



University of Tehran Press

Spatial Analysis of the Effects of Green Infrastructure on Surface Urban Heat Island Intensity at the Neighborhood Scale in Tehran During the Period 2015-2025

Nahid Nematikutenae¹ , Rama Ghalambordezfooly² 

1. Department of Geography, Faculty of Humanities, Islamic Azad University, Research and Science Branch, Tehran, Iran. E-mail: nahid.nk1982@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Islamic Azad University, Science and Technology Pardis Branch, Pardis, Iran. E-mail: rama.ghalambor@iau.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 2 January 2026

Received in revised form: 2 February 2026

Accepted: 19 February 2026

Available online: 16 March 2026

Keywords:

Land surface temperature,
Multiscale geographically,
Weighted regression,
Spatial regression,
Urban green infrastructure,
Urban heat islands.

ABSTRACT

Objective: This study aimed to spatially investigate the intensity of the surface urban heat island in 352 neighborhoods of the Tehran metropolis during the summers of 2015-2025. The emphasis was on the role of vegetation cover, percentage of tree cover, impervious surfaces, surface albedo, and topographic features (elevation, slope) in order to identify spatial heterogeneity patterns, calculate local cooling potential, and provide a prioritization framework for urban green infrastructure interventions.

Method: Satellite remote sensing data from Landsat 8/9 (OLI/TIRS thermal bands) and Sentinel-2 (MSI Level-2A) on the Google Earth Engine platform were used to derive land surface temperature, the normalized difference vegetation index, tree cover percentage (WorldCover 2021), impervious surfaces, surface albedo, mean elevation (SRTM), and slope. Surface urban heat island intensity was calculated as the difference between the mean neighborhood land surface temperature and the median temperature of the entire city. Exploratory analyses included descriptive statistics, global and local Moran's I (spatial autocorrelation), hot spot analysis (Getis-Ord G_i^* statistic), Pearson correlation, and simple regression. modeling comprised ordinary least squares regression, Lagrange Multiplier tests (for selecting spatial error/lag/Durbin models), multiscale geographically weighted regression, and calculation of a cooling potential index (combining the absolute values of significant local coefficients) implemented in ArcGIS Pro and Python.

Results: According to the results, the mean land surface temperature was 44.21 ± 2.56 , and the surface urban heat island intensity was 2.56 ± 0.10 degrees Celsius. Strong spatial autocorrelation was detected (global Moran's I for heat island intensity = 0.7245, $p < 0.001$), and hot clusters of impervious surfaces were observed in the southern and central parts of the city. Strong correlations were found for elevation ($r = -0.45$), impervious surfaces ($r = 0.38$), and vegetation cover ($r = -0.28$). Multiscale geographically weighted regression (adjusted $R^2 = 0.9224$, adjusted Akaike information criterion = 2127.36) showed that vegetation cover (coefficient = -1.52), tree cover (coefficient = -0.11), and albedo (coefficient = -6.71) exerted significant cooling effects ($p < 0.001$ in 50–94% of neighborhoods), whereas impervious surfaces had a warming effect (in 100% of neighborhoods) with pronounced heterogeneity (local $R^2 = 0.62$ – 0.88). The mean cooling potential index was 3.97 (range: 2.28–6.38).

Conclusions: The results indicate that tree and vegetation cover in a substantial proportion of Tehran's neighborhoods have high cooling potential and play a key role in moderating the surface urban heat island. The multiscale geographically weighted regression (MGWR) model, which clearly outperforms global models (ordinary least squares regression with $R^2 = 0.62$ and the spatial error model with $R^2 = 0.75$), accurately reveals the spatial heterogeneity and location dependence of the relationships between variables. From a policy perspective, the findings underscore the need to prioritize green interventions in southern neighborhoods and parts of the city center characterized by high imperviousness and low cooling potential, a strategy that can promote thermal justice and enhance urban climate resilience.

Cite this article: Nematikutenae, N. & Ghalambordezfooly, R. (2026). Spatial Analysis of the Effects of Green Infrastructure on Surface Urban Heat Island Intensity at the Neighborhood Scale in Tehran During the Period 2015-2025, *Journal of Environmental Studies*, 51 (4), 511-534. <http://doi.org/10.22059/jes.2026.408985.1008667>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/jes.2026.408985.1008667>

Introduction

Rapid urbanization, widespread impervious surface expansion, and accelerating climate change have substantially intensified the urban heat island (UHI) phenomenon, particularly its surface component, the surface urban heat island (SUHI). This intensification generates escalating challenges for environmental quality, public health, and thermal equity, especially in large metropolitan areas of arid and semi-arid climates. Tehran, a rapidly growing megacity characterized by marked socio-spatial disparities, diverse urban morphologies, and pronounced topographic gradients, provides an exemplary setting for analyzing the spatial variability of urban thermal environments.

While extensive research has established the cooling efficacy of urban green infrastructure, the majority of studies employ global regression models that presume spatial stationarity in the relationship between land surface temperature (LST) and its biophysical drivers. These stationary assumptions often mask localized thermal heterogeneity and constrain the development of tailored mitigation policies, which are frequently implemented uniformly despite substantial intra-urban differences in heat exposure and cooling resource access. Such limitations are especially acute in heterogeneous cities like Tehran, where neighborhood-scale variations in thermal stress and adaptive capacity are pronounced.

This study addressed these gaps by examining the spatial structure of SUHI across Tehran's 352 officially defined neighborhoods and quantifying the place-specific influences of green infrastructure elements, surface imperviousness, and topographic attributes (elevation and slope) on LST. The core aim is to determine optimal locations and contextual conditions under which green infrastructure interventions yield the greatest surface heat mitigation benefits. By adopting the neighborhood as the primary analytical unit, the research elucidates intra-urban differences in cooling efficacy and their implications for spatially explicit, equity-oriented heat adaptation strategies.

To account for spatial non-stationarity and varying bandwidths in these relationships—phenomena that conventional global models overlook—this study applied multiscale geographically weighted regression (MGWR). This framework supports an explanatory and policy-oriented design, facilitating the conversion of spatially varying model outputs into practical, location-specific recommendations for urban planners, decision-makers, and climate-resilient development stakeholders.

Method

This study employed secondary spatial data analysis, integrating multi-source geospatial datasets from summer months (2015–2025) to capture peak thermal conditions. The analytical units comprised the 352 officially delineated neighborhoods of the city of Tehran.

Land surface temperature (LST) was retrieved from Landsat 8/9 thermal imagery (30 m resolution) after standard preprocessing, temporal consistency checks, and quality control. Green infrastructure metrics—including tree cover percentage (WorldCover 2021) and vegetation indices (NDVI)—were derived from Sentinel-2 Level-2A data and global land cover products. Impervious surface fraction and surface albedo were computed from classified remote sensing datasets. Topographic variables (mean elevation and slope) were extracted from the SRTM digital elevation model. All raster layers were aggregated to the neighborhood level via zonal statistics to provide robust, area-weighted summaries.

The workflow encompassed exploratory spatial data analysis, global and local spatial autocorrelation assessment (Moran's I), and global regression modeling using Ordinary Least Squares (OLS) and Spatial Error Models (SEM). Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR) was subsequently applied to account for spatial non-stationarity and scale-dependent relationships between LST and explanatory variables. Multicollinearity was examined via Variance Inflation Factor ($VIF \leq 5$ threshold for variable retention). Model fit and diagnostics were evaluated using adjusted R^2 , AICc, and residual spatial autocorrelation tests.

A Cooling Potential Index (CPI) was constructed from the absolute values of statistically significant local MGWR coefficients to identify neighborhoods with high thermal stress and strong responsiveness to green infrastructure interventions. All processing and modeling were performed in GIS (ArcGIS Pro) and Python environments, with full documentation to ensure transparency and replicability.

Results

The spatial distribution of surface urban heat across Tehran exhibited marked heterogeneity, confirming that the surface urban heat island (SUHI) is not a uniform city-wide phenomenon. Impervious surfaces and dense built-up areas emerged as the primary drivers of elevated land surface temperature (LST), explaining a substantial share of neighborhood-level temperature variation. In contrast, tree cover percentage demonstrated the strongest and most consistent cooling effect among green infrastructure variables, yielding statistically significant LST reductions in the majority of neighborhoods. Vegetation indices such as NDVI, however, showed spatially variable and less stable effects, indicating that not all vegetation types contribute equally to thermal mitigation at the neighborhood scale.

Topographic variables—particularly elevation and slope—exerted a notable cooling influence, contributing to the formation of distinct hot spots in southern and central Tehran and cool zones in the northern districts. Comparative assessment of model performance revealed that multiscale geographically weighted regression (MGWR) markedly outperformed global models (ordinary least squares regression: adjusted $R^2 \approx 0.62$; spatial error model: adjusted $R^2 \approx 0.75$), achieving an adjusted R^2 of approximately 0.94 while effectively accounting for spatial non-stationarity and multiscale processes in SUHI dynamics.

The Cooling Potential Index (CPI), derived from the absolute values of significant local MGWR coefficients, identified southern, southwestern, and selected central neighborhoods as priority zones where high thermal stress coincides with substantial responsiveness to green infrastructure interventions. These results underscore pronounced spatial mismatches between heat exposure and existing green infrastructure distribution, highlighting the necessity for place-based, differentiated mitigation strategies to enhance thermal equity and urban climate resilience.

Conclusions

This study demonstrates that surface urban heat in Tehran constitutes a spatially heterogeneous and location-dependent process, driven by localized interactions among impervious surface coverage, green infrastructure elements, and topographic attributes. The findings clearly reveal the inadequacy of uniform, city-wide heat mitigation strategies and provide robust empirical evidence in favor of neighborhood-scale, evidence-based planning approaches.

Theoretically, the results highlight the superiority of spatially explicit and multiscale modeling frameworks—particularly multiscale geographically weighted regression (MGWR)—over traditional global models in capturing non-stationarity and scale-varying relationships in urban climate dynamics.

From a practical and policy perspective, the developed Cooling Potential Index (CPI) offers a reliable tool for prioritizing green infrastructure interventions in heat-vulnerable neighborhoods, thereby advancing thermal equity and enhancing urban climate resilience. If replicated and adapted in other megacities with comparable environmental and socio-spatial conditions, this framework can effectively guide climate-sensitive urban planning.

Ultimately, effective mitigation of urban heat demands not merely an expansion of green infrastructure but a strategic, spatially targeted alignment of interventions with the underlying patterns of urban form, thermal vulnerability, and local cooling capacity.

Author Contributions

Nahid Nematikutenae: sample preparation and data collection, laboratory experiments and computations, statistical analysis, interpretation of results, original draft preparation.

Rama Ghalambordezfooly: study design, supervision of research stages, result validation, review, editing, and finalization of the manuscript.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data supporting the results are available upon request from the authors.

Acknowledgements

The authors thank the respected reviewers for their constructive and scientific feedback.

Ethical considerations

The authors adhered to ethical research principles throughout the study and publication process, avoiding data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct, with confirmation from all contributors.

Funding

This study was conducted independently without financial support from public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

تحلیل فضایی اثرات زیرساخت‌های سبز بر شدت جزایر گرمایی سطحی در مقیاس محله‌ای تهران طی دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۵

ناهید نعمتی کوتنائی^۱، راما قلمبردزفولی^۲

۱. گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران. رایانامه: nahid.nk1982@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و فناوری پردیس، پردیس، ایران. رایانامه: rama.ghalambor@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

هدف: این پژوهش با هدف بررسی فضایی شدت جزیره گرمایی سطحی در ۳۵۲ محله کلان‌شهر تهران طی تابستان‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۵ صورت گرفته است. در این راستا، تأکید بر نقش پوشش گیاهی، درصد پوشش درختی، سطوح نفوذناپذیر، آلودگی سطحی و ویژگی‌های توپوگرافی (ارتفاع، شیب) به منظور شناسایی الگوهای ناهمگنی مکانی، محاسبه پتانسیل خنک‌کنندگی محلی و ارائه چارچوب اولویت‌بندی مداخلات زیرساخت سبز شهری بوده است.

روش پژوهش: داده‌های سنجه‌ازدور ماهواره‌های لندست ۹/۸ (باندهای حرارتی OLI/TIRS) و سنتینل-۲ (MSI Level-2A) از پلتفرم Google Earth Engine برای استخراج دمای سطح زمین، شاخص نرمال شده پوشش گیاهی، درصد پوشش درختی (WorldCover 2021)، سطوح نفوذناپذیر، آلودگی سطحی، ارتفاع میانگین (SRTM) و شیب استخراج گردید. شدت جزیره گرمایی سطحی بر اساس تفاضل میانگین دمای سطح محله با میانگین دمای کل شهر محاسبه شد. تحلیل‌های اکتشافی شامل آمار توصیفی، آزمون موران جهانی/محلی (خودهمبستگی فضایی)، تحلیل لکه‌های داغ (آماره گتیس-ارد جی)، همبستگی پیرسون و رگرسیون ساده انجام شد. مدل‌سازی شامل رگرسیون حداقل مربعات معمولی، آزمون‌های لاگرانژ (انتخاب مدل خطای/تأخیر/دوربین فضایی)، رگرسیون وزنی جغرافیایی چندمقیاسی و محاسبه شاخص پتانسیل خنک‌کنندگی (ترکیب قدرمطلق ضرایب محلی معنادار) در نرم افزارهای ArcGIS Pro و Python اجرا شد.

یافته‌ها: براساس نتایج، میانگین دمای سطح $21/44 \pm 2/56$ و شدت جزیره گرمایی سطحی $10/56 \pm 2/56$ درجه سلسیوس محاسبه شد. خودهمبستگی فضایی قوی (شاخص موران جهانی شدت جزیره گرمایی = $0/7245$)، سطح معناداری کمتر از $0/001$ و خوشه‌بندی داغ سطوح نفوذناپذیر در جنوب و مرکز شهر مشاهده گردید. همبستگی‌های قوی شامل ارتفاع (همبستگی = $-0/45$)، سطوح نفوذناپذیر (همبستگی = $-0/38$) و پوشش گیاهی (همبستگی = $-0/28$) بود. رگرسیون وزنی جغرافیایی چندمقیاسی (ضریب تعیین تعدیل شده = $0/9224$)، معیار اطلاعات آکائیکه تعدیل شده = $2127/36$ نشان داد پوشش گیاهی (ضریب = $-52/1$)، پوشش درختی (ضریب = $-0/11$)، آلودگی (ضریب = $-71/6$) اثرات خنک‌کننده معنادار (سطح معناداری کمتر از $0/001$)، 50 تا 94 درصد محلات) و سطوح نفوذناپذیر اثر گرم‌کننده (100 درصد محلات) با ناهمگنی شدید (ضریب تعیین محلی: $0/62-0/88$) دارند. شاخص پتانسیل خنک‌کنندگی میانگین $3/97$ (با دامنه $2/28-6/38$) محاسبه شد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان می‌دهد که پوشش درختی و گیاهی در تعداد قابل توجهی از محلات تهران، پتانسیل خنک‌کنندگی بالایی داشته و نقشی کلیدی در تعدیل جزیره گرمایی سطحی ایفا می‌کند. مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی چندمقیاسی (MGWR) با عملکردی به مراتب برتر نسبت به مدل‌های جهانی (رگرسیون حداقل مربعات معمولی با ضریب تعیین $0/62$ و مدل خطای فضایی با ضریب تعیین $0/75$)، ناهمگنی و مکان وابستگی روابط بین متغیرها را به‌طور دقیق آشکار می‌سازد. از منظر سیاستی، یافته‌ها بر ضرورت اولویت‌دهی به مداخلات سبز در محلات جنوبی و بخش‌هایی از مرکز شهر با سطوح بالای نفوذناپذیری و پتانسیل خنک‌کنندگی پایین تأکید دارد؛ رویکردی که می‌تواند به تحقق عدالت حرارتی و تقویت تاب‌آوری اقلیمی شهری منجر شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

کلیدواژه‌ها:

جزایر گرمایی شهری،

دمای سطح زمین،

رگرسیون فضایی،

رگرسیون وزنی جغرافیایی،

چندمقیاسی،

زیرساخت سبز شهری.

استناد: نعمتی کوتنائی، ناهید. و قلمبردزفولی، راما (۱۴۰۴). تحلیل فضایی اثرات زیرساخت‌های سبز بر شدت جزایر گرمایی سطحی در مقیاس محله‌ای تهران طی دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۵. *نشریه محیط‌شناسی*، ۵۱(۴)، ۵۱۱-۵۳۴. <http://doi.org/10.22059/jes.2026.408985.1008667>

© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.



مقدمه

جزایر گرمایی شهری طی دو دهه اخیر به یکی از چالش‌های بنیادین اقلیم شهری در کلان‌شهرهای جهان بدل شده‌اند. افزایش دما در محیط‌های متراکم شهری، نه تنها بار سرمایشی و مصرف انرژی را تشدید می‌کند، بلکه پیامدهای مستقیمی بر سلامت حرارتی، پایداری زیست‌محیطی و کیفیت زندگی ساکنان دارد (Santamouris, 2020). مطالعات جهانی نشان می‌دهد که جزایر گرمایی شهری با افزایش خطر مرگ‌ومیر ناشی از گرما، تحریک بیماری‌های قلبی-تنفسی و تعمیق نابرابری‌های حرارتی در گروه‌های کم‌درآمد همراه بوده و محلات محروم معمولاً بیشترین شدت گرما را تجربه می‌کنند (Cleland et al., 2023). این امر جزایر گرمایی را به موضوعی مرتبط با عدالت فضایی و سیاستگذاری شهری تبدیل کرده است (Krenz & Amann, 2025). زیرساخت‌های سبز، مؤثرترین و کم‌هزینه‌ترین راهبرد مقابله با جزایر گرمایی معرفی شده‌اند (Marando et al., 2022). پوشش گیاهی، تراکم درختان، پهنه‌های آبی، نفوذپذیری سطح و بازتابندگی سطوح، از طریق خنک‌سازی تبخیری، کاهش جذب انرژی و بهبود گردش هوا، دمای سطحی را کاهش می‌دهند (Gunawardena et al., 2017). با این حال، اثرات این مؤلفه‌ها خطی و یکنواخت نیست؛ بسته به ویژگی‌های مکانی، ساختار کالبدی، توپوگرافی و الگوهای توسعه، رفتار غیرخطی، ناهمگن و فضایی بروز می‌دهند (Connors et al., 2013). تحلیل‌های ساده همبستگی یا رگرسیونی قادر به تبیین کامل این پویایی‌ها نیستند و مدل‌های پیشرفته فضایی ضروری است. با وجود رشد مطالعات جهانی، شکاف‌هایی در این زمینه وجود دارد. نخست، تمرکز بر مقیاس‌های بزرگ (بلوک یا شهر) به جای مقیاس خرد-فضایی محلات (هریسیچیان و همکاران، ۱۴۰۴ و Huang et al., 2025)، دوم، تکیه بر رگرسیون‌های خطی سنتی به جای SLM، SEM، SDM و MGWR برای سنجش همبستگی‌های فضایی و ناهمگنی (Wang et al., 2025)، سوم، استفاده از داده‌های تک‌ساله به جای تصاویر ماهواره‌ای چندساله در اوج گرما، در حالی که Google Earth Engine پردازش چندساله را ممکن می‌سازد (آزادی مبارکی و احمدی، ۱۴۰۰؛ Gorelick et al., 2025). در ایران، مطالعات تهران اغلب کلان‌مقیاس یا با مدل‌های ساده بوده‌اند (پوردیهیمی و همکاران، ۱۳۹۸ و Zargari et al., 2024). با توجه به ناهمگنی در وضعیت توپوگرافی و سبزی‌نگی تهران، تحلیل ۳۵۲ محله با داده‌های ده‌ساله ضروری است، که تاکنون انجام نشده است. پژوهش حاضر اثرات فضایی زیرساخت‌های سبز بر شدت جزایر گرمایی سطحی در محلات تهران (تابستان‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۵) را بررسی می‌کند. در این راستا، داده‌های حرارتی و گیاهی پردازش شده، شاخص‌هایی چون NDVI، پوشش درختی، نفوذناپذیری، فاصله آبی و GI_Z استخراج گردیده و روابط با OLS، LM، SLM، شامل بررسی بازه ده‌ساله اوج گرما، تحلیل محله‌محور، مدل‌های فضایی و MGWR برای ناهمگنی، شاخص GI_Z با ضرایب MGWR و CPI است. این مطالعه با شواهد کمی، نقشه‌ها و چارچوب MGWR، رابطه پیچیده سبزی‌نگی و گرما را نشان می‌دهد و مبنای مداخلات محلی اقلیمی فراهم می‌کند.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

جزیره گرمایی سطحی دمای سطوح شهری را ۲ تا ۱۰ درجه سلسیوس بالاتر از نواحی روستایی نشان می‌دهد که این مسئله، ناشی از تغییر بیلان انرژی که شار گرمایی محسوس را از نهمان تبخیری افزایش می‌دهد (Oke et al., 2017). مکانیسم‌های اصلی موثر در این پدیده شامل سطوح نفوذناپذیر (بازتاب ۰/۱-۰/۲)، جذب ۶۰-۸۰ درصد تابش)، کاهش تبخیر به دلیل پوشش گیاهی کم (>۰/۳) و سطوح آبی (>۱ درصد) و حرارت انسان‌زاد (۵۰-۲۰ وات/م^۲) (U.S. EPA, 2024) است. زیرساخت‌های سبز از طریق سایه‌اندازی (۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش تابش)، تبخیر (۱۰۰-۳۰۰ وات/مترمربع) و افزایش بازتاب (۰/۱۵-۰/۲۵) عمل می‌کنند (Gunawardena et al., 2017). هر ۱۰ درصد افزایش پوشش درختی، دما را ۰/۸-۲/۴ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد. در اقلیم نیمه‌خشک، درختان ۲ تا ۳ برابر علفزار مؤثرند اما این تاثیر غیرخطی و مکانی است (Connors et al., 2013). شرایط توپوگرافی در این پدیده تاثیر گذار بوده و ارتفاع (r = -0.4 - 0.6) و شیب خنک‌سازی را تقویت می‌کنند. محلات مسطح پتانسیل بالاتری برای این پدیده دارند (Huang et al., 2025). مدل‌های فضایی ناهمگنی را در شرایط محیطی آشکار می‌کنند؛ ضرایب محلی NDVI از ۲۰- تا ۸۰- متغیر و خودهمبستگی (Moran's I > 0.5) مدل‌های خطی را نامناسب می‌سازد (Anselin, 1988; Fotheringham et al., 2017).

– مطالعات داخلی

در سطح ملی، مطالعات متعددی بر جزایر گرمایی شهری، تغییرات دمای سطح زمین و نقش زیرساخت‌های سبز تمرکز داشته‌اند. هریسچیان و همکاران (۱۴۰۴) تأثیر زیرساخت‌های سبز بر کاهش جزایر حرارتی و بهره‌وری کارهای سبک/ سنگین در تبریز را ارزیابی کردند. براساس نتایج این تحقیق، با استفاده از تصاویر لندست (۱۳۶۳–۱۴۰۱)، مدل خدمات اکوسیستمی و دمای کره مرطوب، نشان داده شد که شدت جزیره از ۳/۲ به ۵/۲ درجه افزایش یافت. فضاهای سبز و کشاورزی افت بهره‌وری را کاهش و مناطق پرتراکم آن را افزایش دادند. تأکید این تحقیق بر نقش کلیدی سبزی‌نگی در آسایش حرارتی و بهره‌وری اقتصادی بود. صلاحی و فروتن (۱۴۰۳) رابطه جزیره گرمایی با آلاینده‌ها در تهران (۲۰۱۹–۲۰۲۴) را بررسی کردند. با استفاده از MODIS LST، لندست NDVI و سنتینل-۵ در Google Earth Engine، نشان داده شد که دما از غرب به شرق افزایش و هاله حرارتی در مرکز/ جنوب شرقی تمرکز یافت. همبستگی مثبت بخار آب (۰/۶۴۸)، SO₂ و NO₂ با این پدیده مشاهده شد در حالیکه پوشش گیاهی اثر تعدیل‌کننده داشت. بخار آب عامل اصلی تشدید و پوشش گیاهی تعدیل‌کننده معرفی شد. قربانی و سجادی‌زاده (۱۴۰۳) تغییرات پوشش گیاهی بر شدت جزیره گرمایی در کرج (۲۰۰۱–۲۰۲۱) را تحلیل کردند. در این تحقیق با استفاده از MODIS LST، لندست طبقه‌بندی و درخت رگرسیون مشخص شد که افزایش دما با کاهش NDVI همبستگی منفی قوی داشت؛ بافت متراکم/ فرسوده و بایر گرم‌ترین لکه‌ها بودند. گسترش بام‌های سبز و گیاهی سازگار برای تاب‌آوری پیشنهاد شد. منصوری و ضرغامی (۱۴۰۲) دینامیک جزایر حرارتی تهران (۲۰۱۳–۲۰۲۳) را با ۴۶۰ تصویر MODIS در Google Earth Engine بررسی کردند. مناطق مرکزی کمترین و شمالی/ شمال غربی بیشترین تغییرات را داشتند؛ پوشش زمین اثری معکوس با دما و تراکم جمعیت اثر غیرمستقیم داشت. افزایش آب و فضای سبز برای کاهش شدت ضروری دانسته شد. فربودی و زمانی (۱۴۰۱) کاهش جزایر حرارتی تهران را با شبیه‌سازی Dragonfly، Ladybug و ENVI-met (سناریوهای مصالح نفوذپذیر، چمن، درخت، آب و بام سبز) ارزیابی کردند. براساس نتایج بدست آمده، سناریوی بهبود یافته دما را ۴ درجه کاهش، رطوبت را ۱۰ درصد افزایش و CO₂ را کم کرده و پوشش درختی خنک‌سازی بالاتری داشت. تعدیل اقلیم حرارتی با اولویت درختان و سطوح نفوذپذیر پیشنهاد شد. ترکی و همکاران (۱۴۰۰) آب‌وهوای جزایر گرمایی/ سرمایی شهرهای بزرگ ایران (۱۳۸۱–۱۳۹۶) را با MODIS Terra/Aqua تحلیل کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در روز، جزیره سرمایی (۰/۳– تا ۱/۶–) غالب (جز رشت)؛ و در شب، گرمایی (۰/۵– تا ۳ درجه) در همه (جز زاهدان) برقرار بوده است. در این تحقیق بر مدیریت این پدیده با تعدیل انرژی و زیرساخت‌های سبز تأکید شد.

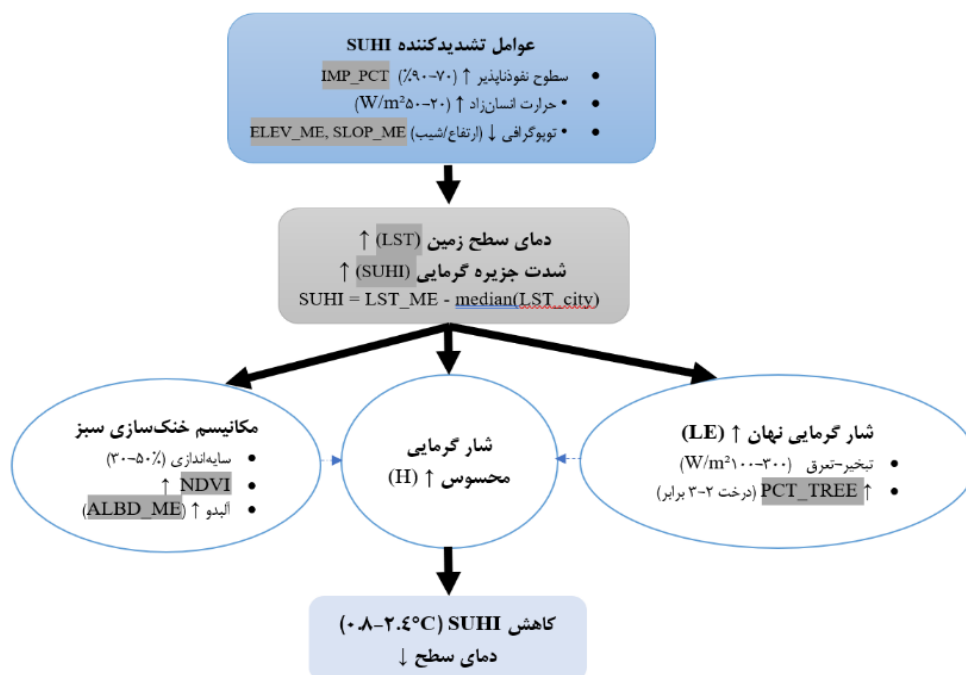
– مطالعات خارجی

در سطح بین‌المللی، پژوهش‌های دهه اخیر بر تحلیل فضایی جزایر گرمایی شهری (SUHI)، نقش پوشش گیاهی و مدل‌سازی مکانی-زمانی LST تمرکز داشته‌اند. ریچاردی و همکاران (۲۰۲۵) چارچوب منبع‌باز خودکاری برای نقشه‌برداری SUHI با ادغام لندست و SRTM در زون‌های ارتفاعی توسعه دادند. این رویکرد با ورودی حداقلی (نام شهر)، نقشه‌های LST/SUHI تولید کرده و در R/Python مستقر است. براساس نتایج بدست آمده، شهرهای عرض‌های جغرافیایی میانی آسیب‌پذیرترند و مشارکت شهروندی دسترسی را بهبود می‌بخشد (Richiardi et al., 2025). ژان و همکاران (۲۰۲۵) روند SUHI در ۲۱۰۴ شهر (۲۰۰۰–۲۰۲۲) را با MODIS و GWR تحلیل کردند. براساس نتایج، نیمی از شهرها کند شدن SUHI را تجربه کرده‌اند (روز: پوشش گیاهی؛ شب: آلودگی). شهرهای بزرگ‌تر سریع‌تر و غیرخطی عمل می‌کنند. به این ترتیب، سیاستگذاری هدفمند برای روندهای در حال تغییر ضروری است (Zhan et al., 2025). منگ و همکاران (۲۰۲۵) ناهمگنی SUHI شی‌آن را با ادغام داده‌های چندمنبعی و MGWR بررسی کردند. تراکم ساختمان، دید سبز و جاده محرک‌های اصلی LST بوده و ضرایب MGWR دامنه گسترده‌ای نشان داد. بر اساس نتایج، سیاست‌های مکان‌محور و شاخص‌های ریزمقیاس ضروری است (Meng et al., 2025). جوارنه و ابولیبده (۲۰۲۴) دما، مصرف آب/ برق و متغیرهای جمعیتی را با استفاده از GWR/MGWR در دوحه مدل کردند. کاربری اراضی و ساختار خانوار محرک‌های کلیدی بوده و مشخص شد MGWR برای برنامه‌ریزی منابع شهری مناسب است (Jawarneh & Abulibdeh, 2024). احمد و همکاران (۲۰۲۵) مدل‌های پیش‌بینی SUHI را (یادگیری ماشین، عمیق، هیبریدی) مرور کردند. براساس نتایج این تحقیق، مدل‌های عمیق/ هیبریدی دقیق‌ترند و شهرنشینی ۲۰۱۳–۲۰۲۲ نیاز به پیش‌بینی قوی را افزایش داده؛

و در نهایت چارچوبی برای آینده ارائه شد (Ahmed et al., 2025). کونگ و همکاران (۲۰۲۵) SUHI ۲۱۶ شهر (۲۰۱۹-۲۰۲۳) را با استفاده از SVR و داده‌های اقلیمی مدلسازی کردند. براساس نتایج، سرعت باد و نزدیکی به ساحل اثر تعدیل کننده داشته و این پدیده در شهرهای مناطق معتدل شدیدتر است. در این تحقیق، ابزارهای عملی برای مدیریت اقلیمی پیشنهاد شد (Kong et al., 2025). ژونگ و همکاران (۲۰۲۴) ساختار علیّی SUHII ووهان را با PC و تحلیل محلی استخراج کردند. نتایج نشان داد که اثرات این پدیده ناهمگن‌اند و سبزی‌نگی بیشترین تاثیر کاهشی را دارد. در نهایت، یک چارچوب علیّی فضایی ارائه شد (Zhong et al., 2024). زنگ و همکاران (۲۰۲۳) اثر فرم-کارکرد را در منطقه تیانجین بر LST با MGWR تحلیل کردند. براساس نتایج، تراکم و ارتفاع دارای تاثیر مثبت و NDVI/SVF دارای تاثیر منفی‌اند. ناهمگنی خردمقیاس در این پدیده اهمیت دارد (Zeng et al., 2023). لو و همکاران (۲۰۲۳) سری زمانی LST را در منطقه چنگدو (۲۰۲۲-۲۰۰۲) با MGWR/CFSDAF ادغام کردند. نتایج نشان داد که SUHII تابستانی دو برابر شد و انسان محرک اصلی است. استفاده از MGWR نتایج بهتری نسبت به روش های متداول نشان داد (Luo et al., 2023).

پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که در ایران، مطالعات جزیره گرمایی شهری عمدتاً در مقیاس کلان (سطح شهر/منطقه) و با مدل‌های ساده (همبستگی، رگرسیون خطی، جنگل تصادفی، GWR) انجام شده و تحلیل محله‌ای دقیق در بازه‌های زمانی بلندمدت بسیار نادر است. در سطح جهانی نیز با وجود استفاده از داده‌های MODIS/Landsat و مدل‌های GWR/MGWR، همچنان کمبود تحلیل در مقیاس محله، فقدان چارچوب یکپارچه (از موران جهانی تا MGWR و CPI) و عدم شاخص‌های ترکیبی استاندارد (CPI، GI_Z) محسوس است. پژوهش حاضر این شکاف‌ها را با موارد زیر پر می‌کند:

- تحلیل ۱۰ ساله (۲۰۱۵-۲۰۲۵) داده‌های حرارتی و پوشش گیاهی در ۳۵۲ محله تهران
 - به کارگیری شاخص‌های نوین، از جمله GI_Z (امتیاز استاندارد سبز در برابر نفوذناپذیری) و CPI (قدرمطلق ضرایب محلی MGWR)
 - استفاده از زنجیره کامل مدل‌سازی، شامل موران ← OLS ← آزمون‌های LM ← MGWR
 - پردازش ابری Google Earth Engine برای داده‌های حجیم
 - کمی‌سازی ناهمگنی اثر پوشش درختی / نفوذناپذیری در اقلیم نیمه‌خشک
- خروجی پژوهش چارچوب عملی برای اولویت‌بندی مداخلات سبز محله‌ای در کلان‌شهرهای در حال توسعه است (شکل ۱).

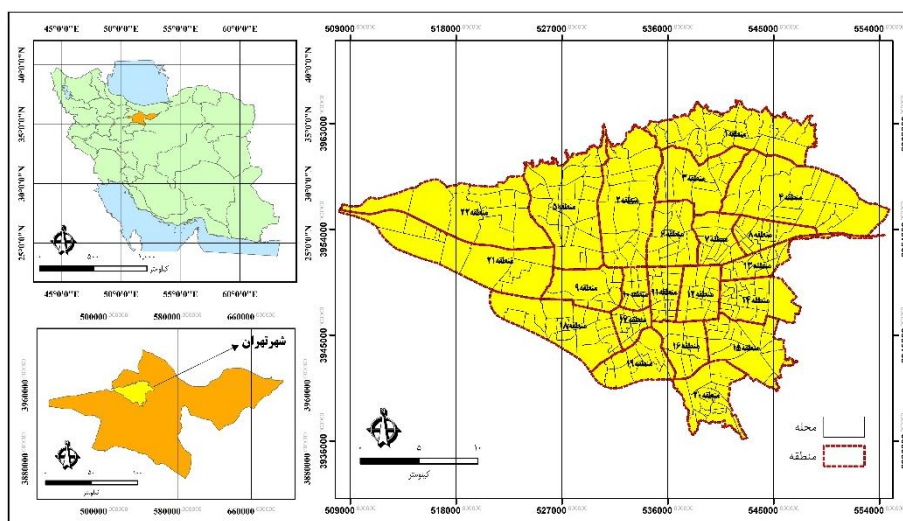


شکل ۱: مدل مفهومی زنجیره تحلیلی جزیره گرمایی شهری تهران

روش‌شناسی پژوهش

- معرفی منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر تهران در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز مرکزی واقع شده و از نظر مختصات جغرافیایی، در محدوده طول شرقی ۵۱ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه، و عرض شمالی ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه قرار دارد (شکل ۲). ارتفاعات این کلان‌شهر از حدود ۹۰۰ متر تا ۱۸۰۰ متر بالای سطح دریا متغیر است و شیب کاهشی ارتفاعی از شمال به سمت جنوب، عامل اصلی ایجاد ریزاقلیم‌های گوناگون و متمایز در بخش‌های مختلف شهر به‌شمار می‌رود (Malekzadeh et al., 2025). طبق نتایج سرشماری سال ۱۳۹۵، جمعیت کلان‌شهر تهران بیش از ۷ میلیون نفر گزارش شده و مساحت کلی آن به ۷۳۰ کیلومترمربع می‌رسد؛ این شهر به ۲۲ منطقه شهرداری، ۱۳۴ ناحیه و ۳۵۲ محله تقسیم‌بندی شده و اقلیم غالب آن نیمه‌خشک با ویژگی‌های بارش محدود و تابستان‌های گرم است. مساحت کل فضای سبز شهری در تهران به ۱۴۰۰۶۱۵ هکتار بالغ می‌شود و سرانه فضای سبز برای هر نفر حدود ۲۷/۱۶ مترمربع محاسبه شده است، اما توزیع نابرابر و نامتوازن این فضاها در مناطق مختلف شهر، یکی از چالش‌های اصلی برنامه‌ریزی شهری به‌حساب می‌آید (Danilina and Majorzadehzahiri, 2021).



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی کلان‌شهر تهران

- داده‌ها و منابع

داده‌های پژوهش ترکیبی از تصاویر سنجنش‌ازدور، مدل ارتفاعی و لایه‌های مکانی است و بازه زمانی آن تابستان‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ را دربرمی‌گیرد. تمامی پردازش‌ها در Google Earth Engine انجام و خروجی‌ها به GIS منتقل شد و شاخص‌های مورد نیاز استخراج گردید. برای مطالعات آینده توصیه می‌شود تحلیل‌های مبتنی بر Raster و داده‌های پوششی انجام شود تا تغییرات فضایی با دقت بالاتری ارزیابی شود. با توجه به هدف سیاست‌گذاری محله‌محور، تحلیل در این مطالعه به صورت واحدهای مکانی تجمیع شده انجام شد و تحلیل‌های raster-based پیوسته خارج از دامنه این پژوهش تعریف گردید. مشخصات داده‌ها در جدول ۱ آمده است. مقادیر ΔT محلات با اختصاص دقیق داده‌های دما به مرز هر محله محاسبه شد تا تغییرات واقعی حرارت سطحی در مقیاس محله ثبت شود.

- تعریف عملیاتی شاخص‌ها

متغیر وابسته در این تحقیق، شدت جزیره گرمایی سطحی (SUHI) است که از تفاضل میانگین دمای سطح محله با میانمای کل شهر از طریق رابطه ۱ محاسبه شد:

$$SUHI=LST_ME-\text{median}(LST_city)$$

رابطه ۱)

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده در پژوهش

منبع داده	سنجنده / محصول	سال‌ها	کاربرد / متغیرهای استخراج شده	قدرت تفکیک
Landsat 8/9(Collection 2)	OLI/TIRS	تابستان‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۵	LST, NDVI, آلبدو	۳۰ متر
Sentinel-2 MSI	Level-2A	۲۰۱۵-۲۰۲۵	تأیید صحت NDVI و پردازش کمکی	۱۰ متر
ESA WorldCover	نسخه ۲۰۲۱	۲۰۲۱	درصد پوشش درخت، آب، سطوح ساخته شده	۱۰ متر
SRTM / NASA DEM	SRTM v3	—	ارتفاع، شیب	۳۰ متر
Boundaries – Tehran Municipality	شیپ فایل محلات	—	مرزبندی ۳۵۲ محله	—

برای کاهش نویز و نوسانات سالانه، شاخص‌های تابستانی هر محله با استفاده از مقدار میانه تابستان‌های ده ساله (۲۰۱۵-۲۰۲۵) محاسبه شدند. این روش امکان شناسایی روندهای بلندمدت دما بدون تأثیرگذاری نوسانات کوتاه‌مدت را فراهم می‌کند. دوره ۱۰ ساله مطالعه و استفاده از میانه مقادیر ده ساله تابستان‌ها به منظور کاهش اثر نوسانات سالانه و افزایش قابلیت اعتماد تحلیل انتخاب شد. دمای سطح (LST) از باند حرارتی لندست با استفاده از رابطه ۲ به سلسیوس تبدیل گردید (Mhanna et al., 2023):

$$LST=ST_B10 \times 0.00341802 + 149.0 - 273.15$$

رابطه ۲)

متغیرهای مستقل (۱۱ شاخص) در جدول ۲ تعریف شده‌اند.

جدول ۲. تعریف عملیاتی شاخص‌های پژوهش

منبع	نحوه محاسبه	شاخص
لندست ۹/۸	(دمای باند حرارتی ضرب در ۰/۰۰۳۴۱۸۰۲ به علاوه ۱۴۹/۰ منهای ۲۷۳/۱۵) برای تبدیل به سلسیوس	میانگین دمای سطح زمین (LST)
	(بازتاب مادون قرمز نزدیک منهای بازتاب قرمز) تقسیم بر (بازتاب مادون قرمز نزدیک به علاوه بازتاب قرمز)	شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)
	۰/۳۵۶ در باند ۲ به علاوه ۰/۱۳۰ در باند ۴ به علاوه ۰/۲۷۳ در باند ۵ به علاوه ۰/۰۸۵ در باند ۶ به علاوه ۰/۰۷۲ در باند ۷ منهای ۰/۰۱۸	آلبدو سطحی (ALBD_ME)
ورلد‌کاور ۲۰۲۰	نسبت مساحت پیکسل‌های درختی به کل مساحت محله	درصد سطح پوشیده از درخت (PCT_TREE)
	نسبت مساحت پیکسل‌های ساخته شده به مساحت محله	درصد سطح نفوذناپذیر (IMP_PCT)
	تعداد پیکسل‌های کلاس ۵۰ (نواحی ساخته شده) × مساحت پیکسل (۱۰ متر) = مجموع مترمربع	مساحت نواحی ساخته شده (BUILT_M2)
	نسبت مساحت پیکسل‌های آبی به مساحت محله	درصد سطح پوشیده از آب (PCT_WTR)
ارتفاع رقومی اس آر تی‌ام	فاصله مرکز هندسی محله تا نزدیک‌ترین پهنه آبی	فاصله تا پهنه آبی (DISTW_M)
	استخراج ارتفاع با ابزار Terrain.slope در گوگل ارث انجین	ارتفاع (ELEV_ME) شیب (SLOP_ME)
ترکیبی	(امتیاز استاندارد پوشش گیاهی به علاوه امتیاز استاندارد درخت به علاوه امتیاز استاندارد آب منهای امتیاز استاندارد نفوذناپذیر) تقسیم بر ۴	شاخص استاندارد زیرساخت سبز (GI_Z)
خروجی نتایج MGWR	ترکیب قدرمطلق ضرایب استاندارد شده رگرسیون وزنی جغرافیایی چندمقیاسی (MGWR) برای ALBD_ME, ELEV_ME, SLOP_ME, PCT_TREE, NDVI ترکیبی	شاخص پتانسیل خنک‌کنندگی (CPI)

– پردازش و کنترل کیفیت

تصاویر تابستانی پس از ماسک ابری و تصحیح اتمسفری، با توابع zonal در سطح ۳۵۲ محله تجمیع شدند. سیستم مختصات به EPSG:32639 تبدیل و مقادیر نامعتبر (خالی/بی‌نهایت) حذف گردید. پرت‌ها با روش دامنه بین‌چارکی شناسایی و تعدیل شد. آمار توصیفی (میانگین، انحراف معیار، چولگی) محاسبه و توزیع با هیستوگرام/باکس‌پلات بررسی گردید.

– تحلیل‌های فضایی

کلیه تحلیل‌های خودهمبستگی فضایی و مدل‌های فضایی بر اساس ماتریس وزن فضایی همسایگی کوئین (Queen contiguity) در سطح محلات انجام شد که امکان در نظر گرفتن تماس‌های رأسی و یالی را فراهم می‌کند.

خودهمبستگی فضایی با موران جهانی: برای بررسی تصادفی یا خوشه‌ای بودن الگوی مکانی دما و سایر متغیرها، از آزمون موران جهانی استفاده شد (رابطه ۳). وجود خودهمبستگی فضایی به معنای نقض فرض استقلال خطاها در مدل خطی معمولی است و لزوم استفاده از مدل‌های فضایی را اثبات می‌کند (Moran, 1950 & Cliff, Ord, 1981).

(رابطه ۳)

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}}$$

همچنین شاخص موران محلی برای شناسایی الگوی خوشه‌ای و نقاط نابهنجار متغیرها از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

(رابطه ۴)

$$I = \frac{(x_i - \bar{x})}{s^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

در این رابطه، x_i خصیصه عارضه i و \bar{x} میانگین مربوط و $w_{i,j}$ وزن فضایی بین عارضه i و j می‌باشد. N برابر با تعداد کل عارضه‌هاست (Xu and Rui., 2024).

لکه‌های داغ: مدل لکه‌های داغ از آماره گتیس ارد جی برای کلیه عوارض موجود در داده‌ها استفاده می‌کند. نمره Z محاسبه شده نشان می‌دهد که در کدام محله، داده‌ها با مقادیر زیاد یا کم خوشه‌بندی شده‌اند. نحوه عملکرد چارچوب مفهومی این تحلیل بدین صورت است که اگر عارضه‌ای مقدار بالا داشته باشد جالب و مهم است، ولی این به این معنی نیست که یک لکه داغ باشد عارضه‌ای لکه داغ تلقی می‌شود که هم خود عارضه و هم عارضه‌های همسایه آن از نظر آماری معنادار باشد. امتیاز Z برای خروجی نهایی زمانی به‌دست خواهد آمد که مجموع محلی عارضه و همسایه آن به‌طور نسبی با جمع کل عارضه‌ها مقایسه گردد (Jang et al., 2024). آماره لکه‌های داغ به‌صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شود که در این رابطه، X_i مقدار خصیصه برای عارضه i ، j و n تعداد کل عارضه‌ها است.

(رابطه ۵)

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{s \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{i,j} \right)^2}{n-1}}}$$

– انتخاب ساختار مدل

ابتدا بر اساس ماتریس همبستگی و عامل تورم واریانس، سه ساختار مدل آزمون شد. مدل اول شامل شاخص زیرساخت سبز، مدل دوم

شامل شاخص پوشش گیاهی و درصد درخت و مدل سوم بدون شاخص سطوح نفوذناپذیر (حساسیت‌سنجی) بود. مدل نهایی بر اساس ضریب تعیین مناسب (R^2 بالا) و عدم هم‌خطی (VIF کمتر از ۵) انتخاب شد. با توجه به هم‌خطی شدید بین شاخص‌های مساحت نواحی ساخته‌شده (BUILT_M2) و درصد سطوح نفوذناپذیر (IMP_PCT)، و همچنین هم‌پوشانی مفهومی BUILT_M2 با اندازه محله، متغیر BUILT_M2 از مدل نهایی حذف شد. IMP_PCT به‌عنوان شاخص نرمال شده و مقیاس ناوابسته نفوذناپذیری، که تفسیر فضایی دقیق‌تری در سطح محله فراهم می‌کند، در مدل حفظ شد.

– مدل‌های آماری و رگرسیون فضایی

فرایند مدل‌سازی شدت جزیره گرمایی سطحی (SUHI) در چهار مرحله متوالی با فرمول‌های ریاضی دقیق اجرا شد.

مرحله ۱: رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS) مدل پایه به‌صورت رابطه ۶ برآورد شد:

$$SUHI_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^8 \beta_k x_{ki} + \epsilon_i, \quad \epsilon_i \sim N(0, \sigma^2) \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن x_k شامل شاخص‌های مورد بررسی شامل میانگین NDVI (NDVI_ME)، درصد سطح پوشیده از درختان (PCT_TREE)، درصد سطوح نفوذناپذیر (IMP_PCT)، میانگین بازتاب سطح زمین (ALBD_ME)، فاصله تا آب‌نماها (DISTW_M)، شاخص زیرساخت سبز (GI_Z)، ارتفاع متوسط محله (ELEV_ME) و شیب متوسط محله (SLOP_ME) است. ضرایب با روش حداقل مربعات (رابطه ۷) تخمین زده شد:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (\text{رابطه ۷})$$

برای بررسی هم‌خطی، VIF تمامی متغیرهای مستقل محاسبه شد. متغیرهای هم‌خط شناسایی و حذف شدند و جدول VIF به‌روزرسانی شد تا تنها متغیرهای مستقل نهایی با هم‌خطی قابل قبول در مدل‌های رگرسیونی وارد شوند. بدین ترتیب که، VIF (عدم هم‌خطی) کمتر از ۵ در نظر گرفته شد و آزمون Jarque-Bera (نرمال بودن باقیمانده) و LM-Lag/Error (وابستگی فضایی) نیز انجام شدند. (Eshetie, 2024).

مرحله ۲: آزمون‌های ضریب لاگ‌رانژ و مدل‌های فضایی: در این مرحله، برای تشخیص وابستگی فضایی، آزمون‌های LM بر باقیمانده‌های OLS اجرا شد (رابطه ۸):

$$LM_{lag} = \frac{(e^T W y / \hat{\sigma}^2)^2}{tr(W X (X^T X)^{-1} X^T W^T)}, \quad LM_{error} = \frac{(e^T W e / e^T e)^2}{tr((I - W \hat{\Sigma} W)^T (I - W \hat{\Sigma} W)) / n} \quad (\text{رابطه ۸})$$

نتایج LM-Error و Robust LM-Error در مدل خطای فضایی (SEM) غالب بود؛ بنابراین مدل خطای فضایی به جای مدل‌های تأخیر فضایی (SLM) و مدل دوربین فضایی (SDM) انتخاب شد (رابطه ۹):

$$SUHI = X\beta + u, \quad u = \lambda W u + \epsilon, \quad \epsilon \sim N(0, \sigma^2 I) \quad (\text{رابطه ۹})$$

$\lambda \approx 0.69$ ($p < 0.01$), Pseudo $R^2 \approx 0.75$, Moran's I ≈ 0 . باقیمانده‌های

مدل‌های جایگزین:

$$(SLM): \text{مدل تأخیر فضایی: } SUHI = \rho W SUHI + X\beta + \epsilon$$

$$(SDM): \text{مدل دوربین فضایی: } SUHI = \rho W SUHI + X\beta + W X \gamma + \epsilon \quad (\text{Chen et al., 2025})$$

مرحله ۳: رگرسیون وزنی جغرافیایی چندمقیاسی (MGWR) در این مرحله، برای تحلیل ناهمگنی مکانی از رابطه ۱۰ استفاده شد:

$$SUHI_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i)x_{ki} + \epsilon_i \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

ضرایب محلی، براساس رابطه ۱۱، با کرنل گاوسی محاسبه گردید (Fotheringham et al, 2017 & Oshan et al., 2019):

$$\hat{\beta}(u_i, v_i) = (X^T G_i X)^{-1} X^T G_i Y, \quad G_i = \exp\left(-\frac{d_i^2}{2bw_k^2}\right) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

همچنین، اثر ترکیبی زیرساخت سبز (شاخص ثانویه مبتنی بر خروجی مدل)، براساس رابطه ۱۲ محاسبه شد:

$$\text{GreenEffect}_i = \beta^{\text{NDVI}-i} \times Z(\text{NDVI})_i + \beta^{\text{TREE}-i} \times Z(\text{TREE})_i \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

Local R2≈0.87 R2≈0.8, AICc≈1010

مرحله ۴: شاخص پتانسیل خنک‌سازی (CPI) این شاخص با استفاده از رابطه ۱۳ به صورت زیر محاسبه شد:

$$CPI_i = Z(SUHI_i) \times \sum_{k=1}^8 |Z(\hat{\beta}_{k,i})| \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

CPI با کواتایل به ۵ طبقه بر مبنای ترکیب UHI بالا و CPI بالا اولویت‌بندی شد (U.S. Environmental Protection Agency, 2024).

جدول ۳. مقایسه برآزش مدل‌ها

وضعیت	Moran's I باقیمانده	AICc	Pseudo R2	مدل
رد (وابستگی فضایی)	*۳/۴۷	۱۲۵۰	۰/۶۲	OLS
بهبود (ناهمگنی باقی‌مانده)	-۰/۸۸	۱۱۰۵	۰/۷۵	SEM
بهبود	تصادفی	۱۰۱۰	۰/۸۷	MGWR

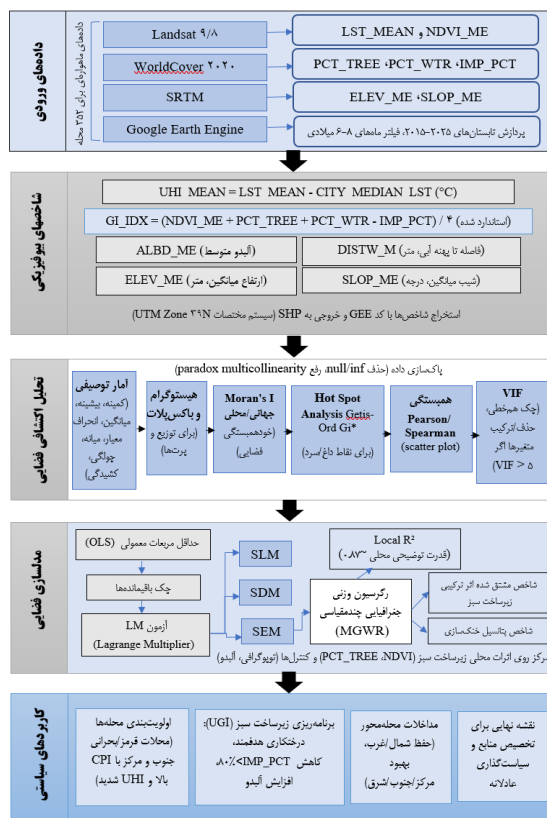
(*p<۰/۰۱)

شکل ۳ فرایند انجام پژوهش را نشان می‌دهد. این فرایند قابلیت تعمیم به سایر کلان‌شهرها را دارد و ابزار علمی برای تخصیص بهینه منابع را فراهم می‌کند.

یافته‌های پژوهش

تحلیل توصیفی شاخص‌های پژوهش

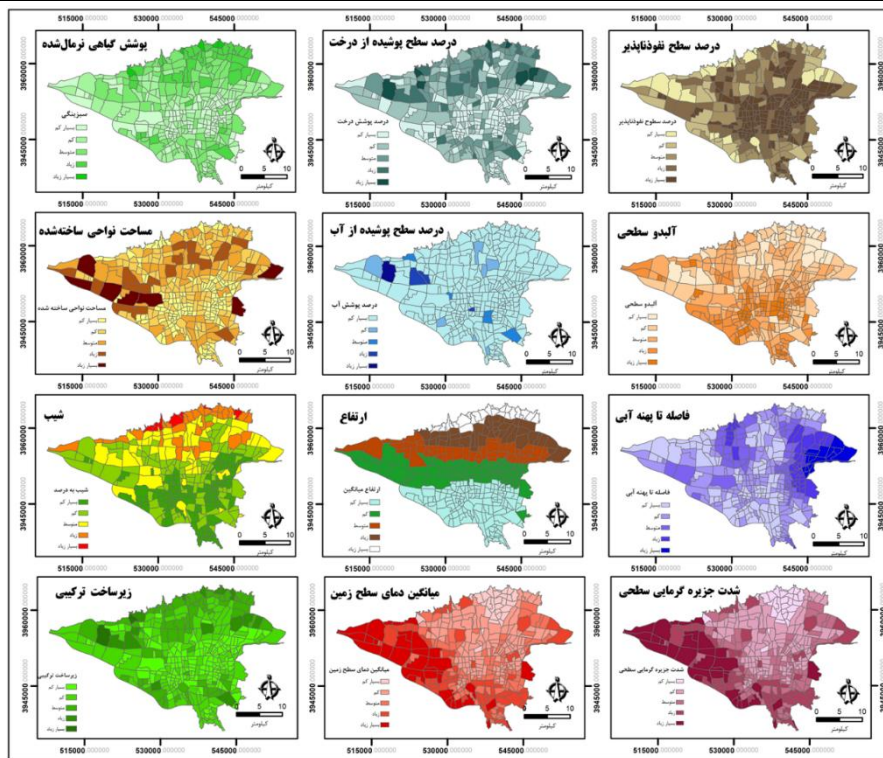
تحلیل توصیفی میانگین دمای سطح زمین (۴۴/۲۱ درجه سانتی‌گراد) را یکنواخت اما شدت جزیره گرمایی سطحی (۰/۱۰ درجه سانتی‌گراد) را به صورت ناهمگن میان محله‌ها نشان داد. شاخص پوشش گیاهی (۰/۸۰) و پوشش درختی (۷/۲۹ درصد) پایین، سطح نفوذناپذیر (۸۵/۹۹ درصد) و مساحت ساخته شده (۱۳۷۹۲۶۷/۱۹ مترمربع) بالا، ارتفاع (۱۲۶۵ متر)، شیب (۳/۹۷ درجه) ناهموار، فاصله تا پهنه آبی (۲۲۸۶/۳۸ متر) و سطح آب (۰/۰۸ درصد) محدود و شاخص استاندارد زیرساخت سبز (۰) با پراکندگی بالا توزیع نامتوازن را تأیید می‌کند (جدول ۴ و شکل ۴). ناهمگنی سبزی‌نگی، تراکم ساخت‌وساز و سطوح نفوذناپذیر نقش کلیدی در تشدید جزیره گرمایی سطحی تهران دارند.



شکل ۳: فرایند انجام پژوهش

جدول ۴. تحلیل توصیفی شاخص‌های پژوهش

شاخص	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
میانگین دمای سطح زمین	۳۸/۲۱	۵۱/۷۳	۴۴/۲۱	۲/۵۶
شاخص پوشش گیاهی نرمال شده	۰/۰۴	۰/۲۳	۰/۰۸	۰/۰۳
درصد سطح پوشیده از درخت	۰	۶۳/۱۳	۷/۲۹	۸/۹۶
درصد سطح نفوذناپذیر	۲۲/۵۷	۱۰۰	۸۵/۹۹	۱۶/۱۳
مساحت نواحی ساخته شده	۹۸۳۲۰/۷۳	۱۰۱۰۶۸۵۰/۵۰	۱۳۷۹۲۶۷/۱۹	۱۱۶۱۹۰۹/۵۷
درصد سطح پوشیده از آب	۰/۰۰	۱۳/۳۰	۰/۰۸	۰/۷۵
آلبدو سطحی	۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۰۱
ارتفاع	۰/۱۰۳۸	۱۷۶۳	۱۲۶۵	۱۷۳
شیب	۲/۰۳	۱۵/۶۶	۳/۹۷	۲/۰۱
فاصله تا پهنه آبی	۹۵/۷۵	۱۰۲۳۹/۰۸	۲۲۸۶/۳۸	۱۸۲۴/۸۱
شاخص استاندارد زیرساخت سبز	-۰/۸۶	۶/۳۹	۰	۰/۷۷
شدت جزیره گرمایی سطحی	۶/۱۱	۷/۴۱	۰/۱۰	۲/۵۶



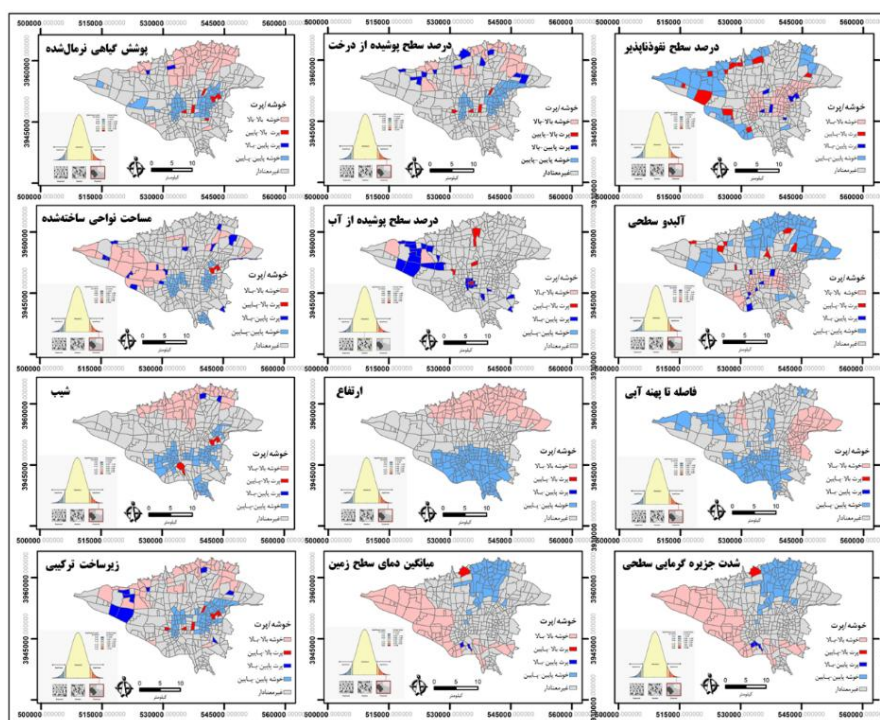
شکل ۴. نقشه وضع موجود شاخص‌های پژوهش

تحلیل خودهمبستگی فضایی

آزمون موران جهانی الگوی خوشه‌ای معنادار را برای همه شاخص‌ها تأیید کرد ($p < 0.000$; جدول ۵). شدت جزیره گرمایی سطحی ($0/۷۲۴۵$) قوی‌ترین خوشه‌بندی را با تمرکز گرم در جنوب/ مرکز و خنک در شمال نشان داد. پوشش گیاهی ($0/۵۴۶۷$) و آلودگی ($0/۵۱۷۳$) مثبت در شمال، نفوذناپذیر ($0/۴۶۰۱$)، ساخته‌شده ($0/۲۷۹۰$) و درخت ($0/۳۲۶۵$) در مرکز/ شمال شرق، ارتفاع ($0/۹۵۲۱$)، شیب ($0/۶۷۰۳$)، فاصله آبی ($0/۸۸۷۴$) و GI_Z ($0/۳۵۵۸$) ناهمگنی شمال- جنوب را برجسته کردند. سطح آب ($-0/۰۰۰۳$) دارای حالت تصادفی است (شکل ۵). نتایج جدول ۵ سازمان‌یافتگی نابرابر گرما، سبزیگی، نفوذناپذیری و توپوگرافی تهران را آشکار می‌سازد.

جدول ۵. نتایج آزمون موران جهانی شاخص‌های پژوهش

شاخص	موران جهانی	امتیاز استاندارد	مقدار احتمال	الگوی فضایی
میانگین دمای سطح زمین	$0/۷۲۴۵$	$۲۲/۹۴$	$0/۰۰۰$	خوشه‌ای قوی
شاخص پوشش گیاهی	$0/۵۴۶۷$	$۱۷/۴۰$	$0/۰۰۰$	خوشه‌ای مثبت
درصد سطح پوشیده از درخت	$0/۳۲۶۵$	$۱۰/۵۰$	$0/۰۰۰$	خوشه‌ای ضعیف
درصد سطح نفوذناپذیر	$0/۴۶۰۱$	$۱۴/۶۳$	$0/۰۰۰$	خوشه‌ای مثبت
مساحت نواحی ساخته‌شده	$0/۲۷۹۰$	$۹/۰۸$	$0/۰۰۰$	خوشه‌ای مثبت
درصد سطح پوشیده از آب	$-0/۰۰۰۳$	$0/۱۷$	$0/۸۶۴$	بدون الگوی معنادار
آلودگی سطحی	$0/۵۱۷۳$	$۱۶/۴۰$	$0/۰۰۰$	خوشه‌ای مثبت
ارتفاع	$0/۹۵۲۱$	$۳۰/۱۱$	$0/۰۰۰$	خوشه‌ای بسیار قوی
شیب	$0/۶۷۰۳$	$۲۱/۴۵$	$0/۰۰۰$	خوشه‌ای مثبت
فاصله تا پهنه آبی	$0/۸۸۷۴$	$۲۸/۱۷$	$0/۰۰۰$	خوشه‌ای بسیار قوی
شاخص استاندارد زیرساخت سبز	$0/۳۵۵۸$	$۱۱/۵۵$	$0/۰۰۰$	خوشه‌ای مثبت
شدت جزیره گرمایی سطحی	$0/۷۲۴۵$	$۲۲/۹۴$	$0/۰۰۰$	خوشه‌ای قوی



شکل ۵. نقشه الگوهای فضایی شاخص‌های پژوهش

تحلیل نقاط داغ

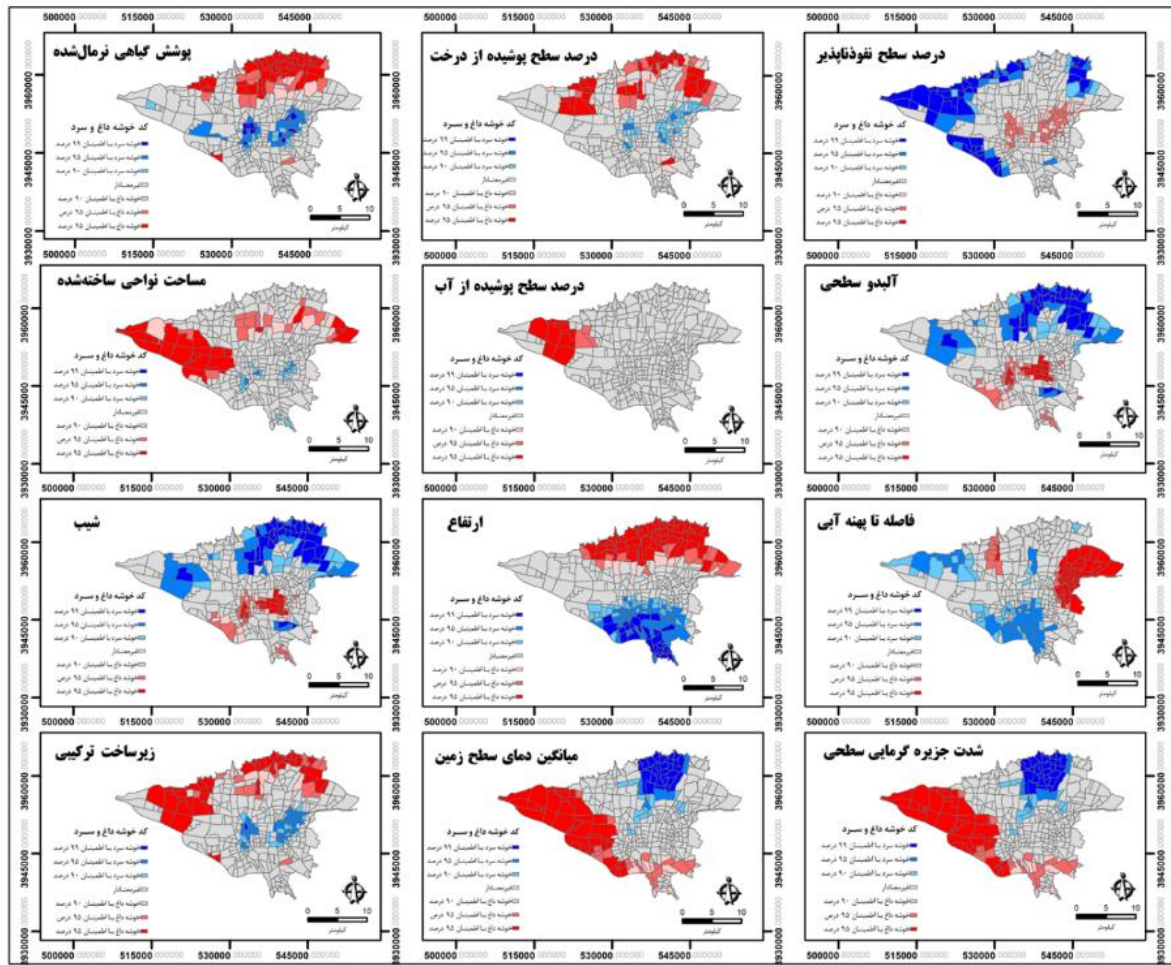
تحلیل Getis-Ord G_i^* الگوی تجمع فضایی را نشان داد، بدین ترتیب که شمال تهران خوشه‌های داغ پوشش گیاهی و سبزی‌نگی، مرکز/ جنوب خوشه‌های سرد گیاهی دارد. سطوح نفوذناپذیر و شدت جزیره گرمایی سطحی در مرکز، شرق و جنوب خوشه‌های داغ (غلبه ساخت‌وساز و تراکم)، شمال خوشه‌های سرد گرمایی (سبزی‌نگی/ ارتفاع بالا) را تشکیل می‌دهد. تراکم جمعیت/ ساختمانی (مرکز/ جنوب شرقی) و پوشش علفی (مرکز/ جنوب غربی) بیشترین خوشه‌های داغ‌اند. هم‌پوشانی داغ نفوذناپذیری/ تراکم/ گرما با سرد سبزی‌نگی، ضرورت افزایش پوشش گیاهی در جنوب/ مرکز را تأیید می‌کند (شکل ۶).

تحلیل همبستگی‌های کلیدی و پارادوکس فضایی

نتایج همبستگی پیرسون ارتفاع (همبستگی = $-0/45$ ، سطح معناداری کمتر از $0/001$)، درصد سطوح نفوذناپذیر (همبستگی = $-0/38$ ، سطح معناداری کمتر از $0/001$)، شاخص پوشش گیاهی (همبستگی = منفی $0/28$ ، سطح معناداری کمتر از $0/001$) و شیب (همبستگی = $-0/17$ ، سطح معناداری کمتر از $0/01$) را قوی‌ترین عوامل منفی SUHII نشان داد، در حالی که شاخص زیرساخت سبز رابطه معناداری نشان نداد (همبستگی = $0/02$ ، سطح معناداری بیشتر از $0/05$). رگرسیون ساده نفوذناپذیر-SUHII تنها $R^2 = 0/14$ توضیح داد؛ پارادوکس فضایی (همبستگی ارتفاع-نفوذناپذیر؛ شمال مرتفع/ کم‌نفوذناپذیر/ خنک) اثر مستقیم شاخص‌ها بر یکدیگر را تحت تأثیر قرار داد. این نتایج ضرورت مدل‌های چندمتغیره فضایی مانند MGWR را توجیه می‌کند.

تحلیل مدل‌سازی اثرات فضایی

مدل حداقل مربعات معمولی (آر مجذور = $0/62$) وابستگی فضایی باقیمانده‌ها را با آماره خودهمبستگی موران برابر $3/47$ (سطح معناداری کمتر از $0/001$) نشان داد؛ بیشینه ضریب تورم واریانس برابر $4/2$ (کمتر از ۵) عدم هم‌خطی شدید متغیرها را تأیید کرد. آزمون‌های لاگرانژ مولتی‌پلایر (مدل تأخیر فضایی = $45/2$ ، مدل خطای فضایی = $52/1$ ؛ هر دو سطح معناداری کمتر از $0/001$) مدل خطای فضایی را مناسب



شکل ۶. نقشه آماره نقطه داغ شاخص‌های پژوهش

تشخیص داد (ضریب خودرگرسیون فضایی لامبدا = $0/69$ ، سطح معناداری کمتر از $0/001$ ؛ شبه آر مجذور = $0/75$ ؛ آماره خودهمبستگی موران باقیمانده‌ها = $-0/88$ ؛ جدول ۶). مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی چندمقیاسی برتر از مدل خطای فضایی عمل کرد (آر مجذور تعدیل شده = $0/87$ در برابر $0/75$ ؛ معیار اطلاعات آکائیکه تعدیل شده = 2286 در برابر 2357 ؛ سطح معناداری خودهمبستگی موران باقیمانده‌ها = $0/80$ ؛ کاهش 71 واحدی معیار اطلاعات آکائیکه تعدیل شده). از 11 شاخص اولیه، 7 متغیر بر اساس معیار اطلاعات آکائیکه تعدیل شده و آماره تی محلی (سطح معناداری کمتر از $0/05$ در بیش از 50 درصد محله‌ها) انتخاب شد؛ متغیرهای حذف شده (مانند فاصله تا پهنه‌های آبی و مساحت ساخته شده) به دلیل ضریب تورم واریانس بیش از 8 و اثر غیرمعنادار (کمتر از 20 درصد محله‌ها) کنار گذاشته شدند (Fotheringham et al, 2017؛ جدول ۷). مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی چندمقیاسی برازش بسیار مطلوب دارد (آر مجذور = $0/9394$ ، آر مجذور تعدیل شده = $0/9224$ ، معیار اطلاعات آکائیکه تعدیل شده = $212/736$ واریانس خطا = $0/0775$ ؛ جدول ۶). درصد سطوح نفوذناپذیر (100 درصد)، پوشش درختی ($92/90$ درصد)، ارتفاع میانگین ($94/60$ درصد) و آلودگی ($94/89$ درصد) بیشترین قدرت تبیین فضایی را دارند؛ شاخص پوشش گیاهی نرمال شده ($50/28$ درصد) و شیب ($21/31$ درصد) کمتر معنادارند (شکل ۷). در مورد ضرایب محلی کلیدی شامل شاخص پوشش گیاهی نرمال شده ($52/1 -$)، پوشش درختی ($0/11 -$)، آلودگی ($6/71 -$)؛ همه سطح معناداری کمتر از $0/001$) است، در حالیکه سطوح نفوذناپذیر (مثبت) دارای آر مجذور محلی $0/62 - 0/88$ است (شکل ۸). شاخص زیرساخت سبز بر پایه ضرایب محلی شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و پوشش درختی، ناهمگنی خنک‌کنندگی را در سطح محله‌ها ترسیم می‌کند و محلات اولویت‌دار مداخله سبز را شناسایی می‌نماید.

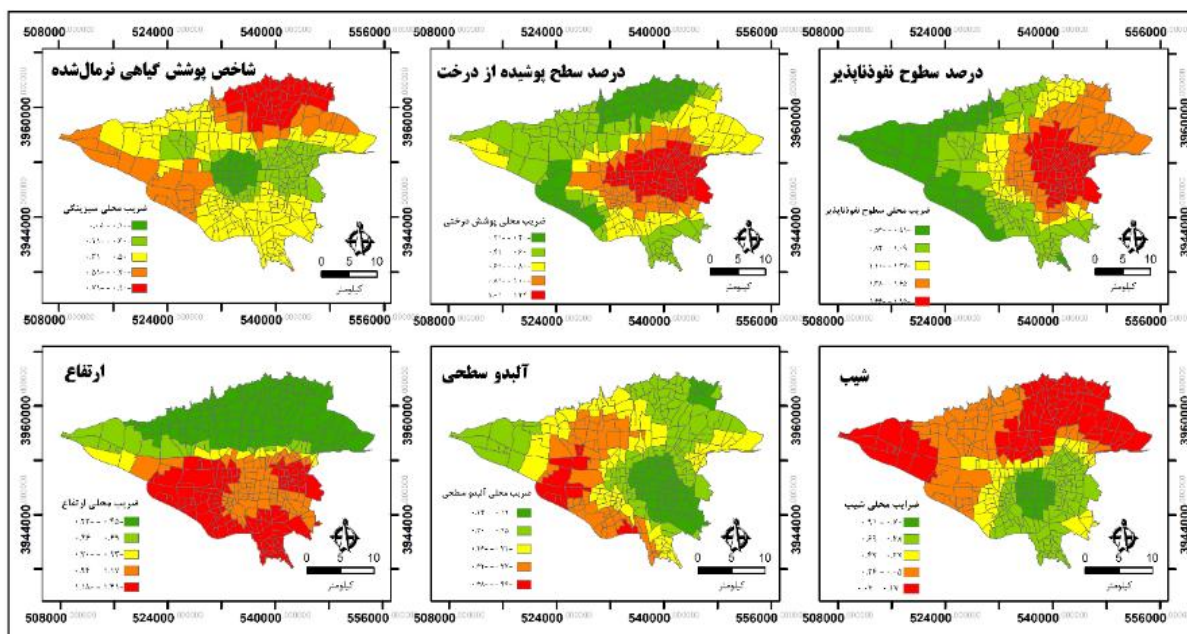
جدول ۶. شاخص‌های کلی برازش مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی چندمقیاسی

مدل	R ²	R ² تعدیل‌شده	معیار اطلاعات اصلاح‌شده (AICc)	واریانس خطا (σ ²)	واریانس خطا (MLE)	درجات آزادی مؤثر
رگرسیون وزنی جغرافیایی چندمقیاسی	۰/۹۳۹۴	۰/۹۲۲۴	۲۱۲/۷۳۶	۰/۰۷۷۵	۰/۰۶۰۶	۲۷۵/۴۱۳۶

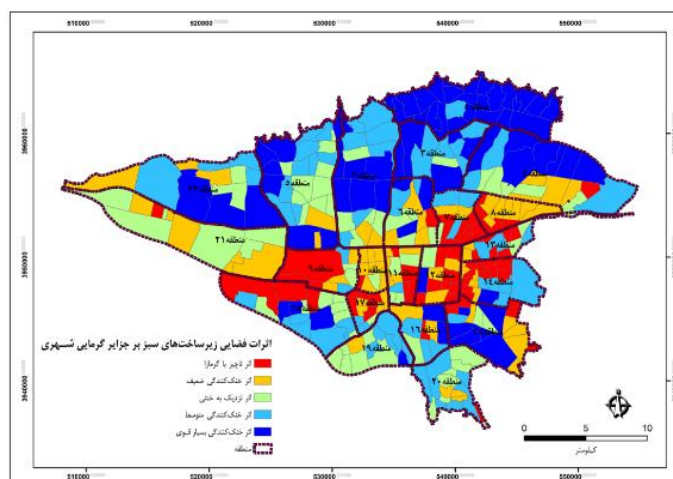
مقدار بالای ضریب تعیین در مدل MGWR لزوماً به معنای بیش‌برازش نیست، بلکه بازتاب ناهمگنی مکانی شدید و عملکرد مدل در تفکیک روابط محلی در مقیاس محله‌ای است؛ این موضوع با تصادفی بودن خودهمبستگی فضایی باقیمانده‌ها و کاهش معنی‌دار AICc تأیید می‌شود.

جدول ۷. پارامترهای فضایی متغیرهای وارد شده در مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی چندمقیاسی

شاخص / پارامتر	طول باند (تعداد همسایگان)	درصد همسایگان از کل عوارض	تعداد مؤثر پارامترها	آلفای تعدیل‌شده	مقدار بحرانی آماره تی	درصد محلات با ضریب معنادار
عرض از مبدأ	۴۳	۱۲/۲۲	۱۲/۴۸	۰/۰۰۴۰	۲/۹۰۲۲	۶۳ محله (۱۷/۹۰)
پوشش گیاهی نرمال‌شده	۴۰	۱۱/۳۶	۱۳/۶۷	۰/۰۰۳۷	۲/۹۳۱۵	۱۷۷ محله (۵۰/۲۸)
درصد درختان	۴۱	۱۱/۶۵	۱۳/۲۶	۰/۰۰۳۸	۲/۹۲۱۷	۳۲۷ محله (۹۲/۹۰)
شیب میانگین	۵۵	۱۵/۶۲	۹/۶۷	۰/۰۰۵۲	۲/۸۱۸۷	۷۵ محله (۲۱/۳۱)
ارتفاع میانگین	۸۰	۲۲/۷۳	۵/۱۴	۰/۰۰۹۷	۲/۶۰۳۶	۳۳۳ محله (۹۴/۶۰)
آلبدوی میانگین	۸۰	۲۲/۷۳	۸/۱۹	۰/۰۰۶۱	۲/۷۶۳۶	۳۳۴ محله (۹۴/۸۹)
درصد سطوح نفوذناپذیر	۴۱	۱۱/۶۵	۱۴/۱۶	۰/۰۰۳۵	۲/۹۴۲۷	۳۵۲ محله (۱۰۰)



شکل ۷. نقشه ضرایب محلی متغیرهای معنادار در مدل وزن‌دهی شده جغرافیایی چندمقیاسی



شکل ۸. نقشه ضرایب محلی متغیرهای معنادار در مدل وزن‌دهی شده جغرافیایی چندمقیاسی

اولویت‌بندی فضایی مداخلات زیرساخت سبز شهری

بر اساس نتایج تحقیق، شاخص پتانسیل خنک‌سازی (CPI) برای اولویت‌بندی فضایی مداخلات زیرساخت سبز توسعه یافت که ترکیبی از نیاز حرارتی محله (شدت جزیره گرمایی سطحی) و ظرفیت اثربخشی (قدرمطلق ضرایب محلی MGWR پوشش گیاهی/ درختی، نفوذناپذیر، آلودگی، توپوگرافی) است. این شاخص محلات را رتبه‌بندی می‌کند و سیاست‌های سبزسازی را هدفمند می‌سازد. شاخص CPI صرفاً بر اساس متغیرهایی تعریف شد که در بیش از ۵۰ درصد محلات دارای ضرایب محلی معنادار در MGWR بودند تا از ورود متغیرهای ناپایدار یا وابسته به مکان خاص جلوگیری شود (جدول ۸؛ شکل ۹).

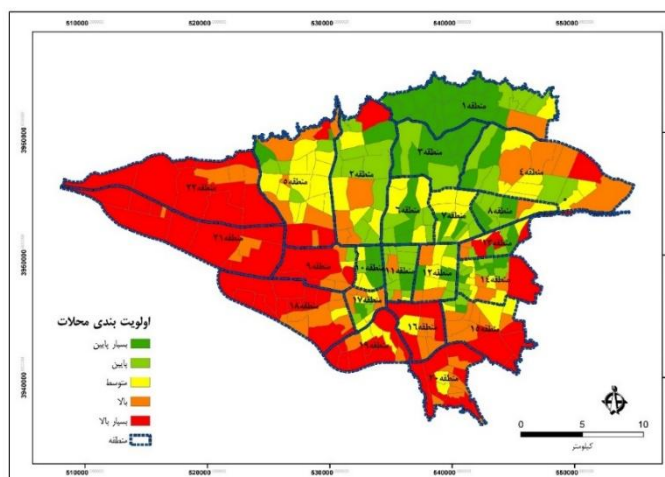
جدول ۸. طبقه‌بندی اولویت مداخله و راهبردهای پیشنهادی

رده	ویژگی‌های کلیدی	راهبرد پیشنهادی	نمونه محلات
بسیار بالا	UHI بالا + اثر خنک‌کنندگی سبز بسیار قوی	مداخله اضطراری گرما: درختکاری سایه‌دار بزرگ‌مقیاس و پارک‌های خنک‌کننده؛ بام/ دیوار سبز عمومی/ صنعتی؛ نفوذپذیرسازی سطوح؛ الزام سایه/ نفوذپذیری در ضوابط شهرسازی؛ مراکز خنک‌کننده و حمایت آسیب‌پذیران	فرودگاه، فتح، شریعتی جنوبی، پاسداران، دولتخواه شمالی، شهرک دانشگاه، خلیج‌فارس شمالی، اسماعیل‌آباد، دولتخواه جنوبی، چیتگر جنوبی
بالا	UHI بالا + اثر خنک‌کنندگی سبز قوی	خنک‌سازی معابر/ نیمه‌عمومی؛ درختکاری پیوسته و پارک جیبی؛ کف‌سازی نفوذپذیر؛ آبیاری هوشمند تبخیر- تعرق؛ ادغام کاهش گرما در طرح‌های موضعی/ تفصیلی	مطهری، یافت‌آباد جنوبی، عباس‌آباد، حر، کیانشهر جنوبی، تختی، ارم، شهرک آزمایش، علی‌آباد جنوبی، قائم
متوسط	UHI متوسط + اثر متوسط	ارتقای کیفی سبز موجود؛ نگهداری/ تقویت گیاهی؛ درختکاری تکمیلی سایه‌دار/ مقاوم؛ پیوستگی لکه‌های سبز؛ بودجه پایدار نگهداشت/ کاهش گرما برای پیشگیری پرخطر	نازی‌آباد، ابوذر، نظام‌آباد، پامنار، بهارستان، بازار، مرزداران، خانی‌آباد نو، افسریه شمالی، نارمک
نسبتاً پایین	UHI نسبتاً پایین + اثر محدود یا اشباع‌شده	حفاظت خنک‌کنندگی؛ جلوگیری قطع درخت بالغ؛ کنترل کاربری/ تراکم گرمازا؛ ادغام شاخص حرارتی در ارزیابی توسعه؛ پیش‌بلندمدت خدمات سرمایه‌ش	توحید، ارمنه، سلامت، فاطمی، شکوفه، زاهدگیلانی، تهرانپارس شرقی، فرحزاد، ابوذر شرقی، تهران ویلا
پایین	UHI پایین (خنک) + اثر نسبتاً اشباع‌شده	مدیریت اکولوژیک؛ جلوگیری ساخت فشرده/ تراکم؛ حفاظت باغات/ فضاهای باز/ توپوگرافی؛ کریدورهای سبز شهری - منطقه‌ای؛ ذخیره‌گاه سرمایه‌ش کلان	دزاشیب، قلهک، دروس، نیاوران، جماران، دربند، باغ فردوس، حصار بوعلی، امامزاده قاسم، تجریش

بحث

یافته‌های مطالعه نشان می‌دهد پوشش درختی نقش کلیدی در تعدیل جزیره گرمایی سطحی محله‌ای تهران دارد، در حالی که سطوح نفوذناپذیر و بافت متراکم تشدیدکننده اصلی‌اند. مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی چندمقیاسی روابط ناهمگن را آشکار می‌سازد و سیاست‌های

محلّه محور را ضروری می‌کند.



شکل ۹. اولویت‌بندی فضایی مداخلات زیرساخت سبز شهری در سطح محلات تهران

این پژوهش با به کارگیری داده‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۵، GI_Z و CPI ، چارچوب نوآورانه‌ای برای کلان‌شهرهای در حال توسعه ارائه می‌دهد و مطالعات پیشین را تکمیل می‌کند. هریسچیان و همکاران (۱۴۰۴) پوشش گیاهی را در کاهش دمای کره‌مرطوب و افزایش بهره‌وری تبریز مؤثر دانستند؛ مطالعه حاضر آن را تأیید و پوشش درختی را برتر از $NDVI$ کلی (به‌ویژه جنوب تهران؛ توضیح $< 80\%$ درصد نفوذناپذیر) می‌شمارد. قربانی و سجادی‌زاده (۱۴۰۳) همبستگی منفی $NDVI-LST$ کرج را گزارش کردند؛ پژوهش حاضر آن را غیرخطی / مقیاس‌پذیر یافت (ضعیف‌تر در شمال به دلیل توپوگرافی). صلاحی و فروتن (۱۴۰۳) در پژوهش خود گرادیان غرب-شرق و تمرکز جنوب‌شرقی تهران را نشان دادند؛ مطالعه فعلی آن را به نابرابری پوشش درختی (با ضرایب محلی تا -0.65) نسبت می‌دهد. در سطح بین‌المللی Connors et al. (۲۰۱۳) رابطه غیرخطی منظر- LST را بررسی کردند؛ پژوهش حاضر با ادغام توپوگرافی، اثر منفی قوی ارتفاع در شمال را نشان می‌دهد. Marando et al. (۲۰۲۲) نقش زیرساخت سبز را در شهرهای اروپایی تأیید کردند، اما این پژوهش با $MGWR$ نشان داد که در اقلیم نیمه‌خشک تهران، اثر آن برخلاف مدل‌های خطی ساده (Wang et al., 2025)، به‌شدت وابسته به مکان است. براساس نتایج، از منظر مکانیسمی، پوشش درختی از طریق سایه‌اندازی، تبخیر-تعرق و کاهش شار محسوس عمل می‌کند (همراستا با Oke, 1982)، اما ناهمگنی $MGWR$ نشان می‌دهد این مکانیسم‌ها در جنوب (با آلودگی پایین) تقویت و در شمال تحت تأثیر توپوگرافی قرار می‌گیرند (همخوان با Huang et al., 2025). خودهمبستگی فضایی مثبت ($Moran > 0$; Anselin, 1988) با $MGWR$ به مکانیسم‌های چندمقیاسی عمیق‌تر تبدیل می‌شود. رویکرد مطالعه-پردازش داده‌ها در Google Earth Engine و ترکیب مدل‌های فضایی-تحقیقات آینده را تسهیل می‌کند؛ شاخص‌های GI_Z و CPI ابزارهای آماده برای اولویت‌بندی مداخلات هستند و روش در شهرهای مشابه (مانند Eshetie, 2024) یا با داده‌های IoT (Jang et al., 2024) قابل تعمیم است. ترکیب سه شاخص $SUHI$ ، GIZ و CPI چارچوبی عملی برای اولویت‌بندی مداخلات سبز فراهم می‌کند؛ محلات با $SUHI$ بالا به همراه CPI پایین (پتانسیل خنک‌کنندگی ضعیف) باید در اولویت توسعه زیرساخت‌های سبز قرار گیرند. به‌عنوان مثال، محلات مناطق ۱۵-۲۰ (جنوبی؛ ارتفاع پایین، شیب کم، $GIZ \approx -0.5$ ، CPI پایین) در مقایسه با مناطق ۱-۶ (شمالی؛ ارتفاع بالا، شیب متوسط، $GIZ \approx +0.8$) پتانسیل خنک‌کنندگی بیشتری از طریق کاشت درخت و سطوح روشن دارند، زیرا محدودیت‌های توپوگرافی کمتری تجربه می‌کنند. این رویکرد امکان تخصیص هدفمند منابع محدود شهرداری را فراهم می‌آورد و عدالت حرارتی را در کلان‌شهر تضمین می‌کند. در چشم‌انداز کلی، مقابله با $SUHI$ نیازمند گذار به مدل‌های فضایی چندمقیاسی است؛ چالش‌هایی مانند تغییرات جهانی اقلیم (Zhan et al., 2025) و نابرابری اجتماعی (Cleland et al., 2023) نیاز به مطالعات میان‌رشته‌ای را نشان می‌دهند. در نهایت، توسعه شاخص CPI بر پایه ضرایب محلی $MGWR$ ، اهمیت مهندسی اکولوژیک شهری را برجسته و ابزار GIS-based برای

سیاستگذاران فراهم می‌کند و این پژوهش را از مطالعات سنتی متمایز می‌سازد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تبیین الگوی فضایی جزایر گرمایی سطحی و شناسایی نقش زیرساخت سبز، نفوذناپذیری و ویژگی‌های توپوگرافی، پویایی گرمایش شهری تهران را در مقیاس ۳۵۲ محله بررسی کرد. مسئله اصلی، درک این موضوع بود که کدام مؤلفه‌ها، در چه بخش‌هایی از شهر، بیشترین سهم را در تشدید یا تعدیل گرمایش دارند و چگونه می‌توان بر پایه تحلیل‌های فضایی پیشرفته، مداخلات محله‌محور مؤثر طراحی کرد. نتایج نشان داد که گرمایش شهری تهران پدیده‌ای یکنواخت نیست، بلکه ساختاری ناهمگن، مکان وابسته و چندمقیاسی دارد. سطوح نفوذناپذیر و تراکم کالبدی، قوی‌ترین محرک افزایش دمای سطح زمین بوده و بخش عمده‌ای از تغییرات فضایی LST را توضیح می‌دهند، در حالی که پوشش درختی مؤثرترین مؤلفه زیرساخت سبز در کاهش گرماسی و برخلاف شاخص NDVI، در اغلب محلات اثر خنک‌کنندگی معنادار و پایدار دارد. همچنین، نقش منفی ارتفاع و تا حدی شیب، به‌ویژه در شمال شهر، بیانگر تأثیر سازمان‌دهنده توپوگرافی در شکل‌گیری لکه‌های حرارتی است. تحلیل‌های MGWR نشان داد که روابط بین متغیرها ناهمگن و مکان‌وابسته‌اند و تنها چارچوب‌های چندمقیاسی قادر به تبیین این پیچیدگی فضایی هستند. بر این اساس، شاخص پتانسیل خنک‌سازی (CPI) محلات جنوب، جنوب‌غرب و بخش‌هایی از مرکز را به‌عنوان نواحی دارای هم‌زمان شدت گرمایش و ظرفیت بالای پاسخ به مداخلات سبز شناسایی کرد. این یافته‌ها از منظر نظری، بر ضرورت گذار از مدل‌های جهانی و میانگین‌محور به چارچوب‌های فضایی-مقیاسی در تحلیل جزایر گرمایی شهری تأکید می‌کند. از نظر عملی و سیاستی، نتایج نشان می‌دهد که رویکردهای یکسان‌نگر در سطح کل شهر کارآمد نیستند و برنامه‌ریزی کاهش گرما باید به‌صورت محله‌محور و مبتنی بر شواهد فضایی انجام شود. توسعه هدفمند پوشش درختی در محلات گرم جنوب و شرق، نفوذپذیرسازی معابر و بهبود ویژگی‌های بازتابی سطوح در بافت‌های پرتراکم مرکزی می‌تواند بیشترین بازده حرارتی بالقوه را ایجاد کند. همچنین، اختلاف ارتفاع تهران باید به‌عنوان یک متغیر راهبردی در طراحی سیاست‌های تاب‌آوری حرارتی لحاظ شود. محدودیت تفکیک مکانی تصاویر ماهواره‌ای در تشخیص جزئیات پوشش گیاهی، نبود داده‌های دقیق مربوط به سایه‌اندازی و هندسه سه‌بعدی ساختمان‌ها و عدم امکان سنجش ریزدما در مقیاس خیابان از جمله محدودیت‌های اصلی این پژوهش است. کاربری زمین در بازه زمانی مطالعه عمدتاً ثابت فرض شد، که این موضوع محدودیتی در تفسیر تغییرات دما و شاخص‌های مرتبط ایجاد می‌کند. افزون بر این، تحلیل حاضر عمدتاً بر مؤلفه‌های کالبدی-اکولوژیک تمرکز دارد و برخی عوامل پویای انسانی و انرژی‌محور به‌طور مستقیم لحاظ نشده‌اند. دسترسی محدود به داده‌های انسانی و اطلاعات اقلیم خرد، یکی از محدودیت‌های این مطالعه محسوب می‌شود. پژوهش‌های آتی می‌توانند با استفاده از داده‌های دقیق‌تر جمعیتی و اقلیمی، تحلیل‌های دقیق‌تری ارائه دهند و با ادغام داده‌های سه‌بعدی مورفولوژی شهری، مدل‌های جوی-شهری، داده‌های سنجش‌گرهای هوشمند و تحلیل الگوهای شبانه-روزانه گرمایش شهری، تصویر دقیق‌تری از پویایی حرارتی شهر ارائه دهند. محدودیت‌های مربوط به مرزهای محلات و کاهش وضوح ریزفضایی باید در تفسیر نتایج در نظر گرفته شود، زیرا تحلیل در مقیاس محله ممکن است تغییرات ریزفضایی محلی را به‌طور کامل نشان ندهد. همچنین، ترکیب مدل‌های اقتصادسنجی فضایی با روش‌های یادگیری عمیق و ارزیابی هزینه-فایده و مشارکتی مداخلات خنک‌سازی می‌تواند بستر تصمیم‌گیری اجرایی را تقویت کند. گرچه مدل MGWR دارای R^2 بالایی است، محدودیت تعمیم نتایج به سایر مقیاس‌ها و دوره‌های زمانی وجود دارد و باید با احتیاط تفسیر شود. در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که مقابله مؤثر با گرمایش شهری تهران نه با مداخلات پراکنده و سیاست‌های کلی، بلکه از طریق رویکردی محله‌محور، عدالت‌محور و متکی بر تحلیل فضایی پیشرفته امکان‌پذیر است؛ رویکردی که می‌تواند مبنای عملی برنامه‌ریزی تاب‌آوری حرارتی و ارتقای کیفیت زندگی شهری در کلان‌شهرهای مشابه قرار گیرد.

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

ناهید نعمتی کوتناپی: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله
 رامنا قلمبر دزفولی: طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر به‌صورت مستقل انجام شده است و حامی مالی ندارد.

سپاسگزاری

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

منابع

- آزادی مبارکی، محمد و احمدی، محمود (۱۴۰۰). بررسی جزایر حرارتی شهری کلان‌شهر تبریز با استفاده از داده‌های چند زمانه ماهواره LANDSAT8 مبتنی بر روش تحلیل لکه‌های داغ. *فصلنامه برنامه ریزی منطقه ای*، ۱۱(۴۳)، ۴۷-۶۳
<https://dx.doi.org/10.30495/jzpm.2021.3992>
- پوردیبهیمی، شهرام؛ تحصیل‌دوست، محمد و عامری، پوریا (۱۳۹۸). تأثیر پوشش گیاهی بر کاهش شدت جزایر حرارتی شهری: نمونه موردی کلان‌شهر تهران. *فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی*، ۵(۳)، ۹۷-۱۲۲. <http://epprjournal.ir/article-1-602-fa.html>
- ترکی، مسلم؛ مسعودیان، ابوالفضل و منتظری، مجید (۱۴۰۰). آب و هواشناسی جزایر گرمایی - سرمایه‌های شهرهای بزرگ ایران. *مجله جغرافیا و توسعه*، ۱۹(۶۴)، ۱-۲۰. <https://dx.doi.org/10.22111/j10.22111.2021.6368>
- صلاحی، برومند و فروتن، مهدی (۱۴۰۳). ارزیابی رابطه بین جزیره گرمایی با عناصر آلاینده جوی (مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران). *جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۱۳(۵۲)، ۱۱-۳۱. <https://doi.org/10.71740/ges.2024.1106223>
- فریودی، مرضیه و زمانی، زهرا (۱۴۰۱). کاهش جزایر حرارتی شهری از طریق افزایش سبزی‌نگی و سطوح نفوذپذیر در تهران. *نشریه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*، ۲۴(۲)، ۳۱-۴۵. <https://doi.org/10.30495/jest.2022.58441.5276>
- قربانی، فاطمه و سجادزاده، حسن (۱۴۰۳). تأثیر تغییرات پوشش گیاهی بر شدت جزیره گرمایی در شهر (نمونه موردی: کلانشهر کرج). *فصلنامه مطالعات شهری*، ۱۳(۵۲)، ۳-۱۶. <https://doi.org/10.22034/urbs.2024.140477.5005>
- منصوری، سید تاج‌الدین و زرغامی، اسماعیل (۱۴۰۲). تحلیل دینامیک جزایر حرارتی شهری در تهران (۲۰۲۳-۲۰۱۳) براساس تصاویر MODIS و موتور Google Earth. *پژوهش‌های سنجش از دور و اطلاعات مکانی*، ۲(۱)، ۴۵-۶۴. <https://doi.org/10.22061/jrsg.2024.10762.1057>
- هریسچیان، مهدی؛ محمودزاده، حسن و قربانی، رسول (۱۴۰۴). ارزیابی تأثیرات کاهش جزایر حرارتی شهری زیرساخت‌های سبز بر افزایش بهره‌وری کارهای سبک و سنگین، مطالعه موردی: کلانشهر تبریز. *برنامه‌ریزی فضایی*، ۱۵(۲)، ۳۵-۷۰. <https://doi.org/10.22108/sppl.2025.142015.1797>

References

- Ahmed, A. N., AlDahoul, N., Aziz, N. A., Huang, Y. F., Sherif, M., & El-Shafie, A. (2025). The urban heat Island effect: A review on predictive approaches using artificial intelligence models. *City and Environment Interactions*, 28, Article 100234. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2025.100234>
- Anselin, L. (1988). *Spatial econometrics: Methods and models*. Springer. <https://www.scribd.com/document/357393717/2-Anselin-Luc-1988-Spatial-Econometrics-pdf>
- Azadi Mubarak, M., & Ahmadi, M. (2021). Investigation of urban heat islands of Tabriz metropolis using multi-time data of LANDSAT8 satellite based on hot spot analysis method. *Journal of Regional Planning*, 11(43), 47-63. <https://dx.doi.org/10.30495/jzpm.2021.3992> [In Persian]
- Chen, TL., Lin, ZH. & Jheng, DC. (2025). Spatial regression analysis of land use impact on land surface temperature in four East Asian metropolises. *Sci Rep* 15, 22252 <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07980-w>
- Cleland, S. E., Steinhardt, W., Neas, L. M., Jason West, J., & Rappold, A. G. (2023). Urban heat island impacts on heat-related cardiovascular morbidity: A time series analysis of older adults in US metropolitan areas. *Environment international*, 178, 108005. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108005>
- Cliff, A. D., & Ord, J. K. (1981). *Spatial processes: Models & applications*. Pion. https://openlibrary.org/books/OL36638829M/Spatial_Processes
- Connors, J. P., Galletti, C. S., & Chow, W. T. L. (2013). Landscape configuration and urban heat island effects: Assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona. *Landscape Ecology*, 28(2), 271-283. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9833-9>
- Danilina, N., & Majorzadehzahiri, A. (2021). Analysis situation of urban green space framework in Tehran. *Vestnik MGSU*. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.8.975-985>
- Eshetie S. M. (2024). Exploring urban land surface temperature using spatial modelling techniques: a case study of Addis Ababa city, Ethiopia. *Scientific reports*, 14(1), 6323. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55121-6>
- Farbudi, M. & Zamani, Z. (2022). Studying the solutions of urban heat island mitigation through greenery and permeable surface in Tehran. *Journal of Environmental Science and Technology*, 24 (2), 31-45. <https://doi.org/10.30495/jest.2022.58441.5276> [In Persian]
- Fotheringham, A. S., Yang, W., & Kang, W. (2017). Multiscale geographically weighted regression (MGWR). *Annals of the American Association of Geographers*, 107(6), 1247-1265. <https://doi.org/10.1080/24694452.2017.135248>
- Ghorbani, F. & Sajadzadeh, H. (2024). The Impact of Vegetation on Urban Heat Island Reduction in the City of Karaj. *Motaleate Shahri*, 13(52), 3-16. <https://doi.org/10.22034/urbs.2024.140477.5005> [In Persian]
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2025). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 306, Article 113456. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*, 584-585, 1040-1055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>
- Jang, S., Bae, J., & Kim, Y. (2024). Street-level urban heat island mitigation: Assessing the cooling effect of green infrastructure using urban IoT sensor big data. *Sustainable Cities and Society*, 100, 105007. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105007>
- Jawarneh, R., & Abulibdeh, A. (2024). Geospatial modelling of seasonal water and electricity consumption in Doha's residential buildings using multiscale geographically weighted regression (MGWR) and Bootstrap analysis. *Sustainable Cities and Society*, 113, Article 105654. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105654>
- Herischian, M., Mahmoudzadeh, H. & Ghorbani, R. (2025). Evaluating the Effects of Mitigating Urban Heat Islands of Green Infrastructure on Increasing the Productivity of Light and Heavy Works, Case Study: Tabriz Metropolitan. *Spatial Planning*, 15(2), 35-70. <https://doi.org/10.22108/sppl.2025.142015.1797> [In Persian]
- 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(1), Article 18589. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04025-0>
- Kong, G., Peng, J., & Corcoran, J. (2025). Modelling urban heat island effects: a global analysis of 216 cities using machine learning techniques. *Computational Urban Science*, 5, Article 18. <https://doi.org/10.1007/s43762-025-00178-w>
- Luo, J., Yao, Y., & Yin, Q. (2023). Analysis of Long Time Series of Summer Surface Urban Heat Island under the Missing-Filled Satellite Data Scenario. *Sensors*, 23(22), 9206. <https://doi.org/10.3390/s23229206>
- Krenz, K., & Amann, L. (2025). Urban heat island effect: examining spatial patterns of socio-demographic inequalities in Greater London. *Cities & Health*, 9(5), 901-924. <https://doi.org/10.1080/23748834.2025.2489854>
- Marando, F., Heris, M. P., Zulian, G., Udías, A., Mentaschi, L., Chrysoulakis, N., Parastatidis, D., & Maes, J. (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 77, Article 103564. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103564>

- Meng, Y., Luo, Q., Bai, B., Li, Y., Lu, J., & Ren, J. (2025). Analysis of spatial heterogeneity in Xi'an's urban heat island effect using multi-source data fusion. *PLoS one*, 20(10), e0332885. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0332885>
- Malekzadeh, S., Jafari, H. R., Nazari, R., Blaschke, T., Hof, A., & Karimi, M. (2025). Modeling the cooling effect of urban green infrastructures with an ecosystem services approach (Case study: Tehran metropolis). *International Journal of Human Capital in Urban Management*, 10(2), 199–214. <https://doi.org/10.22034/IJHCUM.2025.02.01>
- Mansouri, S. T. & Zarghami, E. (2023). Dynamic Analysis of Urban Heat Islands in Tehran (2013–2023) Based on MODIS Images and Google Earth Engine. *Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research*, 2(1), 45–64. <https://doi.org/10.22061/jrsg.2024.10762.1057> [In Persian]
- Mhana, K. H., Norhisham, S. B., Katman, H. Y. B., & Yaseen, Z. M. (2023). Environmental impact assessment of transportation and land alteration using Earth observational datasets: Comparative study between cities in Asia and Europe. *Heliyon*, 9(9), e19413. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19413>
- Moran, P. A. P. (1950). Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika*, 37(1/2), 17–23. <https://doi.org/10.2307/2332142>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press. ISBN: 978-0521849500 (Hardcover) / 978-1107429536 (Paperback). <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. https://www.patarnott.com/pdf/Oake1982_UHI.pdf
- Oshan, T. M., Li, Z., Kang, W., Wolf, L. J., & Fotheringham, A. S. (2019). GWmodel: An R package for geographically weighted models. *Geographical Analysis*, 51(2), 143–160. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1306.0413>
- Richiardi, C., Caroscio, L., Crescini, E., De Marchi, M., De Pieri, G. M., Ceresi, C., Baldo, F., Francobaldi, M., & Pappalardo, S. E. (2025). A global downstream approach to mapping surface urban heat islands using open data and collaborative technology. *Sustainable Geosciences: People, Planet and Prosperity*, 1, 100006. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950492925000057>
- Pourdeihimi S, Tahsildoost M, Ameri P. (2019). Effect of Vegetation Cover on Energy Consumption Optimization due to Reduction of Urban Heat Island intensity: Case of Tehran Metropolitan Area. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*, 5 (3) ,97-122. <http://epprjournal.ir/article-1-602-fa.html> [In Persian]
- Salahi, B., Frotan, M. (2024), Evaluating the Relationship between Heat Island and Atmospheric Pollutants (Case Study: Tehran Metropolis). *Journal of Geography and Environmental Studies*, 13 (52), 18-31. <https://doi.org/10.71740/ges.2024.1106223> [In Persian]
- Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research: Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. *Energy and Buildings*, 207, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>
- Torki, M., Masoodian, S. A. & Montazeri, M. (2021). Climatology of Urban Heat/Cold Island of Metropolises of Iran. *Geography and Development*, 19 (64), 1-20. <https://dx.doi.org/10.22111/j10.22111.2021.6368> [In Persian]
- U.S. Environmental Protection Agency. (2024). What are heat islands? Retrieved November 25, 2025, from <https://www.epa.gov/heatislands/what-are-heat-islands>
- Wang, Y., Li, X., Zhang, Q., & Li, L. (2025). Spatial regression analysis of land use impact on land surface temperature in four East Asian metropolises. *Scientific Reports*, 15(1), Article 22252. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85146-4>
- Xu, Z., & Rui, J. (2024). The mitigating effect of green space's spatial and temporal patterns on the urban heat island in the context of urban densification: A case study of Xi'an. *Sustainable Cities and Society*, 117, 105974. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105974>
- Zargari, M., Mofidi, A., Entezari, A. Baaghideh. M. (2024). Climatic comparison of surface urban heat island using satellite remote sensing in Tehran and suburbs. *Sci Rep* 14, 643 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50757-2>
- Zeng, S., Zhang, J., & Tian, J. (2023). Analysis and Optimization of Thermal Environment in Old Urban Areas from the Perspective of “Function–Form” Differentiation. *Sustainability*, 15(7), Article 6172. <https://doi.org/10.3390/su15076172>
- Zhan, W., Li, L., Chakraborty, T. C., Hu, L., Wang, D., Liao, W., Wang, S., Du, H., Huang, F., Wang, C., Liu, Z., & Li, M. (2025). Recent widespread deceleration of global surface urban heat islands unveiled by satellites. *Geophysical Research Letters*, 52(12), e2024GL112711. <https://doi.org/10.1029/2024GL112711>
- Zhong, Y., Li, S., Liang, X., & Guan, Q. (2024). Causal inference of urban heat island effect and its spatial heterogeneity: A case study of Wuhan, China. *Sustainable Cities and Society*, 115, 105850. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105850>