



Thermal Performance Evaluation of Green Roofs in Metropolises: A case study of Tabriz

Zahra Nobar ¹, Akbar Rahimi ² 

1. Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: zahra.nobar@tabrizu.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: akbar.rahimi@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Received:

30 November 2024

Received in revised form:

23 February 2025

Accepted:

6 April 2025

Available online:

8 May 2025

Keywords:

Green roof,
Optimization of energy
consumption,
Design builder,
Heating load,
Tabriz.

ABSTRACT

Addressing urban requirements has become a serious concern as the population of both developing and developed cities grows rapidly. Green roofs are viewed as a realistic option with clear environmental, economic, and social benefits. This study looks at how green roofs can improve air quality and save energy in residential buildings in Tabriz, a city with a cold and dry climate. To explore this, two scenarios were created using DesignBuilder energy simulation software: one with vegetation on the roofs and another without. The analysis compares the effects of both roof types on energy use for heating and cooling, CO₂ emissions, and urban air quality throughout a year, considering local weather conditions. The results show that in August, the hottest month in Tabriz, a building with a standard roof used around 2000 kWh of energy, while one with a green roof used only 1200 kWh. This difference suggests that green roofs can significantly reduce energy consumption compared to conventional roofs. These findings provide useful insights for designing more energy-efficient buildings in cities, contributing to smarter and more sustainable urban development.

Citation: Nobar, Z., & Rahimi, A. (2025). Thermal Performance Evaluation of Green Roofs in Metropolises: A case study of Tabriz. *Journal of Sustainable City*, 8(1), 101-117.

<http://doi.org/10.22034/jsc.2025.475823.1799>



© The Author(s)

Publisher: Iranian Geography and Urban Planning Association.

This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Extended Abstract

Introduction

Sustainable development has been a key concept in global strategies and United Nations reports since the 1980s. It focuses on economic, social, and environmental dimensions. Sustainable architecture, such as green roofs, is considered an effective solution to reduce energy consumption and carbon emissions. Green roofs create shade, transpiration, and thermal insulation, reducing roof surface temperature and temperature fluctuations. Research shows that green roofs can reduce internal temperatures from 4.3 to 5.0 degrees Celsius, leading to significant energy savings. They also play a role in reducing urban heat islands (UHIs) by an average of 0.68 degrees Celsius. In urban areas like Beijing, green roofs can reduce daily air temperature by 0.41 degrees Celsius. Integrating green roofs in building information modeling can optimize their design and performance, reducing environmental challenges like climate change and energy resource management. This research evaluates the performance of green roofs in cold and dry climates using Design Builder energy simulation software. The results can be used as a strategic tool for urban planners and architects to achieve sustainable development goals.

Methodology

This research explores how green roofs affect energy consumption in residential buildings in Tabriz City. A one-story, two-bedroom house, covering 88 square meters, was selected for energy simulations using DesignBuilder software, which accurately models building energy performance and compares different roof types. The model includes six thermal zones, with control applied to all except zone 6. The building falls under type A with significant urban use, showing a primary need for heating and energy savings in group 1. Roof thermal conductivity was calculated within the software, and the data is detailed in relevant tables. Simulations ran for a full year across four seasons, with results recorded monthly and every 20 minutes. The building features double-glazed

windows, LED lighting, and an average of four occupants per unit. Local meteorological data was incorporated into the simulation via an EPW file, reflecting Tabriz's cold, dry climate. The roof is modeled as flat, with materials selected accordingly, and the green roof includes a soil layer reduced to 20 cm in thickness. This high level of accuracy ensures that the results provide valuable insights for optimizing energy use and minimizing environmental impacts.

Results and discussion

The study shows that energy consumption in colder months, such as January and February, is significantly higher without a green roof, highlighting its role as effective thermal insulation. In contrast, during hotter months like July and August, energy consumption decreases when a green roof is in place. The use of *Frankenia thymifolia*, a common cover plant species, prevents the roof from overheating and lowers the building's cooling needs. The simulated green roof system with *Frankenia* was successful in optimizing energy use year-round, cutting consumption by roughly 462,526 kWh annually. This energy reduction is due to the green roof's unique thermal properties, which limit heat exchange between the building and its surroundings. During hot seasons, the green roof lowers roof surface temperatures, decreasing reliance on cooling systems. In cold seasons, it helps retain heat inside, reducing the need for heating. These thermal benefits also reduce strain on air conditioning and heating systems, extending the lifespan of the building's mechanical equipment.

The results also indicate that the green roof's impact varies depending on specific weather conditions and building characteristics. For example, in regions with more extreme temperature fluctuations, the energy savings from a green roof may be even more pronounced. Additionally, the type and thickness of the soil layer, as well as the choice of plant species, can significantly influence the roof's thermal performance. The study found that *Frankenia thymifolia*, with its

dense foliage and drought-resistant properties, was particularly effective in maintaining stable roof temperatures. However, different plant species might yield varying results depending on local climate conditions. The effectiveness of green roofs in mitigating urban heat islands was also evident, as the lower roof surface temperatures contributed to a cooler microclimate around the building. This not only reduces the building's energy consumption but also has broader environmental benefits, such as improving outdoor air quality and reducing the overall urban heat island effect. These findings underscore the importance of carefully selecting and designing green roof systems to maximize their environmental and energy-saving benefits.

Conclusion

Green roofs are a promising solution for sustainable urban development, offering environmental, economic, and social benefits. They reduce heat islands in cities by 30 degrees Celsius, contribute to effective runoff management, improve urban air quality, and provide thermal insulation, saving up to 21.2 kWh/m² of energy consumption for heating and cooling. The adaptability of green roofs to different weather conditions allows for maximum energy savings. Studies have shown that the construction of green roofs can lead to energy savings between 3.2% and 9.1%.

Green roofs also reduce CO₂ emissions by optimizing parameters and reducing the amount of CO₂ produced by buildings. However, their effectiveness can vary significantly based on specific weather conditions and types of buildings. A study conducted in Tabriz, East Azerbaijan, evaluated the effect of creating a green roof with a common cover plant and a traditional roof without vegetation. Results showed that green roofs significantly affect energy consumption during peak temperatures, but they also reduce heating and cooling energy consumption.

However, the study has limitations, such as the challenge in accurate modeling of complex urban environments and the lack of access to data for long-term studies.

Additionally, the effect of green roofs on indoor air quality has not been studied, and the thermal performance of green roofs with architecture design is not yet fully understood.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



ارزیابی عملکرد حرارتی بام سبز مطالعه موردی: شهر تبریز

زهرا نوبر^۱، اکبر رحیمی^۲

۱- گروه برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: zahra.nobar@tabrizu.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: akbar.rahimi@tabrizu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۹/۱۰

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۱/۱۷

تاریخ چاپ:

۱۴۰۴/۰۲/۱۸

واژگان کلیدی:

بام سبز،
بهینه‌سازی مصرف
انرژی،
دیزاین بیلدر،
بار گرمایشی،
تبریز.

با افزایش سریع جمعیت در شهرهای درحال توسعه و توسعه‌یافته، مدیریت و تأمین نیازهای ساکنان شهری به یکی از چالش‌های اساسی تبدیل شده است. بام‌های سبز به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای توسعه پایدار شهری، مزایای قابل‌توجهی در ابعاد زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی ارائه می‌دهند. این پژوهش که در سال ۱۳۹۹ در شهر تبریز (اقلیم سرد و خشک) انجام شده است و به بررسی تأثیر بام‌های سبز در بهبود کیفیت هوای شهری و صرفه‌جویی انرژی در ساختمان‌های مسکونی پرداخته است. برای بررسی این تأثیرات، با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز انرژی DesignBuilder دو سناریو طراحی شده است: یکی با پوشش گیاهی در بام‌ها و دیگری بدون پوشش گیاهی. این پژوهش با تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی این سناریوها و تأثیرات آن‌ها بر مصرف انرژی گرمایش و سرمایش، تولید CO₂ و کیفیت هوای شهری را در طول یک سال با توجه به شرایط جوی موجود ارزیابی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که در بام معمولی شبیه‌سازی شده در ماه مرداد (گرم‌ترین ماه سال در تبریز)، مصرف انرژی تقریباً ۲۰۰۰ kWh است، درحالی‌که این رقم در ساختمان‌های دارای بام سبز حدود ۱۲۰۰ kWh بوده است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که ساختمان شبیه‌سازی شده فاقد بام سبز و دارای سقف معمولی به‌طور کلی انرژی بیشتری نسبت به ساختمان شبیه‌سازی دارای بام سبز مصرف می‌کند. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان نقطه عطف و نقشه راه برای طراحی و ساخت ساختمان‌ها در شهرهای درحال توسعه و توسعه‌یافته بوده و گامی مؤثر به‌سوی هوشمند سازی ساختمان‌های موجود و در حال احداث باشد.

استناد: نوبر، زهرا و رحیمی، اکبر. (۱۴۰۴). ارزیابی عملکرد حرارتی بام سبز مطالعه موردی: شهر تبریز. مجله شهر پایدار، ۸ (۱)، ۱۰۱-۱۱۷.

<http://doi.org/10.22034/jsc.2025.475823.1799>



مقدمه

از دهه ۱۹۸۰، توسعه پایدار به عنوان یکی از مفاهیم کلیدی در راهبردهای جهانی و گزارش‌های سازمان ملل متحد مطرح شده است. طبق گزارش برانت لند (۱۹۸۷)، توسعه پایدار به معنای توسعه‌ای است که نیازهای نسل حاضر را بدون به خطر انداختن توانایی‌های نسل‌های آینده برای برآورده کردن نیازهای خود تأمین می‌کند (Mugadza, 2024) و بر سه بعد اصلی اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تمرکز دارد (Roy, 2024).

یکی از رویکردهای نوین در توسعه پایدار، معماری پایدار است. طبق تعریف سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD) ساختمان‌های پایدار باید کمترین تأثیرات مخرب را بر محیط‌های مصنوع و طبیعی پیرامون خود داشته باشند و به بهبود کیفیت محیط‌زیست کمک کنند. در این میان، بام‌های سبز به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر و پایدار برای کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن و بهبود ردپای کربنی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این بام‌ها، علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، به ارتقای شاخص زیبایی‌شناسی شهری نیز کمک می‌کنند (Ling et al., 2024). چراکه با ایجاد سایه، تعرق، و عایق‌بندی حرارتی حاصل از وجود گیاهان، می‌توانند دمای سطح بام را کاهش دهند و نوسانات دمایی را تعدیل کنند (Zhu et al., 2023). عملکرد حرارتی بام‌های سبز تحت تأثیر عواملی نظیر نوع گیاه، شاخص مساحت برگ، ضخامت و ترکیب لایه خاکی، رطوبت، و مشخصات لایه زهکشی است (Chung et al., 2024). تحقیقات نشان می‌دهد که این بام‌ها می‌توانند دمای داخلی ساختمان را از ۴۰۳ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش دهند و منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی شوند (Lee et al., 2024). بام‌های سبز همچنین نقش مهمی در کاهش جزایر گرمایی شهری (UHIs) دارند. وجود پوشش گیاهی در پشت بام‌ها می‌تواند شدت UHIs را به طور متوسط ۰۰۶۸ درجه سانتی‌گراد کاهش دهند که این نشان‌دهنده ارتباط مستقیم بین افزایش فضای سبز و کاهش دمای سطح است (Jahangir et al., 2024). همچنین در مناطق شهری مانند پکن، بام‌های سبز می‌توانند دمای هوای متوسط روزانه را تا ۰۰۴۱ درجه سانتی‌گراد کاهش دهند (Fang et al., 2023). در نهایت ادغام بام‌های سبز در چارچوب مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) می‌تواند طراحی و عملکرد این بام‌ها را بهینه کرده و چالش‌های زیست‌محیطی مانند تغییرات آب‌وهوایی و مدیریت منابع انرژی را کاهش دهد (Chen & Gou, 2024; Vavilova, 2024). در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز انرژی Design Builder، ابتدا با در نظر گرفتن تیپ ساختمان‌های معمول در شهر تبریز و با رعایت قوانین مبحث ۱۹ ساختمان، اقدام به طراحی سناریوهایی در جهت ارزیابی عملکرد بام سبز در مقایسه با بام‌های معمولی در جهت مصرف و تولید انرژی در اقلیم سرد و خشک شده است. نتایج حاصل از این پژوهش به دنبال پاسخ به دو سؤال کلیدی است:

- بام سبز به عنوان یک راهبرد معماری در اقلیم سرد و خشک چگونه می‌تواند در صرفه‌جویی مصرف انرژی در ساختمان‌ها مؤثر باشد؟

- کارایی بام سبز در مقایسه با بام‌های معمولی در مصرف انرژی و تولید کربن دی‌اکسید چگونه است؟

اهمیت این پژوهش نه تنها در جهت پاسخ به این سؤالات می‌باشد، بلکه در ارائه راهکارهای عملی برای کاهش اثرات تغییرات آب‌وهوایی و بهبود کیفیت زندگی در محیط‌های شهری است. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان یک ابزار راهبردی برای برنامه‌ریزان شهری و معماران در مواجهه با شرایط اقلیمی و تغییرات آبی استفاده شود، و به این ترتیب نقشی کلیدی در دستیابی به اهداف توسعه پایدار ایفا کند.

مبانی نظری

بام‌های سبز، به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوین در حوزه معماری پایدار، راه‌حلی کارآمد برای مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی و انرژی در محیط‌های شهری ارائه می‌شود. این سیستم‌ها با ایجاد پوشش گیاهی بر روی سطوح ساختمان‌ها، نقش مؤثری در کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی، بهبود بهره‌وری انرژی و افزایش کیفیت زندگی ساکنان ایفا می‌کنند. در دهه‌های اخیر، کاربردهای گسترده و متنوع بام‌های سبز در بسیاری از مطالعات مستند شده است (Zahedi & Gitifar, 2024)؛ این بام‌ها را می‌توان بر اساس ویژگی‌های ساختاری و عملکردی در سه گروه اصلی دسته‌بندی کرد:

بام‌های سبز گسترده^۱

بام‌های سبز گسترده به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارها برای دستیابی به پایداری در صنعت ساخت‌وساز شناخته می‌شوند (Mahmoudi et al., 2024). ویژگی‌های بارز این نوع بام‌ها عبارت‌اند از: عمق کم خاک (کمتر از ۲۰ سانتی‌متر). استفاده از گیاهان کوچک، علف‌ها، گیاهان دارویی و خزها و از همه مهم‌تر نیاز حداقلی به نگهداری و عدم نیاز به سیستم آبیاری دائمی، که باعث مقرون‌به‌صرفه بودن این نوع بام‌ها می‌شود (Moshari et al., 2023).

بام‌های سبز نیمه‌متمرکز یا ساده^۲

این نوع بام‌ها شامل پوشش گیاهی متنوعی همچون چمن‌ها، گیاهان کوچک و بوته‌های متراکم هستند (et al., 2023). بام‌های سبز نیمه‌متمرکز نیازمند نگهداری متوسط و آبیاری دوره‌ای هستند و ترکیبی از ویژگی‌های بام‌های گسترده و متمرکز را ارائه می‌دهند.

بام‌های سبز متمرکز^۳

بام‌های متمرکز به دلیل بستر عمیق خاک (تا عمق ۱ متر)، قابلیت پشتیبانی از گیاهان بزرگ‌تر مانند بوته‌های بزرگ، چمنزارها، باغچه‌های گل و حتی درختان را دارند (Cook & Larsen, 2021). این بام‌ها، نیازمند نگهداری منظم و سیستم‌های آبیاری پیشرفته هستند و امکان ایجاد فضاهای سبز وسیع مشابه باغ‌ها را فراهم می‌کنند. به‌طور کلی، اصول معماری سبز را می‌توان به‌طور کلی در پنج بخش دسته‌بندی کرد (۱) اصول اقتصادی، (۲) اصول محیطی-اقلیمی، (۳) اصول فیزیکی-فضایی، (۴) اصول اجتماعی-فرهنگی، و (۵) اصول فنی (Keeler & Vaidya, 2016).

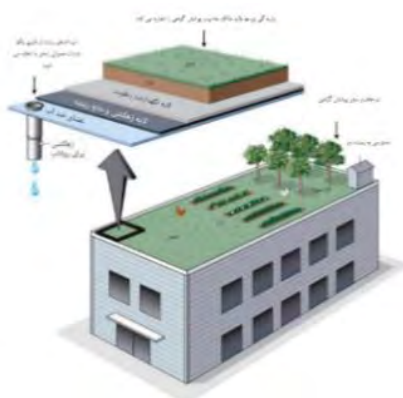
در میان این بخش‌ها، یکی از مهم‌ترین آن‌ها بحث اصول محیطی-اقلیمی است که هدف آن به حداقل رساندن مصرف انرژی و به حداکثر رساندن همسویی با طبیعت است (Well & Ludwig, 2021; Temme & al., 2020). مطالعات زیادی در آب‌وهوای گرم-مرطوب و معتدل انجام شده است. درعین‌حال، تحقیقات نسبتاً کمتری به مطالعات بام سبز در آب‌وهوای خشک اختصاص یافته است (Jamei et al., 2021). برخی از مطالعات ادبیات موجود را بدون هدف قرار دادن و به‌صورت صریح یک شرایط آب‌وهوایی خاصی را بررسی کرده‌اند (Elnabawi & Saber, 2023). با ارزیابی فناوری‌های مقاوم‌سازی سقف در مقیاس ساختمان و محله، دانش جدیدی را ارائه می‌دهند و بینش‌های ارزشمندی را

1. Extensive Green Roofs
2. Semi-Intensive Green Roofs
3. Intensive Green Roofs

برای تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در مورد مقاوم‌سازی پوشش ساختمان ارائه می‌دهند. شبیه‌سازی‌ها کاهش ۱۰ درصدی بار خنک‌کننده را برای بام‌های خنک و کاهش ۷٫۵ درصدی را برای بام‌های سبز در مقایسه با سقف‌های معمولی پیش‌بینی کردند. در طول تابستان، دمای هوای داخل برای این سقف‌ها مشابه بود، درحالی‌که در زمستان در دمای هوای خنک، سقف داخل خانه ۰٫۵ درجه سانتی‌گراد کمتر از بام سبز نشان می‌داد (Bevilacqua, 2021). این سقف‌ها در شرایط آب‌وهوایی خشک در مقایسه با آب‌وهوای مرطوب مؤثر است. مطالعات متعددی تأثیر متغیرهای مختلف مربوط به بام سبز را بررسی کرده‌اند. به‌عنوان مثال، هدف (Yuan et al., 2022) بررسی ویژگی‌های حرارتی بام‌های سبز نصب‌شده بر روی ساختمان‌های مسکونی در آب‌وهوای گرم و خشک قطر بود. به‌طور کلی بام‌های سبز با پوشش ۲۰ تا ۲۵ درصد از سطوح شهری، بهره‌وری انرژی ساختمان را افزایش می‌دهند و راه‌حل‌های پایداری برای کاهش مصرف انرژی ارائه می‌دهند. یکی از مهم‌ترین دستاوردهای بام‌های سبز، کاهش دمای سطوح ساختمانی و بهبود آسایش حرارتی می‌باشد. این سیستم‌ها با کاهش انتقال حرارت از طریق سقف ساختمان‌ها، به کاهش مصرف انرژی برای تهویه مطبوع کمک می‌کنند. تحقیقات نشان داده است که بام‌های سبز می‌توانند دمای سقف را تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با سقف‌های معمولی کاهش دهند و به‌این‌ترتیب انتقال حرارت به فضای داخلی ساختمان را به حداقل برسانند (Kachenchart & Panprayun, 2024; Yacob et al., 2024). این ویژگی به‌ویژه در مناطق گرمسیری و مدیترانه‌ای، که دماهای بالا تأثیر چشمگیری بر مصرف انرژی دارند، حائز اهمیت است. از دیگر مزایای قابل‌توجه بام‌های سبز بهره‌وری انرژی است. این سیستم‌ها می‌توانند با کاهش نیاز به تهویه مطبوع، مصرف انرژی را کاهش داده و به‌صرفه‌جویی اقتصادی منجر شوند. برای نمونه، استفاده از بام‌های سبز می‌تواند مصرف برق را تا ۰٫۲۰ کیلووات ساعت در هر مترمربع طی یک دوره ۸ ساعته کاهش دهد (Kachenchart & Panprayun, 2024). در اقلیم‌های مدیترانه‌ای، بام‌های سبز با کاهش نوسانات دمایی، عملکرد حرارتی ساختمان را بهینه می‌کنند و نیاز به انرژی برای خنک‌سازی را کاهش می‌دهند (İokhim & Ekşi, 2024). علاوه بر کاهش دمای سطوح و بهره‌وری انرژی، بام‌های سبز تأثیر بسزایی در کاهش اثر جزایر گرمایی شهری دارند. این سیستم‌ها با کاهش دمای محیط در مناطق شهری با تراکم بالای جمعیت، به بهبود شرایط زیست‌محیطی کمک می‌کنند. تأثیر این سیستم‌ها در کاهش آلاینده‌های جوی نیز قابل‌توجه است، زیرا پوشش گیاهی موجود بر بام‌های سبز می‌تواند دی‌اکسید کربن را جذب کرده و اکسیژن آزاد کند، که منجر به بهبود کیفیت هوای شهری می‌شود (Vourdoubas, 2024). نقش بام‌های سبز در توسعه فضاهای سبز شهری و ارتقای رفاه اجتماعی نیز شایان توجه است. این بام‌ها فضاهای سبزی ایجاد می‌کنند که می‌توانند به‌عنوان مکان‌هایی برای کشاورزی شهری یا تعاملات اجتماعی مورد استفاده قرار گیرند. این ویژگی‌ها نه تنها به بهبود کیفیت زندگی ساکنان کمک می‌کنند، بلکه امنیت غذایی و مشارکت جامعه را نیز افزایش می‌دهند (Vourdoubas, 2024). پژوهش‌ها در ملبورن نشان داده است که بام‌های سبز می‌توانند دمای هوا را تا ۱٫۵ درجه سانتی‌گراد کاهش دهند و راحتی را در تابستان تا ۲٫۳۸ درجه سانتی‌گراد بهبود بخشند (Jamei et al., 2023). با وجود مزایای متعدد، چالش‌هایی نیز در اجرای بام‌های سبز وجود دارد. هزینه‌های نصب اولیه و نیاز به نگهداری منظم از مهم‌ترین موانع اجرایی این سیستم‌ها محسوب می‌شوند. با این حال، مزایای بلندمدت زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی آن‌ها، بام‌های سبز را به یکی از مؤثرترین راه‌حل‌ها برای توسعه پایدار شهری تبدیل کرده است.

به‌طور کلی، بام‌های سبز با کاهش دمای شهری، بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش آلودگی هوا و ایجاد فضاهای سبز، نقش بسزایی در بهبود کیفیت زندگی شهری و پایداری زیست‌محیطی ایفا می‌کنند. مطالعات متعدد نشان می‌دهند که بهینه‌سازی طراحی این سیستم‌ها، نظیر انتخاب پوشش گیاهی مناسب و تنظیم رطوبت خاک، می‌تواند اثرات مثبت آن‌ها

را به حداکثر برساند. بام‌های سبز نمادی از تعامل سازنده معماری و محیط‌زیست برای آینده‌ای پایدارتر محسوب می‌شوند (شکل ۱).



شکل ۱. تصویر گرافیکی بام سبز (Zahedi et al., 2023)

نرم‌افزار دیزاین بیلدر

نرم‌افزار Design Builder یکی از ابزارهای پیشرفته در حوزه مهندسی و معماری است که برای بهینه‌سازی انرژی، مدیریت حرارتی، و طراحی ساختمان‌های پایدار به کار می‌رود. این نرم‌افزار با ارائه قابلیت‌های شبیه‌سازی پیشرفته و تجزیه و تحلیل داده‌های مرتبط با انرژی، معماران و مهندسان را قادر می‌سازد تا بهترین تصمیمات طراحی را اتخاذ کنند و ساختمان‌هایی با بهره‌وری بالاتر و تأثیر محیطی کمتر با امکان تحلیل و ارزیابی دقیق مصرف انرژی ساختمان‌ها را فراهم می‌آورد. این نرم‌افزار با شناسایی بارهای کلیدی انرژی و تحلیل دقیق مصرف انرژی، به طراحان کمک می‌کند تا استراتژی‌های بهینه‌سازی را به کار گیرند و عملکرد انرژی ساختمان‌ها را بهبود بخشند (Choudhary, 2015). یکی از قابلیت‌های منحصر به فرد Design Builder، امکان انجام تجزیه و تحلیل حساسیت برای بررسی پارامترهای مختلف طراحی است. این نرم‌افزار می‌تواند تأثیر عواملی مانند جهت‌گیری ساختمان، نوع مصالح ساختمانی، و تهویه طبیعی را بر عملکرد انرژی و حرارتی ساختمان‌ها شبیه‌سازی کند و در نتیجه ساختمان‌هایی با مصرف انرژی بهینه‌تر طراحی شود (Choudhary, 2015).

Design Builder ابزار مؤثری برای در طراحی ساختمان‌ها است. این مواد با ذخیره و آزادسازی حرارت، عملکرد حرارتی ساختمان را بهبود می‌بخشند. استفاده از ادغام مواد و تغییر فاز می‌تواند بارهای سیستم‌های تهویه مطبوع را تا حدود ۴۰ درصد کاهش دهد و در عین حال راحتی حرارتی داخلی را افزایش دهد (Μπαρούνη, 2022). این نرم‌افزار از ارزیابی سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال هیبریدی پشتیبانی می‌کند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که استفاده از این سیستم‌ها می‌تواند به کاهش قابل توجه دمای داخلی و بهبود سطح رطوبت کمک کند. این ویژگی به ویژه در مناطق گرم و خشک کاربردی است (Eghtedari & Mahravan, 2021). قابلیت‌های شبیه‌سازی محاسباتی Design Builder امکان مدل‌سازی دقیق و جامع محیط‌های ساخته شده را فراهم می‌کند. این نرم‌افزار به شناسایی استراتژی‌های مؤثر برای صرفه‌جویی در انرژی و ارتقای عملکرد پایدار ساختمان‌ها کمک می‌کند (Zhang, 2014).

نرم‌افزار Design Builder ابزاری قدرتمند برای طراحی ساختمان‌های پایدار و کاهش مصرف انرژی است. با وجود محدودیت‌ها، این نرم‌افزار با ارائه ابزارهای تحلیلی پیشرفته، نقش کلیدی در طراحی بهینه و مدیریت حرارتی ساختمان‌ها ایفا می‌کند. استفاده از این ابزار می‌تواند گامی مهم در راستای توسعه معماری پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی

ساختمان‌ها باشد ازجمله محدودیت‌های این نرم‌افزار مربوط به قابلیت تعامل نرم‌افزار DesignBuilder می‌باشد، اغلب با قابلیت تعامل پایین بین پلتفرم‌های نرم‌افزاری مختلف منجر به مشکلات در تبادل داده‌ها و همکاری بین ذینفعان می‌شود (Marco et al., 2024). همچنین، تکنیک‌های مدل‌سازی فعلی در DesignBuilder ممکن است به اندازه کافی نیازهای متنوع پروژه‌ها را برطرف نکنند و منجر به کیفیت اطلاعات ضعیف و جریان کار ناکارآمد شود (Marco et al., 2024). لازم به ذکر است که شرکت‌های کوچک‌تر ممکن است به دلیل منابع و دانش محدود استفاده مؤثر از DesignBuilder را چالش‌برانگیز کند، که می‌تواند منجر به خطاها و ناکارآمدی در فرآیند طراحی شود (Marco et al., 2024).

روش پژوهش

ارتباط میان پویایی جمعیت، زیرساخت‌های سبز و تغییرات شرایط آب‌وهوایی در جهت انعطاف‌پذیری شهری اهمیت حیاتی دارد. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی است و به بررسی تأثیر بام‌های سبز به‌عنوان یکی از انواع زیرساخت‌های سبز بر مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی و کاهش دمای در شهر تبریز می‌پردازد. در این مطالعه، یک ساختمان مسکونی یک طبقه، دوخوابه با مساحت ۱۵۰ مترمربع در شهر تبریز انتخاب و با دو سناریو که متشکل از ساختمان تیپیکال (بدون بام سبز) و ساختمان دارای بام سبز، شبیه‌سازی انرژی انجام شده است. ساختار لایه‌های مختلف جداره‌های این ساختمان بر مبنای ضرایب هدایت حرارتی پیشنهادی در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان برای ساختمان‌های مسکونی شهر تبریز طراحی و مدل‌سازی شده است. این پژوهش در طی یک دوره زمانی یک‌ساله انجام شده است تا تغییرات فصلی در مصرف انرژی سالیانه و ماهانه انرژی گرمایشی، سرمایشی و تأثیرات اقلیمی به‌طور جامع با استفاده از نرم‌افزار DesignBuilder بررسی شود.

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شهر تبریز مرکز استان آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران قرار دارد. تبریز به‌عنوان چهارمین کلان‌شهر بزرگ ایران شناخته می‌شود و مساحتی بالغ بر ۲۲۷۰ کیلومترمربع را در برمی‌گیرد. میانگین دمای تابستان در این منطقه بین ۱۴ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد است، درحالی‌که دمای زمستان بین ۵ تا -۴ درجه سانتی‌گراد در نوسان است. این سایت در نزدیکی محل تلاقی رودخانه‌های قوری و آجی در ارتفاع ۱۳۵۰ متری قرار دارد (رحیمی و نوبر، ۲۰۲۳، رحیمی و نوبر، ۱۴۰۳). جمعیت تبریز در طول سه دهه از حدود ۱ میلیون به نزدیک به ۲ میلیون نفر افزایش یافته است و باعث گسترش زمین‌های شهری از ۷،۲۲۰ به ۲۷،۶۴۰ هکتار می‌شود. این گسترش منجر به از دست رفتن ۸،۵۱۳ هکتار زمین کشاورزی و تشدید مسائل امنیت غذایی و افزایش هزینه‌های خدمات (نوبر و همکاران، ۱۴۰۳) شده است. از طرفی دیگر، تراکم بالای ساخت‌وساز تأثیر منفی بر آب‌وهوای خرد تبریز گذاشته است و توسعه نامتعادل باعث ناکارآمدی انرژی و بحران‌های زیست‌محیطی شده است (Akbarzadeh, 2024). شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که پیکربندی‌های بهینه ساختمان می‌تواند این اثرات را کاهش دهد و نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی دقیق برای رشد پایدار شهری ضروری است (Akbarzadeh, 2024) (شکل ۲).



شکل ۲. محل مورد مطالعه، در تبریز، ایران

یافته‌ها

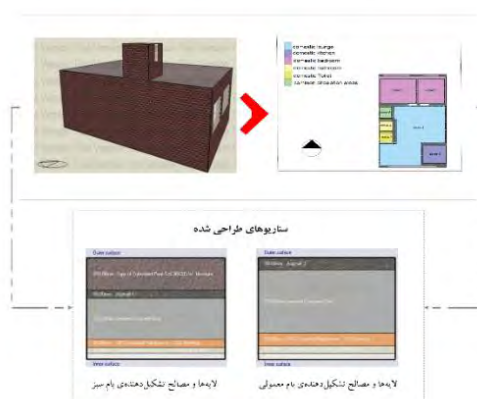
داده‌های ورودی شبیه‌سازی

مشخصات ساختمان و بام سبز

مدل شبیه‌سازی شامل ۶ زون حرارتی است که در آن تمامی زون‌ها به جز زون ۶ (که به عنوان راه‌پله تعریف شده) به عنوان زون حرارتی کنترل شده تعریف شده‌اند (شکل ۳). پنجره‌های دو جداره در ارتفاع یک و نیم متری از سطح زمین و در اضلاع شمالی و جنوبی ساختمان قرار دارند. سیستم روشنایی از نوع LED بوده و به طور متوسط چهار نفر در هر واحد، سکونت دارند. بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، این پروژه در دسته ساختمان‌های نوع الف و با کاربری شهری بزرگ قرار می‌گیرد. با توجه به موقعیت جغرافیایی و نیازهای انرژی سالانه، این ساختمان در گروهی با نیاز حرارتی غالب گرمایش قرار دارد و از نظر صرفه‌جویی در مصرف انرژی، در گروه ۱ دسته‌بندی می‌شود (شکل ۳).

- سقف ساختمان مسطح فرض شده و تمامی لایه‌های ساختمانی، به همراه مشخصات ترموفیزیکی آن‌ها، به نرم‌افزار معرفی شده‌اند تا ارزیابی دقیقی از مصرف انرژی ساختمان انجام گیرد.

- مصالح به کاررفته برای پوسته بام، متناسب با اقلیم سرد و خشک انتخاب شده‌اند. لایه‌های بام سبز به دلیل تأثیر کم برخی جزئیات در انتقال حرارت، به یک لایه خاک با ضخامت ۲۰ سانتیمتر تقلیل یافته‌اند. این سطح از دقت و جزئیات، تضمین‌کننده نتایج شبیه‌سازی‌هایی است که می‌توانند مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های آگاهانه در جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اثرات محیطی باشند (جدول ۱)



شکل ۳. پیکربندی و پلان ساختمان شبیه سازی شده در نرم افزار دیزاین بیلدر

جدول ۱. مصالح و مشخصات لایه های بام معمولی و بام سبز

لایه ها	ضخامت (mm)	ضریب هدایتی حرارتی (W/m K)	چگالی (kg/m^3)	ظرفیت گرمایی (J/kg K)
آسفالت (Asphalt)	۵۰	۰/۷	۲۱۰۰	۱۰۰۰
دال بتنی هوادهی (Aerated Concrete Slab)	۲۵۰	۰/۱۶	۵۰۰	۸۴۰
پلی استایرن اکستروژده شده XPS (XPS Extruded Polystyrene)	۵۰	۰/۳۴	۳۵	۱۴۰۰
ملات / گچ / بتن (concrete / plaster / mortar)	۳۰	۰/۷۲	۱۸۶۰	۸۴۰
گچ سبک (plaster lightweight)	۱۰	۰/۱۶	۶۰۰	۱۰۰۰
خاک (Soil)	۲۰	۰/۵	۱۱۰۰	۲۰۰۰
آسفالت (Asphalt)	۵۰	۰/۷	۲۱۰۰	۱۰۰۰
دال بتنی هوادهی (Aerated Concrete Slab)	۲۵۰	۰/۱۶	۵۰۰	۸۴۰
پلی استایرن اکستروژده شده XPS (XPS Extruded Polystyrene)	۵۰	۰/۳۴	۳۵	۱۴۰۰
ملات / گچ / بتن (mortar / plaster / concrete)	۳۰	۰/۷۲	۱۸۶۰	۸۴۰
گچ سبک (plaster lightweight)	۱۰	۰/۱۶	۶۰۰	۱۰۰۰

- ویژگی های پیش فرض شده برای گیاه انتخابی در جهت شبیه سازی بام سبز (جدول ۲) در نرم افزار، شامل چندین پارامتر کلیدی است که به طور مستقیم بر عملکرد حرارتی و زیست محیطی بام سبز تأثیر می گذارند. این پارامترها به شرح زیر هستند:

- ارتفاع گیاه: این ویژگی، میانگین ارتفاع گیاهان به کاررفته در بام سبز را مشخص می کند و یکی از عوامل مهم در تعیین سایه اندازی و میزان تبادل حرارتی میان پوشش گیاهی و محیط اطراف است.

- شاخص سطح برگ^۱: این شاخص، نسبت سطح برگ گیاه به سطح زمین اشغال شده توسط گیاه را نشان می‌دهد. این پارامتر که عددی بین ۰٫۵ تا ۵ است، بیانگر تراکم برگ‌ها بوده و تأثیر مستقیمی بر میزان جذب و تبخیر آب، همچنین بر کارایی فتوسنتزی بام سبز دارد.

- ضریب بازتاب برگ^۲: این ویژگی، نسبت تابش خورشیدی منعکس شده از سطح برگ گیاه به کل تابش دریافتی را اندازه‌گیری می‌کند. این ضریب که در بازه ۰٫۱ تا ۰٫۴ قرار دارد، نشان‌دهنده توانایی گیاه در انعکاس نور خورشید و کاهش اثرات گرمایی ناشی از تابش مستقیم است.

- ضریب نشر برگ^۳: این ویژگی نشان‌دهنده میزان تابش حرارتی برگ‌ها به نسبت تابش حرارتی یک جسم سیاه ایده‌آل است. ضریب نشر برگ، که مقادیر آن بین ۰٫۸ تا ۱ متغیر است، بیانگر توانایی گیاه در تابش حرارت و تأثیر آن بر تعادل حرارتی بام سبز می‌باشد.

- حداقل مقاومت روزنه^۴: این پارامتر میزان مقاومت گیاه در برابر انتقال رطوبت از طریق روزنه‌های برگ را نشان می‌دهد. هرچه این مقاومت بیشتر باشد، گیاه تبخیر و تعرق کمتری دارد، که تأثیر مستقیمی بر میزان حفظ آب و کاهش نیاز آبی بام سبز دارد. این ویژگی در بازه ۵۰ تا ۳۰۰ واحد اندازه‌گیری می‌شود.

- حداکثر رطوبت حجمی خاک^۵: این ویژگی نشان‌دهنده حداکثر میزان رطوبت حجمی خاک است که به جنس خاک و تخلخل آن بستگی دارد. این پارامتر اهمیت زیادی در ذخیره آب و تأمین نیاز آبی گیاهان دارد و می‌تواند بر کارایی بام سبز تأثیرگذار باشد.

جدول ۲. پارامترهای گیاهان پیش‌فرض شده در بام سبز

پارامتر	گیاه پیش‌فرض
ارتفاع گیاه (m)	۰/۱۵
شاخص سطح برگ (LAI)	۳/۶
ضریب بازتاب برگ	۰/۳۲
ضریب نشر برگ	۰/۸۳
حداقل مقاومت روزنه (s/m)	۱۸۰
حداکثر رطوبت حجمی	۰/۵
رطوبت حجمی اولیه	۰/۰۱

- داده‌های اقلیمی

داده‌ها اقلیمی موردنیاز برای این شبیه‌سازی، مربوط به شهر تبریز، به صورت ماهانه (گزارش هوا و اقلیم (۱۳۹۹)) از سازمان هواشناسی شهر تبریز جمع‌آوری و از طریق فایل EPW به نرم‌افزار DesignBuilder وارد شده است (جدول ۳).

1. Leaf Area Index
2. Leaf Reflectivity
3. Leaf Emissivity
4. Minimum Stomatal Resistance
5. Max Volumetric Moisture Content at Saturation

مقدار بار	مقدار	م	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
مقدار	mm	۲۵/۶	۲۶/۲	۱۵/۷	۲۲/۷	۲۱/۶	۳۲/۴	۴۷/۴	۴۴/۵	۲۳/۶	۸/۳	۴/۴	۶/۶	۲۷۹
حداکثر مطلق	C°	۳۰/۶	۲۳/۴	۲۱/۸	۱۶	۱۹	۲۵/۴	۳۰/۴	۳۳/۵	۳۹	۴۲	۴۰	۳۸	۴۲
میانگین حداکثر	C°	۲۳/۱	۱۴/۸	۷/۳	۳/۲	۳/۹	۸/۴	۱۴/۶	۲۰/۷	۲۶/۷	۳۱/۳	۳۲/۶	۲۹/۷	۱۸
میانگین روزانه	C°	۱۶/۷	۹/۵	۳	-۰/۸	-۰/۴	۳/۷	۹/۴	۱۴/۹	۲۰/۲	۲۴/۶	۲۵/۹	۲۲/۸	۱۲/۵
میانگین حداقل	C°	۹	۲/۴	-۲/۵	-۵	-۳	۱/۴	۶/۶	۱۱/۳	۱۶/۶	۲۰/۴	۲۰/۲	۱۵/۲	۷/۷
حداقل مطلق	C°	-۴	-۱۷	۱۹/۵ -	-۲۵	-۲۲	-۱۹	-۱۲	-۰/۶	۴	۷	۱۰	۴	-۲۵
جهت باد غالب	°	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۲۲۵	۲۲۵	۴۵	۴۵	۴۵	۱۵ ۱۱۲	۴۵
سرعت باد متوسط	m/s	۲/۴	۲	۱/۹	۲/۱	۲/۳	۲/۹	۳/۳	۳/۲	۳/۸	۴/۸	۴/۵	۳/۳	۳
ساعات آفتابی	h	۳۳۱/۸	۱۷۲/۴	۱۳۲/۲	۱۳۲/۵	۱۴۶/۱	۱۷۹/۵	۲۰۱/۴	۲۶۹/۵	۳۳۶/۷	۲۵۲/۶	۳۳۹/۵	۲۰۴/۳	۲۷۹/۳
روزهای یخبندان	d	۰	۹	۲۴	۲۸	۲۲	۱۲	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۹۶
نسبت رطوبت (درصد)	mean	۵۱	۴۵	۷۲	۷۹	۶۲	۶۹	۵۶	۵۰	۴۱	۳۶	۳۶	۳۹	۵۴

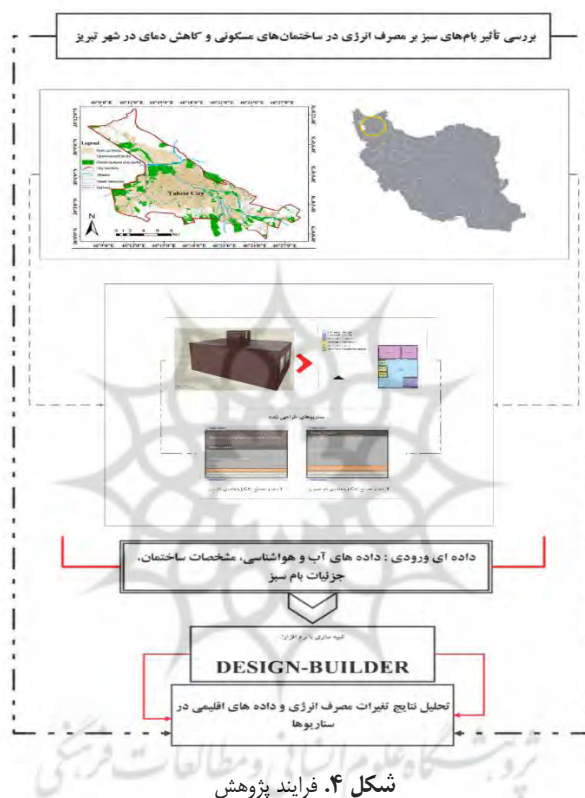
منبع: (گزارش هوا و اقلیم، ۱۳۹۹؛ نوبر و همکاران، ۱۴۰۳)

در جهت تحلیل دقیق انرژی، شبیه‌سازی به مدت یک سال و در چهار فصل مختلف انجام شده است. تحلیل نتایج به صورت ماهانه و با دقت زمانی هر ۲۰ دقیقه صورت می‌گیرد. این شبیه‌سازی، به عنوان یکی از گام‌های اساسی در ارزیابی عملکرد بام سبز، نقش مهمی در توسعه راهکارهای پایدار برای کاهش مصرف انرژی و بهبود کیفیت محیط‌زیست شهری ایفا می‌کند. به منظور دستیابی به دقت و انسجام در ارائه پژوهش، در جدول ۱ پارامترهای کلیدی تحقیق و روش‌های گردآوری اطلاعات مرتبط با هر یک را به صورت سیستماتیک نمایش داده شده است. همچنین در شکل (۴) روند کلی شبیه‌سازی و تحقیق را به تصویر کشیده است

دسته‌بندی	پارامتر کلیدی پژوهش	روش گردآوری اطلاعات و منابع
مستندات ساختمان	مساحت	طراحی و مدل‌سازی بر اساس الزامات مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان.
	نوع ساختمان	اطلاعات جمع‌آوری شده از ویژگی‌های ساختمان‌های مسکونی استاندارد در تبریز.
	تعداد زون‌های حرارتی	تعیین زون‌ها بر اساس اصول طراحی حرارتی در نرم‌افزار DesignBuilder
پژوهی‌های بام	ویژگی جداره‌ها	استخراج ضرایب هدایت حرارتی از مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان و تطبیق با استانداردهای منطقه‌ای.
	عمق خاک	تنظیم عمق خاک بر اساس مطالعات علمی معتبر و تعریف دقیق در نرم‌افزار DesignBuilder
	نوع پوشش گیاهی	انتخاب گیاه <i>Frankenia thymifolia</i> بر اساس پژوهش‌های زیست‌محیطی و کاربرد گیاهان در بام‌های سبز و بررسی گیاهان پوششی بومی منطقه شمال غرب ایران.

شاخص سطح برگ (LAI)	مقداردهی بر اساس داده‌های مطالعات تخصصی و مقالات مرتبط
ارتفاع گیاه	تعریف ارتفاع گیاه در نرم‌افزار با رجوع به منابع علمی بومی و استانداردهای مرتبط.
ضریب بازتاب برگ	پارامتر بازتاب برگ بر اساس استانداردهای زیست‌محیطی و تنظیم آن در نرم‌افزار.
ضریب نشر برگ	اطلاعات برگرفته از مقالات علمی مرتبط با گیاهان بومی مناطق سرد و خشک.
حداقل روزنه‌ای	مقادیر تنظیم‌شده بر اساس داده‌های تحقیقاتی گیاهان سازگار با اقلیم تبریز.
نرم‌افزار	استفاده از DesignBuilder به‌عنوان ابزار اصلی شبیه‌سازی و تحلیل انرژی.
داده‌های اقلیمی	وارد کردن فایل EPW (EnergyPlus Weather) شهر تبریز به نرم‌افزار.
بازه زمانی شبیه‌سازی	شبیه‌سازی سالیانه با دقت زمانی ۲۰ دقیقه‌ای برای تحلیل دقیق تغییرات انرژی.
سناریوها	مقایسه دو سناریو (ساختمان با بام سبز و بدون بام سبز) در شرایط اقلیمی واقعی.

داده‌ها و شبیه‌سازی



بحث

با افزایش روزافزون جمعیت در شهرهای درحال توسعه و توسعه‌یافته، مدیریت و تأمین نیازهای جمعیت ساکن در این شهرها امری حیاتی برای ادامه حیات آن‌ها است. یکی از استراتژی‌های مؤثر در این زمینه، استفاده از بام‌های سبز است. بام‌های سبز مزایای متعددی به‌ویژه در محیط‌های شهری که با چالش‌های آب‌وهوایی مواجه هستند، ارائه می‌دهند. این مزایا می‌تواند به ابعاد زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی تقسیم شود که بام‌های سبز را به‌عنوان راه‌حلی قانع‌کننده برای توسعه پایدار شهری معرفی می‌کند. از جمله مزایای زیست‌محیطی بام‌های سبز، کاهش اثر جزایر حرارتی در شهرها است، به‌گونه‌ای که این بام‌ها قادرند دمای سطح زمین را تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد کاهش دهند (Zhang et al., 2024). همچنین، بام‌های سبز از طریق کاهش سرعت جریان آب، به مدیریت مؤثر روان‌آب کمک کرده و می‌توانند حداقل ۵۱٪ از بارش سالانه را حفظ کنند (Zhang et al., 2024). علاوه بر این، این بام‌ها با جذب ذرات معلق در هوا به بهبود کیفیت هوای شهری کمک شایانی می‌کنند (Mihalakakou et al., 2023). در نهایت، بام‌های سبز با ایجاد عایق

حرارتی مؤثر، می‌توانند تا ۲۱,۲ کیلووات ساعت بر مترمربع در مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش صرفه‌جویی کنند و در نتیجه، منجر به کاهش قابل‌توجه هزینه‌های انرژی در طول زمان شوند (Lee et al., 2024).

سازگاری بام‌های سبز با شرایط آب‌وهوایی مختلف، امکان اجرای راه‌حل‌های متناسبی را فراهم می‌کند که به حداکثر صرفه‌جویی در مصرف انرژی منجر می‌شود. در مطالعه‌ای که توسط Kulumkanov و همکارانش در سال ۲۰۲۳، با شبیه‌سازی در نرم‌افزار DesignBuilder برای تحلیل عملکرد انرژی در ۴۵ شهر با مناطق اقلیمی متفاوت صورت گرفت، نشان داد که احداث بام سبز می‌تواند منجر به صرفه‌جویی انرژی بین ۳,۲٪ تا ۹,۱٪ شود و همچنین به‌عنوان یک استراتژی مؤثر معماری برای صرفه‌جویی در انرژی در آب‌وهوای سرد و خشک از طریق ایجاد عایق حرارتی، مانع از تبادل انرژی در ساختمان شده و مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی را کاهش دهد به‌عنوان مثال، شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده کاهش مصرف برق سالانه به میزان ۱۲,۵٪ در آب‌وهوای سرد و خشک مانند تبریز (Zahedi et al., 2023) است سقف‌های سبز می‌توانند اثرات خنک‌کننده موضعی ایجاد کنند، با مطالعات نشان‌دهنده تأثیر خنک‌کننده ۰,۸ تا ۱,۵ درجه سانتی‌گراد در طول تابستان (Qin et al., 2024). این امر منجر به صرفه‌جویی قابل‌توجهی در انرژی می‌شود، زیرا یک مطالعه گزارش داده است که میزان مصرف انرژی ۲۱,۷۷۲,۸ کیلووات ساعت در طول فصل خنک‌کننده (Qin et al., 2024) با جذب تابش خورشید، سقف‌های سبز به کاهش اثر جزیره گرمایی شهری کمک می‌کند، که در مناطق پرجمعیت بسیار حیاتی است (Azkorra-Larrinaga et al., 2023) این نه تنها به صرفه‌جویی در انرژی کمک می‌کند بلکه محیط کلی شهری را نیز بهبود می‌بخشد. درحالی‌که مزایای سقف‌های سبز در آب‌وهوای سرد و خشک قابل‌توجه است، مهم است که هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و نگهداری مربوط به نصب آن‌ها را در نظر بگیرید. این عوامل ممکن است برخی از صاحبان ساختمان را، علیرغم صرفه‌جویی در انرژی طولانی‌مدت و مزایای زیست‌محیطی، بازدارندگی کنند همچنین یافته‌ها نشان می‌دهد که اگرچه هزینه‌های اولیه (بین ۶,۷ تا ۲۳,۰۵ دلار) ممکن است زیاد باشد، اما مزایای بلندمدت که به بهبود بهره‌وری منجر می‌شود می‌تواند سرمایه‌گذاری را توجیه کند. در مطالعات صورت گرفته توسط Bano & Tahseen, در سال ۲۰۲۴، نشان دادن که احداث بام‌های سبز می‌تواند، تا ۲۱,۲ کیلووات بر مترمربع در انرژی گرمایش و سرمایشی سالانه صرفه‌جویی صورت بگیرد که این امر منجر به کاهش قابل‌توجهی در هزینه در طول زمان می‌شود. همچنین در ادامه با اشاره به یافته‌های Lee و همکارانش در سال ۲۰۲۴، می‌توان به تأثیر بام‌های سبز در آب‌وهوای سرد اشاره کرد، درحالی‌که بام‌های سبز مصرف انرژی گرمایشی را کمی افزایش می‌دهند، اما سبب کاهش حداکثر بارهای خنک‌کننده شده به صرفه‌جویی در مصرف انرژی کمک کنند. در این میان با توجه به مطالعات صورت گرفته توسط Elmzughy & Alhafi در سال ۲۰۲۱، اشاره بر کاهش قابل‌توجه انتشار CO₂ با حضور گیاهان پوششی در بام‌های سبز می‌شود. در این مطالعه به این نکته اشاره می‌شود که با بهینه‌سازی پارامترها، می‌توان انتشار CO₂ از ۲,۵ کیلوگرم در مترمربع در سال به ۱,۵۲ کیلوگرم در مترمربع در سال کاهش داد. این تغییرات در جو می‌تواند راه‌حلی در جهت کاهش نگرانی‌های زیست‌محیطی مربوط به مصرف انرژی در ساختمان‌ها بسیار مهم باشد. در این میان Jia و همکارانش در سال ۲۰۲۴ در پژوهش خود به اثر بام سبز در کاهش جزایر گرمای شهری و حفظ دمای پایین محیط اشاره کرده و خاطرنشان می‌کنند که وجود بام‌های سبز می‌تواند منجر به کاهش نیازهای انرژی برای خنک‌سازی در ساختمان را منجر شود. با این وجود لازم است به این نکته هم اشاره کرد که بام‌های سبز با وجود مزایای متعددی که ارائه می‌دهند، می‌تواند اثربخشی آن‌ها به‌طور قابل‌توجهی بر اساس شرایط آب‌وهوایی خاص و انواع ساختمان متفاوت باشد و نیاز به توجه دقیق در طراحی و اجرا را دارد.

این مطالعه صورت گرفته در جهت ارزیابی تأثیر ایجاد بام سبز با گیاه پوششی رایج در منطقه آذربایجان شرقی، تبریز، با

آب‌وهوای سرد خشک در طی یک سال صورت گرفته است از نوآوری‌های این مطالعه می‌توان به طراحی دو سناریو که متشکل از سقفی با پوشش گیاهی (گیاه پوششی) رایج منطقه تبریز و سقف سنتی فاقد پوشش گیاهی و مقایسه عملکرد این دو سقف نسبت به همدیگر در شرایط یکسان در طول یک سال می‌باشد، نتایج این پژوهش نشان داد که ایجاد بام سبز تأثیر قابل توجهی در میزان مصرف انرژی در ماه‌های اوج سرما و گرما در شهر تبریز دارد همچنین با وجود بام سبز با پوشش گیاهی شامل گیاه پوششی مقدار قابل توجهی انرژی گرمایشی و سرمایشی در ماه‌های پیک دمایی را کاهش می‌دهد که مطالعه صورت گرفته توسط (Evangelisti et al., 2020) که به بررسی سیستم بام سبز پوشیده از چمن (گیاهی پوششی) پرداخته است باعث بهبود بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها را تأیید می‌کند. همچنین در یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی صورت گرفته نشان می‌دهد حضور گیاه پوششی در مقایسه با بام سبز فاقد گیاه باعث کاهش در میزان انرژی مصرفی و کاهش بار سرمایش و گرمایشی، میزان کربن دی‌اکسید تولیدی از ساختمان‌ها را نیز سبب شده است و طرفی دیگر حضور گیاهان در بام‌ها باعث جذب ذرات آلاینده هوا می‌شود لازم است از لحاظ زیباشناختی و اجتماعی احداث بام‌های سبز نیز غافل نشد، و به این موارد نیز اشاره کرد. در این میان توجه به هزینه‌های اولیه سقف‌های سبز می‌تواند قابل توجه باشد، مطالعات نشان می‌دهد که آن‌ها می‌توانند مزایایی بیش از هزینه‌ها را در مرحله عملیاتی خود به میزان ۹ ضریب به همراه داشته باشند. و مصرف انرژی برای گرمایش و خنک‌سازی را تا ۲۲٪ کاهش دهند و منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی مالی در طول زمان بشود (Perović et al., 2023). سقف‌های سبز می‌توانند مقادیر قابل توجهی در هزینه‌های گرمایش و خنک‌سازی صرفه‌جویی کنند، با پیش‌بینی شده پس‌انداز ۹۴ دلار در مترمربع و ۱۱۴ دلار در مترمربع در سناریوهای آب‌وهوایی آینده. (Lee et al., 2024) پروژه‌های سقف سبز می‌تواند با افزایش ارزش ملک به‌طور قابل توجهی افزایش یابد، با برآوردها از ۴۳ یورو تا ۸۲ یورو در مترمربع بسته به نوع سقف متغیر است (Perović et al., 2023). در سئول، سناریویی با اجرای کامل سقف سبز نسبت سود و هزینه ۱,۱۷۴ را نشان داد که نشان می‌دهد مزایا بیش از هزینه می‌باشد (Shin & Kim, 2019). در این میان، سقف‌های سبز می‌توانند مقادیر قابل توجهی از آب را حفظ کنند و مزایای اقتصادی برآورد شده سالانه ۶۲۱,۰۰۰ دلار در شهرهای بزرگ لهستان به ارمغان آورد (Bus & Szelągowska, 2021). درحالی‌که مزایای اقتصادی سقف‌های سبز قانع‌کننده است، چالش‌هایی مانند هزینه‌های اولیه بالا و نیاز به سیاست‌های حمایتی می‌تواند مانع پذیرش گسترده شود. رفع این موانع برای به حداکثر رساندن پتانسیل سقف‌های سبز در محیط‌های شهری بسیار مهم است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر تأیید می‌کند که بام‌های سبز یکی از راهبردهای کلیدی در تحول معماری شهری و مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و انرژی بر شهرهای معاصر به شمار می‌آیند. نقش آن‌ها در کاهش اثر جزایر حرارتی، بهینه‌سازی مصرف انرژی، ارتقای کیفیت هوا و کاهش انتشار کربن، همگی نشانگر تأثیرات عمیق این فناوری در ایجاد شهرهای پایدار است. مزایای اقتصادی بام‌های سبز نیز فراتر از صرفه‌جویی در انرژی، شامل افزایش ارزش املاک و کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی مرتبط با آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی می‌شود. با وجود هزینه‌های اولیه، مدل‌های تحلیلی نشان داده‌اند که بازگشت سرمایه این فناوری در بلندمدت نه تنها توجیه‌پذیر، بلکه سودآور است، به‌ویژه در شهرهای در معرض تنش‌های اقلیمی که وابستگی شدیدی به انرژی‌های فسیلی دارند.

با این حال، میزان اثربخشی بام‌های سبز به متغیرهایی همچون شرایط اقلیمی، نوع پوشش گیاهی و طراحی ساختمان

بستگی دارد. در اقلیم‌های سرد و خشک، کاهش مصرف انرژی مستلزم انتخاب دقیق گونه‌های گیاهی و فناوری‌های سازگار با محیط است تا بتوان عملکرد بهینه را تضمین کرد. از این رو، تحقیقات آینده باید بر توسعه مدل‌های بهینه‌سازی شده برای اقلیم‌های متنوع، تحلیل عمیق‌تر هزینه-فایده، و ارائه راهکارهای سیاستی جهت افزایش پذیرش این فناوری در برنامه‌ریزی شهری تمرکز کنند. همچنین، تلفیق فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی و سیستم‌های مدیریت هوشمند انرژی می‌تواند بهره‌وری بام‌های سبز را به سطوحی فراتر از آنچه تاکنون مشاهده شده است، ارتقا دهد. در نهایت، تحقق شهرهای پایدار نیازمند رویکردی جامع‌نگر است که در آن بام‌های سبز نه تنها یک گزینه طراحی، بلکه عنصری بنیادین در سیاست‌های توسعه شهری تلقی شوند. حمایت‌های دولتی، اصلاح قوانین ساخت‌وساز و مشوق‌های مالی، می‌توانند زمینه را برای گسترش این فناوری فراهم سازند و از طریق هوشمند سازی زیرساخت‌های شهری، گامی اساسی در مسیر کاهش بحران‌های زیست‌محیطی و افزایش تاب‌آوری شهرها در برابر تغییرات اقلیمی بردارند.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان

نویسندگان در تمامی مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشته‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از تمام کسانی که در مراحل مختلف تحقیق، تحلیل، تدوین و نگارش ما را یاری کردند تقدیر و سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- نوبر، زهرا؛ رحیمی، اکبر و بروس، یورگن. (۱۴۰۳). ادیبل پارک‌ها راهبردی نوآورانه در ارتقای آسایش محیطی و توسعه پایدار شهری. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۸ (۹۰)، ۴۶۵-۴۴۰. doi: 10.22034/gp.2025.64192.3318
- رحیمی، اکبر و نوبر، زهرا. (۱۴۰۳). بررسی نقش گیاهان پوششی (چمن) در بهبود دمای معادل فیزیولوژیکی و رطوبت نسبی (منطقه مورد مطالعه: استادیوم دانشگاه تبریز). دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۳۴ (۱)، ۱۸۷-۲۰۴. doi: 10.22034/saps.2023.53515.2930

References

- Akbarzadeh, A. (2024). Investigation of Density factor in Urban Morphology on Micro-Climate Parameters in Cold and Dry Areas (Case Study: Tabriz City, Iran). *Power System Technology*, 48(2), 169-188. <https://doi.org/10.52783/pst.544>
- Azkorra-Larrinaga, Z., Romero-Antón, N., Martin-Escudero, K., & Lopez-Ruiz, G. (2023). Environmentally sustainable green roof design for energy demand reduction. *Buildings*, 13(7), 1846. <https://doi.org/10.3390/buildings13071846>
- Bano, F., & Tahseen, M. (2024). Roofing systems and energy efficiency in low-rise buildings: A comparative study across India's diverse climates. *Green Technologies and Sustainability*, 2(2), 100065. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2023.100065>

- Bus, A., & Szelągowska, A. (2021). Green water from green roofs—the ecological and economic effects. *Sustainability*, 13(4), 2403. <https://doi.org/10.3390/su13042403>
- Canbolat, A. S. (2024). An integrated assessment of the financial and environmental impacts of exterior building insulation application. *Journal of Cleaner Production*, 435, 140376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140376>
- Elmzugh, M. F., & Alhafi, Z. M. (2021). Dynamic Simulation and Parametric Analysis of Green Roofing in Buildings. *i-Manager's Journal on Mechanical Engineering*, 12(1), 39. <https://doi.org/10.26634/jme.12.1.18539>
- Evangelisti, L., Guattari, C., Grazieschi, G., Roncone, M., & Asdrubali, F. (2020). On the energy performance of an innovative green roof in the mediterranean climate. *Energies*, 13(19), 5163. <https://doi.org/10.3390/en13195163>
- Goussous, J., Siam, H., & Alzoubi, H. (2015). Prospects of green roof technology for energy and thermal benefits in buildings: Case of Jordan. *Sustainable cities and Society*, 14, 425-440. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.05.012>
- Huang, J., Kong, F., Yin, H., Middel, A., Liu, H., & Meadows, M. E. (2023). Green roof effects on urban building surface processes and energy budgets. *Energy Conversion and Management*, 287, 117100. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117100>
- Jia, S., Weng, Q., Yoo, C., Xiao, H., & Zhong, Q. (2024). Building energy savings by green roofs and cool roofs in current and future climates. *npj Urban Sustainability*, 4(1), 23. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00159-8>
- Kulumkanov, N., Nadeem, A., & Tokbolat, S. (2023, November). Green roof energy performance in different climate zones: a simulation study. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2600 (9), 092027. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/9/092027>
- Lee, E., Seo, Y., & Woo, D. K. (2024). Enhanced environmental and economic benefits of green roofs in a humid subtropical region under future climate. *Ecological Engineering*, 201, 107221. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107221>
- Lee, E., Seo, Y., & Woo, D. K. (2024). Enhanced environmental and economic benefits of green roofs in a humid subtropical region under future climate. *Ecological Engineering*, 201, 107221. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107221>
- Ling, H. M., Yew, M. C., Yew, M. K., & Saw, L. H. (2024). Analyzing Recent Active and Passive Cool Roofs. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109326>
- Mahmoudzadeh, H., Abedini, A., & Aram, F. (2022). Urban growth modeling and land-use/land-cover change analysis in a metropolitan area (case study: Tabriz). *Land*, 11(12), 2162. <https://doi.org/10.3390/land11122162>
- Mihalakakou, G., Souliotis, M., Papadaki, M., Menounou, P., Dimopoulos, P., Kolokotsa, D., ... & Papaefthimiou, S. (2023). Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113306. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113306>
- Mugadza, A. T. (2024). *Understanding the growing jurisprudence on environmental constitutionalism and the pursuit of environmental sustainability in Zimbabwe*. In Domestic and Regional Environmental Laws and Policies in Africa (pp. 15-29). Routledge. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781003382256-3/understanding-growing-jurisprudence-environmental-constitutionalism-pursuit-environmental-sustainability-zimbabwe-amanda-tapiwa-mugadza>
- Nobar, Z., Rahimi, A., & Brust, J. (2024). Edible Parks: An Innovative Strategy in Promoting Environmental Comfort and Sustainable Urban Development. *Geography and Planning*, 28, (90), 440-465. <https://doi.org/10.22034/gp.2025.64192.3318>. [In Persian]
- Perovic, Z., Coric, S., Isakovic, S., & Sumarac, D. (2023). Potential and Benefit of Green Roof Energy Renovation of Existing Residential Buildings with a Flat Roof in Belgrade. *Applied Sciences*, 13(13), 7348. <https://doi.org/10.3390/app13137348>
- Pianella, A., Clarke, R. E., Williams, N. S., Chen, Z., & Aye, L. (2016). Steady-state and transient thermal measurements of green roof substrates. *Energy and Buildings*, 131, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.024>
- Qadourah, J. A. (2024). Energy efficiency evaluation of green roofs as a passive strategy in the mediterranean climate. *Results in Engineering*, 23, 102519. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102519>

- Rahimi, A., & Nobar, Z. (1403). Investigating the Role of Cover Plants (Grass) in Improving Physiological Equivalent Temperature and Relative Humidity (Study Area: Tabriz University Stadium). *Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 34 (1), 187-204. <https://doi.org/10.22034/saps.2023.53515.2930> [In Persian]
- Rahimi, A., & Nobar, Z. (2023). The impact of planting scenarios on agricultural productivity and thermal comfort in urban agriculture land (case study: Tabriz, Iran). *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1048092. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1048092>
- Roy, P. K. (2024). Sustainable Development: An Unhappy Consciousness. In *Harmonizing Global Efforts in Meeting Sustainable Development Goals* (pp. 75-91). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-2758-6.ch004>
- Seddon, N. (2022). Harnessing the potential of nature-based solutions for mitigating and adapting to climate change. *Science*, 376(6600), 1410-1416. <https://doi.org/10.1126/science.abn9668>
- Seddon, N., Sengupta, S., García-Espinosa, M., Hauler, I., Herr, D., & Rizvi, A. R. (2019). *Nature-based solutions in nationally determined contributions*. IUCN and University of Oxford. Gland, Switzerland and Oxford. <https://www.naturebasedsolutionsinitiative.org/policy-briefs/>
- Shin, E., & Kim, H. (2019). Benefit-cost analysis of green roof initiative projects: The case of Jung-gu, Seoul. *Sustainability*, 11(12), 3319. <https://doi.org/10.3390/su11123319>
- Sun, G.; Chen, X.; Ren, J.; Zhang, A.; Jia, X. Stratiifed spectral mixture analysis of medium resolution imagery for impervious surface mapping. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf*, 2017, 60, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.006>
- Swinnen, J., Burkitbayeva, S., Schierhorn, F., Prishchepov, A. V., & Müller, D. (2017). Production potential in the “bread baskets” of Eastern Europe and Central Asia. *Global Food Security*, 14, 38-53. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.03.005>
- Szkordilis, F., & Kiss, M. (2016). Potential of Vegetation in Improving Indoor Thermal Comfort and Natural Ventilation. *Applied Mechanics and Materials*, 824, 278-287. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.824.278>
- Talebsafa, S., Taheri Shahraeini, M., Yang, X., & Rabiei, M. (2023). Impact of Providing Shade on Outdoor Thermal Comfort during Hot Season: a Case Study of a University Campus in Cold Semi-arid Climate. *Renewable Energy Research and Applications*, 4(2), 209-224. <https://doi.org/10.22044/rra.2022.12254.1169>
- Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., & Holmer, B. (2007). Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(14), 1983-1993. <https://doi.org/10.1002/joc.1537>
- Tochaiwat, K., Phichetkumbodee, N., Suppakittpaisarn, P., Rinchumphu, D., Tepweeerakun, S., Kridakorn Na Ayutthaya, T., & Sittisom, P. (2023). Eco-Efficiency of Green Infrastructure on Thermal Comfort of Outdoor Space Design. *Sustainability*, 15(3), 2566. <https://doi.org/10.3390/su15032566>
- Toxopeus, H., Kotsila, P., Conde, M., Katona, A., van der Jagt, A. P., & Polzin, F. (2020). How ‘just’ is hybrid governance of urban nature-based solutions. *Cities*, 105, 102839. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102839>
- Tseliou, A., Tsiros, I. X., Lykoudis, S., & Nikolopoulou, M. (2010). An evaluation of three biometeorological indices for human thermal comfort in urban outdoor areas under real climatic conditions. *Building and Environment*, 45(5), 1346-1352. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.009>
- Wang, Y., Bakker, F., de Groot, R., Wortche, H., & Leemans, R. (2015). Effects of urban trees on local outdoor microclimate: synthesizing field measurements by numerical modelling. *Urban Ecosystems*, 18, 1305-1331. <https://doi.org/10.1007/s11252-015-0447-7>
- Weng, Q., Hu, X., & Lu, D. (2008). Extracting impervious surfaces from medium spatial resolution multispectral and hyperspectral imagery: A comparison. *J. Remote Sens*, 29, 3209-3232. <https://doi.org/10.1080/01431160701469024>
- Widelska, E., Sowińska-Świerkosz, B., & Walczak, W. (2023). Natural Water Reservoirs as an Example of Effective Nature-Based Solutions (NBS). In *Limnology-The Importance of Monitoring and Correlations of Lentic and Lotic Waters*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106070>

- Wu, Y., Liu, H., Li, B., Kosonen, R., Wei, S., Jokisalo, J., & Cheng, Y. (2021). *Individual thermal comfort prediction using classification tree model based on physiological parameters and thermal history in winter*. In Building Simulation (pp. 1-15). Tsinghua University Press. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0750-y>
- Xu, C., Li, S., Zhang, X., & Shao, S. (2018). Thermal comfort and thermal adaptive behaviors in traditional dwellings: A case study in Nanjing, China. *Building and Environment*, 142, 153-170. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.006>
- Yan, S., Zhang, T., Wu, Y., Lv, C., Qi, F., Chen, Y., ... & Shen, Y. (2023). Cooling Effect of Trees with Different Attributes and Layouts on the Surface Heat Island of Urban Street Canyons in Summer. *Atmosphere*, 14(5), 857. <https://doi.org/10.3390/atmos14050857>
- Yang, J., & Li, P. (2015). Impervious surface extraction in urban areas from high spatial resolution imagery using linear spectral unmixing. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ*, 1, 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2015.06.005>
- Yilmaz, S., Külekçi, E. A., Mutlu, B. E., & Sezen, I. (2021). Analysis of winter thermal comfort conditions: street scenarios using ENVI-met model. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 63837-63859. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12009-y>
- Yoshida, A., Hisabayashi, T., Kashiara, K., Kinoshita, S., & Hashida, S. (2015). Evaluation of effect of tree canopy on thermal environment, thermal sensation, and mental state. *Urban Climate*, 14, 240-250. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.004>
- Yu, X., Shen, Z., Cheng, X., Xia, L., & Luo, J. (2016). Impervious surface extraction using coupled spectral-spatial features. *J. Appl. Remote Sens*, 10, 035013. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.035013>
- Yuan, T., Hong, B., Qu, H., Liu, A., & Zheng, Y. (2023). Outdoor thermal comfort in urban and rural open spaces: A comparative study in China's cold region. *Urban Climate*, 49, 101501. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101501>
- Zahedi, R., Daneshgar, S., Farahani, O. N., & Aslani, A. (2023). Thermal analysis model of a building equipped with green roof and its energy optimization. *Nature-Based Solutions*, 3, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100053>
- Zare, S., Hasheminejad, N., Shirvan, H. E., Hemmatjo, R., Sarebanzadeh, K., & Ahmadi, S. (2018). Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year. *Weather and climate extremes*, 19, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.01.004>
- Zhang, H., Lin, H., & Wang, Y. (2018). A new scheme for urban impervious surface classification from SAR images. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens*, 139, 103-118. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.03.007>
- Zhang, L.; Weng, Q.; Shao, Z. An evaluation of monthly impervious surface dynamics by fusing Landsat and MODIS time series in the Pearl River Delta, China, from 2000 to 2015. *Remote Sens. Environ*. 2017, 201, 99-114. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.036>
- Zhang, X., Soe, A. N., Dong, S., Chen, M., Wu, M., & Htwe, T. (2024). Urban Resilience through Green Roofing: A Literature Review on Dual Environmental Benefits. In *E3S Web of Conferences (Vol. 536, p. 01023)*. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453601023>