture concept and considering the northern Morocco climate. *Building Simulation*. 2020;13(3):677-89.
52. Zhang T, Wang D, Liu H, Liu Y, Wu H. Numerical investigation on building envelope optimization for low-energy buildings in low latitudes of China. *Building Simulation*. 2020;13(2):257-69.
53. Mahdavi Adeli M, Farahat S, Sarhaddi F. Increasing thermal comfort of a net-zero energy building inhabitant by optimization of energy consumption. *International Journal of Environmental platform considering energy efficiency. Building Simulation*. 2023;16(2):263-77.
41. Krarti M, Aldubyan M. Peak demand-based optimization approach for building retrofits: case study of Saudi residential buildings. *Energy Efficiency*. 2022;15(8):69.
42. Kümpel A, Stoffel P, Müller D. Development of a Long-Term Operational Optimization Model for a Building Energy System Supplied by a Geothermal Field. *Journal of Thermal Science*. 2022;31(5):1293-301.
43. Xue Q, Wang Z, Chen Q. Multi-objective optimization of building design for life cycle cost and CO2 emissions: A case study of a low-energy residential building in a severe cold climate. *Building Simulation*. 2022;15(1):83-98.
44. Ronghui S, Liangrong N. An intelligent fuzzy-based hybrid metaheuristic algorithm for analysis the strength, energy and cost optimization of building material in construction management. *Engineering with Computers*. 2022;38(4):2663-80.
45. Abbasizade F, Abbaspour M. Developing an optimization-based simulation approach for building energy performance evaluation (case study: Iran). *International Journal of Energy and Water Resources*. 2021;5(3):277-86.
46. Li X, Rodriguez D. Optimization of a building energy performance by a multi-objective optimization, using sustainable energy combinations. *Evolving Systems*. 2021;12(4):949-63.
47. Ma L, Ge H, Wang L, Wang L. Optimization of passive solar design

- building façade applications using multi-criteria decision-making tools combined with energy simulations. *Energy*. 2021;215:119102.
61. Mi X, Liu R, Cui H, Memon SA, Xing F, Lo Y. Energy and economic analysis of building integrated with PCM in different cities of China. *Applied Energy*. 2016;175:324-36.
  62. Movahed Y, Bakhtiari A, Eslami S, Noorollahi Y. Investigation of single-storey residential green roof contribution to buildings energy demand reduction in different climate zones of Iran. *International Journal of Green Energy*. 2021;18(1):100-10.
  63. Heydari AH, Haghghi Khoshkhoo R. Techno-economical analysis of DSF, BIPV and PCM in administrative buildings in four climates of Iran. *International Journal of Ambient Energy*. 2022;43(1):8474-85.
  64. Gholami H, Nils Røstvik H, Manoj Kumar N, Chopra SS. Lifecycle cost analysis (LCCA) of tailor-made building integrated photovoltaics (BIPV) façade: Solsmaragden case study in Norway. *Solar Energy*. 2020;211:488-502.
  65. Passera A, Lollini R, Avesani S, Lovati M, Maturi L, Moser D. BIPV Facades: Market potential of retrofit application in the european building stock 2018. *Science and Technology*. 2020;17(5):2819-34.
  54. Ciardiello A, Rosso F, Dell'Olmo J, Ciancio V, Ferrero M, Salata F. Multi-objective approach to the optimization of shape and envelope in building energy design. *Applied Energy*. 2020;280:115984.
  55. Zhang J, Liu N, Wang S. A parametric approach for performance optimization of residential building design in Beijing. *Building Simulation*. 2020;13(2):223-35.
  56. Izadpanah S, Fazelpour F, Eftekhari Yazdi M. Comparative study of simultaneous use of a double or a triple skin facade with phase change materials, green roof, and photovoltaics in residential buildings of Iran. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2023;42(1):e13935.
  57. Ivan Andric AK, Sami G. Al-Ghamdi Efficiency of green roofs and green walls as climate change mitigation measures in extremely hot and dry climate: Case study of Qatar. *Energy Reports*. 2020;6:2476-89.
  58. Morshed Alam HJ, Jay Sanjayan, John Wilson. Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities. *Energy and Buildings*. 2014;78:192-201.
  59. Niloufar Ziasistani FF. Comparative study of DSF, PV-DSF and PV-DSF/PCM building energy performance considering multiple parameters. *Solar Energy*. 2019;187:115-28.
  60. Mukhamet T, Kobeyev S, Nadeem A, Memon SA. Ranking PCMs for