

Spatiotemporal Analysis of Urban Heat Island Dynamics and Their Influencing Factors in Baqubah, Iraq, Using Remote Sensing and GIS Techniques¹

Hassan Mahmoudzadeh^{1*}, Firouz Jafari², Ahmad Adel Veisheh³

1.Professor, Urban and Regional Planning Department, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2.Associate Professor, Urban and Regional Planning Department, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3.Ph. D Student, Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ARTICLE INFO

Research Paper

Article history:

Received: 20 June 2026

Accepted: 23 August 2026

Published online:

24 August 2026

Keywords: *Urban Heat Island (UHI); Land Surface Temperature (LST); Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); Normalized Difference Built-up Index (NDBI); Remote Sensing; Baqubah, Iraq.*



<https://www.srds.ir/?adsc=4192>

Abstract

Background and Objective: Urban Heat Islands (UHI) are an important environmental consequence of urban expansion and changes in land surface characteristics, particularly the growth of built-up areas and reduction of vegetation cover. This study aims to investigate the spatio-temporal changes in urban heat islands and identify the factors influencing their intensity in Baqubah City, Iraq, using remote sensing and Geographic Information Systems (GIS). The analysis focuses on three periods, 1985, 2005, and 2025, to assess changes in the thermal characteristics of the urban environment and their relationship with major environmental and physical indicators.

Methodology: Landsat satellite imagery was used to derive Land Surface Temperature (LST), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Built-up Index (NDBI), and Urban Heat Island (UHI) indicators. In addition, Air Quality Index (AQI) and Relative Humidity (RH) were incorporated as environmental variables. Spatial analysis and map preparation were conducted using remote sensing and GIS techniques. Multivariate linear regression was applied to examine the relationships between UHI intensity and the explanatory variables during the three study periods.

Results and findings: The results indicate that the intensity of the urban heat island in Baqubah increased over the study period. The influence of NDBI on UHI increased from 0.47 in 1985 to 0.70 in 2025, while the effect of LST increased from 0.58 to 0.80. In contrast, NDVI showed a negative relationship with UHI, with its coefficient increasing from -0.25 to -0.38, indicating a persistent cooling effect of vegetation. The explanatory power of the regression models also increased over time, with R^2 rising from 0.67 in 1985 to 0.85 in 2025. These findings demonstrate that increasing urbanization and expansion of built-up surfaces have intensified thermal stress in Baqubah, whereas vegetation has played an important mitigating role. The results highlight the importance of protecting and expanding green spaces and integrating green infrastructure into urban planning to reduce UHI impacts.

Citation. Mahmoudzadeh, H., Jafari, F., & Adel Veisheh, A. (2027). Spatiotemporal Analysis of Urban Heat Island Dynamics and Their Influencing Factors in Baqubah, Iraq, Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 7(4), 44-66.

URL: https://www.srds.ir/article_251551.html?lang=en



© The Author(s). Publisher: *Private with Cooperation Iranian Geography and Urban Planning Association.*

¹ This article is derived from the PhD Thesis entitled 'Evaluation of urban ecosystem services in Baqubah, Iraq, with an emphasis on nature-based services, conducted by the third author under the supervision of the first author and the advisory of the second at University of Tabriz, Iran.'

*Corresponding author: mahmoudzadeh@tabrizu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Urban Heat Islands (UHI) are among the most important environmental consequences of urbanization, resulting from the transformation of natural surfaces into built-up and impervious areas and the reduction of vegetation cover. Urban expansion can alter surface energy balance and consequently increase Land Surface Temperature (LST), while vegetation and atmospheric moisture can provide cooling effects. Remote sensing and Geographic Information Systems (GIS) provide effective tools for detecting the spatial distribution and temporal dynamics of UHI and for examining its relationships with urban and environmental characteristics. The reference study on District 4 of Tabriz examined UHI dynamics using NDVI, NDBI, LST, RH, and AQI and applied multivariate linear regression to identify the factors influencing UHI intensity. The present study applies a similar analytical framework specifically to Baqubah City, Iraq, using the empirical data available in the dissertation. The objective is to investigate the spatial and temporal changes of UHI in Baqubah during 1985, 2005, and 2025 and to determine the relative contribution of vegetation, built-up surfaces, surface temperature, air quality, and relative humidity to variations in UHI intensity. The dissertation data indicate that these periods correspond to 1364, 1384, and 1404 in the Iranian calendar and include spatial layers for NDVI, NDBI, LST, UHI, and AQI.

Methodology

The study adopted a spatial and temporal analytical approach based primarily on satellite remote sensing and GIS. Landsat satellite imagery was used to derive the main remotely sensed indicators, including NDVI, NDBI, LST, and UHI. The resulting spatial datasets were prepared for the three study periods and subsequently normalized to facilitate comparison among indicators and across time. The analysis considered UHI as the dependent variable and NDVI, NDBI, LST, RH, and AQI as explanatory variables, following the analytical structure used in the reference article. Multivariate linear regression was employed separately for each period to evaluate the direction and strength of relationships between the explanatory variables and UHI. Statistical significance, model explanatory power, and multicollinearity were also considered. The dissertation reports that the

regression models were developed using SPSS after preparation of the spatial indicator database, while GIS and remote sensing techniques were used for spatial processing and mapping.

Results and Discussion

Results demonstrate a clear strengthening of thermal stress in Baqubah over the study period. The regression analysis indicates that the relationship between urban development and UHI became stronger over time. The standardized coefficient associated with NDBI increased from 0.47 in 1985 to 0.70 in 2025, indicating that the influence of built-up surfaces on UHI intensified substantially. Similarly, the standardized coefficient of LST increased from 0.58 to 0.80, confirming the increasingly strong association between elevated surface temperature and the spatial pattern of UHI. In contrast, NDVI maintained a negative relationship with UHI throughout the study period, with its coefficient changing from -0.25 to -0.38 , demonstrating the persistent cooling role of vegetation.

The statistical models also became more explanatory in the later period. The coefficient of determination increased from $R^2 = 0.67$ in 1985 to $R^2 = 0.85$ in 2025, indicating that the combined environmental and physical variables increasingly explained the spatial variability of UHI. For 2005, the regression model produced an R^2 of 0.72, while the model showed a strong overall correlation between the predictors and UHI ($R = 0.87$). For 2025, the multiple correlation coefficient reached $R = 0.89$, with $R^2 = 0.85$, confirming the high explanatory capacity of the model. The ANOVA results also confirmed that the model was statistically significant.

The coefficient patterns reveal two contrasting processes shaping the thermal environment of Baqubah. NDBI and LST consistently acted as the principal warming-related variables, reflecting the thermal consequences of increasing built-up surfaces and elevated surface temperatures. AQI also showed a positive association with UHI, suggesting that deteriorating air-quality conditions accompanied the intensification of urban thermal stress. Conversely, NDVI and RH exhibited negative relationships with UHI, indicating their mitigating role. The 2025 results further strengthened this pattern: LST had the strongest positive standardized coefficient (0.94), followed by NDBI (0.81) and AQI (0.37), whereas NDVI (-0.46) and RH (-0.22) had cooling effects.

Overall, the findings show that the increase in UHI intensity in Baqubah is closely associated

with urban physical expansion and increasing surface thermal conditions, while vegetation and atmospheric moisture provide important but comparatively weaker counteracting influences. The temporal strengthening of the NDBI and LST effects, together with the increasing explanatory power of the regression models, indicates that urbanization has progressively altered the thermal structure of Baqubah. Therefore, maintaining and expanding vegetation cover, protecting existing green areas, limiting uncontrolled expansion of impervious surfaces, and incorporating green infrastructure into urban planning should be considered important strategies for reducing future UHI intensity in Baqubah.

Conclusion

The findings demonstrate that the urban heat island effect in Baqubah City has intensified considerably between 1985 and 2025 and that this change is closely associated with the transformation of the urban surface. The increasing influence of NDBI and LST indicates that the expansion of built-up surfaces and the intensification of surface thermal conditions have become the dominant factors contributing to UHI development. In contrast, the consistently negative relationship between NDVI and UHI confirms the important cooling role of vegetation, while the negative effect of RH indicates an additional moderating influence of atmospheric moisture. The increase in the explanatory power of the regression models from $R^2 = 0.67$ in 1985 to $R^2 = 0.85$ in 2025 further suggests that the relationships between urban physical development, environmental conditions, and thermal patterns have become stronger over time. These results emphasize that mitigating UHI in Baqubah requires greater attention to the preservation and expansion of vegetation, protection of existing green spaces, limitation of excessive growth of impervious surfaces, and integration of green infrastructure into urban planning. Such measures can contribute to reducing thermal stress and improving the environmental resilience of Baqubah under continuing urban development.

Declarations

Funding: There is no funding support.

Authors' Contribution: The authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest: The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments: We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

References

- Ahmadi, M., Ashourloo, D., & Narangifard, M. (2012). Spatiotemporal changes in thermal patterns and land use in Shiraz city using TM and ETM+ sensor data. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 4(4), e95038. (In Persian). https://scj.sbu.ac.ir/article_95038.html
- Ashraf, B., Farid Hosseini, A., & Mianabadi, A. (2012). Investigation of the urban heat island in Mashhad city using satellite imagery and fractal theory. *Geography and Environmental Hazards*, 1(1), 35-48. (In Persian). doi: 10.22067/geo.v1i1.16521
- Azmoon, M., & Ahmadi, G. (2024). Evaluating the effects of controllable factors on urban heat islands using multiple regression analysis (Case study: Tabriz metropolis). *Quarterly Journal of Studies in Sustainable Urban and Regional Development*, 5(4), 14-27. (In Persian). https://www.srds.ir/article_202038.html
- Azmoon, M. and Ahmadi, G. (2024). Assessment of Impacts Controllable Factors on Urban Heat Islands Using Multiple Regression Analysis (Case Study: Tabriz Metropolis). (In Persian). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 5(4), 14-27. https://www.srds.ir/article_202038.html?lang=en
- Azmoon, M. and Mohammadnejad, M. (2024). Evaluation of ecological and morphological factors of urban heat island (Study sample: District 1 of region 1 and District 4 of region 6 of the metropolis of Tabriz). (In Persian). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 5(1), 58-74. https://www.srds.ir/article_195068.html?lang=en
- Chen, H.-C., Han, Q., & De Vries, B. (2020). Urban morphology indicator analyzes for urban energy modeling. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101863.
- Deilami, K., Kamruzzaman, M., & Liu, Y. (2018). Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67, 30-42.
- Du, J., Fu, Q., Fang, S., Wu, J., He, P., & Quan, Z. (2019). Effects of rapid urbanization on vegetation cover in the metropolises of China over the last four decades. *Ecological Indicators*, 107, 105458.
- Imhoff, M. L., Zhang, P., Wolfe, R. E., & Bounoua, L. (2010). Remote sensing of the urban heat island effect across bioclimatic regions in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 504-513.
- Karimi Firozjaei, M., Kiavarz, M., & Alavipanah, S. K. (2017). Monitoring and predicting the intensity of the urban heat island in

Babol city with respect to urban expansion and land use changes during 1985–2015. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 5(3), 123-151. (In Persian).

<http://dx.doi.org/10.29252/jgit.5.3.123>

11.Kotharkar, R., Ramesh, A., & Bagade, A. (2018). Urban heat island studies in South Asia: A critical review. *Urban climate*, 24, 1011-1026.

12.Li, L., Zhan, W., Hu, L., Chakraborty, T. C., Wang, Z., Fu, P., ... & Wang, S. (2023). Divergent urbanization-induced impacts on global surface urban heat island trends since 1980s. *Remote Sensing of Environment*, 295, 113650.

13.Li, S., Liang, Y., Yang, D., & Shen, J. (2025). Effect of blue-green landscape pattern and urban forms on surface urban heat island intensity: Evidence from 816 Chinese urban clusters. *Ecological Indicators*, 178, 113949.

14.Mahmoudzadeh,H , Jafari,F and Dinparvar,N . (2026). Analysis of thermal reduction capacity based on green spaces in Maragheh city using the urban cooling model. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 6(4), 350-366. (In Persian). https://www.srds.ir/article_229442.html?lang=en

15.Mathew, A., Khandelwal, S., & Kaul, N. (2018). Spatio-temporal variations of surface temperatures of Ahmedabad city and its relationship with vegetation and urbanization parameters as indicators of surface temperatures. *Remote sensing applications: society and environment*, 11, 119–139.

16.Mojarrad, F., Naserieh, M., & Hashemi, S. (2018). Investigation of diurnal and seasonal changes in the urban heat island of Kermanshah city using satellite imagery. *Journal of the Earth and Space Physics*, 44(2), 479-494. (In Persian). doi: 10.22059/jesphys.2018.247773.1006952

17.Mushore, T. D., Mutanga, O., & Odindi, J. (2022). Estimating urban LST using multiple remotely sensed spectral indices and elevation retrievals. *Sustainable Cities and Society*, 78, 103623.

18.Naser, M., Safaeipour, M., & Rezaei Jafari, K. (2022). Investigating the impact of urban heat islands on citizens' psychological well-being in the Ahvaz metropolis. *Quarterly Journal of Studies in Sustainable Urban and Regional Development*, 3(1), 1-22. (In Persian). https://www.srds.ir/article_152274.html

19.Naser,M , Safaeipour,M and Rezaei Jafari,K . (2022). Investigating the Effect of Heat Islands in Ahvaz Metropolis on the Level of Psychological Comfort of Citizens. (In Persian). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development*

Studies(JSURDS), 3(1),1-22.

https://www.srds.ir/article_152274.html?lang=en

20.Patra, S., Sahoo, S., Mishra, P., & Mahapatra, S. C. (2018). Impacts of urbanization on land use/cover changes and its probable implications on local climate and groundwater level. *Journal of urban management*, 7(2), 70–84.

21.Rabie, R., Asghari, M., Nosrati, H., Niri, M. E., & Karimi, S. (2024). Spatially resolved air quality index prediction in megacities with a CNN-Bi-LSTM hybrid framework. *Sustainable Cities and Society*, 109, 105537.

22.Sadeghinia, A., Alijani, B., & Ziaian Firouzabadi, P. (2012). Spatio-temporal analysis of the urban heat island in Tehran metropolis using remote sensing and geographic information system. *Geography and Environmental Hazards*, 1(4), 1-17.(In Persian).doi: [10.22067/geo.v1i4.16950](https://doi.org/10.22067/geo.v1i4.16950)

23.Sarkar, N., Gupta, R., Keserwani, P. K., & Govil, M. C. (2022). Air quality index prediction using an effective hybrid deep learning model. *Environmental pollution*, 315, 120404.

24.Sekertekin, A., & Zadbagher, E. (2021). Simulation of future land surface temperature distribution and evaluating surface urban heat island based on impervious surface area. *Ecological indicators*, 122, 107230.

25.Shi, H., Xian, G. Z., Auch, R. F., Gallo, K., & Zhou, Q. (2021). Urban heat island and its regional impacts using remotely sensed thermal data—A review of recent developments and methodology. *Land*, 10(8), 867.

26.Soleimani, K., Rohani Ghadikolaei, F., Shabani, M., & Rohani Ghadikolaei, M. (2020). Application of the single-channel algorithm in the analysis of urban heat islands. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 12(3), 87-102. (In Persian). doi: [10.52547/gisj.12.3.87](https://doi.org/10.52547/gisj.12.3.87)

27.Taleshi, M. S. A., Sotoudeh, A., Sabouhi, M., & Niazi, Y. (2014). Assessment of land cover effects on land surface temperature using thermal remote sensing: A case study in Tehran. *Journal of Environmental Researches*, 5(10), 69-78. (In Persian).

<https://www.magiran.com/paper/1371401>

28.Valizadeh Kamran, K., Gholamnia, K., Einali, G., & Mousavi, S. M. (2017). Estimation of land surface temperature and extraction of heat islands using the split-window algorithm and multivariate regression analysis (Case study: Zanjan city). *Quarterly Journal of Research and Urban Planning*, 8(30), 35-50. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22285229.1396.8.3.0.3.9>

29.Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384.

30.Wang, H., Yan, S., Liang, Z., Jiao, K., Li, D., Wei, F., & Li, S. (2021). Strength of association between vegetation greenness and its drivers across China between 1982 and 2015: Regional differences and temporal variations. *Ecological Indicators*, 128, 107831.

31.Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 335–344.

32.Yang, Q., Xu, Y., Wen, D., Hu, T., Chakraborty, T. C., Liu, Y., ... & Yang, J. (2024). Satellite clear-sky observations overestimate surface urban heat islands in humid cities. *Geophysical Research Letters*, 51(2), [e2023GL106995](https://doi.org/10.1029/2023GL106995).

33.Yang, X., Xu, S., Peng, L. L., Chen, Y., & Yao, L. (2023). General air temperature and humidity features of local climate zones: A multi-city observational study in eastern China. *Urban Climate*, 51, 101652.

34.Zhang, L., Deng, Y., Li, L., Chan, P.-w., Luo, H., Yin, Q., Xu, F., Wu, K., & Yang, H. (2022). Why has the trend in humidity variation in Shenzhen changed from decrease to increase

while urbanisation has continued? *Urban Climate*, 44, 101209.

35.Zhao, L., Li, T., Przybysz, A., Liu, H., Zhang, B., An, W., & Zhu, C. (2023). Effects of urban lakes and neighbouring green spaces on air temperature and humidity and seasonal variabilities. *Sustainable Cities and Society*, 91, 104438.

36.Zhao, Z., Wu, J., Cai, F., Zhang, S., & Wang, Y.-G. (2022). A statistical learning framework for spatial-temporal feature selection and application to air quality index forecasting. *Ecological Indicators*, 144, 109416.

37.Zheng, Y., Tang, L., & Wang, H. (2021). An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. *Journal of cleaner production*, 328, 129488.

38.Zhou, T., Liu, H., Gou, P., & Xu, N. (2023). Conflict or Coordination? Measuring the relationships between urbanization and vegetation cover in China. *Ecological Indicators*, 147, 109.



نوع مقاله: پژوهشی

فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای

https://www.srds.ir/article_251551.html?lang=fa

دوره هفتم، شماره چهارم، پیاپی (۲۶)، زمستان ۱۴۰۵

صص ۴۴-۶۶

بررسی تغییرات فضایی - زمانی جزایر حرارتی شهری و عوامل مؤثر بر آن در شهر بعقوبه عراق با استفاده از سنجش از دور و GIS^۱

حسن محمودزاده*، استاد گروه برنامه ریزی شهری و منطقه ای، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

فیروز جعفری، دانشیار گروه برنامه ریزی شهری و منطقه ای، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

احمد عادل ویسه، دانشجوی دکتری گروه برنامه ریزی شهری و منطقه ای، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۳/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۰۱

چکیده

زمینه و هدف: جزایر حرارتی شهری یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییرات ساختار کالبدی و پوشش زمین در شهرهاست که می‌تواند تحت تأثیر گسترش سطوح ساخته‌شده، کاهش پوشش گیاهی و تغییر شرایط محیطی تشدید شود. پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات فضایی - زمانی جزایر حرارتی شهری و عوامل مؤثر بر آن در شهر بعقوبه عراق با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام شده است.

روش شناسی: روش پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت توصیفی - تحلیلی با رویکرد مکانی - زمانی است. برای تحلیل وضعیت حرارتی شهر، داده‌های سنجش از دور و اطلاعات محیطی در سه دوره زمانی ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ مورد استفاده قرار گرفت و شاخص‌های دمای سطح زمین (LST)، شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI)، شاخص ساخت‌وساز نرمال‌شده (NDBI)، رطوبت نسبی (RH)، شاخص کیفیت هوا (AQI) و جزیره حرارتی شهری (UHI) در محیط GIS استخراج و تحلیل شدند. به‌منظور بررسی عوامل مؤثر بر UHI نیز از رگرسیون خطی چندمتغیره استفاده شد.

یافته‌ها و نتایج: نتایج نشان داد که طی دوره مورد مطالعه، نقش عوامل کالبدی و حرارتی در شکل‌گیری جزیره حرارتی شهر بعقوبه افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که ضریب اثر NDBI بر UHI از ۰,۴۷ در سال ۱۳۶۴ به ۰,۷۰ در سال ۱۴۰۴ و ضریب LST از ۰,۵۸ به ۰,۸۰ افزایش یافته است. در مقابل، NDVI در دوره‌های مورد مطالعه رابطه منفی با UHI داشته و نقش تعدیل‌کننده پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. همچنین مقدار ضریب تعیین مدل از ۰,۶۷ در سال ۱۳۶۴ به ۰,۸۵ در سال ۱۴۰۴ افزایش یافته است که بیانگر افزایش قدرت تبیین متغیرهای مورد مطالعه در توضیح تغییرات UHI است. بر اساس یافته‌ها، گسترش سطوح ساخته‌شده و کاهش پوشش گیاهی از مهم‌ترین عوامل مرتبط با تشدید جزیره حرارتی بعقوبه محسوب می‌شوند. بنابراین، حفاظت و توسعه فضاهای سبز، افزایش پوشش گیاهی، کنترل گسترش سطوح نفوذناپذیر و تقویت زیرساخت‌های سبز و آبی می‌تواند در کاهش تنش حرارتی و ارتقای پایداری محیطی شهر بعقوبه مؤثر باشد.

واژگان کلیدی: جزیره حرارتی شهری، دمای سطح زمین، شاخص پوشش گیاهی، شاخص ساخت‌وساز، سنجش از دور، بعقوبه عراق..

^۱ این مقاله برگرفته از پایان‌نامه دکتری با عنوان «ارزیابی خدمات اکوسیستم شهری در بعقوبه عراق با تأکید بر خدمات مبتنی بر طبیعت» است که توسط نویسنده سوم و تحت نظارت نویسنده اول و مشاوره نویسنده دوم در دانشگاه تبریز (ایران) انجام شده است.

* مسئول مکاتبات: mahmoudzadeh@tabrizu.ac.ir

ارجاع به این مقاله: محمودزاده، حسن، جعفری، فیروز، و عادل ویسه، احمد. (۱۴۰۵). بررسی تغییرات فضایی - زمانی جزایر حرارتی شهری و عوامل مؤثر بر آن در شهر بعقوبه عراق با استفاده از سنجش از دور و GIS. فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای، ۷(۴)، ۴۴-۶۶.

مقدمه و بیان مسأله

گسترش سریع شهرنشینی و توسعه کالبدی شهرها در دهه‌های اخیر موجب دگرگونی گسترده در ویژگی‌های سطح زمین، الگوی کاربری اراضی و شرایط حرارتی محیط شهری شده است. تبدیل پوشش‌های طبیعی به سطوح ساخته‌شده و نفوذناپذیر، کاهش پوشش گیاهی و تغییر ویژگی‌های حرارتی سطوح شهری از مهم‌ترین فرایندهایی هستند که می‌توانند تعادل انرژی سطح زمین را تغییر داده و به افزایش دمای محیط شهری منجر شوند. یکی از مهم‌ترین پیامدهای این فرایند، شکل‌گیری جزیره حرارتی شهری است. در مطالعات سنجش از دور، تمرکز ویژه‌ای بر «جزیره حرارتی سطحی» و استفاده از دمای سطح زمین برای شناسایی شدت و الگوی فضایی آن وجود دارد؛ زیرا تصاویر ماهواره‌ای امکان بررسی هم‌زمان پراکنش مکانی و تغییرات زمانی پدیده را در مقیاس شهری فراهم می‌کند (Yang et al., 2024).

جزیره حرارتی شهری پدیده‌ای چندعاملی است و شدت آن تنها به دمای سطح زمین وابسته نیست، بلکه تحت تأثیر ترکیبی از پوشش گیاهی، سطوح ساخته‌شده، ویژگی‌های کاربری زمین، ساختار فضایی شهر، شرایط رطوبتی و سایر عوامل محیطی قرار دارد. در این میان، شاخص NDVI یکی از رایج‌ترین شاخص‌های سنجش پوشش گیاهی و NDBI یکی از مهم‌ترین شاخص‌های شناسایی و کمی‌سازی سطوح ساخته‌شده محسوب می‌شوند. مطالعات مروری نشان داده‌اند که در بسیاری از مطالعات، NDVI با دمای سطح رابطه معکوس و NDBI با دمای سطح رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین، افزایش پوشش گیاهی عموماً با کاهش تنش حرارتی و افزایش سطوح ساخته‌شده با تشدید گرمای سطحی همراه است (Shi et al., 2021).

نقش پوشش گیاهی در تعدیل گرمای شهری را می‌توان از طریق سایه‌اندازی، افزایش تبخیر و تعرق و تغییر شرایط خرداقليمی توضیح داد. در مقابل، سطوح ساختمانی، آسفالت و سایر سطوح نفوذناپذیر می‌توانند انرژی تابشی را جذب و ذخیره کنند و در نتیجه بر افزایش دمای سطح اثر بگذارند. یک مرور نظام‌مند از مطالعات جزایر حرارتی نیز نشان داده است که شاخص‌هایی مانند NDVI و NDBI از پرکاربردترین متغیرهای مکمل LST در مطالعات UHI هستند و تغییرات پوشش گیاهی و ساخت‌وساز از عوامل اصلی کنترل‌کننده تغییرات دمای سطح به شمار می‌روند (Li et al., 2025).

اهمیت تحلیل جزایر حرارتی تنها به شناسایی پهنه‌های گرم محدود نمی‌شود، بلکه شناخت عوامل مؤثر بر این پدیده برای برنامه‌ریزی و مدیریت شهری نیز ضروری است. توسعه شهری نامتوازن می‌تواند با افزایش سطوح نفوذناپذیر و کاهش فضای سبز، شدت و گستره پهنه‌های گرم را افزایش دهد. از این رو، تحلیل بلندمدت UHI می‌تواند ابزاری برای آشکارسازی پیامدهای محیطی توسعه شهری و ارزیابی تغییرات ساختار حرارتی شهر باشد. پژوهش‌های جدید نیز بر اهمیت مطالعات زمانی بلندمدت، بررسی عوامل کنترل‌کننده UHI و توجه به شهرها و مناطق کمتر مطالعه‌شده تأکید کرده‌اند (Li et al., 2023).

در این چارچوب، شهر بعقوبه در عراق نمونه‌ای مناسب برای مطالعه تغییرات فضایی - زمانی جزایر حرارتی محسوب می‌شود. ساختار محیطی بعقوبه تحت تأثیر عناصر طبیعی از جمله رودخانه دیاله، اراضی کشاورزی، باغ‌ها و فضاهای سبز قرار دارد؛ در عین حال، گسترش کالبدی شهر و تغییر بخشی از کاربری‌های طبیعی و سبز به سطوح شهری، ساختار محیطی شهر را تحت فشار قرار داده است. مطابق اطلاعات رساله، تغییرات محیطی و کالبدی بعقوبه در سه دوره ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ بررسی شده و برای تحلیل شرایط حرارتی، شاخص‌های LST، NDVI، NDBI، AQI، RH و UHI مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مزیت مهم داده‌های موجود در رساله این است که امکان بررسی جزایر حرارتی بعقوبه را در یک بازه زمانی بلندمدت فراهم می‌کند. برای هر سه دوره، نقشه‌های LST، NDVI، NDBI و UHI تهیه شده و برای افزایش قابلیت مقایسه فضایی، داده‌های شاخص‌ها نیز نرمال‌سازی شده‌اند. بنابراین، علاوه بر شناسایی پهنه‌های دارای شدت متفاوت UHI،

می‌توان تغییرات هم‌زمان پوشش گیاهی، سطوح ساخته‌شده و شرایط حرارتی را نیز بررسی کرد. بر این اساس، مسئله اساسی پژوهش حاضر را می‌توان در دو سطح تبیین کرد: نخست، چگونگی تغییر الگوی فضایی و زمانی جزایر حرارتی شهری در بعقوبه طی دوره ۱۳۶۴ تا ۱۴۰۴ و دوم، نحوه تغییر نقش عوامل محیطی و کالبدی در تشدید یا تعدیل این پدیده. اهمیت این مسئله از آن جهت است که استمرار توسعه کالبدی و تبدیل سطوح طبیعی و سبز به سطوح ساخته‌شده می‌تواند ساختار حرارتی شهر را در بلندمدت دگرگون کند. از این رو، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از سنجش از دور و GIS و با تمرکز بر شاخص‌های UHI، LST، NDVI، NDBI، RH و AQI، به بررسی تغییرات فضایی- زمانی جزایر حرارتی و تعیین عوامل مؤثر بر آن در شهر بعقوبه می‌پردازد. هدف نهایی، ارائه تصویری کمی و مکانی از روند تحول گرمای شهری و روشن کردن نقش توسعه کالبدی و پوشش گیاهی در این فرایند است.

مبانی نظری پژوهش

در این بخش، مبانی نظری مرتبط با جزایر حرارتی شهری و شاخص‌های مؤثر بر آن تبیین شده و سپس پیشینه پژوهش با تمرکز بر چارچوب مفهومی و شاخص‌های مورد استفاده در بررسی شرایط حرارتی شهر بعقوبه ارائه می‌شود.

جزیره حرارتی شهری

جزیره حرارتی شهری یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییرات کاربری و پوشش زمین و گسترش سطوح ساخته‌شده در محیط‌های شهری است. شکل‌گیری این پدیده تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل طبیعی، کالبدی و محیطی قرار دارد. توسعه سطوح ساخته‌شده، پراکنش پوشش گیاهی، وجود اراضی کشاورزی و نقش منابع آبی از جمله عواملی هستند که می‌توانند بر شرایط حرارتی و الگوی فضایی جزایر حرارتی شهری اثرگذار باشند. در شهر بعقوبه، با توجه به شرایط اقلیمی گرم و نسبتاً خشک، بررسی هم‌زمان این عوامل برای شناخت الگوی جزیره حرارتی اهمیت دارد.

در پژوهش حاضر، شاخص جزیره حرارتی شهری (UHI) به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شده است. برای تبیین شرایط و عوامل مؤثر بر UHI، پنج متغیر شامل شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI)، شاخص ساخت‌وساز نرمال‌شده (NDBI)، دمای سطح زمین (LST)، رطوبت نسبی (RH) و شاخص کیفیت هوا (AQI) به‌عنوان متغیرهای مستقل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مجموعه متغیرها امکان بررسی هم‌زمان عوامل پوشش گیاهی، ساخت‌وساز، شرایط حرارتی، رطوبتی و کیفیت محیطی را فراهم می‌کند.

دمای سطح زمین (LST)

دمای سطح زمین^۱ بیانگر وضعیت حرارتی سطح زمین است و یکی از متغیرهای مهم در بررسی جزایر حرارتی شهری محسوب می‌شود. این شاخص شرایط حرارتی سطح را در واحدهای مختلف شهری نشان می‌دهد و امکان شناسایی تفاوت‌های حرارتی میان سطوح مختلف شهر را فراهم می‌کند (Mathew et al., 2018).

در چارچوب پژوهش حاضر، LST به‌عنوان یکی از متغیرهای مؤثر بر UHI در نظر گرفته شده است؛ زیرا وضعیت حرارتی سطح زمین بخش مهمی از ویژگی‌های جزیره حرارتی شهری را تشکیل می‌دهد. در رساله، LST یکی از شاخص‌های اصلی استخراج‌شده از داده‌های سنجش از دور بوده و نقشه آن برای دوره‌های مورد مطالعه تهیه شده است.

شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI)^۲

شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده شاخصی برای بیان وضعیت و تراکم پوشش گیاهی است. این شاخص امکان شناسایی و تفکیک نسبی سطوح دارای پوشش گیاهی از سایر انواع پوشش سطح زمین را فراهم می‌کند. در مطالعات

^۱ -Land Surface Temperature (LST)

^۲ -Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

مربوط به شرایط حرارتی شهری، پوشش گیاهی یکی از عناصر مهم محیطی محسوب می‌شود؛ زیرا وجود پوشش گیاهی می‌تواند با ایجاد سایه و افزایش تبخیر و تعرق، در تعدیل شرایط حرارتی محیط نقش داشته باشد. در پژوهش حاضر، NDVI به‌عنوان یکی از متغیرهای مستقل مورد استفاده قرار گرفته و برای سه دوره زمانی مورد مطالعه در شهر بعقوبه تهیه شده است (Wang et al., 2021).

شاخص ساخت‌وساز نرمال‌شده (NDBI)^۱

شاخص تفاضل نرمال‌شده ساخت‌وساز برای شناسایی و ارزیابی گستره سطوح ساخته‌شده و نفوذناپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص در تحلیل ساختار کالبدی شهر و شناسایی پهنه‌های ساخته‌شده کاربرد دارد (Patra et al., 2018).

سطوح ساخته‌شده از نظر ویژگی‌های حرارتی با سطوح طبیعی تفاوت دارند و افزایش گستره این سطوح می‌تواند با جذب و ذخیره انرژی حرارتی در محیط شهری ارتباط داشته باشد. از این‌رو، NDBI در پژوهش حاضر به‌عنوان یکی از متغیرهای مستقل مؤثر بر UHI در نظر گرفته شده است.

رطوبت نسبی (RH)^۲

رطوبت نسبی بیانگر وضعیت رطوبتی محیط است و از متغیرهای محیطی مورد توجه در بررسی شرایط حرارتی شهر محسوب می‌شود. شرایط رطوبتی می‌تواند با وضعیت تبادل حرارت و رطوبت در محیط ارتباط داشته باشد و از این منظر در بررسی عوامل مؤثر بر جزیره حرارتی شهری مورد توجه قرار می‌گیرد (Zhang et al., 2022). در پژوهش حاضر، RH به‌عنوان یکی از متغیرهای مستقل در کنار شاخص‌های سنجش از دور مورد استفاده قرار گرفته است تا نقش شرایط رطوبتی محیط در الگوی UHI شهر بعقوبه بررسی شود.

شاخص کیفیت هوا (AQI)^۳

شاخص کیفیت هوا ابزاری برای بیان وضعیت کیفیت هوا و شرایط آلودگی هوا در یک محدوده است. کیفیت هوا از جمله ویژگی‌های محیطی مرتبط با شرایط شهری است که می‌تواند در کنار عوامل کالبدی و حرارتی در بررسی وضعیت محیطی شهر مورد توجه قرار گیرد (Rabie et al., 2024). در پژوهش حاضر، AQI به‌عنوان یکی از متغیرهای مستقل در تحلیل جزیره حرارتی شهری در نظر گرفته شده است. برای شهر بعقوبه، نقشه‌های AQI برای دوره‌های زمانی مورد مطالعه تهیه شده و در مجموعه شاخص‌های مورد استفاده برای تحلیل UHI قرار گرفته است. (جدول ۱).

^۱ -Normalized Difference Built-up Index (NDBI)

^۲ -Relative Humidity (RH)

^۳ -Air Quality Index (AQI)

جدول ۱: معیارهای مورد استفاده در تهیه شاخص های مؤثر جزیره حرارتی شهری (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)

Table 1. Criteria Used for Constructing Effective Urban Heat Island Indicators (Source: Authors, 2026)

شاخص	مفهوم و نقش در تحلیل	منابع
NDVI	سنجش تراکم و وضعیت پوشش گیاهی و نقش آن در تعدیل حرارتی	Du et al., 2019; Wang et al., 2021; Zhou (et al., 2023
NDBI	شناسایی و سنجش سطوح ساخته شده و نفوذناپذیر	Chen et al., 2020; Patra et al., 2018;) (Zheng et al., 2021
LST	اندازه گیری دمای سطح زمین و تعیین الگوی حرارتی شهر	(Mathew et al., 2018; Mushore et al., 2022; Sekertekin & Zadbagher, 2021)
RH	ارزیابی وضعیت رطوبت نسبی و نقش آن در تعدیل شرایط حرارتی	(Yang et al., 2023; Zhang et al., 2022; Zhao et al., 2023)
AQI	ارزیابی وضعیت کیفیت هوا و ارتباط آن با شرایط محیطی و حرارتی	Rabie et al., 2024; Sarkar et al., 2022;) (Zhao et al., 2022

پیشینه پژوهش

مطالعات انجام شده در ایران عمدتاً با بهره گیری از سنجش از دور و تصاویر ماهواره ای، به بررسی تغییرات فضایی - زمانی جزایر حرارتی و ارتباط آن با دمای سطح زمین، پوشش گیاهی، سطوح ساخته شده و تغییرات کاربری زمین پرداخته اند.

صادقی نیا و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی تحت عنوان "تحلیل فضایی- زمانی جزیره حرارتی کلان شهر تهران با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی" با استفاده از ۱۳ تصویر Landsat TM، تغییرات فضایی - زمانی جزیره حرارتی تهران را طی سال های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۰ بررسی کردند. نتایج، گسترش پهنه های گرم و ارتباط آن با کاهش پوشش گیاهی و توسعه کاربری های شهری را نشان داد (صادقی نیا و همکاران، ۱۳۹۱).

احمدی و همکاران (۱۳۹۱) در مقاله ای تحت عنوان "تغییرات زمانی- مکانی الگوهای حرارتی و کاربری شهر شیراز با استفاده از داده های سنجنده" با استفاده از تصاویر TM و ETM+، الگوهای حرارتی و تغییرات کاربری شهر شیراز را بررسی کردند. نتایج بر ارتباط میان تغییرات کاربری زمین و الگوی فضایی دمای سطح تأکید داشت (احمدی و همکاران، ۱۳۹۱).

اشرف و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقی با عنوان "بررسی جزیره حرارتی شهر مشهد با استفاده از تصاویر ماهواره ای و نظریه فرکتال" جزیره حرارتی شهر مشهد را با استفاده از تصاویر ماهواره ای و نظریه فرکتال مطالعه کردند. نتایج نشان دهنده اهمیت ساختار فضایی و الگوی توسعه شهری در شکل گیری جزیره حرارتی بود (اشرف و همکاران، ۱۳۹۱). طالبی و همکاران (۱۳۹۳) در مطالعه ای تحت عنوان "ارزیابی اثرات پوشش زمین بر دمای سطح زمین با کاربرد سنجش از دور حرارتی مطالعه موردی: در تهران" اثر پوشش زمین بر دمای سطح تهران را با استفاده از سنجش از دور حرارتی بررسی کردند. نتایج بر ارتباط ویژگی های پوشش زمین و تغییرات دمای سطح تأکید داشت.

کریمی فیروزجایی و همکاران (۱۳۹۶) در مقاله ای با عنوان "پایش و پیش بینی شدت جزیره حرارتی شهر بابل با توجه به گسترش شهری و تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۱۳۹۴-۱۳۶۴" با تلفیق داده های اپتیک و حرارتی Landsat 8 و MODIS، خصوصیات بیوفیزیکی و رفتار حرارتی سطح را در شرق مازندران بررسی کردند. نتایج اهمیت تفاوت اراضی ساخته شده و غیرساخته شده در الگوی حرارتی را نشان داد.

ولیزاده کامران و همکاران (۱۳۹۶) در مقاله تحت عنوان "برآورد دمای سطح زمین و استخراج جزایر حرارتی با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا و تحلیل رگرسیون چند متغیره (مطالعه موردی شهر زنجان)" با استفاده از سنجش از دور و

رگرسیون چندمتغیره، دمای سطح و جزایر حرارتی شهر زنجان را بررسی کردند. این پژوهش بر نقش عوامل مختلف محیطی و کالبدی در تغییرات دمای سطح تأکید داشت.

مجرد و همکاران (۱۳۹۷) ذیل تحقیقی با عنوان "بررسی تغییرات دوره‌ای و فصلی جزیره گرمایی شهر کرمانشاه در شب و روز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. فیزیک زمین و فضا" تغییرات دوره‌ای و فصلی جزیره حرارتی شهر کرمانشاه را در شب و روز بررسی کردند. نتایج بر اهمیت تفاوت‌های زمانی و فصلی در الگوی جزیره حرارتی تأکید داشت. سلیمانی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی با عنوان "بکارگیری الگوریتم تک کاناله در تحلیل جزیره حرارتی منطقه شهری" با استفاده از Landsat 5 و ۸، تغییرات جزیره حرارتی شهر ساری را طی سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۸ بررسی کردند. نتایج نشان داد کاهش فضای سبز و افزایش سطوح شهری با گسترش جزایر حرارتی همراه بوده است.

ناصر و همکاران (۱۴۰۱) در تحقیقی با عنوان "بررسی تأثیر جزایر گرمایی کلانشهر اهواز بر میزان آسایش روانی شهروندان" با رویکرد توصیفی-تحلیلی و بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای (دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸) و تحلیل پرسشنامه‌ها به بررسی تأثیر جزایر گرمایی کلانشهر اهواز بر آسایش روانی شهروندان پرداختند. یافته‌های آنان نشان می‌دهد که جنوب‌غرب اهواز به دلیل تمرکز مراکز آلاینده، بحرانی‌ترین وضعیت را داشته و افزایش دما در این شهر ابتدا به افزایش استرس و فشار روزمره و سپس به کاهش شادی و احساس رضایت از زندگی منجر می‌شود.

آزمون و احمدی (۱۴۰۳) در مقاله‌ای با عنوان "ارزیابی تأثیرات عوامل قابل کنترل بر جزایر شهری به روش رگرسیون چندگانه (نمونه موردی: کلانشهر تبریز)" با بهره‌گیری از الگوریتم پنجره مجزا، تحلیل‌های خودهمبستگی فضایی و رگرسیون چندگانه به ارزیابی عوامل مؤثر بر جزایر حرارتی کلانشهر تبریز پرداختند و دریافتند که فضاهای باز و بافت خاکی بیشترین تأثیر را در شکل‌گیری این پدیده دارند، در حالی که ساختمان‌های با بام‌های بازتابنده و ارتفاع مناسب می‌توانند اثر خنک‌کنندگی داشته باشند.

مطالعات خارجی نیز با تأکید بر رویکردهای سنجش از دور و GIS، ضمن بررسی الگوی فضایی - زمانی جزایر حرارتی، نقش LST، NDVI، NDBI و ویژگی‌های کالبدی و محیطی شهر را در شکل‌گیری و شدت این پدیده مورد بررسی قرار داده‌اند:

بر اساس واکاوی تجارب جهانی، مطالعات مربوط به جزیره حرارتی شهری نشان می‌دهد که توسعه شهری و جایگزینی سطوح طبیعی با سطوح ساخته‌شده، از مهم‌ترین عوامل تغییر شرایط حرارتی سطح زمین هستند با بررسی کاربرد سنجش از دور حرارتی در اقلیم شهری، بر قابلیت داده‌های حرارتی ماهواره‌ای برای شناسایی الگوهای دمای سطح و مطالعه جزایر حرارتی تأکید کردند (Voogt and Oke, 2003). ونگ نیز نشان داد که سنجش از دور حرارتی امکان بررسی هم‌زمان دمای سطح زمین و ویژگی‌های بیوفیزیکی پوشش زمین را فراهم می‌کند (Weng, 2009)

دیلمای در مرور ۷۵ مطالعه، عوامل مؤثر بر UHI را بررسی کردند و پوشش گیاهی، فصل، سطوح ساخته‌شده، تفاوت روز و شب و تراکم جمعیت را از مهم‌ترین عوامل گزارش‌شده دانستند. همچنین، پژوهش‌های مبتنی بر تصاویر Landsat نشان داده‌اند که تغییرات کاربری و پوشش زمین با تغییرات LST و شدت جزیره حرارتی ارتباط مستقیم دارد (Deilami et al. 2018).

ایمهاف در مطالعه‌ای درباره تأثیر رشد شهری بر شرایط حرارتی، ارتباط میان ویژگی‌های سطح زمین و افزایش دمای مناطق شهری را بررسی کردند؛ که مشخص شد Landsat TM و ETM و MODIS از مهم‌ترین داده‌های مورد استفاده برای استخراج UHI هستند (Imhoff et al. 2010).

کته‌رکار در مطالعات جدیدتر، توجه بیشتری به رابطه میان شاخص‌های پوشش زمین و شدت جزیره حرارتی معطوف شده است (Kotharkar et al, 2018) و دیگر مطالعات مبتنی بر سنجش از دور نشان داده‌اند که پوشش گیاهی و سطوح ساخته‌شده از مهم‌ترین متغیرهای توضیح‌دهنده تغییرات حرارتی شهر هستند. در پژوهش انجام‌شده در ایروان نیز ارتباط فضایی - زمانی میان LULC و SUHI بررسی شد و نتایج نشان داد که NDVI و NDBI می‌توانند

به عنوان نماینده های مهم پوشش گیاهی و سطوح ساخته شده برای تبیین تغییرات LST مورد استفاده قرار گیرند؛ به طور کلی، سطوح ساخته شده و اراضی بایر با دمای بالاتر و پوشش گیاهی و پهنه های آبی با دمای پایین تر همراه بودند. مطالعه شی و همکاران (Shi et al. ۲۰۲۱) نیز بر اهمیت LST، NDVI، NDBI و سایر شاخص های سطح زمین در مطالعات SUHI تأکید کرده است. در جدیدترین مرورهای انجام شده، توسعه فناوری سنجش از دور و GIS امکان تحلیل دقیق تر ویژگی های فضایی و زمانی UHI و بررسی عوامل کنترل کننده آن را فراهم کرده است؛ با این حال، تفاوت در تعریف محدوده شهری و پیرامونی، انتخاب داده های حرارتی و روش محاسبه شدت UHI همچنان از چالش های مهم مطالعات این حوزه محسوب می شود.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت و روش، توصیفی - تحلیلی با رویکرد فضایی - زمانی است. هدف اصلی پژوهش، بررسی تغییرات فضایی - زمانی جزایر حرارتی شهری و شناسایی عوامل مؤثر بر آن در شهر بعقوبه عراق است. برای دستیابی به این هدف، از داده های سنجش از دور، شاخص های محیطی و تحلیل های مکانی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شده است. دوره های زمانی مورد بررسی شامل ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ است.

در این پژوهش، به منظور بررسی وضعیت حرارتی و عوامل مرتبط با آن، مجموعه ای از شاخص های سنجش از دور و محیطی تهیه و تحلیل شده است. دمای سطح زمین (LST)، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص ساخت و ساز نرمال شده (NDBI)، شاخص کیفیت هوا (AQI)، رطوبت نسبی (RH) و شاخص جزیره حرارتی شهری (UHI) مهم ترین متغیرهای مورد استفاده در پژوهش هستند.

در چارچوب تحلیلی پژوهش، UHI به عنوان متغیر وابسته و شاخص های LST، NDVI، NDBI، AQI و RH به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده اند. این شاخص ها برای دوره های مورد مطالعه تهیه شده و به صورت لایه های مکانی در محیط GIS مورد استفاده قرار گرفته اند.

در مرحله نخست، داده های سنجش از دور مربوط به دوره های مورد مطالعه آماده سازی و شاخص های مورد نیاز از آن ها استخراج شد. سپس نقشه های LST، NDVI، NDBI، AQI و UHI برای سال های ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ تهیه و در محیط GIS تحلیل شدند. این فرآیند امکان مقایسه الگوی فضایی شاخص ها و بررسی تغییرات آن ها در دوره زمانی مورد مطالعه را فراهم کرد.

برای بررسی ارتباط میان متغیرهای محیطی و کالبدی با جزیره حرارتی شهری، از رگرسیون خطی چندمتغیره استفاده شد. در این مدل، UHI به عنوان متغیر وابسته و LST، NDVI، NDBI، AQI و RH به عنوان متغیرهای توضیح دهنده وارد تحلیل شدند. مدل رگرسیونی برای هر یک از سه دوره زمانی به صورت جداگانه اجرا شد تا امکان مقایسه روابط میان شاخص ها در دوره های مختلف فراهم شود.

در نهایت، روش تحقیق مقاله در چهار مرحله اصلی انجام شده است: (۱) تهیه و آماده سازی داده های سنجش از دور و محیطی، (۲) استخراج شاخص های حرارتی، پوشش گیاهی، ساخت و ساز و محیطی، (۳) تحلیل فضایی - زمانی UHI در محیط GIS و (۴) بررسی عوامل مؤثر بر UHI با استفاده از رگرسیون خطی چندمتغیره. این چارچوب، مبنای تحلیل تغییرات جزایر حرارتی شهری در شهر بعقوبه در مقاله حاضر است (شکل ۱).

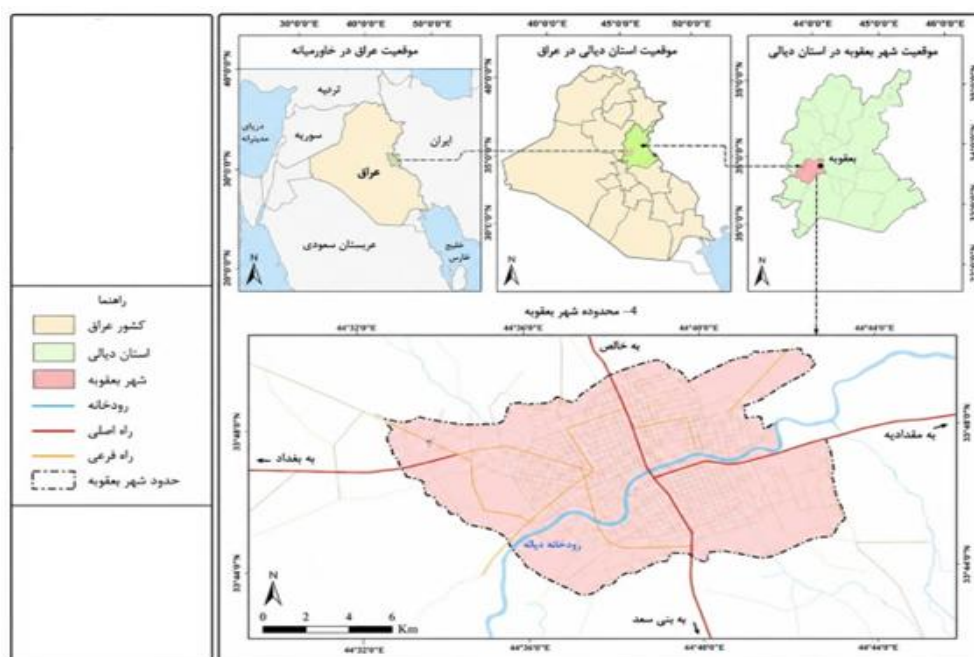
معرفی محدوده مورد مطالعه

شهر بعقوبه، مرکز استان دیالی، در شرق کشور عراق و در فاصله تقریبی ۶۰ کیلومتری شمال شرق بغداد واقع شده است. این شهر در دشت آبرفتی بین النهرین و در امتداد رودخانه دیاله توسعه یافته و موقعیت آن در محور ارتباطی

بغداد-خانقین، جایگاه مهمی در ساختار فضایی و ارتباطی منطقه به آن بخشیده است. از نظر موقعیت ریاضی، بعقوبه در حدود ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی قرار دارد و ارتفاع متوسط آن حدود ۴۵ تا ۵۰ متر از سطح دریا گزارش شده است.

رودخانه دیاله مهم‌ترین عنصر طبیعی محدوده شهر محسوب می‌شود و نقش مهمی در شکل‌گیری دشت آبرفتی، استقرار اراضی کشاورزی و باغ‌ها و توسعه فضاهای سبز پیرامون بعقوبه داشته است. از نظر توپوگرافی نیز شهر در پهنه‌ای عمدتاً هموار و کم‌ارتفاع قرار گرفته است؛ دامنه ارتفاعی محدوده در رساله حدود ۲۶ تا ۵۴ متر گزارش شده و ارتفاعات نسبتاً بیشتر در بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی و ارتفاعات کمتر در بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی قرار دارند. از نظر اقلیمی، بعقوبه در پهنه گرم و نیمه‌خشک عراق قرار دارد؛ بنابراین، شرایط اقلیمی، پوشش گیاهی و منابع آب از مؤلفه‌های مهم محیطی شهر به شمار می‌روند. وجود رودخانه دیاله، باغ‌ها، اراضی کشاورزی و فضاهای سبز در کنار توسعه سطوح ساخته‌شده، ساختار محیطی متنوعی را در شهر ایجاد کرده است. این ویژگی‌ها، به‌ویژه در مطالعه جزایر حرارتی، اهمیت زیادی دارند؛ زیرا تفاوت میان سطوح ساخته‌شده و پوشش‌های طبیعی می‌تواند در الگوی فضایی شرایط حرارتی شهر مؤثر باشد.

محدوده مورد مطالعه در رساله ۲۵۵۹،۴۷ هکتار تعیین شده است. بر اساس اطلاعات رساله، اراضی مسکونی با ۱۲۵۸،۳۷ هکتار (۴۸،۲۴ درصد) بیشترین سهم را در ساختار کاربری اراضی دارند. پس از آن، اراضی کشاورزی با ۳۵۶،۰۴ هکتار (۱۳،۹۱ درصد)، کاربری تجاری و خدماتی با ۲۹۲،۴۲ هکتار (۱۱،۴۶ درصد) و فضاهای سبز و پارک‌ها با ۲۳۱،۴۳ هکتار (۹،۰۴ درصد) قرار دارند. این ترکیب کاربری، غلبه سطوح انسان‌ساخت در کنار وجود پهنه‌های سبز و کشاورزی را نشان می‌دهد و از این جهت، محدوده مناسبی برای بررسی فضایی - زمانی جزایر حرارتی است. بر اساس رساله، جمعیت شهر بعقوبه در سال ۲۰۲۶ حدود ۴۶۷۹۰۰ نفر برآورد شده است. با توجه به مساحت ۲۵۵۹،۴۷ هکتاری محدوده مورد مطالعه، تراکم ناخالص جمعیت حدود ۱۸۳ نفر در هکتار محاسبه شده است. بیشترین تراکم جمعیتی در بخش‌های مرکزی و پهنه‌های مسکونی متراکم و تراکم کمتر در نواحی پیرامونی، اراضی کشاورزی و پهنه‌های باز مشاهده می‌شود.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه شهر بعقوبه (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)

Figure 1. Geographical Location of the Study Area in the City of Ba'qubah (Source: Authors, 2026)

تجزیه و تحلیل داده ها

در پژوهش حاضر، شاخص‌های مذکور برای دوره‌های زمانی مورد مطالعه شهر بعقوبه استخراج و در محیط GIS مورد پردازش و تحلیل قرار گرفتند. استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور امکان شناسایی تغییرات مکانی پوشش گیاهی، سطوح ساخته‌شده و دمای سطح زمین را در گستره شهر فراهم کرده است. همچنین، تلفیق این اطلاعات با داده‌های محیطی مربوط به رطوبت نسبی و کیفیت هوا، زمینه را برای تحلیل جامع‌تر عوامل مؤثر بر جزیره حرارتی شهری فراهم می‌کند. به‌منظور افزایش قابلیت مقایسه میان شاخص‌های مختلف، مقادیر حاصل از هر شاخص پس از تهیه نقشه‌های اولیه، در فرآیند استانداردسازی قرار گرفتند. این مرحله از آن جهت اهمیت دارد که شاخص‌های مورد بررسی دارای واحد، دامنه و مقیاس متفاوت هستند و استفاده مستقیم از مقادیر اولیه آنها در تحلیل چندمتغیره می‌تواند مقایسه میان متغیرها را با محدودیت مواجه سازد. بنابراین، داده‌های شاخص‌های مورد مطالعه با استفاده از استانداردسازی Z-score به مقیاسی قابل مقایسه تبدیل شدند.

در این فرآیند، هر مقدار مشاهده‌شده نسبت به میانگین همان متغیر و انحراف معیار آن استاندارد شده و در نتیجه، میانگین داده‌های استانداردشده برابر صفر و انحراف معیار آنها برابر یک خواهد بود. پس از استانداردسازی، نقشه‌های نرمال‌شده شاخص‌های $NDVI$ ، $NDBI$ ، LST ، AQI ، RH و UHI برای دوره‌های زمانی مورد بررسی تهیه شدند. این نقشه‌ها مبنای اصلی مقایسه فضایی شاخص‌ها و ورود داده‌ها به مرحله تحلیل رگرسیون چندمتغیره قرار گرفتند. شاخص $NDBI$ با هدف شناسایی و ارزیابی الگوی فضایی سطوح ساخته‌شده در شهر بعقوبه مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی نقشه این شاخص نشان می‌دهد که مقادیر بالاتر $NDBI$ عمدتاً با نواحی دارای تراکم بیشتر ساخت‌وساز، سطوح نفوذناپذیر، معابر و مجموعه‌های کالبدی شهری ارتباط دارد. در مقابل، اراضی کشاورزی، فضاهای سبز و سطوح طبیعی معمولاً مقادیر پایین‌تری را به خود اختصاص می‌دهند.

مقایسه دوره‌های زمانی بیانگر گسترش تدریجی سطوح ساخته‌شده در شهر بعقوبه است. افزایش $NDBI$ در برخی بخش‌های شهر را می‌توان نشانه توسعه کالبدی و کاهش سهم نسبی سطوح طبیعی در ساختار شهری دانست. این تغییر از دیدگاه جزیره حرارتی اهمیت زیادی دارد، زیرا سطوح ساخته‌شده و نفوذناپذیر معمولاً نسبت به پوشش گیاهی قابلیت کمتری برای تبخیر و تعرق داشته و انرژی دریافتی را بیشتر به صورت گرمای محسوس ذخیره و آزاد می‌کنند. هم‌زمانی افزایش $NDBI$ با کاهش $NDVI$ از مهم‌ترین الگوهایی است که در تفسیر وضعیت حرارتی بعقوبه مورد توجه قرار می‌گیرد. در مناطقی که توسعه ساخت‌وساز با کاهش پوشش گیاهی همراه شده است، انتظار می‌رود شرایط برای افزایش دمای سطح و تقویت کانون‌های حرارتی شهری فراهم‌تر شود. از این منظر، تغییرات $NDBI$ را نمی‌توان صرفاً به‌عنوان گسترش فیزیکی شهر در نظر گرفت، بلکه این شاخص یکی از متغیرهای مهم در تبیین تغییرات محیطی و حرارتی بعقوبه محسوب می‌شود.

دمای سطح زمین یکی از مهم‌ترین متغیرهای مورد استفاده برای شناسایی وضعیت حرارتی شهر بعقوبه است. الگوی فضایی LST تابعی از نوع پوشش زمین، میزان نفوذناپذیری سطح، تراکم ساخت‌وساز، وضعیت پوشش گیاهی و شرایط رطوبتی است. بنابراین، مقایسه نقشه LST با نقشه‌های $NDVI$ و $NDBI$ امکان شناسایی دقیق‌تر کانون‌های حرارتی و عوامل مؤثر بر شکل‌گیری آنها را فراهم می‌کند.

در شهر بعقوبه، بخش‌هایی که از پوشش گیاهی محدودتر و سطوح ساخته‌شده و بایر بیشتری برخوردارند، ظرفیت بیشتری برای ایجاد دمای سطح بالاتر دارند. در مقابل، مناطقی که دارای پوشش گیاهی، اراضی کشاورزی یا مجاورت بیشتر با عناصر آبی هستند، از ظرفیت بالاتری برای کاهش دمای سطح برخوردارند. این تفاوت فضایی در شرایط اقلیمی گرم و خشک بعقوبه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا شدت تابش و محدودیت رطوبت می‌تواند حساسیت محیط شهری نسبت به تغییرات پوشش زمین را افزایش دهد.

از این رو، تطبیق نقشه LST با NDVI و NDBI نشان می‌دهد که افزایش سطوح ساخته‌شده و کاهش پوشش گیاهی می‌تواند به شکل‌گیری کانون‌های حرارتی در شهر منجر شود. بنابراین، LST در تحلیل حاضر نه تنها یک شاخص توصیفی برای نمایش وضعیت حرارتی شهر، بلکه یکی از متغیرهای کلیدی در تبیین تغییرات UHI محسوب می‌شود. رطوبت نسبی یکی دیگر از عوامل مؤثر بر شرایط حرارتی محیط شهری است. توزیع مکانی RH در بعقوبه به وضعیت پوشش گیاهی، حضور منابع آب، میزان رطوبت سطح و ویژگی‌های اقلیمی و کالبدی مناطق مختلف وابسته است. در مناطقی که پوشش گیاهی و منابع آب حضور بیشتری دارند، شرایط مساعدتری برای افزایش رطوبت و تعدیل دمای محیط فراهم می‌شود.

در مقابل، بخش‌هایی از شهر که دارای سطوح ساخته‌شده، اراضی بایر و پوشش گیاهی محدود هستند، معمولاً از ظرفیت کمتری برای حفظ رطوبت برخوردارند. بنابراین، مقایسه نقشه RH با NDVI و LST می‌تواند ارتباط میان کاهش پوشش گیاهی، کاهش رطوبت و افزایش شرایط حرارتی را در بخش‌های مختلف شهر بعقوبه آشکار سازد. با توجه به شرایط گرم و خشک بعقوبه، نقش RH در تعدیل شرایط حرارتی باید در کنار سایر متغیرها تفسیر شود. به عبارت دیگر، افزایش یا کاهش RH به‌تنهایی تعیین‌کننده شدت UHI نیست، بلکه اثر آن در تعامل با پوشش گیاهی، سطوح ساخته‌شده و دمای سطح زمین قابل ارزیابی است.

شاخص کیفیت هوا برای ارزیابی وضعیت آلودگی و شرایط کیفی هوای شهر مورد استفاده قرار گرفته است. توزیع مکانی AQI می‌تواند تحت تأثیر تراکم ساخت‌وساز، شبکه معابر، فعالیت‌های انسانی، ترافیک، منابع انتشار آلاینده‌ها و شرایط جوی قرار گیرد. بنابراین، بررسی این شاخص در کنار NDBI و LST می‌تواند ارتباط میان ساختار کالبدی شهر و وضعیت محیطی آن را روشن‌تر کند.

در شهر بعقوبه، مناطق دارای تراکم بیشتر فعالیت‌های انسانی و سطوح ساخته‌شده می‌توانند مستعد شرایط نامطلوب‌تر کیفیت هوا باشند. از سوی دیگر، وجود پوشش گیاهی می‌تواند از طریق جذب بخشی از آلاینده‌ها و بهبود شرایط خرداقلیمی، در تعدیل وضعیت محیطی نقش داشته باشد. از این رو، تفسیر AQI باید با توجه به الگوی فضایی کاربری زمین و سایر شاخص‌های محیطی انجام گیرد.

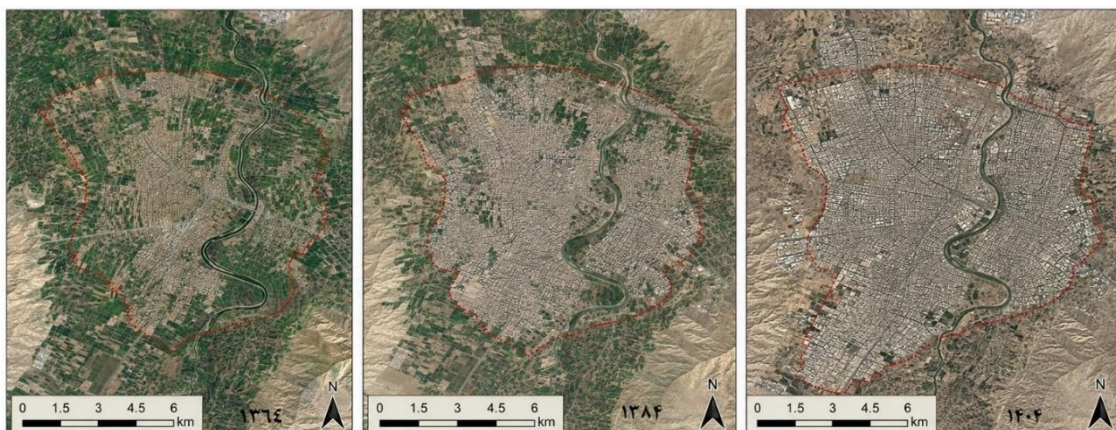
شاخص UHI به‌عنوان متغیر وابسته پژوهش، حاصل ترکیب و برآورد وضعیت حرارتی شهر در دوره‌های زمانی مورد مطالعه است. مقایسه الگوی UHI با NDVI، NDBI، LST، RH و AQI امکان شناسایی کانون‌های حرارتی و عوامل مؤثر بر شدت آنها را فراهم می‌کند.

در مجموع، انتظار می‌رود بخش‌هایی از بعقوبه که با کاهش پوشش گیاهی و افزایش سطوح ساخته‌شده مواجه شده‌اند، شرایط مستعدتری برای افزایش شدت UHI داشته باشند. در مقابل، مناطقی که از پوشش گیاهی، اراضی کشاورزی و عناصر آبی بیشتری برخوردار هستند، می‌توانند نقش تعدیل‌کننده در برابر افزایش دمای سطح داشته باشند. بنابراین، الگوی UHI در بعقوبه را باید حاصل برهم‌کنش مجموعه‌ای از عوامل کالبدی و محیطی دانست و نه نتیجه عملکرد یک شاخص منفرد.

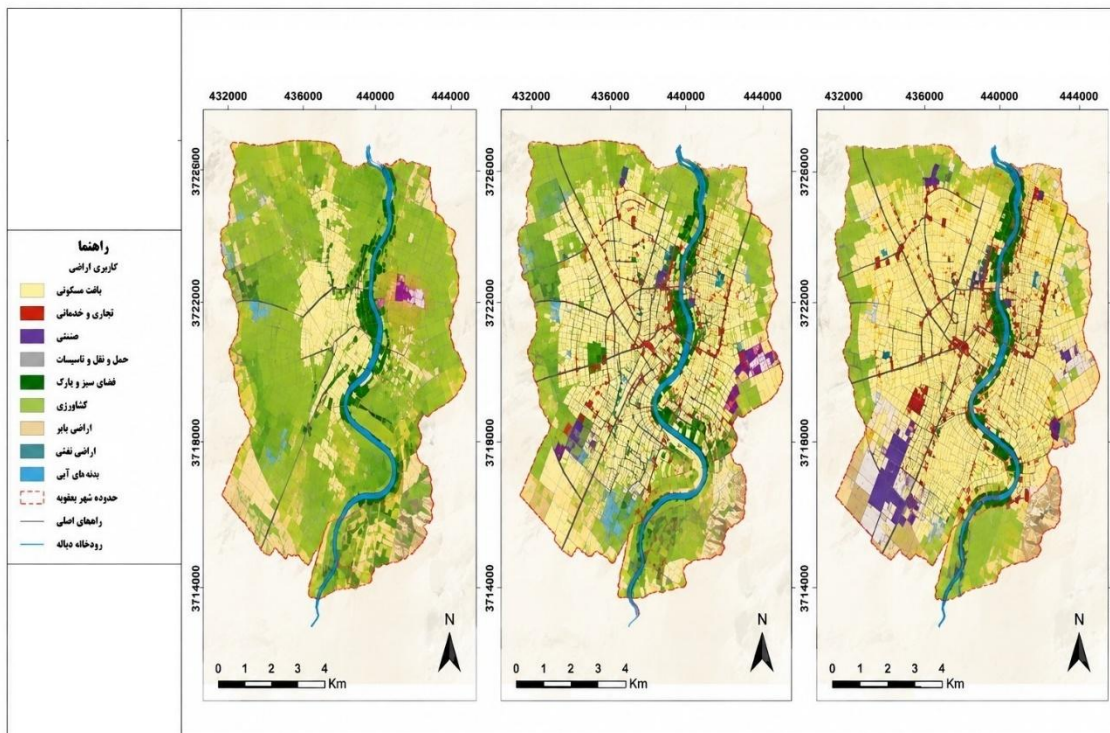
بر اساس مقایسه چندزمانه شاخص‌ها، یکی از مهم‌ترین روندهای مشاهده‌شده در بعقوبه کاهش پوشش گیاهی و تغییر هم‌زمان ساختار فضایی سطوح ساخته‌شده است. این روند از منظر برنامه‌ریزی شهری اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا تداوم کاهش پوشش گیاهی و افزایش سطوح نفوذناپذیر می‌تواند ظرفیت طبیعی شهر برای تعدیل گرما را کاهش داده و زمینه را برای تشدید کانون‌های حرارتی فراهم کند.

در نتیجه، تحلیل فضایی پنج متغیر NDVI، NDBI، LST، RH و AQI در کنار UHI، چارچوب مناسبی برای شناسایی روابط میان تغییرات پوشش زمین، ساختار کالبدی و شرایط محیطی شهر بعقوبه فراهم می‌آورد. در مرحله

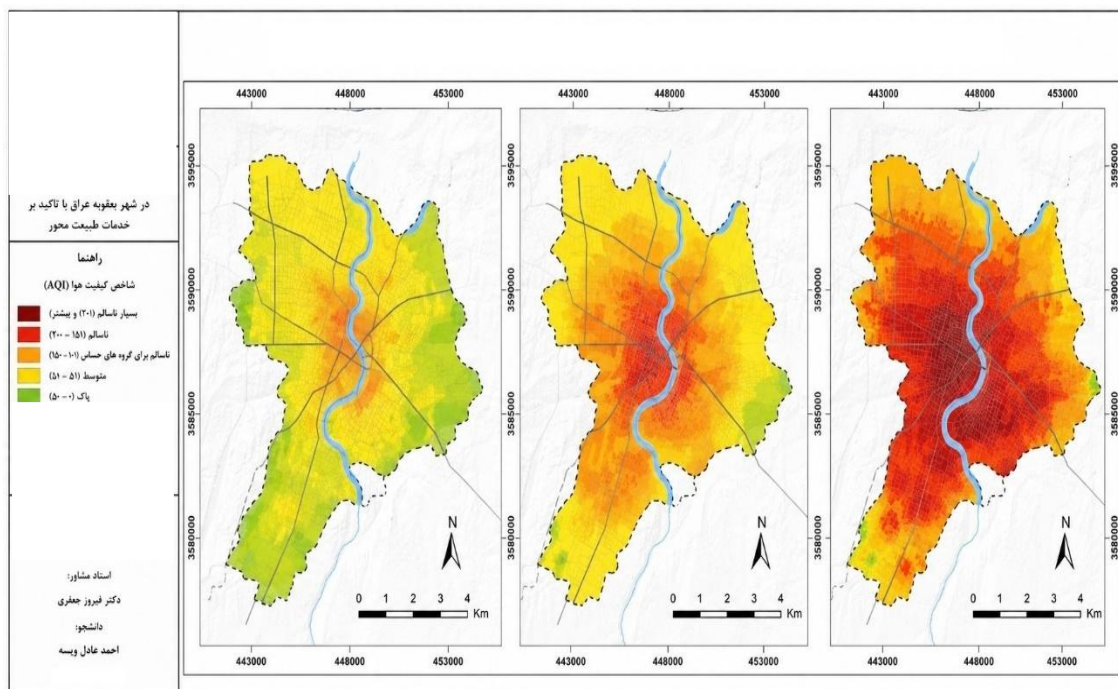
بعد، این روابط با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی چندمتغیره به صورت کمی مورد آزمون قرار می گیرند تا میزان و جهت اثرگذاری هر یک از متغیرهای مستقل بر UHI مشخص شود. تحلیل رگرسیون خطی چندگانه برای سه دوره ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ در شهر بعقوبه، با هدف بررسی تأثیر متغیرهای NDVI، NDBI، LST، RH و AQI بر UHI انجام شد. داده های ورودی با استفاده از Spatial Analyst و ابزار Zonal Statistics as Table از تصاویر ماهواره ای استخراج و میانگین گیری شدند. سپس پایگاه داده های حاصل به SPSS نسخه ۲۶ منتقل و مدل های رگرسیون برای هر دوره برآورد گردیدند (اشکال ۲ تا ۸).



شکل ۲: تصویر ماهواره ای لندست شهر بعقوبه در سال های ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)
Figure 2. Landsat satellite images of Baqubah City for the years 1985, 2005, and 2025. (Source: Authors, 2026).

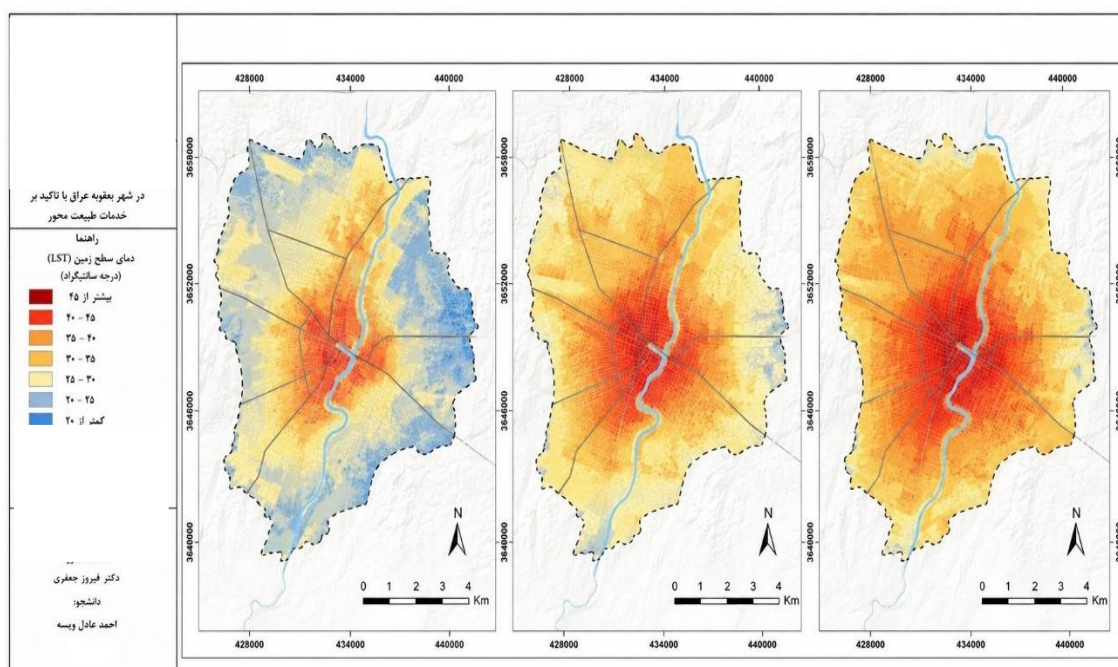


شکل ۳: کاربری های عمده اراضی شهر بعقوبه در سال های ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)
Figure 3. Major land use/land cover (LULC) categories of Baqubah City in 1985, 2005, and 2025. (Source: Authors, 2026).



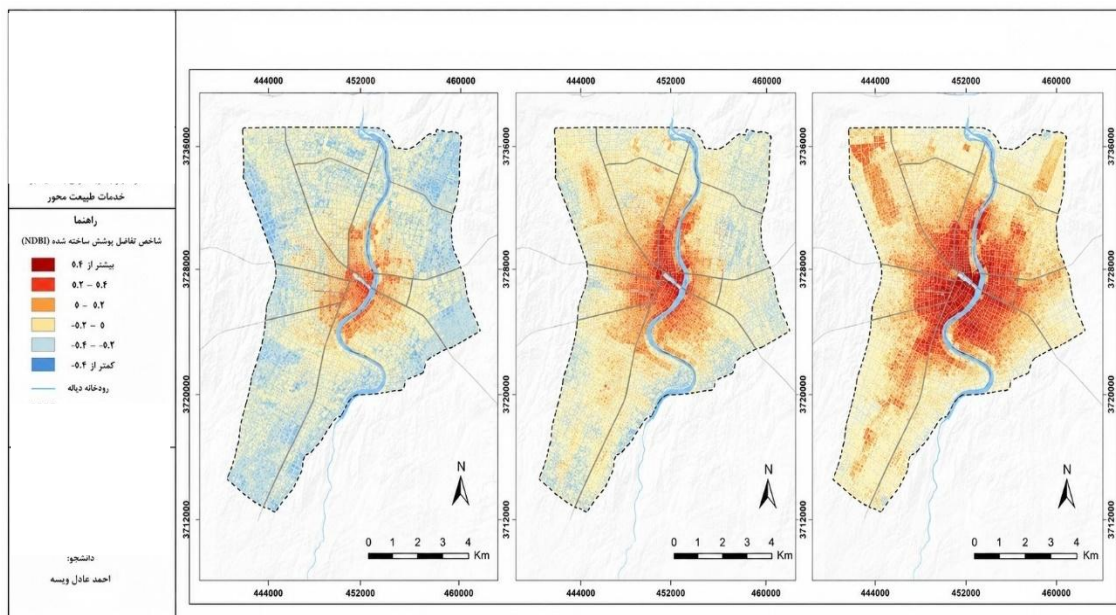
شکل ۴: شاخص کیفیت هوا (AQI) شهر بعقوبه در سال های ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)

Figure 4. Air Quality Index (AQI) of Baqubah City in 1985, 2005, and 2025. (Source: Authors, 2026).

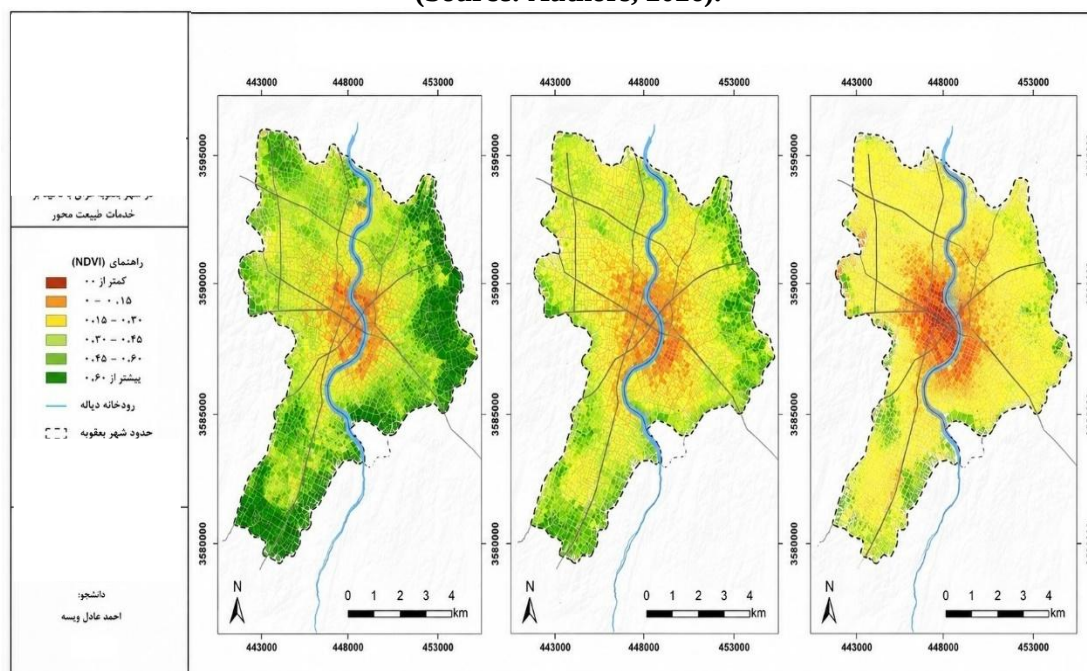


شکل ۵: شاخص دمای سطح زمین (LST) شهر بعقوبه در سال های ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)

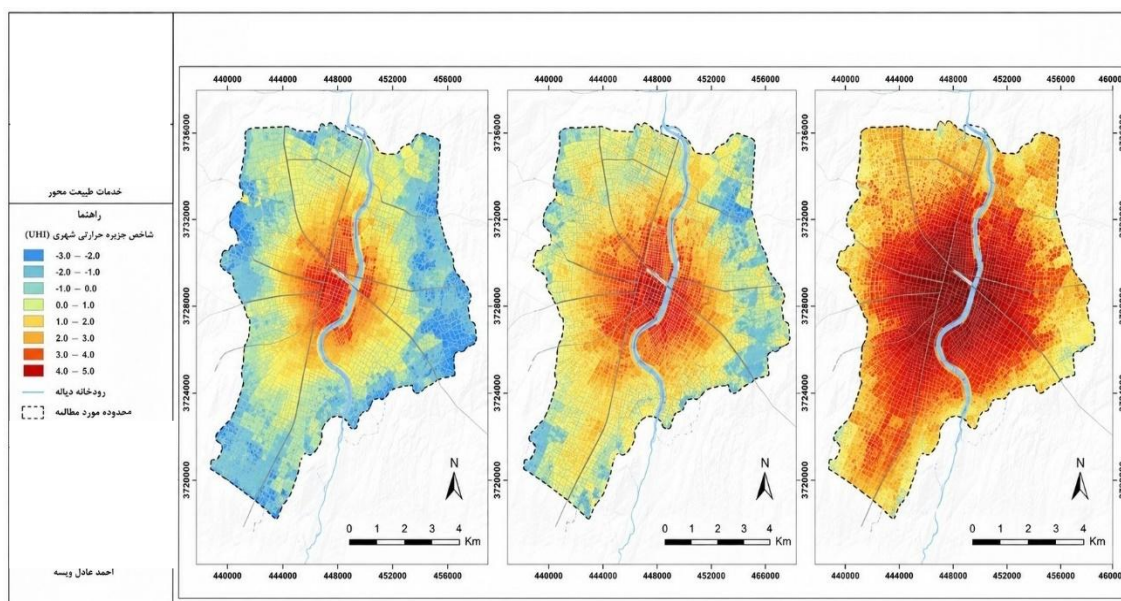
Figure 5. Land Surface Temperature (LST) of Baqubah City in 1985, 2005, and 2025. (Source: Authors, 2026).



شکل ۶: شاخص تفاضل پوشش ساخته شده (NDBI) شهر بعقوبه در سال های ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)
 Figure 6. Normalized Difference Built-up Index (NDBI) of Baqubah City in 1985, 2005, and 2025.
 (Source: Authors, 2026).



شکل ۷: شاخص تفاضل پوشش گیاهی (NDVI) شهر بعقوبه در سال های ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)
 Figure 7. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of Baqubah City in 1985, 2005, and 2025. (Source: Authors, 2026).



شکل ۸: شاخص جزیره حرارتی شهری (UHI) شهر بعقوبه در سال های ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)
 Figure 8. Urban Heat Island (UHI) intensity of Baqubah City in 1985, 2005, and 2025. (Source: Authors, 2026).

تحلیل UHI در سال ۱۳۶۴

بر اساس تحلیل چندمتغیره انجام شده برای دوره نخست، پنج شاخص NDVI، NDBI، LST، RH و AQI به عنوان متغیرهای توضیح دهنده تغییرات UHI در شهر بعقوبه وارد مدل شده اند. نتایج نشان می دهد که مجموعه این متغیرها ارتباط قابل توجهی با الگوی فضایی جزیره حرارتی شهری دارد. مقدار R برابر ۰/۸۷ و مقدار R^2 برابر ۰/۶۱ است؛ بنابراین حدود ۶۱ درصد از تغییرات UHI در این دوره توسط متغیرهای وارد شده به مدل تبیین می شود (جدول ۲).

جدول ۲: خلاصه مدل (Model Summary) برای دوره ۱۳۶۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)

Table 2. Model Summary Corresponding to the Period 1364 (Source: Authors, 1405)

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1364	0.82 ^a	.67	0.64	1.18

a. Predictors: (Constant), NDVI1364, NDBI1364, LST1364, RH1364, AQI1364

بر اساس نتایج حاصل از خلاصه مدل، ضریب همبستگی چندگانه (R) معادل ۰/۸۲ به دست آمده که نشانگر ارتباط قوی بین متغیرهای پیش بین و متغیر پاسخ (UHI1364) است. ضریب تعیین (R^2) نیز برابر با ۰/۶۷ محاسبه شده که حاکی از آن است که مدل تقریباً ۶۷ درصد از پراکندگی های متغیر وابسته را پوشش می دهد. افزون بر این، ضریب تعیین تعدیل شده ($Adjusted R^2$) با مقدار ۰/۶۴، با اعمال جریمه برای تعداد متغیرهای ورودی، از پایداری نسبتاً مطلوب الگو حکایت دارد. در ضمن، خطای استاندارد برآورد که ۱/۱۸ گزارش شده، بیانگر دقت قابل قبول مدل در پیش بینی است (جدول ۳).

جدول ۳: مقادیر ANOVA برای دوره ۱۳۶۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)

Table 3. Analysis of Variance (ANOVA) Results for the Period 1364 (Source: Authors, 1405)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
13	Regression	3.68	5	0.736	31.25	0.0 ^b
64	Residual	4.98	211	0.024		
	Total	8.66	216			
a. Dependent Variable: UHI1364						
b. Predictors: (Constant), NDVI1364, NDBI1364, LST1364, RH1364, AQI1364						

نتایج حاصل از جدول تحلیل واریانس (ANOVA) حاکی از معناداری کلی مدل رگرسیون در سطح اطمینان بالاست؛ به طوری که آماره F برابر با ۳۱٫۲۵ و سطح معنی داری آن کمتر از ۰٫۰۰۱ (Sig. = 0.000) گزارش شده است. با توجه به اینکه این مقدار از آستانه ۰٫۰۵ کوچک تر است، می توان نتیجه گرفت که ترکیب خطی متغیرهای پیش بین، نقشی مؤثر و معنی دار در تشریح تغییرات متغیر وابسته (UHI) ایفا می کند (جدول ۴).

جدول ۴: ضرایب رگرسیون (Coefficients) برای دوره ۱۳۶۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)

Table 4: Regression Coefficients for the Period 1364 (Source: Authors, 1405)

Coefficients ^a						
Model1364	Unstandardized Coefficients		Standardize d Coefficients	t	Sig.	VIF
	B	Std. Error	Beta			
(Constant)	2.35	0.89		2.64	0.009	
NDVI1364	-0.38	0.11	-0.25	-3.45	0.001	1.7
NDBI1364	0.65	0.14	0.47	4.64	0.000	2.0
LST1364	0.79	0.11	0.58	7.18	0.000	1.6
RH1364	-0.27	0.09	-0.21	-3.00	0.003	1.4
AQI1364	0.29	0.08	0.22	3.63	0.000	1.5
a. Dependent Variable: UHI1364						

یافته های جدول ضرایب رگرسیون نشان می دهد که متغیر LST با ضریب بتای استاندارد شده ۰٫۷۹، بیشترین تأثیر مثبت و معنادار را بر متغیر وابسته UHI دارد (در سطح اطمینان ۹۹٪ و با $p < 0.01$). پس از آن، به ترتیب NDBI با بتای ۰٫۶۵ و AQI با بتای ۰٫۲۹ نیز دارای اثر مثبت و معنی دار بر UHI هستند. در سوی مقابل، NDVI با بتای -۰٫۳۸ و RH با بتای -۰٫۲۷، هر دو نقش کاهش دهنده بر UHI داشته و این تأثیرات منفی نیز در سطح ۰٫۰۱ معنادار ارزیابی شده اند. افزون بر این، مقادیر VIF برای همه متغیرها زیر ۲٫۱ محاسبه شده که حاکی از نبود مشکل جدی هم خطی میان پیش بین هاست (جدول ۴).

تحلیل رگرسیونی انجام شده به وضوح نشان می دهد که مدل انتخابی، قدرت کافی برای تشریح ارتباط میان متغیرهای محیطی و UHI دارد. در این میان، دو عامل LST و NDBI به عنوان محرک های اصلی افزایش جزیره حرارتی شناسایی می شوند، در حالی که AQI نیز این روند را تشدید می کند. در طرف مقابل، NDVI و RH به عنوان عوامل

تعدیل کننده، اثر معکوس بر UHI دارند. پیام روشن این پژوهش برای سیاست‌گذاران شهری، اولویت‌دهی به برنامه‌های توسعه‌ی فضای سبز و کنترل آلاینده‌های هوا به‌منزله راهکارهایی مؤثر و علمی برای تعدیل گرمای شهری است.

تحلیل UHI در سال ۱۳۸۴

بر اساس نتایج مدل رگرسیونی مربوط به سال ۱۳۸۴، کلیه‌ی متغیرهای مورد بررسی شامل NDVI، NDBI، LST، RH و AQI توانسته‌اند به‌طور معناداری تغییرات شاخص UHI را تشریح کنند (جدول ۵).

جدول ۵: خلاصه مدل (Model Summary) در دوره ۱۳۸۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)

Table 5: Model Summary for the Period 1384 (Source: Authors, 1405)

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1384	0.87 ^a	.75	0.72	1.04
a. Predictors: (Constant), NDVI1384, NDBI1384, LST1384, RH1384, AQI1384				

نتایج خلاصه مدل برای سال ۱۳۸۴ نشان‌دهنده همبستگی قوی بین ترکیب متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (UHI1384) است، چنانکه ضریب همبستگی چندگانه (R) برابر با ۰٫۸۷ محاسبه شده است. ضریب تعیین (R^2) معادل ۰٫۷۲، به‌دست آمده که بیانگر آن است که مدل توانسته نزدیک به ۷۲ درصد از واریانس متغیر پاسخ را تبیین کند. ضریب تعیین تعدیل‌شده ($Adjusted R^2$) نیز با مقدار ۰٫۷۲، با در نظر گرفتن تعداد متغیرهای پیش‌بین، از برازش قابل‌قبول مدل حکایت دارد. افزون بر این، خطای استاندارد برآورد معادل ۰٫۴۱ گزارش شده که مؤید دقت نسبتاً بالای پیش‌بینی‌های مدل است (جدول ۵).

جدول ۶: مقادیر ANOVA در دوره ۱۳۸۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)

Table 6: ANOVA Values for the Period 1384 (Source: Authors, 1405)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1384	Regression	4.26	5	0.852	40.65	0.000
	Residual	4.40	211	0.021		
	Total	8.66	216			
a. Dependent Variable: UHI1384						
b. Predictors: (Constant), NDVI1384, NDBI1384, LST1384, RH1384, AQI1384						

نتایج جدول تحلیل واریانس (ANOVA) حاکی از آن است که مدل رگرسیونی در سطح اطمینان ۹۹ درصد از لحاظ آماری معنادار می‌باشد ($Sig.=0.000$). مقدار F محاسبه شده برابر با ۴۰٫۶۵ بوده که نشان‌دهنده اعتبار کلی مدل و وجود اثر ترکیبی معنادار از سوی متغیرهای پیش‌بین بر متغیر وابسته UHI است (جدول ۶).

بر اساس جدول ضرایب رگرسیون، متغیر LST با ضریب بتای استاندارد شده ۰٫۹۴، همچنان نیرومندترین و مهم‌ترین عامل تشدیدکننده UHI شناخته می‌شود و این اثر در سطح ۹۹٪ اطمینان معنادار است ($p<0.01$). همچنین NDBI با بتای ۰٫۸۱ و AQI با بتای ۰٫۳۷، هر دو دارای تأثیر مثبت و معنادار بر افزایش UHI هستند. در مقابل، NDVI با ضریب منفی ۰٫۴۶ و RH با ضریب منفی ۰٫۲۲، نقش کاهنده داشته‌اند که تأثیر کاهشی NDVI بار دیگر بر اهمیت پوشش گیاهی در تعدیل دمای شهری و کاهش جزیره حرارتی صحنه می‌گذارد. افزون بر این، مقادیر VIF برای همه

متغیرها کمتر از ۲٫۵ گزارش شده که حاکی از عدم وجود هم‌خطی شدید و اطمینان‌بخش بودن مدل از نظر چندهم‌خطی است (جدول ۷).

جدول ۷: ضرایب رگرسیون (Coefficients) در دوره ۱۳۸۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)

Table 7. Estimated Regression Coefficients for the 1384 Period (Source: Authors, 1405)						
Coefficients ^a						
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	VIF
	B	Std. Error	Beta			
1 (Constant)	2.90	0.82	-	3.54	0.001	-
NDVI1384	-0.46	0.10	-0.31	-4.60	0.000	1.9
NDBI1384	0.81	0.13	0.58	6.23	0.000	2.3
LST1384	0.94	0.10	0.68	9.40	0.000	1.7
RH1384	-0.22	0.08	-0.18	-2.75	0.006	1.5
AQI1384	0.37	0.07	0.28	5.29	0.000	1.8

a. Dependent Variable: UHI1384

یافته‌های سال ۱۳۸۴ همانند الگوی مشاهده‌شده در سال ۱۳۶۴، بار دیگر تأکید می‌کنند که افزایش دمای سطح زمین (LST) و توسعه مناطق ساخته‌شده (NDBI) از مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده پدیده جزیره حرارتی شهری (UHI) محسوب می‌شوند. همچنین، شاخص کیفیت هوا (AQI) در این سال نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری با UHI نشان داده است که احتمالاً بیانگر ارتباط میان آلودگی هوا و افزایش تنش‌های حرارتی در بافت شهری است. در مقابل، کاهش شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و رطوبت نسبی (RH) به‌عنوان دو عامل کاهنده، ضرورت توجه به راهکارهای محیط‌زیستی مانند توسعه فضای سبز و مدیریت رطوبت را بیش از پیش برجسته می‌سازد.

تحلیل UHI در سال ۱۴۰۴

نتایج برآورد مدل رگرسیون چندگانه برای سال ۱۴۰۴ حاکی از آن است که الگوی مذکور از توان پیش‌بینی‌کنندگی بالایی برخوردار بوده و موفق شده است تغییرات شاخص جزیره حرارتی شهری (UHI) را به‌صورت معناداری تبیین نماید (جدول ۸).

جدول ۸: خلاصه مدل (Model Summary) در دوره ۱۴۰۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)

Table 8: Model Summary for the Period 1404 (Source: Authors, 1405)				
Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1404	0.92 ^a	.85	0.82	0.89

a. Predictors: (Constant), NDVI1404, NDBI1404, LST1404, RH1404, AQI1404

نتایج خلاصه مدل برای سال ۱۴۰۴ نشان می‌دهد که ضریب همبستگی چندگانه (R) معادل ۰٫۸۹ بوده که حاکی از همبستگی بسیار نیرومند بین مجموعه متغیرهای پیش‌بین و متغیر وابسته (UHI) است. ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰٫۸۵ به‌دست آمده که بیانگر آن است که مدل قادر به تبیین ۸۵ درصد از واریانس تغییرات UHI است. ضریب تعیین

تعدیل شده ($\text{Adjusted } R^2$) با مقدار ۰,۸۲ نیز پایداری و دقت مدل را تأیید می‌کند. ضمن اینکه خطای استاندارد برآورد با رقم ۰,۸۹ در مقایسه با سال‌های قبل کاهش یافته که خود نشان‌دهنده بهبود قابل توجه دقت پیش‌بینی مدل در سال ۱۴۰۴ است (جدول ۸).

جدول ۹: مقادیر ANOVA در دوره ۱۴۰۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)

Table 9: ANOVA Values for the Period 1404 (Source: Author, 1405)

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
140	Regression	5.24	5	1.048	54.80	0.000
4	Residual	4.02	211	0.019		
	Total	9.26	216			
a. Dependent Variable: UHI1404						
b. Predictors: (Constant), NDVI1404, NDBI1404, LST1404, RH1404, AQI1404						

جدول ANOVA با مقدار F معادل ۲۰,۸ و سطح معناداری کمتر از ۰,۰۱ ($p=0.000$) نشان می‌دهد که مدل از نظر آماری معتبر و معنادار بوده و کلیه متغیرهای مستقل به‌صورت توأمان توانسته‌اند سهم قابل توجهی از تغییرات UHI را تبیین کنند (جدول ۹).

جدول ۱۰: ضرایب رگرسیون (Coefficients) در دوره ۱۴۰۴ (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۵)

Table 10: Regression Coefficients for the Period 1404 (Source: Author, 1405)

Coefficients ^a							
Model1404		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	VIF
		B	Std. Error	Beta			
1	(Constant)	3.85	0.76	-	5.07	0.000	-
	NDVI1404	-0.58	0.09	-0.38	-6.44	0.000	2.1
	NDBI1404	1.02	0.12	0.70	8.50	0.000	2.8
	LST1404	1.18	0.08	0.80	14.75	0.000	2.2
	RH1404	-0.16	0.06	-0.14	-2.67	0.008	1.7
	AQI1404	0.48	0.06	0.33	8.00	0.000	2.4
a. Dependent Variable: UHI1404							

بر اساس جدول ضرایب رگرسیون، متغیر LST با ضریب بتای استاندارد شده ۱,۱۸، بیشترین اثر مثبت و به‌شدت معنادار را بر UHI داشته است ($p<0.01$). پس از آن، NDBI با بتای ۱,۰۲ و AQI با بتای ۰,۴۸ نیز تأثیرات مثبت و معنی‌داری بر متغیر وابسته نشان داده‌اند. در مقابل، NDVI با ضریب منفی ۰,۵۸ و RH با ضریب منفی ۰,۱۶ هر دو همبستگی منفی با UHI دارند. نکته حائز اهمیت، تشدید اثر منفی NDVI در سال ۱۴۰۴ نسبت به سال‌های پیشین است که گویای نقش فزاینده پوشش گیاهی در تعدیل جزیره حرارتی شهری طی سال‌های اخیر می‌باشد. همچنین، مقادیر VIF برای همه متغیرها کمتر از ۳ گزارش شده که حاکی از نبود هم‌خطی شدید و تأییدکننده ثبات و پایداری مدل است (جدول ۱۰).

نتایج مدل‌سازی برای سال ۱۴۰۴ نشان‌دهنده تداوم و حتی تشدید نقش متغیرهای محیطی در شکل‌گیری جزیره حرارتی شهری است. افزایش چشم‌گیر ضرایب LST و NDBI، بیانگر روند صعودی گرمایش شهری و توسعه بی‌رویه سطوح ساخته‌شده است. شاخص کیفیت هوا (AQI) نیز همچنان به‌عنوان عاملی مؤثر بر UHI باقی مانده است. در سوی مقابل، اثر کاهنده پوشش گیاهی (NDVI) در این سال به‌طور معناداری افزایش یافته که نشان از نقش برجسته

فضای سبز در تعدیل دمای شهری دارد. همچنین کاهش نسبی تأثیر رطوبت نسبی (RH) حاکی از آن است که در سال‌های اخیر، وزن عوامل حرارتی و ساختاری (مانند LST و NDBI) بر شدت جزیره حرارتی غلبه یافته است. این یافته‌ها، ضرورت طراحی سیاست‌های شهری مبتنی بر توسعه فضای سبز و مدیریت هوشمندانه توسعه کالبدی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

بررسی و مقایسه نتایج حاصل از سه مدل رگرسیون خطی برای سال‌های ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ روندی معنادار و قابل توجه از تغییرات اثرگذاری متغیرهای محیطی بر شاخص UHI را نشان می‌دهد.

مقدار R در طول سه دوره زمانی از ۰,۸۲ در سال ۱۳۶۴ به ۰,۸۷ در سال ۱۳۸۴ و در نهایت به ۰,۹۲ در سال ۱۴۰۴ افزایش یافته است. این روند بیانگر تقویت رابطه میان مجموعه متغیرهای مستقل شامل NDVI، NDBI، LST، RH و AQI و شاخص UHI در طول دوره مورد مطالعه است. همچنین مقدار R Square از ۰,۶۷ در سال ۱۳۶۴ به ۰,۷۵ در سال ۱۳۸۴ و سپس به ۰,۸۵ در سال ۱۴۰۴ رسیده است. بنابراین، قدرت تبیین مدل رگرسیون در طول دوره مورد بررسی به‌طور محسوسی افزایش یافته و سهم متغیرهای محیطی و کالبدی منتخب در توضیح تغییرات UHI بیشتر شده است. به بیان دیگر، در دوره اخیر، الگوی فضایی UHI شهر بعقوبه ارتباط منسجم‌تری با ویژگی‌های سطح زمین، ساخت‌وساز، پوشش گیاهی، رطوبت و کیفیت هوا پیدا کرده است (جداول ۲ تا ۱۰).

دمای سطح زمین (LST) در هر سه دوره به‌عنوان قوی‌ترین عامل مثبت مؤثر بر UHI ظاهر شده است. مقدار ضریب بتای استانداردشده این متغیر از ۰,۵۸ در سال ۱۳۶۴ به ۰,۶۸ در سال ۱۳۸۴ و سپس به ۰,۸۰ در سال ۱۴۰۴ افزایش یافته است. این روند نشان می‌دهد که نقش دمای سطح زمین در تبیین و تشدید UHI در بعقوبه طی زمان تقویت شده است. با توجه به شرایط گرم و خشک بعقوبه، افزایش اهمیت LST را می‌توان با تشدید شرایط گرمایی سطح شهر و افزایش سهم سطوحی که توانایی بیشتری در جذب و ذخیره انرژی حرارتی دارند مرتبط دانست. از این منظر، LST در دوره ۱۴۰۴ به مهم‌ترین متغیر توضیح‌دهنده شدت UHI در شهر تبدیل شده است.

شاخص ساخت‌وساز (NDBI) نیز در هر سه دوره اثر مثبت و فزاینده‌ای بر UHI داشته است. ضریب بتای استانداردشده این متغیر از ۰,۴۷ در سال ۱۳۶۴ به ۰,۵۸ در سال ۱۳۸۴ و در نهایت به ۰,۷۰ در سال ۱۴۰۴ افزایش یافته است. افزایش مستمر این ضریب نشان‌دهنده تقویت نقش سطوح ساخته‌شده و نفوذناپذیر در شکل‌گیری و تشدید الگوی جزیره حرارتی شهر بعقوبه است. بنابراین، افزایش تراکم و گسترش ساخت‌وساز شهری، در کنار کاهش نسبی ظرفیت طبیعی سطح برای تعدیل گرما، از عوامل مهم مرتبط با افزایش شدت UHI در دوره اخیر محسوب می‌شود. پوشش گیاهی (NDVI) در هر سه دوره اثر منفی و معناداری بر UHI داشته، اما شدت اثر کاهنده آن در طول زمان افزایش یافته است. ضریب بتای استانداردشده NDVI از -۰,۲۵ در سال ۱۳۶۴ به -۰,۳۱ در سال ۱۳۸۴ و سپس به -۰,۳۸ در سال ۱۴۰۴ رسیده است. بنابراین، هرچه مقدار پوشش گیاهی افزایش یافته، شدت UHI کاهش یافته است. افزایش قدرمطلق ضریب NDVI در دوره اخیر نشان می‌دهد که نقش پوشش گیاهی در تعدیل شرایط حرارتی بعقوبه اهمیت بیشتری پیدا کرده است. این یافته از نظر برنامه‌ریزی شهری نیز اهمیت دارد؛ زیرا در اقلیم گرم و خشک بعقوبه، توسعه و حفاظت از فضاهای سبز، پوشش گیاهی و سایر زیرساخت‌های سبز می‌تواند در کاهش اثرات گرمایی شهر مؤثر باشد.

شاخص کیفیت هوا (AQI) نیز در هر سه دوره رابطه مثبت با UHI داشته و اهمیت آن به‌تدریج افزایش یافته است. مقدار Beta این متغیر از ۰,۲۲ در سال ۱۳۶۴ به ۰,۲۸ در سال ۱۳۸۴ و سپس به ۰,۳۳ در سال ۱۴۰۴ رسیده است. این روند بیانگر آن است که همزمان با افزایش شدت شرایط حرارتی و توسعه شهری، ارتباط میان وضعیت کیفیت هوا و UHI نیز تقویت شده است. با این حال، از نظر شدت اثر، AQI در هر سه دوره پس از LST و NDBI قرار دارد و نقش آن در مقایسه با دو متغیر مذکور محدودتر است.

رطوبت نسبی (RH) در هر سه دوره رابطه منفی با UHI داشته است، اما قدرمطلق ضریب بتای آن از -۰,۲۱ در سال ۱۳۶۴ به -۰,۱۸ در سال ۱۳۸۴ و -۰,۱۴ در سال ۱۴۰۴ کاهش یافته است. این روند نشان می‌دهد که اثر تعدیل‌کننده

RH بر UHI در مقایسه با دو عامل اصلی یعنی LST و NDBI، در دوره اخیر ضعیف تر شده است. از آنجا که بعقوبه در پهنه‌ای با شرایط گرم و خشک قرار دارد، کاهش نسبی اهمیت RH در مدل را می‌توان در چارچوب غلبه عوامل حرارتی و کالبدی سطح شهر تفسیر کرد. در این شرایط، تقویت پوشش گیاهی و عناصر طبیعت‌محور می‌تواند به‌عنوان یکی از راهکارهای مهم برای تعدیل شرایط حرارتی و افزایش ظرفیت خنک‌کنندگی محیط شهری مورد توجه قرار گیرد.

در مجموع، افزایش R^2 از ۰,۶۷ در سال ۱۳۶۴ به ۰,۸۵ در سال ۱۴۰۴ نشان می‌دهد که ارتباط میان متغیرهای محیطی و کالبدی منتخب و UHI در شهر بعقوبه در طول دوره مطالعه تقویت شده است. در میان این عوامل، LST و NDBI مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده UHI بوده‌اند، در حالی که NDVI مهم‌ترین عامل کاهنده محسوب می‌شود. روند افزایشی ضرایب LST و NDBI و هم‌زمان افزایش قدرمطلق ضریب منفی NDVI نشان می‌دهد که تغییرات ساختار سطح زمین و وضعیت پوشش گیاهی در شکل‌گیری الگوی حرارتی بعقوبه اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده‌اند. بر این اساس، می‌توان گفت که روند افزایش قدرت تبیین مدل از ۰,۶۷ به ۰,۸۵ صرفاً بیانگر افزایش قدرت آماری مدل نیست، بلکه از منظر فضایی نیز نشان‌دهنده اهمیت فزاینده ویژگی‌های محلی و سطحی شهر در شکل‌گیری UHI است. در شرایط اقلیمی گرم و خشک بعقوبه، گسترش سطوح ساخته‌شده و افزایش دمای سطح زمین در کنار کاهش یا پراکنش نامتوازن پوشش گیاهی می‌تواند زمینه را برای تشدید کانون‌های حرارتی فراهم کند. بنابراین، نتایج رگرسیون ضرورت توجه بیشتر به توسعه فضای سبز، حفاظت از پوشش گیاهی موجود، افزایش عناصر سایه‌انداز و زیرساخت سبز و کنترل گسترش سطوح نفوذناپذیر را در برنامه‌ریزی شهری بعقوبه نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد ها

پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات فضایی - زمانی جزایر حرارتی شهری و عوامل مؤثر بر آن در شهر بعقوبه عراق و با استفاده از داده‌های سنجش از دور و GIS انجام شد. در این راستا، شاخص‌های LST، NDVI، NDBI، RH و AQI برای دوره‌های زمانی ۱۳۶۴، ۱۳۸۴ و ۱۴۰۴ تهیه و ارتباط آن‌ها با شاخص UHI مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در طول دوره مورد مطالعه، فشار ناشی از توسعه کالبدی بر شرایط حرارتی شهر افزایش یافته است. به‌طور مشخص، ضریب اثر NDBI بر UHI از ۰,۴۷ در سال ۱۳۶۴ به ۰,۷۰ در سال ۱۴۰۴ و ضریب LST از ۰,۵۸ به ۰,۸۰ افزایش یافته است؛ در مقابل، NDVI در هر سه دوره رابطه منفی با UHI داشته و نقش پوشش گیاهی در تعدیل شرایط حرارتی را نشان داده است. همچنین، توان تبیین مدل رگرسیونی از $R^2=0.67$ در سال ۱۳۶۴ به $R^2=0.85$ در سال ۱۴۰۴ افزایش یافته است.

از نظر عوامل مؤثر بر جزیره حرارتی، نتایج نشان می‌دهد که LST و NDBI مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده UHI در شهر بعقوبه بوده‌اند، در حالی که NDVI و RH نقش کاهنده داشته‌اند. در دوره ۱۳۸۴ نیز LST با ضریب بتای ۰,۹۴ قوی‌ترین عامل تشدیدکننده UHI بوده و NDBI و AQI نیز رابطه مثبت و معنادار با آن داشته‌اند؛ در مقابل، NDVI و RH اثر کاهنده نشان داده‌اند.

در مجموع، یافته‌های پژوهش بیانگر آن است که گسترش سطوح ساخته‌شده و کاهش ظرفیت پوشش گیاهی از مهم‌ترین مسائل مرتبط با تشدید شرایط حرارتی بعقوبه هستند. از این‌رو، مدیریت جزیره حرارتی در این شهر نیازمند توجه هم‌زمان به ساختار کالبدی و عناصر طبیعی است. حفاظت و تقویت فضاهای سبز، اراضی کشاورزی و سطوح نفوذپذیر و همچنین توسعه زیرساخت‌های سبز و آبی می‌تواند به‌عنوان بخشی از راهبرد کاهش تنش حرارتی شهر مورد توجه قرار گیرد. این رویکرد با نتایج رساله نیز همخوان است که بر حفاظت، احیا و توسعه زیرساخت‌های سبز - آبی و راهکارهای طبیعت‌محور برای کاهش اثرات جزیره حرارتی بعقوبه تأکید دارد.

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل جزیره حرارتی شهر بعقوبه، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

۱. حفاظت از فضاهای سبز و پوشش گیاهی موجود، به‌ویژه باغ‌ها، اراضی کشاورزی و فضاهای سبز شهری، و جلوگیری از تبدیل آن‌ها به سطوح ساخته‌شده.
 ۲. افزایش پوشش گیاهی در پهنه‌های دارای شدت حرارتی بالا از طریق توسعه پارک‌ها، درختکاری معابر و ایجاد فضاهای سبز محله‌ای.
 ۳. کنترل گسترش سطوح نفوذناپذیر و ساخت‌وسازهای متراکم در پهنه‌هایی که از ظرفیت حرارتی بالاتری برخوردارند.
 ۴. تقویت زیرساخت سبز - آبی شهر و ایجاد پیوستگی میان فضاهای سبز، باغ‌ها و پهنه‌های طبیعی با هدف افزایش ظرفیت تعدیل حرارتی.
 ۵. حفاظت و احیای حاشیه رودخانه دیاله و استفاده از ظرفیت طبیعی آن برای ایجاد کریدور سبز و کاهش تنش حرارتی در پهنه‌های پیرامونی.
 ۶. استفاده از راهکارهای طبیعت‌محور در برنامه‌ریزی شهری، به‌ویژه در مناطق دارای شدت بالاتر جزیره حرارتی.
 ۷. استفاده از GIS و تصاویر ماهواره‌ای به‌صورت دوره‌ای برای پایش تغییرات LST، UHI، NDVI و NDBI و شناسایی پهنه‌های بحرانی حرارتی.
 ۸. در مطالعات آتی، پیشنهاد می‌شود اثر ویژگی‌های کالبدی محلات، تراکم ساختمانی، ارتفاع ساختمان‌ها، عرض معابر و الگوی فضایی فضاهای سبز نیز در کنار شاخص‌های سنجش از دور بررسی شود.
- به‌طور کلی، جهت‌گیری اصلی پیشنهادها پژوهش باید حرکت از مدیریت صرفاً کالبدی گرمای شهری به سمت مدیریت اکولوژیک و طبیعت‌محور باشد؛ رویکردی که علاوه بر کاهش جزایر حرارتی، می‌تواند به بهبود کیفیت محیط شهری و افزایش تاب‌آوری بعقوبه در برابر پیامدهای تغییرات محیطی کمک کند.

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

مشارکت نویسندگان در مقاله به شکل توضیح داده شده از سوی مجله، مورد تأیید نویسندگان این مقاله است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر فاقد حمایت مالی است.

سپاسگزاری

از کلیه کسانی که در مراحل مختلف نوشتن این مقاله با نظرات خود ما را یاری دادند، سپاسگزاری می‌کنیم.

References:

1. Ahmadi, M., Ashourloo, D., & Narangifard, M. (2012). Spatiotemporal changes in thermal patterns and land use in Shiraz city using TM and ETM+ sensor data. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 4(4), e95038. (In Persian). https://scj.sbu.ac.ir/article_95038.html
2. Ashraf, B., Farid Hosseini, A., & Mianabadi, A. (2012). Investigation of the urban heat island in Mashhad city using satellite imagery and fractal theory. *Geography and Environmental Hazards*, 1(1), 35-48. (In Persian). doi: 10.22067/geo.v1i1.16521
3. Azmoon, M., & Ahmadi, G. (2024). Evaluating the effects of controllable factors on urban heat islands using multiple regression analysis (Case study: Tabriz metropolis).

- Quarterly Journal of Studies in Sustainable Urban and Regional Development, 5(4), 14-27. (In Persian). https://www.srds.ir/article_202038.html
4. Azmoun, M. and Ahmadi, G. (2024). Assessment of Impacts Controllable Factors on Urban Heat Islands Using Multiple Regression Analysis (Case Study: Tabriz Metropolis). (In Persian). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 5(4), 14-27. https://www.srds.ir/article_202038.html?lang=en
 5. Azmoun, M. and Mohammadnejad, M. (2024). Evaluation of ecological and morphological factors of urban heat island (Study sample: District 1 of region 1 and District 4 of region 6 of the metropolis of Tabriz). (In Persian). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 5(1), 58-74. https://www.srds.ir/article_195068.html?lang=en
 6. Chen, H.-C., Han, Q., & De Vries, B. (2020). Urban morphology indicator analyzes for urban energy modeling. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101863.
 7. Deilami, K., Kamruzzaman, M., & Liu, Y. (2018). Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67, 30-42.
 8. Du, J., Fu, Q., Fang, S., Wu, J., He, P., & Quan, Z. (2019). Effects of rapid urbanization on vegetation cover in the metropolises of China over the last four decades. *Ecological Indicators*, 107, 105458.
 9. Imhoff, M. L., Zhang, P., Wolfe, R. E., & Bounoua, L. (2010). Remote sensing of the urban heat island effect across bioclimatic regions in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 504-513.
 10. Karimi Firozjaei, M., Kiavarz, M., & Alavipanah, S. K. (2017). Monitoring and predicting the intensity of the urban heat island in Babol city with respect to urban expansion and land use changes during 1985-2015. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 5(3), 123-151. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.29252/jgit.5.3.123>
 11. Kotharkar, R., Ramesh, A., & Bagade, A. (2018). Urban heat island studies in South Asia: A critical review. *Urban climate*, 24, 1011-1026.
 12. Li, L., Zhan, W., Hu, L., Chakraborty, T. C., Wang, Z., Fu, P., ... & Wang, S. (2023). Divergent urbanization-induced impacts on global surface urban heat island trends since 1980s. *Remote Sensing of Environment*, 295, 113650.
 13. Li, S., Liang, Y., Yang, D., & Shen, J. (2025). Effect of blue-green landscape pattern and urban forms on surface urban heat island intensity: Evidence from 816 Chinese urban clusters. *Ecological Indicators*, 178, 113949.
 14. Mahmoudzadeh, H., Jafari, F. and Dinparvar, N. (2026). Analysis of thermal reduction capacity based on green spaces in Maragheh city using the urban cooling model. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 6(4), 350-366. (In Persian). https://www.srds.ir/article_229442.html?lang=en
 15. Mathew, A., Khandelwal, S., & Kaul, N. (2018). Spatio-temporal variations of surface temperatures of Ahmedabad city and its relationship with vegetation and urbanization parameters as indicators of surface temperatures. *Remote sensing applications: society and environment*, 11, 119-139.
 16. Mojarad, F., Naserieh, M., & Hashemi, S. (2018). Investigation of diurnal and seasonal changes in the urban heat island of Kermanshah city using satellite imagery.

- Journal of the Earth and Space Physics*, 44(2), 479-494. (In Persian). doi: [10.22059/jesphys.2018.247773.1006952](https://doi.org/10.22059/jesphys.2018.247773.1006952)
17. Mushore, T. D., Mutanga, O., & Odindi, J. (2022). Estimating urban LST using multiple remotely sensed spectral indices and elevation retrievals. *Sustainable Cities and Society*, 78, 103623.
18. Naser, M., Safaeipour, M., & Rezaei Jafari, K. (2022). Investigating the impact of urban heat islands on citizens' psychological well-being in the Ahvaz metropolis. *Quarterly Journal of Studies in Sustainable Urban and Regional Development*, 3(1), 1-22. (In Persian). https://www.srds.ir/article_152274.html
19. Naser, M., Safaeipour, M. and Rezaei Jafari, K. (2022). Investigating the Effect of Heat Islands in Ahvaz Metropolis on the Level of Psychological Comfort of Citizens. (In Persian). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 3(1), 1-22. https://www.srds.ir/article_152274.html?lang=en
20. Patra, S., Sahoo, S., Mishra, P., & Mahapatra, S. C. (2018). Impacts of urbanization on land use/cover changes and its probable implications on local climate and groundwater level. *Journal of urban management*, 7(2), 70-84.
21. Rabie, R., Asghari, M., Nosrati, H., Niri, M. E., & Karimi, S. (2024). Spatially resolved air quality index prediction in megacities with a CNN-Bi-LSTM hybrid framework. *Sustainable Cities and Society*, 109, 105537.
22. Sadeghinia, A., Alijani, B., & Ziaian Firouzabadi, P. (2012). Spatio-temporal analysis of the urban heat island in Tehran metropolis using remote sensing and geographic information system. *Geography and Environmental Hazards*, 1(4), 1-17. (In Persian). doi: [10.22067/geo.v1i4.16950](https://doi.org/10.22067/geo.v1i4.16950)
23. Sarkar, N., Gupta, R., Keserwani, P. K., & Govil, M. C. (2022). Air quality index prediction using an effective hybrid deep learning model. *Environmental pollution*, 315, 120404.
24. Sekertekin, A., & Zadbagher, E. (2021). Simulation of future land surface temperature distribution and evaluating surface urban heat island based on impervious surface area. *Ecological indicators*, 122, 107230.
25. Shi, H., Xian, G. Z., Auch, R. F., Gallo, K., & Zhou, Q. (2021). Urban heat island and its regional impacts using remotely sensed thermal data—A review of recent developments and methodology. *Land*, 10(8), 867.
26. Soleimani, K., Rohani Ghadikolaei, F., Shabani, M., & Rohani Ghadikolaei, M. (2020). Application of the single-channel algorithm in the analysis of urban heat islands. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 12(3), 87-102. (In Persian). doi: [10.52547/gisj.12.3.87](https://doi.org/10.52547/gisj.12.3.87)
27. Taleshi, M. S. A., Sotoudeh, A., Sabouhi, M., & Niazi, Y. (2014). Assessment of land cover effects on land surface temperature using thermal remote sensing: A case study in Tehran. *Journal of Environmental Researches*, 5(10), 69-78. (In Persian). <https://www.magiran.com/paper/1371401>
28. Valizadeh Kamran, K., Gholamnia, K., Einali, G., & Mousavi, S. M. (2017). Estimation of land surface temperature and extraction of heat islands using the split-window algorithm and multivariate regression analysis (Case study: Zanzan city). *Quarterly Journal of Research and Urban Planning*, 8(30), 35-50. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22285229.1396.8.30.3.9>
29. Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384.

30. Wang, H., Yan, S., Liang, Z., Jiao, K., Li, D., Wei, F., & Li, S. (2021). Strength of association between vegetation greenness and its drivers across China between 1982 and 2015: Regional differences and temporal variations. *Ecological Indicators*, 128, 107831.
31. Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 335–344.
32. Yang, Q., Xu, Y., Wen, D., Hu, T., Chakraborty, T. C., Liu, Y., & Yang, J. (2024). Satellite clear-sky observations overestimate surface urban heat islands in humid cities. *Geophysical Research Letters*, 51(2), [e2023GL106995](https://doi.org/10.1029/2023GL106995).
33. Yang, X., Xu, S., Peng, L. L., Chen, Y., & Yao, L. (2023). General air temperature and humidity features of local climate zones: A multi-city observational study in eastern China. *Urban Climate*, 51, 101652.
34. Zhang, L., Deng, Y., Li, L., Chan, P.-w., Luo, H., Yin, Q., Xu, F., Wu, K., & Yang, H. (2022). Why has the trend in humidity variation in Shenzhen changed from decrease to increase while urbanisation has continued? *Urban Climate*, 44, 101209.
35. Zhao, L., Li, T., Przybysz, A., Liu, H., Zhang, B., An, W., & Zhu, C. (2023). Effects of urban lakes and neighbouring green spaces on air temperature and humidity and seasonal variabilities. *Sustainable Cities and Society*, 91, 104438.
36. Zhao, Z., Wu, J., Cai, F., Zhang, S., & Wang, Y.-G. (2022). A statistical learning framework for spatial-temporal feature selection and application to air quality index forecasting. *Ecological Indicators*, 144, 109416.
37. Zheng, Y., Tang, L., & Wang, H. (2021). An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. *Journal of cleaner production*, 328, 129488.
38. Zhou, T., Liu, H., Gou, P., & Xu, N. (2023). Conflict or Coordination? Measuring the relationships between urbanization and vegetation cover in China. *Ecological Indicators*, 147, 109.



COPYRIGHTS



© The Author(s). This is an open access article under the CC BY-NC license:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Publisher: *Private with Cooperation Iranian Geography and Urban Planning Association.*