Research Article Volume 29, No. 4, Winter 2025

Analysis of Influential Parameters in Green Roof Design for Reducing Energy Consumption and Carbon Emissions in Tehran*

Received: 11 Nov 2024
Received in revised form: 05 Dec 2024
Accepted: 23 Dec 2024

Zahra Safi Jahaghi[1] iD
Master of Architectural Technology, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran. E-mail: Zahra.safi@ut.ac.ir

Mahdieh Abravesh[2] iD (Corresponding Author)
Assistant Professor, Department of Architectural Technology, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: abravesh@ut.ac.ir

https://doi.org/10.22059/jfaup.2025.388828.673043

Abstract

Energy consumption in buildings accounts for approximately 40% of global energy use and contributes to 33% of greenhouse gas emissions, making it one of the most critical environmental challenges. Green roofs have emerged as a sustainable solution to mitigate energy consumption and enhance urban environmental conditions. By improving thermal insulation, reducing the urban heat island effect, and supporting biodiversity, green roofs offer significant environmental, economic, and social benefits. This study analyzes and evaluates key parameters such as soil thickness, plant species selection, and vegetation characteristics in green roof design aimed at reducing energy consumption and carbon dioxide emissions in Tehran. This study underscores the importance of proper green roof design and plant selection in enhancing urban sustainability and mitigating the impacts of climate change. The findings highlight how integrating ecological design principles into urban planning can lead to more energy-efficient and environmentally friendly buildings. Policymakers and architects are encouraged to adopt green roof design as part of broader efforts to create resilient urban environments capable of withstanding climate challenges. Selecting suitable plant species for green roofs is of paramount importance. These plants must be well-adapted to local climate conditions and resistant to environmental changes such as high temperatures, severe cold, and drought. Proper selection ensures efficient energy performance and resilience to Tehran's climate, contributing to both environmental protection and energy conservation. This research investigated plant characteristics such as Leaf Area Index (LAI), leaf reflectivity, and leaf emissivity using 133 simulation scenarios conducted with the Design Builder software. Eight plant species suitable for Tehran's climate were identified based on their effectiveness in reducing energy loads and providing year-round thermal comfort. These species included Thymus vulgaris, Mesembryanthemum cordifolium , Salvia Rosmarinus, Sedum, Lavandula angustifolia, Achillea millefolium, Frankenia thymifolia , and Hedera helix. These species not only improve insulation and energy efficiency but also play a crucial role in mitigating urban temperature fluctuations by enhancing thermal stability. The results indicate that green roofs can achieve up to 25% energy savings in cooling and heating loads when appropriate plant species are combined with optimized soil layers. During warm periods, plants with higher LAI values (above 3.5) effectively reduced cooling loads through shading and transpiration. Conversely, during colder periods, plants with moderate to low LAI values (between 1 and 4) demonstrated better heat retention, significantly lowering heating loads. These findings highlight the importance of selecting plants with LAI values suited to seasonal energy needs, enabling year-round efficiency. A soil thickness range of 15 to 20 centimeters was identified as optimal, balancing energy savings during both warm and cold seasons. Thicker soil layers enhance water retention and thermal mass, boosting the efficiency of green roofs under temperature extremes. The study also demonstrated that these eight plant species reduced energy consumption by 19% to 24% while significantly lowering CO_2 emissions, ranging from 5.54 to 9.51 kg/m² per year, through improved insulation and shading properties. As a result, green roofs are recommended as a key strategy for promoting sustainable urban development, particularly in cities like Tehran.

Keywords
Analysis of Influential Parameters in Green Roof Design for Reducing Energy Consumption and Carbon Emissions in Tehran

Citation: Safi Jahaghi, Zahra; Abravesh, Mahdieh (2025). Analysis of influential parameters in green roof design for reducing energy consumption and carbon emissions in Tehran, *Journal of Fine Arts: Architecture and Urban Planning*, 29(4), 59-74. (*in Persian*)

Authors retain the copyright and the full publishing. **Publisher: University of Tehran.**

*This article is extracted from the first author's master thesis, entitled: "Modular Green Roof Design and Its Role in Reducing Energy Consumption and Carbon Emissions in Tehran: A Case Study of an Educational Building" under the supervision of the second author at the University of Tehran.

نشریه هنرهای زیبا: معماری و شهرسازی ● دوره ۲۹، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳

تحلیل پارامترهای مؤثر بر کاهش میزان مصرف انرژی و کاهش انتشار کربن در طراحی بام سبز در شهر تهران*

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵
تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳

زهرا صفی جهقی[1]: کارشناس ارشد، گروه فناوری معماری، دانشکده معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
E-mail: Zahra.safi@ut.ac.ir

مهدیه آبروش (نویسنده مسئول) [2]: استادیار گروه فناوری معماری، دانشکده معماری، دانشکدگان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
E-mail: abravesh@ut.ac.ir

https://doi.org/10.22059/jfaup.2025.387450.673036

چکیده

بام سبز به‌عنوان یک راه‌حل پایدار برای کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در محیط‌های شهری شناخته می‌شود. این پژوهش از نوع کاربردی-تحلیلی و مبتنی بر شبیه‌سازی است که به بهینه‌سازی عملکرد بام سبز در تهران با تمرکز بر ارزیابی ضخامت بستر، کاهش ردپای کربن و انتخاب گیاهان مناسب برای شرایط اقلیمی این منطقه پرداخته است. در مجموع ۱۳۳ سناریوی شبیه‌سازی برای تحلیل ویژگی‌های گیاهی نظیر شاخص سطح برگ، بازتاب‌پذیری و انتشار برگ انجام شد. این شبیه‌سازی‌ها چارچوبی برای انتخاب بهترین گونه‌های گیاهی که به‌ویژه برای شرایط اقلیمی تهران شامل دماهای بالا، خشکی طولانی‌مدت و زمستان سرد مناسب هستند، ایجاد کرده و در نهایت هشت گونه بهینه شناسایی شدند. همچنین، در این پژوهش به بررسی مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم کاهش ردپای کربن، از جمله جذب دی اکسیدکربن توسط گیاهان و کاهش نیاز به انرژی برای گرمایش و سرمایش پرداخته شده است. تأثیر ضخامت بستر بر عملکرد بام سبز و بهبود بازده انرژی نیز بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهند که در دوره‌های گرم و سرد، صرفه‌جویی در بار سرمایی و گرمایی تا ۲۵ درصد امکان‌پذیر است. در دوره سرد، گیاهانی با شاخص سطح برگ کمتر نسبت به دوره گرم، عملکرد بهتری در حفظ گرمای داخلی ساختمان داشته‌اند. به‌طور کلی، هشت گیاه انتخابی می‌توانند بین ۱۹ تا ۲۴ درصد از مصرف انرژی سالانه را کاهش دهند.

واژه‌های کلیدی
بام سبز، کاهش میزان مصرف انرژی، کاهش انتشار کربن، عملکرد حرارتی

استناد: صفی جهقی، زهرا؛ آبروش، مهدیه (۱۴۰۳)، تحلیل پارامترهای مؤثر بر کاهش میزان مصرف انرژی و کاهش انتشار کربن در طراحی بام سبز در شهر تهران، *نشریه هنرهای زیبا: معماری و شهرسازی*، ۲۹(۴)، ۵۹-۷۴.

نگارندگان، حق تکثیر و امتیاز کامل انتشار مقاله خود را حفظ می‌کنند.
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

* مقاله حاضر برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده اول با عنوان "طراحی بام سبز مدولار و تاثیر آن بر کاهش میزان مصرف انرژی و ردپای کربن ساختمان در اقلیم تهران (نمونه موردی ساختمان آموزشی)" می‌باشد که با راهنمایی نگارنده دوم در دانشگاه تهران ارائه شده است.

مقدمه

مصرف انرژی در ساختمان‌ها سهمی ۴۰ درصدی از انرژی جهانی را به خود اختصاص داده ومسئول ۳۳درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای است (Piccardo et al., 2020). نیاز به سرمایش و گرمایش موجب افزایش فشار بر منابع انرژی و تشدید تغییرات اقلیمی شده است(Domanicky & Vranay, 2023). بام‌های سبز به‌عنوان راهکاری پایدار، انتقال حرارت از بام را کاهش می‌دهند و به کاهش نیاز انرژی کمک می‌کنند(Zheng et al., 2022). در دوره‌های گرم، گیاهان با سایه‌اندازی و تبخیر آب دمای سطح بام را کاهش داده و موجب کاهش بار سرمایشی می‌شوند. در دوره‌های سرد، این بام‌ها با حفظ گرما از هدررفت حرارت جلوگیری کرده و نیاز به گرمایش را کاهش می‌دهند.

بام‌های سبز ، تبادل حرارت بین محیط بیرون و داخل ساختمان را به حداقل می‌رسانند. در تابستان، این بام‌ها می‌توانند نیاز به سیستم‌های تهویه مطبوع را تا ۲۵ درصد کاهش دهند. سایه‌اندازی و تبخیر تعرق گیاهان نیز به کاهش دمای محیط اطراف بام کمک می‌کند. در زمستان، لایه‌های خاک و پوشش گیاهی با حفظ گرمای داخلی ساختمان، موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی برای گرمایش می‌شوند.

این بام‌ها با کاهش اثر جزایر گرمایی و بهبود کیفیت هوا در مقابله با تغییرات اقلیمی نقش دارند (Gill et al., 2007). انتخاب گیاهان مناسب بر اساس تطابق با شرایط اقلیمی و توانایی جذب کربن و کاهش مصرف انرژی از عوامل مهم در عملکرد بهینه بام‌های سبز است. گیاهان مورد استفاده باید با شرایط اقلیمی منطقه تطابق داشته باشند. در این پژوهش، ۱۳ گونه گیاهی مختلف که به‌طور خاص برای شرایط اقلیمی تهران شامل دماهای بالا، خشکی طولانی‌مدت و زمستان سرد انتخاب و بررسی شدند. سه معیار اساسی برای انتخاب گیاهان شامل نیاز به نور خورشید، تحمل سرما و نیاز به آب مورد ارزیابی قرار گرفته است.(Seyedabadi et al., 2021) این ارزیابی‌ها به شناسایی گیاهان مناسب این اقلیم کمک کرده و تصمیم‌گیری در مورد استفاده از بام سبز در این مناطق را تسهیل می‌کند. شاخص‌هایی نظیر سطح برگ، ضریب تابش و بازتاب برگ برای ارزیابی اثر گیاهان بر کاهش دما و مصرف انرژی به کار گرفته شدند. تأثیر ضخامت خاک بر عملکرد گیاهان نیز بررسی شد. نتایج نشان دادند که بام‌های سبز با کاهش مستقیم و غیرمستقیم دی اکسیدکربن اثرات مثبتی بر پایداری شهری دارند.

روش پژوهش

این پژوهش از نوع کاربردی است و برای شناسایی گونه‌های گیاهی سازگار با اقلیم نیمه‌خشک تهران و ارزیابی تأثیر آنها بر مصرف انرژی وکاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در بام ساختمان‌های موجود،از شبیه‌سازی‌های انرژی همراه با تحلیل پارامترهای گیاهی استفاده شده است.

محل مطالعه

تهران با مساحت ۷۳۰ کیلومتر مربع و ۸/۷ میلیون نفر جمعیت ، حدود ۱۰ درصد جمعیت کشور را در بر می‌گیرد. این شهر که در دامنه جنوبی البرز قرار دارد، بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن دارای اقلیم نیمه‌خشک (BSK) است. میانگین دمای سالانه ۱۷ درجه سانتی‌گراد و میزان بارندگی سالانه حدود ۲۳۰ میلی‌متر است. تهران تابستان‌های گرم با دمای بیشینه ۴۲ درجه سانتی‌گراد و زمستان‌های سرد با دمای کمینه ۱۵- درجه سانتی‌گراد دارد و شدت تابش خورشیدی آن بین ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰۰ وات بر متر مربع متغیر است.

در این مطالعه، زمینی در تهران برای احداث ساختمان آموزشی انتخاب شده است. ساختمان‌های آموزشی به دلیل مساحت سقف مسطح گسترده و نسبت بالای سقف به سطح، پتانسیل بالایی برای استفاده از بام‌های سبز دارند و به نوع سقف حساسیت بیشتری نشان می‌دهند.

مشخصات مدل شبیه سازی شده

برای شبیه‌سازی، کلاس طراحی‌شده بر اساس استانداردهای نویفرت دارای مساحت ۵۰ متر مربع است که با ضوابط سازمان نوسازی مدارس ایران (۴۸ متر مربع) مطابقت دارد. در این طراحی، مساحت هر دانش‌آموز ۲ متر مربع لحاظ شده است. برای نورگیری مناسب، عمق کلاس ۷/۲ متر و فاصله آخرین ردیف دانش‌آموزان از تخته حداکثر ۸ متر تعیین شد. سطح شیشه‌ها معادل ۲۰ تا ۳۰ درصد مساحت کف و ارتفاع نصب پنجره‌ها حداقل ۹۰ سانتی‌متر از کف در نظر گرفته شد. بر این اساس، ابعاد کلاس ۸ × ۶/۳ متر است که تمامی استانداردهای مورد نظر را رعایت می‌کند.

همه جدارهای کدر دارای ضخامت ۲۵ سانتی‌متر هستند و شامل ۱۰ سانتی‌متر بتن و ۱۵ سانتی‌متر عایق حرارتی با ضریب هدایت ۰/۰۰۱ هستند. این مقدار برای نزدیک کردن جدارها به شرایط تقریباً بی‌دررو انتخاب شده است، اما اینرسی حرارتی آن‌ها نیز در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی‌ها، اتلاف حرارتی تنها از طریق سقف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای این مطالعه، یک سقف مسطح بتنی انتخاب شد که لایه بندی از داخل به خارج به این ترتیب است : گچ‌کاری داخلی (۱/۵ سانتی‌متر) ، لایه بتنی سقف (۲۰ سانتی‌متر) ، لایه محافظ بخار(۱ میلی‌متر)، عایق حرارتی (پلی‌استایرن اکسترود شده)(۵ سانتی‌متر) ، پوشش ضدآب(۵ میلی‌متر).

در این مطالعه، بام سبز با توجه به اینکه نیازی به تقویت سازه سقف نیست، انتخاب شده و لایه های اضافه شده به این ترتیب هستند : لایه محافظ ریشه (۱ میلی متر) ، لایه زهکشی (ژئودرین) (۲ تا ۴ سانتی‌متر)، لایه فیلتراسیون(۱ میلی متر) ، خاک (۱۵ سانتی‌متر طبق جدول خاک)، لایه گیاهی.

انواع گیاهان بام سبز

برای انتخاب پوشش گیاهی مناسب اقلیم تهران، ابتدا ۱۳۳ حالت با متغیرهای شاخص سطح برگ، انعکاس و انتشار برگ در نرم‌افزار دیزاین بیلدر شبیه‌سازی شدند تا محدوده بهینه مشخصات گیاه تعیین شود (جدول ۵). گیاهان انتخابی باید توانایی تحمل نور مستقیم خورشید را داشته باشند، زیرا شدت و مدت زمان تابش بر بام زیاد است و گونه‌های سایه‌دوست عملکرد مناسبی ندارند.

مقاومت در برابر سرمای زمستان نیز ضروری است تا گیاهان بدون مراقبت ویژه در طول سال پایدار بمانند. نیاز آبی پایین یکی دیگر از معیارهای اساسی بود، زیرا بحران کم‌آبی و دشواری نگهداری در ارتفاع،

انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی را ضروری می‌سازد. این معیارها تضمین می‌کنند که بام سبز با کمترین هزینه نگهداری و بیشترین کارایی عمل کند.

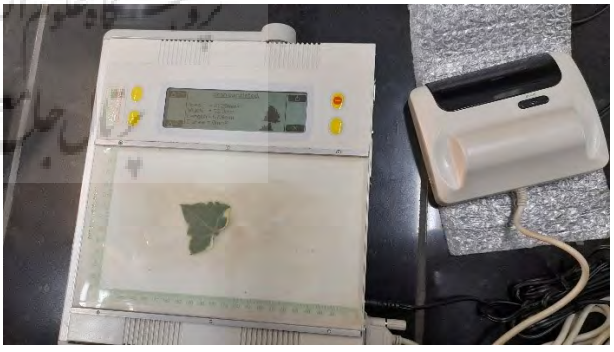
در این پژوهش، ۱۴ گیاه با ویژگی‌های موردنظر شناسایی شد (جدول ۱). اما به دلیل محدودیت دسترسی، ۵ گونه شامل پیچ تلگرافی، مریم‌گلی، گل ماهور، درمنه و فرانکیا حذف شدند. همچنین، گونه پیچ امین‌الدوله به دلیل مناسب‌تر بودن برای دیوار سبز کنار گذاشته شد. نهایتاً ۸ گیاه برای بررسی دقیق‌تر انتخاب گردیدند.

برای ارزیابی مقاومت به سرما، گیاهان از تاریخ ۱۹ تا ۲۹ آذر ۱۴۰۳ در محیط باز قرار داده شدند. باوجود دمای ۲- درجه سانتی‌گراد، تمامی گیاهان مقاومت نشان داده و بدون آسیب باقی ماندند. همچنین، در بررسی نیاز آبی، تنش خشکی ۱۰ روزه اعمال شد. در نتیجه این تنش، گیاه بومادران پژمرده و لیزوماکیا کاملاً خشک شد، اما سایر گیاهان بدون مشکل باقی ماندند.

جدول ۱. مشخصات گیاهان انتخاب شده

نام گیاه	نیاز به نور آفتاب	نیاز به آب	تحمل سرما	تحمل باد
رزماری	زیاد	کم	زیاد	بالا
آویشن	زیاد	متوسط هر روز آبیاری شود	متوسط (۰درجه)	بالا
اسطوخودوس	زیاد	کم هر ۳ روز یکبار	متوسط	بالا
لیزوماکیا	زیاد	متوسط	زیاد	متوسط
ناز یخی (فرانسوی)	زیاد	کم هر ۳ روز یکبار	زیاد	بالا
پاپیتال	زیاد	کم	زیاد	بالا
بومادران	آفتاب تا نیمه‌سایه	کم	زیاد	بالا
سدوم	زیاد	کم (مقاوم به خشکی)	زیاد	بالا
گیاه فرانکنیا	زیاد	کم (مقاوم به خشکی)	زیاد	بالا
پیچ تلگرافی	آفتاب تا نیمه‌سایه	کم	زیاد(۳- درجه)	متوسط
پیچ امین‌الدوله	زیاد	کم	زیاد(۱۵- درجه)	متوسط
مریم‌گلی	زیاد	کم(هر ۱۲ روز)	زیاد	بالا
گل ماهور یا خرگوشک	زیاد	بسیار کم (تحمل خشکی بالا)	زیاد	متوسط
درمنه	زیاد	بسیار کم (تحمل خشکی بالا)	زیاد(۱۵- درجه)	بالا

اندازه گیری ویژگی‌های گیاه



تصویر ۱. دستگاه (Area Meter AM200)

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری شاخص سطح برگ وجود دارد و در این مطالعه از روش مستقیم که دقیق تر است استفاده شد که شامل برگ زدایی گیاهان و اندازه گیری تمام سطوح برگ ها با دستگاه اندازه گیر سطح برگ و سپس تقسیم آن به مساحت زمین بود که از دستگاه(Area Meter AM200) موجود دردانشگاه علوم تحقیقات تهران استفاده شد که نمونه آن در تصویر (۱) نشان داده شده است. در سطح جهانی، شاخص سطح برگ در اکوسیستم‌های بیابانی کمتر از ۱ و در برخی مناطق به بیش از ۱۰ نیز می‌رسد. در نرم‌افزار دیزاین بیلدر ، محدوده شاخص سطح برگ بین ۰/۰۱ تا ۵ در نظر گرفته شده است که محدودیت‌هایی در شبیه سازی گونه‌های خاص ایجاد می کند.

مراحل محاسبه‌ی میزان جذب کربن گیاهان به طور مستقیم

اندازه‌گیری زیست‌توده یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی عملکرد گیاهان روی بام‌های سبز است که رشد و بهره‌وری گیاهان را در شرایط محیطی خاص نشان می‌دهد. زیست‌توده مستقیماً با میزان کربن تثبیت‌شده توسط گیاهان از طریق فتوسنتز ارتباط دارد؛ در این فرآیند گیاهان دی‌اکسید کربن را از جو جذب کرده و آن را به ترکیبات آلی مانند کربوهیدرات‌ها تبدیل می‌کنند که به رشد ساختاری آن‌ها کمک می‌کند. تولید زیست‌توده بالاتر نشان‌دهنده نرخ بالای جذب کربن بوده و به‌عنوان شاخصی ارزشمند برای ارزیابی مزایای اکولوژیکی بام‌های سبز عمل می‌کند.

در این زمینه، زیست‌توده معیاری برای سنجش توانایی گونه‌های گیاهی در تثبیت کربن و خنک‌سازی محیط است. برای اندازه‌گیری، گیاهان در محیط کنترل‌شده با شرایطی مشابه بام ساختمان پرورش داده شدند و شرایطی چون خاک، آبیاری، نور و دما ثابت نگه داشته شد. پس از رشد کافی، نمونه‌ها از بستر خارج و به آزمایشگاه منتقل شدند.

گیاهان در دمای ۷۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت در دستگاه آون (Memmert Universal Oven) خشک شدند تا رطوبت آن‌ها کاملاً خارج شده و وزن دقیق ماده خشک به‌دست آید. وزن نمونه‌های خشک‌شده با ترازوی دقیق اندازه‌گیری و به صورت گرم در هر مترمربع گزارش شده است.

وزن بالاتر زیست‌توده نشان‌دهنده توانایی بیشتر گیاه در جذب کربن، تولید انرژی زیستی و بهبود خنک‌سازی محیط از طریق تعریق و رشد گسترده است. برای محاسبه میزان کربن ذخیره‌شده، زیست‌توده اندازه‌گیری‌شده در ضریب ۰/۵ ضرب می‌شود(Robbiati et al., 2023) سپس با استفاده از ضریب تبدیل ۳/۶۶ (Granata et al., 2020) مقدار تثبیت دی‌اکسید کربن به ازای هر مترمربع($kgCO_2eq$) محاسبه می‌گردد.

مراحل محاسبه‌ی میزان جذب کربن گیاهان به طورغیر مستقیم

کاهش تقاضای انرژی مستقیماً به کاهش انتشار کربن دی اکسید منجر می‌شود، زیرا انرژی کمتری از منابع سوخت فسیلی مورد نیاز است. برای محاسبه کاهش انتشار کربن در این مطالعه، از ضریبی استفاده شده که توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا ارائه شده است. این ضریب بیان می‌کند که به ازای تولید هر کیلووات‌ساعت برق، حدود ۰/۶۸۹۶ کیلوگرم کربن دی اکسید منتشر می‌شود. این ضریب در انرژی ذخیره شده (بر حسب کیلووات ساعت) ضرب می شود تا کاهش انتشار کربن دی اکسید در هر متر مربع بام سبز تخمین زده شود.(Seyedabadi et al., 2021).

از آنجا که شبکه برق ایران عمدتاً بر پایه سوخت‌های فسیلی استوار است، این ضریب می‌تواند به عنوان تقریب مناسبی برای محاسبات مربوط به تهران در نظر گرفته شود. مشابهت ترکیب انرژی ایران با ایالات متحده که بخشی از انرژی خود را از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌کند، دلیل انتخاب این ضریب است. با این حال، در صورت دسترسی به داده‌های دقیق‌تر از وزارت نیرو یا سازمان محیط زیست ایران، می‌توان این مقدار را بومی‌سازی و به‌روزرسانی کرد. باید توجه داشت که این ضریب، یک مقدار استاندارد بین‌المللی است و ممکن است با شرایط خاص تهران اندکی تفاوت داشته باشد.

پیشینه پژوهش

بررسی مطالعات انجام‌شده در حوزه بام‌های سبز، که نتایج آن در جدول (۲) آمده است، تأثیر پارامترهای مختلف مانند ضخامت بستر کشت، نوع و گونه‌های گیاهی بر بهبود شرایط زیست‌محیطی و کاهش مصرف انرژی را نشان می‌دهد. ضخامت بستر بر ظرفیت ذخیره آب و خاصیت عایق‌سازی حرارتی بام تأثیر دارد. گونه‌های گیاهی مقاوم به شرایط سخت، مانند خانواده سدوم، به دلیل نیاز آبی کم و تحمل بالا مورد تأکید قرار گرفته‌اند.

پارامترهایی همچون ارتفاع گیاهان، شاخص سطح برگ، انعکاس و انتشار برگ نیز در عملکرد خنک‌کنندگی و تبخیر تعرق بام‌ها نقش دارند. تأثیر اقلیم و شرایط آب‌وهوایی از متغیرهای اساسی بررسی‌شده در این مطالعات بوده است. پژوهش‌ها به کاهش مصرف انرژی برای سرمایش و گرمایش، نرخ جذب دی‌اکسید کربن، تأثیر بر دمای سطح بام، مدیریت رواناب و هزینه‌های چرخه عمر پرداخته‌اند. بسیاری از این تحقیقات با استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی مانند دیزاین بیلدر و انرژی پلاس انجام شده‌اند و نتایج شبیه‌سازی‌های عملکرد حرارتی و زیست‌محیطی بام‌های سبز را ارائه داده‌اند.

در این مطالعه، علاوه بر بررسی ضخامت خاک (نتایج در جدول ۴)، تأثیر شاخص سطح برگ، انعکاس برگ و انتشار برگ نیز بررسی شده است که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. همچنین، به‌منظور ارزیابی نرخ جذب دی‌اکسید کربن، بیومس تولیدشده توسط گیاهان اندازه‌گیری و محاسبات مرتبط انجام شده که در جدول ۵ ارائه شده‌اند. برخلاف بسیاری از مقالات که تنها به گونه‌های گیاهی سدوم پرداخته‌اند، این پژوهش گونه‌های متناسب با اقلیم نیمه‌خشک تهران را بررسی کرده و امکان ارائه راهکارهای مؤثرتر و بومی‌تر برای طراحی بام‌های سبز در این منطقه را فراهم کرده است.

جدول۲ . پژوهش‌های انجام شده در حوزه ی بام سبز که به مقایسه دو یا چند بام سبز پرداخته اند.

	پارامترها	آب و هوا/ شهر	اهداف تحقیق	گیاهان	مدت آزمایش	نتایج	منبع
۱	ضخامت بستر (۱۰۰-۲۰۰ میلی متر؛ بیش از ۲۰۰ میلی متر)، پوشش (۲۵-۱۰۰٪)، عایق (با / بدون)، مناطق آب و هوایی (۷ منطقه استرالیا)	۷منطقه مختلف آب و هوایی در استرالیا	ارزیابی تأثیر تنظیمات بام سبز بر تقاضای انرژی در آب و هوای مختلف	به صراحت جزئیاتی ندارد	سپتامبر ۲۰۱۹ تا آگوست ۲۰۲۰	-پوشش بالاتر و سقف‌های فشرده تقاضای انرژی را کاهش می‌دهند. -سقف‌های بدون عایق در آب و هوای گرم و مرطوب برتری دارند. -سقف‌های عایق‌بندی‌شده در آب و هوای سرد صرفه‌جویی انرژی دارند. -بهبود عملکرد حرارتی توسط بسترهای ضخیم‌تر	(Abuseif et al., 2023)
۲	ضخامت بستر (۱۰، ۳۰، ۶۰ سانتی متر)، ارتفاع پوشش گیاهی، سطح برگ، بازتاب برگ، خواص حرارتی خاک	موسمی نیمه گرمسیری / نانجینگ، چین	ارزیابی کاهش مستقیم و غیرمستقیم دی اکسیدکربن یک بام سبز فشرده و سهم آن در اعتبارات کربن مبتنی بر طبیعت	ماژول ۱۰ سانتی متری: Sedum alfredia hance، Sedum lineare thunb. ماژول ۳۰ سانتی متری: Ophiopogon japonicus، Osmanthus fragrans، Ligustrum sinense varie-gatum. ماژول ۶۰ سانتی متری: Rhododendron pulchrum sweet	فوریه ۲۰۲۱ - فوریه ۲۰۲۲	کاهش دی اکسیدکربن سالانه : ۴۳۵۵/۶ گرم $year/CO_2/m^2$ (۴۶/۶ گرم مستقیم؛ ۴۳۰۹ گرم غیرمستقیم). کل صرفه جویی در انرژی: ۴۰۳۸/۵ کیلووات ساعت در سال، با صرفه جویی بیشتر در سرمایش در تابستان. تغییرات فصلی در کاهش دی اکسیدکربن، با اوج در پاییز (مستقیم) و تابستان (غیر مستقیم).	(Yang et al., 2023)

	پارامترها	آب و هوا/ شهر	اهداف تحقیق	گیاهان	مدت آزمایش	نتایج	منبع
۳	چهار سیستم سقف: گسترده، نیمه فشرده، فشرده و متعارف. ارتفاع بوته، ضخامت خاک و تراکم.	سرد/ کبک، کانادا.	مقایسه اثرات زیست محیطی سقف های سبز و معمولی را در آب و هوای سرد با استفاده از ارزیابی چرخه زندگی پویا	گسترده: علف های کوتاه و پوشش گیاهی کم. نیمه فشرده: درختچه ها و گیاهان چند ساله (ارتفاع ۰/۱-۰/۷ متر).	چرخه عمر ۴۵ سال بام های سبز	- بام‌های سبز مصرف انرژی را ۲/۲ تا ۲/۵ درصد کاهش دادند. -سقف‌های نیمه فشرده و فشرده هزینه مصالح بالاتری داشتند. - مزایای کربن پس از ۱۴ و ۳۵ سال به دست آمد. -سقف سبز گسترده کمترین انتشار کربن و بیشترین مزایای زیست‌محیطی را داشت.	(Pique et al., 2023)
۴	عمق خاک، ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ و مقاومت روزنه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند. تعادل آب دینامیک بر اساس آبیاری و بارش تحلیل شد.	مدیترانه ای / نیکوزیا، لیماسول، لارناکا و پافوس، قبرس	ارزیابی صرفه جویی در انرژی، مزایای زیست محیطی و قابلیت اقتصادی بام سبز در ساختمان های اداری شهری.	گونه های بومی مدیترانه ای مانند Sedum sediforme و Helichrysum orientale L.	شبیه سازی انرژی سالانه	-صرفه‌جویی در مصرف انرژی: ۲۵٪ برای گرمایش و ۲۰٪ برای سرمایش. -اثرات زیست‌محیطی: کاهش قابل‌توجه CO_2، NOx و SO2 -تأثیر اقتصادی: NPV منفی به دلیل هزینه‌های بالا، اما مزایای غیر کمی اضافی (تنوع زیستی، زیبایی شناسی، کاهش حرارت شهری).	(Ziogou et al., 2017)
۵	اثرات خنک کننده: کاهش دمای سایبان وخاک، عملکرد خنک کننده در شب عملکرد فیزیولوژیکی: میزان تعرق، تولید زیست توده، راندمان مصرف آب رفتار حرارتی: نوسانات دمایی روزانه، خنک سازی خاک در اعماق سطح(۵، ۱۰، ۱۵ سانتیمتر)	نیمه گرمسیری/ شانگهای ،چین	بررسی اثرات خنک کنندگی بام های سبز با مسیرهای مختلف فتوسنتزی (C3، C4، CAM) و مکانیسم های زیربنایی.	- گیاهان : C3 Festuca و Poa pratensis arundinacea. - گیاهان : C4 Cynodon dactylon و Eremochloa ophiuroides. - گیاهان : CAM Sedum lineare و Callisia repens.	ماه های تابستان (ژوئیه تا سپتامبر ۲۰۱۸)	گیاهان C4 بیشترین سرمایش روزانه(تا ۱۶/۹ °C کمتر از دمای هوا) گیاهان : C3 سرمایش متوسط با تعرق کمتر از °C4 گیاهان : CAM سرمایش محدود روزانه اما عملکرد عالی در شب (۰/۲-۴/۲ °C خنک‌تر از سقف‌های بدون پوشش) همه بام‌های سبز دمای خاک را ۱۰/۸-۱۱/۹ °C کاهش دادند.	(Cao et al., 2019)
۶	شاخص سطح برگ، بازتاب برگ، انتشار برگ، مقاومت روزنه‌ای.	نیمه خشک/ مونتری، مکزیک	بهینه سازی طراحی بام سبز برای بهره وری انرژی و راحتی باتجزیه و تحلیل پارامترهای گیاه	Sedum spurium Sempervivum tectorum Opuntia Ficusindica Echeveria elegans	شبیه سازی یک سال	کل صرفه جویی در انرژی: ۱۱-۱۴٪. ساعات راحتی ۱۲/۸٪ بهبود یافته است.	(Mousavi et al., 2023)
۷	مقایسه بام‌های سبز با شاخص سطح برگ ثابت در مقابل شاخص سطح برگ متغیر فصلی.	منطقه آب و هوایی باتابستان گرم و زمستان سرد/ شانگهای، چین	ایجاد یک مدل بام سبز با شاخص سطح برگ متغیر فصلی برای شبیه‌سازی عملکرد انرژی سالانه در اقلیم‌های مختلف	Sedum lineare	شبیه سازی یک سال	-شاخص سطح برگ متغیر فصلی دقت شبیه‌سازی عملکرد انرژی را بهبود می‌دهد و برای آب و هوای تابستان گرم و زمستان سرد مناسب‌تر است. -تغییرات فصلی دما، شار گرما و بار انرژی را بهتر از شاخص سطح برگ ثابت منعطف می‌کند. -شاخص سطح برگ ثابت بارهای سرمایش/گرمایش را بسته به مقدار آن نسبت به داده‌های واقعی دست کم یا بیش از حد تخمین می‌زند. -شاخص سطح برگ بالا بارهای خنک‌کننده را در مناطق گرمسیری کاهش می‌دهد.	(Zhou et al., 2018)
۸	نسبت پوشش، شاخص سطح برگ و دمای برگ، تراکم بوته، ضخامت بستر.	مدیترانه ای/ پالرمو، ایتالیا.	ارزیابی عملکرد انرژی، مزایای حرارتی و رفتار رشد گونه‌های مختلف گیاهی	Phyla nordiflora, Gazania nivea, Gazania uniflora, Aptenia lancifolia, Mesembryanthemum barbatus, Sedum.	اکتبر ۲۰۱۴ - ژانویه ۲۰۱۵	پوشش سریع توسط Phyla nordiflora، Aptenia lancifolia و Mesembryanthemum barbatus (۲۵-۶۷ روز). رشد آهسته برای گونه های گازانیا. و سدوم. صرفه جویی در انرژی خنک کننده ۸ -۲۰٪ (متغیر بر اساس گونه های گیاهی). بالاترین شاخص سطح برگ: Aptenia lancifolia (۳/۹۹).	(Ferrante et al., 2016)
۹	نوع پوشش گیاهی، سطح برگ، جذب دی اکسیدکربن، صرفه جویی در انرژی، حفظ آب طوفان، عمق بستر.	سرد و خشک/ مشهد، ایران.	ارزیابی عملکرد گیاه در آب و هوای سرد و خشک و کاهش ردپای کربن ساختمان	Sedum acre Frankenia thymifolia Vinca major	ژانویه ۲۰۱۹ - ژانویه ۲۰۲۰	صرفه جویی در انرژی: کاهش مصرف انرژی سالانه ۸/۵٪، ۸/۰٪ و ۷/۱٪ برای Sedum acre، Frankenia thymifolia و Vinca major کاهش دی اکسیدکربن: کاهش انتشار ۲۸/۱۶، ۲۶/۴۸ و ۲۳/۴۴ $kg\ CO_2/m^2$ year	(Seyedabadi et al., 2021)

	پارامترها	آب و هوا/ شهر	اهداف تحقیق	گیاهان	مدت آزمایش	نتایج	منبع
۱۰	انواع خاک: خاک شنی و رسی عمق خاک: ۰/۰۴ متر، ۰/۰۶ متر و ۰/۰۸ متر نسبت پوشش فتوولتائیک: ۲۵٪، ۵۰٪ ارتفاع فتوولتائیک ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ متر	گرم استپی- خشک/ شهر نیوبورگ العرب، مصر	تاثیر بام سبزبرراحتی حرارتی وعملکرد فتوولتائیک.بهینه سازی پارامترها برای افزایش بهره وری انرژی و کاهش بارسرمایی	چمن	۱اوت - ۷ سپتامبر ۲۰۲۲	کاهش دمای هـوای داخلی تا ۱۱/۸۵٪ (۴/۳ درجه سانتیگراد) در مقایسه با سقف سنتی. افزایـش راندمـان فتوولتائیـک تـا ۲/۲۷٪ کاهش بارسرمایی، ۱۹/۱۲ درصد. کاهش سالانه دی اکسیدکربن ۵۶/۵۹ kg/m^2	(Abdala-zeem et al., 2024)
۱۱	نوع گیاه (بومی/ خارجی)، رژیم آبیاری	نیمه خشک/ باهیابلانکا، آرژانتین	مقایسه ظرفیت جذب دی اکسید کربن و بقای گیاهان بومی در مقابل گیاهان عجیب و غریب در شرایط کمبود آب	سه گیاه بومی (Poa lanuginosa، Sphaeralcea (australis Phyla nodiflora و سه گیاه عجیب و غریب Oscularia deltoides، Sedum 'tokyo sun'، Sedum nussbaunerianum	آوریل ۲۰۲۱ تا فوریه ۲۰۲۲	همه گونه های بومی در مقایسـه با گونه های عجیب و غریب زنـده ماندند و دی اکسـیدکربن بیشـتری را جـدا کردند.گونه های بومی راندمـان جذب دی اکسیدکربن بالاتری داشتند .گیاهان عجیب و غریب قادر به زنده ماندن در برابر کمبود شـدید هیدریک و یخبندان نبودند.	(Perillo et al., 2023)
۱۲	متابولیسم گیاه (C3 در مقابل CAM)، عملکرد حرارتی، مدیریت آب، چگالی ظاهری بستر، تنظیم دما.	نیمه خشک مدیترانه ای/ انسناداء،رنیا باخاکالیف مکزیک	مقایسه عملکرد حرارتی سقف های سنتی و بام سبز آبی، ارزیابی مناسب بودن گیاهان برای اقلیم مورد مطالعه	سدوم اکر (CAM متابولیسم) Salicornia pacifica , (C3متابولیسم)	زمستان ۲۰۲۰ (ژانویه تا ژوئن).	بام‌های سـبز-آبی نوسـانات دما را کاهـش داده و به عنوان تنظیم‌کننده حـرارت عمل می‌کنند. حداکثر کاهش دمای سطح داخلی: ۱۲/۴ درجه سانتی گراد (در مقایسـه با سقف بتنی) S. pacifica، زیست‌توده و پوشـش بالاتری داشـت که آن را برای مناطق نیمه خشـک مناسب‌تر کرد.سـدوم اکر به دلیل تنش آبی و آفات با چالش‌هایی مواجه شـد که منجر به کاهش پوشش شد.	(López-Silva et al., 2022)

مبانی نظری

فرآیندهای کاهش دی اکسیدکربن

بام‌های سبز می‌توانند به‌طور مستقیم و غیرمستقیم دی اکسیدکربن را کاهش دهند (Shafique et al., 2020). پوشش گیاهی و بستر این بام‌ها به‌عنوان یک تکنیک غیرفعال برای کاهش دمای هوا، سطح و شارهای گرمای رسانا عمل کرده و موجب کاهش تقاضای انرژی خنک‌کننده و انتشار دی اکسیدکربن می‌شوند. همچنین، این بام‌ها نوسانات دمایی غشای سقف را کاهش داده و طول عمر آن را افزایش می‌دهند (Wong, Tay, et al., 2003). علاوه بر بهبود عملکرد حرارتی محیط، بام‌های سبز جذب کربن را افزایش داده و نیاز انرژی داخلی ساختمان را کاهش می‌دهند.

اثرات مستقیم شامل جذب و ذخیره کربن دی‌اکسید توسط گیاهان و خاک است و اثرات غیرمستقیم شامل کاهش تقاضای انرژی داخلی برای گرمایش و سرمایش می‌شود. عوامل مؤثر بر کاهش مستقیم و غیرمستقیم دی اکسیدکربن شامل تبادل خالص اکوسیستم(یا جذب دی اکسیدکربن)، شار خالص تابش، شار حرارتی محسوس، شار گرمای نهان، اثر سایه‌زنی، جرم حرارتی و اثر عایق است (Tan et al., 2023).

فرآیندهای کاهش دی اکسید کربن به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

کاهش مستقیم و کاهش غیرمستقیم. که هر کدام روندهای فصلی قابل توجهی را نشان می دهد، با حداکثر کاهش مستقیم در پاییز و اوج کاهش غیرمستقیم در تابستان (Yang et al., 2023). در ادامه، جزئیات بیشتری از این فرآیندها و عوامل مؤثر بر آن‌ها ارائه می‌شود.

فرآیندهای کاهش مستقیم دی اکسیدکربن

پوشش گیاهی به طور مستقیم کربن دی اکسید محیط را از طریق فتوسنتز از جو جذب می کند، که سپس در گیاهان و بسترها به عنوان زیست توده و مواد آلی ذخیره می شود این فرآیند شامل مراحل زیر است:

فتوسنتز: گیاهان کربن دی اکسید را از جو جذب کرده و آن را به ترکیبات آلی (عمدتاً کربوهیدرات‌ها) تبدیل می‌کنند. این فرآیند به شدت تحت تأثیر نور خورشید و پارامترهای محیطی قرار دارد (Whittinghill et al., 2014).

تنفس: کربن دی اکسید به جو بازمی‌گردد از طریق تنفس خودکار(تنفس گیاهان) و تنفس غیر خودکار(تنفس میکروارگانیسم‌ها و موجودات خاکی) (Heusinger & Weber, 2017a) کاهش خالص کربن دی اکسید یا تولید خالص اولیه (NEP)

تولید خالص اولیه به عنوان تفاوت بین تولید ناخالص اولیه و تنفس اکوسیستم تعریف می‌شود. این معادله به صورت زیر است:

$$NEP = Gpp - R_{eco}$$

در این فرمول:

GPP یا تولید ناخالص اولیه: کل میزان دی اکسیدکربن جذب‌شده توسط گیاهان از طریق فتوسنتز

R_{eco} یا تنفس اکوسیستم: کل میزان دی اکسیدکربن بازگشته به اتمسفر از طریق فرآیندهای تنفس گیاهی و میکروبی.

بنابراین، تولید خالص اولیه میزان خالص دی اکسیدکربن ذخیره‌شده در بام سبز را نشان می‌دهد و هرچه این مقدار بیشتر باشد، به معنی جذب بیشتر کربن توسط بام سبز است (Tan et al., 2023).

فرآیندهای کاهش غیرمستقیم دی اکسیدکربن

بام‌های سبز از طریق فرآیندهای مختلف به کاهش غیرمستقیم دی‌اکسیدکربن کمک می‌کنند، زیرا باعث کاهش مصرف انرژی و بهبود عایق کاری ساختمان می‌شوند. این فرآیندها شامل پنج عامل اصلی هستند که در ادامه هر کدام توضیح داده شده است:

اثر سایه‌اندازی

گیاهان بام سبز با ایجاد سایه روی سطح بام از تابش مستقیم خورشید جلوگیری کرده و دمای سطح بام را کاهش می‌دهند. این امر باعث می‌شود که بام خنک‌تر بماند و نیاز به سرمایش در فضای داخلی ساختمان کاهش یابد. تأثیر سایه‌اندازی همچنین به کاهش دمای هوا در اطراف ساختمان کمک می‌کند و به صورت غیرمستقیم در کاهش تولید دی‌اکسیدکربن اثرگذار است (Jim & Tsang, 2011a).

جرم حرارتی و عایق‌کاری

بام‌های سبز به دلیل داشتن جرم حرارتی بالا، انرژی گرمایی را در بستر ذخیره می‌کنند، بدون اینکه دمای سطحی به شدت افزایش یابد و به عنوان یک عایق حرارتی عمل می‌کنند و انتقال حرارت را کاهش می‌دهند. این امر باعث می‌شود که در دوره گرم سال، نیاز به خنک‌سازی کمتر و در دوره سرد سال ، نیاز به گرمایش کمتر باشد .ضریب مقاومت حرارتی، که به عایق‌کاری کمک می‌کند، با فرمول زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\Delta T}{Q_{tf}} = R$$

در این فرمول:

R: ضریب مقاومت حرارتی بام سبز

ΔT: تفاوت دمای بین سطح بام و فضای داخلی ساختمان

Q_{tf} : مقدار شار حرارتی که به ساختمان وارد می‌شود.

با بالابودن ضریب مقاومت حرارتی، انتقال گرما به داخل ساختمان کاهش می‌یابد (Wong, Cheong, et al., 2003).

انتقال حرارت

بام‌های سبز از طریق تبادل حرارتی با اتمسفر و ایجاد سایه، باعث کاهش گرمای محیطی می‌شوند. این فرآیند با فرمول زیر بیان می‌شود که تعادل حرارتی بام سبز را توصیف می‌کند:

$$Q_{tf} + Q_s + Q_p + Q_{cv} = R_n$$

در این معادله:

R_n : شار تابش خالص سطح بام سبز

Q_{cv}: شار حرارتی محسوس ، که نشان‌دهنده گرمای انتقال‌یافته به هوا می‌باشد.

Q_p : شار حرارتی پنهان ناشی از تبخیر و تعرق

Q_s : گرمای ذخیره‌شده در گیاهان و بستر بام

Q_{tf}: شار حرارتی که به داخل ساختمان منتقل می‌شود.

بام‌های سبز با کاهش شار حرارتی به داخل ساختمان، نیاز به سرمایش داخلی را کاهش می‌دهند و به همین دلیل به صورت غیرمستقیم باعث کاهش تولید دی‌اکسیدکربن می‌شوند (Zonato et al., 2021).

رطوبت و فرآیند تبخیر و تعرق

جذب کربن توسط گیاهان به میزان آب در دسترس بستگی دارد، زیرا گیاهان برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از کم‌آبی، روزنه‌های خود را در شرایط کم‌آبی می‌بندند (Cascone et al., 2019). بام‌های سبز با بهره‌گیری از آب موجود در بستر و گیاهان و فرآیند تبخیر و تعرق، به کاهش تنش گرمایی در محیط‌های شهری کمک می‌کنند (Joshi et al., 2022). همچنین، محتوای آب حجمی بستر بر فرآیند انتقال حرارت رسانا تأثیر دارد؛ بنابراین، تعادل آب بام‌های سبز در کاهش مستقیم و غیرمستقیم دی‌اکسیدکربن نقش مهمی دارد.

انرژی خورشیدی بیشتر به صورت گرمای پنهان منتقل می‌شود تا گرمای محسوس. شارحرارتی پنهان می‌تواند از طریق تبخیر و تعرق و گرمای تبخیر محاسبه گردد (Cascone et al., 2019). بستر بام سبز به‌عنوان محیطی متخلخل و همگن در نظر گرفته می‌شود و محتوای آب حجمی آن به توازن آب بستگی دارد. این توازن شامل ورودی‌های آب مانند بارندگی و آبیاری و خروجی‌هایی مانند تبخیر، تعرق و زهکشی است (Hellies et al., 2018; Rushton et al., 2006).

تبادل حرارت با اتمسفر

بام‌های سبز از طریق تبادل حرارت با هوای اطراف، گرما را به صورت مستقیم یا غیرمستقیم به هوا منتقل می‌کنند. نسبت شار حرارتی محسوس به شار حرارتی پنهان (معروف به نسبت بوئن)، به خنک کنندگی بام کمک می‌کند و با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{Q_{cv}}{Q_p} = \text{BowenRatio}$$

در این فرمول:

Q_{cv} : شارحرارتی محسوس

Q_p : شارحرارتی پنهان ناشی از تبخیر و تعرق

بام‌های سبز با افزایش شار حرارتی پنهان نسبت بوئن را کاهش می‌دهند که به معنای کاهش دمای محیط و نیاز کمتر به انرژی برای خنک‌سازی ساختمان است (Heusinger & Weber, 2017b).

عوامل مرتبط با کاهش دی‌اکسیدکربن در بام‌های سبز بستر

بستر سقف سبز از ترکیب سه فاز جامد (دانه‌ها، ماسه و مواد آلی)، هوا و آب در منافذ تشکیل می‌شود و وظایف مهمی مانند پشتیبانی از رشد گیاهان، عایق‌کاری حرارتی و ذخیره‌سازی حرارت دارد (Coma et al., 201). این ترکیب به بستر امکان ذخیره آب و مواد مغذی را می‌دهد و شرایط مطلوب برای رشد گیاهان را فراهم می‌کند. همچنین، بستر سقف سبز نقش مهمی در مدیریت حرارت و کاهش نوسانات دمایی بین محیط داخلی و خارجی ساختمان ایفا می‌کند .(Wong, Tay, et al., 2003)

ضخامت بستر از عوامل مؤثر در عملکرد سقف سبز است. بسترهای عمیق‌تر (بیش از ۱۲ سانتی‌متر) ظرفیت آبی بیشتر و باعث کاهش انتقال حرارت می‌شوند که به بهبود عایق‌کاری حرارتی کمک می‌کند. و امکان رشد گیاهان متنوع‌تر را فراهم می‌کنند (Fioretti et al., 2010). افزایش ضخامت بستر یا زیست‌توده، ظرفیت جداسازی کربن آلی را افزایش

می‌دهد (Nguyen et al., 2024). لایه‌های ضخیم‌تر خاک (۱۵ تا ۷۰ سانتی‌متر) جرم حرارتی اضافی فراهم کرده و دمای داخلی را با تغییرات روز و شب تثبیت می‌کنند. افزایش ضخامت خاک منجر به مصرف بیشتر انرژی سرمایشی و کاهش مصرف انرژی گرمایشی می شود. گرمای اضافی را که نمی‌توان با تهویه شبانه آزاد کرد ذخیره می‌کند و آب بیشتری را برای خنک‌سازی تبخیری نگه می‌دارد و دمای داخل خانه را در روزهای گرم کاهش می‌دهد (Shi et al., 2022). بسترهای نازک‌تر (۵ تا ۱۲ سانتی‌متر) ظرفیت نگهداری آب کمتری دارند و ممکن است باعث تبخیر بیشتر و افزایش دما در تابستان شوند. انتخاب ضخامت بستر باید به‌گونه‌ای باشد که تعادل مناسبی بین ذخیره‌سازی آب، حرارت و رشد گیاهان ایجاد کند.

پوشش گیاهی

شاخص سطح برگ

شاخص سطح برگ یکی از مهم‌ترین پارامترهای پوشش گیاهی در بام‌های سبز است که تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد حرارتی و انرژی ساختمان دارد. این شاخص نسبت مساحت برگ‌های گیاه به واحد سطح زمین را نشان می‌دهد و بر سایه‌اندازی، تبخیر و تعرق، و انتقال گرمای همرفتی اثر مستقیم دارد. همچنین، ظرفیت فتوسنتزی و پتانسیل جذب دی‌اکسید کربن بام‌های سبز را تعیین می کند .(Tan et al., 2023)

مطالعه ای نشان داده‌است که بام‌های سبز می‌توانند بار سرمایشی را ۳/۶ درصد و بار گرمایشی را ۶/۲ درصد کاهش دهند (He et al., ۲۰۲۰). یعقوبیان و سربریک نیز دریافتند که سطح بدون پوشش گیاهی روزانه ۳۲٪ شار تابشی بیشتری نسبت به سطح سایه‌دار دریافت می کند که منجر به کاهش سالانه بار سرمایشی به میزان ۱۳ کیلووات‌ساعت بر مترمربع و افزایش بار گرمایشی به میزان ۰/۸۸ کیلووات‌ساعت بر مترمربع می‌شود .(Yaghoobian & Srebric, 2015)

افزایش شاخص سطح برگ از ۲ به ۵ گرمای انتقال‌یافته به خاک را تا ۲۵۰ وات بر مترمربع کاهش داده است (Barrio, 1998). هرچند افزایش مقاومت روزنه‌ای و ارتفاع گیاه تأثیر قابل توجهی بر کاهش مصرف انرژی گرمایشی ندارد، اما افزایش شاخص سطح برگ بیشترین اثر را نشان داده است (Balvedi & Giglio, 2023). مقادیر بالای شاخص سطح برگ در زمستان ممکن است نیاز به گرمایش را افزایش دهد، زیرا باعث کاهش جذب گرمای خورشیدی می‌شود که در مناطق با تغییرات فصلی دما اهمیت بیشتری دارد.

برای دقت بیشتر، شبیه‌سازی‌ها به دو دوره گرم و سرد سال تقسیم شدند تا به جای استفاده از یک مقدار ثابت برای شاخص سطح برگ، نتایج واقعی‌تری به دست آید.به‌طور کلی مقادیر بالاتر شاخص سطح برگ با افزایش سایه‌اندازی، کاهش دمای سطح بستر و بهبود عملکرد حرارتی وانرژی ساختمان مرتبط است (Gargari et al., 2016).

انعکاس برگ

انعکاس برگ یا آلبدو به نسبت تابش بازتاب‌شده از سطح برگ به تابش ورودی گفته می‌شود و در کاهش دمای بستر و بهبود بازده انرژی ساختمان نقش کلیدی دارد. گیاهانی با انعکاس بالاتر گرمای کمتری جذب کرده و تابش خورشید را بازتاب می‌دهند که به کاهش جذب حرارت و مصرف انرژی در دوره‌های گرم کمک می‌کند.در دوره‌های سرد، برگ‌ها با بازتاب پایین‌تر گرما را حفظ کرده و به کاهش مصرف انرژی یاری می‌رسانند. در مناطق مدیترانه‌ای، گیاهانی مانند سدوم با انعکاس بالا توانسته‌اند دمای داخلی را تا۶ درجه سانتی‌گراد در تابستان کاهش دهند (Mousavi et al., 2023).

انتشار برگ

انتشار برگ به توانایی برگ در آزادسازی گرمای جذب‌شده به صورت تابش فروسرخ اشاره دارد. این ویژگی در تنظیم دمای سطح بام و ایجاد شرایط مطلوب برای رشد گیاهان و جذب دی‌اکسید کربن نقش دارد. برگ‌های با انتشار بالا می‌توانند حرارت بیشتری را به خارج از محیط منتقل کنند. در دوره‌های سرد، این ویژگی ممکن است منجر به از دست دادن گرما از سقف گردد و در نتیجه میزان مصرف انرژی برای حفظ دمای داخل افزایش یابد.

گیاهان گونه سدوم با انتشار نزدیک به ۰/۹ توانسته‌اند به طور مؤثری گرمای ذخیره‌شده در بستر را کاهش دهند. این ویژگی آن‌ها را برای استفاده در بام‌های سبز مناسب کرده است.گیاهانی با انتشار بالا در مناطق با تابش خورشیدی شدید، با کاهش دمای بستر از طریق تابش گرمایی، عملکرد بهتری داشته‌اند.(Balvedi & Giglio, 2023)

ارتفاع گیاه

ارتفاع گیاه یکی از عوامل در سایه‌اندازی و توانایی خنک‌سازی بام‌های سبز است. گیاهان بلندتر معمولاً سایه بیشتری ایجاد می کنند و می‌توانند انتقال گرما به بستر را کاهش دهند.در اقلیم‌های معتدل، گیاهان بلند با شاخص سطح برگ بالا توانسته‌اند گرمای جذب‌شده توسط بام را کاهش دهند(Mousavi et al., 2023). ترکیب گیاهانی با ارتفاع و شاخص سطح برگ متفاوت می‌تواند بهینه‌سازی سایه‌اندازی و جریان هوا را در بام سبز تسهیل کند(Ferrante et al., 2016).

شرایط میکرواقلیم

عوامل میکرواقلیمی شامل تابش خورشیدی، سرعت باد، رطوبت نسبی و دمای هوا تأثیر مستقیمی بر عملکرد حرارتی و کاهش دی‌اکسید کربن دارند. تابش خورشیدی به عنوان عامل اصلی فرآیند فتوسنتز و تبخیر و تعرق شناخته می‌شود. گیاهان با انعکاس بالا می‌توانند جذب گرما را کاهش داده و دمای سطح بام را پایین بیاورند (Mousavi et al., 2023).

باد قوی نیز با جابجایی هوای اشباع‌شده به خنک‌سازی بام‌ها کمک می‌کند. از آنجا که شدت باد در بام‌ها بیشتر از سطح زمین است، انتخاب گیاهان مقاوم به باد ضروری است. سطح بالای رطوبت نسبی باعث کاهش تبخیر و تعرق و محدود کردن اثر خنک‌کنندگی می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند که نرخ تبخیر و تعرق در شرایط رطوبت کم (مانند فصل پاییز) بالاتر است (Jim & Tsang, 2011b). همچنین، در روزهای آفتابی بسترهای خشک نرخ تبخیر بالاتری نسبت به روزهای ابری دارند (Cascone et al., 2019). این موضوع نشان می‌دهد بام‌های سبز در اقلیم‌های خشک اثر خنک‌کنندگی بیشتری دارند.

بر اساس مطالعه‌ای، بام‌های سبز در شهرهای تهران، تبریز و بندرعباس

به ترتیب مصرف برق سالانه را ۱۶/۳، ۱۲/۵ و ۲۳ درصد کاهش داده‌اند. بنابراین، بام‌های سبز در مناطق گرمسیری مانند بندرعباس کارایی بیشتری نسبت به مناطق سردسیر مانند تبریز دارند (Zahedi et al., 2023). همچنین، تحلیل ۸۹ مطالعه در سه اقلیم مختلف نشان داد که بیشترین اثر سرمایشی سقف‌های سبز در اقلیم‌های خشک (کاهش ۳ °C) و کمترین در اقلیم‌های گرم و مرطوب (کاهش ۱ °C) مشاهده شد. ثبت شده است (Jamei et al., 2021). این یافته‌ها بر اهمیت شرایط اقلیمی در عملکرد حرارتی بام‌های سبز تأکید می‌کنند.

نگهداری

نگهداری بام‌های سبز شامل آبیاری، کنترل علف‌های هرز و کوددهی است که در حفظ عملکرد این سیستم‌ها نقش دارد. آبیاری پایدار، علاوه بر حفظ رشد گیاهان در شرایط کم‌آبی و افزایش اثرات خنک‌کنندگی، تعادل رطوبتی بستر را بهبود بخشیده و عملکرد جذب کربن را حفظ می‌کند leaf area index (LAI) (Ferrante et al., 2016; Tan et al., 2023). طبق مطالعه ای بام سبزی که آبیاری نشده باشد، در سال مرطوب حداکثر جذب کربن معادل ۱۸۹ گرم کربن در متر مربع در سال دارد که تقریباً دو برابر حداقل جذب کربن درسال خشک(معادل ۹۵ گرم درمترمربع درسال) است (Konopka et al., 2021).

کنترل علف‌های هرز از رقابت این گیاهان با گیاهان مطلوب برای منابعی نظیر آب، مواد مغذی و نور جلوگیری کرده و تراکم پوشش گیاهی را افزایش می‌دهد که تأثیر مثبتی بر جذب دی‌اکسیدکربن و سایه‌اندازی دارد. استفاده از کودهای آلی نیز به غنی‌سازی بستر با مواد آلی و فراهم کردن مواد مغذی مورد نیاز برای رشد گیاهان کمک می‌کند و به طور غیرمستقیم بر بهبود اثرات حرارتی بام‌های سبز تأثیرگذار است (Tan et al., 2023).

نتایج و بحث

ملاحظات سازه‌ای و تأسیسات بام سبز

در بستر فوق‌سبُک با دانسیته تقریباً ۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، بار مرده خشک حدود ۹۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار اشباع آب در حد ۱۴۰ کیلوگرم بر متر مربع خواهد بود. علاوه بر این، استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای شامل لوله‌کشی، پمپ کم‌فشار و مخزن ذخیره ۵۰_۱۰۰ لیتری بر متر مربع، به‌طور متوسط ۱۰_۲۵ کیلوگرم بر متر مربع بار مرده اضافه ایجاد می‌کند. مجموع این بارها باید در ترکیب بارمرده سقف (خاک، آب و تأسیسات) منظور شده و در طراحی تیرها، دال‌ها و تکیه‌گاه‌ها با ضریب اطمینان مناسب لحاظ شود؛ همچنین مسیرگذاری لوله‌ها و محل نصب مخزن باید به گونه‌ای در پلان سقف پیش‌بینی گردد که دسترسی آسان برای نگهداری و تعمیرات دوره‌ای فراهم باشد.

تحلیل تغییرات شاخص سطح برگ در دوره‌های گرم و سرد و تاثیر بر میزان مصرف انرژی

با توجه به جدول (۳) و تصویر(۲) در دوره سرد،افزایش مقدار شاخص سطح برگ از ۰/۰۱ تا ۲/۵ ، منجر به کاهش تدریجی میزان مصرف انرژی می‌شود. این کاهش به دلیل محدودتر شدن تبادل حرارت است. وقتی شاخص سطح برگ از ۲/۵ بیشتر می‌شود، مصرف انرژی افزایش می یابد. زیرا با افزایش بیشتر شاخص سطح برگ ، پوشش گیاهی ممکن است بیش از حد سایه ایجاد کند و مانع از جذب گرمای خورشید شود که در دوره سرد به آن نیاز است. علاوه بر این، رطوبت موجود در گیاهان می‌تواند باعث افزایش جرم حرارتی شده و موجب از دست دادن گرما به جای حفظ آن شود.

در دوره گرم، افزایش شاخص سطح برگ از ۰/۰۱ تا ۵/۰۰ باعث کاهش مستمر میزان مصرف انرژی می‌شود. این کاهش به دلیل اثرات سایه‌اندازی ، کاهش دمای محیط اطراف و کاهش انتقال گرما از سقف است. افزایش شاخص سطح برگ از ۰/۰۱ به ۵/۰۰ تأثیر افزایشی دارد، اما به نظر می‌رسد کاهش میزان مصرف انرژی در این بازه غیرخطی و کاهنده باشد

انتخاب گیاهان با مقادیر بهینه شاخص سطح برگ به بهینه‌سازی عملکرد سقف‌های سبز در هر دو دوره کمک کرده است. همان‌طور که در تصویر(۳) نشان داده شده، انتخاب گیاهانی با شاخص سطح برگ بیش از ۴ و در مواردی ۳/۵، کاهش مصرف انرژی بیش از ۲۰ درصد را در کل سال امکان‌پذیر کرده است.

تأثیر انعکاس برگ و انتشار برگ بر میزان مصرف انرژی

در بررسی میزان مصرف انرژی در بام‌های سبز، اگرچه انعکاس برگ و انتشار برگ می‌توانند تأثیرگذار باشند، اما در مقایسه با سایر عوامل مانند شاخص سطح برگ و سایه‌اندازی، تأثیر آن‌ها معمولاً کم تراست. در نتیجه، در مدل‌های اولیه یا در تحلیل‌هایی که به بررسی کلی نیاز دارند، می‌توان این دو ویژگی را نادیده گرفت، مگر اینکه جزئیات دقیق‌تر و تفاوت‌های فیزیکی معناداری میان گیاهان مورد بررسی وجود داشته باشد.

بررسی تأثیر ضخامت خاک بر عملکرد حرارتی و کاهش انتشار دی اکسیدکربن

برای بررسی تأثیر ضخامت خاک بر عملکرد انرژی و کاهش انتشار دی اکسیدکربن شبیه سازی هایی انجام شد که در جدول(۴) آورده شده است ، فرضیات مطالعه به شرح زیر در نظر گرفته شده‌اند: شاخص سطح برگ در دوره گرم ۳/۵ و در دوره سرد ۱/۷۵ فرض شده است. ارتفاع گیاه ۰/۱ متر، بازتاب برگ ۰/۳۶ و تابش برگ ۰/۹۵ به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده‌اند. ضخامت خاک به‌عنوان متغیر اصلی در مقادیر ۱۰ تا ۴۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرارگرفته است تا تأثیر آن بر صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار دی اکسیدکربن ارزیابی شود.

در دوره گرم، با ضخامت خاک ۱۰ سانتی‌متر، صرفه‌جویی انرژی ۲۰٪ است، اما با افزایش ضخامت خاک به ۱۵ سانتی‌متر، صرفه‌جویی انرژی به ۲۱٪ می‌رسد که بیشترین مقدار صرفه‌جویی در دوره گرم است. پس از آن، با افزایش ضخامت خاک به ۲۰، ۲۵، و ۳۰ سانتی‌متر، صرفه‌جویی انرژی کاهش می‌یابد و به ترتیب به ۲۰٪، ۱۹٪، و ۱۸٪ می‌رسد. این روند نشان می‌دهد که افزایش ضخامت خاک تا حدی به بهبود صرفه‌جویی انرژی کمک می‌کند، اما پس از یک نقطه مشخص، کارایی کاهش می‌یابد.

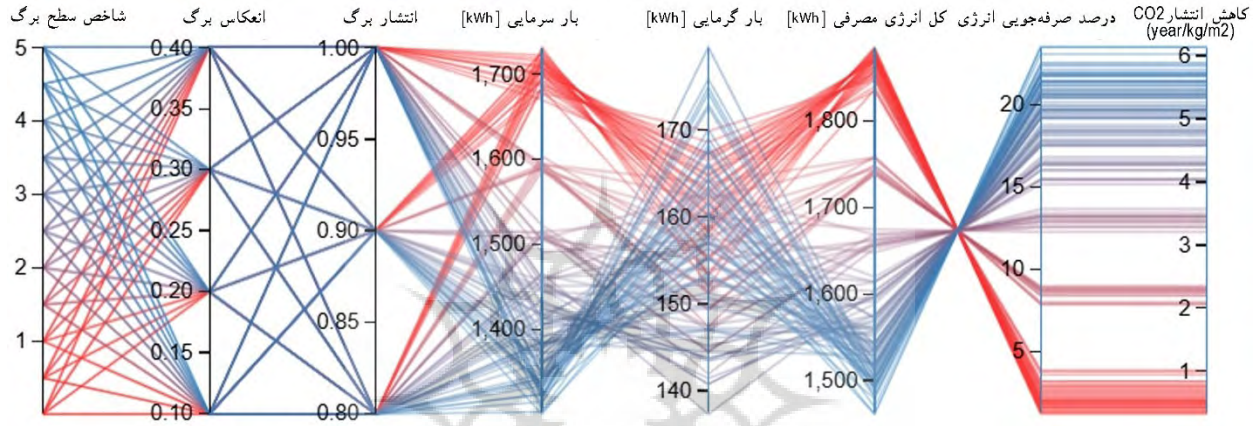
در دوره سرد نیز صرفه‌جویی انرژی با ضخامت خاک به صورت قابل توجهی تغییر می‌کند. با ضخامت خاک ۱۰ سانتی‌متر، صرفه‌جویی انرژی ۵.٪ است. با افزایش ضخامت خاک به ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر، صرفه‌جویی انرژی به ترتیب به ۱۰٪ و ۱۳٪ افزایش می‌یابد. در ضخامت‌های بیشتر، یعنی ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر، صرفه‌جویی انرژی به ۱۶٪ می‌رسد. برخلاف

دوره گرم، در دوره سرد افزایش ضخامت خاک به‌طور پیوسته موجب افزایش صرفه‌جویی انرژی می‌شود.

به طور کلی در دوره گرم، ضخامت ۱۵ سانتی‌متر بهینه ترین میزان صرفه‌جویی انرژی را ارائه می‌دهد، در حالی که در دوره سرد، افزایش ضخامت خاک همواره به بهبود صرفه‌جویی انرژی کمک می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که اثر ضخامت خاک در دوره‌های مختلف سال متفاوت است. انتخاب ضخامت۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر بهترین گزینه است. این ضخامت تعادلی بین صرفه‌جویی انرژی در دوره گرم و دوره سرد ایجاد می‌کند. همچنین، کاهش انتشار دی اکسیدکربن نیز در این ضخامت قابل‌قبول است. این انتخاب می‌تواند عملکرد مطلوبی در هر دو دوره فراهم کند.

درصد پوشش گیاهی در بهمن‌ماه به‌ترتیب برای رزماری ۴۵٪، آویشن ۳۰٪، اسطوخودوس ۳۰٪، لیزوماکیا ۳۰٪، ناز یخی ۵۰٪، پاپیتال ۸۰٪، بومادران ۶۰٪ و سدوم ۷۰٪ بود. بر این اساس، شاخص سطح برگ در دوره سرد برای هر گیاه کمتر در نظر گرفته شد تا شرایط واقعی بهتر شبیه‌سازی شود.

نتایج در جدول ۵ نشان داد که گیاهان انتخابی تأثیرات مختلفی بر کاهش میزان مصرف انرژی و انتشار کربن دارند. آویشن و ناز یخی به دلیل شاخص سطح برگ بالا بیشترین تأثیر را در کاهش انرژی (به ترتیب ۲۴٪ و ۲۳٪) و اسطوخودوس و آویشن و بومادران بیشترین تاثیر را در کاهش

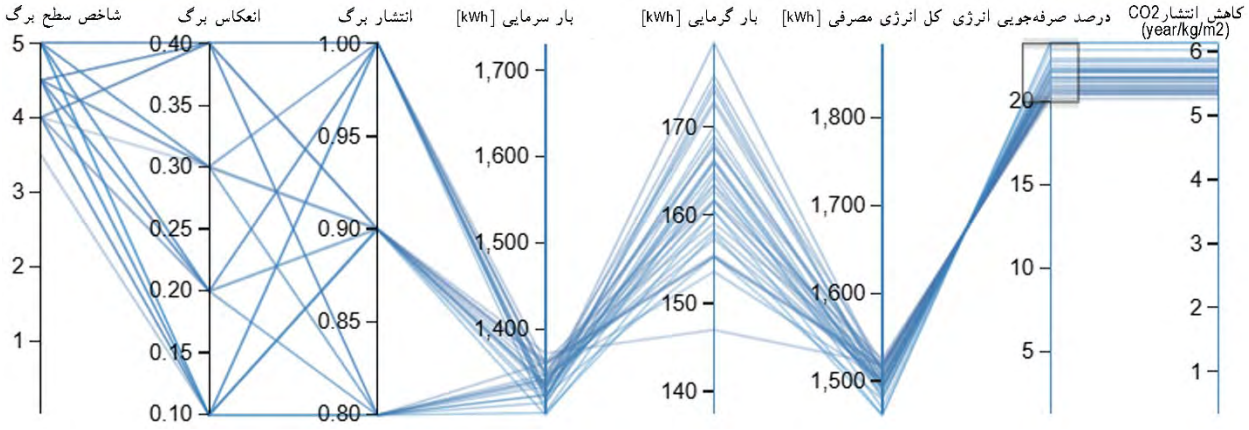


تصویر۲. نمودار جدول ۳

جدول ۳. تأثیر شاخص سطح برگ، انعکاس برگ و انتشار برگ بر مصرف انرژی و کاهش انتشاردی اکسید کربن

کاهش انتشار دی اکسیدکربن (year/kg/m۲)	درصد صرفه‌جویی انرژی	کل انرژی مصرفی [kWh]	درصد صرفه‌جویی انرژی درگرمایش	انرژی مصرفی برای گرمایش [kWh]	درصد صرفه‌جویی انرژی در سرمایش	انرژی مصرفی برای سرمایش [kWh]	انتشار برگ	انعکاس برگ	شاخص سطح برگ در دوره گرم
۰/۳۳	۱	۱۸۸۵	۱۳	۱۵۸	۰/۰۶	۱۷۲۷	۰/۸	۰/۱	۰/۰۱
۴/۱۸-۰/۴۵	۱۶-۱	۱۶۰۴-۱۸۷۶	۱۳-۲۴	۱۳۷-۱۵۸	۰/۶-۱۵	۱۴۶۶-۱۷۱۸			۲/۵-۰/۵
۴/۵۶	۱۷	۱۵۷۶	۲۲	۱۴۱	۱۷	۱۴۳۵			۳
۶/۱۲-۵/۱۸	۲۳-۱۹	۱۴۶۲-۱۵۳۰	۲۰-۱۳	۱۵۸-۱۴۵	۲۰-۲۵	۱۳۰۴-۱۳۸۵			۵-۳/۵
۰/۴	۱	۱۸۸۰	۱۱	۱۶۰	۰/۴۹	۱۷۲۰		۰/۲	۰/۰۱
۴/۲۹-۰/۵۵	۱۶-۲	۱۵۹۵-۱۸۶۹	۱۱-۲۰	۱۴۵-۱۶۱	۱-۱۶	۱۴۵۰-۱۷۰۷			۲/۵-۰/۵
۴/۸۱	۱۸	۱۵۵۸	۲۱	۱۴۴	۱۸	۱۴۱۴			۳
۵/۸۵-۴/۸۹	۲۲-۱۸	۱۴۸۲-۱۵۵۲	۸-۱۷	۱۶۶-۱۵۰	۱۹-۲۴	۱۳۱۶-۱۴۰۲			۵-۳/۵
۰/۴۶	۱	۱۸۷۵	۱۰	۱۶۳	۱	۱۷۱۳		۰/۳	۰/۰۱
۴/۰۴-۰/۶۵	۱۵-۲	۱۶۱۴-۱۸۶۱	۹-۱۷	۱۵۰-۱۶۵	۲-۱۵	۱۴۶۴-۱۶۹۷			۲/۵-۰/۵
۴/۸۵	۱۸	۱۵۵۴	۱۹	۱۴۷	۱۹	۱۴۰۷			۳
۵/۷۲-۵/۱۳	۲۲-۱۹	۱۴۹۱-۱۵۳۴	۱۵-۸	۱۶۶-۱۵۳	۲۰-۲۳	۱۳۲۵-۱۳۸۱			۵-۳/۵
۰/۵۳	۲	۱۸۷۰	۹	۱۶۵	۱	۱۷۰۵		۰/۴	۰/۰۱
۴/۲۶-۰/۷۶	۱۶-۳	۱۵۹۸-۱۸۵۴	۸-۲۲	۱۴۱-۱۶۷	۲-۱۶	۱۴۵۷-۱۶۸۶			۲/۵-۰/۵
۴/۶۶	۱۷	۱۵۶۸	۲۱	۱۴۴	۱۸	۱۴۲۵			۳
۵/۶۷-۵/۱۵	۲۱-۱۹	۱۴۹۵-۱۵۳۳	۱۹-۱۱	۱۶۰-۱۴۷	۲۰-۲۳	۱۳۳۵-۱۳۸۶			۵-۳/۵

۰/۳۶	۱	۱۸۸۳	۱۲	۱۵۹	۱	۱۷۲۴	۰/۹	۰/۱	۰/۰۱
۴/۳۹-۰/۴۹	۱۶-۱	۱۵۸۹-۱۸۷۳	۱۲-۲۲	۱۴۱-۱۵۹	۱-۱۶	۱۴۴۸-۱۷۱۴			۲/۵-۰/۵
۴/۶۴	۱۷	۱۵۷۰	۲۱	۱۴۴	۱۷	۱۴۲۶			۳
۶/۱۲-۵/۳۳	۲۳-۲۰	۱۴۶۲-۱۵۲۰	۱۹-۱۱	۱۶۰-۱۴۷	۲۱-۲۵	۱۳۰۱-۱۳۷۳			۵-۳/۵
۰/۴۲	۱	۱۸۷۸	۱۱	۱۶۱	۱	۱۷۱۷		۰/۲	۰/۰۱
۴/۳۴-۰/۵۹	۱۶-۲	۱۵۹۲-۱۸۶۶	۱۰-۱۸	۱۴۸-۱۶۳	۱-۱۶	۱۴۴۵-۱۷۰۳			۲/۵-۰/۵
۴/۷۲	۱۸	۱۵۶۴	۱۹	۱۴۶	۱۸	۱۴۱۸			۳
۵/۸۳-۵/۰۱	۲۲-۱۹	۱۴۸۳-۱۵۴۳	۱۷-۷	۱۶۸-۱۵۱	۱۹-۲۴	۱۳۱۵-۱۳۹۳			۵-۳/۵
۰/۴۹	۱/۸۶	۱۸۷۴	۹	۱۶۴	۱	۱۷۱۰		۰/۳	۰/۰۱
۴/۱۸-۰/۷	۱۶-۲	۱۶۰۴-۱۸۵۸	۸-۱۶	۱۵۲-۱۶۶	۲-۱۶	۱۴۵۲-۱۶۹۲			۲/۵-۰/۵
۴/۸۱	۱۸	۱۵۵۸	۱۶	۱۵۱	۱۹	۱۴۰۶			۳
۵/۷۲-۵/۰۶	۲۲-۱۹	۱۴۹۱-۱۵۳۹	۱۴-۶	۱۷۰-۱۵۶	۲۰-۲۴	۱۳۲۱-۱۳۸۳			۵-۳/۵
۰/۵۵	۲	۱۸۶۹	۸	۱۶۶	۱	۱۷۰۲		۰/۴	۰/۰۱
۴/۰۳-۰/۸۱	۱۵-۳	۱۶۱۵-۱۸۵۰	۷-۱۳	۱۵۷-۱۶۹	۳-۱۶	۱۴۵۸-۱۶۸۲			۲/۵-۰/۵
۴/۵۸	۱۷	۱۵۷۴	۱۳	۱۵۷	۱۸	۱۴۱۷			۳
۵/۴۵-۵/۰۲	۲۰-۱۹	۱۵۱۱-۱۵۴۲	۱۱-۳	۱۷۶-۱۶۰	۲۰-۲۳	۱۳۳۵-۱۳۸۲			۵-۳/۵
۰/۳۸	۱	۱۸۸۲	۱۲	۱۶۰	۰/۳۸	۱۷۲۲	۱	۰/۱	۰/۰۱
۴/۲۶-۰/۵۳	۱۶-۲	۱۵۹۸-۱۸۷۰	۱۱-۲۱	۱۴۴-۱۶۱	۱-۱۶	۱۴۵۴-۱۷۱۰			۲/۵-۰/۵
۴/۵۷	۱۷	۱۵۷۵	۲۰	۱۴۵	۱۷	۱۴۳۰			۳
۶/۰۱-۵/۱۴	۲۳-۱۹	۱۴۷۰-۱۵۳۳	۱۷-۹	۱۶۴-۱۵۰	۲۰-۲۴	۱۳۰۶-۱۳۸۳			۵-۳/۵
۰/۴۵	۱/۷	۱۸۷۷	۱۰	۱۶۲	۱	۱۷۱۴		۰/۲	۰/۰۱
۴/۲۹-۰/۶۴	۱۶-۲	۱۵۹۶-۱۸۶۳	۹-۱۷	۱۵۰-۱۶۴	۲-۱۶	۱۴۴۵-۱۶۹۹			۲/۵-۰/۵
۴/۷۶	۱۸/۲۳	۱۵۶۱	۱۹	۱۴۷	۱۸	۱۴۱۴			۳
۵/۶۷-۴/۹۹	۲۱-۱۹	۱۴۹۵-۱۵۴۴	۱۶-۴	۱۷۴-۱۵۳	۲۰-۲۴	۱۳۲۱-۱۳۹۱			۵-۳/۵
۰/۵۱	۱/۹۶	۱۸۷۲	۹	۱۶۵	۱	۱۷۰۷	۱	۰/۳	۰/۰۱
۴/۰۳-۰/۷۵	۱۵-۲	۱۶۱۵-۱۸۵۵	۸-۱۵	۱۵۴-۱۶۷	۲-۱۵	۱۴۶۱-۱۶۸۸			۲/۵-۰/۵
۴/۷۸	۱۸	۱۵۶۰	۱۵	۱۵۳	۱۹	۱۴۰۷			۳
۵/۶۶-۵/۰۸	۲۱-۱۹	۱۴۹۵-۱۵۳۸	۳-۱۲	۱۷۵-۱۶۰	۲۰-۲۴	۱۳۲۰-۱۳۷۸			۵-۳/۵
۰/۵۸	۲/۲۲	۱۸۶۷	۸	۱۶۷	۲	۱۷۰۰		۰/۴	۰/۰۱
۳/۹۶-۰/۸۵	۱۵-۳	۱۶۲۰-۱۸۴۷	۶-۱۱	۱۶۰-۱۷۰	۳-۱۶	۱۴۶۰-۱۶۷۷			۲/۵-۰/۵
۴/۶۱	۱۷/۶۶	۱۵۷۲	۱۱	۱۶۱	۱۸	۱۴۱۱			۳
۵/۴۵-۵/۰۱	۲۰-۱۹	۱۵۱۱-۱۵۴۳	۱۰-۰/۸۲	۱۷۹-۱۶۳	۲۰-۲۳	۱۳۳۱-۱۳۸۱			۵-۳/۵



تصویر۳. نمودارمحدود شده جدول ۳ بر اساس کاهش مصرف انرژی بیشتر از ۲۰ درصد

جدول۴. بررسی تاثیر ضخامت خاک بر مصرف انرژی

کاهش انتشار دی اکسیدکربن (year/kg/m^2)	درصد صرفه‌جویی انرژی	کل انرژی مصرفی [kWh]	درصد صرفه‌جویی انرژی در گرمایش	بار گرمایی [kWh]	درصد صرفه‌جویی انرژی در سرمایش	بار سرمایی [kWh]	ضخامت خاک (cm)
۴/۹۹	٪۱۹	۱۵۴۴/۲۴	٪۵	۱۷۰/۶۴	٪۲۰	۱۳۷۳/۶	۱۰
۵/۲۵	٪۲۰	۱۵۲۵/۶۲	٪۱۰	۱۶۳/۰۳	٪۲۱	۱۳۶۲/۵۹	۱۵
۵/۱۵	٪۱۹	۱۵۳۳/۲۱	٪۱۳	۱۵۷/۴۴	٪۲۰	۱۳۷۵/۷۷	۲۰
۴/۸۷	٪۱۸	۱۵۵۳/۰۷	٪۱۶	۱۵۲/۰۷	٪۱۹	۱۴۰۱	۲۵
۴/۶۵	٪۱۷	۱۵۶۹/۳۲	٪۱۶	۱۵۱/۸۱	٪۱۸	۱۴۱۷/۵۱	۳۰
۲/۸۱	٪۱۰	۱۷۰۴/۲	٪۱۸	۱۴۷/۰۹	٪۱۰	۱۵۵۷/۱۱	۳۵
۲/۰۶	٪۷	۱۷۵۹/۰۴	٪۲۲	۱۴۰/۸۷	٪۶	۱۶۱۸/۱۷	۴۰

جدول۵. بررسی مصرف انرژی وکاهش کربن گیاهان انتخاب شده

نام گیاه		رزماری	آویشن	اسطوخودوس	لیزوماکیا	نازیخی (فرانسوی)	پاپیتال	بومادران	سدوم
شاخص سطح برگ (m^2/ m^2)		۳/۷۵	۴/۹	۸/۸۳	۳/۰۷	۷	۴/۳۷	۴/۳۶	۳/۵
ارتفاع گیاه (m)		۰/۲۷	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۸
ضخامت خاک (m)		۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
زیست توده (gr/m^2)		۸۱۱/۲	۸۳۰	۱۹۴۴	۲۴۸/۰۷	۴۰۷/۱۴	۳۹/۱۱	۹۳۱/۲	۳۱۸/۱۸
بار سرمایی [kWh]		۱۳۶۳/۸	۱۲۹۶/۱	۱۳۰۰/۵	۱۳۹۵/۹	۱۲۸۸/۲	۱۳۱۱/۴	۱۳۱۱/۴	۱۳۶۴/۴
درصد صرفه‌جویی انرژی در سرمایش		٪۲۱	٪۲۵	٪۲۵	٪۱۹	٪۲۵	٪۲۴	٪۲۴	٪۲۱
بار گرمایی [kWh]		۱۵۴/۵۳	۱۴۴/۴۳	۱۶۹/۲۷	۱۴۱/۳۲	۱۷۲/۵۲	۱۷۲/۲۸	۱۶۲/۸۴	۱۶۱/۶۷
درصد صرفه‌جویی انرژی در گرمایش		٪۱۵	٪۲۰	٪۶	٪۲۲	٪۵	٪۵	٪۱۰	٪۱۱
کل انرژی مصرفی [kWh]		۱۵۱۸/۳۶	۱۴۴۰/۴۹	۱۴۶۹/۷۶	۱۵۳۷/۲۴	۱۴۶۰/۷۴	۱۴۸۳/۶۹	۱۴۷۴/۲۱	۱۵۲۶/۰۹
درصد صرفه‌جویی انرژی کل		٪۲۰	٪۲۴	٪۲۳	٪۱۹	٪۲۳	٪۲۲	٪۲۲	٪۲۰
کاهش انتشار دی اکسیدکربن (year/kg/m^2)	مستقیم	۱/۴۸	۱/۵۲	۳/۵	۰/۴۵	۰/۷۵	۰/۰۷	۱/۷۰	۰/۵۸
	غیر مستقیم	۵/۳۵	۶/۴۱	۶/۰۱	۵/۰۹	۶/۱۴	۵/۸۲	۵/۹۵	۵/۲۴
کل کاهش انتشاردی اکسیدکربن		۶/۸۳	۷/۹۳	۹/۵۱	۵/۵۴	۶/۸۹	۵/۸۹	۷/۶۵	۵/۸۲

انتشار دی اکسیدکربن (به ترتیب۹/۵۱، ۷/۹۳ ، ۷/۶۵ کیلوگرم در متر مربع در سال) داشتند. گیاهانی مانند سدوم و لیزوماکیا به دلیل شاخص سطح برگ و زیست‌توده پایین‌تر، تأثیر کمتری در کاهش انرژی و کربن داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که درصد پوشش گیاهی در دوره سرد (بهمن‌ماه) و شاخص سطح برگ عوامل کلیدی در عملکرد گیاهان برای بام‌های سبز هستند. انتخاب گیاهانی با شاخص سطح برگ بالا و پوشش بهتر می‌تواند منجر به صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار کربن بیشتری شود.

با توجه به جدول(۵) کاهش کربن به صورت غیرمستقیم بیشتر از جذب کربن به طور مستقیم ازطریق گیاهان است. همانطور که محققان در دو مقاله (Robbiati et al., 2023; Seyedabadi et al., 2021) در تحقیقات خود دریافتند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه پتانسیل قابل توجه بام های سبز را به عنوان یک راه حل پایدار برای بهبود بهره وری انرژی و کاهش انتشار کربن در مناطق شهری مانند تهران برجسته می کند. با انجام ۱۳۲ سناریو شبیه سازی، ویژگی‌های حیاتی گیاه مانند شاخص سطح برگ ، انتشار و انعکاس برگ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد با داشتن گیاهانی با شاخص سطح برگ بیشتر از۳/۵ می توان به طور کلی صرفه جویی در انرژی را به حداکثر رساند و دمای سطح را به طور موثر کاهش داد. هشت گونه گیاهی بهینه انتخاب شدند که به صرفه جویی انرژی بین ۱۹ تا ۲۴ درصد در کل سال و کاهش دی اکسیدکربن بین ۵/۵۴ تا ۹/۵۱کیلوگرم برمتر مربع در سال دست یافتند.

در دوره گرم، با استفاده از گونه‌های گیاهی بهینه و طراحی مناسب بستر، میزان صرفه‌جویی در انرژی از حداقل ۰/۰۶ ٪ تا حداکثر ۲۵٪ متغیر بوده است.برای داشتن صرفه جویی انرژی بین ۱۹ تا ۲۵ درصد در دوره گرم شاخص سطح برگ باید بازه ای بین ۳/۵ تا۵ داشته باشد وبه طور کلی مقادیر انعکاس و انتشار برگ تاثیر واضحی در صرفه جویی انرژی در دوره گرم نداشتند.

در دوره سرد، صرفه‌جویی انرژی بین حداقل ۰٪/۸۲ تا حداکثر ۲۴٪ متغیر بوده است. برخلاف دوره گرم، گیاهانی با شاخص سطح برگ کمتر عملکرد بهتری در حفظ گرمای داخلی ساختمان داشته‌اند.برای داشتن صرفه جویی انرژی بین ۱۵تا ۲۴درصد در دوره سرد شاخص سطح برگ باید بازه ای بین ۱ تا ۴ داشته باشد و به طور کلی گیاهانی با انتشار بالا (۰/۹ و بالاتر) و انعکاس پایین تر (۰/۱ و۰/۲) عملکرد بهتری در دوره سرد داشته‌اند.

بررسی تاثیر ضخامت بستر بر عملکرد انرژی نشان داد که ضخامت ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر بهترین تعادل را برای کاهش میزان مصرف انرژی در دوره‌های گرم و سرد ارائه می‌دهد. این ضخامت همچنین کاهش قابل توجهی دی اکسیدکربن را از طریق مکانیسم های مستقیم، مانند جذب کربن توسط گیاهان، و مکانیسم های غیر مستقیم، از جمله کاهش تقاضای انرژی برای گرمایش و سرمایش تضمین می کند.

تجزیه و تحلیل زیست توده پتانسیل جذب کربن به طور مستقیم با گیاهان انتخاب شده را نشان داد. بر اساس وزن زیست توده خشک، گیاهان برای جذب کربن به شرح زیر رتبه بندی شدند: اسطوخودوس> بومادران > آویشن> رزماری> ناز یخی> سدوم > لیزوماکیا> پاپیتال. گیاه آویشن و ناز یخی به دلیل شاخص سطح برگ بالا بیشترین تأثیر را در کاهش انرژی (به ترتیب ۲۴٪ و ۲۳٪) داشتند. و اسطوخودوس و آویشن و بومادران بیشترین تاثیر را در کاهش انتشار دی اکسیدکربن (به ترتیب۹/۵۱ ، ۷/۹۳ ،۷/۶۵کیلوگرم در متر مربع در سال) داشتند. این نتایج بر اهمیت انتخاب دقیق گیاه و طراحی بستر در افزایش عملکرد بام‌های سبز تأکید می‌کند.

نتایج به دست آمده از این تحقیق، راهنمایی‌هایی برای معماران، برنامه‌ریزان شهری و سیاست‌گذاران برای اجرای استراتژی‌های موثر بام سبز در تهران ارائه می‌کند. مطالعات آتی می‌تواند عوامل دیگری مانند نگهداری طولانی‌مدت، تجزیه و تحلیل هزینه و ادغام سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر را برای بهینه‌سازی بیشتر عملکرد بام سبز و گسترش کاربرد آن‌ها در بافت‌های مختلف شهری بررسی کند.

فهرست منابع

Abdalazeem, M. E., Hassan, H., Asawa, T., & Mahmoud, H. (2024). Enhancing energy efficiency in hot climate buildings through integrated photovoltaic panels and green roofs: An experimental study. *Solar Energy*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X24001130

Abuseif, M., Jamei, E., & Chau, H. W. (2023). Simulation-based study on the role of green roof settings on energy demand reduction in seven Australian climate zones. *Energy and Buildings*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823001688

Balvedi, N., & Giglio, T. (2023). Influence of green roof systems on the energy performance of buildings and their surroundings. *Journal of Building Engineering*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223006095

Barrio, E. D. (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778897000297

Cao, J. J., Hu, S., Dong, Q., Liu, L. J., & Wang, Z. L. (2019). Green roof cooling contributed by plant species with different photosynthetic strategies. *Energy and Buildings*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819300490

Cascone, S., Coma, J., Gagliano, A., & Pérez, G. (2019). The evapotranspiration process in green roofs: A review. *Building and Environment*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318306425

Coma, J., Gracia, A. de, Chàfer, M., Pérez, G., & ... (2017). Thermal characterization of different substrates under dried conditions for extensive green roofs. *Energy and Buildings*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817308642

Domanicky, J., & Vranay, F. (2023). The Impact of Vegetative Roof on Heat Energy Demand. *International Conference Current Issues of Civil …*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_11

roof shows consistent annual net uptake of carbon as documented by 5 years of eddy-covariance flux measurements. *Journal of Geophysical …*. https://doi.org/10.1029/2020JG005879

López-Silva, D. V., Méndez-Alonzo, R., & ... (2022). Experimental comparison of two extensive green roof designs in Northwest Mexico. *Building and …*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132322009520

Mousavi, S. N., Gheibi, M., Wacławek, S., & Behzadian, K. (2023). A novel smart framework for optimal design of green roofs in buildings conforming with energy conservation and thermal comfort. In *Energy and Buildings*. Elsevier. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823003419

Nguyen, C. N., Chau, H. W., Kumar, A., Chakraborty, A., & ... (2024). Biochar Amendment in Green Roof Substrate: A Comprehensive Review of the Benefits, Performance, and Challenges. In *Applied Sciences*. mdpi.com. https://www.mdpi.com/2076-3417/14/16/7421

Perillo, V. L., Brendel, A. S., Ferrelli, F., Gutiérrez, A., Vitale, A. J., & ... (2023). CO2 flux dynamics of exotic and native species in an extensive green roof simulator with hydric deficit. *Urban Climate*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221209552300161X

Piccardo, C., Dodoo, A., Gustavsson, L., & Tettey, U. (2020). Retrofitting with different building materials: Life-cycle primary energy implications. *Energy*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219323436

Pique, L., Blanchet, P., & Breton, C. (2023). Global warming potential comparison between green and conventional roofs in cold climate using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623024721

Robbiati, F. O., Natalia, C., Gustavo, B., Gustavo, O., & ... (2023). Vegetated roofs as a nature-based solution to mitigate climate change in a semiarid city. In *Nature-Based …*. Elsevier. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772411523000216

Rushton, K. R., Eilers, V. H. M., & Carter, R. C. (2006). Improved soil moisture balance methodology for recharge estimation. *Journal of Hydrology*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169405003185

Seyedabadi, M. R., Eicker, U., & Karimi, S. (2021). Plant selection for green roofs and their impact on carbon sequestration and the building carbon footprint. In *Environmental Challenges*. Elsevier. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667010021000986

Shafique, M., Xue, X., & Luo, X. (2020). An overview of carbon sequestration of green roofs in urban areas. *Urban Forestry &Urban Greening*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866719303668

Shi, D., Gao, Y., Zeng, P., Li, B., Shen, P., & Zhuang, C. (2022). Climate adaptive optimization of green roofs and natural night ventilation for lifespan energy performance improvement

Ferrante, P., Gennusa, M. L., Peri, G., Rizzo, G., & ... (2016). Vegetation growth parameters and leaf temperature: Experimental results from a six plots green roofs' system. *Energy*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216310106

Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L. G., & Principi, P. (2010). Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132310000806

Gargari, C., Bibbiani, C., Fantozzi, F., & ... (2016). Simulation of the thermal behaviour of a building retrofitted with a green roof: Optimization of energy efficiency with reference to italian climatic zones. *Agriculture and Agricultural …*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210784316300857

Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure. *Built Environment*. https://www.ingentaconnect.com/content/alex/benv/2007/00000033/00000001/art00008

Granata, M. U., Bracco, F., & Catoni, R. (2020). Carbon dioxide sequestration capability of hazelnut orchards: Daily and seasonal trends. *Energy, Ecology and Environment*. https://doi.org/10.1007/s40974-020-00161-7

He, Y., Yu, H., Ozaki, A., & Dong, N. (2020). Thermal and energy performance of green roof and cool roof: A comparison study in Shanghai area. *Journal of Cleaner Production*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620322526

Hellies, M., Deidda, R., & Viola, F. (2018). Retention performances of green roofs worldwide at different time scales. *Land Degradation & …*. https://doi.org/10.1002/ldr.2947

Heusinger, J., & Weber, S. (2017a). Extensive green roof CO2 exchange and its seasonal variation quantified by eddy covariance measurements. *Science of the Total Environment*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717317552

Heusinger, J., & Weber, S. (2017b). Surface energy balance of an extensive green roof as quantified by full year eddy-covariance measurements. *Science of the Total Environment*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716323567

Jamei, E., Chau, H. W., Seyedmahmoudian, M., & ... (2021). Review on the cooling potential of green roofs in different climates. *Science of the Total …*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721034781

Jim, C. Y., & Tsang, S. W. (2011a). Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Building and Environment*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132310003653

Jim, C. Y., & Tsang, S. W. (2011b). Ecological energetics of tropical intensive green roof. *Energy and Buildings*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811002672

Joshi, J., Stocker, B. D., Hofhansl, F., Zhou, S., Dieckmann, U., & ... (2022). Towards a unified theory of plant photosynthesis and hydraulics. In *Nature Plants*. nature.com. https://www.nature.com/articles/s41477-022-01244-5

Konopka, J., Heusinger, J., & ... (2021). Extensive urban green

Sustainable Cities and …. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670723005243

Zahedi, R., Daneshgar, S., Farahani, O. N., & Aslani, A. (2023). Thermal analysis model of a building equipped with green roof and its energy optimization. In *Nature-Based Solutions*. Elsevier. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772411523000058

Zheng, X., Yang, Z., Yang, J., Tang, M., & Feng, C. (2022). An experimental study on the thermal and energy performance of self-sustaining green roofs under severe drought conditions in summer. *Energy and Buildings*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778822001244

Zhou, L. W., Wang, Q., Li, Y., Liu, M., & Wang, R. Z. (2018). Green roof simulation with a seasonally variable leaf area index. *Energy and Buildings*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817325409

Ziogou, I., Michopoulos, A., Voulgari, V., & ... (2017). Energy, environmental and economic assessment of electricity savings from the operation of green roofs in urban office buildings of a warm Mediterranean region. *Journal of Cleaner …*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617319601

Zonato, A., Martilli, A., Gutierrez, E., Chen, F., & ... (2021). Exploring the effects of rooftop mitigation strategies on urban temperatures and energy consumption. *Journal of …*. https://doi.org/10.1029/2021JD035002

in office buildings. *Building and Environment*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132322007351

Tan, T., Kong, F., Yin, H., Cook, L. M., Middel, A., & ... (2023). Carbon dioxide reduction from green roofs: A comprehensive review of processes, factors, and quantitative methods. … *and Sustainable Energy …*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123002691

Whittinghill, L. J., Rowe, D. B., Schutzki, R., & ... (2014). Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems. *Landscape and Urban …*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204613002296

Wong, N. H., Cheong, D. K. W., Yan, H., Soh, J., Ong, C. L., & ... (2003). The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and …*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778802001081

Wong, N. H., Tay, S. F., Wong, R., Ong, C. L., & Sia, A. (2003). Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. *Building and Environment*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132302001312

Yaghoobian, N., & Srebric, J. (2015). Influence of plant coverage on the total green roof energy balance and building energy consumption. *Energy and Buildings*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881530027X

Yang, S., Kong, F., Yin, H., Zhang, N., Tan, T., & ... (2023). Carbon dioxide reduction from an intensive green roof through carbon flux observations and energy consumption simulations.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی