

Measuring the Impacts of Urban Green Infrastructure with a Climate-Sensitive Design Approach (Case Study: Gol Mohammadi Neighborhood, Isfahan)

Niousha Timi¹, Mahsa Sholeh², Sahand Lotfi³ and Alireza Sadeghi⁴

1. M. A. Student, Department of Urban Planning and Design, Faculty of Art and Architecture, Shiraz University, Shiraz, Iran
2. Associate Professor, Department of Urban Planning and Design, Faculty of Art and Architecture, Shiraz University, Shiraz, Iran
3. Associate Professor, Department of Urban Planning and Design, Faculty of Art and Architecture, Shiraz University, Shiraz, Iran
4. Associate Professor, Department of Urban Planning and Design, Faculty of Art and Architecture, Shiraz University, Shiraz, Iran

Highlights:

A comprehensive evaluation of Urban Green Infrastructure's role in climate-sensitive urban design. Detailed simulation and analysis of Urban Green Infrastructure impacts across distinct scenarios.

ARTICLE INFO

EXTENDED ABSTRACT

UPK, 2025

VOL. 9, Issue 2, PP, 55-77

Received: 11 Dec 2024

Accepted: 10 Apr 2025

Article Type:

Research article

Keywords:

Urban Green Infrastructure, Climate-Sensitive Design, ENVI-met, Gol Mohammadi Neighborhood, Isfahan

Cite this article:

Timi, N., Sholeh, M., Lotfi, S., Sadeghi, A. (2025). Measuring the Impacts of Urban Green Infrastructure with a Climate-Sensitive Design Approach (Case Study: Gol Mohammadi Neighborhood, Isfahan). *Urban Planning Knowledge*, 9(2), 55-77.

DOI:

[10.22124/UPK.2025.29226.1992](https://doi.org/10.22124/UPK.2025.29226.1992)

Introduction: The growing vulnerability of urban environments and human settlements to changing climatic patterns necessitates transformative urban planning and design approaches. Among these approaches, using Urban Green Infrastructure (UGI) as a pivotal tool for mitigating urban heat islands, enhancing public health, and improving thermal comfort has garnered significant attention. UGI, as an integral component of climate-sensitive urban design, serves to balance natural and built environments, promoting sustainable and energy-efficient urban spaces while safeguarding natural resources. This study examines the impact of UGI within the framework of climate-sensitive design, with a focus on the Gol Mohammadi neighborhood in Isfahan. By synthesizing conceptual insights and analyzing the microclimatic conditions of the area, the study evaluates the environmental benefits and functional efficiency of UGI interventions.

Methodology: A comprehensive mixed-methods approach was adopted, combining qualitative urban design principles with quantitative assessments of UGI's climatic effects. The study utilized ENVI-met software to simulate and analyze six distinct scenarios, each representing different configurations of UGI, such as variations in vegetation coverage and distribution. Logical reasoning and scenario development informed the synthesis of findings, while iterative simulations provided a robust basis for evaluating UGI's impact on critical environmental indices, including temperature, wind speed, and mean radiant temperature. Optimized through comparative analysis, the final scenario was tested to offer actionable insights for integrating UGI into urban design frameworks.

Results: The simulation outcomes reveal that UGI scenarios emphasizing increased tree coverage yielded the most substantial improvements in microclimatic conditions. Trees demonstrated a pronounced capacity for temperature reduction and thermal comfort enhancement, significantly mitigating urban heat island effects.

*Corresponding Author: ahadebrahimi@tabriziau.ac.ir



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Complementary strategies, such as green façades and green roofs, while slightly less effective than tree-based solutions, contributed meaningfully to the overall climatic performance of the neighborhood. The proposed optimal scenario combined strategically positioned trees, façades, and roofs, offering a synergistic model for maximizing UGI efficiency. Moreover, the findings facilitated the development of targeted strategies and policies to integrate UGI into sustainable urban design, ensuring adaptability to diverse climatic contexts.

Discussion: The study categorized UGI applications into six scenarios to explore their impact on the neighborhood's microclimate systematically:

- Scenario S0: No vegetation.
- Scenario SN: Existing vegetation.
- Scenario SG: Maximum tree coverage along streets and gardens.
- Scenario SF: Existing vegetation supplemented by 100% green façades.
- Scenario SR: Existing vegetation complemented by 100% green roofs.
- Scenario SS: Optimized design based on insights from previous scenarios.

Comparative analyses of climatic factors indicated that Scenario SG, emphasizing tree coverage, achieved the most significant temperature reductions and enhanced wind flow, making it particularly effective for improving summer thermal comfort. The SF (green façade) and SR (green roof) scenarios also demonstrated measurable impacts, particularly in reducing localized heat buildup. These findings underscore the versatility of UGI in addressing urban climatic challenges, with each type of intervention offering unique advantages.

Conclusion: This study underscores the transformative potential of UGI in fostering climate-sensitive urban environments. By leveraging advanced simulation techniques, it demonstrates that tree-based solutions significantly mitigate urban heat islands. At the same time, green façades and roofs complement these effects by enhancing energy efficiency and climatic resilience. The findings highlight the importance of integrating UGI into urban design frameworks to harmonize built environments with natural ecosystems. This alignment fosters sustainable urban growth, optimizes resource use, and enhances urban livability.

سنجش اثرات زیرساخت سبز شهری با رویکرد طراحی حساس به اقلیم (مطالعه موردی: محله گل محمدی اصفهان)

نیوشا تیمی^۱، مهسا شعله^{۲*}، سهند لطفی^۳ و علیرضا صادقی^۴

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد طراحی شهری، گروه شهرسازی، دانشگاه شیراز، ایران

۲. دانشیار، گروه شهرسازی، دانشگاه شیراز، ایران

۳. دانشیار، گروه شهرسازی، دانشگاه شیراز، ایران

۴. دانشیار، گروه شهرسازی، دانشگاه شیراز، ایران

نکات برجسته:

تبیین رویکرد زیرساخت سبز شهری و اهمیت آن به عنوان یکی از استراتژی‌های اصلی طراحی شهری حساس به اقلیم، ارزیابی اثرات زیرساخت سبز شهری در سناریوهای شبیه سازی.

چکیده

اطلاعات مقاله

بیان بیان مسئله: آسیب‌پذیری انسان و محیط شهری در برابر تغییر در الگوهای اقلیمی باید با برنامه‌ریزی و طراحی مناسب فضاهای شهری کاهش یابد. در این زمینه، زیرساخت‌های سبز وسیله مهمی برای کاهش گرمای شهری و افزایش سلامت، رفاه و آسایش حرارتی در مناطق شهری است.

هدف: هدف از این پژوهش سنجش اثرات زیرساخت سبز شهری با رویکرد طراحی حساس به اقلیم در محله گل محمدی اصفهان به عنوان نمونه مورد مطالعاتی است. در این راستا ضمن بازخوانی مفاهیم مرتبط با طراحی شهری حساس به اقلیم و نقش زیرساخت سبز شهری در آن، شرایط اقلیمی محدوده مورد مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد تا بتوان اثرات زیرساخت سبز شهری را در شاخص‌های مرتبط مورد ارزیابی قرار داد.

روش: در این پژوهش نقش شبیه‌سازی و تحلیل داده‌ها و سنجش با به کارگیری نرم‌افزار ENVI-met انجام و جهت جمع‌بندی و نتیجه‌گیری تحقیق از استدلال منطقی بهره‌گرفته شده‌است. همچنین روند تحلیلی از طریق سناریونویسی و شبیه‌سازی آنها در نرم افزار شبیه‌ساز اقلیم انجام شده است تا بتوان به سناریوهای مختلف از زیرساخت سبز را مورد ارزیابی قرار داد.

یافته‌ها: براساس داده‌های خروجی سناریو افزایش پوشش گیاهی با بیشترین تغییر در وضعیت خرد اقلیم محله و سپس سناریو نمای سبز و بام سبز با اختلافی جزئی در بهبود شرایط اقلیمی موثر بوده‌اند.

نتیجه‌گیری: رویکرد زیرساخت سبز در راستای طراحی شهری حساس به اقلیم با بهبود پوشش گیاهی شهرها و سوق دادن آنها به سمت اکوسیستم‌های طبیعی در تلاش برای رفع این مشکل است. این رویکرد در تلاش است شهرها را به عنوان جزئی از طبیعت و نه در مقابل طبیعت برنامه‌ریزی نماید.

دانش شهرسازی، ۱۴۰۴

دوره ۹، شماره ۲، صفحات ۵۵-۷۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱

نوع مقاله:

پژوهشی

کلید واژه‌ها: زیرساخت سبز شهری، طراحی شهری حساس به اقلیم، ENVI-met، محله گل محمدی اصفهان

ارجاع به این مقاله:

نیوشا، تیمی، شعله، مهسا، لطفی، سهند، صادقی، علیرضا. (۱۴۰۴)، سنجش اثرات زیرساخت سبز شهری با رویکرد طراحی حساس به اقلیم (مطالعه موردی: محله گل محمدی اصفهان). دانش شهرسازی، ۹(۲)، ۵۵-۷۷.

DOI
[10.22124/UPK.2025.29226.1992](https://doi.org/10.22124/UPK.2025.29226.1992)

نویسنده مسئول: msholeh@shiraz.ac.ir



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

بیان مسئله

امروزه بیش از نیمی از جمعیت جهان در مناطق شهری سکونت دارند و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ میلادی، ۶۶ درصد از جمعیت جهان ساکن شهرها شوند. با اینکه شهرها تنها ۳ درصد از زمین‌های جهان را اشغال می‌کنند، ۷۵ درصد از کل منابع طبیعی را مصرف کرده، ۵۰ درصد از کل زباله‌ها را تولید می‌کنند و موجب انتشار ۶۰ تا ۸۰ درصد از گازهای گلخانه‌ای جهان هستند (Oke, Mills, Christen & Voogt, 2017: 1). این در صورتی است که شرایط اقلیمی خود در حال تغییر بوده است و روند توسعه شهرها بدین شکل شدت آن را افزایش می‌دهد (Pahl-Weber, Seelig, Ohlenburg, & Kuhla von Bergmann, 2013: 33). لندزبرگ در کتاب اقلیم شهری خود بیان می‌دارد که آگاهی نیمه علمی از ناهنجاری اقلیم شهری حداقل به اواسط قرن هجدهم برمی‌گردد (Landsberg, 1981: 3-4). از جمله تغییرات مشاهده شده می‌توان به افزایش امواج گرما و شدت حوادث بارشی شدید در سال‌های اخیر اشاره کرد. با این روند پیش‌بینی می‌شود که چنین شرایط اقلیمی، خطرات قابل‌توجهی را برای جوامع و اکوسیستم‌ها ایجاد کند. به همین سبب، سازگاری با تغییرات اقلیمی در شهرها به یک ضرورت تبدیل شده است (Carter et al, 2015: 3).

بارزترین روش برای به حداقل رساندن اثرات منفی اقلیمی بر شهر، کاهش شدت توسعه شهری با اصلاح جنبه‌های فرم و عملکردی آن است (Oke et al, 2017: 7). برنامه‌ریزی و طراحی شهری نقشی اساسی در واکنش جهانی به تغییرات اقلیمی دارند. اقداماتی که هم‌زمان انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند و باعث ایجاد تاب‌آوری در برابر خطرات اقلیمی می‌شوند. چنین اقداماتی باید در همه مقیاس‌های شهری در اولویت قرار گیرند. این کار باید به روش‌های مناسب و متناسب با شرایط محلی انجام شود (Pahl-Weber et al, 2013: 95). در این میان زیرساخت‌های سبز می‌تواند به کاهش دمای سطح زمین و کاهش جزایر گرمایشی سطح شهر با ایجاد حفاظ در برابر اشعه خورشید و خنک‌کردن سطوح از طریق تبخیر و تعرق کمک کند (Bartasaghi-Koc, Osmond & Peters, 2020: 2). توسعه زیرساخت‌های سبز شهری به عنوان راهکاری برای تحقق تاب‌آوری در برابر اقلیم و همچنین به عنوان یک سیستم پایدار در برنامه‌ریزی شهری ضروری است. از آنجایی که جامعه از خدمات اکوسیستم ارائه شده توسط زیرساخت سبز شهری بهره می‌برد، می‌توان علاوه بر مطالبات زیست‌محیطی، خواسته‌های اجتماعی و اقتصادی را نیز برآورده کرد (Seiwert & Rößler, 2020: 2). آسیب‌پذیری انسان و سیستم شهری در برابر تغییر در الگوهای دما و بارش باید با برنامه‌ریزی و طراحی مناسب فضاهای شهری کاهش یابد. در این زمینه، زیرساخت‌های سبز می‌تواند نقش مهمی برای کاهش گرمای شهری و افزایش سلامت، رفاه و آسایش حرارتی در مناطق شهری است. در بیشتر منابع این اتفاق نظر وجود دارد که افزایش پوشش گیاهی و استفاده از ویژگی‌های منظر طبیعی در طراحی شهری بهترین وسیله برای مدیریت اثرات اقلیم شهری در همه مقیاس‌ها است. از جهتی دیگر زیرساخت می‌تواند فراتر از عملکرد سودمدارانه خود، کاربردهای وسیع فرهنگی، اجتماعی و بوم‌شناختی داشته باشد (Hakimian & Lak, 2017: 87). هدف از این پژوهش سنجش اثرات زیرساخت سبز شهری با رویکرد طراحی حساس به اقلیم در محله گل محمدی اصفهان به عنوان نمونه مورد مطالعاتی است. در این راستا ضمن بازخوانی مفاهیم مرتبط با طراحی شهری حساس به اقلیم و نقش زیرساخت سبز شهری در آن، شرایط اقلیمی محدوده مورد مطالعه در محله گل محمدی اصفهان مورد بررسی قرار می‌گیرد تا بتوان اثرات زیرساخت سبز شهری را در شاخص‌های مرتبط مورد ارزیابی قرار داد.

مبانی نظری

طراحی شهری حساس به اقلیم

در ادبیات شهرسازی، طراحی شهری حساس به اقلیم^۱ به روش‌های مختلف توسط محققان مفهوم‌سازی و استفاده شده است (Coutts, 2013: 4). طراحی شهری حساس به اقلیم، مشابه با «اقلیم پاسخده» در ادبیات به منظور توصیف طراحی آگاهانه فضاهای بیرونی به نحوی که آسایش حرارتی برقرار شود، به کار گرفته می‌شوند. واژه‌هایی نظیر «طراحی حساس به اقلیم»، «طراحی خرداقلیم»، «طراحی اقلیم آگاهانه» نیز با همین مفهوم در ارتباطند. در بستر طراحی شهری با اقلیم پاسخده بسیار مهم است که خرداقلیم‌های شهری برحسب تنوع فضایی متمایز شوند، بدین معنی که هر فضای شهری شرایط حرارتی منحصر به خودش را دارد و طراحی بدون توجه به این تمایزها می‌تواند تغییرات ناخواسته در خرداقلیم ایجاد کرده و شرایط را بدتر کند (Klemm, 2017). طراحی شهری حساس به اقلیم، رشته‌ای است که بر میانجی‌گری مکان، اقلیم و مردم با ترکیب

^۱ Climate Sensitive Design

عناصر فضایی به گونه‌ای متمرکز است که محافظت در برابر اثرات منفی و استفاده از جنبه‌های مثبت اقلیم را فراهم می‌کند. طراحی حساس به اقلیم، بهترین تصمیم را برای خرداقلیم‌ها در فصول گرم و سرد سال دارد. با این حال، اغلب بر مقابله با افزایش گرمای شهری در طول دوره تابستان تمرکز می‌کند. دلیل آن تأثیرات فراوان گرما بر سلامت و مرگ و میر در مناطق شهری است (Tamminga, Cortesão, & Bakx, 2020: 8). نکته حائز اهمیت در مورد طراحی شهری حساس به اقلیم این بوده که هیچ طرح و بهترین طرح منفردی وجود ندارد که تمام اهداف اقلیمی را برآورده کند و در بهترین حالت، طراحی شهری حساس به اقلیم می‌تواند خطرات اقلیمی را تعدیل، استفاده از منابع و انتشار را محدود کند و آسایش حرارتی در فضای باز را افزایش دهد (Oke et al, 2017: 451). طراحی شهری حساس به اقلیم دو هدف اصلی را در نظر می‌گیرد؛ طراحی ساختمان‌هایی با مصرف انرژی بهینه در جهت ایجاد آسایش محیط داخلی و طراحی شهری برای ایجاد فضاهای جذاب همراه با آسایش اقلیمی (Couatts et al, 2013). براساس این اهداف، راهبردهایی نظیر کنترل میزان تابش خورشیدی فضا، کنترل شرایط باد، تعادل دما و رطوبت نسبی و کاهش حرارت سطوح با انعکاس به طور خلاصه در تلاش برای دستیابی به آنها پیشنهاد شده است (Tamminga et al, 2020).

طراحی ساختارهای شهری باید پاسخگوی اقلیم منحصر به فرد محله باشد تا در مقیاس وسیع‌تر شهرهایی با شرایط زندگی سالم ایجاد کند و به موازات این امر، الگوی تغییر اقلیم در سطح جهان را با راه‌حل‌هایی چون کاهش تقاضای انرژی برای سرمایش و گرمایش و نیز جابه‌جایی در نظر بگیرد. راه‌حل‌های متعددی جهت دستیابی به این هدف وجود دارد، اما یک روش اصلی معطوف به پیکربندی محیط‌های مصنوعی فعلی و آبی است (Pahl-Weber et al, 2013: 47). حساسیت اقلیمی به معنای توسعه راه‌حل‌هایی است که هم به اقلیم محلی و هم به اقلیم جهانی پاسخ می‌دهند.

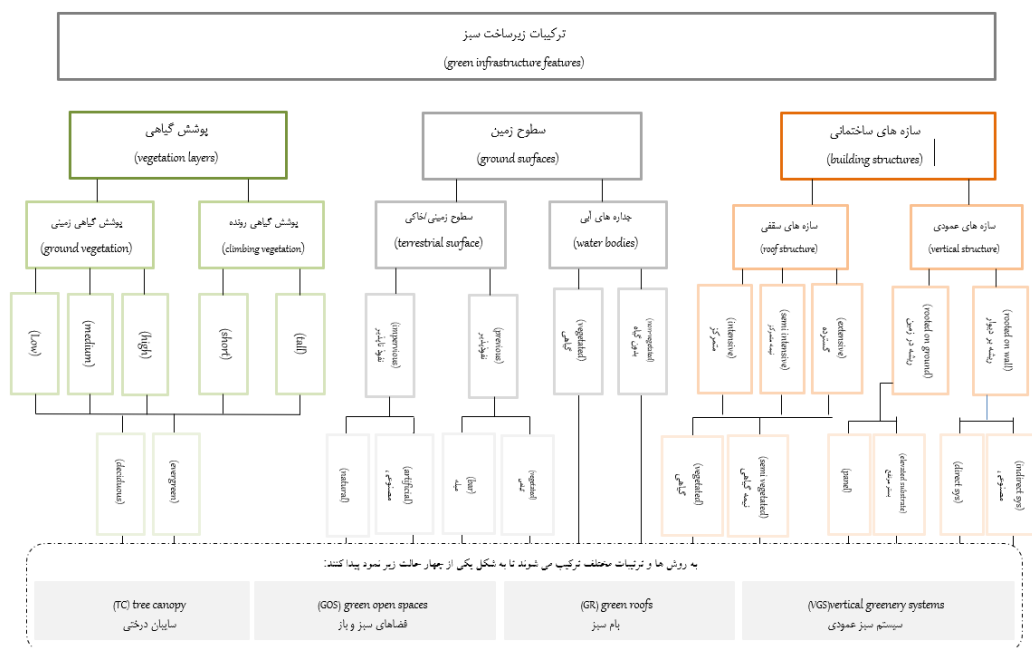
زیرساخت سبز شهری در طراحی حساس به اقلیم

زیرساخت سبز شهری به عنوان یکی از استراتژی‌های اصلی طراحی شهری حساس به اقلیم، مشکلات، اهداف، مزایا و عناصر بسیار گسترده‌ای را در بر می‌گیرد. تعریف‌های متنوعی از زیرساخت‌های سبز وجود دارد تا جایی که زیرساخت‌های سبز اغلب به عنوان اصطلاح تعمیم دهنده طبقه‌بندی شده‌اند، که معنی آن‌ها با توجه به زمینه متفاوت تفسیر می‌شود (Seiwert & Rösler, 2020). برای برخی این واژه به معنای درخت و پوشش گیاهی است که وظیفه فراهم‌آوری سودمندی‌های بوم‌شناختی در محدوده‌های شهری را برعهده دارند. برای برخی دیگر این واژه به معنای ساختار سازه‌(ها)ی مهندسی مانند مدیریت سیلاب یا تجهیزات نگهداری آب است که با رویکرد سازش با محیط‌زیست طراحی و ساخته شده‌اند (Hakimian & Lak, 2017: 48). با توجه به زمینه فعالیتی پژوهش حاضر می‌توان این مفهوم را اینگونه تعریف کرد: «زیرساخت سبز یک شبکه برنامه‌ریزی استراتژیک از مناطق طبیعی و نیمه‌طبیعی شامل فضاهای سبز و آبی و سایر اکوسیستم‌ها است که برای ارائه طیف گسترده‌ای از خدمات اکوسیستمی در مقیاس‌های مختلف طراحی و مدیریت می‌شود» (Monteiro, Ferreira & Antunes, 2020: 3).

زیرساخت‌های سبز ضمن ایجاد تعادل میان محیط طبیعی و انسان‌ساخت، ابزاری استراتژیک در برنامه‌ریزی‌ها به منظور افزایش کارایی و انرژی فضاهای شهری برای دست یافتن به شهرهای پایدار و نیز راهکاری هوشمندانه در جهت حفاظت از منابع هستند (Saboonchi, Abarghouyi & Motedayen, 2018: 7). این زیرساخت‌ها به منزله یک سیستم پشتیبان حیات، شبکه‌ای به هم پیوسته از عناصر طبیعی (جنگل و تالاب)، نیمه‌طبیعی (باغ و زمین‌های کشاورزی و مصنوع (بام سبز) ایجاد می‌کنند و خدمات اکولوژیکی مانند پاکسازی هوا، فیلتراسیون و خنک کردن آب (خدمات تنظیمی)، به چرخش درآوردن مواد مغذی و آب و تولید خاک (خدمات حمایتی)، تأمین مواد غذایی (خدمات تأمین‌کننده و ارزش‌های زیبایی‌شناسی و اکوتوریسم) و خدمات فرهنگی ارائه می‌دهند (Yazdanpanah, Yavari, Zebardast & Alemohammad, 2015: 614) و البته با کاهش شدت اثرات شهرنشینی موجب بهبود شرایط اقلیمی می‌شوند. به طور کلی زیرساخت سبز شامل انواع اکوسیستم‌های طبیعی، بومی و گونه‌های منظر است که نظامی متشکل از مراکز و ارتباطات بین آنها ایجاد می‌کند. اما به صورت جزئی‌تر همانند تعریف این مفهوم اجزای آن بسته به زمینه آن متفاوت است؛ هرچند که منطق اساساً یکسان است. اجزای زیرساخت سبز شامل لکه، دالان و پهنه هستند که بر طبق نظریه فورمن بیان شده‌اند و بندیکت نیز در مقاله خود به این تقسیم‌بندی اشاره کرده‌است. لکه (مرکز) به عنوان نقاط لنگر در یک شبکه زیرساخت سبز تعریف می‌شود، در حالی که دالان (پیوند) به عنوان عناصر اتصال یک سیستم

منسجم شناخته می‌شوند (Seiwert & Rößler, 2020: 4). لکه‌های سبز متشکل از جنگل، پوشش‌های مرتعی، باغ‌ها، مزارع و زمین‌های کشاورزی و در ارتباط با زیرساخت سبز شهری، شامل انواع پارک‌های شهری، زمین‌های ورزشی، باغ، گورستان، زمین‌های خالی، فضاهای شهری، فضاهای سبز خصوصی، فضاهای سبز نیمه‌خصوصی-عمومی، محوطه‌های مدارس، پارکینگ‌های روباز، محوطه‌های تاریخی، فرهنگی و اجتماعی است. دالان‌ها نیز شامل دالان‌های طبیعی و روددره‌ها، رودخانه‌ها، مسیل‌ها، یا کانال‌های آبی مصنوعی، دریاچه‌ها و چشمه‌های طبیعی یا مصنوعی و همچنین مادی‌ها، رودخانه‌ها، کانال‌ها، پارک‌های خطی، مسیرهای دهکشی، مسیرهای انتقال انرژی و برق، خیابان‌ها و... هستند (Hakimian & Lak, 2017: 50), (Rafiee, Vahidzadegan & Abdollahi, 2019: 457-458). جزء سوم نیز که پهنه است از مجموع اجزا با بافت شهری پدید می‌آید.

طرح‌های طبقه‌بندی مرتبط با زیرساخت سبز را می‌توان به سه دسته که عملکردهای حرارتی مختلفی را به اقلیم شهری ارائه می‌دهند، یعنی پوشش‌های گیاهی، سطح زمین و سازه‌های ساختمانی، تقسیم کرد. پوشش‌های گیاهی شامل مجموعه‌ای از ساختارهای طبیعی طبقه‌بندی شده مانند گیاهان پوششی زمین، بوته‌ها، درختان و گونه‌های رونده است که به اصلاح جریان هوا، دمای هوا، تعرق و پتانسیل سایه‌زایی کمک می‌کند. سطح زمین و سازه ساختمانی ترکیبی از ویژگی‌های طبیعی و یا ساخته شده مصنوعی را تشکیل می‌دهد که پشتیبانی بیوفیزیکی از رشد گیاهان را ارائه می‌دهد و با مقادیر مختلف تبخیر، رطوبت و نفوذپذیری به اصلاح خرد اقلیم نزدیک زمین یا سایر سطوح می‌تواند کمک نماید (Bartessaghi-Koc et al, 2016: 185-186). از ترکیب زیرمجموعه‌ی این دسته‌ها با یکدیگر بام سبز، فضای سبز و دیواره سبز بدست می‌آید که طراحان می‌توانند از آن‌ها در جهت ارتقای زیرساخت سبز شهری استفاده نمایند. این طبقه‌بندی زیرساخت‌های سبز شهری که از منظر اقلیم‌شناسی صورت گرفته است، به‌عنوان ساختارهای شهری و مناطق سبز بر اقلیم شهری در مقیاس‌های مختلف فضایی تأثیری می‌گذارد. به‌عنوان مثال فضای سبز پشت‌بام به‌عنوان زیرمجموعه‌ای از یک ساختار سبز یک ساختمان، می‌تواند در ترکیب با چندین بام سبز در محله و سپس در ساختار شهر نقش مثبت‌تری را داشته باشد. به همین ترتیب طراحی زیرساخت سبز شهری در کنار شهرهای پیرامون به‌طور سلسله‌مراتبی تأثیری بسیار فراتر بر کل اقلیم شهری منطقه خواهد داشت (Reinwald et al, 2019: 3). گسترده بودن مفهوم زیرساخت سبز موجب شده است که بین محققان در مورد اینکه چه اصولی باید در برنامه‌ریزی زیرساخت سبز در نظر گرفته شود اختلافاتی شکل بگیرد. به طور خاص، اصول پیوستگی، یکپارچگی (بین سطوح ساختمانی و سبز یک بافت) و چند مقیاسی (عملکرد در سطوح مختلف فضایی) مفهوم زیرساخت سبز شهری را به‌عنوان یک رویکرد برنامه‌ریزی تشکیل می‌دهد و اصول استراتژیک، بین‌رشته‌ای و فرارشته‌ای و همه‌شمولی نشان‌دهنده فرآیند برنامه‌ریزی زیرساخت سبز شهری است (Davies & Laforteza, 2017: 163).



شکل ۱. ترکیبات زیرساخت سبز،

برگرفته از: Bartesaghi-Koc et al, 2016: 186

در جهت بهبود اکوسیستم‌ها و تلاش برای حفظ آن برای آیندگان، طراحی شهری حساس به اقلیم که از ارتباط دو مفهوم اکوسیستم‌های شهری و سیستم اقلیمی شکل گرفته است، در تلاش است تا تعادلی مابین انسان، مکان و اقلیم ایجاد نماید. طراحی شهری حساس به اقلیم با تغییر در فرم شهری، تکنولوژی شهری و منابع شهری در راه دستیابی به این هدف تلاش می‌کند. رویکرد زیرساخت سبز در راستای طراحی شهری حساس به اقلیم با بهبود پوشش گیاهی شهرها و سوق دادن آن‌ها به سمت اکوسیستم‌های طبیعی در تلاش برای رفع این مشکل است. از طرفی این رویکرد در تلاش است شهرها را به عنوان جزیی از طبیعت و نه در مقابل طبیعت برنامه‌ریزی نماید (Klemm et al, 2017: 1). زیرساخت سبز در هر سه مقیاس لکه، دالان و پهنه، با ارائه خدمات اکوسیستم می‌تواند به بالا رفتن کیفیت زندگی در شهرها کمک کند (McMahon, 2000: 4-5). البته زیرساخت سبز برای رسیدن به هدف نهایی خود لازم است از اصول پیوستگی، یکپارچگی، چندعملکردی، چندمقیاسی، همه‌شمولی، تنوع و دسترسی‌پذیری پیروی نماید (Monteiro et al, 2020). بنابراین بر اساس اهمیت بعد محیط‌زیستی در شهرهای امروزه و ضرورت این امر که زیرساخت سبز شهری برای تداوم باید جزیی جدایی‌ناپذیر از زندگی شهروندان و مکان‌های شهری باشد، در این پژوهش به شناسایی شاخص‌های موثر طراحی شهری حساس به اقلیم و زیرساخت سبز شهری پرداخته شده است.

پیشینه پژوهش

با تغییرات سریع در گسترش شهرها و نابودی منابع طبیعی، زیرساخت سبز جهت بازگرداندن پایداری به شهرها و بهبود اقلیم شهری شناخته شده است. با این حال اقلیم شهری همچنان دانش نوپا بوده و به‌صورت کامل توسعه‌نیافته است؛ اما با پیشرفت‌های تکنولوژی و وجود رایانه‌های عظیم برای تحلیل داده و توسعه مدل‌های شبیه‌سازی، قدرت حل و فصل بیشتری را نسبت به گذشته داراست (Landsberg, 1981: 1-4). (Oke et al, 2017: 453-459). اولین ارجاعات به زیرساخت‌های سبز به سال‌های ۱۹۹۵ - ۱۹۹۶ میلادی بازمی‌گردد. هاوزمن و والمسللی اولین نفراتی بودند که از زیرساخت سبز استفاده کردند. والمسللی، لیتل را به‌عنوان آغازگر اصطلاح زیرساخت سبز می‌داند. در گزارش «به سوی آمریکای پایدار» که در سال ۱۹۹۹ میلادی توسط شورای توسعه پایدار منتشر شد، زیرساخت سبز به‌عنوان یکی از استراتژی‌های رویکرد جامع توسعه پایدار نامگذاری شد که بار دیگر اهمیت آن را برجسته می‌کند. در اروپا اما مفهوم زیرساخت سبز موضوع به نسبت

جدیدتری است. اوایل سال ۱۹۹۳ میلادی کمیسیون اقتصادی سازمان ملل متحد برای اروپا به این نتیجه رسید که «فضاهای باز به اندازه زیرساخت‌ها مهم هستند؛ حتی ممکن است صحبت از زیرساخت‌های طبیعی شود.» با این حال سال ۲۰۰۹ میلادی اولین بار بود که از اصطلاح زیرساخت سبز صحبت به میان آمد. همچنین استراتژی تنوع زیستی اتحادیه اروپا برای سال ۲۰۲۰ میلادی بر نقش زیرساخت‌های سبز در حفظ و ارتقای اکوسیستم‌ها و خدمات آن‌ها ضمن بازگرداندن ۱۵ درصد از اکوسیستم‌های تخریب شده تأکید کرد (Seiwert, 2020; Monteiro et al, 2020: 2-5), (Rößler & 3).

در سال‌های اخیر تعدادی از مقالات به مطالعه اثرات زیرساخت سبز شهری بر اقلیم شهری پرداخته‌اند که از جمله تحقیقات انجام شده در این زمینه، مطالعه با هدف ارائه اثر زیرساخت سبز در آسایش حرارتی فضاهای شهری در شهر بغداد انجام شده است (Abdulateef & Alwan, 2022). در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ENVI-met دمای سطح منطقه مورد مطالعه بر اساس چهار سناریو شامل استفاده از مواد خنک‌تر و افزودن سطوح سبز و آبی به اراضی و ساختمان‌های خاکستری موجود، ارزیابی شد. نتایج بدست آمده حاکی از اثرات مثبت در خنک کردن فضاهای شهری با استفاده از این تمهیدات است. در مقاله‌ای دیگر به سنجش اثرات زیرساخت سبز پرداخته می‌شود. این پژوهش که در یکی از شهرهای آلمان و در محدوده‌ای مسکونی با تراکم بالا صورت گرفته نشان می‌دهد صرف قراردادی حجم زیادی پوشش سبز نتیجه دلخواه را ایجاد نمی‌کند و باید به صورت استراتژیک این مکان‌یابی‌ها به صورت بهینه صورت گیرند. همچنین با بررسی تاثیر انواع زیرساخت سبز بر اقلیم شهری دریافت که ابتدا کاشت درختان و سپس جداره سبز بیشترین تاثیر را بر آسایش اقلیمی گذاشته و بام سبز در این میان تاثیر چشم‌گیری ایجاد نکرده است (Zölcha, Maderspacher, Wamsler & Pauleit, 2016). در مقاله اثرات زیرساخت سبز شهری بر فضای خرداقلیم شهرهای گرمسیری در نمونه موردی سریلانکا، با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار ENVI-met انجام شده است. براساس این پژوهش زیرساخت سبز اثر مناسبی در خیابان‌دره‌های شهر کلمبوی سریلانکا داشته است و استفاده از این رویکرد برای مواقعی که قادر به تغییر هندسه شهری نیستیم مناسب است. در این پژوهش همه گونه‌های زیرساخت سبز اثر کاهشی بر دما داشته‌اند و بسته به مطالعات اقتصادی می‌توان مناسب‌ترین را انتخاب کرد (Herath, Halwatura & Jayasinghe, 2018).

در ایران، پژوهش‌های متعددی در زمینه زیرساخت سبز شهری در ارتباط با اقلیم انجام شده است. این مطالعات عمدتاً بر چالش‌های اقلیمی مانند گرمایش شهری، کم‌آبی و آسایش اقلیمی تمرکز داشته‌اند. شیرگیر و همکاران در مقاله تبیین الگوی مداخله در زیرساخت‌های سبز شهری با هدف ایجاد تاب‌آوری اکولوژیک شهری با تأکید بر تغییرات اقلیمی به شناسایی و تحلیل زیرساخت‌های سبز موجود در محله با تأکید بر پتانسیل‌های تاب‌آوری اقلیمی در آن‌ها پرداخته است (Shirgir, Kheyroddin & Behzadfar, 2019). ملکی، ماجدی و زرابادی (2021) در مطالعه‌ای با عنوان تحلیل نقش رویکردهای شهری در پاسخ به تغییرات اقلیم با تأکید بر شهرسازی بیوفیلیک، قابلیت‌های بیوفیلیکی شهر تنکابن را در پاسخ به تغییرات اقلیمی مورد سنجش قرار دادند و قابلیت حفاظت از فضای سبز و جنگل‌های شهری و برنامه‌های شهرسازی شهری را به عنوان بیشترین تأثیر در پاسخ به تغییرات اقلیمی برشمردند. کرمی‌راد و وکیلی نژاد (2022) در مقاله ارزیابی تاثیر بام سبز بر خرداقلیم شهری، با استفاده از نرم‌افزار ENVI-met نشان دادند که استفاده از بام سبز با درخت و چمن تغییراتی اندک در جهت کاهش دمای خرداقلیم ایجاد می‌کند. مروری بر تحقیقات پیشین نشان می‌دهند که زیرساخت سبز شهری با رویکرد طراحی حساس به اقلیم می‌تواند راهکار مؤثری برای مقابله با چالش‌های محیطی باشد.

برای بحث سنجش اثرات زیرساخت سبز شهری با رویکرد طراحی حساس به اقلیم در ایران، می‌توان نمونه‌های موردی متنوعی را بررسی کرد که نشان‌دهنده تلاش در این زمینه هستند. به عنوان نمونه در پارک پردیسان تهران به عنوان یکی از بزرگترین پارک‌های شهری تهران با پوشش گیاهی متنوع، استفاده از سیستم‌های آبیاری هوشمند برای کاهش مصرف آب، طراحی مسیرهای پیاده‌روی و دوچرخه‌سواری برای کاهش آلودگی هوا، اثرات اقلیمی مثبتی را در کاهش جزیره گرمایی شهری در محدوده اطراف به وجود آورده و بهبود کیفیت هوا از طریق جذب ذرات معلق را موجب شده است (Kia, Shamsipour & Azizi, 2025). در کمر بند سبز مشهد، پروژه گسترده‌ای برای ایجاد فضای سبز حاشیه شهر با گونه‌های مقاوم به خشکی با هدف اصلی مقابله با ریزگردها و تعدیل آب و هوای محلی برنامه‌ریزی شده که اثرات اقلیمی آن کاهش دمای محلی و افزایش رطوبت نسبی و کنترل بادهای شدید و گرد و غبار است (Asadolahzade, Mahmodi & Rezataleb, 2023). در پروژه دیوار سبز در برج‌های مسکونی، با نصب دیوارهای سبز عمودی برای بهبود عایق‌بندی ساختمان و کاهش مصرف انرژی و استفاده از گیاهان بومی کم‌آبر، کاهش اثر جزیره گرمایی و بهبود کیفیت هوا و کاهش مصرف انرژی برای سرمایش ساختمان موجب

شده است (Savoj, Dehghan, 2024). بررسی هریک از نمونه‌ها نشان می‌دهند که زیرساخت سبز شهری می‌تواند در تعدیل اقلیم، کاهش آلودگی و افزایش تاب‌آوری شهری مؤثر باشد.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نوع کاربردی است که با رویکردی ترکیبی هم بصورت کیفی و هم در سنجش اثرات زیرساخت سبز شهری به صورت کمی انجام شده است. در این پژوهش نقش شبیه‌سازی و تحلیل داده‌ها و سنجش با به کارگیری نرم‌افزار ENVI-met انجام و جهت جمع‌بندی و نتیجه‌گیری تحقیق از استدلال منطقی بهره گرفته شده است. همچنین روند تحلیلی از طریق سناریونویسی و شبیه‌سازی آنها در نرم افزار شبیه‌ساز اقلیم انجام شده است. روند سناریوسازی در این پژوهش به این صورت است که سناریوهای مختلف زیرساخت سبز از طریق نرم‌افزار ENVI-met شبیه‌سازی خواهند شد؛ سپس تحلیل و ارزیابی شده و سناریو نهایی بر اساس تحلیل‌ها و نتایج به دست آمده مدل‌سازی و مورد آزمایش قرار می‌گیرد. این مدل‌سازی کمی می‌تواند به طراحی شهری حساس به اقلیم کمک کند، زیرا می‌تواند اثربخشی استراتژی‌های کاهنده را بر اساس سناریوهای «چه می‌شود»، به ویژه در طول مراحل طراحی ارزیابی کند (Ouyang et al, 2022: 1). این نرم‌افزار معمولاً در زمینه‌های اقلیم‌شناسی شهری، برنامه‌ریزی شهری و طراحی ساختمان استفاده می‌شود. این مدل مناسب‌ترین و معتبرترین ابزار برای شبیه‌سازی محیط بیرون و ارزیابی آسایش حرارتی مربوط به فضای سبز سطح، دمای هوا و فضای باز است. مدل‌های پوشش گیاهی سه‌بعدی، کاربران را قادر می‌سازد هندسه‌های پیچیده پوشش گیاهی خود را شبیه‌سازی کنند.

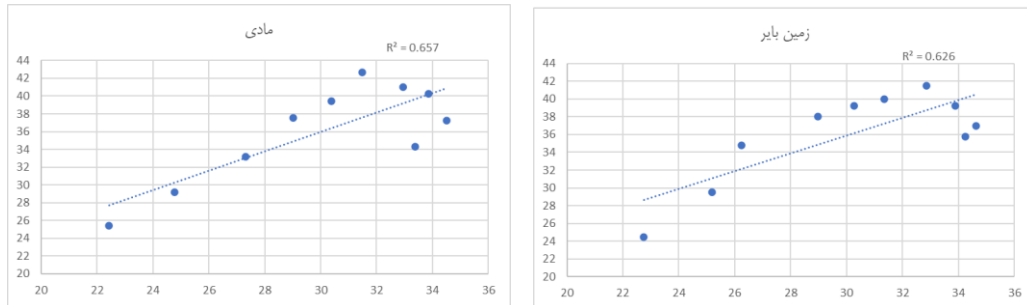
شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش با استفاده از نسخه ENVI-met 5.0.3 انجام شده است. فایل اقلیمی مورد استفاده از نوع EPW و مربوط به شهر اصفهان بود که از پایگاه energyplus.com دریافت گردید. تاریخ شبیه‌سازی یکی از گرم‌ترین روزهای سال، ۲۱ ماه جون معادل با ۱ تیرماه ۱۴۰۲ از ساعت ۵ صبح به مدت ۲۴ ساعت انجام شده است. مدت زمان گرم شدن مدل (spin-up) برابر با سه ساعت اولیه تنظیم گردید تا شرایط تعادل دمایی قبل از تحلیل اصلی فراهم شود. هرچند شبیه‌سازی کل محله تأثیر بهتری بر نتیجه نهایی داراست، اما به دلیل محدودیت‌های نرم افزار از جمله زمان‌بر بودن هر خروجی و افزایش احتمال خطای اطلاعات، به منظور پیشبرد پژوهش، محدوده‌ای به عنوان نمونه از محله مورد نظر انتخاب و شبیه‌سازی شده است. انتخاب محدوده جهت شبیه‌سازی سعی شده است با توجه به ویژگی‌های فیزیکی چون تراکم ساختمان‌ها، بافت هندسی محله، پوشش گیاهی و ویژگی خاص محله (مادی و اراضی بایر) باشد. محدوده انتخابی با مساحت ۳۶۴*۲۷۰ مترمربع در قسمت شرقی محله قرار دارد. دلیل این انتخاب تنوع بافت منظم و نیمه ارگانیک با جهت‌گیری‌های شمال غربی- جنوب شرقی و شمال شرقی- جنوب غربی است.

جدول ۱: اطلاعات ورودی به نرم‌افزار ENVI-met جهت انجام فرایند شبیه‌سازی

اطلاعات ورودی مدل و شبیه‌سازی	
اندازه محدوده (متر)	۳۶۴*۲۷۰
موقعیت مکانی	اصفهان
مختصات مکانی	عرض جغرافیایی ۳۲°۳۵' - طول جغرافیایی ۵۱°۶۷'
چرخش محدوده نسبت به شمال (درجه)	۹.۴
ابعاد (متر)	$(X*Y*Z) - (135*182*40) - (dz*dy*dx) - (2*2*2)$
تعداد Nesting Grid (سلول)	۵
تاریخ شبیه‌سازی	۲۱.۰۶.۲۰۲۲ (میلادی) - ۱ تیرماه ۱۴۰۱ (شمسی)
مدت زمان شبیه‌سازی (ساعت) - ساعت شروع شبیه‌سازی	۲۴ ساعت - ساعت ۵ صبح

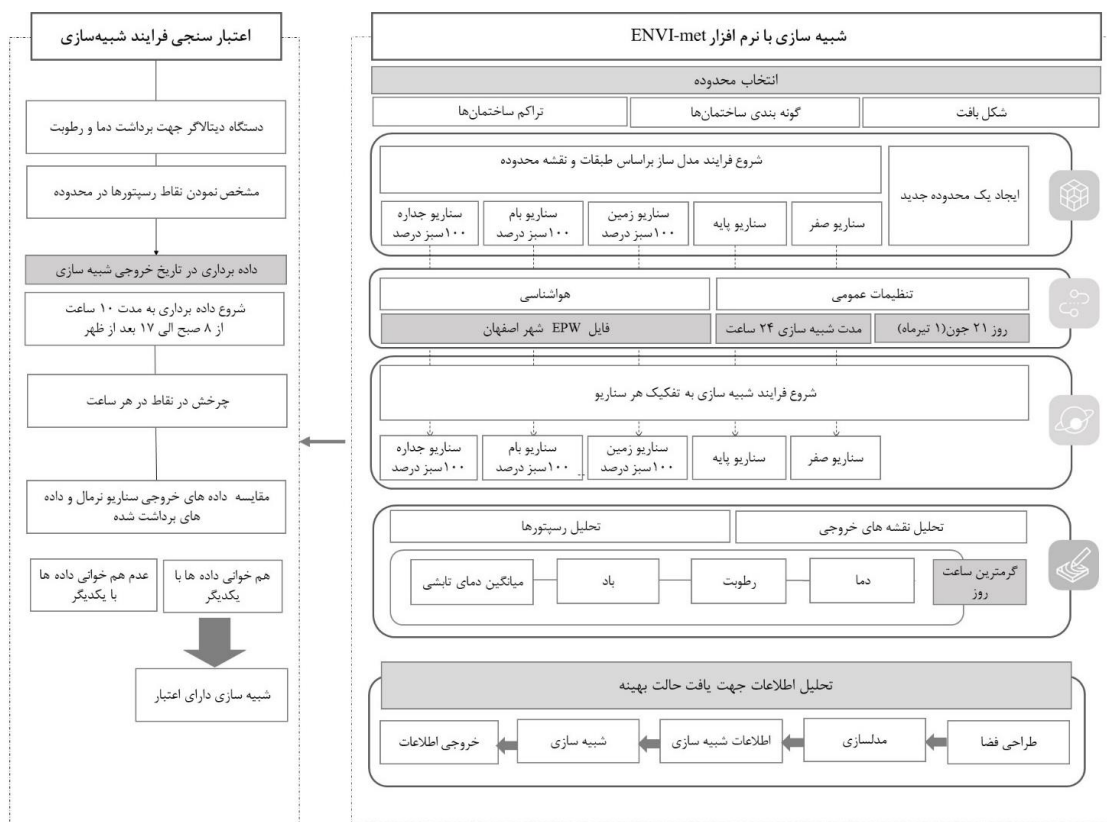
مدل سه‌بعدی محدوده شامل ساختمان‌هایی با ارتفاع میانگین دو تا سه طبقه و حداکثر ارتفاع ۱۵ متر بود. تمام ساختمان‌ها مطابق الگوی کالبدی غالب منطقه، در بخش شمالی زمین واقع شده‌اند و حیاط‌ها در بخش جنوبی قرار دارند که با دیوار از معبر جدا شده‌اند. به منظور حفظ یکپارچگی مدل و کاهش خطای ناشی از تنوع مصالح، نمای تمامی ساختمان‌ها به صورت آجر و معابر با آسفالت تیره مدل‌سازی شدند. پوشش گیاهی بر اساس تحلیل تصاویر هوایی و برداشت‌های میدانی در سه دسته کلی طبقه‌بندی شد: درختان بلند (نارون) با ارتفاع ۹ متر، درختان میان‌بلند (اقاقیا) با ارتفاع ۶ متر و درختان کوتاه با ارتفاع ۳ و ۱.۵ متر. این دسته‌بندی با توجه به ویژگی‌هایی نظیر خزان‌پذیری و موقعیت

قرارگیری در بافت شهری انجام شد. دامنه شبیه‌سازی با ابعاد $40 \times 182 \times 135$ و با سلول‌هایی به ابعاد $2 \times 2 \times 2$ متر طراحی گردید. سایر تنظیمات مربوط به جریان هوا، جهت و سرعت باد، تابش خورشید، رطوبت نسبی و دمای اولیه نیز بر اساس داده‌های فایل EPW و هماهنگ با زمان‌بندی شبیه‌سازی، در مدل اعمال شده‌اند.



شکل ۲. اعتبارسنجی داده‌های خروجی با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی. برگرفته از: نگارندگان

ارزیابی عملکرد یک گام اساسی برای اطمینان از قابلیت اطمینان یک مدل و به حداقل رساندن احتمال تصمیم‌گیری اشتباه بر اساس نتایج شبیه‌سازی یا به‌دست آوردن بینش نامطلوب در موقعیت‌های هدف است (Ouyang et al, 2022: 3). به‌همین منظور در پژوهش حاضر جهت اعتبارسنجی داده‌های خروجی با استفاده از دستگاه دیتالاگر دما و رطوبت Benetech GM1365 در بازه‌های زمانی ساعت ۸ صبح به مدت ۱۰ ساعت در روز ۲۱ ماه جون معادل با ۱ تیرماه ۱۴۰۲ مشخص و ثبت گردیده‌اند. سپس، خروجی‌های نرم‌افزار ENVI-met با این داده‌ها تطبیق داده شده و میزان تطابق آن‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (R^2) ارزیابی گردید. مقادیر ضریب تعیین (R^2) بین داده‌های میدانی و خروجی مدل برای دو نقطه منتخب به ترتیب 0.657 و 0.626 به‌دست آمد. نشان‌دهنده سطح دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی داده‌های دمایی در محیط شهری می‌باشد.



شکل ۳. چارچوب روش‌شناسی پژوهش. برگرفته از: نگارندگان

محدوده مطالعاتی

اصفهان به عنوان بزرگترین شهر مرکزی و سومین شهر پرجمعیت ایران شناخته می‌شود. این شهر با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۹ دقیقه و ۴۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۸ دقیقه و ۳۰ ثانیه شمالی بیشتر در قلمرو آب و هوایی خشک ایران قرار گرفته است و از جمله مناطقی است که در معرض خطر و آسیب پذیری بیشتری نسبت به تغییرات اقلیمی است. محله گل محمدی یکی از محله‌های نسبتاً جدید قسمت شمالی شهر اصفهان است که پس از انقلاب اسلامی و در پی توسعه‌های جدید و رشد شهرنشینی شکل گرفته است. توسعه این محله از بیرون به درون اتفاق افتاده است و توسعه شهری موجب شده در اراضی کشاورزی این محدوده ساخت و ساز شکل گیرد. به گونه‌ای که در حال حاضر قطعاتی پراکنده از اراضی کشاورزی و مادی‌ها در میان بافت محبوس شده‌اند و علاوه بر کاهش کیفیت محله با خطر تغییر کاربری مواجه هستند. پتانسیل ویژه محله جهت توسعه زیرساخت سبز شهری در آن به واسطه قرارگیری دو شاخه مادی و اراضی کشاورزی چشمگیر، فقدان پوشش گیاهی مناسب در محله، تهدید اراضی کشاورزی و مادی‌های محله با خطر تغییر کاربری از اصلی‌ترین دلایل انتخاب این محدوده جهت سنجش رویکرد طراحی شهری حساس به اقلیم با تاکید بر زیرساخت سبز شهری بوده است.



شکل ۴. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

یافته‌ها و بحث

یکی از روش‌های اصلی برای پیشبرد پژوهش حاضر، سناریونویسی است. سناریوها تصویر روشنی از آینده‌اند که برنامه‌ریزی به کمک آن‌ها می‌تواند مسائل، چالش‌ها و فرصت‌های محیط را به روشنی ببیند و بشناسد. یک سناریو تنها پیش‌بینی یک آینده‌ی خاص نیست، بلکه توصیف همه احتمالات قابل تصور است (Barati, Montazeri & Davodpou, 2011: 117-118). در این پژوهش، «زیرساخت سبز» به عنوان شبکه‌ای پیوسته و یکپارچه از پوشش‌های گیاهی تعریف شده است که تداوم عملکرد آن مستلزم تعامل مؤثر با سایر زیرساخت‌های شهری، از جمله زیرساخت‌های خاکستری و آبی است. با این حال، تحقق چنین ساختاری در محیط شهری با موانعی از جمله محدودیت‌های کالبدی، اقتصادی و مدیریتی مواجه است. به همین دلیل، با بهره‌گیری از رویکرد سناریونویسی، تلاش شده است تا تأثیر ظرفیت‌های متنوع سبزی‌نگی بر اقلیم محلی را در سه وضعیت کلان تحلیل نماید:

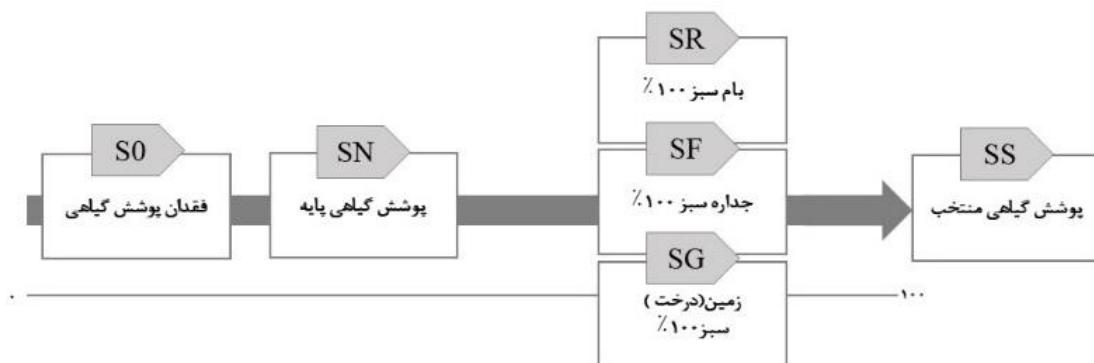
۱. سناریو صفر (بدترین وضعیت ممکن): این سناریو به عنوان پایه‌ای‌ترین حالت در نظر گرفته شده و فاقد هرگونه پوشش گیاهی است. در این وضعیت، تمامی سطوح سایت، اعم از فضاهای عمومی، حیاط‌ها و اراضی باز، عاری از هر نوع پوشش گیاهی فرض شده‌اند تا امکان ارزیابی حداکثری تأثیرات حضور سبزی‌نگی در سناریوهای دیگر فراهم گردد.

۲. سناریو نرمال (وضعیت موجود): این سناریو بازتاب‌دهنده شرایط واقعی سایت در زمان انجام پژوهش است. اطلاعات مربوط به نوع، ارتفاع و موقعیت پوشش گیاهی از طریق برداشت میدانی و تحلیل تصاویر هوایی گردآوری شده و به صورت دقیق در مدل‌سازی نرم‌افزار ENVI-met اعمال شده‌اند. مصالح به کاررفته نیز در تمامی سناریوها ثابت در نظر گرفته شده‌اند تا اثر پوشش گیاهی به صورت مستقل سنجیده شود.

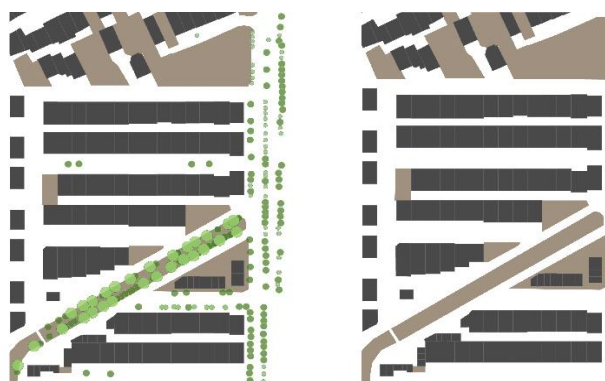
۳. وضعیت ایده‌آل (سناریوهای توسعه یافته): در این گروه از سناریوها، حداکثر ظرفیت بالقوه سبزی‌نگی در سطوح مختلف شهری بررسی شده است. اگرچه تحقق کامل این وضعیت به دلیل محدودیت‌هایی نظیر بازشوهای جداره‌ها، ورودی پلاک‌ها، دید رانندگان، تأسیسات بامی، ارزش زمین و ملاحظات اقتصادی عملاً امکان‌پذیر نیست، اما ارزیابی این حالت می‌تواند به برنامه‌ریزان شهری در دستیابی به وضعیت بهینه کمک نماید.

سناریوهای توسعه یافته شامل موارد زیر است:

- سناریوی بام سبز: تمامی بام‌های سایت (اعم از خصوصی و عمومی) تحت پوشش سبز قرار گرفته‌اند. تعریف بام سبز مطابق با گزینه‌های استاندارد ENVI-met انجام شده و به صورت یکنواخت روی تمامی ساختمان‌ها اعمال شده است.
- سناریوی جداره سبز: در این سناریو، سطوح خارجی ساختمان‌ها به صورت کامل به پوشش گیاهی عمودی مجهز شده‌اند. فعال‌سازی جداره سبز از طریق تنظیمات نرم‌افزار صورت گرفته و با ساختار موجود ترکیب شده است.
- سناریوی درختان: علاوه بر حفظ پوشش گیاهی موجود، در این سناریو کاشت ردیفی درختان در امتداد محورهای اصلی و کاشت پراکنده در اراضی بایر در نظر گرفته شده است. در این‌جا، منظور از پوشش ۱۰۰ درصد، نه کل سطوح سایت، بلکه استفاده کامل از زمین‌های بایر و فضاهایی نظیر پیرامون مادی و حواشی محورهای عبوری (در قالب باغچه‌بندی‌های منظم)، بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های ناشی از دسترسی یا تملک است. شایان ذکر است که در تمامی سناریوهای توسعه یافته، گونه‌های درختی یکسانی به کار گرفته شده‌اند تا شرایط مقایسه دقیقی بین اثرگذاری انواع مختلف ترکیب‌های زیرساخت سبز مهیا شود. به این ترتیب سناریوها نام‌گذاری و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. بر اساس طبقه‌بندی زیرساخت‌های سبز و سنجش دقیق اثرات هر نوع از آن، ۶ سناریو برای محدوده انتخابی تعریف شده است که در آنها مشخصات فیزیکی چون بافت هندسی و نسبت H/W (ارتفاع ساختمان‌ها/عرض خیابان‌ها) و جنس مصالح ثابت در نظر گرفته شده است و تفاوت در میزان پوشش گیاهی و یا نوع آن به لحاظ طبقه بندی است (شکل ۶ و ۵). سناریو اول (S0)، محدوده انتخابی بدون هیچ پوشش گیاهی؛ سناریو دوم (SN)، پوشش گیاهی موجود محدوده انتخابی؛ سناریو سوم (SG)، حداکثر درخت موجود در امتداد محورها و درون باغچه‌ها؛ سناریو چهارم (SF)، پوشش گیاهی موجود با جداره‌هایی ۱۰۰ درصد سبز؛ سناریو پنجم (SR)، پوشش گیاهی موجود با بام‌هایی ۱۰۰ درصد سبز؛ سناریو ششم (SS)، سناریو منتخب که براساس تحلیل و نتایج سناریوهای پیشین فضا طراحی و با شبیه‌سازی دوباره مورد سنجش قرار می‌گیرد.



شکل ۵. شش سناریو تعریف شده در پژوهش حاضر با توجه به طیف صفر تا صد پوشش گیاه

وضعیت موجود
(سناریو نرمال SN)بدون پوشش گیاهی
(سناریو صفر SO)۱۰۰ درصد پوشش گیاهی
(سناریو درخت SG)۱۰۰ درصد بام سبز
(سناریو بام SR)۱۰۰ درصد جداره سبز
(سناریو جداره SF)

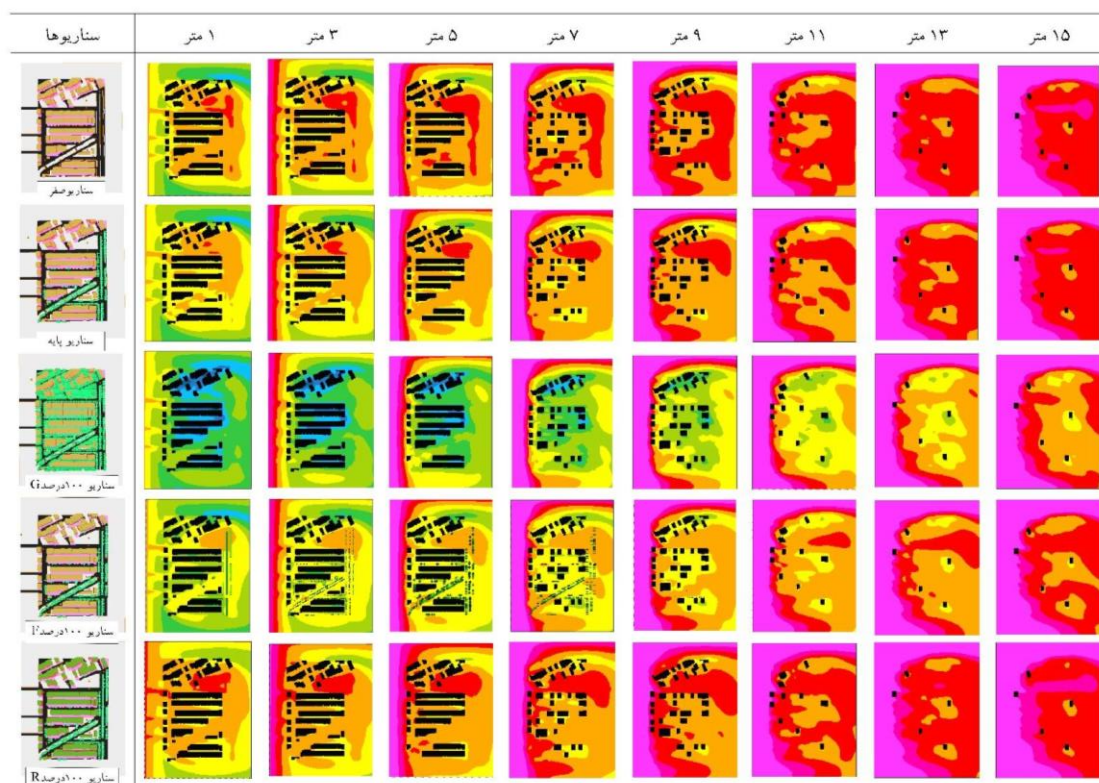
شکل ۶. شش سناریو برای سنجش تاثیر زیرساخت سبز شهری

تحلیل داده های شبیه سازی

باتوجه به شبیه سازی ۶ سناریوی تعیین شده، در ابتدا تغییرات هر یک از فاکتورهای اقلیمی چون دما، میانگین دمای تابشی و سرعت باد در سناریوهای مختلف مورد قیاس قرار گرفته اند. از آنجا که جزایر گرمایی انواع متعددی دارد که هر یک خود نیازمند صرف وقت و زمان بسیار و تخصص ویژه است. در این پژوهش صرفا باتوجه به اهمیت تاثیر زیرساخت سبز در فضای شهری به بررسی لایه سایبان شهری (UCL) پرداخته خواهد شد. به همین منظور ارتفاع بلندترین ساختمان موجود در محدوده شبیه سازی (۵ طبقه معادل ۱۵ متر) مبنای تحلیل و بررسی تغییرات سناریوهای مختلف قرار داده شده است.

با توجه به اهمیت دمای محیطی این پارامتر در همه سناریوها از ارتفاع ۱ تا ۱۵ متری با اختلاف ۲ متر در ساعت ۱۶ بعد از ظهر اول تیرماه به عنوان بالاترین میزان دما را بر اساس اطلاعات هواشناسی، خروجی گرفته شده و با یکدیگر سنجیده شده است. بر اساس این مشاهدات سناریو درخت (SG) بیشترین تغییر دمایی را در محدوده ایجاد کرده و تا ارتفاع ۱۵ متری کاهش دما ادامه پیدا کرده است. اثر درختان در کاهش دما را می توان در مقایسه سناریو صفر و نرمال نیز مشاهده نمود؛ زیرا در مسیری که درختان جانمایی شده اند تغییرات بیشتری مشاهده می شود.

در اولویت دوم سناریوهای بام و جداره سبز با اختلافی کم نسبت به یکدیگر دما را کاهش داده‌اند. مقدار تغییرات دمایی این دو سناریو نسبت به سناریو درخت کمتر اما محسوس است و این نکته قابل توجهی از اثرگذاری انواع زیرساخت سبز در محدوده پژوهشی است (شکل ۷).



شکل ۷. نقشه دمای سناریوهای مختلف در ارتفاعات ۱ الی ۱۵ متر

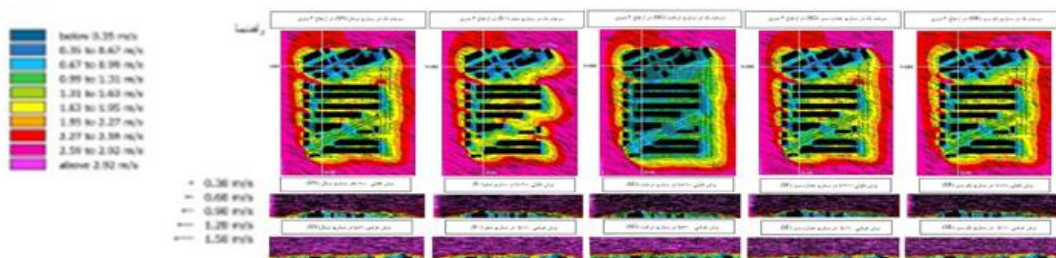
در این مرحله میانگین دمای تابشی و سرعت باد در سناریوها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. از آنجا که هدف طراحی شهری حساس به اقلیم در کنار ایجاد تأثیرات بلندمدت مثبت هم راستا با ایجاد فضاهای شهری مناسب شهروندان است، سنجش تغییرات پارامتر میانگین دمای تابشی برای رسیدن به این هدف یاری دهنده است. به دلیل اهمیت هندسه بافت و ساختمان، پوشش گیاهی و طرح خیابان محدوده انتخابی در میزان میانگین دمای تابشی، این پارامتر جزء به جزء و در قیاس با سناریو نرمال صورت می‌گیرد (شکل ۹ و ۸).
سناریو صفر: تفاوت سناریو نرمال با سناریو صفر در پوشش گیاهی است که بیشتر در محور مادی و خیابان مطهری متمرکز شده است. با این حال تأثیر این میزان پوشش گیاهی بر همه محدوده قابل مشاهده است. بیشترین کاهش مرتبط با محور مادی و مطهری است که حدود این تغییرات از ۴۱ الی ۴۲ درجه سانتیگراد الی ۳۵ الی ۳۶ درجه سانتیگراد می‌باشد. در بقیه محدوده کاهش میانگین دمای تابشی ۱ تا ۵ درجه است که بیشترین این تغییرات در میان دره‌های ساختمانی (حد فاصل دو ساختمان به واسطه حیاط) ایجاد شده است. با افزایش ارتفاع همچنان تغییرات قابل توجه و حدود ۱ الی ۲ درجه سانتیگراد می‌باشد. در ارتباط با سرعت باد نیز، در نقاطی که پوشش گیاهی به محیط اضافه شده است سرعت باد در حدود ۰/۲ الی ۰/۳ متر بر ثانیه در محور مطهری و مادی و در حدود ۰/۷ تا ۰/۵ متر بر ثانیه در تقاطعها کاسته شده است.

سناریو درخت: با توجه به نتیجه تغییرات میانگین دمای تابشی در سناریو نرمال نسبت به سناریو صفر، تأثیر قابل توجه این پارامتر در سناریو درخت قابل پیش‌بینی است. با این وجود کاهش میانگین دمای تابشی در محور مادی (شرقی-جنوب غربی) و خیابان مطهری و کوچه صادقی (شمالی-جنوب غربی) مشهودتر است. البته لازم به ذکر است در قسمتی از محدوده که جهت‌گیری پلاک‌ها شمال غربی - جنوب شرقی است، افزودن درخت در قسمت شرق ساختمان موجب افزایش میانگین دمای تابشی شده است. در ارتفاعات بالاتر نیز اما همه تغییرات مثبت بوده است و به طور کلی پوشش گیاهی به صورت درخت از شدت میانگین دمای تابشی نسبت به سناریو نرمال کاسته است. در سناریو درخت کمترین تغییرات سرعت باد مربوط به فضای بین ساختمان‌ها در بافت بالایی و بیشترین تغییرات ۰/۵ الی ۰/۸ متر بر ثانیه مربوط به محورهای

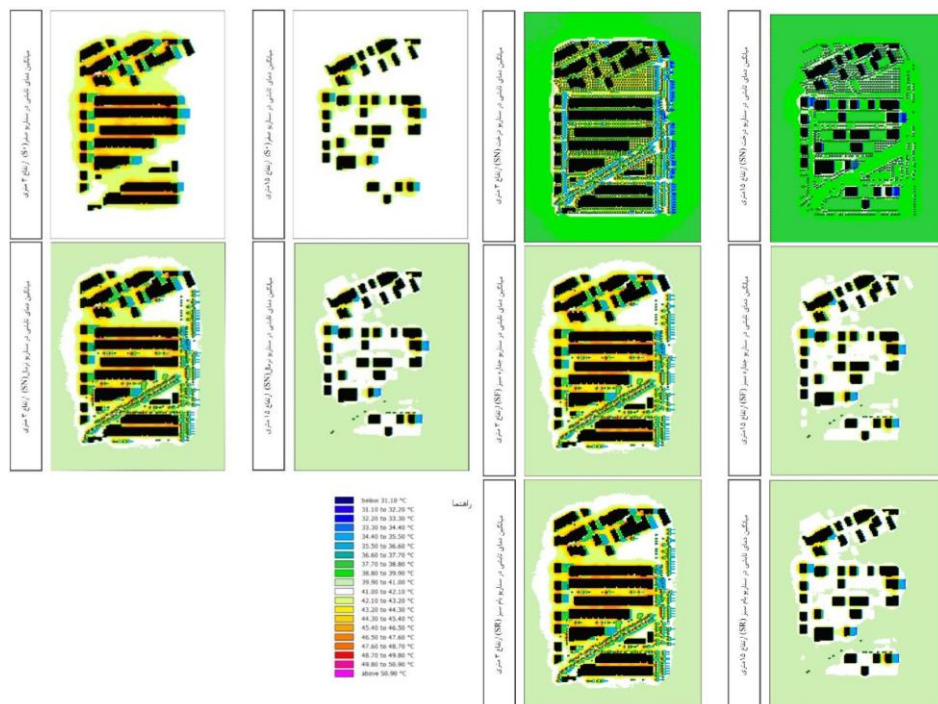
شمالی شرقی-جنوب غربی و فضای میان ساختمان‌ها در بافت پایینی می‌باشد. همچنین سرعت باد در زمین بابر نزدیک به ۱ متر بر ثانیه کاهش یافته است.

سناریو جداره سبز: در سناریو جداره سبز تفاوت نسبت به دیگر سناریوها، نامحسوس‌تر است. این تغییرات در نزدیکی جداره‌ها بیشتر مشهود است. برای مثال در بافت پایینی-جداره‌های شمالی و جنوبی دارای تغییرات حدود 0.4°C درجه‌ی سانتی‌گراد و نمایان‌تر از پلاک‌های بالایی است. این تغییرات در ارتفاع ۹ متری نیز به همین صورت است و به علت اختلاف طبقات در ساختمان‌ها، جداره‌های شرقی و غربی و بام ساختمان‌های کم تراکم‌تر در پلاک‌های شمال شرقی-جنوب غربی افزایش 0.3°C الی 0.5°C درجه سانتی‌گرادی در میانگین دمای تابشی سناریو جداره سبز دیده می‌شود. سرعت باد در جداره سبز تغییرات مشخصی را نشان نمی‌دهد؛ اما با بررسی برش‌های طولی محورهای منتخب می‌توان کاهش جزئی سرعت باد را در دره‌های شهری مشاهده کرد.

سناریو بام سبز: تغییرات در سناریو بام سبز به نسبت سناریو نرمال، همچون جداره سبز نامحسوس بوده و در همان قسمت‌ها با اختلاف جزئی 0.07°C الی 0.1°C درجه سانتیگرادی صورت گرفته است. در سناریو بام سبز همچون سناریو جداره سبز اختلافات سرعت باد بسیار جزئی و قابل چشم‌پوشی است. البته لازم به ذکر است که دلیل این عدم اختلاف می‌تواند به نوع پوشش سبز انتخابی در نرم افزار نیز مرتبط باشد. در پژوهش حاضر از گزینه جداره و بام سبز برای این تغییر استفاده شده است. عدم وجود جزئیات در این دو ممکن است بر نتیجه نهایی اثر گذاشته باشد.



شکل ۸. نقشه قیاس سرعت باد در سناریو ها. برگرفته از: نگارندگان



شکل ۹. نقشه قیاس میانگین دمای تابشی سناریوها

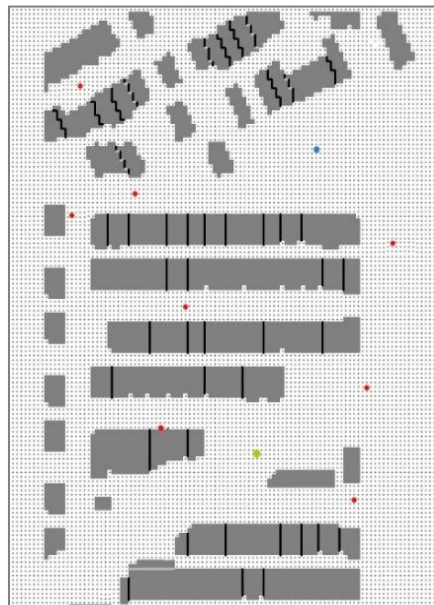
مقایسه میانگین دمای تابشی و سرعت باد در سناریوهای تحلیل شده در جدول ۲ ارائه گردیده است. لازم به ذکر است که دلیل اختلاف کم سناریو جداره سبز و سناریو بام سبز نسبت به سناریو نرمال می‌تواند به نوع پوشش سبز انتخابی در نرم افزار مرتبط باشد. در پژوهش حاضر از گزینه جداره و بام سبز برای این تغییر استفاده شده است.

جدول ۲: مقایسه میانگین دمای تابشی و سرعت باد در سناریوهای تحلیل شده

سناریو	میانگین دمای تابشی	سرعت باد
سناریو صفر	- عمده تفاوت در پوشش گیاهی خیابان مطهری و مادی که منجر به کاهش دمای ۶-۷ درجه شده است. - کاهش ۱ الی ۵ درجه دما در نقاط دیگر محله بخصوص خیابان دره‌ها - اختلاف حداقل ۱ الی ۲ درجه دما در ارتفاعات بالاتر	- در نقاطی که پوشش گیاهی ایجاد شده است - کاهش سرعت باد حدود ۰/۲ الی ۰/۳ متر بر ثانیه در محور مطهری و مادی - کاهش سرعت باد حدود ۰/۵ الی ۰/۷ متر بر ثانیه در تقاطع‌ها
سناریو درخت	- کاهش میانگین دمای تابشی در محور مادی (شرقی-جنوب غربی) و خیابان مطهری و کوچه صادقی (شمالی-جنوب غربی) - تغییرات مثبت در ارتفاعات بالاتر - به طور کلی کاهش میانگین دمای تابشی با افزایش درختان محدوده نسبت به سناریو نرمال	- کمترین تغییرات مرتبط با خیابان دره‌ها در قسمت شمالی محدوده - بیشترین تغییرات (۰/۵ الی ۰/۸ متر بر ثانیه) مرتبط با خیابان‌هایی با جهت‌گیری شرقی - جنوب غربی و خیابان دره‌ها در بافت قسمت جنوبی محدوده - کاهش سرعت باد در اراضی بایر ۱ متر بر ثانیه
سناریو جداره سبز	- تفاوت میانگین دمای تابشی نامحسوس‌تر از دیگر سناریوها - بیشترین اختلاف در نزدیکی جداره‌ها	تغییرات مشهودی مشاهده نشد اما برش‌های طولی محورها نشان از کاهش سرعت باد در خیابان دره‌ها دارد.
سناریو بام سبز	تغییرات نامحسوس و با اختلاف جزئی ۰/۷ الی ۰/۱ درجه سانتیگراد	در این سناریو همچون سناریو جداره سبز اختلافات سرعت باد بسیار جزئی و قابل چشم‌پوشی

تحلیل داده‌های مرتبط با رسپتورها

در فرایند شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار ENVI-met بخشی از داده‌های خروجی مرتبط با رسپتورهایی است که بسته به ماهیت پژوهش به تعداد موردنیاز در محدوده جایگذاری شده‌است. در پژوهش حاضر با توجه به اهمیت زیرساخت سبز و تاثیر آن در هندسه محدوده انتخابی موقعیت مکانی رسپتورها به صورت شکل ۱۰ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱۰. موقعیت رسپتورها در شبیه‌سازی محدوده انتخابی از محله گل محمدی^۱

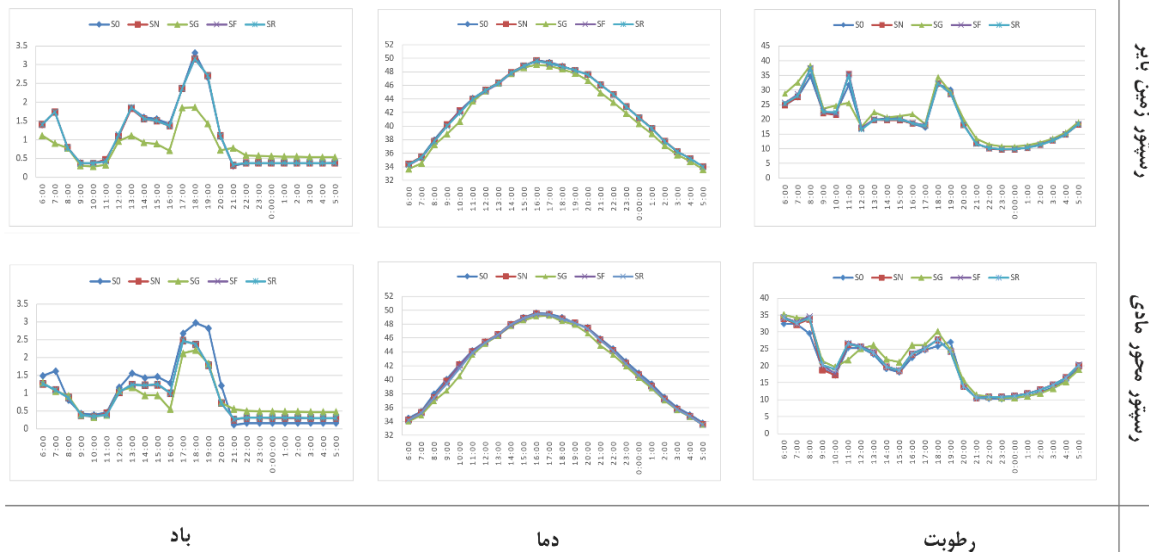
تحلیل داده‌های رستپورهای مختلف منجر به دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر است. به دلیل محدودیت‌های پژوهش، تنها پرداختن به دو عدد از مهمترین رستپورها به عنوان نمونه در نظر گرفته شده است. رستپور اول مرتبط با محور مادی است. مادی‌ها به عنوان عنصر هویتی شهر اصفهان در دو شاخه از شرق تا غرب محله قرار گرفته‌اند و فرصت مناسبی برای دالان‌های سبز ایجاد کرده‌اند. دومین رستپور مرتبط با زمین بایر است زیرا که بزرگترین تهدید محله تغییر کاربری اراضی کشاورزی به بایر است. در ادامه تحلیل داده‌های به دست آمده در شاخص‌های دما و رطوبت نسبی و سرعت باد بیان می‌گردد که در شکل ۱۱ جمع‌بندی آنها ارائه گردیده است.

دمای هوا (ارتفاع ۳ متری): در هر دو رستپور بیشتر تغییرات دمایی مرتبط با سناریو درخت است. باتوجه به بستر متفاوت قرارگیری رستپور در زمین بایر ساعات ۱۳ الی ۱۹ بعد از ظهر شدت کاهش دما کمتر از این ساعات در رستپور مادی و ساعات ۸ الی ۱۲ ظهر و ساعات ۲۰ شب الی ۵ صبح اثرگذاری سناریو درخت در محور مادی کمتر بوده است.

در سایر سناریوها تغییرات بسیار جزیی بوده است، اما به دلیل ماهیت محور مادی تغییرات مشهودتر است. سناریو جداره سبز با تغییرات در حدود ۰.۲ درجه سانتیگراد در محور مادی موجب کاهش دما شده است. این تغییرات اما در سناریو بام سبز محور مادی بسیار کمتر و نهایتاً ۰.۱ درجه سانتیگراد می‌باشد. کاهش دما در زمین بایر در سناریوهای جداره و بام سبز شاید ناچیز بوده و قابل تحلیل نباشند، اما نسبت به سناریو صفر وضعیت بهتری را ایجاد کرده‌اند.

رطوبت نسبی (ارتفاع ۳ متری): در بررسی رطوبت نسبی سناریوهای مختلف دو رستپور، بیشترین تغییرات مرتبط با سناریو درخت سبز بوده و چهار سناریو دیگر نسبتاً تغییرات مشابهی نسبت به وضعیت موجود داشته‌اند. در سناریو درخت، تغییرات رستپور زمین بایر در حدود ۱ الی ۴ درصد بخصوص در ساعات ۸ شب به بعد است. اما در ساعات ۲ الی ۳ بعد از ظهر سناریو درخت در محور مادی افزایش رطوبت بیشتری را ثبت کرده است. در اینجا لازم است این نکته یادآوری شود که افزایش رطوبت به همراه گرما، آسایش حرارتی را کاهش می‌دهد. در اولویت بعدی تغییرات سناریو نرمال نسبت به سناریو صفر قابل توجه است. در این سناریو به دلیل افزایش پوشش گیاهی در محور مادی افزایش رطوبت نسبت زمین بایر بیشتر است. با این وجود میزان رطوبت نسبی در زمین بایر به واسطه تغییرات پوشش گیاهی پیرامونش هرچند کم اما افزایش داشته است.

سرعت باد (ارتفاع ۳ متری): به طور کلی با افزایش پوشش گیاهی و با توجه به ارتفاع آن، سرعت باد دست خوش تغییر می‌شود. به همین دلیل در سناریو درخت که ارتفاع درختان مانع ایجاد می‌کنند سرعت باد کاهش چشمگیرتری داشته است. اوج این کاهش سرعت در ساعت ۱۶ بعد از ظهر اتفاق می‌افتد، سپس دوباره افزایش یافته و در ساعات ۲۱ شب تا صبح با روندی ثابت می‌وزد. افزایش سرعت باد در شب موجب جابجایی گرمای آزاد شده از سطوح می‌شود.



شکل ۱۱. نمودار اختلاف دما، باد، رطوبت در سناریوهای مختلف در دو رستپور مادی و زمین بایر

سناریو منتخب

تحلیل‌های صورت‌گرفته تا به اینجا نشان دادند که میزان تاثیر انواع زیرساخت سبز که هر کدام به عنوان یک سناریو در این پژوهش سنجیده شده‌اند، تفاوت بسیار زیادی با یکدیگر دارند. برای مثال پوشش گیاهی به واسطه درخت به دلیل تاج آن عملکرد چشمگیری نسبت به نما و بام سبز دارد. سناریوهای انجام شده برای سنجش در حالت ایده‌آل شبیه‌سازی شده‌اند و در نهایت جمع‌بندی تحلیل‌های صورت گرفته از خروجی‌های نرم‌افزار یک سناریو منتخب که ترکیبی از هر سه نوع زیرساخت سبز به مفهوم جایگذاری درختان سبز، نمای سبز و بام سبز در محله گل‌محمدی است، ارائه خواهد شد.

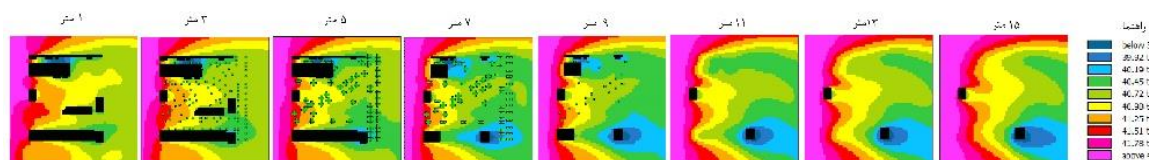
جایگذاری درختان: درختان علاوه بر خنک‌سازی و کاهش جزایر گرمایی سایبان مناسبی برای استفاده‌کنندگان فضا هستند؛ به همین جهت کاشت درخت در تقاطعی با آسایش اقلیمی پایین لازم و ضروری است. کاشت درخت در محورهای شمال-جنوب و محورهای شمال شرقی-جنوب غربی در اولویت است. از کاشت درخت در جبهه شرقی هر دو نوع جهت پلاک و جبهه جنوب-شرقی در پلاک‌هایی با جهت‌گیری شمال غربی-جنوب شرقی پرهیز شود. همچنین اراضی بایر در اولویت زیرساخت سبز شهری قرار دارند.

نمای سبز: از آنجا که امکان کاشت درخت در همه محورها و حیاط‌خانه‌ها وجود ندارد، نمای سبز فرصت مناسبی جهت اجرای زیرساخت سبز است. به این منظور نمای سبز در جداره‌های رو به کوچه در اولویت قرار دارد.

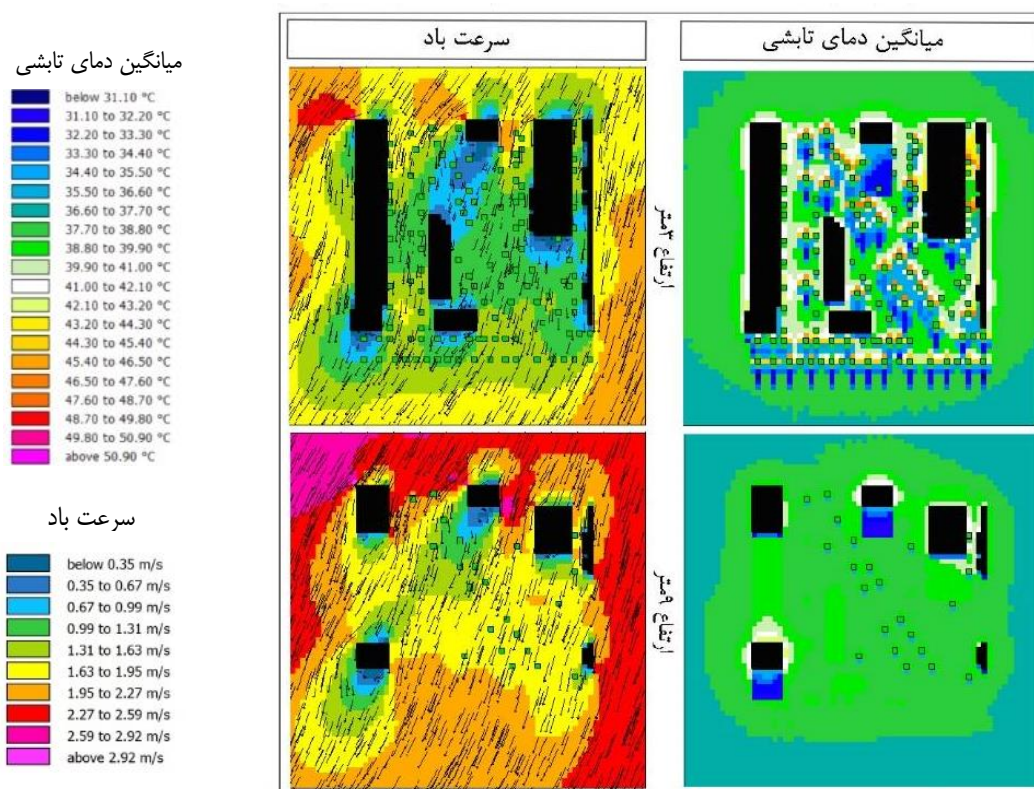
بام سبز: بام سبز با وجود تاثیر نسبتاً کم خود در قیاس با سناریوهای دیگر، مفید بوده و عملکردهای گوناگونی از جمله باغ خصوصی-کمک به ذخیره آب باران و همچنین ارتقای منظر شهری دارد. از آنجا که ایجاد بام سبز نیازمند مشارکت ساکنین است، می‌توان در ابتدا با ایجاد بام‌های سبز بر اماکن عمومی چون ایستگاه مترو، ساختمان مدارس و مساجد شروع نموده و با تشویق ساکنین و ارائه تسهیلات آنها را به ایجاد بام سبز هدایت نمود.

شبیه سازی سناریوی منتخب در نرم افزار

پس از شبیه سازی سناریو منتخب در نرم افزار ENVI-met می توان نتیجه گرفت که کنارهم قرارگیری ترکیبات مختلف زیرساخت سبز می تواند موثرتر از حالت تک عنصری باشد. برای مثال در هر دو خروجی می توان اثر قابل توجه جداره و بام سبز را بخصوص در ارتفاعات بالاتر مشاهده کرد (شکل ۱۲). همچنین احیا دوباره مادی ها تاثیر فزاینده ای بر بهبود دمای خرداقلیم داشته است. به صورتی که در شکل ۱۳ خروجی های میانگین دمای تابشی و سرعت باد قابل ملاحظه است. خروجی های میانگین دمای تابشی نشان می دهد مسیر مادی احیا شده در کمترین میزان دمای تابشی خود قرار دارد.



شکل ۱۲. دمای محدوده طراحی در ارتفاعات ۱ الی ۱۵ متر



شکل ۱۳. میانگین دمای تابشی و سرعت باد در محدوده طراحی

با توجه به اهمیت اقلیم در طراحی این محله، با استفاده از روش شبیه سازی نرم افزار ENVI-met به سنجش سناریوهای مختلفی از زیرساخت سبز پرداخته شد. براساس داده های خروجی سناریو درخت با بیشترین تغییر در وضعیت خرداقلیم محله و سپس سناریو نمای سبز و بام سبز با اختلافی جزئی در بهبود وضعیت جزایر گرمایی لایه سایبان موثر بوده اند. در نهایت و با در نظر گرفتن بیشترین کارایی هر یک از انواع زیرساخت سبز و ریخت شناسی محل سناریو بهینه برای جایگذاری مناسب پوشش گیاهی درخت، نما و بام سبز پیشنهاد شد. در انتها در جدول ۳ راهبرد و سیاست های مبتنی بر تدوین چارچوب طراحی شهری حساس به اقلیم با تاکید بر زیرساخت سبز شهری در محله مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول ۳: راهبرد و سیاست‌های مبتنی بر تدوین چارچوب طراحی شهری حساس به اقلیم با تاکید بر زیرساخت سبز شهری

سیاست	راهبرد	هدف
- ایجاد سایبان مناسب برای قرارگاه‌های رفتاری تعبیه شده در محله - افزایش پوشش گیاهی در سمت جداره شمالی محورهای شرقی-غربی - افزایش فضاهای سبز محلی در سراسر محله - تشویق ساکنین به ایجاد بام‌های سبز (ابتدا اختصاص بام سبز به ساختمان‌های عمومی) - استفاده از جداره سبز در ساختمان‌هایی با نماهای ناسازگار با منظر محله و ساختمان‌های بدون نما و مصالحی با آلودگی پایین - اختصاص بخشی از اراضی بایر به ساکنین جهت کاشت محصول و باغچه شخصی - کاشت درختان در محورهای شمال جنوب - استفاده از کفسازی‌های نفوذپذیر	- مناسب‌سازی فضا برای بهره از آفتاب و سایه - تقویت عناصر تعدیل کننده دما و رطوبت	تدوین چارچوب طراحی شهری حساس به اقلیم با تاکید بر زیرساخت سبز شهری در محله
- قراردی پائل خورشیدی در اراضی باز و بام ساختمان‌ها - استفاده از آب بازیافتی در جهت بازطراحی مادی‌ها - استفاده از پوشش گیاهی همساز با اقلیم اصفهان چون نارون	مصرف بهینه انرژی	
- ایجاد لوپ پیاده در پیرامون فضاهای سبز - ایجاد فضاهای سبز در مقیاس محله به عنوان لکه‌های زیرساخت سبز - در نظر گرفتن خرد فضاهای سبز برای فعالیت‌های اختیاری - در نظر گرفتن محورهای اصلی و مادی‌ها به عنوان دالان‌های سبز - تسهیل دسترسی پیاده به ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی از طریق مسیرسازی - استفاده از پرچین برای جداسازی دیواره حیاط از خیابان	ایجاد ساختار یکپارچه سبز	
اختصاص فضای پیرامون مادی به پیاده‌راه برای اتصال پارک به اراضی کشاورزی	ارتقا کیفیت عناصر سبز موجود	

نتیجه گیری

تغییرات اقلیم امروز از دغدغه مهم متخصصان در زمینه‌های مختلف است و با توجه به نقش شهرها در افزایش شدت اثرات نامطلوب این پدیده، طراحی شهری می‌تواند با ارائه راهکارهای مناسب نقش مهمی در بهبود آن ایجاد نماید. در این پژوهش تلاش گردید با نگاهی کل به جز از مفاهیم اکولوژی و اقلیم به روش کار و ریشه‌یابی مساله پرداخت شود و با مطالعه طراحی شهری حساس به اقلیم و در ذیل آن زیرساخت سبز چارچوبی مناسبی برای محله‌ها که مقیاسی قابل توجه برای ایجاد تغییرات مثبت در اقلیم شهری خواهند داشت، ارائه نماید که همراستا با آن کیفیت‌های لازم جهت زندگی افزایش می‌یابد.

با مطالعات صورت گرفته در بخش مبانی نظری اهمیت زیرساخت سبز شهری برای بهبود اکوسیستم شهری و همچنین کاهش خسارات جبران‌ناپذیر مشخص شد و در پی آن شاخص‌هایی مناسب برای ادغام سه مفهوم مکان، اقلیم و زیرساخت سبز و ایجاد چارچوبی برای حفظ و نگهداری از اجزای زیرساخت سبز در محله انتخابی ارائه گردید. در ادامه به دلیل ترکیبات متنوع زیرساخت سبز و اهمیت تاثیر هریک در بهبود شرایط اقلیمی، با استفاده از نرم‌افزار انویمت سناریوهای مختلفی چون بام سبز، نمای سبز و زمین درختکاری شده در بخشی از محله شبیه‌سازی و با اطلاعات هواشناسی مورد سنجش قرار گرفتند. نتیجه بدین صورت شد که هر سه سناریو تاثیرات مثبت و موثری نشان دادند؛ با این حال کاشت پوشش گیاهی می‌تواند با اختلاف تغییر بیشتری ایجاد نماید.

پیشرفت تکنولوژی و نرم افزارهای اقلیمی موجب شده است این امکان فراهم باشد تا از طریق شبیه‌سازی با نرم افزارهای مختلف بتوان شرایط مختلف را در یک فضای شهری سنجید. به همین سبب با استفاده از نرم‌افزار ENVI-met وضعیت محله گل محمدی در سناریوهای مختلف؛ بدون پوشش گیاهی و با پوشش گیاهی و همچنین ترکیب فضای محله با انواع زیرساخت سبز مورد سنجش قرار گرفت و این نتیجه دریافت شد که فقدان پوشش گیاهی تاثیر بسیاری بر تشدید جزایر گرمایی می‌گذارد و پوشش گیاهی درخت جزایر گرمایی را تا حد چشمگیری در محله کاهش می‌دهد. در درجه دوم نمای سبز و بام سبز تاثیرات مناسبی خواهند داشت. البته ذکر این نکته ضروری است که بام سبز و

نمای سبز می‌تواند تأثیرات بیشتری از طریق تغییر در مصرف انرژی ساختمان‌ها داشته باشد که خود نیازمند مطالعه دقیق‌تر در یک پژوهش مستقل است.

این پژوهش اهمیت زیرساخت سبز شهری و نقش آن در طراحی شهری حساس به اقلیم را تبیین کرده و با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری به ارزیابی تأثیرات مختلف پرداخته است. یافته‌های تحقیق به وضوح نشان می‌دهند که رویکردهای مبتنی بر طبیعت، به ویژه در محیط‌های شهری، نه تنها قادر به تعدیل اثرات جزایر گرمایی هستند، بلکه می‌توانند به ارتقای کیفیت زندگی شهروندان و پایداری اکولوژیکی شهرها کمک شایانی نمایند. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با نرم‌افزار ENVI-met در محله گل‌محمدی حاکی از آن است که پوشش گیاهی عمودی (درختان) مؤثرترین راهکار در کاهش دمای محلی (تا ۳-۲ درجه سانتیگراد) و مقابله با اثر جزیره گرمایی است. دیوارها و بام‌های سبز اگرچه تأثیر کمتری بر دمای محیط دارند، اما در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها (تا ۲۰-۱۵٪) نقش کلیدی ایفا می‌کنند. و در نهایت ترکیب هوشمندانه این راهکارها می‌تواند تا ۳۰٪ بهبود در خرداقلیم شهری ایجاد نماید.

رویکرد زیرساخت سبز در راستای طراحی شهری حساس به اقلیم با بهبود پوشش گیاهی شهرها و سوق دادن آن‌ها به سمت اکوسیستم‌های طبیعی در تلاش برای رفع مشکلات اقلیمی است. از طرفی رویکرد زیرساخت سبز، در تلاش است شهرها را به عنوان جزیی از طبیعت و نه در مقابل طبیعت برنامه‌ریزی نماید. به این ترتیب زیرساخت‌های سبز ضمن ایجاد تعادل میان محیط طبیعی و انسان‌ساخت، ابزاری استراتژیک در برنامه‌ریزی‌ها به منظور افزایش کارایی و انرژی فضاهای شهری برای دست یافتن به شهرهای پایدار و نیز راهکاری هوشمندانه در جهت حفاظت از منابع هستند.

References

- Abdulateef, M., & Al-Alwan, H. (2022). The effectiveness of urban green infrastructure in reducing surface urban heat island. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(1), 101526. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.06.012>
- Asadolahzadeh, K., Mahmoudi, J., & Rezatalab, A. (2023). The effect of some individual characteristics on the willingness of citizens to use the green belt in order to spend leisure time in Mashhad Park Mountain. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 4(2), 91–106. (In Persian) URL: https://www.srds.ir/?_action=article&_au=%D8%B1%D8%B6%D8%A7%D8%B7%D9%84%D8%A8%D8%8C+%D8%A7%D8%A8%D9%88%D8%A7%D9%84%D9%81%D8%B6%D9%84&_au=1348247&lang=en
- Barati, N., Montazeri, M., & Davodpour, Z. (2011). *Research methods in environmental studies*. Tehran: Sako Publishing. (In Persian)
- Bartesaghi-Koc, C., Osmond, P., & Peters, A. (2016). A green infrastructure typology matrix to support urban microclimate studies. *Procedia Engineering*, 169, 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.022>
- Bartesaghi-Koc, C., Osmond, P., & Peters, A. (2020). Quantifying the seasonal cooling capacity of 'green infrastructure types' (GITs): An approach to assess and mitigate surface urban heat island in Sydney, Australia. *Landscape and Urban Planning*, 203, 103893. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103893>
- Carter, J., Cavan, G., Connelly, A., Guy, S., Handley, J., & Kazmierczak, A. (2015). Climate change and the city: Building capacity for urban adaptation. *Progress in Planning*, 95, 1–66. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2013.08.001>
- Coutts, A. M., Tapper, N. J., Beringer, J., Loughnan, M., & Demuzere, M. (2013). Watering our cities: The capacity for Water Sensitive Urban Design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 37(1), 2–28. <https://doi.org/10.1177/0309133312461032>

- Davies, C., & Laforteza, R. (2017). Urban green infrastructure in Europe: Is greenspace planning and policy compliant? *Land Use Policy*, 69, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.08.018>
- Herath, H., Halwatura, U., & Jayasinghe, R. (2018). Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.013>
- Karamirad, S., & Vakilinezhad, R. (2022). Assessing the Effect of Green Roofs on Urban Microclimate, Case study: the Low-Rise Context in Hot-Dry Climate of Shiraz. *Journal of Iranian Architecture & Urbanism (JIAU)*, 13(2), 5–19. (In Persian) <https://doi.org/10.30475/isau.2022.237674.1453>
- Kia, Z., Shamsipour, A., & Azizi, G. (2025). Identification of Homogeneous Climate Response Units in Tehran Metropolitan. *Motaleate Shahri*, 14(53), 67–80. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/urbs.2024.140790.5015>
- Klemm, W., Lenzholzer, S., & van den Brink, A. (2017). Developing green infrastructure design guidelines for urban climate adaptation. *Journal of Landscape Architecture*, 12(3), 60–71. <https://doi.org/10.1080/18626033.2017.1425320>
- Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate*. New York: Academic Press.
- Maleki, L., Majedi, H., & Zarabadi, Z. (2021). Analyzing the role of urban approaches in response to climate changes with emphasis on biophilic urbanism, a case study: Tonekabon City. *Urban Planning Knowledge*, 5(1), 147–163. (In Persian) <https://doi.org/10.22124/upk.2020.13045.1211>
- McMahon, E. T. (2000). Green infrastructure. *Planning Commissioners Journal*, (37), 4–7. URL: <https://plannersweb.com/wp-content/uploads/2000/01/372.pdf>
- Monteiro, R., Ferreira, J. C., & Antunes, P. (2020). Green infrastructure planning principles: An integrated literature review. *Land*, 9(12), 525. <https://doi.org/10.3390/land9120525>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Ouyang, W., Sinsal, T., Simon, H., Morakinyo, T. E., Liu, H., & Ng, E. (2022). Evaluating the thermal-radiative performance of ENVI-met model for green infrastructure typologies (Experience from a subtropical climate). *Building and Environment*, 207, 108427. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108427>
- Pahl-Weber, E., Seelig, S., Ohlenburg, H., & Kuhla von Bergmann, N. (2013). Urban challenges and urban design approaches for resource-efficient and climate-sensitive urban design in the MENA region. *Young Cities Research Paper Series*, 5. <https://doi.org/10.14279/depositonce-3704>
- Rafiee, V., Vahidzadegan, F., & Abdollahi, R. (2019). Natural-historical landscape regeneration of urban green infrastructures based on AWOP and gravity models (Case study: District 3, Isfahan). *Journal of Environmental Studies*, 45(3), 453–469. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jes.2019.276592.1007826>
- Reinwald, F., Ring, Z., Kraus, F., Kainz, A., Tötzer, T., & Damjanovic, D. (2019). Green resilient city - A framework to integrate the Green and Open Space Factor and climate simulations into everyday planning to support a green and climate-sensitive landscape and urban development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323, 012082. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012082>

- Saboonchi, P., Abarghouyi, H., & Motedayen, H. (2018). Green landscape networks; The role of articulation in the integrity of green space in landscapes of contemporary cities of Iran. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, 15(62), 5–16. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/bagh.2018.66280>
- Savoj, N., & Dehghan, N. (2024). Evaluation of vertical greenery system efficiency for thermal behavior of conventional residential buildings in the hot and dry climate, Isfahan Province, Iran. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 17(46), 1–22. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/aaud.2024.376179.2742>
- Seiwert, A., & Rößler, S. (2020). Understanding the term green infrastructure: origins, rationales, semantic content and purposes as well as its relevance for application in spatial planning. *Land Use Policy*, 97, 104785. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104785>
- Shirgir, E., Kheyroddin, R., & Behzadfar, M. (2019). Developing a pattern for intervention in urban green infrastructures to reach urban ecological resilience to climate change (Case study: Yousef Abad Neighborhood in Tehran). *Journal of Environmental Studies*, 45(3), 545–565. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jes.2020.290829.1007933>
- Tamminga, K., Cortesão, J., & Bakx, M. (2020). Convivial greenstreets: A concept for climate-responsive urban design. *Sustainability*, 12(9), 3790. <https://doi.org/10.3390/su12093790>
- Yazdanpanah, M., Yavari, A., Zebardast, L., & Alemohammad, S. (2015). Urban green infrastructure assessment for their regeneration in Tehran landscape. *Journal of Environmental Studies*, 41(3), 613–625. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jes.2015.55900>
- Zölcha, T., Maderspacher, J., Wamsler, C., & Pauleit, S. (2016). Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.09.011>