



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Study of seasonal variations of heat islands in Isfahan County using processing of MODIS and TIRS sensor images

Mina Jireh Nezhadian¹, Meisam Rastegari Mehr^{2*}, Ata Shakeri³

1, 2, 3. Department of Geochemistry, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Karaj, Iran

Article info

Article history

Received: 12 October 2025

Accepted: 18 December 2025

Keywords:

Surface Urban Heat Island, Surface Urban Cool Island, Biophysical Variables, Isfahan County, Remote Sensing.



Abstract

The Urban Heat Island (UHI) phenomenon, a significant outcome of urbanization and industrialization, leads to elevated land surface temperatures in urban areas compared to their surroundings. This study investigates the seasonal variations of Land Surface Temperature (LST) and the intensity of the Surface Urban Heat Island (SUHI) in Isfahan County using data from MODIS and TIRS sensors. Satellite images from 2018 to 2023 were retrieved and processed within the Google Earth Engine (GEE) environment. Three different methods—based on temperature differences between urban areas and rural, agricultural, and water body zones—were applied to calculate SUHI intensity. The results show that SUHI intensity is higher during the nighttime, whereas an Urban Cool Island effect is observed during the daytime, underscoring the significant role of bare soils and wetlands in creating a thermal inversion of the heat island. Vegetation cover, albedo, and elevation were identified as the most important biophysical variables affecting land surface temperature, with significant correlations found between these variables and LST. The highest vegetation cover occurs in spring, contributing to temperature reduction through evapotranspiration. Additionally, increased albedo reduces heat absorption by the land surface. The findings highlight the prominent role of thermal interactions among urban, rural, and aquatic areas in shaping SUHI and emphasize the importance of managing vegetation cover and high-albedo materials to mitigate the phenomenon's negative impacts. In semi-arid cities such as Isfahan, the urban heat island effect may manifest as an urban cool island during the day and a heat island at night; therefore, precise modeling requires remote sensing data from both day and night, along with consideration of accuracy-related indices.

Introduction

One significant consequence of urbanization and industrialization is the Urban Heat Island (UHI) phenomenon, which elevates Land Surface Temperature (LST) in urban areas relative to their rural surroundings. This study investigates seasonal variations in LST and the intensity of the Surface Urban Heat Island (SUHI) in Isfahan County using MODIS and Landsat 8 TIRS satellite data from 2018 to 2023. Urbanization drives environmental degradation and thermal imbalance, impacting the local climate and exacerbating health and environmental risks—including increased energy

demand and air pollution. Remote sensing with thermal infrared (TIR) data from sensors like MODIS and Landsat 8 provides an effective means of assessing UHIs. By examining the influence of biophysical surface properties, urban morphology, and temporal factors on SUHI dynamics, this research aims to support strategies for adapting to urban climate change (Haashemi et al., 2016; Mendez-Astudillo et al., 2022; Ramly et al., 2024; Yazdly et al., 2023).

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.104842>

*Corresponding author: Meisam Rastegari Mehr; E-mail: rastegar.m@khu.ac.ir

How to cite this article: Jireh Nezhadian, M., Rastegari Mehr, M., Shakeri, A., 2025. Study of seasonal variations of heat islands in Isfahan County using processing of MODIS and TIRS sensor images. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 11(2), 461- 487. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.104842>



BY NC

Materials and Methods

The study area is Isfahan County, covering 15,706 km². It is located between 51°30'15"E and 51°47'10"E longitude and 32°30'20"N and 32°48'10"N latitude. The region has a dry and semi-arid desert climate, with elevations ranging from 1,550 to 1,650 meters (Fig. 1). In the Google Earth Engine environment, we used JavaScript to process MODIS products (MYD11A1 V6.1 and MYD11A2 V6.1) with a 1 km spatial resolution and daily/8-day temporal resolution, as well as atmospherically corrected Landsat 8 Level 2 data (30 m resolution). Daytime and nighttime Land Surface Temperature (LST) bands from MODIS and Landsat 8 for the period 2018–2023 were used to create monthly averages for spatial analysis. Three methods for calculating Surface Urban Heat Island (SUHI) intensity were employed. These methods are based on the temperature differences between urban-rural, urban-agriculture, and urban-water zones, as defined by Mohammad and Goswami (2021) and Haashemi et al. (2016).

$$\text{SUHI1} = \text{LST}_{\text{urban}} - \text{LST}_{\text{rural}} \quad (1)$$

$$\text{SUHI2} = \text{LST}_{\text{urban}} - \text{LST}_{\text{agriculture}} \quad (2)$$

$$\text{SUHI3} = \text{LST}_{\text{urban}} - \text{LST}_{\text{water}} \quad (3)$$

Biophysical variables—including land cover, elevation, fractional vegetation cover (FVC), and albedo—were derived from the following data sources: ESA WorldCover (10 m resolution) for land cover, SRTM DEM (30 m resolution) for elevation, and Landsat 8 imagery (30 m resolution) for FVC and albedo. Vegetation indices such as NDVI, required for calculating FVC, were derived from the Landsat data as follows:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}) \quad (4)$$

Where NIR and R are the near-infrared and red reflectance bands respectively (Yaghobi et al., 2019; Talkhablou et al., 2025). FVC was derived as:

$$\text{FVC} = [(\text{NDVI} - \text{NDVI}_s) / (\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s)] \quad (5)$$

Where NDVI_s and NDVI_v represent bare soil and dense vegetation values, respectively (Feyzi Zadeh and Gholamnia, 2016).

To retrieve the reflectance coefficient using the OLI bands, the TM/ETM+ algorithm was utilized:

$$a_{\text{short}} = 0.365a_2 + 0.130a_4 + 0.373a_5 + 0.085a_6 + 0.072a_7 - 0.0018 \quad (6)$$

where a_{short} is the shortwave total reflectance coefficient, and a_2 , a_5 , a_6 , and a_7 are the spectral reflectances of OLI bands 2, 4, 5, 6, and 7, respectively (Liang, 2001; Haashemi et al., 2016).

Results and Discussion

Daytime and nighttime LST patterns showed the highest temperatures in July and the lowest in January, with nighttime normalized LST (NLST) values consistently higher than daytime values (Fig. 2). Spatial distributions of NLST reveal urban centers and the Gavkhouni wetland as the warmest areas at night but cooler during the day (Figs. 3 and 4), indicating effects of thermal inertia and the moderating influence of vegetation and water.

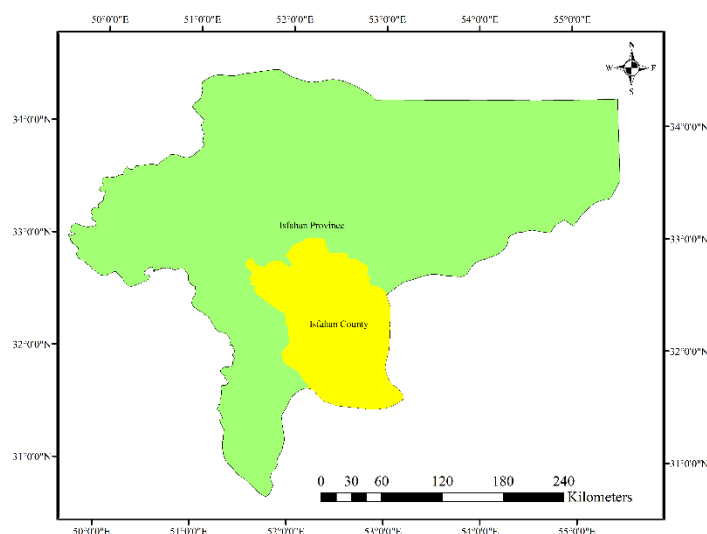


Fig. 1. Geographical location of the investigated area

SUHI (Surface Urban Heat Island) intensity results showed that heat island effects were stronger at night than during the daytime. Daytime "urban cool island" phenomena were observed, attributable to differences in heat capacity and albedo between urban areas and their surrounding rural, agricultural, and water bodies (Fig. 5). Monthly SUHI intensity statistics demonstrated seasonal variability, with maximum temperature differences occurring during winter nights and summer days (Tables 1 and 2).

Correlation analyses revealed significant negative relationships between daytime NLST and FVC, albedo, and elevation across different seasons (Table 3).

Vegetation reduces surface temperature via shading and evapotranspiration, while higher-albedo surfaces reflect more solar radiation, reducing heat accumulation. Elevation showed a negative correlation with temperature due to adiabatic cooling and atmospheric processes (Ahrens and Henson, 2022; Barry and Chorley, 2009; Bonan, 2008; Ullah et al., 2023). In dry and semi-arid urban contexts like Isfahan, SUHI exhibits complex diurnal and seasonal dynamics influenced by human activities, surface materials, and biophysical factors. The observed daytime urban cooling effect underscores the importance of incorporating high-reflectivity materials and vegetation in urban planning to mitigate heat stress.

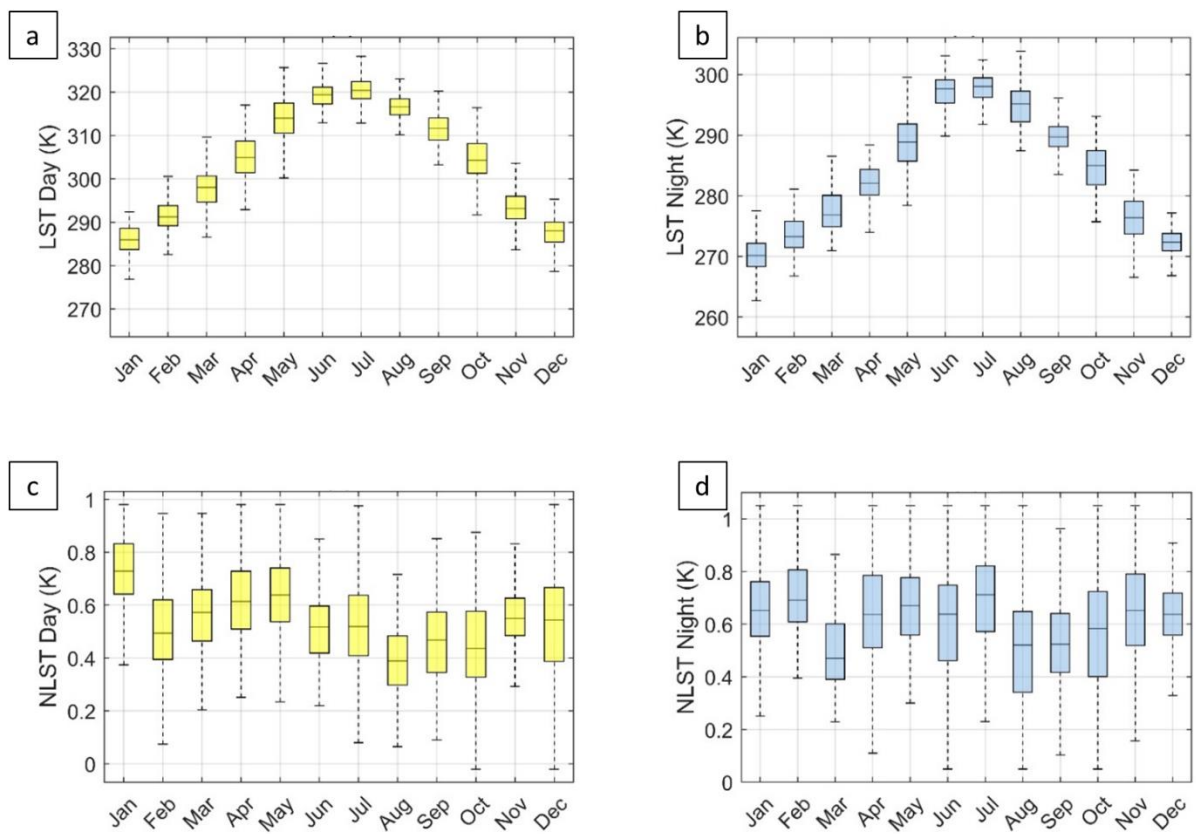


Fig. 2. Box plot of day and night LST and normalized LST data: a) daytime LST, b) nighttime LST, c) daytime normalized LST (NLST), d) nighttime NLST.

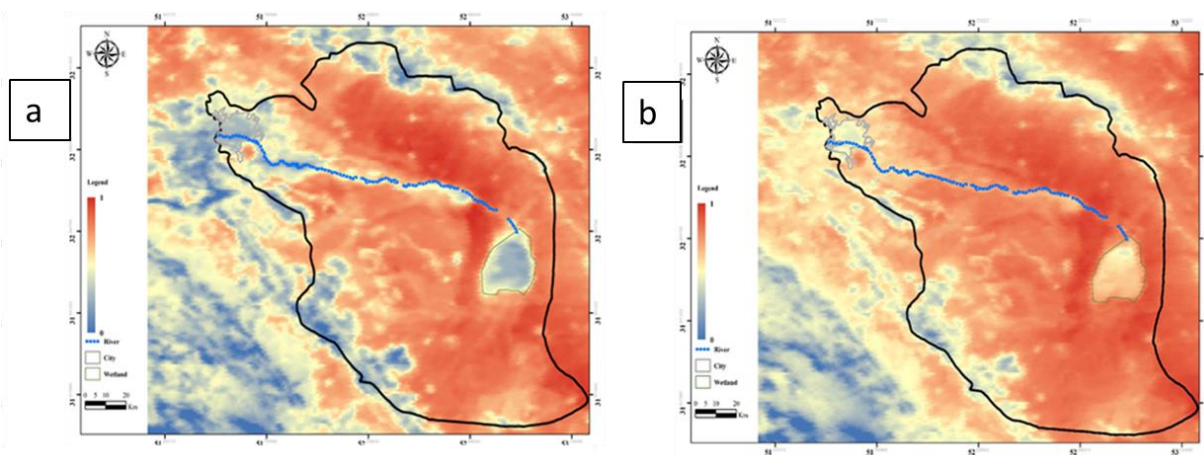


Fig. 3. Spatial distribution of NLST in daytime: a) summer; b) winter

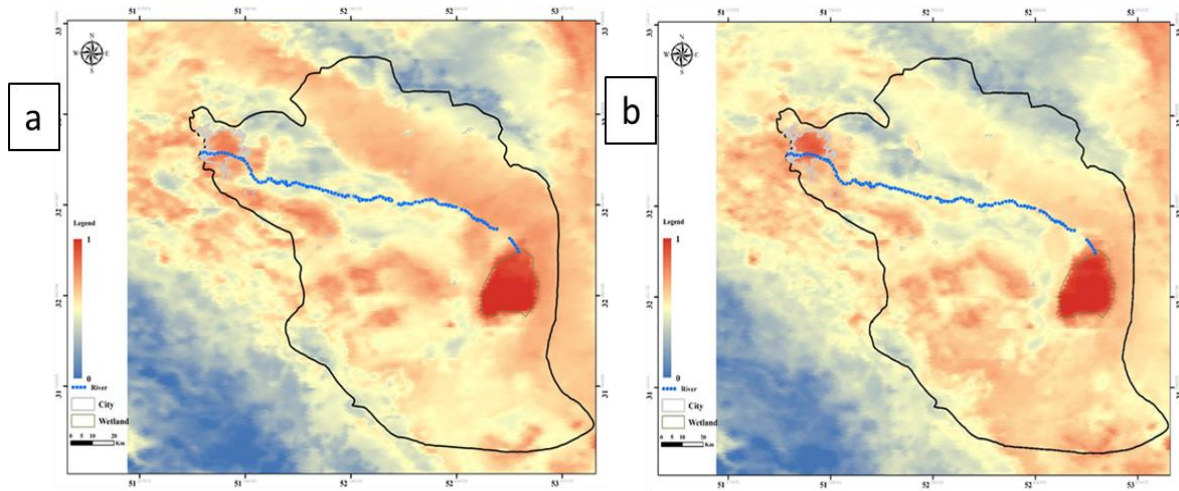


Fig. 4. Spatial distribution of NLST at night time: a) summer, b) winter.

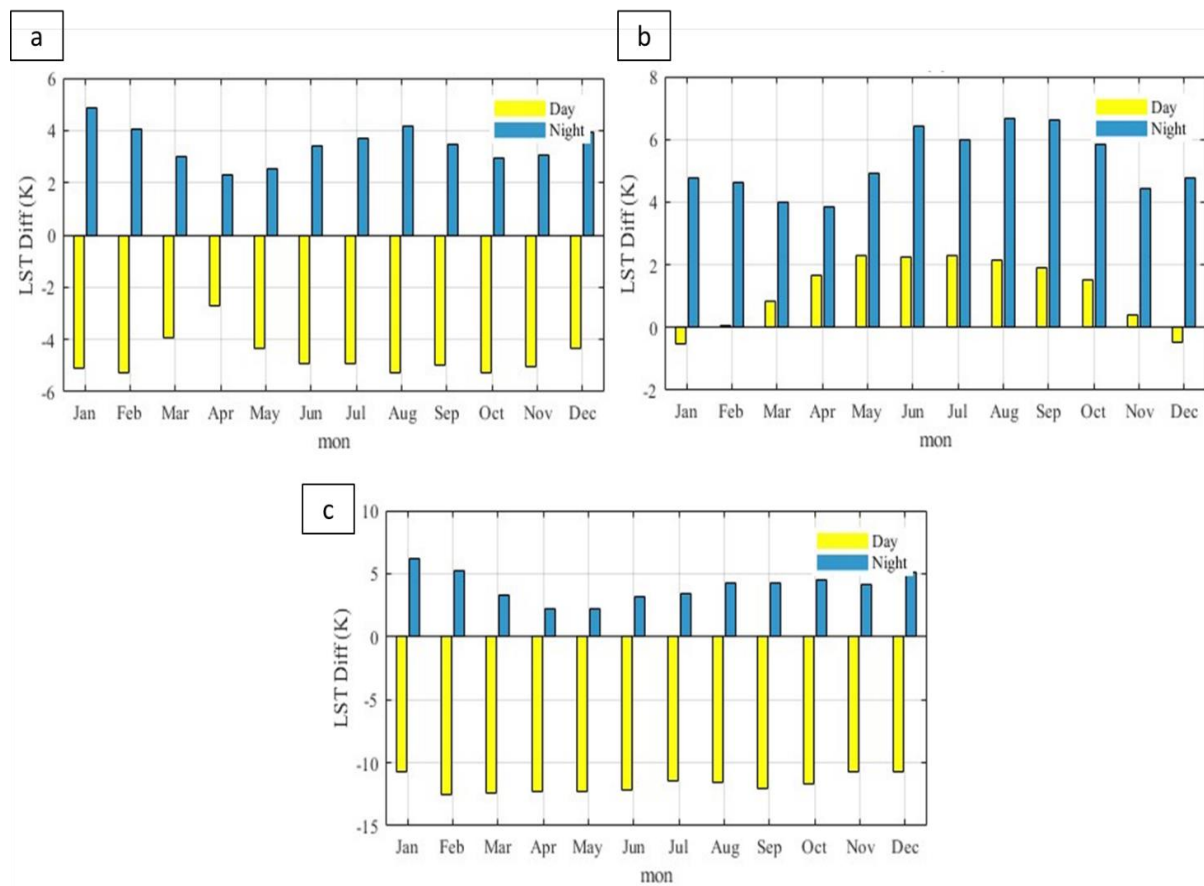


Fig. 5. Monthly center intensity of surface urban heat island in Isfahan city: a) urban-rural difference method, b) urban-agricultural difference method, c) urban-water difference method

Table 1. Monthly SUHI intensity values of daytime with different calculation methods (urban-rural(U-R)), urban-agriculture (U-A) and urban-water (U-W) approaches

SUHI Method	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
U-R	-8.33	-9.20	-9.36	-9.95	-10.08	-10.62	-9.57	-9.61	-9.80	-9.38	-7.88	-8.99
Difference												
U-A	-5.02	-4.37	-1.65	1.65	4.41	3.03	2.19	3.46	2.18	-1.41	-3.43	-4.92
Difference												
U-W	5.82	6.61	8.22	10.81	13.22	13.24	13.53	12.41	7.65	4.65	2.30	1.306
Difference												

Table 2. Monthly SUHI intensity values of nighttime with different calculation methods

SUHI Method	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
U-R	6.07	4.82	3.48	2.82	2.96	3.95	4.89	5.32	4.705	4.387	3.767	5.16
Difference												
U-A	4.17	4.17	3.92	3.75	4.52	5.95	5.44	6.25	6.52	5.50	3.90	4.0
Difference												
U-W	8.97	8.05	6.29	5.48	5.25	6.31	5.84	5.60	6.40	5.38	3.61	4.99
Difference												

Table 3. Pearson correlation coefficients between NLST (day) and FVC, albedo and elevation in different seasons of the year.

	Winter	Spring	Summer	Autumn
FVC	-0.11	-0.36	-0.50	-0.40
Albedo	-0.194	0.160	0.0038	0.048
Elevation	-0.58	-0.70	-0.46	-0.47




Conclusions

This comprehensive seasonal assessment of surface urban heat islands (SUHI), using MODIS and Landsat 8 satellite data, highlights the critical role of vegetation, surface albedo, and elevation in controlling the urban thermal environment of Isfahan County. SUHI intensity varies strongly with both time of day and season, exhibiting pronounced urban heat accumulation at night and urban cooling during the daytime in winter months. The analyzed biophysical variables demonstrate significant control over land surface temperature (LST) patterns, emphasizing the need for integrated strategies incorporating urban greening and high-albedo materials to mitigate urban heat effects. Continuous monitoring with high-resolution remote sensing data is essential to inform urban climate adaptation and public health policies.

References

- Ahrens, C. D., Henson, R., 2022. *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*, 13th ed. Cengage Learning, 736 pp.
- Barry, R. G., Chorley, R. J., 2009. *Atmosphere, Weather and Climate*, 9th ed. Routledge, London & New York, 532 pp.
- Bonan, G. B., 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320(5882), 1444–1449.
- Feyzi Zadeh, B. D., Gholamnia, K., 2016. Estimation of land surface temperature and separate window algorithm using Landsat 8 satellite images (case study: Mahabad watershed). *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data* 25(98), 171–181.
- Haashemi, S., Weng, Q., Darvishi, A., Alavipanah, S. K., 2016. Seasonal variations of the surface urban heat island in a semi-arid city. *Remote Sensing* 8(4), 352.
- Liang, S., 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: algorithms. *Remote Sensing of Environment* 76(2), 213–238.
- Mendez-Astudillo, J., Caetano, E., Pereyra-Castro, K., 2022. Synergy between the urban heat island and the urban pollution island in Mexico City during the dry season. *Aerosol and Air Quality Research* 22(8), 210278.
- Mohammad, P., Goswami, A., 2021. Quantifying diurnal and seasonal variation of surface urban heat island intensity and its associated determinants across different climatic zones over Indian cities. *GIScience & Remote Sensing* 58(7), 955–981.
- Ramly, N., Hod, R., Hassan, M. R., Arsad, F. S., Radi, M. F. M., Ismail, R., 2024. Impact of urban heat island on human health: a systematic review. *Malaysian Journal of Public Health Medicine* 24(1), 172–186.
- Talkhablou, M., Farmahinifarahani, M., Siah Mansouri, S., 2025. A python-based framework for land cover classification in engineering geology: a comparative assessment of SVM, K-means, and spectral indices. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 11(1), 201–219.
- Ullah, W., Ahmad, K., Ullah, S., Tahir, A. A., Javed, M. F., Nazir, A., Abbasi, A. M., Aziz, M., Mohamed, A., 2023. Analysis of the relationship among land surface temperature (LST), land use land cover (LULC) and normalized difference vegetation index (NDVI) with topographic elements in the lower Himalayan region. *Heliyon* 9(2), e13322.
- Yaghobi, S., Heidarizadi, Z., Mirzapour, H., 2019. Comparing NDVI and RVI for forest density estimation and their relationships with rainfall (case study: Malekshahi, Ilam Province). *Environmental Resources Research* 7(2), 117–128.
- Yazdly, M. T., Hosseini, S. M., Khoramabadi, F., Mohtaram, M., 2023. Monthly changes of night heat islands in Isfahan County using MODIS multi-temporal products. *Environmental Sciences* 21(4), 41–60.

CRediT authorship contribution statement

 Mina Jireh Nezhadian	Writing - Original Draft, Formal analysis Conceptualization, Methodology Investigation
 Meisam Rastegari Mehr	Writing - Review & Editing Project administration Resources Supervision
 Ata Shakeri	Writing - Review & Editing Supervision



مقاله پژوهشی

دسترسی آزاد

مجله علوم زمین خوارزمی

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

مطالعه تغییرات فصلی جزایر حرارتی در شهرستان اصفهان با استفاده از پردازش تصاویر سنجنده‌های MODIS و TIRS

مینا جیره نژادیان^۱، میثم رستگاری مهر^{۲*}، عطا شاکری^۳

۱، ۲، ۳. گروه آموزشی ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله	پدیده جزیره گرمایی شهری (Urban Heat Island - UHI) به‌عنوان یکی از اثرات مهم توسعه شهرنشینی و صنعتی شدن، موجب افزایش دمای سطح زمین در نواحی شهری نسبت به مناطق پیرامون می‌شود. این مطالعه به بررسی تغییرات فصلی دمای سطح زمین (Land Surface Temperature - LST) و شدت جزیره گرمایی سطحی شهری (Surface Urban Heat Island - SUHI) در شهرستان اصفهان با استفاده از داده‌های سنجنده‌های MODIS و TIRS می‌پردازد. تصاویر ماهواره‌ای برای بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ در محیط Google Earth Engine (GEE) فراخوانی و پردازش شدند. سه روش مختلف مبتنی بر اختلاف دمای مناطق شهری با مناطق روستایی، کشاورزی و پهنه‌های آبی برای محاسبه شدت SUHI به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که شدت جزیره گرمایی در طول شب بالاتر است، در حالی که در طول روز پدیده «جزیره خنک شهری» مشاهده می‌شود. این موضوع نقش مهم خاک‌های عریان و باتلاق‌ها را در ایجاد وارونگی جزیره حرارتی نشان می‌دهند. پوشش گیاهی، ضریب بازتاب (سپیدایی) و ارتفاع از مهم‌ترین متغیرهای بیوفیزیکی مؤثر بر دمای سطح زمین شناخته شدند و روابط همبستگی معناداری بین آن‌ها با LST یافت شد. بیشترین مقدار پوشش گیاهی در ماه‌های بهار مشاهده می‌شود که از طریق اثرات تبخیر و تعرق به کاهش دما می‌انجامد. همچنین، افزایش ضریب بازتاب باعث کاهش جذب گرمای سطح زمین می‌شود. یافته‌ها بیانگر نقش برجسته تعاملات حرارتی میان مناطق شهری، روستایی و آبی در شکل‌گیری SUHI و اهمیت مدیریت پوشش گیاهی و به‌کارگیری مصالح با سپیدایی بالا برای کاهش اثرات منفی این پدیده است. در شهرهای نیمه‌خشک مانند اصفهان، پدیده جزیره حرارتی شهری ممکن است در طول روز به شکل جزیره خنک و در شب به‌صورت جزیره حرارتی مشاهده شود. بنابراین، برای مدل‌سازی دقیق این پدیده، ضروری است داده‌های سنجنش‌آزاد در روز و هم در شب جمع‌آوری شده و شاخص‌های مرتبط با دقتی ویژه موردتوجه قرار گیرند.
واژه‌های کلیدی:	جزیره حرارتی شهری سطحی، جزیره خنک شهری سطحی، متغیرهای بیوفیزیکی، شهرستان اصفهان، سنجنش از دور.
دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰	
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷	



مقدمه

این اختلاف دما بین مناطق شهری و حومه، جزیره گرمایی شهری (UHI) گفته می‌شود (Ramly et al., 2024). این پدیده زمانی رخ می‌دهد که مناطق شهری دمای بالاتری نسبت به نواحی روستایی مجاور خود داشته باشند و عمدتاً نتیجه رشد سریع شهرنشینی و تغییر کاربری پوشش زمین است (Mendez-Astudillo et al., 2022). جزیره گرمایی شهری یک مخاطره محیطی نوظهور است که توسعه و گسترش شهرنشینی، عامل اصلی شکل‌گیری آن محسوب

توسعه شهرنشینی و صنعتی‌شدن، منجر به تخریب محیط‌زیست شهری شده است. گسترش بی‌رویه شهرها، تعادل آب‌وهوایی و حرارتی آن‌ها را تغییر داده و موجب افزایش دمای هوا در مقایسه با مناطق کم‌جمعیت پیرامون شده است. منبع‌های گرمایی ناشی از فعالیت‌های انسانی، مانند دستگاه‌های تهویه مطبوع و فرآیندهای احتراقی، به‌ویژه در مناطق شهری، بر این افزایش دما می‌افزایند. به

DOI <https://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.104842>*نویسنده مسئول: میثم رستگاری مهر rastegar.m@khu.ac.ir

استناد به این مقاله: جیره نژادیان، م.، رستگاری مهر، م.، شاکری، ع. (۱۴۰۴). مطالعه تغییرات فصلی جزایر حرارتی در شهرستان اصفهان با استفاده از پردازش تصاویر سنجنده‌های MODIS و TIRS. *مجله علوم زمین خوارزمی*. جلد ۱۱، شماره ۲، صفحه ۴۶۱ تا ۴۸۷. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.104842>



فصل‌های سال و زمان‌های مختلف شبانه‌روز نیز می‌توانند بر شدت و الگوی این پدیده‌ها تأثیرگذار باشند.

شوارز و همکاران (Schwarz et al., 2011) با استفاده از داده‌های MODIS و شاخص‌های مختلف، به بررسی UHI در ۲۶۳ شهر اروپایی پرداختند و دریافتند که تفکیک شهرها بر اساس مناطق آب و هوایی مختلف، موجب افزایش همبستگی با شاخص‌های انتخاب‌شده می‌شود. همچنین، لازارینی و همکاران (Lazzarini et al., 2013) پدیده SUHI را در ابوظبی، به‌عنوان یک شهر بیابانی، مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که در طول روز، وارونگی الگوی معمول SUHI باعث می‌شود مناطق مرکز شهر نسبت به حومه‌ها خنک‌تر به نظر برسند. در مطالعه‌ای دیگر، هاشمی و همکاران (Haashemi et al., 2016) نشان دادند که در شهرهای نیمه‌خشک مانند تهران، پدیده SUHI بسته به شاخص‌های مورد استفاده و زمان شبانه‌روز متغیر است و گاهی در طول روز به‌جای جزیره گرمایی شهری، پدیده «جزیره سرمای سطحی شهری» مشاهده می‌شود. هان و همکاران (Han et al., 2023) در مطالعه‌ای بر شهر نیمه‌خشک شیآن چین، با ادغام داده‌های Landsat و MODIS نشان دادند که شدت جزیره حرارتی شهری (SUHI) در مناطق با ساختار فشرده، به‌طور معناداری بیشتر از مناطق با ساختار باز است. همچنین تأیید کردند که وجود پوشش گیاهی متراکم در مناطق شهری با ساختار باز، به‌عنوان یک عامل تعدیل‌کننده کلیدی عمل کرده و باعث کاهش چشمگیر شدت SUHI می‌شود. این مطالعه بر اهمیت ویژگی‌های کالبدی شهری و مدیریت پوشش سبز به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش اثرات جزایر حرارتی صحه می‌گذارد.

تشکیل جزایر حرارتی تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت محیط‌زیست شهرستان‌ها دارد. شهرستان اصفهان به دلیل صنعتی شدن، جذب مهاجرین و افزایش فعالیت‌های آلاینده، به‌ویژه با توجه به شرایط گرم و خشک کشور، از این موضوع مستثنا نیست. همچنین خشک‌سالی‌های اخیر، خشک شدن زاینده‌رود، افزایش اراضی بایر و

می‌شود. سطوح شهری به دلیل ظرفیت حرارتی بالا، گرمای جذب‌شده در طول روز را به‌تدریج در شب آزاد می‌کنند و باعث حفظ دمای سطحی بالا تا ساعاتی از شب می‌شوند. این فرآیند، وقوع و تشدید جزیره حرارتی را حتی در شب‌ها تداوم می‌بخشد. همچنین، شدت و تکرار این پدیده در فصول تابستان و زمستان بیشتر مشاهده می‌شود (Yazdly et al., 2023). پیامدهای این پدیده برای محیط‌زیست و سلامت انسان ملموس و گسترده است. افزایش مصرف انرژی، تشدید آلودگی هوا و کاهش کیفیت منابع آب، بخشی از چالش‌های زیست‌محیطی مرتبط با آن هستند. علاوه بر این، جزیره گرمایی شهری می‌تواند مستقیماً سلامت ساکنان را نیز تهدید کند (Ramly et al., 2024).

سنجش‌ازدور حرارتی یکی از کارآمدترین روش‌ها برای بررسی پدیده جزایر حرارتی است. داده‌های حاصل از این روش امکان تخمین دقیق دمای سطح زمین (LST) را فراهم می‌کنند و از این‌رو، نقشی کلیدی در مطالعه و ارزیابی این پدیده ایفا می‌کنند. در این راستا، تصاویر ماهواره‌ای دارای باندهای حرارتی مانند لندست (LANDSAT)، استر (ASTER) و مادیس (MODIS) به‌طور گسترده برای اندازه‌گیری و تحلیل جزایر گرمایی شهری به‌کار می‌روند. (Abedini et al., 2022).

رایج‌ترین روش برای تحلیل دمای سطح زمین (LST) و پدیده جزیره حرارتی شهری (SUHI)، استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور است. در این راستا، حسگرهای ماهواره‌ای متعددی برای گردآوری داده‌های مادون‌قرمز حرارتی (TIR) سطح زمین به‌کار گرفته می‌شوند و تأثیر SUHI نیز با استفاده از همین داده‌ها و در وضوح‌های گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است (Haashemi et al., 2016).

اگرچه گسترش UHIs و SUHIs عموماً به توسعه شهری و افزایش فعالیت‌های صنعتی و انسانی نسبت داده می‌شود، عوامل دیگری مانند موقعیت جغرافیایی، شرایط آب‌وهوایی، جنس مصالح شهری،

۲۰ ثانیه تا ۳۲ درجه و ۴۸ دقیقه و ۱۰ ثانیه شمالی در استان اصفهان واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع این شهرستان بین حداقل ۱۵۵۰ متر در اطراف زاینده رود و حداکثر آن ۱۶۵۰ متر در نقاط مرتفع تر در نوسان است. اصفهان با اختصاص ۴۶/۸۷ درصد از جمعیت شهری، رتبه اول را از لحاظ تراکم جمعیتی در بین شهرستان‌های استان دارد. بخش وسیعی از این منطقه را اقلیم خشک و نیمه خشک کویری در بر گرفته است و این امر بیش از همه معلول موقعیت خاص جغرافیایی، همجواری با کویر لوت، میانگین بارش سالیانه اندک و دمای سالیانه بالا است. این شهرستان از نظر وسعت مراتع درجه یک، رتبه آخر و از نظر وسعت مراتع درجه ۳ (فقیر)، رتبه اول را در بین شهرستان‌های استان دارد (Yazdly et al., 2023).

تغییر کاربری زمین‌ها، بر تشدید این وضعیت افزوده‌اند. این پدیده‌ها به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر مصرف آب و برق در روزهای گرم تأثیر گذاشته و پیامدهای قابل توجهی بر آسایش ساکنان، سلامت عمومی و کیفیت زندگی دارند. لذا پایش جزیره حرارتی سطحی شهری امری ضروری است. هدف این مطالعه، بررسی تغییرات فصلی دمای سطح زمین و جزیره حرارتی سطحی شهری و همچنین شناسایی ارتباط بین جزیره حرارتی سطحی شهری و متغیرهای بیوفیزیکی سطح شهرستان اصفهان است.

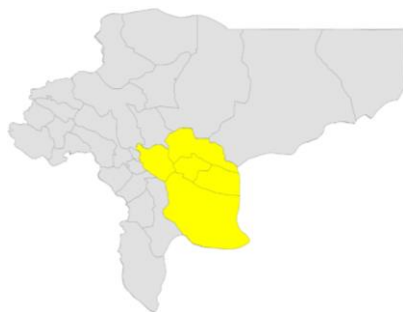
منطقه مورد مطالعه

شهرستان اصفهان با مساحت ۱۵۷۰۶ کیلومتر مربع در محدوده بین طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۰ دقیقه و ۱۵ ثانیه تا ۵۱ درجه ۴۷ دقیقه و ۱۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۰ دقیقه و

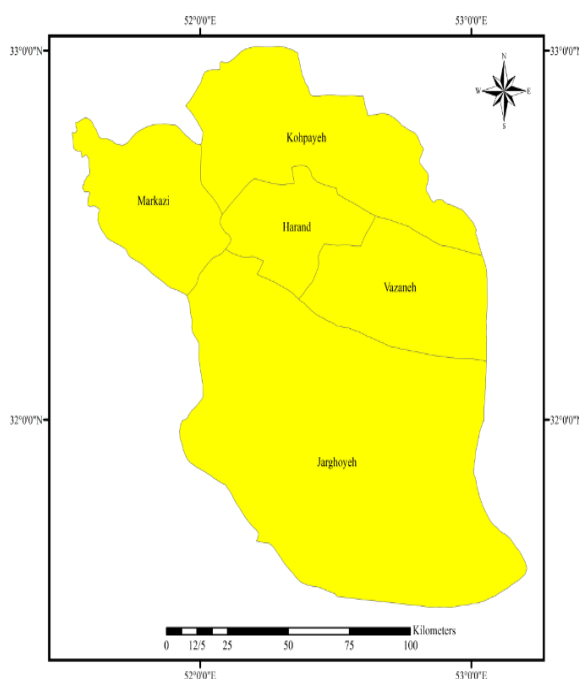
Location of Isfahan Province



Location of Isfahan County



Extent of Isfahan County



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی پهنه مورد بررسی

Fig. 1. Geographical location of the investigated area

مواد و روش‌ها

در این پژوهش با استفاده از زبان برنامه‌نویسی JavaScript در محیط برنامه Google Earth Engine (GEE)، تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS با محصول MYD11A1 V6.1 و MYD11A2 V6.1 با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و تفکیک زمانی روزانه و ۸ روزه و همچنین تصاویر تصحیح اتمسفری شده Landsat 8 Level 2, Collection 2, Tier 1 با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر فراخوانی شدند. باند دمای شبانه و روزانه سطح زمین تصاویر مودیس و همچنین باندهای ۱۰ و ۱۱ تصاویر لندست برای بازمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ میلادی، به صورت نقشه میانگین در مقیاس مکانی شهرستان اصفهان جهت پایش جزایر حرارتی در محدوده زمانی تعریف شده مورد بررسی قرار گرفت. برای هر یک از محصولات یک تابع خام تعریف شد. داده‌ها شامل مجموعه‌ای از تصاویر ماهواره‌ای با یک‌زمان شروع و یک‌زمان پایان هستند که به عنوان ورودی تابع انتخاب شدند. خروجی نیز به صورت مجموعه‌ای از تصاویر فراخوانی شده در فیلتر زمانی (سال بازه مطالعاتی) و مکانی (مرز شهرستان) اجرا شد. هر تابع نیز بر روی باند ویژه مرتبط با مجموعه تصاویر مدنظر اعمال گردید. سپس نقشه مکانی میانگین در دوره زمانی مورد بررسی در محیط نرم‌افزار GIS، نمودارها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و در نهایت بررسی همبستگی پیرسون در محیط EXCEL مورد تحلیل قرار گرفت.

تحلیل جزایر حرارتی شهری سطحی (SUHI)

میانگین روزانه LST مادیس با رزولوشن ۱ کیلومتر از داده‌های شبانه بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ به مقادیر ماهانه تبدیل شد. همچنین LST به دست آمده از ماهواره Landsat-8 TIRS به صورت ماهانه و با همگام‌سازی زمانی با داده‌های مادیس، میانگین‌گیری شد. سه شاخص جزیره گرمایی شهری برای ارزیابی شدت SUHI در روز، شب و تغییرات فصلی به کار گرفته شد. روش اختلاف دمای میانگین بین مناطق شهری و روستایی پیشنهادی توسط (Mohammad and

Goswami, 2021) (معادله ۱) برای شناسایی تغییرات SUHI

تطبیق داده شد. علاوه بر این، روش اختلاف بین مناطق شهری و کشاورزی (معادله ۲) و روش اختلاف بین مناطق شهری و پهنه‌های آبی (معادله ۳) نیز به منظور مقایسه، اقتباس شدند (Haashemi et al., 2016).

$$SUHI1 = LST_{urban} - LST_{rural} \quad (1)$$

$$SUHI2 = LST_{urban} - LST_{agriculture} \quad (2)$$

$$SUHI3 = LST_{urban} - LST_{water} \quad (3)$$

LST_{urban} نشان‌دهنده دمای سطح زمین پیکسل‌های واقع در نواحی شهری و LST_{rural} میانگین دمای سطح زمین پیکسل‌های نواحی روستایی در منطقه حائل است. اثر گرمایش مثبت SUHI با مقدار مثبت SUHI نشان داده می‌شود، درحالی‌که مقدار منفی SUHI بیانگر اثر خنک‌کنندگی SUHI است (Mohammad and Goswami, 2021). همچنین، LST_{water} و LST_{agriculture} به ترتیب میانگین دمای ماهانه مناطق کشاورزی و پهنه‌های آبی را نشان می‌دهند.

این رویکرد تطبیقی مبتنی بر این مبناست که هر شاخص، بسته به ویژگی‌های حرارتی متفاوت کاربری اراضی مرجع، بُعد خاصی از پدیده SUHI را آشکار می‌سازد. شاخص کلاسیک SUHI1 امکان مقایسه گسترده با داده‌های موجود را فراهم می‌کند (Zhou et al., 2025). شاخص SUHI2 با در نظر گرفتن اراضی کشاورزی به عنوان پیرامون متداول بسیاری از شهرها، تأثیر تعدیل‌کنندگی فعالیت‌های کشاورزی مدیریت شده را منعکس می‌نماید (Chen et al., 2014). در نهایت، شاخص SUHI3 با استفاده از پیکره‌های آبی به عنوان مرجع با پایداری حرارتی بالا، حداکثر پتانسیل اختلاف دما را اندازه‌گیری کرده و معیاری فیزیکی و کم‌نوسان ارائه می‌دهد (Zhao et al., 2014). استفاده ترکیبی از این شاخص‌ها، نه تنها با ارائه طیفی از مقادیر SUHI، درک کامل‌تری از گرادیان حرارتی فضایی ایجاد

شاخص NDVI یک شاخص برای مشخص کردن مناطق با پوشش گیاهی است. این شاخص با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (۴)$$

که در آن NDVI شاخص پوشش گیاهی پیکسل موردنظر، NIR ضریب بازتابش پیکسل موردنظر در باند مادون قرمز نزدیک و R ضریب بازتابش پیکسل موردنظر در باند قرمز است (Yaghobi et al., 2019; Talkhablou et al., 2025).

شاخص FVC از شاخص NDVI به صورت زیر (معادله ۵) محاسبه شد.

$$FVC = [(NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s)] \quad (۵)$$

NDVI، مقدار NDVI هر نقطه یا پیکسل؛ NDVI_s مقدار NDVI مربوط به مناطق بدون پوشش گیاهی (حداقل NDVI)؛ NDVI_v مقدار NDVI مربوط به مناطق با پوشش گیاهی کامل یا بسیار متراکم (حداکثر NDVI) است (Feyzi Zadeh and Gholamina, 2016).

برای مقایسه بهتر تصاویر، مقادیر LST در هر تصویر بر اساس حداقل و حداکثر مقادیر شناسایی شده، مقیاس بندی گردید. سپس این مقادیر برای محاسبه NLST با استفاده از معادله (۶) به کار گرفته شدند:

$$NLST = (LST - LST_{min}) / (LST_{max} - LST_{min}) \quad (۶)$$

NLST نمایانگر دمای سطح زمین نرمال شده، LST دمای سطح زمین مربوط به هر پیکسل مشخص، LST_{min} حداقل مقدار و LST_{max} حداکثر مقدار دمای سطح زمین در یک تصویر است (Haashemi et al., 2016). همبستگی منفی بین NDVI یا FVC و LST در مطالعات پیشین یافت شده است (Alshehri et al., 2023; Guha et al., 2018; Roy and Bari, 2022; Ullah et al., 2023). آخرین ویژگی بیوفیزیکی موردبررسی، ضریب بازتاب

می‌کند، بلکه با ایجاد امکان مقایسه درونی نتایج، اعتبار تحلیل را افزایش داده و بینش عملیاتی هدفمندی برای سیاست‌گذاری‌های خنک‌سازی شهری بر اساس انواع مختلف کاربری اراضی فراهم می‌آورد (Clinton and Gong, 2013).

استخراج متغیرهای بیوفیزیکی سطح

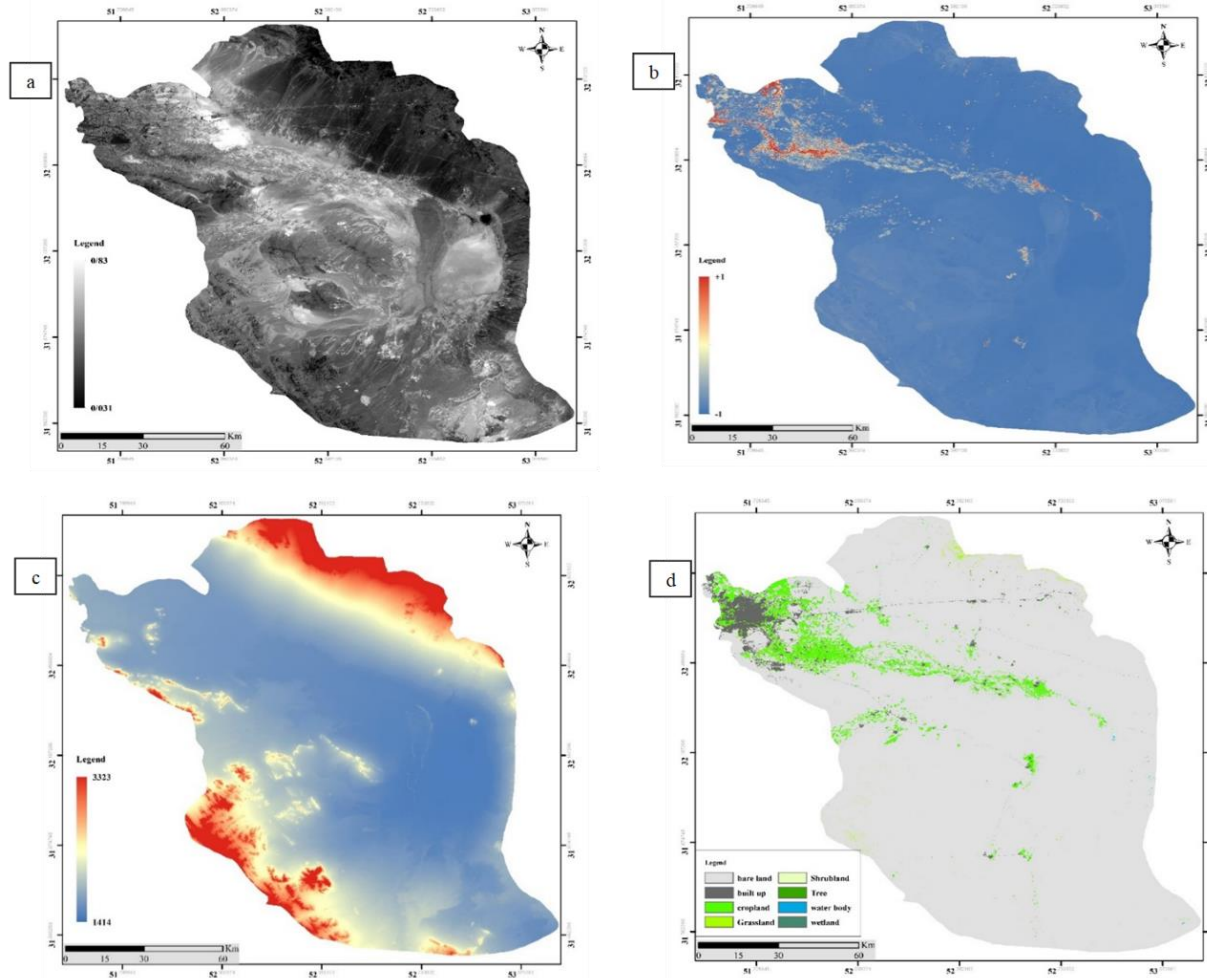
انواع پوشش زمین با استفاده از نقشه کاربری اراضی و عکس هوایی منطقه مطالعاتی، به کلاس‌های مناطق شهری، پوشش گیاهی، خاک و آب طبقه‌بندی شدند (شکل ۲-d). نقشه WorldCover که توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) توسعه یافته است، یک نقشه کاربری و پوشش زمین با تفکیک مکانی ۱۰ متر است که برای سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ تولید شده است. این نقشه با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-1 و Sentinel-2 و به کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین تهیه شده و ۱۱ کلاس را شامل می‌شود. این نقشه به دلیل تفکیک مکانی بالا و به‌روزرسانی سالانه، ابزاری مهم برای پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین، مدیریت منابع طبیعی و مطالعات محیط‌زیستی محسوب می‌شود و به‌طور رایگان از طریق ESA قابل دریافت است. همچنین این نقشه در سامانه Google Earth Engine قابل پردازش است. میانگین دمای ماهانه بر اساس کلاس پوشش زمین محاسبه شد. علاوه بر این، برای بررسی رابطه بین LST (دمای سطح زمین) و ویژگی‌های بیوفیزیکی سطح، سه توصیفگر بیوفیزیکی و فیزیکی سطح به کار برده شد: سپیدایی سطح، NDVI (شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی) و ارتفاع (شکل ۲-a، b و c). لایه ارتفاعی SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) که توسط ناسا و آژانس ملی تصویربرداری و نقشه‌برداری ایالات متحده (NIMA) در سال 2000 تولید شد، یک مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با تفکیک مکانی ۳۰ متر (در نسخه‌های جدید) و ۹۰ متر (در نسخه‌های قدیمی‌تر) است (Farr et al., 2007). برای استخراج داده‌های ارتفاع استفاده شد (شکل ۲-d).

برای بازیابی ضریب بازتاب با استفاده از باندهای OLI، از الگوریتم TM/ETM+ و معادله (Y) بهره گرفته شد:

$$a_{\text{short}} = 0.365a_2 + 0.130a_4 + 0.373a_5 + 0.085a_6 + 0.072a_7 - 0.0018 \quad (Y)$$

که در آن a_{short} ضریب بازتاب کل موج کوتاه است، a_2 ، a_4 ، a_5 ، a_6 ، a_7 به ترتیب بازتاب طیفی باند ۲، باند ۴، باند ۵، باند ۶ و باند ۷ OLI هستند (Haashemi et al., 2016).

است. تأثیر ضریب بازتاب بر SUHI در مطالعات متعددی (Elgendy et al., 2025; Liu et al., 2024; Lopez-Cabeza et al., 2022) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که به‌کارگیری مصالح با ضریب بازتاب بالا می‌تواند میزان جذب تابش خورشیدی را کاهش داده و به‌تبع آن دمای سطح زمین (LST) را کاهش دهد. علاوه بر این، الگوریتم‌های متنوعی برای استخراج ضریب بازتاب باند پهن از طریق ترکیب باندهای مختلف ارائه شده‌اند (Käfer et al., 2020; Liang, 2001).



شکل ۲- خواص بیوفیزیکی سطح: (a) ضریب بازتاب، (b) کسر پوشش گیاهی، (c) ارتفاع، (d) پوشش زمین

Fig. 2. Surface biophysical properties: a) albedo, b) fractional vegetation cover, c) elevation, d) land cover

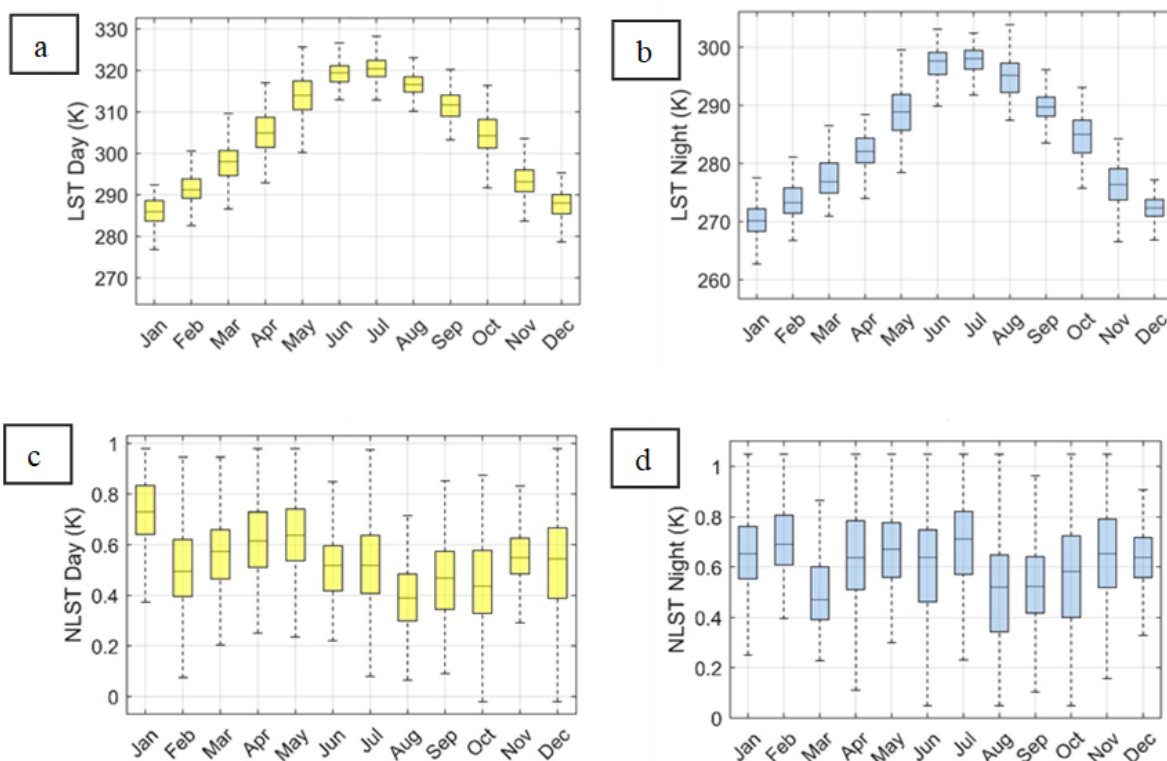
نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل LST

شکل ۳، نمودار جعبه‌ای داده‌های LST روز و شب را نشان می‌دهد؛ LST اوج دما برای هر دو حالت روز و شب در جولای و حداقل دما برای هر دو حالت روز و شب در ژانویه مشاهده شد.

NLST توزیع داده‌های دما را بین دماهای بالا و پایین نمایش می‌دهد و ابزاری مفید برای مقایسه تغییرات فضایی و زمانی اثر جزیره گرمایی شهری در ماه‌های مختلف است. این داده‌ها، نشان می‌دهد که چگونه دما در نواحی مختلف شهر در طول زمان و در فصول مختلف

تغییر می‌کند. این اطلاعات به درک بهتر تأثیر حرارتی شهرها بر محیط‌زیست و همچنین بر کیفیت زندگی ساکنان کمک می‌کند. طبق نمودار جعبه‌ای NLST (شکل ۳- c و d)، مشاهده می‌شود که در شب، مقادیر کلی NLST بالاتر از مقادیر آن در روز است. همچنین، مساحت وسیعی از پوشش ایجاد شده، به ترتیب با مقادیر کم و زیاد NLST در روز و شب هم‌راستا است. به عبارت دیگر، تغییرات NLST در طول روز و شب تأثیر زیادی بر پوشش ایجاد شده دارد.

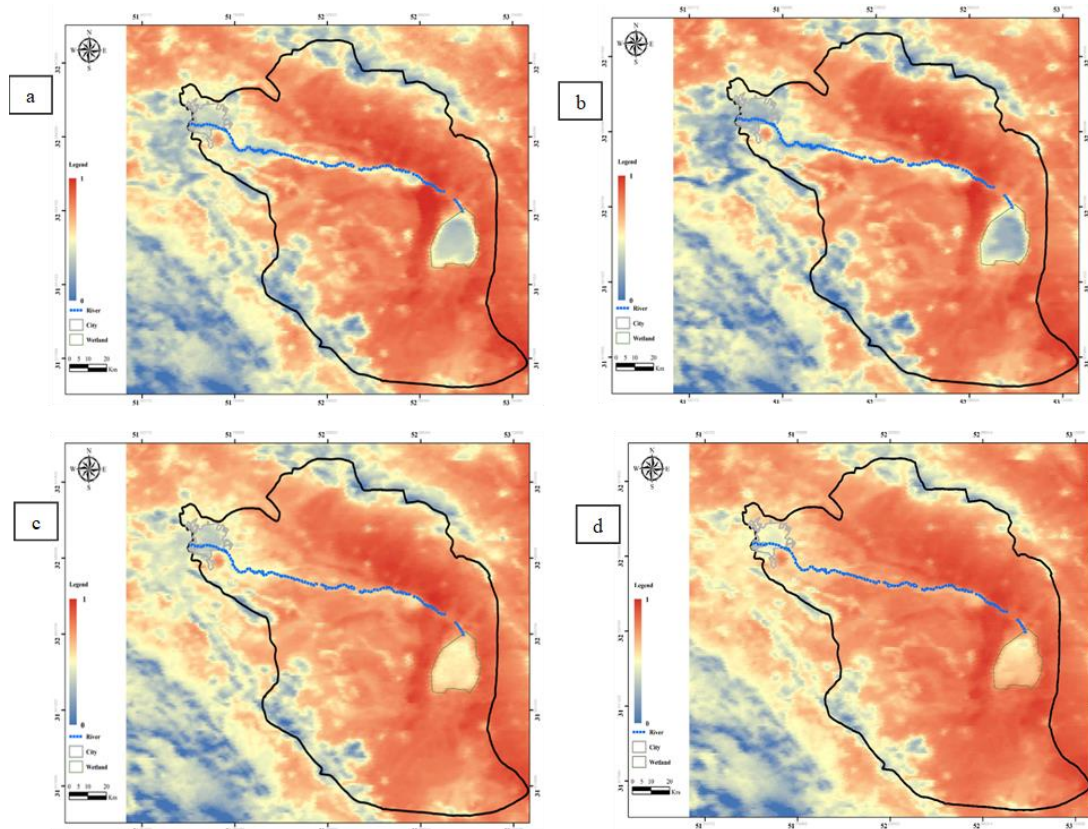


شکل ۳- نمودار جعبه‌ای داده‌های LST (دمای سطح زمین) روز و شب و داده‌های LST نرمال: (a) LST روزانه، (b) LST شبانه، (c) LST نرمال روزانه (NLST)، و (d) NLST شبانه

Fig. 3. Box plot of day and night LST and normalized LST data: a) daytime LST, b) nighttime LST, c) daytime normalized LST (NLST), and d) nighttime NLST

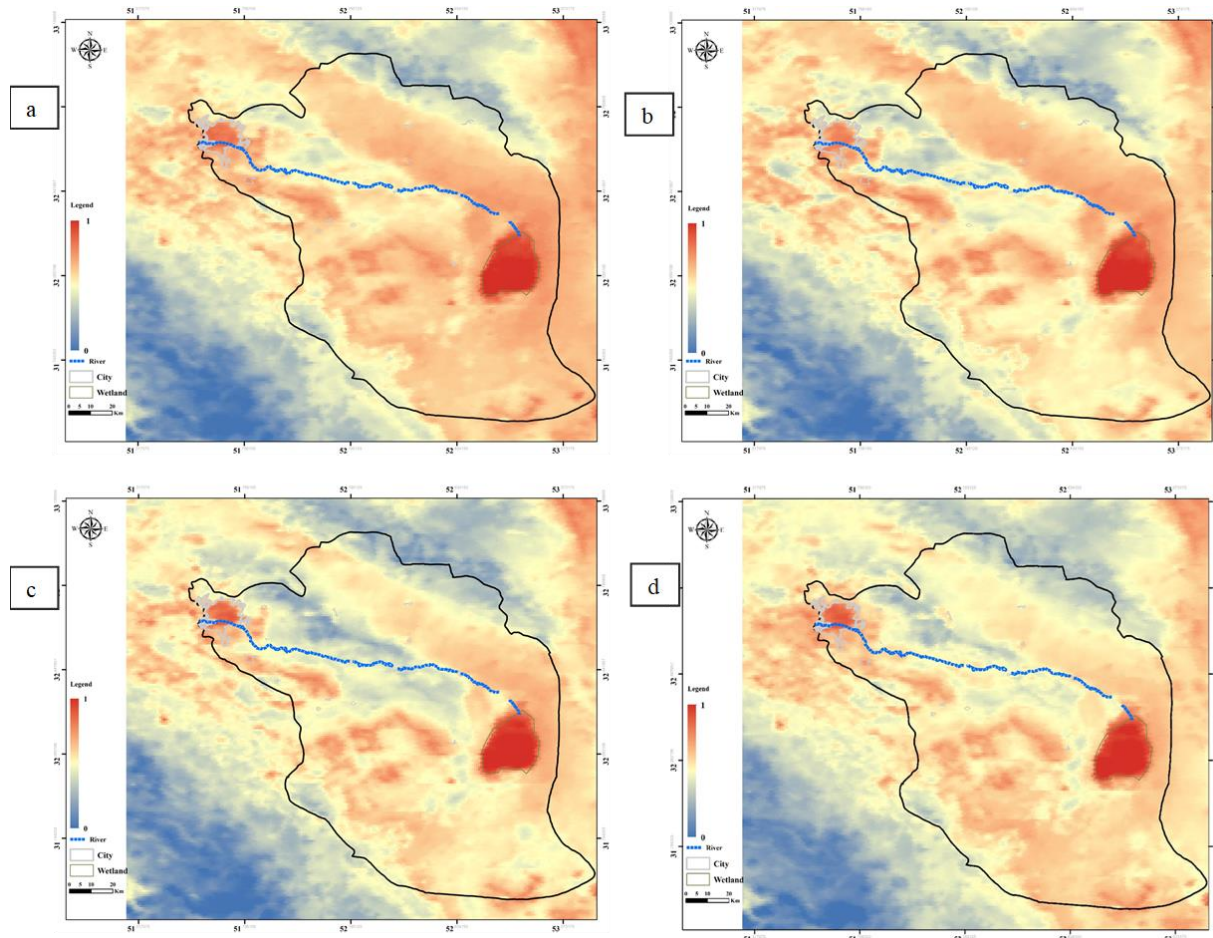
دمای پایین تر و سردتر می‌شوند. این الگوی حرارتی به دلیل تمرکز بالای ساختمان‌ها و فعالیت‌های انسانی در مرکز شهر ایجاد می‌شود که موجب ذخیره حرارت در طول روز و آزادسازی آن در طول شب می‌گردد و آب و پوشش گیاهی در طول روز گرما را جذب و در طول شب آزاد می‌کنند. همچنین، تغییرات فصلی در این الگوها نمایانگر تأثیرات شرایط جوی و تغییرات دما در طول سال است که می‌تواند موجب تغییر در الگوی فضایی دما شود.

توزیع فضایی NLST در طول روز و شب در شکل‌های ۴ و ۵ به وضوح قابل مشاهده است. شکل ۴، NLST روز بیانگر این است که مناطق شهری و باتلاق گاوخونی در فصول مختلف نسبت به نواحی اطراف خنک‌تر بوده‌اند. این تفاوت ممکن است به دلیل تأثیرات عایق‌کنندگی، موجودیت پوشش گیاهی و آب در این نواحی باشد. در طول شب، شکل ۵ نشان می‌دهد که مناطق مرکزی شهر و باتلاق گاوخونی گرم‌ترین نقاط هستند، در حالی که نواحی اطراف به‌طور کلی دارای



شکل ۴- توزیع فضایی NLST در طول روز: (a) بهار، (b) تابستان، (c) پاییز، (d) زمستان

Fig. 4. Spatial distribution of NLST in daytime: a) spring, b) summer, c) autumn, d) winter



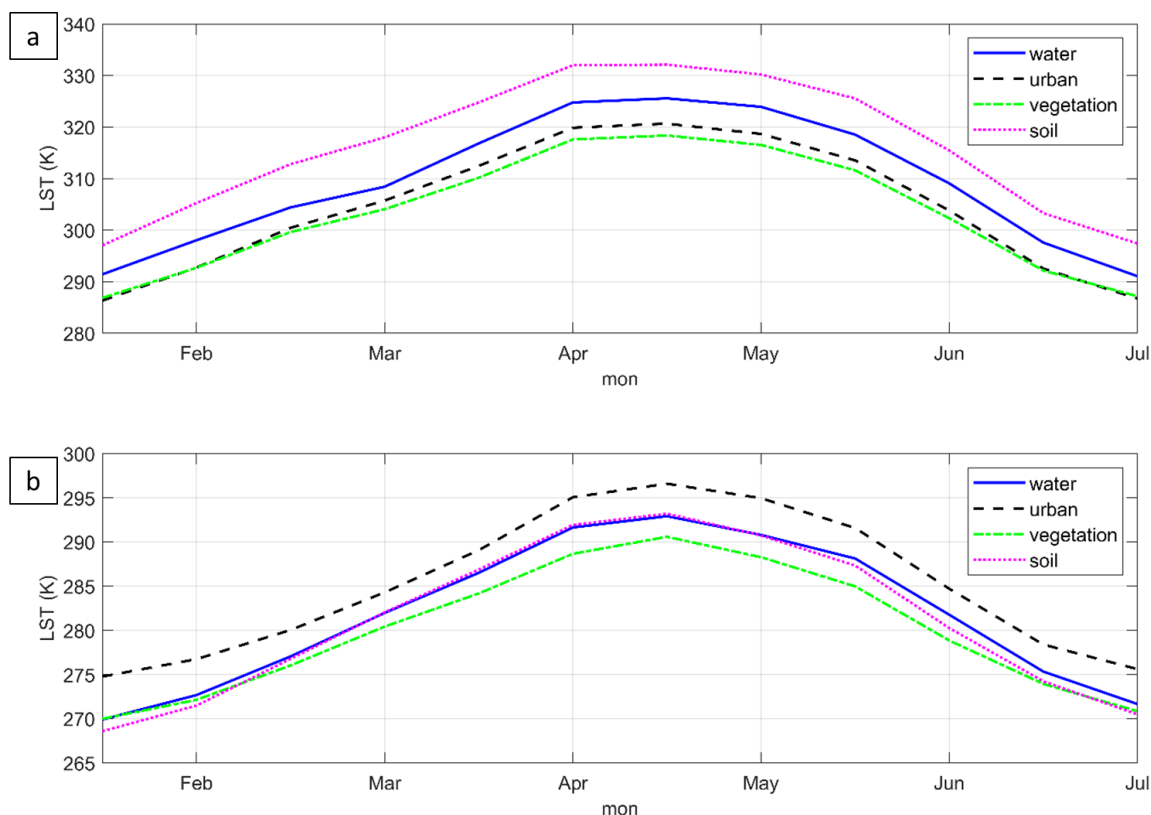
شکل ۵- توزیع فضایی NLST در شب: (a) بهار، (b) تابستان، (c) پاییز، (d) زمستان

Fig. 5. Spatial distribution of NLST at night time: a) spring, b) summer, c) autumn, d) winter

اختلاف دما بین کلاس‌های مختلف پوشش زمین قابل توجه بود. در عوض، در فصل‌های زمستان و پاییز، این تفاوت‌ها کاهش یافته و به‌طور کلی دماهای نزدیک‌تری مشاهده شد (شکل ۶-ا). در طول شب، اختلاف دما بین کلاس‌های مختلف پوشش زمین کمتر و پایدارتر بود که نشان‌دهنده تأثیر ضعیف تابش شبانه و دیگر عوامل محیطی بر روی دما هست. این نتایج می‌توانند در درک بهتر از تأثیرات تغییرات فصلی بر روی دما و رفتار پوشش زمین در مناطق مختلف کمک کنند (شکل ۶-ب).

تجزیه و تحلیل SUHI

برای هر نوع پوشش زمین، میانگین LST در طول روز و شب طی ماه‌های مختلف محاسبه گردید. شکل ۶، نمودارهای زمانی میانگین LST را بر اساس انواع پوشش زمین نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بالاترین دماها در طول روز مربوط به خاک بدون پوشش بودند. در طول شب، اما مناطق شهری و ساختمان‌ها قادر به نشان دادن بالاترین دماها بودند. تحلیل‌ها همچنین نشان داد که در طول روز، تغییرات دما با توجه به نوع پوشش زمین، در میان ماه‌ها و فصل‌های مختلف سال، تفاوت داشت. به‌ویژه در بهار و تابستان، این



شکل ۶- نمودار سالانه میانگین دمای ماهانه بر اساس پوشش زمین: (a) در طول روز و (b) شب

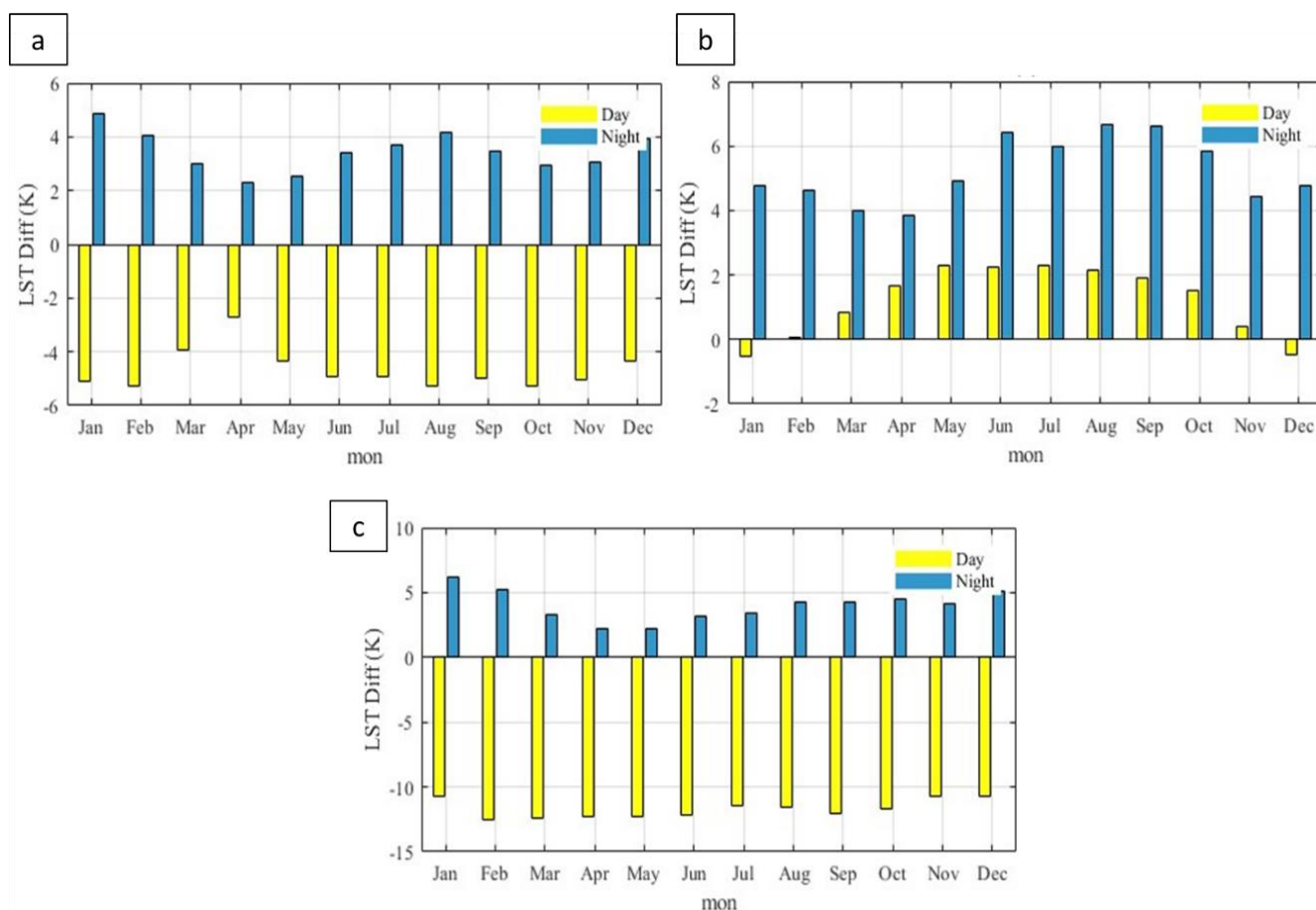
Fig. 6. Annual plot of monthly averaged temperature by land cover: a) daytime; and b) night time

مشخص است. شدت این پدیده به طور قابل توجهی در شبها بیشتر از روزها است. بیشترین اختلاف دما در شبها در ماههای تابستان و اوایل پاییز (ژوئن تا سپتامبر) رخ می‌دهد که نشان‌دهنده نقش حیاتی انتشار گرما از سطوح شهری در طول شب است. در مقابل، در طول روزها، تفاوت دما کمتر است و در ماههای زمستان (ژانویه و دسامبر)، حتی یک پدیده جزیره خنک شهری مشاهده می‌شود که در آن مناطق شهری در طول روز سردتر از مناطق کشاورزی هستند. به عنوان سومین روش مورد استفاده در این مطالعه، تحلیل اختلاف دمای سطح زمین شهری و آب (LST) نشان داد که دینامیک دمایی بین مناطق شهری و پهنه‌های آبی، یک الگوی فصلی و روزانه کاملاً متضاد دارد (شکل ۷-۲). در طول روز، مناطق شهری سردتر از پهنه‌های آبی هستند و پدیده جزیره خنک شهری به‌ویژه در ماههای

در شکل ۷، مقادیر SUHI محاسبه‌شده ارائه گردیده است. با به‌کارگیری روش اختلاف دمای سطح شهری-روستایی (شکل ۷-۲)، مناطق شهری در طول شبها به‌ویژه در فصول سرد سال گرم‌تر از مناطق روستایی هستند. این امر می‌تواند به دلیل انتشار گرمای ذخیره‌شده از ساختمان‌ها و فعالیت‌های انسانی در طول شب باشد. با این حال، در طول روز، این الگو معکوس می‌شود و یک پدیده جزیره خنک شهری مشاهده می‌شود، به طوری که مناطق شهری سردتر از مناطق روستایی هستند. این پدیده در تمام طول سال رخ می‌دهد و بیشترین شدت آن در ماههای زمستان (ژانویه و فوریه) است. شکل ۷-۲ تفاوت دمای سطح زمین بین مناطق شهری و زمین‌های کشاورزی نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که پدیده جزیره گرمایی شهری در منطقه مورد مطالعه دارای یک الگوی فصلی و روزانه

روستایی و پهنه‌های آبی نقش کلیدی در شدت و نوع این پدیده‌ها دارد. بدین ترتیب، دینامیک این جزایر حرارتی پیچیده بوده و به تغییرات محیطی و زمانی حساس است. جداول ۱ و ۲ مقادیر ماهانه شدت SUHI روز و شب را با روش‌های محاسبه مختلف نشان می‌دهند. حداکثر مقادیر ماهانه شدت SUHI با هر سه روش در روز و شب به ترتیب $۱۳/۵۳$ و $۸/۹۷$ درجه کلوین و حداقل مقادیر ماهانه شدت SUHI به ترتیب $-۱۰/۶۲$ و $۲/۸۲$ درجه کلوین بودند.

زمستان (ژانویه، فوریه و دسامبر) به حداکثر خود می‌رسد. این امر می‌تواند به دلیل اختلاف در ظرفیت گرمایی و نرخ تبخیر بین دو سطح باشد. باین‌حال، در طول شب، این الگو معکوس می‌شود و مناطق شهری گرم‌تر از پهنه‌های آبی هستند؛ بنابراین پدیده جزیره گرمایی شهری در تمام طول سال مشاهده می‌شود و بیشترین شدت آن نیز در ماه ژانویه است. یافته‌ها نشان می‌دهد که جزایر گرمایی و خنک شهری به‌طور کلی تحت تأثیر عوامل زمانی مانند ساعت‌های روز و فصل‌های سال قرار دارند و تعامل حرارتی بین مناطق شهری،



شکل ۷- شدت میانگین ماهانه جزیره گرمایی شهری سطح در شهرستان اصفهان: (a) روش تفاوت شهری-روستایی، (b) روش تفاوت شهری-کشاورزی، (c) روش تفاوت شهری-آب

Fig. 7. Monthly center intensity of surface urban heat island in Isfahan city: a) urban-rural difference method, b) urban-agricultural difference method, c) urban-water difference method

جدول ۱- مقادیر ماهانه شدت SUHI روزانه با روش‌های محاسبه مختلف (روش‌های شهری-روستایی (U-R)، شهری-کشاورزی (U-A) و شهری-آب (U-W))
 Table. 1. Monthly SUHI intensity values of daytime with different calculation methods (urban-rural (U-R)), urban-agriculture (U-A) and urban-water (U-W) approaches

SUHI Method	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
U-R Difference	-8.33	-9.20	-9.36	-9.95	-10.08	-10.62	-9.57	-9.61	-9.80	-9.38	-7.88	-8.99
U-A Difference	-5.02	-4.37	-1.65	1.65	4.41	3.03	2.19	3.46	2.18	-1.41	-3.43	-4.92
U-W Difference	5.82	6.61	8.22	10.81	13.22	13.24	13.53	12.41	7.65	4.65	2.30	1.306

جدول ۲- مقادیر ماهانه شدت SUHI در شب با روش‌های مختلف محاسبه

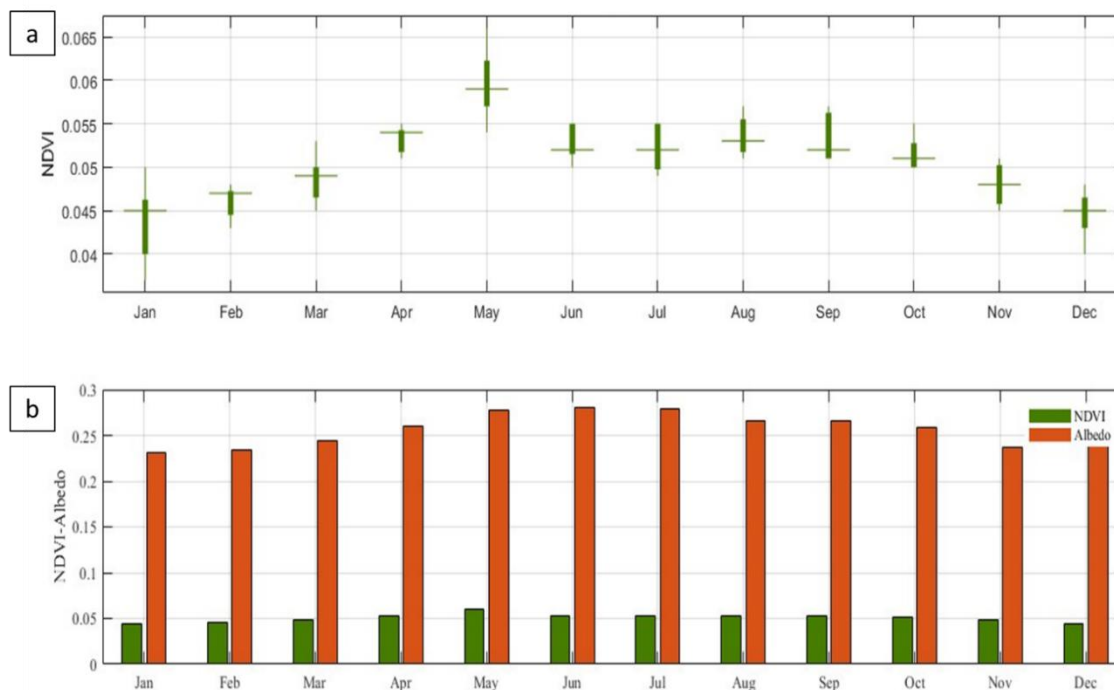
Table. 2. Monthly SUHI intensity values of nighttime with different calculation methods

SUHI Method	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
U-R Difference	6.07	4.82	3.48	2.82	2.96	3.95	4.89	5.32	4.705	4.387	3.767	5.16
U-A Difference	4.17	4.17	3.92	3.75	4.52	5.95	5.44	6.25	6.52	5.50	3.90	4.0
U-W Difference	8.97	8.05	6.29	5.48	5.25	6.31	5.84	5.60	6.40	5.38	3.61	4.99

دیگر، تغییرات سپیدایی در طول ماه‌های سال (شکل ۸-ب) نشان‌دهنده نوسانات قابل توجهی است، به گونه‌ای که بالاترین مقادیر سپیدایی در فصل تابستان مشاهده می‌شود که بازتاب‌دهنده تابش مستقیم و شدید نور خورشید بر سطوح مختلف است. این در حالی است که در فصل زمستان و پاییز، مقدار سپیدایی کاهش می‌یابد که می‌تواند به دلیل کاهش تابش خورشیدی و پوشش برف دار در برخی مناطق باشد.

رابطه بین LST و خصوصیات سطح

میانگین شاخص NDVI و ضریب بازتاب به صورت ماهانه در طول دوره مطالعه محاسبه و تحلیل شد. نمودار جعبه‌ای NDVI در ماه‌های مختلف (شکل ۸-ا) نشان‌دهنده این است که حداکثر مقدار NDVI در ماه می ثبت گردید که این امر به شرایط ایده آل رشد پوشش گیاهی در این منطقه نیمه‌خشک مربوط می‌شود. در واقع، در این ماه، شاهد بیشترین تراکم و سرسبزی گیاهی بودیم که به‌ویژه تحت تأثیر شرایط اقلیمی و بارش‌های دوره‌ای قرار دارد. از سوی



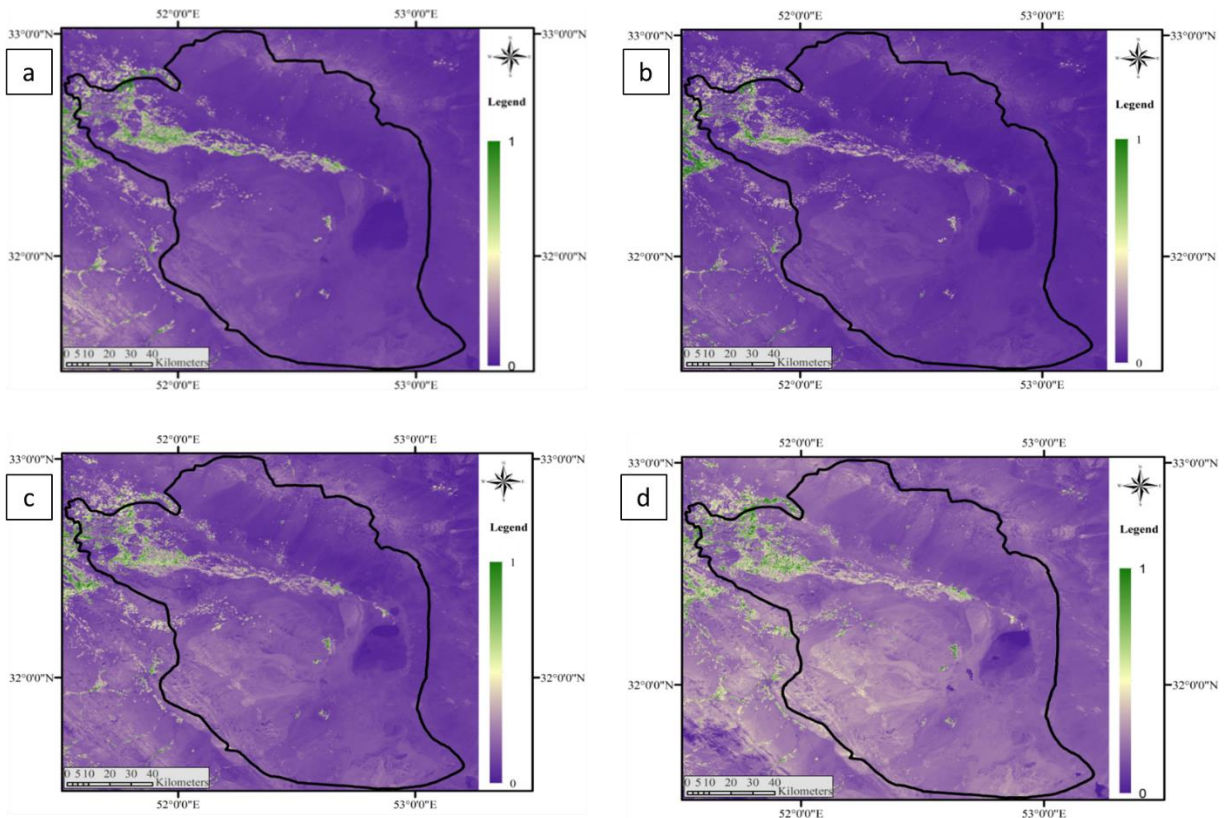
شکل ۸- (a) نمودار جعبه‌ای NDVI ماهانه، (b) نمودار میله‌ای میانگین NDVI در مقایسه با میانگین سپیدایی که از Landsat 8 OLI استخراج شده است
 Fig. 8. a) Box plot of monthly NDVI b) the bar graph of mean NDVI compared to the mean albedo retrieved from Landsat 8 OLI

مشهود است (شکل ۹). زمین‌های کشاورزی، الگوهای کشت منظم فصلی را نمی‌پیمایند و بیشتر تحت تأثیر نیازهای بازار قرار دارند. این به معنای این است که کشت و کار در این نواحی متناسب با تقاضا، به صورت متغیر و نامنظم انجام می‌شود. این عدم هماهنگی در زمان‌بندی کشت گیاهان و تنوع فنولوژیکی آن‌ها، به شکل قابل توجهی بر دینامیک‌های فضای سبز شهری تأثیر می‌گذارد. تغییرات در FVC، به نوبه خود بر توزیع فضایی LST تأثیر می‌گذارد. با تغییر در پوشش گیاهی در فصول مختلف، میزان تابش و تبادل حرارتی بین زمین و جو نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در فصولی که پوشش گیاهی ضعیف‌تر است، مانند زمستان، دماهای بالاتری به علت کاهش سایه و فقدان رطوبت ایجاد می‌شود، در حالی که در فصول پر پوشش، مانند بهار و تابستان، دما در نتیجه سایه‌افکنی و تبخیر بیشتری کاهش می‌یابد.

در شهرستان اصفهان، به دلیل شرایط خاص اقلیمی و تأثیرات انسانی، توزیع پوشش گیاهی بسیار متنوع و نامنظم است. در برخی مناطق، به دلیل وجود خاک‌های حاصلخیز و منابع آبی کافی، پوشش گیاهی مترکم و متنوع است، در حالی که در مناطق دیگر، به دلیل خشکی هوا، فقر خاک یا تأثیرات انسانی، پوشش گیاهی بسیار کم و پراکنده است. این شهر با تنوعی از درختان، شامل درختان خزان‌دار و همیشه‌سبز، ویژگی‌های منحصر به فردی را در پوشش گیاهی خود به نمایش می‌گذارد. توزیع فضایی فصلی پوشش گیاهی سبز تحت تأثیر این تنوع قرار می‌گیرد، به طوری که در فصول مختلف، ترکیب و پراکندگی پوشش گیاهی در مناطق مختلف تغییر می‌کند. به عنوان مثال، در فصل زمستان، درختان خزان‌دار به خاطر ریزش برگ‌هایشان، در مقایسه با درختان همیشه‌سبز، نواحی کم‌پوشش سبز بیشتری را ایجاد می‌کنند که به وضوح در نقشه‌های FVC

از جمله FVC، ضریب بازتاب و ارتفاع در فصول مختلف را بررسی کنیم. برای تحلیل داده‌ها از همبستگی پیرسون (پس از نرمال‌سازی) استفاده شده است که روشی مناسب برای بررسی قدرت و نوع ارتباط بین دو متغیر عددی است.

برای بررسی همبستگی بین دمای سطح زمین و خصوصیات بیوفیزیکی سطح، از LST نرمال فصلی استفاده شده است که به منظور کاهش تأثیرات غیرطبیعی و نوسانات روزانه، میانگین LST ماهانه در روز در طول دوره مطالعه محاسبه شده است. این امر به ما این امکان را می‌دهد که به‌طور جامع رابطه بین LST روزانه و متغیرهای دیگر



شکل ۹- توزیع فضایی FVC در (a) بهار، (b) تابستان، (c) پاییز، (d) زمستان

Fig. 9. Spatial distribution of FVC in a) spring, b) summer, c) autumn, d) winter

مشاهده شود و در فصل دیگر این همبستگی ضعیف‌تر شود. این پدیده می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی باشد، از جمله تغییرات دما، رطوبت، نوع پوشش گیاهی و شرایط جغرافیایی که تحت تأثیر الگوهای فصلی قرار می‌گیرند. حداکثر ضریب همبستگی مشاهده شده در بین سطح دمای روزانه (NLST) و ارتفاع در بهار (0/70-)، NLST روزانه و سپیدایی در زمستان (0/19-) و NLST روزانه با

همبستگی پیرسون مقادیر بین -1 و 1 را می‌گیرد که در آن -1 به معنی همبستگی منفی کامل، 0 به معنی عدم ارتباط و 1 به معنی همبستگی مثبت کامل است. نتایج تحلیل همبستگی در جدول 3 خلاصه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که همبستگی LST با متغیرهای ذکر شده تحت تأثیر فصل‌ها تغییر می‌کند. به این معنا که ممکن است در یک فصل خاص همبستگی قوی‌تری با یکی از متغیرها

FVC و در تابستان ($-0/50$) بوده است. در مقابل، حداقل ضریب همبستگی به ترتیب شامل NLST روزانه و FVC در زمستان ($-0/11$)، NLST روزانه و ارتفاع در تابستان ($-0/46$)، NLST روزانه و سپیدایی در تابستان ($0/03$)، است. بین FVC و LST همبستگی نشان می‌دهد که عمدتاً ناشی از اثرات خنک‌کنندگی تبخیر-تعرق، سایه‌اندازی و پویایی‌های بازتاب است. همان‌طور که توسط برخی مطالعات (Bonan, 2008; Kumar et al., 2024; Mildrexler et al., 2011; Oke, 1982; Xue et al., 2019; Zhang et al., 2017) پشتیبانی می‌شود.

همبستگی بین LST و سپیدایی در روز برای فصل‌های بهار، تابستان و پاییز مثبت و در زمستان به صورت منفی بود. در فصل تابستان، پوشش گیاهی کاهش می‌یابد و خاک‌های لخت به‌ویژه در مناطق با تابش شدید خورشید، هم‌زمان باعث افزایش سپیدایی (بازتابش نور) و دمای سطح زمین در روز می‌شوند؛ بنابراین، افزایش روشنایی و بازتاب نور از خاک‌های لخت در روز موجب افزایش هر دو سپیدایی و دمای سطح زمین می‌گردد.

تحلیل همبستگی پیرسون بین سپیدایی (Albedo) و دمای سطح زمین نرمال‌شده (NLST) در فصل تابستان نشان داد که ضریب همبستگی بسیار ضعیف و نزدیک به صفر است ($r=0/038$) و $p=0/95$. این بدان معناست که در سطح اطمینان ۹۵٪، رابطه خطی معناداری بین این دو متغیر وجود ندارد. با توجه به عدم معناداری آماری و ضعف شدید همبستگی مشاهده‌شده، می‌توان این نتیجه را ناشی از نقش غالب سایر عوامل تعدیل‌کننده در محیط پیچیده شهری دانست. در محیط پیچیده شهری، رابطه ساده و مستقیم بازتابش بالاتر و دمای پایین‌تر، تحت تأثیر عوامل غالب دیگری تضعیف می‌شود. این مشاهده با یافته‌های مطالعات پیشین در اقلیم‌شناسی شهری همسو است که دلایل آن را می‌توان در چند مکانیزم کلیدی جستجو کرد: نخست، ظرفیت گرمایی بالا و ذخیره انرژی مصالح شهری (مانند بتن و آسفالت) که موجب تداوم دمای بالا حتی در سطوح با بازتابش نسبی می‌شود (Oke et al., 2017). دوم

افزایش رطوبت جو و پوشش ابر در تابستان باعث پراکندگی و جذب بخشی از تابش خورشیدی می‌شود. این امر نه تنها تابش ورودی موثر را کاهش می‌دهد، بلکه باعث همگن‌تر شدن دمای سطح در نواحی با سپیدایی متفاوت می‌گردد. در چنین شرایطی، نقش سپیدایی در تعدیل دما تحت الشعاع قرار می‌گیرد (Arnfield, 2003). سوم، تأثیر گرمای انسان‌ساخت و تابش موج بلند که مستقل از Albedo عمل کرده و محتوای گرمایی محیط شهری را افزایش می‌دهد (Sailor, 2011). همچنین، هندسه شهری و پدیده تله‌اندازی تابش در شبکه معابر و ساختمان‌ها باعث می‌شود تابش چندین بار بازتاب شده و نهایتاً جذب شود که اثر خنک‌کنندگی Albedo را خنثی می‌سازد (Masson, 2000). در نتیجه، این ضریب همبستگی ضعیف بر ضرورت در نظرگیری تلفیقی سایر پارامترهای مؤثر از جمله پوشش گیاهی (شاخص‌هایی مانند NDVI)، ویژگی‌های توده‌گذاری شهری و منابع رطوبتی در تحلیل و مدل‌سازی جزیره حرارتی شهری تأکید می‌ورزد. در فصل بهار پوشش گیاهی سریع سبز می‌شود (شروع فصل رشد)، این کاهش در رنگ روشن زمین (برخلاف برف یا خاک خشک) باعث کاهش سپیدایی می‌شود و پوشش گیاهی از طریق فرآیند تبخیر و تعرق باعث کاهش دمای سطح زمین می‌شوند. همچنین در فصل پاییز، کاهش برگ‌های درختان برگ‌ریز (که باعث کاهش سطح برگ و تغییر مقدار فتوسنتز و تبادل انرژی می‌شود) می‌تواند بر تغییر سپیدایی و دما اثرگذار باشد و این موضوع به افزایش آلبیدو از طریق سطح خاک و سایر پوشش‌ها منجر شود که شاخص همبستگی مثبت را توضیح می‌دهد (Ebrahimi et al., 2023; Haashemi et al., 2021; Zheng et al., 2021; Kibler et al., 2016).

در حالی که سپیدایی یک عامل غالب است، متغیرهای دیگری مانند پوشش ابر و زاویه خورشید نیز بر رابطه بین سپیدایی و LST تأثیر می‌گذارند. در فصل زمستان، زوایای کم خورشیدی شدت تابش خورشیدی ورودی را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود که اثر سپیدایی بارزتر شود. پوشش ابری می‌تواند قدرت رابطه albedo-LST را

خنک‌سازی آدیاباتیک ناشی از انبساط هوا با صعود آن، کاهش چگالی هوا در ارتفاعات بالاتر، نزدیکی به سطح گرم شده زمین که بیشتر گرمای جو پایین را فراهم می‌کند، آزادسازی گرمای نهان در توده‌های هوای مرطوب که خنک‌سازی را تعدیل می‌کند اما معکوس نمی‌کند و ساختار تروپوسفر که گرادیان دمای ثابتی را حفظ می‌کند (Ahrens and Henson, 2022; Barry and Chorley, 2009; Holton and Hakim, 2013; Salby, 2012; Ullah et al., 2023; Wallace and Hobbs, 2006).

تعدیل کند. باین‌حال، در شرایط آسمان صاف، همبستگی منفی بین سپیدایی و LST به دلیل تأثیر مستقیم بازتاب سطح بر جذب انرژی قوی باقی می‌ماند (Chen et al., 2014).

در طول زمستان، تسلط سطوح با سپیدایی بالا (برف و یخ) گرم شدن سطح را سرکوب می‌کند و منجر به یک همبستگی منفی واضح بین سپیدایی و LST می‌شود (Zheng et al., 2021). در مورد ارتباط بین دما و ارتفاع، یک همبستگی منفی قابل توجه مشاهده شد. همبستگی منفی بین دما و ارتفاع به دلیل موارد زیر ایجاد می‌شود:

جدول ۳- ضرایب همبستگی پیرسون بین NLST و FVC، سپیدایی و ارتفاع در فصول مختلف سال

Table 3. Pearson correlation coefficients between NLST (day) and FVC, albedo and elevation in different seasons of the year

	Winter	Spring	Summer	Autumn
FVC	-0.11	-0.36	-0.50	-0.40
Albedo	-0.194	0.160	0.0038	0.048
Elevation	-0.58	-0.70	-0.46	-0.47

گرمایی و تابش میان مناطق شهری و زمین‌های روستایی یا آبی است.

تحلیل داده‌ها نشان داد که پوشش گیاهی، ضریب بازتاب و ارتفاع نقش کلیدی در کنترل دمای سطح زمین دارند. افزایش پوشش گیاهی با شاخص‌های NDVI و FVC بالا منجر به کاهش دما می‌شود که این اثرات از طریق تبخیر و تعرق، سایه‌افکنی و افزایش بازتاب تابش خورشیدی تحقق می‌یابد. همچنین، ضریب بازتاب نقش مهمی در کاهش جذب حرارت دارد، به طوری که استفاده از مصالح با بازتاب بالا می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش شدت SUHI باشد. ارتباط منفی قابل توجه بین دما و ارتفاع نیز نشان‌دهنده تأثیر ساختار توپوگرافی و فرآیندهای جوی مانند خنک‌سازی آدیاباتیک است.

این تحقیق با محدودیت‌هایی همراه بوده است که از جمله می‌توان به تأثیر پوشش ابر بر کیفیت داده‌های LST، وضوح مکانی یک کیلومتری داده‌های MODIS و عدم در نظرگیری وزن مساحت پیکسل‌ها در محاسبه میانگین دمای هر کلاس کاربری اشاره کرد. استفاده از میانگین ساده (به جای میانگین وزنی با توجه به مساحت

نتیجه‌گیری

این تحقیق به‌طور جامع تغییرات فصلی دمای سطح زمین و پدیده جزیره گرمایی سطحی شهری در شهرستان اصفهان را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای MODIS و Landsat 8 مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که شدت SUHI به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر زمان (ساعت شبانه -روز) و فصل‌های سال قرار دارد و فعالیت‌های انسانی و ساختار کالبدی شهر، به‌خصوص در طول شب، باعث افزایش دمای مناطق شهری می‌شوند. در طول شب به‌ویژه در فصول سرد، اختلاف دمای سطح زمین بین مناطق شهری و پیرامونی به اوج خود می‌رسد که ناشی از آزادسازی تدریجی حرارت ذخیره‌شده در ساختمان‌ها و سطح زمین است. این موضوع اثرات منفی قابل توجهی بر مصرف انرژی و سلامت انسان دارد و نشان‌دهنده ضرورت مدیریت بهینه انرژی و مقاوم‌سازی شهر در برابر گرمایش است. در مقابل، در ساعات روز و به‌ویژه در زمستان، پدیده جزیره خنک شهری به‌وضوح مشاهده می‌شود که ناشی از تفاوت ظرفیت

کمک کند. توسعه فضای سبز عمودی و ایجاد سایه بان‌های طبیعی در مراکز پرتردد شهری نیز از جمله راهکارهای مؤثر در کاهش دمای محلی است.

در نهایت، یافته‌های این مطالعه تأکید می‌کنند که پدیده SUHI در شهرستان اصفهان تحت تأثیر نیروهای متنوعی شامل الگوهای اقلیمی، ویژگی‌های کالبدی، پوشش زمین و فعالیت‌های انسانی است. تلفیق این عوامل باید در برنامه‌ریزی شهری و طراحی فضای سبز، مقاومت‌سازی زیرساخت‌های شهری و سیاست‌گذاری‌های مدیریت شهری مدنظر قرار گیرد تا کاهش اثرات مخرب گرمایش محیطی و بهبود کیفیت زندگی شهروندان تحقق یابد. نتایج همچنین بر اهمیت پایش مستمر دمای سطح زمین با بهره‌گیری از فناوری‌های سنجش‌ازدور و داده‌های ماهواره‌ای با تفکیک بالا جهت شناسایی دقیق‌تر نواحی آسیب‌پذیر و زمان‌هایی که شدت UHI بیشتر است، تأکید می‌کند.

References

- Abedini, M., Qale, A., Aghazadeh, N., Mohammadzadeh Shihgaran, M., 2022. Monitoring the surface temperature of the earth and investigating the relationship between land use and surface temperature using OLI and TM sensor images (case study: Meshginshahr city). *Applied Research of Geographical Sciences* 22(67), 375–393. (in Persian)
- Ahrens, C. D., Henson, R., 2022. *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*, 13th ed. Cengage Learning, 736 pp.
- Alshehri, F., Abuamrah, B. A., Abd El-Hamid, H. T., 2023. Impact of land use dynamics on land surface temperature using optical remote sensing data integrated with statistical analysis in Riyadh, Saudi Arabia. *Advances in Space Research* 72(5), 1739–1750.
- Arnfield, A. J., 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology* 23(1), 1–26.
- Barry, R. G., Chorley, R. J., 2009. *Atmosphere, Weather and Climate*, 9th ed. Routledge, London & New York, 532 pp.

اگرچه برای مقایسه‌پذیری با مطالعات پیشین مناسب است، ولی در مناطقی با پراکندگی ناهمگون پیکسل‌ها ممکن است دقت نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، داده‌های مورد استفاده قادر به رفع کامل تأثیرات اتمسفری و تغییرات سریع پوشش ابر نبوده‌اند. علاوه بر این، ضریب همبستگی ناچیز بین سپیدایی و NLST در فصل تابستان (۰/۰۰۳۸) نشان‌دهنده تأثیر غالب سایر عوامل مانند رطوبت خاک، پوشش ابر و گرمای انسان‌ساخت در این فصل است که می‌تواند اثر خنک‌کنندگی سپیدایی را تحت الشعاع قرار دهد.

با توجه به یافته‌ها، پیشنهاد می‌شود در برنامه‌ریزی شهری اصفهان از گونه‌های گیاهی مقاوم به خشکی و با نیاز آبی کم (مانند افاقیا، سرو نقره‌ای و زیتون تلخ) برای افزایش پوشش سبز و تقلیل اثرات حرارتی استفاده شود. همچنین، به‌کارگیری مصالح با آلبدو بالا (مانند سطوح روشن، پوشش‌های بازتابنده و آسفالت‌های خنک) در سطوح معابر و بام‌ها می‌تواند به کاهش جذب گرمای خورشیدی

- Bonan, G. B., 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320(5882), 1444–1449.
- Chen, A., Yao, X. A., Sun, R., Chen, L., 2014. Effect of urban green patterns on surface urban cool islands and its seasonal variations. *Urban Forestry & Urban Greening* 13(4), 646–654.
- Clinton, N., Gong, P., 2013. MODIS detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls. *Remote Sensing of Environment* 134, 294–304.
- Ebrahimi, A., Safar zad, T., Ghobadi, G. J., 2023. Evaluation of land use changes and their effect on surface albedo and land surface temperature (case study: cities from Sari to Chalus). *Natural Geography Quarterly* 15(59), 21. (in Persian)
- Elgendy, D., Tolba, O., Kamel, T., 2025. The impact of increasing urban surface albedo on outdoor air and surface temperatures during summer in newly developed areas. *Scientific Reports* 15(1), 25165.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R. M., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S. W., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. W., Alsdorf, D.,

2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics* 45(2), RG2004.
- Feyzi Zadeh, B. D., Gholamnia, K., 2016. Estimation of land surface temperature and separate window algorithm using Landsat 8 satellite images (case study: Mahabad watershed). *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data* 25(98), 171–181. (in Persian)
- Guha, S., Govil, H., Dey, A., Gill, N., 2018. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing* 51(1), 667–678.
- Haashemi, S., Weng, Q., Darvishi, A., Alavipanah, S. K., 2016. Seasonal variations of the surface urban heat island in a semi-arid city. *Remote Sensing* 8(4), 352.
- Han, L., Lu, L., Fu, P., Ren, C., Cai, M., Li, Q., 2023. Exploring the seasonality of surface urban heat islands using enhanced land surface temperature in a semi-arid city. *Urban Climate* 49, 101455.
- Holton, J. R., Hakim, G. J., 2013. *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 5th ed. Elsevier Academic Press, Amsterdam and Boston, 532 pp.
- Käfer, P. S., da Rocha, N. S., Diaz, L. R., Kaiser, E. A., Santos, D. C., Veeck, G. P., Roberti, D. R., Rolim, S. B. A., de Oliveira, G. G., 2020. Artificial neural networks model based on remote sensing to retrieve evapotranspiration over the Brazilian Pampa. *Journal of Applied Remote Sensing* 14(3), 038504.
- Kibler, C. L., Trugman, A. T., Roberts, D. A., Still, C. J., Scott, R. L., Caylor, K. K., Stella, J. C., Singer, M. B., 2023. Evapotranspiration regulates leaf temperature and respiration in dryland vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology* 339, 109560.
- Kumar, P., Debele, S. E., Khalili, S., Halios, C. H., Sahani, J., Aghamohammadi, N., Das, M., Schreier, S., Reis, S., Roberts, F., Morawska, L., Dhimal, M., Skuhra, P. A., Yaradanova, D., Assefa, G., Pappas, N., Song, Y., Shi, Q., Owuor, P., Cerezo-Mota, A. M., 2024. Urban heat mitigation by green and blue infrastructure: drivers, effectiveness, and future needs. *Innovation* 5(2), 100588.
- Lazzarini, M., Marpu, P. R., Ghedira, H., 2013. Temperature–land cover interactions: the inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. *Remote Sensing of Environment* 130, 136–152.
- Liang, S., 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: algorithms. *Remote Sensing of Environment* 76(2), 213–238.
- Liu, Y., Chu, C., Zhang, R., Chen, S., Xu, C., Zhao, D., Ju, M., Cao, Z., 2024. Impacts of high-albedo urban surfaces on outdoor thermal environment across morphological contexts: a case of Tianjin, China. *Sustainable Cities and Society* 100, 105038.
- Lopez-Cabeza, V. P., Alzate-Gaviria, S., Diz-Mellado, E., Rivera-Gomez, C., Galan-Marin, C., 2022. Albedo influence on the microclimate and thermal comfort of courtyards under Mediterranean hot summer climate conditions. *Sustainable Cities and Society* 81, 103872.
- Masson, V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology* 94(3), 357–397.
- Mendez-Astudillo, J., Caetano, E., Pereyra-Castro, K., 2022. Synergy between the urban heat island and the urban pollution island in Mexico City during the dry season. *Aerosol and Air Quality Research* 22(8), 210278.
- Mildrexler, D. J., Zhao, M., Running, S. W., 2011. Satellite finds highest land skin temperatures on Earth. *Bulletin of the American Meteorological Society* 92(7), 855–860.
- Mohammad, P., Goswami, A., 2021. Quantifying diurnal and seasonal variation of surface urban heat island intensity and its associated determinants across different climatic zones over Indian cities. *GIScience & Remote Sensing* 58(7), 955–981.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J. A., 2017. *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Oke, T. R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108(455), 1–24.
- Ramly, N., Hod, R., Hassan, M. R., Arsad, F. S., Radi, M. F. M., Ismail, R., 2024. Impact of urban heat island on human health: a systematic review. *Malaysian Journal of Public Health Medicine* 24(1), 172–186.
- Roy, B., Bari, E., 2022. Examining the relationship between land surface temperature and landscape features using spectral indices with Google Earth Engine. *Heliyon* 8(9), e10668.
- Sailor, D. J., 2011. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology* 31(2), 189–199.

- Salby, M. L., 2012. *Physics of the Atmosphere and Climate*, 2nd ed. Cambridge University Press, 718 pp.
- Schwarz, N., Lautenbach, S., Seppelt, R., 2011. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures. *Remote Sensing of Environment* 115(12), 3175–3186.
- Talkhablou, M., Farmahinifarahani, M., Siah Mansouri, S., 2025. A python-based framework for land cover classification in engineering geology: a comparative assessment of SVM, K-means, and spectral indices. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 11(1), 201–219. (in Persian)
- Ullah, W., Ahmad, K., Ullah, S., Tahir, A. A., Javed, M. F., Nazir, A., Abbasi, A. M., Aziz, M., Mohamed, A., 2023. Analysis of the relationship among land surface temperature (LST), land use land cover (LULC) and normalized difference vegetation index (NDVI) with topographic elements in the lower Himalayan region. *Heliyon* 9(2), e13322.
- Wallace, J. M., Hobbs, P. V., 2006. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*, 2nd ed. Elsevier Academic Press, 483 pp.
- Xue, Z., Hou, G., Zhang, Z., Lyu, X., Jiang, M., Zou, Y., Shen, X., Wang, J., Liu, X., 2019. Quantifying the cooling effects of urban and peri-urban wetlands using remote sensing data. *Landscape and Urban Planning* 182, 92–100.
- Yaghobi, S., Heidarizadi, Z., Mirzapour, H., 2019. Comparing NDVI and RVI for forest density estimation and their relationships with rainfall (case study: Malekshahi, Ilam Province). *Environmental Resources Research* 7(2), 117–128. (in Persian)
- Yazdly, M. T., Hosseini, S. M., Khoramabadi, F., Mohtaram, M., 2023. Monthly changes of night heat islands in Isfahan County using MODIS multi-temporal products. *Environmental Sciences* 21(4), 41–60. (in Persian)
- Zhang, X., Li, X., Jing, Y., Fang, X., Zhang, X., Lei, B., Yu, Y., 2017. Transplacental transfer of polycyclic aromatic hydrocarbons in Shanghai, China. *Environmental Pollution* 222, 267–275.
- Zhao, L., Lee, X., Smith, R. B., Oleson, K., 2014. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature* 511(7508), 216–219.
- Zheng, L., Qi, Y., Qin, Z., Xu, X., Dong, J., 2021. Assessing albedo dynamics and its environmental controls of grasslands over the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology* 307, 108479.
- Zhou, D., Zhao, S., Zhang, L., Sun, G., Liu, Y., 2025. The footprint of urban heat island effect in China. *Scientific Reports* 5, 11160.