

Investigating the effect of green walls on the surrounding microclimate in the autumn season during hot semi-arid climate of Shiraz

Elham Shafiee

PhD Candidate in Architecture, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Mohsen Faizi

Professor, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Seyed-Abbas Yazdanfar

Associate Professor, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran (Corresponding Author)

Mansoureh Tahbaz

Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

In recent years, the use of green walls has rapidly expanded across various climates worldwide, becoming a significant strategy for improving environmental quality in both indoor and outdoor spaces. This study provides an accurate evaluation of the impact of green walls on environmental parameters and thermal indices at a real scale. While numerous studies have examined the cooling and heating effects of green walls during the summer and winter seasons, fewer have focused on their effects during autumn. Addressing this research gap, this study analyzes the influence of green walls on the surrounding microclimate during the autumn season at different distances from the walls. The green wall and control wall were oriented to the south-southeast, and given the geographical location and the hot semi-arid climate of Shiraz, this façade is exposed to direct sunlight throughout the day, especially during midday hours. In the autumn season, with the reduction in solar radiation intensity compared to summer, the walls remain exposed to direct sunlight and still have significant impacts on surface temperatures and the surrounding environment. These conditions align with the research objectives, which aim to examine the effect of the green wall, exposed to sunlight, on the surrounding microclimate. Field measurements were conducted over 10 consecutive days on a 24-hour basis at various distances from both the green wall and a control bare wall (without vegetation) during autumn. Indices related to thermal sensation (heat index, humidity index, and summer heat sensation index) and thermal stress (lethal heat stress index) were calculated using the Python programming language. The results showed that, on average, the green wall had the greatest impact at a distance of 0.5 meters, reducing thermal indices by up to 2.1°C. By analyzing the findings from the calculation of thermal indices during peak sunlight hours (11 AM to 5 PM), it was determined that the green wall reduces the heat index by an average of 3.1°C, 2.7°C, and 1.9°C at distances of 0, 0.5, and 1 meter from the wall, respectively. Additionally, the humidex index was reduced by 3.9°C, 3.7°C, and 2.3°C at the same distances. Similarly, during peak sunlight hours, the green wall decreased the lethal heat stress index by an average of 1.6°C, 1.5°C, and 0.8°C, and the summer heat sensation index by 3.5°C, 3.4°C, and 2.2°C at distances of 0, 0.5, and 1 meter from the wall. The data obtained from the non-irrigated days of the green wall demonstrated a significant reduction in the wall's effectiveness. This highlights the critical need for an irrigation system and a regular maintenance schedule to sustain the natural processes of the vegetation and ensure the optimal performance of the green wall. Overall, the findings suggest that green walls can significantly improve the surrounding microclimate during the autumn season, particularly during peak radiation hours, in urban environments located in hot semi-arid climates, contributing to an enhanced quality of life in these areas.

Keywords: Green wall, hot and semi-arid climate, thermal sensation indices, Python, Shiraz

فصلنامه علمی نامه معماری و شهرسازی، ۱۷(۴۷)، ۲۸-۴۸

DOI: 10.30480/aup.2025.5553.2195

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی تأثیر دیوارهای سبز بر خرداقلیم پیرامونی در فصل پاییز در اقلیم گرم و نیمه خشک شهر شیراز*

الهام شفيعی

دانشجوی دکتری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محسن فیضی

استاد گروه معماری منظر، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سید عباس یزدانفر

دانشیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران (نویسنده مسئول مکاتبات)

E-mail: yazdanfar@iust.ac.ir

منصوره طاهباز

استاد گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

پژوهش حاضر به ارزیابی دقیق تأثیر دیوارهای سبز بر پارامترهای محیطی و شاخص‌های حرارتی در مقیاس واقعی می‌پردازد. علی‌رغم تمرکز تحقیقات پیشین بر تأثیر این سیستم‌ها در فصل‌های تابستان و زمستان، تحقیقات کمتری به تأثیر این سیستم‌ها در فصل پاییز پرداخته‌اند. این پژوهش، به تحلیل اثرات دیوارهای سبز بر خرداقلیم پیرامونی در فصل پاییز و مقایسه اثرات آن در فواصل مختلف از دیوار می‌پردازد. اندازه‌گیری‌های میدانی طی ۱۰ روز، به صورت ۲۴ ساعته و در فواصل مختلف از دیوارها، شامل یک دیوار سبز و یک دیوار عاری، به منزله نمونه کنترل، در فصل پاییز انجام شد. از شاخص‌های مرتبط با احساس حرارتی (شاخص گرما، شاخص رطوبت و شاخص احساس گرمای تابستانی) و استرس حرارتی (شاخص استرس گرمایی کشنده) با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون بهره گرفته شد. یافته‌ها نشان دادند که دیوار سبز در طول شبانه روز، به طور میانگین بیشترین اثرگذاری را در فاصله ۰/۵ متری بر کاهش شاخص‌های حرارتی تا ۲/۱۹°C داشته است. همچنین با تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از محاسبه شاخص‌ها در ساعات اوج گرمای روز، مشخص گردید که دیوار سبز به طور میانگین، شاخص‌های حرارتی را تا ۳/۹°C بلافاصله بعد از دیوار کاهش می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که دیوارهای سبز در فصل پاییز به طور مؤثری به بهبود شرایط خرداقلیم پیرامونی، به ویژه در ساعات اوج گرمای روز، در محیط‌های شهری واقع در اقلیم گرم و نیمه خشک کمک می‌کنند.

کلیدواژه‌ها: دیوار سبز، اقلیم گرم و نیمه خشک، شاخص احساس حرارتی، پایتون، شیراز

* این مقاله برگرفته از رساله دکتری الهام شفيعی با عنوان «تأثیر دیوارهای سبز بر بهبود آسایش حرارتی محیطی افراد به لحاظ ابعاد عینی و ذهنی در فضاهای باز معماری (اقلیم گرم و نیمه خشک)» است که به راهنمایی دکتر محسن فیضی و دکتر سید عباس یزدانفر و مشاوره دکتر منصوره طاهباز در دانشگاه علم و صنعت ایران درحال انجام است.

مقدمه

بازگرداندن فضای سبز به مناطق پرتراکم شهری بخشی از راهبردی است که بسیاری از دولت‌های محلی در سراسر جهان برای بهبود محیط شهری اتخاذ کرده‌اند. یانگ برای تطبیق محیط ساخته شده خود با محیط طبیعی پیشنهاد می‌کند که «ساختمان‌های ما باید از اکوسیستم‌ها در همه جنبه‌ها تقلید کنند» (Raji et al., 2015, 611). به‌کارگیری هدفمند گیاهان روی سطوح سخت ساختمان‌ها، به افزایش حجم فضای سبز مورد نیاز در شهرها کمک می‌کند و از طریق اتصال پارک‌ها و باغ‌های موجود به بام‌ها و دیوارهای سبز، یکپارچگی بصری ایجاد می‌کند (Rahman et al., 2014, 42). این رویکرد به‌ویژه برای شهرهای داخلی که فضای سبز موجود بسیار کم است و اغلب از یکدیگر جدا شده‌اند بسیار مفید خواهد بود. ظرفیت بالقوه بام‌ها و دیوارهای سبز در بهره‌گیری از سطوح موجود ساختمان‌ها و درواقع از سطوحی است که پیش‌تر مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. با توجه به کمبود روزافزون زمین در مناطق شهری، فضاهای کار و زندگی به ناچار باید به‌صورت عمودی توسعه یابند (Dunnett & Kingsbury, 2008). دیوارهای سبز، نه تنها به افزایش توده سبز شهری کمک می‌کنند، بلکه تأثیرات مثبتی بر آسایش حرارتی و خرداقلیم پیرامونی دارند (Medl et al., 2017, 43; Morakinyo et al., 2019, 42). پوشش گیاهی روی سطوح عمودی با کاهش دمای سطح دیوار و هوای اطراف از طریق سایه‌اندازی و تبخیر و تعرق، موجب کاهش دمای محیطی و تعدیل اثرات جزیره گرمایی شهری می‌شود (Katsoulas et al., 2017, 44; Yang et al., 2018, 954). وونگ و همکاران (2007) دریافتند که ساختمان‌های مجاور یا احاطه شده با فضای سبز دمای محیط کمتری نسبت به ساختمان‌های دور از فضای سبز دارند (Wong et al., 2007, 2970). عمده تحقیقات دیوارسبز، بر روی دمای سطح دیوار داخلی و خارجی، دمای داخل ساختمان و محیط پیرامونی، شارهای حرارتی ورودی و خروجی و حفظ انرژی متمرکز هستند. آن‌ها مناطق مختلف آب‌وهوایی از معتدل تا مدیترانه‌ای و گرمسیری، با تمرکز بر فصل گرم را پوشش می‌دهند. این مطالعات شامل دو روش اصلی بررسی هستند، یکی رویکرد تجربی و دیگری مطالعاتی که رویکرد شبیه‌سازی مدل‌سازی محاسباتی را اتخاذ می‌کنند (Jim, 2015, 349). در رویکرد تجربی، بررسی‌ها از طریق برداشت‌های میدانی بر روی دیوارهای سبز نصب شده بر ساختمان‌های واقعی و دربرخی موارد با استفاده از کابین‌های آزمایشگاهی انجام شده است. یکی از چالش‌های موجود در این حوزه مطالعاتی، کمبود تحقیقات جامع پیرامون تأثیر دیوارهای سبز بر آسایش حرارتی و خرداقلیم، به‌ویژه در فصل پاییز است. تاکنون اکثر پژوهش‌ها بر فصول گرم سال متمرکز بوده‌اند، درحالی‌که تغییرات فصلی، به‌ویژه در دوره‌های گذار مانند پاییز، می‌تواند نتایج و اثرات متفاوتی را به همراه داشته باشد (Hunter et al., 2014, 102-113; Pérez et al., 2014, 143-165). این کمبود مطالعاتی، نیاز به تحقیقات بیشتر را درخصوص نقش دیوارهای سبز در بهبود شرایط محیطی در فصول مختلف، ازجمله پاییز، برجسته می‌سازد. دسته‌بندی‌های گوناگونی در ارتباط با انواع دیوارهای سبز مطرح است که در مطالعات متعددی به آن پرداخته شده است. درحال حاضر درمورد حضور متمایز دو دسته اصلی که به‌عنوان «نماهای سبز» و «دیوارهای زنده» توصیف می‌شوند اتفاق نظر وجود دارد که براساس محل قرارگیری بستر رشد تعریف می‌شوند (Perini et al., 2011, 2). نماهای سبز براساس کاربرد، گیاهان بالارونده یا آویزان شده در امتداد دیوار هستند و به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند (Ottel et al., 2011, 3419). سیستم‌های مستقیم و غیرمستقیم به‌ترتیب بیانگر این هستند که گیاهان یا مستقیماً بدون هیچ فاصله‌ای از نمای ساختمان بالا می‌روند و یا به‌طور غیرمستقیم، با پشتیبانی اضافی مانند داربست، کابل، مش و غیره بالا می‌روند (Palermo & Turco, 2020, 3). سیستم‌های دیوارهای زنده با توجه به روش کاربریشان به دو دسته پیوسته و مدولار طبقه‌بندی می‌شوند. در سیستم‌های پیوسته، گیاهان به‌طور یکپارچه و بدون فاصله در بسترهایی مانند صفحات سبک وزن و نفوذپذیر قرار می‌گیرند که اجازه می‌دهند گیاهان به‌طور مستقیم در دیوار رشد کنند. درحالی‌که در سیستم‌های مدولار، بسترهای رشد

به صورت واحدهای مجزا و قابل تنظیم از مواد مختلف طراحی می شوند که به گیاهان این امکان را می دهند تا در محیط های متفاوت رشد کنند (Manso & Castro-Gomes, 2015, 865).

پیشینه پژوهش

در این پژوهش، مطالعات مرتبط در پایگاه های داده داخلی و خارجی جستجو و مورد بررسی قرار گرفتند. منابع انتخاب شده شامل مطالعاتی هم راستا با اهداف این پژوهش هستند که به بررسی تأثیرات دیوارهای سبز بر آسایش حرارتی و خرداقلیم با رویکرد تجربی پرداخته اند. این مطالعات، به منظور شناسایی شکاف های موجود و ارائه بینشی جامع تر از وضعیت کنونی دانش در این زمینه تحلیل شده اند. آزموده و حیدری (۱۳۹۶)، در مطالعه ای به بررسی تأثیر دیوارهای سبز شهری بر کاهش دمای خرداقلیم ها و اثر جزیره گرمایی شهری در فضای شهری تهران پرداختند. مطالعه میدانی و بررسی نمونه موردی روش اصلی این پژوهش بود که در آن از دستگاه دیتالاگر برای برداشت اطلاعات مربوط به دمای هوا و رطوبت نسبی با فاصله ۳۰ ثانیه استفاده شد. روش بررسی بدین ترتیب بود که در آن دو دیوار سبز شهری (دیوار محوطه) انتخاب شده و برداشت ها در فواصل مشخصی (۰، ۵، ۱۰، ۲۰ متری) از دیوارها انجام شدند. نتایج نشان داد که در فصول گرم دمای اطراف دیوارهای سبز تا 1°C خنک تر و در فصول سرد تا 3°C گرم تر است (آزموده و حیدری، ۱۳۹۶، ۵). در مطالعه بعدی، با همان روش قبل، در یک سایت شهری، تغییرات دما و رطوبت نسبی مجاور یک پانل گیاهکاری شده در فواصل مختلف اندازه گیری شد. یافته ها نشان دادند که دمای هوا در نقاط نزدیک به فضای استقرار گیاهان و در فاصله کمتر از ۵/۵ متر، حدود $0/5^{\circ}\text{C}$ کمتر از سایر نقاط بود؛ علاوه بر دما، رطوبت نسبی نیز در این محدوده بیشتر بود. نتایج بیانگر بهبود آسایش حرارتی در خرداقلیم های شهری اطراف گیاهان به ویژه در فصول گرم بود. بررسی انواع گیاهان نیز نشان داد تعدیل دما فارغ از نوع گیاه صورت خواهد گرفت (آزموده، ۱۴۰۰). در مطالعه انجام شده بر تأثیر سیستم دیوار زنده بر دمای هوا و رطوبت نسبی در شهر شیراز نشان داده شد که سبزیبگی عمودی می تواند به گونه ای مؤثر شرایط محیطی را بهبود بخشد. در ساعات اوج تابش، دمای هوای محیط به طور متوسط $2/59^{\circ}\text{C}$ و تا حداکثر $8/7^{\circ}\text{C}$ کاهش یافت. رطوبت نسبی نیز به طور متوسط $9/97\%$ در مقابل دیوار سبز بیشتر از دیوار عاری بود. این اندازه گیری ها در اواخر تابستان و اوایل پاییز به مدت ۱۰ روز در مقابل دیوار سبز و دیوار عاری واقع بر جبهه غربی انجام شدند و تأثیر قابل توجهی بر بهبود شرایط خرداقلیم و کاهش اثر جزیره گرمایی داشتند (Shafiee et al., 2020).

در مطالعه ای دیگر، تأثیر زیرساخت سبز شهری به عنوان یک رویکرد پایدار به تغییرات خرداقلیم گرمسیری و آسایش حرارتی انسان توسط گالاگودا و همکاران بررسی شده است. این مطالعه سه نوع اساسی زیرساخت سبز، از جمله دیوارهای زنده، نماهای سبز غیرمستقیم و نماهای سبز مستقیم را برای رسیدگی به شکاف تحقیقاتی در ارزیابی عملکرد این سیستم ها در شرایط گرمسیری شهر کلمبو در سریلانکا مورد بررسی قرار داد. فاکتورهای دما، رطوبت نسبی و غلظت دی اکسید کربن در فاصله ۱/۰ و ۱ متری با فواصل ۱۵ دقیقه ای در مقابل دیوارهای سبز، داخل شاخ و برگ، شکاف هوا و سطح دیواره خارجی در مقایسه با دیوار لخت مجاور به منزله نمونه کنترل اندازه گیری شد. در مجموع ۹ سیستم دیوار سبز (۳ تا از هر نوع) با شباهت زیاد در نوع گیاهان و مصالح مورد استفاده و تفاوت در برخی ویژگی ها مانند اندازه، جهت، کاربری، تعداد طبقات و قدمت ساختمان به مدت ۲ روز کاملاً آفتابی در سپتامبر و نوامبر تحت نظر قرار گرفتند. این مطالعه نشان داد که بیشترین کاهش دما نسبت به دیوار بدون پوشش مربوط به دیوار زنده به میزان 28°C - 8°C بود و پس از آن، نماهای سبز غیرمستقیم به میزان 34°C - $1/86^{\circ}\text{C}$ و نماهای سبز مستقیم به میزان 34°C - $1/34^{\circ}\text{C}$ بود و 64°C قرار داشتند (Galagoda et al., 2018).

در یک مطالعه تجربی مقایسه‌ای بر رفتار حرارتی سیستم‌های سبز عمودی بر نمای ساختمان‌ها، نتایج نشان دادند که تفاوت دما بین دیوار عاری و دیوارهای سبز، تا 1.7°C برای سیستم سبزی‌نگی مستقیم و 4.4°C برای سیستم دیوار زنده براساس جعبه‌های کاشت پس از ۸ ساعت گرمایش برای شرایط تابستانی، وجود دارد (Ottel & Perini, 2017). در مطالعه مروری درمورد تأثیر دیوارهای سبز بر آسایش شهری از نظر کاهش دما، یافته‌ها نشان دادند که کاهش دما در درجه اول تحت تأثیر قابلیت سایه‌اندازی پوشش گیاهی انتخابی، فرایند تبخیر و تعرق گیاهان و وجود بستر است. دیوارهای سبز پیوسته می‌توانند دمای هوای مجاور را بین 2°C تا 5°C کاهش دهند، درحالی‌که دیوارهای سبز مدولار با زیرلایه به کاهش بسیار بالاتری بین 1°C تا 14°C می‌رسند. مطالعات انجام‌شده با توجه به نوع آب‌وهوا نشان می‌دهند که در آب‌وهوای نیمه‌گرمسیری و مرطوب، دیوارهای سبز پیوسته می‌توانند منجر به کاهش دما بین 1.1°C تا 14°C شوند، درحالی‌که دیوارهای سبز مدولار از 6.1°C تا 20.8°C متغیر هستند. در آب‌وهوای قاره‌ای، مقادیر دیوارهای سبز پیوسته بین 0.8°C و 2.1°C متغیر است، درحالی‌که دیوارهای سبز مدولار بین 8°C تا 31°C متغیر است. در آب‌وهوای مدیترانه، دیوارهای سبز پیوسته بین 1.6°C تا 19.1°C کاهش نشان می‌دهند، درحالی‌که دیوارهای سبز مدولار بین 12°C تا 20°C تغییر می‌کنند. تفاوت تأثیر حرارتی بین دیوارهای سبز پیوسته و مدولار، به این دلیل است که ساختار و ویژگی‌های دیوار سبز مدولار (مانند وجود بستر ضخیم‌تر، ظرفیت حرارتی بالاتر، و استفاده از سیستم‌های آبیاری) باعث افزایش خنک‌کنندگی و کاهش بیشتر دما می‌شود. درمقابل، دیوارهای سبز پیوسته به دلیل نازک‌تر بودن لایه پوشش گیاهی و محدودیت در استفاده از بستر، تأثیر کمتری در کاهش دما دارند (Oquendo-Di Cosola et al., 2022, 9).

در شهر کوئرتارو در یک منطقه نیمه‌خشک واقع در مکزیک، دو کلبه آزمایشی، که با متداول‌ترین مصالح مورد استفاده برای مسکن ساخته شده بودند مورد بررسی قرار گرفتند. در یکی از آن‌ها یک دیوار زنده در نمای جنوبی قرار داده شده بود، درحالی‌که دیگری به‌عنوان یک دیوار عاری (نمونه کنترل) عمل می‌کرد. این مطالعه به لحاظ اقلیم و انتخاب جبهه جنوبی برای قرار دادن دیوار سبز با این پژوهش مشابه است، اما بررسی خرد اقلیم و تغییرات پارامترهای آب‌وهوایی پیرامون دیوار زنده، از اهداف این مطالعه نبوده است. این مطالعه نشان داد که استفاده از دیوار زنده در نمای جنوبی مسکن اجتماعی می‌تواند یک جایگزین غیرفعال برای بهبود شرایط زندگی در نظر گرفته شود، با توجه به اینکه آن‌ها نیاز به سرمایه‌گذاری مالی نسبتاً کمی دارند و می‌توانند رفاه و آسایش حرارتی را بهبود بخشند. همچنین، استفاده از دیوارهای زنده در منطقه نیمه‌خشک مکزیک می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای دستیابی به ۹ متر مربع فضای سبز به ازای هر ساکن، مطابق با توصیه‌های سازمان بهداشت جهانی، مورد بهره‌برداری قرار گیرد (Sánchez-Reséndiz et al., 2018).

مقدم و همکاران (2020)، اثر جهت‌گیری ساختمان در عملکرد نمای سبز و تأثیرات آن بر منظر شهری را در یک بلوک شهری در بارسلونا بررسی کردند. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر جهت ساختمان با نمای سبز بر مصرف انرژی بود. این مقاله شرح مفصلی از اقدامات لازم برای استفاده از نمای سبز به‌عنوان لایه دوم و جهت‌گیری مطلوب آن با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی استودیو ساختمان سبز ارائه داد. نتایج نشان داد جهت‌گیری ساختمان و موقعیت جغرافیایی از عوامل اساسی برای طراحی نمای سبز هستند و میزان تابش خورشیدی که نمای سبز دریافت می‌کند، رفتار حرارتی ساختمان و سطح آسایش حرارتی فضا را تحت تأثیر قرار می‌دهد. عملکرد نماهای سبز در جهت شمال و غرب، کمتر از نماها در سایر جهت‌ها بود، درحالی‌که عملکرد نماهای سبز واقع در جنوب غربی و جنوب شرقی قابل توجه بودند. برای جهت‌گیری جنوب شرقی، کل هزینه انرژی سالانه حدود ۲۸٪ و برای جهت جنوب غربی، ۱۸٪ کاهش یافت. در مطالعه دیگری که تأثیر حرارتی جهت و ارتفاع فضای سبز عمودی بر عابران پیاده در یک منطقه گرمسیری بررسی

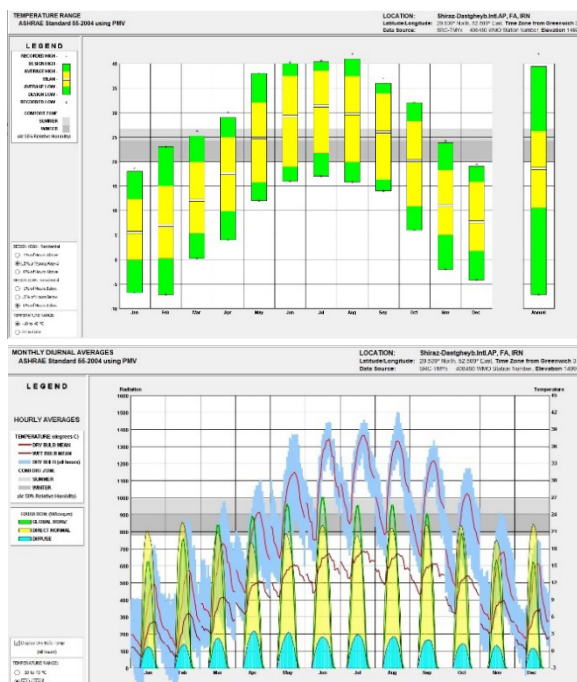
شده بود، سه سناریوی ارتفاعی مختلف برای دیوارهای سبز (۴، ۶، ۱۰ متر) با حالت عاری مقایسه شدند. نتایج نشان داد که بیشترین مزایای حرارتی برای عابران پیاده از قسمت‌های پایین‌تر دیوار سبز (تا ارتفاع ۴ متر) حاصل می‌شود. پس از این ارتفاع، تأثیر کاهش می‌یابد و عناصر سبز بالای ۶ متر نقش کمتری در بهبود آسایش حرارتی عابران دارند. به علاوه، انتظار نمی‌رود که مزایایی در فاصله بیش از ۳ متر از نما مشاهده شود. همچنین، در نتایج گفته شده است که اگرچه یافته‌ها براساس نتایج مدل سازی بود، اما با مطالعات موجود براساس اندازه‌گیری‌ها و مدل سازی در مناطق گرمسیری و سایر مواردی که در عرض‌های جغرافیایی متوسط انجام شده بودند، تطبیق داشت (Acero et al., 2019, 983).

با توجه به کمبود مطالعات در این حوزه و به‌ویژه در ایران و در فصل پاییز، هدف این پژوهش ارزیابی تأثیر دیوارهای سبز بر خرداقلیم محیط پیرامونی، در اقلیم گرم و نیمه‌خشک شهر شیراز است.

روش تحقیق

اقلیم شهر شیراز

ارزیابی‌ها در شهر شیراز واقع در بخش مرکزی استان فارس (مختصات جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۹ دقیقه شمالی و ۵۲ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی و ارتفاع آن از سطح دریا بین ۱۴۸۰ تا ۱۶۷۰ متر در نقاط مختلف شهر متغیر است) و در جنوب غربی ایران، با اقلیم گرم و نیمه‌خشک صورت گرفت. این شهر در فصل زمستان دارای آب‌وهوای نسبتاً معتدل توأم با بارندگی و در فصل تابستان دارای آب‌وهوای گرم و نیمه‌خشک است. میانگین دمای سالانه شیراز بالای ۱۸°C است و در دسته‌بندی کوپن در گروه BSh (آب‌وهوای گرم و نیمه‌خشک)^۲ قرار می‌گیرد (Shafiee et al., 2020; Tabatabaei & Fayaz, 2023). داده‌های آب‌وهوایی که به‌عنوان فایل EPW^۳ مورد استفاده قرار می‌گیرند از سایت <https://climate.onebuilding.org> (نسخه ۲۰۰۷-۲۰۲۱) استخراج شدند. با وارد کردن فایل EPW به نرم‌افزار کلایمت کانسالتنت خروجی‌های زیر به دست آمدند:

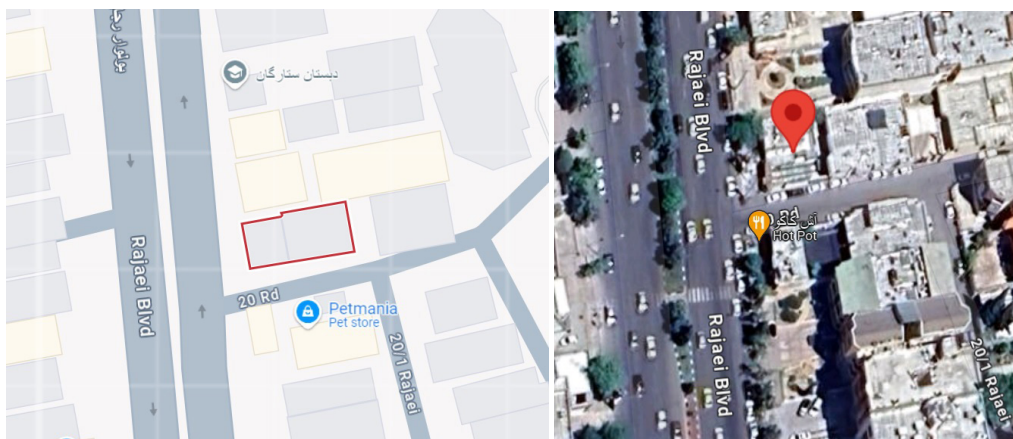


شکل ۱. نمودار محدوده دمایی (راست) و میانگین ساعتی دما و تابش (چپ) برای شهر شیراز (خروجی‌های نرم‌افزار کلایمت کانسالتنت)

نمودار محدوده دمایی در سمت راست نشان می‌دهد که میانگین دمای سالانه شیراز بیش از 18°C است، که این مقدار نشان‌دهنده اقلیم گرم این شهر می‌باشد. نمودار سمت چپ نیز با ترسیم متغیرهایی همچون میانگین‌های ماهانه و روزانه دمای خشک، دمای تر و تابش، نشان می‌دهد که دمای خشک در اکثر ماه‌های سال به طور قابل توجهی از محدوده راحتی فراتر می‌رود. در چنین شرایطی، استفاده از استراتژی‌های خنک‌کننده تبخیری بسیار مؤثر خواهد بود. این راهکارها به دلیل ویژگی‌های اقلیم گرم و نیمه خشک شیراز، که دارای دمای بالا و رطوبت نسبی پایین می‌باشد، عملکرد مطلوبی دارند. خنک‌کننده‌های تبخیری به طور طبیعی دمای هوا را کاهش داده و محیط را به محدوده راحتی نزدیک‌تر می‌کنند. دیوار سبز یکی از راهکارهای خنک‌کننده تبخیری است که در این اقلیم می‌تواند به خوبی پاسخگو باشد.

در این مطالعه، نمونه‌ای مدنظر بود که دیوار سبز در معرض تابش مستقیم خورشیدی بوده و جبهه‌ای غیر از جبهه شمالی باشد، زیرا برای مشاهده میزان تأثیر دیوار سبز بر تشعشعات حرارتی بهتر است دیوار سبز در سایه نباشد. جهت ساختمان یکی از پارامترهای مؤثر بر اثربخشی دیوارهای سبز بر محیط است. اگرچه در مطالعات مختلف درمورد مؤثرترین جبهه در تأثیر دیوار سبز تناقض وجود دارد، اما بر مؤثرتر بودن جبهه جنوبی اجماع بیشتری وجود دارد (Coma et al., 2017). همچنین مهم بود که در نمونه مدنظر، امکان مقایسه بخش سبز دیوار با بخش عاری دیوار (به منزله نمونه کنترل) وجود داشته باشد. از آن جایی که نماهای سبز اغلب شامل گیاهان بالارونده و درختچه‌های دیواری و اکثراً خزان‌پذیر هستند ممکن است تراکم گیاهی لازم را برای انجام آزمایشات نداشته باشند، از این رو مدنظر این مطالعه نبودند. سیستم‌های دیوار سبز از نوع دیوار زنده مدولار علاوه بر خودکفایی، راه‌اندازی سریع و استفاده معمول از گیاهان همیشه سبز به دلیل کارایی حرارتی (بیشتر از دیوار زنده پیوسته)، مورد توجه این پژوهش هستند. به علاوه، نمونه‌هایی که در محل گذر بودند، به دلیل محصور نبودن از هیچ سمتی، کنترل متغیرها سخت بود، بنابراین این نمونه‌ها نیز حذف شدند. برای مشاهده محسوس‌تر تغییرات خرداقلیم، بهتر است دیوار سبز در یک محدوده محصور واقع شده باشد. در نواحی محصور، این اثرات به دلیل تبادل محدود هوا با محیط خارجی می‌تواند بارزتر باشد و به دیوار سبز اجازه دهد تأثیر قابل توجهی بر خرداقلیم اطراف خود داشته باشد. از میان همه نمونه‌های موجود، نمونه‌ای که دارای دو دیوار مورد مقایسه با شرایط یکسان از لحاظ جهت و موقعیت و حائز شرایط ذکر شده بود انتخاب شد. از دلایل دیگر انتخاب این نمونه موردی، وجود دو دیوار سبز و عاری از گیاه با فضای پشتی مجزا و بدون تهویه بود که باعث شد تأثیرپذیری دیوارها از فضاهای پشتی به حداقل برسد. همچنین به دلیل تازگی ساخت فضا، استفاده از فضاهای داخلی و رفت و آمد، حداقل ممکن بود. این شرایط امکان اندازه‌گیری دقیق‌تر تأثیر پوشش گیاهی بر شرایط محیطی اطراف را فراهم کرد.

درمانگاه دندانپزشکی درین واقع در خیابان فرهنگشهر (رجایی) و در محدوده مرکزی شهر شیراز است. این مجموعه در منطقه ۶ قرار گرفته و از شمال با بلوار رجایی، بلوار کسایی و خیابان گرامی، از شرق با بلوار ایمان شمالی، از جنوب با میدان معلم و بلوار ایمان جنوبی و از غرب با خیابان کمربندی شیراز محدود شده است (شکل ۲).



شکل ۲. عکس ماهواره‌ای و نقشه گوگل ارث نمونه انتخابی

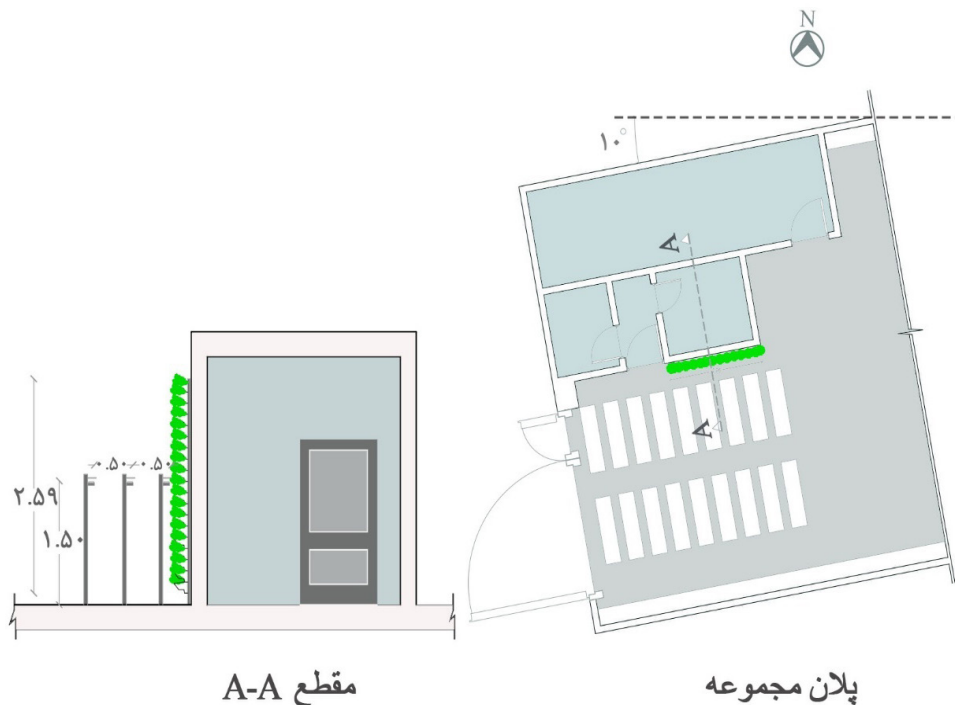
نمونه انتخاب شده دارای پانل‌هایی از جنس پلی‌پروپیلن (متعلق به شرکت دیوار سبز تیاب)^۴، به صورت دوقلو است که دیوار سبزی به ابعاد ۲٫۹۶ در ۲٫۵۹ متر ایجاد کرده است. المان‌های دیوار سبز را می‌توان به طور مستقیم و غیرمستقیم به دیوار متصل نمود. در این نمونه با روش غیرمستقیم، پروفیل با فاصله ۵ سانتی‌متر به دیوار متصل و سپس گلدان‌ها به آن وصل شده‌اند (شکل ۳).



شکل ۳. عکس دیوار سبز مجموعه و ابعاد و اندازه‌های آن

در این پژوهش، به منظور مقایسه تأثیر بخش سبز دیوار و بخش عاری از گیاه بر شرایط محیطی، اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شدند. به منظور اطمینان از دقت داده‌ها، دیوار کنترل در همان راستای دیوار سبز انتخاب شد و هر دو دیوار دارای جبهه جنوب- جنوب شرقی بودند، که این انتخاب به دلیل بیشترین اثرگذاری تابش خورشیدی بر دیوارهای جنوبی در منطقه مورد مطالعه بود. برداشت‌های میدانی شامل جمع‌آوری داده‌های دمای هوا (Ta)، رطوبت نسبی (RH) و دمای نقطه شبنم (Td) در فواصل مختلف از هر دو بخش دیوار بود تا تأثیر پوشش گیاهی بر بهبود شرایط محیطی و محدوده فاصله تأثیرگذار آن تعیین گردد. برای ضبط داده‌ها از دستگاه‌های دیتالاگر استفاده شد. این دستگاه‌ها به صورت پیوسته و شبانه‌روزی به مدت ۱۰ روز در بازه زمانی ۲۷ مهرماه تا ۲۸ آبان ماه داده‌ها را ثبت کردند. دیتالاگرها در ارتفاع ۱٫۵ متری از سطح زمین (در سطح انسانی و برای ارزیابی آسایش حرارتی و شرایط محیطی)، بر روی پایه‌های چوبی قرار گرفتند. استاندارد ایزو ۷۷۲۶ برای افراد ایستاده، ارتفاع‌های ۱٫۸ متر (سطح شکم) و ۱٫۷ متر (سطح سر) را

پیشنهاد می‌کند (Standard ISO 7726, 1998). در این پژوهش، ارتفاع ۱٫۵ متری به عنوان یک نقطه بینابینی انتخاب شد که بتواند شرایط مختلف بدن را پوشش داده و تحلیل دقیق‌تر تأثیرات حرارتی دیوار سبز بر احساس حرارتی را ممکن سازد. همچنین با مرور مطالعات مشابه، مشخص شد که مطالعات متعددی از ارتفاع ۱٫۵ متر برای استقرار حسگرها استفاده کرده‌اند. این انتخاب به دلایل متعددی از جمله تعادل میان ارتفاع‌های پیشنهادی استاندارد و دستیابی به داده‌های پایدار و قابل اعتماد در محیط‌های بیرونی انجام شده است (Cui et al., 2022; Solera Jimenez, 2018; Tabatabaei & Fayaz, 2023; Wahba et al., 2019). استفاده از پایه‌های چوبی به دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین چوب، به منظور به حداقل رساندن تأثیرات حرارتی پایه‌ها انجام شد. سنسور دستگاه‌ها در فواصل ۰٫۵ متر، ۰٫۵ متر و ۱ متری از دیوارها قرار گرفتند. آبیاری دیوار سبز در روزهای مدنظر، به صورت دستی و یک روز در میان در ساعت معین انجام شد تا شرایط رشد گیاه حفظ شده و تأثیرات ناشی از تغییرات رطوبتی به درستی ارزیابی گردد. این انتخاب‌ها، به کاهش اختلالات احتمالی و افزایش دقت اندازه‌گیری‌های میدانی کمک کرد (شکل ۴).



شکل ۴. پلان و مقطع محل نصب دیوار سبز، واقع بر جبهه جنوب-جنوب شرقی

در این مطالعه، برداشت‌های میدانی با استفاده از دستگاه‌های دیتالاگر که مشخصات آن‌ها در جدول (۱) آمده است، انجام شد.

جدول ۱. ابزارهای اندازه‌گیری

دستگاه	متغیر	کد	واحد	محدوده	دقت	تعداد
دیتالاگر MIC-۹۸۵۸۶	دمای هوا رطوبت نسبی دمای نقطه شبنم دمای تر	Ta RH Td Tw	°C % °C °C	۴۰- تا ۸۵°C ۰٫۱ تا ۹۹٫۹ % - -	±۰٫۶°C ±۳ % - -	۲
دیتالاگر MIC-۹۸۵۸۳	دمای هوا رطوبت نسبی	Ta RH	°C %	۴۰- تا ۸۵°C ۰٫۱ تا ۹۹٫۹ %	±۰٫۶°C ±۳ %	۲
دیتالاگر CEM-۱۷۲ TK	دمای هوا رطوبت نسبی دمای سطح	Ta RH Ts	°C % °C	۴۰- تا ۷۰°C ۱۰۰ % تا ۱۰۰۰ % ۲۰۰- تا ۱۳۷۰°C	±۰٫۵°C ±۳٫۵ % بالای ۱۰۰°C: ۰٫۱۵%rgd+۱٫۰°C زیر ۱۰۰°C: ۰٫۵%rgd+۲٫۰°C	۱

در ادامه، برای تحلیل داده‌های میدانی از زبان برنامه‌نویسی پایتون به عنوان ابزار تحلیل استفاده شد. پایتون با بهره‌گیری از کتابخانه‌های قدرتمند پنداس^۵ برای پردازش داده‌های جدولی، نامپی^۶ برای محاسبات عددی و مت‌پلات‌لیب^۷ برای بصری‌سازی داده‌ها، به عنوان روشی کارآمد در تحلیل داده‌های این پژوهش به کار گرفته شد. داده‌های خام حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی، پس از پالایش و پیش‌پردازش اولیه (شامل تبدیل داده‌ها به مقیاس‌های مناسب، حذف داده‌های ناپیوسته، رفع خطاهای اندازه‌گیری و هموارسازی داده‌ها)، برای تجزیه و تحلیل شاخص‌های مؤثر بر خرد اقلیم پیرامونی به کار گرفته شدند. شاخص گرما^۸، شاخص رطوبت^۹، شاخص استرس گرمایی کشنده^{۱۰} و شاخص احساس گرمای تابستانی^{۱۱} به منظور ارزیابی تأثیر دیوار سبز بر شرایط حرارتی و رطوبتی محیط محاسبه گردیدند. در ادامه معادله‌های به کار گرفته شده در تحلیل شاخص‌ها ارائه شده است.

شاخص گرما (HI) مبین دمای واقعی احساس شده توسط انسان است که اندازه دقیقی از احساس گرما در ترکیب معینی از دما و رطوبت به طور هم‌زمان ارائه می‌دهد و به عنوان یک شاخص اقلیمی مؤثر بر راحتی انسان قلمداد می‌شود (درگاهیان و رضایی، ۱۳۹۳). این شاخص زمانی از طریق معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$HI(F^{\circ}) = -42379 + 2.04901523 \times Ta + 1014333127 \times RH - 022475541 \times Ta \times RH - 68378 \times 10^{-3} \times Ta^2 - 548172 \times 10^{-2} \times RH^2 + 1229 \times 10^{-3} \times Ta^2 \times RH + 8528 \times 10^{-4} \times Ta \times RH^2 - 199 \times 10^{-6} \times Ta^2 \times RH^2 \quad (1)$$

اگر RH کمتر از ۱۳٪ و دما بین ۸۰°F تا ۱۱۲°F (۲۶٫۶°C و ۴۴٫۴°C) باشد، تنظیم زیر از HI کم می‌شود:

$$ADJUSTMENT = \left[\frac{13 - RH}{4} \right] \times SQRT \left[\frac{17 - ABS(Ta - 95)}{17} \right]$$

در معادله، T_a ، HI ، RH و ABS و $SQRT$ به ترتیب نشان دهنده شاخص گرما و دمای هوا برحسب $^{\circ}F$ ، رطوبت نسبی برحسب % و قدر مطلق و توابع ریشه مربع هستند (Mohammad, 2024, 6).

شاخص رطوبت (HD) بیانگر درک ذهنی از دمایی است که بدن انسان در محیط بیرون احساس می‌کند (Lukić et al., 2019). این شاخص به دلیل آنکه بر اثرات ترکیبی دما و رطوبت تمرکز می‌کند می‌تواند بینش‌های بیشتری در مورد چگونگی تأثیر پوشش گیاهی بر گرمای درک شده ارائه دهد. شاخص رطوبت با استفاده از معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$HD(^{\circ}C) = T_a + (05555 \times (e - 10)) \quad (2)$$

$$e = 611 \times \exp \left(54177530 \times \left(\left(\frac{1}{27316} \right) - \left(\frac{1}{T_d} \right) \right) \right)$$

که در معادله، HD ، T_a ، T_d و e به ترتیب نشان دهنده شاخص رطوبت و دمای هوای خشک بر حسب $^{\circ}C$ ، دمای نقطه شبنم برحسب کلوین (K)، فشار بخار آب برحسب هکتوپاسکال و $\exp$ نشان دهنده تابع نمایی هستند (Zamanian et al., 2017, 3).

شاخص استرس گرمای کشنده ($LHSI$) یک شاخص است که برای ارزیابی میزان خطرناک بودن استرس گرمایی بر سلامت انسان به کار می‌رود. این شاخص زمانی مورد توجه قرار می‌گیرد که دما و رطوبت محیط به حدی بالا بروند که بدن نتواند به طور مؤثر گرما را دفع کند و این وضعیت ممکن است به گرم‌زدگی شدید، آسیب‌های جدی به اندام‌های داخلی و حتی مرگ منجر شود. به طور کلی، این شاخص به مسئولان و پژوهشگران کمک می‌کند تا وضعیت‌های خطرناک گرمایی را پیش‌بینی کرده و برای جلوگیری از آسیب‌ها، اقدامات پیشگیرانه مانند تغییر ساعات کار، تأمین آب کافی و ایجاد سایه یا استراحت در محیط‌های خنک‌تر را برنامه‌ریزی کنند. شاخص استرس گرمایی کشنده که توسط ووتر و همکاران در سال ۲۰۲۲ محاسبه شده است، با استفاده از دمای تر (T_w) معادله (۳) و رطوبت نسبی (RH) از طریق معادله (۴) برآورد می‌شود.

$$T_w(^{\circ}C) = T_a \times \operatorname{atan}(0151977 \times \sqrt{RH} + 8313659) + \operatorname{atan}(T_a + RH) - \operatorname{atan}(RH - 167633) + 000391838 \times RH^{\frac{3}{2}} \times \operatorname{atan}(0023101 \times RH) - 468635 \quad (3)$$

که در آن، T_w ، T_a ، RH و به ترتیب نشان دهنده دمای تر، دمای هوا، برحسب و رطوبت نسبی برحسب % و تابع قطبی (مماس معکوس) هستند.

$$LHSI(^{\circ}C) = T_w + 45 \left(1 - \left[\frac{RH}{100} \right]^2 \right) \quad (4)$$

که در معادله، T_w و RH ، به ترتیب نشان دهنده شاخص استرس گرمای کشنده و دمای تر برحسب و رطوبت نسبی برحسب % هستند (Mohammad, 2024, 6).

و در نهایت، شاخص احساس گرمای تابستانی (SSI) یکی دیگر از شاخص‌های آسایش حرارتی است که دمای درک شده را با ترکیب دمای هوا و رطوبت نسبی اندازه‌گیری می‌کند. شاخص جدید احساس گرمای تابستانی، تنها شاخص دما-رطوبت است که از نتایج مدل‌های فیزیولوژیکی اثبات شده و آزمایش‌های انسانی استفاده می‌کند. این شاخص، نه تنها به عنوان نشانه‌ای از اینکه گرما چقدر احساس می‌شود استفاده می‌شود، بلکه به عنوان هشدار قابل تشخیص برای افرادی که در معرض خطرات فیزیولوژیکی ناشی از گرما هستند نیز عمل می‌کند. برخلاف سایر شاخص‌ها، شاخص احساس گرمای تابستانی، دیدگاه متفاوتی در مورد اینکه چگونه دما و رطوبت با هم بر آسایش انسان تأثیر می‌گذارند، ارائه می‌دهد. این شاخص از طریق معادله (۵) محاسبه می‌شود.

$$SSI(F^{\circ}) = (198 \times (Ta - (055 - (00055 \times RH))) \times (Ta - 58)) - 5683 \quad (5)$$

که در معادله، SSI، Ta، و RH به ترتیب شاخص احساس گرمای تابستانی و دمای هوا برحسب F° و رطوبت نسبی برحسب % است (Ghalhari et al., 2022, 3).

یافته‌ها و بحث

داده‌های میدانی جمع‌آوری شده به منظور بررسی تأثیر دیوار سبز بر شرایط پیرامونی تحلیل شدند. در ابتدا، به مدت سه روز پیاپی قبل از نصب گیاهان در پانل‌های تعبیه‌شده و سپس در روزهای بعد از قرارگیری گیاهان، داده‌برداری انجام شد. در سه روز ابتدایی که دیوار سبز آبیاری نشده بود، مشاهده شد که دیوار سبز عملکرد معمول خود را نداشته و تفاوت دمای پیرامونی بین دیوار سبز و دیوار کنترل، جزئی شده است. این نتایج تأثیر قابل توجه آبیاری گیاهان بر عملکرد حرارتی دیوار سبز را تأیید می‌کند. بنابراین، آبیاری قبل از شروع اندازه‌گیری‌ها به صورت یک روز درمیان و در ساعات معین انجام شد. در ادامه، به مدت ۶ روز، اندازه‌گیری‌های پیاپی با تغییر فاصله دستگاه‌ها از دیوارها انجام شد. همچنین، با فاصله زمانی، یک روز اضافی برای بررسی تکرارپذیری نتایج، در فاصله ۰٫۵ متری انجام شد. نتایج حاصل از ۶ روز اندازه‌گیری مداوم (هر دو روز در یک فاصله) در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. داده‌های به دست آمده حاصل از برداشت‌های میدانی به صورت ۲۴ ساعته در فواصل معین از دیوار سبز و دیوار عاری (کنترل)

							مدت زمان برداشت داده‌ها		
							دیوار		
							روزها		
							فاصله از دیوارها		
دمای نقطه شبنم (°C)		رطوبت نسبی (%)		دمای خشک (°C)		مقدار	روز	فاصله	
دیوار سبز	دیوار عاری	دیوار سبز	دیوار عاری	دیوار سبز	دیوار عاری				
-۳٫۳	-۳٫۰	۱۱٫۷	۸٫۹	۱۰٫۳	۱۰٫۸	حداقل	روز ۱	بلافاصله بعد از دیوارها	
۰٫۵	۱٫۱	۲۸٫۸	۲۷٫۷	۲۱٫۱	۲۲٫۹	میانگین			
۴٫۹	۵٫۲	۴۷٫۳	۴۷٫۴	۳۷٫۲	۴۰٫۸	حداکثر			
-۳٫۶	-۲٫۷	۱۰٫۸	۱۰٫۹	۱۲	۱۲٫۵	حداقل	روز ۲		۰٫۵ متری از دیوارها
-۰٫۳	۰٫۴	۲۴٫۴	۲۴	۲۲	۲۳٫۴	میانگین			
۴٫۳	۵٫۴	۴۳٫۶	۴۳٫۷	۳۸٫۵	۳۹٫۵	حداکثر			
-۶٫۹	-۶٫۹	۹٫۵	۸٫۵	۷٫۶	۸٫۷	حداقل	روز ۳	۰٫۵ متری از دیوارها	
-۲٫۸	-۲٫۱	۲۷٫۵	۲۶٫۵	۱۷٫۹	۱۹٫۸	میانگین			
۰٫۳	۱٫۴	۴۶٫۷	۴۷٫۳	۳۱٫۷	۳۳٫۷	حداکثر			
-۱۲٫۹	-۱۳٫۷	۶٫۷	۴٫۹	۶٫۵	۷٫۶	حداقل	روز ۴		۰٫۵ متری از دیوارها
-۴٫۵	-۳٫۸	۲۶٫۷	۲۵٫۶	۱۷٫۴	۱۹٫۵	میانگین			
-۱٫۶	-۰٫۶	۵۱٫۲	۵۱٫۲	۳۲٫۳	۳۵٫۱	حداکثر			

۱ متری از دیوارها	روز ۵	حداقل	۱۰٫۵	۱۰	۱۰٫۷	۱۱	-۷٫۸	-۱۰
		میانگین	۱۹٫۳	۱۸٫۲	۲۳٫۹	۲۳٫۶	-۲٫۹	-۳٫۷
		حداکثر	۳۵٫۹	۳۱٫۹	۴۳٫۷	۴۱٫۲	۱٫۶	۱٫۵
	روز ۶	حداقل	۱۰٫۳	۹٫۸	۱۶٫۶	۱۷٫۲	-۷٫۶	-۸٫۷
		میانگین	۱۹٫۴	۱۸٫۴	۳۲٫۶	۳۲٫۹	۱٫۳	۰٫۹
		حداکثر	۳۲	۳۰٫۴	۵۱٫۴	۵۰٫۵	۴٫۴	۴٫۸

با فاصله زمانی، با تکرار قرارگیری دستگاه‌ها در فاصله نیم متر، برداشت‌ها انجام شد، که نتایج در جدول (۳) آمده است:

جدول ۳. داده‌های به دست آمده از برداشت‌های میدانی مجاور دیوار سبز و دیوار کنترل (تکرار فاصله ۰٫۵ متری)

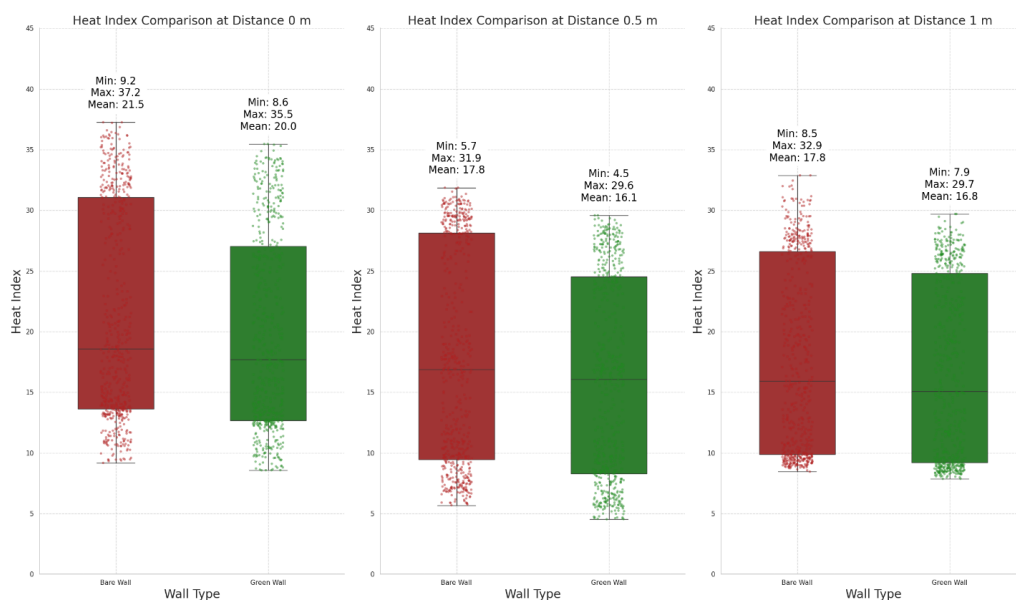
فاصله	روز	مقدار	دمای خشک (°C)		رطوبت نسبی (%)		دمای نقطه شبنم (°C)	
			دیوار عاری	دیوار سبز	دیوار عاری	دیوار سبز	دیوار عاری	دیوار سبز
۰٫۵ متری از دیوارها	روز ۷	حداقل	۷٫۸	۷	۲۴٫۶	۲۵٫۶	۱٫۵	۱
		میانگین	۱۵٫۶	۱۴٫۱	۴۶٫۲	۴۸٫۱	۳٫۱	۲٫۷
		حداکثر	۲۷٫۵	۲۴٫۶	۶۷٫۵	۶۸٫۴	۵٫۹	۴٫۹

با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که همواره دیوار سبز موجب کاهش دما و بهبود شرایط محیطی شده است. حداکثر دماها در بازه زمانی ۱ تا ۲ بعدازظهر و حداقل دماها در ساعات اولیه صبح (حدود ساعت ۶) ثبت گردیده‌اند. برای ارزیابی صحیح تأثیر دیوار سبز، ضروری است که اثر ترکیبی دما و رطوبت حاصل از آن در طی شبانه‌روز مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور، استفاده از شاخص‌های حرارتی به عنوان ابزارهایی کارآمد به ما کمک می‌کند تا تأثیرات این سیستم بر شرایط محیطی را به طور دقیق‌تر تحلیل و ارزیابی کنیم.

در ادامه، شاخص‌های مؤثر بر تحلیل شرایط حرارتی محیط بیرونی مجاور دیوار سبز و دیوار عاری محاسبه شدند. برای نمایش بصری توزیع داده‌ها از نمودار جعبه^{۱۳} استفاده شد. این نمودارها شاخص‌ها را برای دیوار عاری (با رنگ قرمز) و دیوار سبز (با رنگ سبز) در فواصل مختلف مقایسه می‌کنند و مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین هر شاخص را به وضوح نمایش می‌دهند. هر نمودار حاصل از دوشبانه روز اندازه‌گیری است.

شاخص گرما (HI)

شاخص HI در فاصله‌های مختلف (۰ متر، ۰٫۵ متر و ۱ متر) از دیوار عاری و دیوار سبز در شکل (۵) مقایسه شدند. ابتدا داده‌ها به درجه فارنهایت تبدیل و پس از اعمال در فرمول، نتایج به درجه سانتی‌گراد برگردانده شده و در نمودارهای زیر ارائه شده‌اند.

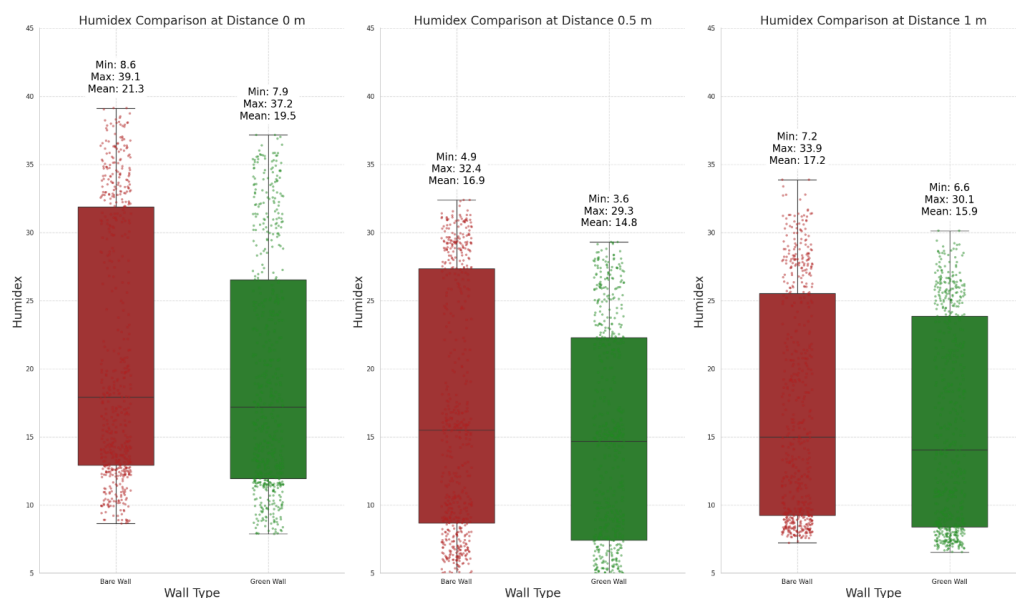


شکل ۵. مقایسه شاخص گرما (HI) مجاور دیوار عاری و دیوار سبز در فواصل ۰ متر، ۰٫۵ متر و ۱ متر

همان‌گونه که نمودار جعبه ارائه شده نشان می‌دهد بلافاصله در جلوی دیوارها (۰ متری)، دیوار سبز موجب کاهش میانگین شاخص گرما به میزان 1.5°C نسبت به دیوار عاری شده است. در فاصله ۰٫۵ متری، این کاهش به 1.7°C و در فاصله ۱ متری به 1°C می‌رسد.

شاخص رطوبت (HD)

شاخص HD در فاصله‌های مختلف (۰٫۵ متر و ۱ متر) از دیوار عاری و دیوار سبز در شکل (۶) مقایسه شدند.

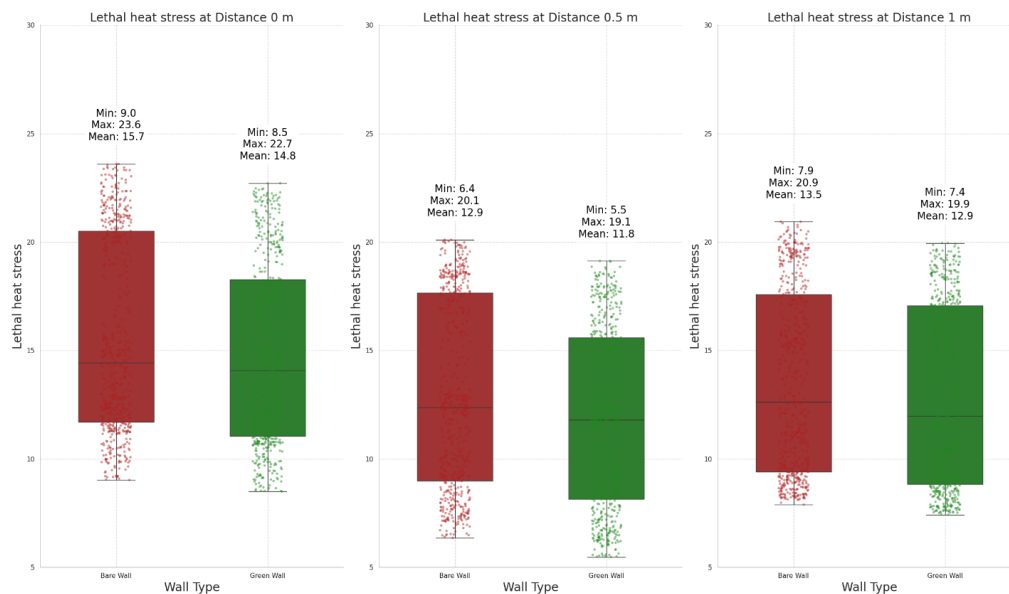


شکل ۶. مقایسه شاخص رطوبت (HD) مجاور دیوار عاری و دیوار سبز در فواصل ۰ متر، ۰٫۵ متر و ۱ متر

بلافاصله در جلوی دیوارها (۰ متری)، دیوار عاری مقادیر بالاتری از شاخص رطوبت را با میانگین $21,3^{\circ}\text{C}$ نشان می‌دهد، درحالی‌که میانگین دیوار سبز با $18,8^{\circ}\text{C}$ کاهش، $19,5^{\circ}\text{C}$ است. این تفاوت حاکی از یک اثر خنک‌کننده است که توسط دیوار سبز ایجاد می‌شود و ناراحتی حرارتی نزدیک به دیوار را کاهش می‌دهد. با افزایش فاصله به $0,5$ متر، دیوار عاری، مقادیر میانگین شاخص رطوبت را به میزان $22,1^{\circ}\text{C}$ بیشتر از این میزان درمقابل دیوار سبز نشان می‌دهد، که بیانگر تأثیر پوشش گیاهی در تعدیل تنش گرمایی در این فاصله است. در فاصله یک متری، تفاوت بین دو دیوار، کمی کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که دیوار سبز میانگین شاخص رطوبت را به میزان $18,3^{\circ}\text{C}$ نسبت به دیوار عاری بهبود می‌بخشد.

شاخص استرس گرمای کشنده (LHSI)

در اینجا، شاخص LHSI در فاصله‌های مختلف (۰ متر، $0,5$ متر و ۱ متر) از دیوار عاری و دیوار سبز در شکل (۷) مقایسه شدند.

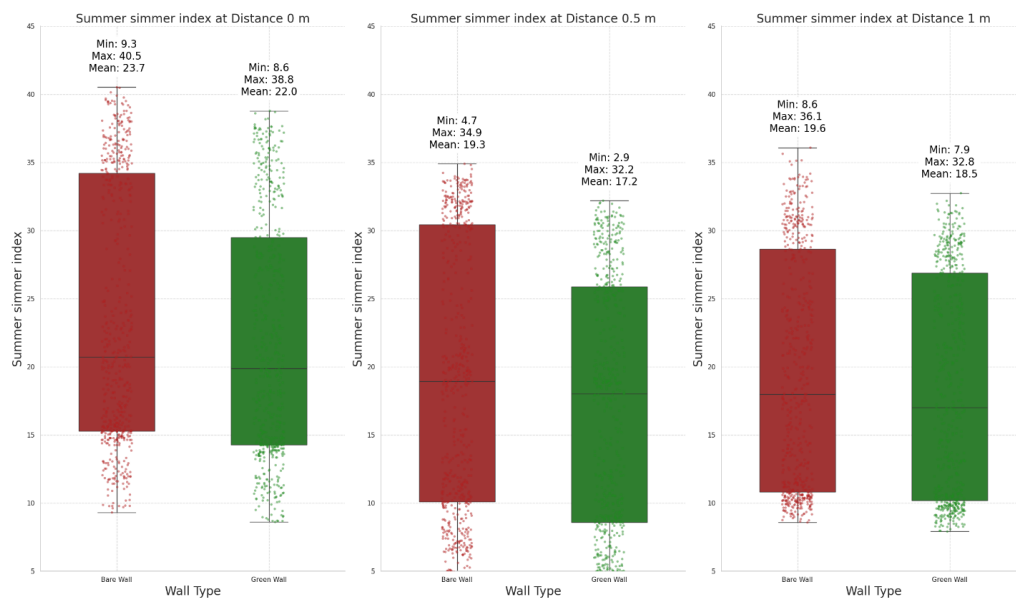


شکل ۷. مقایسه شاخص استرس گرمای کشنده (LHSI) مجاور دیوار عاری و دیوار سبز در فواصل ۰ متر، $0,5$ متر و ۱ متر

ارزیابی شاخص استرس گرمای کشنده نشان می‌دهد که بلافاصله در جلوی دیوارها، دیوار سبز میانگین این شاخص را به میزان $0,9^{\circ}\text{C}$ کمتر درمقایسه با دیوار عاری نشان می‌دهد. در فاصله $0,5$ متری، دیوار سبز بیشترین تأثیرگذاری را بر شاخص استرس گرمای کشنده داشته و میانگین این شاخص را از $12,9^{\circ}\text{C}$ به $11,8^{\circ}\text{C}$ کاهش داده است. با افزایش فاصله به ۱ متر، دیوار سبز به‌طور میانگین موجب کاهش $0,6^{\circ}\text{C}$ در این شاخص شده است.

شاخص احساس گرمای تابستانی (SSI)

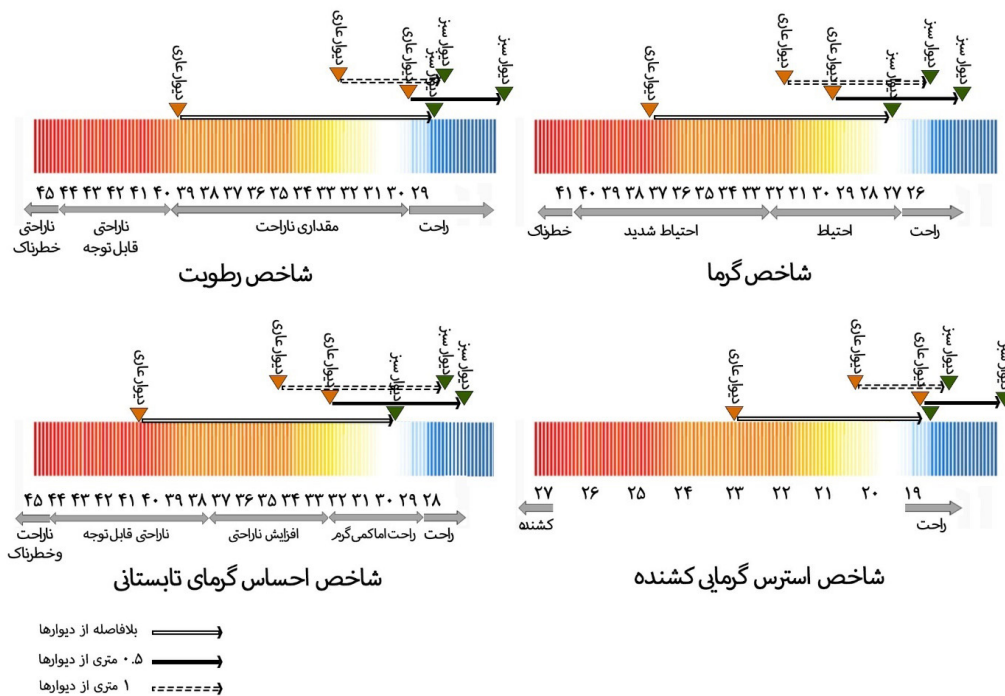
شاخص SSI در فاصله‌های مختلف (۰ متر، $0,5$ متر و ۱ متر) از دیوار عاری و دیوار سبز محاسبه شد. فرمول این شاخص براساس فارنهایت است، بنابراین ابتدا داده‌ها به درجه فارنهایت تبدیل و پس از اعمال در فرمول، نتایج به درجه سانتی‌گراد برگردانده شده و در نمودارهای شکل (۸) ارائه شده‌اند.



شکل ۸. مقایسه شاخص احساس گرمای تابستانی (SSI) مجاور دیوار عاری و دیوار سبز در فواصل ۰ متر، ۰٫۵ متر و ۱ متر

نمودارهای جعبه در گراف ارائه شده در هر سه فاصله نشان دهنده کاهش میانگین شاخص احساس گرمای تابستانی به ترتیب به میزان 1°C ، 2°C و 1°C نسبت به مقادیر میانگین این شاخص در مجاورت دیوار عاری است.

بررسی شاخص‌های حرارتی نشان می‌دهد که دیوار سبز به طور میانگین بیشترین اثرگذاری بر بهبود شرایط حرارتی در فاصله ۰٫۵ متری نسبت به دیوار عاری داشته است. در شکل (۹)، تغییرات شاخص‌های احساس حرارتی با استفاده از طیف‌های رنگی حرارتی و براساس بازه‌های استاندارد تعریف شده از شاخص گرما (Salamone et al., 2017, 3)، شاخص رطوبت (d'Ambrosio Alfano et al., 2011, 98)، شاخص استرس گرمایی کشنده (Wouters et al., 2022, 3) و شاخص احساس گرمای تابستانی (Ghalhari et al., 2022, 3)، به صورت گرافیکی نمایش داده شده‌اند. این نمودارها با در نظر گرفتن مقدار شاخص‌های حرارتی در مجاورت دیوار عاری در ساعت پیشینه مقدار شاخص‌ها (۲ بعد از ظهر) و مقایسه هم‌زمان آن با شرایط حرارتی مجاور دیوار سبز در سه فاصله ۰٫۵، ۱ و ۰٫۵ متری ترسیم شده‌اند. هر شاخص حرارتی براساس محدوده‌های استاندارد تعریف شده در مطالعات پیشین ارزیابی شده است.



شکل ۹. تغییرات ایجاد شده توسط دیوار سبز نسبت به دیوار عاری (در فواصل ۰.۵ و ۱ متری) در ساعت بیشینه مقدار شاخص‌های حرارتی (۲ بعد از ظهر)، در محدوده‌های استاندارد تعریف شده برای شاخص‌های حرارتی

همان‌گونه که از تجزیه و تحلیل نمودارها مشخص است، دیوار سبز با کاهش قابل توجه در تمامی شاخص‌ها در ساعت اوج گرمای روز (۲ بعد از ظهر)، شرایط محیطی را به وضعیت راحتی نزدیک‌تر کرده است. این کاهش‌ها نشان‌دهنده تأثیر مثبت دیوار سبز در اقلیم‌های گرم و نیمه‌خشک است که با بهبود دما و رطوبت، به‌طور مؤثر از استرس حرارتی می‌کاهد و احساس حرارتی افراد را بهبود می‌بخشد. با تجزیه و تحلیل یافته‌های حاصل از محاسبه شاخص‌های حرارتی در ساعات اوج گرمای روز (۱۱ پیش از ظهر تا ۵ بعد از ظهر) مشخص شد که دیوار سبز به‌طور میانگین شاخص گرما را به ترتیب به میزان 3.1°C ، 2.7°C و 1.9°C در فواصل صفر و نیم و یک متری از دیوار کاهش می‌دهد. همچنین، شاخص رطوبت نیز به ترتیب به میزان 3.9°C ، 3.7°C و 2.3°C در همین فواصل کاهش می‌دهد. به همین منوال، دیوار سبز به‌طور میانگین شاخص استرس گرمایی کشنده را به ترتیب به میزان 1.6°C ، 1.5°C و 0.8°C و احساس گرمای تابستانی را به میزان 3.5°C ، 3.4°C و 2.2°C در فواصل صفر و نیم و یک متری از دیوار کاهش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به بررسی تأثیر دیوارهای سبز بر خرد اقلیم پیرامونی با محاسبه شاخص‌های احساس حرارتی و استرس حرارتی در مقیاس واقعی پرداخته شد. جبهه دیوار سبز و دیوار کنترل، جبهه جنوب-جنوب شرقی بود که با توجه به موقعیت جغرافیایی و اقلیم گرم و نیمه‌خشک شیراز، در طول روز و به‌ویژه در ساعات میانی روز، در معرض تابش مستقیم خورشید قرار دارد. در فصل پاییز، با کاهش شدت تابش خورشید نسبت به فصل تابستان، دیوارها همچنان در معرض تابش مستقیم بوده و تأثیرات قابل توجهی بر دمای سطح و محیط اطراف دارند. این شرایط، با اهداف پژوهش که بررسی میزان تأثیرگذاری دیوار سبز

در معرض تابش، بر شرایط خرداقلیم پیرامونی بود، همسو بود. داده‌های حاصل از روزهای برداشت بدون آبیاری دیوار سبز، کاهش قابل توجه اثرگذاری دیوار سبز را نشان داد. این موضوع بیانگر نیاز اساسی به یک سیستم آبیاری و برنامه نگهداری منظم برای حفظ فرایندهای طبیعی پوشش گیاهی و اطمینان از عملکرد مطلوب دیوار سبز است. تحلیل داده‌های به دست آمده از محاسبه شاخص‌های حرارتی درمقابل دیوار سبز و مقایسه آن با دیوار عاری نشان داد که دیوار سبز به طور میانگین در فاصله ۰/۵ متری بیشترین تأثیر را بر کاهش شاخص‌های حرارتی داشته است و میانگین کاهش دمایی تا $2,1^{\circ}\text{C}$ ، در طول شبانه‌روز مشاهده شد. همچنین، در ساعات اوج گرمای روز، کاهش چشمگیر شاخص گرما تا $3,1^{\circ}\text{C}$ ، شاخص رطوبت تا $3,9^{\circ}\text{C}$ ، استرس گرمایی کشنده تا $1,6^{\circ}\text{C}$ و احساس گرمای تابستانی تا $3,5^{\circ}\text{C}$ ، نشان دهنده دیوارهای سبز به عنوان یک راهکار مؤثر در اقلیم گرم و نیمه خشک شهر شیراز در فصل پاییز بر بهبود شرایط خرداقلیمی و احساس حرارتی است.

در تحقیقات آینده، می‌توان با ترکیب دیوار سبز با راهکارهایی مانند سایه بان‌ها و افشانه‌های آب، اثرات ترکیبی این فناوری‌ها را بر شرایط خرداقلیمی و شاخص‌های احساس حرارتی بررسی کرد. علاوه بر این، تأثیر هم‌زمان این فناوری بر مصرف انرژی ساختمان و کیفیت هوای داخلی می‌تواند به بهبود طراحی و کاهش نیاز به سیستم‌های خنک‌کننده در اقلیم‌های گرم و نیمه خشک کمک کند. همچنین، مطالعه دیوارهای سبز به عنوان راهکاری برای کاهش آلودگی‌های محیطی و صوتی و تأثیر آن‌ها بر کیفیت زندگی از دیگر مسیرهای تحقیقاتی پیشنهادی است.

پی‌نوشت‌ها

1. Autodesk green building studio نرم‌افزار شبیه‌سازی استودیو ساختمان سبز
2. Hot semi-arid climates آب و هوای گرم نیمه خشک
3. EnergyPlus Weather (EPW) فایل‌های آب و هوایی
4. <https://www.tiabgreenwall.com/> شرکت دیوار سبز تیاب
5. Pandas
6. NumPy
7. Matplotlib
8. Heat Index (HI): شاخص گرما
9. Humidex Index (HD): شاخص رطوبت
10. Lethal Heat Stress Index (LHSI): شاخص استرس گرمایی کشنده
11. Summer Simmer Index (SSI): شاخص احساس گرمای تابستانی
12. Box plot

جدول اختصارات

ترجمه	معادل	اختصار	ترجمه	معادل	اختصار
سازمان بین‌المللی استانداردسازی	International Organization for Standardization	ISO	آب و هوای گرم و نیمه خشک	Hot semi-arid climate	BSh
درجه سانتی‌گراد	Centigrade	$^{\circ}\text{C}$	فایل‌های آب و هوایی	EnergyPlus Weather	EPW
کلوین	Kelvin	K	دمای هوا	air Temperature	Ta
فارنهایت	Fahrenheit		رطوبت نسبی	Relative Humidity	RH

شاخص گرما	Heat Index	HI	دمای نقطه شبنم	Dew point Temperature	Td
شاخص رطوبت	Humidex	HD	دمای تر	Wet bulb Temperature	Tw
شاخص استرس گرمای کشنده	Lethal Heat Stress Index	LHSI	دمای سطح	Surface Temperature	TS
شاخص احساس گرمای تابستانی	Summer Simmer Index	SSI	مقدار خوانده شده	Reading	Rgd

فهرست منابع

- آزموده، مریم (۱۴۰۰). چگونگی عملکرد گیاهان در تعدیل پارامترهای مؤثر بر آسایش حرارتی در فضای شهری نمونه پژوهش: دیوار سبز شهری در تهران. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۲(۳)، ۶۷-۸۰.
- آزموده، مریم و حیدری، شاهین (۱۳۹۶). تأثیر دیوارهای سبز شهری بر کاهش دمای خرداقلیم‌ها و اثر جزیره گرمایی شهری. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۹(۵)، ۶۰۶-۵۹۷.
- درگاهیان، فاطمه و رضایی، غلامحسین (۱۳۹۳). بررسی شرایط سینوپتیکی و بیوکلیماتولوژی شاخص گرما با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در ایستگاه‌های ساحلی و دریایی جنوب و اثرات آن بر روی سلامت انسان. فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، ۲۳(۹۱)، ۴۳-۵۴.
- Acero, J. A., Koh, E. J. Y., Li, X. X., Ruefenacht, L. A., Pignatta, G., & Norford, L. K. (2019). Thermal impact of the orientation and height of vertical greenery on pedestrians in a tropical area. *Building Simulation*, 12(6), 973–984. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0537-1>
- Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M., & Cabeza, L. F. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, 111, 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>
- Cui, D., Zhang, Y., Li, X., Yuan, L., Mak, C. M., & Kwok, K. (2022). Effects of different vertical façade greenery systems on pedestrian thermal comfort in deep street canyons. *Urban Forestry & Urban Greening*, 72, 127582. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2022.127582>
- d'Ambrosio Alfano, F. R., Palella, B. I., & Riccio, G. (2011). Thermal environment assessment reliability using temperature -Humidity indices. *Industrial Health*, 49(1), 95-106. <https://doi.org/10.2486/indhealth.MS1097>
- Dunnett, N., & Kingsbury, N. (2008). *Planting green roofs and living walls* (Rev. ed.). Timber Press.
- Galagoda, R. U., Jayasinghe, G. Y., Halwatura, R. U., & Rupasinghe, H. T. (2018). The impact of urban green infrastructure as a sustainable approach towards tropical micro-climatic changes and human thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.05.008>
- Ghalhari, G. F., Heidari, H., Dehghan, S. F., & Asghari, M. (2022). Consistency assessment between summer simmer index and other heat stress indices (WBGT and Humidex) in Iran's climates. *Urban Climate*, 43, 101178. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101178>
- Hunter, A. M., Williams, N. S. G., Rayner, J. P., Aye, L., Hes, D., & Livesley, S. J. (2014). Quantifying the thermal performance of green façades: A critical review. *Ecological Engineering*, 63, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.021>
- Jim, C. Y. (2015). Greenwall classification and critical design-management assessments. *Ecological Engineering*, 77, 348–362. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.021>
- Katsoulas, N., Antoniadis, D., Tsirogiannis, I. L., Labraki, E., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017).

Microclimatic effects of planted hydroponic structures in urban environment: measurements and simulations. *International Journal of Biometeorology*, 61(5), 943–956. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1274-0>

- Lukić, M., Pecelj, M., Protić, B., & Filipović, D. (2019). An evaluation of summer discomfort in niš (Serbia) using humidex. *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic SASA*, 69(2). <https://doi.org/10.2298/IJGI1902109L>
- Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 863–871. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>
- Medl, A., Mayr, S., Rauch, H. P., Weihs, P., & Florineth, F. (2017). Microclimatic conditions of 'Green Walls', a new restoration technique for steep slopes based on a steel grid construction. *Ecological Engineering*, 101, 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.018>
- Moghaddam, F. B., Mir, J. M. F., Yanguas, A. B., Delgado, I. N., & Dominguez, E. R. (2020). Building orientation in green facade performance and its positive effects on urban landscape: Case study of an urban block in Barcelona. *Sustainability*, 12(21), 9273. <https://doi.org/10.3390/SU12219273>
- Mohammad, P. W. Q. (2024). Comparing existing heat wave indices in identifying dangerous heat wave outdoor conditions. *Nexus*, 1(3), 1–7.
- Morakinyo, T. E., Lai, A., Lau, K. K. L., & Ng, E. (2019). Thermal benefits of vertical greening in a high-density city: Case study of Hong Kong. *Urban Forestry & Urban Greening*, 37, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.010>
- Oquendo-Di Cosola, V., Olivieri, F., & Ruiz-García, L. (2022). A systematic review of the impact of green walls on urban comfort: Temperature reduction and noise attenuation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112463>
- Ottelé, M., & Perini, K. (2017). Comparative experimental approach to investigate the thermal behaviour of vertical greened façades of buildings. *Ecological Engineering*, 108, 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.016>
- Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and Buildings*, 43(12), 3419–3429. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010>
- Palermo, S. A., & Turco, M. (2020). Green Wall systems: Where do we stand? *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 410(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012013>
- Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2014). Vertical greenery systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 139–165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>
- Perini, K., Ottelé, M., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Greening the building envelope, facade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*, 1(1), 1–8. <https://doi.org/10.4236/oje.2011.11001>
- Rahman, A., Wang, C., Rahim, A. M., Loo, S. C., & Miswan, N. (2014). Vertical greenery systems (VGS) in urban tropics. *Open House International*, 39(4), 42–52. <https://doi.org/10.1108/OHI-04-2014-B0005>
- Raji, B., Tenpierik, M. J., & Van Den Dobbelsteen, A. (2015). The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 610–623. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.011>
- Salamone, F., Belussi, L., Danza, L., Ghellere, M., & Meroni, I. (2017). How to define the urban comfort in the era of smart cities through the use of the do-it-yourself approach and new pervasive technologies. *Proceedings of the 4th Electronic Conference on Sensors and Applications*. <https://doi.org/10.1109/ECSSA.2017.8262611>

doi.org/10.3390/ecs-a-4-04921

- Sánchez-Reséndiz, J. A., Ruiz-García, L., Olivieri, F., & Ventura-Ramos, E. (2018). Experimental assessment of the thermal behavior of a living wall system in semi-arid environments of central Mexico. *Energy and Buildings*, 174, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.060>
- Shafiee, E., Faizi, M., Yazdanfar, S. A., & Khanmohammadi, M. A. (2020). Assessment of the effect of living wall systems on the improvement of the urban heat island phenomenon. *Building and Environment*, 178, 106923. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106923>
- Solera Jimenez, M. (2018). Green walls: a sustainable approach to climate change, a case study of London. *Architectural Science Review*, 61(1–2), 48–57. <https://doi.org/10.1080/00038628.2017.1405789>
- International Organization for Standardization (ISO). (1998). *ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical quantities*. ISO.
- Tabatabaei, S. S., & Fayaz, R. (2023). The effect of facade materials and coatings on urban heat island mitigation and outdoor thermal comfort in hot semi-arid climate. *Building and Environment*, 243, 110701. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110701>
- Wahba, S., Kamil, B., Nassar, K., & Abdelsalam, A. (2019). Green envelope impact on reducing air temperature and enhancing outdoor thermal comfort in arid climates. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 5(5), 1269–1281. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091317>
- Wong, N. H., Kardinal Jusuf, S., Aung La Win, A., Kyaw Thu, H., Syatia Negara, T., & Xuchao, W. (2007). Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics. *Building and Environment*, 42(8), 2949–2970. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.004>
- Wouters, H., Keune, J., Petrova, I. Y., van Heerwaarden, C. C., Teuling, A. J., Pal, J. S., de Arellano, J. V. G., & Miralles, D. G. (2022). Soil drought can mitigate deadly heat stress thanks to a reduction of air humidity. *Science Advances*, 8(1), eabe6653. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe6653>
- Yang, F., Yuan, F., Qian, F., Zhuang, Z., & Yao, J. (2018). Summertime thermal and energy performance of a double-skin green facade: A case study in Shanghai. *Sustainable Cities and Society*, 39, 43–51. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.01.049>
- Zamanian, Z., Sedaghat, Z., Hemehrezaee, M., & Khajehnasiri, F. (2017). Evaluation of environmental heat stress on physiological parameters. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 15(24), 1–8. <https://doi.org/10.1186/s40201-017-0286-y>

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Journal of Architecture and Urban Planning. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



نحوه ارجاع به این مقاله

شفیعی، الهام؛ فیضی، محسن؛ یزدانفر، سید عباس و طاهباز و منصوره (۱۴۰۴). بررسی تأثیر دیوارهای سبز بر خرداقلیم پیرامونی در فصل پاییز در اقلیم گرم و نیمه خشک شهر شیراز. فصلنامه علمی نامه معماری و شهرسازی، ۱۷(۴۷)، ۲۸–۴۸.

DOI: 10.30480/aup.2025.5553.2195

URL: https://aup.journal.art.ac.ir/article_1422.html

