

The Role of Plant Species Diversity in Green Roofs for Energy Optimization: A Case Study of Shokouh School in Babol

Rouhollah Rahimi^{1*}, Fatemeh Firozmandi Bandpi²

Received: 2025/08/12

Revised: 2025/11/30

Accepted: 2026/05/10

Published: 2025/06/10

Highlights

- All four native plant species (Sedum, creeping thyme, Carpobrotus, Frankenia) reduced total annual energy consumption in the school by approximately 17–18% compared to a conventional roof.
- Sedum species provided the best overall performance, reducing total energy use by 17.7%, cooling load by 17.8%, and heating load by 17.4%.
- Frankenia laevis was particularly effective for cold seasons, achieving a 28.7% reduction in heating energy demand.
- Green roofs significantly lowered roof surface temperature (up to 7.8°C in summer) and reduced annual CO₂ emissions by up to 7.5%.
- This study fills a critical research gap for temperate and humid climates in Iran, offering practical design guidelines for educational buildings.

Extended Abstract

Introduction

Rising energy costs and greenhouse gas emissions have made energy optimization in educational buildings a priority. Green roofs, as a passive sustainable technology, provide natural thermal insulation and can reduce cooling loads by up to 70%. However, their energy performance is highly dependent on plant species. While extensive research exists for hot and dry or cold climates, the impact of plant species diversity on green roof efficiency in temperate and humid climates—characterized by high humidity and abundant rainfall—remains unexplored. This study investigates how four plant species affect energy consumption, heat transfer, surface temperature, and CO₂ emissions in a school in Babol, Iran. Ultimately, it provides practical recommendations for selecting the most optimal plant species suitable for the climatic conditions of temperate and humid regions.

Theoretical Framework

This research is grounded in building energy modeling and passive design principles. Previous studies show that green roofs reduce heat gain in summer and heat loss in winter through evapotranspiration, shading, and insulation. However, systematic comparisons of different plant species under temperate and humid conditions on an actual educational building are lacking. The primary criteria for plant selection in this climate are resistance to high humidity and the ability to grow in shaded or semi-shaded conditions, as roofs may not be fully exposed to direct sunlight. In addition, plants should be resistant to root rot caused by excessive moisture and have moderate water requirements to prevent resource waste. This study addresses that gap using a quantitative simulation-based framework.

Methodology

A dynamic simulation was performed using Design Builder (Energy Plus) for a 12-classroom school in Babol (temperate and humid climate). The baseline model (conventional roof) was calibrated against actual utility bills (9% error). Four plant species—Sedum, creeping thyme, Carpobrotus, and Frankenia—were modeled with specific parameters (LAI, albedo, emissivity, height). Simulations used a 10-minute time step over one year. The choice of an energy simulation approach over experimental or analytical methods was made due to the serious limitations of the experimental method (high cost, disruption to school operations, the need for multi-year monitoring to stabilize

¹ *Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Arts and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran; Corresponding Author, Email: r.rahimi@umz.ac.ir

² MS.C in Architecture, Department of Architecture, Faculty of Arts and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

vegetation, and the impossibility of simultaneously implementing five scenarios) and the inability of simple analytical methods to dynamically model the hygrothermal behavior of plants. Therefore, this method was identified as the most accurate and practical way to answer the research questions regarding the impact of green roof plant diversity on energy consumption optimization in a temperate and humid climate. Outputs included annual heating/cooling energy, roof heat transfer, surface temperature, and CO₂ emissions.

Results & Discussion

All green roof scenarios reduced total annual energy consumption compared to the baseline (31,150 kWh). Sedum achieved the highest reduction (17.7%, to 25,651 kWh), followed by Frankenia (17.6%), creeping thyme (17.3%), and Carpobrotus (17.2%). Sedum reduced cooling by 17.8% and heating by 17.4%. Notably, Frankenia reduced heating load by 28.7% (from 12,549 to 8,949 kWh), making it suitable for winter, but its cooling reduction was only 10.1%. Sedum lowered average roof surface temperature from 23.5°C to 20.1°C and reduced CO₂ emissions by 7.5% (from 32,401 to 29,984 kg). Statistical analysis (One-way ANOVA, Tukey HSD) showed that Sedum's total energy saving was significantly better than creeping thyme ($p=0.047$) and Carpobrotus ($p=0.031$), but not significantly different from Frankenia ($p=0.842$). Nevertheless, Sedum's balanced performance across all indicators makes it the optimal choice.

Conclusion

Green roofs with appropriate plant species are highly effective passive solutions for reducing energy consumption, roof surface temperature, and CO₂ emissions in educational buildings in temperate and humid climates. Model validation using the school's actual electricity and gas bills (School of Shoqoh) showed that the difference between the simulated energy use and the real consumption is about 9%, which falls within the acceptable range recommended by common guidelines for evaluating building energy models. This indicates that the model has sufficient accuracy for analyzing green-roof scenarios. The sensitivity analysis conducted on key plant parameters and the soil layer also showed that energy consumption is most sensitive to changes in the reflectance (albedo) and the leaf area index (LAI). Meanwhile, reasonable variations in plant height and the soil thermal conductivity produce only limited deviations (on the order of a few percent) in the results. Therefore, the ranking order of species and the resulting conclusion about the optimal species are robust to parameter uncertainties. Sedum is recommended as the optimal species for green roof design guidelines in northern Iran. Frankenia can be used as a supplementary species to enhance winter heating performance. Future research should include long-term field monitoring (3–5 years) and cost-benefit analyses.

Keywords

Green roof, Energy optimization, Plant species, Temperate and humid climate

Citation:

Rahimi, R., & Firozmandi Bandpi, F. (2026). The Role of Plant Species Diversity in Green Roofs for Energy Optimization: A Case Study of Shokouh School in Babol. *Journal of Urban Sustainable Development*, 7(22), 109-129.

 DOI: <https://doi.org/10.22034/usd.2026.2068767.1375>

 DOR:

URL: https://usdjournals.daneshpajooan.ac.ir/article_736326.html?lang=en



Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Daneshpajooan Pishro Higher Education Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



نقش تنوع گونه‌های گیاهی بام سبز در بهینه‌سازی مصرف انرژی: مطالعه موردی مدرسه شکوه بابل

روح اله رحیمی^{۳*}، فاطمه فیروزمندی بندپی^۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

چکیده: با افزایش مصرف انرژی و کاهش منابع تجدیدناپذیر، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی به یک چالش اساسی تبدیل شده است. در این میان، بام‌های سبز به‌عنوان یک راهکار پایدار، با کاهش بارهای حرارتی و انتشار کربن، پتانسیل بالایی برای بهبود این وضعیت دارند. با این حال، تأثیر کلیدی تنوع گونه‌های گیاهی بر کارایی انرژی این سیستم‌ها، به‌ویژه در اقلیم‌های معتدل و مرطوب که ویژگی‌هایی مانند رطوبت نسبی بالا و بارندگی فراوان دارند، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش به‌طور مشخص به این پرسش می‌پردازد که هر یک از گونه‌های گیاهی منتخب در یک بام سبز تا چه اندازه می‌توانند الگوی مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن را در یک مدرسه واقع در اقلیم معتدل و مرطوب شهر بابل بهینه‌سازی کنند؟ برای پاسخ به این پرسش، عملکرد چهار گونه گیاهی بومی و سازگار شامل ناز گوستی، آویشن خزنده، سدوم‌ها و فرانکنیا با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر شبیه‌سازی و با حالت پایه (بدون بام سبز) مقایسه شد. نتایج به‌وضوح نشان داد که همه گونه‌ها در کاهش مصرف انرژی مؤثر هستند، اما گونه سدوم‌ها با کاهش ۱۷/۷ درصدی در مصرف کل انرژی (معادل ۲۵۶۵۱ کیلووات‌ساعت)، ۱۷/۸ درصدی در سرمایش و ۱۷/۴ درصدی در گرمایش، بهترین عملکرد را ارائه داد. همچنین، این گونه موجب کاهش دمای سطح سقف به ۲۰/۱۱ درجه سانتی‌گراد و کاهش ۷/۵ درصدی (۲۹۹۸۴ کیلوگرم) در انتشار کربن شد. در مقابل، فرانکنیا با کاهش ۲۸/۷ درصدی در انرژی گرمایشی، گزینه‌ای مناسب‌تر برای فصول سرد شناسایی شد. این پژوهش با پر کردن شکاف مطالعاتی در اقلیم معتدل و مرطوب، راهکارهای عملی برای طراحی بام‌های سبز در محیط‌های آموزشی ارائه می‌دهد و به‌طور مشخص گونه سدوم را به‌عنوان گونه بهینه برای دستیابی به حداکثر بهره‌وری انرژی و پایداری زیست‌محیطی در این اقلیم معرفی می‌کند.

واژگان کلیدی: بام سبز، بهینه‌سازی انرژی، گونه‌های گیاهی، اقلیم معتدل و مرطوب

^{۳*} دانشیار، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابل، ایران. Email: r.rahimi@umz.ac.ir

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابل، ایران

۱- مقدمه و بیان مسئله

افزایش هزینه‌های انرژی، کاهش منابع فسیلی و ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی را به یکی از اولویت‌های اصلی تبدیل کرده است. در جهان حدود ۶۰۰ میلیون دانش‌آموز در مدارس حضور دارند و ۶۶ درصد این مراکز در سطح پایین مدیریت انرژی قرار دارند (Zahedi et al., 2024). در ایران نیز رشد جمعیت دانش‌آموزی همراه با قدمت بالای مدارس، نیاز به راه‌حل‌های کم‌مصرف و کم‌کربن را بیش از پیش ضروری ساخته است (Tayefeh et al., 2024).

بام‌های سبز به‌عنوان یکی از مؤثرترین فناوری‌های غیرفعال، با ایجاد عایق حرارتی طبیعی، کاهش بار سرمایشی تا ۷۰ درصد و کاهش دمای داخلی تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد در فصل گرم، نقش مهمی در مدیریت انرژی ساختمان‌های آموزشی ایفا می‌کنند (Lee et al., 2024; VahabiKha, et al., 2023). همچنین تأثیر مثبت این بام‌ها بر کیفیت یادگیری و رفتار دانش‌آموزان نیز به اثبات رسیده است (Bianchini & Hewage, 2012).

با این حال، کارایی انرژی و زیست‌محیطی بام‌های سبز به شدت وابسته به گونه گیاهی به کاررفته است (Jamei et al., 2021). گونه‌های مختلف از نظر مقاومت به رطوبت، سایه، سرما، عمق ریشه و توانایی عایق‌بندی حرارتی عملکرد کاملاً متفاوتی دارند. در حالی که تحقیقات گسترده‌ای در اقلیم‌های گرم و خشک و گرم و مرطوب انجام شده، تأثیر گونه‌های گیاهی بر عملکرد بام سبز در اقلیم معتدل و مرطوب ایران (با رطوبت نسبی بالا، بارندگی زیاد و سایه طولانی) تقریباً مورد بررسی قرار نگرفته و شکاف دانشی بزرگی در این حوزه وجود دارد.

در حال حاضر هیچ مبنای علمی معتبر و بومی‌شده‌ای برای انتخاب گونه گیاهی مناسب بام‌های سبز در مناطق معتدل و مرطوب کشور (مانند استان‌های شمالی) وجود ندارد. این موضوع باعث شده که اجرای بام سبز در مدارس این مناطق یا انجام نشود یا با انتخاب گونه‌های ناسازگار، کارایی بسیار پایینی داشته باشد و سرمایه‌گذاری انجام‌شده به هدر رود.

این پژوهش به منظور بررسی و مقایسه تأثیر چهار گونه گیاهی منتخب و سازگار با محیط منطقه معتدل و مرطوب (نازگوشتی، سدوم، آویشن خزنه و فرانکنیا) بر کاهش مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات دمایی سطوح در مدرسه شکوه بابل (به عنوان نمونه ساخته شده) انجام شده و در نهایت به ارائه راهکارهای عملیاتی برای انتخاب بهینه‌ترین گونه گیاهی متناسب با شرایط اقلیمی مناطق معتدل و مرطوب می‌پردازد. در این راستا پرسش‌های مطرح شده به شرح زیر است:

۱. تفاوت عملکرد بام سبز در مقایسه با بام‌های متعارف از نظر مصرف انرژی، انتقال حرارت از سقف، دما سطوح و انتشار دی اکسید کربن به چه میزان است؟
۲. هر یک از گونه‌های گیاهی مورد مطالعه تا چه اندازه در بهینه‌سازی الگوی مصرف انرژی، انتقال حرارت از سقف، دما سطوح و انتشار دی اکسید کربن در اقلیم معتدل و مرطوب مؤثر واقع می‌شوند؟

نوآوری اصلی این پژوهش، توسعه یک مدل مقایسه‌ای کمی برای سنجش همزمان تأثیر چهار گونه گیاهی بومی بر شاخص‌های عملکرد انرژی و محیط‌زیست در اقلیم معتدل و مرطوب است. این مطالعه با ارائه چارچوبی نظام‌مند برای انتخاب گونه گیاهی بهینه بر اساس اولویت‌های طراحی و تعیین معیارهای فنی قابل اجرا، مبنای علمی لازم را برای تصمیم‌گیری سازمان‌نوسازی مدارس و طراحان فراهم می‌کند. این رویکرد نه تنها شکاف مطالعاتی در اقلیم‌های معتدل و مرطوب را پر می‌کند، بلکه راهکارهای عملیاتی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در محیط‌های آموزشی ارائه می‌دهد.

۲- پیشینه و مبانی نظری پژوهش

۲-۱- مطالعات پیشین در مورد بام‌های سبز و تأثیر آن‌ها بر مصرف انرژی

بام‌های سبز به‌عنوان یکی از راهکارهای پایدار در معماری و شهرسازی، به دلیل قابلیت‌های زیست‌محیطی، اقتصادی، زیبایی‌شناختی و تفریحی، در دهه‌های اخیر به موضوعی

سقف را در تابستان تا ۲/۹ درجه سانتی گراد کاهش داده‌اند که به بهبود عملکرد سرمایشی کمک کرده است (Ran et al., 2020). این مطالعات بر ضرورت تطبیق طراحی بام سبز با شرایط اقلیمی خاص تأکید دارند و نشان می‌دهند که انتخاب پارامترهای مناسب، از جمله شاخص سطح برگ و نوع گیاه، می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر عملکرد انرژی داشته باشد.

در ایران، پژوهش‌ها به‌طور ویژه بر نقش گونه‌های گیاهی و جزئیات طراحی متمرکز بوده‌اند. در تبریز، استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر نشان داد که گونه‌های گیاهی مختلف، مانند وینکا، می‌توانند مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی را بین ۳/۸ تا ۴/۲ درصد کاهش دهند (Faghiehnia et al., 2024). در اقلیم گرم و نیمه‌خشک دزفول، استفاده از گونه‌های گیاهی با برگ‌های پهن و رشد پایین در ترکیب با لایه‌های زهکش مناسب، مصرف انرژی را تا ۴۲/۴ درصد کاهش داده است (حسینی و یینا، ۱۴۰۱). در تهران، تحلیل ۱۳۳ سناریوی شبیه‌سازی نشان داد که انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب می‌تواند مصرف انرژی سالانه را بین ۱۹ تا ۲۴ درصد کاهش دهد و در دوره‌های گرم و سرد، صرفه‌جویی در بارهای سرمایی و گرمایی تا ۲۵ درصد را امکان‌پذیر سازد (اعرابی و همکاران، ۱۴۰۰). این مطالعات بر اهمیت تنوع گونه‌های گیاهی و تطبیق طراحی با اقلیم تأکید دارند و نشان می‌دهند که انتخاب دقیق گیاهان می‌تواند به‌طور مستقیم بر بهره‌وری انرژی تأثیر بگذارد.

علاوه بر این، بررسی‌ها در مناطق معتدل ایران نشان داده‌اند که ترکیب بام‌های سبز با راهکارهایی مانند سیستم‌های فتوولتائیک و عایق کاری حرارتی، مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد (پارمحمد و مهدی‌زاده سراج، ۱۴۰۱). مطالعه‌ای در اصفهان نیز گزارش کرد که بام‌های سبز در ساختمان‌های بهینه‌سازی شده می‌توانند بین ۴ تا ۹/۵ درصد صرفه‌جویی در مصرف انرژی ایجاد کنند و تأکید کرد که مصرف انرژی ساختمان‌های ایران به‌طور متوسط چهار برابر استانداردهای بین‌المللی است (دهقان و همکاران، ۱۴۰۳).

کلیدی در پژوهش‌های جهانی تبدیل شده‌اند. این سیستم‌ها با ایجاد عایق حرارتی، کاهش اثر جزیره گرمایی شهری، مدیریت آب باران و بهبود بهره‌وری انرژی، نقش مهمی در طراحی ساختمان‌های پایدار ایفا می‌کنند. پژوهش حاضر با تمرکز بر تأثیر تنوع گونه‌های گیاهی بام سبز بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در مدرسه شکوه بابل، در اقلیم معتدل و مرطوب، به دنبال شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد انرژی و ارائه راهکارهای عملی است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که بام‌های سبز می‌توانند مصرف انرژی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهند، اما موفقیت آن‌ها به عواملی چون اقلیم، انتخاب گونه‌های گیاهی، جزئیات طراحی و یکپارچگی با سایر راهکارهای معماری وابسته است.

پژوهش‌های متعدد تأثیر بام‌های سبز را در اقلیم‌های مختلف بررسی کرده‌اند. در اقلیم سرد ایران، شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که ترکیب بام سبز با پاسیوهای داخلی در یک ساختمان آموزشی در بروجرد، مصرف کل انرژی سالانه را تا ۲۱/۰۴ درصد کاهش داده است، با کاهش ۳۴/۲۳ درصدی در تولید گرما، ۱۷/۴۸ درصدی در انرژی سرمایشی و ۳۴/۲۲ درصدی در گرمایش منطقه‌ای (Borghiei et al., 2025). به‌طور مشابه، بررسی بام‌های سبز متصل به آتریوم‌ها در ساختمان‌های آموزشی، صرفه‌جویی ۵۴/۹۵ درصدی در گرمایش زمستانه و بهبود سرمایش تابستانه را نشان داده است. این سیستم‌ها همچنین تهویه طبیعی و کیفیت فضاهای یادگیری را ارتقا داده‌اند (Zahedi et al., 2024). این یافته‌ها بر اهمیت یکپارچگی بام‌های سبز با عناصر معماری در بهینه‌سازی انرژی تأکید دارند و نشان می‌دهند که طراحی مناسب می‌تواند اثرات قابل‌توجهی بر کاهش بارهای حرارتی و سرمایی داشته باشد.

در اقلیم‌های گرم‌تر، نتایج متفاوتی گزارش شده است. برای مثال، در مراکش، بررسی‌ها نشان داده‌اند که بام‌های سبز در مناطق گرم‌تر تا ۴/۷۵ درصد مصرف انرژی سرمایشی را کاهش می‌دهند، اما در ماه‌های سرد ممکن است نیاز به گرمایش را تا ۲۰/۲۳ درصد افزایش دهند (Idouanaou et al., 2025). در شانگهای چین، بام‌های سبز دمای سطح

این یافته‌ها ضرورت استفاده از بام‌های سبز را به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود بهره‌وری انرژی برجسته می‌کنند و نشان می‌دهند که طراحی‌های بهینه‌شده می‌توانند تأثیرات

قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی داشته باشند (جدول شماره ۱).

جدول ۱. بررسی منابع و پیشینه تحقیق

| منبع | اقلیم | کاربری | روش تحقیق | یافته‌های کلیدی |
|---------------------------------|------------------------|--------|--|---|
| (Borghei et al., 2025) | سرد (بروجرد، ایران) | آموزشی | شبیه‌سازی با DesignBuilder | کاهش ۲۱/۰۴٪ مصرف انرژی سالانه |
| (Idouanaou et al., 2025) | متنوع (۶ منطقه مراکش) | اداری | شبیه‌سازی با Energy Plus | کاهش ۴/۷۵٪ انرژی سرمایشی |
| (Zahedi et al., 2024) | سرد (ایران) | آموزشی | شبیه‌سازی با Carrier HAP و اعتبارسنجی LEED | صرفه‌جویی ۵۴/۹۵٪ در گرمایش |
| (Nursat et al., 2023) | مناطق مختلف اقلیمی | عمومی | شبیه‌سازی چند سناریویی | بهبود عایق حرارتی و کاهش رواناب |
| (Elantary & Saleem 2023) | خشک (جیبیل، عربستان) | مسکونی | شبیه‌سازی با دیزاین بیلدر | بام‌های سبز می‌توانند مصرف کل انرژی را حداقل ۸/۸٪ کاهش دهند |
| (Ran et al., 2020) | مناطق مختلف چین | عمومی | شبیه‌سازی با دیزاین بیلدر و انرژی پلاس | برتری سقف‌های سبز گسترده به سقف‌های عایق حرارتی معمولی در کاهش مصرف انرژی |
| اعرابی و همکاران (۱۴۰۰) | گرم و خشک اصفهان | مسکونی | مطالعه تطبیقی استانداردها | صرفه‌جویی ۹/۵-۴٪ در مصرف انرژی |
| فقیهی‌نیا و همکاران (۱۴۰۴) | سرد (تبریز) | مسکونی | شبیه‌سازی با DesignBuilder | کاهش ۳/۸-۴/۲٪ مصرف انرژی |
| حسینی و بی‌نا (۱۴۰۱) | گرم و نیمه‌خشک (دزفول) | مسکونی | شبیه‌سازی و مطالعات میدانی | کاهش ۴۲/۴٪ انرژی مصرفی |
| یارمحمد و مهدی‌زاده سراج (۱۴۰۱) | معتدل (ایران) | اداری | مطالعه تطبیقی | معرفی بام سبز به‌عنوان راهکار مؤثر |
| نیرومند و فرامرزی فرد (۱۴۰۰) | اصفهان | آموزشی | شبیه‌سازی با DesignBuilder | کاهش ۴/۸٪ مصرف انرژی سالانه |

با وجود پتانسیل بالای بام‌های سبز در کاهش مصرف انرژی که مطالعات پیشین تأیید کرده‌اند، مرور دقیق این پژوهش‌ها سه محدودیت اساسی را آشکار می‌کند:

۱. تمرکز نامتوازن بر اقلیم‌های گرم و خشک یا سرد و کمبود پژوهش در اقلیم‌های معتدل و مرطوب؛ جایی که رطوبت نسبی بالا و بارندگی فراوان می‌تواند اثرات خنک‌کنندگی و عایق‌بندی حرارتی بام سبز را به‌طور قابل توجهی تعدیل یا حتی معکوس کند
۲. بررسی محدود و پراکنده نقش تنوع گونه‌های گیاهی؛ به‌طوری‌که تاکنون مقایسه سیستماتیک عملکرد گونه‌های مختلف بر شاخص‌های انرژی، دمایی و انتشار کربن در یک اقلیم یکسان و بر روی یک ساختمان واقعی انجام نشده است.
۳. نوسان گسترده نتایج کمی (از کمتر از ۵٪ تا بیش از ۵۰٪ صرفه‌جویی) که ناشی از تفاوت در کاربری ساختمان، جزئیات فنی لایه‌ها، فرضیات شبیه‌سازی و عدم شفافیت در گزارش پارامترهای گیاهی است.

گرمایی را تا بیش از ۸ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد (Cascone & Leuzzo, 2023). بنابراین، برنامه‌ریزی برای افزایش پوشش سبز و به‌کارگیری گونه‌های مؤثر، راهبردی کلیدی برای کاهش اثر جزیره گرمایی و بهبود راحتی حرارتی و سلامت شهری به شمار می‌رود.

۳-۲- معرفی گونه‌های گیاهی مورد مطالعه و ویژگی‌های آن‌ها

از آنجایی که ایران دارای چهار منطقه اقلیمی اصلی شامل معتدل و مرطوب، گرم و خشک، سرد کوهستانی و گرم و مرطوب است، انتخاب گونه‌های گیاهی برای بام سبز باید با شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه سازگار باشد. شهر بابل با اقلیم معتدل و مرطوب، ویژگی‌هایی نظیر رطوبت نسبی بالا، بارندگی مناسب و دمای معتدل را داراست. بنابراین، گیاهانی که در این منطقه استفاده می‌شوند باید توانایی تحمل رطوبت زیاد، مقاومت در برابر باران‌های فصلی و انطباق با دماهای متغیر را داشته باشند.

اولویت اصلی برای انتخاب گیاه در این اقلیم، مقاومت در برابر رطوبت بالا و توانایی رشد در شرایط سایه‌دار یا نیمه‌سایه است، زیرا بام‌ها ممکن است به‌طور کامل در معرض نور مستقیم خورشید نباشند. همچنین، گیاهان باید در برابر پوسیدگی ریشه ناشی از آب زیاد مقاوم باشند و نیاز آبی متوسطی داشته باشند تا از هدررفت منابع جلوگیری شود. این معیارها برای بام سبز، به‌ویژه در محیطی مانند مدرسه شکوه بابل، از اهمیت بالایی برخوردارند و انتخاب نهایی باید تعادلی بین این ویژگی‌ها ایجاد کند.

با این حال، مقاومت در برابر رطوبت و انطباق با سایه نسبت به نیاز آبی کمتر، اولویت بیشتری دارد، زیرا عدم سازگاری با رطوبت بالا می‌تواند به تخریب سریع پوشش گیاهی منجر شود. از سوی دیگر، نیاز به نور خورشید در این اقلیم معتدل اهمیت کمتری نسبت به مناطق سرد و خشک دارد، اما همچنان باید در نظر گرفته شود. بر این اساس، گونه‌های ناز گوشتی^۱، فرانکنیا^۲، اویشن خزنده^۳ و

پژوهش حاضر دقیقاً این سه شکاف را هدف قرار داده است: با تمرکز بر اقلیم کمتر مطالعه‌شده معتدل و مرطوب بابل، مقایسه همزمان چهار گونه گیاهی سازگار و ارائه نتایج شفاف و قابل‌تعمیم، راهنمای عملی برای انتخاب بهینه‌ترین گونه گیاهی در محیط‌های آموزشی این اقلیم ارائه می‌دهد.

۲-۲- تأثیر پوشش گیاهی بر کاهش جزیره گرمایی شهری

پدیده جزیره گرمایی شهری به عنوان یکی از چالش‌های اصلی محیط‌زیست شهری، ناشی از گسترش سطوح غیرقابل نفوذ و کاهش فضای سبز است که منجر به جذب و ذخیره گرمای بیشتر و افزایش مصرف انرژی برای سرمایش می‌شود. پوشش گیاهی از طریق مکانیزم‌های متعددی به مقابله با این پدیده می‌پردازد. مهم‌ترین این مکانیسم‌ها تبخیر و تعرق است که با تبدیل انرژی خورشیدی به گرمای نهان، اثر خنک‌کنندگی مستقیمی ایجاد می‌کند (Santiago & Rivas, 2021; Zabeti & Dessel, 2015). ناشی از شاخ و برگ گیاهان نیز از تابش مستقیم خورشید به سطوح شهری جلوگیری می‌کند (Santiago & Rivas, 2021; Gultekin et al., 2018; Cook & Larsen, 2021).

علاوه بر این، پوشش گیاهی با داشتن بازتابش بالاتر و ظرفیت گرمایی کمتر نسبت به مصالحی مانند آسفالت، گرمای کمتری جذب و ذخیره می‌کند (Perez et al., 2014). همچنین با ایجاد جریان‌های هوایی، هوای خنک مناطق سبز را به سمت مناطق گرمتر هدایت می‌نماید (Kumar et al., 2024).

بام‌های سبز به‌عنوان یکی از اشکال زیرساخت سبز، با ترکیب مکانیسم‌های سایه‌اندازی، تبخیر و تعرق و بازتابش، سهم بسزایی در تعدیل دمای شهری دارند (Anderson & Gough, 2021). اثرگذاری این راهکارها به عواملی مانند تراکم پوشش گیاهی (Zhou et al., 2019)، انتخاب گونه‌های مناسب و چیدمان استراتژیک آن‌ها بستگی دارد. به‌طوری که پیاده‌سازی سیستم‌های سبز یکپارچه می‌تواند تنش

³ Thymus serpyllum

¹ Carpobrotus

² Frankenia

بابل مقاوم است و نیاز به آبیاری کمتری دارد. علاوه بر فواید زیست‌محیطی، خواص معطر این گیاه می‌تواند به بهبود کیفیت هوا در محیط مدرسه کمک کند. نگهداری این گیاه ساده است و هزینه‌های مرتبط با مراقبت را به حداقل می‌رساند.

۳-۲-۳ ناز گوشتی

ناز گوشتی از خانواده آزواسه^۴ گیاهی گوشتی و چندساله است که به دلیل توانایی بالای خود در ذخیره آب در برگ‌های ضخیم و گوشتی‌اش شناخته می‌شود. حداکثر ارتفاع این گیاه حدود ۰/۱۵ متر است و رشد گسترده‌ای دارد که آن را برای پوشش‌دهی یکنواخت بام‌های سبز ایده‌آل می‌کند. شاخص سطح برگ این گیاه حدود ۴/۵ است که نشان‌دهنده ظرفیت بالای فتوسنتز آن است. ضریب بازتابی برگ ۰/۳۴ و ضریب انتشار برگ ۰/۹۵ نشان می‌دهد که این گیاه می‌تواند نور خورشید را به‌طور مؤثری بازتاب داده و دمای سطح بام را کاهش دهد، که به بهینه‌سازی مصرف انرژی سرمایشی کمک می‌کند (Rabbani & Kazemi, 2022). ناز گوشتی در برابر رطوبت بالا و بارندگی‌های فصلی مقاوم است و نیاز آبی کمی دارد، که با شرایط اقلیم معتدل و مرطوب بابل سازگار است. این گیاه به نگهداری اندک نیاز دارد و با عمق کاشت ۲۰ سانتی‌متری بام‌های گسترده سازگار است، که هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهد.

۳-۲-۴ فرانکنیا

فرانکنیا از خانواده فرانکنیاسه^۵ گیاهی چندساله و مقاوم است که حداکثر ارتفاع آن به ۰/۵ متر می‌رسد. این گیاه با شاخص سطح برگ ۲/۴۴، ضریب بازتابی ۰/۲۴ و ضریب انتشار ۰/۹۳۴، توانایی متوسطی در فتوسنتز و کاهش دما دارد، اما ساختار ریشه‌ای کم‌عمق آن (مناسب برای بسترهای کم‌عمق) و مقاومت در برابر رطوبت بالا، آن را برای بام‌های سبز در بابل مناسب می‌کند. فرانکنیا به دلیل تحمل شرایط مرطوب و

سدوم^۱ به‌عنوان گزینه‌های برتر انتخاب شدند (شکل شماره ۱). این گیاهان به دلیل مقاومت بالا در برابر رطوبت، رشد موفق در شرایط نیمه‌سایه، دسترسی آسان و هزینه معقول، برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در بام سبز مناسب هستند.



شکل ۱. از چپ به راست (سدوم، آویشن خزنده، فرانکنیا و ناز گوشتی)

۳-۲-۱-۲ سدوم

سدوم از خانواده کراسولاسه^۲ یکی از محبوب‌ترین گونه‌ها برای بام‌های سبز است که حداکثر ارتفاع آن ۰/۳ متر است. این گیاه با شاخص سطح برگ ۴/۵، ضریب بازتابی ۰/۳۴ و ضریب انتشار ۰/۹۵، توانایی بالایی در فتوسنتز و کاهش اثرات گرمایی دارد. سدوم به دلیل ساختار گوشتی برگ‌ها و ریشه‌های کم‌عمق، در برابر رطوبت بالا و شرایط اقلیم معتدل و مرطوب مقاوم است و با عمق کاشت محدود بام‌های گسترده سازگار است. این گیاه نیاز آبی بسیار کمی دارد و به مراقبت اندک نیاز دارد، که آن را به گزینه‌ای اقتصادی و پایدار تبدیل می‌کند. همچنین، تنوع رنگ و شکل برگ‌های سدوم می‌تواند جنبه زیبایشناختی بام سبز را تقویت کند (فقیهی‌نیا و همکاران ۱۴۰۴).

۳-۲-۲-۲ آویشن خزننده

آویشن خزننده از خانواده لامیاسه^۳ گیاهی معطر و پوششی است که حداکثر ارتفاع آن ۰/۱۵ متر است. این گیاه با شاخص سطح برگ ۴/۴۹، ضریب بازتابی ۰/۳۴ و ضریب انتشار ۰/۹۵، فتوسنتز بالایی داشته و نقش مهمی در کاهش دمای بام ایفا می‌کند. آویشن خزننده به دلیل ریشه‌های کم‌عمق و سازگاری با خاک‌های مرطوب، برای بام‌های گسترده با عمق کاشت ۲۰ سانتی‌متر مناسب است (Amii et al., 2025). این گونه در برابر رطوبت نسبی بالا و بارندگی‌های متداول

⁴ Aizoaceae

⁵ Frankeniaceae

¹ Sedum acre

² Crassulaceae

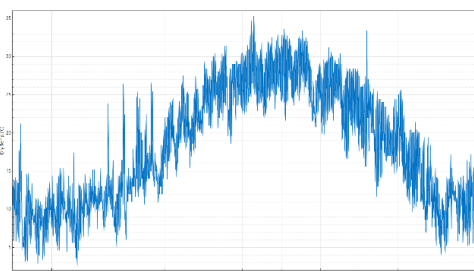
³ Lamiaceae

گیاهی بام سبز بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در اقلیم معتدل و مرطوب شناخته شد.

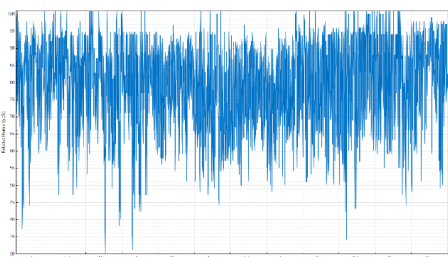
۳-۲- بستر پژوهش

شهر بابل، واقع در استان مازندران در شمال ایران، دارای اقلیم معتدل و مرطوب است. بر اساس داده‌های هواشناسی ایستگاه قراخیل قائمشهر که نزدیک ترین ایستگاه هواشناسی به شهر بابل می باشد، دمای متوسط سالانه این شهر حدود ۱۵ درجه سانتی گراد، با میانگین ۲۵ درجه سانتی گراد در گرم‌ترین ماه‌ها (تیر و مرداد) و ۵ درجه سانتی گراد در سردترین ماه‌ها (دی و بهمن) است (شکل شماره ۲).

میزان بارندگی سالانه بین ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر، عمدتاً در فصول پاییز و زمستان، و رطوبت نسبی سالانه بین ۷۰ تا ۸۰ درصد است (شکل شماره ۳). پوشش گیاهی گسترده منطقه، شامل درختان پهن‌برگ و کاج‌های طبیعی، به حفظ رطوبت و تعدیل دما کمک می‌کند. مصرف انرژی در بابل به دلیل اقلیم معتدل و مرطوب، به‌ویژه برای سرمایش و گرمایش، نسبت به مناطق خشک یا سرد ایران کمتر است (مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، ویرایش ۱۴۰۰). با این حال، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی به دلیل استفاده گسترده از سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی همچنان اهمیت دارد.



شکل ۲. نمودار دما ماهانه به ساعت شهر بابل



شکل ۳. نمودار رطوبت نسبی به ساعت شهر بابل

خاک‌های با زهکشی متوسط، در اقلیم معتدل و مرطوب عملکرد خوبی دارد. این گیاه به دلیل رشد کند و نیاز کم به آبیاری، گزینه‌ای اقتصادی است و می‌تواند به‌عنوان بخشی از پوشش گیاهی متنوع در بام سبز عمل کند، که به پایداری اکوسیستم کمک می‌کند (فقیهی‌نیا و همکاران ۱۴۰۴).

با توجه به اینکه بام مورد مطالعه از نوع گسترده با عمق کاشت حداکثر ۲۰ سانتی‌متر است، استفاده از درختان و درختچه‌ها امکان‌پذیر نیست. بنابراین انتخاب به گیاهان پوششی کم‌نیاز به نگهداری محدود شد. با در نظر گرفتن اقلیم معتدل و مرطوب بابل، محدودیت عمق بستر، هزینه نگهداری پایین، دسترسی آسان و سازگاری بالا، چهار گونه‌ی نازگوشتی، سدوم‌ها، آویشن خزنده و فرانکنیا به‌عنوان گزینه‌های مناسب انتخاب شدند.

۳- روش تحقیق

۳-۱- رویکرد پژوهش

این پژوهش از نوع کاربردی و با رویکرد شبیه‌سازی انرژی ساختمان (Building Energy Modeling) است. در این مطالعه، از نرم‌افزار DesignBuilder به‌عنوان ابزار اصلی شبیه‌سازی پویای عملکرد انرژی ساختمان استفاده شده است. این نرم‌افزار بر پایه موتور محاسباتی EnergyPlus عمل می‌کند و امکان مدل‌سازی دقیق انتقال حرارت، بارهای سرمایشی و گرمایشی، و تأثیر پوشش‌های گیاهی بام سبز را در شرایط اقلیمی واقعی و با گام زمانی ساعتی فراهم می‌آورد.

انتخاب رویکرد شبیه‌سازی انرژی به‌جای روش‌های تجربی یا تحلیلی به دلیل محدودیت‌های جدی روش تجربی (هزینه بالا، اختلال در بهره‌برداری مدرسه، نیاز به پایش چندساله برای تثبیت پوشش گیاهی و غیرممکن بودن اجرای همزمان پنج سناریو) و ناتوانی روش‌های تحلیلی ساده در مدل‌سازی پویای رفتار حرارتی-رطوبتی گیاهان صورت گرفت.

بنابراین، این روش دقیق‌ترین و عملی‌ترین راه برای پاسخ به پرسش‌های پژوهش در خصوص تأثیر تنوع گونه‌های

۳-۳- نمونه مطالعاتی

نمونه مورد بررسی در این پژوهش، مدرسه دخترانه ۱۲ کلاسه «شکوه» واقع در شهر بابل، استان مازندران است (شکل شماره ۴ و ۵). این مدرسه در سال ۱۴۰۲ افتتاح شده و از نظر معماری، تأسیسات و مصالح ساختمانی مطابق با آخرین ضوابط و استانداردهای سازمان نوسازی، توسعه و تجهیز مدارس کشور احداث گردیده است. موقعیت جغرافیایی مدرسه در منطقه‌ای درون‌شهری با اقلیم معتدل و مرطوب و نماینده بودن آن از مدارس نوساز شمال کشور، این بنا را به گزینه‌ای مناسب برای مطالعه عملکرد بام سبز گسترده در شرایط واقعی بهره‌برداری آموزشی تبدیل کرده است.

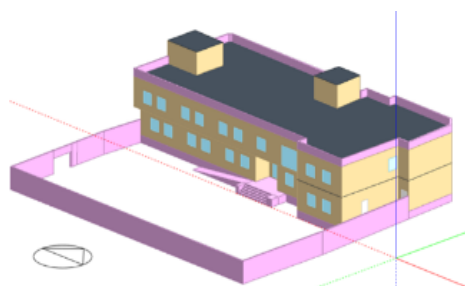


شکل ۴. مدرسه دخترانه شکوه در شهر بابل

مشخصات زیربنایی این مدرسه در (جدول شماره ۲) ارائه شده است:

جدول ۲. مشخصات زیربنایی مدرسه شکوه بابل

| حجم فضاها (m ³) | مساحت دیوارها (m ²) | مساحت سقفی شیشه (m ²) | مساحت شیشه دیوارها (m ²) | مساحت سقف (m ²) | زیربنای کل (m ²) |
|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| ۵۳۰۰ | ۱۱۳۷ | ۰ | ۱۱۶ | ۷۴۵ | ۱۲۴۵ |



شکل ۵. شماتیک ساختمان مدرسه شکوه

۳-۴- متغیرهای پژوهش

متغیرهای پژوهش در سه دسته مستقل، وابسته و کنترل تعریف شده‌اند تا تأثیر تنوع گونه‌های گیاهی بام سبز بر مصرف انرژی، انتشار کربن و عملکرد حرارتی به صورت جامع ارزیابی شود.

۳-۴-۱- متغیرهای مستقل

متغیرهای مستقل پژوهش شامل نوع پوشش گیاهی بام سبز می باشد که در چهار سطح بررسی شده است. چهار نوع پوشش گیاهی (نازگوشتی، سدوم، آویشن خزنده و فرانکنیا) مورد ارزیابی قرار گرفته است تا تأثیر گونه‌های مختلف گیاهی بر مصرف انرژی، انتشار کربن و عملکرد حرارتی ساختمان بررسی گردد.

۳-۴-۲- متغیرهای وابسته

متغیرهای وابسته، خروجی‌هایی هستند که تحت تأثیر متغیرهای مستقل اندازه‌گیری شده‌اند شامل مصرف انرژی سالانه، میزان انتشار دی‌اکسید کربن و عملکرد حرارتی (شامل کاهش دمای سطح بام (°C) و کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی) می باشد (جدول شماره ۳).

جدول ۳. متغیرهای وابسته پژوهش

| متغیر وابسته | واحد اندازه‌گیری | روش تحلیل/ابزار | هدف ارزیابی |
|--------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--|
| مصرف انرژی سالانه | kWh/m ² | شبیه‌سازی در دیزاین بیلدر | سنجش صرفه‌جویی انرژی |
| انتشار کربن (CO ₂) | kg CO ₂ /m ² | خروجی نرم افزار دیزاین بیلدر | ارزیابی تأثیر زیست‌محیطی |
| عملکرد حرارتی | % °C | شبیه‌سازی حرارتی در دیزاین بیلدر | ارزیابی کاهش دمای بام و بارهای سرمایشی/گرمایشی |

۳-۴-۳- متغیرهای کنترل

متغیرهای کنترل برای کاهش تأثیر عوامل خارجی و حفظ ثبات شرایط ثابت نگه داشته شده‌اند شامل (مشخصات معماری ساختمان، شرایط اقلیمی بابل، الگوی بهره‌برداری) در نظر گرفته شده اند (جدول شماره ۴).

جدول ۴. متغیرهای کنترل پژوهش

| دسته‌بندی | متغیرهای کنترل | مقادیر/شرایط ثابت شده |
|-------------------|-------------------|---|
| مشخصات ساختمان | زیربنا | ۱۲۴۵ m ² |
| | حجم فضاها | ۵۳۰۰ m ³ |
| | مصالح دیوارها | بتن سبک (U=۰/۷ W/m ² K) |
| | مصالح سقف | بتن (U=۱/۱ W/m ² K) |
| شرایط اقلیمی | پنجره‌ها | دوجداره (U=۲/۰ W/m ² K) UPVC |
| | موقعیت | بابل، ایران |
| | دمای متوسط سالانه | ۱۵°C |
| | رطوبت نسبی | ۷۰-۸۰% |
| الگوی بهره‌برداری | بارندگی | ۱۰۰۰-۱۲۰۰ mm |
| | تراکم حضور | ۰/۲ نفر/m ² |
| | تجهیزات برقی | ۴ W/m ² |
| | روشنایی | LED (۷/۵ W/m ²) |

۳-۵- فرایند شبیه‌سازی

۳-۵-۱- فرضیات شبیه‌سازی

- جدار دیوارها: بتن سبک با ضریب انتقال حرارت ۰/۷ W/m²K.
- جدار سقف: بتن با ضریب انتقال حرارت ۱/۱ W/m²K.
- سیستم سرمایش: کولر گازی.
- سیستم گرمایش: پکیج و شوفاژ با راندمان ۸۵٪.
- روشنایی LED: با توان ۷/۵ W/m².
- تجهیزات برقی: ۴ W/m².
- ست پوینت سرمایش: ۲۴°C، ست پوینت گرمایش: ۲۲°C.

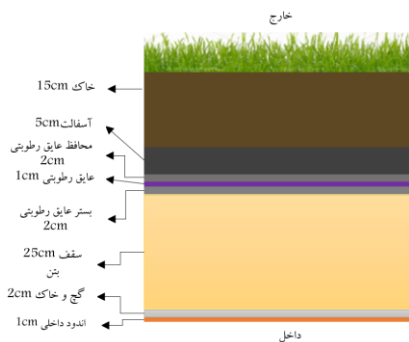
- تعداد افراد: ۰/۲ نفر/m².

- پنجره‌ها: دوجداره با فریم UPVC (شکل شماره ۶)
- برنامه زمان‌بندی فعالیت‌ها: بر اساس پیوست ۵ مبحث ۱۹ برای فضاهای آموزشی.

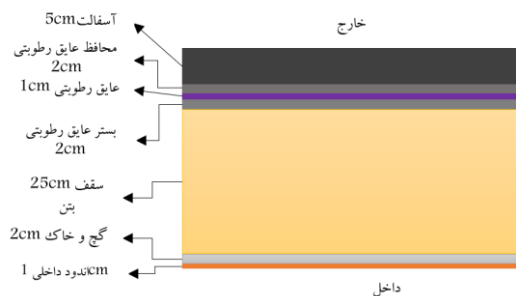
| Calculated Values | |
|---|-------|
| Total solar transmission (SHGC) | 0.596 |
| Direct solar transmission | 0.487 |
| Visible transmittance | 0.541 |
| U-value (ISO 10292/ EN 673) (W/m ² -K) | 2.679 |
| U-Value (W/m ² -K) | 2.537 |

شکل ۶. مشخصات پنجره

۳-۵-۲- مصالح و مشخصات لایه‌های بام



شکل ۸. جزئیات لایه‌های سقف بام سبز



شکل ۷. جزئیات لایه‌های سقف معمولی

جدول ۵. مصالح و مشخصات لایه های بام معمولی

| ضریب هدایت حرارتی W/m·K | چگالی kg/m ³ | ظرفیت گرمایی J/kg·K | ضخامت (mm) | جنس مصالح |
|----------------------------|-------------------------|------------------------|------------|-----------------|
| ۰/۷۰ | ۲۱۰۰ | ۹۲۰ | ۵۰ | آسفالت |
| ۱/۰۰ | ۲۱۰۰ | ۸۴۰ | ۵۰ | ملات ماسه سیمان |
| ۰/۱۹ | ۱۱۰۰ | ۱۰۰۰ | ۲۰ | ایزوگام |
| ۱/۰۰ | ۲۱۰۰ | ۸۴۰ | ۴۰ | ملات ماسه سیمان |
| ۰/۷۲ | ۱۸۶۰ | ۸۴۰ | ۲۵۰ | بتن |
| ۰/۴۰ | ۱۲۰۰ | ۱۰۸۰ | ۲۰ | ملات گچ و خاک |
| ۰/۲۵ | ۹۵۰ | ۱۱۰۰ | ۱۰ | گچ پرداخت |

جدول ۶. مصالح و مشخصات لایه های بام سبز

| ضریب هدایت حرارتی (W/m·K) | چگالی (kg/m ³) | ظرفیت گرمایی (J/kg·K) | ضخامت (mm) | جنس مصالح |
|------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------|-----------------|
| ۰/۵ | ۱۱۰۰ | ۲۰۰۰ | ۲۰۰ | خاک |
| ۰/۷۰ | ۲۱۰۰ | ۹۲۰ | ۵۰ | آسفالت |
| ۱/۰۰ | ۲۱۰۰ | ۸۴۰ | ۵۰ | ملات ماسه سیمان |
| ۰/۱۹ | ۱۱۰۰ | ۱۰۰۰ | ۲۰ | ایزوگام |
| ۱/۰۰ | ۲۱۰۰ | ۸۴۰ | ۴۰ | ملات ماسه سیمان |
| ۰/۷۲ | ۱۸۶۰ | ۸۴۰ | ۲۵۰ | بتن |
| ۰/۴۰ | ۱۲۰۰ | ۱۰۸۰ | ۲۰ | ملات گچ و خاک |
| ۰/۲۵ | ۹۵۰ | ۱۱۰۰ | ۱۰ | گچ پرداخت |

جدول ۷. پارامترهای گیاهان پیش فرض شده در بام سبز

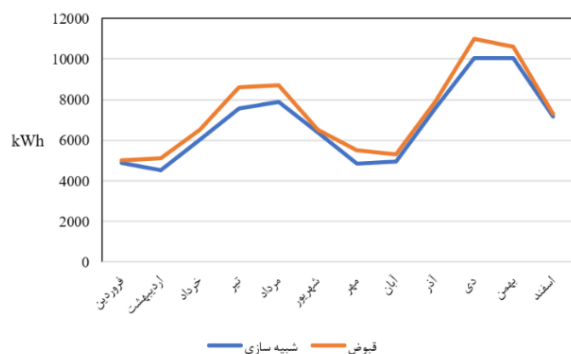
| شاخص سطح برگ | ضریب بازتابی برگ | ضریب انتشار برگ | حداکثر ارتفاع (m) | نام | خانواده |
|--------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------|------------|
| ۴/۵ | ۰/۳۴ | ۰/۹۵ | ۰/۱۵ | ناز گوشتی | آزواسه |
| ۴/۴۹ | ۰/۳۴ | ۰/۹۵ | ۰/۱۵ | آویشن خزنده | لامیاسه |
| ۴/۵ | ۰/۳۴ | ۰/۹۵ | ۰/۳ | سدوم ها | کراسولاسه |
| ۲/۴۴ | ۰/۲۴ | ۰/۹۳۴ | ۰/۵ | فرانکنیا | فرانکنیاسه |

جدول ۴-۵-۳- مراحل شبیه‌سازی

۱. ایجاد مدل سه‌بعدی مدرسه شکوه در نرم‌افزار دیزاین بیلدر با استفاده از مشخصات واقعی سازه و مصالح.
۲. وارد کردن داده‌های اقلیمی بابل (دما، رطوبت، تابش خورشیدی) به مدل.

جدول ۳-۵-۳- پارامترهای گیاهان پیش فرض شده در بام سبز

پارامترهای گیاهی نظیر شاخص سطح برگ، ضریب بازتابی برگ، ضریب انتشار برگ و حداکثر ارتفاع گیاه، تأثیر مستقیمی بر عملکرد حرارتی، سرمایشی و زیست‌محیطی بام سبز دارند. در این بخش، جدول پارامترهای گیاهان پیش فرض شده (جدول شماره ۶) بر اساس مطالعات (Jamei, et al., 2021) ، (Rabbani & Kazemi, 2022) ، (Amii et al., 2025) و فقیهی‌نیا و همکاران (۱۴۰۴) برای طراحی بام سبز ارائه شده است که شامل گونه‌هایی با ویژگی‌های مناسب برای اقلیم معتدل و مرطوب، مانند منطقه بابل، می‌باشد. این جدول به‌عنوان مبنایی برای شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است تا نقش تنوع گونه‌های گیاهی در بهینه‌سازی مصرف انرژی در مدرسه شکوه بابل بررسی شود.



شکل ۱۹. اعتبارسنجی نتایج مدرسه شکوه با قبض برق و گاز

به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان و پایداری نتایج شبیه سازی، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای کلیدی مؤثر در عملکرد بام سبز شامل شاخص سطح برگ (LAI)، ضریب بازتابی برگ (Albedo)، ارتفاع گیاه و ضریب هدایت حرارتی لایه خاک انجام شد. هر پارامتر به صورت مجزا در بازه $\pm 20\%$ درصد نسبت به مقدار پایه تغییر داده شد و تأثیر آن بر مصرف انرژی کل سالانه در سناریوی بهینه (سدوم) مورد ارزیابی قرار گرفت. کلیه شبیه سازی ها با گام زمانی ۱۰ دقیقه ای (۶ تایم استپ در ساعت) انجام شد. نتایج تحلیل حساسیت در (جدول شماره ۸) ارائه شده است.

۳. کالیبراسیون مدل پایه با داده های مصرف انرژی واقعی (در صورت دسترسی).

۴. شبیه سازی سناریوهای مختلف با پوشش های گیاهی متفاوت.

۵. تحلیل نتایج شامل مصرف انرژی، انتشار کربن و عملکرد حرارتی با استفاده از ابزارهای دیزاین بیلدر

۶. شبیه سازی ها به صورت پویا و با گام زمانی ۱۰ دقیقه (۶ تایم استپ در ساعت) انجام گرفت تا دقت مدل سازی فرآیندهای حرارتی و رطوبتی بام سبز به ویژه در اقلیم مرطوب تضمین شود. نتایج نهایی مصرف انرژی، انتقال حرارت، دمای سطح و انتشار کربن در مقیاس ماهانه و سالانه از داده های ساعتی (۸۷۶۰ ساعته سال) جمع و گزارش شدند.

۳-۶- تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی مدل

نتایج شبیه سازی حالت پایه با داده های واقعی قبوض برق و گاز مدرسه شکوه مقایسه شد. مصرف انرژی شبیه سازی شده (60 kWh/m^2) به مقدار واقعی (66 kWh/m^2) نزدیک بود، که نشان دهنده دقت مدل است. خطای ۹٪ به تفاوت های جزئی در بهره برداری واقعی و فرضیات شبیه سازی نسبت داده شد (شکل شماره ۹).

جدول ۸. نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای بام سبز بر مصرف انرژی کل سالانه (kWh)

| تغییر مصرف انرژی (20%+) | تغییر مصرف انرژی (20%-) | تغییر ۲۰٪ | تغییر ۲۰٪+ | مقدار پایه | پارامتر |
|-------------------------|-------------------------|-----------|------------|------------|-------------------------------|
| 4.8%+ (26882 kWh) | 4.1%- (24609 kWh) | ۳/۶۰ | ۵/۴۰ | ۴/۵۰ | شاخص سطح برگ (LAI) |
| 6.2%+ (27241 kWh) | 5.5%- (24241 kWh) | ۰/۲۷۲ | ۰/۴۰۸ | ۰/۳۴ | ضریب بازتابی برگ (Albedo) |
| 1.9%+ (26139 kWh) | 1.7%- (25223 kWh) | ۰/۲۴ | ۰/۳۶ | ۰/۳۰ | ارتفاع گیاه (m) |
| 2.9%- (24908 kWh) | 3.3%+ (26498 kWh) | ۰/۴۰ | ۰/۶۰ | ۰/۵۰ | ضریب هدایت حرارتی خاک (W/m·K) |

• ضریب هدایت حرارتی خاک با حداکثر انحراف $+3/3\%$

• ارتفاع گیاه با حداکثر انحراف $+1/9\%$

بر اساس نتایج به دست آمده، حساسیت مدل به ترتیب اولویت عبارت است از:

• ضریب بازتابی برگ با حداکثر انحراف $+6/2\%$

• شاخص سطح برگ با حداکثر انحراف $+4/8\%$

این نتایج نشان می‌دهد که مدل از پایداری مناسبی در برابر تغییرات پارامترهای ورودی برخوردار است و حداکثر انحراف ایجاد شده در بدترین سناریو در محدوده قابل قبول ($\pm 6/6\%$) قرار دارد.

۴- بحث و یافته‌های پژوهش

۴-۱- یافته‌ها

۴-۱-۱- نتایج بررسی‌ها در حالت پایه

نتایج ارائه شده در (جدول شماره ۹) حالت پایه، عملکرد انرژی یک ساختمان بدون استفاده از بام سبز را در مدرسه شکوه بابل، واقع در اقلیم معتدل و مرطوب، نشان می‌دهد. این داده‌ها شامل پارامترهای انتقال حرارت سقف، انرژی موردنیاز برای سیستم‌های گرمایش و سرمایش، دمای خارجی سطح سقف و انتشار دی‌اکسید کربن در طول یک سال است. در حالت پایه، مصرف کل انرژی سالانه برای گرمایش و

سرمایش ۳۱۱۵۰ کیلووات‌ساعت است که ۱۲۵۴۹ کیلووات‌ساعت آن مربوط به گرمایش و ۱۸۶۰۱ کیلووات‌ساعت به سرمایش اختصاص دارد. انتقال حرارت سقف در ماه‌های سرد (مانند دی و بهمن) به صورت منفی (خروج حرارت) و در ماه‌های گرم (مانند تیر و مرداد) به صورت مثبت (جذب حرارت) مشاهده می‌شود. دمای خارجی سطح سقف در تیرماه به $37/87$ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که نشان‌دهنده بار حرارتی قابل توجه در تابستان است. همچنین، انتشار سالانه دی‌اکسید کربن ۳۲۴۰۱ کیلوگرم گزارش شده است که بیانگر تأثیر زیست‌محیطی بالای مصرف انرژی در این حالت است. این نتایج به‌عنوان مبنایی برای مقایسه با سناریوهای استفاده از بام سبز با گونه‌های گیاهی متنوع در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد تا تأثیر این سیستم‌ها بر بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش انتشار کربن ارزیابی شود.

جدول ۹. نتایج شبیه‌سازی در حالت پایه مدرسه شکوه بابل

| | انتقال حرارت سقف | انرژی سیستم گرمایش | انرژی سیستم سرمایش | انرژی سرمایش و گرمایش | دمای خارجی سطح | انتشار کربن دی‌اکسید |
|--------|------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------|----------------------|
| | kWh | kWh | kWh | kWh | °C | kg |
| Jan | -۴۴۸۴ | ۴۱۵۸ | ۰ | ۴۱۵۸ | ۱۰/۶۸ | ۲۴۱۰ |
| Feb | -۳۴۳۶ | ۳۲۳۶ | ۰ | ۳۲۳۶ | ۱۲/۳۴ | ۲۰۴۲ |
| Mar | -۲۰۷۷ | ۱۳۶۵ | - | ۱۳۶۵ | ۱۷/۳۰ | ۱۸۴۲ |
| Apr | -۵۸۷ | ۱۷۳ | ۵۸۳ | ۷۵۶ | ۲۲/۶۴ | ۱۹۰۷ |
| May | ۱۴۶۸ | ۰ | ۱۹۶۰ | ۱۹۶۰ | ۲۹/۷۶ | ۲۸۱۶ |
| Jun | ۲۶۸۶ | ۰ | ۳۰۴۰ | ۳۰۴۰ | ۳۴/۲۵ | ۳۳۶۶ |
| Jul | ۴۰۴۰ | ۰ | ۴۰۲۰ | ۴۰۲۰ | ۳۷/۸۷ | ۴۰۲۹ |
| Aug | ۲۷۴۰ | ۰ | ۳۸۵۹ | ۳۸۵۹ | ۳۴/۱۰ | ۳۹۷۸ |
| Sep | ۷۳۵ | ۰ | ۲۴۶۹ | ۲۴۶۹ | ۲۹/۲۳ | ۲۹۸۰ |
| Oct | -۴۷۷ | ۰ | ۲۰۲۷ | ۲۰۲۷ | ۲۵/۰۴ | ۲۸۵۴ |
| Nov | -۲۷۴۶ | ۶۹۱ | ۶۴۴ | ۱۳۳۵ | ۱۷/۰۱ | ۲۰۸۵ |
| Dec | -۴۰۸۲ | ۲۹۲۶ | ۰ | ۲۹۲۶ | ۱۱/۸۹ | ۲۰۹۱ |
| Annual | -۲۹۵۵۷ | ۱۲۵۴۹ | ۱۸۶۰۱ | ۳۱۱۵۰ | ۲۳/۵۱ | ۳۲۴۰۱ |

۴-۱-۲- نتایج بررسی‌ها در حالت گیاه سدوم

نتایج استفاده از گیاه سدوم‌ها در بام سبز مدرسه شکوه بابل (اقلیم معتدل و مرطوب) نشان‌دهنده کاهش $17/70\%$ در مصرف کل انرژی (۲۵۶۵۱ کیلووات‌ساعت) نسبت به حالت

پایه (۳۱۱۵۰ کیلووات‌ساعت) است، شامل کاهش $17/40\%$ در گرمایش (۱۰۳۶۲ کیلووات‌ساعت) و $17/80\%$ در سرمایش (۱۵۲۸۹ کیلووات‌ساعت). انتقال حرارت سقف در ماه‌های سرد و گرم بهبود یافته، با کاهش اتلاف حرارتی (از

در بهینه‌سازی انرژی و پایداری زیست‌محیطی است و مبنایی برای مقایسه با دیگر گونه‌های گیاهی فراهم می‌کند (جدول شماره ۱۰).

۴۴۸۴- به ۳۳۴۶ کیلووات ساعت در دی) و دمای خارجی سطح سقف (از ۳۷/۸۷ به ۲۹/۰۷ درجه سانتی‌گراد در تیر). انتشار دی‌اکسید کربن نیز ۷/۴۶٪ کاهش یافته (از ۳۲۴۰۱ به ۲۹۹۸۴ کیلوگرم). این داده‌ها نشان‌دهنده تأثیر مثبت سدوم‌ها

جدول ۱۰. نتایج شبیه‌سازی در حالت گیاه سدوم

| | انتقال حرارت سقف | انرژی سیستم گرمایش | انرژی سیستم سرمایش | انرژی سرمایش و گرمایش | دمای خارجی سطح | انتشار کربن دی‌اکسید |
|--------|------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------|----------------------|
| | kWh | kWh | kWh | kWh | °C | kg |
| Jan | -۳۳۴۶ | ۳۱۶۳ | ۰ | ۳۱۶۳ | ۱۱/۹۸ | ۲۲۲۳ |
| Feb | -۲۸۸۶ | ۲۷۹۶ | ۰ | ۲۷۹۶ | ۱۲/۴۴ | ۱۹۶۰ |
| Mar | -۲۵۷۱ | ۱۵۲۶ | ۰ | ۱۵۲۶ | ۱۴/۵۵ | ۱۸۷۲ |
| Apr | -۱۷۲۳ | ۲۴۵ | ۲۸۱ | ۵۲۶ | ۱۸/۲۸ | ۱۷۳۷ |
| May | -۹۴۲ | ۰ | ۱۳۹۶ | ۱۳۹۶ | ۲۲/۸۵ | ۲۴۷۴ |
| Jun | -۱۸۶ | ۰ | ۲۳۶۴ | ۲۳۶۴ | ۲۶/۵۷ | ۲۹۵۶ |
| Jul | ۵۴۵ | ۰ | ۳۱۶۳ | ۳۱۶۳ | ۲۹/۰۷ | ۳۵۱۱ |
| Aug | ۳۳۶ | ۰ | ۳۲۵۵ | ۳۲۵۵ | ۲۸/۱۵ | ۳۶۱۲ |
| Sep | -۳۷۷ | ۰ | ۲۲۳۴ | ۲۲۳۴ | ۲۵/۷۰ | ۲۸۳۸ |
| Oct | -۱۲۲۸ | ۰ | ۱۸۹۰ | ۱۸۹۰ | ۲۲/۰۹ | ۲۷۷۱ |
| Nov | -۲۲۸۶ | ۳۹۰ | ۷۰۶ | ۱۰۹۶ | ۱۶/۹۲ | ۲۰۶۶ |
| Dec | -۳۲۱۳ | ۲۲۴۲ | ۰ | ۲۲۴۲ | ۱۲/۶۵ | ۱۹۶۳ |
| Annual | -۱۶۶۲۷ | ۱۰۳۶۲ | ۱۵۲۸۹ | ۲۵۶۵۱ | ۲۰/۱۱ | ۲۹۹۸۴ |

کاهش یافته است. دمای خارجی سطح سقف در تیر از ۳۷/۸۷ به ۳۰/۰۰ درجه سانتی‌گراد و میانگین سالانه آن از ۲۳/۵۱ به ۲۰/۵۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. انتشار دی‌اکسید کربن نیز ۶/۹٪ کاهش یافته و از ۳۲۴۰۱ به ۳۰۱۶۰ کیلوگرم رسیده است. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت ناز گوشتی در کاهش مصرف انرژی و بهبود پایداری زیست‌محیطی است و مبنایی برای مقایسه با سایر گونه‌های گیاهی فراهم می‌کند (جدول شماره ۱۱).

۳-۱-۴- نتایج بررسی‌ها در حالت گیاه ناز گوشتی

استفاده از گیاه ناز گوشتی (کارپوپروتوس) در بام سبز مدرسه شکوه بابل (اقلیم معتدل و مرطوب) نشان‌دهنده کاهش ۱۷/۳٪ در مصرف کل انرژی (۲۵۷۹۳ کیلووات ساعت) نسبت به حالت پایه (۳۱۱۵۰ کیلووات ساعت) است، شامل کاهش ۱۹/۱٪ در گرمایش (۱۰۱۴۶ کیلووات ساعت) و ۱۵/۹٪ در سرمایش (۱۵۶۴۷ کیلووات ساعت). انتقال حرارت سقف ۴۱/۶٪ بهبود یافته و از -۲۹۵۵۷ به -۱۷۲۵۳ کیلووات ساعت

جدول ۱۱. نتایج شبیه‌سازی در حالت گیاه ناز گوشتی

| | انتقال حرارت سقف | انرژی سیستم گرمایش | انرژی سیستم سرمایش | انرژی سرمایش و گرمایش | دمای خارجی سطح | انتشار کربن دی‌اکسید |
|-----|------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------|----------------------|
| | kWh | kWh | kWh | kWh | °C | kg |
| Jan | -۳۲۹۲ | ۳۱۳۲ | ۰ | ۳۱۳۲ | ۱۲/۱۳ | ۲۲۱۷ |
| Feb | -۲۷۸۳ | ۲۷۲۵ | ۰ | ۲۷۲۵ | ۱۲/۷۴ | ۱۹۴۷ |
| Mar | -۲۴۴۰ | ۱۴۳۵ | ۰ | ۱۴۳۵ | ۱۴/۸۷ | ۱۸۵۵ |
| Apr | -۱۵۹۴ | ۲۴۱ | ۳۱۴ | ۵۵۵ | ۱۸/۱۸ | ۱۷۵۶ |
| May | -۷۸۲ | ۰ | ۱۴۳۶ | ۱۴۳۶ | ۲۲/۲۸ | ۲۴۹۹ |

| | انتقال حرارت سقف | انرژی سیستم گرمایش | انرژی سیستم سرمایش | انرژی سرمایش و گرمایش | دمای خارجی سطح | انتشار کربن دی اکسید |
|--------|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|
| Jun | ۳۸ | ۰ | ۲۴۱۴ | ۲۴۱۴ | ۲۷/۱۷ | ۲۹۸۶ |
| Jul | ۹۱۸ | ۰ | ۳۲۵۲ | ۳۲۵۲ | ۳۰/۰۰ | ۳۵۶۵ |
| Aug | ۵۶۳ | ۰ | ۳۳۱۵ | ۳۳۱۵ | ۲۸/۶۹ | ۳۶۴۸ |
| Sep | -۱۴۶ | ۰ | ۲۲۸۵ | ۲۲۸۵ | ۲۶/۲۶ | ۲۸۶۹ |
| Oct | -۱۰۷۹ | ۰ | ۱۹۲۳ | ۱۹۲۳ | ۲۲/۵۴ | ۲۷۹۲ |
| Nov | -۲۳۱۱ | ۴۰۶ | ۷۰۸ | ۱۱۱۴ | ۱۶/۸۶ | ۲۰۷۱ |
| Dec | -۳۱۶۳ | ۲۲۰۷ | ۰ | ۲۲۰۷ | ۱۲/۷۹ | ۱۹۵۶ |
| Annual | -۱۷۲۵۳ | ۱۰۱۴۶ | ۱۵۶۴۷ | ۲۵۷۹۳ | ۲۰/۵۰ | ۳۰۱۶۰ |

۴-۱-۴- نتایج بررسی ها در حالت گیاه آویشن خزنده

بررسی عملکرد بام سبز با گیاه آویشن خزنده (از خانواده Lamiaceae) در مدرسه شکوه بابل (اقلیم معتدل و مرطوب) نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در بهره‌وری انرژی نسبت به حالت پایه است. مصرف کل انرژی سرمایش و گرمایش با ۱۷/۳٪ کاهش از ۳۱۱۵۰ به ۲۵۷۴۸ کیلووات‌ساعت رسیده است، شامل کاهش ۱۹/۵٪ در انرژی گرمایش (از ۱۲۵۴۹ به ۱۰۱۰۲ کیلووات‌ساعت) و ۱۵/۹٪ در انرژی سرمایش (از ۱۸۶۰۱ به ۱۵۶۴۶ کیلووات‌ساعت). انتقال حرارت سقف

۴۲/۳٪ بهبود یافته و از -۲۹۵۵۷ به -۱۷۰۵۱ کیلووات‌ساعت کاهش یافته است که نشان‌دهنده کاهش اتلاف حرارتی در زمستان و جذب حرارت در تابستان است.

دمای خارجی سطح سقف به طور میانگین از ۲۴ به ۲۰.۵۱ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته و در تیرماه از ۳۷/۸۷ به ۳۰/۰۴ درجه سانتی‌گراد رسیده است که اثر خنک‌کنندگی آویشن خزنده را تأیید می‌کند. انتشار دی‌اکسید کربن نیز ۶/۹٪ کاهش یافته و از ۳۲۴۰۱ به ۳۰۱۵۱ کیلوگرم رسیده است (جدول شماره ۱۲).

جدول ۱۲. نتایج شبیه‌سازی در حالت گیاه آویشن خزنده

| | انتقال حرارت سقف | انرژی سیستم گرمایش | انرژی سیستم سرمایش | انرژی سرمایش و گرمایش | دمای خارجی سطح | انتشار کربن دی اکسید |
|--------|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|
| | kWh | kWh | kWh | kWh | °C | kg |
| Jan | -۳۲۹۰ | ۳۱۳۱ | ۰ | ۳۱۳۱ | ۱۲/۱۴ | ۲۲۱۷ |
| Feb | -۲۷۷۸ | ۲۷۲۰ | ۰ | ۲۷۲۰ | ۱۲/۷۵ | ۱۹۴۶ |
| Mar | -۲۴۳۸ | ۱۴۳۴ | ۰ | ۱۴۳۴ | ۱۴/۸۷ | ۱۸۵۵ |
| Apr | -۱۵۹۳ | ۲۴۱ | ۳۱۴ | ۵۵۵ | ۱۸/۶۸ | ۱۷۵۶ |
| May | -۷۸۰ | ۰ | ۱۴۳۷ | ۱۴۳۷ | ۲۳/۲۹ | ۲۴۹۹ |
| Jun | ۱۴ | ۰ | ۲۴۰۹ | ۲۴۰۹ | ۲۷/۱۱ | ۲۹۸۳ |
| Jul | ۹۳۷ | ۰ | ۳۲۵۷ | ۳۲۵۷ | ۳۰/۰۴ | ۳۵۶۷ |
| Aug | ۵۶۵ | ۰ | ۳۳۱۶ | ۳۳۱۶ | ۲۸/۶۹ | ۳۶۴۹ |
| Sep | -۲۱۵ | ۰ | ۲۲۶۶ | ۲۲۶۶ | ۲۶/۱۱ | ۲۸۵۷ |
| Oct | -۱۰۳۸ | ۰ | ۱۹۳۳ | ۱۹۳۳ | ۲۲/۶۱ | ۲۷۹۸ |
| Nov | -۲۲۴۴ | ۳۸۰ | ۷۱۵ | ۱۰۹۵ | ۱۷/۰۶ | ۲۰۷۰ |
| Dec | -۳۱۵۱ | ۲۱۹۷ | ۰ | ۲۱۹۷ | ۱۲/۸۲ | ۱۹۵۴ |
| Annual | -۱۷۰۵۱ | ۱۰۱۰۲ | ۱۵۶۴۶ | ۲۵۷۴۸ | ۲۰/۵۱ | ۳۰۱۵۱ |

۵-۱-۴- نتایج بررسی ها در حالت گیاه فرانکنیا

کیلووات ساعت کاهش یافته که نشان دهنده کاهش اتلاف حرارتی در زمستان و جذب حرارت در تابستان است.

دمای خارجی سطح سقف به طور میانگین از ۲۴ به ۲۱/۸۵ درجه سانتی گراد کاهش یافته و در تیرماه از ۳۷/۸۷ به ۳۱/۰۱ درجه سانتی گراد رسیده که بیانگر اثر خنک کنندگی فرانکنیا در تابستان است. انتشار دی اکسید کربن نیز ۵/۶٪ کاهش یافته و از ۳۲۴۰۱ به ۳۰۵۸۵ کیلوگرم رسیده است (جدول شماره ۱۳).

بررسی عملکرد بام سبز با گیاه فرانکنیا در مدرسه شکوه بابل (اقلیم معتدل و مرطوب) نشان دهنده بهبود قابل توجه در بهره‌وری انرژی نسبت به حالت پایه است. مصرف کل انرژی سرمایش و گرمایش با ۱۷/۶٪ کاهش از ۳۱۱۵۰ به ۲۵۶۶۷ کیلووات ساعت رسیده است، شامل کاهش ۲۸/۷٪ در انرژی گرمایش (از ۱۲۵۴۹ به ۸۹۴۹ کیلووات ساعت) و ۱۰/۱٪ در انرژی سرمایش (از ۱۸۶۰۱ به ۱۶۷۱۸ کیلووات ساعت). انتقال حرارت سقف ۳۸/۷٪ بهبود یافته و از -۲۹۵۵۷ به -۱۸۱۰۷

جدول ۱۳. نتایج شبیه سازی در حالت گیاه فرانکنیا

| | انتقال حرارت سقف | انرژی سیستم گرمایش | انرژی سیستم سرمایش | انرژی سرمایش و گرمایش | دمای خارجی سطح | انتشار کربن دی اکسید |
|--------|------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------|----------------------|
| | kWh | kWh | kWh | kWh | °C | kg |
| Jan | -۲۸۱۵ | ۲۷۴۳ | ۰ | ۲۷۴۳ | ۱۳/۳۰ | ۲۱۴۴ |
| Feb | -۲۴۹۳ | ۲۵۲۲ | ۰ | ۲۵۲۲ | ۱۳/۵۷ | ۱۹۰۹ |
| Mar | -۲۰۴۹ | ۱۲۳۰ | ۰ | ۱۲۳۰ | ۱۵/۸۸ | ۱۸۱۷ |
| Apr | -۱۳۴۰ | ۱۹۰ | ۳۹۰ | ۵۸۰ | ۱۹/۴۸ | ۱۷۹۳ |
| May | -۲۲۳ | ۰ | ۱۵۵۰ | ۱۵۵۰ | ۲۴/۶۸ | ۲۵۶۸ |
| Jun | ۷۶۹ | ۰ | ۲۵۹۳ | ۲۵۹۳ | ۲۹/۱۵ | ۳۰۹۵ |
| Jul | ۱۳۲۷ | ۰ | ۳۳۵۶ | ۳۳۵۶ | ۳۱/۰۱ | ۳۶۲۷ |
| Aug | ۱۶۷۷ | ۰ | ۳۵۸۲ | ۳۵۸۲ | ۳۱/۴۶ | ۳۸۱۰ |
| Sep | ۵۵۷ | ۰ | ۲۴۳۷ | ۲۴۳۷ | ۲۸/۲۸ | ۲۹۶۱ |
| Oct | -۵۵۰ | ۰ | ۲۰۴۹ | ۲۰۴۹ | ۲۳/۸۲ | ۲۸۶۸ |
| Nov | -۲۰۲۹ | ۳۴۲ | ۷۶۲ | ۱۱۰۴ | ۱۷/۶۴ | ۲۰۹۱ |
| Dec | -۲۷۲۶ | ۱۹۲۱ | ۰ | ۱۹۲۱ | ۱۳/۹۵ | ۱۹۰۳ |
| Annual | -۱۸۱۰۷ | ۸۹۴۹ | ۱۶۷۱۸ | ۲۵۶۶۷ | ۲۱/۸۵ | ۳۰۵۸۵ |

۲-۴- مقایسه حالت های مختلف

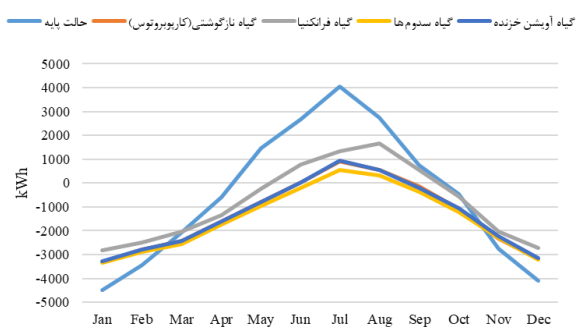
جدول ۱۴. مقایسه مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی در پنج

حالت

۱-۲-۴- مصرف انرژی

| انرژی سیستم گرمایش | انرژی سیستم سرمایش | انرژی سرمایش و گرمایش | |
|--------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| - | - | - | حالت پایه |
| ۱۹/۱٪ | ۱۵/۹٪ | ۱۷/۳٪ | گیاه نازگوشتی |
| ۱۹/۵٪ | ۱۵/۹٪ | ۱۷/۳٪ | گیاه آویشن خزنده |
| ۱۷/۴٪ | ۱۷/۸٪ | ۱۷/۷٪ | گیاه سدوم ها |
| ۲۸/۷٪ | ۱۰/۱٪ | ۱۷/۶٪ | گیاه فرانکنیا |

بررسی مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی در مدرسه شکوه بابل (اقلیم معتدل و مرطوب) برای حالت پایه و چهار گونه گیاهی بام سبز (ناز گوشتی، آویشن خزنده، سدوم ها، فرانکنیا) نشان دهنده تأثیر مثبت بام سبز بر کاهش مصرف انرژی است. نتایج به شرح (جدول شماره ۱۴) است.

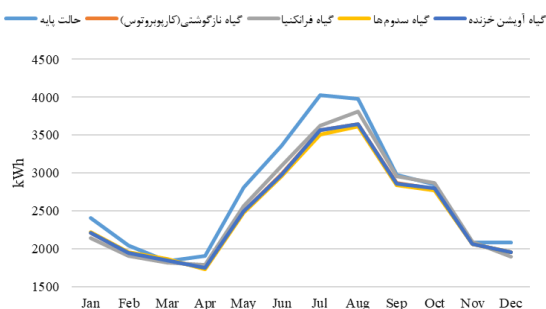


شکل ۱۱. مقایسه انتقال حرارت از سقف در حالت های مختلف

تحلیل ماهانه نشان می‌دهد که کاهش انتقال حرارت در ماه‌های سرد (دی و بهمن) بیشتر است، به‌ویژه با سدوم که در ژانویه ۳۳۴۶- کیلووات‌ساعت انتقال حرارت دارد. این کاهش به دلیل عایق‌بندی حرارتی بهتر گیاهان، به‌ویژه سدوم، است که دمای سطح را پایین نگه می‌دارد و از اتلاف حرارت جلوگیری می‌کند.

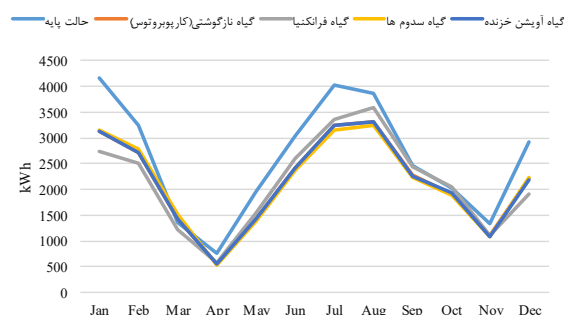
۳-۲-۴- انتشار کربن

انتشار کربن دی‌اکسید در حالت پایه با ۳۲۴۰۱ کیلوگرم در سال بالاترین مقدار است. بام سبز با گیاه سدوم با ۲۹۹۸۴ کیلوگرم کمترین انتشار را دارد که ۷/۵٪ کاهش نسبت به حالت پایه نشان می‌دهد. ناز گوشتی با ۳۰۱۶۰ کیلوگرم (کاهش ۶/۹٪) آویشن خزنده با ۳۰۱۵۱ کیلوگرم (کاهش ۶/۹٪) و فرانکنیا با ۳۰۵۸۵ کیلوگرم (کاهش ۵/۶٪) نیز کاهش انتشار را نشان می‌دهند. این کاهش به دلیل کاهش کلی مصرف انرژی (به‌ویژه در ماه‌های گرم و سرد) است. سدوم با کاهش بیشتر در بار سرمایشی و تعادل فصلی، اثرات زیست‌محیطی بهتری دارد (شکل شماره ۱۲).



شکل ۱۲. مقایسه انتشار کربن در حالت های مختلف

سدوم‌ها با کاهش ۱۷/۷٪ در مصرف کل انرژی و ۱۷/۸٪ در سرمایش، بهترین عملکرد را دارند. فرانکنیا با کاهش ۲۸/۷٪ در گرمایش، برای ماه‌های سرد مناسب‌تر است، اما در سرمایش (۱۰/۱٪) ضعیف‌تر عمل می‌کند. ناز گوشتی و آویشن خزنده با کاهش ۱۷/۲٪ و ۱۷/۳٪ عملکرد متعادلی ارائه می‌دهند. انتخاب گونه گیاهی باید با توجه به اولویت گرمایش یا سرمایش و شرایط اقلیمی انجام شود (شکل شماره ۱۰).



شکل ۱۰. مقایسه مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی در حالت های مختلف

از نظر فصلی، اوج مصرف انرژی در همه مدل‌ها در بازه ۱۱ دی تا ۱۱ بهمن (زمستان) رخ می‌دهد، که نشان‌دهنده نیاز بالای گرمایش است، در حالی که کمترین مصرف در ۹ مهر تا ۹ آبان (پاییز) مشاهده می‌شود. سدوم به دلیل تعادل بهتر بین کاهش بار سرمایشی (۱۷/۸٪) و گرمایشی (۱۷/۴٪) به‌عنوان گزینه برتر برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در این مدرسه پیشنهاد می‌شود.

۲-۲-۴- انتقال حرارت از سقف

انتقال حرارت سقف در حالت پایه با ۲۹۵۵۷- کیلووات‌ساعت بیشترین مقدار را دارد. بام سبز با گیاه سدوم با ۱۶۶۲۷- کیلووات‌ساعت بهترین عملکرد را نشان می‌دهد و ۴۳/۷٪ کاهش انتقال حرارت نسبت به حالت پایه دارد. ناز گوشتی با ۱۷۲۵۳- کیلووات‌ساعت (کاهش ۴۱/۶٪)، آویشن خزنده با ۱۷۰۵۱- کیلووات‌ساعت (کاهش ۴۲/۳٪) و فرانکنیا با ۱۸۱۰۷- کیلووات‌ساعت (کاهش ۳۸/۷٪) نیز کاهش قابل توجهی ایجاد می‌کنند (شکل شماره ۱۱).

به منظور بررسی معناداری آماری تفاوت بین سناریوهای مختلف، آزمون واریانس یک طرفه (One-way ANOVA) بر داده‌های مصرف انرژی کل سالانه (kWh) انجام شد. نتایج نشان داد که تفاوت کلی بین پنج حالت (حالت پایه و چهار گونه گیاهی) در سطح بسیار بالایی معنادار است. ($p < 0/001$; $F(4,45) = 2487/6$).

آزمون تعقیبی توکی (Tukey HSD) برای مقایسه‌های جفتی به کار گرفته شد و نتایج آن در (جدول شماره ۱۶) ارائه شده است.

جدول ۱۶. مقایسه آماری مصرف انرژی کل سالانه و نتایج آزمون تعقیبی توکی (Tukey HSD)

| سناریو | مصرف انرژی کل سالانه (kWh) | کاهش نسبت به حالت پایه (%) | تفاوت میانگین با سدوم (kWh) | سطح معناداری (p-value) در مقایسه با سدوم |
|-------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|
| حالت پایه | ۳۱ ۱۵۰ | - | +۴ ۴۹۹ | <۰/۰۰۱*** |
| سدوم | ۲۵ ۶۵۱ | ۱۷/۷ | ۰ (مینا) | - |
| فرانکنیا | ۲۵ ۶۶۷ | ۱۷/۶ | +۱۶ | ۰/۸۴۲ |
| آویشن خزنده | ۲۵ ۷۴۸ | ۱۷/۳ | +۹۷ | ۰/۰۴۷* |
| ناز گوشتی | ۲۵ ۷۹۳ | ۱۷/۲ | +۱۴۲ | ۰/۰۳۱* |

نتایج ANOVA: $F(۴/۴۵) = ۲۴۸۷/۶$, $p < ۰/۰۰۱$

$p < ۰/۰۰۱$ * $p < ۰/۰۵$ *

با توجه به نتایج جدول ۱۸ و آزمون تعقیبی توکی:

- مصرف انرژی در سناریوی سدوم به طور معنادار کمتر از ناز گوشتی ($p = ۰/۰۳۱$) و آویشن خزنده ($p = ۰/۰۴۷$) است.
- تفاوت مصرف انرژی بین سدوم و فرانکنیا معنادار نیست ($p = ۰/۸۴۲$).

بنابراین، هرچند سدوم از نظر عددی کمترین مصرف انرژی را دارد و در کاهش همزمان بار سرمایشی (۱۷/۸٪)،

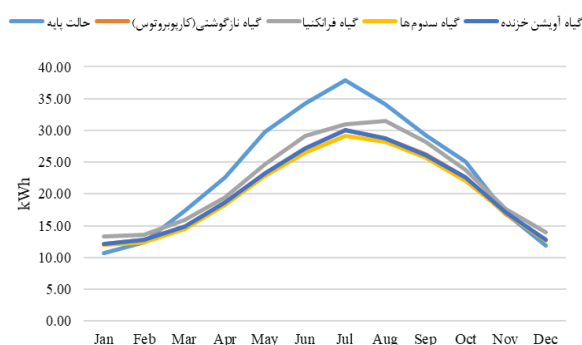
تحلیل ماهانه نشان می‌دهد که در تابستان (مثلاً ژوئیه)، سدوم انتشار را از ۴/۰۲۹ کیلوگرم (حالت پایه) به ۲۹۵۶ کیلوگرم کاهش می‌دهد، که نشان‌دهنده کارایی آن در کاهش کربن است.

۴-۲-۴-۴ دمای سطوح

بام سبز در همه حالت‌ها موجب کاهش میانگین دمای خارجی سطح سقف نسبت به حالت پایه (۲۴ درجه سانتی‌گراد) شد. بهترین عملکرد را گیاه سدوم با میانگین دمای ۲۰/۱۱ درجه سانتی‌گراد داشت. (جدول شماره ۱۵).

جدول ۱۵. مقایسه دمای خارجی سطوح در حالت‌های مختلف

| حالت پایه | دمای خارجی سطح | دمای خارجی سطح |
|------------------|----------------|----------------|
| حالت پایه | ۲۴ | ۲۴ |
| گیاه نازگوشتی | ۲۱ | ٪۱۲/۸ |
| گیاه آویشن خزنده | ۲۱ | ٪۱۲/۷ |
| گیاه سدوم ها | ۲۰ | ٪۱۴/۵ |
| گیاه فرانکنیا | ۲۲ | ٪۷/۰ |



شکل ۱۳. مقایسه دمای سطح در حالت‌های مختلف

تحلیل فصلی نشان می‌دهد که کاهش دما در ماه‌های گرم (مثل ژوئیه) با سدوم از ۳۷ به ۲۶ درجه سانتی‌گراد و در زمستان (ژانویه) از ۱۰/۶۸ به ۱۱/۹۸ درجه سانتی‌گراد مشهود است. این کاهش دما، به‌ویژه با سدوم، نیاز به سرمایش را کم کرده و آسایش حرارتی را در مدرسه بهبود می‌بخشد (شکل شماره ۱۳).

۴-۲-۵ تحلیل آماری تفاوت عملکرد گونه‌های گیاهی

سقف را چند درجه سانتی‌گراد پایین آوردند؛ به‌ویژه سدوم که دمای میانگین سطح را به حدود $20/1$ درجه سانتی‌گراد رساند و در ماه‌های گرم اوج تابستان، دمای سقف را نسبت به بام متعارف به‌طور محسوسی کاهش داد. این کاهش دمای سطح، علاوه بر کاهش نیاز به سرمایش مکانیکی، می‌تواند در مقیاس محلی به کاهش شدت اثر جزیره گرمایی و بهبود آسایش حرارتی کاربران مدرسه کمک کند.

اعتبارسنجی مدل با قبوض واقعی برق و گاز مدرسه شکوه نشان داد که اختلاف بین مصرف شبیه‌سازی شده و مصرف واقعی حدود ۹ درصد است که در محدوده قابل قبول راهنماهای رایج برای ارزیابی مدل‌های انرژی ساختمان قرار می‌گیرد و بیانگر دقت مناسب مدل برای تحلیل سناریوهای بام سبز است. تحلیل حساسیت انجام‌شده روی پارامترهای کلیدی گیاهی و لایه خاک نیز نشان داد که بیشترین حساسیت مصرف انرژی به تغییرات ضریب بازتابی و شاخص سطح برگ است و تغییرات معقول در ارتفاع گیاه و ضریب هدایت حرارتی خاک، انحراف نسبتاً محدودی (در حد چند درصد) در نتایج ایجاد می‌کند؛ بنابراین، ترتیب برتری گونه‌ها و نتیجه‌گیری درباره گونه بهینه در برابر عدم قطعیت پارامترها پایدار است.

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که طراحی و اجرای بام سبز گسترده با انتخاب هدفمند گونه‌های متناسب با اقلیم معتدل و مرطوب، یکی از مؤثرترین راهکارهای غیرفعال برای کاهش مصرف انرژی، انتشار دی‌اکسید کربن و دمای سطح سقف در مدارس شمال کشور است و گونه سدوم با توجه به عملکرد متعادل در شاخص‌های انرژی، حرارتی و زیست‌محیطی می‌تواند به‌عنوان گزینه پایه برای دستورالعمل‌های طراحی بام سبز آموزشی در این اقلیم پیشنهاد شود. در عین حال، ترکیب سدوم با گونه‌هایی مانند فرانکنیا برای تقویت عملکرد گرمایشی در زمستان و بهره‌گیری از تنوع زیستی بیشتر، مسیری امیدبخش برای مطالعات آینده و تدوین الگوهای بام سبز بومی‌شده در مقیاس شبکه مدارس محسوب می‌شود. با توجه به مطالعات انجام شده پیشنهاد پژوهش‌های آتی به شرح زیر می‌باشد:

گرمایشی ($17/4\%$) و دمای سطح سقف ($20/11$) درجه سانتی‌گراد) بهترین عملکرد را نشان می‌دهد، اما برتری آماری آن تنها نسبت به نازگوشتی و آویشن خزننده تأیید شده است. با این وجود، با در نظر گرفتن عملکرد متعادل تر سدوم در تمام شاخص‌های بررسی‌شده، این گونه همچنان به‌عنوان گونه بهینه برای بام سبز گسترده در اقلیم معتدل و مرطوب بابل پیشنهاد می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در پژوهش انجام شده، نقش تنوع گونه‌های گیاهی بام سبز در بهینه‌سازی مصرف انرژی یک مدرسه نوساز در اقلیم معتدل و مرطوب بابل به‌صورت کمی و مبتنی بر شبیه‌سازی پویا بررسی شد. نتایج نشان داد که اجرای بام سبز با چهار گونه نازگوشتی، آویشن خزننده، سدوم‌ها و فرانکنیا در مقایسه با بام متعارف، مصرف کل انرژی سالانه مدرسه را بین حدود $17/2$ تا $17/7$ درصد کاهش می‌دهد و به‌طور هم‌زمان موجب کاهش انتقال حرارت از سقف، افت دمای سطح بام و کاهش انتشار سالانه دی‌اکسید کربن می‌شود؛ به‌گونه‌ای که سناریوی سدوم با کاهش $17/7$ درصدی مصرف انرژی و $7/5$ درصدی انتشار کربن، بهترین عملکرد ترکیبی را ارائه داد.

تحلیل جزئی‌تر نشان داد که سدوم به دلیل شاخص سطح برگ بالا، ضریب بازتابی مناسب و سازگاری با عمق کاشت کم، تعادل مناسبی میان کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی ایجاد می‌کند، در حالی که فرانکنیا با کاهش $28/7$ درصدی در انرژی گرمایش برای فصول سرد کارآمدتر است اما از نظر کاهش بار سرمایشی ضعیف‌تر عمل می‌کند. نازگوشتی و آویشن خزننده نیز کاهش مصرف انرژی در حد $17/2$ تا $17/3$ درصد را به همراه داشتند و به‌عنوان گزینه‌های پایدار و کم‌نیاز به نگهداری، امکان ترکیب با سایر گونه‌ها را برای دستیابی به اهداف هم‌زمان انرژی و تنوع زیستی فراهم می‌کنند.

از منظر عملکرد حرارتی، همه سناریوهای بام سبز انتقال حرارت سالانه سقف را نسبت به حالت پایه به‌طور قابل‌توجهی کاهش دادند و میانگین دمای خارجی سطح

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24234931.1400.8.2.15.1>

- یارمحمد، فاطمه، و مهدی زاده سراج، فاطمه. (۱۴۰۱). امکان‌سنجی استفاده از راهکارهای بهینه‌سازی پوسته ساختمان‌های اداری در مناطق معتدل ایران با بهره‌گیری از نمونه‌های بناهای صفر انرژی اجرا شده در اقلیم‌های مشابه. *معماری و شهرسازی ایران*، ۲۴(۱۳)، ۱۹۵-۱۷۷.

<https://www.doi.org/10.30475/isau.2022.225316.1384>

- Amii, B., Flavia, B., Luca, D. A., Roberto, C., & Giulia, C. (2025). Enhancing biodiversity and functionality of extensive green roof: a comparative study of five native Mediterranean perennial species in Rome. *Building and Environment*, 282, 113285.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113285>

- Anderson, V., & Gough, W.A. (2021). Nature-based cooling potential: a multi-type green infrastructure evaluation in Toronto, Ontario, Canada. *International Journal of Biometeorology*, 66, 397 - 410.

<https://doi.org/10.1007/s00484-021-02100-5>

- Bianchini, F., & Hewage, K. (2012). How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, 48, 57-65.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.019>

- Borghei, S., Niroumand, N., Niroumand, H., Balachowski, L., Taghizadeh, K., & Gultekin, A. B. (2025). The Impact of Green Roofs and Internal Patios on Energy Consumption in a School Building A computer simulation model. *International review for spatial planning and sustainable development*, 13(2), 7-24.

https://doi.org/10.14246/irspsd.13.2_7

- Cascone, S., & Leuzzo, A. (2023). Thermal Comfort in the Built Environment: A Digital Workflow for the Comparison of Different Green Infrastructure Strategies. *Atmosphere*, 14(4), 685.

<https://doi.org/10.3390/atmos14040685>

۱. انجام تحلیل هزینه-فایده برای سناریوهای مختلف بام سبز (گونه‌ها و جزئیات لایه‌ها) در مدارس اقلیم معتدل و مرطوب با در نظر گرفتن هزینه اجرا و صرفه‌جویی انرژی.

۲. پایش میدانی بلندمدت (۳ تا ۵ ساله) دوام، عملکرد حرارتی و نیازهای نگهداری گونه‌های گیاهی انتخاب‌شده روی بام‌های سبز آموزشی، به‌منظور ارائه الگوهای طراحی اقتصادی و پایدار.

۶- منابع

- اعرابی، مریم، دهقان، مازیار، و ضیائی راد، سعید. (۱۴۰۰). بهسازی عملکرد انرژی یک ساختمان موجود به همراه تأثیرات بام سبز بر میزان مصرف انرژی در اقلیم اصفهان: مطالعه تطبیقی مبحث ۱۹ در برابر استاندارد ASHRAE2018-2/90. *نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، ۵۱(۴)، ۳۳۰-۳۲۳.

<https://doi.org/10.22034/jmeut.2022.11528>

- حسینی، مریم، و بینا، محسن. (۱۴۰۱). میزان کاهش مصرف انرژی خانگی با اصلاح جزئیات معماری بام سبز در منطقه گرم و نیمه‌خشک، دزفول (ایران). *نشریه علمی اندیشه معماری*، ۶(۱۱)، ۱۹۳-۲۱۲.

<https://civilica.com/doc/1523371/>

- فقیه‌نیا، زینب، حامی، احمد، و سعادت‌جو، پریا. (۱۴۰۴). ارزیابی تأثیر تنوع پوشش گیاهی در بام سبز گسترده بر مصرف انرژی ساختمان (مطالعه موردی: ساختمان‌های مسکونی شهر تبریز). *فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای*، ۶(۱)، ۱۱۸-۱۰۰.

https://www.srds.ir/article_214007.html

- نیرومند، محمد، و فرامرزی‌فرد، نگار. (۱۴۰۰). بررسی نقش بام سبز در کاهش میزان مصرف انرژی ساختمان‌های آموزشی (مطالعه موردی: مدرسه ابتدایی دخترانه حق‌پناه در شهر اصفهان). *نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو*، ۸(۲)، ۱۴۵-۱۳۹.

<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100588>

- 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>

- Nursat, Kulumkanov., Abid, Nadeem., Serik, Tokbolat. (2023). 26. Green roof energy performance in different climate zones: a simulation study. *Journal of Physics: Conference Series*, 2600(9).

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/9/092027>

- Perez, G., Coma, J., Martorell, I., & Cabeza L.F. (2014). Vertical Greener Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 39, 139-165.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>

- Rabbani, M., & Kazemi, F. (2022). Water need and water use efficiency of two plant species in soil-containing and soilless substrates under green roof conditions. *Journal of Environmental Management*, 302, 113950.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113950>

- Ran, J., Yang, Z., Feng, Y., Xiong, K., & Tang, M. (2020). Energy performance assessment and optimization of extensive green roofs in different climate zones of China. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 172, p. 16003). EDP Sciences.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017216003>

- Santiago, J.L., & Rivas, E. (2021). Advances on the Influence of Vegetation and Forest on Urban Air Quality and Thermal Comfort. *Forests*, 12(8), 1133.

https://doi.org/10.3390/f12081133?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

- Tayefeh, A., Aslani, A., Zahedi, R., & Yousefi, H. (2024). Reducing energy consumption in a factory and providing an upgraded energy system to improve energy performance. *Cleaner Energy Systems*, 100124.

<https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100124>

- Cook, L. M., & Larsen, T. A. (2021). Towards a performance-based approach for multifunctional green roofs: An interdisciplinary review. *Building and Environment*, 188, 107489.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107489>

- Elantary, A., & Saleem, M. (2023). The Energy-Saving Potential of a Green Roof on Existing Residential Buildings. A Case Study of Jubail Industrial City, Saudi Arabia. *Journal of Engineering Research*, 7(2), 125-132.

<https://doi.org/10.21608/erjeng.2023.206539.1174>

- Gultekin, A.B., Yıldırım, H.Y., & Tanrıvermiş, H. (2018). A Holistic Conceptual Scheme for Sustainable Building Design in the Context of Environmental, Economic and Social Dimensions. In: *Sustainable Buildings - Interaction Between a Holistic Conceptual Act and Materials Properties*.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.74031>

- Idouanaou, A., Malha, M., Bah, A., & Kardellass, S. (2025). The potential of green roof strategies for reducing CO2 emissions and energy use in Moroccan office buildings. *Green Technologies and Sustainability*, 3(3), 100177.

<https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100177>

- Jamei, E., Chau, H. W., Seyedmahmoudian, M., & Stojcevski, A. (2021). Review on the cooling potential of green roofs in different climates. *Science of the Total Environment*, 791, 148407.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148407>

- Kumar, P., Debele, S.E., Khalili, S., Halio C.H., Sahani, J., Aghaoammadi, N., de Fátima Andrae M., Athanassiadou, M., Bhui, K Calvillo, N., Cao, S., Coulon, F., Edndson, J.L., Fletcher, D., Dias de Fritas, E., Guo, H., Hort, M.C., Katti, M., Kjeldsen, T.R., Lehmann, S., Loosselli, G.M., Malham, S.K., Morwska, L., Parajuli, R., Rogers, C.D., ao, R., Wang, F., Wenk, J., & Jones, L. (2024). Urban heat mitigation by green and blue infrastructure: Drivers, effectiveness, and future needs. *The Innovation*, 5(2), 100588.

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.457>

- Zahedi, R., Omidifar, R., Balaghi, S. F., Pourezat, A. A., Yousefi, H., Taghitahooneh, M., ... & Ahmadi, A. (2024). Heating, cooling, and energy management of cold climate educational built environments using green roofs. *Urban Governance*, 4(4), 297-312.

<https://doi.org/10.1016/j.ugj.2024.10.001>

- Zhou, W., Cao, F., & Wang, G. (2019). Effects of Spatial Pattern of Forest Vegetation on Urban Cooling in a Compact Megacity. *Forests*, 10(3), 282.

<https://doi.org/10.3390/f10030282>

- Vahabikhah, M., Zahedi, R., Eskandarpanah, R., Mirzaei, A. M., Farahani, O. N., Malek, I., & Rezaei, N. (2023). Optimal sizing of residential photovoltaic and battery system connected to the power grid based on the cost of energy and peak load. *Heliyon*, 9(3), e14414.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14414>

- Zabeti, M., & Dessel, S.V. (2015). Potential Contribution of Urban Developments to Outdoor Thermal Comfort Conditions: The Influence of Urban Geometry and Form in Worcester, Massachusetts, USA. *Procedia Engineering*, 118, 1153-1161.

نحوه ارجاع به مقاله:

رحیمی، روح اله، و فیروزمندی بندپی، فاطمه. (۱۴۰۵). نقش تنوع گونه‌های گیاهی بام سبز در بهینه‌سازی مصرف انرژی: مطالعه موردی مدرسه شکوه بابل. توسعه پایدار شهری، ۷(۲۲)، ۱۲۹-۱۰۹.

 DOI: <https://doi.org/10.22034/usd.2026.2068767.1375>

 DOR:

URL: https://usdjournals.daneshpajooan.ac.ir/article_736326.html?lang=fa



Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Daneshpajooan Pishro Higher Education Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)