

Abridged Paper

Original Research Paper

Analyzing the Role of Urban Morphology in Thermal Comfort of Urban Open Spaces during the Hot Season; Case Study: Dehkadeh Olympic and Zibadasht Neighborhoods, District 22, Tehran

Saeede Alikaei ^{1*}, Mahdiyeh Rahaei ², Mehrnoosh Arabzadeh Karbala ³

1. Assistant Professor, Department of Urban Design, Faculty of Urban Planning, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Master's student, Department of Urban Design, Faculty of Urban Planning, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. Master's student, Department of Urban Design, Faculty of Urban Planning, University of Tehran, Tehran, Iran.

Highlights

- Developing a conceptual framework effective on the causal and simultaneous interaction of urban morphology, microclimate, and thermal comfort indicators
- Quantitative simulation of the impact of urban morphology on microclimate and thermal comfort of urban spaces using ENVI-met software
- Emphasis on microclimate simulation as a supporting tool for urban design interventions against thermal stresses.

Abstract

With the intensification of climate change and the growing thermal stress, analyzing the role of urban morphology in shaping microclimatic conditions and outdoor thermal comfort has become a fundamental challenge of urban planning and design. The aim of research is to elucidate the active and dynamic role of urban morphological characteristics in generating microclimatic patterns and to examine the causal and simultaneous relationships between three-dimensional morphological indices, microclimatic variables, and users' thermal comfort at the neighborhood scale. The study adopts an interdisciplinary approach within a hierarchical conceptual-analytical framework. To this end, numerical microclimate simulations using ENVI-met software were combined with quantitative spatial analyses. Two urban fabrics with distinct morphologies in District 22 of Tehran (Dehkadeh Olympic and Zibadasht), which exhibit significant differences in geometric configuration, building density, and vegetation cover, were selected as case studies. The findings indicate that urban morphology plays a decisive role in shaping microclimatic conditions and users' thermal experience through the simultaneous control of solar radiation, natural ventilation, and heat and moisture exchange. The low-density, low-rise fabric of Dehkadeh Olympic, due to a higher sky view factor, spatial continuity, and the presence of vegetation, provides a more uniform temperature distribution, more stable ventilation, and a balanced humidity regime. In contrast, the dense, high-rise fabric of Zibadasht, despite localized shading, is prone to thermal heterogeneity and the accumulation of heat and moisture due to airflow obstruction and spatial enclosure. The results emphasize that thermal comfort in urban open spaces is the outcome of a multi-level, non-linear causal chain rooted in the spatial and physical logic of the city. This underscores the necessity of establishing a dynamic balance among density, building height, street geometry, and strategic vegetation placement, and highlights microclimatic simulation as an effective tool for supporting urban design decisions in response to thermal stress.

Article Info

Received 26/01/2026
Revised 12/03/2026
Accepted 26/03/2026
Available Online 21/06/2026

Keywords

Urban morphology
Urban microclimate
Thermal comfort
ENVI met simulation

© [2026] by the author(s).

Citation of the article

Alikaei, S., Rahaei, M., & Arabzadeh Karbala, M. (2026). Analyzing the Role of Urban Morphology in Thermal Comfort of Urban Open Spaces during the Hot Season (Case Study: Dehkadeh Olympic and Zibadasht Neighborhoods, District 22, Tehran). *Iranian Urban Design Studies*, 3(1), 169–194.

* Author Corresponding:

Email: saeedealikaei@ut.ac.ir

Introduction: The increasing pressures of urbanization and climate change necessitate a deeper understanding of urban microclimates and their impact on human thermal comfort. Current research highlights significant gaps in precisely quantifying the relationship between the three-dimensional (3D) structure of cities and the thermal experiences of people within them, particularly at the neighborhood scale. Traditional urban planning approaches often fail to adequately consider the dynamic interplay between the built form and local climate conditions, leading to environments that can be uncomfortable and unsustainable, especially during periods of heat stress. This study frames the problem by defining three interconnected analytical layers: urban morphology (the physical structure of the city), urban microclimate (the resulting local climate conditions), and thermal comfort (the human perception of these conditions). The research is structured around two main objectives: The first objective is to analyze urban morphology as an active mechanism and not merely a physical context, to understand how microclimatic patterns are shaped; this interdisciplinary approach links the boundaries of urban planning and design, climatology, and environmental analyses, and examines the complex interaction between urban geometry (Including length, width, height, aspect ratios, area, volume, form complexity, position and orientation, distance, distribution, regularity, and complexity in both 2D and 3D), spatial density (Such as compactness, the ratio of spacing to height, surface coverage ratio, and open space ratio), vegetation cover (Including surface and soil permeability, height, type, and density of vegetation), and climatic parameters. In the second step, the research focuses on the thermal comfort of urban open spaces during the summer season, as summer creates the most thermal stress and temperature dispersion in urban open spaces and has the greatest impact on users' experience in using open spaces and environmental design needs. Examining summer conditions allows for the identification of critical thermal comfort patterns and sensitive urban areas that are vital for heat-resilient design and planning.

Materials and Methods: The present research is applicable in terms of objective; quantitative-analytical in terms of approach; hierarchical conceptual-analytical in terms of nature; and cross-sectional in terms of temporal dimension. The main focus of the research is to analyze the relationship between the physical-spatial configuration of the city and microclimatic variables in two neighborhoods, Olympic Village and Zibadasht Town, in District 22 of Tehran, relying on numerical data obtained from environmental simulations and spatial analyses using ENVI-met software. The selection of these two areas was based on significant differences in construction patterns, the ratio of open to built-up areas, characteristics of the street network, and spatial configuration; in a way that allows for a comparative analysis of the impact of urban morphology on microclimate conditions and thermal comfort. The simulations were conducted for a representative day (July 12, 2025, local time between 15:30 and 17:30, air temperature between 32 and 33°C, relative humidity between 14 and 15%, wind speed of 3.1 m/s at a reference height of 10 meters, wind direction from the southwest at an angle of 225 degrees, specific humidity of 8 g/kg at an altitude of 2500 meters, and a micro-surface roughness of 0.10 meters) to reveal the highest level of thermal stress and the difference in morphological performance between the two textures.

Findings: The analysis focuses on identifying the spatial patterns of thermal comfort and stress distribution and their relationship with the morphological differences between the two textures:

- Temperature: Zibadasht displays unstable and uneven temperature distribution, despite experiencing lower temperatures in some areas. Olympic Village, while generally warmer, offers better uniformity, thermal balance, and overall climatic quality. The open layout, low building height, and extensive greenery in Olympic Village effectively reduce temperature and enhance thermal comfort. Conversely, Zibadasht's compact structure and limited green space lead to temperature instability and reduced thermal efficiency.
- Wind: Olympic Village features a calm, balanced, and dispersed wind flow due to its villa-style texture, wide streets, and abundant green spaces. While wind speeds are moderate, air stagnation is largely avoided, promoting natural ventilation over a wider surface for stable conditions and increased thermal



comfort. Zibadasht, characterized by high density and scarce open spaces/greenery, experiences contrasting and unstable airflow, with some areas facing strong winds and others near stagnation. This imbalance disrupts natural ventilation, creating localized hot spots and degrading climatic quality.

- Humidity: Olympic Village's open texture, low building density (36-m), wider streets, and extensive vegetation support plant evapotranspiration and moisture exchange, resulting in lower and more uniform relative humidity. This enhances climatic resilience against thermal stress and prevents localized high humidity areas. Zibadasht, with its denser texture, taller buildings (912-m), and narrower streets, exhibits higher relative humidity due to confined airflow and limited plant evaporation. This leads to increased humidity zones, impaired heat exchange, and reduced climatic resilience to future thermal stresses.

- Radiation: Average radiant temperature distribution in Olympic Village is heterogeneous, with high values in open, unshaded areas and decreases near buildings and vegetation. Zibadasht, however, shows a more cohesive and uniform pattern of average radiant temperature. The regular arrangement of buildings, semi-enclosed spaces, continuous shading, and consistent vegetation cover significantly reduce average radiant temperature across a substantial portion of its open spaces.

Discussion and Conclusion: This comparative simulation study reveals that the causal relationships within the conceptual framework are evident in both studied areas. Differences in urban morphological elements (buildings, blocks, street networks, open/green spaces), characterized by their dimensions, geometry, density, spacing, surface cover, and materials, significantly alter microclimatic processes. These include radiative exchange, heat storage/release, airflow dynamics, and evapotranspiration. Ultimately, these changes manifest in microclimatic variables such as air temperature, radiant temperature, wind speed, and relative humidity.

The arrangement of buildings, urban block sizes, street network patterns, and the continuity of open/green spaces in the Olympic Village (sparse, low-rise) and Zibadasht (dense, high-rise) directly influenced spatial metrics like building height, street width, height-to-width ratios, building separation, and form continuity. They also affected density and spacing metrics, including compactness, spacing-to-height ratios, and built-up vs. open area ratios. These distinct morphological characteristics in turn directly impacted microclimatic parameters and, consequently, thermal comfort.

Overall, interpreting the results within the conceptual framework indicates that the Olympic Village's morphological features—lower height-to-width ratios, greater building separation, continuous open spaces, and extensive vegetation—promote radiative exchange, reduce heat storage, enhance air mixing, and increase evapotranspiration. This leads to more uniform temperature distribution, effective ventilation, and reduced hot/humid spots. Conversely, Zibadasht's high density, tall buildings, reduced sky view, limited open spaces, and lack of vegetation weaken radiative exchange, increase heat storage, destabilize airflow, and cause localized moisture accumulation, resulting in greater thermal vulnerability. The findings underscore that urban morphology's impact on thermal comfort arises from the simultaneous interaction of geometric, density, and surface-related indicators. No single indicator can explain the microclimatic conditions; their combination determines microclimatic processes and final variables.

The research's innovation lies in presenting a framework based on morphological features as comparable units for urban microclimate analysis. It shifts focus from individual elements to the spatial and physical logic of urban form, emphasizing the spatial distribution patterns of microclimatic variables and their fluctuation ranges at the pedestrian scale. The study highlights the multi-dimensional and sometimes conflicting nature of morphological interventions (e.g., simultaneous vertical shading and vegetation for temperature/ventilation moderation) and stresses the need to avoid single-variable solutions for urban heat stress. This multi-dimensional approach enables the identification of optimal scenarios across different design and planning levels, assisting urban researchers and designers in modeling and predicting the simultaneous effects of physical and spatial parameters on thermal comfort.

Declarations

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest related to this research.

Funding

This research has not received any financial support from governmental or private organizations for the advancement of the study.

Informed Consent

All participants in this research have provided their informed consent in writing.

Authors' Contributions

Conceptualization and study design: Saeede Alikaei, Mahdiyeh Rahaei, Mehrnoosh Arabzadeh Karbala; Data curation: Mahdiyeh Rahaei, Mehrnoosh Arabzadeh Karbala; Data analysis: Saeede Alikaei, Mahdiyeh Rahaei, Mehrnoosh Arabzadeh Karbala; Writing (Original Draft): Mehrnoosh Arabzadeh Karbala; Mahdiyeh Rahaei; Writing (Review Editing): Saeede Alikaei; Validation and Final Approval: All authors have approved the final version of the manuscript.

Acknowledgments

No acknowledgments were reported by the authors.

References

- Aliabadi, A., Moradi, M., Clement, D., Lubitz, W., & Gharabaghi, B. (2019). Flow and temperature dynamics in an urban canyon under a comprehensive set of wind directions, wind speeds, and thermal stability conditions. *Environmental Fluid Mechanics*, 19, 81–109.
- Allegrini, J., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2015). Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 144, 108–117.
- 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, Article 700.
- Chen, G., Rong, L., & Zhang, G. (2021). Impacts of urban geometry on outdoor ventilation within idealized building arrays under unsteady diurnal cycles in summer. *Building and Environment*, 206, Article 108344.
- Cheung, P. K., & Jim, C. Y. (2019). Improved assessment of outdoor thermal comfort: 1-hour acceptable temperature range. *Building and Environment*, 151, 303–317.
- Conzen, M. R. G. (2004). *Thinking about urban form: Papers on urban morphology*, 1932–1998. Peter Lang.
- Costa, I. T., Wollmann, C. A., Writzl, L., Iensse, A. C., da Silva, A. N., de Freitas Baumhardt, O., Gobo, J. P. A., Shooshtarian, S., & Matzarakis, A. (2024). A systematic review on human thermal comfort and methodologies for evaluating urban morphology in outdoor spaces. *Climate*, 12, Article 30.
- de Oliveira, A. (2022). *Urban morphology*. Springer.
- Deng, J.-Y., & Wong, N. H. (2020). Impact of urban canyon geometries on outdoor thermal comfort in central business districts. *Sustainable Cities and Society*, 53, Article 101966.
- Deng, X., Cao, Q., Wang, L., Wang, W., Wang, S., Wang, S., & Wang, L. (2023). Characterizing urban densification and quantifying its effects on urban thermal environments and human thermal comfort. *Landscape and Urban Planning*, 237, Article 104803.
- Dinić Branković, M., Igić, M., Đekić, J., & Ljubenović, M. (2025). Impact of urban densification on outdoor microclimate and design of sustainable public open space in residential neighborhoods: A study of Niš, Serbia. *Sustainability*, 17, Article 1573.
- Emmanuel, R., & Steemers, K. (2018). *Connecting the realms of urban form, density and microclimate*. Taylor & Francis.
- Giurgiu, I. C., & Ottmann, D. A. (2025). Relationships between urban form, microclimate, and energy efficiency in hot climates. *Urban Science*, 9, Article 527.
- Huang, C., Liu, K., Ma, T., Xue, H., Wang, P., & Li, L. (2025). Analysis of the impact mechanisms and driving factors of urban spatial morphology on urban heat islands. *Scientific Reports*, 15, Article 18589.



- Huttner, S., & Bruse, M. (2009). Numerical modeling of the urban climate: A preview on ENVI-met 4.0. In *Proceedings of the 7th International Conference on Urban Climate (ICUC-7)*, Yokohama, Japan.
- 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, 1326–1338.
- Kamal, A., Abidi, S. M. H., Mahfouz, A., Kadam, S., Rahman, A., Hassan, I. G., & Wang, L. L. (2021). Impact of urban morphology on urban microclimate and building energy loads. *Energy and Buildings*, 253, Article 111499.
- Kropf, K. (2009). Aspects of urban form. *Urban Morphology*, 13, 105–120.
- Lindberg, F., & Grimmond, C. (2011). The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: Model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology*, 105, 311–323.
- Liu, B., Liu, Y., Cho, S., & Chow, D. H. C. (2024). Urban morphology indicators and solar radiation acquisition: 2011–2022 review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, Article 114548.
- Liu, C., Ye, X., Xu, Y., Sun, Q., & Xu, Y. (2025). Exploring the impact of urban morphology on heat stress: A high-resolution microclimate simulation study. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. Advance online publication.
- Mandić, L., Đukić, A., Marić, J., & Mitrović, B. (2024). A systematic review of outdoor thermal comfort studies for the urban (re)design of city squares. *Sustainability*, 16, Article 4920.
- Marshall, S., & Çalışkan, O. (2011). A joint framework for urban morphology and design. *Built Environment*, 37, 409–426.
- Mo, Z., Liu, C.-H., & Ho, Y.-K. (2021). Roughness sublayer flows over real urban morphology: A wind tunnel study. *Building and Environment*, 188, Article 107463.
- Morakinyo, T. E., Kong, L., Lau, K. K.-L., Yuan, C., & Ng, E. (2017). A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and Environment*, 115, 1–17.
- Muniz-Gaal, L. P., Pezzuto, C. C., de Carvalho, M. F. H., & Mota, L. T. M. (2020). Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate. *Building and Environment*, 169, Article 106547.
- Nosek, Š., Kukačka, L., Kellnerová, R., Jurčáková, K., & Jaňour, Z. (2016). Ventilation processes in a three-dimensional street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, 159, 259–284.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Oliveira, V. (2016). The elements of urban form. In *Urban morphology: An introduction to the study of the physical form of cities*. Springer.
- Paramita, B., & Matzarakis, A. (2019). Urban morphology aspects on microclimate in a hot and humid climate. *Geographica Pannonica*, 23.
- Perini, K., & Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 495–506.
- Ramponi, R., Blocken, B., de Coo, L. B., & Janssen, W. D. (2015). CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths. *Building and Environment*, 92, 152–166.
- Şahin, A., & Selçuk, S. A. (2025). How does urban regeneration affect urban morphology? A systematic review and bibliometric analysis. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 13, 79–98.
- Simon, H. (2016). *Modeling urban microclimate: Development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met* (Doctoral dissertation, Johannes Gutenberg University Mainz).
- Sinsel, T. (2022). *Advancements and applications of the microclimate model ENVI-met* (Doctoral dissertation, Johannes Gutenberg University Mainz).
- Sodoudi, S., Zhang, H., Chi, X., Müller, F., & Li, H. (2018). The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34, 85–96.
- Szkordilis, F., & Kiss, M. (2016). Potential of vegetation in improving indoor thermal comfort and natural ventilation. *Applied Mechanics and Materials*, 824, 278–287.
- Tong, S., Wong, N. H., Tan, C. L., Jusuf, S. K., Ignatius, M., & Tan, E. (2017). Impact of urban morphology on microclimate and thermal comfort in northern China. *Solar Energy*, 155, 212–223.
- Tumini, I., Higuera Garcia, E., & Baereswyl Rada, S. (2016). Urban microclimate and thermal comfort modelling: Strategies for urban renovation. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 7, 22–37.





- Wei, R., Song, D., Wong, N. H., & Martin, M. (2016). Impact of urban morphology parameters on microclimate. *Procedia Engineering*, 169, 142–149.
- Wei, R., Yan, J., Cui, Y., Song, D., Yin, X., & Sun, N. (2023). Studies on the specificity of outdoor thermal comfort during the warm season in high-density urban areas. *Buildings*, 13, Article 2473.
- Yang, J., Yang, Y., Sun, D., Jin, C., & Xiao, X. (2021). Influence of urban morphological characteristics on thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 72, Article 103045.
- Yao, Z., Wang, P., Tian, Y., Zhang, Y., Zhang, Q., Wang, X., Wang, P., & Han, Q. (2025). Impact of sky view factor on seasonal microclimate and thermal comfort variability across urban campus streets and buildings. *Buildings*, 15, Article 4121.
- Yi, P., Liu, L., Huang, Y., Zhang, M., Liu, H., & Bedra, K. B. (2023). Study on the coupling relationship between thermal comfort and urban center spatial morphology in summer. *Sustainability*, 15, Article 5084.
- Zhang, J., Li, Z., & Hu, D. (2022a). Effects of urban morphology on thermal comfort at the micro-scale. *Sustainable Cities and Society*, 86, Article 104150.
- Zhang, J., Li, Z., Wei, Y., & Hu, D. (2022b). The impact of the building morphology on microclimate and thermal comfort: A case study in Beijing. *Building and Environment*, 223, Article 109469.
- Zhang, P., Ghosh, D., & Park, S. (2023a). Spatial measures and methods in sustainable urban morphology: A systematic review. *Landscape and Urban Planning*, 237, Article 104776.
- Zhang, Z., Luan, W., Yang, J., Guo, A., Su, M., & Tian, C. (2023b). The influences of 2D/3D urban morphology on land surface temperature at the block scale in Chinese megacities. *Urban Climate*, 49, Article 101553.
- Zhong, D., Gao, Y., Wei, L., Gu, X., Li, T., Xu, J., Yao, L., & Liu, Z. (2025). Street canyon microclimate effect on thermal comfort at entrances and exits of underground commercial streets: Measured and ENVI-met simulation. *Buildings*, 15, Article 4147.
- Zhou, Y., An, N., & Yao, J. (2022). Characteristics, progress and trends of urban microclimate research: A systematic literature review and bibliometric analysis. *Buildings*, 12, Article 877.

Note for Readers:

This paper contains an identical English abstract in two sections:

Abridged Paper: To provide an overview for international readers.

Persian Section: To meet the standardized structure of Persian academic publications.

This repetition is intentional to ensure alignment with academic standards and facilitate readability for both audiences. Readers are encouraged to review the full paper for comprehensive details.

یادداشت برای خوانندگان:

این مقاله شامل یک چکیده انگلیسی در دو بخش است:

بخش فارسی: به منظور رعایت استانداردهای ساختار مقالات علمی فارسی.

تکرار این چکیده، با هدف انطباق با استانداردهای علمی و تسهیل مطالعه برای هر دو گروه از مخاطبان طراحی شده است. خوانندگان می‌توانند برای دریافت جزئیات کامل، به متن اصلی مقاله مراجعه کنند.

COPYRIGHTS

© [2026] by the author(s). This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International (CC BY 4.0). The authors retain copyright, and

this work may be shared and redistributed with proper attribution.

License link: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



© [۲۰۲۶] نویسنده(گان). این مقاله تحت مجوز (CC BY 4.0) Creative Commons Attribution 4.0 International منتشر شده است. نویسنده(گان) مالک

حقوق مادی و معنوی اثر خود هستند، و این مقاله می‌تواند با ذکر منبع مورد استفاده، بازنشر و توزیع شود.

لینک مجوز: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



تحلیل نقش مورفولوژی شهری بر آسایش حرارتی فضاهای باز شهری در فصل گرم؛ نمونه موردی: محله دهکده المپیک و شهرک زیبادشت در منطقه ۲۲ تهران

سعیده علی کائی*^۱، مهدیه رهایی^۲، مهنوش عربزاده کر بلا^۳

- استادیار، گروه طراحی شهری، دانشکده شهرسازی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه طراحی شهری، دانشکده شهرسازی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه طراحی شهری، دانشکده شهرسازی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

نکات شاخص

- تدوین چهارچوب مفهومی موثر بر تعامل علی و هم‌زمان شاخص‌های مورفولوژی شهری، خُرداقلیم و آسایش حرارتی
- شبیه‌سازی کمی تأثیر مورفولوژی شهری بر خُرداقلیم و آسایش حرارتی فضاهای شهری با نرم‌افزار ENVI-met
- تأکید بر شبیه‌سازی خُرداقلیم به عنوان ابزار پشتیبانی از مداخلات طراحی شهری در برابر تنش‌های حرارتی

مشخصات مقاله

چکیده

تاریخ ارسال
تاریخ بازنگری
تاریخ پذیرش
تاریخ انتشار آنلاین
۱۴۰۴/۱۱/۰۶
۱۴۰۴/۱۲/۲۱
۱۴۰۵/۰۱/۰۶
۱۴۰۵/۰۳/۳۱

واژگان کلیدی

مورفولوژی شهری
خُرداقلیم شهری
آسایش حرارتی
شبیه‌سازی ENVI-met

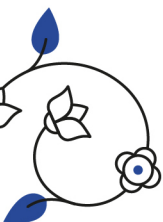
با تشدید تغییرات اقلیمی و افزایش تنش‌های حرارتی در شهرها، تحلیل نقش مورفولوژی شهری در شکل‌دهی شرایط خُرداقلیمی و آسایش حرارتی فضاهای باز شهری به یکی از چالش‌های اساسی برنامه‌ریزی و طراحی شهری تبدیل شده است. هدف این پژوهش، تبیین نقش فعال و دینامیک ویژگی‌های مورفولوژیک شهری در تولید الگوهای خُرداقلیمی و بررسی رابطه علی و هم‌زمان میان شاخص‌های سه‌بعدی مورفولوژیک، متغیرهای خُرداقلیم و آسایش حرارتی کاربران در مقیاس محله است. پژوهش با رویکردی بین‌رشته‌ای و در چهارچوبی مفهومی تحلیلی سلسله‌مراتبی انجام شده است؛ بدین منظور از شبیه‌سازی عددی خُرداقلیم در نرم‌افزار ENVI-met به همراه تحلیل‌های فضایی کمی استفاده شده است. دو بافت شهری با مورفولوژی متفاوت در منطقه ۲۲ شهر تهران (دهکده المپیک و زیبادشت) که از نظر الگوی هندسی، تراکم ساختمانی و پوشش گیاهی تمایز معناداری دارند، به عنوان نمونه‌های موردی انتخاب شدند. یافته‌ها نشان می‌دهد که مورفولوژی شهری از طریق کنترل هم‌زمان تابش خورشیدی، تهویه طبیعی و تبادل حرارت و رطوبت، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌دهی شرایط خُرداقلیمی و تجربه حرارتی کاربران دارد. بافت کم‌تراکم و کم‌ارتفاع دهکده المپیک، به واسطه ضریب دید آسمان بالاتر، پیوستگی فضایی و حضور پوشش گیاهی، توزیع یکنواخت‌تر دما، تهویه پایدارتر و تعادل رطوبتی مناسب‌تری را فراهم می‌کنند. در مقابل، بافت متراکم و بلندمرتبه زیبادشت، علی‌رغم سایه‌اندازی موضعی، به دلیل انسداد جریان هوا و محصوریت فضایی، مستعد ناهمگنی حرارتی و انباشت هم‌زمان گرما و رطوبت هستند. نتایج پژوهش تأکید می‌کند که آسایش حرارتی در فضاهای باز شهری، حاصل زنجیره علی چندسطحی و غیرخطی است که ریشه در منطق فضایی و کالبدی شهر دارد. این امر بر ضرورت ایجاد تعادل پویا میان تراکم، ارتفاع، هندسه معابر و جانمایی هدمند پوشش گیاهی تأکید داشته و شبیه‌سازی خُرداقلیمی را به عنوان ابزاری مؤثر برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های طراحی و برنامه‌ریزی شهری در مواجهه با تنش‌های حرارتی معرفی می‌کند.

© [2026] نویسنده(گان).

نحوه ارجاع دهی به این مقاله

علی کائی، سعیده، رهایی، مهدیه، و عربزاده کر بلا، مهنوش. (۱۴۰۵). تحلیل نقش مورفولوژی شهری بر آسایش حرارتی فضاهای باز شهری در فصل گرم؛ نمونه موردی: محله دهکده المپیک و شهرک زیبادشت در منطقه ۲۲ تهران. نشریه علمی مطالعات طراحی شهری ایران، ۳(۱)، ۱۹۴-۱۶۹.

* آدرس پستی نویسنده مسئول: saeedalikai@ut.ac.ir





Original Research Paper

Analyzing the Role of Urban Morphology in Thermal Comfort of Urban Open Spaces during the Hot Season; Case Study: Dehkadeh Olympic and Zibadasht Neighborhoods, District 22, Tehran

Saeede Alikaei ^{1*}, Mahdiyeh Rahaei ², Mehrnoosh Arabzadeh Karbala ³

1. Assistant Professor, Department of Urban Design, Faculty of Urban Planning, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Master's student, Department of Urban Design, Faculty of Urban Planning, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. Master's student, Department of Urban Design, Faculty of Urban Planning, University of Tehran, Tehran, Iran.

Highlights

- Developing a conceptual framework effective on the causal and simultaneous interaction of urban morphology, microclimate, and thermal comfort indicators
- Quantitative simulation of the impact of urban morphology on microclimate and thermal comfort of urban spaces using ENVI-met software
- Emphasis on microclimate simulation as a supporting tool for urban design interventions against thermal stresses.

Abstract

With the intensification of climate change and the growing thermal stress, analyzing the role of urban morphology in shaping microclimatic conditions and outdoor thermal comfort has become a fundamental challenge of urban planning and design. The aim of research is to elucidate the active and dynamic role of urban morphological characteristics in generating microclimatic patterns and to examine the causal and simultaneous relationships between three-dimensional morphological indices, microclimatic variables, and users' thermal comfort at the neighborhood scale. The study adopts an interdisciplinary approach within a hierarchical conceptual-analytical framework. To this end, numerical microclimate simulations using ENVI-met software were combined with quantitative spatial analyses. Two urban fabrics with distinct morphologies in District 22 of Tehran (Dehkadeh Olympic and Zibadasht), which exhibit significant differences in geometric configuration, building density, and vegetation cover, were selected as case studies. The findings indicate that urban morphology plays a decisive role in shaping microclimatic conditions and users' thermal experience through the simultaneous control of solar radiation, natural ventilation, and heat and moisture exchange. The low-density, low-rise fabric of Dehkadeh Olympic, due to a higher sky view factor, spatial continuity, and the presence of vegetation, provides a more uniform temperature distribution, more stable ventilation, and a balanced humidity regime. In contrast, the dense, high-rise fabric of Zibadasht, despite localized shading, is prone to thermal heterogeneity and the accumulation of heat and moisture due to airflow obstruction and spatial enclosure. The results emphasize that thermal comfort in urban open spaces is the outcome of a multi-level, non-linear causal chain rooted in the spatial and physical logic of the city. This underscores the necessity of establishing a dynamic balance among density, building height, street geometry, and strategic vegetation placement, and highlights microclimatic simulation as an effective tool for supporting urban design decisions in response to thermal stress.

Article Info

Received 26/01/2026
Revised 12/03/2026
Accepted 26/03/2026
Available Online 21/06/2026

Keywords

Urban morphology
Urban microclimate
Thermal comfort
ENVI met simulation

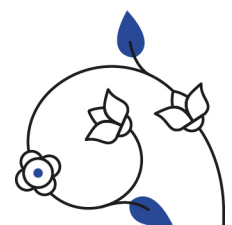
© [2026] by the author(s).

Citation of the article

Alikaei, S., Rahaei, M., & Arabzadeh Karbala, M. (2026). Analyzing the Role of Urban Morphology in Thermal Comfort of Urban Open Spaces during the Hot Season (Case Study: Dehkadeh Olympic and Zibadasht Neighborhoods, District 22, Tehran). *Iranian Urban Design Studies*, 3(1), 169–194.

* Author Corresponding:

Email: saeedealikaii@ut.ac.ir



مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد سریع جمعیت شهری و تشدید تغییرات اقلیمی، اهمیت تحلیل و مدیریت شرایط خُرداقلیمی و آسایش حرارتی در فضاهای شهری را به‌عنوان یکی از محورهای کلیدی برنامه‌ریزی و طراحی شهری برجسته کرده است (Costa et al., 2024). شاخص‌های پایه‌ای آسایش حرارتی در محیط‌های باز به‌طور گسترده مطالعه شده‌اند؛ اما همچنان شکاف‌های مفهومی و عملی در درک رابطه دقیق میان ویژگی‌های مورفولوژیک عناصر شهری و تجربه حرارتی کاربران در مقیاس محله وجود دارد. بسیاری از مطالعات پیشین بر تحلیل تک‌بعدی متغیرهایی مانند تراکم یا پوشش گیاهی متمرکز بوده‌اند و ارتباط هم‌زمان و علی میان ویژگی‌های مورفولوژیک عناصر شهری، الگوهای جریان هوا، تابش خورشیدی، رطوبت و درنهایت آسایش حرارتی به‌طور کامل روشن نشده است. همچنین بررسی ادبیات نظری نشان می‌دهد که شاخص‌های سه‌بعدی مورفولوژیک اثرات معنادارتری بر شاخص‌های آسایش حرارتی نسبت به شاخص‌های دوبعدی دارند، با این حال، این یافته‌ها هنوز به‌صورت سیستماتیک در طراحی و برنامه‌ریزی شهری به کار گرفته نشده‌اند (Emmanuel and Steemers, 2018, Zhang et al., 2023b, Liu et al., 2025, Giurgiu and Ottmann, 2025). فرایندهای سنتی برنامه‌ریزی و طراحی شهرها غالباً اثرات هم‌زمان و دینامیک مورفولوژی شهری بر شرایط خُرداقلیمی را در نظر نمی‌گیرند که این امر با توجه به روند افزایشی تغییرات اقلیمی و افزایش تنش‌های حرارتی در فصول مختلف سال تشدید می‌گردد. نتیجه این رویکرد، پراکندگی و ناهمگنی شرایط حرارتی در فضای شهری و تأثیر مستقیم بر تجربه حرارتی نامطلوب کاربران و کاهش کیفیت عملکرد محیطی است.

از سویی دیگر در مطالعات اقلیمی شهری، آسایش حرارتی در فصل تابستان به‌عنوان مهم‌ترین معیار سنجش کیفیت محیط‌های باز شهری مطرح است؛ زیرا در این فصل تنش‌های گرمایی بیشینه می‌شود و افراد در معرض بار حرارتی شدید قرار می‌گیرند که می‌تواند به کاهش فعالیت‌های خارج از خانه، افزایش مصرف انرژی برای سرمایش و بروز مشکلات سلامت مرتبط با گرما منجر شود (Yi et al., 202). پژوهش‌های اخیر تأکید کردند که در بسیاری از مناطق شهری تفاوت‌های فضایی زمانی آسایش حرارتی در تابستان بسیار چشمگیرتر از دیگر فصول است و پیک‌های دمایی و شاخص‌های آسایش در ساعات گرم روز به‌وضوح تحت تأثیر پارامترهایی چون نسبت سطح سبز، حجم ساختمان و بازشدگی آسمان قرار می‌گیرند؛ درحالی‌که این تفاوت‌ها در دیگر فصول کمتر هستند (Wei et al., 2023, Yi et al., 2023, Giurgiu and Ottmann, 2025).

براین اساس، رویکرد این پژوهش در گام نخست بر تحلیل مورفولوژی شهری به‌عنوان سازوکاری فعال و نه صرفاً زمینه کالبدی، برای فهم چگونگی شکل‌دهی الگوهای خُرداقلیمی استوار است. این رویکرد بین‌رشته‌ای، مرزهای برنامه‌ریزی و طراحی شهری، اقلیم‌شناسی و تحلیل‌های زیست محیطی را به هم پیوند می‌دهد و به بررسی تعامل پیچیده میان هندسه شهری، تراکم فضایی، پوشش گیاهی و پارامترهای اقلیمی می‌پردازد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که هم‌بستگی‌های معناداری میان ساختار فضایی شهری و شاخص‌های آسایش حرارتی وجود دارد؛ اما نیاز به چهارچوب‌های تحلیلی عملی و مقایسه‌پذیر در سطوح طراحی و برنامه‌ریزی شهری هنوز برجسته است.

در گام دوم تمرکز پژوهش بر آسایش حرارتی فضاهای باز شهری در فصل تابستان است؛ زیرا تابستان بیشترین تنش حرارتی و پراکندگی دمایی در فضاهای باز شهری را ایجاد می‌کند و بیشترین تأثیر را بر تجربه کاربران در استفاده از فضاهای باز و نیازهای طراحی محیطی دارد. بررسی شرایط تابستانی، امکان شناسایی الگوهای بحرانی آسایش حرارتی و نقاط حساس شهری را فراهم می‌سازد که برای طراحی و برنامه‌ریزی مقاوم در برابر گرما حیاتی است. بدین منظور، پژوهش حاضر از شبیه‌سازی خُرداقلیم در نرم‌افزار ENVI-met استفاده می‌کند که امکان مدل‌سازی دقیق نحوه تأثیر پارامترهای مورفولوژیک بر متغیرهای خُرداقلیمی محیطی را فراهم می‌آورد. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، به‌همراه تحلیل‌های فضایی کمی، اجازه می‌دهد الگوهای توزیع دما، باد، رطوبت نسبی و تابش در دو بافت شهری با مورفولوژی متفاوت در منطقه ۲۲ تهران (دهکده المپیک و زیبادشت) که از نظر الگوی هندسی، تراکم و پوشش گیاهی به‌طور قابل ملاحظه‌ای متمایز هستند، در یکی از روزهای گرم تابستان ۱۴۰۴ بررسی شود.

پیشینه پژوهش

در ادبیات معاصر اقلیم شهری، محیط حرارتی شهرها نتیجه برهم‌کنش پیچیده میان شرایط اقلیم منطقه‌ای و ویژگی‌های کالبدی محیط مصنوع است. در این چهارچوب، مفهوم خُرداقلیم شهری به‌عنوان سطحی از تحلیل اقلیمی مطرح می‌شود که امکان بررسی دقیق ناهمگونی‌های محیطی در مقیاس خرد را فراهم می‌کند. خُرداقلیم شهری به شرایط اقلیم در مقیاس خرد، مانند محله یا بلوک اطلاق می‌شود که نتیجه سازمان فضایی، هندسه کالبدی و ویژگی‌های سطحی محیط مصنوع هستند (Wei et al., 2016, Zhou et al., 2022) و می‌تواند حتی در شهرهایی با اقلیم منطقه‌ای نسبتاً یکنواخت، ناهمگونی‌های مهمی در شرایط حرارتی، جریان هوا و رطوبت ایجاد کند (Kamal et al., 2021, Allegrini et al., 2015).



پژوهش‌های اخیر تأکید دارند که خُرداقلیم نه یک پدیده مستقل، بلکه محصول مستقیم منطق مورفولوژیک شهر است و باید به عنوان یکی از بر ساخته‌های ساختار فضایی شهر درک شود. به بیان دیگر، خُرداقلیم شهری رابطه مستقیم میان فرم و سازمان فضایی شهر و شرایط محیط محلی را منعکس می‌کند و شاخصی کلیدی برای تحلیل آسایش حرارتی و کیفیت محیطی فضاهای باز و بسته به شمار می‌آید (Zhang et al., 2022b). براین اساس، محیط شهری به عنوان سامانه‌ای فیزیکی در نظر گرفته می‌شود که از طریق تنظیم دریافت و بازتاب تابش خورشیدی، ذخیره و بازگسیل حرارت، جریان و اختلاط هوا، مقاومت آیرودینامیکی فضا و تبادل رطوبتی سطوح، شرایط اقلیم محلی را بازتوزیع می‌کند (Oke et al., 2017). به بیان دیگر، خُرداقلیم شهری حاصل برهم کنش پیوسته میان فرم فیزیکی شهر و فرایندهای انتقال انرژی و جرم در لایه نزدیک سطح زمین است.

متغیرهای اصلی خُرداقلیم شهری شامل دمای هوا، تابش خورشیدی و تابش حرارتی، سرعت و الگوی جریان هوا و رطوبت نسبی هستند که هریک از طریق سازوکارهای فیزیکی متفاوتی شکل می‌گیرند؛ اما در محیط شهری به صورت هم‌زمان و وابسته به یکدیگر عمل می‌کنند (Yang et al., 2021, Zhang et al., 2022a, Emmanuel and Steemers, 2018). این متغیرها به طور مستقیم شرایط حرارتی محیط را تعیین می‌کنند و زمینه شکل‌گیری تجربه حرارتی انسان در فضاهای شهری را فراهم می‌سازند. بنابراین اهمیت خُرداقلیم شهری زمانی آشکار می‌شود که ارتباط آن با تجربه انسانی فضا مورد توجه قرار گیرد. خُرداقلیم شهری به تنهایی هدف نهایی تحلیل نیست؛ بلکه نقش آن در فراهم‌سازی بستر تجربه محیطی کاربران فضاهای شهری اهمیت می‌یابد. مهم‌ترین نمود این تجربه در محیط شهری، آسایش حرارتی است که به عنوان شاخصی انسان‌محور برای ارزیابی کیفیت محیطی فضاهای شهری شناخته می‌شود.

آسایش حرارتی به وضعیت فیزیولوژیکی و حسی انسان اطلاق می‌شود که در آن فرد نه احساس گرما و نه سرما می‌کند و شرایط محیطی برای فعالیت‌های روزمره مطلوب است. در محیط شهری، آسایش حرارتی به شدت تحت تأثیر مؤلفه‌های خُرداقلیم شهری قرار دارد که در ادامه تشریح شده است (Tumini et al., 2016, Bacha et al., 2024, Mandić et al., 2024):

- **دمای هوا** به عنوان عامل اصلی تعیین‌کننده آسایش حرارتی شناخته می‌شود. آسایش حرارتی زمانی برقرار است که بدن در حالت تعادل حرارتی قرار داشته باشد؛ یعنی گرمای تولیدی بدن با گرمای تبادل شده با محیط متعادل باشد. در شرایط معمول و بدون در نظر گرفتن فاکتورهای دیگر مانند رطوبت یا باد، ۸۰ درصد افراد در دمای بین ۲۲ تا ۲۶°C احساس آسایش دارند (Cheung and Jim, 2019). اگرچه دما عامل پایه است، آسایش حرارتی یک تجربه چندعاملی است و در کنار رطوبت، باد، تابش و عوامل فردی عمل می‌کند.
- **سرعت باد و جریان هوا** نقش مهمی در تنظیم تبادل حرارت میان بدن و محیط دارند. حرکت هوا با افزایش تبادل حرارتی هم‌رفتی و تبخیری می‌تواند اثر خنک‌کنندگی ایجاد کند؛ درحالی‌که در شرایط سرد ممکن است باعث تشدید احساس سرما شود. بنابراین اثر جریان هوا همواره در تعامل با دمای هوا و رطوبت نسبی معنا پیدا می‌کند.
- **رطوبت** بر تبخیر عرق از بدن اثر می‌گذارد و در نتیجه احساس گرما یا سردی را تغییر می‌دهد. اثر رطوبت در دماهای بالاتر، مثلاً بالای ۳۰°C قوی‌تر است و می‌تواند باعث کاهش آسایش حرارتی شود؛ زیرا تبخیر عرق محدود می‌شود و بدن نمی‌تواند گرمای اضافی را دفع کند. در شرایط آسایش حرارتی، رطوبت نسبی معمولاً بین ۳۰ تا ۶۰ درصد قرار دارد تا بدن بتواند به طور مؤثر دمای خود را کنترل کند.
- **تابش خورشیدی** یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر آسایش حرارتی است؛ زیرا جذب انرژی گرمایی توسط بدن و سطوح اطراف را افزایش می‌دهد. حتی در دمای هوا یکسان، فردی که زیر تابش خورشید قرار دارد، احساس گرمایی بیشتری نسبت به فردی که در سایه است، خواهد داشت. مطالعات نشان داده‌اند که تابش مستقیم خورشید می‌تواند دمای پوست را ۱-۳°C یا بیشتر افزایش دهد و همین امر احساس ناراحتی گرمایی را تقویت می‌کند.

از این منظر، آسایش حرارتی را می‌توان به عنوان خروجی نهایی سامانه خُرداقلیم شهری در نظر گرفت؛ خروجی‌ای که حاصل برهم کنش متغیرهای اقلیمی در مقیاس خرد و پاسخ فیزیولوژیکی انسان به این شرایط است. در نتیجه، تحلیل آسایش حرارتی بدون ارجاع به سازوکارهای شکل دهنده خُرداقلیم شهری، به درک ناقصی از کیفیت محیطی فضاهای شهری منجر خواهد شد (Wei et al., 2016, Tong et al., 2017, Zhang et al., 2022b).

در این میان ویژگی‌های فیزیکی و سازمان فضایی عناصر مورفولوژیک می‌توانند شرایط خُرداقلیم را تحت تأثیر قرار دهند و متعاقباً تجربه آسایش حرارتی را نیز شکل دهند (Tong et al., 2017). در ادبیات معاصر شهرسازی و اقلیم شهری، مورفولوژی شهری به عنوان یکی از لایه‌های بنیادین شکل دهنده به شرایط محیطی شهرها شناخته می‌شود. مورفولوژی شهری عبارت است از مطالعه نظام‌مند شکل، ساختار و

سازمان فضایی اجزای فیزیکی شهر و بررسی روابط و الگوهای میان این اجزا با هدف فهم چگونگی سازمان‌یابی و توسعه شهرها و تبیین تأثیر این ساختارها بر کیفیت‌ها و عملکردهای محیط شهری (Conzen, 2004, Kropf, 2009, de Oliveira, 2022).

در این تعریف، تأکید بر مطالعه نظام‌مند شکل و ساختار، بیانگر رویکرد تحلیلی مورفولوژی شهری است که فراتر از توصیف صرف نمای فیزیکی شهر رفته و به ساختارهای درونی و روابط میان اجزای کالبدی توجه دارد. تأکید بر تحلیل روابط و الگوها نشان می‌دهد که عناصر فیزیکی شهر به صورت منفرد معنا نمی‌یابند؛ بلکه سازمان فضایی و نحوه ارتباط آن‌هاست که کیفیت‌های شهری را شکل می‌دهد و بستری برای فهم تأثیر فرم شهری بر متغیرهای محیطی، اجتماعی و عملکردی فراهم می‌سازد. از این منظر، مورفولوژی شهری نه تنها توصیف فرم، بلکه چهارچوبی تحلیلی برای بررسی پیامدهای عینی و قابل اندازه‌گیری تعامل میان عناصر کالبدی شهر به شمار می‌آید؛ پیامدهایی که در پژوهش‌های معاصر، به ویژه در حوزه‌های اقلیم شهری و آسایش محیطی، اهمیت فزاینده‌ای یافته‌اند (Oke et al., 2017, Huang et al., 2025). براین اساس، مطالعه مورفولوژی شهری مستلزم شناسایی و تحلیل اجزای فیزیکی تشکیل‌دهنده فرم شهر و روابط فضایی میان آن‌هاست. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد مهم‌ترین عناصر مورفولوژی شهری شامل ساختمان‌ها، قطعات و بلوک‌های شهری، شبکه خیابان‌ها و فضاهای باز و سبز است (Marshall and Çalışkan, 2011, Oliveira, 2016, Şahin and Selçuk, 2025) که از طریق ویژگی‌های فضایی خود چهارچوب فیزیکی محیط شهری را تعریف کرده و شرایط مرزی تبادل انرژی و جرم را در مقیاس خرد تعیین می‌کنند:

- **ساختمان‌ها و ویژگی‌های مورفولوژیک آن** از مهم‌ترین عوامل تنظیم‌کننده خرداقلیم شهری محسوب می‌شوند که در تعامل جمعی با خیابان‌ها، قطعات و فضاهای باز، کیفیت محیط شهری را تحت تأثیر قرار می‌دهند. ارتفاع و حجم ساختمان‌ها با کنترل نسبت دید آسمان و میزان دریافت تابش خورشیدی، نه تنها دمای تابشی و دمای هوای محیط را تغییر می‌دهند؛ بلکه با ایجاد موانع فیزیکی، الگوهای جریان باد و اختلاط هوا را نیز شکل می‌دهند (Deng et al., 2023). نسبت فاصله به ارتفاع و پراکندگی ساختمان‌ها تعیین می‌کند که باد چگونه وارد کانال‌های شهری شود، شدت جریان هوا و نرخ تبادل حرارتی میان سطوح و هوا چگونه باشد و چه مقدار تابش خورشید به سطوح زمین و ساختمان‌ها برسد. نسبت سطح به حجم و موقعیت ساختمان‌ها ظرفیت ذخیره و بازگسیل حرارت را تنظیم می‌کنند و در تعامل با جریان باد و تابش، میزان تبخیر و تعرق از سطوح سبز و خاک را تغییر می‌دهند که بر رطوبت نسبی محیط تأثیر مستقیم دارد. پیچیدگی فرم و جهت‌گیری ساختمان‌ها نیز با ترکیب این اثرات، مسیرهای تابش و جریان هوا را به شکل متنوعی کانالیزه می‌کند، مناطق سایه و روشن ایجاد می‌کند و در نتیجه الگوی تجمع گرما و توزیع رطوبت نسبی را تعدیل می‌کند (Nosek et al., 2016; Chen et al., 2021, Ramponi et al., 2015).
- **بلوک‌ها و قطعات شهری**، به عنوان واحدهای میانجی میان ساختمان‌ها و شبکه معابر، نقش کلیدی در شکل‌دهی خرداقلیم دارند. ویژگی‌هایی چون نسبت سطح پوشیده به فضای باز، ابعاد و ارتفاع بلوک، ارتفاع متوسط ساختمان‌ها و نسبت سطح به حجم با هم تعیین می‌کنند که چه میزان تابش خورشیدی به سطوح زمین و ساختمان‌ها می‌رسد، گرمای تابشی ذخیره و بازگسیل می‌شود و دما و تابش محیط چگونه توزیع می‌شوند (Liu et al., 2024). افزایش نسبت سطح پوشیده و ارتفاع بلوک باعث تجمع حرارت و افزایش دمای تابشی می‌شود، درحالی‌که فضاهای باز و بلوک‌های کوتاه‌تر جریان هوا را تسهیل می‌کنند و به تهویه و کاهش گرمای محیط کمک می‌کنند (Wei et al., 2023, Deng et al., 2023). شکل و پیچیدگی بلوک و قطعه، مسیر و شدت جریان باد را تحت تأثیر قرار داده و الگوی پراکندگی دما و رطوبت را تعدیل می‌کنند. بلوک‌های پیچیده با کانالیزه کردن جریان هوا، مناطق سایه‌دار و تابشی ایجاد می‌کنند که باعث ناهمگونی حرارتی و موضعی شدن رطوبت نسبی می‌شود. همچنین جهت‌گیری بلوک‌ها و قطعات نسبت به مسیر خورشید و باد غالب، تعیین‌کننده مسیر تابش مستقیم، سایه‌اندازی و جهت حرکت جریان هواست و اثر آن بر دمای سطح، تابش و تبادل رطوبتی به صورت هم‌زمان اعمال می‌شود (Nosek et al., 2016).
- **شبکه خیابان‌ها** به عنوان ساختار خطی و فضایی باز میان ساختمان‌ها و بلوک‌ها، نقش کلیدی در تنظیم خرداقلیم دارد. ویژگی‌هایی چون عرض، طول، انحنا و محصوریت معابر به طور مستقیم میزان تابش خورشیدی و شدت سایه‌اندازی را تعیین می‌کنند و در نتیجه بر دمای تابشی سطوح و دمای هوا در مقیاس محلی اثرگذارند (Liu et al., 2024). این ویژگی‌ها همچنین بر نحوه نفوذ و هدایت جریان هوا اثر می‌گذارند و می‌توانند موجب شتاب‌گیری یا تضعیف جریان باد شوند و تهویه طبیعی یا تجمع حرارت را تشدید کنند. جهت‌گیری معابر نسبت به باد غالب و پیچیدگی شبکه معابر، شامل تعداد تقاطع‌ها و شاخه‌ها، مسیر و آشفته‌گی جریان هوا را شکل می‌دهند. این شاخص‌ها تعیین می‌کنند که جریان باد چگونه حرکت کند، در کدام نقاط شتاب گیرد یا کند شود و اختلاط حرارتی در فضاهای شهری چگونه رخ دهد (Yao et al., 2025, Zhong et al., 2025, Deng and Wong, 2020). در کنار این، ویژگی‌های سطحی و جنس معابر با کنترل جذب، ذخیره و بازگسیل انرژی خورشیدی، دمای سطح و رطوبت نسبی محیط را تعدیل می‌کنند و اثر هم‌زمان بر دما، تابش و رطوبت ایجاد می‌کنند.



• فضاهای باز و سبز، شامل میادین، پارک‌ها، حیاط‌ها و فضاهای بینابینی، از مهم‌ترین عناصر تنظیم‌کننده خُرداقلیم شهری به شمار می‌آیند و نقش چندگانه‌ای در تعدیل دما، تابش، جریان باد و رطوبت محیط دارند. ویژگی‌هایی مانند ارتفاع، نوع و تراکم پوشش گیاهی با ایجاد سایه و کاهش تابش مستقیم، دمای تابشی محیط را تعدیل می‌کنند و در عین حال با تسهیل فرایندهای تبخیر و تعرق، بر دمای هوا و رطوبت نسبی تأثیر می‌گذارند (Sodoudi et al., 2018). مساحت و نسبت فضای سبز، موقعیت و توزیع فضایی، ظرفیت سرمایشی محیط از طریق تبخیر-تعرق و الگوی پراکندگی گرما در مقیاس محله را تعیین می‌کنند و می‌توانند باعث ایجاد گرادیان‌های حرارتی در محیط شوند (Perini and Magliocco, 2014; Paramita and Matzarakis, 2019). علاوه بر این، جهت‌گیری فضاهای سبز میزان دریافت تابش خورشیدی و سایه‌زایی را کنترل می‌کند و نفوذپذیری سطح و خاک با تنظیم تبادل رطوبتی، تعادل حرارتی محیط را بهبود می‌بخشد. درنهایت، سایه‌دهی پوشش گیاهی به‌طور هم‌زمان دمای سطح و دمای هوای مجاور را کاهش می‌دهد و جریان باد را تسهیل می‌کند؛ زیرا در فضاهای سبز با مقاومت آیرودینامیکی کمتر، حرکت هواروان‌تر و اختلاط حرارتی مؤثرتر رخ می‌دهد (Szkordilis and Kiss, 2016; Morakinyo et al., 2017).

به بیان تحلیلی و خلاصه، مورفولوژی شهری شرایط مرزی و مسیر حرکت انرژی و جرم در سطح شهر را تعریف می‌کند و از طریق فیلترهای فیزیکی به‌طور مستقیم خُرداقلیم را بازتوزیع می‌کند و شرایط آسایش حرارتی را در سطح انسان تغییر می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که طراحی فضایی صحیح می‌تواند تابش و دما را کاهش داده، جریان هوا را بهبود بخشد و رطوبت را در سطحی متعادل نگه دارد که همگی مؤلفه‌های کلیدی آسایش حرارتی هستند. بنابراین، تحلیل مورفولوژی شهری و شاخص‌های کالبدی آن، ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی و مدیریت شرایط آسایش حرارتی در فضاهای باز و بسته فراهم می‌کند و امکان طراحی شهرهایی با کیفیت محیطی بالاتر را ایجاد می‌کند. از منظر نظری، می‌توان گفت که آسایش حرارتی نقطه تلاقی میان ساختار فضایی شهر، شرایط خُرداقلیمی و انسان به‌عنوان استفاده‌کننده فضا است. پژوهش‌های معاصر بر ضرورت تحلیل هم‌زمان این سه سطح تأکید کرده و معتقدند که بررسی آسایش حرارتی بدون ارجاع به خُرداقلیم و تحلیل خُرداقلیم بدون توجه به منطق مورفولوژیک شهر به نتایجی تقلیل یافته منجر خواهند (Wei et al., 2016, Tong et al., 2017, Zhang et al., 2022b).

چهارچوب مفهومی پژوهش

در این گذار مفهومی، مورفولوژی شهری، خُرداقلیم شهری و آسایش حرارتی به‌عنوان سه سطح تحلیلی متمایز اما پیوسته تعریف می‌شوند که هریک نقش خاصی در زنجیره تولید و ادراک شرایط محیطی ایفا می‌کنند. مورفولوژی شهری بستر کالبدی را تعریف می‌کند، خُرداقلیم شرایط اقلیمی محلی بر ساخته از این بستر را تبیین می‌نماید و آسایش حرارتی به‌عنوان خروجی انسان‌محور این شرایط، کیفیت تجربه محیطی فضاهای شهری را بازتاب می‌دهد.

مورفولوژی شهری در این چهارچوب به‌عنوان بستر ساختاری تولید شرایط خُرداقلیمی تلقی می‌شود. پژوهش‌های جدید تأکید دارند که سازمان فضایی شهر، واجد ظرفیت اقلیمی درونی است و خُرداقلیم شهری را باید به‌عنوان برآیند مستقیم منطق مورفولوژیک محیط مصنوع در نظر گرفت. از این منظر، عناصر مورفولوژیک شهر شامل ساختمان‌ها، قطعات و بلوک‌های شهری، شبکه معابر و فضاهای باز و سبز، هریک از طریق ویژگی‌های کالبدی خاص خود در شکل‌دهی به شرایط محیطی نقش ایفا می‌کنند. باین‌حال، اثرگذاری این عناصر بر خُرداقلیم نه به‌واسطه ماهیت عملکردی آن‌ها، بلکه از طریق ویژگی‌های فضایی و فیزیکی‌ای صورت می‌گیرد که در مقیاس‌های مختلف شهری قابل تعمیم و مقایسه‌اند. از این‌رو، برای تحلیل نظام‌مند رابطه مورفولوژی و خُرداقلیم، تمرکز از «عنصر شهری» به «ویژگی مورفولوژیک» منتقل می‌شود؛ ویژگی‌هایی که مستقل از نوع عنصر، قابلیت تبیین فرایندهای فیزیکی حاکم بر محیط شهری را دارند (شکل ۱). بررسی ویژگی‌های مؤثر عناصر مورفولوژیک شهری نشان می‌دهد که این ویژگی‌ها را می‌توان در سه دسته اصلی تجمیع و سازمان‌دهی کرد:

- ابعاد و هندسه (طول، عرض، ارتفاع، تناسبات، مساحت، حجم، شکل و پیچیدگی فرم، موقعیت و جهت‌گیری، فاصله، توزیع، نظم، پیوستگی و پیچیدگی فرم در دو و سه بعد)
- تراکم و فاصله (فشرده‌گی و پراکندگی، نسبت فاصله به ارتفاع، نسبت سطح پوشیده، نسبت فضای باز)
- پوشش گیاهی (نفوذپذیری سطح و خاک، ارتفاع، نوع و تراکم پوشش گیاهی)

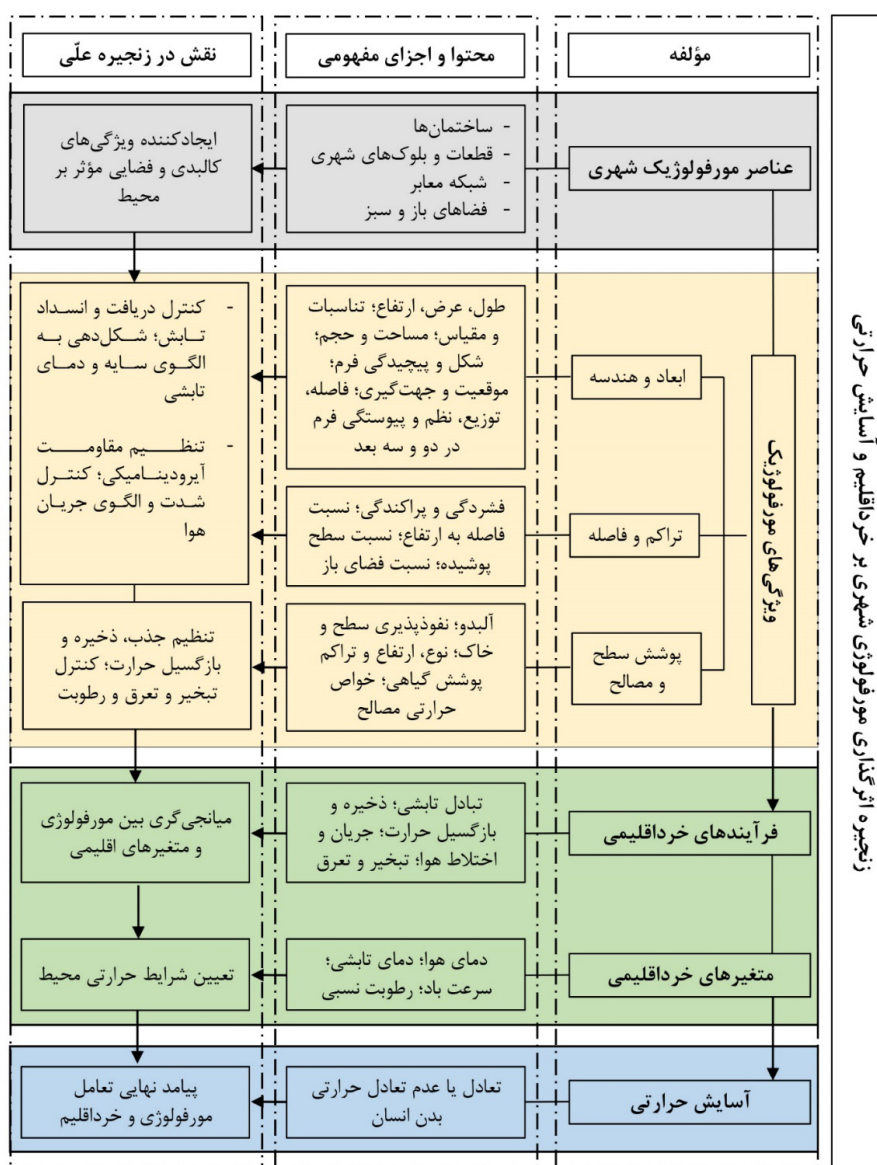
این سه دسته، مجموعه جامعی از ویژگی‌های مورفولوژیک را تشکیل می‌دهند که مبنای تحلیل اثرگذاری فرم شهر بر فرایندهای خُرداقلیمی قرار می‌گیرند.

ویژگی‌های مورفولوژیک شهری از طریق تأثیرگذاری بر فرایندهای فیزیکی حاکم بر تبادل انرژی و جرم، خُرداقلیم محیط شهری را شکل می‌دهند. ابعاد و هندسه فضاها با کنترل میزان دریافت و انسداد تابش خورشیدی و همچنین شکل‌دهی به الگوی سایه‌اندازی و دمای تابشی



سطوح، بر توازن حرارتی محیط اثر می‌گذارند. ویژگی‌های مرتبط با تراکم و فاصله، مقاومت آیرودینامیکی فضا را تعیین می‌کند و در نتیجه بر شدت، جهت و آشفتگی جریان هوا و میزان تهویه طبیعی تأثیر می‌گذارند. در مقابل، پوشش سطح از طریق تنظیم جذب، ذخیره و بازگسیل حرارت، نفوذپذیری رطوبتی و فرایندهای تبخیر و تعرق، نقش کلیدی در تعدیل دمای هوا و رطوبت نسبی ایفا می‌کنند. بدین ترتیب، مورفولوژی شهری مجموعه‌ای از شرایط مرزی را ایجاد می‌کند که متغیرهای اصلی خرداقلیم شامل دمای هوا، دمای تابشی، سرعت باد و رطوبت را هم‌زمان کنترل می‌نماید.

متغیرهای خرداقلیمی حاصل از این فرایندها، به‌طور مستقیم بر موازنه حرارتی بدن انسان اثر گذاشته و سطح آسایش یا تنش حرارتی را تعیین می‌کنند. از این منظر، آسایش حرارتی نتیجه نهایی یک زنجیره علّی است که از ویژگی‌های مورفولوژیک شهر آغاز شده، از طریق فرایندهای خرداقلیمی میانجی‌گری می‌شود و در نهایت به تجربه حرارتی کاربران فضاهای شهری منتهی می‌شود. براین اساس، چهارچوب مفهومی پژوهش حاضر رابطه میان عناصر مورفولوژیک، ویژگی‌های کالبدی تجمیع‌شده، فرایندهای خرداقلیمی و آسایش حرارتی را به‌صورت ساختاری سلسله‌مراتبی و پیوسته نمایش می‌دهد (شکل ۱).



شکل شماره ۱. چهارچوب مفهومی پژوهش مبتنی بر تأثیر متقابل مورفولوژی شهری، خرداقلیم و آسایش حرارتی



روش شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی؛ از نظر رویکرد، کمی تحلیلی؛ از نظر ماهیت، مفهومی تحلیلی سلسله مراتبی و از نظر بُعد زمانی، مقطعی است. تمرکز اصلی پژوهش بر تحلیل رابطه میان پیکربندی کالبدی فضایی شهر و متغیرهای خُرداقلیمی با اتکا به داده‌های عددی حاصل از شبیه‌سازی‌های محیطی و تحلیل‌های فضایی قرار دارد. در این چهارچوب، مورفولوژی شهری به عنوان عامل ساختاری مؤثر و خُرداقلیم به عنوان متغیر میانجی در تبیین شرایط آسایش حرارتی فضاها با شهر در نظر گرفته شده است. براین اساس، هدف اصلی پژوهش بررسی تأثیر عناصر مورفولوژی شهری بر شرایط خُرداقلیم و درنهایت آسایش حرارتی در دو محله از منطقه ۲۲ شهر تهران است. انتخاب این دو محله با هدف آشکارسازی نقش تفاوت‌های مورفولوژیک در شکل‌دهی شرایط اقلیم خرد و پیامدهای آن بر آسایش حرارتی و با حداقل تفاوت در شرایط اقلیم کلان صورت گرفته است.

روش گردآوری داده‌ها و ابزار تحلیل

داده‌های موردنیاز پژوهش از طریق ترکیب روش‌های مطالعات کتابخانه‌ای، مشاهده میدانی، شکل‌برداری و تحلیل اسناد و داده‌های مکانی موجود گردآوری شده‌اند. اطلاعات مربوط به ویژگی‌های کالبدی و مورفولوژیک شامل ابعاد و هندسه فضاها، تراکم و فاصله عناصر و ویژگی‌های پوشش سطح، از شکل‌های پایه، تصاویر ماهواره‌ای، برداشت‌های میدانی و اسناد طرح‌های شهری استخراج و برای مدل‌سازی آماده‌سازی شده‌اند.

ابزار اصلی تحلیل در این پژوهش، نرم‌افزار ENVI-met است. این نرم‌افزار یکی از ابزارهای معتبر و پرکاربرد ابزارهای شبیه‌سازی اقلیم خرد در محیط‌های شهری به شمار می‌رود (Simon, 2016, Sinsel, 2022) و قادر است براساس اصول ترمودینامیک، انتقال انرژی و دینامیک سیالات محاسباتی، تعامل میان سطوح شهری، پوشش گیاهی و جو لایه پایین را شبیه‌سازی کند (Huttner and Bruse, 2009). در این پژوهش، پارامترهای خُرداقلیمی شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش حرارتی با استفاده از این نرم‌افزار مدل‌سازی شده‌اند.

مراحل انجام شبیه‌سازی و تحلیل داده‌ها

معرفی محدوده مطالعه

در این پژوهش، دو محله دهکده المپیک و شهرک زیبادشت در منطقه ۲۲ شهر تهران به عنوان نمونه‌های مطالعه انتخاب شدند (شکل ۲).

محله دهکده المپیک ساختاری با تراکم ساختمانی پایین، غلبه واحدهای کم‌ارتفاع و ویلایی، شبکه معابر با عرض مناسب، سهم بیشتر فضاها با حضور قابل توجه پوشش گیاهی دارد. این ویژگی‌ها به سازمان فضایی نسبتاً باز و نفوذپذیر منجر می‌شود و شرایط متفاوتی را از نظر دریافت تابش، تهویه طبیعی و تعدیل دمایی ایجاد می‌کند. در مقابل، شهرک زیبادشت با الگوی توسعه متراکم‌تر، ساختمان‌های میان‌مرتبه و بلندمرتبه، شبکه معابر باریک‌تر، سهم محدود فضاها با نسبت پایین‌تر پوشش گیاهی شناخته می‌شود. این پیکربندی کالبدی فضایی شرایط متفاوتی را از نظر الگوی سایه‌اندازی، ذخیره و بازگسیل حرارت و جریان هوا در مقیاس محله ایجاد می‌کند.

انتخاب این دو محدوده بر مبنای تفاوت‌های معنادار در الگوهای ساخت و ساز، نسبت سطوح باز به ساخته شده، ویژگی‌های شبکه معابر و پیکربندی فضایی صورت گرفته است؛ به گونه‌ای که امکان تحلیل تطبیقی تأثیر مورفولوژی شهری بر شرایط خُرداقلیم و آسایش حرارتی فراهم شود. از سوی دیگر، قرارگیری هر دو محدوده در یک منطقه شهری واحد، با شرایط اقلیم کلان مشابه، این امکان را ایجاد می‌کند که نقش تفاوت‌های مورفولوژیک به صورت مستقل از متغیرهای اقلیمی کلان ارزیابی شود. همچنین موقعیت جغرافیایی خاص منطقه ۲۲ در مجاورت رشته کوه‌های البرز و دریاچه چیتگر و بروز پدیده‌هایی نظیر جزایر حرارتی شهری و نوسانات دمایی، اهمیت مطالعه این محدوده‌ها را در چهارچوب پژوهش حاضر افزایش می‌دهد.





شکل شماره ۲. جانمایی محدوده مدل سازی در محلات (چپ: دهکده المپیک، راست: شهرک زیبادشت)

استخراج و آماده سازی داده های مورفولوژیک

در این مرحله، داده های مربوط به عناصر مورفولوژی شهری شامل ساختمان ها، بلوک ها و قطعات، شبکه معابر و فضاهای باز و سبز از طریق شکل های پایه، تصاویر ماهواره ای، داده های GIS و برداشت های میدانی استخراج شدند. سپس ویژگی های کالبدی فضایی هر محدوده شامل ابعاد و هندسه فضاها، تراکم و فاصله عناصر و ویژگی های پوشش گیاهی، به صورت کمی و مدل سازی تعریف و برای ورود به نرم افزار ENVI-met آماده سازی شدند. این فرایند شامل ساده سازی هندسی، تعیین ارتفاع ساختمان ها، نوع سطوح زمین و پوشش گیاهی بوده است. به منظور تکمیل جزئیات فنی شبیه سازی و افزایش قابلیت بازتولید نتایج، تنظیمات مدل به شرح زیر تعریف شده است:

- دامنه مدل با ابعاد $100 \times 50 \times 50$ متر شامل ۵۰ سلول در راستای X، ۲۵ سلول در راستای Y و ۲۵ سلول در راستای Z
- اندازه هر سلول شبکه در هر سه راستا برابر با ۲ متر
- تعریف شبکه عمودی به صورت یکنواخت و استفاده نکردن از قابلیت افزایش تدریجی اندازه سلول ها در ارتفاع
- تقسیم نخستین لایه عمودی به پنج زیرسلول به منظور افزایش دقت در تراز نزدیک به زمین

تعریف شرایط مرزی و سناریوی شبیه سازی

شرایط مرزی شامل داده های هواشناسی پایه، نظیر دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد و شرایط تابشی، براساس اطلاعات ایستگاه های هواشناسی معتبر و متناسب با زمان مطالعه تعریف شدند. شبیه سازی ها برای یک روز نماینده (۲۲ تیر ۱۴۰۴، بازه زمانی ۱۵:۳۰ تا ۱۷:۳۰ به وقت محلی، دمای هوا بین ۳۲ تا ۳۳ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی بین ۱۵ تا ۱۴ درصد، سرعت باد ۳/۱ متر بر ثانیه در ارتفاع مرجع ۱۰ متر، جهت وزش باد از جنوب غربی با زاویه ۲۲۵ درجه، رطوبت ویژه ۸ گرم بر کیلوگرم در ارتفاع ۲۵۰۰ متر و زبری سطح میکرو برابر ۰.۱۰ متر) انجام شد تا بیشترین میزان تنش حرارتی و تفاوت عملکرد مورفولوژیک دو بافت آشکار شود. هدف پژوهش مقایسه نسبی عملکرد دو الگوی مورفولوژیک تحت شرایط یکسان اقلیمی است، نه تحلیل تغییرات زمانی؛ از این رو انتخاب یک روز نماینده، برای آشکارسازی تفاوت ها کفایت دارد.

شبیه سازی اقلیم خرد

پس از تعریف مدل سه بعدی هر محدوده و اعمال شرایط مرزی، شبیه سازی اقلیم خرد با استفاده از نرم افزار ENVI-met انجام شد. در این مرحله، تعامل میان سطوح شهری، پوشش گیاهی و جو لایه پایین براساس اصول دینامیک سیالات محاسباتی و انتقال انرژی مدل سازی شد. خروجی های اصلی شبیه سازی شامل دمای هوا، دمای تابشی، سرعت باد و رطوبت نسبی در تراز ارتفاع انسانی استخراج و برای تحلیل های بعدی ذخیره شدند.

تحلیل و مقایسه نتایج

در مرحله نهایی، خروجی های حاصل از شبیه سازی دو محدوده مطالعه تحلیل و با یکدیگر مقایسه شدند. تمرکز تحلیل بر شناسایی الگوهای فضایی توزیع آسایش و تنش حرارتی و ارتباط آن ها با تفاوت های مورفولوژیک دو بافت بوده است. نتایج این مقایسه مبنای تبیین نقش عناصر و ویژگی های مورفولوژی شهری در تعدیل یا تشدید شرایط آسایش حرارتی در فضاهای شهری قرار گرفته است.



یافته‌های پژوهش

به منظور انجام شبیه‌سازی و بررسی تأثیر ویژگی‌های اجزای مورفولوژی شهری بر آسایش حرارتی در دو بافت متفاوت، در این پژوهش، مدل‌سازی دقیق ساختمان‌ها با تمام ویژگی‌های مورفولوژیک شامل ابعاد و هندسه، تراکم و فاصله و پوشش گیاهی انجام شده است. به این ترتیب، ساختمان‌ها به عنوان عناصر اصلی مدل وارد شده‌اند و سایر اجزای مورفولوژیک مانند قطعات، بلوک‌ها، معابر و فضاهای باز به صورت مشتق از فضای خالی میان ساختمان‌ها و توزیع و تراکم آن‌ها تعریف شده‌اند.

پس از مدل‌سازی، داده‌های هواشناسی و اقلیمی شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، باد و تابش خورشیدی در بازه زمانی ۱۵:۳۰ تا ۱۷:۳۰ به وقت محلی برای تاریخ ۲۲ تیرماه ۱۴۰۴ گردآوری شد. انتخاب این بازه زمانی به دلیل قرارگیری در گرم‌ترین ساعات روز و اوج تابش خورشیدی بوده است تا تفاوت عملکرد خرداقلیم میان دو بافت به طور واضح قابل مشاهده باشد. این بازه زمانی برای بررسی آسایش حرارتی بافت‌ها در شرایط سخت‌تر گرمایی مناسب‌تر است و امکان تحلیل دقیق‌تری از عملکرد فضاهای شهری را فراهم می‌کند. در این پژوهش به دلیل تعدد نقشه‌ها در ساعات اندازه‌گیری، از لحاظ کردن تمامی آن‌ها صرف نظر شده و تنها نقشه‌های مربوط به ساعت ۱۶:۳۰ به وقت محلی آورده شده است.

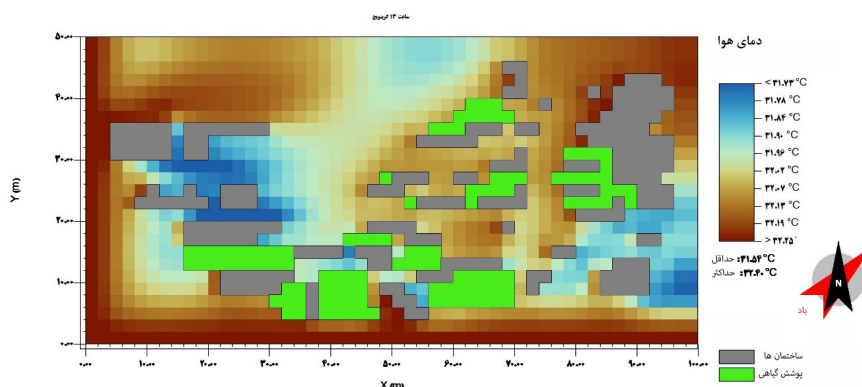
دما: شکل ۳ مؤلفه دمای هوا در محدوده شبیه‌سازی شده شهرک دهکده المپیک و شکل ۴ همان مؤلفه را در محدوده شبیه‌سازی شده شهرک زیبادشت نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی، تفاوت معناداری در الگوی فضایی دما بین دو محدوده آشکار می‌سازد که می‌توان آن را با ساختار هندسی، تراکم و میزان و نحوه پراکنش پوشش گیاهی مرتبط دانست.

در دهکده المپیک (شکل ۳)، بافتی قدیمی با تراکم پایین، بناهای کوتاه‌مرتبه (۳-۶ متر)، فضاهای باز گسترده و پوشش گیاهی فراوان مشاهده گردید. دامنه دمای هوا در این محدوده بین ۳۱.۵۴ تا ۳۲.۴۰ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. میانگین دما نسبتاً زیاد است؛ اما توزیع دما یکنواخت‌تر و متعادل‌تر به نظر می‌رسد. بخش‌های وسیعی از بافت با رنگ‌های آبی تا زرد روشن نمایش داده شده که نشان‌دهنده عملکرد مؤثر پوشش گیاهی و باز بودن فضاها در ممانعت از شکل‌گیری نقاط داغ موضعی است. همچنین، تهویه طبیعی در این بافت به دلیل عرض مناسب معابر و عدم انسداد مسیر باد، باعث توزیع یکنواخت‌تر دما در سراسر محدوده شده است.

در مقابل، شهرک زیبادشت (شکل ۴) با بافتی جدید و متراکم، ساختمان‌های بلندمرتبه (۹-۱۲ متر)، خیابان‌های باریک و پوشش سبز محدود در حاشیه‌ها، دامنه دمایی بین ۲۷.۹۱ تا ۳۱.۲۱ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. این محدوده در مقایسه با دهکده المپیک دمای هوای کمتری را نشان می‌دهد؛ به‌ویژه در محور میانی بافت که رنگ آبی پررنگ‌گویی حضور کانال‌های خنک موضعی ناشی از سایه‌اندازی ساختمان‌ها و هدایت جریان باد در فضاهای باریک بین بلوک‌های مرتفع است. با این حال، کاهش دما موضعی و متمرکز است و بخش‌های گسترده‌ای از بافت، به‌ویژه در حاشیه شمالی و شرقی که با رنگ‌های نارنجی و قهوه‌ای نمایش داده شده، تجمع گرما و شکل‌گیری نقاط داغ را نمایش می‌دهد. این وضعیت ناشی از کمبود سایه طبیعی، کاهش نفوذپذیری باد و سطح سخت بالا در این مناطق تفسیر می‌شود.

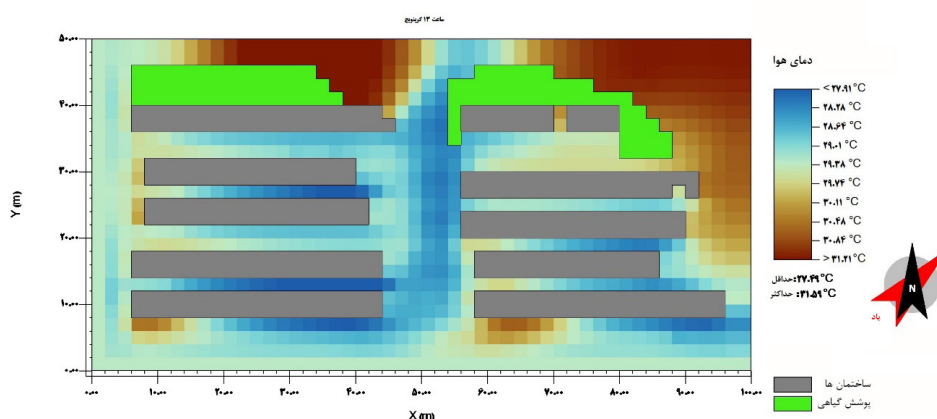
در مجموع، می‌توان این‌گونه برداشت کرد که زیبادشت به‌رغم تجربه دمای کمتر در برخی نقاط، از نظر الگوی توزیع دما دارای عملکردی ناپایدار و نابرابر است؛ درحالی‌که دهکده المپیک با وجود دمای کلی زیادتر، از لحاظ یکپارچگی، تعادل حرارتی و کیفیت اقلیمی عمومی وضعیت مطلوب‌تری دارد. بنابراین، الگوی کالبدی باز، ارتفاع کم و سبزی‌نگی گسترده در دهکده المپیک نقش مؤثری در کاهش دما و ارتقای آسایش حرارتی این بافت ایفا کرده است، درحالی‌که ساختار فشرده و فضای سبز محدود در زیبادشت به شکل‌گیری ناپایداری دمایی و کاهش کارایی حرارتی آن منجر شده است.

دمای هوا در دهکده المپیک



شکل شماره ۳. دمای هوا در محدوده دهکده المپیک

دمای هوا در زیبادشت



شکل شماره ۴. دمای هوا در محدوده زیبادشت

باد: شکل های ۵ و ۶ نتایج شبیه سازی سرعت و جهت باد در محدوده های دهکده المپیک و زیبادشت را نشان می دهند. در هر دو محدوده، جهت وزش باد غالب از جنوب غربی (زاویه ۲۲۵ درجه) بوده که در شکل ها با فلش هایی مشخص شده است. با وجود شرایط اقلیمی ورودی یکسان، تفاوت های چشمگیری در توزیع و شدت باد میان دو محدوده مشاهده می شود که با تفاوت های فرم کالبدی، تراکم ساخت و ساز و میزان فضای باز همخوانی دارد.

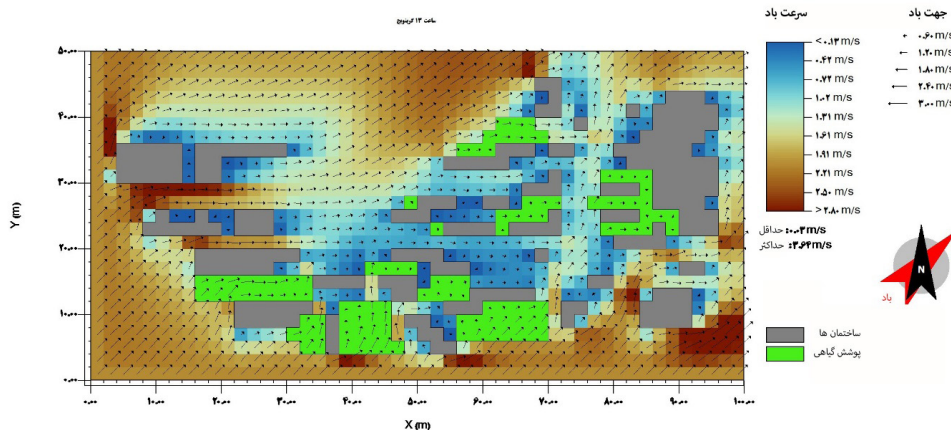
در محدوده دهکده المپیک (شکل ۵)، سرعت باد در بازه ای بین ۰.۰۳ تا ۳.۶۴ متر بر ثانیه قرار دارد. بیشترین سرعت باد در حاشیه های جنوبی و غربی دیده می شود که براساس نتایج شبیه سازی، به دلیل وجود فضاهای باز و نبود موانع بلند، باد امکان نفوذ و حرکت بیشتری دارد. درون بافت، بیشتر نواحی دارای سرعت باد پایین هستند؛ به ویژه در اطراف ساختمان های کم ارتفاع (۳ تا ۶ متر) و در مجاورت پوشش گیاهی که به نظر می رسد نقش مهمی در کاهش سرعت باد و مستهلک سازی جریان آن دارند. الگوی کلی حرکت باد در دهکده المپیک نشان دهنده جریان آرام، متعادل و پراکنده است. بافت ویلایی، خیابان های عریض و حضور گسترده فضای سبز موجب شده اند که هرچند باد با سرعت زیاد در این محدوده نفوذ نمی کند، اما سکون کامل هوا نیز در بیشتر نقاط رخ ندهد. تهویه طبیعی در این محدوده با شدت کمتر، ولی در سطح وسیع تری برقرار است که به ایجاد شرایط اقلیمی پایدار و افزایش آسایش حرارتی کمک می کند.

از طرفی در محدوده زیبادشت (شکل ۶)، سرعت باد در بازه ای بین ۰.۰ تا ۳.۹۸ متر بر ثانیه قرار دارد. حداکثر سرعت باد در مسیرهای میانی بافت دیده می شود؛ جایی که بین ساختمان های بلندمرتبه (۹ تا ۱۲ متر) معابر باریکی وجود دارد که باد به شدت در آن ها متمرکز و تسریع می شود. این وضعیت، نمونه ای از اثر تونل باد است که براساس مشاهدات شبیه سازی در بافت متراکم با ارتفاع زیاد زیبادشت رخ داده است. در مقابل، بسیاری از نقاط دیگر، به ویژه پشت ساختمان ها، گوشه ها و فضاهای بسته با سرعت باد نزدیک به صفر مواجه اند که نشان دهنده سکون شدید هواست. با توجه به تراکم زیاد و کمبود فضاهای باز و سبزیگی، جریان هوا در این محدوده الگوی متضاد و ناپایداری دارد؛ بخشی از بافت جریان شدید و بخشی دیگر تقریباً راکد است. این عدم تعادل، تهویه طبیعی را مختل کرده و باعث شکل گیری نقاط داغ موضعی و کاهش کیفیت اقلیمی شده است.

بنابراین می توان گفت دهکده المپیک با توجه به بافت باز، تراکم پایین، ساختمان های کوتاه و پوشش گیاهی گسترده، جریان بادی آرام ولی یکنواخت تری دارد که به بهبود تهویه طبیعی و افزایش تاب آوری اقلیمی کمک کرده است. در مقابل، زیبادشت با وجود تجربه سرعت های زیادتر در بعضی نقاط، به دلیل تمرکز موضعی جریان و وجود سکون های شدید، الگوی جریان بادی ناپایدار و عملکرد اقلیمی ضعیف تری از خود نشان می دهد.

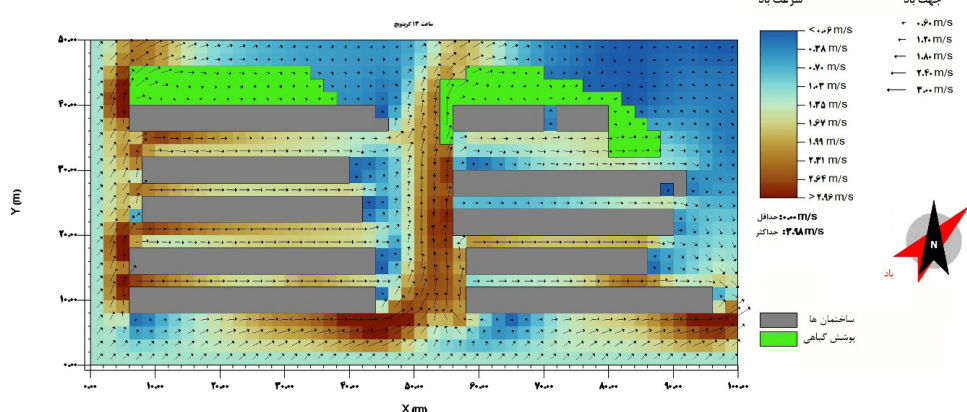


سرعت و جهت باد در دهکده المپیک



شکل ۵. سرعت و جهت باد در محدوده دهکده المپیک

سرعت و جهت باد در زیبادشت

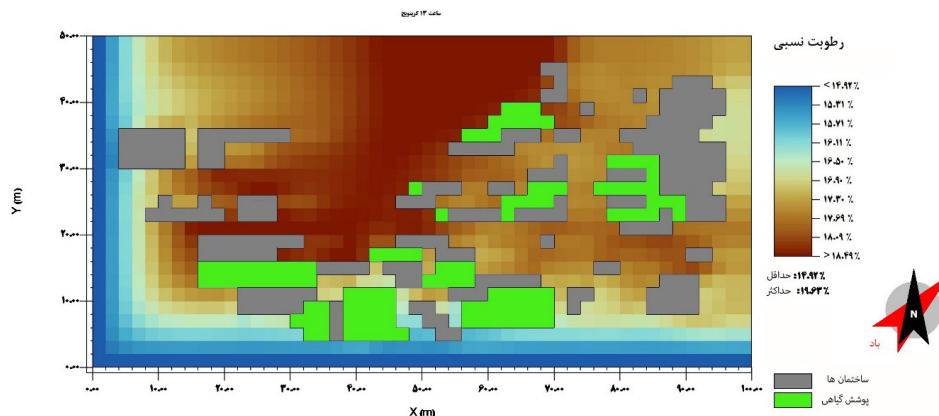


شکل شماره ۶. سرعت و جهت باد در محدوده زیبادشت

رطوبت: براساس نتایج حاصل از شبیه سازی، توزیع رطوبت نسبی در دو بافت دهکده المپیک (شکل ۷) و زیبادشت (شکل ۸) تفاوت های چشمگیری را نشان می دهد که به نظر می رسد با سازمان فضایی و مورفولوژی این دو محله مرتبط باشد. در محله دهکده المپیک (شکل ۷)، مقادیر رطوبت نسبی در بازه حدود ۱۴.۹۲ درصد (کمترین) تا ۱۹.۶۳ درصد (بیشترین) متغیر است. این محله با بافت باز، تراکم ساختمانی پایین (ساختمان های ۳ تا ۶ متر)، معابر عریض تر و پوشش گیاهی وسیع، امکان تبخیر و تعرق گیاهان و تبادل رطوبت با جریان هوا را فراهم می سازد. مشاهدات شبیه سازی نشان می دهد این امر موجب شکل گیری رطوبت نسبی پایین تر و توزیع یکنواخت تر در این بافت شده که ضمن افزایش تاب آوری اقلیمی محله در برابر تنش های حرارتی، از بروز نقاط با رطوبت بالای محلی جلوگیری کرده است. در مقابل، محله زیبادشت (شکل ۸) با بافت متراکم تر، ساختمان های بلند (۹ تا ۱۲ متر) و خیابان های باریک تر، مقادیر رطوبت نسبی بیشتری را از حدود ۲۰.۶۱ درصد (کمترین) تا ۳۳.۱۶ درصد (بیشترین) نشان می دهد. این موضوع می تواند به دلیل محصور بودن جریان هوا در این بافت و تبخیر محدود از طریق گیاهان رخ دهد. نتیجه مشاهده شده شکل گیری نقاط با رطوبت زیادت در زیبادشت، اختلال در تبادل حرارتی با محیط بیرونی و در مجموع، پایین آمدن تاب آوری اقلیمی این محله در برابر تنش های حرارتی آینده است.

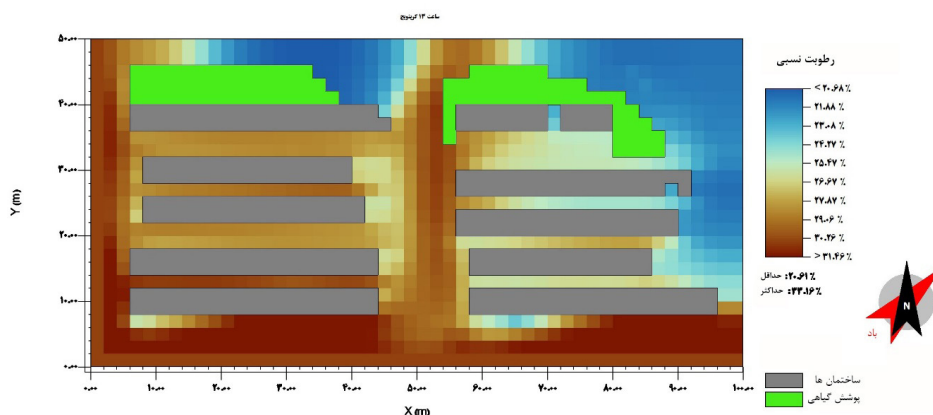
این مقایسه تطبیقی نشان می دهد سازمان فضایی باز، تراکم پایین و پوشش گیاهی وسیع در محله دهکده المپیک الگوی رطوبت نسبی پایین تر و یکنواختی را نسبت به محله زیبادشت، با بافت متراکم، ساختمان های بلند و فضاهای باز محدود ارائه می دهد.

رطوبت نسبی در دهکده المپیک



شکل شماره ۷. رطوبت نسبی در محدوده دهکده المپیک

رطوبت نسبی در زیادشت



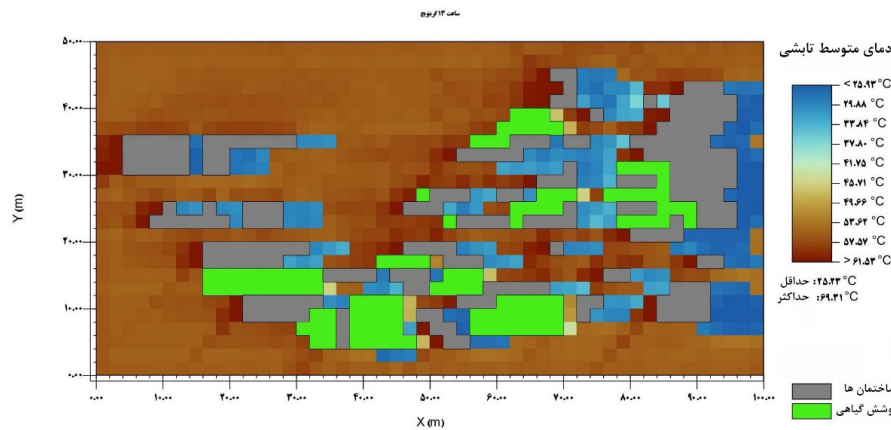
شکل شماره ۸. رطوبت نسبی در محدوده زیادشت

تابش: نقشه‌های دمای متوسط تابشی (برآیند اثر تابش مستقیم و پراکنده خورشیدی، بازتاب سطوح و تابش بلند موج عناصر کالبدی بر بدن) حاصل از شبیه‌سازی، تفاوت‌هایی معنادار در الگوی توزیع فضایی مؤلفه تابشی آسایش حرارتی میان دو بافت دهکده المپیک و شهرک زیادشت نشان می‌دهند.

در دهکده المپیک (شکل ۹)، توزیع فضایی دمای متوسط تابشی با ناهمگنی قابل توجهی همراه است؛ به گونه‌ای که مقادیر بالای دمای تابشی عمدتاً در فضاهای باز و سطوح فاقد سایه مشاهده می‌شود، در حالی که کاهش دمای متوسط تابشی به نواحی محدود مجاور ساختمان‌ها و لکه‌های پراکنده پوشش گیاهی محدود شده است. ساختار کالبدی باز، فاصله‌گذاری نسبتاً زیاد میان بلوک‌ها و پیوستگی پایین سایه‌اندازی موجب شده است که اگرچه این بافت در شاخص‌های هواپایه آسایش حرارتی شامل دمای هوا، رطوبت نسبی و شرایط تهویه عملکرد مطلوب‌تری نشان می‌دهد؛ اما در ساعات اوج تابش خورشیدی، بخش قابل توجهی از فضاهای باز آن در معرض تنش تابشی بالا قرار گیرد. این الگو نشان می‌دهد که بهبود شرایط هواپایه لزوماً به کاهش تنش تابشی منجر نمی‌شود. در مقابل، شهرک زیادشت (شکل ۱۰) الگوی منسجم‌تر و یکپارچه‌تری از توزیع دمای متوسط تابشی را نشان می‌دهد. آرایش منظم‌تر بلوک‌های ساختمانی، شکل‌گیری فضاهای نیمه محصور و تداوم سایه‌اندازی کالبدی در کنار حضور نسبتاً پیوسته‌تر پوشش گیاهی، موجب کاهش محسوس دمای متوسط تابشی در بخش قابل توجهی از فضاهای باز شده است. در این بافت، هرچند شاخص‌های هواپایه آسایش حرارتی نسبت به دهکده المپیک در وضعیت مطلوب‌تری قرار ندارند؛ اما از منظر مؤلفه تابشی آسایش حرارتی، شرایط پایدارتر و قابل تحمل‌تری مشاهده می‌شود که مؤید نقش تعیین‌کننده سازمان‌دهی کالبدی در کنترل دریافت تابشی براساس یافته‌های شبیه‌سازی است.

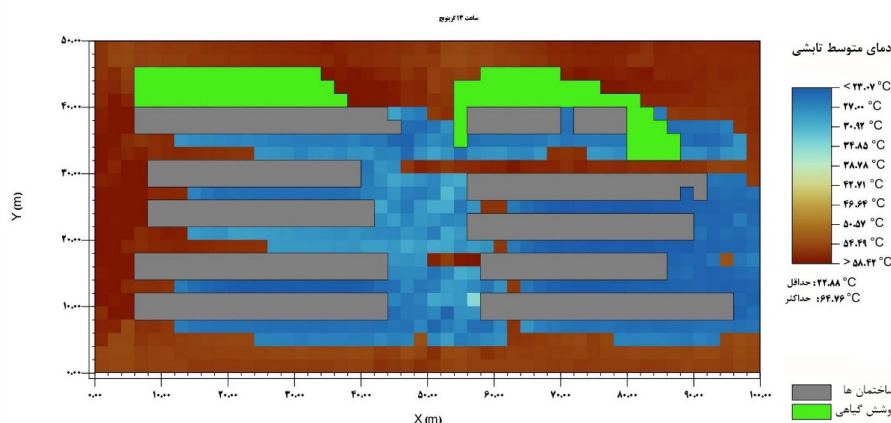


نقشه دمای متوسط تابشی در دهکده المپیک



شکل شماره ۹. دمای تابشی در محدوده دهکده المپیک

نقشه دمای متوسط تابشی در زیادداشت



شکل شماره ۱۰. دمای تابشی در محدوده زیادداشت



بحث

نتایج شبیه سازی تطبیقی نشان می دهد که روابط علی ترسیم شده در چهارچوب مفهومی (شکل ۱) به طور روشن در دو محدوده مطالعه مشاهده می شود؛ به گونه ای که تفاوت در عناصر مورفولوژیک شهری (ساختمان ها، بلوک ها، شبکه معابر و فضاهای باز و سبز) از طریق ویژگی های مورفولوژیک (ابعاد و هندسه، تراکم و فاصله و پوشش سطح و مصالح) موجب تغییر در فرایندهای خرداقلیمی (تبادل تابشی، ذخیره و بازگسیل حرارت، جریان و اختلاط هوا و تبخیر/تعرق) شده و این تغییرات در نهایت در متغیرهای خرداقلیمی شامل دمای هوا، دمای تابشی، سرعت باد و رطوبت نسبی نمود یافته اند.

نحوه استقرار ساختمان ها، اندازه بلوک های شهری، الگوی شبکه معابر و میزان پیوستگی فضاهای باز و سبز در بافت باز و کم تراکم دهکده المپیک و بافت متراکم و بلندمرتبه زیادداشت، مستقیماً بر شاخص های مربوط به ابعاد و هندسه فضا (ارتفاع ساختمان ها، عرض معابر، نسبت ارتفاع به عرض، فاصله میان ساختمان ها و میزان پیوستگی فرم) و نیز بر شاخص های مرتبط با تراکم و فاصله بافت (فشرده گی و پراکنده گی، نسبت فاصله به ارتفاع و نسبت سطح پوشیده به باز) اثر گذاشته اند. این تفاوت معنادار در ویژگی های مورفولوژیک دو بافت، تأثیر مستقیمی بر پارامترهای خرداقلیم و در نتیجه بر آسایش حرارتی داشته است:

در سطح ویژگی‌های مورفولوژیک مرتبط با «ابعاد و هندسه» در دهکده المپیک، ارتفاع محدود ساختمان‌ها، عرض بیشتر معابر و فاصله بیشتر میان بلوک‌ها موجب افزایش ضریب دید آسمان و کاهش محصوریت فضایی شده است، درحالی‌که در زیبادشت ارتفاع بیشتر ساختمان‌ها و فشردگی بلوک‌ها به کاهش دید آسمان و افزایش محصوریت فضایی انجامیده است. این تفاوت هندسی به‌طور مستقیم فرایند تبادل تابشی را تحت تأثیر قرار داده است؛ به‌طوری‌که در زیبادشت اگرچه سایه‌اندازی ساختمان‌ها در برخی کانیون‌های عمیق موجب کاهش موضعی دمای تابشی در ساعات روز شده، اما کاهش ضریب دید آسمان و محدود شدن تبادل تابش طول موج بلند با آسمان، ظرفیت دفع حرارت را کاهش داده و موجب افزایش ذخیره حرارتی سطوح شده است. در مقابل، در دهکده المپیک به دلیل نسبت ارتفاع به عرض کمتر و بازبودن فضاها، تبادل تابشی کارآمدتر بوده و گرادیان‌های دمایی محدودتر و توزیع دمای هوا یکنواخت‌تر مشاهده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های هندسی نظیر نسبت ارتفاع به عرض و ضریب دید آسمان که در چهارچوب مفهومی در گروه «ابعاد و هندسه» قرار می‌گیرند، نقش تعیین‌کننده‌ای در تنظیم فرایندهای تابشی و در نتیجه دمای هوا و دمای تابشی دارند (Deng and Wong, 2020; Zhong et al., 2025).

ابعاد و هندسه ساختمان‌ها و معابر همچنین نقش تعیین‌کننده‌ای در فرایند جریان و اختلاط هوا داشته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در زیبادشت، معابر باریک میان بلوک‌های بلندمرتبه به‌صورت کانال‌های هدایت باد عمل کرده و موجب افزایش موضعی سرعت جریان هوا شده‌اند. این شتاب موضعی عمدتاً در محورهای مستقیم با نسبت ارتفاع به عرض بالا مشاهده شده است. با این حال، هم‌زمان با این شتاب موضعی، نواحی پناه‌گرفته در پشت ساختمان‌ها، گوشه‌ها و فضاهای نیمه‌بسته با سکون شدید هوا مواجه بوده‌اند. این وضعیت نشان می‌دهد که در بافت‌های متراکم، شاخص‌های هندسی مانند پیوستگی جداره‌ها، نسبت ارتفاع به عرض و پیچیدگی فرم موجب شکل‌گیری الگوی ناهمگن تهویه می‌شوند که شامل هم‌زمانی نواحی با سرعت باد زیاد و نواحی با تهویه بسیار ضعیف است. در مقابل، در دهکده المپیک سرعت باد متوسط کمتر بوده است؛ اما توزیع آن یکنواخت‌تر بوده و سکون کامل هوا در بخش‌های وسیع مشاهده نشده است. معابر عریض‌تر، فضاهای باز پیوسته و شکستگی‌های کالبدی موجب نفوذ تدریجی جریان هوا و اختلاط بهتر آن در کل محدوده شده‌اند. این نتایج با نتایج مطالعاتی که بر نقش هندسه و تراکم مؤلفه‌های مورفولوژیک به‌عنوان کنترل‌کننده اصلی‌های فرایند جریان و اختلاط هوا و در نتیجه متغیر سرعت باد هستند، همخوان است (Aliabadi et al., 2019; Mo et al., 2021).

در سطح ویژگی‌های مورفولوژیک مرتبط با «تراکم و فاصله»، تفاوت معناداری میان نسبت سطح پوشیده، فاصله میان ساختمان‌ها و میزان فشردگی بافت در دو محله مشاهده شد. در زیبادشت، افزایش تراکم ساختمانی و کاهش فاصله میان ساختمان‌ها موجب افزایش سطوح جذب‌کننده تابش و کاهش امکان دفع حرارت شده است. این وضعیت فرایند ذخیره و بازگسیل حرارت را تقویت می‌کند و به افزایش دمای سطح و دمای هوا انجامیده است، درحالی‌که در دهکده المپیک نسبت سطح اشغال کمتر و سهم بیشتر فضاهای باز موجب کاهش ذخیره حرارتی و تسهیل تبادل انرژی با جو شده است. در نتیجه، دمای هوا در دهکده المپیک پایین‌تر و توزیع آن یکنواخت‌تر بوده است، درحالی‌که در زیبادشت الگوی دمایی ناهمگون‌تری مشاهده شده است. این الگو نشان می‌دهد که شاخص‌های تراکمی نه تنها بر مقدار میانگین دما، بلکه بر پایداری فضایی شرایط حرارتی نیز اثر می‌گذارند. این یافته با مطالعاتی که رابطه مثبت تراکم ساختمانی و دمای سطح زمین را گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد (Dinić Branković et al., 2025).

در سطح «پوشش سطح و مصالح»، تفاوت قابل توجهی در میزان پوشش گیاهی، نفوذپذیری سطوح و نوع پوشش زمین میان دو محله مشاهده شد. در دهکده المپیک، حضور گسترده پوشش گیاهی موجب فعال‌تر شدن فرایند تبخیر-تعرق شده است؛ فرایندی که در آن بخشی از انرژی تابشی به گرمای نهان تبدیل شده و از افزایش دمای محسوس هوا جلوگیری می‌شود. علاوه بر این، سایه‌اندازی درختان موجب کاهش دریافت تابش خورشیدی در سطح زمین و کاهش دمای تابشی شده است. در مقابل، کمبود فضای سبز و غلبه سطوح سخت در زیبادشت موجب افزایش جذب تابش و تقویت فرایند ذخیره حرارت شده است. بنابراین شاخص‌های مربوط به نوع و تراکم پوشش گیاهی، نفوذپذیری سطوح و خواص حرارتی مصالح که در چهارچوب مفهومی در گروه «پوشش سطح و مصالح» قرار دارند، نقش مهمی در کنترل هم‌زمان فرایندهای تبخیر-تعرق و ذخیره حرارتی ایفا کرده‌اند و در نهایت به تفاوت‌های مشاهده‌شده در دمای هوا و دمای تابشی منجر شده‌اند. موضوعی که در مطالعات مربوط به نقش پوشش گیاهی در خرداقلیم شهری نیز گزارش شده است (Lindberg and Grimmond, 2011; Sodoudi et al., 2018).

نتایج همچنین نشان می‌دهد الگوهای رطوبت نسبی نیز به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های مورفولوژیک ساختمان‌ها و معابر و پوشش گیاهی دو محله قرار گرفته است. در بافت کم‌ارتفاع و کم‌تراکم دهکده المپیک، رطوبت تولیدشده ناشی از تبخیر سطحی و تعرق گیاهان به‌واسطه جریان هوای نسبتاً یکنواخت در سطح محله پراکنده شده و از تجمع موضعی رطوبت جلوگیری شده است. در مقابل، در زیبادشت نواحی کم‌تهویه، به‌ویژه در فضاهای نیمه‌بسته و معابر محصور، با انباشت رطوبت نسبی همراه بوده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های



مربوط به هندسه فضا و پیوستگی شبکه معابر که جریان هوا را کنترل می کنند، نقش تعیین کننده ای در پراکندگی رطوبت دارند. به بیان دیگر، رطوبت نسبی نه تنها تابع میزان تبخیر تعرق، بلکه تابع کیفیت تهویه نیز هست و فرم های کالبدی که مانع جریان هوا می شوند، مستعد تجمع هم زمان گرما و رطوبت هستند. نتیجه ای که با مطالعات پیشین درباره توزیع رطوبت در فضاهای شهری متراکم همخوان است (Johansson, 2006; Muniz-Gäl et al., 2020).

در مجموع، تفسیر نتایج در چهارچوب مفهومی نشان می دهد که ترکیب ویژگی های مورفولوژیک شامل نسبت ارتفاع به عرض پایین تر، فاصله بیشتر میان ساختمان ها، پیوستگی فضاهای باز و پوشش گیاهی گسترده در دهکده المپیک موجب تقویت تبادل تابشی، کاهش ذخیره حرارت، بهبود اختلاط هوا و افزایش تبخیر تعرق شده و در نتیجه توزیع یکنواخت تر دما، تهویه مؤثرتر و کاهش نقاط داغ و مرطوب را به همراه داشته است. در مقابل، در زیبادشت ترکیب تراکم زیاد، ارتفاع زیاد ساختمان ها، کاهش دید آسمان، محدودیت فضاهای باز و کمبود پوشش گیاهی موجب تضعیف تبادل تابشی، افزایش ذخیره حرارت، ناپایداری جریان هوا و تجمع موضعی رطوبت شده و در نهایت آسیب پذیری حرارتی بیشتری ایجاد کرده است. این نتایج نشان می دهد که اثر مورفولوژی شهری بر آسایش حرارتی حاصل برهم کنش هم زمان شاخص های هندسی، تراکمی و سطحی است و هیچ یک از این شاخص ها به تنهایی قادر به توضیح شرایط خرد اقلیمی نیستند؛ بلکه ترکیب آن ها است که فرایندهای خرد اقلیمی و متغیرهای نهایی را تعیین می کند.

نتیجه گیری

پژوهش حاضر با اتکا به چهارچوب مفهومی سلسله مراتبی و بهره گیری از شبیه سازی عددی خرد اقلیم در محیط نرم افزار ENVI-met، نشان داد که مورفولوژی شهری نه صرفاً زمینه ای کالبدی، بلکه به مثابه سازوکاری فعال، دینامیک و تعیین کننده در تولید شرایط خرد اقلیمی و در نهایت شکل دهی به آسایش حرارتی فضاهای شهری عمل می کند. نتایج حاصل از مدل سازی دقیق ویژگی های مورفولوژیک شهری، شامل هندسه و ابعاد فضا، میزان تراکم و فاصله گذاری توده ها و پوشش گیاهی، تأیید می کند که این ویژگی ها از طریق تأثیرگذاری بر تابش خورشیدی، الگوهای جریان باد و فرایندهای تبادل حرارت و رطوبت، به صورت هم زمان بر متغیرهای اصلی خرد اقلیم اثر گذاشته و تجربه حرارتی کاربران در مقیاس پیاده و فضای باز را شکل می دهند. بدین ترتیب، آسایش حرارتی را می توان خروجی نهایی یک زنجیره علی دانست که ماهیتی چند سطحی دارد و ریشه در منطق فضایی و کالبدی شهر دارد. همچنین، این یافته ها بر اهمیت تحلیل ترکیبی و بین رشته ای شاخص های فضایی و اقلیمی تأکید می کنند و نشان می دهند که تعامل میان پارامترهای مورفولوژیک و شرایط محیطی نه خطی است و نه محدود به متغیری منفرد؛ بلکه تابعی از هم زمانی و هم پوشانی عوامل متعددی است که به طور پویا در سطح محله عمل می کنند.

مقایسه تطبیقی دو بافت با مورفولوژی متفاوت، دهکده المپیک و زیبادشت، بر پایه خروجی های هم زمان شبیه سازی دما، باد، رطوبت نسبی و تابش، نشان داد که محلات کم تراکم با الگوی ویلایی، معابر عریض و پوشش گیاهی گسترده، اگرچه الزاماً به کمینه شدن دمای مطلق هوا منجر نمی شوند؛ اما از طریق ایجاد توزیع یکنواخت تر دما، تهویه طبیعی پایدار و جلوگیری از تمرکز موضعی گرما و رطوبت، کیفیت اقلیمی عمومی و آسایش حرارتی بالاتری را فراهم می آورند. در مقابل، بافت های متراکم و بلند مرتبه با خیابان های باریک و کمبود فضای سبز، علی رغم ایجاد سایه اندازی و لکه های خنک موضعی که در نتایج مدل سازی مشاهده شد، به دلیل کاهش ضریب دید آسمان، انسداد مسیرهای باد و شکل گیری نواحی سکون شدید هوا، مستعد ناپایداری خرد اقلیمی، انباشت هم زمان گرما و رطوبت و افزایش تنش حرارتی هستند. این یافته ها نشان می دهد که ارزیابی عملکرد اقلیمی بافت های شهری نباید صرفاً بر مقادیر حداقلی یا حداکثری متغیرها متمرکز باشد؛ بلکه الگوی فضایی توزیع آن ها، دامنه نوسانات خرد مقیاس و میزان یکنواختی شرایط محیطی که تنها از طریق تحلیل فضایی و شبیه سازی عددی قابل آشکارسازی است، نقش تعیین کننده تری در ادراک آسایش حرارتی دارد.

از منظر نظری، نوآوری پژوهش در ارائه چهارچوبی مبتنی بر ویژگی های مورفولوژیک به عنوان واحدهای مقایسه پذیر در تحلیل خرد اقلیم شهری است. تمرکز از عناصر منفرد به منطق فضایی و فیزیکی فرم شهر منتقل شده و بر الگوی فضایی توزیع متغیرهای خرد اقلیمی و دامنه نوسانات آن ها در مقیاس پیاده تأکید دارد. یافته ها بر ماهیت چند بعدی و گاه متعارض مداخلات مورفولوژیک، نظیر نقش هم زمان سایه اندازی عمودی و پوشش گیاهی در تعدیل دما و تهویه، اشاره دارند و ضرورت پرهیز از راهکارهای تک متغیره در مواجهه با تنش های حرارتی شهری را برجسته می کنند. این رویکرد چند بعدی، امکان شناسایی سناریوهای بهینه در سطوح مختلف طراحی و برنامه ریزی را فراهم می آورد و به پژوهشگران و طراحان شهری کمک می کند تا اثرات هم زمان پارامترهای فیزیکی و فضایی را بر آسایش حرارتی مدل سازی و پیش بینی کنند. از منظر کاربردی، نتایج بیانگر آن است که ارتقای آسایش حرارتی در مقیاس محله مستلزم ایجاد تعادلی پویا میان تراکم ساختمانی، ارتفاع توده ها، هندسه معابر، پیوستگی فضایی و جانمایی هدفمند پوشش گیاهی است. حفظ کریدورهای تهویه، پرهیز از محصوریت بیش از حد فضاهای باز و ترکیب سنجیده سایه اندازی کالبدی و طبیعی می تواند به عنوان اصول طراحی مبتنی بر شواهد در بازطراحی بافت های شهری،



به‌ویژه در شرایط تشدید تنش‌های حرارتی ناشی از تغییرات اقلیمی، مدنظر قرار گیرد. همچنین، این یافته‌ها کاربرد مستقیمی در بازتعریف معیارهای طراحی شهری و تدوین دستورالعمل‌های بهینه‌سازی مورفولوژیک محلات، با هدف کاهش اثرات جزیره‌های گرمایی شهری و بهبود کیفیت محیطی برای ساکنان، دارند.

درنهایت، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که شبیه‌سازی خُرداقلیمی می‌تواند به‌عنوان ابزاری تحلیلی و پیش‌بینانه در ارزیابی سناریوهای مورفولوژیک و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های طراحی شهری مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی با گسترش دامنه زمانی و اقلیمی شبیه‌سازی‌ها و پیوند نظام‌مند میان نتایج خُرداقلیمی، شاخص‌های کمی آسایش حرارتی و ابزارهای سیاست‌گذاری شهری، زمینه ترجمه یافته‌های علمی به ضوابط و راهبردهای اجرایی را فراهم آورند.

بیانیه‌ها

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافی مرتبط با این پژوهش وجود ندارد.

مشارکت مالی: این پژوهش از هیچ منبع مالی اعطایی سازمان‌های دولتی یا خصوصی برای پیشبرد تحقیق استفاده نکرده است.

رضایت آگاهانه: تمام شرکت‌کنندگان در این پژوهش رضایت آگاهانه خود را به صورت کتبی اعلام کرده‌اند.

مشارکت نویسندگان: ایده‌پردازی و طراحی مطالعه: سعیده علی‌کائی، مهدیه رهایی، مهرنوش عرب‌زاده کربلا؛ گردآوری داده‌ها: مهدیه رهایی، مهرنوش عرب‌زاده کربلا؛ تجزیه و تحلیل داده‌ها: سعیده علی‌کائی، مهدیه رهایی، مهرنوش عرب‌زاده کربلا؛ نگارش نسخه اولیه: مهرنوش عرب‌زاده کربلا، مهدیه رهایی؛ بازبینی و اصلاح مقاله: سعیده علی‌کائی؛ تأیید نهایی: تمام نویسندگان نسخه نهایی مقاله را تأیید کرده‌اند.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- Aliabadi, A., Moradi, M., Clement, D., Lubitz, W., & Gharabaghi, B. (2019). Flow and temperature dynamics in an urban canyon under a comprehensive set of wind directions, wind speeds, and thermal stability conditions. *Environmental Fluid Mechanics*, 19, 81–109.
- Allegrini, J., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2015). Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 144, 108–117.
- 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, Article 700.
- Chen, G., Rong, L., & Zhang, G. (2021). Impacts of urban geometry on outdoor ventilation within idealized building arrays under unsteady diurnal cycles in summer. *Building and Environment*, 206, Article 108344.
- Cheung, P. K., & Jim, C. Y. (2019). Improved assessment of outdoor thermal comfort: 1-hour acceptable temperature range. *Building and Environment*, 151, 303–317.
- Conzen, M. R. G. (2004). *Thinking about urban form: Papers on urban morphology, 1932–1998*. Peter Lang.
- Costa, I. T., Wollmann, C. A., Writzl, L., Iensse, A. C., da Silva, A. N., de Freitas Baumhardt, O., Gobo, J. P. A., Shooshtarian, S., & Matzarakis, A. (2024). A systematic review on human thermal comfort and methodologies for evaluating urban morphology in outdoor spaces. *Climate*, 12, Article 30.
- de Oliveira, A. (2022). *Urban morphology*. Springer.
- Deng, J.-Y., & Wong, N. H. (2020). Impact of urban canyon geometries on outdoor thermal comfort in central business districts. *Sustainable Cities and Society*, 53, Article 101966.
- Deng, X., Cao, Q., Wang, L., Wang, W., Wang, S., Wang, S., & Wang, L. (2023). Characterizing urban densification and quantifying its effects on urban thermal environments and human thermal comfort. *Landscape and Urban Planning*, 237, Article 104803.
- Dinić Branković, M., Igić, M., Đekić, J., & Ljubenović, M. (2025). Impact of urban densification on outdoor microcli-



- mate and design of sustainable public open space in residential neighborhoods: A study of Niš, Serbia. *Sustainability*, 17, Article 1573.
- Emmanuel, R., & Steemers, K. (2018). *Connecting the realms of urban form, density and microclimate*. Taylor & Francis.
 - Giurgiu, I. C., & Ottmann, D. A. (2025). Relationships between urban form, microclimate, and energy efficiency in hot climates. *Urban Science*, 9, Article 527.
 - Huang, C., Liu, K., Ma, T., Xue, H., Wang, P., & Li, L. (2025). Analysis of the impact mechanisms and driving factors of urban spatial morphology on urban heat islands. *Scientific Reports*, 15, Article 18589.
 - Huttner, S., & Bruse, M. (2009). Numerical modeling of the urban climate: A preview on ENVI-met 4.0. In *Proceedings of the 7th International Conference on Urban Climate (ICUC-7)*, Yokohama, Japan.
 - 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, 1326–1338.
 - Kamal, A., Abidi, S. M. H., Mahfouz, A., Kadam, S., Rahman, A., Hassan, I. G., & Wang, L. L. (2021). Impact of urban morphology on urban microclimate and building energy loads. *Energy and Buildings*, 253, Article 111499.
 - Kropf, K. (2009). Aspects of urban form. *Urban Morphology*, 13, 105–120.
 - Lindberg, F., & Grimmond, C. (2011). The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: Model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology*, 105, 311–323.
 - Liu, B., Liu, Y., Cho, S., & Chow, D. H. C. (2024). Urban morphology indicators and solar radiation acquisition: 2011–2022 review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, Article 114548.
 - Liu, C., Ye, X., Xu, Y., Sun, Q., & Xu, Y. (2025). Exploring the impact of urban morphology on heat stress: A high-resolution microclimate simulation study. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. Advance online publication.
 - Mandić, L., Đjukić, A., Marić, J., & Mitrović, B. (2024). A systematic review of outdoor thermal comfort studies for the urban (re)design of city squares. *Sustainability*, 16, Article 4920.
 - Marshall, S., & Çalışkan, O. (2011). A joint framework for urban morphology and design. *Built Environment*, 37, 409–426.
 - Mo, Z., Liu, C.-H., & Ho, Y.-K. (2021). Roughness sublayer flows over real urban morphology: A wind tunnel study. *Building and Environment*, 188, Article 107463.
 - Morakinyo, T. E., Kong, L., Lau, K. K.-L., Yuan, C., & Ng, E. (2017). A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and Environment*, 115, 1–17.
 - Muniz-Gäl, L. P., Pezzuto, C. C., de Carvalho, M. F. H., & Mota, L. T. M. (2020). Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate. *Building and Environment*, 169, Article 106547.
 - Nosek, Š., Kukačka, L., Kellnerová, R., Jurčáková, K., & Jaňour, Z. (2016). Ventilation processes in a three-dimensional street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, 159, 259–284.
 - Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
 - Oliveira, V. (2016). The elements of urban form. In *Urban morphology: An introduction to the study of the physical form of cities*. Springer.
 - Paramita, B., & Matzarakis, A. (2019). Urban morphology aspects on microclimate in a hot and humid climate. *Geographica Pannonica*, 23.
 - Perini, K., & Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 495–506.
 - Ramponi, R., Blocken, B., de Coo, L. B., & Janssen, W. D. (2015). CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths. *Building and Environment*, 92, 152–166.
 - Şahin, A., & Selçuk, S. A. (2025). How does urban regeneration affect urban morphology? A systematic review and

bibliometric analysis. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 13, 79–98.

- Simon, H. (2016). *Modeling urban microclimate: Development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met* (Doctoral dissertation, Johannes Gutenberg University Mainz).
- Sinsel, T. (2022). *Advancements and applications of the microclimate model ENVI-met* (Doctoral dissertation, Johannes Gutenberg University Mainz).
- Sodoudi, S., Zhang, H., Chi, X., Müller, F., & Li, H. (2018). The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34, 85–96.
- Szkordilis, F., & Kiss, M. (2016). Potential of vegetation in improving indoor thermal comfort and natural ventilation. *Applied Mechanics and Materials*, 824, 278–287.
- Tong, S., Wong, N. H., Tan, C. L., Jusuf, S. K., Ignatius, M., & Tan, E. (2017). Impact of urban morphology on microclimate and thermal comfort in northern China. *Solar Energy*, 155, 212–223.
- Tumini, I., Higuera Garcia, E., & Baereswyl Rada, S. (2016). Urban microclimate and thermal comfort modelling: Strategies for urban renovation. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 7, 22–37.
- Wei, R., Song, D., Wong, N. H., & Martin, M. (2016). Impact of urban morphology parameters on microclimate. *Procedia Engineering*, 169, 142–149.
- Wei, R., Yan, J., Cui, Y., Song, D., Yin, X., & Sun, N. (2023). Studies on the specificity of outdoor thermal comfort during the warm season in high-density urban areas. *Buildings*, 13, Article 2473.
- Yang, J., Yang, Y., Sun, D., Jin, C., & Xiao, X. (2021). Influence of urban morphological characteristics on thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 72, Article 103045.
- Yao, Z., Wang, P., Tian, Y., Zhang, Y., Zhang, Q., Wang, X., Wang, P., & Han, Q. (2025). Impact of sky view factor on seasonal microclimate and thermal comfort variability across urban campus streets and buildings. *Buildings*, 15, Article 4121.
- Yi, P., Liu, L., Huang, Y., Zhang, M., Liu, H., & Bedra, K. B. (2023). Study on the coupling relationship between thermal comfort and urban center spatial morphology in summer. *Sustainability*, 15, Article 5084.
- Zhang, J., Li, Z., & Hu, D. (2022a). Effects of urban morphology on thermal comfort at the micro-scale. *Sustainable Cities and Society*, 86, Article 104150.
- Zhang, J., Li, Z., Wei, Y., & Hu, D. (2022b). The impact of the building morphology on microclimate and thermal comfort: A case study in Beijing. *Building and Environment*, 223, Article 109469.
- Zhang, P., Ghosh, D., & Park, S. (2023a). Spatial measures and methods in sustainable urban morphology: A systematic review. *Landscape and Urban Planning*, 237, Article 104776.
- Zhang, Z., Luan, W., Yang, J., Guo, A., Su, M., & Tian, C. (2023b). The influences of 2D/3D urban morphology on land surface temperature at the block scale in Chinese megacities. *Urban Climate*, 49, Article 101553.
- Zhong, D., Gao, Y., Wei, L., Gu, X., Li, T., Xu, J., Yao, L., & Liu, Z. (2025). Street canyon microclimate effect on thermal comfort at entrances and exits of underground commercial streets: Measured and ENVI-met simulation. *Buildings*, 15, Article 4147.
- Zhou, Y., An, N., & Yao, J. (2022). Characteristics, progress and trends of urban microclimate research: A systematic literature review and bibliometric analysis. *Buildings*, 12, Article 877.

۱۴۰۵. دوره ۳. شماره ۱/ صفحات ۱۹۴-۱۶۹

سعیده علی کائی، مهدیه رهایی، مهنوش عرب زاده کریملا

