



An Examination of the Dynamics of Urban Heat Islands Utilizing a Multi-Temporal Methodology (Case Study: District 4 of Tabriz Metropolis)

Hassan Mahmoudzadeh^{1*} , Hadi Hakimi² , Ramin Asghari³ 

1. Professor, Urban and Regional Planning Department, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: mahmoudzadeh@tabrizu.ac.ir
2. Associate, Department of Urban and regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: h.hakimi@tabrizu.ac.ir
3. Ph.D. student of Geography and Urban Planning, Aras International Campus, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: ramin.asghari1987@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 29 July 2025

Received in revised form: 10
October 2025

Accepted: 21 October 2025

Published online: 5 November
2025

Keywords:

Urban Heat Islands (UHIs),
Remote Sensing,
Multiple Linear Regression,
Multi-Temporal Approach,
District 4 of Tabriz

ABSTRACT

Urbanization, driven by rural-to-urban migration, significantly contributes to global population growth and the expansion of cities. This growth intensifies the Urban Heat Island (UHI) effect, where urban areas experience higher temperatures than surrounding rural regions. Rapid urbanization also increases energy demand, air pollution, and greenhouse gas (GHG) emissions, adversely impacting human health and well-being. Consequently, studying factors influencing UHI intensity, particularly using Land Surface Temperature (LST) as a key indicator, is critical for developing mitigation strategies against the negative impacts of urban expansion. This research specifically examined factors affecting UHI intensity and analyzed its temporal changes from 1363 to 1403 in District 4 of the Tabriz metropolitan area, Iran. Key investigated indices included the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Built-up Index (NDBI), Land Surface Temperature (LST), Urban Heat Island intensity (UHI), Relative Humidity (RH), and Air Quality Index (AQI). Methodology involved secondary satellite data (Landsat 5 TM and Landsat 8 TIRS/OLI C2L2) for NDVI, NDBI, LST, and UHI calculation. The ASCE-standardized Penman-Monteith method derived RH, while AQI utilized data from local air quality stations. Multivariate linear regression analyzed the relationships between these indices and UHI intensity. Findings revealed that NDVI (vegetation cover) and RH exhibited cooling effects over the 40-year period, acting as mitigating factors for UHI intensity (indicated by negative regression coefficients). However, this cooling influence proved relatively insignificant compared to the dominant heating effects resulting from increased built-up areas (NDBI) and reduced green space. Crucially, the analysis showed substantial increases in NDBI and AQI coefficients by 1403 relative to 1363 and 1383. This signifies that intensified urbanization, urban expansion, and associated air pollution have been the primary drivers significantly exacerbating the UHI effect within Tabriz's District 4. The study concludes that the heating impacts of construction and pollution far outweigh the cooling benefits of remaining vegetation and humidity. These results underscore the urgent necessity for implementing sustainable urban planning strategies focused on enhancing green infrastructure, expanding green spaces, and managing land use effectively to mitigate the detrimental effects of urban heat islands.

Cite this article: Mahmoudzadeh, H., Hakimi, Y., & Asghari, R. (2025). An Examination of the Dynamics of Urban Heat Islands Utilizing a Multi-Temporal Methodology (Case Study: District 4 of Tabriz Metropolis). *Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 5 (16), 69-94.
<http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.68382.1143>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.68382.1143>

Publisher: University of Tabriz.



Extended Abstract

Introduction

Urbanization, driven by rural-to-urban migration, intensifies the Urban Heat Island (UHI) effect, where cities experience higher temperatures than surrounding rural areas. This phenomenon exacerbates energy demand, air pollution, and greenhouse gas emissions, adversely impacting human health. Focusing on District 4 of Tabriz metropolis, Iran, this study examines factors influencing UHI intensity and its temporal dynamics from 1984 to 2024.

Materials and Methods

Secondary satellite data (Landsat 5 TM and Landsat 8 TIRS/OLI C2L2) were used to compute key indices: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Built-up Index (NDBI), Land Surface Temperature (LST), and UHI intensity. Relative Humidity (RH) was derived via the ASCE-standardized Penman-Monteith method, while the Air Quality Index (AQI) utilized data from local monitoring stations. Multivariate linear regression analyzed relationships between these variables and UHI intensity across three time periods (1984, 2004, 2024). Data normalization and spatial analysis were performed using ENVI, ArcGIS, and SPSS.

Results

NDVI (vegetation cover) and RH exhibited consistent cooling effects, indicated by negative regression coefficients. However, their mitigation impact was overshadowed by pronounced warming from increased built-up areas (NDBI) and air pollution (AQI). By 2024, NDBI and AQI coefficients surged significantly compared to 1984 and 2004, highlighting urbanization and pollution as primary UHI drivers. LST emerged as the strongest positive predictor of UHI ($\beta = 0.85$ in 2024). Statistical models showed enhanced explanatory power over time ($R^2 = 0.81$ in 2024), confirming intensified UHI correlates.

Conclusion

The heating effects of urbanization and pollution substantially outweigh the cooling capacity of vegetation and humidity in Tabriz. The findings underscore an urgent need for sustainable urban planning, emphasizing green infrastructure expansion, land-use management, and air quality controls to mitigate UHI impacts. Future policies should prioritize ecological resilience in rapidly developing regions.

References

- Ahmadi, M., & Dadashi Rudbari, A. A. (2017). Identification of urban heat islands based on an environmental approach: Case study (Isfahan Metropolis). *Geography and Environmental Planning*, 28(3), 1–20. doi:10.22108/gep.2017.98318.0[In Persian]
- Aminzadeh Ghohrri, B., & Qeshlagh Pour, S. (2020). The impact of spatial patterns of urban green structure on urban heat island temperature change: Case study of Tehran City. *Environmental Sciences*, 46(2), 239–254. doi:10.22059/jes.2021.308065.1008059[In Persian]
- Arab, N., Salman Mahiny, A. R., Mikaeli Tabrizi, A. R., & Wicht, T. (2022). Investigation and analysis of land use dynamics and its impact on urban heat islands (Case study: Mashhad City). *Journal of Natural Environment*, 75(3), 384–398. doi:10.22059/jne.2022.336599.2365[In Persian]
- Arab, N., Salman Mahiny, A. R., Mikaeli Tabrizi, A. R., & Wicht, T. (2020). Evaluating the relationship between urban land use and heat islands: Case study of the desert city of Yazd. *Journal of Physical Geography*, 47(Serial No. 47), 1–17. (Spring 2020) [In Persian]
- Askandari Damaneh, H., Askandari Damaneh, H., Cheraghi, M., Khosravi, H., & Adeli Sardooi, M. (2021). The impact of land use changes on heat island formation using remote sensing (Case study: Kerman City). *Journal of Natural Environment*, 74(3), 614–628. doi:10.22059/jne.2022.327993.2258[In Persian]
- Ghorbani, F., & Sajadzadeh, H. (2024). The impact of vegetation changes on the intensity of the urban heat island (Case study: Karaj Metropolis). *Urban Studies Quarterly*, 13(52), 3–16. doi:10.22034/urbs.2024.140477.5005[In Persian]



- Khedmatzadeh, A., Mousavi, M. N., Mohammadi Turkmani, H., & Mohammadi, M. S. (2021). Analysis of land use changes and heat island formation in the buffer zone of Urmia City using remote sensing. *Regional Planning Quarterly*, 11(41), 119–134. doi:10.30495/jzpm.2021.3965 [In Persian]
- Mahmoudzadeh, H., Naghdbishi, A., & Mo'meni, S. (2018). The impact of urban land uses on heat island formation (Case study: Mashhad City). *Geography and Environmental Hazards*, 7(3), 105–119. doi:10.22067/geo.v0i0.68150 [In Persian]
- Maleki, S., Farahmand, G., & Shojaian, A. (2018). Evaluating the spatio-temporal variability of heat islands in relation to urban land uses: Case study of Urmia City. *Geographical Information (Sepehr) Scientific-Research Quarterly*, 27(105), 183–197. doi:10.22131/sepehr.2018.31488 [In Persian]
- Mansouri, S. T. A., & Zarghami, E. (2022). Investigating the impact of the physical arrangement of high-rise residential buildings on urban heat islands. *Iranian Journal of Energy*, 25(1), 33–45. URL: <http://necjournals.ir/article-1-1770-fa.html> [In Persian]
- Maroofnezhad, A. (2011). The role of urban land uses in heat island formation (Case study: Ahvaz City). *Zagros Landscape Geographical Quarterly*, 3(10), 90–111. SID. <https://sid.ir/paper/175788/fa> [In Persian]
- Moshiri, S., Nikdel, M. A., Jabraeili, M. R., Teimouri, I., Valizadeh, K. K., & Feizizadeh, B. (2025). Evaluating the spatio-temporal changes of the ecological livability index (Study area: Tabriz Metropolis). *Spatial Planning*, 15(1), 87–108. doi:10.22108/sppl.2025.141477.1787 [In Persian]
- Motkan, A. A., Nohegar, A., Mirbagheri, B., & Torkchin, N. (2014). Analyzing the role of land use in the formation of heat islands using multi-temporal ASTER sensor data (Case study: Bandar Abbas City). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 5(4), 1–14. SID. <https://sid.ir/paper/189463/fa> [In Persian]
- Namjomanesh, J., Kargar, B., & Zivyar, P. (2022). Urban management and regeneration of green spaces and its impact on mitigating heat islands. *Iranian Journal of Political Sociology*, 5(12), 2332–2352. doi:10.30510/psi.2022.299994.2144 [In Persian]
- Omidwar, K., Moeidfard, S., Fatemi, M., & Mahdi Narangifard. (2020). Evaluating the relationship between urban land use and heat islands: Case study of the desert city of Yazd. *Journal of Physical Geography*, 47(Serial No. 47), 1–17. (Spring 2020) [In Persian]
- Sami, I., Karbasi, P., & Akhavan, Z. (2023). Assessing the role of land use in the formation of heat islands in Maragheh City. *Urban Structure and Function Studies*, 10(36), 89–111. doi:10.22080/usfs.2023.24802.2329 [In Persian]
- Shahinifar, M., & Shahandeh, H. R. (2023). Analysis of Sentinel-3 SLSTR sensor images in identifying urban heat islands and their relationship with vegetation (Case study: Kermanshah City). *Journal of Physical Geography*, 16(60), 97–112. [In Persian]
- Shoushtari, S. A., Ghalehnoee, M., Ezzatian, V., Maleki, A., Paknezhad, M., & Rahpo, R. (2018). Investigating a hybrid method for detecting heat islands and mitigation strategies through urban green space capacity (Case study: Isfahan City). *Urban Studies Quarterly*, 7(28), 41–54. doi:10.34785/J011.2018.015 [In Persian]
- Deosthali, V. (2000). Impact of rapid urban growth on heat and moisture islands in Pune City, India. *Atmospheric Environment*, 34(17), 2745–2754.
- Gonzalez-Trevizo, M., Martinez-Torres, K., Armendariz-Lopez, J., Santamouris, M., Bojorquez-Morales, G., & Luna-Leon, A. (2021). Research trends on environmental, energy and vulnerability impacts of Urban Heat Islands: An overview. *Energy and Buildings*, 246, 111051.
- Hassan, T., Zhang, J., Prodhon, F. A., Pangali Sharma, T. P., & Bashir, B. (2021). Surface urban heat islands dynamics in response to LULC and vegetation across South Asia (2000–2019). *Remote Sensing*, 13(16), 3177.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., & Franklin, J. (2005). The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction. *The Mathematical Intelligencer*, 27(2), 83–85.
- He, B.-J., Wang, J., Liu, H., & Ulpiani, G. (2021). Localized synergies between heat waves and urban heat islands: Implications on human thermal comfort and urban heat management. *Environmental Research*, 193, 110584.



- Jalan, S., & Sharma, K. (2014). Spatio-temporal assessment of land use/land cover dynamics and urban heat island of Jaipur city using satellite data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 767–772.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning* (Vol. 112). Springer.
- Kamali Maskooni, E., Hashemi, H., Berndtsson, R., Daneshkar Arasteh, P., & Kazemi, M. (2021). Impact of spatiotemporal land-use and land-cover changes on surface urban heat islands in a semiarid region using Landsat data. *International Journal of Digital Earth*, 14(2), 250–270.
- Koko, A. F., Yue, W., Abubakar, G. A., Alabsi, A. A. N., & Hamed, R. (2021). Spatiotemporal influence of land use/land cover change dynamics on surface urban heat island: A case study of Abuja metropolis, Nigeria. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 272.
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied linear statistical models*. McGraw-hill.
- Maru, R., & Ahmad. S. (2015). The relationship between land use changes and the urban heat island phenomenon in Jakarta, Indonesia. *Advanced Science Letters*, 21(2), 150–152.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A. & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons.
- Nurwanda, A., & Honjo, T. (2018). Analysis of land use change and expansion of surface urban heat island in Bogor City by remote sensing. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(5), 165.
- Oliveira, A., Lopes, A., Correia, E., Niza, S., & Soares, A. (2021). Heatwaves and summer urban heat islands: a daily cycle approach to unveil the urban thermal signal changes in Lisbon, Portugal. *Atmosphere*, 12(3), 292.
- Putra, C., Ramadhani, A., & Fatimah, E. (2021). Increasing Urban Heat Island area in Jakarta and it's relation to land use changes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Putri, D. O. A., Ermawati, M., & Yanto, N. P. (2024). Analisis Dampak Perubahan Penggunaan Lahan Perkotaan Terhadap Urban Heat Island Di Kecamatan Kedaton. *Jurnal Perencanaan dan Pengembangan Kebijakan*, 4(1), 27–38.
- Radhi, H., Sharples, S., & Assem, E. (2015). Impact of urban heat islands on the thermal comfort and cooling energy demand of artificial islands—A case study of AMWAJ Islands in Bahrain. *Sustainable Cities and Society*, 19, 310–318.
- Sahoo, S., Majumder, A., Swain, S., Gareema, Pateriya, B., & Al-Ansari, N. (2022). Analysis of decadal land use changes and its impacts on urban heat island (UHI) using remote sensing-based approach: a smart city perspective. *Sustainability*, 14(19), 11892.
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities—a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar energy*, 103, 682–703.
- Saverino, K. C., Routman, E., Lookingbill, T. R., Eanes, A. M., Hoffman, J. S., & Bao, R. (2021). Thermal inequity in Richmond, VA: the effect of an unjust evolution of the urban landscape on urban heat islands. *Sustainability*, 13(3), 1511.
- Sejati, A. W., Buchori, I., & Rudiarto, I. (2019). The spatio-temporal trends of urban growth and surface urban heat islands over two decades in the Semarang Metropolitan Region. *Sustainable Cities and Society*, 46, 101432.
- Thambawita, T., Munasinghe, D., & Yapa, L. (2023a). Identification of Urban Heat Island Effect on Land Use Land Cover Changes. *Journal of Geospatial Surveying*, 3(2), 43–53.
- Thambawita, T., Munasinghe, D., & Yapa, L. (2023b). Identification of Urban Heat Island Effect on Land Use Land Cover Changes. *Journal of Geospatial Surveying*, 3 (2).
- Wang, C., Zhan, W., Li, L., Wang, S., Wang, C., Miao, S., Du, H., Jiang, L., & Jiang, S. (2023). Urban heat islands characterized by six thermal indicators. *Building and Environment*, 244, 110820.
- Weisberg, S. (2005). *Applied linear regression* (Vol. 528). John Wiley & Sons.
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote sensing of Environment*, 89(4), 467–483.



- Yang, C., He, X., Yan, F., Yu, L., Bu, K., Yang, J., Chang, L., & Zhang, S. (2017). Mapping the influence of land use/land cover changes on the urban heat island effect—A case study of Changchun, China. *Sustainability*, 9(2), 312.
- Yin, Z., Liu, Z., Liu, X., Zheng, W., & Yin, L. (2023). Urban heat islands and their effects on thermal comfort in the US: New York and New Jersey. *Ecological Indicators*, 154, 110765.
- Zandi, R., & Roki, Z. (2021). The role of land use changes on the formation and spatial changes of thermal islands—A case study in Ahvaz city, Iran. *Sustainable Earth Trends*, 1(2), 44–51.



بررسی دینامیک جزیره حرارتی شهری با رویکرد چند زمانی (مطالعه موردی: منطقه چهار کلانشهر تبریز)

حسن محمودزاده^{۱*}، هادی حکیمی^۲، رامین اصغری^۳

۱. استاد، گروه برنامه ریزی شهری و منطقه ای، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: mahmoudzadeh@tabrizu.ac.ir

۲. دانشیار، گروه برنامه ریزی شهری و منطقه ای، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: h.hakimi@tabrizu.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه ریزی شهری پردیس بین المللی ارس، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: ramini.asghari1987@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

فرآیند شهرنشینی که شامل مهاجرت جمعیت از مناطق روستایی به شهرها می شود، نقش قابل توجهی در رشد جمعیت جهانی داشته است. با گسترش مستمر شهرها، افراد بیشتری به دنبال فرصت ها و امکانات به سمت آن ها مهاجرت می کنند که این امر منجر به افزایش بیشتر جمعیت شهری می شود. اثر جزیره حرارتی شهری (UHI) به پدیده ای اشاره دارد که در آن مناطق شهری نسبت به مناطق روستایی اطراف خود دمای بالاتری را تجربه می کنند. رشد سریع شهرها به افزایش تقاضای انرژی کمک کرده است که به دلیل آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه ای (GHG) بر سلامت و رفاه انسان تأثیر می گذارد. بنابراین، مطالعه عوامل مؤثر بر شدت جزایر حرارتی شهری با استفاده از دمای سطح زمین به عنوان یک شاخص کلیدی، برای اجرای سیاست ها و استراتژی های هدفمند برای کاهش تأثیرات منفی رشد شهری ناشی از شهرنشینی سریع، ضروری و حیاتی است. هدف تحقیق حاضر، بررسی عوامل مؤثر بر شدت جزایر حرارتی و تحلیل تغییرات این پدیده در بازه زمانی ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۳ در منطقه چهار کلانشهر تبریز است. شاخص های مورد نظر NDVI، NDBI، LST، UHI، RH و AQI می باشد. برای محاسبه شاخص های NDVI، NDBI، LST و UHI از داده های ثانویه که شامل تصاویر ماهواره ای Landsat 5 و Landsat 8 با سنجنده های به ترتیب TM، TIRS وOLI (C2L2)، برای شاخص RH از روش پنمن مانیت استاندارد ASCE و برای شاخص AQI از داده های ایستگاه های سنجش کیفیت هوای تبریز استفاده و جهت تحلیل یافته های بدست آمده از روش تحلیل آماری رگرسیون خطی چند متغیره استفاده شده است. یافته ها نشان می دهند که شاخص های NDVI و RH اثرات خنک کننده را در طی ۴۰ سال اخیر در منطقه ۴ شهر تبریز دارند و با ضرایب منفی، نقش کاهنده ای در شدت جزایر حرارتی شهری ایفا می کنند. قابل ذکر است که این تأثیر در مقایسه با اثرات شدید مناطق ساخته شده و کاهش وسعت فضاهای سبز، چندان به چشم نمی خورد. افزایش ضرایب NDBI و AQI (کیفیت هوا) در سال ۱۴۰۳ نسبت به سال های ۱۳۶۳ و ۱۳۸۳، نمایانگر این است که افزایش شهرنشینی و گسترش شهرها همراه با افزایش آلودگی هوا، بطور چشمگیری بر تشدید جزایر حرارتی محدوده منطقه ۴ تبریز مؤثر بوده است. این نتایج نیاز به برنامه ریزی شهری پایدار، تقویت و گسترش فضاهای سبز و مدیریت کاربری اراضی را برای کاهش اثرات جزایر حرارتی را ضروری می سازد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

کلیدواژه ها:

جزایر حرارتی شهری،

سنجش از دور،

رگرسیون خطی چند متغیره،

رویکرد چند زمانی،

منطقه ۴ تبریز.

استناد: محمودزاده، حسن؛ حکیمی، هادی و اصغری، رامین (۱۴۰۴). بررسی دینامیک جزیره حرارتی شهری با رویکرد چند زمانی (مطالعه موردی: منطقه چهار

کلانشهر تبریز). کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی، ۵ (۱۶)، ۶۹-۹۴

<http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.68382.1143>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

پدیده شهرنشینی، متضمن انتقال جمعیت از نواحی روستایی به مراکز شهری، سهم بسزایی در افزایش جمعیت جهانی ایفا نموده است. تداوم گسترش کالبدی شهرها، مهاجرت فزاینده‌ای را در پی جستجوی فرصت‌ها و امکانات به سوی خود جلب می‌کند که این امر به نوبه خود منجر به تشدید رشد جمعیت شهری می‌گردد. در این میان، پدیده جزیره حرارتی شهری (*Urban Heat Island - UHI*) به وضعیتی اطلاق می‌شود که در آن دمای مناطق شهری به شکل محسوسی از نواحی روستایی پیرامون فراتر می‌رود. مکانیزم شکل‌گیری این پدیده عمدتاً ناشی از تراکم روزافزون سطوح جاذب حرارت نظیر بتن و آسفالت، توأم با کاهش پوشش گیاهی و فضاهای سبز شهری است که نقش تعدیل‌کننده دما را دارند. اثرات جزایر حرارتی بر الگوهای کاربری اراضی، دگرگونی‌های پوشش زمین و روند شهرنشینی قابل ملاحظه است. خود فرآیند شهرنشینی نیز از طریق افزایش سطوح نفوذناپذیر و تقلیل فضاهای سبز، به تشدید اثر جزایر حرارتی دامن می‌زند که پیامد آن، افزایش مخاطرات بهداشتی مرتبط با استرس گرمایی، به‌ویژه برای گروه‌های آسیب‌پذیر نظیر سالمندان و افراد مبتلا به بیماری‌های زمین‌ای، می‌باشد (Thambawita et al., 2023a:43).

افزایش مستمر دمای متوسط زمین از اواخر سده ۱۹ میلادی، گرمایش جهانی را به کانون مطالعات بین‌المللی تبدیل نموده است. با توجه به اسکان اکثریت جمعیت جهان در شهرها، نقش شهرنشینی به عنوان یکی از عوامل شتاب‌دهنده این پدیده تثبیت گردیده است. این امر از طریق ایجاد «جزیره گرمایی شهری» و دگرگونی‌های فیزیکی سیمای شهرها، منجر به نوسانات دمایی و چالش‌های عمیق زیست‌محیطی شده است (Jalan & Sharma, 2014:767).

گسترش شتابان شهرنشینی منجر به افزایش مصرف انرژی گردیده که با تولید آلاینده‌های هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای (*GHG*)، سلامت و رفاه جوامع انسانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو، بررسی عوامل تعیین‌کننده شدت جزایر حرارتی شهری با اتکا بر شاخص دمای سطح زمین (*LST*) به عنوان معیار اساسی، برای تدوین و اجرای سیاست‌ها و راهبردهای هدفمند به منظور کاهش پیامدهای منفی توسعه شهری، امری ضروری محسوب می‌شود (Koko et al., 2021:272).

مطالعات جزایر حرارتی شهری (*UHI*) به دلیل تأثیرپذیری از عوامل متعددی نظیر شرایط جوی، اقلیم منطقه‌ای، ویژگی‌های هیدرولوژیکی و اکولوژیکی، ماهیتی پیچیده و چندبعدی دارند. در این زمینه، فناوری سنجش از دور با فراهم آوردن امکان کاوش عمیق‌تر، افق‌های پژوهشی نوینی را گشوده و به ارتقای درک ما از این پدیده کمک شایانی می‌کند (Yang et al., 2017:312).

منطقه ۴ کلانشهر تبریز، همانند سایر مناطق رشد قابل توجهی را تجربه کرده‌است و دارای پهنه شهری متراکم می‌باشد. این منطقه به عنوان پرجمعیت‌ترین منطقه شهرداری تمرکزگرایی بالایی را از خود نشان داده است که مقایسه آمارهای سال ۱۳۸۵ با ۱۳۹۵ نشان می‌دهد که منطقه ۴ شهر تبریز دارای بافت متراکم و فرسوده بالایی می‌باشد. بنابراین به دنبال افزایش رشد جمعیت و توسعه شهری تغییرات گسترده‌ای در نوع کاربری اراضی این منطقه به وجود آمده‌است که این امر موجب افزایش دمای سطح زمین و ایجاد جزایر حرارتی شده که منجر به پدید آمدن مشکلات متعدد زیست‌محیطی گشته است. از این رو هدف تحقیق حاضر، بررسی عوامل مؤثر بر شدت جزایر حرارتی و تحلیل تغییرات این پدیده در بازه زمانی ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۳ در منطقه ۴ کلانشهر تبریز است. تمرکز بر منطقه ۴ تبریز به عنوان مطالعه موردی، بر اساس ویژگی‌های خاص آن (پرجمعیت‌ترین و متراکم‌ترین منطقه شهرداری با رشد سریع کالبدی و بافت فرسوده، طبق آمار ۱۳۹۵-۱۳۸۵) انتخاب شده است تا دینامیک *UHI* در یک کانون شهری کلیدی به طور عمیق بررسی شود. مقایسه با سایر مناطق تبریز یا شهرهای مشابه، خارج از محدوده این پژوهش موردی قرار گرفته، اما برای افزایش عمومیت، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی انجام گیرد. همچنین، تمرکز بر شاخص‌های سنجش از دور (*LST*، *NDBI*، *NDVI* و...) به دلیل امکان تحلیل چندزمانی دقیق، اولویت داشته؛ عوامل جانبی مانند ترافیک یا صنایع (که با *AQI* تا حدی پوشش داده شده) در تحقیقات گسترده‌تر قابل بررسی است. این رویکرد، اعتبار محلی نتایج را حفظ کرده و پایه‌ای برای تعمیم فراهم می‌آورد. با مطالعه مبانی نظری و پیشینه تجربی در حوزه جزایر حرارتی،

طیف جامعی از شاخص‌ها شناسایی شد و با استفاده از داده‌های ماهواره ای لندست شاخص‌های نرمال شده پوشش گیاهی ($NDVI$)، نرمال شده تفاوت پوشش ساخته شده ($NDBI$)، دمای سطح زمین (LST)، شدت جزایر حرارتی (UHI)، رطوبت موجود در هوا (RH) و کیفیت هوا (AQI) در طی دوره‌های زمانی ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳ محاسبه شده و سپس جهت تحلیل یافته‌های بدست آمده از روش تحلیل آماری رگرسیون خطی چند متغیره استفاده شده است.

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

بررسی منابع علمی بین‌المللی نشان می‌دهد که پدیده جزایر حرارتی شهری ($Urban Heat Islands - UHI$) به‌طور گسترده‌ای در شهرهای مختلف جهان مورد مطالعه قرار گرفته است. این پژوهش‌ها ابعاد مختلف این پدیده، از تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی تا راهکارهای کاهش آن را پوشش می‌دهند.

در زمینه تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی، گونزالز تریویزو و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی ۱۷۱ مطالعه در ۳۷ کشور، به چالش‌های مرتبط با کیفیت محیط و تقاضای انرژی پرداخته و بر ضرورت تدوین سیاست‌های پیشگیرانه برای کاهش آسیب‌پذیری‌های بهداشتی و ارتقای تاب‌آوری شهری تأکید کرده‌اند (Gonzalez-Trevizo et al., 2021). در همین راستا، سنتاموریس (۲۰۱۴) به مرور مواد و سطوح خنک‌کننده به‌عنوان راهکاری برای کاهش اثر جزایر گرمایی و بهبود آسایش حرارتی در فضاهای شهری پرداخته است (Santamouris, 2014).

مطالعات متعددی نیز به تحلیل تغییرات دما و رشد شهری اختصاص یافته‌اند. به‌عنوان مثال، سیجاتی و همکاران (۲۰۱۹) با تحلیل تغییرات پوشش زمین در شهر سمارنگ اندونزی، رابطه مستقیم بین توسعه شهری و افزایش دمای سطح زمین را نشان داده‌اند (Sejati et al., 2019). همچنین، بین و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای بر روی نیویورک و نیوجرسی، اثرات جزیره حرارتی بر آسایش حرارتی را بررسی کرده و افزایش قابل توجه دماهای حداکثر و حداقل در دو دهه اخیر را گزارش نموده‌اند (Yin et al., 2023).

برخی پژوهش‌ها به بررسی موارد خاصی مانند تأثیرات جزایر مصنوعی پرداخته‌اند. مطالعه رعدی و همکاران (۲۰۱۵) در بحرین نشان می‌دهد که این جزایر مصنوعی چگونه منجر به افزایش دمای سطحی و در نتیجه، افزایش نیاز به انرژی برای سرمایش می‌شوند (Radhi et al., 2015).

بُعد دیگر تحقیقات، تمرکز بر تأثیرات آب‌وهوایی و مدیریت گرما است. هی و همکاران (۲۰۲۱) هم‌افزایی خطرناک بین امواج گرما و جزایر گرمای شهری در شانگهای را تحلیل کرده و نیاز مبرم به برنامه‌های اضطراری مدیریت گرما را خاطر نشان ساخته‌اند (He et al., 2021). اولیورا و همکاران (۲۰۲۱) نیز در لیسبون، تغییرات سیگنال حرارتی شهری طی امواج گرما را مورد مطالعه قرار داده و نقش تعدیل‌کننده باد در تغییرات دما را برجسته کرده‌اند (Oliveira et al., 2021).

تحقیقات مقایسه‌ای بین شهرها نیز بینش ارزشمندی ارائه می‌کنند. وانگ و همکاران (۲۰۲۳) با به‌کارگیری شش شاخص حرارتی مختلف در ۳۰ شهر بزرگ چین، تأثیرات متنوع UHI بر آسایش حرارتی را کمی‌سازی کرده‌اند (Wang et al., 2023). از سوی دیگر، ساوارینو و همکاران (۲۰۲۱) در ریچموند ویرجینیا، به تحلیل نابرابری حرارتی پرداخته و نشان داده‌اند که چگونه سیاست‌های تاریخی شهری بر توزیع نامتوازن دما تأثیر گذاشته‌اند (Saverino et al., 2021).

۱ Normalized Difference Vegetation Index

۲ Normalized Difference Built-up Index

۳ Land Surface Temperature

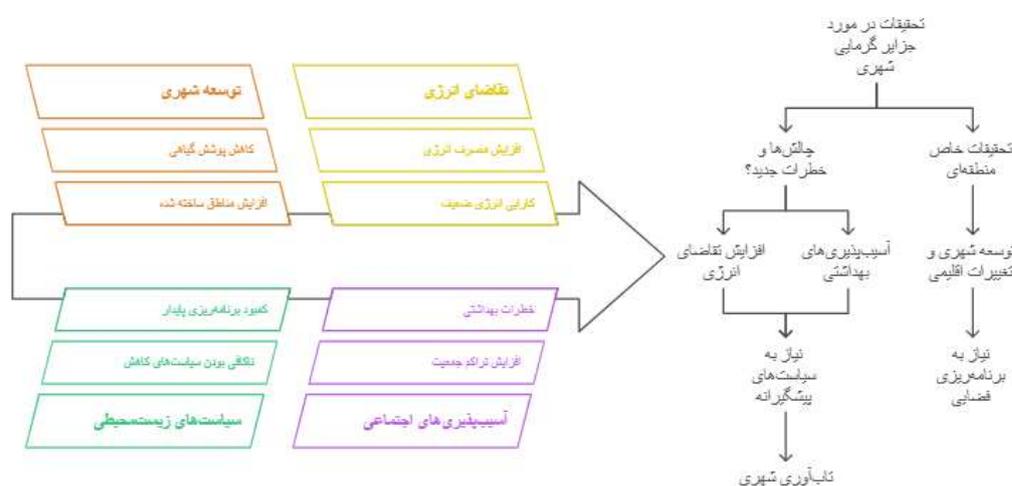
۴ Urban Heat Island Intensity

۵ Relative Humidity

۶ Air Quality Index

سرانجام، پژوهش‌های تاریخی و تحلیل روندهای زمانی عمق بیشتری به درک این پدیده بخشیده‌اند. دئوستالی (۲۰۰۰) با تحلیل داده‌های دمایی در پونه هند، تأثیر رشد سریع شهری را بر تشدید جزایر گرما نشان داده است (Deosthali, 2000). در مقیاسی وسیع‌تر، حسن و همکاران (۲۰۲۱) نیز با مطالعه دینامیک جزایر حرارتی در جنوب آسیا، ارتباط تنگاتنگ بین الگوهای کاربری اراضی و دمای سطح زمین را تأیید کرده‌اند (Hassan et al., 2021).

در مجموع، این دسته‌بندی‌های پژوهشی به‌خوبی نشان می‌دهند که مقابله با پدیده جزایر حرارتی شهری نیازمند رویکردی یکپارچه است که شامل درک علل تشدید اثر جزایر حرارتی (مانند توسعه شهری فشرده، تغییر پوشش زمین و فعالیت‌های انسانی)، توجه به چالش‌های مرتبط (از جمله تهدیدات سلامت عمومی، افزایش مصرف انرژی و نابرابری‌های اجتماعی) و در نهایت، تدوین و اجرای سیاست‌های پایدار و هوشمند برای ایجاد شهرهای تاب‌آورتر در برابر تغییرات آب‌وهوایی می‌شود. در شکل ۱ علل تشدید اثر جزایر حرارتی شهری و چالش‌ها مرتبط و لزوم تدوین سیاست‌های پایدار بر اساس تحقیقات انجام شده آورده شده است.



شکل ۱. علل تشدید اثر جزایر حرارتی شهری و چالش‌ها مرتبط و لزوم تدوین سیاست‌های پایدار (منبع نگارندگان، ۱۴۰۴)

بررسی منابع داخلی نشان می‌دهد که تحقیقات مختلفی درباره جزایر گرمایی شهری و تأثیرات آن‌ها بر محیط زیست و اقلیم‌های شهری در ایران انجام گرفته است. این پژوهش‌ها به شناسایی عوامل مؤثر در ایجاد جزایر گرمایی، ارتباط آن‌ها با کاربری‌های اراضی و فضای سبز، و ارائه راهکارهایی برای کاهش اثرات منفی این پدیده پرداخته‌اند.

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، پژوهش‌های مرتبط با جزایر گرمایی شهری در ایران را می‌توان در پنج دسته اصلی طبقه‌بندی نمود:

در حوزه مدیریت شهری و فضای سبز، پژوهش‌ها بر نقش راهبردی فضاهای سبز در تعدیل دمای شهری تأکید دارند. به عنوان مثال، ناجی‌منش و همکاران (۱۴۰۱) بر ضرورت بازآفرینی فضاهای سبز برای کاهش اثر جزایر گرمایی در کلانشهر تهران تمرکز کرده‌اند. این یافته‌ها با نتایج پژوهش شوشتری و همکاران (۱۳۹۷) در اصفهان همسوست که با بررسی تأثیر کاربری‌های مختلف زمین، ایجاد و توسعه فضاهای سبز را به عنوان راهکاری کلیدی برای کاهش دما پیشنهاد می‌دهند.

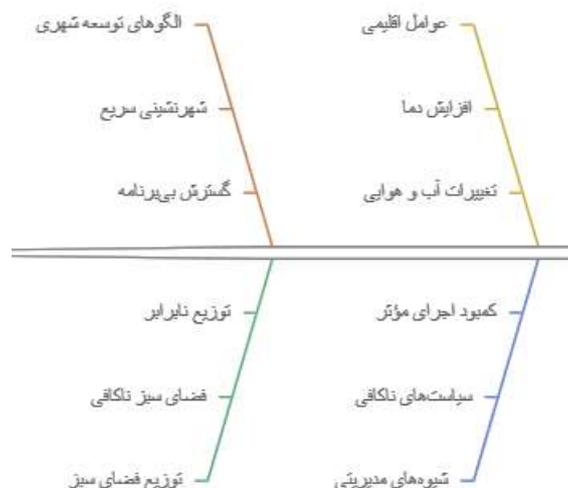
دسته دوم متکی بر تحلیل داده‌های ماهواره‌ای است که امکان پایش گسترده‌ی پدیده‌ی جزایر حرارتی را فراهم می‌کند. در این راستا، امیدوار و همکاران (۱۳۹۹) در یزد از تصاویر ماهواره‌ای برای بررسی ارتباط میان نوع کاربری اراضی و تشکیل جزایر حرارتی بهره برده‌اند. به طور مشابه، محمودزاده و همکاران (۱۳۹۷) نیز در مشهد، رابطه‌ی بین دمای سطح زمین و شاخص‌های پوشش گیاهی را با استفاده از این فناوری تحلیل کرده‌اند.

سومین دسته به تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر تشدید این پدیده می‌پردازد. برای نمونه، عرب و همکاران (۱۴۰۱) تغییرات کاربری اراضی در مشهد را بررسی و ارتباط مستقیم آن را با افزایش دمای سطح زمین نشان داده‌اند. قربانی و سجادزاده (۱۴۰۳) نیز در پژوهشی در کرج، به تحلیل همزمان وضعیت پوشش گیاهی و دمای سطح زمین پرداخته‌اند که نتایج آن بر پیامدهای گرمایی تغییرات کاربری اراضی صحنه می‌گذارد.

پژوهش‌های مقایسه‌ای نیز به درک بهتر ویژگی‌های محلی جزایر گرمایی کمک شایانی کرده‌اند. شاهینی فر و همکاران (۱۴۰۲) در کرمانشاه، شدت جزایر گرمایی را در ارتباط با تراکم پوشش گیاهی در نقاط مختلف شهر مقایسه نموده‌اند. احمدی و همکاران (۱۳۹۶) نیز در اصفهان، به شناسایی و پهنه‌بندی مناطق بحرانی از نظر شدت جزایر حرارتی اقدام کرده‌اند.

در نهایت، نقش طراحی شهری و چیدمان کالبدی به عنوان عاملی مؤثر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. منصوری و ضرغامی (۱۴۰۱) در این زمینه، به بررسی تأثیر چیدمان و تراکم ساختمان‌های بلندمرتبه بر تشکیل و تشدید جزایر حرارتی پرداخته‌اند و بر لزوم ملاحظات زیست‌محیطی در طراحی فرم شهری تأکید دارند.

این دسته‌بندی کمک کرد تا پژوهش‌ها به‌طور منظم‌تر مورد بررسی قرار گیرند و ارتباطات بین آن‌ها بهتر فهمیده شود که در شکل زیر تعدیل جزیره گرمایی شهری از طریق مدیریت فضای سبز با دو فرایند ایجاد سایه و افزایش تبخیر و تعرق خلاصه شده است. با (شکل ۲).



شکل ۲. عوامل تشدید و تعدیل جزیره گرمایی شهری از طریق مدیریت فضای سبز (منبع نگارندگان، ۱۴۰۴)

طبق مبانی نظری و پیشینه تحقیق حاضر، مطالعات گسترده‌ای در زمینه جزایر حرارتی صورت گرفته است اما تأثیرات میزان رطوبت نسبی و آلودگی هوا ناشی از کاربری اراضی بر جزایر حرارتی کمتر مورد پژوهش واقع شده است بنابراین تحقیق حاضر علاوه بر اینکه طیف جامعی از معیارهای تأثیرگذار بر جزایر حرارتی را مورد بحث قرار داده به بررسی تأثیر میزان رطوبت نسبی و آلودگی هوا ناشی از کاربری اراضی نیز پرداخته است. در جدول ۱ معیارهای تحقیق بر اساس پیشینه آماده شده است (جدول ۱).

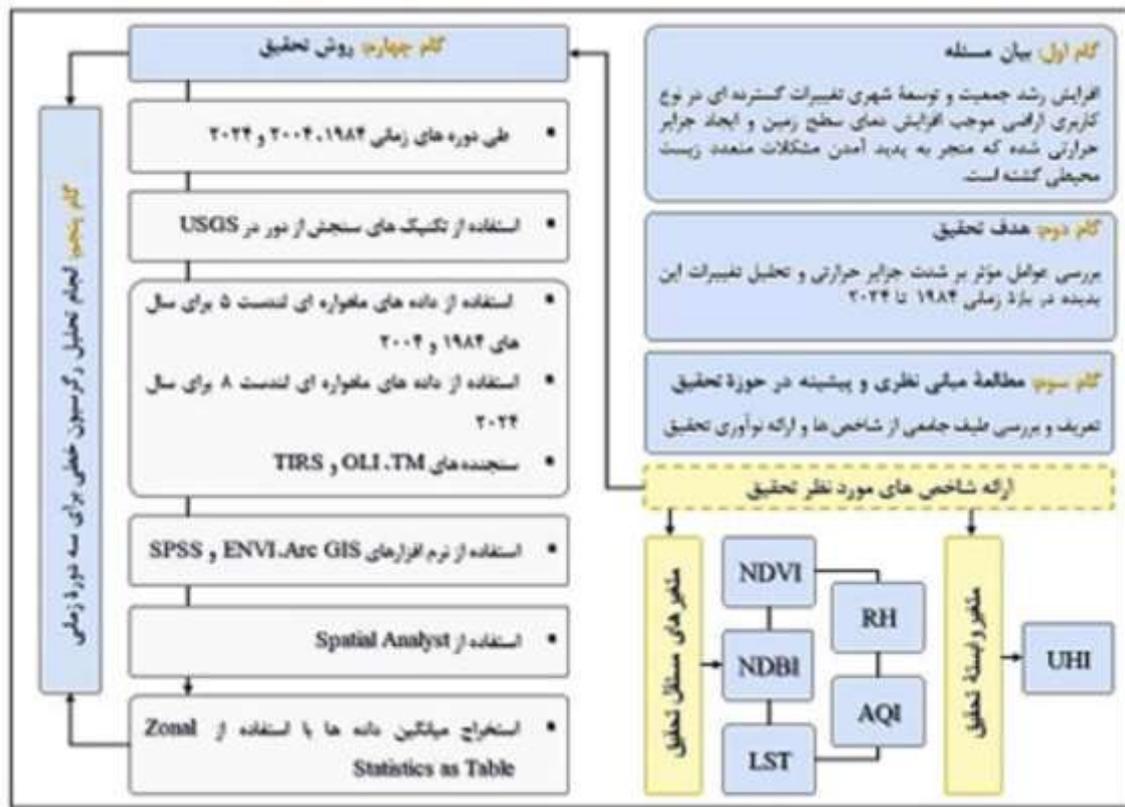
جدول ۱. معیارهای مورد استفاده در تحقیق (منبع: نگارنده، ۱۴۰۴)

شاخص	تعریف	منابع
NDVI	برای ارزیابی پوشش گیاهی استفاده می‌شود و به طور غیر مستقیم با دمای سطح زمین مرتبط است. هر چقدر مقدار NDVI بیشتر باشد، پوشش گیاهی انبوه‌تر و دمای سطح زمین کمتر است.	(Putri et al., 1403); (Thambawita et al., 2023b); (Koko et al., 2021); (Zandi & Roki, 2021); (Kamali Maskooni et al., 2021) (عرب و همکاران، ۱۴۰۱؛ خدمت زاده و همکاران، ۱۴۰۰؛ اسکندری دامنه و همکاران، ۱۴۰۰؛ امیدوار و همکاران، ۱۳۹۹؛ محمودزاده، نقد بیشی و مؤمنی، ۱۳۹۷؛ متکان و همکاران،

(۱۳۹۳) (Putri et al., 1403); (Koko et al., 2021); (Zandi & Roki, 2021); (Kamali Maskooni et al., 2021); (Maru & Ahmad, 2015) (سامی، کرباسی و اخوان، ۱۴۰۲؛ اسکندری و همکاران، ۱۴۰۰) (Putri et al., 1403); (Thambawita et al., 2023b); (Koko et al., 2021); (Jalan & Sharma, 2014) (عرب و همکاران، ۱۴۰۱؛ امیدوار و همکاران، ۱۳۹۷؛ ملکی، فرهمند و شجاعیان، ۱۳۹۵؛ متکان و همکاران، ۱۳۹۳؛ معروف نژاد، ۱۳۹۰) (Thambawita et al., 2023b)	برای شناسایی مناطق ساخته شده (مانند ساختمان ها و جاده ها) استفاده می‌شود. افزایش مناطق ساخته شده با افزایش دمای سطح زمین مرتبط است. دمای واقعی سطح زمین را نشان می‌دهد و برای شناسایی مناطق گرم و سرد استفاده می‌شود. شدت جزیره حرارتی شهر را نشان می‌دهد و با مقایسه دمای مناطق شهری و غیرشهری محاسبه می‌شود. رطوبت موجود در هوا با جذب بخشی از انرژی خورشیدی، از افزایش بیش از حد دمای سطح زمین جلوگیری می‌کند. در واقع، رطوبت بالا می‌تواند به عنوان یک عامل خنک کننده عمل کند و از شدت جزایر حرارتی بکاهد. برخی از آلاینده‌ها مانند دی اکسید کربن و متان می‌توانند اثر گلخانه-ای را تشدید کنند و باعث افزایش دمای هوا شوند. این امر به ویژه در مناطق شهری که غلظت آلاینده‌ها بیشتر است، می‌تواند به تشدید جزایر حرارتی کمک کند. (میزان آلودگی هوا)	NDBI LST UHI RH AQI
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------

روش تحقیق

در تحقیق حاضر به بررسی عوامل مؤثر بر شدت جزایر حرارتی و تحلیل تغییرات این پدیده در بازه زمانی ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۳ در منطقه ۴ کلانشهر تبریز پرداخته شده است، بنابراین این تحقیق، از نوع کمی است. به لحاظ هدف کاربردی و از نظر ماهیت توصیفی-تحلیلی و تبیینی است و پارادایم به کار رفته در آن از نوع اثبات گرایی می‌باشد پس از مطالعه مبانی نظری و پیشینه تحقیق در حوزه جزایر حرارتی جهت بررسی و تحلیل عوامل مؤثر بر شدت جزایر حرارتی و تحلیل تغییرات این پدیده، ۶ شاخص شناسایی شده و طی دوره‌های زمانی ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳ مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق از روش های میدانی و کتابخانه ای جهت گردآوری داده ها استفاده شده است (شکل ۳).



شکل ۳. دیاگرام فرآیند تحقیق (منبع: نگارنده، ۱۴۰۴)

برای تحلیل داده‌ها از روش رگرسیون خطی چند متغیره^۱ که یک تکنیک آماری پارامتری قدرتمند است با مدل‌سازی رابطه‌ی خطی بین یک متغیر پاسخ (وابسته) کمی (Y) و دو یا چند متغیر پیش‌بین (مستقل) (X₁, X₂, ..., X_p) استفاده می‌کند استفاده شده است. هدف اصلی آن، پیش‌بینی مقدار متغیر وابسته بر اساس مقادیر متغیرهای مستقل و همچنین درک و کمی‌سازی تأثیر هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته، در حالی که تأثیر سایر متغیرها ثابت نگه داشته می‌شود، است. این مدل گسترش طبیعی رگرسیون خطی ساده به ابعاد بالاتر است (James et al., 2013:64).

فرمولاسیون ریاضی و برآورد پارامترها

مدل پایه‌ی رگرسیون خطی چند متغیره به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_p X_{ip} + \epsilon_i$$

که در آن:

\hat{Y}_i : مقدار مشاهده شده متغیر وابسته برای مشاهده i ام.

β_0 : عرض از مبدأ (مقدار Y وقتی تمام X ها صفر هستند).

β_1 تا β_p : ضرایب رگرسیون (شیب‌ها)، نشان‌دهنده تغییر مورد انتظار در Y به ازای یک واحد تغییر در متغیر مستقل متناظر، وقتی سایر متغیرها ثابت باشند.

X_{i1} تا X_{ip} : مقادیر مشاهده شده متغیرهای مستقل برای مشاهده i ام.

^۱ Multiple Linear Regression - MLR

ϵ_i : جمله خطا (اختلاف بین مقدار مشاهده شده Y_i و مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل) برای مشاهده i ام، که فرض می‌شود دارای میانگین صفر و واریانس ثابت (σ^2) و مستقل از یکدیگر است.

روش معمول برای برآورد پارامترهای مجهول ($\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$) روش حداقل مربعات معمولی^۱ است. این روش مقادیر β ها را طوری پیدا می‌کند که مجموع مربعات باقیمانده‌ها ($\sum \epsilon_i^2$) را کمینه کند (Kutner et al., 2005:63).

مفروضات کلیدی

برای اینکه برآوردهای OLS دارای مطلوبیت آماری مانند BLUE باشند، چندین فرض اساسی باید برقرار باشند:

۱. خطی بودن: رابطه بین متغیرهای مستقل و میانگین شرطی ($E(Y|X)$) خطی است.
۲. استقلال: مشاهدات مستقل از یکدیگر هستند (مخصوصاً خطاها مستقلند).
۳. همسانی واریانس (همواسکداستیسیته): واریانس خطاها (ϵ_i) برای تمام مقادیر X ها ثابت است.
۴. نرمال بودن: خطاها (ϵ_i) دارای توزیع نرمال با میانگین صفر هستند.
۵. عدم همخطی بودن شدید: متغیرهای مستقل همبستگی خطی بسیار بالایی با هم ندارند. نقض این فرض (همخطی چندگانه) باعث بی‌ثباتی در برآورد ضرایب و بزرگ شدن خطای استاندارد آن‌ها می‌شود.

بررسی و تأیید این مفروضات (مثلاً با تحلیل باقیمانده‌ها) قبل از تفسیر نتایج ضروری است (Montgomery et al., 2021:47).

ارزیابی و تفسیر مدل

پس از برآورد مدل، ارزیابی کیفیت آن حیاتی است:

ضریب تعیین (R^2) و R^2 تعدیل‌شده: نسبت تغییرپذیری Y که توسط مدل توضیح داده می‌شود را نشان می‌دهد. R^2 تعدیل‌شده برای تعدیل اثر افزایش تعداد متغیرهای مستقل استفاده می‌شود.

آزمون F : معنی‌داری کلی مدل را بررسی می‌کند (آیا حداقل یکی از ضرایب غیرصفر است؟).

آزمون t برای ضرایب: معنی‌داری آماری هر ضریب رگرسیون (β_j) به صورت جداگانه را بررسی می‌کند.

تحلیل باقیمانده‌ها: برای بررسی برقراری مفروضات (نرمال بودن، همسانی واریانس، استقلال، خطی بودن) و شناسایی نقاط پرت یا اهرمی استفاده می‌شود.

تفسیر ضریب β_j بیانگر این است که «به ازای هر واحد افزایش در متغیر مستقل X_j ، و در حالی که سایر متغیرهای مدل ثابت نگه داشته شوند، مقدار متغیر وابسته Y به طور متوسط به اندازه β_j واحد تغییر می‌کند» (Weisberg, 2005:467).

کاربردها و ملاحظات

رگرسیون خطی چند متغیره کاربردهای گسترده‌ای در علوم مختلف (اقتصاد، مالی، علوم اجتماعی، پزشکی، زیست‌شناسی، مهندسی و ...) دارد، مانند پیش‌بینی فروش، مدل‌سازی عوامل مؤثر بر بیماری‌ها، تحلیل تأثیر سیاست‌ها، و بهینه‌سازی فرآیندها. با این حال، ملاحظات مهمی وجود دارد:

^۱ Ordinary Least Squares - OLS

^۲ Best Linear Unbiased Estimator

علیت را اثبات نمی‌کند: همبستگی به معنای علیت نیست. داده‌های مشاهده‌ای نمی‌توانند به تنهایی رابطه علی را ثابت کنند. حساسیت به نقض مفروضات: نتایج در صورت نقض جدی مفروضات (مخصوصاً خطی بودن، استقلال و همسانی واریانس) ممکن است گمراه‌کننده باشند.

نیاز به داده با کیفیت: به حجم نمونه کافی و داده‌ای بدون خطاهای اندازه‌گیری شدید نیاز دارد.

مدل‌های جایگزین: اگر رابطه غیرخطی باشد یا مفروضات به شدت نقض شوند، ممکن است نیاز به روش‌های پیشرفته‌تر مانند رگرسیون غیرخطی، مدل‌های تعمیم‌یافته (GLM) یا یادگیری ماشین باشد (Hastie et al., 2005:83).

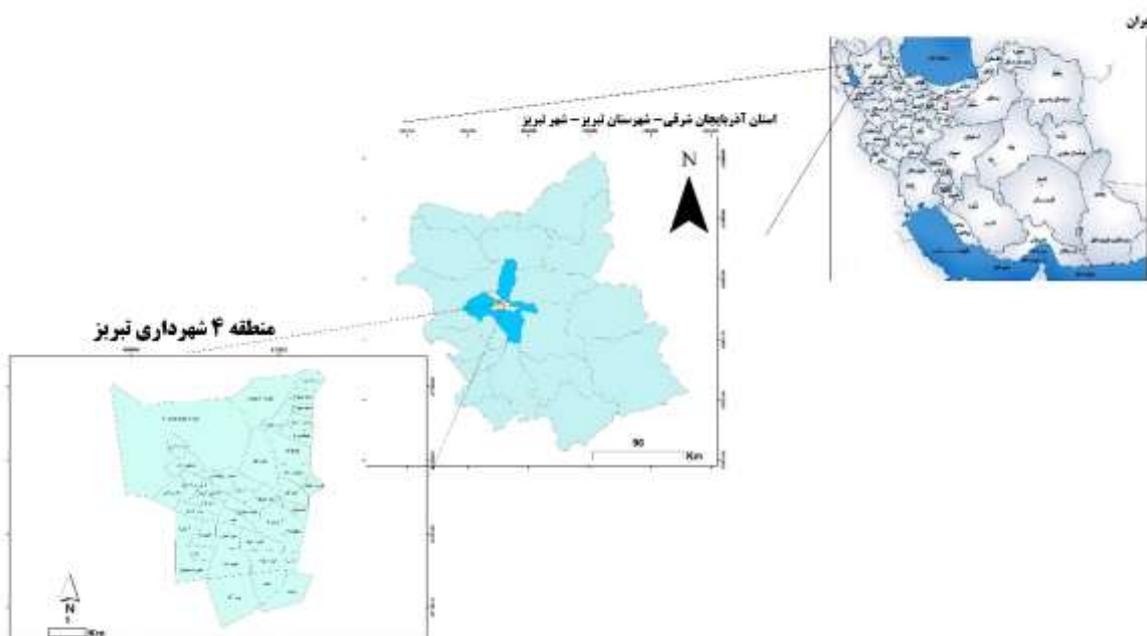
محدوده مورد مطالعه

منطقه چهار کلانشهر تبریز، به عنوان یکی از مناطق ده گانه این کلانشهر، عمدتاً در بخش‌های شمالی و شمال غربی تبریز واقع شده است. این منطقه به دلیل گسترش سریع کالبدی و جمعیتی در دهه‌های اخیر، به ویژه پس از تصویب طرح‌های جامع و تفصیلی، مورد توجه پژوهش‌های شهری قرار گرفته است. از لحاظ جغرافیایی، بخش‌هایی از این منطقه در مجاورت دامنه‌های کوهستانی شمال تبریز (کوه‌های عون بن علی) قرار دارد، در حالی که بخش‌های دیگر به سمت دشتهای مسطح تر شرق و جنوب شرق توسعه یافته‌اند. این تنوع توپوگرافی و گستردگی فضایی، آن را به بستر مناسبی برای بررسی تغییرپذیری مکانی پدیده‌هایی مانند جزیره حرارتی شهری (UHI) تبدیل می‌کند.

از منظر کالبدی و کاربری اراضی، منطقه چهار ترکیبی پیچیده از بافتهای مسکونی نوین، کاربریهای خدماتی و تجاری (همچون مراکز آموزشی بزرگ، مراکز خرید و درمانی)، و در عین حال، فضاهای باز و نیمه باز (مانند اراضی کشاورزی حاشیه‌ای، پارک‌های نسبتاً بزرگ و فضاهای بایر در حال تبدیل) را در خود جای داده است (مشیری و همکاران، ۱۴۰۴:۸۷).

این اختلاط و گسیختگی در الگوهای پوشش زمین، به ویژه تقابل بین سطوح نفوذناپذیر گسترده در مناطق مسکونی و تجاری جدید با سطوح سبز در فضاهای سبز و اراضی کشاورزی حاشیه‌ای و کوهپایه‌ای، نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد و شدت جزایر حرارتی محلی و الگوهای خنک‌کنندگی بالقوه ایفا می‌کند (Weng et al., 1383:467). توسعه افقی و افزایش تراکم ساختمانی در این منطقه، به عنوان یکی از کانون‌های اصلی رشد تبریز، تأثیر مستقیمی بر تغییرات میکروکلیمایی محلی دارد.

این منطقه به دلیل دینامیک توسعه فضایی سریع، تنوع چشمگیر در پوشش/کاربری زمین و تغییرات مورفولوژی شهری در بازه‌های زمانی کوتاه مدت و میان مدت، یک مطالعه موردی ایده‌آل برای بررسی «دینامیک» جزیره حرارتی شهری با رویکرد چندزمانی محسوب می‌شود. گذار از اراضی کشاورزی و بایر به بافتهای مسکونی و خدماتی متراکم، تغییرات قابل اندازه‌گیری در شارهای انرژی سطحی و دمای سطح زمین (LST) ایجاد کرده است. بررسی روند زمانی این تغییرات (چندزمانی) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای امکان شناسایی نقاط بحرانی توسعه، ارزیابی اثربخشی سیاستهای فضای سبز و برنامه ریزی شهری بر تعدیل UHI، و مدلسازی روندهای آتی را فراهم می‌سازد. بنابراین، مطالعه دینامیک UHI در منطقه چهار تبریز نه تنها درک محلی از این پدیده اقلیم شهری را ارتقا می‌دهد، بلکه بینش‌های ارزشمندی برای برنامه ریزی شهری تاب‌آور در مقابل تغییرات اقلیمی در کلانشهرهای مشابه ایران ارائه می‌کند (شکل ۴).



شکل ۴. موقعیت جغرافیایی منطقه ۴ تبریز (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴)

برای تصحیح اتمسفری، که تأثیرات پراکندگی، جذب و مسیره‌های نوری (Path Radiance) را حذف می‌کند، از روش Quick Atmospheric Correction (QUAC) در نرم‌افزار ENVI (نسخه ۵.۶) استفاده شد. QUAC یک الگوریتم خودکار و مبتنی بر طیف است که بدون نیاز به داده‌های جانبی (مانند اوزون، آئروسول یا بخار آب از مدل‌های هواشناسی)، بر اساس آمار پیکسل‌های تاریک (Dark Pixels) و روشن (Bright Pixels) در تصویر، پارامترهای اتمسفری را تخمین می‌زند. این روش بر پایه مدل‌های radiative transfer (مانند S_6) عمل می‌کند و بازتاب سطحی (Surface Reflectance) را برای باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک (NIR) محاسبه می‌نماید. تأثیرات فصلی (Seasonal Effects) بر دمای سطح زمین (LST) و شدت UHI، که می‌تواند ناشی از تغییرات پوشش گیاهی، رطوبت و زاویه خورشید باشد، به طور صریح در انتخاب و پردازش تصاویر مورد توجه قرار گرفت. برای کاهش این تأثیرات، تصاویر از فصل تابستان (ژوئیه-آگوست) انتخاب شدند، که اوج فصل رشد گیاهی و حداکثر شدت UHI در اقلیم نیمه‌خشک تبریز است. فصل تابستان نماینده‌ترین دوره ۱۴۰۳-۱۳۶۳ برای بررسی UHI است، زیرا گرمایش سطحی حداکثری را نشان می‌دهد و تغییرات فصلی (مانند پوشش برف زمستانی یا سبزی بهاری) را حذف می‌کند. مطالعات پیشین (مانند Weng et al., ۲۰۰۳) تأکید دارند که تصاویر تابستانی، سیگنال UHI را بدون نویز فصلی تقویت می‌کنند.

برای جبران تفاوت‌های جزئی زاویه خورشید (Solar Zenith Angle) بین تصاویر، از نرمال‌سازی فصلی در محاسبه LST و NDVI و UHI با ضریب تعدیل فصلی نرمال‌سازی گردیدند تا تغییرات گیاهی فصلی (مانند EVI فصلی) تأثیرگذار نباشد. برای محاسبه شاخص‌های NDVI، NDBI، LST و UHI از داده‌های ثانویه که شامل تصاویر ماهواره‌ای Landsat 5 و Landsat 8 با سنجنده‌های به ترتیب TM، TIRS و OLI (C2L2) استفاده شده است. این تصاویر حاوی اطلاعات در مورد پوشش زمین، کاربری زمین و سایر ویژگی‌های سطح زمین هستند. در محاسبه شاخص‌های RH و AQI نیز از داده‌های ثانویه به ترتیب دمای تر، خشک و فشار هوا و ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای تبریز استفاده شده است. روش Penman-Monteith استاندارد ASCE برای محاسبه رطوبت نسبی (RH) بر اساس داده‌های ورودی دمای تر (T_w)، دمای خشک (T_{dry}) و فشار هوا (P) انجام شده است. این داده‌ها به عنوان اطلاعات ثانویه از ایستگاه‌های هواشناسی تبریز (تحت نظارت سازمان هواشناسی کشور)

برای دوره‌های زمانی ۱۳۶۳ (۱۹۸۴)، ۱۳۸۳ (۲۰۰۴) و ۱۴۰۳ (۲۰۲۴) شمسی استخراج و درون‌یابی شده‌اند (جدول ۱).

نرمال‌سازی شاخص‌ها (مانند NDVI، LST، NDBI، RH و AQI) با استفاده از روش استانداردسازی Z-score (میانگین صفر و انحراف معیار واحد) در نرم‌افزار ArcGIS (ابزار Raster Calculator) و سپس SPSS انجام شد. این روش داده‌ها را به صورت $(X - \mu) / \sigma$ تبدیل می‌کند تا مقیاس متغیرها یکسان شود و مقایسه‌پذیری افزایش یابد. این فرآیند پیش از ورود داده‌ها به مدل رگرسیون خطی چندمتغیره اعمال گردید و نقشه‌های نرمال‌شده تولید شد.

نرمال‌سازی بر ضرایب استانداردشده (β) تأثیر مستقیم ندارد، زیرا SPSS به طور خودکار استانداردسازی Z-score را برای محاسبه β اعمال می‌کند و نتایج β مستقل از مقیاس اولیه است. با این حال، بر ضرایب غیراستانداردشده (B) تأثیر گذاشته و آن‌ها را مقیاس‌پذیر می‌کند، که این امر دقت مدل را افزایش داده و VIF را > 3 نگه داشته است.

شاخص VIF به عنوان روش استاندارد و مستقیم برای ارزیابی هم‌خطی چندگانه (multicollinearity) در مدل رگرسیون خطی چندمتغیره انتخاب شده است، زیرا همبستگی‌های جفتی (مانند پیرسون) را فراتر رفته و تأثیر کلی متغیرها بر واریانس را می‌سنجد ($VIF < 3$) در تمام مدل‌ها نشان‌دهنده عدم هم‌خطی شدید است). گزارش همبستگی پیرسون به عنوان آزمون مقدماتی، در صورت لزوم، قابل افزودن به پیوست است تا تحلیل کامل‌تر شود، اما VIF برای اختصار و تمرکز بر مدل کافی تلقی گردید.

نتایج و بحث

برای انجام تحلیل رگرسیون خطی در نرم‌افزار SPSS برای سه دوره زمانی (۱۴۰۳، ۲۰۰۴، ۱۳۶۳) در منطقه ۴ تبریز و بررسی ارتباط متغیرهای مستقل (NDVI، NDBI، LST، RH، AQI) با متغیر وابسته (UHI)، مراحل زیر طی شد. با استفاده از Spatial Analyst و استخراج میانگین داده‌ها با Zonal Statistics as Table پایگاه اطلاعاتی ورودی به نرم‌افزار SPSS26 آماده و نتایج برای سه دوره بدست آمد.

یافته‌ها

مطابق با معادلات مورد محاسبه برای هر کدام از شاخص‌ها، نقشه شاخص‌ها در هر سه بازه زمانی ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳ تولید شده‌است. که طبق نقشه‌های تولید شده می‌توان دریافت که در طی ۴۰ سال اخیر در منطقه ۴ کلانشهر تبریز؛ در سال ۱۳۶۳، شاخص NDVI در بسیاری از سطوح منطقه بخصوص قسمت مرکزی و جنوبی کم بوده و در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳ مساحت پوشش گیاهی به شکل قابل توجهی کاهش یافته اما میزان توزیع و پراکندگی آن‌ها افزایش یافته است.

شاخص NDBI در سال ۱۳۶۳، بیشتر مناطق ساخته شده در قسمت جنوبی و شرقی منطقه بوده و در ۱۳۸۳ به قسمت‌های شمال غربی کشیده شده است. در سال ۱۴۰۳ و با توجه به کاهش تراکم پوشش گیاهی و تغییر کاربری اراضی شاخص NDBI در قسمت‌های شمال و شمال غربی، روند صعودی نشان می‌دهد.

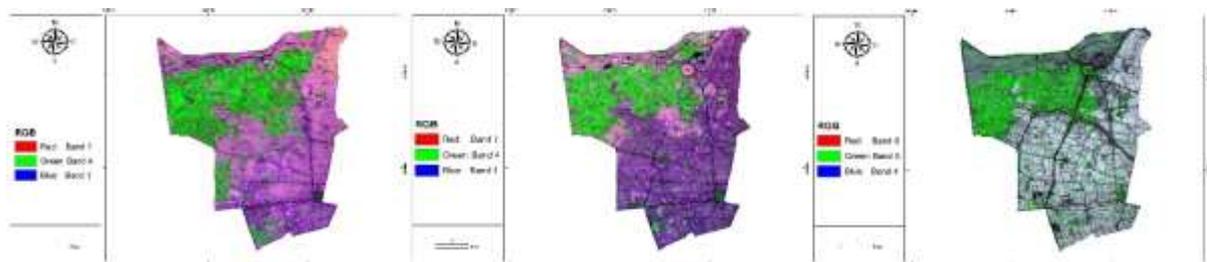
با توجه به شاخص‌های NDVI و NDBI نتیجه گرفته شد که شاخص LST در سال ۱۳۶۳ در قسمت‌های شرقی و جنوبی بالا بوده و در سال ۱۳۸۳، در قسمت‌های شمال غربی به علت سطوح سبز پارک بزرگ کمتر شده، طبق موارد ذکر شده در سال ۱۴۰۳، با توجه به عقب نشینی پوشش گیاهی در شمال غرب این شاخص از مرکز منطقه ۴ به طرف مناطق پایین دستی شمال غرب افزایش یافته است.

شاخص رطوبت نسبی RH در سال ۱۳۶۳ بر پوشش گیاهی و محلات دارای فضای سبز در جهت شمال غربی افزایش یافته و در سایر محلات رو به کاهش است. بیشینه رطوبت نسبی در دوره ۱۳۸۳ نسبتاً افزایش یافته ولی مساحت مناطق با رطوبت نسبی بالا کاهش پیدا کرده است. در سال ۱۴۰۳ با کاهش فضای سبز، رطوبت نسبی در محلات مرکزی و جنوبی کاهش یافته و با توجه به کاهش پوشش گیاهی و افزایش مناطق ساخته شده در سال‌های اخیر، مساحت مناطق با RH پایین زیاد شده است.

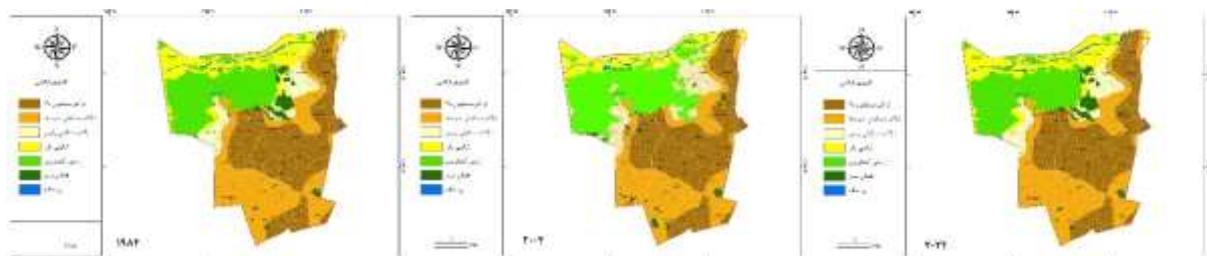
شاخص AQI در سال ۱۳۶۳ از وضعیت مناسبی برخوردار بوده، ولی در سال ۱۳۸۳ افزایش یافته که به افزایش خودرو و تراکم ساختمانی منطقه ۴ مربوط می باشد، و در سال ۱۴۰۳ روند AQI صعودی هست و در کل در هر سه دوره، محلات شرقی وضعیت بهتری (AQI کمتری) را ارائه می کنند.

رویکرد تحلیل چندمعیاری و چندزمانه‌ای در ارزیابی جزایر حرارتی شهری منطقه ۴ تبریز، امکان بررسی پویایی‌های این متغیر را در بازه‌های زمانی مختلف و با در نظر گرفتن معیارهای متعدد فراهم می‌آورد. محلات با سطوح نفوذناپذیر بالا و پوشش گیاهی کم (مانند نواحی نزدیک به مراکز صنعتی یا تجاری) دمای سطح زمین بالاتری دارند و به‌عنوان کانون‌های حرارتی شناخته می‌شوند. در منطقه چهار کلانشهر تبریز، که شامل محلاتی با بافت‌های متنوع از جمله مناطق مسکونی متراکم و فضاهای باز است، این متغیر به دلیل تأثیراتش بر کیفیت زندگی، مصرف انرژی و سلامت ساکنان اهمیت ویژه‌ای دارد. متغیر وابسته UHI در سال ۱۳۶۳ دمایی بین ۱/۳ تا ۳/۲- درجه سانتی‌گراد دارد که در محلات شهرک شهید بهشتی ۲ (پارک بزرگ)، شهرک آذربایجان، رضوانشهر، نظام پزشکی، چوستدوزان ۱، رضوانشهر ۶ دمای سطح زمین نسبت به بقیه محلات پایین‌تر است. در سال ۱۳۸۳ اختلاف دما به بازه ۱/۵ - ۳/۲- درجه سانتی‌گراد رسیده که نشان‌دهنده افزایش مختصر اثر جزیره حرارتی است. مجدداً در سال ۱۴۰۳ اختلاف دمایی جزیره حرارتی به بازه ۱/۴ - ۲/۶- درجه سانتی‌گراد رسیده که دلیل آن پراکندگی نسبی فضای سبز و تعدیل دماست

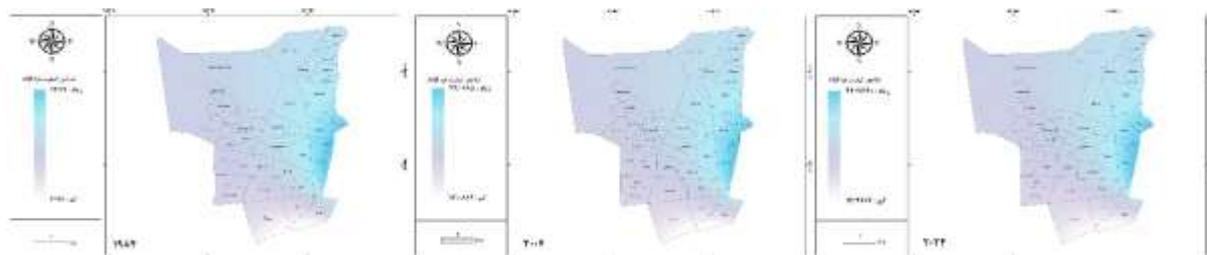
درنهایت می‌توان نتیجه گرفت که هر ۵ شاخص بررسی شده در ۳ دوره در منطقه ۴ تبریز، تأثیر بسزایی در شدت جزایر حرارتی دارد که در سال‌های اخیر با کاهش شاخص NDVI، AQI، RH و افزایش شاخص LST و NDBI شدت جزایر حرارتی افزایش یافته‌است (اشکال ۵ تا ۱۱).



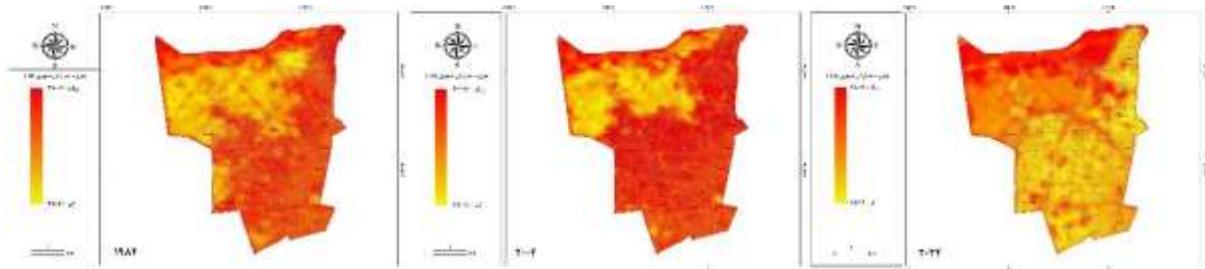
شکل ۵: تصویر ماهواره‌ای لندست منطقه ۴ تبریز در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳



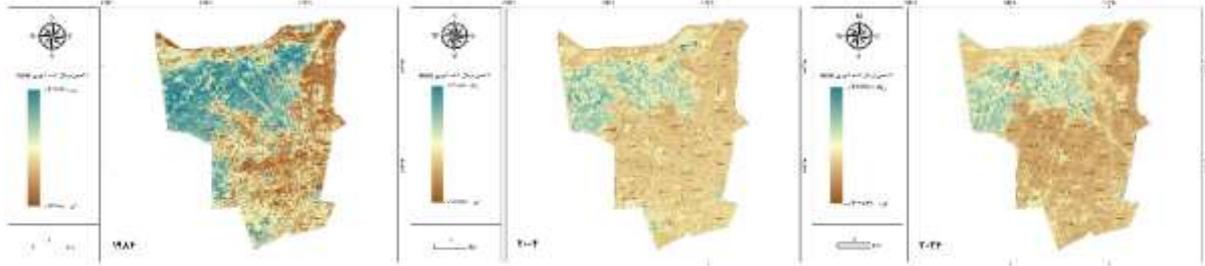
شکل ۶: کاربری‌های عمده اراضی منطقه ۴ تبریز در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳



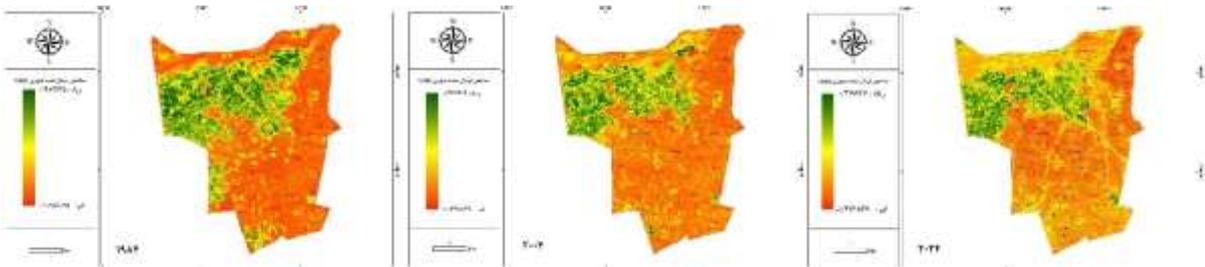
شکل ۷: شاخص کیفیت هوا (AQI) در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳



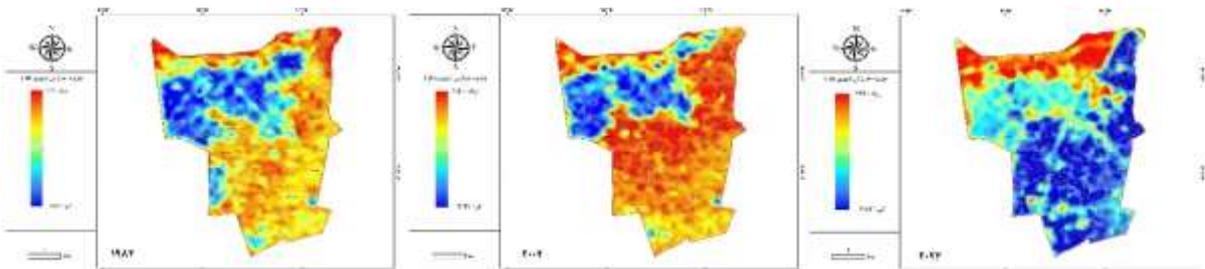
شکل ۸. شاخص دمای سطح زمین (LST) در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳



شکل ۹. شاخص تفاضل پوشش ساخته شده (NDBI) در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳

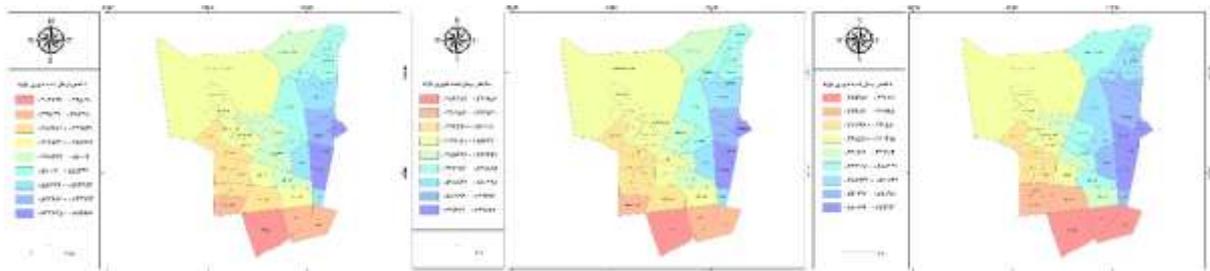


شکل ۱۰. شاخص تفاضل پوشش گیاهی (NDVI) در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳

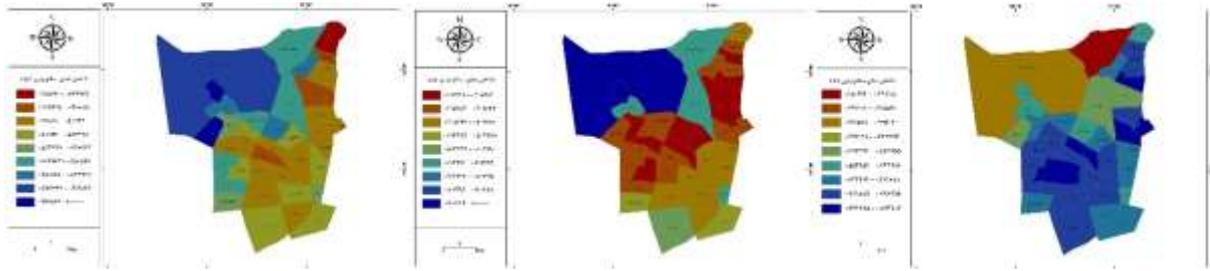


شکل ۱۱. شاخص جزیره حرارتی شهری (UHI) در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳

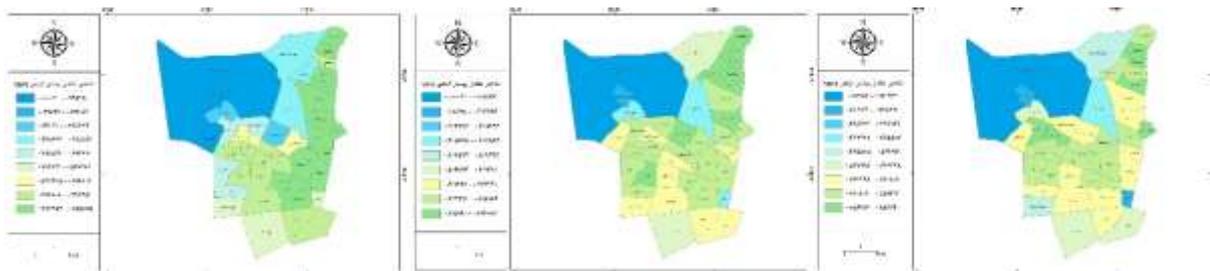
جهت تسهیل و دقت در تحلیل و مقایسه شاخص‌ها در هر منطقه لازم است اعداد بدست آمده از هر نقشه تولید شده، پیش از فرآیند تحلیل، نرمال سازی شوند پس از انجام نرمال سازی نقشه‌های هر شاخص در هر ۳ بازه زمانی تهیه شده است (اشکال ۱۲ تا ۱۶).



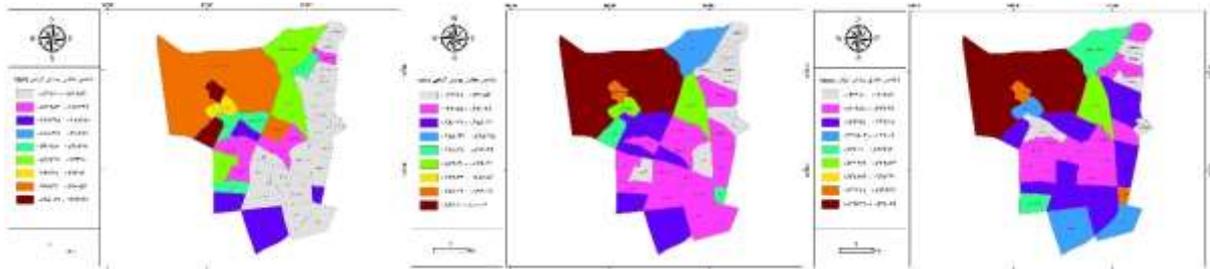
شکل ۱۲. شاخص نرمال شده کیفیت هوا (AQI) در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳



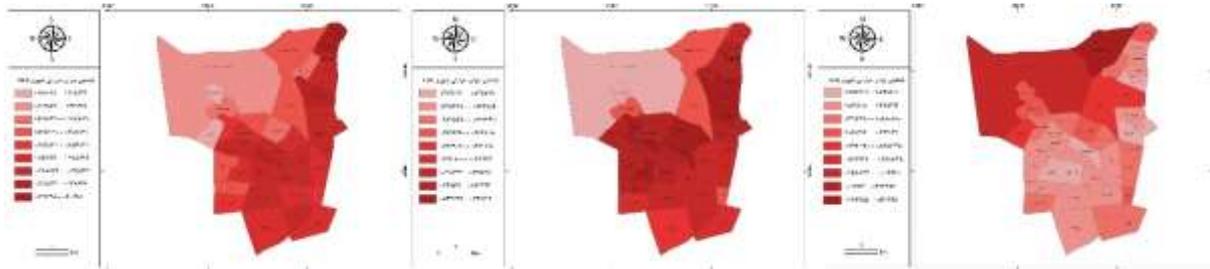
شکل ۱۳. شاخص نرمال شده دمای سطح زمین (LST) در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳



شکل ۱۴. شاخص نرمال شده تفاضل پوشش ساخته شده (NDBI) در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳



شکل ۱۵. شاخص نرمال شده تفاضل پوشش گیاهی (NDVI) در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳



شکل ۱۶. شاخص نرمال شاخص جزیره حرارتی شهری (UHI) در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳

داده‌ها و پیش‌فرض‌ها

- داده‌ها: داده‌های سه دوره (۱۴۰۳، ۲۰۰۴، ۱۳۶۳) برای منطقه ۴ شهر تبریز با مقادیر NDVI, NDBI, LST, RH, UHI و AQI.

پیش‌فرض‌های رگرسیون خطی

- خطی بودن رابطه بین متغیرها.
- نرمال بودن باقی‌مانده‌ها (با آزمون شاپیرو-ویلک).
- عدم همخطی شدید (با $10 < VIF$).
- همسانی واریانس (با نمودار باقیمانده‌ها).

خروجی‌های SPSS برای هر دوره

در زیر جداول برای هر دوره با سطح اطمینان ۹۵٪ ارائه شده است:

▪ دوره ۱۳۶۳

بر اساس نتایج حاصل از مدل رگرسیون خطی چندگانه، متغیرهای مستقل شامل NDVI، NDBI، LST، RH و AQI در تبیین تغییرات شاخص UHI سال ۱۳۶۳ مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

جدول ۲. خلاصه مدل برای دوره ۱۳۶۳ (Model Summary)

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1363	0.87 ^a	.61	0.58	1.25

a. Predictors: (Constant), NDVI1363, NDBI1363, LST1363, RH1363, AQI1363

خلاصه مدل (Model Summary) نشان می‌دهد که مقدار R برابر با ۰٫۸۷ است که حاکی از همبستگی قوی میان متغیرهای مستقل و متغیر وابسته UHI1363 می‌باشد. همچنین مقدار R Square برابر با ۰٫۶۱ به دست آمده است، به این معنا که مدل قادر است حدود ۶۱ درصد از واریانس تغییرات UHI را تبیین نماید. مقدار Adjusted R Square نیز که به منظور اصلاح اثر تعداد متغیرهای مستقل در مدل لحاظ می‌شود، برابر با ۰٫۵۸ است که بیانگر پایداری نسبی مدل می‌باشد. خطای استاندارد برآورد نیز معادل ۱٫۲۵ بوده که مقبولیت نسبی مدل را تأیید می‌کند (جدول ۲).

جدول ۳. مقادیر ANOVA برای دوره ۱۳۶۳

ANOVA ^a						
Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
1363	Regression	4.15	5	8.3	25	0.0 ^b
	Residual	3.28	211	1.5		
	Total	3.32	216			

a. Dependent Variable: UHI1363

b. Predictors: (Constant), NDVI1363, NDBI1363, LST1363, RH1363, AQI1363

نتایج تحلیل ANOVA بیانگر معنادار بودن مدل کلی رگرسیون است؛ چرا که مقدار F معادل ۲۵ با سطح معناداری ۰/۰۰۰ گزارش شده که کمتر از ۰/۰۵ است. این موضوع نشان می‌دهد که ترکیب متغیرهای مستقل به‌طور کلی در تبیین تغییرات UHI تأثیر معناداری دارد (جدول ۳).

جدول ۴. ضرایب رگرسیون (Coefficients) برای دوره ۱۳۶۳

Model1363		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	VIF
		B	Std. Error	Beta			
1	(Constant)	2.10	0.95	-	2.21	0.036	-
	NDVI1363	-0.45	0.12	-0.32	-3.75	0.000	1.8
	NDBI1363	0.72	0.15	0.56	4.80	0.000	2.1
	LST1363	0.85	0.10	0.65	8.50	0.008	1.5
	RH1363	-0.23	0.08	-0.18	-2.87	0.000	1.3
	AQI1363	0.35	0.07	0.27	4.29	0.000	1.6

a. Dependent Variable: UHI1363

بر اساس جدول ضرایبها (Coefficients)، متغیر LST با ضریب بتای استاندارد شده ۰/۶۵ قوی‌ترین اثر مثبت را بر UHI داشته و این اثر در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار است ($p < 0.01$). همچنین NDBI با بتای ۰/۵۶ و AQI با بتای ۰/۲۷ نیز تأثیر مثبت و معنادار بر UHI داشته‌اند. در مقابل، NDVI و RH به ترتیب با ضرایب بتای منفی ۰/۳۲ و ۰/۱۸ نقش کاهنده بر UHI ایفا کرده‌اند که این نتایج نیز از نظر آماری معنادار می‌باشند ($p < 0.01$).

مقادیر VIF برای کلیه متغیرها کمتر از ۲/۱ گزارش شده و نشان‌دهنده عدم وجود مشکل جدی در هم‌خطی چندگانه بین متغیرهای مستقل است (جدول ۴).

نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که مدل رگرسیون چندگانه توانسته به‌خوبی روابط بین متغیرهای زیست‌محیطی و UHI را تبیین نماید. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش دمای سطح زمین (LST) و توسعه مناطق ساخته‌شده (NDBI) از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر افزایش UHI هستند. همچنین، شاخص کیفیت هوا (AQI) نیز همبستگی مثبت و معناداری با شدت اثرات جزیره حرارتی شهری داشته است. در سوی دیگر، افزایش پوشش گیاهی (NDVI) و رطوبت نسبی (RH) به کاهش اثرات UHI منجر شده‌اند. این نتایج تأکیدی بر اهمیت مداخلات محیطی مانند افزایش پوشش گیاهی و بهبود کیفیت هوا در کاهش شدت UHI دارند.

▪ دوره ۱۳۸۳

نتایج مدل رگرسیون چندگانه برای سال ۱۳۸۳ نشان می‌دهد که متغیرهای NDVI، NDBI، LST، RH و AQI در تبیین تغییرات شاخص UHI نقش معناداری ایفا کرده‌اند.

جدول ۵. خلاصه مدل (Model Summary) در دوره ۱۳۸۳

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1383	0.85 ^a	.72	0.69	1.10

a. Predictors: (Constant), NDVI1383, NDBI1383, LST1383, RH1383, AQI1383

خلاصه مدل (Model Summary) حاکی از وجود یک رابطه قوی میان مجموعه متغیرهای مستقل و متغیر وابسته UHI1383 است؛ به‌طوری‌که مقدار R معادل ۰/۸۵ بوده و بیانگر شدت همبستگی بالا میان متغیرها می‌باشد. همچنین مقدار R

Square برابر با ۰/۷۲ است که نشان می‌دهد ۷۲ درصد از تغییرات UHI توسط این مدل توضیح داده شده است. مقدار Adjusted R Square که برای اصلاح تعداد متغیرهای پیش‌بین به کار می‌رود، برابر با ۰/۶۹ بوده که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل است. میزان Std. Error of the Estimate معادل ۱/۱۰ بوده و از دقت پیش‌بینی مناسب مدل حکایت دارد (جدول ۵).

جدول ۶. مقادیر ANOVA در دوره ۱۳۸۳

ANOVA ^a						
Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
1383	Regression	1.81	5	3.6	15.2	0.0 ^b
	Residual	3.14	211	1.48		
	Total	3.32	216			

a. Dependent Variable: UHI1383

b. Predictors: (Constant), NDVI1383, NDBI1383, LST1383, RH1383, AQI1383

در جدول ANOVA، سطح معناداری مدل در سطح ۹۹ درصد تأیید شده است (Sig=0.000) و مقدار F برابر با ۱۵/۲ نشان می‌دهد که مدل به لحاظ آماری معتبر بوده و متغیرهای انتخاب شده، اثر مشترک معناداری بر UHI داشته‌اند (جدول ۶).

جدول ۷. ضرایب رگرسیون (Coefficients) در دوره ۱۳۸۳

Coefficients ^a							
Model1383	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	VIF	
	B	Std. Error					
	(Constant)	3.20	0.80	-	4.00	0.000	-
1	NDVI1383	-0.55	0.10	-0.35	-5.50	0.000	2.0
	NDBI1383	0.90	0.12	0.65	7.50	0.000	2.5
	LST1383	1.05	0.09	0.75	11.67	0.000	1.8
	RH1383	-0.18	0.06	-0.12	-3.00	0.007	1.4
	AQI1383	0.45	0.05	0.32	8.00	0.000	1.9

a. Dependent Variable: UHI1383

بر اساس جدول Coefficients، بار دیگر متغیر LST با ضریب بتای استاندارد شده ۰/۷۵ مهم‌ترین و قوی‌ترین عامل افزایش UHI شناخته شده و اثر آن از لحاظ آماری معنادار است ($p < 0.01$) و همچنین NDBI با ضریب بتای ۰/۶۵ و AQI با ضریب بتای ۰/۳۲ هر دو اثر مثبت و معناداری بر افزایش UHI داشته‌اند. در سوی مقابل، NDVI و RH به ترتیب با ضرایب بتای منفی ۰/۳۵ و ۰/۱۲ اثر کاهشی بر UHI از خود نشان داده‌اند. اثر منفی NDVI بار دیگر بر نقش مهم پوشش گیاهی در تعدیل دمای محیط شهری و کاهش پدیده جزیره حرارتی تأکید دارد.

مقادیر VIF که همگی کمتر از ۲/۵ هستند، بیانگر نبود هم‌خطی شدید بین متغیرهای مستقل و اطمینان بخش بودن مدل از نظر مسائل چند هم‌خطی می‌باشند (جدول ۷).

یافته‌های سال ۱۳۸۳ مشابه با الگوی مشاهده شده در سال ۱۳۶۳، بر نقش کلیدی افزایش دمای سطح زمین (LST) و گسترش مناطق ساختمانی (NDBI) در تشدید UHI تأثیر می‌گذارند. از سوی دیگر، شاخص کیفیت هوا (AQI) نیز در این سال همبستگی مثبت و معناداری با UHI داشته است که می‌تواند بازتابی از ارتباط میان کیفیت پایین هوا و تشدید اثرات حرارتی در محیط شهری باشد. کاهش شاخص NDVI و رطوبت نسبی، به عنوان دو عامل تعدیل‌کننده، اهمیت اقدامات محیط زیستی نظیر توسعه فضای سبز و مدیریت رطوبت محیطی را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

دوره ۱۴۰۳

بررسی مدل رگرسیون چندگانه برای سال ۱۴۰۳ نشان می‌دهد که مدل، از قدرت پیش‌بینی بالایی برخوردار بوده و توانسته است تغییرات شاخص UHI را به شکل معناداری توضیح دهد.

جدول ۸. خلاصه مدل (Model Summary) در دوره ۱۴۰۳

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1403	0.9 ^a	.81	0.78	0.95

a. Predictors: (Constant), NDVI1403, NDBI1403, LST1403, RH1403, AQI1403

خلاصه مدل (Model Summary) نشان می‌دهد که مقدار R برابر با ۰/۹۰ بوده که بیانگر همبستگی بسیار قوی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته UHI در این سال است. مقدار R Square معادل ۰/۸۱ محاسبه شده و حاکی از این است که ۸۱ درصد از واریانس تغییرات UHI توسط متغیرهای وارد شده در مدل قابل توضیح است. مقدار Adjusted R Square نیز با عدد ۰/۷۸ دقت و پایداری مدل را تأیید می‌کند. همچنین میزان خطای استاندارد برآورد (۰/۹۵) نسبت به سال‌های قبل کاهش یافته و نشان‌دهنده بهبود دقت مدل در سال ۱۴۰۳ می‌باشد (جدول ۸).

جدول ۹. مقادیر ANOVA در دوره ۱۴۰۳

ANOVA ^a						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1403	Regression	4.15	4	3.77	20.8	0.0 ^b
	Residual	3.28	212	1.49		
	Total	3.32	216			

a. Dependent Variable: UHI1403

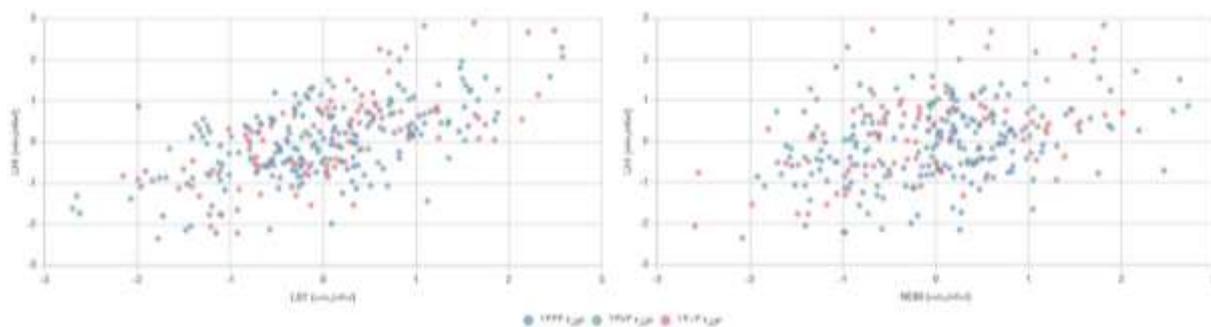
b. Predictors: (Constant), NDVI1403, NDBI1403, LST1403, RH1403, AQI1403

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 ۱۴۰۳

Coefficients ^a							
Model1403		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	VIF
		B	Std. Error	Beta			
1	(Constant)	4.50	0.70	-	6.43	0.036	-
	NDVI1403	-0.65	0.08	-0.40	-8.12	0.000	2.2
	NDBI1403	1.10	0.10	0.75	11.00	0.000	3.0
	LST1403	1.30	0.07	0.85	18.57	0.000	2.0
	RH1403	-0.12	0.05	-0.08	-2.40	0.026	1.6
	AQI1403	0.55	0.04	0.35	13.75	0.000	2.5

a. Dependent Variable: UHI1403



شکل ۱۷. گراف‌های پراکندگی (scatter plots) برای دو متغیر LST و NDBI در سه دوره ۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳

جهت تفسیر آسان‌تر نتایج، نتیجه جداول رگرسیون با گراف پراکندگی سه دوره برای دو متغیر LST و NDBI ترسیم گردید (شکل ۱۷).

در جدول Coefficients، متغیر LST با ضریب بتای استاندارد شده $0/85$ بیشترین اثر مثبت را بر UHI داشته و این اثر به‌طور قوی معنادار است. پس از آن، NDBI با بتای $0/75$ و AQI با بتای $0/35$ نیز اثرات مثبت و معناداری را بر UHI نشان داده‌اند. از سوی دیگر، NDVI و RH دارای ضرایب منفی به ترتیب $0/40$ و $0/08$ بوده و هر دو با UHI همبستگی منفی داشته‌اند. نکته قابل توجه این است که اثر منفی NDVI در سال 1403 نسبت به سال‌های قبل تقویت شده و بیانگر اهمیت روزافزون پوشش گیاهی در کاهش شدت UHI در سال‌های اخیر است.

بررسی مقادیر VIF نشان می‌دهد که هیچ یک از متغیرهای مستقل دچار هم‌خطی شدید نیستند (همه کمتر از ۳)، که این امر نشان‌دهنده ثبات و عدم وجود مشکل چند هم‌خطی در مدل می‌باشد (جدول ۱۰).

مدل سال 1403 نشان‌دهنده تداوم و حتی تقویت اثرگذاری برخی متغیرهای محیطی بر UHI است. افزایش شدید نقش LST و NDBI در افزایش شدت UHI، گواهی بر روند تشدید پدیده‌های مرتبط با گرمایش شهری و توسعه فضاهای ساخته‌شده می‌باشد. همچنین، افزایش شاخص کیفیت هوا (AQI) همچنان به‌عنوان یک عامل موثر بر UHI مطرح است. در مقابل، اثر کاهنده پوشش گیاهی (NDVI) به‌طور معناداری در این سال تقویت شده و به وضوح نقش کلیدی فضای سبز در کاهش دمای محیط شهری را برجسته می‌سازد. کاهش نسبی اثر RH بر UHI نیز نشان‌دهنده این است که در سال‌های اخیر، اهمیت سایر عوامل نظیر LST و NDBI بر شدت جزیره حرارتی شهری غالب شده است.

این نتایج، ضرورت تدوین سیاست‌های شهری در راستای افزایش پوشش گیاهی و مدیریت بهینه توسعه شهری را بیش از پیش نمایان می‌کند.

بررسی و مقایسه نتایج حاصل از سه مدل رگرسیون خطی برای سال‌های 1363 ، 1383 و 1403 روندی معنادار و قابل توجه از تغییرات اثرگذاری متغیرهای محیطی بر شاخص UHI را نشان می‌دهد.

مقدار R در طول این سه دوره زمانی از $0/87$ در سال 1363 به $0/85$ در سال 1383 و نهایتاً به $0/90$ در سال 1403 افزایش یافته است. این روند حاکی از این است که همبستگی میان متغیرهای مستقل و UHI در طول زمان به تدریج تقویت شده است. همچنین R Square از $0/61$ به $0/72$ و سپس به $0/81$ رسیده که نشان‌دهنده افزایش مشهود قدرت تبیین مدل‌ها در طول چهار دهه اخیر است. این افزایش بیانگر آن است که عوامل انتخاب شده نقش فزاینده‌ای در تغییرات UHI ایفا کرده‌اند و وابستگی UHI به این عوامل طی زمان بیشتر شده است.

بررسی تغییرات اثرگذاری متغیرها

دمای سطح زمین (LST) در هر سه دوره به‌عنوان قوی‌ترین عامل موثر مثبت بر UHI ظاهر شده است. ضریب بتای استاندارد

شده این متغیر از ۰/۶۵ در سال ۱۳۶۳ به ۰/۷۵ در ۱۳۸۳ و سپس به ۰/۸۵ در ۱۴۰۳ افزایش یافته است. این روند نشان دهنده شدت یافتن نقش افزایش دمای سطح در تشدید UHI در طی زمان است که می تواند ناشی از تغییرات اقلیمی و افزایش چشمگیر گرمایش سطح زمین باشد.

- شاخص ساخت و ساز (NDBI) نقش این متغیر نیز طی این سال ها به طور مستمر افزایش یافته است. از ضریب بتای ۰/۵۶ در ۱۳۶۳ به ۰/۶۵ در ۱۳۸۳ و سپس ۰/۷۵ در ۱۴۰۳ رسیده است. این روند نشان دهنده توسعه مستمر و فزاینده سطوح ساخته شده و مناطق غیرقابل نفوذ شهری است که خود یکی از پیشران های اصلی UHI به شمار می آید.
- پوشش گیاهی (NDVI) همواره اثر منفی و معناداری بر UHI داشته است، اما اثر کاهنده آن طی زمان تقویت شده است. ضریب NDVI از ۰/۳۲- در ۱۳۶۳ به ۰/۳۵- در ۱۳۸۳ و سپس به ۰/۴۰- در ۱۴۰۳ افزایش یافته است. این موضوع اهمیت پوشش گیاهی به عنوان یک عامل کلیدی در کنترل و کاهش UHI را در طول زمان برجسته تر می کند.
- شاخص کیفیت هوا (AQI) اثر مثبت AQI بر UHI در طول این سال ها روند افزایشی داشته است. از بتای ۰/۲۷ در ۱۳۶۳ به ۰/۳۲ در ۱۳۸۳ و در نهایت به ۰/۳۵ در ۱۴۰۳ رسیده است. این روند می تواند منعکس کننده ارتباط فزاینده بین کیفیت پایین هوا و تشدید پدیده جزیره حرارتی در مناطق شهری باشد.
- کاهش ضریب RH در سال ۱۴۰۳ (۰/۸۱-) نسبت به دوره های پیشین، بازتاب دهنده غلبه اثرات گرم کننده urbanization (NDBI و LST) بر عوامل تعدیل کننده است. این امر، بدون ارتباط مستقیم با تغییرات اقلیمی، بر لزوم تقویت فضای سبز برای حفظ نقش RH تأکید دارد.
- افزایش R^2 از ۰/۶۱ به ۰/۸۱ در مدل رگرسیون، بیانگر تقویت همبستگی عوامل محلی (مانند NDBI و LST) با UHI است که با روند جهانی تشدید جزیره حرارتی شهری (UHI) به دلیل شهرنشینی و گرمایش جهانی همخوانی دارد؛ مطالعات جهانی (مانند Koko et al., 2021 و Wang et al., 2023) نشان دهنده افزایش مشابه شدت UHI در شهرهای روبه رشد است. گرمایش جهانی مستقیماً در مدل وارد نشده، اما از طریق LST (به عنوان proxy دمای سطحی تحت تأثیر اقلیمی) غیرمستقیم لحاظ شده است.

نتیجه گیری

نتایج نشان می دهد که از ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۳، شدت و اثرگذاری عوامل حرارتی و انسانی بر UHI به تدریج افزایش یافته است. افزایش قدرت اثرگذاری LST و NDBI هم راستا با گسترش فضاهای ساخته شده، کاهش پوشش گیاهی و تغییرات اقلیمی قابل توجهی است. در عین حال، اثر پوشش گیاهی در کاهش UHI طی زمان برجسته تر شده است، که این خود دلیلی بر تأکید بیشتر بر توسعه فضاهای سبز شهری در سیاست های مدیریت محیطی و برنامه ریزی شهری است. افزایش سهم AQI به عنوان متغیر اثرگذار، گواهی بر تعامل پیچیده میان آلودگی هوا و گرمایش موضعی در بافت های شهری است که در سال های اخیر به یک چالش جدی بدل شده است. این تحلیل تطبیقی بیانگر آن است که با گذر زمان، عوامل مرتبط با تغییرات LST و NDBI نقش فزاینده ای در تشدید UHI ایفا کرده اند. در مقابل، اثر تعدیل کننده پوشش گیاهی نیز اهمیت بیشتری یافته است. این روندها تأکید می کنند که بدون مداخلات جدی همچون توسعه زیرساخت های سبز و کاهش فضاهای غیرقابل نفوذ، شدت پدیده UHI در دهه های آینده به مراتب بیشتر خواهد شد.

تغییرات کاربری اراضی موجب کاهش تراکم پوشش گیاهی و افزایش تراکم ساختمانی و انتشارات وسایل نقلیه شده است که این امر نقش قابل توجهی در توزیع مکانی پدیده جزیره حرارتی شهری دارد (Putra et al., 2021). طبق نتایج بدست آمده کاهش میزان پوشش گیاهی، افزایش مناطق ساخته شده و آلودگی هوا در تشدید جزایر حرارتی منطقه ۴ تبریز در طی ۴۰ سال تأثیر گذاشته است. همراه با افزایش شدت جزایر حرارتی تحلیل رگرسیون نشان می دهد که بین درصد مناطق سبز و LST

همبستگی منفی وجود دارد، که نشان‌دهنده اثر خنک‌کنندگی پوشش گیاهی است. برعکس، همبستگی مثبتی بین LST و درصد مناطق شهری مشاهده می‌شود (Koko et al., 2021; Thambawita et al., 2023b).

طبق نتایج تحلیل رگرسیون بدست آمده در تحقیق حاضر، اثر منفی شاخص NDVI نقش مهمی در تعدیل دمای محیط منطقه ۴ تبریز و کاهش پدیده جزیره حرارتی آن داشته و شاخص NDBI اثر مثبت و معناداری بر افزایش UHI داشته‌است. در طی بازه زمانی ۲۰ سال، با افزایش مناطق ساختمانی و کاهش پوشش گیاهی شدت جزایر حرارتی به طور پیوسته افزایش یافته است (Sahoo et al., 2022). در طی بازه زمانی ۴۰ سال در منطقه ۴ تبریز نیز با افزایش مناطق ساختمانی و کاهش پوشش گیاهی موجب افزایش شدت جزایر حرارتی شده‌است. افزایش دمای سطح و کاهش تفاوت بین میانگین دمای مناطق درون شهری و مناطق اطراف شهر نشان‌دهنده گسترش پدیده جزیره گرمایی شهری است (عرب و همکاران، ۱۴۰۱). طبق نقشه‌های تولید شده شاخص دمای سطح زمین و نتایج بدست آمده طی بازه زمانی مورد مطالعه دمای سطح زمین شهر منطقه ۴ افزایش یافته‌است که این امر نشان‌دهنده گسترش پدیده جزیره گرمایی در این شهر نیز می‌باشد. همبستگی منفی بین دو شاخص پوشش گیاهی و دمای سطح زمین در طول دوره ۱۰ ساله مشاهده می‌شود که نشانگر آن است که همزمان با کاهش فضای سبز بر وسعت جزایر حرارتی افزوده شده‌است (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۷). در تحقیق حاضر نیز شاخص NDVI دارای ضریب منفی و اثر خنک‌کنندگی است بنابراین کاهش فضای سبز موجب افزایش وسعت جزایر حرارتی شده‌است. بین شاخص پوشش گیاهی و دمای سطحی زمین ارتباطی وجود دارد (محمودزاده و همکاران، ۱۳۹۷). در تحقیق حاضر نیز بین شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح زمین رابطه معکوس وجود دارد. طبق بررسی‌های صورت گرفته با رجوع به مطالعه‌های پیشین، نتایج تحقیق‌های موجود در پیشینه با نتایج تحقیق حاضر مطابقت داشته‌است.

به‌منظور استفاده از داده‌های آلودگی هوا برای سال ۱۳۶۲ (۱۳۶۳ میلادی) با توجه به اینکه اطلاعات موجود، داده‌های آلودگی هوای کلانشهر تبریز از سال ۱۳۸۳ (۱۳۸۳ میلادی) در دسترس هستند، این امر جزء محدودیت‌های تحقیق حاضر است که جهت دستیابی به این اطلاعات و تجزیه و تحلیل آن‌ها از تکنیک درون‌یابی IDW^۱ در ArcGIS برای تخمین داده‌های کیفیت هوا در سال ۱۳۶۳ استفاده شده‌است. به دلیل عدم دسترسی به داده‌های واقعی AQI برای سال ۱۳۶۳ شمسی (۱۹۸۴ میلادی) و شروع ثبت داده‌ها از سال ۱۳۸۳، از روش درونیابی IDW در ArcGIS برای تخمین مقادیر استفاده شد تا تحلیل چندزمانی کامل شود؛ این امر به عنوان محدودیت تحقیق ذکر شده است. حساسیت مدل رگرسیون به این تخمین‌ها به طور خاص بررسی نشده، اما پایداری مدل ($R^2=0.61$ و $VIF<2$) و همخطی پایین متغیرها، تأثیر محدود آن را بر نتایج کلی تأیید می‌کند.

لازم به ذکر است شاخص‌ها و روش‌های استفاده شده در این تحقیق قابلیت استفاده در سطوح جغرافیایی دیگر را نیز دارد.

در پژوهش حاضر ابتدا تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سال‌های (۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳) با استفاده از سایت USGS و با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Landsat و اطلاعات ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا استخراج شده‌اند و نقشه‌های شاخص‌های «NDVI»، «NDBI»، «LST»، «UHI»، «RH» و «AQI» با استفاده از نرم افزار ENVI تهیه شده و پس از نرمال کردن تمامی شاخص‌ها در مرحله بعدی برای تحلیل داده‌ها از نرم افزار SPSS26 استفاده شده است و در نهایت تحلیل‌های آماری مانند رگرسیون خطی جهت بررسی ارتباط متغیرهای مستقل و وابسته به کار گرفته شده‌است. شاخص‌های مورد بررسی «NDVI»، «NDBI»، «LST»، «UHI»، «RH» و «AQI» در سه دوره زمانی (۱۳۶۳، ۱۳۸۳ و ۱۴۰۳) نشان می‌دهد که رشد سریع شهرنشینی و تغییرات کاربری اراضی در کلانشهر تبریز و به تبع آن در منطقه ۴، تأثیر بسزایی بر افزایش شدت جزایر حرارتی داشته‌است. با استفاده از آزمون «رگرسیون خطی» در نرم‌افزار SPSS، نتایج حاصل نشان‌دهنده این است که: ضریب تعیین (R^2) که میزان ارتباط خطی بین دو متغیر (مستقل و وابسته) را اندازه‌گیری می‌کند، در سال ۱۳۶۳، ۰.۶۱ و در سال

^۱Inverse Distance Weighting

۱۳۸۳، ۰٫۷۲ و در سال ۱۴۰۳، به ۰٫۸۱ افزایش یافته است. افزایش چشمگیر ضریب تعیین (R^2) در طی ۴۰ سال، نشان‌دهنده افزایش تأثیر متغیرهای مستقل NDBI و LST بر متغیر وابسته، UHI است. همچنین، یافته‌ها نشان می‌دهند که شاخص‌های NDVI و RH اثرات خنک‌کننده را در طی ۴۰ سال اخیر در شهر دارند و با ضرایب منفی، نقش کاهنده‌ای در شدت جزایر حرارتی منطقه ۴ شهر تبریز ایفا می‌کنند. قابل ذکر است که این تأثیر در مقایسه با اثرات شدید مناطق ساخته شده و کاهش وسعت فضاهای سبز، چندان به چشم نمی‌خورد. افزایش ضرایب NDBI و AQI (کیفیت هوا) در سال ۱۴۰۳ نسبت به سال‌های ۱۳۶۳ و ۱۳۸۳، نمایانگر این است که افزایش شهرنشینی و گسترش شهرها همراه با افزایش آلودگی هوا، بطور چشمگیری بر تشدید جزایر حرارتی منطقه ۴ مؤثر بوده‌است. آزمون‌های رگرسیون خطی نشان دادند که متغیرهای LST و NDBI در تمام دوره‌ها با ضرایب مثبت و معنادار ($\text{Sig.} < 0.05$)، قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌های UHI می‌باشند. در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که در طی ۴۰ سال اخیر از سال ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۳ با گسترش مناطق ساخته شده، تغییرات کاربری اراضی و کاهش مساحت پوشش گیاهی در منطقه ۴، رابطه مستقیم با افزایش دمای شهری و تشدید اثرات منفی جزایر حرارتی دارد. این نتایج نیاز به برنامه‌ریزی شهری پایدار، تقویت و گسترش فضاهای سبز و مدیریت کاربری اراضی را برای کاهش اثرات جزایر حرارتی را ضروری می‌سازد.

پیشنهادات عملی مقاله، مانند گسترش فضای سبز، از طریق مراحل زیر قابل اجرا هستند:

سیاست‌گذاری شهری: ادغام الزامات پوشش گیاهی (حداقل ۳۰٪ فضای سبز) در طرح‌های جامع و تفصیلی شهرداری تبریز، با اولویت‌بندی بازآفرینی پارک‌ها و ایجاد کریدورهای سبز در مناطق متراکم (مانند شهرک‌های شهید بهشتی و آذربایجان).

مدیریت کاربری اراضی: اعمال محدودیت‌های توسعه افقی در مناطق پرخطر (شمال غربی) با استفاده از GIS برای نظارت بر تغییرات کاربری، و تبدیل اراضی بایر به فضاهای سبز از طریق مشوق‌های مالی (مانند معافیت‌های مالیاتی برای پروژه‌های سبز).

کنترل کیفیت هوا: همکاری با ایستگاه‌های پایش AQI برای اجرای طرح‌های کاهش انتشارات (مانند گسترش حمل‌ونقل عمومی و وسایل نقلیه الکتریکی).

منابع

- احمدی محمود، داداشی رودباری عباسعلی. (۱۳۹۶). شناسایی جزایر حرارتی شهری مبتنی بر رویکرد زیست محیطی، مطالعه موردی (کلان شهر اصفهان). جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۸(۳)، ۱-۲۰. doi: 10.22108/gep.2017.98318.0
- اسکندری دامنه هادی، اسکندری دامنه حامد، چراغی میثم، خسروی حسن، عادل ساردوئی محسن. (۱۴۰۰). تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر تشکیل جزایر گرمایی با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: شهر کرمان). نشریه محیط زیست طبیعی، ۷۴(۳)، ۶۱۴-۶۲۸. doi: 10.22059/jne.2022.327993.2258
- امیدوار کمال، موید فر سعیده، فاطمی مهران، مهدی نارنگی فرد. (۱۳۹۹). ارزیابی ارتباط کاربری اراضی شهری و جزایر حرارتی، مطالعه موردی: شهر بیابانی یزد، نشریه جغرافیای طبیعی، پیاپی ۴۷ (بهار ۱۳۹۹)، صص ۱-۱۷.
- امین زاده گوهرریزی بهناز، قشلاق پور سهیل. (۱۳۹۹). تأثیر الگوهای فضایی ساختار سبز شهری بر تغییر دمای جزایر حرارتی مورد مطالعه: شهر تهران. محیط شناسی، ۴۶(۲)، ۲۳۹-۲۵۴. doi: 10.22059/jes.2021.308065.1008059
- خدمت زاده علی، موسوی میرنجف، محمدی ترکمانی حجت، محمدی میر صادق. (۱۴۰۰). تحلیلی بر تغییرات کاربری زمین و شکل گیری جزایر حرارتی در حریم شهر ارومیه با استفاده از سنجش از دور. فصلنامه علمی برنامه ریزی منطقه ای، ۱۱(۴۱)، ۱۳۴-۱۱۹. doi: 10.30495/jzpm.2021.3965

- سامی ابراهیم، کرباسی، پوران، اخوان زهرا. (۱۴۰۲). ارزیابی نقش کاربری اراضی بر شکل‌گیری جزیره حرارتی در شهر مراغه. مطالعات ساختار و کارکرد شهری، ۱۰(۳۶)، ۸۹-۱۱۱. doi: 10.22080/usfs.2023.24802.2329
- شاهینی فر مصطفی، شاهنده حمیدرضا. (۱۴۰۲). تحلیل تصاویر سنتینل ۳ سنجنده SLSTR در شناسایی جزایر گرمایی شهری و ارتباط آن با پوشش گیاهی (مطالعه موردی: شهر کرمانشاه). فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۱۶(۶۰)، ۹۷-۱۱۲.
- شوشتری صلاح الدین، قلعه نوبی محمود، عزتیان ویکتوریا، ملکی آیدا، پاکنژاد مصطفی، رهپو رئوفه. (۱۳۹۷). بررسی روش ترکیبی در تشخیص جزایر گرمایی و راهکار تعدیل از طریق ظرفیت فضای سبز شهری (مورد مطالعه: شهر اصفهان). فصلنامه مطالعات شهری، ۷(۲۸)، ۴۱-۵۴. doi: 10.34785/J011.2018.015
- عرب نرگس، سلمان ماهینی عبدالرسول، میکاییلی تبریزی علیرضا، ویتته توما. (۱۴۰۱). بررسی و تحلیل پویایی کاربری اراضی و تأثیر آن بر جزایر حرارتی شهری (مطالعه موردی: شهر مشهد). نشریه محیط زیست طبیعی، ۷۵(۳)، ۳۸۴-۳۹۸. doi: 10.22059/jne.2022.336599.2365
- عرب نرگس، سلمان ماهینی عبدالرسول، میکاییلی تبریزی علیرضا، ویتته توما. (۱۳۹۹). ارزیابی ارتباط کاربری اراضی شهری و جزایر حرارتی، مطالعه موردی: شهر بیابانی یزد، نشریه جغرافیای طبیعی، پیاپی ۴۷ (بهار ۱۳۹۹)، صص ۱-۱۷.
- قربانی فاطمه، سجادزاده حسن. (۱۴۰۳). تأثیر تغییرات پوشش گیاهی بر شدت جزیره گرمایی در شهر (نمونه موردی: کلانشهر کرج). فصلنامه مطالعات شهری، ۱۳(۵۲)، ۳-۱۶. doi: 10.22034/urbs.1403.140477.5005
- متکان علی اکبر، نوحه گر احمد، میرباقری بابک، ترک چین ناهید. (۱۳۹۳). تحلیل نقش کاربری اراضی در شکل‌گیری جزایر حرارتی با استفاده از داده‌های چند زمانه سنجنده ASTER (مطالعه موردی: شهر بندرعباس). سنجش از راه دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۵(۴)، ۱-۱۴. doi: SID. https://sid.ir/paper/189463/fa
- محمودزاده حسن، نقدبیشی افسانه، مؤمنی سحر. (۱۳۹۷). تأثیر کاربری های شهری در ایجاد جزایر حرارتی (مطالعه موردی: شهر مشهد)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۷(۳)، ۱۰۵-۱۱۹. doi: DOI: 10.22067/geo.v0i0.68150
- مشیری سجاد، نیکدل منور احمد، جبرئیلی محمدرضا، تیموری ایرج، ولیزاده کامران خلیل، فیضی زاده بختیار. (۱۴۰۴). ارزیابی تغییرات زمانی-مکانی شاخص زیستپذیری اکولوژیکی (منطقه مطالعه شده: کلانشهر تبریز). برنامه ریزی فضایی، ۱۵(۱)، ۸۷-۱۰۸. doi: 10.22108/sppl.2025.141477.1787
- معروف نژاد عباس. (۱۳۹۰). نقش کاربری های شهری در ایجاد جزایر حرارتی (مطالعه موردی: شهر اهواز). فصلنامه جغرافیایی چشم انداز زاگرس، ۳(۱۰)، ۹۰-۱۱۱. doi: SID. https://sid.ir/paper/175788/fa
- ملکی سعید، فرهنگ قاسم، شجاعیان علی. (۱۳۹۷). ارزیابی تغییر پذیری فضایی - زمانی جزایر حرارتی در ارتباط با کاربریهای شهری مطالعه موردی: شهر ارومیه. فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۲۷(۱۰۵)، ۱۹۷-۱۸۳. doi: 10.22131/sepehr.2018.31488
- منصوری سیدتاج الدین، زرغامی اسماعیل. (۱۴۰۱). بررسی تأثیر چیدمان کالبدی معماری ساختمان‌های بلندمرتبه مجتمع مسکونی و جزایر حرارتی شهری، نشریه انرژی ایران. ۲۵ (۱) ۳۳-۴۵. URL: http://necjournals.ir/article-1770-1fa.html
- نامجو منش جواد، کارگر بهمن، زیویار پروانه. (۱۴۰۱). مدیریت شهری و بازآفرینی فضاهای سبز و تأثیر آن در تعدیل جزایر گرمایی. ماهنامه جامعه شناسی سیاسی ایران، ۵(۱۲)، ۲۳۳۲-۲۳۵۲. doi: 10.30510/psi.2022.299994.2144
- Ahmadi, M., & Dadashi Rudbari, A. A. (2017). Identification of urban heat islands based on an environmental approach: Case study (Isfahan Metropolis). *Geography and Environmental Planning*, 28(3), 1-20. doi:10.22108/gep.2017.98318.0[In Persian]

- Aminzadeh Ghohrrizi, B., & Qeshlagh Pour, S. (2020). The impact of spatial patterns of urban green structure on urban heat island temperature change: Case study of Tehran City. *Environmental Sciences*, 46(2), 239–254. doi:10.22059/jes.2021.308065.1008059 [In Persian]
- Arab, N., Salman Mahiny, A. R., Mikaeli Tabrizi, A. R., & Wicht, T. (2022). Investigation and analysis of land use dynamics and its impact on urban heat islands (Case study: Mashhad City). *Journal of Natural Environment*, 75(3), 384–398. doi:10.22059/jne.2022.336599.2365 [In Persian]
- Arab, N., Salman Mahiny, A. R., Mikaeli Tabrizi, A. R., & Wicht, T. (2020). Evaluating the relationship between urban land use and heat islands: Case study of the desert city of Yazd. *Journal of Physical Geography*, 47(Serial No. 47), 1–17. (Spring 2020) [In Persian]
- Askandari Damaneh, H., Askandari Damaneh, H., Cheraghi, M., Khosravi, H., & Adeli Sardooi, M. (2021). The impact of land use changes on heat island formation using remote sensing (Case study: Kerman City). *Journal of Natural Environment*, 74(3), 614–628. doi:10.22059/jne.2022.327993.2258 [In Persian]
- Ghorbani, F., & Sajadzadeh, H. (1403). The impact of vegetation changes on the intensity of the urban heat island (Case study: Karaj Metropolis). *Urban Studies Quarterly*, 13(52), 3–16. doi:10.22034/urbs.1403.140477.5005 [In Persian]
- Khedmatzadeh, A., Mousavi, M. N., Mohammadi Turkmani, H., & Mohammadi, M. S. (2021). Analysis of land use changes and heat island formation in the buffer zone of Urmia City using remote sensing. *Regional Planning Quarterly*, 11(41), 119–134. doi:10.30495/jzpm.2021.3965 [In Persian]
- Mahmoudzadeh, H., Naghdbishi, A., & Mo'meni, S. (2018). The impact of urban land uses on heat island formation (Case study: Mashhad City). *Geography and Environmental Hazards*, 7(3), 105–119. doi:10.22067/geo.v0i0.68150 [In Persian]
- Maleki, S., Farahmand, G., & Shojaian, A. (2018). Evaluating the spatio-temporal variability of heat islands in relation to urban land uses: Case study of Urmia City. *Geographical Information (Sephehr) Scientific-Research Quarterly*, 27(105), 183–197. doi:10.22131/sepehr.2018.31488 [In Persian]
- Mansouri, S. T. A., & Zarghami, E. (2022). Investigating the impact of the physical arrangement of high-rise residential buildings on urban heat islands. *Iranian Journal of Energy*, 25(1), 33–45. URL: <http://necjournals.ir/article-1-1770-fa.html> [In Persian]
- Maroofnezhad, A. (2011). The role of urban land uses in heat island formation (Case study: Ahvaz City). *Zagros Landscape Geographical Quarterly*, 3(10), 90–111. SID. <https://sid.ir/paper/175788/fa> [In Persian]
- Moshiri, S., Nikdel, M. A., Jabraeili, M. R., Teimouri, I., Valizadeh, K. K., & Feizizadeh, B. (2025). Evaluating the spatio-temporal changes of the ecological livability index (Study area: Tabriz Metropolis). *Spatial Planning*, 15(1), 87–108. doi:10.22108/sppl.2025.141477.1787 [In Persian]
- Motkan, A. A., Nohegar, A., Mirbagheri, B., & Torkchin, N. (2014). Analyzing the role of land use in the formation of heat islands using multi-temporal ASTER sensor data (Case study: Bandar Abbas City). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 5(4), 1–14. SID. <https://sid.ir/paper/189463/fa> [In Persian]
- Namjomanesh, J., Kargar, B., & Zivyar, P. (2022). Urban management and regeneration of green spaces and its impact on mitigating heat islands. *Iranian Journal of Political Sociology*, 5(12), 2332–2352. doi:10.30510/psi.2022.299994.2144 [In Persian]
- Omidwar, K., Moeidfard, S., Fatemi, M., & Mahdi Narangifard. (2020). Evaluating the relationship between urban land use and heat islands: Case study of the desert city of Yazd. *Journal of Physical Geography*, 47(Serial No. 47), 1–17. (Spring 2020) [In Persian]
- Sami, I., Karbasi, P., & Akhavan, Z. (2023). Assessing the role of land use in the formation of heat islands in Maragheh City. *Urban Structure and Function Studies*, 10(36), 89–111.

doi:10.22080/usfs.2023.24802.2329[In Persian]

- Shahinifar, M., & Shahandeh, H. R. (2023). Analysis of Sentinel-3 SLSTR sensor images in identifying urban heat islands and their relationship with vegetation (Case study: Kermanshah City). *Journal of Physical Geography*, 16(60), 97–112. [In Persian]
- Shoushtari, S. A., Ghalehnoee, M., Ezzatian, V., Maleki, A., Paknezhad, M., & Rahpo, R. (2018). Investigating a hybrid method for detecting heat islands and mitigation strategies through urban green space capacity (Case study: Isfahan City). *Urban Studies Quarterly*, 7(28), 41–54. doi:10.34785/J011.2018.015[In Persian]
- Deosthali, V. (2000). Impact of rapid urban growth on heat and moisture islands in Pune City, India. *Atmospheric Environment*, 34(17), 2745–2754.
- Gonzalez-Trevizo, M., Martinez-Torres, K., Armendariz-Lopez, J., Santamouris, M., Bojorquez-Morales, G., & Luna-Leon, A. (2021). Research trends on environmental, energy and vulnerability impacts of Urban Heat Islands: An overview. *Energy and Buildings*, 246, 111051.
- Hassan, T., Zhang, J., Prodhon, F. A., Pangali Sharma, T. P., & Bashir, B. (2021). Surface urban heat islands dynamics in response to LULC and vegetation across South Asia (2000–2019). *Remote Sensing*, 13(16), 3177.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., & Franklin, J. (2005). The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction. *The Mathematical Intelligencer*, 27(2), 83–85.
- He, B.-J., Wang, J., Liu, H., & Ulpiani, G. (2021). Localized synergies between heat waves and urban heat islands: Implications on human thermal comfort and urban heat management. *Environmental Research*, 193, 110584.
- Jalan, S., & Sharma, K. (2014). Spatio-temporal assessment of land use/land cover dynamics and urban heat island of Jaipur city using satellite data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 767–772.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning* (Vol. 112). Springer.
- Kamali Maskooni, E., Hashemi, H., Berndtsson, R., Daneshkar Arasteh, P., & Kazemi, M. (2021). Impact of spatiotemporal land-use and land-cover changes on surface urban heat islands in a semiarid region using Landsat data. *International Journal of Digital Earth*, 14(2), 250–270.
- Koko, A. F., Yue, W., Abubakar, G. A., Alabsi, A. A. N., & Hamed, R. (2021). Spatiotemporal influence of land use/land cover change dynamics on surface urban heat island: A case study of Abuja metropolis, Nigeria. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5), 272.
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied linear statistical models*. McGraw-hill.
- Maru, R., & Ahmad, S. (2015). The relationship between land use changes and the urban heat island phenomenon in Jakarta, Indonesia. *Advanced Science Letters*, 21(2), 150–152.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons.
- Nurwanda, A., & Honjo, T. (2018). Analysis of land use change and expansion of surface urban heat island in Bogor City by remote sensing. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(5), 165.
- Oliveira, A., Lopes, A., Correia, E., Niza, S., & Soares, A. (2021). Heatwaves and summer urban heat islands: a daily cycle approach to unveil the urban thermal signal changes in Lisbon, Portugal. *Atmosphere*, 12(3), 292.
- Putra, C., Ramadhani, A., & Fatimah, E. (2021). Increasing Urban Heat Island area in Jakarta and it's relation to land use changes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Putri, D. O. A., Ermawati, M., & Yanto, N. P. (1403). Analisis Dampak Perubahan Penggunaan Lahan

- Perkotaan Terhadap Urban Heat Island Di Kecamatan Kedaton. *Jurnal Perencanaan dan Pengembangan Kebijakan*, 4(1), 27–38.
- Radhi, H., Sharples, S., & Assem, E. (2015). Impact of urban heat islands on the thermal comfort and cooling energy demand of artificial islands—A case study of AMWAJ Islands in Bahrain. *Sustainable Cities and Society*, 19, 310–318.
- Sahoo, S., Majumder, A., Swain, S., Gareema, Pateriya, B., & Al-Ansari, N. (2022). Analysis of decadal land use changes and its impacts on urban heat island (UHI) using remote sensing-based approach: a smart city perspective. *Sustainability*, 14(19), 11892.
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities—a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar energy*, 103, 682–703.
- Saverino, K. C., Routman, E., Lookingbill, T. R., Eanes, A. M., Hoffman, J. S., & Bao, R. (2021). Thermal inequity in Richmond, VA: the effect of an unjust evolution of the urban landscape on urban heat islands. *Sustainability*, 13(3), 1511.
- Sejati, A. W., Buchori, I., & Rudiarto, I. (2019). The spatio-temporal trends of urban growth and surface urban heat islands over two decades in the Semarang Metropolitan Region. *Sustainable Cities and Society*, 46, 101432.
- Thambawita, T., Munasinghe, D., & Yapa, L. (2023a). Identification of Urban Heat Island Effect on Land Use Land Cover Changes. *Journal of Geospatial Surveying*, 3(2), 43–53.
- Thambawita, T., Munasinghe, D., & Yapa, L. (2023b). Identification of Urban Heat Island Effect on Land Use Land Cover Changes. *Journal of Geospatial Surveying*, 3 (2).
- Wang, C., Zhan, W., Li, L., Wang, S., Wang, C., Miao, S., Du, H., Jiang, L., & Jiang, S. (2023). Urban heat islands characterized by six thermal indicators. *Building and Environment*, 244, 110820.
- Weisberg, S. (2005). *Applied linear regression* (Vol. 528). John Wiley & Sons.
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (1983). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote sensing of Environment*, 89(4), 467–483.
- Yang, C., He, X., Yan, F., Yu, L., Bu, K., Yang, J., Chang, L., & Zhang, S. (2017). Mapping the influence of land use/land cover changes on the urban heat island effect—A case study of Changchun, China. *Sustainability*, 9(2), 312.
- Yin, Z., Liu, Z., Liu, X., Zheng, W., & Yin, L. (2023). Urban heat islands and their effects on thermal comfort in the US: New York and New Jersey. *Ecological Indicators*, 154, 110765.
- Zandi, R., & Roki, Z. (2021). The role of land use changes on the formation and spatial changes of thermal islands—A case study in Ahvaz city, Iran. *Sustainable Earth Trends*, 1(2), 44–51.