



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=fa>

Geography and Environmental Planning

E-ISSN: 2252- 0910

Document Type: Research Paper

Vol. 37, Issue 2, No.102, 2026, pp. 153- 182

Received: 16/02/2026 Accepted: 21/09/2026

Urban Microclimate Assessment and Thermal Comfort Improvement Strategies in Hot and Dry Climates: A Case Study of Zahedan City

Parvin Hashemzaei 

Department of Human Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
parven.sh054@gmail.com

Eisa Ebrahimzadeh Akbad 

Department of Human Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
iazh@gep.usb.ac.ir

Mohsen Hamidianpour  *

Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
mhamidianpour@gep.usb.ac.ir

Abstract

The quality of urban livability in hot and dry climates depends on microclimatic conditions. Solar radiation, low humidity, and sparse vegetation significantly affect quality of life. Enhancing thermal comfort contributes to a better experience of public spaces and encourages greater social interaction. Zahedan, with its high temperature potential and limited vegetation cover, serves as a suitable case for analyzing the effects of climate-based design on improving livability. This study aimed to assess the existing thermal conditions and propose integrated strategies, employing a combination of field measurements, vegetation and material monitoring, and microclimatic modeling with ENVI-met software. The results indicated that the Rasouli intersection area experienced severe thermal stress during the midday hours as characterized by high PET values, insufficient shading, and low-albedo surfaces. Analysis of design scenarios showed that the use of drought-tolerant species with effective canopy cover, increased vegetation density, reflective materials, and artificial shading could reduce surface temperatures by approximately 6°C, moderate the mean radiant temperature, and lower the physiological equivalent temperature by 2-3°C. At the same time, the maximum relative humidity during peak radiation hours decreased from 35.16 to 33.00%, while its minimum value during the morning hours rose from

*Corresponding Author

Hashemzaei, P. , Ebrahimzadeh Akbad, E. and Hamidianpour, M. (2026). Assessment of Urban Microclimate and Strategies for Improving Thermal Comfort in Hot and Dry Climates: Case Study of Zahedan City. *Geography and Environmental Planning*, 37 (2), 153 - 182 .



2252-0910 © University of Isfahan

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



10.22108/gep.2026.148358.1774

38.21 to 17.34%, activating the evaporative cooling mechanism of plants and enhancing its positive effect on thermal comfort indices, such as the physiological equivalent temperature and the global thermal climate index. This simultaneous interaction of temperature reduction and increased relative humidity improved the range and duration of users' thermal comfort, indicating the effective impact of urban design interventions on enhancing livability in public spaces. The findings of this study emphasized climate-responsive strategies and the integration of green elements in improving the thermal conditions of open urban spaces.

Keywords: Urban Microclimate, Urban Heat Islands, Thermal Comfort, Regulating Services, Mitigation Strategies.

Introduction

Urban growth and urban transformations have intensified the urban heat island phenomenon, adversely affecting citizens' health and quality of life. Thermal comfort in urban open spaces, particularly in hot and arid climates, has emerged as a fundamental challenge as these areas are directly exposed to environmental stresses and their quality influences behavioral patterns and social interactions. Research indicates that climate-responsive design and implementation of vegetation can improve microclimatic conditions by providing shade and moderating temperatures. In this context, microclimate simulation utilizing indices, such as PET, PMV, and UTCI, serves as an effective tool for assessing the impact of design interventions prior to implementation. Despite advancements, a research gap persists regarding the integrated analysis of thermal indices and physical components within a systemic framework. The present study adopted an innovative approach by employing the Xeriscaping strategy and concurrently evaluating multiple thermal indices to investigate the influence of physical characteristics and climate-responsive design on enhancing thermal comfort. Focusing on Rasuli Crossroads in Zahedan, this article analyzed the role of spatial structure and interventions—such as low-water vegetation—in mitigating thermal stress and improving urban livability.

Materials & Methods

Study Area: Zahedan County covering an area of 31,250 km² (equivalent to 17% of the total area of the province) is characterized by an arid desert climate with winter precipitation (Statistical Center of Iran, 2023). The region experiences extreme summer temperatures and limited vegetation cover. The commercial district at Rasuli Crossroads serving as one of the city's busiest pedestrian thoroughfares provides an appropriate setting for investigating urban livability in thermally stressful environments. This research employed ENVI-met software modeling, field-based microclimatic measurements, and a systematic review of thermal comfort literature to examine and propose integrated urban design strategies for improving environmental comfort and enhancing livability.

Data and Methodology: This study adopted a descriptive-analytical approach by utilizing a mixed-methods (quantitative-qualitative) strategy organized into 3 main phases:

Phase One: Theoretical Framework Development: A systematic review of relevant research on outdoor thermal comfort, microclimate simulation, and climate-responsive design was conducted to establish the theoretical framework of the study.

Phase Two: Field Data Collection: Climatic parameters were measured at 12 fixed points within the study area by using a TES-1160 thermo-hygro-barometer at a standard height of 1.1 meters above ground level in accordance with ASHRAE Standard 55 guidelines (ASHRAE, 2023). The measured parameters included air temperature, relative humidity, wind speed and direction, and radiant temperature. Concurrently, 70 questionnaires based on ASHRAE Standard 55 were distributed and collected to assess users' thermal perception. Field data were utilized for calibration and validation of simulation results.

Phase Three: Microclimate Simulation and Scenario Analysis: Simulations were performed by using ENVI-met software, version 5.6. For detailed analysis, 3 representative receptors were selected based on physical characteristics, predominant activity types, and degree of solar exposure. Using the SWOT model informed by field observations and stakeholder interviews, strategic spatial analysis revealed that high accessibility and economic dynamism constituted the primary strengths of the area, while insufficient vegetation cover, intense solar radiation, and pedestrian–vehicle route conflicts represented its most significant weaknesses. These findings informed the development of design intervention scenarios. In the final phase, in addition to analyzing existing conditions, a proposed intervention scenario incorporating climate-adapted vegetation was simulated to evaluate its effects on air temperature and relative humidity. The analysis results served as practical guidelines for designing and enhancing the quality of urban open spaces in the area of Rasuli Crossroads.

Research Findings

Data collection combined climatic measurements with 70 surveys. The results showed that most users experienced severe thermal stress, forcing them to seek shade or pass through shops. The sample comprised 60% men and 40% women, predominantly aged 20-35 years with shopkeepers as the main occupational group. The findings confirmed the direct link between physical design and thermal experience validated against previous research. Field measurements confirmed significant microclimatic variations in the pedestrian area with shaded versus sunlit spaces showing substantial temperature differences. ENVI-met simulations closely matched field data, particularly near building masses, thus validating the model's accuracy. Wind flow analysis (northwest–southeast) indicated natural ventilation potential, while intense solar radiation (11:00-16:00) in shaded areas severely reduced thermal comfort. Extensive hard surfaces, limited vegetation, and uneven building heights were identified as key factors exacerbating heat stress. Despite strong commercial activity creating social interaction potential, this capacity remained underutilized due to poor climatic conditions.

Microclimate Analysis and Simulation: Using field data, microclimate simulation was conducted with ENVI-met software. A scenario incorporating native drought-resistant trees (*Prosopis*, *Cupressus*, *Olea*, *Melia*, *Washingtonia*) was designed with tall shade trees along pedestrian margins and understory species in xeriscaping layers. This aimed to reduce ambient temperature by 2-3°C, increase shade, and mitigate urban heat island effects.

Key Simulation Results: The proposed scenario reduced maximum temperatures and hotspots while improving spatial temperature distribution. At 15:00, the maximum temperature decreased by 6.49°C (from 39.70 to 33.21°C), demonstrating that the combined interventions were more effective than vegetation-only approaches. Air temperature reductions of 2-6°C and PET decreases of 2-3°C confirmed positive thermal comfort impacts.

Relative humidity analysis revealed enhanced evapotranspiration effects with maximum humidity increasing from 16.35 to 33.00% at 15:00. Morning humidity increases (from 34.17 to 38.21%) demonstrated vegetation benefits throughout the daily cycle. These findings aligned with international research on the effectiveness of green infrastructure.

Shade deficiency and limited airflow were identified as primary factors reducing thermal comfort. Areas with adequate vegetation experienced significant PET reductions and improved user perception, confirming the effectiveness of drought-resistant species and strategic tree placement.

Thermal Comfort and Livability: The proposed scenario expanded comfort zones and reduced heat stress. Vegetation, shading, and reflective materials created "thermal shelters" in dense green areas. Unlike the study of Meliuh et al. (2024), in which vegetation alone proved insufficient, integrated approach of this research combining plants, shade, and radiation control achieved superior comfort in hot, arid climates.

Physical Structure Analysis: Rasuli Crossroads exhibited market development that increased thermal density, poor coordination that limited airflow, and activity patterns that overrode climate considerations.

SWOT Analysis: Thermal quality stemmed from design, not merely climate. Direct sun exposure without shade reduced comfort, while wind flow remained untapped. Movement analysis showed that pedestrian–vehicle interference reduced safety and spatial quality despite commercial potential. The SWOT analysis identified strengths and weaknesses in pedestrian spaces. Integrating microclimatic data with SWOT enabled practical improvement strategies (Ahmadi, 2024; Dirvar, 2025; Cui et al., 2019).

Discussion of Results & Conclusion

The research findings indicated that thermal comfort in the open space of Rasuli Crossroads in Zahedan resulted from a complex interaction of climatic, physical, and movement factors. Simulation results and field data confirmed that direct solar radiation in the absence of effective shading elements was the primary factor reducing users' thermal comfort. However, appropriate wind orientation within the area was identified as a valuable climatic opportunity that, with proper physical organization, could contribute to natural ventilation and reduce thermal stress.

The key point was that the existing thermal challenges were not solely attributable to the hot and arid climate of the region, but largely stemmed from spatial organization and physical design. The development of market-oriented activities, conversion of residential units to commercial spaces, and high human density had intensified thermal density while increasing economic dynamism. Physical incoordination, lack of shading, and pedestrian–vehicle route interference (particularly motorcycle traffic) had not only reduced safety but also negatively affected the perceptual quality of space and willingness to remain in the environment.

Similar studies (such as [Meliouh et al., 2024](#)) had shown that merely increasing vegetation density could not, on its own, achieve complete comfort. In contrast, the present study emphasized that an integrated, combined approach—incorporating native drought-resistant vegetation, spatial shading arrangements, direct radiation control, and physical spatial organization—could shift the thermal comfort index (PET) from severe stress conditions to moderate or near-comfort ranges (the green-yellow spectrum). This finding aligned with research by Sharaf et al. (2023) and Shabanzadeh Namini et al. (2021), which emphasized the importance of structural and integrated design in urban spaces. Ultimately, combining microclimatic data with strategic SWOT analysis demonstrated that strengths like high accessibility and economic dynamism, when mitigating weaknesses, such as lack of shade and vegetation, could lead to the realization of the space's social and economic capacities. Therefore, enhancing thermal comfort is not merely a decorative goal but a prerequisite for effectively leveraging the potential of pedestrian-oriented spaces in hot and arid climates. Climate-responsive design must be prioritized as a fundamental strategy for urban livability.

مقاله پژوهشی

ارزیابی خرداقلیم شهری و راهبردهای بهبود آسایش حرارتی در اقلیم گرم و خشک (مطالعه موردی: شهر زاهدان)

پروین هاشم‌زائی^{ID}، گروه جغرافیای انسانی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
parven.sh054@gmail.com

عیسی ابراهیم‌زاده^{ID}، گروه جغرافیای انسانی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
iazh@gep.usb.ac.ir

محسن حمیدیان‌پور^{ID*}، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
mhamidianpour@gep.usb.ac.ir

چکیده

کیفیت زیست‌پذیری شهری در اقلیم‌های گرم و خشک به شرایط خرداقلیمی وابسته است. تابش خورشید، رطوبت کم و پوشش گیاهی محدود بر کیفیت زندگی تأثیر دارد. بهبود آسایش حرارتی موجب ارتقاء تجربه فضاهای عمومی و افزایش تعامل اجتماعی می‌شود. این پژوهش با تمرکز بر بازار رسولی شهر زاهدان به‌عنوان نمونه‌ای با دمای بالا و پوشش گیاهی کم، به تحلیل تأثیر طراحی اقلیم‌محور بر زیست‌پذیری می‌پردازد. روش پژوهش شامل اندازه‌گیری‌های میدانی، پرسشنامه، پایش پوشش گیاهی و مصالح، و در نهایت مدل‌سازی خرداقلیمی با نرم‌افزار ENVI-met است. هدف، ارزیابی شرایط موجود و ارائه راهبردهای یکپارچه برای بهبود آسایش حرارتی و ارتقای کیفیت محیط شهری است. نتایج نشان می‌دهد که محدوده تقاطع رسولی در ساعات میانی روز با مقادیر بالای PET، سایه‌اندازی ناکافی و سطوح با آلودگی پایین، دچار تنش حرارتی شدید است. تحلیل سناریوهای طراحی نشان می‌دهد که به‌کارگیری گونه‌های مقاوم به خشکی با تاج پوشش مؤثر، افزایش تراکم پوشش گیاهی، استفاده از مصالح بازتابنده و ایجاد سایه‌اندازی مصنوعی، می‌تواند دمای سطحی را تا حدود ۶ درجه سلسیوس کاهش دهد، میانگین دمای تابشی را تعدیل کند و دمای معادل فیزیولوژیکی را ۲ تا ۳ درجه سلسیوس کاهش دهد. همزمان، بیشینه رطوبت نسبی در ساعات اوج تابش از ۱۶/۳۵ درصد به ۳۳ درصد افزایش یافته و در ساعات صبح نیز حداقل آن از ۲۱/۳۸ درصد به ۱۹/۸۱ درصد کاهش یافته است که مکانیزم خنک‌کننده تبخیری گیاهان را فعال و اثر مثبت آن بر شاخص‌های آسایش حرارتی مانند دمای معادل فیزیولوژیکی و شاخص جهانی اقلیم حرارتی را تقویت می‌کند. این تعامل همزمان کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی، محدوده و مدت زمان آسایش حرارتی کاربران را بهبود می‌بخشد و نشان‌دهنده تأثیر مؤثر مداخلات طراحی شهری بر ارتقای زیست‌پذیری در فضاهای عمومی است. نتایج این مطالعه بر راهبردهای اقلیم‌محور و ادغام عناصر سبز در بهبود شرایط حرارتی فضاهای باز تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: خرداقلیم شهری، پوشش گیاهی، آسایش حرارتی، استراتژی‌های کاهش

*نویسنده مسئول

هاشم‌زائی، پروین، ابراهیم‌زاده، عیسی و حمیدیان‌پور، محسن. (۱۴۰۵). ارزیابی خرداقلیم شهری و راهبردهای بهبود آسایش حرارتی در اقلیم گرم و خشک (مطالعه موردی: شهر زاهدان). جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۷ (۲)، ۱۸۲-۱۵۳.



مقدمه

رشد شتابان شهرنشینی و دگرگونی الگوهای توسعه شهری در دهه‌های پسین، پیامدهای چشمگیری بر ساختار کالبدی و شرایط اقلیمی شهرها بر جای گذاشته است. افزایش تراکم ساختمانی، گسترش سطوح نفوذناپذیر، کاهش پوشش گیاهی و به‌کارگیری مصالح با ظرفیت ذخیره گرمایی بالا، از عوامل اصلی تشدید جزیره حرارتی شهری محسوب می‌شوند (Bacha et al., 2024, p. 1; Gomaa et al., 2024, p. 1; Oke, 1988, p. 103; Stewart & Oke, 2012, p. 1885; UN-Habitat, 2016, p. 1). این پدیده با افزایش دمای محیط شهری نسبت به پیرامون، کاهش کیفیت فضاهای باز و تشدید تنش حرارتی، می‌تواند سلامت، رفاه و کیفیت زندگی شهروندان را تحت تأثیر قرار دهد (Harlan et al., 2006, p. 2847; Melioun et al., 2024, p. 1; Sedira, 2023, p. 1). به‌عنوان یکی از شاخص‌های بنیادین کیفیت محیط و زیست‌پذیری شهری، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان حضورپذیری، الگوهای رفتاری، تعاملات اجتماعی و سرزندگی فضاهای عمومی ایفا می‌کند (Gehl, 2011, p. 32; Nikolopoulou, 2011, p. 1552). فضاهای باز شهری به دلیل قرارگیری مستقیم در معرض تابش خورشید، نوسانات دمایی، جریان باد و تغییرات رطوبتی، بیش از سایر فضاها تحت تأثیر تنش‌های حرارتی قرار دارند و کیفیت خرداقلیمی آنها بر تجربه ادراکی و رفتار کاربران اثر مستقیم دارد (Benzaida et al., 2025, p. 13; Erell et al., 2011). ازاین‌رو، ارزیابی و بهبود شرایط حرارتی فضاهای باز به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک به یکی از چالش‌های محوری برنامه‌ریزی و طراحی شهری تبدیل شده است (Emmanuel & Johansson, 2006, p. 189; Johansson, 2006, p. 1326). در واقع، طراحی شهری اقلیم‌محور و بهره‌گیری از عناصر طبیعی، به‌ویژه پوشش گیاهی، می‌تواند نقش مؤثری در تعدیل شرایط خرداقلیمی و کاهش شدت جزیره حرارتی داشته باشد (Bowler et al., 2010, p. 147; Santamouris, 2014; Tzoulas et al., 2007, p. 167). پوشش گیاهی، به‌ویژه درختان، افزون بر کارکردهای زیباشناختی و اکولوژیکی، از طریق ایجاد سایه، کاهش دمای سطح، تعدیل باد و فرایند تبخیر و تعرق، موجب کاهش دمای هوا و ارتقای آسایش حرارتی در فضاهای باز می‌شوند (Ali-Toudert, 2005; Rahman et al., 2016, p. 135; Shashua-Bar et al., 2011, p. 1498). همچنین نقش فضای سبز شهری در کاهش آلاینده‌ها و کنترل اثرات گرمایش شهری در پژوهش‌های گوناگون تأیید شده است (کریمیان، ۱۳۹۲؛ Tzoulas et al., 2007, p. 167).

در سال‌های پسین، شبیه‌سازی خرداقلیم به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل شرایط حرارتی فضاهای باز و سنجش سناریوهای طراحی پیش از اجرا مورد توجه قرار گرفته است (ENVI-met, 2024; Mohsin & Gough, 2012, p. 105; UN-Habitat, 2016). این رویکرد امکان ارزیابی کمی اثر مداخلات کالبدی (مانند تغییر نسبت ارتفاع به عرض خیابان، افزایش سایه‌اندازها، اصلاح مصالح و تقویت پوشش گیاهی) بر کاهش تنش حرارتی و ارتقای زیست‌پذیری را فراهم می‌کند (Emmanuel & Fernando, 2007, p. 241; Erell et al., 2011). در این چارچوب، به‌کارگیری شاخص‌های معتبر آسایش حرارتی مانند PET^1 ، PMV^2 و $UTCI^3$ ، امکان تحلیل جامع‌تر تعامل انسان و محیط را

¹ Physiological Equivalent Temperature

² Predicted Mean Vote

³ Universal Thermal Climate Index

فراهم می‌سازد؛ زیرا این شاخص‌ها افزون بر دمای هوا، اثر تابش، رطوبت، سرعت باد و پارامترهای فیزیولوژیک انسان را نیز لحاظ می‌کنند (Błażejczyk et al., 2010, p. 91; Fanger, 1970; Höppe, 1999, p. 71; Jendritzky et al., 2012, p. 421). در این راستا بررسی پژوهش‌ها نشان می‌دهد کیفیت حرارتی فضاها با شهرهای تحت تأثیر متقابل ویژگی‌های کالبدی، عناصر طبیعی و متغیرهای اقلیمی قرار دارد (جدول ۱). در حوزه مؤلفه‌های کالبدی، هندسه شهری و نسبت‌های ابعادی معابر (H/W) به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده در میزان دریافت تابش و الگوی سایه‌اندازی شناخته می‌شوند. پژوهش‌های بنیادین اوکه و جانسون تأکید دارند که در اقلیم‌های گرم و خشک، دره‌های شهری عمیق با افزایش نسبت ارتفاع به عرض، پناهگاه‌های حرارتی مؤثری در برابر تابش مستقیم خورشید ایجاد می‌کنند (Johansson, 2006, p. 1326; Oke, 1988, p. 103). در ایران نیز مطالعاتی نظیر پژوهش (پوراحمد و همکاران، ۱۳۹۸، ص. ۸۹؛ عزیزی و همکاران، ۱۳۹۹، ص. ۵). مؤید این مطلب است که جهت‌گیری معابر و ارتفاع جداره‌ها نقشی حیاتی در تعدیل شاخص‌های آسایش حرارتی نظیر PET ایفا می‌کنند؛ به‌طوری‌که در ساعات اوج تابش، سایه کالبدی ساختمان‌ها حتی از سایه درختان در دره‌های شهری عمیق مؤثرتر عمل می‌کند. همچنین، در مطالعه‌ای در اراضی پشت سیلوی شهر یزد، با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزار انوی‌مت و شاخص PMV، تأثیر مؤلفه‌های فرم کالبدی، از جمله نسبت ارتفاع به عرض معابر، محصوریت، ضریب دید به آسمان، مصالح و پوشش گیاهی، بر آسایش حرارتی فضاها با شهرهای بررسی و اهمیت این مؤلفه‌ها در شکل‌گیری شرایط خرداقلیمی تأیید شده است (منتظری و همکاران، ۱۳۹۶، ص. ۶۹). در کنار فرم کالبدی، نقش عناصر طبیعی و پوشش گیاهی به‌عنوان راهکاری اکولوژیک برای بهبود میکروکلیم به‌دقت واکاوی شده است. یافته‌های شاخص‌های مدنظر نشان می‌دهند که درختان از طریق دو مکانیسم موازی ایجاد سلیه و تبخیر و تعرق، دمای محیط را کاهش می‌دهند (Rahman et al., 2016, p. 135; Shashua-Bar et al., 2011, p. 1498). یادگاری و سجاذزاده، با تأکید بر عملکرد فصلی درختان برگ‌ریز، پتانسیل این عناصر را در ایجاد تعادل حرارتی میان تابستان و زمستان در اقلیم‌های ایران نشان داده‌اند؛ با این حال، در مناطق با محدودیت شدید منابع آبی، پارادایم طراحی از فضای سبز متداول به سمت زری‌اسکیپ یا طراحی منظر کم‌مصرف تغییر یافته است (یادگاری و سجاذزاده، ۱۴۰۰، ص. ۱۵). مطالعاتی همچون وید و همکاران، اکبری و همکاران بر این نکته صحنه می‌گذارند که استفاده از گونه‌های بومی و مقاوم به خشکی (مانند کهور و گز در مناطق خشک ایران) می‌تواند بدون تحمیل هزینه‌های سنگین آبیاری، تنش حرارتی را در مقیاس خرد کاهش دهد (Akbari et al., 2001, p. 295; Wade et al., 2010). موضوعی که در پیشینه‌های داخلی امینی‌پور کمتر به‌صورت کمی و شبیه‌سازی شده تحلیل شده است (Aminipouri, 2019, p. 9).

سنجش دقیق این اثرات مستلزم به‌کارگیری شاخص‌های معتبر آسایش حرارتی است که تعامل میان فیزیولوژی انسان و محیط را مدل‌سازی کنند. در این راستا، شاخص PET به دلیل قابلیت تفسیر بالا، پرکاربردترین معیار در مطالعات فضای باز محسوب می‌شود (Höppe, 1999, p. 71). با وجود این، پژوهش‌های اخیر (Błażejczyk et al., 2013, p. 5; Jendritzky et al., 2012, p. 421). بر ضرورت استفاده از شاخص‌های جامع‌تری مانند UTCI تأکید دارند که پاسخ‌های ترموفیزیولوژیک بدن را در طیف وسیعی از اقلیم‌ها با دقت بیشتری ارزیابی می‌کند. در سطح ملی،

پژوهش‌هایی با بهره‌گیری از شاخص‌های آسایش اقلیمی در شهرهایی همچون اصفهان (اسدی و گندمکار، ۱۳۹۶)، تهران (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۹، ص. ۵) و کرمانشاه (محمدی و همکاران، ۱۳۹۸، ص. ۷۷) به ارزیابی شرایط حرارتی پرداخته‌اند. همچنین در مطالعه‌ای جداگانه، میر و همکاران، با آینده‌نگری تنش‌های گرمایی در شهر زاهدان، بر لزوم توجه به تغییرات اقلیمی و تدوین راهبردهای سازگاری بومی تأکید کرده‌اند (میر و همکاران، ۱۴۰۳، ص. ۱). درنهایت، مرور نظام‌مند پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که در مطالعات داخلی، تأثیر فرم شهری و فضای سبز به‌طور مجزا بررسی شده است؛ با این حال، ادغام سیستمی راهبردهای کالبدی با رویکرد زری‌اسکیپ در بافت تجاری - سستی پرتردد مانند چهارراه رسولی زاهدان هنوز به‌طور کامل مورد توجه قرار نگرفته است. بیشتر پژوهش‌های اخیر بر فضاهای سبز متداول تمرکز داشته و از تحلیل الگوهای استقرار گیاهان کم‌مصرف بومی در بهبود هم‌زمان شاخص‌ها غافل مانده‌اند.

با وجود پژوهش‌های گسترده درباره آسایش حرارتی فضاهای باز، ادغام هم‌زمان چند شاخص کلیدی، تحلیل یکپارچه اثر فرم و مورفولوژی شهری بر خرداقلیم، و ارائه راهکارهای طراحی سازگار با اقلیم‌های خاص به‌ویژه گرم و خشک همچنان از چالش‌های پژوهشی باقی مانده است (Emmanuel & Johansson, 2006, p. 189; Erell et al., 2011; Santamouris, 2014, p. 682). بسیاری از پژوهش‌ها یا بر یک شاخص حرارتی تمرکز داشته‌اند یا مؤلفه‌های کالبدی را به‌صورت منفک و غیرسیستمی بررسی کرده‌اند؛ از این رو، تعامل پیچیده میان عوامل اقلیمی، کالبدی و انسانی کمتر به‌صورت جامع تحلیل شده است. این در حالی است که میان ویژگی‌های مورفولوژیک بافت شهری و شاخص‌های حرارتی نظیر PET رابطه‌ای معنادار وجود دارد و اصلاح این مؤلفه‌ها می‌تواند نقش مؤثری در تعدیل شرایط حرارتی فضاهای باز شهری ایفا کند (Emmanuel & Johansson, 2006, p. 189; Höppe, 1999, p. 71). با توجه به خلأهای شناسایی شده در مطالعات پیشین، بررسی هم‌زمان ویژگی‌های کالبدی و مداخلات طراحی اقلیم‌محور می‌تواند در تبیین و بهبود شرایط حرارتی فضاهای باز شهری، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک، مؤثر باشد (Santamouris, 2014, p. 682; UN-Habitat, 2016). در این چارچوب، زری‌اسکیپ به‌عنوان رویکردی سازگار با محدودیت منابع آب، ظرفیت آن را دارد که از طریق انتخاب و استقرار هدفمند گونه‌های گیاهی کم‌مصرف، در تعدیل شرایط خرداقلیمی و ارتقای آسایش حرارتی فضاهای باز نقش ایفا کند (Höppe, 1999, p. 71; Jendritzky et al., 2010, p. 421; Wade et al., 2012). از این رو، این پژوهش بر کیفیت و الگوی کاشت زری‌اسکیپ و تحلیل هم‌زمان PET تمرکز دارد (Bowler et al., 2010, p. 147; Rahman et al., 2016, p. 135). بر این اساس، مسئله اصلی پژوهش آن است که ساختار فضایی و مؤلفه‌های کالبدی محدوده تا چه اندازه بر شرایط حرارتی اثر می‌گذارند و آیا به‌کارگیری پوشش گیاهی کم‌مصرف و عناصر سایه‌انداز در قالب مداخلات طراحی اقلیم‌محور می‌تواند به بهبود آسایش حرارتی و در نتیجه ارتقای کیفیت محیطی و زیست‌پذیری فضای باز شهری منجر شود (Emmanuel, 2005, p. 1591; Shashua-Bar et al., 2011, p. 1498; UN-Habitat, 2016, p. 1).

جدول ۱- مقایسه اثرگذاری راهبردهای طراحی اقلیم‌محور بر شاخص PET در مطالعات مشابه

Table 1 - Comparison of the impact of climate-based design strategies on the PET index in similar studies

مطالعات کلیدی	نتایج	تأثیر بر PET	عامل
Shashua-Bar & Hoffman (2000); Aminipouri et al. (2019)	این مطالعه نشان می‌دهد که درختان با تاج گسترده از طریق سایه‌اندازی و تبخیر - تعرق، دمای تابشی و شاخص PET را به‌طور معنادار در اقلیم‌های گرم و خشک کاهش می‌دهند.	۲ تا ۳- درجه سلسیوس؛	پوشش گیاهی
Santamouris., (2014)	نتایج پژوهش بیانگر آن است که استفاده از مصالح بازتابنده در کف و بدنه فضاهای شهری موجب کاهش جذب تابش خورشیدی و در نتیجه کاهش دمای سطح و تنش حرارتی می‌شود.	تا ۶- درجه سلسیوس	مصالح آلبدو بالا
de Abreu-Harbach et al., (2015)	این تحقیق نشان می‌دهد که سایه‌بان‌های مصنوعی می‌توانند میانگین دمای تابشی را کاهش دهند و نقش مؤثری در بهبود آسایش حرارتی عابرین در فضاهای باز ایفا کنند.	۲ تا ۴- درجه سلسیوس	سازه‌های سایه‌بان
He et al., (2015); Benziada et al., (2025)	مطالعات اقلیمی شهری در شهرهای بیابانی نشان می‌دهد که نسبت مناسب ارتفاع به عرض معبر (H/W) و سایه کالبدی حاصل از شکل شهر می‌تواند بار حرارتی را کاهش دهد و شرایط PET را بهبود بخشد.	متغیر، جهت‌گیری شمال-جنوب بهتر	هندسه شهری

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که ارتقای زیست‌پذیری فضاهای شهری، به‌ویژه در مناطق گرم و خشک، نیازمند توجه هم‌زمان به مؤلفه‌های محیطی و شرایط آسایش حرارتی است. (Levy, 2022). زیست‌پذیری شهری، که توانایی یک مکان برای تأمین نیازهای مادی و معنوی ساکنان و ارتقای کیفیت زندگی آنان تعریف می‌شود (بندرآباد، ۱۳۹۰، ص. ۱۸۸)، با پایداری شهری ارتباط تنگاتنگی دارد؛ به‌طوری‌که حفظ منابع طبیعی و کاهش آسیب‌های محیطی، هر دو به بهبود کیفیت زندگی فعلی و آینده کمک می‌کنند. در این میان، فضاهای عمومی شهری به‌عنوان محورهای کلیدی تعاملات اجتماعی، نقش مهمی در ارتقای رفاه اجتماعی، فرهنگی و زیست‌محیطی شهرها ایفا می‌کنند (Gehl, 2011). آسایش حرارتی، به‌عنوان یکی از معیارهای بنیادین کیفیت فضاهای باز شهری، بیان‌کننده رضایت ذهنی افراد از شرایط حرارتی محیط است (ASHRAE 55, 2023). این مفهوم در فضای باز شهری اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا شرایط نامطلوب حرارتی می‌تواند موجب کاهش حضور شهروندان، تضعیف سرزندگی فضاهای عمومی و افزایش مصرف انرژی در ساختمان‌ها شود.

براساس مدل استاندارد فانگر، آسایش حرارتی تحت تأثیر شش پارامتر اصلی قرار دارد: چهار پارامتر محیطی (دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و دمای تابشی متوسط) و دو پارامتر شخصی (مقاومت حرارتی پوشاک و نرخ متابولیک) (Fanger, 1970). در فضاهای باز، دمای تابشی متوسط (T_{mrt}) که شامل تابش مستقیم خورشید و تابش از سطوح اطراف است، تا ۷۰ درصد از بار حرارتی وارد بر انسان را تشکیل می‌دهد و در اقلیم‌های گرم می‌تواند تا ۴۰ درجه سلسیوس بیشتر از دمای هوا باشد (Shashua-Bar et al., 2011, p. 1498). در سال‌های جدید، نقش عناصر طبیعی به‌ویژه پوشش گیاهی در تعدیل شرایط خرداقلیمی و بهبود آسایش حرارتی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته

است. پوشش گیاهی شهری از طریق ایجاد سایه، افزایش تبخیر و تعرق، تعدیل شرایط تابشی و تغییر الگوی جریان هوا می‌تواند در کاهش تنش حرارتی فضاهای باز مؤثر باشد (Bowler et al., 2010, p. 147; Rahman et al., 2016, p. 135)؛ با این حال، در مناطق دارای محدودیت منابع آبی، استفاده از رویکردهای پایدار مانند زری‌اسکیپ (منظرسازی کم آب) که بر انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی و کاهش نیاز آبی تأکید دارد، به‌عنوان راهبردی سازگار با اقلیم مورد توجه قرار گرفته است (McPherson & Rowntree, 1993, p. 321; Wade et al., 2010).

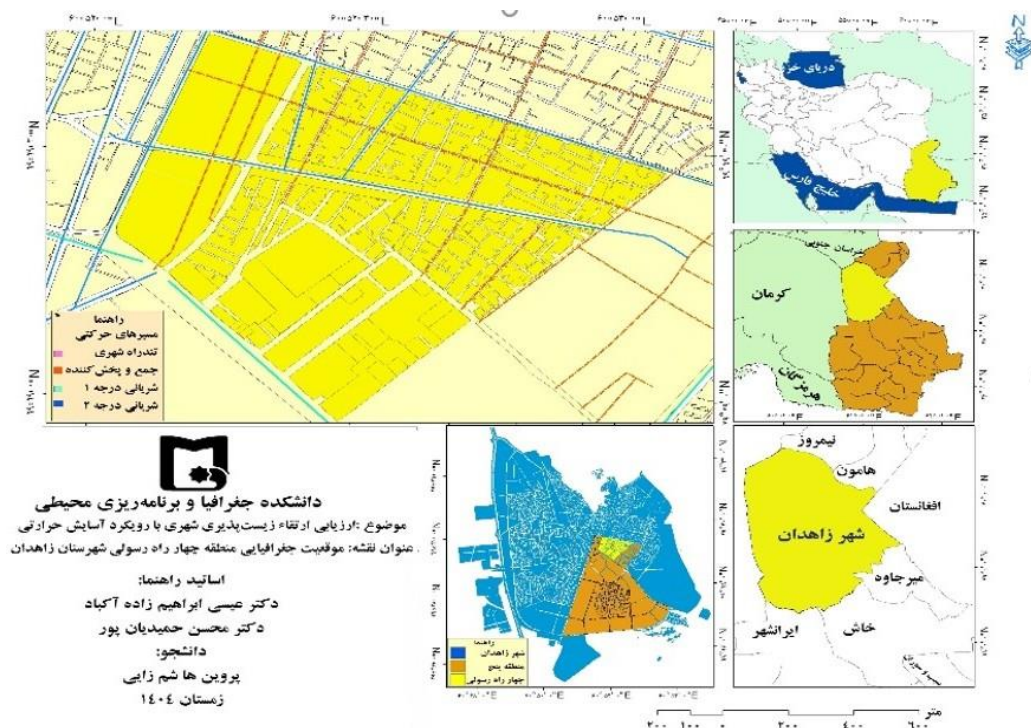
برای ارزیابی کمی آسایش حرارتی، شاخص‌هایی نظیر PET (دمای معادل فیزیولوژیک)، PMV (رأی میانگین پیش‌بینی‌شده) و UTCI (شاخص جهانی اقلیم حرارتی) به‌کار می‌روند که هر یک نقاط قوت و محدودیت‌های خاص دارند (Höppe, 1999, P. 71; Jendritzky et al., 2012, p. 421). شاخص PET به دلیل تفسیرپذیری آسان (محدوده آسایش ۱۸-۲۳ درجه سلسیوس در اقلیم گرم و خشک) و UTCI به دلیل جامعیت مدل فیزیولوژیک (محدوده آسایش ۹-۲۶ درجه سلسیوس) برای مطالعات فضای باز توصیه می‌شوند. تحقیقات نشان می‌دهند که ترکیب عوامل طراحی شهری (پوشش گیاهی، هندسه شهری، مصالح سطحی) تأثیر معناداری بر بهبود این شاخص‌ها و در نتیجه، ارتقای زیست‌پذیری فضاهای شهری دارد (Nikolopoulou & Steemers, 2003, p. 95).

داده‌ها و روش

محدوده مورد مطالعه

شهرستان زاهدان با وسعت ۳۱/۲۵۰ کیلومتر مربع، معادل ۱۷ درصد مساحت استان، از شمال به شهرستان‌های هامون و بیابان لوت، از شرق به پاکستان، از غرب به استان کرمان و از جنوب به شهرستان خاش محدود است. این منطقه دارای اقلیم خشک و بیابانی با بارندگی زمستانه است (شهرستان زاهدان، ۱۴۰۴) و دمای شدید تابستان و پوشش گیاهی محدودی را تجربه می‌کند. چهارراه (بازار) رسولی در زاهدان به‌عنوان نمونه مطالعاتی این پژوهش، براساس معیارهای عینی و قابل اندازه‌گیری شهری انتخاب شده است: این محدوده با دارا بودن موقعیت مرکزی در شبکه ارتباطی شهر، بیشترین میزان تردد عابران پیاده را در ساعات اوج روز ثبت می‌کند و تراکم بالای فعالیت‌های تجاری - خدماتی در کنار کاربری ترکیبی (مدرن و سنتی)، آن را به قطب جذب جمعیت تبدیل کرده است؛ به گونه‌ای که در ایام پرفراغت مانند تابستان و تعطیلات نوروزی، حجم مراجعه‌کنندگان به شدت افزایش یافته و فشار مضاعفی بر زیرساخت‌های پیاده و محیطی وارد می‌شود (دادگر و قصری، ۱۴۰۱، ص. ۲۶۷)؛ با این حال، بررسی کالبدی نشان‌دهنده کمبود شدید سایه‌اندازی طبیعی، فقدان پوشش گیاهی مناسب و سطح بالای تابش مستقیم خورشید در معابر پیاده است که همراه با مصالح جاذب گرما در جداره‌ها و روسازی‌ها، شرایط خرداقلیمی نامطلوب و تنش حرارتی درخور توجهی را برای عابران ایجاد می‌کند؛ از این رو، این مکان نه تنها از حیث کارکردی، به دلیل مواجهه با مسئله مشخص آسایش حرارتی در فضای باز، بستری ایدئال برای بررسی ارتباط میان ویژگی‌های کالبدی، اقلیم محلی و زیست‌پذیری شهری فراهم می‌آورد؛ پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل‌سازی در نرم‌افزار ENVI-met، برداشت‌های میدانی خرداقلیمی و مرور نظام‌مند ادبیات علمی، به دنبال ارائه راهبردهای یکپارچه طراحی شهری برای تعدیل

تنش‌های حرارتی و ارتقای آسایش محیطی در این محدوده پرتردد است (شکل ۱).



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه (چهارراه رسولی) در شهر زاهدان، ایران

Figure 1- The study area in the city of Zahedan (at Rasouli Intersection), Iran

پژوهش حاضر با رویکرد توصیفی-تحلیلی و استفاده از راهبرد ترکیبی (کمی - کیفی) انجام شده است. در این پژوهش، داده‌های کمی حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی و شبیه‌سازی ریزاقلیم با داده‌های کیفی حاصل از ادراک حرارتی کاربران، مشاهده مستقیم و بررسی محیط شهری تلفیق شدند. داده‌های میدانی برای شناخت شرایط واقعی خرداقلیمی و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، شبیه‌سازی نرم‌افزار ENVI-met برای تحلیل فضایی شرایط حرارتی و ارزیابی سناریوی پیشنهادی، و داده‌های پرسشنامه و مشاهده میدانی برای تبیین ادراک کاربران و شناسایی مسائل محیطی استفاده شدند؛ از این داده‌ها به صورت مکمل برای تفسیر شرایط موجود و ارزیابی مداخله پیشنهادی استفاده شد. محدوده مطالعاتی، چهارراه رسولی واقع در مرکز شهر زاهدان انتخاب شد که به دلیل قرارگیری در اقلیم گرم و خشک، از نظر شرایط آسایش حرارتی و کیفیت محیطی حائز اهمیت است.

داده‌های میدانی در ۱۲ نقطه منتخب از محدوده با استفاده از ترموهیگروبارومتر TES-1160 و در ارتفاع استاندارد مطابق با دستورالعمل ASHRAE 55-2023 برداشت شد. دقت اندازه‌گیری دستگاه برای دمای هوا ± 0.5 درجه سلسیوس و برای رطوبت نسبی ± 3 درصد RH بود. دستگاه در زمان برداشت به صورت دستی و در وضعیت ایستاده نگه داشته شد و پس از پایدار شدن مقادیر نمایشگر، قرائت‌ها ثبت شدند. نقاط برداشت به صورت هدفمند و با توجه به تفاوت شرایط محیطی و کالبدی محدوده انتخاب شدند تا تنوع مکانی شرایط خرداقلیمی پوشش داده شود. با توجه به اینکه تیرماه از گرم‌ترین دوره‌های فصل تابستان در منطقه مورد مطالعه است، روزهای ۱۳ و ۱۵ تیرماه ۱۴۰۳ برای

برداشت میدانی انتخاب شدند. دمای هوا و رطوبت نسبی در بازه‌های زمانی صبح و بعدازظهر و در شرایط مختلف فضایی از جمله نقاط سایه و آفتاب، اندازه‌گیری شد. از میان نقاط برداشت، سه نقطه شاخص با شرایط فضایی متفاوت برای مقایسه با خروجی شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل انتخاب شدند که موقعیت آنها در (شکل ۲) نشان داده شده است. همچنین، به منظور سنجش ادراک حرارتی کاربران، ۷۰ پرسشنامه براساس مطالعات مشابه و استاندارد ASHRAE 55 طراحی و توزیع شد (Nikolopoulou & Steemers, 2003, p. 95). شبیه‌سازی خرداقلیم با استفاده از نرم‌افزار انوی‌مت برای روز ۱۵ تیرماه ۱۴۰۴ و در یک دوره ۲۴ ساعته انجام شد (جدول ۲).

جدول ۲- تنظیمات مدل در نرم‌افزار انوی‌مت

Table 2- Model settings in EnviMat software

تعداد گریدها	۱۸۵*۱۲۵*۱۵
ابعاد گرید X,Y	2 m
اندازه گرید Z	2 m
سرعت باد	5 m/s
جهت باد (شمال شرقی - جنوب غربی)	° 50
حداقل و حداکثر دما	Min:24/9 ; Max:40/4
حداقل و حداکثر رطوبت نسبی	Min:12 ; Max:23

جدول ۳- جدول سوات محدوده مورد مطالعه

Table 2 - SWOT table of the study area

نقاط قوت (S)	نقاط ضعف (W)
دسترسی بالای شهری و موقعیت مرکزی	تداخل مسیرهای پیاده و موتورسیکلت
تنوع کاربری تجاری-خدماتی	تابش مستقیم شدید بدون سایه کافی
پویایی اقتصادی و جریان پیاده مداوم	پوشش گیاهی ناکارآمد
فرصت‌ها (O)	تهدیدها (T)
ظرفیت توسعه فضای سبز با گونه‌های بومی	تشدید جزیره حرارتی شهری
تقاضای بالا برای ارتقای کیفیت محیطی	افزایش تراکم فعالیت و فشار بر فضا
امکان اجرای طرح‌های اقلیم‌محور	افت کیفیت تجربه پیاده در بلندمدت

به منظور ارزیابی کمی عملکرد مدل ENVI-met، داده‌های دمای هوای برداشت‌شده در سه ریسپتور منتخب در دو زمان ۰۵:۰۰ و ۱۷:۰۰ با مقادیر متناظر حاصل از شبیه‌سازی وضعیت موجود در همان مکان و زمان مقایسه شدند. در مجموع، شش جفت داده متناظر برای ارزیابی مدل استفاده شد. میزان اختلاف بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده با استفاده از میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) محاسبه شد. MAE اختلاف بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده، RMSE ریشه میانگین مربعات این اختلافات و R^2 میزان تطابق تغییرات مقادیر شبیه‌سازی‌شده با داده‌های مشاهده‌شده را نشان می‌دهد. این شاخص‌ها بر اساس داده‌های متناظر محاسبه شدند و برای ارزیابی اعتبارسنجی محلی مدل در محدوده مورد مطالعه به کار رفتند (Chow et al.,

برای نقاط منتخب ارزیابی شد. در ادامه، تحلیل راهبردی فضا با بهره‌گیری از مدل SWOT و براساس بازدیدهای میدانی و مصاحبه با ذی‌نفعان انجام گرفت (جدول ۳). نتایج این تحلیل نشان داد که دسترسی بالا و پویایی اقتصادی از جمله نقاط قوت اصلی محدوده محسوب می‌شوند، در حالی که کمبود پوشش گیاهی، شدت بالای تابش خورشیدی و تداخل مسیرهای حرکتی پیاده و سواره از مهم‌ترین ضعف‌های آن به‌شمار می‌روند. یافته‌های حاصل از این بخش، مبنای تدوین سناریوهای مداخله طراحی قرار گرفتند (انوری و حاجی‌حسینی، ۱۳۹۵).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad \text{رابطه ۲}$$

پس از ارزیابی نتایج پرسشنامه، مرحله شبیه‌سازی آغاز شد که در آن دو سناریو، یعنی وضع موجود و سناریو پیشنهادی، بررسی شد. برای افزایش زیست‌پذیری شهری و بهبود آسایش حرارتی در محدوده چهارراه رسولی، یک سناریو پیشنهادی طراحی شده است که شامل استفاده از گونه‌های بومی و مقاوم به خشکی است. هدف اصلی این سناریو طراحی فضاهای شهری به گونه‌ای است که با اقلیم منطقه هماهنگ باشد. به این منظور، شرایط اقلیمی منطقه به دقت مورد توجه قرار می‌گیرد و گیاهانی انتخاب خواهند شد که با این شرایط سازگار باشند. در این سناریو، تغییرات ناشی از دما، رطوبت و شاخص PET ارزیابی شد تا تأثیرات مثبت طراحی منطبق بر اقلیم بر کیفیت زندگی ساکنان مشخص شود. پوشش گیاهی یا درختان پیشنهادی براساس دیدگاه منظرشناسی (زری اسکپ) انتخاب شده‌اند. گونه‌های انتخاب شده شامل کهور ایرانی^۱، سرو شیراز^۲، زیتون معمولی^۳، زیتون تلخ^۴ و نخل بادبزنی^۵ هستند. در این سناریو، درختان بلند قامت و سایه‌دار مانند کهور ایرانی به‌صورت ردیفی در حاشیه پیاده‌راه کاشته شده‌اند تا تابش مستقیم خورشید کاهش یابد و سایه کافی برای عابران فراهم شود. گونه‌های کوتاه‌تر و مقاوم به خشکی، مانند زیتون معمولی و زیتون تلخ، در فضاهای داخلی و زیر درختان (زری اسکپ) قرار گرفته‌اند تا تابش سطحی، کاهش و اثر خنک‌کنندگی تبخیری افزایش یابد. همچنین، نخل‌های بادبزنی در نقاط باز پیاده‌راه جانمایی شده‌اند تا سایه متناوب ایجاد کنند و کاهش دمای محیط را بهبود بخشند. هدف از انتخاب گونه‌ها و چیدمان گیاهی، کاهش دمای محیط در ارتفاع عابر پیاده، افزایش سایه، بهبود جریان باد و آسایش حرارتی، و کاهش اثر جزیره حرارتی شهری است. با وجود نیاز آبی پایین این گونه‌ها پس از استقرار، مرحله اولیه کاشت و استقرار گیاهان در اقلیم گرم و خشک همچنان به

^۱ Prosopis cineraria

^۲ Cupressus sempervirens

^۳ Olea europaea

^۴ Melia azedarach

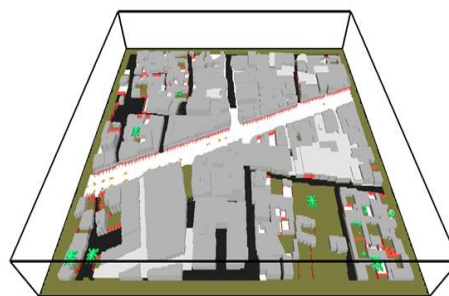
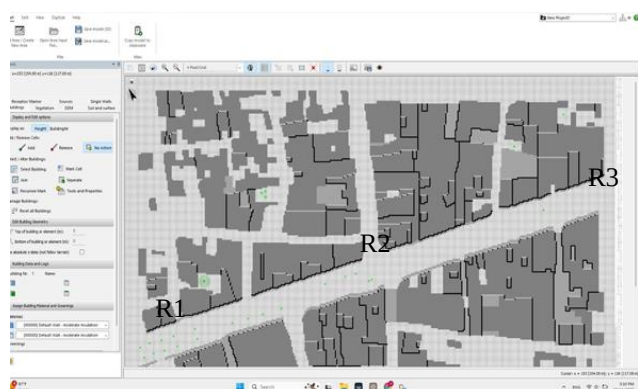
^۵ Washingtonia robusta

آبیاری و مراقبت اولیه نیاز دارد؛ از این رو، اجرای رویکرد زری‌اسکیپ مستلزم مدیریت هدفمند آبیاری در دوره استقرار و استفاده بهینه از منابع آب است. پیش‌بینی می‌شود این چینش موجب کاهش تابش تابستانی، بهبود تجربه کاربران در پیاده‌راه، افزایش پوشش گیاهی، ارتقای زیبایی بصری و ارتقای کیفیت زیست‌محیطی منطقه شود. این سناریو به منظور شبیه‌سازی در نرم‌افزار انوی‌مت^۱ و ارزیابی تأثیر پوشش‌های گیاهی بر دمای محیط و آسایش حرارتی (PET) طراحی شده است تا اثرات آن به صورت کمی و کیفی مشخص شود. این رویکرد نه تنها به بهبود زیبایی‌شناسی فضا کمک می‌کند، می‌تواند به افزایش راحتی و آسایش ساکنان نیز منجر شود. **جدول (۴)** شامل لیست گیاهان و درختان پیشنهادی به همراه ویژگی‌های اقلیمی آنها است که می‌تواند به عنوان مبنایی برای طراحی فضای سبز در منطقه چهارراه رسولی استفاده شود. در سناریو پیشنهادی، با تغییرات در طراحی فضای سبز و استفاده از گونه‌های بومی و مقاوم به خشکی، انتظار می‌رود پارامترهای اقلیمی مانند دما، رطوبت و شاخص آسایش حرارتی PET بهبود یابد. **شکل (۲)** شرایط منطقه مورد مطالعه را در نرم‌افزار نشان می‌دهد.

جدول ۴- مورفولوژی گونه‌های گیاهی

Table 3- Morphology of plant species

تصویر	کهور ایرانی	زیتون تلخ	زیتون خوراکی	سرو شیراز	نخل واشنگتنی
نام فارسی / علمی	Prosopis Cineraria	Melia azedarach	Olea europaea	Cupressus sempervirens	Washingtonia filifera
گونه	همیشه سبز	خزان کننده	همیشه سبز	همیشه سبز	همیشه سبز
بافت	خشن	نرم	خشن	خشن	خشن
ویژگی گیاه	فرم چتری، گل و رنگ برگ	رنگ برگ، گل و فرم جذاب	رنگ برگ	فرم جذاب	برگ و فرم
سرعت رشد	متوسط	سریع	متوسط	کند	سریع
نیاز نوری	آفتاب کامل	آفتاب کامل / سایه	آفتاب کامل	آفتاب کامل	آفتاب کامل
نیاز آبی	کم	کم	خیلی کم	کم	متوسط



شکل ۲ - پلان و سه بعدی منطقه چهارراه رسولی

¹ ENVI-met

Figure 2 - Plan and 3D view of the Rasouli Market (intersection)

نتایج و بحث

تحلیل داده‌های پرسشنامه و تجربه کاربران

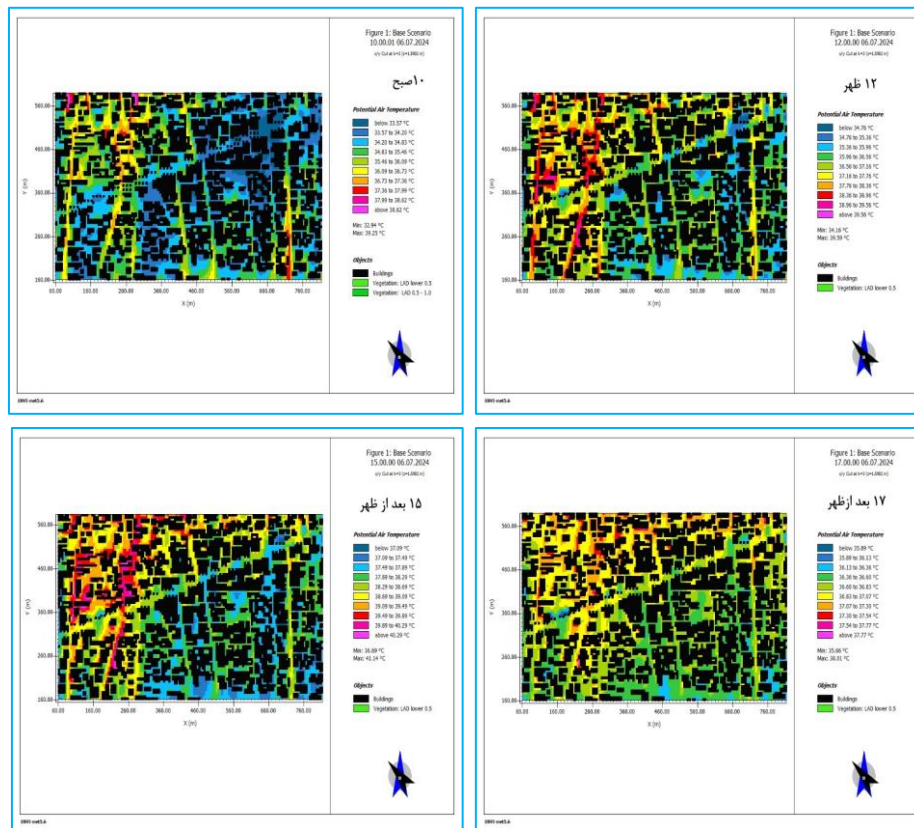
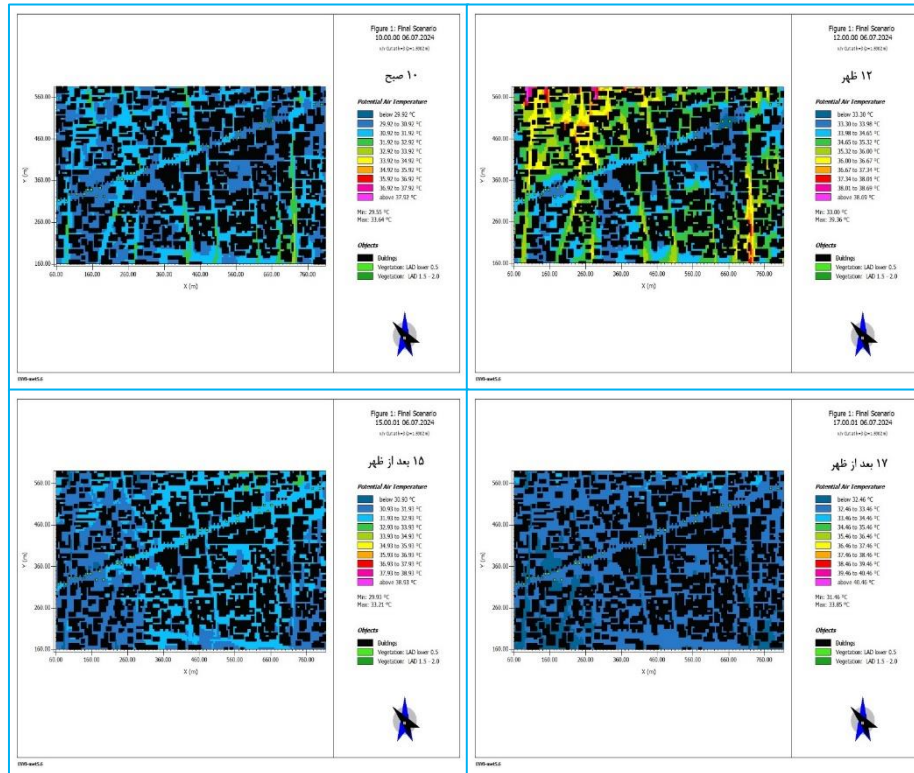
برای بررسی شرایط آسایش حرارتی و ادراک کاربران در مسیر پیاده‌راه چهارراه رسولی زاهدان، داده‌ها از دو منبع اصلی گردآوری شد: اندازه‌گیری‌های میدانی پارامترهای اقلیمی در نقاط منتخب و پرسشنامه‌های میدانی برای سنجش تجربه و ادراک حرارتی کاربران. ۷۰ پرسشنامه به‌صورت هدفمند و در امتداد مسیر پیاده‌راه، میان کاربران حاضر در محدوده مورد مطالعه توزیع و تکمیل شد. هدف از اجرای پرسشنامه، سنجش ادراک حرارتی کاربران همان فضای مورد مطالعه و استفاده از آن به‌عنوان داده مکمل در تفسیر نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی و شبیه‌سازی ENVI-met بود؛ بنابراین، نتایج پرسشنامه با هدف تعمیم آماری به کل جمعیت شهر یا منطقه مورد مطالعه تفسیر نشده است (محمدي و همکاران، ۱۳۹۸، ص. ۷۷؛ Shashua-Bar & Hoffman, 2000, p. 221). نتایج کلی پرسش‌نامه‌ها حاکی از آن است که بخش چشمگیری از کاربران فضاهای باز در ساعات گرم روز، تنش حرارتی چشمگیری را تجربه می‌کنند؛ به‌طوری‌که حضور طولانی‌مدت در محیط را برای آنان دشوار می‌سازد. در این پژوهش، ۶۰ درصد از پاسخ‌دهندگان را مردان و ۴۰ درصد را زنان تشکیل دادند. از نظر توزیع سنی، بیش‌ترین فراوانی مربوط به گروه سنی ۲۰ تا ۳۵ سال بود و گروه‌های سنی زیر ۲۰ سال و بالای ۵۱ سال، سهم کمتری از جامعه نمونه را در برداشتند.

این توزیع نشان می‌دهد که تجربیات منعکس‌شده در مطالعه عمدتاً مربوط به دیدگاه و الگوهای رفتاری جوانان و میانسالان است. در بررسی توزیع شغلی نیز، بیشترین سهم متعلق به کسبه بود که پس از آن، مشاغل آزاد، اداری و دانشجویی به‌ترتیب قرار گرفتند. افزون بر آمار توصیفی، به‌منظور بررسی ارتباط ویژگی‌های فردی و رفتاری با احساس حرارتی کاربران در فصل تابستان، آزمون‌های استنباطی متناسب با ماهیت رتبه‌ای متغیرها انجام شد. برای مقایسه احساس حرارتی بین دو گروه جنسیتی از آزمون Mann-Whitney U، برای مقایسه گروه‌های سنی و شغلی از آزمون Kruskal-Wallis و برای بررسی رابطه مدت حضور با احساس حرارتی از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن استفاده شد. نتایج نشان داد تفاوت احساس حرارتی برحسب جنسیت ($p=0.395$, $U=483$)، گروه سنی ($p=0.211$, $H=4.515$) و شغل ($p=0.683$, $H=1.500$) از نظر آماری معنادار نبود. همچنین رابطه بین مدت حضور و احساس حرارتی نیز معنادار مشاهده نشد ($p=0.110$, $p=-0.208$). در مقابل، بین احساس حرارتی و رضایت کلی از شرایط حرارتی رابطه مثبت و معناداری مشاهده شد ($p=0.010$, $p=0.331$). یافته‌های پرسشنامه همچنین نشان داد که شرایط محیطی و عناصر طراحی فضا در تجربه حرارتی کاربران اهمیت دارند. بسیاری از پاسخ‌دهندگان، سایه، پوشش گیاهی و جریان هوا را از عوامل مؤثر بر کاهش تنش حرارتی دانستند و در شرایط گرمای نامطلوب، تمایل بیشتری به استفاده از مسیرهای سایه‌دار یا کاهش مدت حضور در فضای باز داشتند. این نتایج با یافته‌های حاصل از برداشت‌های میدانی و تحلیل شرایط خرداقلیمی محدوده همخوانی دارد و بر اهمیت هم‌زمان عوامل محیطی، کالبدی و رفتاری در شکل‌گیری تجربه حرارتی کاربران تأکید می‌کند. این امر حاکی از آن است که تحلیل آسایش حرارتی و تجربه کاربران عمدتاً مبتنی بر نیازها و الگوهای رفتاری افرادی است که به‌صورت روزمره در محیط‌های بازار و پیاده‌راه‌ها فعالیت دارند. بیشتر کاربران در هنگام مواجهه با شرایط حرارتی نامطلوب، ترجیح می‌دهند از مسیرهای سایه‌دار، استفاده کنند یا برای کاهش مواجهه با گرما از داخل مغازه‌ها عبور کنند؛ امری که پیوند مستقیم میان طراحی کالبدی و تجربه حرارتی رابطه‌خوبی

نشان می‌دهد. این یافته‌ها با داده‌های میدانی و مطالعات پیشین تطابق دارد و اعتبار روش نمونه‌برداری را تأیید می‌کند.

نتایج کلیدی شبیه‌سازی

به‌طور کلی، تحلیل نقشه‌ها و داده‌های کمی نشان می‌دهد که سناریوی پیشنهادی نه تنها دمای حداکثر و نقاط داغ را کاهش می‌دهد، با تعدیل گرادیان‌های حرارتی و بهبود توزیع فضایی دما، امکان تجربه طولانی‌تر و دلپذیرتر آسایش حرارتی را برای کاربران فضاهای شهری فراهم می‌آورد. جدول مقادیر دمایی حاصل از شبیه‌سازی‌های خردمقیاس انوی‌مت، کاهش دمای حداکثر را در ساعات اوج گرمایی تأیید می‌کند. در ساعت ۱۵ بعد از ظهر، دمای حداکثر با کاهش ۶/۴۹ درجه سلسیوس از ۳۹/۷۰ به ۳۳/۲۱ درجه سلسیوس رسیده است؛ این کاهش چشم‌گیر، اثرگذاری راهکارهای پیشنهادی، به‌ویژه افزایش پوشش گیاهی و تبخیر - تعرق آن، در مقابله با تنش حرارتی شدید و ارتقای مدت زمان آسایش حرارتی کاربران فضاهای شهری را نشان می‌دهد (شکل ۳ و جدول ۵). به‌منظور ارزیابی کمی عملکرد مدل ENVI-met، داده‌های دمای هوای برداشت‌شده در سه ریسپتور R1، R2 و R3 در ساعت‌های ۰۵:۰۰ و ۱۷:۰۰ با مقادیر متناظر شبیه‌سازی‌شده در وضعیت موجود مقایسه شدند. براساس شش جفت داده متناظر، مقدار MAE برابر ۱/۸۱ °C، RMSE برابر ۱/۸۹ °C و R^2 برابر ۰/۲۵ به‌دست آمد. این شاخص‌ها میزان اختلاف بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده را به‌صورت کمی نشان می‌دهند و نتایج اعتبارسنجی مدل را برای محدوده مورد مطالعه ارائه می‌کنند. در مقایسه با مطالعات پیشین، دامنه کاهش دمای مشاهده‌شده در این پژوهش، با نتایج ثناگردربانی و همکاران همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که آنان نیز کاهش محسوس دمای محیط در اثر افزایش پوشش گیاهی در معابر شهری را گزارش کرده‌اند (ثناگردربانی و همکاران، ۱۳۹۶، ص. ۵۶۱)؛ با این حال، میزان کاهش ۶/۴۹ درجه‌ای در ساعت اوج گرما در پژوهش پیش‌رو، نشان‌دهنده اثربخشی بالاتر مداخلات ترکیبی (پوشش گیاهی، سایه‌اندازی و طراحی اقلیم‌محور) نسبت به رویکردهای صرفاً مبتنی بر افزایش فضای سبز است. همچنین، یافته‌های شفيعی و همکاران که بر نقش زیرساخت سبز در کاهش دمای تابشی و بهبود آسایش حرارتی تأکید دارند، از نظر جهت‌گیری نتایج با پژوهش حاضر همسو است (Shafiee et al., 2023, p. 2321). در قیاس تطبیقی، هر دو پژوهش بر کارآمدی پوشش گیاهی تأکید دارند، اما پژوهش کنونی با استفاده از شبیه‌سازی خردمقیاس انوی‌مت و تحلیل شاخص PET، ارزیابی کمی دقیق‌تری از شدت بهبود آسایش حرارتی ارائه می‌دهد. افزون بر این، درحالی‌که پژوهش مذکور بیشتر بر یک بافت خاص بازار شهری تمرکز داشته است، پژوهش حاضر با رویکرد سناریو‌محور، امکان تعمیم‌پذیری راهکارها به سایر فضاهای باز شهری با اقلیم مشابه را نیز فراهم می‌کند. در واقع نتایج سناریوی پیشنهادی پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد طراحی اقلیم‌محور، به‌ویژه از طریق افزایش پوشش گیاهی بومی، جانمایی اصولی درختان سایه‌انداز و به‌کارگیری عناصر سایه‌ساز، می‌تواند به‌طور مؤثری شرایط حرارتی فضاهای باز شهری را تعدیل کند. کاهش دمای هوا بین ۲ تا ۶ درجه سلسیوس و افت میانگین ۲ تا ۳ درجه‌ای شاخص PET، بیانگر تأثیر مثبت این مداخلات بر ارتقای آسایش حرارتی است. با توجه به تغییرپذیری شرایط جوی و احتمال وقوع بادهای شدید موسمی در منطقه، نتایج این پژوهش بیانگر اثرگذاری سناریوی پیشنهادی در شرایط اقلیمی مورد بررسی است و تعمیم نتایج به سایر شرایط جوی و دوره‌های زمانی سال، نیازمند بررسی‌های تکمیلی است.



شکل ۳- نقشه‌های توزیع دمای هوا در شرایط موجود و سناریو پیشنهادی

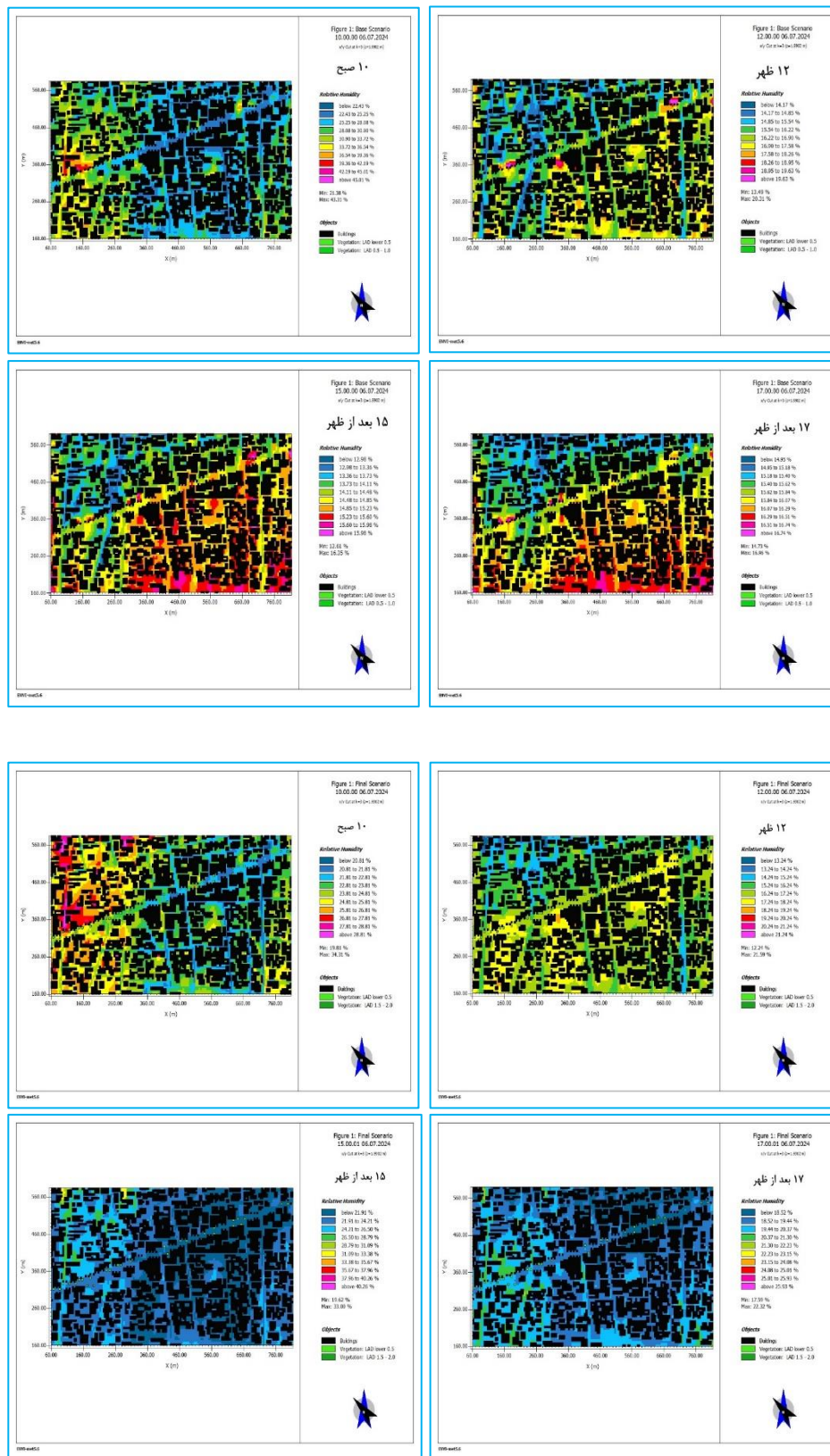
Figure 3- Air temperature distribution maps in existing conditions and proposed scenario

جدول ۵- مقایسه مقادیر دمایی محیط در شرایط موجود و وضع پیشنهادی

Table 5- Comparison of ambient temperature values in existing conditions and proposed situation

بازه زمانی	حداقل _ حداکثر دما وضع موجود	حداقل _ حداکثر دما وضع پیشنهادی
۱۰ صبح	۳۱/۰۹ تا ۳۵/۹۲	۲۸/۹۲ تا ۳۴/۱۷
۱۲ ظهر	۳۴/۹۵ تا ۴۱/۳۶	۳۲/۶۳ تا ۳۹/۳۶
۱۵ بعد از ظهر	۳۶/۹۲ تا ۳۹/۷۰	۲۹/۹۳ تا ۳۳/۲۱
۱۷ بعد از ظهر	۳۵/۶۶ تا ۳۸/۰۱	۳۶/۰۷ تا ۳۷/۳۱

تحلیل هم‌زمان **جدول (۶)** و نقشه‌های رطوبت نسبی (RH) در **شکل (۴)** نقش تعیین‌کننده تبخیر - تعرق پوشش گیاهی در بازتنظیم شرایط خرداقلیمی را آشکار می‌سازد. افزایش هدفمند پوشش گیاهی در سناریوی پیشنهادی موجب ارتقای معنادار رطوبت نسبی محیط شده است؛ تغییری که به‌ویژه در بازه‌های زمانی بحرانی روز قابل توجه است. در ساعت ۱۵ بعد از ظهر، هم‌زمان با اوج تنش حرارتی، مقدار بیشینه رطوبت نسبی از ۱۶/۳۵ درصد در وضعیت موجود به ۳۳/۰۰ درصد در وضعیت پیشنهادی افزایش یافته است که بیانگر تقویت محسوس فرآیندهای تبخیر - تعرق در مقیاس فضای باز شهری است. این یافته‌ها با نتایج ملیو و همکاران و بنزیادا و همکاران همسو هستند که نشان داده‌اند افزایش پوشش گیاهی و سایه‌اندازی می‌تواند دمای هوا و دمای تابشی را کاهش دهد و شرایط خرداقلیمی را بهبود بخشد (Benziada et al., 2025; Meliough et al., 2024)؛ با این حال، مطالعه ملیو و همکاران نشان داد که حتی با ۹۰ درصد پوشش گیاهی، دستیابی به شرایط کامل آسایش حرارتی ممکن نبوده است (Meliough et al., 2024)؛ درحالی‌که در پژوهش حاضر شاخص PET در نواحی سایه‌دار و پوشش گیاهی متراکم به محدوده سبز - زرد منتقل شده است. این نشان می‌دهد که رویکرد ترکیبی شامل پوشش گیاهی هدفمند، آرایش فضایی سایه و کنترل تابش مستقیم، نسبت به افزایش صرف تراکم پوشش، اثرگذاری بیشتری بر بهبود شاخص‌های آسایش حرارتی داشته است. یافته‌های لین و همکاران و امانوئل و فرناندو نیز تأیید می‌کنند که توزیع مناسب سایه و پوشش گیاهی متراکم، هر دو شاخص دما و رطوبت را تعدیل کرده و PET را بهبود می‌بخشد (Emmanuel & Fernando, 2007, p. 241; Lin et al., 2010, p. 213).



شکل ۴- نقشه‌های توزیع رطوبت نسبی در شرایط موجود و سناریو پیشنهادی

Figure 4- Relative humidity distribution maps in existing conditions and proposed scenario

جدول ۶ - مقایسه مقادیر رطوبتی محیط در شرایط موجود و وضع پیشنهادی (درصد)

Table 6- Comparison of ambient temperature values in the current conditions and the proposed situation

بازه زمانی	حداقل - حداکثر رطوبت وضع موجود	حداقل - حداکثر رطوبت وضع پیشنهادی
۱۰ صبح	۲۱/۳۸ تا ۴۳/۳۱	۱۹/۸۱ تا ۳۴/۳۱
۱۲ ظهر	۱۳/۴۹ تا ۲۰/۳۱	۱۲/۲۴ تا ۲۱/۵۹
۱۵ بعد از ظهر	۱۲/۶۱ تا ۱۶/۳۵	۱۹/۶۲ تا ۳۳/۰۰
۱۷ بعد از ظهر	۱۴/۷۳ تا ۱۶/۹۶	۱۷/۵۹ تا ۲۲/۳۲

افزون بر این، در ساعات اولیه روز (ساعت ۱۰ صبح)، کاهش رطوبت نسبی از ۲۱/۳۸ درصد به ۱۹/۸۱ درصد نشان می‌دهد که اثر پوشش گیاهی صرفاً به ساعات اوج گرمایش محدود نبوده و در طول چرخه روزانه نیز به پایداری شرایط خرداقليمی کمک کرده است. این الگوی تغییر، بیانگر آن است که مداخلات مبتنی بر طبیعت می‌توانند از طریق تنظیم هم‌زمان دما و رطوبت، کیفیت محیط حرارتی را در فضاهای باز شهری بهبود بخشند. نتایج مشابه در مطالعات ماتزاراکیس و همکاران و شاشوا-بار و هافمن نیز مشاهده شده است که اهمیت ترکیب سایه و پوشش گیاهی در ارتقای آسایش حرارتی را تأیید می‌کند. از این منظر، نتایج پژوهش بر ظرفیت راهبردهای سبز در ارتقای زیست‌پذیری شهری، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک، تأکید می‌کند (Shashua-Bar & Hoffman, 2000, p. 221; Matzarakis et al., 1999, p. 77).

- نقشه‌های دمای سطح زمین نشان دادند که نقاط داغ حرارتی کاهش یافته و توزیع دما یکنواخت‌تر شده است.
- پوشش گیاهی و سایه‌اندازی اثرپذیری پایدار و درخور توجهی در تعدیل خرداقليم دارند.
- بیشینه دما در ساعت ۱۵ از ۳۹/۷۰ به ۳۳/۲۱ درجه سلسیوس کاهش یافت.
- رطوبت نسبی در ساعت ۱۵ از ۱۶/۳۵ درصد به ۳۳/۰۰ درصد افزایش یافت.
- شاخص PET در نواحی سایه‌دار و پوشش گیاهی متراکم طیف سبز - زرد و در نواحی کم‌سایه، طیف نارنجی - قرمز را نشان داد.

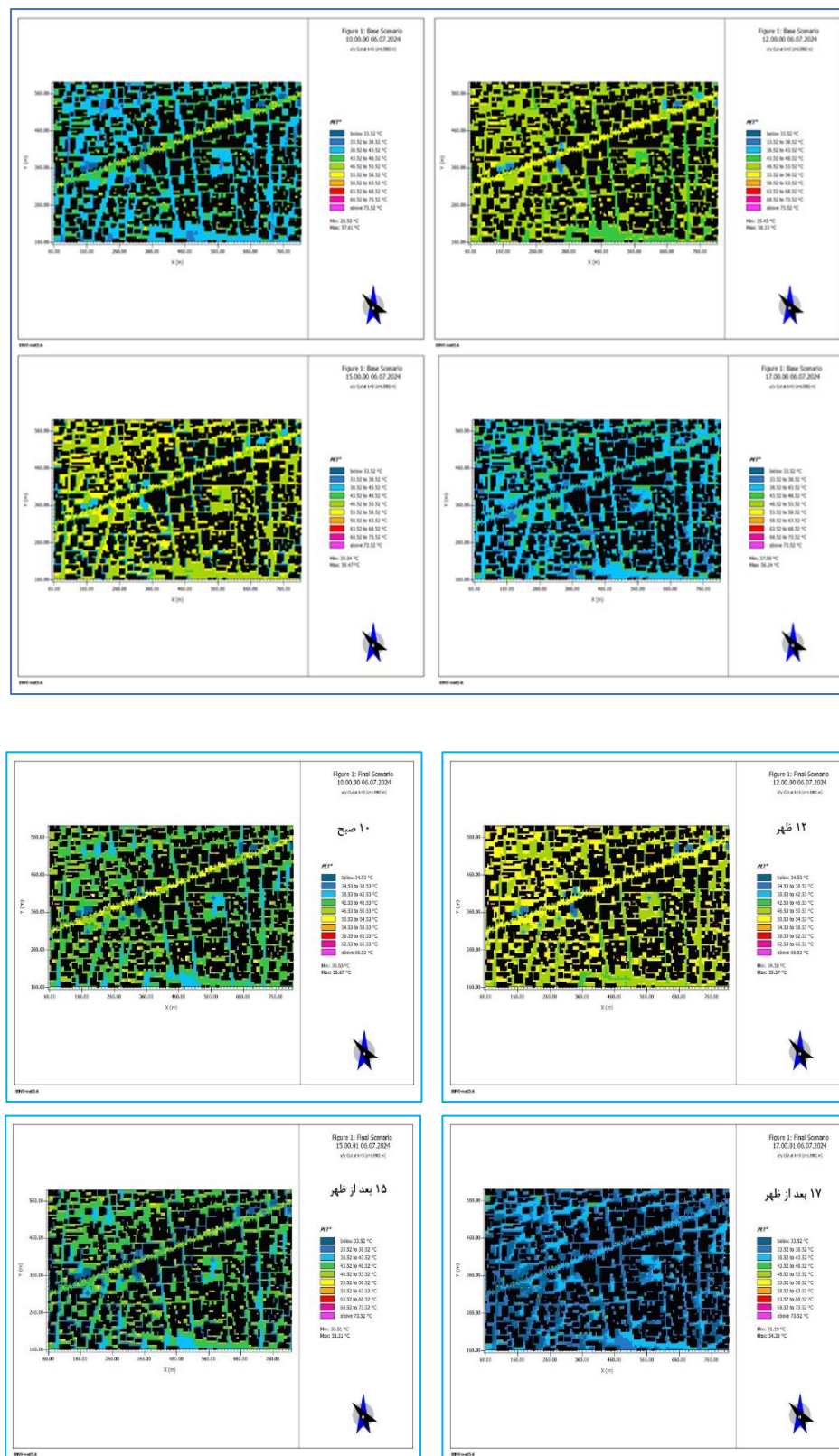
این یافته‌ها نشان می‌دهد که کمبود سایه که ناشی از عدم وجود پوشش گیاهی سایه‌انداز و جریان هوا محدود، مهم‌ترین عوامل کاهش آسایش حرارتی در محدوده مورد مطالعه هستند که با نتایج حاصل از تحلیل پرسشنامه و یافته‌های مشابه در مطالعات آسایش حرارتی شهری (Shashua-Bar & Hoffman, 2000, p. 221; Matzarakis et al., 1999, p. 76) مطابقت دارد.

همچنین این بخش از نتایج نیز با مطالعه عبدی و همکاران همسو است (Abdi et al., 2020) که بیان می‌کند فرم کالبدی فشرده و هندسه نامناسب معابر در بافت‌های خشک، افزایش قابل توجه دما و تنش حرارتی را به دنبال دارد. در همین راستا همچنین (Sedira, 2023) نشان داد که جانمایی نامناسب درختان و کمبود پوشش گیاهی، دمای تابشی و شاخص آسایش حرارتی را افزایش می‌دهد که با داده‌های میدانی پژوهش حاضر مطابقت دارد. در مقابل، مسیرها و فضاهایی که از پوشش گیاهی مناسب و سایه‌اندازی مؤثر برخوردار بودند، کاهش معنادار شاخص PET را تجربه کرده

و درک ذهنی کاربران از آسایش حرارتی در آنها بهبود یافته است. نتایج مشابهی در (Gomaa et al., 2024) مشاهده شد که نشان داد افزایش پوشش گیاهی متنوع در مناطق مسکونی کم‌تراکم، می‌تواند دمای تابشی و شاخص PET را به‌طور معناداری کاهش دهد. این یافته‌ها اثر مثبت پوشش گیاهی مقاوم به خشکی و جانمایی اصولی درختان سایه‌انداز را تأیید می‌کند و این تأییدی بر شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار انوی‌مت و داده‌های میدانی پژوهش حاضر است.

آسایش حرارتی و زیست‌پذیری شهری

شاخص PET نشان داد که در سناریوی پیشنهادی، نواحی با آسایش حرارتی مطلوب افزایش یافته و نواحی با استرس گرمایی شدید کاهش یافته است. راهکارهای اقلیم‌محور شامل پوشش گیاهی، سایه‌اندازی و مصالح بازتابنده، توانسته‌اند شرایط حرارتی را بهبود بخشند و حضور کاربران در فضاهای باز را تسهیل کنند. تحلیل نقشه‌ها نشان داد که کاهش دما در تراز ۱/۵ متری از سطح زمین، همراه با بهبود دمای تابشی، شدت تنش حرارتی ادراک‌شده را کاهش می‌دهد و امکان حضور، حرکت و استفاده طولانی‌تر از فضاهای باز شهری را فراهم می‌کند. نواحی با پوشش گیاهی متراکم و سایه‌اندازی مناسب، به «پناهگاه‌های حرارتی» تبدیل شده و الگوهای PET پایین‌تر (طیف آبی تا سبز روشن) نشان‌دهنده آسایش حرارتی مطلوب و ارتقای زیست‌پذیری فضا است؛ درحالی‌که نواحی با سطوح سخت و کمبود سایه، شاخص PET بالایی داشتند و استرس حرارتی را افزایش داده‌اند (شکل ۵). در مقایسه با مطالعه ملیو و همکاران که افزایش تراکم پوشش گیاهی را در اقلیم گرم و خشک شبیه‌سازی کرده و کاهش دمای هوا و MRT را گزارش کرده است (Meliouh et al., 2024) نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که دستیابی به سطوح قابل‌قبول آسایش حرارتی نیازمند رویکردی فراتر از افزایش صرف درصد پوشش گیاهی است. در آن مطالعه، حتی در سناریوی با حداکثر تراکم سبز نیز شرایط به محدوده آسایش کامل منتقل نشد. در مقابل، در پژوهش حاضر شاخص PET در نواحی سایه‌دار و دارای پوشش گیاهی متراکم به طیف سبز - زرد انتقال یافته است که بیانگر کاهش سطح تنش حرارتی از وضعیت شدید به محدوده متوسط یا نزدیک به آسایش است. این تفاوت می‌تواند ناشی از رویکرد یکپارچه اتخاذشده در این پژوهش باشد که علاوه بر پوشش گیاهی، بر آرایش فضایی سایه، کنترل تابش مستقیم و سازمان‌دهی کالبدی فضا تأکید دارد؛ بنابراین، به نظر می‌رسد اثربخشی مداخلات اقلیم‌محور در اقلیم‌های گرم و خشک زمانی افزایش می‌یابد که به‌صورت ترکیبی و ساختاری طراحی شوند.



شکل ۵- نقشه‌های توزیع آسایش حرارتی در شرایط موجود و سناریو پیشنهادی

Figure 5- Thermal comfort distribution maps in existing conditions and proposed scenario

تحلیل ساختار کالبدی و فضایی

چهارراه رسولی به‌عنوان یک گره شهری خودسازمان‌یافته، با تراکم کاربری تجاری و حضور انسانی بالا، تجربه حرارتی کاربران را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تحلیل کالبدی نشان داد:

- توسعه فعالیت‌های بازارمحور و تبدیل واحدهای مسکونی به تجاری، تراکم حرارتی و انسانی را افزایش داده و موجب تشدید تنش حرارتی شده است.
- عدم هماهنگی کالبدی و فقدان سایه‌اندازی، جریان طبیعی هوا را محدود کرده و آسایش حرارتی را کاهش داده است.
- تمرکز فعالیت‌ها و جریان حرکت، بر تجربه حرارتی تأثیر مستقیم دارد و ملاحظات اقلیمی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

تحلیل راهبردی محور پیاده‌راه با مدل SWOT

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که کیفیت حرارتی پیاده‌راه چهارراه رسولی، حاصل برهم‌کنش متغیرهای اقلیمی و خرداقلیمی شامل تابش خورشیدی، دمای هوا، رطوبت نسبی و جریان باد، با ویژگی‌های کالبدی و حرکتی فضا است. تطابق مناسب داده‌های میدانی با خروجی‌های شبیه‌سازی انویمت بیانگر اعتبار مدل در تحلیل شرایط خرداقلیمی بوده و امکان اتکا به نتایج شبیه‌سازی برای ارزیابی سناریوهای طراحی اقلیم‌محور را فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که تابش مستقیم خورشید، در شرایط کمبود عناصر سایه‌انداز، از عوامل اصلی افزایش بار حرارتی محیط و تشدید تنش حرارتی کاربران است. این مسئله به‌ویژه در ساعات اوج فعالیت روزانه، موجب کاهش تمایل به توقف و ماندگاری در فضاهای باز می‌شود و نقش مستقیم شرایط اقلیمی در الگوهای رفتاری کاربران را برجسته می‌سازد. از سوی دیگر، جهت‌گیری مناسب جریان باد در محدوده، یک فرصت اقلیمی ارزشمند محسوب می‌شود که در صورت ساماندهی کالبدی صحیح و جلوگیری از انسداد مسیرهای باد، می‌تواند به بهبود تهویه طبیعی و کاهش تنش حرارتی کمک کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که چالش‌های حرارتی موجود صرفاً ناشی از اقلیم منطقه نیست، بلکه تا حد زیادی به نحوه سازمان‌دهی فضا و طراحی کالبدی بازمی‌گردد (Sharaf et al., 2023, p. 2321; Cui et al., 2019, p. 127؛ دیروار، ۱۴۰۴؛ احمدی، ۱۴۰۳، ص. ۹۹۶).

تحلیل حرکتی نشان داد که تداخل مسیرهای پیاده و سواره، به‌ویژه حضور موتورسیکلت، افزون بر کاهش ایمنی، بر کیفیت ادراکی فضا و تجربه حرکتی کاربران نیز اثر منفی دارد. این مسئله در کنار شرایط نامطلوب حرارتی، موجب کاهش کارایی پیاده‌راه به‌عنوان یک فضای شهری سرزنده و قابل توقف شده است. در عین حال، تمرکز فعالیت‌های تجاری و خدماتی در محورهای اصلی، ظرفیت بالایی برای تقویت زیست‌پذیری شهری ایجاد کرده است؛ ظرفیتی که در صورت بهبود شرایط اقلیمی و ساماندهی حرکتی، می‌تواند به افزایش تعاملات اجتماعی، ماندگاری کاربران و ارتقای کیفیت محیط شهری منجر شود.

این رویکرد تحلیلی با مطالعات قبلی مطابقت دارد؛ پژوهش‌های داخلی نشان داده‌اند که استفاده از تحلیل سوات در ارزیابی فضاهای شهری و مسیرهای پیاده، چارچوبی قابل اعتماد برای شناسایی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و

تهدیدها ارائه می‌دهد و می‌تواند در تدوین راهبردهای طراحی پایدار شهری مؤثر باشد (دیروار، ۱۴۰۴؛ احمدی، ۱۴۰۳، ص. ۹۹۶). مطالعات بین‌المللی نیز نشان داده‌اند که سوات می‌تواند چارچوبی برای شناسایی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای فضاهای عمومی و مسیرهای پیاده است؛ همچنین (Sharaf et al., 2023). نشان داده‌اند که تحلیل سوات در ارزیابی مسیرهای پیاده و فضاهای شهری، نقاط ضعف و قوت کالبدی و محیطی را شناسایی و به تدوین راهکارهای بهبود کیفیت محیطی کمک می‌کند (Shabanzadeh Namini, 2021, p. 117). همچنین، تأیید کرده‌اند که این تحلیل راهبردی می‌تواند به بهبود تجربه کاربری و کیفیت فضاهای عمومی منجر شود.

در مجموع، ترکیب داده‌های میکرواقليمی (دما، رطوبت، شاخص دمای فیزیولوژیک) با تحلیل سوات امکان تدوین راهکارهای عملی برای بهبود آسایش حرارتی و کیفیت محیطی پیاده‌راه را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که کیفیت استفاده از فضا صرفاً ناشی از شرایط اقلیمی نیست؛ بلکه تا حد زیادی به نحوه سازمان‌دهی فضا و طراحی کالبدی بازمی‌گردد.

بنابراین، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که ارتقای آسایش حرارتی، پیش‌شرط بهره‌برداری مؤثر از پتانسیل‌های اجتماعی و اقتصادی فضاهای پیاده‌محور در اقلیم‌های گرم و خشک است.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که شرایط خرداقلیمی فضاهای باز شهری در بافت‌های گرم و خشک، به‌طور مستقیم تحت تأثیر ویژگی‌های کالبدی، هندسه معابر، مصالح سطحی و پوشش گیاهی قرار دارد. بررسی‌های میدانی و شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار انویمت بیانگر آن است که در وضعیت موجود محدوده چهارراه رسولی، غلبه سطوح سخت نفوذناپذیر، کمبود پوشش گیاهی و فقدان سایه، باعث افزایش دمای هوا و دمای تابشی شده و فضا را از محدوده آسایش حرارتی کاربران خارج کرده است (Abdi et al., 2020; Sedira, 2023, p. 28). تحلیل شاخص‌های حرارتی PET و UTCI نشان داد که فرم کالبدی فشرده، نسبت نامناسب ارتفاع به عرض معابر و استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش دمای موضعی و کاهش آسایش حرارتی دارند. یافته‌های پرسشنامه نیز تأیید کرد که کاربران، به‌ویژه در ساعات گرم روز، تنش حرارتی درخور توجهی را تجربه می‌کنند و حضور طولانی‌مدت در محیط برای آنان دشوار است. کمبود سایه و جریان هوا محدود، مهم‌ترین عوامل کاهش آسایش حرارتی و کاهش حضورپذیری کاربران هستند.

شبیه‌سازی سناریوی پیشنهادی، شامل افزایش پوشش گیاهی بومی کم‌آب، به‌کارگیری عناصر سایه‌انداز و اصلاح مصالح سطحی، نشان داد که دمای هوا بین ۲ تا ۶ درجه سلسیوس کاهش یافته و شاخص PET به محدوده نزدیک‌تر به آسایش حرارتی منتقل شده است. همچنین، رطوبت نسبی بهبود یافته و توزیع دما یکنواخت‌تر شده است که نشان‌دهنده اثر مثبت مداخلات طراحی اقلیم‌محور بر کاهش تنش حرارتی و ارتقای زیست‌پذیری فضاهای باز شهری است.

تحلیل کالبدی محدوده نیز تأکید کرد که هماهنگی میان ساختار معابر، جریان حرکتی و عناصر سبز نقش کلیدی در بهبود شرایط خرداقلیمی و افزایش بهره‌وری فضا دارد؛ بنابراین، ارتقای آسایش حرارتی در اقلیم‌های گرم و خشک نیازمند رویکرد یکپارچه و ترکیبی است که شامل طراحی اصولی معابر، جانمایی مناسب درختان سایه‌انداز و انتخاب مصالح بازتابنده باشد.

در نهایت، ترکیب داده‌های میدانی، شبیه‌سازی خرداقلیمی و تجربه کاربران می‌تولند راهنمایی کاربردی برای طراحی فضاهای باز شهری فراهم کند. استفاده از راهکارهای اقلیم‌محور و پوشش گیاهی کم‌آب (زری‌اسکیپ) علاوه بر کاهش تنش حرارتی، می‌تواند حضورپذیری، تعاملات اجتماعی و کیفیت زیست‌پذیری فضاهای شهری را در مناطق گرم و خشک بهبود بخشد.

منابع

- احمدی، زهرا (۱۴۰۳). تدوین راهبردهای توسعه پایدار شهری با استفاده از تکنیک‌های SWOT، ACEPT، TOPSIS (مطالعه موردی: شهر کرمانشاه). *جغرافیا و روابط انسانی*، ۶(۴)، ۹۹۶-۱۰۱۳.
- <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.419910.1963>
- اسدی، مرضیه، و گندمکار، امیر (۱۳۹۶). *ارزیابی و مقایسه تطبیقی اقلیم آسایش شهر اصفهان با استفاده از مدل‌های PM، PET و UTCI*. اولین همایش اندیشه‌ها و فناوری‌های نوین در علوم جغرافیایی.
- <https://civilica.com/doc/679500/>
- انوری، محمودرضا، و حاجی حسینی، حبیب‌الله (۱۳۹۵). *ارزیابی و تحلیل وضعیت پارک‌های شهری با استفاده از مدل SWOT (مطالعه موردی: پارک پردیس لاله شهر زاهدان)*. سومین کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و توسعه اقتصاد شهری. شیراز. <https://civilica.com/doc/571881/>
- بندرآباد، علیرضا (۱۳۹۰). *شهر زیست‌پذیر از مبانی تا معانی*. انتشارات آذرخش.
- پوراحمد، احمد، حاتمی‌نژاد، حسین، زیاری، کرامت‌الله، و علیجانی، سعیده (۱۳۹۸). *نگرشی جدید بر زیست‌پذیری شهری تهران: آسایش حرارتی شرط اولیه برای ارتقای کیفیت (نمونه موردی منطقه ۲۲)*. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۶(۲)، ۸۹-۱۱۰. <http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.6.2.89>
- شناگر، دربانی، الهام، رفیعیان، مجتبی، حنایی، تکتم و منصفی پراپری، دانیال (۱۳۹۶). *آثار زیست‌محیطی تغییرات هندسه بافت شهری بر دمای محیط و آسایش حرارتی بیرونی در اقلیم خشک شهر مشهد*. *محیط‌شناسی*، ۴۳(۴)، ۵۶۱-۵۷۸. <https://doi.org/10.22059/jes.2018.247624.1007570>
- دادگر، فرزانه، و قصری، محمدعلی (۱۴۰۱). *نقش بازار رسولی به عنوان فضای جمعی - تجاری در کیفیت بخشی به محیط شهری زاهدان*. *تحقیقات جغرافیایی*، ۳۷(۲)، ۲۶۷-۲۷۶. <https://sid.ir/paper/1062177/fa>
- دیروار، مسعود (۱۴۰۴). *طراحی منظر شهری پایدار در اقلیم‌های گرم و مرطوب (مطالعه موردی: شهر بندرعباس)*. یازدهمین کنگره سالانه ملی عمران، معماری، هنر و توسعه شهری. <https://civilica.com/doc/2397981/>
- شهرستان زاهدان (۱۴۰۴، ۲۰ آذر). *در ویکی‌پدیا*. https://fa.wikipedia.org/wiki/شهرستان_زاهدان
- عزیزی، محمد مهدی، امین‌زاده، بهناز و آقاملایی، ریحانه (۱۳۹۹). *ارزیابی عملکرد حرارتی بافت‌های شهری در اقلیم شهر تهران: آموزه‌هایی برای طراحی شهری حساس به شرایط خرداقلیم*. *نشریه هنرهای زیبا: معماری و شهرسازی*، ۲۵(۱)، ۵-۱۵. <https://doi.org/10.22059/jfaup.2020.296175.672397>

کریمیان، زهرا (۱۳۹۲). بهینه‌سازی فضای سبز شهری به منظور آسایش دمایی گرم‌ترین دوره سال با استفاده از روش‌های مدل‌سازی [پایان‌نامه دکترای منتشر نشده]. دانشگاه فردوسی مشهد.

محمدی، کثوم، ذوالفقاری، حسن، و کولیوند، طاهره (۱۳۹۸). شبیه‌سازی شرایط میکروکلیمایی و آسایش حرارتی در معابر اصلی کلان‌شهر کرمانشاه. *جغرافیا و آمایش شهری منطقه‌ای*، ۹ (۳۰)، ۷۷-۹۴.

<https://doi.org/10.22111/gaij.2019.4446>

منتظری، مرجان، جهان‌شاه‌لو، لعل، و ماجدی، حمید (۱۳۹۷). تأثیر مؤلفه‌های فرم کالبدی شهری بر آسایش حرارتی فضاهای باز شهری (مطالعه موردی: اراضی پشت سیلو شهر یزد). *مطالعات محیطی هفت‌حصار*، ۶ (۲۳)، ۴۹-۶۶.

<http://hafthesar.iauh.ac.ir/article-1-543-fa.html>

میر، فاطمه، خسروی، محمود، و شجاع، فائزه (۱۴۰۳). ارزیابی شاخص‌های بهینه‌آسایش اقلیمی و آینده‌نگری تنش‌های گرمایی در شهر زاهدان؛ راهبردی جهت سازگاری با تغییر اقلیم. *جغرافیا و آمایش شهری منطقه‌ای*، ۱۵ (۵۴)، ۱-۳۲.

<https://doi.org/10.22111/gaij.2025.50467.3247>

یادگاری، پگاه، و سجاذزاده، حسن (۱۴۰۰). نقش الگوی فضایی و پوشش گیاهی فضاهای باز محلی بر میزان آسایش حرارتی در اقلیم سرد. *فصلنامه مطالعات شهری*، ۱۰ (۴۰)، ۲۶-۱۵.

https://urbstudies.uok.ac.ir/article_61800.html

References

- Abdi, H., Hemmatjo, M., & Taki, A. (2020). Evaluating the effect of urban morphology on outdoor thermal comfort in hot-arid climates. *Urban Climate*, 32, 100628. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100628>
- Ahmadi, Z. (2024). Formulating sustainable urban development strategies using SWOT, ACEPT, and TOPSIS techniques (Case study: Kermanshah city). *Geography and Human Relations*, 6(4), 996-1013. <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.419910.1963> [In Persian]
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar energy*, 70(3), 295-310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Ali-Toudert, F. (2005). *Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate* [Doctoral dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg]. ResearchGate. <https://B2n.ir/xd2324>
- Aminipouri, M., Knudby, A. J., Krayenhoff, E. S., Zickfeld, K., & Middel, A. (2019). Modelling the impact of increased street tree cover on mean radiant temperature across Vancouver's local climate zones. *Urban Forestry & Urban Greening*, 39, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.01.016>
- Anvari, M. R., & Haji Hosseini, H. (2016). *Evaluation and analysis of the status of urban parks using the SWOT model (Case study: Laleh Campus Park in Zahedan)*. Third International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Economic Development. Shiraz. <https://civilica.com/doc/571881/> [In Persian]
- Asadi, M., & Gandomkar, A. (2017). *Comparative assessment and comparison of Isfahan city's comfort climate using PMV, PET and UTCI models*. First Conference on New Thoughts and Technologies in Geographic Sciences. <https://civilica.com/doc/679500/> [In Persian]
- ASHRAE. (2023). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2023: Thermal environmental conditions for human*. ANSI.
- Azizi, M. M., Aminzadeh, B., & Aghamollaei, R. (2019). Assessment of thermal performance of urban textures in the climate of Tehran: Lessons for urban design sensitive to microclimate conditions.

- Journal of Fine Arts: Architecture and Urban Planning*, 25(1), 5–15.
<https://doi.org/10.22059/jfaup.2020.296175.672397> [In Persian]
- Bacha, A. E., Ahriz, A., Alshenaifi, M., Alfraidi, S., Noaime, E., Alsolami, B., Ghosh, A., Bouzaher, S., Doulos, L. T., & Mesloub, A. (2024). A comprehensive study on outdoor thermal comfort in arid urban environments through microclimatic analysis of urban density. *Buildings*, 14(3), 700.
<https://doi.org/10.3390/buildings14030700>
- Bandarabad, A. (2011). *Livable city from basics to meanings*. Azarakhsh Publications. [In Persian]
- Benziada, R., Kacemi, M., Mokhtari, A. M., Fezzoui, N., Harrat, Z. R., Chatbi, M., Hilal, N., Mansour, W., & Sobuz, M. H. R. (2025). Optimizing urban thermal comfort through multi-criteria architectural approaches in arid regions: The case of Béchar, Algeria. *Sustainability*, 17(17), 7658.
<https://doi.org/10.3390/su17177658>
- Błażejczyk, K., Bröde, P., Fiala, D., & Havenith, G. (2010). Principles of the new universal thermal climate index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale. *Miscellanea Geographica*, 14(1), 91–102. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0009>
- Błażejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A., & Kampmann, B. (2013). An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Geographia Polonica*, 86(1), 5–10. <https://doi.org/10.7163/GPol.2013.1>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Cui, J., Allan, A., & Lin, D. (2019). SWOT analysis and development strategies for underground pedestrian systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 87, 127–133.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.12.023>
- Chow, W. T. L., Brennan, D., & Brazel, A. J. (2012). Urban Heat Island Research in Phoenix, Arizona: Theoretical Contributions and Policy Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 517–530. <https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00011.1>
- de Abreu-Harbach, L. V., Labaki, L. C., & Matzarakis, A. (2015). Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape and Urban Planning*, 138, 99–109.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.007>
- Dirvar, M. (2025). *Sustainable urban landscape design in hot and humid climates (Case Study: Bandar Abbas City)*. 11th Annual National Congress of Civil Engineering, Architecture, Art and Urban Development. <https://civilica.com/doc/2397981/> [In Persian]
- Dadgar, F., & Qasri, M. A. (2022). The role of Rasouli Bazaar as a collective-commercial space in improving the urban environment of Zahedan. *Geographical Research*, 37(2), 267–276.
<https://sid.ir/paper/1062177/fa> [In Persian]
- Emmanuel, R. (2005). Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: The Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. *Building and Environment*, 40(12), 1591–1601.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.12.004>
- Emmanuel, R., & Fernando, H. J. S. (2007). Urban heat islands in humid and arid climates: Role of urban form and thermal properties in Colombo, Sri Lanka and Phoenix, USA. *Climate Research*, 34(3), 241–251. <https://doi.org/10.3354/cr00694>
- Emmanuel, R., & Johansson, E. (2006). Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate: The case of Colombo, Sri Lanka. *Climate Research*, 30(3), 189–200.
<https://doi.org/10.3354/cr030189>
- ENVI-met GmbH. (2024). *ENVI-met* (Version 5.6) [Software]. <https://www.envi-met.com>
- Erell, E., Pearlmuter, D., & Williamson, T. (2011). *Urban microclimate: Designing the spaces between buildings*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775397>

- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19722700268>
- Gehl, J. (2011). *Life between buildings: Using public space*. Island Press.
- Gomaa, M. M., El Menshawy, A., Nabil, J., & Ragab, A. (2024). Investigating the impact of various vegetation scenarios on outdoor thermal comfort in low-density residential areas of hot arid regions. *Sustainability*, 16(10), 3995. <https://doi.org/10.3390/su16103995>
- Harlan, S. L., Brazel, A. J., Prashad, L., Stefanov, W. L., & Larsen, L. (2006). Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. *Social Science & Medicine*, 63(11), 2847–2863. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2006.07.030>
- He, X., Miao, S., Shen, S., Li, J., Zhang, B., Zhang, Z., & Chen, X. (2015). Influence of sky view factor on outdoor thermal environment and physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 59(3), 285–297. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0849-6>
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature: A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>
- Jendritzky, G., Dear, R. D., & Havenith, G. (2012). UTCI—Why another thermal index?. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 421–428. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>
- Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41(10), 1326–1338. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.022>
- Karimian, Z. (2013). *Optimization of urban green space for thermal comfort during the hottest period of the year using modeling methods* [Unpublished doctoral dissertation]. Ferdowsi University of Mashhad. [In Persian]
- Levy, J. M. (2022). *Contemporary urban planning*. Routledge.
- Lin, T. P., Matzarakis, A., & Hwang, R. L. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 45(1), 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.002>
- Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: Physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43, 76–84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>
- McPherson, E. G., & Rowntree, R. A. (1993). Energy conservation potential of urban tree planting. *Journal of Arboriculture*, 19, 321–331. <https://B2n.ir/uj5458>
- Meliouh, F., Ghanemi, F., Hamel, K., & Manel, N. (2024). Greening the arid: The impact of urban vegetation on the outdoor thermal comfort in hot and dry city. *South Florida Journal of Development*, 5(12), e4718. <https://doi.org/10.46932/sfjdv5n12-005>
- Mohammadi, K., Zolfaghari, H., & Kolivand, T. (2019). Simulation of microclimatic conditions and thermal comfort in the main streets of Kermanshah metropolis. *Geography and Regional Urban Planning*, 9(30), 77–94. https://gaij.usb.ac.ir/article_4446.html [In Persian]
- Mir, F., Khosravi, M., & Shoja, F. (2025). Evaluation of optimal climate comfort indices and forecasting of heat stress in Zahedan City: A strategy for adaptation to climate change. *Geography & Territorial Spatial Arrangement*, 14(54), 1–32. <https://doi.org/10.22111/gaij.2025.50467.3247> [In Persian]
- Montazeri, M., Jahanshahloo, L., & Majedi, H. (2018). The effects of urban physical form components on thermal comfort in urban open spaces (Case study: Behind the Silo lands in Yazd). *Haft Hesar Environmental Studies*, 6(23), 49–66. <http://hafthesar.iauh.ac.ir/article-1-543-fa.html> [In Persian]
- Mohsin, T., & Gough, W. A. (2012). Characterization and estimation of urban heat island at Toronto: Impact of the choice of rural sites. *Theoretical and Applied Climatology*, 108, 105–117. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0516-7>

- Nikolopoulou, M. (2011). Outdoor thermal comfort. *Frontiers in Bioscience (Scholar Edition)*, 3(4), 1552–1568. <https://doi.org/10.2741/245>
- Nikolopoulou, M., & Steemers, K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, 35(1), 95–101. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1).
- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1–3), 103–113. [https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1988EneBu..11..103O/doi:10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1988EneBu..11..103O/doi:10.1016/0378-7788(88)90026-6).
- Pourahmad, A., Hatami Nejad, H., Ziari, K., & Alijani, S. (2019). A new perspective on Tehran's urban livability: Thermal comfort is a prerequisite for improving quality (case study of District 22). *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 6(2), 89–110. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2955-fa.html> [In Persian]
- Rahman, M. A., Moser, A., Rötzer, T., & Pauleit, S. (2016). Microclimatic differences and their influence on transpirational cooling of *Tilia cordata* in two contrasting street canyons in Munich, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 230, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.006>
- Sanagar Darbani, E., Rafiian, M., Hanaei, T., & Monsefi Prapari, D. (2017). Environmental effects of changes in urban texture geometry on ambient temperature and outdoor thermal comfort in the arid climate of Mashhad. *Ecology*, 43(4), 561–578. <https://doi.org/10.22059/jes.2018.247624.1007570> [In Persian]
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 86(7), 1621–1641. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Sedira, H. (2023). Influence of street geometry and vegetation on pedestrian thermal comfort in arid urban areas. *Sustainable Cities and Society*, 89, 104297. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104297>
- Shabanzadeh Namini, R., Loda, M., & Meshkini, A. (2021). SWOT analysis and developing strategies for the realisation of urban livability in Tehran. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 13(1), 117–129. <https://doi.org/10.1080/19463138.2020.1827412>
- Shafiee, S., Ghaffarianhoseini, A., & Naismith, N. (2023). Effects of urban green infrastructure on outdoor thermal comfort in hot and dry climates. *Building and Environment*, 228, 109761. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109761>
- Sharaf, F. M., Çinar, H. S., & Irmeili, G. (2023). Quality evaluation of public pedestrian spaces: The case of Abdali development in Amman city. *Civil Engineering and Architecture*, 11(5), 2321–2335. <https://doi.org/10.13189/cea.2023.110506>
- Shashua Bar, L., Pearlmutter, D., & Erell, E. (2011). The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot arid environment. *International Journal of Climatology*, 31(10), 1498–1506. <https://doi.org/10.1002/joc.2177>
- Shashua Bar, L., & Hoffman, M. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*, 31(3), 221–235. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00062-7)
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Schöneberger, P., Sinsel, T., Ouyang, W., Tan, Z., Bruse, M., & Simon, H. (2025). Enhancing urban microclimate simulations: Validating ENVI-met's accuracy in modeling multi-directional radiative fluxes and mean radiant temperature in subtropical hong kong. *Building and environment*, 284, 113475. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132325009485>

- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., & James, P. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using green infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 81(3), 167–178.
https://ggi.dcp.ufl.edu/_library/reference/Promoting%20ecosystem.pdf
- UN-Habitat. (2016). *World cities report 2016: Urbanization and development—Emerging futures*. United Nations Human Settlements Programme.
- Wade, G. L., Midcap, J. T., Coder, K. D., Landry, G. W., Tyson, A. W., & Weatherly, N., Jr. (2010). *Xeriscape: A guide to developing a water-wise landscape*. University of Georgia Cooperative Extension Service. <https://openscholar.uga.edu/record/22900/files/B1073.pdf>
- Yadegari, P. and sajadzadeh, H. (2021). The impact of spatial pattern and local urban space vegetation on the thermal comfort in cold climate. *Motaleate Shahri*, 10(40), 15-26.
https://urbstudies.uok.ac.ir/article_61800.html [In Persian]
- Zahedan County. (2025, December 11). Wikipedia. https://fa.wikipedia.org/wiki/شهرستان_زاهدان [In Persian]