Journal of Sustainable Energy Systems

Online ISSN: 2980-8693

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

The University of Tehran Press

Evaluation of Thermal Comfort of a Building Equipped with Upgraded Green Roof with Phase Change Materials

Mohammad Hossein Jahangir[1*] | Armita Fathi[2]

1. Corresponding Author, Associate Professor, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mh.jahangir@ut.ac.ir
2. M.Sc. Student, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: armita.fathi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 31 January 2023
Revised 31 March 2023
Accepted 01 May 2023
Published Online 18 May 2024

Keywords:
Green Roof,
Phase Change Materials,
Renewable Energy,
Sustainable Architecture,
Sustainable Development.

ABSTRACT

One of the most important goals of sustainable development is to preserve nature and improve it, and the manifestation of sustainable development in the built environment basin is called sustainable architecture. Green roof is one of the new approaches to architecture and urban planning and arises from the concepts of sustainable development, which can be used to increase the per capita green space, improve the quality of the environment. Today, due to the increasing need for energy and the limitation of fossil fuels as depleting and polluting sources of the environment, the need to use more renewable energy sources is felt. One of the increasing uses of energy is thermal energy. One of the methods of thermal energy storage is the use of phase change materials. This research has been prepared with the aim of thermal optimization of green roof using phase change materials. By selecting biodegradable materials as phase change materials used in the roof, the research was conducted in three models and three different uses, using Energy Plus software. According to the results, the green roof model optimized with phase change materials in all three different uses of the building has increased the temperature in the building in cold seasons and significantly increased the temperature in hot seasons, and achieved thermal comfort. Therefore, according to the results, using green roof separately causes more temperature balance.

Cite this article: Jahangir, M. H. & Fathi, A. (2023). Evaluation of Thermal Comfort of a Building Equipped with Upgraded Green Roof with Phase Change Materials. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 2 (4), 313-328. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.374038.1060

© Mohammad Hossein Jahangir, Armita Fathi. **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.374038.1060

Introduction

Today, the environment, saving fossil fuels and sustainable development have become very important and common topics at the international level. According to the International Energy Agency, over the past 20 years, primary energy production has increased by 49 % and carbon dioxide emissions by 43 %. In 1980, the name sustainable development first appeared in a report by the World Conservation Organization. Green roof is one of the new approaches to architecture and urban planning and arises from the concepts of sustainable development, which can be used to increase the per capita green space, improve the quality of the environment, and sustainable urban development. One of the most important ways to use solar energy is to store energy during hot hours and use it in cold times. One of the new methods of storing solar energy is the use of high-capacity thermal masses in energy storage. Thermal masses are materials that can absorb, store and release energy when needed. Phasing materials are a new generation of this type of thermal masses that, when receiving energy, store it as latent energy by changing its phase, and at the desired time, returning to the initial phase, provide the

stored energy to their environment. Ability to store a significant amount of solar energy in a relatively small volume of phase change materials, reduce thermal energy storage, high rate of absorption and dissipation of thermal energy, intelligence, and relatively cheap price of these materials are among the advantages of using these materials in buildings.

Research Method

There are several types of building energy analysis software, each capable of performing a number of analyze several the huge number of this software, Energy Plus is one of the most powerful and widely used building thermal analysis software. The room modeled in this project is on the top floor of a building. Due to the creation of a green roof and the addition of a layer of phase change material and its effect on the last unit of the building, only the unit on the last floor of the building was modeled. This sample unit in the city of Tehran with an area of 100 square meters and with an external wall facing south and two double-glazed windows with a total heat transfer coefficient of 3.01 K^2W/m^3 on the south wall of the unit has been selected for simulation. To increase the accuracy of the work, the unit floor, and the left outer wall were considered adiabatic. (No heat transfer). In the present study, three-building models have been modeled in software. The first model of construction according to the standard of Article 19 of the building, the second model of the building with the addition of green roof layers according to the default of Plus Energy software, and the third model of green roof optimized with phase change materials. After importing the material, other useful information such as light and lighting, air conditioning system, etc. were entered into the Energy Plus software, and the desired outputs of this research were obtained as changes in indoor temperature in different models. To make the results more accurate, all three models designed for three different uses of the building, including commercial, office, and residential use, were considered. Also, in this research, a biodegradable substance or Bio_PCM has been used.

Results

In commercial use, the Model 3 is much more efficient than the previous two models. Model 2 shows relatively good performance compared to Model 1, especially in summer. However, in model 3, by adding a layer of phasing materials to the green roof layer, this model, compared to model 2, reduces the temperature more in the hot season and increases the temperature more in the cold season, which reduces energy consumption.

In office use, model 3 in office use, like commercial use, causes a greater balance of temperature inside the office unit than model 2. In June, February, March, and April, which are the coldest months of the year, the Model 3 keeps the internal temperature higher than the Model 2, closer to the comfort temperature defined in the software, and on the other hand, in the warmer months of the year, May, June, July. , August, September, and October kept the indoor temperature cooler than the Model 2. In residential use, model 3 is more efficient and suitable than model 2.

The changes in thermal comfort in all three models used in this study show that model 3, i.e. green roof combined with phasing materials, has generally been more successful in terms of thermal comfort and has produced fewer temperature fluctuations over a longer period.

Conclusion

In this paper, the application of phasing materials in green rothe as an insulator in the rate of temperature changes is investigated. After designing three different models of the standard roof, green roof, and green roof optimized with phasing materials, the number of temperature changes in three different models and three different uses of the building was examined. The results showed that the third model, which was an optimized model of the green roof using changeable materials, had the highest efficiency compared to the previous two models and caused a significant decrease in temperature in hot seasons and an increase in temperature in hot seasons in the building. As a result, it can be said that the use of phase change materials in the green roof can play a practical and significant role in increasing the thermal comfort of the building and thus saving energy.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

ارزیابی آسایش حرارتی ساختمان به کمک بام سبز ارتقایافته با مواد تغییرفازدهنده

محمدحسین جهانگیر[1*] | آرمیتا فتحی[2]

۱. نویسندهٔ مسئول، دانشیار دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mh.jahangir@ut.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکدهٔ مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: armita.fathi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹

کلیدواژه:
انرژی تجدیدپذیر،
بام سبز،
توسعهٔ پایدار،
معماری پایدار،
مواد تغییرفازدهنده

چکیده

یکی از اهداف مهم توسعهٔ پایدار، حفظ طبیعت و اصلاح آن است و تجلی توسعهٔ پایدار در حوزهٔ محیط ساخته‌شده، معماری پایدار نامیده می‌شود. بام سبز یکی از رویکردهای نو معماری و شهرسازی و برخاسته از مفاهیم توسعهٔ پایدار است که از آن می‌توان به منظور افزایش سرانهٔ فضای سبز، ارتقای کیفیت محیط زیست و توسعهٔ پایدار شهری بهره برد. از سوی دیگر امروزه با توجه به افزایش نیاز به انرژی و محدودیت سوخت‌های فسیلی به عنوان منابع رو به اتمام و آلایندهٔ محیط زیست، نیاز به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر بیشتر احساس می‌شود. یکی از انرژی‌هایی که کاربرد آن رو به افزایش است، انرژی حرارتی است. یکی از روش‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی استفاده از مواد تغییرفازدهنده است. این پژوهش با هدف بهینه‌سازی حرارتی بام سبز با استفاده از مواد تغییرفازدهنده تهیه شده است. با انتخاب مواد تغییرفازدهندهٔ زیستی به عنوان مادهٔ تغییر فاز مورد استفاده در بام پژوهش مورد نظر در سه مدل و سه کاربری مختلف با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس انجام شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده مدل بام سبز بهینه‌شده با مواد تغییرفازدهنده در هر سه کاربری مختلف ساختمان باعث افزایش دما در ساختمان در فصل‌های سرد و افزایش قابل توجه دما در فصل‌های گرم سال و رسیدن به آسایش حرارتی شده است. بنابراین طبق نتایج به‌دست‌آمده استفاده از بام سبز به طور مجزا باعث تعادل بیشتر دمایی می‌شود. به صورت میانگین مشاهده شد که درصد افزایش و کاهش دما در مدل ۳ نسبت به مدل ۲ در هر سه کاربری ۱۰ درصد بیشتر است و کاهش مصرف انرژی سرمایشی در کاربری تجاری ۸/۷ درصد، کاربری اداری ۱۰/۱ درصد و کاربری مسکونی ۱۰/۸ درصد بیشتر است. همچنین کاهش مصرف انرژی گرمایشی در کاربری تجاری ۱۰/۱درصد، در کاربری اداری ۸/۵ درصد و در کاربری مسکونی ۵/۲ درصد بیشتر است. در انتها توجیه اقتصادی نیز ذکر شده است که کاهش چشمگیر هزینه‌ها مشاهده می‌شود.

استناد: جهانگیر، محمدحسین و فتحی، آرمیتا. (۱۴۰۲). ارزیابی آسایش حرارتی ساختمان به کمک بام سبز ارتقایافته با مواد تغییرفازدهنده. *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۲ (۴) ۳۱۳-۳۲۸. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.374038.1060

© محمدحسین جهانگیر، آرمیتا فتحی.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2024.374038.1060

۱. مقدمه

امروزه محیط زیست، صرفه‌جویی در مصرف انرژی‌های فسیلی و توسعهٔ پایدار، به مباحث بسیار مهم و رایج در سطح بین‌المللی تبدیل شده‌اند. همچنین افزایش مداوم جمعیت، کشورهای جهان را بیش از پیش با مشکل کمبود انرژی مواجه ساخته است و حیات بشر را تهدید می‌کند. طبق آمار آژانس بین‌المللی انرژی[1]، طی ۲۰ سال گذشته میزان تولید انرژی اولیه ۴۹ درصد و میزان انتشار کربن دی‌اکسید ۴۳ درصد افزایش داشته است [۱]. سازمان ملل متحد[2] گزارش داده تا سال ۲۰۳۰، در مناطق شهری سراسر جهان ۵ میلیارد نفر زندگی خواهند کرد. این در حالی است که در سال ۱۹۵۰، ۳۰ درصد جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کردند. در سال ۲۰۰۰ نسبت ساکنان شهری به ۷۴ درصد افزایش یافت و پیش‌بینی شده تا سال ۲۰۳۰ به ۶۰ درصد افزایش یابد [۲]. در حال حاضر یکی از چالش‌های کارشناسان، ذخیرهٔ انرژی در شکل مناسب است. این امر منجر به ذخیرهٔ انرژی مازاد و اقتصادی‌تر شدن سیستم از طریق کاهش اتلاف انرژی و هزینهٔ سرمایه می‌شود. کمبود انرژی، گرم شدن کرهٔ زمین، گستردگی شهری، آلودگی هوا، فراوانی محله‌ای دفن زباله، کمبود آب و بیماری، میراثی از قرن بیست و یکم خواهند بود. در سال ۱۹۸۰ برای نخستین‌بار نام توسعهٔ پایدار[3] در گزارش سازمان جهانی حفاظت از منابع طبیعی آمد. این سازمان در گزارش خود با نام «استراتژی حفظ منابع طبیعی» این واژه را برای توصیف وضعیتی به کاربرد که توسعه نه‌تنها برای طبیعت مضر نیست، بلکه به یاری آن‌هم می‌آید. از دههٔ ۱۹۸۰ به بعد، توسعهٔ پایدار به عنوان مفهوم اصلی و بنیادی در راهبرد جهانی سازمان ملل و در گزارش براندتلند[4] قرار گرفت. گزارش خانم براندتلند در سال ۱۹۸۳، توسعهٔ پایدار را «توسعه‌ای که نیازهای نسل حاضر را بدون به خطر انداختن توانایی‌های آینده، برای برآوردن نیازهای خودشان» تعریف می‌کند [۳]. توسعهٔ پایدار، سه حوزهٔ اصلی اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را در بر می‌گیرد [۴]. در حقیقت توسعهٔ پایدار تنها بر جنبهٔ زیست‌محیطی اتفاقی تمرکز ندارد، بلکه به جنبه‌های اجتماعی و اقتصادی آن هم توجه می‌کند. به بیان دیگر توسعهٔ پایدار محل تلاقی جامعه، اقتصاد و محیط زیست است. یکی از مباحثی که توسعهٔ پایدار در آن ایده‌های نوینی را جهت نیل به مقصود مطرح کرده، معماری پایدار[5] است. بر اساس طرح سازمان همکاری و توسعهٔ اقتصادی، بناهای پایدار، بناهایی تلقی می‌شوند که کمترین تأثیرات مخرب را بر محیط‌های ساخته‌شده (مصنوعی) و طبیعی مجاور و بلافصل خود و نیز ناحیهٔ اطرافشان و همچنین زمینهٔ کلی خود داشته باشند. ساختمان‌های پایدار، به تمام چرخهٔ حیات ساختمان، محیط باکیفیت، کارکرد مطلوب و آینده توجه می‌کنند [۵]. بام سبز[6] یکی از رویکردهای نوین معماری و شهرسازی و برخاسته از مفاهیم توسعهٔ پایدار است که از آن می‌توان در جهت افزایش سرانهٔ فضای سبز، ارتقای کیفیت محیط زیست و توسعهٔ پایدار شهری بهره برد. استفادهٔ کاربردی از بام‌ها می‌تواند به عنوان امکان بهره‌برداری بهینه از زمین‌های شهری قلمداد شود [۶]. به طور کلی در خصوص این موضوع می‌توان بیان کرد که سکونت بشر در زمین باعث بروز مشکلات عمده‌ای برای محیط زیست نظیر گرم شدن کرهٔ زمین، کاهش منابع طبیعی، باران‌های اسیدی، آلودگی آب‌وهوا و تخریب لایهٔ ازن شده است. توسعهٔ پایدار به عنوان راه‌حل اصلی برای این مسئله، درست در نقطهٔ مقابل آن قرار گرفته که یکی از نمودهای آن استراتژی فضای سبز است [۷]. درواقع بام سبز، استفاده از فضاهای بدون استفاده در ساختمان‌های شهری در جهت ایجاد لکه‌های سبز است. این امر علاوه بر جنبه‌های زیباشناختی شهر، موجب تلطیف هوا در مقیاس خرد اقلیم و کاهش آلودگی هوا و درنهایت بهبود محیط زیست ساکنان شهر می‌شود [۸].

از طرف دیگر مدیریت مصرف انرژی و تعیین راهکارهای کاهش تلفات به معنای بررسی انواع انرژی‌های مورد نیاز ساختمان (گرمایشی، سرمایشی و الکتریکی) و یافتن گلوگاه‌های مصرف و اتلاف آن‌ها است. مدیریت مصرف انرژی می‌تواند به عنوان یک روش، میزان انرژی واقعی مورد نیاز یک ساختمان را اندازه‌گیری کرده و سپس راهکارهایی جهت کاهش و کمینه کردن آن ارائه دهد. در این روش حیطه‌هایی که در آن انرژی به طور مؤثر استفاده شده یا هدر می‌رود، شناسایی می‌شوند. در حقیقت می‌توان

1. International Energy Agency (IEA)
2. United Nation
3. Sustainable development
4. Brandtland
5. Sustainable Architecture
6. Green roof

مدیریت مصرف انرژی در ساختمان را چگونگی ارتباط اجزای سیستم با یکدیگر و نحوهٔ اثرگذاری محیط خارجی بر ساختمان دانست. استفاده از روش‌های جدید و انرژی‌های تجدیدپذیر در جهت مدیریت مصرف ساختمان، یک مسئلهٔ مهم است که در سال‌های اخیر به‌شدت مورد توجه قرار گرفته است [۹]. رشد جمعیت جهان، کاهش منابع انرژی و همچنین افزایش آلایندگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی جامعهٔ جهانی را به سمت استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر سوق داده است. با توجه به گسترش استفاده از این نوع انرژی‌ها، استفاده از آن‌ها در بحث ممیزی انرژی ساختمان‌ها در سال‌های اخیر به‌شدت مورد توجه قرار گرفته است [۱۰]. در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، خورشید به عنوان یک منبع بی‌پایان انرژی در کانون توجه پژوهشگران زیادی در سطح جهان قرار گرفته است. با توجه به متغیر بودن شدت تابش خورشید در ساعات مختلف شبانه‌روز، استفاده از این انرژی بدون ذخیره‌سازی مناسب امکان‌پذیر نیست. با توجه به این مسئله، بحث ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی از میزان اهمیت بالایی برخوردار است [۱۱]. یکی از راهکارهای مهم استفاده از انرژی خورشیدی ذخیرهٔ انرژی خورشیدی طی ساعت‌های گرم و استفاده از آن‌ها در ساعت‌های سرد است. در ساختمان‌های اولیه با استفاده از موادی با ظرفیت حرارتی بالا مانند سنگ، بتن، خشت، آجر و آب مقدار قابل توجه از حرارت خورشید طی روز جذب و ذخیره شده و هنگام شب با سرد شدن هوا از این انرژی استفاده می‌شد. اما این روش قدیمی معایبی ازجمله استفاده زیاد از مصالح ساختمانی و سنگین شدن ساختمان را به همراه داشت. از سوی دیگر استفاده از مصالح زیاد ازلحاظ اقتصادی نیز به‌صرفه نبود. یکی از روش‌های جدید ذخیرهٔ انرژی خورشیدی، استفاده از جرم‌های حرارتی با قابلیت بالا در ذخیرهٔ انرژی است. جرم‌های حرارتی موادی هستند که توانایی جذب، نگهداری و آزادسازی انرژی را در زمان مورد نیاز دارند. مواد تغییرفازدهنده[1] نسل جدیدی از این نوع جرم‌های حرارتی هستند که هنگام دریافت انرژی، با تغییر فاز آن را به صورت انرژی نهان در خود ذخیره کرده و در زمان مورد نظر با برگشت به فاز اولیه، انرژی ذخیره‌شده را در اختیار محیط پیرامونی خود قرار می‌دهند [۱۲].

از کاربردهای مهم مواد تغییرفازدهنده می‌توان به استفاده از آن‌ها در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی خورشید و استفاده از آن‌ها جهت تأمین بارهای گرمایشی ساختمان‌ها اشاره کرد. قابلیت ذخیرهٔ مقدار قابل توجهی از انرژی خورشیدی در حجم نسبتاً کمی از مواد تغییرفازدهنده، کاهش ذخیرهٔ انرژی حرارتی، بالا بودن سرعت جذب و دفع انرژی گرمایی، هوشمند بودن و قیمت نسبتاً ارزان این مواد ازجمله مزایای استفاده از این مواد در ساختمان‌ها است. این مواد قادرند در زمان‌هایی که ساختمان نیاز به گرما ندارد آن را جذب کنند و در زمان مورد نیاز آن را به محیط برگردانند [۱۳]. مواد با دمای ذوب حدود ۲۵ تا ۳۰ درجهٔ سلسیوس برای استفاده در سیستم‌های گرمایشی مستقیم ساختمان و مواد با دمای ذوب حدود ۶۰ تا ۷۰ درجهٔ سلسیوس برای تأمین آب گرم بهداشتی و همچنین گرمایش غیرمستقیم ساختمان استفاده می‌شوند. بحث ذخیره‌سازی انرژی سرمایشی ناشی از تولید آب سرد دستگاه‌های مولد مانند چیلر نیز موضوع جدیدی است که در سال‌های اخیر مطرح شده است [۱۴]. استفاده از مواد تغییرفازدهنده در دیوارها علاوه بر سبک‌تر شدن آن‌ها، ذخیرهٔ انرژی را نیز به همراه دارد. مواد تغییرفازدهنده‌ای که در این زمینه به کار می‌روند عمدتاً از نوع نمک‌های آبدار و یا هیدروکربن‌ها هستند که معمولاً به همراه مواد افزودنی آهنی جهت افزایش ضریب هدایت حرارتی به کار می‌روند.

۱.۱. پیشینهٔ تحقیق

با آشکارتر شدن اثر زیست‌محیطی ساختمان‌ها، رشتهٔ جدیدی به نام معماری سبز نیز در حال پیشرفت است. ساختمان سبز یا پایدار با بهره‌گیری از مدل‌های سالم‌تر و با منابع کارآمدتر ساخت، نوسازی، راه‌اندازی، نگهداری و تخریب می‌شود [۱۵]. ایجاد یک چارچوب مفهومی برای اجرای اصول پایداری و راهبردهای صنعت ساخت‌وساز ساختمان‌های اداری یکی از چشم‌اندازهای چرخهٔ عمر برای کمک به توسعهٔ پایدار است. این چارچوب متکی بر سه اصل اساسی است: مدیریت منابع، طراحی و طراحی زندگی انسان و محیط زیست. در این میان، استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید برق در سراسر جهان به عنوان یک منبع انرژی آزاد، تمیز و پایدار، مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است.

1. Phase Changing Material (PCM)

دیاس[1] و همکاران (۲۰۱۶) [۱۶] به بررسی کاربرد مفاهیم پایداری و اهداف توسعهٔ پایدار در جهت کاهش اتلاف انرژی در معماری یا همان معماری پایدار پرداختند. معماری پایدار که درواقع زیرمجموعهٔ طراحی پایدار است را شاید بتوان یکی از جریان‌های مهم معاصر به حساب آورد که واکنشی منطقی در برابر مسائل و مشکلات عصر صنعت به شمار می‌رود. در این تحقیق علاوه بر معرفی و روش‌های رتبه‌بندی ساختمان، مزایای استفاده از استاندارد لید بیان شده است.

در تحقیقی توسط یانگ و همکاران[2] (۲۰۲۰) [۱۷] بر بام سبز در شانگهای چین انجام شد، نتایج پژوهش یادشده نشان داد بام سبز تأثیر خنک‌کنندگی تا ۲/۹ درجهٔ سانتی‌گراد در سطح بیرونی سقف در تابستان می‌شود. واتلی[3] (۲۰۱۱) [۱۸] در مطالعه‌ای که روی نصب و راه‌اندازی بام‌های سبز برای تمام مدارس عمومی آتلانتا انجام داده، این نتیجه را فراهم می‌آورد که منافع حاصل از بام سبز، در مقیاس وسیع، از هزینه‌های ابتدایی وارده آن بیشتر است و بام‌های سبز بسیار بادوام هستند و تکنولوژی سودمندی محسوب می‌شود که به دنبال پایداری آینده است. در مقاله‌ای توسط بلاربی و همکاران[4] (۲۰۱۴) [۱۹] تأثیر بام سبز در داخل و بیرون ساختمان بر دره‌های شهری از نظر عددی و تجربی مورد بررسی قرار داده شده است. در این تحقیق سطوح پیاده‌رو شهری با اندازه‌گیری بازتاب‌های بام سبز از نظر آسایش ساکنان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس[5] نشان داد استفاده از بام سبز موجب کاهش ۲۰ درجه‌ای دما در تابستان و همچنین موجب کاهش ۰/۸درجه‌ای دما در سطوح پیاده‌رو شهری نیز می‌شود. در تحقیقی دیگر توسط توسط ژو[6] و همکاران (۲۰۱۸) [۲۰] تأثیر شاخص متغیر سطح برگ بر کارایی بام سبز توسط نرم افزار انرژی پلاس[7] بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد دما، شار حرارتی و بار حرارتی ساختمان دارای بام سبز کاملاً به شاخص سطح برگ بستگی دارد. برواردی[8] (۲۰۱۶) [۲۱] به بررسی نقش بام‌های سبز بر کاهش مصرف انرژی و خرده‌اقلیم‌های شهری در تورنتو کانادا با استفاده از نرم‌افزار انوی‌ـ مت[9] پرداخته شده است. نتایج پژوهش یادشده نشان داد افزایش سطح برگ درختان باعث افزایش تأثیر سرمایشی دمای هوا تا ۰/۴ درجه طی روز در سطوح پیاده‌رو شده است. همچنین میزان مصرف انرژی تا ۳ درصد کاهش یافته و افزایش عمق خاک نیز در این راستا بسیار مهم بوده است.

تحقیقات انجام‌شده در دانشگاه تربیت‌مدرس توسط کیان‌پرور (۲۰۱۰) [۲۲] که طی آن تغییرات سینوسی دمای محیط و تغییرات شار تابشی خورشید در شبانه‌روز لحاظ شده است نشان داد در یک اتاق نمونه در فصل زمستان، کاربرد مادهٔ تغییرفاز دهنده با ضخامت ۲۵ میلی‌متر، گرمای نهان ذوب ۱۵۰ کیلوژول بر کیلوگرم و دمای ذوب ۲۱ درجهٔ سانتی‌گراد بهترین شرایط آسایش حرارتی و مصرف انرژی را در پی دارد. تحقیقات تریش[10] و همکاران (۲۰۲۱) [۲۳] با عنوان تأثیر مواد تغییرفازدهنده بر کاهش میزان مصرف انرژی سرمایش در ساختمان‌های مسکونی نشان داد مادهٔ تغییرفازدهنده با درجه ذوب بالاتر برای اقلیم‌های گرم و خشک مناسب‌تر است و استفاده از مادهٔ پی‌سی‌ام بر لایهٔ خارجی دیوارهای خارجی باعث کاهش دمای سطح دیوارهای داخلی در تابستان می‌شود.

کابزا[11] و همکاران (۲۰۱۴) [۲۴] در تحقیقی تجربی تأثیر استفاده از یک نوع آجر بهبودیافته که در آن از مواد تغییرفازدهنده به صورت میکروکپسولی استفاده شده بود را در مقایسه با دیوار بتنی عادی بررسی کردند. طبق نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی، رفتار دیوار دارای مواد تغییرفازدهنده در مقایسه با دیوار دارای بتن معمولی نشان‌دهندهٔ نوسان کمتر دمای داخل طی روز بود. در تحقیق دیگری که توسط لیو[12] و همکاران (۲۰۲۱) [۲۵] تأثیر پی‌سی‌ام بر عملکرد حرارتی ساختمان‌های سبک انجام شد، نتایج نشان داد پیک شار حرارتی و متوسط شار حرارتی به‌ترتیب ۶۶/۵۲ و ۳۳/۳۹ درصد کاهش می‌یابند.

1. Dias
2. Yung et al.
3. Wately
4. Belarbi et al
5. TRANSYS
6. Zhou
7. Energy Plus
8. Berardi
9. ENVI-met
10. Tarish
11. Cabeza
12. Liu

۲. مواد و روش‌ها

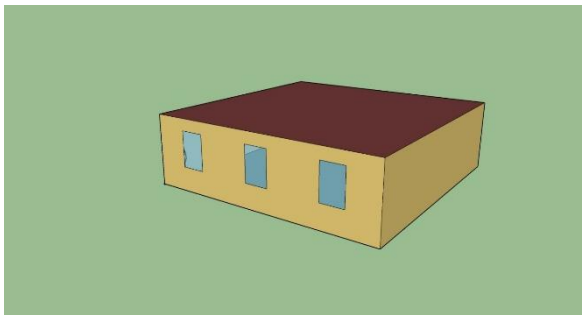
در این بخش به مدل‌سازی مسئلهٔ مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس پرداخته می‌شود. نرم‌افزارهای تحلیل و شبیه‌سازی انرژی، ازجمله ابزارهایی هستند که در اختیار محققان و طراحان به منظور بهینه‌سازی ساختمان‌های موجود و طراحی ساختمان‌های بهینه، قرار دارند. نرم‌افزارهای تحلیل انرژی ساختمان دارای انواع مختلفی هستند که هریک توانایی انجام تعدادی تحلیل را دارند. از میان خیل عظیم این نرم‌افزارها، انرژی پلاس از قدرتمندترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای تحلیل حرارتی ساختمان است. این نرم‌افزار رایگان که اولین نسخهٔ آن در آوریل ۲۰۰۱ ارائه شد، یک شبیه‌سازی جامع انرژی از ساختمان را در اختیار مهندسان، معماران و محققان به منظور کاربرد در مدل‌های انرژی و مصرف آب قرار می‌دهد. استفاده از انرژی پلاس توسط متخصصان بخش ساختمان موجب بهینه‌سازی طراحی برای استفادهٔ کمتر از انرژی و آب خواهد شد. انرژی پلاس سیستم‌های گرمایشی، سرمایشی، روشنایی، تهویه و دیگر جریان‌های انرژی را در کنار مصرف آب مدل‌سازی می‌کند. انرژی پلاس دارای توانمندی‌های خلاقانه و مفیدی در شبیه‌سازی، همچون آنالیز با بازهٔ زمانی کمتر از یک ساعت، سیستم مدولار، جریان‌های هوایی چندمنطقه‌ای، شرایط آسایش، تهویهٔ طبیعی و سیستم‌های فتوولتائیک است. استفاده از انرژی پلاس توسط متخصصان بخش ساختمان سبب بهینه کردن طراحی برای استفادهٔ کمتر از انرژی و آب خواهد شد. انرژی پلاس، سیستم گرمایشی، سرمایشی، روشنایی، تهویه و دیگر جریان‌های انرژی را در کنار نیاز آب مدل می‌کند. انرژی پلاس دارای توانمندی‌های خلاقانه و مفیدی در شبیه‌سازی همچون: آنالیز با بازهٔ زمانی کمتر از یک ساعت، شرایط آسایش، تهویهٔ طبیعی و شبیه‌سازی یکپارچهٔ ساختمان، سیستم اصلی و ثانویه را دارد. اساس کار این نرم‌افزار بر اطلاعات ورودی کاربر نظیر نقشهٔ سه‌بعدی ساختمان، ترکیب فیزیکی ساختمان، اجزای سیستم‌های مکانیکی مربوطه، الگوریتم حل و ... استوار است. نرم‌افزار انرژی پلاس برای محاسبهٔ بارهای حرارتی و برودتی از روش بالانس حرارتی بهره می‌گیرد. این روش شامل سه معادلهٔ بالانس حرارتی است که به‌ترتیب روی سطوح خارجی فضای مورد نظر، روی سطوح داخلی و در فضای مورد نظر به طور هم‌زمان حل، و بار حرارتی و برودتی سیستم محاسبه می‌شود. تخمین بار ساختمان به روش بالانس حرارتی شامل محاسبات بالانس حرارتی هدایت، جابه‌جایی و تشعشع سطح با سطح برای هر سطح اتاق و بالانس حرارتی هوای اتاق است. یکی از قابلیت‌های مهم انرژی پلاس توانایی مدل کردن سطوح حاوی مواد تغییرفازدهنده است. برای شبیه‌سازی مصرف انرژی و آسایش حرارتی یک اتاق با دیوارهای حاوی مواد تغییرفازدهنده در انرژی پلاس از الگوریتم تفاضل محدود هدایت استفاده شده است. در این الگوریتم پس از شبکه‌بندی سطوح مختلف دیوار با گره‌های متعدد، معادلهٔ انرژی با استفاده از روش تفاضل محدود ضمنی گسسته‌سازی می‌شود و برای تمام گره‌ها به کار می‌رود. نکتهٔ قابل توجه در این محاسبات آن است که با وجود ثابت در نظر گرفتن خواص ترموفیزیکی مواد، به دلیل اندک بودن تغییرات دما ظرفیت گرمایی مواد تغییرفازدهنده متغیر و وابسته به دما در نظر گرفته می‌شود.

در این بخش به بررسی مدل انجام‌شده پرداخته شده است. شکل ۱ نشان‌دهندهٔ اتاق مدل‌سازی‌شده در این پروژه در طبقهٔ آخر یک ساختمان است که با نرم‌افزار اسکچ آپ طراحی شده است. به علت ایجاد بام سبز و اضافه کردن لایهٔ مواد تغییرفازدهنده و تأثیر آن بر واحد آخر ساختمان فقط واحدی که در آخرین طبقهٔ ساختمان وجود دارد مدل شد. این واحد نمونه در شهر تهران به مساحت ۱۰۰ مترمربع و با دیوار خارجی رو به جنوب و دو پنجرهٔ دوجداره با ضریب انتقال حرارت کلی ۳/۰۱ W/m^2K روی دیوار جنوبی واحد برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. برای افزایش دقت کار، کف واحد و دیوار خارجی سمت چپ آدیاباتیک در نظر گرفته شد (انتقال حرارتی وجود ندارد).

طراحی در نرم‌افزار انرژی پلاس شامل مراحل مختلفی است. ابتدا باید مدل مورد نظر در نرم‌افزار واسطی طراحی شود. نرم‌افزار اسکچ آپ[1] یکی از این نوع نرم‌افزارهای گرافیکی است که طراحی گرافیکی و نوع قرارگیری و مساحت کلی ساختمان در آن انجام می‌شود. پس از طراحی گرافیکی، با استفاده از نرم‌افزار اوپن استدیو[2] که یکی از افزونه‌های نرم‌افزار انرژی پلاس است اطلاعات مربوط به متریال و جنس مواد به‌کاررفته در لایه‌های دیوار ساختمان وارد شد. در تحقیق حاضر سه مدل ساختمان در

1. Sketch up
2. Open studio

نرم‌افزار مدل‌سازی شده است. مدل اول ساختمانی طبق استاندارد مبحث ۱۹ ساختمان (جدول ۱)، مدل دوم ساختمان با اضافه شدن لایه‌های بام سبز طبق پیش‌فرض نرم‌افزار انرژی پلاس (جدول ۳) و مدل سوم بام سبز بهینه‌شده با مواد تغییرفازدهنده. پس از وارد کردن متریال، در نرم‌افزار انرژی پلاس اطلاعات کاربردی دیگر مانند نور و روشنایی، سیستم تهویهٔ مطبوع و ... وارد شد و خروجی‌های مورد نظر این تحقیق که تغییرات دمای داخل ساختمان در مدل‌های مختلف به دست آمد. برای دقیق‌تر شدن نتایج تمامی سه مدل طراحی‌شده برای سه کاربری مختلف ساختمان شامل: کاربری تجاری، اداری و مسکونی در نظر گرفته شد. اطلاعات مربوط به ۳ مدل در جدول‌های ۱ تا ۳ به طور دقیق آورده شده است.



شکل ۱. نمای شماتیک ساختمان مورد بررسی

جدول ۱. مشخصات مصالح به‌کاررفته طبق استاندارد مبحث ۱۹ ساختمان

مصالح	چگالی (Kg/m^3)	هدایت گرمایی (W/m-K)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/Kg-K)	ضخامت (m)
گچ	۸۰۰	۰/۱۶	۱۰۹۰	۰/۰۱۹
بتن	۱۲۸۰	۰/۵۳	۸۴۰	۰/۱۰۱۶
عایق	۳۶۸	۰/۶	۵۹۰	۰/۰۱۹۱
پنجره	–	–	–	–

جدول ۲. مشخصات لایه‌های مدل

جنس	لایه‌ها
شیشهٔ ۶ میلی‌متری + ۱۳ میلی‌متر گاز + شیشهٔ ۶ میلی‌متری	پنجرهٔ دوجداره
لایه عایق + مقاومت فضای هوای سقف + ۱۰۰ میلی‌متر بتن سبک	طبقهٔ داخلی
۱۹ میلی‌متر تختهٔ گچ + مقاومت فضای هوای سقف + ۱۹ میلی‌متر تختهٔ گچ	دیوار داخلی

جدول ۳. مشخصات گیاهان استفاده‌شده در بام

واحد	اندازه	المان
متر	۰/۲	ارتفاع گیاهان
بدون بعد	۱	شاخص سطح برگ
D بدون بعد	۰/۲۲	بازتاب برگ
-	۰/۹۵	نشر برگ
s/m	۱۸۰	حداقل مقاومت روزانه
متر	۰/۱	ضخامت
-	متوسط	سختی
W/m-K	۰/۳۵	رسانایی خاک خشک
Kg/m^3	۱۱۰۰	چگالی خاک خشک

مطابق جدول ۴، در این تحقیق از مادۀ تغییرفازدهنده زیستی یا بیوپی‌سی‌ام استفاده شده است. بسیاری از مواد تغییرفازدهنده از مواد مبتنی بر پارافین استخراج می‌شوند که بسیار اشتعال‌پذیر هستند و بنابراین برای استفاده در ساختمان‌ها محدودیت دارند. مادۀ تغییرفاز مبتنی بر مواد آلی که به‌تازگی توسعه یافته است و در اینجا بیوپی‌سی‌ام نامیده می‌شود، ایمنی را بهبود می‌بخشد و اشتعال‌پذیری کمتری نسبت به مواد تغییرفازدهندۀ سنتی دارد. مواد ضد حریق همچنین می‌توانند به مادۀ تغییرفاز مبتنی بر پارافین اضافه شوند تا اشتعال‌پذیری آن‌ها کاهش یابد، اما با افزایش هزینۀ ساخت مادۀ جدید همراه است. بیوپی‌سی‌ام همچنین می‌تواند به گونه‌ای تولید شود که نقطۀ ذوب را بین ۲۲/۷- درجۀ سانتی‌گراد تا ۷۸/۳۳ درجۀ سانتی‌گراد (۷۳- درجۀ فارنهایت تا ۱۷۳+ درجۀ فارنهایت) تغییر دهد، و این استفاده از آن را در مناطق مختلف آب‌وهوایی تسهیل می‌کند. بیوپی‌سی‌ام به صورت بلوک‌های گسسته و دارای شکاف‌های هوایی بین آن‌ها کپسول می‌شود. این حصیرها در پاکت ساختمان (دیوارها، کف و سقف) قرار می‌گیرند. طی روز با دمای زیاد محیط و تابش خورشید، بیوپی‌سی‌ام ذوب می‌شود (فاز را از جامد به مایع تغییر می‌دهد) و مقدار زیادی انرژی گرمایی را در خود ذخیره می‌کند. به این فرایند ذوب یا شارژ گفته می‌شود. طی این فرایند از افزایش گرما در ساختمان کاسته می‌شود و بنابراین انرژی کمتری توسط سیستم تهویۀ مطبوع برای خنک‌سازی ساختمان مصرف می‌شود. طی شب، مواد تغییرفاز از مایع به فاز جامد تبدیل می‌شود و گرما را به داخل ساختمان و به محیط خارج منتقل می‌کند. این فرایند جامدسازی یا تخلیه نامیده می‌شود. این روند طی زمستان سودمند است، زیرا گرمای آزادشده به گرم شدن ساختمان کمک می‌کند. با این‌حال، این پدیده طی فصل تابستان مشکلاتی را به همراه دارد، زیرا گرمای اضافی تخلیه‌شده باید توسط سیستم تهویۀ مطبوع حذف شود.

جدول ٤. مشخصات مادۀ تغییرفازدهندۀ مورد استفاده

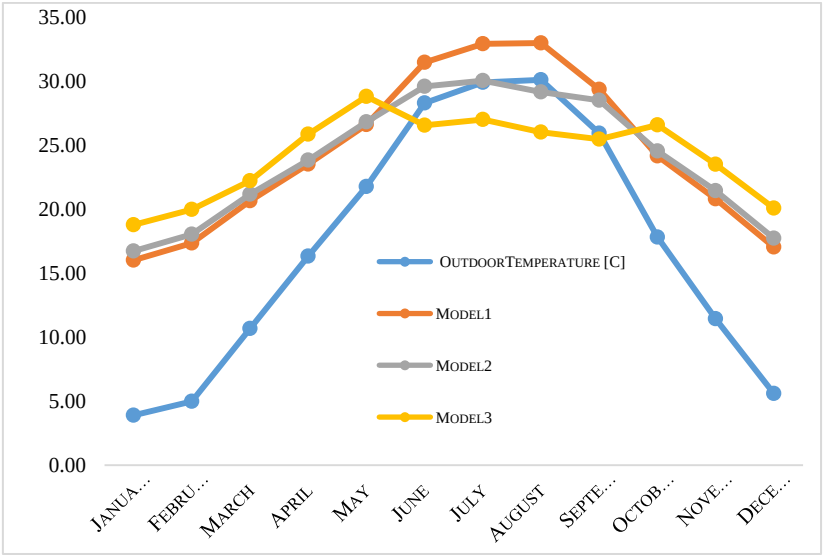
خصوصیات	Bio PCM
نقطۀ ذوب (C°)	۲۹
چگالی (Kg/m^3)	۸۶۰
گرمای ویژه (kJ/ kg. C°)	۱/۹۷
گرمای نهان (kJ/kg)	۲۱۹
ویسکوزیته	۷
نقطۀ جوش (C°)	۴۱۸
هدایت حرارتی (W/m.C°)	۰/۲

۳. نتایج

پارامترهای مهمی که باید در این بخش گزارش شوند شامل اختلاف دمای داخل ساختمان و همچنین، برقراری آسایش حرارتی در مدل و کاربری‌های مختلف نسبت به یکدیگر به صورت ماهانه است.

۳. ۱. کاربری تجاری

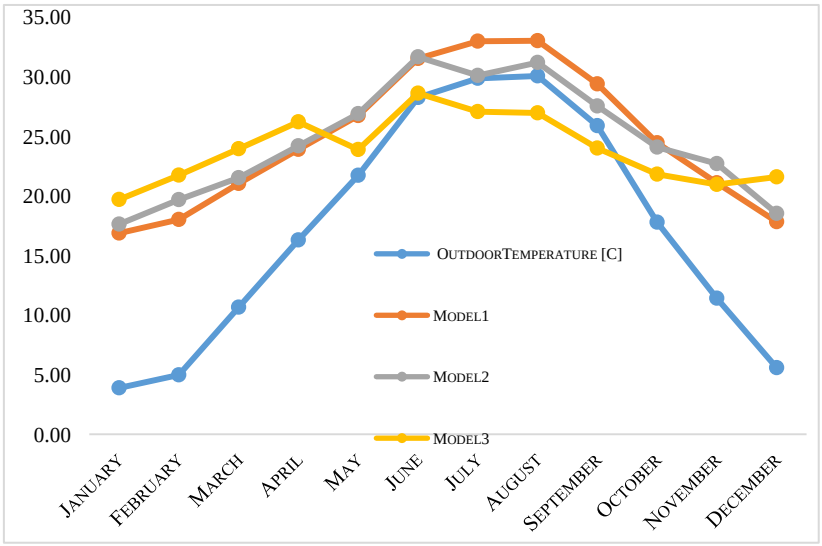
همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مدل ۳ نسبت به دو مدل قبلی بسیار کارآمدتر است. مطابق نمودار مدل ۳ نسبت به مدل ۲ در فصل پاییز و زمستان باعث بالا ماندن دمای داخل واحد و از طرفی در فصل تابستان باعث پایین‌تر ماندن دمای داخل نسبت به مدل ۲ می‌شود. مطابق نمودار مدل ۲ نسبت به مدل ۱ کارایی نسبتاً خوبی را به‌خصوص در فصل تابستان نشان می‌دهد. اما در مدل ۳ با اضافه شدن لایۀ مواد تغییرفازدهنده به لایه‌بندی بام سبز این مدل نسبت به مدل ۲ کاهش دمای بیشتر در فصل گرم و افزایش دمای بیشتر در فصل سرد را باعث می‌شود که کاهش مصرف انرژی را در بر دارد.



شکل ۲. نمودار تغییرات دما داخل واحد تجاری در سه مدل مختلف

۳. ۲. کاربری اداری

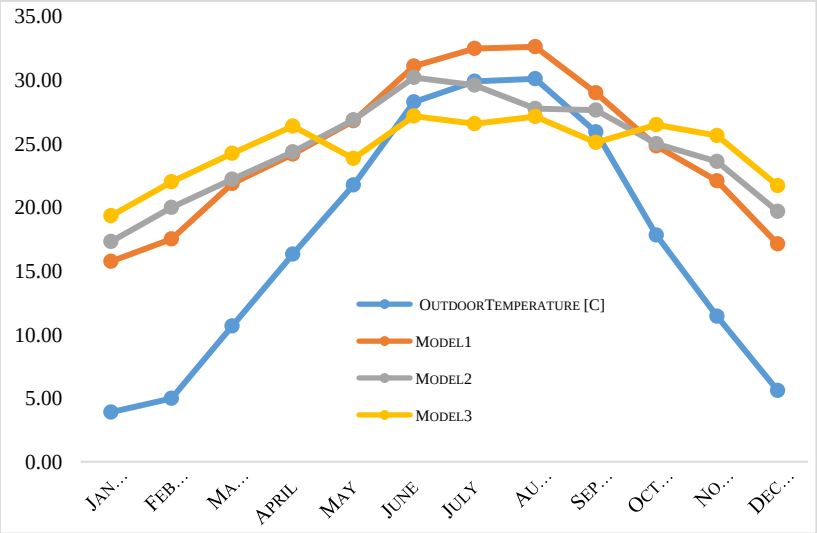
مطابق شکل ۳ تغییرات دمایی در سه مدل مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل ۳ در کاربری اداری همانند کاربری تجاری باعث تعادل بیشتر دمای داخل واحد اداری نسبت به مدل ۲ می‌شود. به عنوان مثال در ماه‌های ژوئن، فوریه، مارس و آوریل که از ماه‌های سرد سال هستند مدل ۳ دمای داخل را نسبت به مدل ۲ بالاتر و نزدیک به دمای آسایش تعریف‌شده در نرم‌افزار نگه داشته و از طرف دیگر در ماه‌های گرم‌تر سال یعنی می، ژوئن، جولای، اوت، سپتامبر و اکتبر دمای محیط داخل را نسبت به مدل ۲ خنک‌تر نگه داشته است.



شکل ۳. نمودار تغییرات دما داخل واحد اداری در سه مدل مختلف

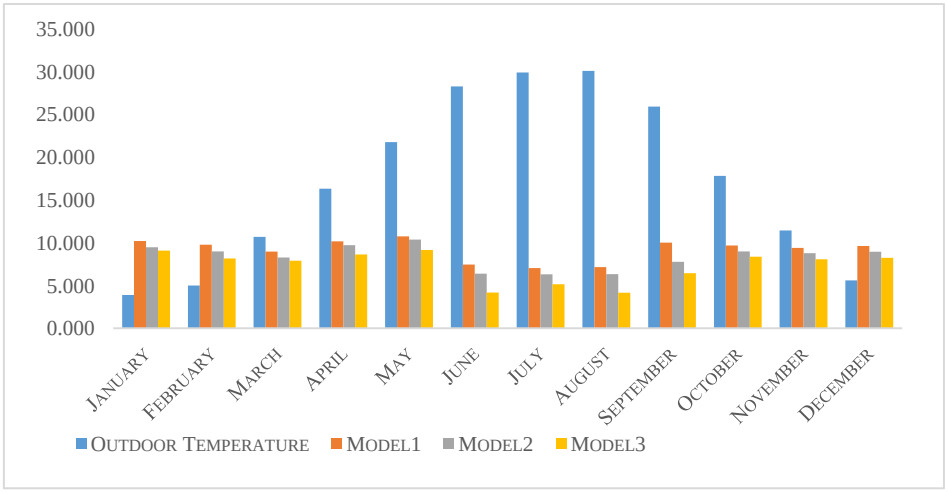
۳. ۳. کاربری مسکونی

در کاربری مسکونی نیز مدل ۳ نسبت به مدل ۲ کارآمدتر و مناسب‌تر است. مطابق شکل ۴ که نشان‌دهندهٔ کاهش دما در ماه‌های گرم سال و افزایش دما در ماه‌های سرد سال در داخل واحد مسکونی نسبت به مدل ۲ است و مطابق شکل در مدل ۲ نسبت به مدل ۱ در ماه‌های سرد سال از لحاظ تغییرات دمایی هیچ تفاوتی بین دو مدل وجود ندارد، اما این مشکل در مدل ۳ به صورت کامل حل شده است.



شکل ٤. نمودار تغییرات دما داخل واحد مسکونی در سه مدل مختلف

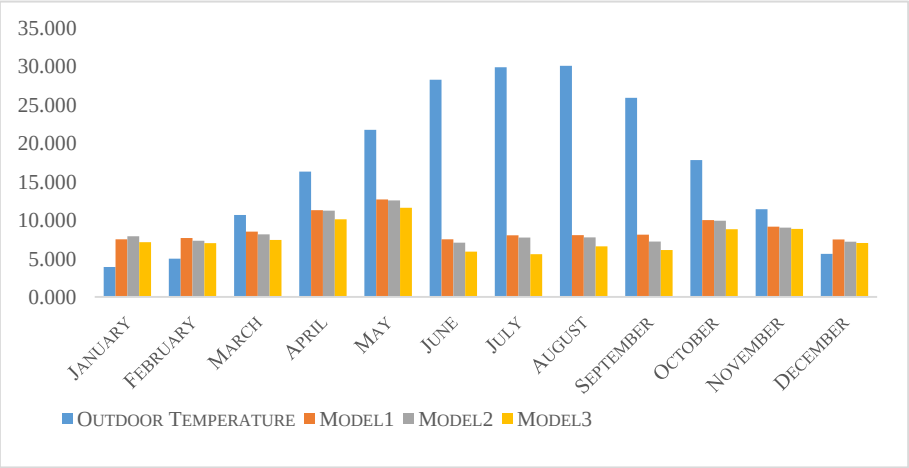
آسایش حرارتی یکی از خروجی‌هایی است که در نرم‌افزار انرژی پلاس می‌توان به دست آورد. طبق خروجی نرم‌افزار، اگر عدد مربوط به آسایش حرارتی کمتر از عدد ۱۰ باشد آسایش برقرار است. نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار در مورد آسایش حرارتی در سه مدل به‌کارگرفته‌شده در این مطالعه، در هر سه کاربری استفاده‌شده (تجاری، اداری و مسکونی) نشان داد استفاده از مواد تغییرفاز دهنده در ساختمان با کاهش اندازهٔ نوسانات دمای هوای داخل ساختمان و باقی‌ماندهٔ آن برای مدت‌زمانی طولانی‌تر نزدیک به دمای مطلوب بدن، می‌تواند انرژی گرمایش و سرمایش را کاهش دهد و بار زمان پیک مصرف برق را جابه‌جا کند. درنتیجه مواد تغییرفازدهنده را می‌توان به عنوان یک راه‌حل مناسب و امیدوارکننده نه‌تنها برای افزایش آسایش حرارتی داخل ساختمان، بلکه کاهش مصرف انرژی برگزید. در شکل ۵ تغییرات آسایش حرارتی را در کاربری تجاری برای سه مدل استفاده‌شده در این مطالعه نشان می‌دهد مطابق خروجی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار، مدل ۳ یعنی بام سبز ترکیبی با مواد تغییرفازدهنده، به طور کلی در مورد آسایش حرارتی موفق‌تر عمل کرده و نوسانات دمایی کمتری در مدت‌زمان طولانی‌تر ایجاد کرده است. در ماه‌های گرم سال ژوئن، جولای و اوت بیشتری میزان آسایش حرارتی را در مدل ۳ مشاهده شد.



شکل ۵. نمودار تغییرات آسایش حرارتی در سه مدل طراحی‌شده در کاربری تجاری

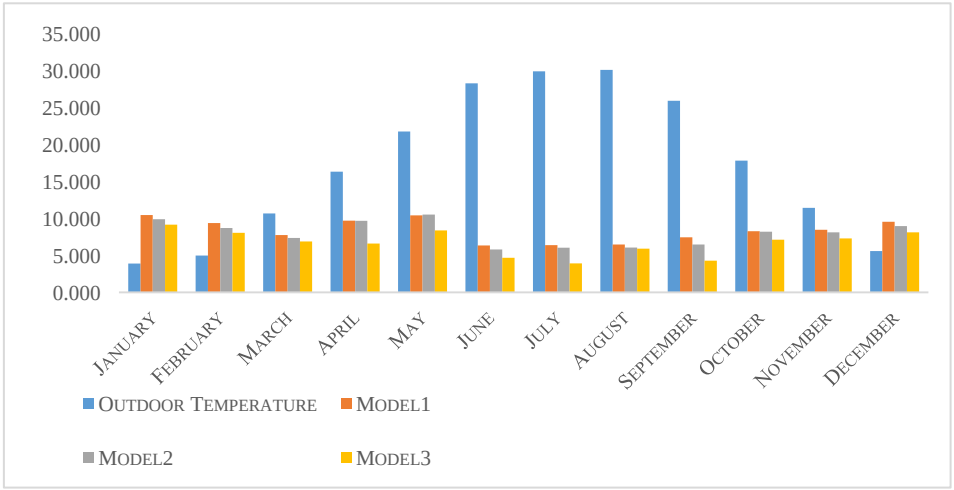
در شکل ۶ که تغییرات آسایش حرارتی در کاربری اداری برای سه مدل بام استاندارد، بام سبز و بام سبز ترکیبی با لایهٔ مواد تغییرفازدهنده را نشان می‌دهد، مطابق نمودار به‌دست‌آمده از نرم‌افزار نوسانات دمایی هنگام طولانی‌تر ثابت باقی‌مانده و در

ماه‌های گرم سال جوین، جولای، اوت و سپتامبر بیشترین میزان آسایش حرارتی توسط مدل ۳ در کاربری اداری مشاهده می‌شود. اگرچه در این کاربری در ماه‌های آوریل و می نتیجهٔ رضایت‌بخشی به دست نیامده است.



شکل ٦. نمودار تغییرات آسایش حرارتی در سه مدل طراحی‌شده در کاربری اداری

شکل ۷ مربوط به کاربری مسکونی در ماه‌های مختلف سال است که در سه مدل به‌کارگرفته‌شده در این مطالعه آسایش حرارتی را بررسی می‌کند. در این کاربری تأثیر بام سبز ترکیبی با لایه‌ای از مواد تغییرفازدهنده نقش بسزایی را در ایجاد آسایش حرارتی ایفا کرده‌اند و در مدت‌زمانی بسیار طولانی، ماه‌های مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای، اوت، سپتامبر، اکتبر که تفاوتی میان بام استاندارد و بام سبز به لحاظ آسایش حرارتی مشاهده نمی‌شود و این دو مدل کاملاً منطبق بر هم هستند حضور مواد تغییرفازدهنده در مدل سوم یعنی بام سبز ترکیب‌شده با مواد تغییرفازدهنده توانسته است تأثیر چشمگیری بر این موضوع داشته باشد و آسایش حرارتی بهتری را ایجاد کند.



شکل ۷. نمودار تغییرات آسایش حرارتی در سه مدل طراحی‌شده در کاربری مسکونی

خروجی‌های به‌دست‌آمده در مورد کاهش مصرف انرژی، مورد توجه‌ترین بخش از این مطالعه است. متوسط سالیانهٔ انرژی سرمایش و گرمایشی به‌کاررفته در سه کاربری تجاری، اداری و مسکونی با استفاده از این مدل بام به‌شدت کاهش نشان می‌دهد (جدول‌های ۶ و ۷). کمترین میزان انرژی مورد نیاز در کاربری مسکونی و با مدل سوم، یعنی ساختمان ترکیبی بام سبز با لایهٔ از مواد تغییرفازدهنده با مقدار عددی ۲۷۰۴ KJ/H است.

جدول ۵. مقایسهٔ درصد کاهش و افزایش دما در مدل‌ها و کاربری‌های مختلف ساختمان

	کاربری مسکونی		کاربری اداری		کاربری تجاری	
	مدل ۳ نسبت به مدل ۱	مدل ۲ نسبت مدل ۱	مدل ۳ نسبت به مدل ۱	مدل ۲ نسبت مدل ۱	مدل ۳ نسبت به مدل ۱	مدل ۲ نسبت مدل ۱
January	۱۸/۵۷	۹/۰۲	۱۴/۲۷	۴/۲۵	۱۴/۷۵	۴/۲۵
February	۲۰/۴۲	۱۲/۴۲	۱۷/۱۳	۸/۴۸	۱۳/۱۴	۳/۷۸
March	۹/۷۷	۱/۴۹	۱۲/۱۹	۲/۲۳	۷/۰۴	۲/۴۱
April	۸/۳۳	۰/۷۰	۸/۸۱	۱/۲۴	۹/۰۴	۱/۳۰
May	−۱۲/۳۶	۰/۳۰	−۱۱/۹۱	۰/۶۳	۷/۶۳	۰/۷۸
June	−۱۴/۴۶	−۲/۹۵	−۱۰/۱۶	۰/۴۱	−۱۸/۵۲	−۶/۳۳
July	−۲۲/۲۸	−۹/۷۴	−۲۱/۸۱	−۹/۵۳	−۲۱/۸۹	−۹/۵۷
August	−۲۰/۲۲	−۱۷/۴۹	−۲۲/۴۸	−۵/۸۳	−۲۶/۷۹	−۱۳/۱۶
September	۱۵/۵۴	−۴/۹۳	−۲۲/۴۴	−۶/۷۱	−۱۵/۲۷	−۲/۹۹
October	۶/۳۵	۰/۷۲	−۱۲/۱۰	−۱/۴۹	−۹/۱۲	۱/۵۹
November	۱۳/۸۸	۶/۴۹	−۰/۶۱	۷/۱۳	۱۱/۵۱	۲/۹۹
December	۲۱/۱۲	۱۲/۹۸	۱۷/۴۱	۳/۷۸	۱۵/۱۶	۳/۹۰

جدول ٦. کاهش مصرف انرژی سرمایشی در مدل ها و کاربریهای مختلف ساختمان

	کاربری مسکونی		کاربری اداری		کاربری تجاری	
	مدل ۳ نسبت به مدل ۱	مدل ۲ نسبت مدل ۱	مدل ۳ نسبت به مدل ۱	مدل ۲ نسبت مدل ۱	مدل ۳ نسبت به مدل ۱	مدل ۲ نسبت مدل ۱
January	۰	۰	۰	۰	۰	۰
February	۰	۰	۰	۰	۰	۰
March	۰	۰	۰	۰	−۱۵/۴۳	−۹/۶۳
April	−۱۳/۲۸	−۲/۵۴	−۱۵/۲۸	−۶/۶۷	−۱۳/۰۴	−۵/۰۸
May	−۴/۳۶	−۰/۹۴	−۷/۰۷	−۲/۶۴	−۶/۷۳	−۲/۴۲
June	−۷/۸۴	−۱/۴۴	−۱۳/۹۳	−۱/۱۲	−۸/۶۹	−۲/۱۲
July	−۱۳/۵۵	−۴/۲۱	−۱۰/۳۰	−۱/۰۷	−۱۴/۶۸	−۱/۱۸
August	−۱۶/۴۶	−۱/۲۳	−۹/۳۶	−۳/۷۹	−۱۳/۶۶	−۰/۲۱
September	−۲۱/۳۴	−۲/۶۶	−۲۹/۴۹	−۳/۳۳	−۱۲/۲۱	−۲/۸۴
October	−۲۰/۹۴	−۶/۱۳	−۷/۹۸	−۴/۲۸	−۷/۵۳	−۳/۷۴
November	−۴۹/۳۶	−۴۱/۵۲	−۲۸/۲۲	−۱۷/۹۵	−۲۸/۳۰	−۱۶/۴۳
December	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۷. کاهش مصرف انرژی گرمایشی در مدل‌ها و کاربری‌های مختلف ساختمان

	کاربری مسکونی		کاربری اداری		کاربری تجاری	
	مدل ۳ نسبت به مدل ۱	مدل ۲ نسبت مدل ۱	مدل ۳ نسبت به مدل ۱	مدل ۲ نسبت مدل ۱	مدل ۳ نسبت به مدل ۱	مدل ۲ نسبت مدل ۱
January	−۷/۹۵	−۴,۴۲	−۱۴/۹۹	−۸/۹۱	−۱۱/۳۰	−۷/۵۹
February	−۸/۷۷	−۴,۷۷	−۱۸/۹۷	−۱۰/۱۹	−۱۶/۰۵	−۹/۰۶
March	−۲۵/۱۲	−۸,۹۵	−۲۵/۹۶	−۱۴/۴۰	−۳۶/۲۵	−۱۴/۲۴
April	−۹/۱۱	−۵,۴۷	−۳۴/۰۶	−۲۵/۸۱	−۲۷/۳۳	−۲۰/۸۸
May	۰	۰	−۳۴/۶۹	−۲۹/۶۴	−۳۹/۶۵	−۲۵/۲۱
June	۰	۰	۰	۰	۰	۰
July	۰	۰	۰	۰	۰	۰
August	۰	۰	۰	۰	۰	۰
September	۰	۰	۰	۰	۰	۰
October	−۵۴/۳۲	−۴۷/۳۴	−۵۱/۰۸	−۴۵/۲۰	−۵۰/۳۶	−۴۲/۶۵
November	−۳۴/۲۵	−۲۲/۹۲	−۳۳/۰۴	−۱۸/۵۲	−۳۱/۶۲	−۱۷/۵۲
December	−۹/۳۲	−۵/۲۷	−۱۶/۲۷	−۸/۷۷	−۱۵/۳۴	−۸/۲۳

مطابق جدول ۵ که نشان‌دهندهٔ درصد کاهش و افزایش دما است کاملاً مشخص و واضح است که مدل ۳ نسبت به مدل ۲ کارایی بسیار بیشتری است. مطابق جدول فوق در ماه آگوست بیشترین کاهش در کاربری تجاری و بیشترین افزایش در ماه ژوئن در کاربری مسکونی است. اما به طور کلی در فصل تابستان و در کاربری مسکونی بهترین نتیجه حاصل شده است. به صورت میانگین مشاهده می‌شود درصد افزایش و کاهش دما در مدل ۳ نسبت به مدل ۲ در هر سه کاربری ۱۰ درصد بیشتر است.

در جدولهای ۶ و ۷ که میزان درصد کاهش مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی را در مدل‌های ۲ و ۳ نسبت به مدل ۱ نشان می‌دهد بیانگر این موضوع است که در هر ۳ کاربری مختلف مدل سوم باز هم بیشترین کاهش مصرف و صرفه‌جویی انرژی را نسبت به مدل دوم دارد. درخور یادآوری است که بیشترین مقدار کاهش انرژی سرمایشی در ماه نوامبر در کاربری مسکونی و بیشترین کاهش مصرف انرژی گرمایشی در ماه اکتبر و در کاربری مسکونی است. به صورت کلی مدل سوم یعنی مدل ترکیبی بام سبز و مواد تغییرفازدهنده در هر سه کاربری تجاری، اداری و مسکونی کارآمدتر است، اما در بین این ۳ کاربری مختلف، کاربری مسکونی بیشترین مقدار کاهش و صرفه‌جویی انرژی را بین کاربری ها دارد. که علت این موضوع می‌تواند در تعداد افراد کمتردر واحد سطح، نفوذ کمتر هوا، مقدار روشنایی و میزان تجهیزات الکتریکی کمتر در کاربری مسکونی باشد. در جدول ۶ به صورت میانگین مشاهده می‌شود که کاهش مصرف انرژی سرمایشی مدل ۳ نسبت به مدل ۲ در کاربری تجاری ۸/۷ درصد، کاربری اداری ۱۰/۱ درصد و کاربری مسکونی ۱۰/۸ درصد بیشتر است. به صورت مشابه در جدول ۷ مشاهده می‌شود که به صورت میانگین کاهش مصرف انرژی گرمایشی مدل ۳ نسبت به مدل ۲ در کاربری تجاری ۱۰/۱ درصد، در کاربری اداری ۸/۵ درصد و در کاربری مسکونی ۵/۲ درصد بیشتر است.

۳. ۴. توجیه اقتصادی

توجیه اقتصادی بام سبز را می‌توان به شرح ذیل بیان کرد.

متراژ بام، در مقایسه با کل متراژ ساخت ساختمان معمولاً نسبت کمی است. معماری بام سبز یا روف گاردن نیز به گونه‌ای است که بر اساس بهره‌وری زیاد از متراژ مورد استفاده طراحی می‌شود. با این فرضیات اصولاً هزینهٔ انجام‌شده بابت ساخت متراژ نه چندان زیادی از ساختمان به عنوان بام سبز به تناسب بهره‌وری و امکاناتی که از آن حاصل می‌شود، به‌صرفه می‌شود. مبلغ اجرای بام سبز برای ساختمان‌های آپارتمانی، به طور میانگین بین ۲ تا ۷ درصد به هزینه‌های ساخت آن ساختمان اضافه می‌کند. در حالی که در فروش همان ساختمان، وجود این فضا بیش از ۱۰ درصد افزایش فروش را در پی دارد. از طرفی امروزه مشاعات در بازار لوکس ساختمان‌سازی ایران این تأثیرات را به همراه دارد: ۱- تأثیر بر جزئیات اجرایی در داخل واحدها و نما؛ ۲- تأثیر مستقیم در روند فروش. گفتنی است که بام سبز هزینهٔ انرژی برق و آب کاهش چشم‌گیری می‌دهد. با اجرای سیستم بام سبز در فصل‌های بهار، تابستان و بخشی از پاییز به صفر می‌رسد. مواد تغییرفازدهنده در بازار جهانی بستگی به نوع و محدودهٔ دمایی آن‌ها قیمت‌های متفاوتی دارند. مواد تغییرفازدهنده مورد استفاده در این تحقیق مواد تغییرفازدهندهٔ زیستی یا به‌اصطلاح Bio PCM بود که قیمت آن در هر متر مربع از ۱۰/۷۶ تا ۲۱/۵۲ دلار است. از طرفی مصرف انرژی در ساختمان در ازای هر متر مربع 106 kW/h است. طبق نتایج به‌دست‌آمده میزان مصرف انرژی در ساختمان به 3200 kW/h می‌رسد. که این میزان مصرف در مدل سوم یعنی مدل بهینه‌شدهٔ بام سبز با استفاده از مواد تغییرفازدهنده به 2900 kW/h در سال کاهش پیدا کرده است. طبق استاندارد جهانی میزان مصرف انرژی در هر متر مربع ساختمان معادل ۲۰ سنت و تقریباً برابر ۴۸۰۰ تومان است. کی طی محاسبه‌ای ساده در سال و در یک ساختمان معمولی معادل ۱۵ ملیون تومان است که این میزان مصرف در مدل سوم به ۱۳ میلیون تومان کاهش پیدا می‌کند. این در حالی است که میزان هزینهٔ مواد تغییرفازدهنده در هر متر مربع معادل ۵۰۰ هزار تومان است که نشان می‌دهد با ایجاد یک لایهٔ مواد تغییرفاز و کمی هزینهٔ بیشتر می‌توان در بلند مدت به کاهش چشم‌گیر هزینه‌های مربوط به انرژی دست یافت.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی کاربرد مواد تغییرفازدهنده در بام سبز به عنوان نقش عایق در میزان تغییرات دما پرداخته شده است. به این منظور ابتدا یک ساختمان در شهر تهران به متراژ ۱۰۰ مترمربع با استفاده از نرم‌افزار اسکچ آپ، اوپن استدیو و انرژی پلاس مدل‌سازی شد. پس از طراحی سه مدل مختلف بام استاندارد، بام سبز و بام سبز بهینه‌شده با مواد تغییرفازدهنده میزان تغییرات دما در سه مدل مختلف و در سه کاربری مختلف ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. در مدل اول طبق استاندار مبحث ۱۹ ساختمان، فرض شد ساختمان بدون هیچ عایقی باشد و نوع تمام مصالح از استاندارد مبحث ۱۹ ساختمان تبعیت کند.

در مدل دوم با استفاده از پیش‌فرض نرم‌افزار انرژی پلاس یک‌لایه بام سبز به ساختمان اضافه شد. طبق خروجی‌های به‌دست‌آمده با اضافه شدن بام سبز به عنوان عایق عمل کرده و باعث افزایش دما در ساختمان در فصول سرد و کاهش دما در فصل‌های گرم سال نسبت به مدل اولیه شده است.

در مدل سوم که مدل بهینه‌شدهٔ بام سبز با استفاده از مواد تغییرفازدهنده بود، یک لایه از مواد تغییرفازدهنده با بام سبز اضافه شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، این مدل بیشترین کارایی را نسبت به مدل دوم داشت و باعث کاهش قابل توجه دما در فصل‌های گرم سال و افزایش دما در فصل‌های گرم سال در ساختمان شد. درنتیجه می‌توان نتیجه گرفت با استفاده از مواد تغییرفازدهنده در بام سبز می‌توان در افزایش آسایش حرارتی ساختمان و درنتیجه صرفه‌جویی انرژی نقش کاربردی و قابل توجهی را ایجاد کرد.

اما به طور کلی در فصل تابستان و در کاربری مسکونی بهترین نتیجه برای درصد کاهش و افزایش دما حاصل شده است. به صورت میانگین مشاهده می‌شود که درصد افزایش و کاهش دما در مدل ۳ نسبت به مدل ۲ در هر سه کاربری ۱۰ درصد بیشتر است. و همچنین به صورت میانگین مشاهده می‌شود که کاهش مصرف انرژی سرمایشی مدل ۳ نسبت به مدل ۲ در کاربری تجاری ۸/۷ درصد، کاربری اداری ۱۰/۱ درصد و کاربری مسکونی ۱۰/۸ درصد بیشتر است. به صورت مشابه مشاهده می‌شود به صورت میانگین کاهش مصرف انرژی گرمایشی مدل ۳ نسبت به مدل ۲ در کاربری تجاری ۱۰/۱ درصد، در کاربری اداری ۸/۵ درصد و در کاربری مسکونی ۵/۲ درصد بیشتر است.

منابع

1. Technology Roadmap. Solar Heating and Cooling. International energy Agency (IEA). Available from, 10-30-2012.
2. United Nation, Department of Economic and Social affairs, Accessed 2018.
3. Farhoudi R.,Rahnamaei M. & Teymouri E. Measuring the sustainable development of urban neighborhoods using fuzzy logic and geographic information system (case study: District 17 of Tehran Municipality). Human Geography Research Quarterly,2011, Volume 43, Number 77, pp. 89-110. [Persian]
4. Luczac A. & Just M. Sustainable development of territorial units: MCDM approach with optimal tail section, Ecological modelling,2021. Vol. 457, pp. 109675.
5. Zandieh M. & Parvadinezhad S. Sustainable development and its concepts in Iranian residential architecture. Housing and Village Environment Quarterly,2010. Volume 29, Number 130, pp. 2-21 [Persian] .
6. Cavadini G. & Cook L. Green and cool roof choices integrated into rooftop solar energy modelling, Applied Energy,2021. Vol. 296, pp. 117082.
7. Maleki R. & Karegar A. Green roof, sustainable architecture and green materials and its application to reduce energy consumption. International conference New researches in civil engineering, architecture and urban planning, March 24, 2014, Istanbul. [Persian]
8. Maftouni N. & Askari M. Biulding energy optimization: Implementing green roof and rainwater harvester system for residential building, Journal of Renewable Energy and Environment,2019. Vol. 6, No. 2, pp. 38-45.
9. Sadeghian O., Mradzadeh A., Mohammadi-Ivatloo B., Abapour M., Anvari-Moghadam A., Shiun Lim J. & Marquez F. A comprehensive review on energy saving options and saving potential in low voltage electricity distribution networks: building and public lighting, Sustainable Cities and Socities,2021. Vol. 72, pp. 103064.
10. Shahsavari A. & Akbari M. Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions, Renewable and Sustainable Energy Reviews,2018. Vol. 90, pp. 275-291.
11. Hereher M. & Kenawy A. Exploring the potential of solar, tidal, and wind energy resources in Oman using an integrated climatic-socioeconomic approach, Renewable Energy,2020. Vol. 161, pp. 662-675.
12. Pirasaci T. Investigation of phase state and heat storage from the phase change material (PCM) layer integrated into the exterior walls of residential-apartment during heating season, Energy,2020. Vol. 207, pp. 118-176.
13. Pandey A., Hossain M., Tyagi V., Abd Rahim N., Selvaraj A. & Sari A. Novel approaches and recent developments on potential applications of phase change materials in solar energy, Renew. Sustain. Energy Rev,2018. Vol. 82, pp. 281-323.
14. Faraj K., Khaled M., Faraj J., Hachem F. & Castelian C. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications, Journal of Energy Storage, 2021.Vol. 33, pp. 101913.
15. Motawa, I., Almarshad, A. A knowledge-based BIM system for building maintenance. Autom. Constr. 29,2013. 173–182.
16. Vakilinezhad M., Dias P. & Ergan S. Achieving model-based safety at construction sites: BIM and safety requirements representation,2016. Proc., 33rd CIB W78 Conf., Auckland, New Zealand: Univ. of Auckland.
17. Yang H., Yu H., Dong N. & Ozaki A. Thermal and energy performance of green roof and cool roof: A comparison study in Shanghi area, Journal of Cleaner Production,2020. Vol. 267, pp. 122-205.
18. Whatley M. B. Life-cycle cost-benefit analysis of green roofing systems: the economic and environmental impact of installing green roofs on all atlanta public schools,2011. Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology, United State.
19. Ouldboukhitine S., Belarbi R. & Sailor D. Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings, Applied Energy,2014. Vol. 114, pp. 273-282.
20. Zhou L., Wang Qi., Li Y., Liu M. & Wang R. Green roof simulation with a seasonally variable leaf area index, Energy & Buildings,2018. Vol. 174, pp. 156-167.
21. Berardi U. The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits, Energy and Buildings,2016. Vol. 121, pp. 217-229.
22. Kianparvar S. Analyzing the use of phase change materials in the wall of the room and estimating its effect on reducing heating energy consumption in the winter season. Under the guidance of Mehdi Marafet,2009. Technical and Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran. [Persian]
23. Al-mudhafar A., Hamzah M. & Tarish A. Potential of integrating PCMs in residential building envelope to reduce cooling energy consumption. Case Studies in Thermal Engineering,2021 Vol.27, pp. 101360.
24. Dutil Y., Rousses D., Lassue S., Zalewski L., Joulin A., Virgone F. & Cabeza F. Modeling phase change materials behavior in building applications: Comments on materials characterization and model validation, Renewable Energy,2014. Vol. 61, pp. 132-135.
25. Liu Z., Hou J., Meng X. & Dewancker B. A numerical study on the effect of phase-change material (PCM) parameters on the thermal performance of lightweight building walls, Case Studies in Construction, Materials,2021. Vol. 15, pp. 758.