

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

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

Received: 11 Nov 2024

Received in revised form: 05 Dec 2024

Accepted: 23 Dec 2024

Zahra Safi Jahaghi¹ 

Master of Architectural Technology, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran. E-mail: Zahra.safi@ut.ac.ir

Mahdieh Abravesh²  (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>

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 CO₂ 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.

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

چکیده

بام سبز به عنوان یک راه حل پایدار برای کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن در محیط های شهری شناخته می شود. این پژوهش از نوع کاربردی-تحلیلی و مبتنی بر شبیه سازی است که به بهینه سازی عملکرد بام سبز در تهران با تمرکز بر ارزیابی ضخامت بستر، کاهش رد پای کربن و انتخاب گیاهان مناسب برای شرایط اقلیمی این

منطقه پرداخته است. در مجموع ۱۳۳ سناریوی شبیه سازی برای تحلیل ویژگی های گیاهی نظیر شاخص سطح برگ، بازتاب پذیری و انتشار برگ انجام شد. این شبیه سازی ها چارچوبی برای انتخاب بهترین گونه های گیاهی که به ویژه برای شرایط اقلیمی تهران شامل دماهای بالا، خشکی طولانی مدت و زمستان سرد مناسب هستند، ایجاد کرده و در نهایت هشت گونه بهینه شناسایی شدند. همچنین، در این پژوهش به بررسی مکانیسم های مستقیم و غیرمستقیم کاهش رد پای کربن، از جمله جذب دی اکسید کربن 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 می دهند که در دوره های گرم و سرد، صرفه جویی در بار سرمایی و گرمایی تا ۲۵ درصد امکان پذیر است. در دوره سرد، گیاهانی با شاخص سطح برگ کمتر نسبت به دوره گرم، عملکرد بهتری در حفظ گرمای داخلی ساختمان داشته اند. به طور کلی، هشت گیاه انتخابی می توانند بین ۱۹ تا ۲۴ درصد از مصرف انرژی سالانه را کاهش دهند.

واژه های کلیدی

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

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳

زهرا صفی جهقی^۱: کارشناس ارشد، گروه فناوری معماری، دانشکده معماری، دانشکده های زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

E-mail: Zahra.safi@ut.ac.ir

مهدیه آبروش (نویسنده مسئول)^۲: استادیار گروه فناوری معماری، دانشکده معماری، دانشکده های زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

E-mail: abravesh@ut.ac.ir

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

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)، ۷۴-۵۹.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

نگارندگان، حق تکثیر و امتیاز کامل انتشار مقاله خود را حفظ می کنند.



* مقاله حاضر برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده اول با عنوان "طراحی بام سبز مدولار و تأثیر آن بر کاهش میزان مصرف انرژی و رد پای کربن ساختمان در اقلیم تهران (نمونه موردی ساختمان آموزشی)" می باشد 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 و مسئول ۳۳ درصد 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 به عنوان 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 طولانی مدت 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 و کاهش انتشار دی اکسیدکربن 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 طراحی شده بر اساس استانداردهای نوپرفت 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 ۰/۰۰۰۱ 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: گچ کاری داخلی (۱/۵ سانتی‌متر)، لایه بتنی سقف (۲۰ سانتی‌متر)، لایه محافظ بخار (۱ میلی‌متر)، عایق حرارتی (پلی استایرن اکستروژده) (۵ سانتی‌متر)، پوشش ضدآب (۵ میلی‌متر).

در این مطالعه، بام سبز با توجه به اینکه نیازی به تقویت سازه سقف نیست، انتخاب شده و لایه‌های اضافه شده به این ترتیب هستند: لایه محافظ ریشه (۱ میلی‌متر)، لایه زهکشی (ژئودرین) (۲ تا ۴ سانتی‌متر)، لایه فیلتراسیون (۱ میلی‌متر)، 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

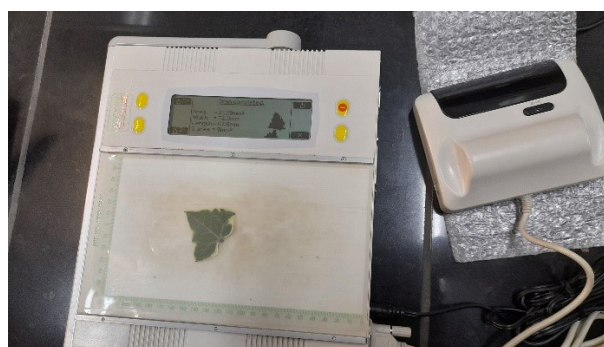
نام گیاه	نیاز به نور آفتاب	نیاز به آب	تحمل سرما	تحمل باد
رزماری	زیاد	کم	زیاد	بالا
آویشن	زیاد	متوسط هر روز آبیاری شود	متوسط (۰ درجه)	بالا
اسطوخودوس	زیاد	کم هر ۳ روز یکبار	متوسط	بالا
لیزوماکیا	زیاد	متوسط	زیاد	متوسط
ناز یخی (فرانسوی)	زیاد	کم هر ۳ روز یکبار	زیاد	بالا
پاپیتال	زیاد	کم	زیاد	بالا
بومادران	آفتاب تا نیمه سایه	کم	زیاد	بالا
سدوم	زیاد	کم (مقاوم به خشکی)	زیاد	بالا
گیاه فرانکنیا	زیاد	کم (مقاوم به خشکی)	زیاد	بالا
پیچ تلگرافی	آفتاب تا نیمه سایه	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

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 شبیه‌سازی گونه‌های خاص ایجاد می‌کند.

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 بالایی 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.

اندازه‌گیری 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 دقیق‌تر است استفاده شد که شامل برگ‌زدایی گیاهان و اندازه‌گیری تمام سطوح برگ‌ها با دستگاه اندازه‌گیر سطح برگ و سپس تقسیم آن به مساحت زمین بود که از دستگاه (Area Meter AM200) موجود در دانشگاه 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

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 بررسی شده 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.

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 اندازه‌گیری شده 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 (kgCO₂eq) محاسبه می‌گردد.

مراحل محاسبه‌ی میزان جذب کربن گیاهان به طورغیر مستقیم

کاهش تقاضای انرژی مستقیماً به کاهش انتشار کربن دی‌اکسید 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 دی‌اکسید منتشر می‌شود. این ضریب در انرژی ذخیره شده (بر حسب کیلووات‌ساعت) ضرب می‌شود تا کاهش انتشار کربن دی‌اکسید 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

جدول ۲. پژوهش‌های انجام شده در حوزه ی بام سبز که به مقایسه دو یا چند بام سبز پرداخته اند.

منبع	نتایج	مدت آزمایش	گیاهان	اهداف تحقیق	آب و هوا/ شهر	پارامترها
(Abuseif et al., 2023)	-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	سپتامبر ۲۰۱۹ تا اگوست ۲۰۲۰	به صراحت جزئیاتی ندارد	ارزیابی تأثیر تنظیمات بام سبز بر تقاضای انرژی در آب و هوای مختلف	منطقه ۷ مختلف آب و هوایی در استرالیا	ضخامت بستر (۱۰۰-۲۰۰ میلی‌متر؛ بیش از ۲۰۰ میلی‌متر)، پوشش (۲۵-۱۰۰٪)، عایق (با / بدون)، مناطق آب و هوایی (۷ منطقه استرالیا)
(Yang et al., 2023)	کاهش دی‌اکسید کربن 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 دی‌اکسید کربن، با اوج در پاییز (مستقیم) و تابستان (غیر مستقیم).	فوریه ۲۰۲۱ - فوریه ۲۰۲۲	ماژول ۱۰ سانتی متری: Sedum alfredia hance, Sedum lineare thunb ماژول ۳۰ سانتی متری: Ophiopogon japonicus, Osmanthus fragrans, Ligustrum sinense variegatum ماژول ۶۰ سانتی متری: Rhododendron pulchrum sweet	ارزیابی کاهش مستقیم و غیرمستقیم دی‌اکسید کربن یک بام سبز فشرده و سهم آن در اعتبارات کربن مبتنی بر طبیعت	موسمی نیمه گرمسیری / نانچینگ، چین	ضخامت بستر (۱۰، ۳۰، ۶۰ سانتی متر)، ارتفاع پوشش گیاهی، سطح برگ، بازتاب برگ، خواص حرارتی خاک

منبع	نتایج	مدت آزمایش	گیاهان	اهداف تحقیق	آب و هوا/ شهر	پارامترها	
(Pique et al., 2023)	- بام‌های سبز مصرف انرژی را ۲/۲۱ 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.	چرخه عمر ۴۵ سال بام های سبز	گسترده: علف‌های کوتاه و پوشش گیاهی کم، نیمه فشرده: درختچه‌ها و گیاهان چند ساله (ارتفاع ۰/۷-۰/۸ متر).	مقایسه اثرات زیست‌محیطی سقف‌های سبز و معمولی را در آب و هوای سرد با استفاده از ارزیابی چرخه زندگی پویا	سرد/ کبک، کانادا.	چهار سیستم سقف: گسترده، نیمه فشرده، فشرده و متعارف. ارتفاع پوته، ضخامت خاک و تراکم.	۳
(Ziougou et al., 2017)	- صرفه جویی در مصرف انرژی: ۲۵٪ برای گرمایش و ۲۰٪ برای سرمایش. - اثرات زیست‌محیطی: کاهش قابل توجه CO ₂ ، NOx و SO ₂ - تأثیر اقتصادی: NPV منفی به دلیل هزینه‌های بالا، اما مزایای غیر کمی اضافی (تنوع زیستی، زیبایی شناسی، کاهش حرارت شهری).	شبیه سازی انرژی سالانه	گونه‌های بومی مدیترانه‌ای مانند Sedum sediforme و Helichrysum orientale L.	ارزیابی صرفه جویی در انرژی، مزایای زیست محیطی و قابلیت اقتصادی بام سبز در ساختمان‌های اداری شهری.	مدیترانه‌ای / نیکوزیا، لیماسول، لارناکا و پافوس، قبرس	عمق خاک، ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ و مقاومت روزنه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند. تعادل آب دینامیک بر اساس آبیاری و بارش تحلیل شد.	۴
(Cao et al., 2019)	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 (۴/۲-۰/۲ C) خنک‌تر از سقف‌های بدون پوشش همه بام‌های سبز دمای خاک را ۱/۸-۱۱/۹ C کاهش دادند.	ماه‌های تابستان (ژوئیه تا سپتامبر ۲۰۱۸)	- گیاهان: C3 - Festuca و Poa pratensis arundinacea. - گیاهان: C4 Cynodon: Eremochloa و dactylon ophiuroides - گیاهان: CAM Sedum: Callisia repens و lineare	بررسی اثرات خنک‌کنندگی بام‌های سبز با مسیرهای مختلف فتوسنتزی (C3، CAM، C4) و مکانیسم‌های زیربنایی.	نیمه گرمسیری / شانگهای چین	اثرات خنک کننده: کاهش دمای سایبان و خاک، 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) ۱۵،۱۰، ۵ سانتیمتر)	۵
(Mousavi et al., 2023)	کل صرفه جویی در انرژی: ۱۱-۱۴٪. ساعات راحتی ۱۲/۸٪ بهبود یافته است.	شبیه سازی یک سال	Sedum spurium Sempervivum tectorum Opuntia Ficusindica Echeveria elegans	بهینه‌سازی طراحی بام سبز برای بهره‌وری انرژی و راحتی باتجزیه و تحلیل پارامترهای گیاه	نیمه خشک / مونتری، مکزیک	شاخص سطح برگ، بازتاب برگ، انتشار برگ، مقاومت روزنه‌ای.	۶
(Zhou et al., 2018)	- 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.	شبیه سازی یک سال	Sedum lineare	ایجاد یک مدل بام سبز با شاخص سطح برگ متغیر فصلی برای شبیه‌سازی عملکرد انرژی سالانه در اقلیم‌های مختلف	منطقه آب و هوایی باتایستان گرم و زمستان سرد / شانگهای، چین	مقایسه بام‌های سبز با شاخص سطح برگ ثابت در مقابل شاخص سطح برگ متغیر فصلی.	۷
(Ferrante et al., 2016)	Phyla nordiflora، Aptenia سریع توسط Mesembryanthemum barbatum و lancifolia (۲۵-۶۷ روز). رشد آهسته برای گونه‌های گازانیا. و سدوم. صرفه جویی در انرژی خنک‌کننده ۸-۲۰٪ (متغیر بر اساس گونه‌های گیاهی). بالاترین شاخص سطح برگ: Aptenia lancifolia (۳/۹۹).	اکتبر ۲۰۱۴ - ژانویه ۲۰۱۵	Phyla nordiflora، Gazania nivea، Gazania uniflora، Aptenia lancifolia، Mesembryanthemum barbatum، Sedum	ارزیابی عملکرد انرژی، مزایای حرارتی و رفتار رشد گونه‌های مختلف گیاهی	مدیترانه ای / پالرمو، ایتالیا.	نسبت پوشش، شاخص سطح برگ و دمای برگ، تراکم پوته، ضخامت بستر.	۸
(Seyedabadi et al., 2021)	صرفه جویی در انرژی: کاهش مصرف انرژی سالانه Sedum acre، Franke- Vinca major و nia thymifolia کاهش دی اکسید کربن: کاهش انتشار ۲۸/۱۶ year/kg CO ₂ m ² ۲۳/۴۴ و ۲۶/۴۸	ژانویه ۲۰۱۹ - ژانویه ۲۰۲۰	Sedum acre Frankenia thymifolia Vinca major	ارزیابی عملکرد گیاه در آب و هوای سرد و خشک و کاهش رد پای کربن ساختمان	سرد و خشک / مشهد، ایران.	نوع پوشش گیاهی، سطح برگ، جذب دی اکسید کربن، صرفه جویی در انرژی، حفظ آب طوفان، عمق بستر.	۹

منبع	نتایج	مدت آزمایش	گیاهان	اهداف تحقیق	آب و هوا / شهر	پارامترها	
(Abdala-zeem et al., 2024)	کاهش دمای هوای داخلی تا ۱۱/۸۵٪ (۴/۳) درجه سانتیگراد) در مقایسه با سقف سنتی. افزایش راندمان فتوولتائیک تا ۲/۲۷٪. کاهش بار سرمایی، ۱۹/۱۲ درصد. کاهش سالانه دی اکسید کربن ۵۶/۵۹ kg/m ²	۱ اوت - ۷ سپتامبر ۲۰۲۲	چمن	تأثیر بام سبز بر راحتی و عملکرد فتوولتائیک، بهینه سازی پارامترها برای افزایش بهره وری انرژی و کاهش بار سرمایی	گرم استپی - خشک / شهر نیو بزرگ العرب، مصر	انواع خاک: خاک شنی و رسی عمیق خاک: ۰/۰۴ متر، ۰/۰۶ متر و ۰/۰۸ متر نسبت پوشش فتوولتائیک: ۲۵٪، ۵۰٪ ارتفاع فتوولتائیک ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱ متر	۱۰
(Perillo et al., 2023)	همه گونه های بومی در مقایسه با گونه های عجیب و غریب زنده ماندند و دی اکسید کربن بیشتری را جدا کردند. گونه های بومی راندمان جذب دی اکسید کربن بالاتری داشتند. گیاهان عجیب و غریب قادر به زنده ماندن در برابر کمبود شدید هیدریک و یخبندان نبودند.	آوریل ۲۰۲۱ تا فوریه ۲۰۲۲	Poa سه گیاه بومی (Poa lanuginosa, Sphaeralcea australis Phyla nodiflora) و سه گیاه عجیب و غریب (Oscularia deltoidea, Sedum 'tokyo sun', Sedum nussbaumerianum)	مقایسه ظرفیت جذب دی اکسید کربن و بقای گیاهان بومی در مقابل گیاهان عجیب و غریب در شرایط کمبود آب	نیمه خشک / باهیا بلانکا، آرژانتین	نوع گیاه (بومی / خارجی)، رژیم آبیاری	۱۱
(López-Silva et al., 2022)	بام های سبز - آبی نوسانات دما را کاهش داده و به عنوان تنظیم کننده حرارت عمل می کنند. حداکثر کاهش دمای سطح داخلی: ۱۲/۴ درجه سانتیگراد (در مقایسه با سقف بتنی) S. pacifica، زیست توده و پوشش بالاتری داشت که آن را برای مناطق نیمه خشک مناسب تر کرد. سدوم اگر به دلیل تنش آبی و افتات با چالش هایی مواجه شد که منجر به کاهش پوشش شد.	زمستان ۲۰۲۰ (ژانویه تا ژوئن).	سدوم اگر (CAM متابولیسم) Salicornia pacifica, (C3 متابولیسم)	مقایسه عملکرد حرارتی سقف های سنتی و بام سبز آبی، ارزیابی مناسب بودن گیاهان برای اقلیم مورد مطالعه	نیمه خشک مدیترانه ای / انساندار، رنیا باخاکالیف مکزیک	متابولیسم گیاه (C3 در مقابل CAM)، عملکرد حرارتی، مدیریت آب، چگالی ظاهری بستر، تنظیم دما.	۱۲

فرآیندهای کاهش مستقیم دی اکسید کربن

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 کربوهیدرات ها) تبدیل می کنند. این فرآیند به شدت تحت تأثیر نور خورشید و پارامترهای محیطی قرار دارد (Whittinghill et al., 2014).

تنفس: کربن دی اکسید به جو بازمی گردد از طریق تنفس خودکار (تنفس گیاهان) و تنفس غیر خودکار (تنفس میکروارگانیسم ها 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 می شود. این معادله به صورت زیر است:

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

در این فرمول:

GPP یا تولید ناخالص اولیه: کل میزان دی اکسید کربن جذب شده توسط گیاهان از طریق فتوسنتز

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

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

مبانی نظری

فرآیندهای کاهش دی اکسید کربن

بام های سبز می توانند به طور مستقیم و غیر مستقیم دی اکسید کربن را کاهش دهند (Shafique et al., 2020). پوشش گیاهی و بستر این بام ها به عنوان یک تکنیک غیرفعال برای کاهش دمای هوا، سطح و شارهای گرمای رسانا عمل کرده و موجب کاهش تقاضای انرژی خنک کننده و انتشار دی اکسید کربن می شوند. همچنین، این بام ها نوسانات دمایی غشای سقف را کاهش داده و طول عمر آن را افزایش می دهند (Wong, Tay, et al., 2003). علاوه بر بهبود عملکرد حرارتی محیط، بام های سبز جذب کربن را افزایش داده و نیاز انرژی داخلی ساختمان را کاهش می دهند.

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

فرآیندهای کاهش دی اکسید کربن به دو دسته اصلی تقسیم می شوند:

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 آن ها ارائه می شود.

فرآیندهای کاهش غیرمستقیم دی اکسید کربن

بام‌های سبز از طریق فرآیندهای مختلف به کاهش غیرمستقیم دی اکسید کربن 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 دی اکسید کربن اثرگذار است (Jim & Tsang, 2011a).

جرم حرارتی و عایق کاری

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 عایق کاری 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 بالا بردن 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 انتقال یافته به هوا می‌باشد.

Q_p : شار حرارتی پنهان ناشی از تبخیر و تعرق

Q_s : گرمای ذخیره شده 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 دی اکسید کربن 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، روزه‌های 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 دی اکسید کربن نقش مهمی دارد.

انرژی خورشیدی بیشتر به صورت گرمای پنهان منتقل می‌شود تا گرمای محسوس. شار حرارتی پنهان می‌تواند از طریق تبخیر و تعرق و گرمای تبخیر محاسبه گردد (Cascone et al., 2019). بستر بام سبز به عنوان 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 خنک‌کنندگی بام کمک می‌کند و با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

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

در این فرمول:

Q_{cv} : شار حرارتی محسوس

Q_p : شار حرارتی 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 دی اکسید کربن 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، عایق کاری 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 عایق کاری 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

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 تا ۶ 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 می‌کنند 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 فرایند 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

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 می‌شود. 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 به گونه‌ای 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 می‌کند. (Tan et al., 2023)

مطالعه‌ای 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 می‌کند 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). هر چند 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 و انرژی 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

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 °C ۳) و کمترین در اقلیم‌های گرم و مرطوب (کاهش °C ۱) 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 (Ferrante et al., 2016; Tan et al., 2023). Leaf area index (LAI) 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 در سال خشک (معادل ۹۵ گرم در مترمربع در سال) 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 فوق‌سُک 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 بار مرده 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 می‌یابد. 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 کم‌تر است. 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 دی‌اکسیدکربن

برای بررسی تأثیر ضخامت خاک بر عملکرد انرژی و کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن شبیه‌سازی‌هایی 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 قرار گرفته است تا تأثیر آن بر صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن 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

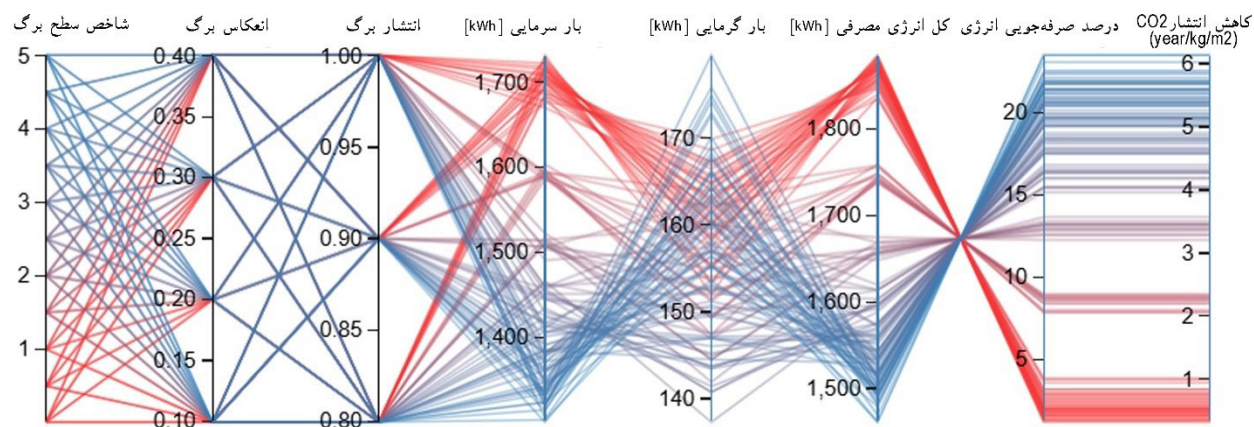
فراهم کند.

درصد پوشش گیاهی در بهمن ماه به ترتیب برای رزماری ۴۵٪، آویشن ۳۰٪، اسطوخودوس ۳۰٪، لیزوماکیا ۳۰٪، نازیخی 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 شبیه سازی شود.

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

دوره گرم، در دوره سرد افزایش ضخامت خاک به طور پیوسته موجب افزایش صرفه جویی انرژی می شود.

به طور کلی در دوره گرم، ضخامت ۱۵ سانتی متر بهینه ترین میزان صرفه جویی انرژی را ارائه می دهد، در حالی که در دوره سرد، افزایش ضخامت خاک همواره به بهبود صرفه جویی انرژی کمک می کند. این موضوع نشان می دهد که اثر ضخامت خاک در دوره های مختلف سال متفاوت است. انتخاب ضخامت ۱۵ تا ۲۰ سانتی متر بهترین گزینه است. این ضخامت تعادلی بین صرفه جویی انرژی در دوره گرم و دوره سرد ایجاد می کند. همچنین، کاهش انتشار دی اکسید کربن نیز در این ضخامت قابل قبول است. این انتخاب می تواند عملکرد مطلوبی در هر دو دوره



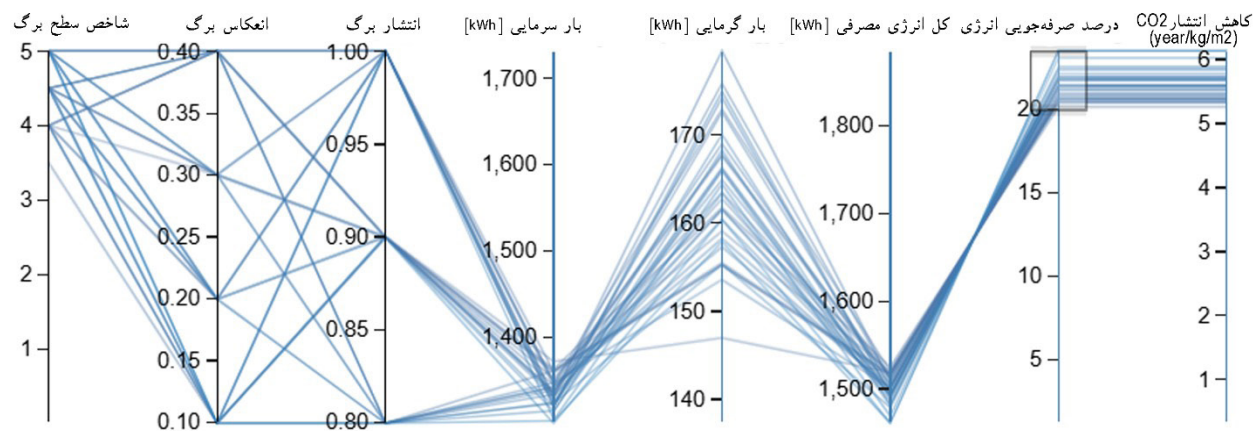
تصویر ۲. نمودار جدول ۳

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

کاهش انتشار دی اکسید کربن (year/kg/m ²)	درصد صرفه جویی انرژی	کل انرژی مصرفی [kWh]	درصد صرفه جویی انرژی در گرمایش	انرژی مصرفی برای گرمایش [kWh]	درصد صرفه جویی 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	۰/۱	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	۰/۲	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	۰/۳	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	۰/۴	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

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

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



تصویر ۳. نمودار محدود شده جدول ۳ بر اساس کاهش مصرف انرژی بیشتر از ۲۰ درصد

جدول ۴. بررسی تأثیر ضخامت خاک بر مصرف انرژی

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

جدول ۵. بررسی مصرف انرژی و کاهش کربن گیاهان انتخاب شده

نام گیاه	رزماری	آویشن	اسطوخودوس	لیزو ماکیا	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 صرفه جویی 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 صرفه جویی 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 صرفه جویی انرژی کل	%۲۰	%۲۴	%۲۳	%۱۹	%۲۳	%۲۲	%۲۲	%۲۰
کاهش انتشار دی اکسید کربن (year/kg/m ²)	۱/۴۸	۱/۵۲	۳/۵	۰/۴۵	۰/۷۵	۰/۰۷	۱/۷۰	۰/۵۸
	۵/۳۵	۶/۴۱	۶/۰۱	۵/۰۹	۶/۱۴	۵/۸۲	۵/۹۵	۵/۲۴
کل کاهش انتشار دی اکسید کربن	۶/۸۳	۷/۹۳	۹/۵۱	۵/۵۴	۶/۸۹	۵/۸۹	۷/۶۵	۵/۸۲

در دوره سرد، صرفه‌جویی انرژی بین حداقل 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 صرفه‌جویی انرژی بین ۱۵ تا ۲۴ درصد در دوره سرد شاخص سطح برگ باید بازه ای بین ۱ تا ۴ داشته باشد و به طور کلی گیاهانی با انتشار بالا (۹/۰ و بالاتر) و انعکاس پایین تر (۱/۰ و ۲/۰) 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 مکانیسم‌های مستقیم، مانند جذب کربن توسط گیاهان، و مکانیسم‌های غیر مستقیم، از جمله کاهش تقاضای انرژی برای گرمایش و سرمایش تضمین می‌کند.

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 < پایتال. 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 تأثیر را در کاهش انتشار دی اکسیدکربن (به ترتیب ۹/۵۱، ۷/۹۳، ۷/۶۵ کیلوگرم 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.

انتشار دی اکسیدکربن (به ترتیب ۹/۵۱، 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 از طریق 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 بام‌های سبز را به عنوان یک راه حل پایدار برای بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار کربن در مناطق شهری مانند تهران بر جسته می‌کند. با انجام ۱۳۲ سناریو شبیه‌سازی، 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 از ۳/۵ می‌توان به طور کلی صرفه‌جویی در انرژی را به حداکثر رساند و دمای سطح را به طور موثر کاهش داد. هشت گونه گیاهی بهینه انتخاب شدند که به صرفه‌جویی انرژی بین ۱۹ تا ۲۴ درصد در کل سال و کاهش دی اکسیدکربن بین ۵/۵۴ تا ۹/۵۱ کیلوگرم بر متر 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 صرفه‌جویی انرژی بین ۱۹ تا ۲۵ درصد در دوره گرم شاخص سطح برگ باید بازه ای بین ۳/۵ تا ۵ داشته باشد و به طور کلی مقادیر انعکاس و انتشار برگ تأثیر واضحی در صرفه‌جویی انرژی در دوره گرم نداشتند.

فهرست منابع

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

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

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-Alonso, 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., Waclawek, 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., Seyedmehmoudian, 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.