



The University of Tehran Press

Investigating the Impact of Vertical Green Facades on Energy Efficiency and Carbon Footprint in Office Buildings: A Study of Climatic Regions in Iran

Leila Jafari¹ | Seyedeh Mamak Salavatian^{2*} | Marzieh Kazemzadeh³ | Davood Hashemabadi⁴

1. Department of Architecture, Ra.C., Islamic Azad University, Rasht, Iran. Email: leila.jafari322@iau.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Architecture, Ra.C., Islamic Azad University, Rasht, Iran. Email: m.salavatian@iau.ac.ir

3. Department of Architecture, Ra.C., Islamic Azad University, Rasht, Iran. Email: mkazemzadeh@iau.ac.ir

4. Department of Horticulture, Ra.C., Islamic Azad University, Rasht, Iran. Email: Hashemabadi@iau.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 22 May 2025

Revised: 21 July 2025

Accepted: 26 September 2025

Published Online: 15 January 2025

Keywords:

Energy efficiency,
Global warming potential (GWP),
Carbon footprint,
Office buildings,
Climate-adaptive design,
Vertical green facades.

ABSTRACT

Global warming and climate change pose urgent environmental challenges of the 21st century. Iran emits roughly 996,753 megatons of CO₂ equivalent annually, which represents a significant share of global greenhouse gas emissions. The building sector drives approximately 40% of the nation's total energy consumption. This study evaluates how vertical green facades (VGFs) affect energy consumption and carbon emissions in office buildings across five distinct climatic zones in Iran. Using DesignBuilder and SimaPro software, we modeled and compared three façade types: conventional (non-vegetated), direct green facade, and indirect green facade. We analyzed the data statistically using ANOVA and Tukey's tests in Python. Results showed that green facades perform differently depending on climate. The direct green facade in the hot-humid region achieved a 5.17% reduction in energy use and a 6% decrease in carbon emissions. Meanwhile, the indirect green facade in the cold climate yielded a 7.29% reduction in energy consumption. In the semi-arid climate, only the direct green facade demonstrated a positive impact, with a 1.69% energy reduction. However, in the temperate-humid climate, both green facade types resulted in increased energy use (2.28–2.43%) and carbon emissions (11.26–12.21%). Statistical analysis confirmed significant differences ($P < 0.05$) among façade types across all climates, with large effect sizes ($\eta^2 = 0.49\text{--}0.81$). Two-way ANOVA revealed a statistically significant interaction between climate type and façade type on energy use ($P = 0.0032$) and carbon emissions ($P = 0.0028$). These results provide evidence-based insights for climate-responsive green facade strategies, which could contribute to sustainable development and climate change mitigation efforts in Iran.

Cite this article: Jafari, L.; Salavatian, M.; Kazemzadeh, M. & Hashemabadi, D. (2026). Investigating the Impact of Vertical Green Facades on Energy Efficiency and Carbon Footprint in Office Buildings: A Study of Climatic Regions in Iran. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (1), 79-105. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394499.1143>



© Leila Jafari, Seyedeh Mamak Salavatian, Marzieh Kazemzadeh, Davood Hashemabadi

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394499.1143>

Introduction

Office buildings produce substantial greenhouse gas emissions because they consume large amounts of energy. Potential strategies to mitigate these impacts include improving energy efficiency, optimizing resource management, and implementing adaptive measures to address climate impacts. Vertical green systems (VGSs) offer a promising solution by reducing energy demand, lowering ambient temperatures, and enhancing urban sustainability. Still, further research is required to ensure accurate evaluation and broader application of these systems. This study investigates the thermal performance and carbon footprint of three facade types (conventional/non-vegetated, direct green

facade, and indirect green facade) across five climatic zones in Iran. By analyzing their effectiveness in diverse climatic conditions, this research aims to provide evidence-based recommendations for integrating VGSs into sustainable building design, possibly supporting Iran's environmental and energy efficiency goals.

Methodology

A standardized office model (3×3×3.5 m) was developed and simulated in DesignBuilder for five cities: Ahvaz (hot semi-arid), Bandar Abbas (hot and humid/tropical), Tabriz (cold semi-arid), Tehran (semi-arid), and Rasht (temperate and humid). These cities represent Iran's major climate types. Climate parameters were derived from Iran's National Building Code. The HVAC systems utilized gas heating and electric cooling. Energy consumption was calculated over a 50-year lifespan. Carbon emissions were assessed in SimaPro using emission factors of kgCO₂e/kWh for natural gas and electricity. We conducted statistical analysis using ANOVA and Tukey's post-hoc tests to evaluate differences in energy use and emissions across facade types and climates.

Key Results

Green facade performance depended heavily on climate conditions across regions:

- **Hot semi-arid (Ahvaz):** Indirect green facades achieved a 2.37% reduction in energy use and a 2.55% decrease in carbon emissions, with a remarkable 89.36% reduction in heating demand.
- **Hot and humid (tropical) (Bandar Abbas):** Direct green facades resulted in a 5.17% energy saving and a 6.00% reduction in emissions, likely due to shading and evaporative cooling.
- **Cold semi-arid (Tabriz):** Indirect facades delivered a 7.29% energy saving, while direct systems achieved the highest emission reduction at 8.27%, apparently because of enhanced insulation and wind protection.
- **Semi-Arid (Tehran):** Only direct facades demonstrated benefits, with a 1.69% energy saving and a 7.2% carbon reduction; indirect facades led to a 1.84% increase in energy use.
- **Temperate and humid (Rasht):** Both green facade types resulted in increased energy use (2.28–2.43%) and emissions (11.26–12.21%), probably because of moisture retention and limited cooling effects.

Statistical tests confirmed significant differences by facade and climate ($p < 0.05$), with strong interaction effects on energy use ($p = 0.0032$) and emissions ($p = 0.0028$). Effect sizes were large ($\eta^2 = 0.49$ – 0.81), indicating a substantial impact.

Discussion and Conclusion

These findings emphasize the importance of climate-responsive design in the implementation of vertical green systems (VGSs). In hot and cold climates, VGSs can significantly reduce operational energy use and greenhouse gas emissions. Indirect facades work particularly well in cold climates given that they provide an additional insulating air cavity, while direct systems offer optimal performance in hot-humid conditions by reducing solar gain and enhancing cooling through evapotranspiration. By contrast, temperate-humid climates like Rasht may experience adverse outcomes given that excessive moisture retention, reduced transpiration efficiency, and increased cooling demands could occur. Beyond operational energy savings, green facades contribute to carbon sequestration, estimated at 0.5 to 1.5 kg CO₂/m²/year, though this varies with plant species and maintenance practices. This study provides evidence-based recommendations for integrating VGSs into Iranian green building policies. It also highlights the need for further research into long-term life cycle costs, maintenance challenges, and the ecological benefits of green facade technologies. By tailoring VGS implementation to Iran's climatic diversity, architects and policymakers can advance national sustainability targets while reducing building-sector emissions.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

بررسی تأثیر به‌کارگیری نماهای سبز عمودی بر بهره‌وری انرژی و ردپای کربن در ساختمان‌های اداری: مطالعه‌ای بر مناطق اقلیمی ایران

لیلا جعفری^۱ | سیده مامک صلواتیان^{۲*} | مرضیه کاظم‌زاده^۳ | داود هاشم‌آبادی^۴

۱. گروه معماری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. رایانامه: leila.jafari322@iau.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه معماری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. رایانامه: m.salavatian@iau.ac.ir

۳. گروه معماری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. رایانامه: mkazemzadeh@iau.ac.ir

۴. گروه باغبانی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. رایانامه: Hashemabadi@iau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۵

کلیدواژه:

بهره‌وری انرژی،

پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)،

ردپای کربن،

ساختمان‌های اداری،

طراحی سازگار با اقلیم،

نماهای سبز عمودی.

گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی یکی از چالش‌های بزرگ زیست‌محیطی قرن حاضر است. ایران با انتشار سالانه ۹۹۶,۷۵۳ مگاتن معادل کربن، سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای جهان دارد. در این میان، بخش ساختمان یکی از عوامل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران است که حدود ۴۰ درصد از کل مصرف انرژی کشور را به خود اختصاص می‌دهد. این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر نمای سبز عمودی بر مصرف انرژی و انتشار کربن در ساختمان‌های اداری در پنج اقلیم متفاوت ایران انجام شده است. با استفاده از نرم‌افزارهای دیزاین بیلدر و سیم‌پرو، سه نوع نما شامل نمای متعارف (بدون پوشش گیاهی)، نمای سبز مستقیم و نمای سبز غیرمستقیم شبیه‌سازی و مقایسه شد. داده‌های حاصل با آزمون‌های آماری آنووا و توکی در پایتون تحلیل شد. نتایج نشان داد اثربخشی نماهای سبز به‌شدت به اقلیم وابسته است. بهترین عملکرد در میان تمام اقلیم‌ها به نمای سبز مستقیم در اقلیم گرم و مرطوب با کاهش ۵/۱۷ درصد مصرف انرژی و ۶ درصد در انتشار کربن و نمای سبز غیرمستقیم در اقلیم سرد با کاهش ۷/۲۹ درصد در مصرف انرژی مربوط بود. در اقلیم نیمه‌خشک، تنها نمای سبز مستقیم عملکرد مثبتی با کاهش ۱/۶۹ درصد مصرف انرژی نشان داد، در حالی که در اقلیم معتدل و مرطوب، هر دو نوع نمای سبز اثر معکوس داشتند و موجب افزایش ۲/۴۳ - ۲/۲۸ درصد مصرف انرژی و ۱۱/۲۶ - ۱۲/۲۱ درصد انتشار کربن شدند. آزمون‌های آماری در تمام اقلیم‌ها تفاوت معناداری ($P < 0.05$) با اندازه اثر بزرگ ($\eta^2 = 0.49 - 0.81$) بین انواع نماها نشان داد. همچنین، آزمون آنووا دوطرفه تأیید کرد که اثر متقابل اقلیم و نوع نما بر مصرف انرژی ($P = 0.0032$) و انتشار کربن ($P = 0.0028$) معنادار است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند برای توسعه راهبردهای اقلیم‌محور نماهای سبز ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گیرد و گامی مؤثر در راستای توسعه پایدار و مقابله با تغییرات اقلیمی باشد.

استناد: جعفری، لیلا؛ صلواتیان، سیده مامک؛ کاظم‌زاده، مرضیه و هاشم‌آبادی، داود (۱۴۰۴). بررسی تأثیر به‌کارگیری نماهای سبز عمودی بر بهره‌وری انرژی و ردپای کربن در ساختمان‌های اداری: مطالعه‌ای بر مناطق اقلیمی ایران. *فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار*، ۵ (۱) ۷۹-۱۰۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394499.1143>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© لیلا جعفری، سیده مامک صلواتیان، مرضیه کاظم‌زاده، داود هاشم‌آبادی

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394499.1143>



۱. مقدمه

ساختمان‌های اداری به دلیل مصرف بالای انرژی، سهم چشمگیری در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند و در نتیجه، به تغییرات اقلیمی دامن می‌زنند. برای مقابله با این چالش، سه راه‌حل کلیدی وجود دارد که شامل بهینه‌سازی مصرف انرژی، مدیریت بهتر منابع و سازگاری با اثرات اقلیمی است. تقاضای زیاد برای گرمایش و سرمایش مشکل را بدتر می‌کند و این موضوع به‌ویژه در اقلیم‌های گرم اهمیت دارد، زیرا انتشار CO_2 در این مناطق بیشتر است. تغییرات اقلیمی نیز دمای محیط را بالا می‌برد [۱]. این افزایش دما به نوبه خود نیاز به سرمایش را بیشتر می‌کند و در نهایت، این چرخه معیوب مشکل را تشدید می‌کند. همچنین، پدیده جزیره گرمایی شهری همراه با تغییرات اقلیمی، هزینه‌های انرژی را افزایش می‌دهد و بر بهره‌وری عملیاتی تأثیر منفی می‌گذارد. استفاده از فناوری‌های انرژی کارآمد در ساختمان‌های موجود، انتشار گازها را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. تمرکز بر بهینه‌سازی منابع و بازیافت، دستیابی به اهداف اقلیمی را بدون افزایش اتلاف منابع ممکن می‌سازد. صنعت ساختمان، به دلیل مصالح و فرایندهای ساخت، سهم زیادی در انتشار کربن و پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)^۱ دارد. فاز عملیاتی ساختمان، شامل گرمایش، سرمایش و روشنایی، اغلب بیش از ۷۴ درصد کل تأثیر زیست‌محیطی را در بر می‌گیرد [۲].

ارزیابی چرخه عمر (LCA)^۲ ابزاری کلیدی در سنجش مصالح ساختمانی است که تمام مراحل از استخراج مواد خام تا دفع نهایی را پوشش می‌دهد. رویکردهای پویای LCA در مقایسه با روش‌های ایستا، تصویر دقیق‌تری از انتشار طی زمان ارائه می‌دهند. همچنین، برای ارزیابی دقیق‌تر، نیاز به داده‌های شفاف‌تر در اعلامیه‌های زیست‌محیطی محصول (EPD)^۳ وجود دارد. به عنوان مثال، متریکال‌های زیستی مانند چوب، با در نظر گرفتن جذب کربن زیستی، می‌توانند GWP را کاهش دهند و به خنثی‌سازی کربن کمک کنند [۳]. نماهای سبز عمودی به عنوان راه‌حلی پایدار در شهرها مطرح‌اند که با به‌کارگیری گیاهان در نمای ساختمان، موجب کاهش مصرف انرژی، بهبود کیفیت هوا و ارتقای زیبایی شهری می‌شوند. این سیستم‌ها می‌توانند مصرف انرژی سرمایشی را تا ۵۸/۹ درصد کاهش دهند و از دمای سطح دیوار تا ۹ درجه بکاهند، آسایش حرارتی و اثر جزیره گرمایی را بهبود بخشند. سیستم‌های سبز عمودی (VGS)^۴ علاوه بر صرفه‌جویی انرژی، باعث کاهش نویز می‌شوند و شرایط هیدرولوژیکی را ارتقا می‌دهند، هرچند برای کمی‌سازی دقیق آن‌ها به مطالعات بیشتری نیاز است. این سیستم‌ها همچنین با ایجاد فضاهای سبز در مناطق متراکم، به تنوع زیستی و رفاه شهری کمک می‌کنند. با وجود مزایا، چالش‌هایی در طراحی و ادغام آن‌ها در ساختمان‌های موجود وجود دارد و کمبود مطالعات مقایسه‌ای، تعمیم‌پذیری نتایج را محدود کرده است. از این‌رو، پژوهش‌های آتی باید بر ارزیابی جامع انرژی سالانه، شامل گرمایش، سرمایش و روشنایی تمرکز کنند [۴].

۲. سیستم‌های نمای سبز عمودی

نماهای سبز یا سیستم‌های سبز عمودی (VGS) به عنوان عناصر طراحی پایدار، در بهبود عملکرد زیست‌محیطی ساختمان‌ها با صرفه‌جویی در مصرف انرژی، ارتقای آسایش حرارتی و کاهش اثر جزیره گرمایی شهری نقش دارند. این سیستم‌ها به دو نوع مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند: در نوع مستقیم، گیاهان مستقیم روی دیوار رشد می‌کنند و معمولاً از گونه‌هایی مانند پیچک (*Hedera spp.*) بهره می‌برند که ساده، ارزان و در کاهش جذب گرما مؤثر هستند. در نوع غیرمستقیم، سازه‌هایی مانند کابل یا شبکه‌های توری از گیاهان پشتیبانی می‌کنند تا هم از دیوار محافظت شود و هم مزایای گیاهی حفظ شود [۵]. همچنین، نوع گیاهان (برگ‌ریز یا همیشه‌سبز) بر عملکرد حرارتی فصلی تأثیر دارد. طراحی بهینه این نماها مستلزم در نظر گرفتن شرایط اقلیمی، انتخاب نوع گیاه و ساختار مناسب است تا علاوه بر افزایش کارایی، نیاز به نگهداری نیز کاهش یابد [۶].

نماهای سبز و دیوارهای زنده می‌توانند به طور قابل توجهی آلودگی هوا، به‌ویژه ذرات $PM_{2.5}$ ^۵ را کاهش دهند. مطالعات انجام‌شده در تهران نشان می‌دهد انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب با اقلیم و سیستم‌های نمای سبز می‌تواند جذب آلاینده‌ها را

1. Global Warming Potential
2. Life-cycle assessment
3. Environmental Product Declaration
4. Vertical Greenery Systems
5. Particulate Matter

افزایش دهد و مدیریت آن‌ها را نسبت به برخی دیگر از سیستم‌های دیوار سبز آسان‌تر کند. همچنین، سقف‌ها و نماهای سبز، به‌ویژه در مناطق پرتراکم، مزایای خنک‌کنندگی قابل توجهی ارائه دادند [۷]. در شهرکرد دیوارهای سبز هیدروپونیک عملکرد حرارتی مثبتی را در اقلیم‌های سرد نشان داده‌اند [۸]. ترکیب این سیستم‌ها با کشاورزی عمودی برای تولید غذا در شهرها نویدبخش است، همانند پژوهشی که در تهران صورت گرفت، اما به دلیل نیاز به نورپردازی و کنترل دما، مصرف انرژی در سطح بالایی قرار می‌گیرد [۹].

۱-۲. انتخاب گونه‌های گیاهی برای نماهای سبز

پیچک (*Hedera helix*) انعطاف‌پذیری اکولوژیکی قابل توجهی از خود نشان می‌دهد و در محیط‌های متنوع، از سایه کامل تا نور مستقیم خورشید، رشد می‌کند و توانایی تحمل تغییرات قابل توجه در دما و رطوبت خاک را دارد [۱۰]. قابلیت تنظیم مورفولوژی برگ، ظرفیت فتوسنتزی و سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی به این گیاه امکان می‌دهد تا در اقلیم‌های سرد و گرم، و همچنین در محیط‌های شهری و طبیعی، نه‌تنها زنده بماند، بلکه گسترش یابد [۱۱].

انتخاب صحیح گونه‌های گیاهی برای نماهای سبز مستقیم و غیرمستقیم، نقش بسزایی در تحقق پایداری، افزایش تنوع زیستی و کاهش نیاز به نگهداری دارد. بهترین نتایج زمانی حاصل می‌شود که گونه‌هایی انتخاب شوند که با اقلیم محلی سازگار بوده، رشد قوی و پوشش‌دهی بالا داشته و به منابع کمی نیاز داشته باشند. در عین حال، سطح نگهداری مورد نیاز به ویژگی‌های گیاه و طراحی نما بستگی دارد. از معیارهای کلیدی در انتخاب گونه‌های گیاهی می‌توان به پنج شاخص اصلی اشاره کرد: ۱- سازگاری با اقلیم محلی: گونه‌های بومی یا غیرتهاجمی که با اقلیم منطقه سازگاری دارند [۴]، به دلیل تاب‌آوری بالا، ارتقای تنوع زیستی و نیاز کمتر به نگهداری، گزینه‌های مناسبی محسوب می‌شوند. ۲- فرم رشد و میزان پوشش‌دهی: گیاهان بالارونده قوی مانند *Hedera helix*، *Parthenocissus tricuspidata* و *Anemopaegma chamberlaynii* به دلیل پوشش متراکم، سرمایش بهتری فراهم می‌کنند و از تنوع زیستی حمایت می‌کنند. ۳- نیازهای آبی و نوری: انتخاب گونه‌هایی با نیاز آبی و تحمل سایه متناسب با شرایط سایت ضروری است. تا عملکرد بهینه و نگهداری کم‌هزینه تضمین شود. ۴- خدمات اکوسیستم: باید گونه‌ها از گرده‌افشان‌ها، بندپایان مفید و حیات‌وحش شهری پشتیبانی کنند تا به بهبود اکوسیستم شهری کمک کنند. ۵- اهداف زیبایی‌شناسی و عملکردی: باید بین ارزش زینتی، نرخ رشد و نیازهای نگهداری (نظیر هرس و کنترل آفات) تعادل برقرار شود تا نمای سبز هم زیبا و هم کارآمد باشد [۱۲]. بر این اساس، جدول ۱ نمونه‌ای از گیاهان رایج در نمای سبز را ارائه می‌دهد.

جدول ۱. نمونه‌ای از گونه‌های رایج برای نماهای سبز [۱۳]

گونه گیاهی	نوع پوشش	ویژگی‌های کلیدی	نوع نما
<i>Hedera helix</i>	همیشه‌سبز	پوشش متراکم، نیاز کم به نگهداری	مستقیم/غیرمستقیم
<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	خزان‌پذیر	رشد سریع، شاخص سطح برگ بالا (LAI)	مستقیم/غیرمستقیم
<i>Basella rubra</i> , <i>Clitoria ternatea</i>	بومی، خوراکی	خنک‌کننده، سازگارپذیر	غیرمستقیم
<i>Anemopaegma chamberlaynii</i>	گرمسیری	رشد قوی، پوشش‌دهی بالا	غیرمستقیم

۱-۱-۲. راهبردهای نگهداری در انتخاب گونه‌های گیاهی

شاخص‌هایی که باید در نگهداری گونه‌های گیاهی مورد توجه قرار بگیرند را می‌توان به چهار گروه دسته‌بندی کرد: ۱- آبیاری: سیستم آبیاری باید با نیاز آبی گونه‌ها تطبیق داشته باشد. استفاده از گیاهان مقاوم به خشکی، مانند گونه‌های بومی یا کم‌نیاز هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهد. ۲- هرس و هدایت: برای کنترل رشد و حفظ ساختار گیاه، به‌ویژه برای گونه‌های با رشد شدید مانند *Hedera helix*، الزامی است. این کار به حفظ شکل و عملکرد نمای سبز کمک می‌کند. ۳- پایش سلامت: بررسی منظم از نظر آفات، بیماری‌ها برای حفظ سلامت گیاه توصیه می‌شود [۱۴]. انتخاب گونه‌های مقاوم به آفات و بیماری‌ها، نیاز به مداخلات نگهداری را کاهش می‌دهد. همچنین، پایش یکپارچگی سازه‌ای نمای سبز ضروری است. ۴- زیر لایه و سازه نگه‌دارنده: در نماهای غیرمستقیم، تأمین خاک زیر لایه کافی برای رشد گیاهان ضروری است. همچنین، ساختار تکیه‌گاهی مستحکم برای پشتیبانی از گیاهان و پایداری طولانی‌مدت نمای سبز مورد نیاز است [۴].

۳. نماهای سبز عمودی به عنوان یک راه حل پایدار

پدیده گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی، چالشی جدی برای بیش از ۷۰ درصد شهرهای جهان است. کلان‌شهرها با مصرف بالای انرژی و تولید عمده گازهای گلخانه‌ای، نقش مهمی در تشدید یا کاهش این بحران دارند. افزایش دمای هوا در مناطق شهری، معماران را به استفاده از نماهای سبز ترغیب کرده است. نماهای سبز با ایجاد سایه و کاهش شار حرارتی، دمای سطح دیوار را کاهش می‌دهند و به صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی منجر می‌شوند [۱۵]. این سیستم‌ها می‌توانند دمای داخلی ساختمان را تا ۵/۶۴ درجه کاهش دهند و شار حرارتی را بین ۷/۸۴ تا ۱۶/۷۹ وات بر مترمربع کم کنند [۱۶]. عملکرد این نماها ناشی از سایه‌اندازی و تبخیر - تعرق گیاهان است. همچنین، در زمستان نیز با حفظ گرما، نقش عایق را ایفا می‌کنند. این نماها در تابستان می‌توانند مصرف انرژی سرمایشی را تا حدود ۵۹ درصد کاهش دهند. عواملی مانند سرعت باد، تابش خورشید و رطوبت و جهت‌گیری نما بر عملکرد آن‌ها تأثیر می‌گذارند. نماهای جنوبی به‌ویژه در اقلیم گرم و مرطوب کارایی بیشتری دارند و جهت‌گیری جنوب شرقی یا جنوب غربی در اقلیم مدیترانه‌ای بیشترین صرفه‌جویی را دارد [۱۷]. نوع و تراکم پوشش گیاهی و طراحی سازه‌ای نما نیز در کارایی حرارتی این نماها مؤثرند. در مقیاس شهری، این نماها می‌توانند روزانه تا ۳۴۷ وات‌ساعت بر مترمربع در انرژی صرفه‌جویی کنند که معادل کاهش ۳۱ کیلووات‌ساعت انرژی سرمایشی تابستانی به ازای هر مترمربع است. همچنین، می‌توانند دمای سطح دیوار را تا ۱۵/۵ درجه نسبت به دیوارهای بدون گیاه کاهش دهند [۱۸].

۳-۱. تأثیر نمای سبز بر مصرف انرژی در دوره بهره‌برداری ساختمان

انرژی عملیاتی (OE) به انرژی مصرف‌شده طی استفاده از ساختمان اشاره دارد و بخش بزرگی از مصرف کل انرژی و ردپای کربن را شامل می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند این نوع انرژی معمولاً سهم اصلی چرخه عمر ساختمان را تشکیل می‌دهد. ابزارهای شبیه‌سازی می‌توانند به بهینه‌سازی طراحی برای کاهش انرژی عملیاتی کمک کنند. برای مثال، شبیه‌سازی‌ها در ساختمان‌های آموزشی، مصرف بالای سیستم‌های سرمایشی را نشان داده و راهکارهایی برای کاهش آن ارائه کرده‌اند [۱۹]. با این حال، مدیریت دقیق مصرف انرژی طی عمر ساختمان چالش‌برانگیز است و عواملی مانند تغییرات اقلیمی و نگهداری باید در نظر گرفته شوند. همچنین، استفاده از داده‌های واقعی برای اعتبارسنجی مدل‌ها و بهبود طراحی آینده ضروری است. به عنوان نمونه، در مطالعه‌ای در اقلیم تهران، نمای دوپوسته با پوشش گیاهی بررسی شد و نتایج نشان داد این نوع نما در مقایسه با نماهای سنتی و دوپوسته معمولی، عملکرد انرژی بهتری دارد و به کاهش مصرف انرژی به میزان ۴/۲۱ درصد در زمستان و ۵/۲۲ درصد در تابستان کمک می‌کند [۲۰].

۳-۱-۱. نقش عوامل محیطی در عملکرد بلندمدت و اثر بخشی سیستم‌های نمای سبز

شدت نور، دما و رطوبت نسبی از جمله پارامترهای محیطی کلیدی هستند که بر رفتار حرارتی و عملکرد انرژی نمای سبز تأثیر می‌گذارند. جدول ۲ تأثیر این عوامل را به تفکیک بیان می‌کند.

ملاحظات طراحی از شاخص‌های مؤثر در عملکرد نماهای سبز هستند که به سه بخش عمده تقسیم می‌شوند: ۱- شاخص سطح برگ (LAI) و تراکم پوشش گیاهی: افزایش LAI و تراکم برگ موجب بهبود خنک‌سازی و سایه‌اندازی می‌شود، اما در عین حال باعث افزایش رطوبت و کاهش نفوذ نور به داخل می‌شود. همچنین، یک حد بالایی برای تراکم وجود دارد که پس از آن، افزایش تراکم تأثیر چندانی بر عملکرد حرارتی ندارد [۲۲]. ۲- جهت‌گیری و فاصله‌گذاری: جهت‌گیری به سوی جنوب یا غرب بهترین عملکرد حرارتی را دارد. فاصله‌ای بیش از ۱۵۰ میلی‌متر بین گیاه و نما می‌تواند عملکرد حرارتی را بهبود بخشد [۲۳]. ۳- سازگاری با اقلیم: در اقلیم‌های گرم و مرطوب، افزایش رطوبت ممکن است مزایای خنک‌سازی را تحت‌الشعاع قرار دهد، در حالی که در اقلیم‌های سرد، عایق‌بندی شبانه می‌تواند عملکرد مثبت‌تری ایجاد کند [۱۶].

جدول ۲. تأثیر پارامترهای محیطی بر سیستم‌های نمای سبز [۱۳ و ۲۱]

عامل محیطی	تأثیر بر سیستم‌های نمای سبز	یافته‌های کلیدی و منابع
شدت نور	کاهش شدت نور داخلی، ایجاد سایه و کاهش تابش خیره‌کننده (سلامت گیاه نیازمند حداقل سطح نور است؛ سایه‌زنی بیش از حد می‌تواند رشد را محدود کند).	گیاهان می‌توانند بین ۲۸ تا ۵۴ درصد از نور خورشید را کاهش دهند که بسته به جهت‌گیری و تراکم متفاوت است. سیستم‌های قابل تنظیم می‌توانند نور را برای نیازهای هم‌زمان گیاه و ساختمان بهینه‌سازی کنند.
دما	کاهش دمای سطحی و داخلی ساختمان به‌ویژه در دوره‌های گرم و همچنین عایق‌بندی شبانه می‌تواند خطر انجماد و یخ‌زدان را کاهش دهد.	کاهش دما بین ۱ تا ۹ درجه گزارش شده است که با افزایش تراکم برگ و جهت‌گیری مناسب تشدید می‌شود. در زمستان، دمای ناحیه پستی پوشش متراکم ممکن است در شب بالاتر باشد.
رطوبت نسبی	افزایش رطوبت داخلی به دلیل تعرق گیاهان که می‌تواند بر آسایش ساکنان تأثیر بگذارد. رطوبت محیطی عمدتاً در عصرهای گرم افزایش می‌یابد.	رطوبت نسبی داخلی در ساختمان‌های دارای پوشش گیاهی می‌تواند بین ۱۱ تا ۷۳ درصد افزایش یابد. تغییرات رطوبت خارجی اغلب محدودتر است و در اقلیم‌های مرطوب، رطوبت بالا ممکن است موجب ناراضی‌های حرارتی شود.

تغییرات فصلی تأثیر چشم‌گیری بر عملکرد گیاهان دارند که بر محاسبات انرژی در سیستم‌های طبیعی و مدیریتی اثرگذار است. در فصل‌های گرم، گیاهان معمولاً فعالیت فتوسنتزی و خنک‌کنندگی بیشتری دارند، در حالی که در فصل‌های سرد، به دلیل کاهش فعالیت‌های متابولیکی، این مزایا کاهش می‌یابد. ظرفیت فتوسنتزی و بازده تبدیل انرژی در دوره‌های با نور و دمای بهینه به اوج می‌رسد و با نامساعد شدن شرایط کاهش می‌یابد. مزایای حرارتی نظیر سایه‌اندازی و خنک‌سازی تبخیری در بهار و تابستان در بیشترین حد است و در ماه‌های سردتر کاهش می‌یابد [۲۴]. نگهداری مناسب سیستم‌های نمای سبز، به‌ویژه آبیاری منظم، برای حفظ عملکرد حرارتی بهینه ضروری است. تأمین مداوم رطوبت خاک، از طریق آبیاری کافی، موجب افزایش شاخص سطح برگ (LAI)^۱ و بهبود سایه‌اندازی و تبخیر - تعرق می‌شود. مطالعات مختلف کاهش دمای سطح دیوار تا ۸ درجه و دمای داخلی بین ۱ تا ۵ درجه سلسیوس را گزارش کرده‌اند که به اقلیم و نوع طراحی بستگی دارد [۲۲].

در صورت ناکافی بودن آبیاری، مزایای نمای سبز ممکن است تضعیف شود، زیرا کاهش سلامت گیاه و تراکم پوشش گیاهی به افت ظرفیت عایق‌کاری حرارتی منجر می‌شود. راهکارهای نوآورانه‌ای مانند جمع‌آوری مه^۲ می‌تواند به عنوان مکملی برای آبیاری باشد و به خودکفایی آبی از منظر تأمین منابع کمک کند و در نتیجه، گامی در جهت پایداری زیستی گیاهان و حفظ عملکرد حرارتی نمای سبز باشد [۲۵]. نگهداری صحیح و آبیاری مستمر همچنین موجب کاهش نیاز به تعویض گیاهان و افزایش صرفه‌جویی انرژی در بلندمدت می‌شود [۲۶].

۳-۲. تأثیر نمای سبز بر انتشار کربن و پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) در دوره بهره‌برداری ساختمان

بر اساس استاندارد BS EN 15978^۳ [۲۷]، فاز تولید (A1-A3) و مصرف انرژی عملیاتی (B6) مسئول ۶۰ تا ۸۰ درصد از کل انتشار کربن ساختمان هستند و برخی مطالعات سهم فاز عملیاتی را تا ۸۵/۴ درصد نیز گزارش کرده‌اند. مراحل ساخت و پایان عمر نیز در کاهش انتشار نقش دارند. در زیرساخت‌های شهری نیز عمده انتشار مربوط به فاز عملیاتی است [۲۸]. نمودارهای جهانی نشان می‌دهند انتشار گازهای گلخانه‌ای ایران از ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ حدود ۸۰ درصد رشد داشته و سرانه انتشار تقریباً دو برابر شده است [۲۹] و سهم بخش ساختمان به طور چشمگیری افزایش یافته است. الگوهای انتشار در کشورهای مختلف به عوامل اقلیمی، عملکرد و عایق‌کاری بستگی دارد. در اقلیم‌های گرم و مرطوب، نماهای سبز می‌توانند مصرف انرژی و نیاز سرمایشی را تا ۱۳ درصد کاهش دهند. در اقلیم‌های معتدل - گرم، سیستم‌های تهویه و روشنایی منابع اصلی انتشار کربن هستند [۳۰]. همچنین، از دیگر عواملی که در کاهش گازهای گلخانه‌ای نقش دارند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: انتخاب گیاه مناسب،

1. Leaf Area Index

2. fog harvesting

3. Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings.

مانند گونه‌های با ظرفیت بالای جذب کربن، به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. عمق بستر مناسب، با فراهم کردن شرایط بهینه برای رشد ریشه، عملکرد گیاه را بهبود می‌بخشد. آبیاری منظم و بهینه، از طریق حفظ سلامت گیاه و افزایش جذب کربن، در کاهش گازهای گلخانه‌ای مؤثر است [۳۱]. در اقلیم مدیترانه‌ای سیستم‌های سبز عمودی مانند دیوارهای زنده و نماهای سبز با توان بالقوه در کاهش انتشار و بهبود بهره‌وری انرژی مورد توجه قرار گرفته و ارزیابی چرخه عمر این سیستم‌ها نشان داد فاز عملیاتی تا ۹۰ درصد کل انتشار را شامل می‌شود، به‌ویژه می‌توانند مصرف سرمایشی را تا ۷۰ درصد کاهش دهند و ۵۵ درصد در هزینه‌های چرخه عمر صرفه‌جویی کنند و کاهش ۹/۲ درصد در انتشار CO₂ سالانه را به همراه داشته باشند [۳۲].

طول عمر مفید و نرخ جایگزینی پوشش گیاهی از عوامل کلیدی در ارزیابی دقیق پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی پروژه‌های نمای سبز به شمار می‌روند. گنجاندن این پارامترها در ارزیابی‌های چرخه عمر (LCA) و محاسبه هزینه‌های نگهداری برای دستیابی به تحلیل واقع‌گرایانه‌ای از پایداری و صرفه‌جویی اقتصادی این سامانه‌ها ضروری است. هزینه‌های نصب و نگهداری، از جمله تعویض پوشش گیاهی و نگهداری سازه‌ای، از موانع اصلی در گسترش نمای سبز به شمار می‌روند [۳۳]. با این حال، انتخاب مصالح بادوام، گونه‌های گیاهی مناسب، و راهکارهای نگهداری بهینه می‌تواند این هزینه‌ها را در سراسر چرخه عمر کاهش دهد و در نتیجه، پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی را بهبود بخشد. به طور خاص، جایگزینی مصالحی مانند فولاد با چوب در سازه نگه‌دارنده می‌تواند تا ۵۸ درصد در کاهش انتشار کربن مؤثر باشد [۲۶].

۳-۳. تأثیرات بهره‌وری انرژی در مناطق اقلیمی مختلف

نماهای سبز عمودی به طور فزاینده‌ای در ساختمان‌های اداری در سراسر جهان برای بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش ردپای کربن مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها به طور پیوسته باعث کاهش تقاضای انرژی سرمایشی و انتشار کربن می‌شوند و بیشترین مزایا را در اقلیم‌های گرم و در شرایطی که با تراکم گیاهی و جهت‌گیری بهینه طراحی شده‌اند، ارائه می‌دهند. جدول ۳ خلاصه‌ای از نتایج به‌دست‌آمده در کشورهای مختلف با اقلیم‌های متفاوت را ارائه می‌دهد.

جدول ۳. مقایسه تأثیر نماهای سبز عمودی در مناطق مختلف اقلیمی با تأکید بر کاهش مصرف انرژی

کشور / شهر و شرایط اقلیمی	میزان صرفه‌جویی انرژی (%) و کاهش دما	عوامل مؤثر اصلی
گوانگژو، چین گرم و مرطوب / تابستان‌های طولانی	۸.۷٪ تا ۱۳°C سطح، ۳۶°C داخلی	فصل سرمایش طولانی و تابش خورشیدی بالا [۲۴]. تأثیر سایه‌اندازی و تبخیر
شانگهای، چین گرم - مرطوب معتدل	۳.۱٪	تراکم گیاهی بالا و طراحی سیستم [۲۴].
قونیه، ترکیه نیمه‌خشک / تابستان‌های گرم و خشک	۱۱.۶٪	تأثیر متوسط به علت شرایط آب‌وهوایی متعادل‌تر و تراکم متوسط [۳۵].
طرابلس، لبنان مدیترانه‌ای	۱۵.۷٪ (VGS)، تراکم ۵۰٪	استفاده تنها از نمای سبز عمودی و تراکم بهینه [۳۶].
بارسلونا، اسپانیا مدیترانه‌ای	مشخص نشده	تراکم بهینه گیاه (۵۰٪)، انتخاب مناسب سیستم و جهت‌گیری [۳۷].

۴. شکاف تحقیقاتی

بر اساس داده‌های نمودار پایگاه داده انتشار گازهای گلخانه‌ای برای تحقیقات جوی جهانی EDGAR^۱، انتشار گازهای گلخانه‌ای ایران از ۳۳۲/۷۱۶ مگا تن CO₂ معادل در سال ۱۹۹۰ به ۹۹۶/۷۵۳ مگا تن در سال ۲۰۲۳ افزایش یافته که نشان‌دهنده رشد تقریباً سه‌برابری است [۲۹]. این افزایش عمدتاً ناشی از رشد مصرف انرژی در بخش‌های صنعت، ساختمان و حمل‌ونقل است. با توجه به سهم قابل توجه بخش ساختمان در این آمار و افزایش سرانه انتشار از ۵/۹۱۷ به ۱۱/۶۴۳ مگا تن CO₂ معادل، نیاز به راهکارهای مؤثر برای کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای بیش از پیش احساس می‌شود.

1. Emissions Database for Global Atmospheric Research

مطالعات جامعی که به صورت کمی تأثیر نماهای سبز عمودی را در کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در اقلیم‌های مختلف ایران بررسی کند، بسیار محدود است. نماهای سبز عمودی به عنوان یک راهکار مبتنی بر طبیعت، پتانسیل قابل توجهی در بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان‌ها، جذب CO₂ و بهبود عملکرد حرارتی دارند. با این حال، تأثیر دقیق آن‌ها بر مصرف انرژی و ردپای کربن ساختمان‌های اداری در شرایط اقلیمی متنوع ایران هنوز به خوبی مستند نشده است. با توجه به اینکه ۷۸/۱ درصد از انتشارات گلخانه‌ای ایران را CO₂ تشکیل می‌دهد و بخش ساختمان سهم قابل توجهی در مصرف انرژی دارد، نماهای سبز عمودی می‌توانند نقش مهمی در کاهش هم‌زمان مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا کنند. این پژوهش با هدف پر کردن شکاف موجود، به کمی‌سازی تأثیر نماهای سبز عمودی بر صرفه‌جویی انرژی، کاهش ردپای کربن و تخفیف پتانسیل گرمایش جهانی در ساختمان‌های اداری در اقلیم‌های مختلف ایران می‌پردازد. همچنین، راهکارهای عملی برای بهبود کارایی انرژی و بهره‌گیری مؤثر از این فناوری سبز در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و دستیابی به اهداف توسعه پایدار ارائه می‌دهد.

۵. روش‌شناسی

این مطالعه در چند مرحله انجام شد تا عملکرد ردپای کربن نمای سبز (مستقیم و غیرمستقیم) طی عمر آن‌ها بررسی شود. برای این منظور، پنج شهر با ویژگی‌های اقلیمی و معماری متمایز برای طراحی و شبیه‌سازی انتخاب شدند. این شهرها نمایانگر شرایط اقلیمی متنوع در ایران هستند. اطلاعات جغرافیایی و اقلیمی شهرهای مورد بررسی در این مطالعه در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. موقعیت‌های جغرافیایی و اطلاعات اقلیمی [۳۸]

شهر	نوع اقلیم	طبقه‌بندی کوپن	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (متر)	WMO
اهواز	گرم و نیمه‌خشک	BSh	۳۱.۲۸° شمالی	۴۸.۷۱° شرقی	۱۳	۴۰۸۱۱۰
بندرعباس	گرم و مرطوب	As / BWh	۲۷.۱۲° شمالی	۵۶.۲۲° شرقی	۱۰	۴۰۸۷۵۰
تبریز	سرد و نیمه‌خشک	BSk / Dsa	۳۸.۰۷° شمالی	۴۶.۲۹° شرقی	۱۴۰۱	۴۰۷۰۶۰
تهران	نیمه‌خشک	BSh / BSk	۳۵.۷۲° شمالی	۵۱.۴۷° شرقی	۱۲۶۳	۴۰۷۵۴۰
رشت	معتدل و مرطوب	Cfa / Csa	۳۷.۲۷° شمالی	۴۹.۶۸° شرقی	۱	۴۰۷۱۹۰

روش به کار گرفته شده برای مطالعه ردپای کربن نمای سبز را می‌توان به مراحل زیر تقسیم کرد:

- مرحله ۱)** شبیه‌سازی یک ساختمان اداری نمونه به منظور تعیین مصرف انرژی عملیاتی (مصرف سالانه انرژی گرمایشی و سرمایشی و سایر تجهیزات مورد استفاده در ساختمان‌های اداری برحسب کیلووات‌ساعت بر مترمربع).
- مرحله ۲)** محاسبه انتشارات کربن عملیاتی بر اساس نتایج مرحله ۱ (انتشارات سالانه کربن ناشی از سرمایش و گرمایش و سایر تجهیزات) که به عنوان پتانسیل گرمایش جهانی عملیاتی GWPOC برحسب kgCO₂e بیان می‌شود.
- مرحله ۳)** به منظور مقایسه هم‌زمان عملکرد سه نوع نمای ساختمانی (متعارف، سبز مستقیم و سبز غیرمستقیم) در شرایط اقلیمی مختلف (۵ اقلیم)، با استفاده از آزمون‌های آماری نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

۵-۱. محاسبه انرژی عملیاتی

با پیروی از فصل ۴ مقررات ملی ساختمان ایران برای ساختمان‌های اداری، یک مدل ۳ در ۳ متر با ارتفاع کف تا سقف ۳/۵ متر به منظور مطالعه تعیین مصرف انرژی سالانه تعریف شد. مدل حاصل دارای سطح مفید کف ۹ مترمربع و حجم ۳۱/۵ مترمکعب است. این مدل از طریق یک دیوار نما (شامل پنجره) و سقف با محیط خارجی در تماس است، در حالی که سایر قسمت‌های ساختمان به عنوان آدیاباتیک مدل‌سازی شده‌اند. همچنین، بر اساس مقررات ملی ساختمان ایران مبحث نوزدهم صرفه‌جویی در مصرف انرژی حداکثر ضرایب انتقال حرارت را برای اجزای پوسته ساختمان بر اساس نوع ساختمان و موقعیت مکانی تعیین می‌کند. مقادیر مورد

استفاده در مطالعه در جدول ۵ فهرست شده‌اند. انواع پنجره‌ها و نسبت پنجره به دیوار^۱ (WWR) بر اساس منطقه اقلیمی خاص برای هر مکان تعریف شدند. همچنین، سایه‌بان‌ها مطابق با مقررات ملی ساختمان ایران و جهت‌گیری برای هر مکان بر اساس توصیه‌ها با توجه به مواجهه نمای ساختمان با نور خورشید و شرایط باد غالب بر اساس پارامترهای طراحی خاص اقلیم از ادبیات تحلیل شده تعیین شد. داده‌های مربوط به جهت‌گیری، ویژگی‌های پنجره، (WWR) و سایه‌اندازی در جدول ۶ ارائه شده است. در این جدول به جز جهت‌گیری ساختمان سایر موارد با آنالیز حساسیت برای تعیین شرایط بهینه صورت پذیرفت. همچنین، جدول‌های ۷ و ۸ به ترتیب مشخصات پنجره‌های مدل‌سازی شده متناسب با هر اقلیم و همچنین، میزان مساحت نما و پنجره‌ها با توجه به شرایط اقلیمی هر منطقه در مدل‌سازی را در خود جای داده است.

جدول ۵. ضرایب انتقال حرارت برای عناصر ساختمان مرجع گروه ۱ (ساختمان متصل با اشغال غیر پیوسته) [۳۹]

اقلیم (شهر)	پنجره UG [W/m ² K]	دیوار نما UW [W/m ² K]	سقف تخت یا شیب‌دار UR [W/m ² K]
(گرم و نیمه‌خشک) اهواز (گرم و مرطوب) بندرعباس (سرد و نیمه‌خشک) تبریز	۳.۴۰	۱.۱۰	۰.۵۵
(نیمه‌خشک) تهران	۴.۲۸	۱.۳۹	۰.۶۹
(معتدل و مرطوب) رشت	۴.۹۶	۱.۶۱	۰.۸۰

جدول ۶. ابعاد پنجره، نوع شیشه، ویژگی‌های سیستم سایه‌بان، WWR انتخاب شده و جهت‌گیری ساختمان

اقلیم (شهر)	جهت‌گیری [°]	WWR [%]	نوع شیشه	نوع سایه‌بان خارجی	پیش‌آمدگی عنصر سایه‌بان [متر]
(گرم و نیمه‌خشک) اهواز	۱۸۰ (جنوب)	۳۵	دوجداره با پوشش کم گسیل	افقی	۱/۰۸۴
(گرم و مرطوب) بندرعباس	۱۸۰ (جنوب)	۴۰	دوجداره با پوشش کم گسیل	عمودی و افقی*	۰/۵۰۰
(سرد و نیمه‌خشک) تبریز	۱۶۵ (جنوب شرقی)	۴۵	سه‌جداره با پوشش کم گسیل	افقی	۰/۵۸۴
(نیمه‌خشک) تهران	۱۸۰ (جنوب)	۵۵	دوجداره با پوشش کم گسیل	افقی	۱.۰۴۰
(معتدل و مرطوب) رشت	۱۸۰ (جنوب)	۵۵	دوجداره با پوشش کم گسیل	افقی	۱.۰۴۰

*در این شهر، با توجه به عمق قابل توجه سایبان‌ها، توصیه می‌شود که علاوه بر رعایت زوایای سیستم سایه‌اندازی مشخص شده، سایه روی کل نمای ساختمان ایجاد شود. این مطابق با دستورالعمل‌های فصل ۱۹ مقررات ملی ساختمان است. با توجه به نیاز در این شهر برای سایه‌اندازی کل نما، یک سایبان متشکل از بال‌های کناری و سایبان‌های بالایی با بیرون‌زدگی ۰/۵ متر، هم‌راستا با ارتفاع کامل نما و مانند یک ایوان، طراحی شده است.

جدول ۷. مشخصات هندسی پنجره‌ها

پارامتر	مقدار	واحد
ارتفاع پنجره	۱.۸۰	متر
فاصله پنجره‌ها	۴.۵۰	متر
آستانه پنجره	1.50	متر
نوع قاب	UPVC	-

جدول ۸. مساحت پنجره‌ها و نما در اقلیم‌های مختلف

اقلیم (شهر)	مساحت نما	مساحت پنجره‌ها	واحد
(گرم و نیمه‌مرطوب) اهواز	۶.۸	۳.۷	مترمربع
(گرم و مرطوب) بندرعباس	۶.۳	۴.۲	مترمربع
(سرد) تبریز	۵.۸	۴.۷	مترمربع
(نیمه‌خشک) تهران	۴.۲	۶.۳	مترمربع
(معتدل و مرطوب) رشت	۴.۷	۵.۸	مترمربع

همچنین، تهویه دفتر به صورت تهویه طبیعی با نرخ تعویض هوا در ساعت‌های اشغال و غیر اشغال تعریف شد، همان‌طور که در جدول ۹ آمده است. نشست هوا در نرخ‌های تهویه طبیعی گنجانده شد که مطابق با حداکثر نرخ‌های مجاز نشست هوا از مقررات ملی ساختمان ایران برای ساختمان‌های اداری است. همچنین، جدول ۱۰ و ۱۱ پارامترهای کلیدی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های انرژی، از جمله مشخصات ساختمان، ویژگی‌های اشغال و دستگاه‌های انرژی را خلاصه می‌کند. سیستم گرمایشی با استفاده از گاز طبیعی مدل‌سازی شد، در حالی که سرمایش به برق متکی است. علاوه بر این، جدول چگالی توان تجهیزات و سایر ورودی‌های مرتبط را مشخص می‌کند، درخور یادآوری است به دلیل طراحی متناسب روشنایی مصنوعی در نظر گرفته نشده است. محاسبات عملکرد انرژی برای گرمایش و سرمایش و سایر تجهیزات با استفاده از نرم‌افزار Design Builder نسخه ۶.۱۰.۰۰۶ انجام شد. برای هر مکان سه شبیه‌سازی انجام شد که در آن تمام پارامترهای مدل به جز ترکیب نمای خارجی ثابت بودند. مقایسه حاصل بین مدل‌های شبیه‌سازی شده، تأثیر نمای سبز مختلف بر مصرف انرژی عملیاتی را نسبت به طراحی نمای مرسوم در مورد صرفه‌جویی انرژی تعریف شده است، شناسایی می‌کند.

جدول ۹. تهویه طبیعی و برنامه‌های عملیاتی

نوع تهویه	نرخ تهویه [تعویض هوا در ساعت]	برنامه اشغال	ساعت‌های در روز	روزهای هفته
تهویه طبیعی	۲.۵۷	ساعت‌های اداری	۷:۰۰ - ۱۴:۰۰	۶ روز در هفته
	۱	خارج از ساعت‌های اداری	۷:۰۰ - ۰۰:۰۰ و ۱۴:۰۰ - ۰۰:۲۴	۶ روز در هفته
	۰.۶۴	آخر هفته	۰۰:۰۰ - ۲۴:۰۰	۱ روز در هفته

جدول ۱۰. پارامترهای تراکم انسانی و بارهای متابولیک

پارامتر	مقدار	واحد	توضیحات
چگالی اشغال	۰.۳۳	نفر/مترمربع	چگالی اشغال فضای کاری (طبق استاندارد ASHRAE 62.1)
تعداد افراد	۳	نفر	ظرفیت اسمی فضای اداری
نرخ متابولیک	۱	MET	معادل متابولیک کار اداری سبک (مرجع: ISO 7730)
ضریب متابولیک	۰.۹۰	-	ضریب تصحیح بار حرارتی متابولیک

جدول ۱۱. مشخصات سیستم‌های انرژی و تجهیزات ساختمان

پارامتر	مقدار	واحد
روش ساده	-	-
سیستم گرمایش	گاز طبیعی	-
ضریب عملکرد فصلی گرمایش	۰.۸۵	-
عامل انتشار (GHG) گرمایش	۰.۲۶۲ [۳۸]	kg CO ₂ e/kWh
سیستم سرمایش	برق	-
ضریب عملکرد فصلی سرمایش	۳۶	-
عامل انتشار (GHG) سرمایش	۰.۶۲۳ [۳۸]	kg CO ₂ e/kWh
تجهیزات اداری	کامپیوترها	وات/مترمربع
سایر تجهیزات	۱۱.۷۷	وات/مترمربع

به منظور طراحی دقیق ساختمان، نوع لایه‌ها و ضخامت و مشخصات حرارتی آن‌ها منطبق با اقلیم و مصالح رایج تعریف شد. جدول ۱۲ مشخصات سقف‌های طراحی شده ساختمان مرجع شامل سقف تخت و شیب‌دار را مشخص می‌کند. همچنین، ترکیب پوسته ساختمان برای نمای ساختمان در جدول ۱۳ ارائه شده است. این جدول جزئیات نمای ساختمان مرجع شامل نوع لایه‌ها، ضخامت، رسانایی‌های حرارتی و جذب سطحی خورشیدی خارجی را متناسب با هر اقلیم ارائه می‌دهد.

جدول ۱۲. جزئیات ساخت سقف مرجع (تخت و شیب‌دار)

سقف تخت					
اقلیم (شهر)	لایه	ضخامت (m)	رسانایی (W/mK)	گرمای ویژه (J/kgK)	چگالی (kg/m ³)
(گرم و نیمه‌مرطوب) اهواز (گرم و مرطوب) بندرعباس (سرد) تبریز (نیمه‌خشک) تهران	کاشی سیمانی (جذب خورشیدی=۰.۶۵)	۰.۰۲۰	۱.۵۰۰	۱۰۰۰	۲۱۰۰
	ملات ماسه سیمانی	۰.۰۳۰	۱.۵۰۰	۱۰۰۰	۲۱۰۰
	عایق قیری (ایزوگام)	۰.۰۴۰	۰.۲۳۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰
	فوم بتن	۰.۵۰۰	۰.۱۶	۱۰۰۰	۸۰۰
(گرم و نیمه‌مرطوب) اهواز (گرم و مرطوب) بندرعباس (سرد) تبریز	دال بتنی رویه	۰.۱۲۰	۱.۸۰۰	۱۰۰۰	۲۴۰۰
	دال بتنی رویه	۰.۱۰۰	۱.۸۰۰	۱۰۰۰	۲۴۰۰
(گرم و نیمه‌مرطوب) اهواز (گرم و مرطوب) بندرعباس (سرد) تبریز	پلی‌استایرن پرشده معدنی	۰.۱۵۰	۰.۱۲	۱۴۷۰	۱۳
	پلی‌استایرن پرشده معدنی	۰.۲۰۰	۰.۱۸	۱۴۷۰	۱۳
(گرم و نیمه‌مرطوب) اهواز (گرم و مرطوب) بندرعباس (سرد) تبریز (نیمه‌خشک) تهران	ملات گچ و ماسه	۰.۰۲۰	۰.۸۲۰	۸۴۰	۱۶۸۰
	تخته گچی	۰.۰۱۰	۰.۸۲۰	۸۴۰	۱۶۸۰

سقف شیب‌دار

اقلیم (شهر)	لایه	ضخامت (m)	رسانایی (W/mK)	گرمای ویژه (J/kgK)	چگالی (kg/m ³)
(معتدل و مرطوب) رشت	سفال (جذب خورشیدی=۰.۹۶)	۰.۰۵۲	۱.۵۰۰	۱۳۰۰	۱۱۰۰
	لایه کنترل بخار	۰.۰۰۳	۰.۱۹۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰
	تخته زیرسازی چوبی	۰.۰۱۸	۰.۱۵۰	۱۲۵۰	۷۰۰
	تبرچه چوبی	۰.۰۸۰	۰.۱۵۰	۱۲۵۰	۷۰۰
	فضای خالی	۰.۰۵	۰.۳۰۰	۱۰۰۵	۱.۲۹
	عایق پشم چوب	۰.۰۲	۰.۰۴۵	۲۱۰۰	۱۵۰
	تخته گچی	۰.۰۱۵	۰.۳۰۰	۱۰۵۰	۹۵۰

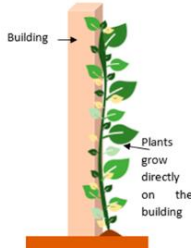
جدول ۱۳. جزئیات نمای ساختمان مرجع به تفکیک اقلیم

اقلیم (شهر)	لایه	ضخامت (m)	رسانایی (W/mK)	گرمای ویژه (J/kgK)	چگالی (kg/m ³)
(گرم و نیمه‌مرطوب) اهواز (گرم و مرطوب) بندرعباس (نیمه‌خشک) تهران (معتدل و مرطوب) رشت	پوشش سنگ تراورتن (جذب خورشیدی=۰.۳۳)	۰.۰۲۵	۱.۵۰۰	۷۲۰	۲۱۸۰
	پوشش سنگ گرانیت (جذب خورشیدی=۰.۵۳)	-	۳.۴۹۰	۸۰۰	۲۸۸۰
	ملات ماسه و سیمان	۰.۳۰۰	۰.۷۲۰	۸۴۰	۱۸۶۰
(گرم و نیمه‌مرطوب) اهواز (گرم و مرطوب) بندرعباس (سرد) تبریز (نیمه‌خشک) تهران (معتدل و مرطوب) رشت	بلوک سرامیکی پرشده با فوم	۰.۱۵۰	۰.۲۵۰	۹۰۰	۸۰۰
	بلوک سرامیکی پرشده با فوم	۰.۱۰۰	۰.۱۵۰	۹۰۰	۸۰۰
(گرم و نیمه‌مرطوب) اهواز (گرم و مرطوب) بندرعباس (سرد) تبریز (نیمه‌خشک) تهران (معتدل و مرطوب) رشت	بلوک سرامیکی پرشده با فوم	۰.۱۰۰	۰.۲۵۰	۹۰۰	۸۰۰
	بلوک سرامیکی پرشده با فوم	۰.۱۰۰	۰.۳۰۰	۹۰۰	۸۰۰
(گرم و نیمه‌مرطوب) اهواز (گرم و مرطوب) بندرعباس (سرد) تبریز (نیمه‌خشک) تهران (معتدل و مرطوب) رشت	گچ کاری	۰.۰۲۰	۰.۴۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
	اندود داخلی	۰.۰۱	۰.۸۰۰	۱۰۰۰	۱۶۰۰

دو پیکربندی نمای سبز (مستقیم و غیرمستقیم) بر اساس نمای مرجع با افزودن لایه‌های لازم تعریف شدند. جدول‌های ۱۴ و ۱۵ این اطلاعات را با ارائه ویژگی‌های پوشش گیاهی در هر سیستم نمای سبز تکمیل می‌کند. همچنین، داده‌های مرتبط با نوع گیاه انتخابی و شاخص‌های رطوبتی در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی در جدول ۱۶ مشخص شده است. با توجه به موارد مطرح شده در بخش و توجه به شاخص‌های زیر گونه *H. helix* برای این تحقیق انتخاب شد. (۱) **مکانیزم‌های تحمل محیطی**، نور و دما؛ پیچک می‌تواند با تغییر ساختار برگ و پروتئین‌های فتوسنتزی خود با شدت‌های نوری شدید سازگار شود و در زیستگاه‌های سایه‌دار و آفتاب‌گیر به حیات خود ادامه دهد [۱۰]. مقاومت به سرما: فرایند تطابق با سرما در *H. helix* شامل دو مرحله است: تجمع قندهای ناشی از نور و تغییرات پروتئینی که مقاومت به یخ‌زدگی را افزایش می‌دهد. این فرایند حتی در شرایط نور کم و دوره‌های نوری کوتاه نیز مؤثر است و گرما و خشکسالی: اگرچه این گیاه به طور کلی در برابر شرایط خنک مقاوم‌تر است، برخی از ارقام آن تفاوت‌های ژنتیکی در تحمل گرما نشان می‌دهند که با الگوهای بیان ژن مرتبط با تطابق با تنش گرمایی همراه است. مقاومت به خشکسالی نیز از طریق تنظیم محتوای آب برگ و ساقه و پاسخ‌های قوی آنتی‌اکسیدانی پشتیبانی می‌شود. (۲) **محیط‌های شهری و شرایط سخت**: پیچک (*Hedera helix*) به دلیل توانایی‌اش در تنظیم دمای ساختمان‌ها، کاهش مصرف انرژی و تحمل میکرواقلیم‌های بام و دیوار، اغلب در زیرساخت‌های سبز استفاده می‌شود. این گیاه در زمستان عایق حرارتی فراهم می‌کند و در تابستان اثر خنک‌کنندگی دارد و قادر به تحمل رطوبت بالا و پایین است [۴۰].

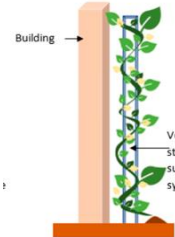
جدول ۱۴. جزئیات لایه نمای سبز مستقیم

لایه	نوع ماده	چگالی [kg/m ³]	ضخامت [cm]	استاندارد مرجع
پوشش گیاهی	پیچک <i>H. helix</i>	-	۰.۱	FLL



جدول ۱۵. جزئیات لایه نمای سبز غیرمستقیم

لایه	نوع ماده	چگالی [kg/m ³]	ضخامت [m]	استاندارد مرجع
حفره هوا	حفره هوا	-	۰.۰۵	BS EN 1996-1-1
پیچ‌ها	فولاد ضد زنگ	۷۹۳۰	۰.۰۰۲	EN 1993-1-8
براکت‌های فاصله‌انداز	فولاد ضد زنگ	۷۹۳۰	۰.۰۰۲	EN 1993-1-8
تکیه‌گاه سازه‌ای	مش فولاد ضد زنگ	۷۹۳۰	۰.۰۰۲	EN 1993-1-1
پوشش گیاهی	پیچک <i>H. helix</i>	-	۰.۱	FLL



جدول ۱۶. مشخصات گونه گیاهی انتخابی و محتوای رطوبت در نظر گرفته شده [۱۳]

پارامتر	مقدار / واحد
ویژگی‌های گیاهی	<i>H. helix</i>
ارتفاع گیاهان	۰.۱۰۰۰ متر
شاخص سطح برگ (LAI)	۲.۷۸۰۰
ضریب انعکاس برگ	۰.۲۲۰
ضریب گسیل برگ	۰.۹۵۰
حداقل مقاومت استوماتا	s/m ³ ۸۰۰۰۰۰
مشخصات خاک	
حداکثر محتوای رطوبت	۰.۵۰۰
حداقل محتوای رطوبت باقی‌مانده	۰.۰۱۰
محتوای رطوبت اولیه	۰.۱۵۰

با توجه به مقررات ملی ضریب انتقال حرارتی مورد الزام برای ساختمان مرجع برای هر اقلیم و همچنین، ضریب انتقال حرارتی محاسبه‌شده مربوط به نماهای سبز در جدول ۱۷ آورده شده است.

جدول ۱۷. ضرایب انتقال حرارت نماهای مختلف با توجه به نوع اقلیم

شهر	نمای متعارف [W/m ² K]	نمای سبز مستقیم [W/m ² K]	نمای سبز غیرمستقیم [W/m ² K]
اهواز/ بندرعباس/ تبریز	۱.۱۰	۰.۸۶	۰.۷۵
تهران	۱.۳۹	۱.۰۳	۰.۶۷
رشت	۱.۶۱	۱.۱۵	۰.۹۶

۵-۲. محاسبه انتشارات کربن عملیاتی

در این مرحله، انتشارات کربن ناشی از مصرف انرژی عملیاتی ساختمان محاسبه شد. هدف این مرحله، تعیین میزان تأثیر نمای سبز بر کاهش انتشارات کربن طی چرخه عمر ساختمان بود. مراحل انجام این مرحله به شرح زیر است:

۵-۳. تبدیل مصرف انرژی به انتشارات کربن

با استفاده از داده‌های مصرف انرژی عملیاتی مجموع انرژی (گرمایش و سرمایش و تجهیزات مورد استفاده) از مرحله اول، انتشارات کربن ۵۰ ساله ساختمان محاسبه شد. برای این تبدیل، از عوامل انتشار کربن (Emission Factors) استفاده شد که میزان انتشار کربن به ازای هر واحد انرژی مصرفی را نشان می‌دهند. این عوامل بر اساس نوع سوخت مصرفی (مانند گاز طبیعی برای گرمایش و برق برای سرمایش) تعیین شدند. برای انجام محاسبات دقیق‌تر، از نرم‌افزار SimaPro استفاده شد. این نرم‌افزار بر اساس روش‌شناسی پروتکل گازهای گلخانه‌ای (Greenhouse Gas Protocol) عمل می‌کند. این تحلیل بر اساس مصرف انرژی سالانه تعیین‌شده در مرحله قبل انجام شد که منابع انرژی و مقادیر مصرف مرتبط با گرمایش، سرمایش و تجهیزات را در نظر گرفت. انتشارات کربن با تبدیل کل مصرف انرژی به معادل‌های کربن با استفاده از عوامل انتشار استخراج‌شده از پایگاه‌های داده Eco Invent 3 Consequential و Industry Data 2.0 محاسبه شد.

نتایج محاسبات به صورت پتانسیل گرمایش جهانی عملیاتی بیان شدند. این شاخص نشان‌دهنده میزان تأثیر انتشارات کربن بر گرمایش جهانی است و برحسب معادل کربن دی‌اکسید (kgCO₂e) محاسبه می‌شود. در این مطالعه، برای محاسبه انتشارات کربن از روش IPCC GWP 100a استفاده شده است. این روش بر اساس گزارش‌های هیئت بین‌الدولی تغییرات اقلیمی (IPCC^۱) توسعه می‌یابد و پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) را برای یک دوره ۱۰۰ ساله محاسبه می‌کند. این روش به طور گسترده‌ای در ارزیابی‌های چرخه عمر (LCA) مورد استفاده قرار می‌گیرد و معیاری استاندارد برای مقایسه تأثیرات مختلف گازهای گلخانه‌ای بر گرمایش جهانی است. درنهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و محاسبات انتشارات کربن برای ساختمان‌های مجهز به نمای سبز با ساختمان‌های معمولی مقایسه شدند. این تحلیل نشان داد استفاده از نمای سبز تا چه حد می‌تواند مصرف انرژی عملیاتی و انتشارات کربن را کاهش دهد.

در این مطالعه، به منظور مقایسه هم‌زمان عملکرد سه نوع نمای ساختمانی (متعارف، سبز مستقیم و سبز غیرمستقیم) در شرایط اقلیمی مختلف، از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) استفاده شد. این انتخاب با توجه به ماهیت کمی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و نیاز به کنترل خطای نوع I در مقایسه‌های چندگانه صورت گرفت. پیش از اجرای تحلیل اصلی، پیش‌فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، برای شناسایی دقیق تفاوت‌های بین گروه‌ها در مواردی که نتایج ANOVA معنادار بود ($p < 0.05$)، از آزمون تعقیبی توکی بهره گرفته شد. این آزمون به دلیل توانایی در کنترل نرخ خطای خانواده wise و ارائه فواصل اطمینان معتبر برای تفاوت میانگین‌ها انتخاب شد. کلیه تحلیل‌های آماری با استفاده از کتابخانه‌های تخصصی پایتون شامل (SciPy) و (Stats Models) پیاده‌سازی شد که مزیت اصلی

آن، امکان خودکارسازی محاسبات و ایجاد خروجی‌های استاندارد برای گزارش‌دهی علمی بود. به منظور اطمینان از اعتبار نتایج، علاوه بر بررسی پیش‌فرض‌های آماری، اندازه اثر (η^2) برای تعیین اهمیت عملی تفاوت‌ها محاسبه شد. همچنین، توان آماری تحلیل‌ها برای تمام موارد با استفاده از توابع تخصصی ارزیابی شد که نشان‌دهنده کفایت حجم نمونه برای تشخیص تفاوت‌های واقعی بود.

۶. یافته‌ها

۶-۱. نتایج مصرف انرژی ۵۰ ساله نماهای مختلف به تفکیک اقلیم

اقلیم گرم و نیمه‌خشک (اهواز): بررسی مصرف انرژی ساختمان‌های اداری در اقلیم گرم و نیمه‌خشک اهواز نشان می‌دهد نماهای سبز، به‌ویژه نوع غیرمستقیم، تأثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد حرارتی ساختمان دارند.

جدول ۱۸. مقایسه مصرف انرژی (گرمایش، سرمایش و کل) بر اساس نوع نما در اقلیم گرم و نیمه‌خشک (اهواز)

نوع نما	کل (kWh/m ²)	درصد تغییرات کل	سرمایش (kWh/m ²)	درصد تغییرات سرمایش	گرمایش (kWh/m ²)	درصد تغییرات گرمایش
نمای متعارف	۸۶۴۸	-	۷۳۳۵	-	۲۳.۵	-
نمای سبز مستقیم	۸۵۰۱	-۱.۷۰٪	۷۲۰۸	-۱.۷۳٪	۴	-۸۲.۹۸٪
نمای سبز غیرمستقیم	۸۴۴۳	-۲.۳۷٪	۷۱۵۱	-۲.۵۱٪	۲.۵	-۸۹.۳۶٪

طبق جدول ۱۸، نمای سبز غیرمستقیم بهترین عملکرد را با کاهش ۲/۳۷ درصد در مصرف کل انرژی و ۲/۵۱ درصد در قسمت سرمایشی دارد. در اقلیم گرم اهواز، این کاهش‌ها حائز اهمیت هستند. همچنین، مصرف انرژی گرمایشی نیز در هر دو نوع نمای سبز کاهش چشمگیری داشته است؛ ۸۲/۹۸ درصد در نوع مستقیم و ۸۹/۳۶ درصد در نوع غیرمستقیم. این یافته‌ها با اصول معماری بومی ایران همخوانی دارد، جایی که عناصری مانند سایه‌اندازها، دیوارهای ضخیم برای کاهش بار سرمایشی در اقلیم‌های گرم به کار می‌رفته‌اند نماهای سبز را می‌توان نوعی انطباق مدرن این اصول دانست که با افزودن خنک‌کنندگی گیاهی، استراتژی‌های سنتی اقلیم‌محور را تقویت می‌کند؛ به‌ویژه در شرایط تغییرات اقلیمی که نیاز سرمایشی افزایش یافته است. از علل اصلی عملکرد بهتر نمای سبز غیرمستقیم شامل: وجود لایه هوای عایق بین گیاه و دیوار، سایه‌اندازی مؤثرتر و تهویه طبیعی در فضای بین گیاه و نما ذکر کرد که بار سرمایشی را کاهش می‌دهد. مواردی که در تحقیقات مشابه بیان شده است [۴۱]. همچنین، تعرق گیاهان و خنک‌کنندگی تبخیری نیز به کاهش دمای سطح و بار سرمایشی کمک می‌کنند. اثرگذاری نماهای سبز در اقلیم گرم و مرطوب بیشتر از دیگر اقلیم‌هاست؛ مطالعات مشابه توسط ناگدو و همکاران (۲۰۲۳) بر آن تأکید دارند [۴۲]. با این حال، صرفه‌جویی انرژی در اهواز کمتر از مقادیر گزارش‌شده در اقلیم‌های گرم مانند مکزیک (تا ۱۰ درصد) است که احتمالاً به دلیل تابش شدید خورشیدی و رطوبت نسبی کمتر در اهواز است که اثربخشی تبخیر - تعرق را محدود می‌کند [۱۵].

اقلیم گرم و مرطوب (بندرعباس): در اقلیم گرم و مرطوب بندرعباس، نمای سبز مستقیم نسبت به نوع غیرمستقیم عملکرد بهتری داشته و به کاهش ۵/۱۷ درصد در مصرف کل انرژی و ۶/۰۱ درصدی مصرف سرمایشی عملکرد بهتری نسبت به نمای غیرمستقیم داشت. این برتری به دلیل تهویه طبیعی مؤثر و کاهش جذب تابش خورشیدی توسط پوشش گیاهی است که شار حرارتی را کاهش می‌دهد. در حالی که مقادیر کاهش در نمای غیرمستقیم به ترتیب ۴/۷۳ درصد و ۵/۵۰ درصد بوده است. این یافته‌ها با نتایج مطالعه پراگاتی و همکاران (۲۰۲۳)، همسویی دارد که بر تأثیر مثبت نمای سبز مستقیم در کاهش مصرف انرژی تأکید دارند [۴۳]. دلیل اصلی این عملکرد بهتر، تهویه طبیعی مؤثر و کاهش جذب تابش خورشیدی توسط پوشش گیاهی است که به کاهش شار حرارتی و بهبود عملکرد سرمایشی منجر می‌شود. در مقایسه دو نوع نمای سبز، نوع مستقیم به دلیل نبود لایه هوای میانی که ممکن است باعث افزایش رطوبت و کاهش کارایی شود، عملکرد بهتری دارد. یافته‌های ناگدو (۲۰۲۳) این نتایج را تأیید می‌کند که پوشش مستقیم گیاهی از طریق ایجاد سایه و تعرق، نقش مؤثرتری در کاهش دما و مصرف انرژی ایفا

می‌کند [۴۲]. با توجه به معماری مناطق مرطوب ایران، جایی که طراحی‌ها بر ایجاد تهویه طبیعی و کنترل رطوبت تمرکز دارند. نمای سبز مستقیم نیز با فراهم کردن سایه و تبخیر، همان‌طور که معماری سنتی از بازشوهای بزرگ و حیاط‌های مرکزی برای بهبود جریان هوا استفاده می‌کرد [۴۱] عملکرد سرمایشی را ارتقا می‌دهد. نتایج در جدول ۱۹ ارائه شده است.

جدول ۱۹. مقایسه مصرف انرژی (گرمایش، سرمایش و کل) بر اساس نوع نما در اقلیم گرم و مرطوب (بندرعباس)

نوع نما	کل (kWh/m ²)	درصد تغییرات کل	سرمایش (kWh/m ²)	درصد تغییرات سرمایش	گرمایش (kWh/m ²)	درصد تغییرات گرمایش
نمای متعارف	۹۲۹۲	-	۸۰۰۳	-	۰	-
نمای سبز مستقیم	۸۸۱۲	-۵.۱۷٪	۷۵۲۲	-۶.۰۱٪	۰	-
نمای سبز غیرمستقیم	۸۸۵۳	-۴.۷۳٪	۷۵۶۳	-۵.۵۰٪	۰	-

اقلیم سرد: یافته‌های این پژوهش در اقلیم سرد و نیمه‌خشک تبریز (جدول ۲۰) نشان می‌دهد نمای سبز غیرمستقیم با کاهش ۷/۲۹ درصد در مصرف کل انرژی، عملکرد بهتری نسبت به نمای سبز مستقیم با کاهش ۶/۰۶ درصد دارد. در بخش گرمایش نیز نمای غیرمستقیم با کاهش ۱۰/۷۴ درصد نسبت به ۷/۱۷ درصد، عملکرد مؤثرتری داشته است. این برتری ناشی از وجود لایه هوای عایق بین پوشش گیاهی و سطح دیوار است که موجب حفظ گرما در فصل‌های سرد می‌شود. در معماری این اقلیم که از دیوارهای ضخیم و مصالح سنگی و خشتی برای حفظ گرما در زمستان بهره می‌برد، عملکرد نمای سبز غیرمستقیم همانند دیوارهای قطور عمل می‌کند و با افزایش مقاومت حرارتی، مصرف انرژی گرمایشی را کاهش می‌دهد. این موضوع در مواجهه با بحران مصرف گاز و نیاز گرمایشی در این اقلیم اهمیت ویژه دارد. همچنین، این نتایج با مطالعات؛ کانورتینو (۲۰۲۱) که نشان داد نمای سبز می‌تواند تلفات انرژی تابشی مادون‌قرمز را تا ۷۹ درصد کاهش دهد و مانند یک مانع حرارتی عمل کند [۲۲]. اما صرفه‌جویی کمتر در تبریز ممکن است به دلیل دماهای پایین‌تر زمستان ایران باشد که تقاضای گرمایشی پایه را افزایش می‌دهد.

جدول ۲۰. مقایسه مصرف انرژی (گرمایش، سرمایش و کل) بر اساس نوع نما در اقلیم سرد و نیمه‌خشک (تبریز)

نوع نما	کل (kWh/m ²)	درصد تغییرات کل	سرمایش (kWh/m ²)	درصد تغییرات سرمایش	گرمایش (kWh/m ²)	درصد تغییرات گرمایش
نمای متعارف	۶۰۷۶	-	۱۸۱۶	-	۲۹۷۱	-
نمای سبز مستقیم	۵۷۰۸	-۶.۰۶٪	۱۶۶۱	-۸.۵۳٪	۲۷۵۸	-۷.۱۷٪
نمای سبز غیرمستقیم	۵۶۳۳	-۷.۲۹٪	۱۶۹۲	-۶.۸۳٪	۲۶۵۲	-۱۰.۷۴٪

در مقابل، در بخش سرمایش، نمای سبز مستقیم با کاهش ۸/۵۳ درصد نسبت به ۶/۸۳ درصد عملکرد بهتری دارد، زیرا پوشش گیاهی مستقیم به سطح دیوار متصل است و به طور مؤثرتری مانع جذب گرمای خورشید در تابستان می‌شود. با این حال، با توجه به غالب بودن نیاز گرمایشی در اقلیم سرد تبریز، نمای سبز غیرمستقیم با کاهش بیشتر در مصرف کل انرژی، گزینه بهینه‌تری برای این منطقه محسوب می‌شود.

اقلیم نیمه‌خشک: در اقلیم نیمه‌خشک تهران، نمای سبز مستقیم از منظر انرژی با کاهش ۱/۶۹ درصدی مصرف کل انرژی و ۵/۰ درصدی مصرف سرمایشی عملکرد بهتری داشت (جدول ۲۱)، در حالی که نمای غیرمستقیم به افزایش ۱/۸۴ درصدی مصرف انرژی منجر شد. این عملکرد به دلیل سایه‌اندازی و تبخیر - تعرق نمای مستقیم است که جذب انرژی خورشیدی را کاهش می‌دهد و شرایط حرارتی محیط را بهبود می‌بخشد. این یافته با معماری سنتی مناطق مرکزی ایران، مانند خانه‌های قاجاری تهران و کاشان، که بر سایه‌اندازی، حیاط مرکزی و تبخیر-تعرق حوض‌ها متکی بودند، همسو است [۴۱].

جدول ۲۱. مقایسه مصرف انرژی (گرمایش، سرمایش و کل) بر اساس نوع نما در اقلیم نیمه‌خشک (تهران)

نوع نما	کل (kWh/m ²)	درصد تغییرات کل	سرمایش (kWh/m ²)	درصد تغییرات سرمایش	گرمایش (kWh/m ²)	درصد تغییرات گرمایش
نمای متعارف	۸۷۴۲	-	۷۰۴۲	-	۴۱۰	-
نمای سبز مستقیم	۸۵۹۴	-۱.۶۹٪	۷۰۰۶	-۰.۵۱٪	۲۹۹	-۳۷.۰۷٪
نمای سبز غیرمستقیم	۸۹۰۳	+۱.۸۴٪	۷۳۶۲	+۴.۵۴٪	۲۵۲	-۳۸.۵۴٪

نمای سبز با ایجاد سایه، افزایش تبخیر و تعرق و کاهش دمای سطوح، جذب انرژی خورشیدی را کاهش می‌دهد و شرایط حرارتی محیط را بهبود می‌بخشد. نمای سبز غیرمستقیم در اقلیم نیمه‌خشک، به‌ویژه به دلیل افزایش رطوبت نسبی و کنترل ضعیف دما، در فصل‌های گرم و حتی سرد عملکرد مناسبی ندارد و در مقایسه با نمای متعارف، باعث افزایش ۴/۵ درصد در بار سرمایشی می‌شود موردی که در تحقیقات ناگدو و همکاران (۲۰۲۳) به آن اشاره شده است [۴۲].

اقلیم معتدل و مرطوب: در اقلیم معتدل و مرطوب، نمای متعارف عملکرد بهتری نسبت به نماهای سبز دارد. نمای سبز مستقیم موجب افزایش ۱۲/۸۶ درصد در بار سرمایشی و کاهش ۲۸/۶۷ درصد در گرمایش می‌شود. نتایج نشان می‌دهد در اقلیم معتدل و مرطوب، استفاده از نماهای سبز نه تنها عملکرد انرژی را بهبود نمی‌بخشد، بلکه موجب افزایش ۲/۴۳ درصد در مصرف انرژی می‌شود. این یافته اهمیت حیاتی انطباق اقلیمی در طراحی نماهای سبز را نشان می‌دهد. نمای غیرمستقیم نیز با الگوی مشابه، مصرف انرژی را ۲/۲۸ درصد افزایش می‌دهد (جدول ۲۲). علت اصلی افزایش بار سرمایشی در اقلیم معتدل و مرطوب، تعادل حرارتی نامناسب و رطوبت بالای محیط است که اثر تبخیر و تعرق گیاهان را معکوس می‌کند و به جای بهبود شرایط حرارتی، به افزایش بار سرمایشی منجر می‌شود. این یافته‌ها با تحقیقات غفوری آذر و همکاران (۲۰۲۳) همخوانی دارد [۴۴]. رطوبت نسبی بالا در این اقلیم، گرادیان رطوبت بین سطح گیاه و هوای اطراف را به شدت کاهش می‌دهد و در نتیجه، نرخ تبخیر - تعرق را به طور قابل توجهی محدود می‌کند. در واقع، به دلیل مقاومت آئرودینامیکی، با افزایش رطوبت، مقاومت در برابر انتقال جرم (حرکت بخار آب از سطح به هوا) افزایش یافته و تبخیر و تعرق را بیشتر محدود می‌کند. همچنین، این یافته‌ها با نتایج پژوهش بالانکو و همکاران (۲۰۲۱) سازگار است که نشان می‌دهند در اقلیم‌های مرطوب، نماهای سبز به دلیل افزایش رطوبت، نیاز به سرمایش را افزایش می‌دهند و کاهش گرمایش نمی‌تواند آن را جبران کند [۴۵]. در فصل تابستان، کاهش نرخ تبخیر به دلیل رطوبت نسبی بالا به افزایش حرارت محسوس محیط منجر می‌شود و هم‌زمان حرارت نهان را افزایش می‌دهد. این شرایط کارایی سیستم‌های تهویه و تبرید را کاهش داده و مصرف انرژی را افزایش می‌دهد. این یافته‌ها با نتایج نگدو و همکاران (۲۰۲۳) همخوانی دارد [۴۲]. در فصل زمستان، پوشش گیاهی با کاهش جذب تابش خورشیدی به اتلاف حرارتی ساختمان منجر می‌شود. همچنین، تبخیر باقی‌مانده در پوشش گیاهی به افزایش اتلاف حرارتی کمک می‌کند. این نتیجه با نتایج مطالعات کوما و همکاران (۲۰۱۷) سازگار است [۱۷].

در اقلیم‌های مرطوب، پتانسیل سرمایشی نماهای سبز به دلیل کاهش تبخیر - تعرق در شرایط رطوبت نسبی بالا محدود می‌شود. این یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین هم‌راستا هستند؛ به عنوان نمونه، پژوهش امامیان فر و همکاران (۲۰۲۴)، نشان داد رطوبت بالای محیط، گرادیان فشار بخار را تضعیف می‌کند و در نتیجه، کارایی سرمایش تبخیری را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، دمای معتدل (۱۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس) انرژی کافی برای تبخیر مؤثر فراهم نمی‌کند و سرعت باد پایین نیز انتقال حرارت جابه‌جایی را مختل می‌سازد. ابرناکی مداوم و کاهش تابش مستقیم خورشید، این محدودیت‌ها را تشدید می‌کنند؛ از این‌رو، در اقلیم‌های معتدل و مرطوب، نماهای سبز به جای بهبود شرایط خرد اقلیمی، ممکن است به تشکیل تجمعات موضعی رطوبت و کاهش جریان‌های طبیعی هوا منجر شوند که این امر می‌تواند اثرات ناخواسته‌ای بر آسایش حرارتی و عملکرد انرژی ساختمان داشته باشد. این یافته نشان می‌دهد طراحی نما باید دقیقاً با شرایط اقلیمی شمال ایران هماهنگ شود. معماری سنتی این مناطق بیشتر بر بازشوهای بزرگ، تهویه متقاطع تأکید داشت [۴۶]. استفاده نادرست از نماهای سبز می‌تواند افزایش رطوبت و بار

سرمایشی ایجاد کند، بنابراین انتخاب گونه‌های مقاوم به رطوبت و ایجاد تهویه در لایه میانی باید مد نظر قرار گیرد. این موضوع اهمیت بازآفرینی دانش بومی اقلیمی ایران در طراحی‌های مدرن را برجسته می‌کند.

جدول ۲۲. مقایسه مصرف انرژی (گرمایش، سرمایش و کل) بر اساس نوع نما در اقلیم معتدل و مرطوب (رشت)

نوع نما	کل (kWh/m ²)	درصد تغییرات کل	سرمایش (kWh/m ²)	درصد تغییرات سرمایش	گرمایش (kWh/m ²)	درصد تغییرات گرمایش
نمای متعارف	۵۰۹۲	-	۲۹۲۴	-	۸۷۹	-
نمای سبز مستقیم	۵۲۱۶	+۲.۴۳٪	۳۳۰۰	+۱۲.۸۶٪	۶۲۷	-۲۸.۶۷٪
نمای سبز غیرمستقیم	۵۲۰۸	+۲.۲۸٪	۳۳۳۴	+۱۴.۰۲٪	۵۸۴	-۳۳.۵۶٪

۲-۶. نتایج انتشار کربن در دوره ۵۰ ساله و عملکرد نماها در اقلیم‌های مختلف

تفاوت معنادار در کاهش انتشار کربن میان انواع نما را می‌توان به تفاوت ضرایب انتشار منابع انرژی نسبت داد. با توجه به اینکه در ساختمان مورد مطالعه، سرمایش با برق و گرمایش با گاز طبیعی تأمین می‌شود و تولید برق کربن بیشتری نسبت به گاز دارد، کاهش مصرف برق در بخش سرمایش تأثیر بیشتری بر کاهش انتشار کربن دارد. همچنین، فتوسنتز گیاهان در نماهای سبز به جذب مستقیم CO₂ از هوا کمک می‌کند؛ به طوری که هر مترمربع پوشش گیاهی سالانه می‌تواند بین ۰/۵ تا ۱/۵ کیلوگرم CO₂ جذب کند.

اقلیم گرم و نیمه‌خشک (اهواز): از منظر کربن، نمای سبز غیرمستقیم با کاهش ۲/۵۵ درصدی انتشار کربن و کاهش چشمگیر ۸۹/۳۶ درصدی تقاضای گرمایشی عملکرد مطلوبی داشت. بر اساس جدول ۲۳، نمای سبز غیرمستقیم با کاهش ۲/۵۵ درصد در انتشار کربن نسبت به نمای متعارف، بهترین عملکرد را دارد و نمای مستقیم با کاهش ۱/۷۷ درصد در رتبه بعدی قرار می‌گیرد. این کاهش عمدتاً ناشی از کاهش بار سرمایشی به واسطه سایه‌اندازی و عایق کاری گیاهان است. همچنین، کاهش قابل توجه ۸۹/۲ درصد در انتشار کربن گرمایش به دلیل کاهش مصرف گاز طبیعی از طریق بهبود عایق کاری توسط لایه‌های سبز غیرمستقیم حاصل شده است. این نتیجه با مطالعه آلتامن و همکاران (۲۰۲۲) که کاهش ۳۶ تا ۵۱ درصدی انتشار CO₂ را در اقلیم‌های گرم و نیمه‌خشک گزارش کردند [۴۷] متفاوت است. این تفاوت ممکن است به دلیل استفاده از گونه گیاهی پیچک (*Hedera helix*) با شاخص سطح برگ پایین‌تر و محدودیت‌های آبیاری در اهواز باشد. افزون بر این، فرایند فتوسنتز نقش مهمی در کاهش کربن دارد؛ موردی که طبق پژوهش اولوریا و همکاران (۲۰۲۴)، سیستم‌های سبز عمودی می‌توانند سالانه تا ۹۷/۰۳ کیلوگرم CO₂ به ازای هر مترمربع جذب کنند. همچنین، نماهای سبز می‌توانند با کاهش اثر جزیره حرارتی شهری از طریق تبخیر و تعرق و سایه‌اندازی، نیاز به سرمایش را کاهش دهند و در انتشار کربن تأثیرگذار باشند [۲۶].

جدول ۲۳. مقایسه میزان انتشار کربن (گرمایش، سرمایش و کل) بر اساس نوع نما در اقلیم گرم و نیمه‌خشک (اهواز)

نوع نما	کل (kg CO ₂ eq)	درصد تغییرات کل	سرمایش (kg CO ₂ eq)	درصد تغییرات سرمایش	گرمایش (kg CO ₂ eq)	درصد تغییرات گرمایش
نمای متعارف	۴۱۳۴.۹۵	-	۴۱۳۳.۱۶	-	۱.۷۶	-
نمای سبز مستقیم	۴۰۶۱.۹۲	-۱.۷۷٪	۴۰۶۱.۵۹	-۱.۷۳٪	۰.۳۰	-۸۲.۹۵٪
نمای سبز غیرمستقیم	۴۰۲۹.۶۸	-۲.۵۵٪	۴۰۲۹.۴۷	-۲.۵۱٪	۰.۱۹	-۸۹.۲۰٪

اقلیم گرم و مرطوب: طبق جدول ۲۴، در بندرعباس به کارگیری نماهای سبز به‌ویژه نوع مستقیم با کاهش ۶ درصد و نوع غیرمستقیم با ۵/۴۹ درصد، بیشترین کاهش در انتشار کربن را داشته‌اند. این یافته‌ها با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از کاهش مصرف انرژی در مرحله قبل پژوهش در این اقلیم هماهنگی دارد. به دلیل سایه‌اندازی و خنک‌سازی تبخیری میسر شده است. این نتیجه با یافته‌های نگدو (۲۰۲۳) هم‌راستا است که نشان داد نمای مستقیم به دلیل نبود لایه هوای میانی که رطوبت را حفظ می‌کند، در اقلیم‌های مرطوب می‌تواند کارایی بهتری داشته باشد [۴۲]. علت اصلی کاهش انتشار کربن در این اقلیم، کاهش بار

سرمایشی ناشی از بهبود عملکرد عایق حرارتی در نمای سبز، به‌ویژه نوع مستقیم آن است. لایه‌های گیاهی مرطوب، ظرفیت حرارتی بالاتری داشته و انتقال گرما را کندتر می‌کند.

جدول ۲۴. مقایسه میزان انتشار کربن (گرمایش، سرمایش و کل) بر اساس نوع نما در اقلیم گرم و مرطوب (بندرعباس)

نوع نما	کل (kg CO2 eq)	درصد تغییرات کل	سرمایش (kg CO2 eq)	درصد تغییرات سرمایش	گرمایش (kg CO2 eq)	درصد تغییرات گرمایش
نمای متعارف	۴۵۰۹۶۲	-	۴۵۰۹۶۰	-	.	-
نمای سبز مستقیم	۴۲۳۸۸۵	-۶٪	۴۲۳۸۸۲	-۶٪	.	-
نمای سبز غیرمستقیم	۴۲۶۱۹۵	-۵.۴۹٪	۴۲۶۱۹۳	-۵.۴۹٪	.	-

در اقلیم گرم و مرطوب، برخلاف اقلیم گرم و نیمه‌مرطوب، نمای سبز مستقیم عملکرد بهتری دارد. این برتری به دلیل جلوگیری از نفوذ رطوبت به داخل ساختمان و خنک‌سازی تبخیری مؤثرتر در سطح دیوار است که مصرف انرژی سرمایشی را کاهش می‌دهد. در نمای مستقیم، تماس مستقیم گیاهان با دیوار و فقدان لایه هوای میانی، از تجمع رطوبت جلوگیری می‌کند و خنک‌سازی را تقویت می‌کند. این یافته‌ها با تحقیقات برنا و یگانه (۲۰۲۴) همخوانی دارد [۴۸].

اقلیم سرد و نیمه‌خشک: طبق جدول ۲۵، در اقلیم سرد نمای سبز مستقیم با کاهش ۸/۲۷ درصد و نمای غیرمستقیم با ۷/۵۳ درصد در انتشار کربن کل، عملکرد بهتری نسبت به نمای متعارف داشته‌اند. این نتایج با مطالعه آلتامن و همکاران (۲۰۲۲) هم‌راستا است که کاهش ۳۶/۲ درصد تا ۵۱/۴ درصد انتشار CO₂ توسط نماهای گیاهی در اقلیم‌های نیمه‌خشک سرد را نشان داده‌اند [۴۷].

جدول ۲۵. مقایسه میزان انتشار کربن (گرمایش، سرمایش و کل) بر اساس نوع نما در اقلیم سرد و نیمه‌خشک (تبریز)

نوع نما	کل (kg CO2 eq)	درصد تغییرات کل	سرمایش (kg CO2 eq)	درصد تغییرات سرمایش	گرمایش (kg CO2 eq)	درصد تغییرات گرمایش
نمای متعارف	۱۲۴۵۹۵	-	۱۰۲۳۰۸	-	۲۲۲۸۵	-
نمای سبز مستقیم	۱۱۴۲۹۱	-۸.۲۷٪	۹۳۶۰۱	-۸.۵۱٪	۲۰۶۸۷	-۷.۱۷٪
نمای سبز غیرمستقیم	۱۱۵۲۰۱۸	-۷.۵۳٪	۹۵۳۰۲۰	-۶.۸۳٪	۱۹۸۹۶	-۱۰.۷۲٪

تفاوت در الگوی انتشار کربن در این اقلیم ناشی از استفاده بیشتر از گاز طبیعی با ضریب کربن کمتر نسبت به برق است. کاهش بار گرمایشی و به تبع آن، کاهش انتشار کربن به دلیل افزایش مقاومت حرارتی دیوارها اتفاق می‌افتد؛ موردی که در یافته‌های کریمی و همکاران (۲۰۲۲) نیز بیان شده است که اثربخشی لایه‌های گیاهی به عنوان عایق حرارتی در اقلیم سرد را تأیید کرده‌اند. همچنین، مقاومت حرارتی نماهای سبز می‌تواند بین ۰/۳۱ تا ۰/۶۸ (m²K/W) بیشتر از نماهای غیر سبز باشد که این تفاوت به نوع سیستم سبز کاری و موقعیت جغرافیایی وابسته است [۴۹].

اقلیم نیمه‌خشک (تهران): بر اساس جدول ۲۶، در اقلیم نیمه‌خشک تهران، نمای سبز مستقیم با کاهش ۰/۷۲ درصد در انتشار کربن کل عملکرد بهتری نسبت به نمای متعارف داشته، در حالی که نمای سبز غیرمستقیم باعث افزایش ۴/۲۱ درصد در انتشار کربن شده است. این عملکرد مثبت نمای سبز مستقیم به سرمایش تبخیری مرتبط است که در اقلیم‌های خشک به دلیل رطوبت کم، تأثیر بالایی دارد. فرایند تبخیر و تعرق می‌تواند دمای سطحی را تا ۸ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد. با این حال، یافته‌های این مطالعه در تضاد با گزارش آلتامن و همکاران (۲۰۲۲) است که کاهش انتشار CO₂ را بین ۳۶/۲ درصد تا ۵۱/۴ درصد برای نماهای گیاهی در اقلیم‌های نیمه‌خشک و ۱۸ درصد تا ۳۷/۶ درصد در اقلیم‌های گرم و خشک گزارش کرده‌اند [۴۷]. عملکرد ضعیف نمای سبز غیرمستقیم در این اقلیم ممکن است به دلیل کنترل حرارتی ناکارآمد باشد. کارلوجی و همکاران (۲۰۲۳)، اشاره کرده‌اند که در اقلیم‌های با تابش شدید، فاصله هوایی بین گیاه و دیوار می‌تواند به عنوان تله حرارتی عمل کند و

کارایی سیستم را کاهش دهد، در حالی که نمای سبز مستقیم با استفاده از سایه‌اندازی و تبخیر - تعرق محیط حرارتی ساختمان را بهبود می‌بخشد و در نهایت، بر نرخ انتشار کربن تأثیرگذار خواهد بود [۵۰].

جدول ۲۶. مقایسه میزان انتشار کربن (گرمایش، سرمایش و کل) بر اساس نوع نما در اقلیم نیمه خشک (تهران)

نوع نما	کل (kg CO2 eq)	درصد تغییرات کل	سرمایش (kg CO2 eq)	درصد تغییرات سرمایش	گرمایش (kg CO2 eq)	درصد تغییرات گرمایش
نمای متعارف	۳۹۹۹.۱۱	-	۳۹۶۸.۳۳	-	۳۰.۷۶	-
نمای سبز مستقیم	۳۹۷۰.۱۸	-۰.۷۲٪	۳۹۴۷.۷۶	-۰.۵۲٪	۲۲.۳۹	-۲۷.۲۱٪
نمای سبز غیرمستقیم	۴۱۶۷.۲۷	+۴.۲۱٪	۴۱۴۸.۳۸	+۴.۵۴٪	۱۸۸۷	-۳۸.۶۵٪

اقلیم معتدل و مرطوب: با بررسی نتایج جدول ۲۷ مشخص می‌شود که در اقلیم معتدل و مرطوب، نمای متعارف با میزان انتشار کربن ۱۷۱۳.۳۹ kg CO2 eq عملکرد بهتری نسبت به نماهای سبز دارد. نمای سبز مستقیم و غیرمستقیم به ترتیب باعث افزایش انتشار کربن به میزان ۱۱/۲۶ درصد و ۱۲/۲۱ درصد می‌شوند؛ که علل آن را می‌توان افزایش قابل توجه بار سرمایشی نماهای سبز دانست که باعث افزایش چشمگیر انتشار کربن مرتبط با سرمایش می‌شوند (۱۲/۸۶ درصد در نمای مستقیم و ۱۴/۰۴ درصد در نمای غیرمستقیم). علت این افزایش می‌تواند به عواملی همچون رطوبت بالا، کاهش تهویه طبیعی و افت جذب گرمای خورشیدی در فصل زمستان مرتبط باشد.

جدول ۲۷. مقایسه میزان انتشار کربن (گرمایش، سرمایش و کل) بر اساس نوع نما در اقلیم معتدل و مرطوب (رشت)

نوع نما	کل (kg CO2 eq)	درصد تغییرات کل	سرمایش (kg CO2 eq)	درصد تغییرات سرمایش	گرمایش (kg CO2 eq)	درصد تغییرات گرمایش
نمای متعارف	۱۷۱۳.۳۹	-	۱۶۴۷.۴۶	-	۶۵.۹۳	-
نمای سبز مستقیم	۱۹۰۶.۳۷	+۱۱.۲۶٪	۱۸۵۹.۳۵	+۱۲.۸۶٪	۴۷	+۲۸.۶۹٪
نمای سبز غیرمستقیم	۱۹۲۲.۶۲	+۱۲.۲۱٪	۱۸۷۸.۷۹	+۱۴.۰۴٪	۴۳.۸۱	+۳۳.۵۳٪

همچنین، عدم جبران کافی در بخش گرمایش را باید دلیل دیگری دانست اگرچه هر دو نوع نمای سبز باعث کاهش انتشار کربن در بخش گرمایش شده‌اند (۲۸/۶۹ درصد برای نمای مستقیم و ۳۳/۵۳ درصد برای نمای غیرمستقیم)، اما این کاهش به دلیل سهم کمتر گرمایش در اقلیم معتدل و مرطوب، (فقط ۳/۸۵ درصد از کل انتشار کربن در نمای متعارف) با توجه به نرخ انتشار کمتر نوع سوخت مصرفی یعنی گاز طبیعی نمی‌تواند افزایش انتشار در بخش سرمایش را جبران کند. همچنین، داده‌ها نشان می‌دهد نمای سبز غیرمستقیم عملکرد ضعیف‌تری نسبت به نمای سبز مستقیم با دارد. این موضوع با مطالعات دائمی و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد که نشان می‌دهد در اقلیم‌های مرطوب، فاصله هوایی در نماهای غیرمستقیم می‌تواند به محیطی برای تجمع رطوبت بیشتر تبدیل شود و کارایی را کاهش دهد [۵۱].

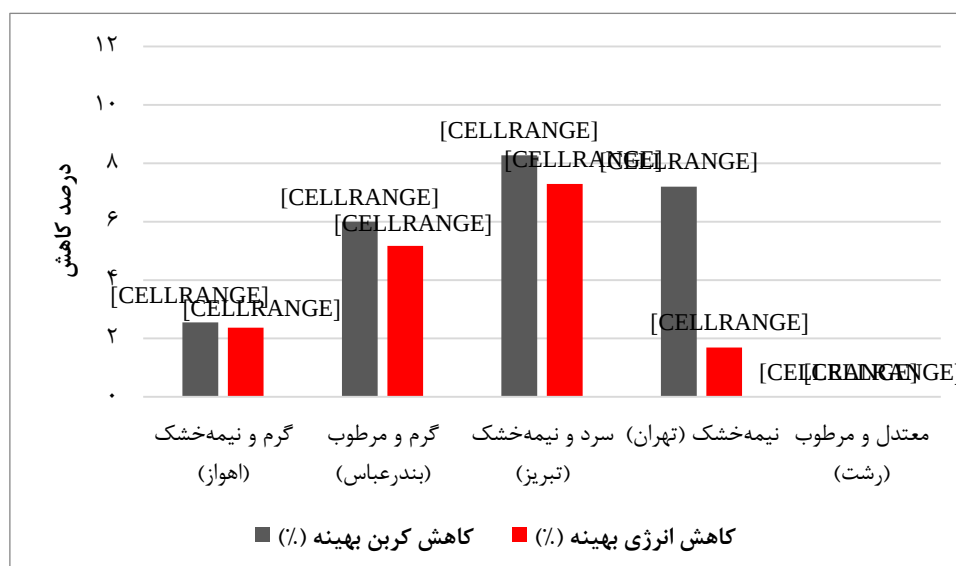
۳-۶. اولویت‌بندی آلترواتیوهای نما برای مناطق اقلیمی مختلف

در راستای بررسی تأثیر نماهای سبز عمودی بر بهره‌وری انرژی و ردپای کربن ساختمان‌های اداری، پس از شبیه‌سازی و جمع‌آوری داده‌ها، از آزمون‌های آماری برای تحلیل و مقایسه دقیق نتایج استفاده شد. برای این منظور، آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) برای بررسی معناداری تفاوت بین سه نوع نمای مورد بررسی (متعارف، سبز مستقیم و سبز غیرمستقیم) انجام گرفت. همچنین، از آزمون تعقیبی توکی (Tukey's post-hoc test) برای مشخص کردن تفاوت معنادار بین گروه‌های مختلف نما در هر اقلیم استفاده شد. نتایج در قالب جدول ۲۸ و نمودار ۱ آمده است.

جدول ۲۸. مقایسه عملکرد انواع نما در اقلیم‌های مختلف و نتایج تحلیل آماری

اقلیم	نمای بهینه	نتیجه ANOVA	آماره F و p-value	اندازه اثر (η^2)
گرم و نیمه‌خشک	سبز غیرمستقیم (بهینه انرژی و کاهش کربن)	تفاوت معنادار ($P<0.05$)	$F=12.45, P=0.0023$	0.72
گرم و مرطوب	سبز مستقیم (کاهش ۵/۲ درصد انرژی)	تفاوت معنادار ($P<0.05$)	$F=18.72, P=0.0008$	0.81
سرد و نیمه‌خشک	سبز غیرمستقیم (انرژی) و سبز مستقیم (کاهش کربن)	تفاوت معنادار ($P<0.05$)	$F=9.87, P=0.0041$	0.66
نیمه‌خشک	سبز مستقیم (تنها گزینه مناسب)	تفاوت معنادار ($P<0.05$)	$F=6.54, P=0.012$	0.54
معتدل و مرطوب	متعارف (بهینه)	تفاوت معنادار ($P<0.05$)	$F=5.32, P=0.018$	0.49

نتایج تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) نشان‌دهنده تفاوت معنادار بین عملکرد نماهای متعارف، سبز مستقیم و سبز غیرمستقیم در تمامی اقلیم‌های مورد مطالعه است ($P<0.05$). اندازه اثر (η^2) در تمامی اقلیم‌ها بزرگ بوده که نشان‌دهنده اهمیت عملی و کاربردی این تفاوت‌هاست.



نمودار ۱. مقایسه تطبیقی نمای سبز در اقلیم‌های مختلف، ارزیابی آماری عملکرد انرژی و محیط زیست

۴-۶. راهکارهای بهبود عملکرد در اقلیم معتدل و مرطوب

برای بهبود عملکرد نماهای سبز در این شرایط، چندین راهکار علمی و فنی پیشنهاد می‌شود. انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب نقش کلیدی در بهبود عملکرد دارد، جایی که گونه‌های مقاوم به رطوبت و گیاهان خشکی‌رست (مقاوم به کم‌آبی) می‌توانند تبخیر کمتری داشته باشند. همچنین، طراحی سیستم زهکشی پیشرفته با لایه‌بندی مناسب و تعبیه سیستم تهویه در لایه‌های زیرین، می‌تواند کنترل رطوبت را بهبود بخشد و از تجمع رطوبت جلوگیری کند. همچنین، حفظ فاصله بهینه ۱۰-۱۵ سانتی‌متر بین نما و دیوار، ایجاد مسیرهای تهویه طبیعی جریان هوا را تقویت می‌کند و دمای دیوار را تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد. این موضوع با نتایج مطالعات دائمی و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد [۵۱].

همچنین، برای ارتقای این سیستم‌ها می‌توان از دو جنبه بهبود اقدام کرد: از منظر بهبودهای فنی، مطالعات نشان می‌دهند استفاده از گونه‌های دارای متابولیسم اسید کراسولاسه (CAM) مانند سدوم (Sedum) و سمپروویوم (Sempervivum) در اقلیم‌های مرطوب می‌تواند تبخیر شبانه را کاهش دهد. همچنین، به کارگیری لایه‌های آب‌گریز^۳ در زیر بستر کاشت و استفاده

1. Xerophytic

2. Crassulacean Acid Metabolism

3. hydrophobic layers

از سیستم‌های میکرو زهکشی همراه با فن‌های کم‌سرعت می‌تواند به کنترل رطوبت محیط کمک کند [۵۲]. از منظر بهبودهای فناورانه، به‌کارگیری فناوری‌های نوین برای ارتقای عملکرد نماهای سبز ضروری است. سیستم‌های کنترل هوشمند شامل حس‌گرهای دقیق رطوبت، سیستم آبیاری هوشمند و سیستم تهویه فعال با فن‌های کم‌مصرف می‌توانند شرایط محیطی را بهینه نگه دارند. ترکیب نماهای سبز با پنل‌های فتوولتائیک، استفاده از عناصر آبی برای تنظیم رطوبت و به‌کارگیری مواد تغییر فازدهنده (PCM)^۱ در سیستم، از جمله راهکارهای نوآورانه‌ای هستند که می‌توانند عملکرد کلی را بهبود بخشند. مطالعات اخیر همچنین نشان داده‌اند استفاده از نانوکامپوزیت‌های فتوکاتالیستی مانند دی‌اکسید تیتانیوم (TiO₂) در لایه‌های پوششی نماهای سبز، علاوه بر کنترل رطوبت محیط، می‌تواند به کاهش آلودگی هوا کمک کند. علاوه بر این، استفاده از سیستم‌های اینترنت اشیا (IoT)^۲ برای نظارت بر میکروکلیم و تنظیم خودکار شرایط بر اساس داده‌های محیطی، می‌تواند بهره‌وری انرژی را افزایش دهد [۵۳].

۷. چالش‌ها و ملاحظات پیاده‌سازی نماهای سبز در ایران

با توجه به یافته‌های این پژوهش در مورد عملکرد نماهای سبز در کاهش مصرف انرژی و ردپای کربن در اقلیم‌های مختلف ایران، بررسی چالش‌ها و ملاحظات پیاده‌سازی این فناوری‌ها در ساختمان‌های اداری ایران برای امکان‌سنجی واقعی ضروری است. این چالش‌ها شامل موانع اقتصادی، فرهنگی، اجتماعی، مدیریتی، سیاسی، و ملاحظات اقلیمی و گواهی‌نامه‌های ساختمان سبز است که در ادامه تشریح می‌شوند. ۱) **موانع اقتصادی و وابستگی به سوخت‌های فسیلی:** بخش انرژی ایران به‌شدت به سوخت‌های فسیلی وابسته است که به انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای و آسیب‌پذیری در برابر نوسانات بازار جهانی انرژی منجر می‌شود. این وابستگی، همراه با ناپایداری اقتصادی، ناکارآمدی‌های بروکراتیک، نبود استانداردهای مشخص، و کمبود سرمایه‌گذاری، پذیرش گسترده فناوری‌های پایدار مانند نماهای سبز را محدود می‌کند. نگرانی‌های اقتصادی، از جمله هزینه‌های اولیه بالا و نبود مشوق‌های مالی کافی، از موانع اصلی در توسعه این سیستم‌ها در ایران هستند. ۲) **موانع فرهنگی و ادراکات اجتماعی:** نگرش‌های فرهنگی نقش مهمی در پذیرش فناوری‌های ساختمان سبز در ایران ایفا می‌کنند. دیدگاه رایج مبنی بر لوکس یا غیرضروری بودن ساخت‌وساز سبز، همراه با کمبود آگاهی عمومی و حرفه‌ای و عدم اعتماد به سازمان‌های مسئول، پذیرش نماهای سبز را با چالش مواجه کرده است. زمینه‌های فرهنگی و اقلیمی، مانند سنت‌های محلی و نیازهای خاص اقلیمی، بر ادراک و کاربردی بودن این فناوری‌ها تأثیر می‌گذارند به عنوان مثال، تصور ناکارآمدی نماهای سبز در اقلیم‌های خشک ایران، به دلیل عدم اطمینان در مورد عملکرد آن‌ها، مانع پذیرش گسترده شده است [۵۴]. ۳) **چالش‌های مدیریتی و سیاستی:** موانع مدیریتی شامل عدم قطعیت در مورد عملکرد ساخت‌وساز سبز، مشوق‌های دولتی ناکافی، شیوه‌های مدیریتی ضعیف، نبود مقررات واضح، تضمین‌های اجرایی محدود، و موانع بروکراتیک است که اجرای نماهای سبز را پیچیده‌تر می‌کنند. چارچوب‌های مدیریتی و قانونی مؤثر اغلب در مقایسه با عوامل زیست‌محیطی و فنی در اولویت پایین‌تری قرار دارند، اما برای اجرای موفق پروژه‌ها حیاتی هستند. فقدان استانداردهای بومی برای ساختمان‌های سبز در ایران، همراه با فرایندهای پیچیده بروکراتیک، موانع قابل توجهی ایجاد کرده است [۵۵]. ۴) **ملاحظات اقلیمی و اجرایی:** با توجه به تنوع اقلیمی ایران، انتخاب گونه‌های گیاهی مقاوم به خشکی و بهره‌گیری از سیستم‌های آبیاری کارآمد برای کاهش هزینه‌های نگهداری در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که بخش عمده‌ای از کشور را تشکیل می‌دهند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. این رویکرد نه تنها به کاهش مصرف آب کمک می‌کند، بلکه با بهینه‌سازی عملکرد حرارتی نماهای سبز، پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی پروژه‌ها را ارتقا می‌بخشد. ۵) **هزینه‌های گواهی‌نامه‌های ساختمان سبز:** دستیابی به گواهی‌نامه‌های ساختمان سبز در ایران، مانند استانداردهای ملی یا بین‌المللی، می‌تواند هزینه‌های ساخت‌وساز را بین ۳/۴ تا ۵/۹ درصد افزایش دهد. این افزایش شامل هزینه‌های فنی (مانند طراحی و اجرای سیستم‌های پایدار) و هزینه‌های اداری (مانند فرایند ارزیابی و صدور گواهی‌نامه) است. با

وجود این، اخذ چنین گواهی‌نامه‌هایی می‌تواند با ارتقای ارزش ملک و جذب حمایت‌های مالی، بخشی از هزینه‌های اولیه را جبران کند. (۶) **عوامل کلیدی برای پذیرش موفق:** برای غلبه بر این موانع، افزایش دانش عمومی و کارشناسی، تقویت اعتماد اجتماعی، و ادغام ملاحظات فرهنگی، اقلیمی و زیست‌محیطی محلی در طراحی و سیاست‌گذاری ضروری است. همکاری بین ذی‌نفعان، از جمله دولت، بخش خصوصی، و جوامع محلی، و تدوین سیاست‌های حمایتی، مانند مشوق‌های مالی و استانداردهای بومی، برای تسهیل پذیرش فناوری‌های سبز حیاتی است. تعامل بین ساختمان‌ها و سیستم‌های شهری، اولویت‌بندی پایداری اجتماعی و ایمنی، و توسعه فرهنگ شرکتی مشتری‌محور و یادگیری متمرکز بر بازار نیز می‌تواند نوآوری سبز را در بخش خصوصی تقویت کند. همچنین، پتانسیل بالایی برای ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر و تدوین استانداردهای سبز بومی در ایران وجود دارد که می‌تواند پذیرش فناوری‌های پایدار مانند نماهای سبز را تسهیل کند [۵۴].

۸. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد کارایی نماهای سبز عمودی در ساختمان‌های اداری به‌شدت به شرایط اقلیمی وابسته است. در اقلیم گرم و مرطوب ایران، این نماها با ایجاد سایه و خنک‌سازی تبخیری، مصرف انرژی و انتشار کربن را به‌ترتیب تا ۵/۲ درصد و ۶ درصد کاهش دادند. در اقلیم سرد و نیمه‌خشک، عملکرد عایق حرارتی نماها، به‌ویژه نمای غیرمستقیم، صرفه‌جویی در گرمایش را تا ۷/۳ درصد و کاهش انتشار کربن را تا ۸/۳ درصد بهبود بخشید، در حالی که نمای مستقیم در کاهش انتشار کربن مؤثرتر بود. در اقلیم گرم و نیمه‌خشک، کاهش متوسط (۲/۴ درصد و ۲/۵ درصد) و در اقلیم نیمه‌خشک (تهران)، تنها نمای سبز مستقیم تأثیر مثبتی داشت و کاهش محدودتری شامل ۱/۶۹ درصد در مصرف انرژی و ۷/۲ درصد در انتشار کربن مشاهده شد؛ در حالی که نمای غیرمستقیم موجب ۱/۸۴ درصد افزایش مصرف انرژی شد. این تفاوت‌ها به ویژگی‌های انتقال حرارت و رطوبت و تأثیر آن‌ها بر سیستم‌های تأسیساتی بازمی‌گردد. در اقلیم معتدل و مرطوب، استفاده از نماهای سبز به دلیل افزایش رطوبت، کاهش تهویه طبیعی، و افت جذب گرمای خورشیدی در زمستان، نه تنها مفید نبود، بلکه مصرف انرژی و انتشار کربن را افزایش داد. این یافته‌ها بر ضرورت انتخاب نوع مناسب نمای سبز متناسب با اقلیم تأکید دارند، زیرا انتخاب نادرست می‌تواند اثرات منفی داشته باشد.

از منظر چالش‌های اجرایی، هزینه‌های اولیه و جاری نصب و نگهداری، و نرخ بالای جایگزینی گیاهان در برخی اقلیم‌ها از موانع اصلی هستند. تحلیل هزینه چرخه عمر نشان می‌دهد انتخاب مصالح بادوام و گونه‌های گیاهی مناسب می‌تواند هزینه‌های نگهداری را کاهش داده و بهره‌وری اقتصادی را افزایش دهد. محدودیت در دسترسی به گونه‌های گیاهی بومی مقاوم، به‌ویژه در اقلیم‌های نیمه‌خشک، و نبود محصولات نمای سبز در بازار داخلی، همراه با کمبود مشوق‌های دولتی و نیروی فنی متخصص، از دیگر موانع هستند.

محدودیت‌های پژوهش نیز بر نتایج تأثیر داشته است. انتخاب تنها یک گونه گیاهی پیچک یا (*Hedera helix*) به دلیل سازگاری و مقاومت بالای آن در برابر خشکسالی و تغییرات دمایی و سازگاری بالا با اقلیم‌های مختلف انجام شد، اما این انتخاب نتایج را به این گونه خاص محدود کرد. بررسی هم‌زمان چندین گونه به دلیل پیچیدگی مدل‌سازی و محدودیت منابع ممکن نبود. با این حال، این محدودیت زمینه‌ای برای مطالعات آینده فراهم می‌کند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، گونه‌های گیاهی متنوع برای هر اقلیم به صورت جداگانه بررسی شوند تا گونه‌های بهینه شناسایی شوند. تدوین استانداردهای طراحی اقلیم‌محور، ایجاد پایگاه‌های داده منطقه‌ای برای ثبت عملکرد واقعی نماهای سبز، و حمایت از صنعت بومی نماهای سبز از طریق آموزش و تولید مصالح و گیاهان سازگار، می‌تواند به رفع چالش‌های اجرایی و بهبود کارایی این سیستم‌ها کمک کند.

درنهایت، این پژوهش به عنوان یکی از مطالعات جامع در زمینه ارزیابی عملکرد نماهای سبز در اقلیم‌های متنوع ایران، چارچوبی علمی برای تصمیم‌گیری‌های آگاهانه ارائه می‌دهد. طراحان و سیاست‌گذاران باید با در نظر گرفتن محدودیت‌های شناسایی شده، مانند انتخاب گونه گیاهی و چالش‌های اجرایی، و اتخاذ سیاست‌های حمایتی مانند مشوق‌های مالی و توسعه زیرساخت‌های بومی، بهترین گزینه‌ها را برای کاهش مصرف انرژی، هزینه‌ها، بهبود کیفیت هوای شهری، و مقابله با گرمایش شهری انتخاب کنند. کاربرد صحیح نماهای سبز با رفع این محدودیت‌ها می‌تواند نقش مهمی در توسعه پایدار و کاهش آثار تغییر اقلیم در ایران ایفا کند.

منابع

- [1] M. S. Fernandes, B. Coutinho, and E. Rodrigues, "The impact of climate change on an office building in Portugal: Measures for a higher energy performance," *J. Clean. Prod.*, vol. 445, p. 141255, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141255.
- [2] H. Zhang, J. Cai, and J. E. Braun, "A whole building life-cycle assessment methodology and its application for carbon footprint analysis of U.S. commercial buildings," *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 16, no. 1, pp. 38–56, Jan. 2023, doi: 10.1080/19401493.2022.2107071.
- [3] M. S. Hossain, O. Therasme, P. Crovella, and T. A. Volk, "Assessing the Environmental Impact of Biobased Exterior Insulation Panel: A Focus on Carbon Uptake and Embodied Emissions," *Energies*, vol. 17, no. 14, p. 3406, July 2024, doi: 10.3390/en17143406.
- [4] P. Talhinhos, J. C. Ferreira, V. Ferreira, A. L. Soares, D. Espírito-Santo, and T. A. D. Paço, "In the Search for Sustainable Vertical Green Systems: An Innovative Low-Cost Indirect Green Façade Structure Using Portuguese Native Ivies and Cork," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, p. 5446, Mar. 2023, doi: 10.3390/su15065446.
- [5] M. Radić, M. Brković Dodig, and T. Auer, "Green Facades and Living Walls—A Review Establishing the Classification of Construction Types and Mapping the Benefits," *Sustainability*, vol. 11, no. 17, p. 4579, Aug. 2019, doi: 10.3390/su11174579.
- [6] M. Manouchehri, J. Santiago López, and M. Valiente López, "Sustainable Design of Vertical Greenery Systems: A Comprehensive Framework," *Sustainability*, vol. 16, no. 8, p. 3249, Apr. 2024, doi: 10.3390/su16083249.
- [7] S. Arghavani, H. Malakooti, and A.-A. Ali Akbari Bidokhti, "Numerical assessment of the urban green space scenarios on urban heat island and thermal comfort level in Tehran Metropolis," *J. Clean. Prod.*, vol. 261, p. 121183, July 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121183.
- [8] M. farhadian, S. Razzaghi Asl, and H. Ghamari, "Thermal Performance Simulation of Hydroponic Green Wall in a Cold Climate," *Int. J. Archit. Eng. Urban Plan.*, vol. 29, no. 2, Dec. 2019, doi: 10.22068/ijaup.29.2.233.
- [9] P. Keyvan and R. Roshandel, "An integrated Energy-Yield-Cost model to evaluate clean energy solutions for vertical farms," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 219, p. 108809, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.compag.2024.108809.
- [10] H. Zer, A. Z. Ben-Ami, and N. Keren, "Static and dynamic acclimation mechanisms to extreme light intensities in *Hedera helix* (Ivy) plants," *Physiol. Plant.*, vol. 177, no. 2, p. e70217, Mar. 2025, doi: 10.1111/ppl.70217.
- [11] L. Kucharski, M. Kloss, J. Sienkiewicz, M. Liszewska, and P. Kiełtyk, "Impact of climate change on ivy (*Hedera helix* L.) expansion in forests of Central Poland," *Folia For. Pol.*, vol. 61, no. 3, pp. 211–221, Sept. 2019, doi: 10.2478/ffp-2019-0020.
- [12] G. Oloś, "Green facades support biodiversity in urban environment – A case study from Poland," *J. Water Land Dev.*, pp. 257–266, Jan. 2024, doi: 10.24425/jwld.2023.148450.
- [13] G. Pérez, J. Coma, M. Chàfer, and L. F. Cabeza, "Seasonal influence of leaf area index (LAI) on the energy performance of a green facade," *Build. Environ.*, vol. 207, p. 108497, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108497.
- [14] U. K. Priya and R. Senthil, "Framework for Enhancing Urban Living Through Sustainable Plant Selection in Residential Green Spaces," *Urban Sci.*, vol. 8, no. 4, p. 235, Dec. 2024, doi: 10.3390/urbansci8040235.
- [15] W. G. Báez-García, E. Simá, M. A. Chagolla-Aranda, L. Carlos Sandoval Herazo, and L. G. Carreto-Hernandez, "Numerical-experimental study of the thermal behavior of a green facade in a warm climate in Mexico," *Energy Build.*, vol. 311, p. 114156, May 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114156.
- [16] R. Widiastuti, J. Zaini, and W. Caesarendra, "Field measurement on the model of green facade systems and its effect to building indoor thermal comfort," *Measurement*, vol. 166, p. 108212, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108212.
- [17] J. Coma, G. Pérez, A. De Gracia, S. Burés, M. Urrestarazu, and L. F. Cabeza, "Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and

- green facades,” *Build. Environ.*, vol. 111, pp. 228–237, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.11.014.
- [18] L. L. H. Peng, Z. Jiang, X. Yang, Q. Wang, Y. He, and S. S. Chen, “Energy savings of block-scale facade greening for different urban forms,” *Appl. Energy*, vol. 279, p. 115844, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115844.
- [19] A. Jurizat, U. Surahman, and G. K. Tedjawinata, “Operational Energy Analysis of an Educational Building Design; A Case Study of Center of Excellent (CoE) Building at Universitas Pendidikan Indonesia (UPI),” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 738, no. 1, p. 012018, Apr. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/738/1/012018.
- [20] S. A. Zolfaghari, M. Saadatinasab, and E. Norouzi Jajarm, “Investigating the Effect of Using Green Double-Skin Facades on Energy Consumption of High-Rise Buildings in Tehran's Climatic Conditions,” *Journal of Modeling in Engineering*, vol. 17, no. 56, 2019. in Persian
- [21] M. Sharbafian, M. Yeganeh, and M. Baradaran Motie, “Evaluation of Shading of Green Facades on Visual Comfort and Thermal load of the Buildings,” *Energy Build.*, vol. 317, p. 114303, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114303.
- [22] F. Convertino, G. Vox, and E. Schettini, “Evaluation of the cooling effect provided by a green façade as nature-based system for buildings,” *Build. Environ.*, vol. 203, p. 108099, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108099.
- [23] R. Bakhshoodeh, C. Ocampo, and C. Oldham, “Thermal performance of green façades: Review and analysis of published data,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 155, p. 111744, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111744.
- [24] C. C. Okorieimoh, B. Norton, and M. Conlon, “Disaggregating Longer-Term Trends from Seasonal Variations in Measured PV System Performance,” *Electricity*, vol. 5, no. 1, pp. 1–23, Jan. 2024, doi: 10.3390/electricity5010001.
- [25] L. Hadba, M. Bitonto, M. Oliveira, P. Mendonça, A. Zanelli, and L. Silva, “A Nature-Inspired Green–Blue Solution: Incorporating a Fog Harvesting Technique into Urban Green Wall Design,” *Sustainability*, vol. 16, no. 2, p. 792, Jan. 2024, doi: 10.3390/su16020792.
- [26] T. D. De Oliveira Santos, F. A. L. Pacheco, and L. F. S. Fernandes, “A systematic analysis on the efficiency and sustainability of green facades and roofs,” *Sci. Total Environ.*, vol. 932, p. 173107, July 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173107.
- [27] British Standards Institution, “BS EN 15978:2011 Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method,” BSI Standards Limited, 2011.
- [28] K. Kanafani, J. Magnes, S. M. Lindhard, and M. Balouktsi, “Carbon Emissions during the Building Construction Phase: A Comprehensive Case Study of Construction Sites in Denmark,” *Sustainability*, vol. 15, no. 14, p. 10992, July 2023, doi: 10.3390/su151410992.
- [29] European Commission, Joint Research Centre (JRC), “GHG emissions data for Iran - EDGAR 2024.” 2024. [Online]. Available: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2024
- [30] W. Liu, X. Zhang, Q. Feng, B. A. Engel, and Z. Li, “Substrate moisture variations of extensive green roofs with different structural configurations in a semi-arid region: Observational data and dynamic simulation,” *J. Hydrol.*, vol. 626, p. 130133, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130133.
- [31] M. R. Seyedabadi, U. Eicker, and S. Karimi, “Plant selection for green roofs and their impact on carbon sequestration and the building carbon footprint,” *Environ. Chall.*, vol. 4, p. 100119, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.envc.2021.100119.
- [32] R. Hay and C. P. Ostertag, “Life cycle assessment (LCA) of double-skin façade (DSF) system with fiber-reinforced concrete for sustainable and energy-efficient buildings in the tropics,” *Build. Environ.*, vol. 142, pp. 327–341, Sept. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.06.024.
- [33] W. Knifka, R. Karutz, and H. Zozmann, “Barriers and Solutions to Green Facade Implementation—A Review of Literature and a Case Study of Leipzig, Germany,” *Buildings*, vol. 13, no. 7, p. 1621, June 2023, doi: 10.3390/buildings13071621.
- [34] H. Mi, S. Wang, T. Wang, and T. Li, “The Influence of Vertical Greening Systems on Building Energy Consumption and Comprehensive Carbon Emission,” *Buildings*, vol. 15, no. 3, p. 471, Feb. 2025, doi: 10.3390/buildings15030471.

- [35] H. B. Kobya and F. Canan, "Examination of vertical green facades and green roofs in terms of ecological criteria and evaluation of energy efficiency," *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, July 2021, doi: 10.17714/gumusfenbil.929266.
- [36] A. Hassoun, C. Traboulsi, M. Rabea, and M. Felix, "Suitable Density of Vertical Greenery Systems on Office Buildings for Energy Saving," *Green Build. Constr. Econ.*, pp. 138–149, June 2023, doi: 10.37256/gbce.4120232235.
- [37] F. Bagheri Moghaddam, J. M. Fort Mir, A. Besné Yanguas, I. Navarro Delgado, and E. Redondo Dominguez, "Building Orientation in Green Facade Performance and Its Positive Effects on Urban Landscape Case Study: An Urban Block in Barcelona," *Sustainability*, vol. 12, no. 21, p. 9273, Nov. 2020, doi: 10.3390/su12219273.
- [38] U.S. Department of Energy, "Energy Plus Weather Data." 2025. [Online]. Available: <https://energyplus.net/weather>
- [39] Ministry of Roads and Urban Development of the Islamic Republic of Iran, *Iran National Building Regulations: Volume 19, Energy Conservation*. Office of National Building Regulations, 2011. in Persian
- [40] F. Thomsit-Ireland, E. A. Essah, P. Hadley, and T. Blanuša, "The impact of green facades and vegetative cover on the temperature and relative humidity within model buildings," *Build. Environ.*, vol. 181, p. 107009, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107009.
- [41] F. Dehghan and C. Porras Amores, "Simulation-Based Multi-Objective Optimization for Building Retrofits in Iran: Addressing Energy Consumption, Emissions, Comfort, and Indoor Air Quality Considering Climate Change," *Sustainability*, vol. 17, no. 5, p. 2056, Feb. 2025, doi: 10.3390/su17052056.
- [42] S. S. Nagdeve, S. Manchanda, and A. Dewan, "Thermal performance of indirect green façade in composite climate of India," *Build. Environ.*, vol. 230, p. 109998, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.109998.
- [43] S. Pragati, R. Shanthi Priya, C. Pradeepa, and R. Senthil, "Simulation of the Energy Performance of a Building with Green Roofs and Green Walls in a Tropical Climate," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, p. 2006, Jan. 2023, doi: 10.3390/su15032006.
- [44] M. Ghafouri-Azar and S.-I. Lee, "Meteorological Influences on Reference Evapotranspiration in Different Geographical Regions," *Water*, vol. 15, no. 3, p. 454, Jan. 2023, doi: 10.3390/w15030454.
- [45] I. Blanco, F. Convertino, E. Schettini, and G. Vox, "Energy analysis of a green façade in summer: an experimental test in Mediterranean climate conditions," *Energy Build.*, vol. 245, p. 111076, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111076.
- [46] A. Emamianfar, Y. Tretiak, and R. Kosarevska, "CLASSIFICATION OF NATURAL CLIMATIC ZONES FOR ENERGYEFFICIENT ARCHITECTURAL SOLUTIONS FOR IRANIAN SCHOOLS," *Urban Dev. Spat. Plan.*, no. 87, pp. 43–55, Oct. 2024, doi: 10.32347/2076-815x.2024.87.43-55.
- [47] R. A. T. Alothman, A. R. Abdin, and A. H. Mahmoud, "The effect of using vegetated façades on CO₂ emissions in multistory residential buildings, in cold semiarid and hot arid climate," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1113, no. 1, p. 012020, Dec. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1113/1/012020.
- [48] M. Borna and M. Yeganeh, "Analysis of the impact of growing green walls based on the reduction of PM_{2.5} particles in the resilient central urban fabric," *Front. Built Environ.*, vol. 10, p. 1443554, Sept. 2024, doi: 10.3389/fbuil.2024.1443554.
- [49] K. Karimi, M. Farrokhzad, G. Roshan, and M. Aghdasi, "Evaluation of effects of a green wall as a sustainable approach on reducing energy use in temperate and humid areas," *Energy Build.*, vol. 262, p. 112014, May 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112014.
- [50] S. Carlucci, M. Charalambous, and J. N. Tzortzi, "Monitoring and performance evaluation of a green wall in a semi-arid Mediterranean climate," *J. Build. Eng.*, vol. 77, p. 107421, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.107421.
- [51] A. B. Daemei, E. Shafiee, A. A. Chitgar, and S. Asadi, "Investigating the thermal performance of green wall: Experimental analysis, deep learning model, and simulation studies in a humid climate," *Build. Environ.*, vol. 205, p. 108201, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108201.

- [52] Y. Shi and K. Kim, "Fabrication of hydrophilic and hydrophobic membranes inspired by the phenomenon of water absorption and storage of cactus," *Front. Mater.*, vol. 9, Sept. 2022, doi: 10.3389/fmats.2022.966692.
- [53] S. Bianchi, C. Andriotis, T. Klein, and M. Overend, "Multi-criteria design methods in façade engineering: State-of-the-art and future trends," *Build. Environ.*, vol. 250, p. 111184, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111184.
- [54] M. Rajabi, J. M. Sardroud, and A. Kheyroddin, "Green standard model using machine learning: identifying threats and opportunities facing the implementation of green building in Iran," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, no. 44, pp. 62796–62808, Nov. 2021, doi: 10.1007/s11356-021-14991-3.
- [55] S. Ali Sadat, M. Vakilalroaya Fini, H. Hashemi-Dezaki, and M. Nazififard, "Barrier analysis of solar PV energy development in the context of Iran using fuzzy AHP-TOPSIS method," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 47, p. 101549, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101549.