

Evaluation of the Impact of Urban Form on Urban Heat Islands: A Comparative Study of Residential Areas of Mashhad, Iran

Fateme Mirzaeian¹, Iman Ghalandarian², Maryam Talaei³

1. Department of Urbanism, Faculty of Architecture and Urbanism, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: fa.mirzaeiyan@mail.um.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Urbanism, Faculty of Architecture and Urbanism, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: ghalandarian@um.ac.ir
3. Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: m.talaei@um.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 17 July 2024
Received in revised form: 31 May 2025
Accepted: 1 June 2025
Available online: 10 June 2025

Keywords:

*Cold and dry climate,
ENVI-met,
Micro climate,
Urban heat island.*

ABSTRACT

Objective: The rapid growth and expansion of urban areas have caused extensive replacement of natural land surfaces with impermeable buildings and urban materials. This process increases thermal energy absorption and results in elevated temperatures, contributing to the Urban Heat Island (UHI) effect—a significant temperature difference between urban areas and their adjacent rural regions. The primary objective of this study is to examine how different urban morphological characteristics, including spatial configuration, building height, street orientation, and urban canyon geometry, influence urban microclimatic conditions. The focus is on cold semi-arid climates, where thermal comfort is often compromised, to identify effective urban design strategies to mitigate UHI and improve outdoor thermal conditions.

Method: A mixed-method research approach was adopted, involving a systematic review, morphological classification, and numerical environmental simulation. Additionally, a systematic analysis using VOS viewer software was conducted to explore the evolution of research trends related to urban form and thermal comfort, covering publications from 1973 to 2023. Subsequently, six distinct urban fabric types were selected from residential areas in Mashhad, Iran, categorized by spatial configuration (compact versus scattered) and building height classes (low-rise, mid-rise, high-rise). The microclimate of each typology was simulated using ENVI-met 5.1/6, a sophisticated 3D modelling tool that estimates variables such as air temperature, surface temperature, wind speed and direction, solar radiation, shading patterns, sky view factor (SVF), and height-to-width (H/W) ratios. Simulations were performed for three representative dates—summer solstice (June 21), winter solstice (December 21), and a moderate season (April 15), each covering a full diurnal cycle.

Results: The results revealed that compact urban forms generally contributed to lower daytime air temperatures due to increased shading from dense building arrangements and higher H/W ratios. However, very compact layouts tended to reduce natural ventilation, limiting nighttime cooling. Urban canyons with low SVF reduced solar exposure during the day but trapped heat at night, decreasing overall thermal comfort after sunset. Proper alignment of streets parallel to prevailing wind directions enhanced airflow and cooling, whereas perpendicular orientations impeded ventilation. Notably, some scattered high-rise configurations created localized cooling zones due to increased wind penetration, particularly in cruciform building layouts.

Conclusions: The study highlighted the importance of integrating climatic considerations into urban form design. It concluded that an optimal balance of building density, canyon geometry, and alignment with wind flow could effectively mitigate UHI impacts in cold semi-arid climates. These findings offer valuable evidence-based recommendations for urban planners and policymakers aiming to enhance thermal comfort and sustainability in rapidly urbanizing regions.

Cite this article: Mirzaeian, F., Ghalandarian, I., & Talaei, M. (2025). Evaluation of the Impact of Urban Form on Urban Heat Islands: A Comparative Study of Residential Areas of Mashhad, Iran. *Journal of Environmental Studies*, 51 (1), 97- 119. <http://doi.org/10.22059/jes.2025.378604.1008514>

Introduction

Urbanization has accelerated significantly in recent decades, transforming natural landscapes into densely built environments characterized by impervious surfaces such as concrete, asphalt, and compact buildings. These changes have resulted in dramatic shifts in the local climate, particularly in the form of urban heat islands (UHIs), which manifest as significantly higher temperatures in urban areas compared to surrounding rural landscapes. The rise in urban temperature due to UHI affects multiple aspects of city life, including energy consumption, public health, thermal comfort, and overall environmental quality.

The UHI phenomenon has been widely acknowledged as a consequence of the combined effects of anthropogenic land use changes and climatic conditions. Cities in arid and semi-arid regions, like those in Iran, are particularly vulnerable to UHI effects due to their limited vegetation, high solar radiation, and rapid urban growth. Among such cities, Mashhad—Iran's second-largest city—serves as a compelling case study due to its cold and semi-arid climate, population density, and the intensity of recent urban development. The city has experienced extensive physical growth over the past few decades, resulting in an increase in air pollution, energy usage, and, importantly, local surface temperatures.

A growing body of literature has explored the UHI phenomenon, focusing on both climatic contributors (e.g., solar radiation, humidity, and wind patterns) and human-induced elements such as land use change, building materials, and urban morphology. However, many studies tend to emphasize the role of green infrastructure in mitigating UHIs, leaving a relative gap in understanding how urban form itself—independent of vegetation—affects microclimatic behaviour. Urban morphology encompasses the physical characteristics of the built environment, including building layout and density, street orientation, building height, sky view factor (SVF), and height-to-width (H/W) ratio of urban canyons. These morphological parameters affect the flow of wind, the retention of solar radiation, and the degree of surface shading, all of which influence local thermal conditions. Thus, investigating the role of urban form becomes essential for cities aiming to design climate-resilient urban areas, especially in regions with extreme temperature fluctuations and limited natural cooling elements.

Despite its vulnerability to heat accumulation and air pollution, Mashhad has not been extensively studied in the context of urban form and urban heat island (UHI). Existing research about the city has mostly focused on land use and air quality, with minimal attention paid to how building geometry, density, and spatial arrangements influence temperature. This study addresses this gap by analysing how different urban configurations contribute to or mitigate the UHI effect in Mashhad's cold and semi-arid climate. The objectives of the study are as follows: to identify critical morphological indicators that affect urban temperature levels, to simulate various types of urban forms (compact vs. scattered; low-rise vs. high-rise) and evaluate their thermal performance, and to provide practical recommendations for urban planners and designers to reduce urban heat through urban form-based interventions.

Method

The study employed a mixed-method approach combining scient metric analysis, morphological classification, and environmental simulation. Initially, a comprehensive literature review and scient metric analysis were conducted using VOS viewer software to identify relevant urban form parameters associated with urban heat island (UHI) mitigation. Articles published between 1973 and 2023 were analysed, highlighting key trends in form-based urban climate research. Six representative urban fabric types were selected from residential areas in Mashhad. These types were classified based on two criteria: spatial configuration (compact vs. scattered), and building height (low-rise, mid-rise, and high-rise). Each urban fabric type was modelled using ENVI-met 5.1/6 software, a 3D microclimate modelling tool capable of simulating airflow, temperature dynamics, radiation flux, and evapotranspiration within urban environments. The input data included accurate spatial layouts, land cover, surface material types, and localized meteorological data. Simulations were performed over 24-hour periods on three distinct dates reflecting seasonal conditions: December 21 (winter solstice), June 21 (summer solstice), and April 15 (moderate temperature period). The results were analysed in terms of air temperature at pedestrian level, wind speed and direction, surface temperature, radiation and shading pattern, and sky view factor (SVF).

Results

The simulation outputs revealed several key patterns, including the impact of building density, revealing that compact urban forms generally exhibited lower midday air temperatures than scattered forms due to the shading effect provided by closely spaced buildings. However, ventilation efficiency was reduced by compactness, especially in areas with poor alignment to prevailing winds. The influence of height-to-width ratio indicated that urban canyons with higher height-to-width (H/W) ratios provided increased shading, thereby reducing surface heat absorption. However, excessively high H/W ratios resulted in decreased airflow and retention of heat during nighttime.

Analysing the sky view factor (SVF) showed a strong inverse relationship between SVF and ambient temperature. Areas with low SVF, indicating limited sky visibility due to surrounding structures, experienced cooler daytime temperatures because of reduced solar exposure but exhibited weaker nocturnal cooling.

Investigating the effect of street orientation revealed that streets aligned perpendicular to prevailing wind directions hindered ventilation and increased heat retention, whereas parallel alignment facilitated airflow and improved cooling.

Performance of scattered high-rise layouts showed that in certain scenarios, high-rise buildings arranged in scattered patterns generated unexpected cooling pockets due to open space configurations and enhanced wind access, particularly in cruciform layouts. Regarding temperature extremes, peak air temperatures during summer scenarios were significantly higher in low-rise, scattered, and low-shade areas. Conversely, the lowest temperatures were recorded in compact, high-rise areas with optimized canyon geometry.

To ensure scientific reliability and enhance credibility, the simulation results produced by ENVI-met were validated against field measurements conducted in selected neighbourhoods of Mashhad. This validation process involved installing digital thermometers and anemometers at multiple heights (1.5m and 10m) across six typologies of urban fabric types, collecting data on air temperature, relative humidity, and wind speed during peak hours. Comparing observed values with simulated outputs from ENVI-met for the corresponding dates and time intervals demonstrated a high correlation between ENVI-met outputs and actual field data, particularly concerning air temperature and shading patterns. Minor deviations were noted in wind speed and humidity, mainly due to local turbulence and urban obstructions that were not fully captured in the model. Nevertheless, the model's performance confirmed its suitability for simulating the microclimate of Mashhad. The findings suggested a compound interaction between urban morphology and microclimate, challenging the perception that mitigating the impacts of UHI was the exclusive function of green infrastructure. While vegetation is undoubtedly valuable, the ideal composition of urban form is also considered important, particularly in dense, dry cities where space for vegetation is limited. In the case of Mashhad, strategies such as increasing building density, optimizing canyon geometry, and aligning with prevailing winds were found to have considerable thermal benefits. However, no single approach was found to be universally effective. Highly compact layouts restricting airflow were shown to intensify nighttime heat stress, whereas dispersed layouts that promoted wind movement were unlikely to provide sufficient daytime shading. This finding necessitates the design of climatically responsive urban forms that can create a balanced synthesis between density and ventilation. Urban planning should no longer focus solely on visual aesthetics or land use but should also prioritize thermal performance in relation to prevailing and predicted climatic conditions.

The study provided evidence-based insights for municipal authorities and urban planning departments in Mashhad and similar cities in terms of climate and urban form. Specific policy recommendations included the establishment of form-based codes regulating height-to-width (H/W) ratios and building orientation, encouraging mixed-height developments with proper ventilation corridors, incorporating climate-responsive design guidelines in zoning and land development regulations, offering incentives for reducing reflective materials, using permeable surfaces in urban paving, and integration of microclimate simulation tools such as ENVI-met into pre-approval processes for new developments. These measures, when combined with green infrastructure and energy-efficient building design, were proven to significantly mitigate urban heat stress and improve urban sustainability.

Conclusions

The results of the research showed that, in July, high-rise and compact urban forms, characterized by relatively high height-to-width (H/W) ratios and low sky view factor (SVF), demonstrated the lowest potential air temperatures during peak heat hours. This was attributed to the increased shaded areas and reduced direct exposure to sunlight. In general, compact forms provided better thermal conditions across varying urban densities. However, due to the limited distribution of low-temperature zones within the compact high-rise context, scattered high-rise textures were identified as the second most effective in reducing temperature. This effectiveness was likely due to factors such as the cruciform layout of buildings, high H/W ratios, and low SVF values, all of which contributed to reduced thermal accumulation.

For municipal authorities and designers, the research suggested embedding microclimate simulation as a standard tool in urban development processes, developing form-based building codes that set minimum and maximum values for H/W ratios and sky view factor (SVF), prioritizing ventilation corridors aligned with prevailing winds, encouraging infill development that enhanced shading without disrupting airflow, and integrating small-scale green interventions (e.g., roof gardens, green walls, pocket parks) even in high-density neighbourhoods.

Author Contributions

Fatemeh Mirzaeian: Investigation (data collection), Formal Analysis, Software (modeling and simulation), Visualization (interpretation), Writing Manuscript.

Iman Ghalandarian: Conceptualization (research design), Supervision, Validation, Writing – Review & Editing.

Maryam Talaei: Methodology (research design), Software (validation), Supervision, Review & Editing.

All authors reviewed and approved the final manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



ارزیابی تاثیر فرم شهر بر جزایر حرارتی شهری: مطالعه تطبیقی محدوده های مسکونی مشهد، ایران

فاطمه میرزائیان^۱، ایمان قلندریان^۲✉، مریم طلایی^۳۱. گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: fa.mirzaeiyan@mail.um.ac.ir۲. نویسنده مسئول، گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، رایانامه: ghalandarian@um.ac.ir۳. گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، رایانامه: m.talaei@um.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: فرآیند توسعه شهرنشینی و گسترش شهرها باعث افزایش جذب انرژی حرارتی و افزایش دما شده و پدیده‌ای به نام «جزیره حرارتی شهری» را ایجاد می‌کند که تفاوت دمای قابل توجهی بین مناطق شهری با اطراف را نشان می‌دهد. هدف اصلی این مطالعه بررسی تاثیر ویژگی‌های مختلف فرم شهری، از جمله پیکربندی فضایی، ارتفاع ساختمان‌ها، جهت‌گیری معابر و هندسه کانیون شهری بر شرایط خرد اقلیم است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰	روش پژوهش: این پژوهش مبتنی بر روش تحقیق آمیخته شامل مرور نظام‌مند، طبقه‌بندی مورفولوژیکی و شبیه‌سازی محیطی انجام شد. با استفاده از تحلیل علم‌سنجی و بهره‌گیری از نرم‌افزار VOS viewer روندهای پژوهشی مرتبط با شکل شهری و آسایش حرارتی در بازه زمانی ۱۹۷۳ تا ۲۰۲۳ بررسی شد. سپس، شش نوع مختلف بافت شهری از مناطق مسکونی شهر مشهد انتخاب شدند که بر اساس پیکربندی فضایی (فشرده در برابر پراکنده) و دسته‌بندی ارتفاع ساختمان (کم/ارتفاع، میان‌ارتفاع، بلندمرتبه) طبقه‌بندی شدند. شرایط خرداقلیمی هر نوع بافت با استفاده از نرم‌افزار ENVI-met نسخه ۶/۵٫۱ برای سه تاریخ نماینده انقلاب تابستانی (۲۱ ژوئن)، انقلاب زمستانی (۲۱ دسامبر) و فصل معتدل (۱۵ آوریل)، و هر بار یک چرخه کامل ۲۴ ساعته شبیه‌سازی شد.
کلیدواژه‌ها: ENVI-met, آب و هوای سرد و خشک، جزیره حرارتی شهری، خرد اقلیم.	نتایج: نتایج نشان داد که فرم‌های شهری فشرده به طور کلی موجب کاهش دمای هوای روزانه به دلیل سایه‌اندازی بیشتر از ساختمان‌های متراکم و نسبت بالاتر H/W می‌شوند. با این حال، این فرم‌ها تهویه طبیعی را کاهش داده و خنک شدن شبانه را محدود می‌کنند. کانیون‌های شهری با SVF پایین، میزان تابش خورشید را در روز کاهش داده اما در شب حرارت را به دام انداخته و آسایش حرارتی کلی را پس از غروب کاهش می‌دهند. جهت‌گیری معابر به موازات جهت باد غالب، جریان هوا و خنک‌سازی را افزایش داده، در حالی که جهت‌گیری عمود بر باد مانع تهویه می‌شود. به‌طور خاص، برخی چیدمان‌های پراکنده بلندمرتبه به دلیل نفوذ بیشتر باد، به ویژه در آرایش‌های صلیبی شکل، مناطق خنک‌کننده‌ای را ایجاد نمودند.
	نتیجه‌گیری: این مطالعه اهمیت ادغام ملاحظات اقلیمی در طراحی فرم شهری را برجسته کرده و نشان داد که تعادل بهینه بین تراکم ساختمان‌ها، هندسه کانیون‌های شهری و جهت‌گیری با جریان باد می‌تواند به طور مؤثری اثرات جزیره حرارتی را در اقلیم سرد و نیمه‌خشک کاهش دهد. این یافته‌ها توصیه‌هایی مبتنی بر شواهد برای برنامه‌ریزان شهری و سیاست‌گذاران فراهم می‌کند تا آسایش حرارتی و پایداری را در مناطق شهری در حال توسعه ارتقاء دهند.
استناد: میرزائیان، فاطمه؛ قلندریان، ایمان. و طلایی، مریم (۱۴۰۴). ارزیابی تاثیر فرم شهر بر جزایر حرارتی شهری: مطالعه تطبیقی محدوده‌های مسکونی مشهد، ایران. نشریه محیط‌شناسی، ۵۱(۱)، ۹۷-۱۱۹. http://doi.org/10.22059/jes.2025.378604.1008514	
ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.



۱. مقدمه

امروزه بر اساس حوادث اقلیمی فراوان نظیر سیل، خشکسالی و ... ثابت شده است که تغییرات آب و هوایی زیادی در کره زمین، اتفاق افتاده و مداخله بشر در طبیعت باعث تسریع این تغییرات شده است (Mostofi et al., 2020). یکی از مهمترین مشکلات جهانی، که بر اساس شواهد بسیار بر اثر فعالیت‌های انسانی ایجاد شده است، پدیده تغییر اقلیم و گرمایش جهانی می‌باشد (Jain et al., 2020).

از طرفی رشد مستمر جمعیت و شهرنشینی به نحوی است که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، ۲/۵ میلیارد نفر به جمعیت شهری جهان اضافه شود که احتمال می‌رود حدود ۹۵ درصد از گسترش شهرها در سال‌های آینده در کشورهای در حال توسعه رخ دهد (Akbari & Kolokotsa, 2016). رشد سریع جمعیت و گسترش شهرها، به رشد شتابان شهرنشینی و تسریع عملیات ساختمانی منجر شده است. با ادامه این روند، شهرها با افزایش تراکم محیط ساخته شده در حال گسترش هستند. تسریع عملیات ساختمانی و توسعه شهرها منجر به جایگزینی مقدار زیادی از پوشش طبیعی زمین با ساختمان‌ها و سطوح غیرقابل نفوذ می‌شود که دلیل افزایش جذب انرژی حرارتی بوده و منجر به تغییرات اقلیمی می‌گردد. یکی از مهمترین پدیده‌های ناشی از تغییرات دمایی در محیط ساخته شده «جزیره حرارتی شهری» است که بیانگر اختلاف دمای معنادار میان مناطق شهری و مناطق روستایی اطراف آن است.

عوامل متعددی منجر به ایجاد جزیره حرارتی شهری می‌شود. برخی از این عوامل مانند عوامل اقلیمی، تحت کنترل و دخالت انسان‌ها نبوده و وابسته به شرایط آب و هوایی می‌باشند مانند: سرعت و جهت باد، رطوبت خاک و هوا، پوشش ابری، تابش خورشید، تغییرات فصلی، عرض جغرافیایی، توپوگرافی زمین و نزدیکی به رودخانه و دریا. گروه دیگر عوامل کنترل‌پذیر، شهرسازانه و ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند کاربری زمین، اندازه و جمعیت شهر، حمل‌ونقل، سطوح نفوذناپذیر و فرم و هندسه شهری است (Rezwan et al., 2008). فرم شهری با متغیرهایی مانند عرض و جهت‌گیری خیابان‌ها، فرم پراکنده و فشرده، ارتفاع ساختمان‌ها و دید به آسمان از عوامل قابل کنترل بر تغییرات دما است؛ تأثیرات فرم شهری بر تغییر تعادل انرژی و جریان باد این عامل را به یکی از مهمترین عوامل شکل‌گیری پدیده مذکور تبدیل کرده است. ملاحظات طراحی شهری نظیر نوع چیدمان ساختمان‌ها، ارتفاع ابنیه و سایر عوامل مرتبط با فرم شهری می‌تواند در جهت تقلیل آثار مخرب جزایر حرارتی تأثیرگذار باشند. به علت افزایش فعالیت‌ها و بالابودن نرخ جمعیت تشکیل این جزایر در کلان شهرها و شهرهای بزرگ، نسبت به سایر شهرها از احتمال بالاتری برخوردار است (ترابی و همکاران، ۱۳۹۹).

کلان شهر مشهد به عنوان پایتخت معنوی ایران که یکی از مراکز مهم توریستی و جمعیتی ایران به شمار می‌آید در طول چند دهه اخیر رشد شهری و جمعیتی سریعی داشته است (محمودزاده و همکاران، ۱۳۹۷). بر اساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ این شهر با ۳۰۰۱۱۸۴ نفر جمعیت، دومین شهر پرجمعیت ایران پس از تهران است (مرکز آمار ایران). مشکلات جزیره حرارتی شهری می‌تواند در کلان شهر مشهد با افزایش جمعیت و روند شهری شدن، بیشتر و بیشتر معنی‌دار شده و بر توسعه شهر مشهد و محیط‌زیست زندگی ساکنان تأثیرگذار باشد. افزایش جمعیت و تراکم آن در شهر مشهد و به دنبال آن افزایش میزان آلودگی هوا، از عوامل اثرگذار بر شکل‌گیری جزایر حرارتی است؛ آن چنان که آروین و همکاران (۱۳۹۶) نشان داده‌اند قبل و بعد از سال ۱۳۶۰ دمای متوسط شهر مشهد بر اثر تشکیل جزیره حرارتی ۱/۶ درجه افزایش داشته است و ارتباط خطی بین لگاریتم جمعیت و دمای هوای شهر مشهد وجود دارد.

در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی به بررسی وضعیت جزایر حرارتی شهری مشهد پرداخته‌اند. مانند پژوهش زندی و همکاران (۱۳۹۸) و محمودزاده و همکاران (۱۳۹۷) که به بررسی نقش تغییرات کاربری اراضی بر جزایر حرارتی شهری مشهد پرداخته است، بندان و همکاران (۱۴۰۰) بررسی و تفکیک جزیره حرارتی مشهد را مورد تحقیق قرار داده‌اند، در این میان، مسأله ارتباط فرم شهری و جزیره حرارتی در مشهد کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. اهمیت موضوع جزایر حرارتی شهری با نگاهی اجمالی به پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر قابل توجه است. روند صعودی و رشد مثبت تعداد پژوهش‌های صورت گرفته از سال ۲۰۰۰ تا کنون بیانگر اهمیت و وسعت این پدیده و همچنین دغدغه مشترک جهانی در رابطه با این مسأله است. لذا آن چه بر ضرورت انجام این مقاله تأکید دارد خلا مطالعاتی پیرامون درک اهمیت جزایر حرارتی و ارتباط معنادار فرم شهری و جزایر حرارتی در اقلیم سرد و خشک مشهد است. این مقاله در نظر دارد با نگاهی جدید از منظر طراحی شهری به موضوع جزایر حرارتی بپردازد و با مطالعه تطبیقی، تأثیر شاخص‌های فرم شهری بر جزایر حرارتی

در منطقه سرد و خشک مشهد را بررسی کند. در انتها با استفاده از شبیه‌سازی‌های ENVI-met نسبت به ارزیابی تأثیر عوامل فرم شهری بر پتانسیل دمای هوا اقدام نماید. نتایج حاصل از این مقاله می‌تواند به طراحان و مدیران شهری برای ارائه پیشنهادات مرتبط با شاخص‌های فرم شهری اثرگذار بر جزایر حرارتی کمک کند و همانند راهنما برای توسعه‌های آتی به حساب آید.

افزایش دما در داخل شهرها مشکلی است که همه جنبه‌های زندگی شهری را تحت تأثیر قرار می‌دهد و نادیده گرفتن آن می‌تواند عواقب جبران‌ناپذیری به همراه داشته باشد. اکثر کشورهای خاورمیانه با مسائل زیست‌محیطی مرتبط با اثر جزیره حرارتی شهری، انتشار گرما و آلودگی هوا مواجه هستند که می‌تواند منجر به مشکلات سلامت انسان شود (Elkhazindar et al., 2022). این مشکل در شهرها و کلان‌شهرهایی با جمعیت زیاد و فعالیت‌های اقتصادی گسترده مشهودتر است. بنابراین در شرایطی که مصرف انرژی همچنان در حال افزایش است و مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای همچنان تغییرات آب و هوایی را تشدید می‌کنند، حرکت در جهت کاهش اثر جزایر حرارتی شهری می‌تواند به شهرها کمک کند تا با اثرات آتی گرمایش جهانی سازگار شوند. در کشورهایی نظیر ایران که تحت تأثیر این تغییرات قرار گرفته، منابع آب کاهش یافته و دمای هوا افزایش یافته است، نیاز به طراحی مجدد فرم‌های شهری و برنامه‌ریزی مجدد مناظر شهری برای دستیابی به فرم مطلوب شهری جهت مواجهه با مخاطرات اقلیمی آینده احساس می‌شود. در این مسیر طراحی شهری به عنوان دانشی پاسخگو می‌تواند با در نظر گرفتن متغیرها و عوامل موثر بر جزایر حرارتی شهری به بررسی بازتاب تأثیر توسعه شهری و جزیره حرارتی شهری بپردازد. بنابراین بررسی تأثیرات فرم شهری در جهت نیل به کاهش جزایر حرارتی در اقلیم سرد و خشک امری لازم است.

۲. پیشینه پژوهش

۲-۱. فرم شهری و شاخص‌های فرمی اثرگذار بر جزایر حرارتی شهری

مطالعه بر روی فرم شهری به عنوان یکی از عناصر اصلی تشکیل‌دهنده ساختار شهرها، هسته اصلی بسیاری از مطالعات در زمینه طراحی شهری است. معمولاً در تعاریف مرتبط، فرم و شکل شهر به یک معنی به کار برده شده‌اند، اما تفاوت میان این دو واژه را می‌توان این گونه بیان نمود؛ شکل هر جسم عبارت از خطوط پیرامون سطح آن جسم است، در حالی که فرم جنبه سه بعدی جسم است (پورجعفر و رفیعیان، ۱۴۰۰). در ادبیات طراحی شهری، فرم را می‌توان مترادف کالبد شهر دانست (زاهدی یگانه و همکاران، ۱۳۹۷) و به بیان دیگر فرم شهری ویژگی‌های فیزیکی مناطق ساخته شده را تشکیل می‌دهد، از جمله شکل، اندازه، تراکم و پیکربندی سکونتگاه‌ها. فرم شهری عامل اساسی در تعریف سکونتگاه‌های انسانی است. سمینار بین‌المللی فرم شهری^۱ به سه اصل مهم در خصوص فرم شهری اشاره می‌کند:

- فرم شهری از سه عنصر فیزیکی اساسی شامل ساختمان، فضای باز و خیابان تشکیل شده است.
 - فرم شهری در مقیاس‌هایی نظیر ساختمان/قطعه، خیابان، بلوک، شهر و منطقه قابل بررسی است.
 - با توجه به تغییرات عناصر تشکیل‌دهنده فرم شهری در طول زمان، فرم شهری صرفاً با نگاه تاریخی قابل درک است (Moudon, 1997).
- پژوهش حاضر با توجه به اصل اول و تحلیل مطالعات انجام شده در زمینه فرم شهری مطابق شکل ۱ مولفه‌های فیزیکی فرم شهری را در سه عنصر ساختمان، فضای باز و معبر تقسیم‌بندی نموده است، سپس شاخص‌های مربوط به هر مولفه را به شکل بلوک، اندازه، ارتفاع و تراکم ساختمان، شکل ساختمان، هندسه خیابان‌ها، جهت‌گیری و چیدمان فضایی آن‌ها تقسیم نموده است که می‌توان برای مطالعات مورفولوژیکی شهری، فرم شهر را به عنوان متغیرهایی تعریف کرد که بر دمای محیط تأثیر می‌گذارند مانند نسبت ارتفاع به عرض و فاکتور نمایی آسمان^۲ (SVF) (Abdi et al., 2023). در ادامه به توصیف شاخص‌ها پرداخته شده است.
- تراکم ساختمانی: این شاخص، نسبت سطح زیر بنای ساختمان به مساحت قطعه زمین است که با مفاهیمی نظیر سطح زمین، سطح

1. ISUF

2. Sky view factor

اشغال ساختمان و سطح زیر بنا ارتباط دارد (نیک‌پور و همکاران، ۱۴۰۱). به نوعی می‌توان تراکم را مفهومی چندبعدی و پیچیده معرفی نمود که اثر تعیین‌کننده‌ای بر تمامی ابعاد شهر از جمله اقتصادی، اجتماعی، کالبدی و سیاسی دارد و به عنوان یکی از مهمترین عناصر فرم شهری شمرده می‌شود.

ارتفاع و تعداد طبقات ساختمان: تهویه محیط بسیار تحت تاثیر عناصر فرم شهری از جمله ارتفاع ساختمان‌ها است (Wang et al., 2021) در این مقاله مطابق با مبحث ۴ مقررات ملی ساختمان، ساختمان‌های مورد بررسی از نظر ارتفاعی به سه گروه بلندمرتبه (بیش از ۷ طبقه)، میان‌مرتبه (چهار تا هفت طبقه) و کوتاه‌مرتبه (یک تا سه طبقه) دسته‌بندی شده‌اند.

عرض معبر و کانیون شهری $(H/W)^1$: نسبت ارتفاع به عرض خیابان که با عنوان درجه محصوریت، کانیون (دره) شهری، هندسه خیابان و هندسه شهر شناخته می‌شود یک متغیر بسیار پرکاربرد در مطالعات اقلیم شهری است (Liao et al., 2021) او که^۲ از اولین محققین برجسته در زمینه بررسی ارتباط پارامترهای هندسی و شدت جزایر حرارتی است.

جهت خیابان و فاکتور نمایی آسمان: فاکتور نمایی آسمان به دو طریق می‌تواند دمای سطح زمین و تهویه و به طور خاص تابش خورشید ورودی را تنظیم کند. از یک طرف فاکتور نمایی آسمان بیشتر، که نمایانگر آسمان باز قابل مشاهده‌تر است، می‌تواند به افزایش گردش هوا و سرعت باد در یک محیط متراکم کمک کند و در نتیجه دما را کاهش دهد. از طرف دیگر فاکتور نمایی آسمان کمتر می‌تواند تابش خورشیدی ورودی را برای نفوذ به سطح کاهش دهد و بنابراین به کاهش دمای سطح زمین کمک کند (Huang & Wang, 2019).

۳. روش شناسی پژوهش

۳-۱. منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد در موقعیت جغرافیایی با عرض $36^{\circ} 17' 45''$ شمالی و طول $59^{\circ} 36' 43''$ شرقی واقع شده است (بندار و همکاران، ۱۳۹۹). این شهر در شمال شرق ایران و در حوزه آبریز کشف‌رود، بین رشته کوه‌های بینالود و هزار مسجد قرار دارد. شهر مشهد دارای آب و هوای متغیر و متمایل به سرد و خشک و نیمه‌خشک است که براساس طبقه‌بندی یونسکو در گروه اقلیم سرد و نیمه خشک (BSK) قرار دارد (کامیابی، ۱۳۹۵). این شهر با جمعیتی بیش از سه میلیون نفر و مساحت ۳۲۷ کیلومتر مربع دومین کلان شهر ایران می‌باشد. امروزه تراکم بالای جمعیتی و توسعه فیزیکی سریع شهر، باعث کاهش چشم‌انداز طبیعی و تفاوت دمایی در منطقه شده است (دلبسته و همکاران، ۱۳۹۷). از طرفی کاهش سطح کیفیت هوا و افزایش میزان آلودگی نیز از پیامدهای این تراکم جمعیتی و ساخت‌وسازهای متعدد است. بر اساس گزارش‌های مرکز پایش آلاینده‌های محیط‌زیست مشهد در سال ۱۳۹۴ تنها ۴۲ روز هوای مشهد در وضعیت پاک و مطلوب قرار داشته است (اسماعیلی، ۱۳۹۷).

جزیره حرارتی شهری معلول افزایش جمعیت و تراکم آن در شهرها و به دنبال آن افزایش میزان آلودگی هوا است (Peterson & Owen, 2005). نتایج پژوهش زندی و همکاران (۱۳۹۸) نشان می‌دهد که در سال ۱۹۹۸ بیشینه دمایی در مشهد بین ۴۸-۴۲ درجه سانتی‌گراد بوده و همین دما در سال ۲۰۱۶ بین ۵۲-۴۶ درجه سانتی‌گراد رسیده است که با توجه به رشد و گسترش کالبدی شهر می‌توان پیش‌بینی نمود که اگر همین روند ادامه پیدا کند، تعداد و دمای جزایر حرارتی شهر افزایش خواهد یافت. این افزایش دمای سطحی شهر مشهد و گرم شدن شهر، تاثیرات منفی بر محیط‌زیست طبیعی، کاهش فعالیت اقتصادی دارد و افزایش مصرف آب و انرژی را موجب می‌شود. بنابراین ضروری است در جهت مدیریت بحران این پدیده اقداماتی در صدد کاهش شدت جزایر حرارتی شهری انجام شود.

۳-۲. روش پژوهش

پژوهش حاضر با ملاحظات روش‌شناسی کمی- کیفی و از نوع توصیفی- تحلیلی صورت گرفته که با توجه به نوع هدف کاربردی و به

۱. نسبت ارتفاع به عرض

لحاظ ماهیت به شیوه شبیه‌سازی نرم‌افزاری انجام شده است. مراحل پژوهش در شکل شماره ۱ به نمایش گذاشته شده‌اند. در مرحله اول طی مروری جامع بر ادبیات موضوع جهت بررسی مفهوم جزایر حرارتی شهری، از شیوه علم‌سنجی با استفاده از نرم‌افزار وی‌یواس و ویر^۱ مقالات از سال ۱۹۷۳ تا ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفتند. سپس پس از استخراج عوامل موثر بر جزیره حرارتی شهری به دلیل اهمیت و تاثیر مستقیم سیاست‌های طراحی شهری بر فرم شهری، این مولفه به عنوان شاخص موردنظر پژوهش انتخاب گردید. لذا مفهوم فرم شهری مجدد با استفاده از شیوه علم‌سنجی به طور خاص مورد توجه قرار گرفت و مقالات از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ مورد بررسی واقع شدند. نتایج حاصل از این بررسی منتج به استخراج شاخص‌های فرمی اثرگذار بر جزایر حرارتی شهری گردید.

در مرحله سوم، جهت بررسی نحوه اثرگذاری شاخص‌های فرمی بر جزیره حرارتی شهری، مناطقی از بافت شهری انتخاب شدند. این انتخاب مستلزم دسته‌بندی مناطق شهری بر اساس مولفه‌های فرمی اثرگذار بر جزایر حرارتی شهری بود. لذا بافت شهری بر اساس شاخص چیدمان ساختمان‌ها به دو گونه پراکنده و فشرده تقسیم شد. سپس بر اساس شاخص ارتفاعی به سه زیر گروه کوتاه‌مرتبه، میان‌مرتبه و بلندمرتبه دسته‌بندی شدند. در نتیجه بر اساس این گروه‌بندی شش نوع بافت شهری با کاربری مسکونی انتخاب گردید. سپس مطابق شکل ۱ برای تحلیل جزایر حرارتی مناطق شهری از نرم‌افزار ENVI-met ۱/۶، ۵ استفاده شد. در ابتدا مدلسازی شش بافت شهری منتخب در نرم‌افزار انجام شد و سپس داده‌های اقلیمی با فرمت EPW برای نرم‌افزار تعریف شدند. در انتها شبیه‌سازی برای ۲۴ ساعت در سه تاریخ ۳۰ آذر (انقلاب زمستانی)، ۳۱ خرداد (انقلاب تابستانی) و ۲۶ فروردین ۱۴۰۰ صورت گرفت.

۳-۲-۱. روش شبیه‌سازی

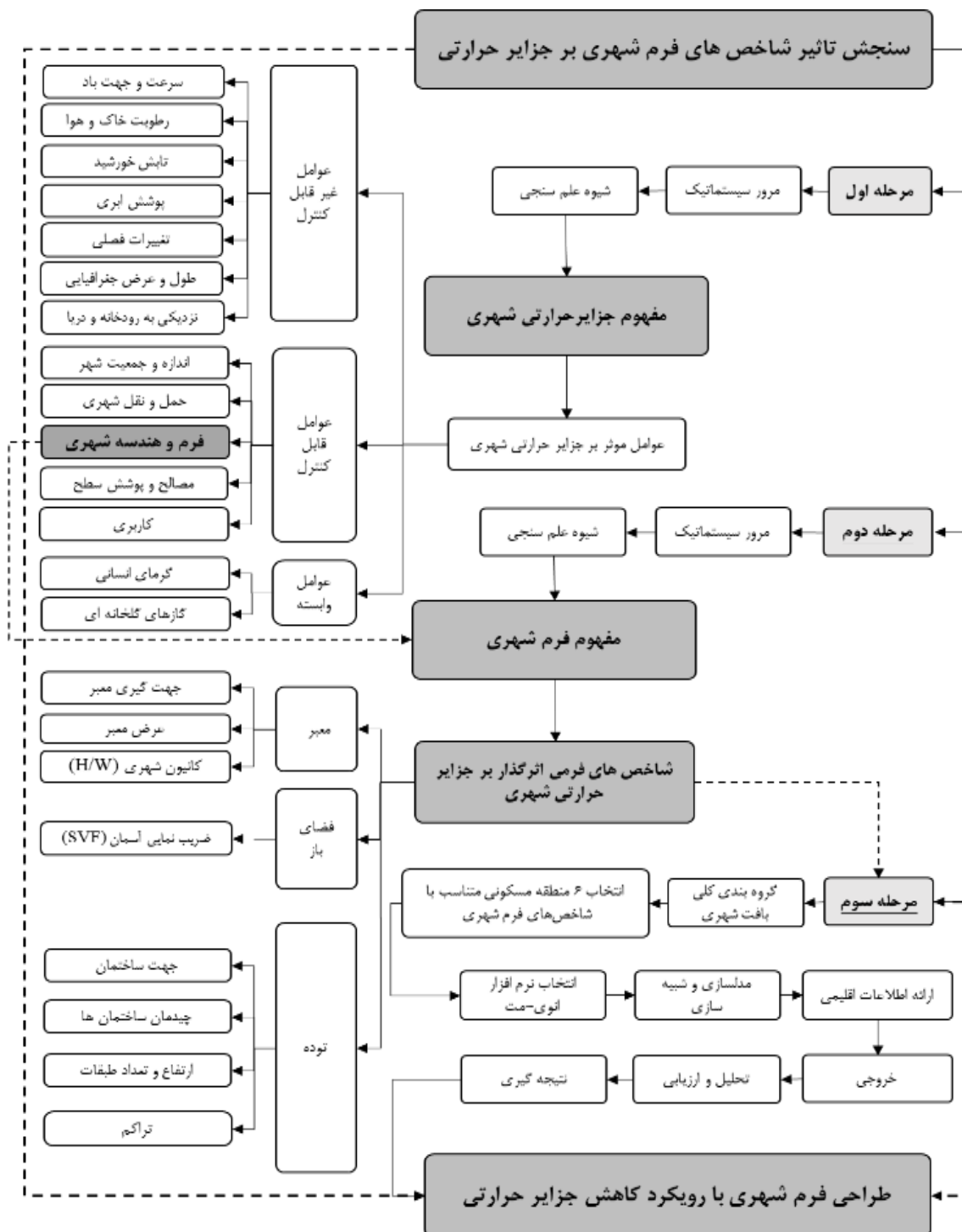
فرم‌های شهری از شش سایت منتخب، از طریق شبیه‌سازی‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. شبیه‌سازی رفتارهای حرارتی برای ۲۴ ساعت در سه روز ارزیابی شدند. قبل از آغاز فرآیند شبیه‌سازی لازم بود که عوامل ثابت، مستقل و وابسته در پژوهش تعیین شوند (جدول ۱). پارامترهای ورودی مانند داده‌های آب و هوا، مدلسازی جهت‌گیری بلوک‌ها و مشخصات ساختمان (مساحت، ارتفاع، تراکم) در جدول ۱ نشان داده شده است. عوامل وابسته و آنچه به عنوان خروجی در این مقاله مورد توجه است پتانسیل دمای هوا و سرعت وزش باد است.

جدول ۱. عوامل ثابت، مستقل و وابسته در شبیه‌سازی (منبع: نگارندگان)

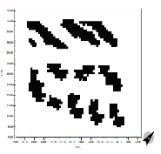
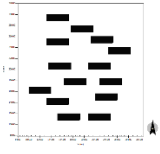
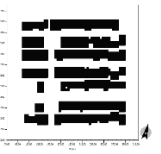
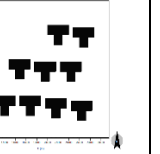
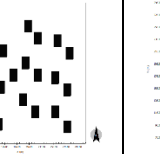
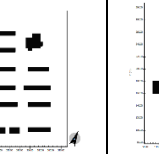
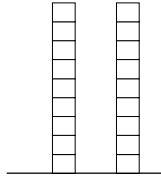
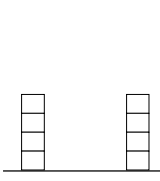
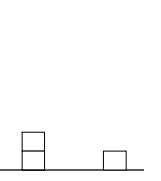
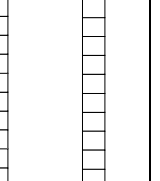
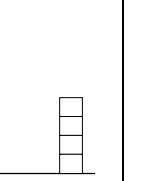
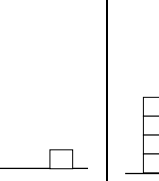
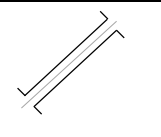
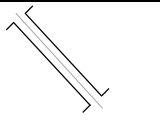
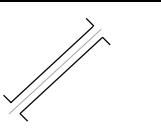
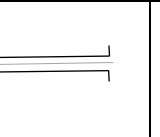
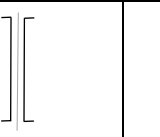
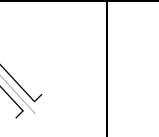
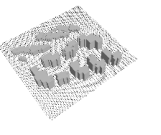
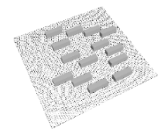
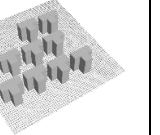
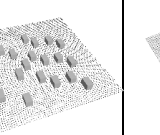
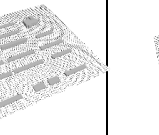
عوامل پژوهش	
عوامل ثابت	❖ زمان‌بندی، داده‌های اقلیمی (دمای هوا، سرعت و جهت باد)
عوامل مستقل	❖ جهت‌گیری فرم شهری - فرم ساختمان - هندسه خیابان ❖ هندسه و عرض معابر و کوچه‌ها - تراکم شهری
عوامل وابسته	❖ دمای هوا ❖ سرعت و جهت باد، رطوبت

پس از تعریف عوامل ثابت، مستقل و وابسته و داده‌های اقلیمی برای شبیه‌سازی، جهت امکان مقایسه نتایج، یک مقیاس مشترک به عنوان مساحت سطوح ساخته شده تعیین شد. بنابراین با توجه به تراکم‌های متفاوت سایت‌های منتخب شهری، اندازه یکسان معادل ۲۴۰×۲۴۰ مترمربع که معادل ۴۸۰۰۰۰ مترمربع است در نظر گرفته شد. شکل ۲ به طور خلاصه مشخصات وضعیت موجود شش سایت شهری به همراه تراکم آن‌ها را نشان می‌دهد. جهت‌گیری معابر بر اساس جاده‌ها و مسیر اصلی به طور نسبی تعیین شده است. شش منطقه مسکونی از نقاط مختلف شهر مشهد مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس مشخصات فرم شهری مدنظر به شکل متنوع انتخاب شدند. از آنجا که در این مقاله برخی از فاکتورهای کالبدی فرم شهری مطالعه شده است (شکل ۲)، لذا جهت تشخیص نتایج حاصل از این عوامل و عدم دخالت دیگر موارد تاثیرگذار بر جزایر حرارتی شهری، شاخص کاربری به صورت یکسان، کاربری مسکونی در تمام

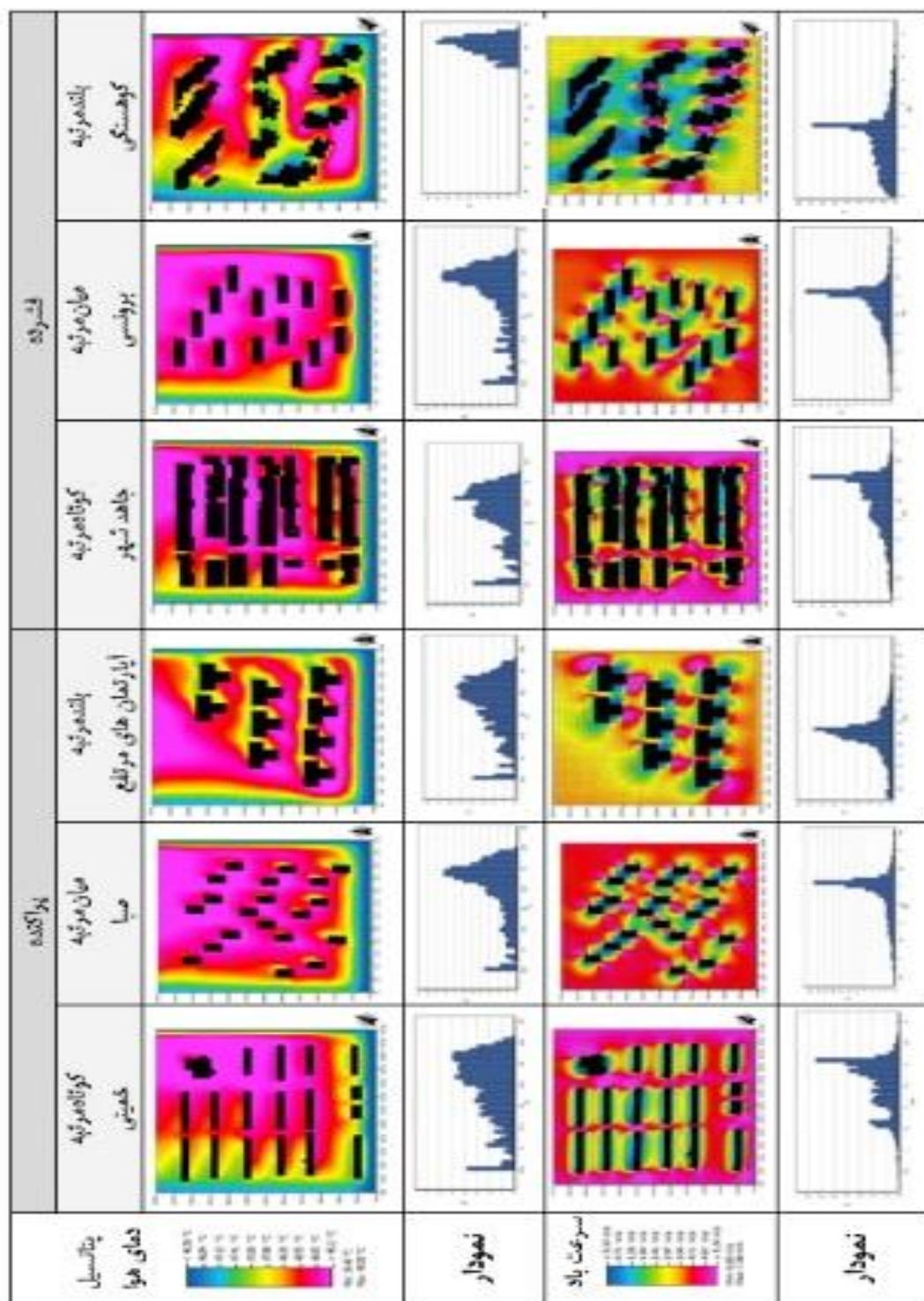
مناطق در نظر گرفته شد. جهت سنجش شاخص ارتفاع، ارتفاع هر طبقه به طور میانگین ۳/۴ متر در نظر گرفته شد.



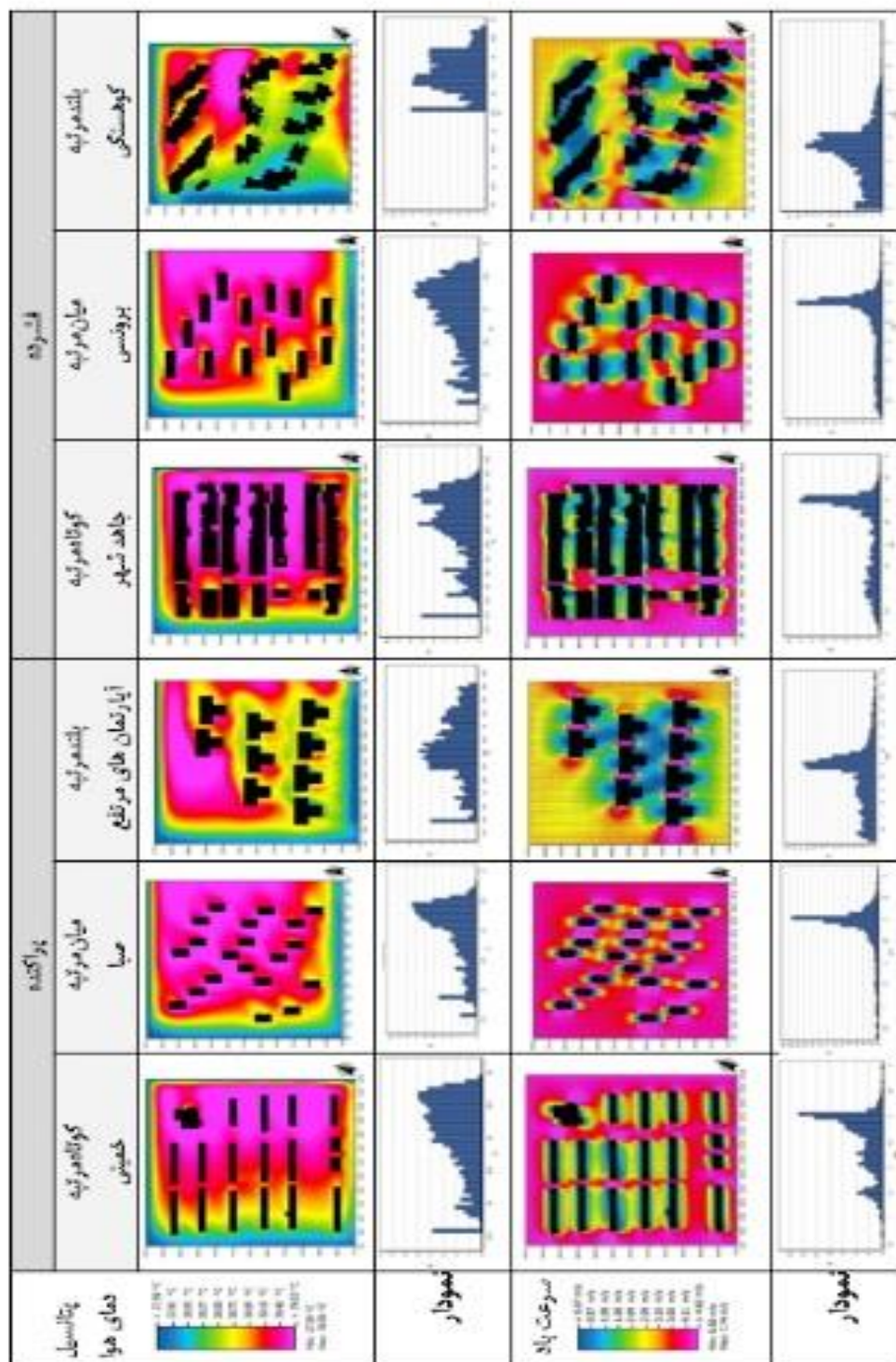
شکل ۱. مدل مفهومی پژوهش (منبع: نگارندگان)

منطقه ساخته شده	فشرده			پراکنده		
	بلندمرتبه	میان مرتبه	کوتاه مرتبه	بلندمرتبه	میان مرتبه	کوتاه مرتبه
	کوهسنگی	برونسی	جاهد شهر	آپارتمان های مرتفع	صبا	خمینی
						
تصاویر						
مساحت (m ²)	240*240= 480,000 m ²	240*240= 480,000 m ²	240*240= 480,000 m ²	240*240= 480,000 m ²	240*240= 480,000 m ²	240*240= 480,000 m ²
تراکم	m ² /مساحت زیربنا =m ² مساحت زمین ۲/۱۷	m ² /مساحت زیربنا =m ² مساحت زمین ۰/۶	m ² /مساحت زیربنا =m ² مساحت زمین ۰/۸	m ² /مساحت زیربنا =m ² مساحت زمین ۱/۳۴	m ² /مساحت زیربنا =m ² مساحت زمین ۰/۳۸	m ² /مساحت زیربنا =m ² مساحت زمین ۰/۲۷
ارتفاع (m)	۳/۴-۳۰/۶	۱۳/۶	۶/۸ - ۳/۴	34	۱۳/۶	۶/۸ - ۳/۴
کانون شهری						
	۲/۵۵H/W=	۰/۴۱H/W=	۰/۴۲H/W=	H/W=2	۰/۴۵H/W=	۰/۲۴H/W=
جهت معابر						
	NE-SW	NW-SE	NE-SW	E-W	N-S	NW-SE
سه بعدی						

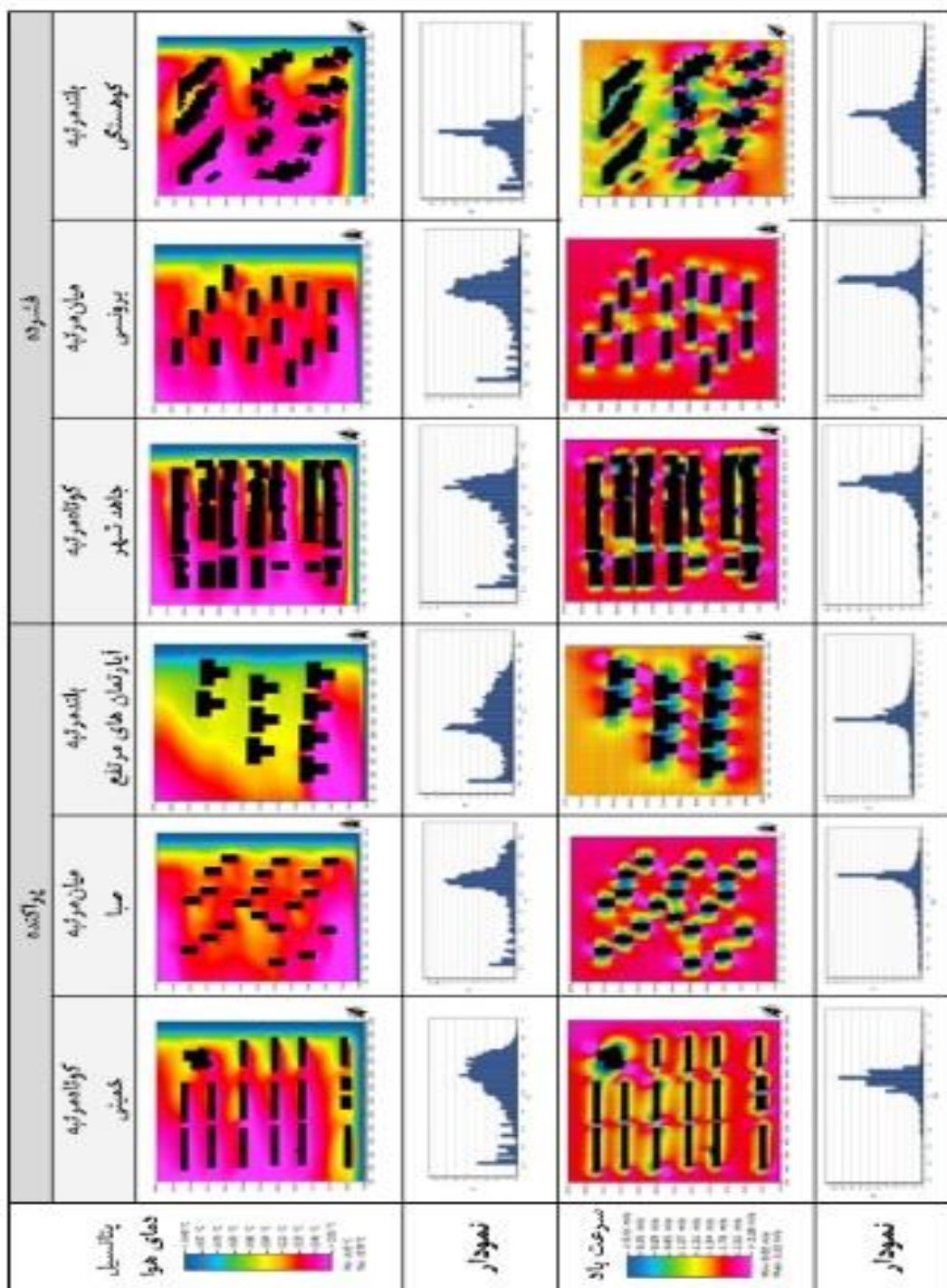
شکل ۲. مشخصات سایت های شهری (منبع: یافته های تحقیق و تصاویر تولید شده توسط ENVI-met)



شکل ۳. دمای هوا و توزیع باد برای شش سایت در تاریخ ۳۱ خرداد (منبع: تصاویر تولید شده توسط (ENVI-met)



شکل ۴. دمای هوا و توزیع باد برای شش سایت در تاریخ ۳۰ آذر (منبع: تصاویر تولید شده توسط (ENVI-met))



شکل ۵. دمای هوا و توزیع باد برای شش سایت در تاریخ ۲۶ فروردین (منبع: تصاویر تولید شده توسط (ENVI-met)

۴. یافته‌های پژوهش

پس از انجام تمامی شبیه‌سازی‌ها داده‌های مورد نیاز با استفاده از نقشه‌های شبیه‌سازی استخراج شدند. داده‌های جمع‌آوری شده در سطح صفحه برش $k=2$ در نرم‌افزار برابر با ۲ متر است. بالاترین دمای هوا و بیشترین اختلاف دما، اوایل صبح و اواخر عصر ثبت شده است. از این‌رو، تجزیه و تحلیل بر روی این دوره متمرکز شد که اثر جزیره حرارتی در اوج خود قرار دارد. ساعت ۱۴:۰۰ برای مناطق مسکونی

جهت تحلیل نتایج شبیه سازی در نظر گرفته شده است. لذا، تمام سناریوها با تصاویری که نشان دهنده سرعت و جهت باد و رفتار دمای هوا در ساعت اوج گرما ۱۴:۰۰ پردازش شده اند. نتایج برای سرعت و جهت باد و رفتار دمای هوا در ساعت اوج به شرح زیر است و در ادامه به بررسی شاخص ها در مناطق شبیه سازی شده پرداخته شده است.

به طور کلی نتایج حاکی از استخراج نمودارها بیانگر آن است که شش پیکربندی شهری رفتار بسیار نزدیکی نسبت به یکدیگر دارند با اندکی تفاوت نتایج نشان می دهد که در میان شش منطقه مورد بررسی، بافت بلندمرتبه و فشرده با بالاترین میزان تراکم ساختمانی، از کمترین درجه دمایی برخوردار است.

۵. بحث

۵-۱. بلندمرتبه و پراکنده

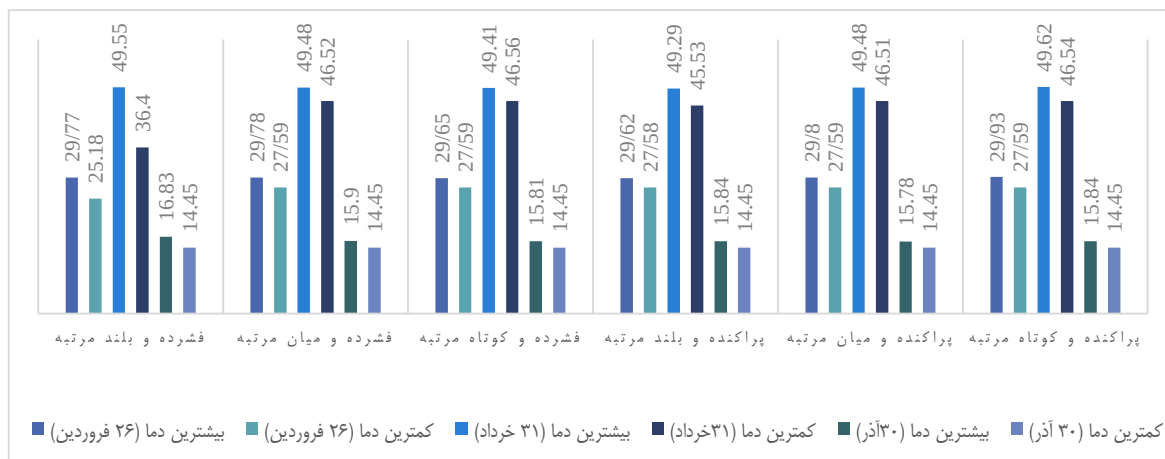
نتایج شبیه سازی ها در شکل های ۳، ۴ و ۵ حاکی از آن است که منطقه آپارتمان های مرتفع به عنوان یکی از قدیمی ترین مناطق بلندمرتبه مسکونی در مشهد، وسعت بیشتری از دمای پایین را نشان داد. بالاترین میزان سرعت باد برای این منطقه ۷/۲۳ متر بر ثانیه در آذرماه ثبت شده است، این بیشینه سرعت باد، در نزدیکی بلوک ها و لبه ها قابل مشاهده است. شرایط پتانسیل دمایی و سرعت باد مشاهده شده می تواند به دلیل عوامل فرمی زیر باشد:

- کانیون شهری: به طور کلی دمای هوا در مناطقی که نسبت ارتفاع به عرض بالاتری دارند، کمتر ثبت شده است. در منطقه بلندمرتبه و پراکنده نیز مطابق شکل ۲ نسبت ارتفاع به عرض معادل ۲ است. این نسبت به علت برهم کنش ارتفاع زیاد و فاصله بلوک ها نسبت به یکدیگر در برخی نقاط حاصل شده است که مطابق شکل ۳ در قسمت هایی که معبر در مجاورت دو بلوک مسکونی قرار گرفته و عرض کمتری دارد میزان پتانسیل دمایی پایین تر است. از طرفی سرعت حرکت باد نیز در این نقاط پایین تر است. این محدودیت در حرکت باد می تواند به علت شکل گیری راهروهایی با عرض کم و جداره های بلند حاصل از قرارگیری بلوک های مسکونی باشد.
- فاکتور نمایی آسمان: مطابق شکل ۸ میانگین فاکتور نمایی آسمان برای این منطقه ۰/۵۸ می باشد. با توجه به فرم بلوک ها، در میان شکاف ها و فاصله بین دو بلوک میزان فاکتور نمایی آسمان در کمترین حالت خود قرار دارد.
- فرم ساختمان: فرم ساختمان در این منطقه به شیوه صلیبی شکل در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۳ در نقشه دمایی بلندمرتبه و پراکنده در نزدیکی بلوک ها تفاوت درجه پتانسیل دمایی قابل مشاهده است، لذا این فرم می تواند در هدایت و کنترل حرکت باد در نتیجه پتانسیل دمایی موثر باشد.
- تراکم: میزان تراکم در این منطقه مطابق شکل ۲، ۱/۳۴ است که در مقایسه با سایر مناطق از میزان نسبتا بالاتری برخوردار است. مطابق شکل ۷ تراکم ساختمانی در مناطق با میانگین پتانسیل دمایی ارتباط مستقیم دارد.
- جهت گیری: فرم صلیبی بلوک ها به شکل گیری دو محور شمالی جنوبی و شرقی غربی در بلوک منجر شده است این دو محور جهت گیری ساختمان را در دو راستا به ترتیبی قرار داده است که بر حرکت باد تاثیر گذار بوده و در نقاطی که بر اثر تلاقی این دو محور شکل گرفته و شکاف هایی را ایجاد کرده است، کمترین میزان باد مشاهده می شود.

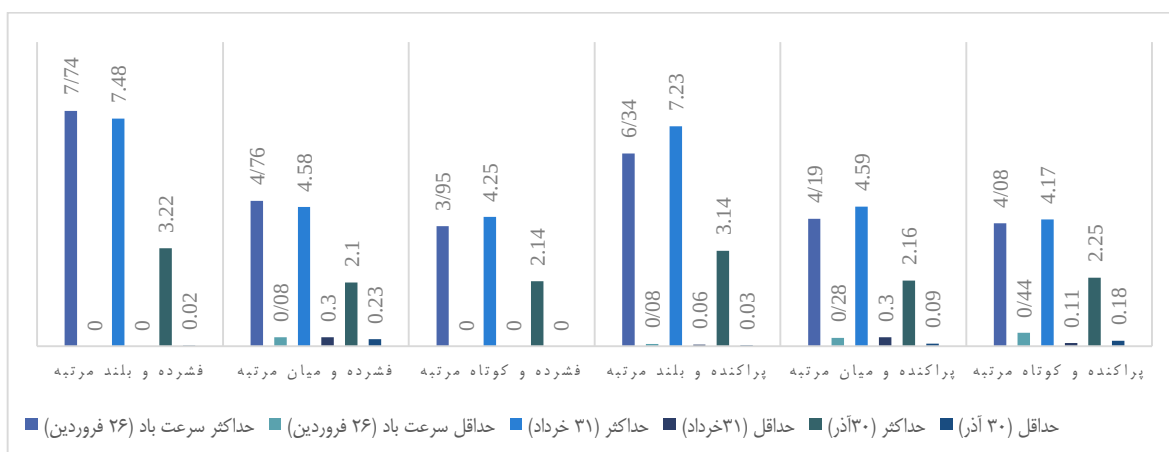
۵-۲. میان مرتبه و پراکنده

- بافت میان مرتبه در هر دو گونه پراکنده و فشرده مطابق شکل های ۳، ۴ و ۵ در فصول مختلف شرایط پتانسیل دمایی و سرعت باد بسیار نزدیکی داشتند. عوامل فرمی موثر در ادامه به شرح زیر بررسی شده اند:
- کانیون شهری: این نسبت در بافت میان مرتبه و پراکنده ۰/۴۵ است که حاکی از تعداد بالای سطوح در معرض نور خورشید است، نتایج بیانگر اهمیت تاثیرگذاری بحث سایه اندازی و نحوه سازماندهی فرم شهری، بر دمای هوا است. با توجه به وسعت فضای باز و میان مرتبه سازی، پایین بودن نسبت ارتفاع به عرض در این منطقه بیانگر کمبود میزان سایه اندازی است.

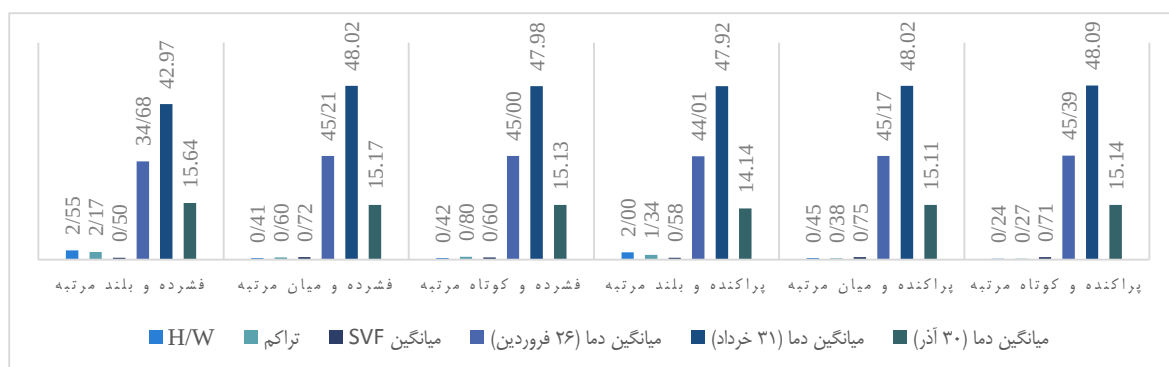
– فرم ساختمان: در شکل شماره ۳ نحوه پیکربندی این منطقه مسکونی نمایانگر میزان پراکندگی و عدم پیوستگی بلوک‌های مسکونی است. آپارتمان‌های منفصل و جدا از هم به علت پراکندگی و عدم پیوستگی، باعث ازدیاد تعداد سطوح در معرض تابش خورشیدی و در نتیجه افزایش گرمای آزاد شده توسط سطوح می‌گردند که بر پتانسیل دمای هوا تاثیرگذار است. همچنین مطابق شکل ۴ پراکندگی فضایی به محبوس شدن جریان باد در فضای بین بلوک‌ها در نتیجه کاهش سرعت باد در این قسمت‌ها شده است.



شکل ۶. مقایسه بیشترین، کمترین و میانگین پتانسیل دمایی مناطق شبیه‌سازی شده (منبع: یافته‌های تحقیق)



شکل ۷. مقایسه بیشترین، کمترین و میانگین سرعت باد مناطق شبیه‌سازی شده (منبع: یافته‌های تحقیق)



شکل ۸. مقایسه شاخص‌ها و میانگین دما (منبع: یافته‌های تحقیق)

- فاکتور نمای آسمان: مطابق شکل ۸ میانگین فاکتورنمایی آسمان در این محدوده ۰/۷۵ است. آن چنان که بیان شد، عدد فاکتور نمایی آسمان بالا یکی از متغیرهای تاثیرگذار بر افزایش دما است.
- تراکم: در این منطقه به علت میزان پراکندگی و میان مرتبه سازی تراکم ساختمانی مقدار نسبتا پایین ۰/۳۸ است. این موضوع بیانگر آن است که پایین بودن سطح تراکم ساختمانی می تواند به عنوان یکی از عوامل مهم در افزایش پتانسیل دمای هوا در نظر گرفته شود.
- جهت گیری: جهت گیری بلوک ها و معابر اصلی در این محدوده به صورت شمالی- جنوبی است. با توجه به تاثیر جهت گیری معابر و بلوک ها بر سرعت حرکت باد، تقاطع جهت وزش باد و بلوک ها باعث کاهش سرعت باد شده و در نتیجه به افزایش پتانسیل دمایی منجر شده است. بالاترین میزان سرعت باد در اطراف بلوک ها و لبه های منطقه شبیه سازی شده ثبت شد. علاوه بر آن، لکه های واقع در فضای باز با انسداد کمتر از ساختمان ها، نقاط بادگیرتری نسبت به سایر نقاط بودند.

۵-۳. کوتاه مرتبه و پراکنده

- در این بافت در هر سه دوره شبیه سازی مطابق شکل ۳، ۴ و ۵ رفتار مشابهی به لحاظ پتانسیل دمایی قابل مشاهده است. صرفا در لبه های بافت شبیه سازی شده و به موازات آن در نزدیکی برخی بلوک ها نسبت به سایر نقاط دما پایین تر است. مطابق شکل ۶ بیشترین میزان پتانسیل دما در این محدوده مربوط به خرداد ماه و معادل ۴۹/۶۲ است. همچنین این منطقه از بیشترین میانگین دمایی در فروردین و خرداد ماه برخوردار است. عوامل فرم شهری که ممکن است منجر به رخداد این شرایط از پتانسیل دمایی شده باشند عبارتند از:
- کانیون شهری و فاکتورنمایی آسمان: مطابق شکل ۸ نسبت ارتفاع به عرض در این محدوده ۰/۲۴ است. همچنین فاکتور نمایی آسمان در این محدوده در نزدیکی بلوک ها به صورت میانگین و در سایر قسمت های منطقه شبیه سازی شده به علت پایین بودن ارتفاع بلوک ها در بیشترین حالت خود قرار دارد. این وضعیت به معنی وجود سطوح بسیار در معرض تابش مستقیم خورشید است که به علت ارتفاع پایین بلوک ها حداقل میزان سایه اندازی در این منطقه وجود دارد.
- تراکم: در این منطقه به علت پایین بودن سطح ارتفاع بلوک ها، تراکم در سطح نسبتا پایینی بوده و مطابق شکل ۲ کمترین میزان را نسبت به سایر مناطق شبیه سازی شده دارد. شکل شماره ۸ حاکی از ارتباط نسبتا مستقیم شاخص تراکم و افزایش پتانسیل دمای هوا است.
- فرم ساختمان و جهت گیری: کشیدگی بلوک ها در منطقه در جهت شمال شرقی- جنوب غربی قرار گرفته است. این جهت گیری به نحوی است که بلوک ها حدودا ۲۲ درجه به سمت شمال شرقی- جنوب غربی تمایل پیدا کرده اند و نسبت به زاویه ۴۵ درجه، عدد نسبتا پایینی محسوب می شود. جهت کشیدگی بلوک ها و فرم آنها ارتباط مستقیم با جهت وزش باد دارد. بر اساس شکل ۷ در این منطقه در دو ماه فروردین و خرداد حداکثر سرعت وزش باد پایین ترین میزان در مقایسه با سایر گونه های فرم شهری است. بر این اساس می توان این طور استنباط نمود که راهروهای شکل گرفته در میان بلوک های پیوسته بر کاهش سرعت حرکت باد تاثیرگذار است. همچنین با وجود جهت گیری شمال شرقی- جنوب غربی، چرخش حدود ۲۲ درجه نسبت به شمال حاکی از تمایل بلوک ها در جهت شرقی- غربی است که بر کاهش سرعت باد ایجاد شده در محدوده اثرگذار بوده است.

۵-۴. بلندمرتبه و فشرده

- با توجه به شکل ۶ اختلاف میان حداکثر و حداقل پتانسیل دمایی در هر سه دوره شبیه سازی نسبت به سایر بافت ها در بالاترین میزان قرار دارد که بیانگر اختلاف دمایی زیاد در نقاط مختلف سایت است. با توجه به شکل شماره ۳ نقاط بسیار معدودی در نزدیکی ساختمان ها از حداقل دما برخوردارند و در اغلب فضای شبیه سازی شده دمای بسیار بیشتری به چشم می خورد.
- کانیون شهری و فاکتور نمایی آسمان: مطابق شکل ۸ بالاترین میزان نسبت ارتفاع به عرض و پایین ترین سطح فاکتورنمایی آسمان مربوط به این منطقه است. این نسبت بیانگر آن است که اغلب سطوح مجاور بلوک ها از سایه اندازی مناسبی برخوردارند. لذا این عامل می تواند علتی بر پایین بودن پتانسیل دما در نزدیکی ساختمان ها باشد.

- تراکم: شاخص تراکم در این منطقه مطابق شکل ۲، سطح بالایی دارد. شکل ۸ بیانگر ارتباط نسبتاً مستقیم تراکم و میزان پتانسیل دمایی است.
- فرم ساختمان: شکستگی‌های فرم ساختمان در این منطقه یکی از عواملی است که منجر به ایجاد تفاوت‌های دمایی در اطراف ساختمان شده است. بدیهی است در نقاطی که طراحی فرم ساختمان به شکل‌گیری شکاف‌هایی انجامیده است، با توجه به ارتفاع زیاد ساختمان، میزان سایه‌اندازی در سطح بالایی قرار دارد و در نتیجه خنک‌تر از سایر نقاط سایت می‌باشد.

۵-۵. میان مرتبه و فشرده

- در این منطقه کمترین میزان پتانسیل دمایی هوا در لبهٔ محدوده شبیه‌سازی شده قرار گرفته است و بیشترین مساحت از محدوده شبیه‌سازی شده از میانگین و حداکثر پتانسیل دمایی برخوردار هستند.
- کانیون شهری: نسبت ارتفاع به عرض در منطقه میان مرتبه و فشرده در سطح متوسطی قرار دارد که می‌تواند در گسترده بودن میانگین پتانسیل دمایی تأثیرگذار باشد.
- فاکتور نمایی آسمان: فاکتور نمایی آسمان با توجه به متغیر بودن وسعت فضای باز در این منطقه متغیر است. آن چنان که با وجود ارتفاع، فرم، تراکم و جهت یکسان تمامی بلوک‌ها شرایط دمایی در نقاط مختلف سایت متفاوت است.
- جهت‌گیری و فرم ساختمان: کشیدگی بلوک‌ها در جهت شرقی- غربی و همچنین پیکربندی پلکانی ساختمان‌ها در پلان مطابق شکل ۵ حرکت جریان باد در بین بلوک‌ها را با دشواری همراه کرده و دامنهٔ سطوحی که در معرض وزش باد با سرعت پایین‌تر هستند بسیار بیشتر است.

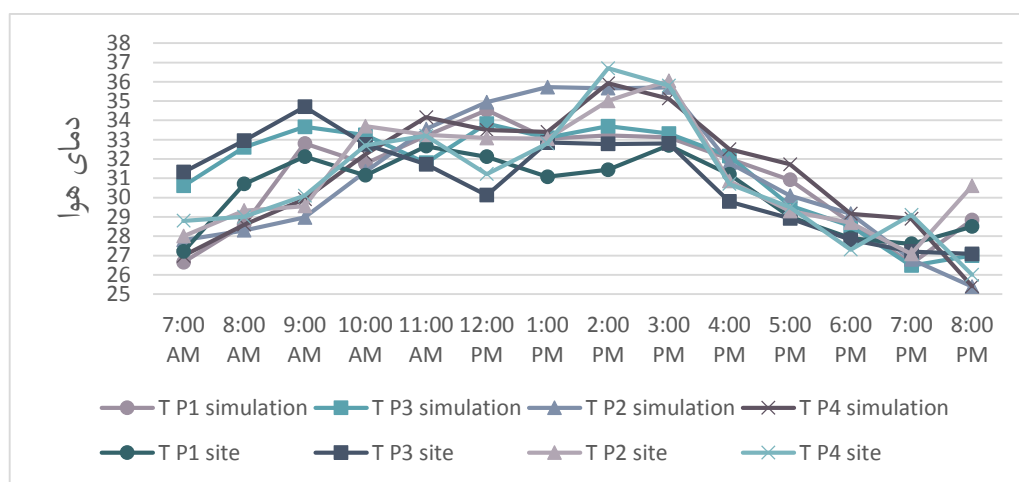
۵-۶. کوتاه مرتبه و فشرده

- در بافت مسکونی کوتاه مرتبه و فشرده پتانسیل دمایی هوای پایین‌تری با اختلاف ناچیز مشاهده شد، با این وجود وسعت لکه‌هایی که از این میزان دما برخوردار هستند بسیار کم است. عوامل فرمی اثرگذار بر شرایط دمایی این بافت در ادامه بررسی شده است.
- کانیون شهری: ارتفاع کم بلوک‌ها در این منطقه منجر به شکل‌گیری سطوح بسیاری که در معرض تابش مستقیم خورشید قرار گرفته‌اند شده است.
- فاکتور نمایی آسمان: پیوستگی ساختمان‌ها از عواملی است که منجر به پایین بودن نسبی میزان فاکتور نمایی آسمان شده است. پایین‌ترین میزان فاکتور نمایی آسمان در این منطقه ۰/۲۱ است که در معابر بین ساختمان‌ها و موازی با آن ایجاد شده است. به نظر می‌رسد با توجه به شکل ۵ در این نقاط، پتانسیل دمایی به سمت بالاترین میزان خود میل کرده است.
- تراکم: کوتاه مرتبه بودن و از طرفی فشرده بودن منطقه از عواملی هستند که شاخص تراکم را در سطح نسبتاً متوسطی نسبت به سایر مناطق قرار داده‌اند. متناظر با ارتباط مستقیم شاخص تراکم و میانگین پتانسیل دمایی هوا، در این منطقه نیز این شاخص در میانگین پتانسیل دمایی حاصل شده نقش به‌سزایی دارد.
- جهت‌گیری و فرم ساختمان: جهت‌گیری بلوک‌ها در این محدوده شمال شرقی- جنوب غربی در نظر گرفته شده است. این در حالی است که با انحراف حدود ۷ درجه نسبت به شمال این جهت‌گیری حاصل شده است و مشخصاً کشیدگی و جهت‌گیری بلوک‌ها غالباً شرقی- غربی در نظر گرفته می‌شود. این شیوهٔ طراحی نقش به‌سزایی در پتانسیل دمایی بالای محدوده دارد. شیوه طراحی بلوک‌های شهری و عبورفتگی‌ها و پیش‌آمدگی‌های فرمی در این منطقه به گونه‌ای است که باعث شکل‌گیری کنج‌ها و فضاهایی در معابر مجاور بلوک‌ها شده است. مطابق شکل ۵ کمترین میزان پتانسیل دما در این نقاط شکل گرفته است.

۵-۷. اعتبارسنجی نرم‌افزار ENVI-met

نرم‌افزار ENVI-met در بسیاری از مطالعات مربوط به خرد اقلیم شهری و آب و هوا مورد استفاده قرار گرفته است. در عین حال طیف

نسبتا جامعی از عوامل مانند اشکال ساختمان، پوشش گیاهی و غیره را در نظر می‌گیرد. خروجی با وضوح بالا تولید شده توسط این ابزار شامل دمای هوا، رطوبت هوا و خاک، سرعت و جهت باد و بسیاری از عوامل مهم هواشناسی دیگر است (Maleki & Mahdavi, 2016). اعتبار داده‌های حاصل از این نرم‌افزار در بسیاری از پژوهش‌ها با استفاده از شبیه‌سازی اعتبارسنجی مورد آزمایش قرار گرفته است (Abdelmejeed Gruehn, 2024; Alsaad et al., 2022; Ayyad & Sharples, 2019; Elkhazindar et al., 2022). برای مثال پژوهش الرئوف و همکاران، ۲۰۲۲ نرم‌افزار ENVI-met را به صورت میدانی و شبیه‌سازی اعتبارسنجی نموده است (Elraouf et al., 2022). به جهت اعتبارسنجی نرم‌افزار، فرآیند شبیه‌سازی منطبق با داده‌های میدانی پژوهش مذکور انجام شده است. مطابق شکل ۹ منحنی‌های دمای هوا بین ENVI-met و داده‌های حاصل از مطالعات میدانی روند مشابهی را نشان می‌دهند و تنها تفاوت‌های دمایی جزئی در تمام ساعات دارند.



شکل ۹. مقایسه نتایج شبیه‌سازی دمای هوا با اندازه‌گیری‌های میدانی در تاریخ ۳ جولای ۲۰۲۰ (منبع: یافته‌های تحقیق و Elraouf, 2022)

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این مقاله به بررسی نحوه اثرگذاری پارامترهای فرم شهری بر جزایر حرارتی شهری پرداخت. نتایج این مولفه‌ها از جنبه میزان کارایی آن‌ها در کاهش دما استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که در فروردین و خرداد ماه، فرم شهری بلندمرتبه و فشرده با نسبت ارتفاع به عرض بیشتر و میزان فاکتور نمایی آسمان کم، از کمترین پتانسیل دمای هوای روزانه در ساعت اوج گرما، با به حداکثر رساندن مناطق سایه‌دار و به حداقل رساندن سطوح در معرض تابش مستقیم خورشید، برخوردارند. با این حال، آن چنان که بیان شد به علت محدود بودن نقاط با درجه پایین پتانسیل دمای هوا و اختلاف بسیار زیاد دمایی در منطقه بلندمرتبه و فشرده، بافت بلندمرتبه و پراکنده به عنوان دومین منطقه به لحاظ پایین‌ترین میزان دما و توازن دمایی مطلوب‌تر میان نقاط مختلف سایت، معرفی شد که وسعت لکه‌های با دمای پایین‌تر در این محدوده بیشتر بود. این موضوع می‌تواند به دلیل عوامل متعددی رخ دهد، از جمله فرم صلیبی شکل ساختمان‌ها، نسبت ارتفاع به عرض بالا، مقدار فاکتور نمایی آسمان کم که منجر به کاهش دما می‌شود. به طور کلی در ارتباط با شکل بلوک‌ها نتایج پژوهش بیانگر تاثیر مثبت فرم‌های شکسته در بهبود شرایط پتانسیل دمای هوا در محدوده است. به گونه‌ای که با وجود اختلاف دمایی بالا در نقاطی که فرم ساختمان‌ها با پیش‌آمدگی و عقب‌رفتگی همراه است، نقاطی با کمترین میزان پتانسیل دمای هوا در این قسمت‌ها شکل گرفته‌اند. پیوستگی بلوک‌ها نیز از جمله عواملی است که بر پتانسیل دمای هوای بافت‌های شبیه‌سازی اثرگذار بوده است. نتایج نشان می‌دهد زمانی که بلوک‌ها به صورت منفصل، متناوب، و با جهت‌گیری نامناسب اقلیمی طراحی شوند قادر به هدایت جریان باد در محدوده نخواهند بود و می‌توانند منجر به کاهش سرعت باد و افزایش پتانسیل دمای هوا شوند.

با توجه به نتایج پژوهش و بررسی شاخص جهت‌گیری به عنوان یکی از عوامل فرمی اثرگذار بر جزایر حرارتی شهری، می‌توان استنباط نمود که زمانی که کشیدگی بلوک‌ها به جهت شرقی- غربی تمایل پیدا کنند، می‌توانند تاثیر نامطلوب بر سرعت باد و در نتیجه پتانسیل دمای هوا داشته باشند. شرایط پتانسیل دمای هوا و سرعت باد در این بافت‌ها شاهدهی بر این مدعا هستند. در بافت‌های شبیه‌سازی شده نمونه‌هایی از جهت‌گیری‌های شمال شرقی- جنوب غربی بررسی شدند که با زاویه بسیار کم نسبت به شمال انحراف پیدا کرده و کشیدگی بلوک‌ها به جهت شرقی- غربی متمایل بود و سرعت باد و پتانسیل دمای هوا در شرایط مناسبی قرار نداشتند.

یافته‌های پژوهش درک بهتری از متغیرهای فرم شهری موثر بر جزیره حرارتی ارائه می‌دهند که با توجه به اهمیت مسائل اقلیمی می‌تواند در سیاست‌های برنامه‌ریزی و طراحی شهری به منظور ایجاد شهرهای قابل زیست مورد توجه قرار گیرند. نتایج این مقاله در تایید نتایج الخازیندر^۱ و همکاران (۲۰۲۳) و آلوبیدی^۲ و همکاران (۲۰۱۶) است که نشان دادند، در اقلیم خشک در حالتی که نسبت ارتفاع به عرض بالاتر و میزان فاکتور نمایی آسمان پایین است، این شرایط کمک می‌کند تا دسترسی تابش خورشیدی به دره‌ها در طول روز به حداقل برسد و با به حداکثر رساندن مناطق سایه‌دار به خنک ماندن سطوح کمک کند. به عبارتی، قرار گرفتن بیشتر سطوح در معرض تابش خورشید، منجر به افزایش میزان تابش خورشیدی منعکس شده و همچنین حرارت ساطع شده می‌شود که به نوبه خود منجر به افزایش پتانسیل دمای هوا می‌شود.

به طور کلی پیشنهاد می‌شود در طراحی و توسعه‌های شهری آتی، نحوه اثرگذاری شاخص‌های فرم شهری بر جزایر حرارتی مورد توجه قرار گیرد و بر این اساس طراحی بلوک‌ها و معابر همسو با جهت‌گیری مناسب اقلیمی صورت پذیرد. طراحی ردیفی و منظم بلوک‌ها به جای آرایش متناوب به منظور افزایش تهویه هوا و سایه‌اندازی می‌تواند بر کاهش پتانسیل دمای هوا موثر واقع شود. همچنین استفاده از فرم‌های شکسته و نماهای پلکانی به منظور ایجاد عقب‌رفتگی و پیش‌آمدگی در بلوک‌ها تاثیر مثبتی بر کاهش پتانسیل دمای هوا دارد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

فاطمه میرزائیان: گردآوری داده‌ها، انجام مدل‌سازی و شبیه‌سازی، تجزیه و تحلیل داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله
ایمان قلندریان: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله
مریم طالبی: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، اعتبارسنجی نرم‌افزار، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- آروین، عباس علی (۱۳۹۶). بررسی جزیره حرارتی در ارتباط با آلودگی هوا در شهر اصفهان. نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۷(۱)، ۱۱۵-۱۲۹.
https://geoeh.um.ac.ir/article_3170.html
- اسماعیلی، رضا (۱۳۹۶). مناطق همگن آلودگی هوا در شهر مشهد. مخاطرات محیط طبیعی، ۷(۱۶)، ۲۴۰-۲۲۷. https://jneh.usb.ac.ir/article_3170.html
- بندار، حسین، موسوی بایگی، محمد، و قهرمان، بیژن (۱۴۰۰). بررسی و تفکیک جزیره حرارتی و گرمایش جهانی در دشت مشهد. آب و خاک. ۳۵(۱)، ۱۵۱-۱۳۷.
<https://doi.org/10.22067/jsw.2020.14683.0>
- پورجعفر، محمدرضا، و رفیعان، محسن (۱۴۰۰). بررسی شکل کلی شهر یزد. گفت‌وگوهای طراحی شهری: مروری بر ادبیات و نظریه‌های معاصر، ۲(۱)، ۱-۲۵.
<http://udd.modares.ac.ir/article-40-54269-fa.html>
- ترابی، سحر، زارعی، مجید، و هاشم‌پور، رحیم (۱۳۹۸). طراحی شهری با هدف کاهش نارسایی‌های محیطی ناشی از جزایر حرارتی (مطالعه موردی: منطقه تهرانسر، ناحیه ۲۱ تهران). فصلنامه جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، ۱۰(۳۸)، ۱۰۳-۱۱۰.
https://www.jgeoqeshm.ir/article_109364.html
- زاهدی یگانه، امیر، خادم الحسینی، احمد، و مختاری ملک‌آبادی، رضا (۱۳۹۶). تحلیل شاخص‌های مدیریت شهری در ابعاد جهانی شدن در بافت‌های شهری اصفهان. پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری، ۹(۱۷ (سری ۱))، ۴۹-۶۲.
https://grup.journals.pnu.ac.ir/article_4446.html
- زند، رحمان، کرمی، مختار، و طاهری، جلال (۱۳۹۷). نقش تغییرات کاربری اراضی بر شکل فضایی جزایر حرارتی در مشهد. برنامه‌ریزی توسعه فیزیکی، ۴۶(۴)، ۹۵-۱۰۵.
<https://doi.org/10.30473/psp.2020.6590>
- شفیعی دستجردی، مسعود، لک، آزاده، و غفاری، علی (۱۴۰۱). توسعه مدل ارزیابی شکل شهری با رویکرد تاب‌آوری فضایی. پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری، ۱۰(۲)، ۲۷-۱۰.
<https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2022.333648>
- کامیابی، سعید (۱۳۹۴). کاربرد سیستم طبقه‌بندی اقلیمی در معماری شهرهای استان خراسان رضوی. جغرافیای سرزمین، ۱۳(۵۰)، ۹۱-۱۰۵.
<https://sanad.iau.ir/fa/Journal/sarzamin/Article/822623>
- محمودزاده، حسن، نقدیشی، افسانه، و مومنی، سحر (۱۳۹۷). تأثیر کاربری‌های شهری در ایجاد جزایر حرارتی (مطالعه موردی: شهر مشهد). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۷(۳)، ۱۰۵-۱۱۹.
https://geoeh.um.ac.ir/article_32644.html
- مستوفی، نیکروز، آقامحمدی زنجیرآباد، حسین، وفایی‌نژاد، علیرضا، رضانی، مهدی، و حمصی، امیرهومن (۱۳۹۹). آرایه روشی نوین جهت انتخاب بهینه شاخص‌های مرتبط با پوشش زمین به منظور شناسایی جزایر حرارتی شهری، با بکارگیری داده‌های سنجش از دور. فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۹(۱۱۳)، ۵۷-۷۲.
<https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.40471>
- مفیدی شمیرانی، سید مجید، حسینی، سیده مریم، صنایعیان، هانیه، و جاپلقی، غلامرضا (۱۳۹۹). بررسی اثر حرارتی گیاهان در فضاهای شهری با مدل PMV (نمونه موردی محله ازگل تهران). فصلنامه مطالعات شهری، ۹(۳۴)، ۱۱۹-۱۳۰.
https://urbstudies.uok.ac.ir/article_61330.html
- نیک‌پور، عامر، محمدیاری، بهناز، و سلیمانی، محمد (۱۴۰۱). مدل‌سازی فضایی عوامل مؤثر در تراکم ساختمان (مطالعه موردی: شهر همدان). برنامه‌ریزی فضایی، ۱۲(۲)، ۲۷-۴۶.
<https://doi.org/10.22108/sppl.2022.127142>

References

- Abdelmejeed, A. Y., & Gruehn, D. (2024). Optimizing an efficient urban tree strategy to improve microclimate conditions while considering water scarcity: a case study of Cairo [Article]. *Discover Sustainability*, 5(1), Article 66. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024DiSus...5...66A/abstract>
- Abdi, Z., Alizadeh, H., Mohammadi, S., & Sabouri, S. (2023). Analysis of urban form typology using urban heat island indicators: Case study of Ferdous neighborhood of Tabriz. *FRONTIERS IN ECOLOGY AND EVOLUTION*, 10, Article 1065538. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1065538>
- Akbari, H., & Kolokotsa, D. (2016). Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy and Buildings*, 842-834, 133. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.067>
- Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A. L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnefa, A., Wong, N. H., & Zinzi, M. (2016). Local climate change and urban heat island mitigation techniques – the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(1), 16-1. doi:10.3846/13923730.2015.1111934
- Alobaydi, D., Bakarman, M. A., & Obeidat, B. (2016). The Impact of Urban Form Configuration on the Urban Heat Island: The Case Study of Baghdad, Iraq. *Procedia Engineering*, 145, 820-827. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.107>
- Alsaad, H., Hartmann, M., Hilbel, R., & Voelker, C. (2022). The potential of facade greening in mitigating the effects of heatwaves in Central European cities. *Building and Environment*, 216, 109021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109021>
- Arvin, A. A. (2017). Investigating thermal island in connection with air pollution in Isfahan city. *Geography and Environmental Hazards*, 7(1), 115-129. (In Persian). https://geoeh.um.ac.ir/article_
- Ayyad, Y. N., & Sharples, S. (2019). Envi-MET validation and sensitivity analysis using field measurements in a hot arid climate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 329(1), 012040. 10.1088/1755-1315/329/1/012040
- Bondar, H., Mousavi Baighi, M., & Kahraman, B. (2021). Investigation and separation of heat island and global warming in Mashhad plain. *Water and Soil*, 35(1), 137-151. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.2020.14683.0>
- Conzen, M. R. G. (1960). Alnwick, Northumberland: a study in town-plan analysis. *Transactions and Papers (Institute of British Geographers)*. 10.1177/0309132509334948
- Delbasteh, S., Doostan, D., & karimi, D. (2018). Evaluation of Spatial Variations of Surface Temperature in Mashhad Metropolis. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*. 10.22111/gaij.2018.4088
- Elkhazindar, A., Kharrufa, S. N., & Arar, M. S. (2022). The Effect of Urban Form on the Heat Island Phenomenon and Human Thermal Comfort: A Comparative Study of UAE Residential Sites. *Energies*, 15(15), 5471. <https://doi.org/10.3390/en15155471>
- Elraouf, R. A., ELMokadem, A., Megahed, N., Eleinen, O. A., & Eltarabily, S. (2022). Evaluating urban outdoor thermal comfort: a validation of ENVI-met simulation through field measurement. *Journal of Building Performance Simulation*, 15(2), 268–286. 10.1080/19401493.2022.2046165
- Golany, G. S. (1996). Urban design morphology and thermal performance. *Atmospheric Environment*, 30, 455-465 [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00266-9](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00266-9)
- Huang, X., & Wang, Y. (2019). Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: A case study of Wuhan, Central China. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 131-119. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.010>
- Ismaili, Reza. (2017). Homogeneous air pollution areas of Mashhad city. *Natural Environment Hazards*, 7(16), 227-240. (In Persian). https://jneh.usb.ac.ir/article_3170.html
- Jain, S., Sannigrahi, S., Sen, S., Bhatt, S., Chakraborti, S., & Rahmat, S. (2020). Urban heat island intensity and its mitigation strategies in the fast-growing urban area. *Journal of Urban Management*, 9(1), 66-54. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2019.09.004>
- Liao, W., Hong, T., & Heo, Y. (2021). The effect of spatial heterogeneity in urban morphology on surface urban heat islands. *Energy and Buildings*, 244, Article 111027. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111027>
- Liu, X., Ming, Y., Liu, Y., Yue, W., & Han, G. (2022). Influences of landform and urban form factors on urban heat island: Comparative case study between Chengdu and Chongqing. *Science of The Total Environment*, 820, 153395. 10.1016/j.scitotenv.2022.153395
- Mahmoudzadeh, H., Naqdbishi, A., & Momeni, S. (2017). The effect of urban uses on the creation of thermal islands

- (case study: Mashhad city). *Geography and Environmental Hazards*, 7(3), 106-119. (In Persian) https://geoeh.um.ac.ir/article_32644.html
- Maleki, A., & Mahdavi, A. (2016). Evaluation of Urban Heat Islands mitigation strategies using dimensional urban micro-climate model envi-met. 17, 371-357. <https://www.magiran.com/p1449845>
- Mofidi Shemirani, S. M., Hosseini, S. M., Sanyayan, H., & Japelaghi, Gh. R. (2019). Investigating the thermal effect of plants in urban spaces with the PMV model (a case study of Azgol neighborhood in Tehran). *Quarterly Journal of Urban Studies*, 9(34), 119-130. (In Persian) https://urbstudies.uok.ac.ir/article_61330.html
- Nikrouz Mostofi, H., Aghamohammadi Zanjirabad, A. R., Vafaeinezhad, M., Ramezani, A., & Hemmasi, H. (2020). A novel method for optimal selection of land cover indices and urban heat islands determination using remote sensing data, *Journal of Geographical Data (SEPEHR)*, 29(113), 57-72. [magiran.com/p2134506](https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.40471). (In Persian). <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.40471>
- Moudon, A. V. (1997a). Urban morphology as an emerging interdis. *Urban Morphology*, 1(1), 3-10. <https://doi.org/10.51347/jum.v1i1.4047>
- Nikpour, A., Mohammadyari, B., & Soleimani, M. (2022). Spatial modeling of effective factors in building density (case study: Hamadan city). *Spatial Planning*, 12(2), 27-46. (In Persian) 10.22108/sppl.2022.127142. 1559.
- Oke, T (1995). The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects. *NATO ASI Series e Applied Sciences-Advanced Study Institute*, 277, 108-81. 10.1007/978-94-017-3686-2_5
- Peterson, T. C., & Owen, T. W. (2005). Urban Heat Island Assessment: Metadata Are Important. *Journal of Climate*, 18(14), 2637-2646. <https://colab.ws/articles/10.1175%2Fjcli3431.1>
- Pourjafar M. R., & Rafiyan M. (2021). Examining the general shape of Yazd city. *Urban design discourse A review of contemporary literature and theories*, 2 (1), 1-25. (In Persian). <http://udd.modares.ac.ir/article-40-54269-fa.html>
- Quan, J. (2019). Multi-Temporal Effects of Urban Forms and Functions on Urban Heat Islands Based on Local Climate Zone Classification. *Int J Environ Res Public Health*, 16(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph16122140>
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y. C., & Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 128-120. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4)
- Santamouris, M. (2014). On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings*, 82, 100-113. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.022>
- Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*, 207, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>
- Shafii Dastjardi, M., Lek, A., & Ghafari, A. (2022). Development of an urban form evaluation model with a spatial resilience approach. *Urban Planning Geography Research*, 10(2), 1-27. (In Persian). 10.22059/jurbangeo.2022.333648, 1610.
- Torabi, S., Zarei, M., & Hashempour, R. (2019). Urban design with the aim of reducing environmental inadequacies caused by heat islands (case example: Tehransar area, 21st district of Tehran). *Geography Quarterly (Regional Planning)*, 10 (38), 154-143. (In Persian). https://www.jgeoqeshm.ir/article_109364.html
- Wang, D., Zhang, G., Lin, T., Hu, X., Zhao, Z., & Shi, L. (2021). Exploring the Connection between Urban 3D Form and Building Energy Performance and the Influencing Mechanism. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, (10)10. <https://doi.org/10.3390/ijgi10100709>
- Kamyabi, S. (2015). Applying the climatic classification system to the architecture of the cities of Razavi Khorasan province. *Land Geography*, 13(50), 105-91. (In Persian). <https://sanad.iau.ir/fa/Journal/sarzamin/Article/822623>
- Zahedi Yeganeh, A., Khadem Al-Hosseini, A., & Mokhtari Malekabadi, R. (2017). Analysis of urban management indicators in the dimensions of globalization in the urban areas of Isfahan. *Urban Ecology Research*, 9(1 (series 17)), 49- 62. (In Persian). https://grup.journals.pnu.ac.ir/article_4446.html
- Zandi, R., Karmi, M., & Taheri, J. (2018). The role of land use changes on the spatial form of thermal islands in Mashhad. *Physical Development Planning*, 6(4), 95-105. (In Persian). <https://doi.org/10.30473/psp.2020.6590>