Archive of SID

ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2020;20(7):1883-1894

# Thermal Performance Investigation of Residential Buildings with Cool and Green Roofs under Different Climates of Iran

ARTICLE INFO

*Article Type*
Original Research

*Authors*
Yazdani H.*[1] *MSc,*
Yaghoubi M.[1] *PhD*

**How to cite this article**
Yazdani H, Yaghoubi M. Thermal Performance Investigation of Residential Buildings with Cool and Green Roofs under Different Climates of Iran. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(7):1883-1894.

ABSTRACT

Cooling and heating energy accounts for a significant portion of the total energy consumption in residential sector. Building envelope is exposed to sunlight and outside air and therefore have a significant role in determining the thermal loads of buildings. Meanwhile, roofs which are exposed to sunlight all the day long are important envelope components and have a significant share of buildings energy consumption. Therefore, applying appropriate roof solutions can significantly reduce building energy consumption for air-conditioning and improve indoor comfort conditions. This paper aims to investigate the effect of different roofing techniques on thermal performance of a single-storey residential building with two types of uninsulated and insulated configurations under different climatic conditions of Iran. For this purpose, different cool roof albedos 0.5, 0.7, and 0.9 and two types of green roofs, GR with actual local rainfall and wet GR, are considered. The thermal loads of the buildings are calculated using the DesignBuilder software and compared with a conventional cast concrete roof. The results show that by choosing an appropriate type of roof technique, the total air-conditioning energy requirement of the building can be reduced between 7-31%, depending on the building configuration and climatic condition.

**Keywords** Cool Roof; Green Roof; Building Energy Performance; Climatic Conditions; Simulation

[1]Mechanical Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

***Correspondence**
*Address:* Mechanical Engineering Department, Faculty of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran. Postal Code: 7193616548.
*Phone*: -
*Fax*: -
hamedme.yazdani@gmail.com

***Article History***
Received: November 05, 2019
Accepted: April 19, 2020
ePublished: July 20, 2020

CITATION LINKS

[1] The coming sustainable energy transition: History ... [2] Sustainable buildings: An ... [3] Deep renovation in existing residential buildings through façade additions: A case study ... [4] A review on the generation, determination and mitigation ... [5] The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand ... [6] Heat island research in Europe: ... [7] Assessment of the impact of cool roofs in temperate climates through a comparative experimental ...[8] Assessment of the effectiveness of cool and green roofs for the mitigation of the heat island effect and for the improvement of thermal comfort ... [9] Energy utilizability concept as a retrofitting solution selection ... [10] Green and cool roofs' urban heat island mitigation ... [11] Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: Evaluation with ... [12] Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in ... [13] Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed ... [14] Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in ... [15] The impacts of applying typical and aesthetically–thermally optimized TiO2 pigmented coatings on cooling and heating load demands of a typical residential ... [16] Reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs in ... [17] An integrated method to valuate the function of green roofs in absorbing air ... [18] Numerical assessment of the urban green space scenarios on urban heat island and thermal comfort ... [19] Geography of ... [20] Case study of the upgrade of an existing office building for low energy ... [21] An energy and comfort comparison between passive cooling ... [22] Energy plus: Energy simulation ... [23] Modeling daylight availability and irradiance components ... [24] A green roof model for building energy simulation ... [25] Contrasting the capabilities of building energy performance ... [26] A procedure for calculating thermal response factors ... [27] Comfort, climate analysis and building design ... [28] Uncertainty sources and calculation approaches ...

*Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.*

www.SID.ir

Archive of SID



# بررسی عملکرد حرارتی ساختمان‌های مسکونی با سقف‌های خنک و سبز در اقلیم‌های مختلف ایران

**حامد یزدانی* MSc**
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
**محمود یعقوبی PhD**
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

**چکیده**
بخش عمده مصرف انرژی در بخش خانه‌های مسکونی مربوط به گرمایش و سرمایش ساختمان است. نماهای خارجی ساختمان‌ها در معرض نور خورشید و هوای محیط بیرون بوده و نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین بارهای حرارتی ساختمان دارند. در این میان، سقف‌ها که در تمام طول روز در معرض تابش خورشیدی هستند، از اجزای مهم ساختمانی بوده و سهم قابل توجهی از مصرف انرژی یک ساختمان مربوط به آنها است. لذا به‌کارگیری راه‌حل‌های مناسب برای سقف‌ها موجب کاهش قابل توجه مصرف انرژی ساختمان برای تهویه مطبوع و بهبود شرایط راحتی محیط داخل ساختمان می‌شود. در این مقاله تأثیر روش‌های مختلف پوشش سقف، بر عملکرد حرارتی یک ساختمان یک طبقه مسکونی با دو نوع طراحی غیرعایق و عایق‌بندی‌شده، در اقلیم‌های مختلف جوی ایران بررسی می‌شود. برای مطالعه سه نوع سقف خنک با ضرایب بازتابش خورشیدی ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ و دو نوع سقف سبز، که یکی به‌طور طبیعی در معرض بارش‌های جوی و دیگری همیشه مرطوب نگهداری می‌شود، در نظر گرفته شده و بارهای حرارتی سالیانه مورد نیاز ساختمان جهت تأمین شرایط آسایش، با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر محاسبه و با سقف معمول بتنی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد، با انتخاب پوشش مناسب سقف، می‌توان انرژی کل مورد نیاز ساختمان در بخش تهویه مطبوع را بین ۷ تا ۳۱% با توجه به نوع طراحی ساختمان و اقلیم منطقه کاهش داد.

**کلیدواژه‌ها:** سقف خنک، سقف سبز، عملکرد انرژی ساختمان، شرایط اقلیمی، شبیه‌سازی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۳۱
*نویسنده مسئول: hamedme.yazdani@gmail.com

## مقدمه

امروزه اثرات گرمایش جهانی، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع انرژی، از مباحث مورد علاقه در اغلب کشورها است[1]. ساخت و نگهداری ساختمان‌ها، مصرف حدود ۴۰% انرژی اولیه مورد نیاز جهان و نیز تولید ۳۳% گازهای گلخانه‌ای در مقیاس جهانی را شامل می‌شود[2]. از طرفی پژوهش‌ها نشان می‌دهند، در بخش ساختمان، پتانسل بسیار بالایی برای بهبود توسعه پایدار و بهره‌وری انرژی جهانی وجود دارد[3]. در این راستا، طراحی ساختمان‌های انرژی کارا در جهت محدودکردن پدیده گرمایش جهانی و کاهش اثرات مخرب تغییرات اقلیمی، اقدامی ضروری به‌نظر می‌رسد.

با رشد روزافزون شهرها، به‌تدریج جاده‌ها و مصالح ساختمانی با خصوصیات جذب تابش خورشیدی زیاد، نفوذپذیری کم و جرم حرارتی زیاد، جایگزین پوشش گیاهی منطقه شده و این امر باعث افزایش قابل ملاحظه دمای هوا در نواحی شهری نسبت به مناطق روستایی شده است؛ این پدیده که جزیره گرمای شهری (Urban Heat Island) نامیده می‌شود، باعث افزایش دمای شهر، درحالت عادی بین ۲ تا ۵ و در شرایط خاص تا ۱۲درجه کلوین، نسبت به نواحی روستایی می‌شود. این موضوع بر سلامت، کیفیت زندگی افراد جامعه و نیز زیست‌بوم مناطق شهری تأثیرات منفی خواهد داشت[4-6].

پژوهش‌ها نشان می‌دهند، در نتیجه تابش خورشید دمای بیرونی سقف بسته به هر منطقه تا ۵۰ تا ۶۰درجه سانتی‌گراد می‌رسد[7]. از طرفی از آنجایی که سقف ساختمان‌ها، حدود ۲۰ تا ۲۵% سطوح شهری را تشکیل می‌دهند، با طراحی مناسب می‌توانند باعث کاهش دمای سطح و در نتیجه هوای شهر شوند[8]. برای این منظور، دو نوع سقف خنک (بازتاب‌کننده) و سبز، که علاوه‌بر کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، باعث کارآیی انرژی بهتر ساختمان می‌شوند، پیشنهاد شده است[9].

### سقف خنک

سقف‌های خنک با دو مشخصه کلی ضریب تابش حرارتی و ضریب بازتابش خورشیدی زیاد شناخته می‌شوند. ضریب بازتابش خورشیدی زیاد این سقف‌ها موجب شده تا در طول روز بیشتر تابش خورشیدی رسیده به سقف، به آسمان منعکس شود و لذا سقف خنک نگه داشته می‌شود؛ همچنین ضریب تابش حرارتی زیاد این نوع سقف‌ها، باعث می‌شود تا در طول شب حرارت جذب‌شده در مصالح سقف بیشتر به آسمان تابیده شود. معادله ساده‌شده تعادل انرژی روی سقف افقی، با حذف ترم‌های شار حرارتی آنتروپوجنیک (Anthropogenic) و شار حرارتی افقی ناشی از انتقال جرم، در رابطه ۱ آورده شده است:

$$Q_R = \dot{Q} + Q_C + Q_S + Q_L \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، $Q_R$ شار خالص تشعشعی واردشده به سطح، $\dot{Q}$ نرخ انرژی ذخیره‌شده در سقف، $Q_C$، $Q_S$ و $Q_L$، شار حرارتی هدایت، جابجایی و نهان خارج‌شده از سطح هستند. با توجه به این معادله، در سقف‌های خنک کاهش تابش خالص ورودی به سقف ناشی از افزایش تشعشع و بازتابش خورشیدی، کاهش انرژی ذخیره‌شده در سقف، شار هدایت و جابجایی حرارتی را به‌دنبال خواهد داشت.

### سقف سبز

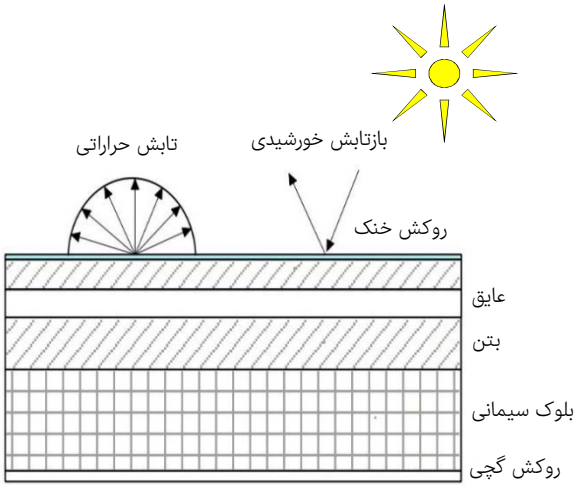
سقف سبز یک سیستم لایه‌ای متشکل از پوشش گیاهی و لایه خاک به‌عنوان محیط رشد گیاه، بر روی یک غشای ضد آب است. پوشش گیاهی بر روی این سقف‌ها باعث کاهش بارهای حرارتی ساختمان، ناشی از تابش خورشیدی و دمای هوای بیرون می‌شود؛ بدین صورت که گیاه برای ادامه حیات و فعالیت‌هایی نظیر فتوسنتز و تبخیر- فراتراوش (Evapo-Transpiration)، بخشی از حرارت تابش خورشیدی و هوای محیط اطراف را جذب می‌کند. لذا در این سقف‌ها، علاوه‌بر کاهش جذب تابش خورشیدی توسط مصالح ساختمانی سقف، شار گرمای نهان نیز افزایش می‌یابد و در


www.SID.ir

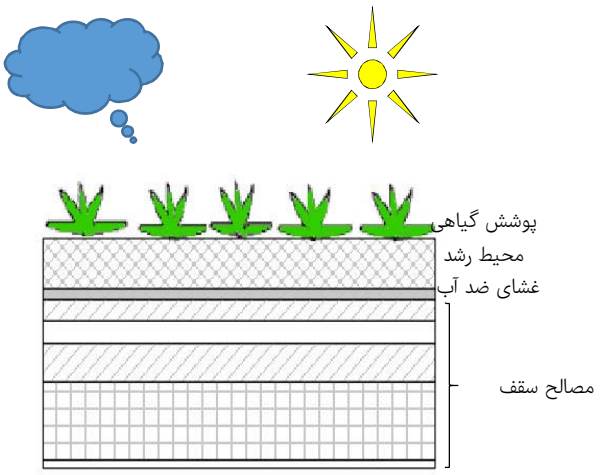
Archive of SID

معادله ۱ دو ترم تابش خورشیدی و شار حرارتی نهان به کاهش بیشتر انرژی ذخیره‌شده در سقف، شار حرارتی جابجایی و هدایت به درون ساختمان، نسبت به سقف خنک کمک می‌کنند. علاوه‌بر این، در این سقف‌ها خاک به‌عنوان یک لایه عایق حرارتی اضافی عمل کرده و رطوبت موجود در خاک و پوشش گیاهی نیز به افزایش لختی حرارتی سقف، با توجه به ظرفیت حرارتی بالای آب کمک می‌کند. این خصوصیات باعث شده تا سقف‌های سبز در اقلیم‌های مختلف آب و هوایی باعث کارآیی حرارتی بهتر ساختمان شوند[10].

در شکل ۱، روکش سقف خنک به همراه سایر مصالح ساختمانی مورد استفاده و در شکل ۲، تصویر شماتیکی از اجزای اصلی پوشش سقف سبز نشان داده شده است.




**شکل ۱)** پوشش سقف خنک و جزییات سایر مصالح سقف




**شکل ۲)** اجزای اصلی پوشش سقف

مطالعات متعددی طی دهه‌های اخیر، برای ارزیابی عملکرد حرارتی ساختمان با بهبود پوشش سقف صورت گرفته است. *شارما* و همکاران[11]، به بررسی عملکرد حرارتی سقف‌های خنک با شرایط مرزی مختلف از جهت اقلیم و مصالح ساختمانی پرداختند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد، با توجه به نوع شرایط مرزی، انتقال حرارت و رطوبت بین سقف و محیط بیرون بسیار متفاوت بوده و منجر به تبادل انرژی متفاوت روی سقف می‌شود و لذا می‌بایست در انتخاب سقف بهینه، نوع مصالح و ناحیه جغرافیایی در نظر گرفته شود. *سینفا* و همکاران[12]، تأثیر سقف‌های خنک را بر روی یک خانه مسکونی یک طبقه، در شرایط اقلیمی مختلف، در دو حالت ساختمان عایق و غیرعایق بررسی کردند. در این پژوهش، کاهش انرژی سرمایشی سالیانه ۱۸ تا ۹۳% با افزایش ضریب بازتابش خورشیدی از ۰/۲۰ به ۰/۸۵ گزارش شد. *سانتاموریس* و همکاران[13]، به بررسی تأثیر سقف سبز بر عملکرد حرارتی ساختمان در فصل زمستان و تابستان، در مدرسه‌ای در شهر آتن پرداختند. نتایج این تحقیق تا ۴۹% کاهش مصرف انرژی کل ساختمان، در نتیجه استفاده از سقف سبز را نشان داد. *پاریزوتو* و *لمبرتس*[14]، طی یک مطالعه موردی در برزیل به‌صورت تجربی نشان دادند که یک بام سبز در یک ساختمان آزمایشی، باعث کاهش ۹۲ تا ۹۷% شار حرارتی در مقایسه با سقف سرامیک و سقف‌های معمول فلزی می‌شود. *یانگ* و همکاران[10]، با بررسی عملکرد حرارتی سقف‌های خنک و سبز در فصل تابستان برای اقلیم گرم و مرطوب سنگاپور با متوسط دمای هوای ۲۸درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۴% نشان دادند، شار حرارتی از سقف برای یک روز طراحی تابستان در صورت استفاده از سقف‌های خنک و سبز به‌جای سقف معمولی به‌ترتیب ۳۷ و ۳۱% کاهش می‌یابد. *بانشی* و *مارویاما*[15]، به بررسی تأثیر دو نوع روکش سقف خنک با ضرایب بازتابش خورشیدی ۰/۶۶ و ۰/۵۴ بر عملکرد حرارتی ساختمان در شش شهر ایران پرداختند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، در صورت استفاده از سقف خنک، با توجه به نوع روکش و اقلیم منطقه، بار سرمایشی بین ۴ تا ۳۶% کاهش و بار گرمایشی بین ۱/۷ تا ۱۵% افزایش، نسبت به سقف آسفالت خواهد داشت. *عبادتی* و *احیایی*[16]، تأثیر استفاده از سقف سبز با آبیاری مداوم پوشش گیاهی، به‌جای سقف آسفالت را در یک خانه دو طبقه مسکونی برای سه اقلیم متفاوت ایران بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد، میزان کاهش مصرف برق سالیانه جهت سرمایش و گرمایش ساختمان برای سه شهر بندرعباس، تهران و تبریز به‌ترتیب ۲۳/۰، ۱۶/۳ و ۱۲/۵% است. *محمدی* و همکاران[17]، در پژوهشی به بررسی پتانسیل سقف سبز در جذب آلاینده‌های هوا در تهران پرداختند. ایشان نشان دادند به‌کارگیری سقف سبز برای همه ساختمان‌های مسکونی تهران (حدود ۱۵% سطح شهر) در مدت ۵۰ سال، منجر به صرفه‌جویی حدود ۵۰۰ میلیون دلار جهت کاهش آلاینده‌ها می‌شود. *ارغوانی* و همکاران[18] به بررسی و مقایسه اثر سقف سبز و پوشش گیاهی سطح شهر، بر جزیره گرمای شهری و آسایش حرارتی در فصل تابستان برای مناطق مختلف تهران پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد در مناطق مسکونی کم جمعیت، به‌طور کلی پوشش گیاهی سبز، منجر به خنک‌ترشدن هوا (تا ۰/۸۶-درجه سانتی‌گراد) و


www.SID.ir

Archive of SID



بهبود آسایش حرارتی شده ولی در مناطق پرجمعیت و صنعتی، این پوشش در شب منجر به افزایش دما (تا ۰/۶۳+درجه سانتی‌گراد) شده است؛ مقایسه سقف سبز و پوشش گیاهی سطح شهر نشان می‌دهد این اثر افزایش دما، برای سقف سبز نسبت به پوشش گیاهی سطح شهر کمتر است. ایشان همچنین گزارش کردند کاهش متوسط روزانه سرعت باد توسط پوشش سبز، منجر به کاهش تهویه مطبوع طبیعی و افزایش آلودگی هوا شده است.

با توجه به مطالعات گذشته، هدف این پژوهش تحلیل و مقایسه اثر سقف‌های خنک و سبز روی عملکرد انرژی سالیانه ساختمان با محاسبه بارهای حرارتی و تعداد ساعات تهویه مطبوع مورد نیاز و نیز بررسی آسایش حرارتی در گرم‌ترین روز سال در ساختمان‌های فاقد تهویه مطبوع با توجه به نوع پوشش سقف، در اقلیم‌های مختلف ایران برای دو نوع ساختمان عایق (طراحی مهندسی) و غیرعایق (طراحی معمولی) است.

## روش تحقیق

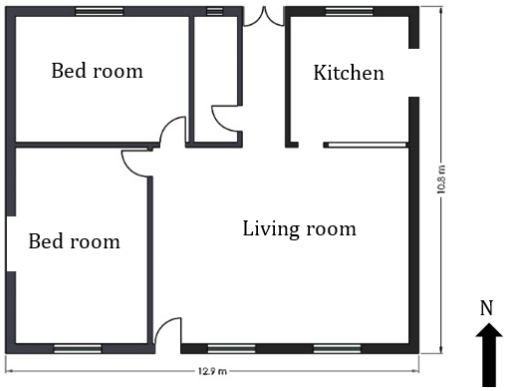
سه نوع سقف خنک و دو نوع سقف سبز برای یک ساختمان یک طبقه مسکونی در دو حالت غیرعایق و عایق‌بندی‌شده در سه اقلیم مختلف ایران، جهت انجام شبیه‌سازی دینامیکی انتخاب شده است.

### اقلیم‌های مورد مطالعه

سه شهر بندرعباس، برای قسمت جنوبی کشور دارای آب و هوای گرم و مرطوب، شیراز در ناحیه مرکزی دارای اقلیم معتدل مدیترانه‌ای و تبریز برای لبه شمالی کشور، دارای اقلیم مدیترانه‌ای با بارش‌های بهاری به‌عنوان نمونه‌ای از اقلیم‌های متفاوت آب و هوایی ایران انتخاب شده‌اند[19]. شهرها بیان‌گر رابطه بین انرژی حرارتی مورد نیاز ساختمان و اقلیم نیز هستند؛ به‌گونه‌ای که در قسمت جنوبی کشور بارهای سرمایشی، در عرض‌های مرکزی کشور بارهای سرمایشی و گرمایشی در تعادل با یکدیگر و در بخش‌های شمالی کشور، بارهای گرمایشی عمده مصرف انرژی ساختمان در بخش تهویه را تشکیل می‌دهند. از پایگاه داده نرم‌افزار متنورم (Meteonorm v7.3)، برای مدل‌کردن شرایط اقلیمی نظیر دمای هوا، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، میزان بارش، سرعت و جهت باد در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر (DesignBuilder v6.1) استفاده شده است.

### مشخصات ساختمان مرجع

برای انجام محاسبات حرارتی، یک ساختمان یک طبقه متداول مسکونی رایج در اغلب شهرهای کشور، با دو نوع ساخت غیرعایق و عایق طبق شکل ۳ در نظر گرفته شده است. ساختمان از طریق جبهه‌های شمالی، جنوبی، سقف و کف در تماس با محیط بیرون و جبهه‌های شرقی و غربی به‌صورت آدیاباتیک (در تماس با ساختمان مجاور) در نظر گرفته شده است. مشخصات معماری، مصالح ساختمانی مورد استفاده و خواص حرارتی مولفه‌های مختلف ساختمان غیرعایق و عایق مدل‌شده در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر به‌ترتیب در جدول‌های ۱ تا ۳ ذکر شده است. شایان ذکر است، نرخ نفوذ هوا برای ساختمان غیرعایق و عایق به‌ترتیب ۱/۸۲ و ۰/۶۱تعویض هوا در ساعت در نظر گرفته شده است[20].




**شکل ۳)** نقشه ساختمان مسکونی یک طبقه مدل‌شده در نرم‌افزار

**جدول ۱)** مشخصات معماری ساختمان مرجع

| نوع | مقدار |
|---|---|
| **مساحت سقف** ($m^2$) | ۱۳۹ |
| **مساحت کف** ($m^2$) | ۱۲۷ |
| **مساحت قسمت تهویه‌شده** ($m^2$) | ۱۱۶ |
| **مساحت دیوار شمالی و جنوبی** ($m^2$) | ۳۹ |
| **مساحت دیوار شرقی و غربی** ($m^2$) | ۳۲ |
| **نسبت سطح پنجره به دیوار، شمال** (%) | ۱۲/۰ |
| **نسبت سطح پنجره به دیوار، جنوب** (%) | ۱۵/۸ |

**جدول ۲)** مصالح ساختمانی مورد استفاده در ساختمان عایق (*) (اعداد به سانتی‌متر هستند)

| مشخصات | مصالح (از خارج به داخل) |
|---|---|
| **دیوار خارجی** | آجرنما (۱۰)، لایه هوا (۱)، عایق پلی‌یورتان (۲/۵)، بتن سبک (۱۰)، لایه هوا (۱)، روکش گچی (۱/۴) |
| **دیوار داخلی** | گچ و خاک (۱/۴)، آجر (۱۰)، گچ و خاک (۱/۴) |
| **سقف** | بتن سبک (۲/۵)، عایق پلی‌یورتان (۲/۵)، بتن سبک (۶)، بلوک سیمانی (۱۵)، روکش گچی (۱/۴) |
| **کف** | بلوکاژ (۳۰)، بتن سبک (۱۰)، عایق پلی‌استایرن (۵)، ملات (۲)، سرامیک (۱) |

(*) ضخامت لایه عایق مصالح دیوار خارجی و سقف در ساختمان غیرعایق، صفر در نظر گرفته شده است.

**جدول ۳)** خصوصیات حرارتی مولفه‌های مختلف ساختمان

| مولفه ساختمانی | مقاومت حرارتی، غیرعایق ($m^2k/W$) | مقاومت حرارتی، عایق ($m^2k/W$) |
|---|---|---|
| **دیوار خارجی** | ۰/۶۷ | ۱/۷۲ |
| **دیوار داخلی** | ۰/۴۶ | ۰/۴۶ |
| **سقف** | ۰/۸۳ | ۱/۷۵ |
| **کف** | ۱/۷۹ | ۱/۷۹ |
| **پنجره** (*) | ۰/۱۷ | ۰/۳۷ |

(*) در ساختمان غیرعایق، پنجره‌ها تک‌جداره و در ساختمان عایق، دوجداره هستند.



www.SID.ir

Archive of SID

### سقف‌های مورد استفاده

برای بررسی تأثیر استفاده از سقف‌های خنک و سبز بر عملکرد حرارتی ساختمان، سه نوع سقف خنک با ضرایب بازتابش خورشیدی ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ و ضریب تابش حرارتی ۰/۹ برای هر کدام و دو نوع سقف سبز، یکی متناسب با اقلیم گرم و مرطوب بندرعباس و دیگری مناسب برای شرایط اقلیمی مدیترانه‌ای شیراز و تبریز، انتخاب شده‌اند. شایان ذکر است یکی از مزیت‌های سقف‌های خنک و سبز، امکان اجرایی‌کردن آنها در ساختمان‌های موجود جهت بهبود عملکرد حرارتی آنها است؛ در حالی که راه‌کارهای دیگر کاهش مصرف انرژی ساختمان نظیر بهینه‌سازی عایق و جرم حرارتی مصالح در عمل برای چنین ساختمان‌هایی ممکن نبوده و یا با هزینه‌های اضافی همراه است. مشخصات پارامترهای اصلی سقف‌های سبز مورد استفاده در جدول ۴ آمده است[10, 21].

**جدول ۴)** مشخصات پارامترهای اصلی سقف‌های سبز

| مشخصات | مقدار | |
|---|---|---|
| | اقلیم گرم و مرطوب | اقلیم مدیترانه‌ای |
| ارتفاع پوشش گیاهی (m) | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ |
| شاخص سطح برگ | ۱/۲ | ۱/۲ |
| ضریب بازتابش گیاه | ۰/۲۲ | ۰/۲۵ |
| ضریب تشعشع گیاه | ۰/۹۵ | ۰/۹۰ |
| حداقل مقاومت روزنه گیاه (s/m) | ۱۸۰ | ۱۲۰ |
| مقدار اولیه رطوبت حجمی خاک | ۰/۱ | ۰/۱۵ |
| حداکثر میزان رطوبت حجمی خاک | ۰/۳ | ۰/۳۲ |
| حداقل میزان رطوبت حجمی خاک | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ |
| ضریب هدایت حرارتی خاک (W/m-K) | ۰/۳۵ | ۰/۳٤ |
| ظرفیت حرارتی خاک (J/kg-K) | ۱۲۰۰ | ۱۵۰۰ |
| چگالی خاک ($kg/m^3$) | ۱۱۰۰ | ۹٦۰ |
| ضخامت لایه خاک (m) | ۰/۱۲ | ۰/۱۲ |

### فرضیات تحلیل عددی

با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر که از موتور شبیه‌سازی دینامیکی انرژی‌پلاس (EnergyPlus v8.9) برای انجام محاسبات حرارتی کمک می‌گیرد، انجام شده است[22]. این برنامه شامل بسیاری از ابزارهای پیشرفته مدل‌سازی، نظیر مدل‌کردن مصالح ساختمانی با قابلیت تنظیم خواص حرارتی، در نظرگرفتن بارهای حرارتی مختلف، الگوریتم‌های مختلف برای محاسبات شرایط آسایش و غیره به‌صورت دینامیک با گام‌های زمانی کوچک است. از قابلیت‌هایی که این نرم‌افزار را نسبت به سایر نرم‌افزارهای مشابه متمایز می‌سازد، می‌توان به داشتن الگوریتم‌های مختلف برای محاسبه ضریب جابجایی حرارتی روی سطوح داخلی و بیرونی، محاسبات پیشرفته عددی برای یافتن نرخ هوای ورودی به ساختمان، محاسبات مربوط به جابجایی جریان هوا بین ناحیه‌های مختلف و توزیع دمای هوای داخل ساختمان اشاره کرد. برای محاسبات مربوط به خواص تشعشعی سطوح مختلف ساختمان، انرژی‌پلاس از مدل *پرز* و همکاران، برای محاسبه تابش مستقیم و پخشی خورشید استفاده می‌کند[23]. انرژی‌پلاس یک مدل اعتبار سنجی‌شده یک‌بعدی بام سبز، با در نظرگرفتن تبخیر- فراتراوش پوشش گیاهی، خواص حرارتی وابسته به زمان خاک، تبادل حرارت تشعشعی و جابجایی را به‌کار می‌برد[24, 25]. در این پژوهش از الگوریتم حل CTF با روش حالت- فضا، مورد استفاده در انرژی‌پلاس و گام زمانی ۳دقیقه‌ای برای مدل‌کردن هدایت گذرا درون مصالح ساختمانی با جرم حرارتی متفاوت استفاده شده است[26].

برای محاسبات مربوط به بارهای حرارتی ساختمان فرضیات زیر صورت گرفته است:

۱- تعداد افراد حاضر در ساختمان، ۴ نفر و حداقل نرخ هوای تازه برای هر فرد ۸لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

۲- بیشینه بهره کل حرارتی ناشی از روشنایی و تجهیزات دیگر ۴/۲وات بر متر مربع در نظر گرفته شده و این مقدار متناسب با برنامه زمانی حضور افراد در محل تغییر می‌کند.

۳- دمای آسایش در زمستان و تابستان به‌ترتیب ۲۱ و ۲۵درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

۴- سیستم‌های تهویه به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که همیشه محل در شریط آسایش قرار داشته باشد[27, 28].

شایان ذکر است، برای یافتن درک درستی از بارهای حرارتی مورد نیاز سالیانه ساختمان ناشی از تأثیرات ایجادشده توسط سقف‌های خنک و سبز، انرژی خالص که مجموع بارهای سرمایشی و گرمایشی بدون در نظرگرفتن بازدهی سیستم‌های تهویه است، به‌عنوان معیاری برای انجام محاسبات انرژی، انتخاب شده است. همچنین در صورت استفاده از بام سبز، ضخامت لایه عایق دیوار نسبت به سقف معمولی کاهش پیدا کرده، تا مقاومت حرارتی هر دو سقف یکسان شده و بدین صورت تأثیر عایق‌کاری بام سبز در نتایج مشخص باشد.

## نتایج و بحث

سقف‌های معمولی و خنک، المان‌های استاتیکی هستند و خصوصیات آنها در شرایط مختلف اقلیمی ثابت می‌ماند ولی در سقف‌های سبز، شرایط اقلیمی بر محتوی آب موجود در پوشش گیاهی تأثیرگذار بوده و به تبع آن، تعادل حرارتی روی سطح خارجی سقف و در نتیجه بارهای حرارتی با توجه به نوع اقلیم متفاوت خواهند بود. از این‌رو، آبیاری پوشش گیاهی عاملی تعیین‌کننده، هنگام استفاده از بام سبز به‌خصوص در نواحی گرم و خشک است. برای ارزیابی حالتی که بام سبز به‌طور منظم آبیاری شده و پوشش گیاهی در حالت بیشینه رطوبت قرار داشته باشد، نرخ آبیاری ۰/۰۱متر بر ساعت در نظر گرفته شده است. این حالت نیازمند هزینه‌های اضافی و منابع مختلف است و فقط برای مقایسه آورده شده است. این وضعیت در نمودارها با حالت سقف سبز، مرطوب مشخص است. در ادامه بارهای حرارتی سالیانه


www.SID.ir

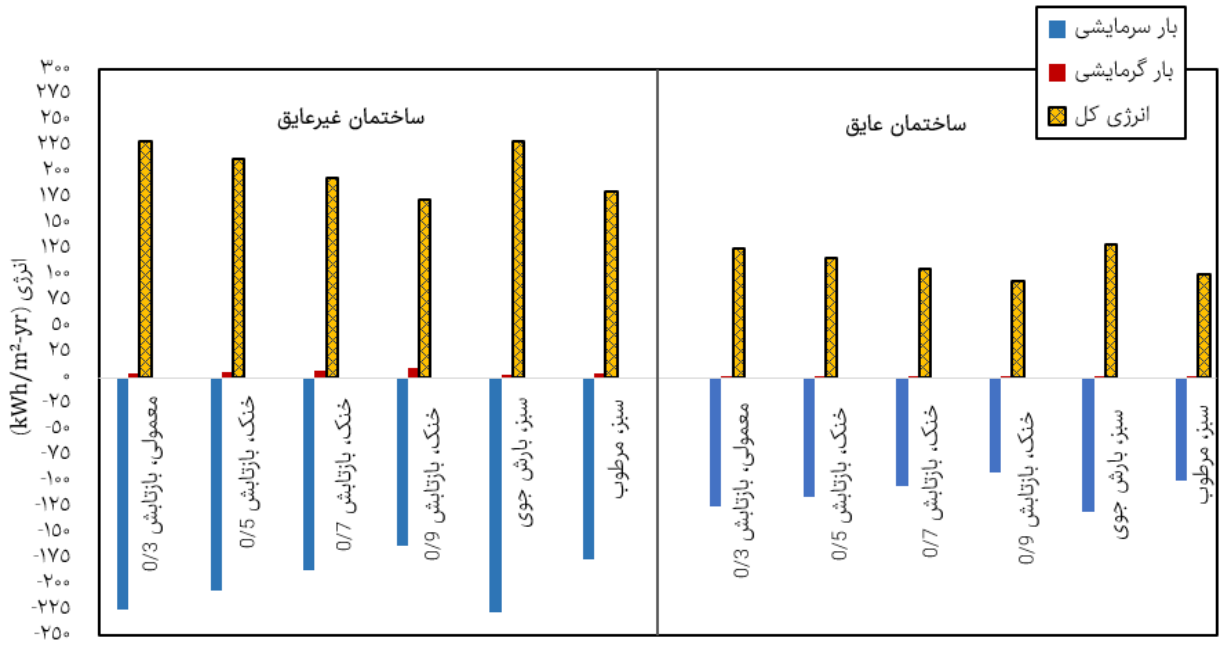
Archive of SID



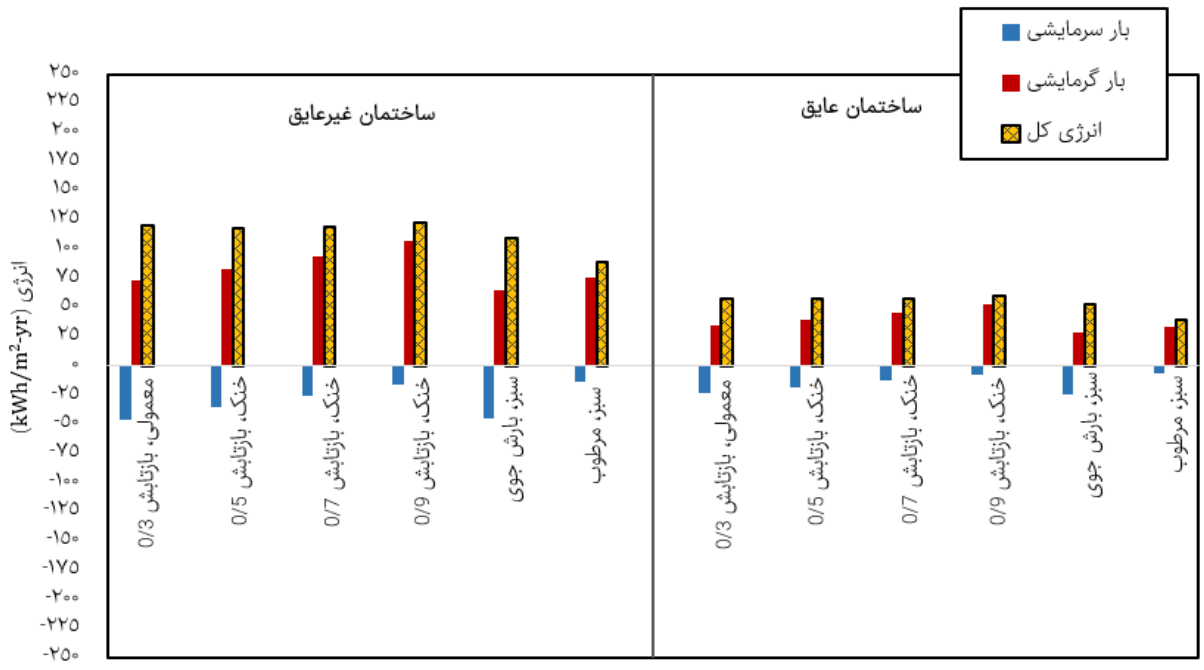
ساختمان برای تهویه مطبوع، تعداد ساعات سالیانه مورد نیاز برای سرمایش و گرمایش فضا و نیز دمای هوای داخل ساختمان در گرم‌ترین روز سال برای اقلیم‌های مختلف آورده شده است.

**انرژی مورد نیاز سالیانه ساختمان**

نتایج شبیه‌سازی دینامیکی حرارتی، مربوط به بار گرمایشی، بار سرمایشی و انرژی مورد نیاز سالیانه ساختمان برای شش نوع سقف، معمولی، خنک با ضرایب بازتابش خورشیدی ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹، سبز با بارش طبیعی جوی و سبز در حالت بیشینه رطوبت، برای دو حالت ساختمان غیرعایق و عایق‌کاری‌شده، برای سه شهر بندرعباس، شیراز و تبریز به‌ترتیب در نمودارهای ۱ تا ۳ آورده شده‌اند. همچنین در جدول ۵، مقادیر عددی بارهای حرارتی برای حالت‌های مختلف به همراه درصد کاهش انرژی کل ساختمان نسبت به سقف معمولی آورده شده است. ابتدا نتایج برای ساختمان غیرعایق تحلیل شده و در ادامه تأثیر عایق‌کاری ساختمان بر بارهای حرارتی سالیانه نشان داده شده است.




**نمودار ۱)** عملکرد حرارتی غیرعایق و عایق با به‌کارگیری پوشش‌های مختلف سقف در بندرعباس




**نمودار ۲)** عملکرد حرارتی ساختمان غیرعایق با به‌کارگیری پوشش‌های مختلف سقف در شیراز



www.SID.ir

Archive of SID

**شکل ۳)** عملکرد حرارتی ساختمان غیرعایق و عایق با به‌کارگیری پوشش‌های مختلف سقف در تبریز

**جدول ۵)** بار گرمایشی، بار سرمایشی، انرژی کل و درصد کاهش انرژی کل نسبت به سقف معمول بتنی برای پوشش‌های مختلف سقف (اعداد برحسب کیلووات ساعت/متر مربع-سال هستند)

| مشخصه شهر | | ساختمان غیرعایق | | | | ساختمان عایق | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | بار سرمایشی | بار گرمایشی | انرژی کل | کاهش انرژی کل (%) | بار سرمایشی | بار گرمایشی | انرژی کل | کاهش انرژی کل (%) |
| بندرعباس | معمولی، بازتابش ۰/۳ | -۲۲۴/۸ | ٤/٥ | ۲۲۹/۰ | ۰/۰ | -۱۲٤/۸ | ۰/۳ | ۱۲٥/۱ | ۰/۰ |
| | خنک، بازتابش ۰/٥ | -۲۰٦/٤ | ٥/٦ | ۲۱۲/۰ | ۷/٤ | -۱۱٥/۰ | ۰/٦ | ۱۱٥/٦ | ۷/٦ |
| | خنک، بازتابش ۰/۷ | -۱۸۷/۰ | ۷/۳ | ۱۹٤/۳ | ۱٥/۲ | -۱۰٤/٥ | ۱/۰ | ۱۰٥/٦ | ۱٥/٦ |
| | خنک، بازتابش ۰/۹ | -۱٦۳/۲ | ۹/٦ | ۱۷۲/۹ | ۲٤/٥ | -۹۲/٥ | ۱/۷ | ۹٤/۲ | ۲٤/۷ |
| | سبز، بارش جوی | -۲۲۷/٥ | ۲/٤ | ۲۲۹/۹ | -۰/٤ | -۱۲۹/٦ | ۰/۱ | ۱۲۹/۷ | -۳/۷ |
| | سبز، مرطوب | -۱۷٥/٦ | ٤/۸ | ۱۸۰/٤ | ۲۱/۲ | -۱۰۰/۰ | ۰/۳ | ۱۰۰/۳ | ۱۹/۸ |
| شیراز | معمولی، بازتابش ۰/۳ | -٤٦/٥ | ۷۳/۹ | ۱۲۰/٤ | ۰/۰ | -۲۳/۷ | ۳٤/٥ | ٥۸/۲ | ۰/۰ |
| | خنک، بازتابش ۰/٥ | -۳٥/٤ | ۸۳/۱ | ۱۱۸/٥ | ۱/٦ | -۱۷/۸ | ۳۹/٥ | ٥۷/۳ | ۱/٦ |
| | خنک، بازتابش ۰/۷ | -۲٥/۲ | ۹٤/۰ | ۱۱۹/۲ | ۱/۰ | -۱۲/۱ | ٤٥/٤ | ٥۷/٥ | ۱/۲ |
| | خنک، بازتابش ۰/۹ | -۱٦/۲ | ۱۰۷/۱ | ۱۲۳/۳ | -۲/٤ | -۷/۱ | ٥۲/٥ | ٥۹/۷ | -۲/٥ |
| | سبز، بار جوی | -٤٥/۰ | ٦٥/۰ | ۱۱۰/۰ | ۸/٦ | -۲٤/۳ | ۲۸/۲ | ٥۲/٥ | ۹/۸ |
| | سبز، مرطوب | -۱۳/٥ | ۷٥/۳ | ۸۸/۷ | ۲٦/۳ | -٦/۰ | ۳٤/۱ | ٤۰/۲ | ۳۱/۰ |
| تبریز | معمولی، بازتابش ۰/۳ | -۱۷/۷ | ۱۷٥/۰ | ۱۹۲/۷ | ۰/۰ | -۷/۷ | ۹۱/۱ | ۹۸/۷ | ۰/۰ |
| | خنک، بازتابش ۰/٥ | -۱۳/۲ | ۱۸٤/۳ | ۱۹۷/٥ | -۲/٥ | -٥/٤ | ۹٦/۱ | ۱۰۱/٥ | -۲/۸ |
| | خنک، بازتابش ۰/۷ | -۹/٤ | ۱۹٤/۷ | ۲۰٤/۱ | -٥/۹ | -۳/٥ | ۱۰۱/۸ | ۱۰٥/۲ | -٦/٦ |
| | خنک، بازتابش ۰/۹ | -٦/٤ | ۲۰٦/٦ | ۲۱۲/۹ | -۱۰/٥ | -۲/۰ | ۱۰۸/۳ | ۱۱۰/۳ | -۱۱/۸ |
| | سبز، بارش جوی | -۲۲/۳ | ۱٥۹/۸ | ۱۸۲/۱ | ٥/٥ | -۱۱/۰ | ۸۲/۲ | ۹۳/۲ | ٥/٦ |
| | سبز، مرطوب | -٤/٥ | ۱۷۳/۳ | ۱۷۷/۹ | ۷/۷ | -۱/۲ | ۹۰/۲ | ۹۱/٤ | ۷/٤ |

نتایج در نمودار ۱ برای شهر بندرعباس، سقف خنک با ضریب بازتابش خورشیدی ۰/۹، حالت بهینه بوده و باعث کاهش ۲۴/۵% انرژی کل نسبت به سقف معمولی می‌شود؛ این در حالی است که برای این سقف، بار گرمایشی تقریباً ۲ برابر شده ولی با توجه به کاهش ۳۷درصدی بار سرمایشی و اینکه در این اقلیم بارهای سرمایشی غالب هستند، این سقف در مجموع عملکرد حرارتی بهتری داشته است. سقف سبز باعث کاهش ۴۲/۹% بار گرمایشی شده که این میزان اثر عایق‌کاری سقف سبز در زمستان را به‌خوبی نشان می‌دهد، ولی بار سرمایشی با توجه به اثر ناچیز کاهش اتلافات انرژی از طریق گرمای نهان در سقف به‌دلیل کاهش تبخیر ناشی از رطوبت بالای محیط در این اقلیم و نیز جذب بالای نور خورشید توسط پوشش گیاهی و در نتیجه بالارفتن دمای سقف سبز نسبت به سقف خنک، تقریباً ثابت مانده است. با آبیاری پوشش گیاهی، اثر خنک‌کاری سقف سبز در تابستان افزایش


www.SID.ir

Archive of SID


داشته است و بار سرمایشی و انرژی کل به‌ترتیب ۲۱/۹ و ۲۱/۲% نسبت به سقف معمولی کاهش یافته‌اند.

نتایج در نمودار ۲ برای شهر شیراز نشان می‌دهد، سقف سبز در حالت مرطوب بهترین عملکرد حرارتی را بین دیگر سقف‌های انتخابی داشته است. برای این نوع سقف، بار سرمایشی ۲۹/۰% کاهش، بار گرمایشی تقریباً ثابت مانده و در مجموع انرژی کل ۲۶/۳% کاهش یافته است. سقف سبز در حالت عادی، باعث کاهش ۸/۳ درصدی انرژی کل شده، برای این سقف، بار سرمایشی، ۳/۲% کاهش و بار گرمایشی، ۱۲/۰% کاهش یافته است. مشاهده می‌شود برای این نوع سقف، در فصل زمستان اثر عایق‌کاری بام سبز به‌دلیل بارش‌های جوی افزایش چشم‌گیری داشته ولی در فصل تابستان پوشش گیاهی خشک، به بهبود عملکرد حرارتی ساختمان کمک چندانی نکرده است. سقف خنک با ضریب بازتابش خورشیدی ۰/۵، بهترین عملکرد حرارتی را بین سایر سقف‌های خنک در این اقلیم داشته است. برای این نوع سقف، بار سرمایشی ۲۳/۹% کاهش، بار گرمایشی ۱۲/۵% افزایش و انرژی کل ۱/۶% نسبت به سقف معمول بتنی کاهش یافته است.

در نمودار ۳ مشاهده می‌شود، برای شهر تبریز بارهای گرمایشی، نسبت به بارهای سرمایشی سهم بسیار بیشتری در انرژی مورد نیاز کل ساختمان داشته‌اند و لذا سقفی بهینه خواهد بود که در فصل زمستان عملکرد حرارتی بهتری داشته باشد. سقف‌های خنک با توجه به ضریب بازتابش و تشعشع زیاد، بخش عمده‌ای از تابش خورشیدی وارد بر سقف و نیز حرارت موجود در خود را به محیط بر می‌گردانند که این باعث افزایش بارهای گرمایشی شده و در صورت استفاده از این سقف‌ها انرژی کل بین ۲ تا ۱۱% افزایش می‌یابد. برای سقف سبز، بارهای سرمایشی، گرمایشی و انرژی کل به‌ترتیب ۲۶/۰، ۸/۷ و ۵/۵% کاهش می‌یابند، در حالی که مقادیر مشابه برای سقف سبز مرطوب، ۷۴/۶، ۱/۰ و ۷/۷% است. از نتایج مشخص است، با توجه به بارش‌های جوی فراوان در شهر تبریز عمکلرد حرارتی سقف سبز در حالت طبیعی و با آبیاری مداوم، از لحاظ پتانسیل سقف در کاهش انرژی کل سالیانه نسبت به دو شهر بندرعباس و شیراز شباهت بیشتری داشته است. همچنین مشاهده می‌شود، سقف سبز در حالت بارش طبیعی در فصل زمستان عملکرد حرارتی بهتری داشته است که دلیل آن کاهش اتلافات حرارتی از طریق گرمای نهان به‌دلیل محتوی کمتر آب نسبت به سقف مرطوب است.

در نمودارها بارهای حرارتی سالیانه برای ساختمان عایق نیز نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، برای شهر بندرعباس در نتیجه عایق‌کاری ساختمان بارهای سرمایشی، گرمایشی و انرژی کل به‌ترتیب ۴۴/۵، ۹۳/۳ و ۴۵/۴% نسبت به ساختمان غیرعایق کاهش می‌یابند. همچنین برای این نوع ساختمان، سقف خنک با ضریب بازتابش خورشیدی ۰/۹ باعث کاهش ۲۴/۷درصدی انرژی کل شده و از این حیث بهترین عملکرد را بین سایر سقف‌ها داشته است.

برای شهر شیراز عایق‌کاری ساختمان، بارهای سرمایشی، گرمایشی و انرژی کل را به‌ترتیب ۴۹/۰، ۵۳/۳ و ۵۱/۷% نسبت به ساختمان غیرعایق کاهش می‌دهد. برای ساختمان عایق‌کاری‌شده در شهر شیراز، سقف سبز در حالت مرطوب با ۳۱/۰% و پس از آن سقف سبز در حالت طبیعی با ۹/۱% کاهش انرژی کل نسبت به ساختمان مشابه با سقف بتنی بهترین عملکرد حرارتی را داشته‌اند.

عایق‌کاری ساختمان برای اقلیم تبریز، بارهای سرمایشی، گرمایشی و انرژی کل را به‌ترتیب، ۵۶/۵، ۴۷/۹ و ۴۸/۸% نسبت به ساختمان غیرعایق کاهش می‌دهد. برای ساختمان عایق در اقلیم تبریز، سقف سبز در حالت مرطوب با ۷/۴% و سقف سبز در حالت طبیعی با ۵/۶% کاهش انرژی کل نسبت به ساختمان عایق با سقف بتنی، بهترین عملکرد حرارتی را داشته‌اند.

**تعداد ساعات تهویه مطبوع ساختمان**

تعداد ساعات سالیانه مورد نیاز برای تهویه مطبوع ساختمان با سقف معمول بتنی با دو نوع طراحی غیرعایق و عایق برای شهرهای بندرعباس، شیراز و تبریز در جدول ۶ نشان داده شده است. همان گونه که انتظار می‌رود بیشینه تعداد ساعات سرمایش مربوط به بندرعباس با ۶۱ تا ۶۵% ساعات سال، با توجه به نوع طراحی ساختمان و بیشینه تعداد ساعات گرمایش مربوط به تبریز حدود ۵۳% ساعات سال، است. همچنین مشاهده می‌شود، با عایق‌کاری ساختمان تعداد ساعات مورد نیاز سرمایش برای شهر بندرعباس، ۶/۸% افزایش داشته و این در حالی است که بار سرمایشی سالیانه برای این شهر، ۴۴/۵% نسبت به ساختمان غیرعایق کاهش داشته است؛ به‌عبارتی عایق‌کاری ساختمان، به‌طور کلی منجر به کاهش انرژی مصرفی سیستم‌های تهویه مطبوع سرمایشی شده ولی تعداد ساعات کارکرد آنها، به‌خصوص در شب با کاهش اتلافات حرارت از طریق مصالح ساختمان و نیز کاهش نرخ نفوذ هوا نسبت به ساختمان غیرعایق، افزایش می‌یابد. مشخص است که با توجه به کم‌بودن میزان این بارها، به‌راحتی می‌توان با افزایش نرخ هوای ورودی به ساختمان از طریق پنجره‌ها، بار سرمایشی مورد نیاز در این ساعت‌ها را تعدیل کرد.

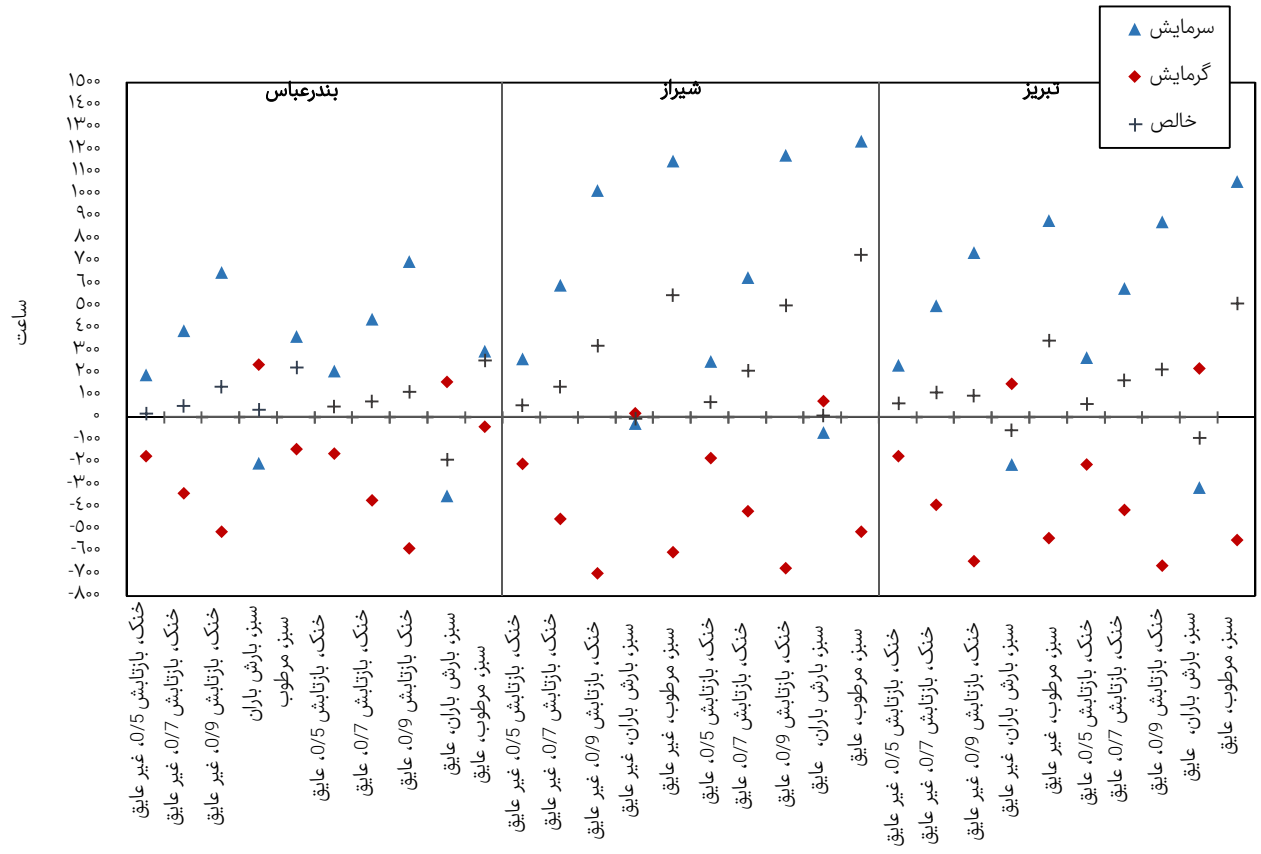
کاهش تعداد ساعات سالیانه تهویه مطبوع ساختمان، در صورت استفاده از سقف‌های خنک و سبز نسبت به سقف معمولی در نمودار ۴ مشاهده می‌شود. اعداد منفی در این شکل به‌معنای افزایش تعداد ساعات تهویه مطبوع است.

**جدول ۶)** تعداد ساعات تهویه مطبوع سالیانه ساختمان برای سقف معمولی

| شهر | ساختمان غیرعایق | | ساختمان عایق | |
|---|---|---|---|---|
| | ساعات سرمایش | ساعات گرمایش | ساعات سرمایش | ساعات گرمایش |
| بندر عباس | ۵۳۶۵ | ۸۶۹ | ۵۷۳٤ | ۲٤۱ |
| شیراز | ۳۰۲۵ | ۳٤۸۸ | ۳۰۳٤ | ۳۳۹٦ |
| تبریز | ۱٦۹۰ | ٤٦۷۳ | ۱٦۲۳ | ٤٦۵۹ |


www.SID.ir

Archive of SID




**نمودار ۴)** کاهش تعداد ساعات سالیانه تهویه مطبوع ساختمان برای سقف‌های مختلف نسبت به سقف معمولی

به‌طور کلی، در صورت استفاده از سقف‌های خنک، تعداد ساعات سرمایش، کاهش و تعداد ساعات گرمایش ساختمان افزایش یافته و این اثر با افزایش ضریب بازتابش خورشیدی سقف، تشدید شده است. به‌طوری که با افزایش ضریب بازتابش خورشیدی سقف، ساعات سرمایش بین ۹۲ تا ۱۱۷۸ساعت کاهش، ساعات گرمایش بین ۱۶۰ تا ۶۹۷ساعت افزایش و تعداد ساعات تهویه مطبوع بین ۲۱ تا ۵۰۴ساعت افزایش، با توجه به اقلیم منطقه و نوع طراحی ساختمان داشته است. برای سقف‌های سبز دو حالت متفاوت مشاهده می‌شود. سقف سبز در حالت بارش طبیعی باعث افزایش تعداد ساعات سرمایش و کاهش تعداد ساعات گرمایش شده است. این امر موید این موضوع است که در سقف سبز خشک با بارش‌های جوی کم، اثر عایق حرارتی نسبت به دیگر پارامترهای تأثیرگذار در این نوع سقف‌ها نظیر افزایش جرم حرارتی و نیز افزایش اتلاف حرارت از طریق گرمای نهان بیشتر است. این اثر عایق حرارتی، دلایل متفاوتی نظیر کاهش اختلاف دمای محیط بیرون و داخل در نتیجه خنک‌ترشدن سقف و نیز کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی روی سقف، در نتیجه اُفت سرعت باد در هنگام عبور از روی پوشش گیاهی دارد. همان گونه که انتظار می‌رود برای سقف سبز در حالت مرطوب، اثر عایق‌کاری کاهش و اثر خنک‌کاری افزایش یافته است. به‌طوری که این نوع سقف مانند سقف‌های خنک عمل کرده است و باعث کاهش تعداد ساعات سرمایشی ساختمان بین ۲۹۸ تا ۱۲۴۰ساعت و افزایش تعداد ساعات گرمایشی بین ۳۹ تا ۶۰۱ساعت و کاهش تعداد ساعات تهویه مطبوع بین ۲۲۵ تا ۷۳۱ساعت، با توجه به اقلیم و نوع طراحی ساختمان شده است.

**بررسی شرایط راحتی ساختمان فاقد تهویه مطبوع در تابستان**

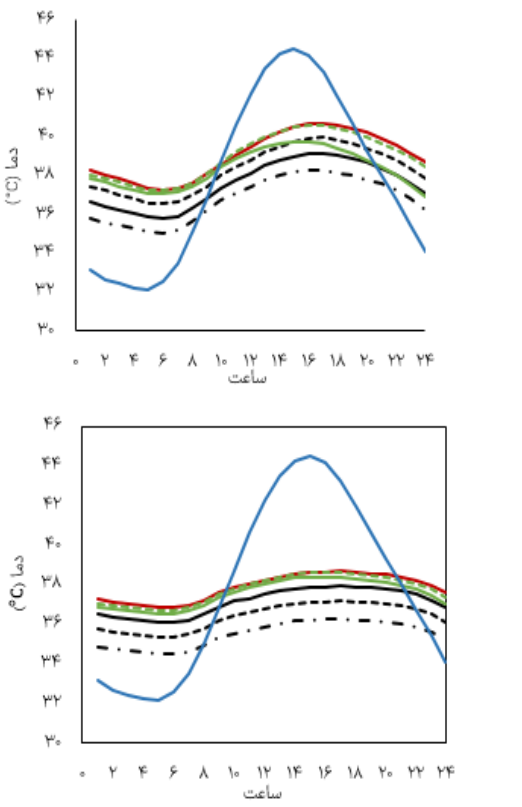
در بعضی از ساختمان‌ها مانند انبارها، کارگاه‌ها و ساختمان‌های مسکونی که در اغلب اوقات سال خالی از سکنه است، سیستم‌های تهویه مطبوع وجود ندارد. لذا ضروری است عملکرد حرارتی این ساختمان‌ها در گرم‌ترین روز سال ارزیابی و مشخص شود.

متوسط دمای هوای داخل برای دو ساختمان عایق و غیرعایق به‌ازای به‌کارگیری پوشش‌های مختلف سقف، در گرم‌ترین روز سال برای سه شهر بندرعباس، شیراز و تبریز در نمودارهای ۵ تا ۷ نشان داده شده است. از نمودارها مشخص است، عایق‌بندی ساختمان باعث کاهش دما و نیز تعدیل نوسانات دمای داخلی ساختمان شده است. برای ساختمان غیرعایق بیشینه دمای هوا بین ۳۱/۷ تا ۴۰/۷درجه سانتی‌گراد بوده در حالی که این مقادیر برای ساختمان عایق، بین ۲۹/۵ تا ۳۸/۷درجه سانتی‌گراد با توجه به نوع اقلیم و سقف مورد استفاده است. همچنین اختلاف بین بیشینه و کمینه دمای هوا داخل ساختمان در گرم‌ترین روز سال، برای ساختمان غیرعایق و عایق به‌ترتیب ۲/۶ تا ۳/۷ و ۱/۸ تا ۲/۱درجه سانتی‌گراد وابسته به نوع اقلیم و سقف مورد استفاده به‌دست آمده است.

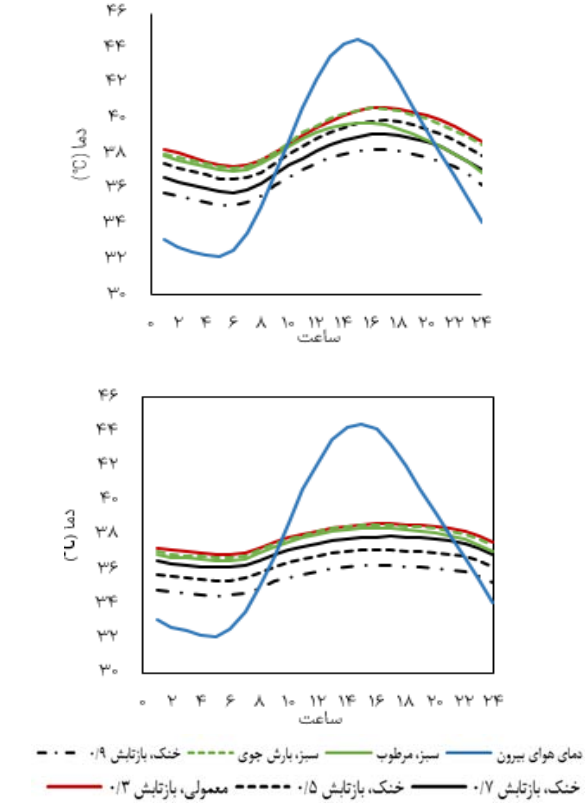

www.SID.ir

Archive of SID






**نمودار ۷)** تغییرات دمای هوای داخل ساختمان برای سقف‌های مختلف در گرم‌ترین روز سال شهر تبریز ۱۰ مرداد؛ ساختمان غیرعایق (نمودار بالا)، ساختمان عایق (نمودار پایین)



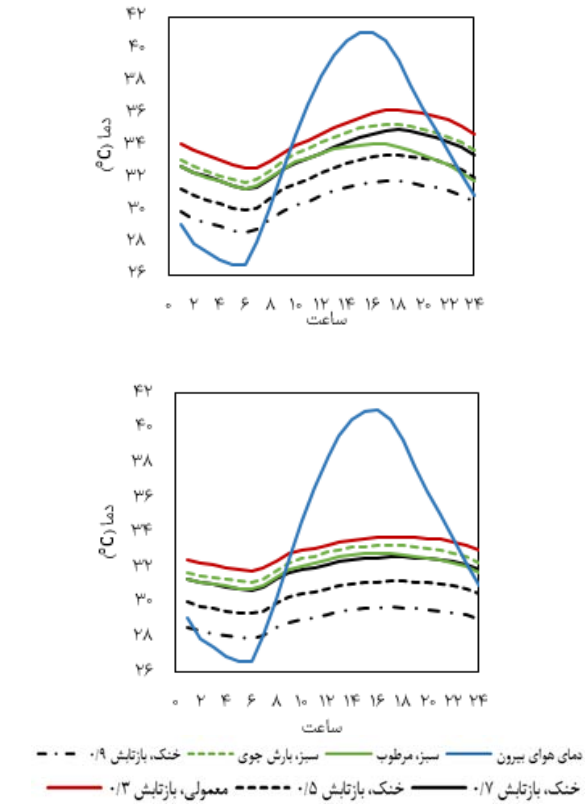

**نمودار ۵)** تغییرات دمای هوای داخل ساختمان برای سقف‌های مختلف در گرم‌ترین روز سال شهر بندرعباس ۲۹ خرداد؛ ساختمان غیرعایق (نمودار بالا)، ساختمان عایق (نمودار پایین)

سقف خنک با ضریب بازتابش خورشیدی ۰/۹ بهترین عملکرد حرارتی را در کاهش دمای هوای داخلی ساختمان در گرم‌ترین روز سال در تمامی حالات ممکن داشته است. در ادامه پتانسیل تکنیک‌های مختلف سقف در کاهش متوسط و بیشینه دمای هوا برای ساختمان غیرعایق بررسی شده است.

برای شهر بندرعباس، در صورت استفاده از سقف خنک با ضریب بازتابش خورشیدی ۰/۹، دمای متوسط و بیشینه روزانه به‌ترتیب ۵/۸ و ۵/۹% نسبت به سقف معمول بتنی کاهش یافته‌اند. برای این شهر سقف سبز در حالت خشک، عملکردی مشابه سقف معمولی داشته و سقف سبز در حالت مرطوب، باعث کاهش ۱/۸درصدی متوسط دما و ۲/۳درصدی بیشینه دما شده است.

برای ساختمان غیرعایق در شهر شیراز، افزایش ضریب بازتابش خورشیدی ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۷ سقف، به‌ترتیب باعث کاهش ۳/۶، ۷/۶ و ۱۱/۹درصدی متوسط دما و ۳/۵، ۷/۷ و ۱۲/۲درصدی بیشینه دما شده است. سقف سبز مرطوب باعث کاهش ۵/۰ و ۶/۰درصدی متوسط دما و بیشینه دما شده در حالی که این مقادیر برای سقف سبز خشک به‌ترتیب ۲/۴ و ۲/۵% است.

برای شهر تبریز، استفاده از سقف‌های خنک باعث کاهش ۲/۲ تا ۶/۸درصدی متوسط دما و ۲/۲ تا ۷/۱درصدی بیشینه دمای هوا




**نمودار ٦)** تغییرات دمای هوای داخل ساختمان برای سقف‌های مختلف در گرم‌ترین روز سال شهر شیراز ۷ مرداد؛ ساختمان غیرعایق (نمودار بالا)، ساختمان عایق (نمودار پایین)



www.SID.ir

Archive of SID

داخلی ساختمان با توجه به ضریب بازتابش خورشیدی سقف خنک شده است. برای این شهر، سقف سبز مرطوب باعث کاهش ۴/۳% متوسط دما و ۵/۲% بیشینه دما شده است، در حالی که این مقادیر برای سقف سبز خشک به‌ترتیب ۱/۵ و ۱/۶% است.

## جمع‌بندی

مقایسه‌ای بین عملکرد حرارتی پوشش‌های مختلف سقف، برای دو نوع ساختمان غیرعایق و عایق برای شرایط اقلیمی بندرعباس، شیراز و تبریز با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس صورت گرفت. نتایج کلی به‌دست‌آمده به شرح زیر است.

الف- برای اقلیم گرم و مرطوب شهر بندرعباس، سقف‌های خنک بسیار موثر در کاهش بار سرمایشی ظاهر شده و با توجه به غالب‌بودن بارهای سرمایشی در این نوع اقلیم، می‌توانند مصرف انرژی ساختمان را تا ۲۴/۷% نسبت به سقف معمولی کاهش دهند. در این نوع اقلیم‌ها، به‌دلیل کمبود بارش‌های جوی سقف‌های سبز در حالت طبیعی و بدون آبیاری، بار سرمایشی مشابه سقف معمولی داشته ولی بار گرمایشی، با توجه به افزایش مقاومت حرارتی ناشی از مقدار محدود محتوی آب موجود در سقف سبز معمولی تا ۶۶/۷% کاهش می‌یابد. با آبیاری پوشش گیاهی، بار سرمایشی تا ۲۱/۹% کاهش و بار گرمایشی، افزایش محسوسی تا ۶/۷% با توجه به نوع طراحی ساختمان خواهد داشت. ولی با توجه به غالب‌بودن بار سرمایشی در این مناطق، در صورت استفاده از سقف سبز برای کاهش‌یافتن مصرف انرژی کل، می‌بایست حتما پوشش گیاهی آبیاری شود.

ب- در عرض‌های جغرافیایی بالاتر و اقلیم‌های معتدل‌تر ناحیه مرکزی ایران که بارهای گرمایشی و سرمایشی تقریباً در تعادل با یکدیگر هستند، سقف‌های سبز از لحاظ عملکرد حرارتی، بازدهی بیشتری نسبت به سقف‌های خنک داشته و با آبیاری مناسب با توجه به نوع اقلیم، می‌توان مصرف انرژی کل را به میزان چشم‌گیری تا حد ۳۱/۰% کاهش داد.

پ- در عرض‌های جغرافیایی شمالی کشور که عمده مصرف انرژی ساختمان در بخش تهویه مطبوع ناشی از بار گرمایشی است، سقف‌های خنک با جذب کمتر انرژی خورشیدی، در مجموع باعث افزایش انرژی مصرفی کل ساختمان بین ۲/۵ تا ۱۱/۸% با توجه به ضریب بازتابش خورشیدی سقف خنک، اقلیم منطقه و نوع طراحی ساختمان می‌شوند. در این مناطق سقف‌های سبز، با افزایش مقاومت حرارتی در فصل زمستان و نیز افزایش اتلافات گرمای نهان، ناشی از فرایند تبخیر- فراتراوش در پوشش گیاهی و در نتیجه خنک‌شدن هوای بالای سقف در فصل تابستان، باعث بهبود عملکرد حرارتی ساختمان می‌شوند، به‌طوری که در صورت استفاده از این نوع سقف‌ها، انرژی مصرفی کل ساختمان در بخش تهویه مطبوع بین ۵/۵ تا ۷/۷% با توجه به نوع سقف سبز و طراحی ساختمان کاهش می‌یابد. در این نواحی آبیاری پوشش گیاهی، نسبت به اقلیم‌های دیگر تأثیر کمتری بر بارهای حرارتی ساختمان دارد.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

**تأییدیه اخلاقی:** اصول اخلاقی رعایت شده است.

**تعارض منافع:** هیچ گونه تعارض منافعی وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** حامد یزدانی، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۷۰%)؛ محمود یعقوبی، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۰%).

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

**فهرست علایم**

| | |
|---|---|
| **Q** | شار حرارتی ($W/m^2$) |
| **T** | دما (°C) |
| **$\bar{H}$** | متوسط روزانه تابش برای هر ماه ($MJ/m^2$) |
| **RH** | رطوبت نسبی (%) |
| **N** | جهت شمال |
| **CTF** | تابع انتقال هدایت |
| **ACH** | تعویض هوا در ساعت |
| **MJ** | مگاژول |
| **h** | ساعت |
| **s** | ثانیه |
| **Kg** | کیلوگرم |
| **kWh** | کیلووات ساعت |
| **C°** | درجه سانتی‌گراد |
| **m** | متر |
| **cm** | سانتی‌متر |
| **$m^2$** | متر مربع |
| **yr** | سال |

**زیرنویس‌ها**

| | |
|---|---|
| **R** | تابش |
| **C** | هدایت |
| **S** | جابجایی |
| **L** | نهان |

## منابع

1- Solomon BD, Krishna K. The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook. Energy Policy. 2011;39(11):7422-7431.

2- Dutil Y, Rousse DR, Guillermo Q. Sustainable buildings: An ever evolving target. Sustainability. 2011;3(2):443-464.

3- Fotopoulou A, Semprini G, Cattani E, Schihin Y, Weyer J, Gulli R, et al. Deep renovation in existing residential buildings through façade additions: A case study in a typical residential building of the 70s. Energy and Buildings. 2018;166:258-270.

4 Rizwan AM, Dennis LY, Chunho LI. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. Journal of Environmental Sciences. 2008;20(1):120-128.

5- Kolokotroni M, Giannitsaris I, Watkins R. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies. Solar Energy. 2006;80(4):383-392.


www.SID.ir

Archive of SID


6- Santamouris M. Heat island research in Europe: The state of the art. Advances in Building Energy Research. 2007;1(1):123-150.
7- Barozzi B, Pollastro MC. Assessment of the impact of cool roofs in temperate climates through a comparative experimental campaign in outdoor test cells. Buildings. 2016;6(4):52.
8- Di Giuseppe E, D'Orazio M. Assessment of the effectiveness of cool and green roofs for the mitigation of the heat island effect and for the improvement of thermal comfort in nearly zero energy building. Architectural Science Review. 2015;58(2):134-143.
9- Yang, J, Chong A, Santamouris M, Kolokotsa D, Lee SE, Tham KW, et al. Energy utilizability concept as a retrofitting solution selection criteria for buildings. Journal of Civil Engineering. Management. 2017;23(5):541-552.
10- Yang J, Kumar DIM, Pyrgou A, Chong A, Santamouris M, Kolokotsa D, et al. Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. Solar Energy. 2018;173:597-609.
11- Sharma A, Conry P, Fernando HJS, Hamlet AF, Hellmann JJ, Chen F. Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: Evaluation with a regional climate model. Environmental Research Letters. 2016;11(6):064004.
12- Synnefa A, Santamouris M, Akbari H. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. Energy and Buildings. 2007;39(11):1167-1174.
13- Santamouris M, Pavlou C, Doukas P, Mihalakakou G, Synnefa A, Hatzibiros A, et al. Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. Energy. 2007;32(9):1781-1788.
14- Parizotto S, Lamberts R. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, southern Brazil. Energy and Buildings. 2011;43(7):1712-1722.
15- Baneshi M, Maruyama Sh. The impacts of applying typical and aesthetically–thermally optimized TiO2 pigmented coatings on cooling and heating load demands of a typical residential building in various climates of Iran. Energy and Buildings. 2016;113:99-111.
16- Ebadati M, Ehyaei MA. Reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs in three different climates of Iran. Advances in Building Energy Research. 2020;14(1):66-93.
17- Mohammadi E, Mirkarimi SH, Mohammadzadeh M. An integrated method to valuate the function of green roofs in absorbing air pollutants; Case study: Tehran. Environmental Resources Research. 2019;7(1):1-8.
18- Arghavani S, Malakooti H, Aliakbari Bidokhti A-A. Numerical assessment of the urban green space scenarios on urban heat island and thermal comfort level in Tehran metropolis. Journal of Cleaner Production. 2020;261:121183.
19- Unknown Author. Geography of Iran [Internet]. Unknown Publisher City: Wikipedia; 2014 [Cited 2019 August 01]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Geography of Iran.
20- Charles A, Maref W, Ouellet-Plamondon CM. Case study of the upgrade of an existing office building for low energy consumption and low carbon emissions. Energy and Buildings. 2019;183:151-160.
21- Zinzi M, Agnoli S. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. Energy and Buildings. 2012;55:66-76.
22- Crawley DB, Lawrie L, Pedersen CO, Winkelmann FC. Energy plus: Energy simulation program. Ashrae Journal. 2000;42(4):49-56.
23- Perez R, Ineichen P, Seals R, Michalsky J, Stewart R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. Solar Energy. 1990;44(5):271-289.
24- Sailor DJ. A green roof model for building energy simulation programs. Energy and Buildings. 2008;40(8):1466-1478.
25- Crawley DB, Hand JW, Kummert M, Griffith BT. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Building and environment. 2008;43(4):661-673.
26- Ouyang K, Haghighat F. A procedure for calculating thermal response factors of multi-layer walls-state space method. Building and Environment. 1991;26(2):173-177.
27- Givoni B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. Energy and buildings. 1992;18(1):11-23.
28- Ding Y, Shen Y, Wang J, Shi X. Uncertainty sources and calculation approaches for building energy simulation models. Energy Procedia. 2015;78:2566-2571.


www.SID.ir