

Impact of Urban Characteristics on Nitrogen Dioxide Concentration and Urban Heat Island Intensity: A case study of Tehran

Taher Safarrad¹ , Mohammadreza Miandej² 

1. (Corresponding Author) Department of Geography, Faculty Humanities and Social Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

Email: tsafarrad@ut.ac.ir

2. Department of Geography, Faculty Humanities and Social Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

Email: m.miandej01@umail.umz.ac.ir

Article Info

Article type:
[Research Article](#)

Article History:

[Received:](#)

6 July 2025

[Revised:](#)

10 October 2025

[Accepted:](#)

19 November 2025

[Available online:](#)

23 December 2025

Keywords:

Nitrogen Dioxide,
Urban Heat Island,
Remote Sensing,
Tehran.

ABSTRACT

Air pollution and the Urban Heat Island (UHI) effect have become critical challenges in megacities such as Tehran, particularly as a result of rapid population growth and ongoing urban expansion. This study investigates the relationship between key urban characteristics, including built-up areas, building height, and vegetation cover, and UHI intensity as well as nitrogen dioxide (NO₂) concentration, which represents a major urban air pollutant. Data on built-up areas and building height were obtained from the Global Human Settlement Layer (GHSL), while vegetation cover was mapped using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derived from Sentinel-2 imagery. UHI intensity was assessed using nighttime MOD11A2 land surface temperature products acquired at 22:30 with a spatial resolution of 1000 m for the period 2018 to 2022, while NO₂ concentrations were retrieved from the TROPOMI sensor onboard Sentinel-5 for the period 2019 to 2024. All data processing and analysis were conducted using the Google Earth Engine platform, with Pearson correlation analysis applied to examine the relationships among variables. The findings reveal significant positive correlations between both built-up areas and building height and NO₂ concentration ($R^2 = 0.45$ and 0.18 , respectively), indicating that urban growth substantially contributes to increased NO₂ levels. A weaker positive correlation was observed between vegetation cover and NO₂ concentration ($R^2 = 0.097$), which is attributed to Tehran's topographic conditions and the accumulation of pollutants in certain densely vegetated areas. The results also indicate strong positive associations between built-up areas and building height and UHI intensity ($R^2 = 0.45$ and 0.18), highlighting their significant role in intensifying urban heat island effects. Although the relationship was not statistically significant, an inverse association was observed between vegetation density and UHI intensity, suggesting that vegetation may play a mitigating role in reducing urban heat intensity. Overall, this study underscores the strong influence of urban morphology on both air quality and thermal dynamics, while highlighting vegetation as a potential strategy for moderating UHI intensity in rapidly growing cities such as Tehran.

Cite this article: Safarrad, T., & Miandej, M. (2025). Impact of Urban Characteristics on Nitrogen Dioxide Concentration and Urban Heat Island Intensity: A case study of Tehran. *Physical Geography Research Quarterly*, 57 (4), 23-41.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.394256.1007882>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Urbanization exerts increasing pressure on environmental resources and has adverse effects on air and water quality, land availability, and local climatic conditions. Urban areas play a substantial role in the emission of greenhouse gases and, at the same time, are highly vulnerable to the impacts of climate change, including global warming and sea-level rise. Urban development alters surface radiation balance and moisture regimes, leading to changes in land use patterns and biogeochemical cycles. The present study examines the relationship between urban structural characteristics, including built-up areas, building height, and vegetation cover, and their effects on the Urban Heat Island (UHI) phenomenon and nitrogen dioxide (NO₂) emissions in Tehran. By employing multiple remote sensing datasets, this research seeks to provide an integrated assessment of urban structure, air quality, and urban heat island intensity.

Methodology

This study employs datasets from the Global Human Settlement Layer (GHSL) to assess the physical characteristics of the urban environment, with particular emphasis on the Global Built-up Surface dataset for quantifying built-up areas and the building height dataset for estimating building heights. These datasets are readily accessible through the Google Earth Engine (GEE) platform. Vegetation cover characteristics were extracted using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derived from Sentinel-2 satellite imagery. To address differences in spatial resolution and sample size, the study area, namely the city of Tehran, was divided into a uniform grid with a spatial resolution of 1000 × 1000 m. Within each grid cell, key variables were calculated, including Urban Heat Island (UHI) intensity, nitrogen dioxide (NO₂) concentration, mean building height, total built-up area, and vegetation cover. Subsequently, the relationships between urban physical characteristics and both UHI intensity and NO₂ concentration were analyzed using Pearson correlation coefficients. This methodological

framework enables a systematic assessment of the interactions between urban structure, urban heat island characteristics, and air pollution at a consistent spatial scale.

Result and Discussion

Urban Heat Island in Tehran

During the study period from 2018 to 2022, the highest mean annual temperature in Tehran was recorded in 2022 at 17.7 °C, while the lowest mean annual temperature was observed in 2020 at 15.3 °C. In the suburban areas of Tehran, the highest average temperature reached 12.8 °C in 2022, whereas the lowest value of 10.7 °C was recorded in 2019. Seasonal analysis indicates that temperatures within the urban core of Tehran consistently exceed those of the surrounding suburban areas throughout the year, confirming the persistent presence of the Urban Heat Island (UHI) phenomenon.

UHI intensity in Tehran exhibits clear seasonal variability, reaching its maximum value of 5.2 °C during the winter months and decreasing to approximately 4.3 °C during the summer. Notably, the UHI effect intensifies during colder seasons, a pattern that can largely be attributed to increased anthropogenic activities, particularly the extensive use of heating systems in urban areas. In 2021, when the mean urban temperature declined to 14.9 °C, central districts, especially Districts 10 and 11, exhibited elevated temperature levels, with an average UHI intensity of 4.4 °C. This spatial concentration of higher temperatures highlights the influence of dense urban morphology and intensified human activities on local climatic conditions in Tehran.

Nitrogen Dioxide (NO₂) Concentration in Tehran

Analysis of nitrogen dioxide (NO₂) concentrations in Tehran from 2018 to 2024 indicates that Districts 7 and 8 consistently experienced the highest average NO₂ levels, whereas Districts 19 and 20 recorded the lowest concentrations. The highest overall NO₂ concentration was observed in 2021, while the lowest levels occurred during 2018 and 2019. The peak in NO₂ concentration in 2021 may be associated with post-COVID-19 pandemic conditions. Although reductions in vehicular traffic and industrial activities during lockdown

periods in 2019 and 2020 likely contributed to lower emission levels, the subsequent resumption of economic activities in 2021 appears to have led to a renewed increase in pollutant emissions.

Seasonal analysis further reveals that NO₂ concentrations peak during December and January, coinciding with winter temperature inversion events that trap pollutants near the ground surface. In contrast, NO₂ levels reach their minimum between April and September, a period characterized by enhanced atmospheric dispersion and reduced emission intensity. In particular, April shows a marked decrease in NO₂ concentrations compared to March, which may reflect reduced urban and industrial activities during the Nowruz holiday period.

Conclusion

The results of this study indicate that the Urban Heat Island (UHI) in Tehran exhibits a distinct seasonal pattern, intensifying during the winter months as a result of increased fossil fuel consumption and weakening during the summer. In addition, UHI intensity decreases markedly during weekends and official holidays, such as Thursdays and Fridays, coinciding with reduced industrial activity, a pattern that is consistent with findings reported in previous studies. Further analysis reveals a statistically significant relationship between UHI intensity and urban physical characteristics, particularly built-up areas and building height. These urban forms contribute to heat accumulation, whereas increased vegetation cover is associated with a moderating effect on urban temperatures.

Similarly, nitrogen dioxide (NO₂) emissions follow a seasonal pattern comparable to that of the UHI, reaching peak levels in winter due to intensified urban and industrial activities and declining during periods of reduced activity. Correlation analysis indicates strong associations between NO₂ concentration and built-up density, building height, and vegetation cover. Specifically, areas characterized by higher building density and taller structures exhibit elevated NO₂ levels, while areas with greater vegetation cover are associated with lower

concentrations. These findings underscore the critical role of urban morphology in shaping thermal and atmospheric conditions in urban environments and highlight the importance of vegetation in mitigating urban heat and air pollution.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

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

تأثیر ویژگی‌های شهری بر غلظت دی‌اکسید نیتروژن و شدت جزیره گرمایی شهری مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران

طاهر صفرراد^۱ ✉، محمدرضا میانج^۲ 

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران. رایانامه: t.safarrad@umz.ac.ir

۲- گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران. رایانامه: m.miandej01@umail.umz.ac.ir

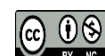
اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	آلودگی هوا و جزیره گرمایی شهری (UHI) متأثر از رشد سریع جمعیت و گسترش شهرها در شهرهایی مانند تهران تشدید شده است. این مطالعه رابطه بین ویژگی‌های شهری مناطق ساخته‌شده، ارتفاع ساختمان و پوشش گیاهی و شدت UHI و غلظت دی‌اکسید نیتروژن (NO ₂) را به‌عنوان یک آلاینده کلیدی شهری بررسی می‌کند. مناطق ساخته‌شده و ارتفاع ساختمان از داده‌های GHSL و پوشش گیاهی با استفاده از شاخص NDVI از طریق تصاویر Sentinel-2 استخراج شدند. محصول MOD11A2 برای شب (۲۲:۳۰) با قدرت تفکیک ۱۰۰۰ متر به‌منظور اندازه‌گیری اثر UHI در سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ استفاده شد و غلظت NO ₂ از سنجنده TROPOMI در ماهواره Sentinel-5 برای سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ به دست آمد. پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌ها از طریق سامانه Google Earth Engine همچنین با بهره‌گیری از ضریب همبستگی پیرسون انجام شد. نتایج نشان داد هر یک از ویژگی‌های مناطق ساخته‌شده و ارتفاع ساختمان‌ها با ضریب $R^2(0/18 \text{ و } 0/45)$ رابطه‌ای مستقیم و معناداری با غلظت NO ₂ دارند و توسعه شهری، افزایش قابل‌توجهی در انتشار NO ₂ خواهد داشت. همبستگی مستقیمی بین پوشش گیاهی و NO ₂ با ضریب $R^2(0/097)$ مشاهده شد که به توپوگرافی تهران و تجمع آلاینده در مناطق با پوشش گیاهی زیاد نسبت داده شد. همچنین نتایج این پژوهش آشکار کرد که، ارتباط مستقیم و معناداری بین مناطق ساخته‌شده و ارتفاع ساختمان‌ها با UHI با ضریب $R^2(0/18 \text{ و } 0/45)$ در تهران وجود دارد که نقش این ویژگی‌ها را در شکل‌گیری و تشدید پدیده جزیره گرمایی برجسته می‌کند. همچنین، این مطالعه نشان داد که رابطه معکوس (اگرچه از نظر آماری معنادار نیست) بین تراکم پوشش گیاهی و اثر جزیره گرمایی وجود دارد که نشان می‌دهد پوشش گیاهی می‌تواند نقش تعدیل‌کننده‌ای در کاهش شدت جزیره گرمایی ایفا کند..
واژگان کلیدی: سنجش‌ازدور، دی‌اکسید نیتروژن، جزیره گرمایی شهری، تهران.	

استناد: صفرراد، طاهر و میانج، محمدرضا. (۱۴۰۴). تأثیر ویژگی‌های شهری بر غلظت دی‌اکسید نیتروژن و شدت جزیره گرمایی شهری مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۷ (۴)، ۴۱-۲۳.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.394256.1007882>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

© نویسندگان



مقدمه

مناطق شهری که به سرعت در حال رشد هستند، فشار شدید انسانی بر محیط‌زیست طبیعی وارد می‌کنند و بار سنگینی بر منابع طبیعی مانند کیفیت هوا، کیفیت آب و فضای موجود تحمیل می‌کنند (Das & Das, 2020). شهرها نقشی محوری در علم تغییر اقلیم جهانی ایفا می‌کنند، زیرا هم به عنوان منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای شناخته می‌شوند و هم در معرض تهدیداتی مانند افزایش سطح دریا و گرمایش جهانی قرار دارند (IPCC, 2022). با توسعه شهرنشینی، شرایط اقلیمی مانند توازن تابش، تراز رطوبت و پایداری حرارتی در سطح زمین تغییر می‌کند (Das & Das, 2020). تغییرات کاربری و پوشش زمین ناشی از شهرنشینی توجه محققان را در جنبه‌های مختلفی مانند اقلیم شهری، مصرف انرژی، بهداشت عمومی، سیلاب و چرخه‌های کربن و نیتروژن را به خود جلب کرده است (Zhao et al, 2023). انتشار گرما و رطوبت ناشی از فعالیت‌های انسان، ویژگی‌های شهری را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که تعادل انرژی سطحی و تابشی طبیعی را مختل کرده و باعث می‌شود شهرها به طور نسبی مناطق گرم‌تری باشند (Oke, 1982; Lowry & Lowry, 2001). مناطق شهری اغلب دارای اقلیمی متفاوتی نسبت به محیط‌های روستایی و طبیعی اطراف خود هستند. این پدیده به عنوان اثر جزیره گرمایی شهری (UHI) شناخته می‌شود (Rahmani & Sharifi, 2025). اثر جزیره گرمایی شهری (UHI) نتیجه تغییرات در ساختار سطح زمین و فعالیت‌های انسانی مرتبط با شهرنشینی است که تمایل به تشدید در دمای بالاتر دارد این اثر با افزایش دمای سطح یا هوا در مناطق شهری نسبت به مناطق اطراف مشخص می‌شود (Zheng et al, 2023). جزیره گرمایی شهری (UHI) تغییر اقلیم در مناطق شهری را در پی دارد و توسط عوامل متعددی ایجاد می‌شود (Xi et al, 2023). برای درک بهتر و مدیریت مؤثر پیامدهای جزیره گرمایی شهری (UHI)، لازم است رابطه پیچیده میان این پدیده و نحوه سازمان‌دهی فضایی مناطق شهری به صورت جامع مورد بررسی قرار گیرد.

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در مورد اقلیم‌های مختلف شهر و نقش آن‌ها در درک دینامیک اقلیم شهری منتشر شده است. ژانگ و وانگ^۱ (۲۰۰۸) به مطالعه روابط بین گستره مکانی جزایر گرمایی شهری سطحی (SUHI) و پنج عامل مشخصه شهری مانند اندازه شهر، منطقه توسعه‌یافته، نسبت آب، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و تراکم جمعیت در ده شهر کشور چین پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد که جزیره گرمایی همبستگی بالایی با اندازه شهر ($r=0.95$)، تراکم جمعیت ($r=0.97$) و منطقه توسعه‌یافته ($r=0.83$) دارد. همچنین ثابت شد که بین جزیره گرمایی و میانگین NDVI و نسبت آب برای هر شهر یک همبستگی منفی ضعیف وجود دارد. اگاشاوارا^۲ و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه دمای درخشندگی و انواع پوشش زمین از تصاویر ماهواره‌ای Landsat TM مربوط به سال‌های ۱۹۸۶، ۲۰۰۱ و ۲۰۱۰ برای بررسی توزیع مکانی تغییرات دما و پوشش زمین پرداختند. و از یک رویکرد کمی برای بررسی روابط بین دما، مساحت‌های مختلف پوشش زمین و چندین شاخص از جمله شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص تفاضلی نرمال شده آب (NDWI) و شاخص تفاضلی نرمال شده مناطق ساخته‌شده (NDBI) استفاده کرده‌اند و نشان دادند که مناطق شهری و زمین‌های بایر با دمای بالا همبستگی مثبت دارند، درحالی‌که مناطق پوشیده از پوشش گیاهی و آب با دمای پایین مرتبط هستند. همچنین نگرامبه^۳ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی ارتباط گازهای معلق CO ، SO_2 ، NO_2 ، O_3 با جزیره گرمایی در شهر سئول پرداختند که نتایج نشان داد مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و ذرات معلق (PM) همبستگی مثبتی با شدت جزیره گرمایی شهری (UHI) دارند. در

1. Zhang & Wang
2. Ogashawara
3. Ngarambe

مقابل، ازن (O_3) همبستگی منفی با UHI نشان داد. وی^۱ و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که با افزایش جمعیت شهری، شدت UHI و غلظت NO_2 نیز افزایش می‌یابد تخمین زدند که افزایش ۱۰ برابری در جمعیت، اختلاف دمای بین شهر و حومه را تقریباً ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد داد، یا به عبارت دیگر، زمانی که شهرها بسیار بزرگ می‌شوند، این اختلاف تا ۴۰٪ افزایش می‌یابد. همچنین NO_2 به روشی مشابه تغییر می‌کند، به طوری که هر بار که جمعیت شهری ۱۰ برابر شود، غلظت NO_2 نیز ۴۰٪ افزایش می‌یابد. در پژوهشی دیگر رحمانی و شریفی^۲ (۲۰۲۵) تأثیرات UHI در مناطق مختلف زون‌های اقلیم محلی (LCZ) را بررسی کرده و استراتژی‌های کاهش آن را پیشنهاد می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که LCZ_2 به عنوان گرم‌ترین منطقه شناخته می‌شود، در حالی که LCZ_9 با توسعه پراکنده، به عنوان خنک‌ترین منطقه ساخته شده در هر دو حالت برجسته شده است. همچنین تأیید می‌کنند که طراحی‌های فشرده در ارزیابی‌های روزانه اثر سایه‌اندازی ایجاد می‌کنند، اما گرما را در شب به دام می‌اندازند و منجر به افزایش دما می‌شوند. در مطالعه‌ای دیگر بودزیک^۳ و همکاران (۲۰۲۵) ویژگی‌های مؤثر در شکل‌دهی به قابلیت خنک‌کنندگی را با توجه به LCZ های مختلف ارزیابی می‌کند و ویژگی‌های خنک‌کنندگی شامل نوع، هندسه، تراکم فضایی، ویژگی‌های پوشش گیاهی و شرایط اولیه اقلیمی را در نظر می‌گیرد و مشخص شد که پوشش گیاهی و آب در شهر باعث کاهش دمای شهر و افزایش خنک‌کنندگی می‌شود. در پژوهش‌های داخلی نیز رفتار و ویژگی‌های جزیره گرمایی شهر در شهرهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است برای نمونه شهر اصفهان در هنگام روز از پیرامون خود سردتر و در هنگام شب حدود دو درجه سلسیوس گرم‌تر از پیرامون خود است (مسعودیان و منتظری، ۱۳۹۹) که اختلاف دمای جزیره گرمایی شهری با دمای پیرامون آن متعاقب وقوع حداکثر آلودگی در شهر اصفهان افزایش می‌یابد که این ارتباط از نظر آماری معنادار است (آروین، ۱۳۹۶). در مورد شهر تهران نیز نتایج مطالعات نشان می‌دهد، سرعت و جهت باد بیش‌ترین نقش را در الگوی فضایی و شدت جزیره گرمایی شهر تهران دارد (شمسی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱) و بین شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI با دمای سطح زمین در شهر تهران رابطه عکس برقرار است (نوربخش و نظری نژاد، ۱۴۰۱) همچنین شدت جزیره گرمایی شهر تهران در زمان حاکمیت شرایط پرفشاری به علت سکون هوا، افزایش می‌یابد و در شرایط کم‌فشاری عکس این حالت رخ می‌دهد (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۲) از طرف دیگر، روند تغییرات دمای شبانه در مرکز تهران با پیرامون شهر متفاوت است، در حالی که دمای شبانه سطح زمین در حومه افزایش معناداری دارد، چنین افزایشی در مرکز شهر مشاهده نمی‌شود. این افزایش شتابان دمای شبانه در حومه نسبت به مرکز، موجب کاهش نسبی شدت جزیره گرمایی شهر تهران شده است (صفراد، ۱۴۰۰). فیض‌الله پور (۱۴۰۲) به بررسی دمای سطح زمین با شاخص‌های NDVI، NDWI و NDMI پرداخت و نتایج مطالعاتش نشان داد دمای سطح زمین (LST) بیشترین همبستگی منفی را با شاخص رطوبتی NDMI دارد، به میزان ۰/۶۵-، یعنی با افزایش رطوبت، دمای سطح کاهش می‌یابد. همچنین، بیشترین همبستگی مثبت به میزان ۰/۲۳ بین دمای سطح زمین و شاخص NDWI بوده است. در مطالعه‌ای دیگر صلاحی و همکاران (۱۴۰۳) به بررسی ارتباط هواویز شهری با جزیره گرمایی شهر اردبیل پرداختند و نشان دادند بین این دو پدیده رابطه مستقیمی وجود دارد و با افزایش هواویز شدت جزیره گرمایی نیز افزایش می‌یابد.

این مطالعه هریک از ویژگی‌های کالبد شهر شامل مناطق ساخته شده، ارتفاع ساختمان‌ها و پوشش گیاهی و ارتباط آن‌ها با جزیره گرمایی و آلودگی هوا (انتشار گاز NO_2) را مورد بررسی قرار خواهد داد. استفاده از طیف وسیع داده‌های

1. Wei

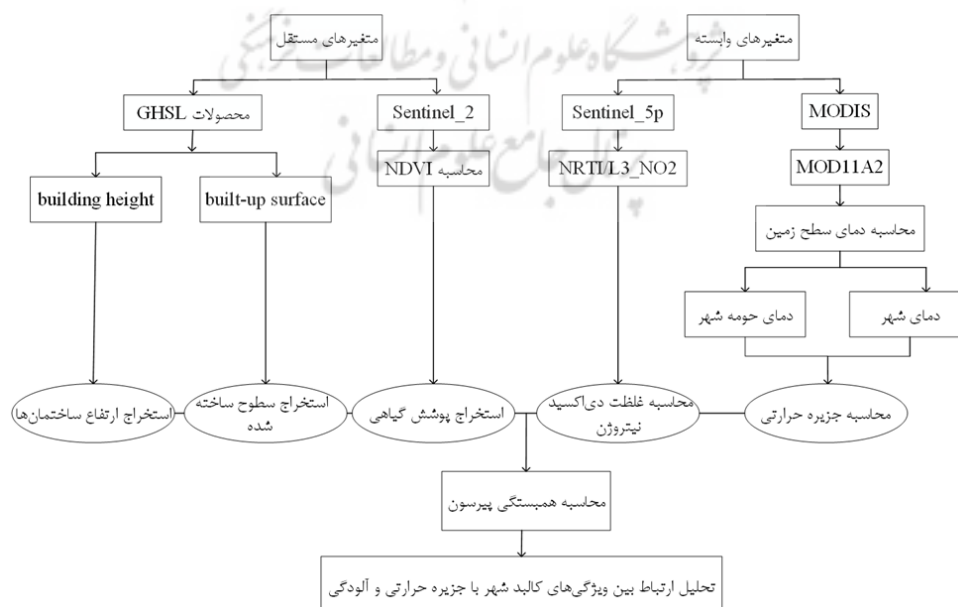
2. Rahmani & Sharifi

3. Budzik

دورسنجی این امکان را فراهم می‌سازد تا شناخت شهر و ویژگی‌های آن به بهترین شکل ممکن مهیا شود و پژوهشگر بتواند با اشرافیت کامل بر موضوع، به درک بهتر ارتباط میان کالبد شهر با جزیره گرمایی و آلودگی هوای کلان‌شهر تهران نائل آید، نتایج این تحقیق می‌تواند و به شکل مؤثری برای برنامه‌ریزی شهری و کاهش مشکلات شهری در آینده مورد استفاده قرار گیرد و مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریت شهری و طراحی استراتژی‌های مقابله با تغییر اقلیمی باشند. همچنین، این تحقیق می‌تواند به توسعه مدل‌های بهینه‌سازی برای کاهش اثرات جزایر گرمایی شهری در شهرهای پرجمعیتی مانند تهران کمک کند.

روش پژوهش

در این پژوهش، ارتباط بین آلودگی هوا، جزیره گرمایی شهری و ویژگی‌های کالبدی شهر تهران طی دوره زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ بررسی شده است. برای این منظور، ابتدا سری‌های زمانی جزیره گرمایی و غلظت آلاینده NO_2 از داده‌های سنجنش‌ازدور استخراج و پراکندگی فضایی آن‌ها تحلیل گردید. این سری‌های زمانی در چهار مقیاس سالانه، فصلی، ماهانه و هفتگی محاسبه شد تا روندهای کوتاه‌مدت و بلندمدت تغییرات مشخص شود. به منظور تحلیل روند تغییرات در بازه‌های زمانی مختلف، از روش تحلیل روند استفاده گردید تا الگوهای افزایشی یا کاهشی دما و آلاینده‌ها به صورت کمی ارزیابی شود. برای بررسی ویژگی‌های کالبد شهر، از داده‌های سنجنش‌ازدوری GHSL: Global Built-up Surface (جهت محاسبه سطوح ساخته‌شده) و GHSL: Global Building Height (جهت تعیین ارتفاع ساختمان‌ها) استفاده شد. این داده‌ها محصولات آماده در پلتفرم Google Earth Engine بوده‌اند. همچنین، برای ارزیابی پوشش گیاهی، شاخص NDVI از تصاویر ماهواره Sentinel-2 استخراج گردید. به دلیل اختلاف پیکسل سائز داده‌ها، منطقه مورد مطالعه یعنی شهر تهران با شبکه‌ای به ابعاد 1000×1000 متر پوشش داده شد و میانگین پارامترهای جزیره گرمایی، غلظت NO_2 ، ارتفاع ساختمان‌ها و مجموع سطوح ساخته‌شده و پوشش گیاهی در هر سلول محاسبه گردید. در گام بعد، ارتباط بین هر یک از ویژگی‌های کالبدی شهر با جزیره گرمایی و غلظت آلاینده NO_2 از طریق ضریب همبستگی پیرسون مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت (شکل ۱).



شکل ۱. فلوچارت فرایند روش تحقیق در این مطالعه

در این پژوهش جهت اطلاع از ساختار و کالبد شهر از محصولات سنجش‌ازدوری مربوط به کالبد شهر که در سامانه Google Earth Engine موجود است برای تحلیل و ارزیابی استفاده شده است. برای آگاهی از رابطه بین کالبد شهر و جزیره گرمایی از داده‌های LST محصول MOD11A از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ مورد استفاده و تحلیل قرار گرفته است. برای محاسبه غلظت دی‌اکسید نیتروژن از داده NRTI/L3_NO₂ از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ استفاده شده است. و برای اطلاع از کالبد شهر از محصولات سطوح ساخته شده GHSL: Global built-up surface 10m (P2023A) و ارتفاع ساختمان GHSL: Global building height 2018 (P2023A) بهره گرفته شد. همچنین برای استخراج پوشش گیاهی شهر تهران از شاخص NDVI استخراج شده از ماهواره سنتینل ۲ کمک گرفته شد (جدول ۱). به منظور بررسی ارتباط جزیره گرمایی و غلظت آلاینده NO₂ با کالبد شهر، فصل زمستان ۲۰۱۸ به عنوان دوره مطالعاتی انتخاب شد، زیرا در این فصل، شدت جزیره گرمایی و میزان غلظت NO₂ به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش

ردیف	نام داده	تاریخ	اندازه پیکسل (متر)
۱	سنتینل ۲	۲۰۱۸/۰۸/۰۱ - ۲۰۱۸/۰۷/۰۱	۱۰
۲	GHSL: Global built-up surface	۲۰۱۸/۰۱/۰۱	۱۰
۳	GHSL: Global building height	۲۰۱۸/۰۱/۰۱	۱۰۰
۴	NRTI/L3_NO ₂	۲۰۲۴/۰۱/۰۱ - ۲۰۱۸/۰۱/۰۱	۱۱۱۳/۲
۵	MOD11A2	۲۰۲۲/۱۱/۱۵ - ۲۰۱۸/۰۱/۰۱	۱۰۰۰

کالبد شهر

کالبد شهر به عنوان مجموعه‌ای از عناصر فیزیکی و فضایی شهر تعریف می‌شود که شامل ساختمان‌ها، معابر، فضاهای عمومی، تأسیسات و مبلمان شهری است. این عناصر به صورت همگن و مرتبط با یکدیگر، ساختار و هویت فیزیکی شهر را تشکیل می‌دهند. در تحلیل ارتباط بین جزیره گرمایی، آلودگی هوا و کالبد شهر، ویژگی‌های کالبدی مانند تراکم ساخت‌وساز، ارتفاع ساختمان‌ها، سطوح ساخته شده و پوشش گیاهی در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرند (فلاحی و همکاران، ۱۴۰۱).

سطوح ساخته شده

برای محاسبه سطوح ساخته شده از محصول آماده GHSL: Global built-up surface 10m (P2023A) استفاده شد. که این محصول با حمایت کمیسیون اروپا، مرکز تحقیقات مشترک (JRC)، و اداره کل سیاست منطقه‌ای و شهری اجرا شده است. این داده توزیع سطوح ساخته شده را بر حسب مترمربع در هر سلول ۱۰ متری برای سال ۲۰۱۸ نشان می‌دهد که از تصاویر S2 استخراج شده است (Pesaresi et al., 2024). همچنین برای محاسبه تراکم سطوح ساخته شده (BD) از نسبت مساحت سطوح ساخته شده هر منطقه (BA) به مساحت آن منطقه (A) استفاده شد:

$$BD = \frac{BA}{A} \quad \text{رابطه (۱)}$$

ارتفاع ساختمان‌ها

برای محاسبه ارتفاع ساختمان‌ها در منطقه مورد مطالعه از محصول آماده سنجش‌ازدوری GHSL: Global building height 2018 (P2023A) استفاده شده است. این محصول مجموعه داده رستری فضایی توزیع جهانی ارتفاع ساختمان‌ها را با دقت ۱۰۰ متر و مربوط به سال ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. داده‌های ورودی که برای پیش‌بینی ارتفاع ساختمان‌ها استفاده شده‌اند، شامل مدل سطح دیجیتال جهانی ALOS (۳۰ متر)، داده‌های مأموریت راداری شاتل

(SRTM) ناسا (۳۰ متر) و ترکیب تصاویر ماهواره‌ای جهانی سنتینل-۲ از داده‌های L1C برای دوره ۲۰۱۷-۲۰۱۸ هستند. این محصول ابتدا با استفاده از داده‌های DSM، ویژگی‌های مورفولوژیکی را استخراج و از طریق مدل‌های رگرسیونی، ارتفاع خالص و ناخالص ساختمان‌ها و حجم کلی آن‌ها پیش‌بینی می‌شود. سپس با ترکیب این پیش‌بینی‌ها و استفاده از داده‌های سطح ساخته‌شده، پیش‌بینی‌ها دقیق‌تر می‌شوند و در نهایت ارتفاع ساختمان‌ها برای سال‌های مختلف تخمین زده می‌شود (Pesaresi et al., 2024).

شاخص NDVI

NDVI که به‌عنوان یکی از بهترین شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی شناخته می‌شود، بر اساس نسبت بازتاب باندهای نزدیک به مادون قرمز (NIR) و قرمز (Red) محاسبه می‌شود، همان‌گونه که در رابطه (۲) بیان شده است این دو باند، که حاوی بیش از ۹۰٪ اطلاعات پوشش گیاهی هستند، به‌طور گسترده در ماهواره‌های سنجنش‌ازدور مشاهده می‌شوند (Li et al., 2021). شاخص NDVI به اندازه‌گیری مقدار پوشش گیاهی در سطح زمین پرداخته و در ارتباط با سلامت پوشش گیاهی بوده که در آن گیاهان سالم مقدار زیادی از انرژی را در مقایسه با گیاهان بیمار بازتاب می‌دهد. مقدار این شاخص بین +۱ و -۱ قرار دارد. بیشترین مقدار NDVI دلالت بر پوشش گیاهی سالم و غنی داشته درحالی‌که مقادیر کم، پوشش گیاهی ضعیف را نمایش می‌دهد (فیض‌الله پور، ۱۴۰۲).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این پژوهش برای محاسبه NDVI منطقه مورد مطالعه از ماهواره سنتینل ۲ استفاده شده است که در آن NIR برابر با باند ۵ و Red برابر با باند ۴ است.

همچنین برای محاسبه تراکم پوشش گیاه (VD) از نسبت مساحت پوشش گیاهی هر منطقه (VA) به مساحت آن منطقه (A) استفاده شد:

$$VD = \frac{VA}{A} \quad \text{رابطه (۳)}$$

جزیره گرمایی شهر

محصول MOD11A2 نسخه ۶ برای بررسی ویژگی‌های فضایی LST در شهر تهران و حومه آن مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها، میانگین ساده‌ای از داده‌های MOD11A1 در یک دوره ۸ روزه هستند، در هر پیکسل دمای سطح زمین و گسیلمندی را برای ساعات ۱۰:۳۰ روز و ۲۲:۳۰ شب با قدرت تفکیک ۱ کیلومتر ارائه می‌دهند. شبکه پوششی این محصول دارای ابعاد ۱۲۰۰ در ۱۲۰۰ کیلومتر است. داده‌های MOD11A2 امکان ارائه تصویری دقیق از ویژگی‌های سطح زمین در روز و شب را فراهم می‌کنند و برای مطالعات اقلیمی در مقیاس‌های محلی و میکرو مناسب هستند در این پژوهش از داده‌های مزبور طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ استفاده شد. جزایر حرارتی شهری در طول سال و در ساعات مختلف شبانه‌روز شکل می‌گیرند. از آنجاکه مناطق روستایی در شب سریع‌تر از مناطق شهری خنک می‌شوند و حرارت خود را از دست می‌دهند، اختلاف دمای بین مناطق شهری و روستایی معمولاً در روزهای آرام و بدون ابر و در ساعات پایانی روز به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این امر به دلیل تفاوت در ظرفیت حرارتی سطوح مختلف است؛ سطوح نفوذناپذیری مانند جاده‌ها، ساختمان‌ها و سایر سازه‌های ساخته‌شده توسط انسان، در مقایسه با سطوح نفوذپذیری همچون پوشش گیاهی و خاک، گرمای بیشتری ذخیره می‌کنند. در نتیجه، بیشترین اختلاف دما بین مناطق شهری و روستایی، یا حداکثر شدت جزیره گرمایی شهری (SUHI)، معمولاً سه تا پنج ساعت پس از غروب خورشید رخ می‌دهد (صفرآباد، ۱۴۰۰). در این پژوهش برای محاسبه شدت جزیره گرمایی شهر تهران از روش به کار گرفته‌شده توسط scott et al., 2018 استفاده شده است آن‌ها شدت جزیره گرمایی شبانه (NSUHI) برای شهر را به‌عنوان تفاوت دمای آن شهر از

پیرامون آن در نظر گرفتند (رابطه ۴):

$$NSUHI = T_u - T_r \quad \text{رابطه ۴}$$

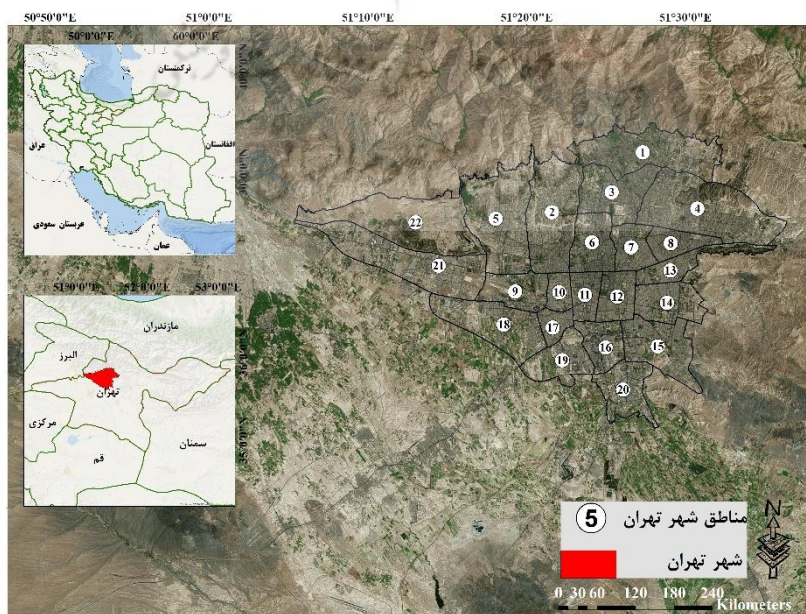
محدوده‌های واقع در فاصله ۳ تا ۶ کیلومتری از مرکز شهر تهران که کاربری آن‌ها عمدتاً شامل سطوح طبیعی نظیر اراضی بایر، فضاها، سبزی و زمین‌های کشاورزی (سطوح نفوذپذیر) بود، به‌عنوان پیرامون شهر در نظر گرفته شدند. با توجه به تأثیر مستقیم شهر بر محیط پیرامونی، ناحیه سه کیلومتر نخست مستثنی گردید. به‌منظور شناسایی و تفکیک سطوح نفوذپذیر در این محدوده، از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth استفاده شد.

غلظت دی‌اکسید نیتروژن NO_2

ماهواره Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5 P) که در ۱۳ اکتبر ۲۰۱۷ به فضا پرتاب شد، اولین ماهواره مأموریت Copernicus است که به نظارت بر اتمسفر اختصاص داده شده است. این ماهواره مجهز به طیف‌سنجی به نام TROPOMI (ابزار نظارت بر اتمسفر تروپوسفری) است که تابش‌های فرابنفش زمین را با وضوح طیفی بالا اندازه‌گیری می‌کند. TROPOMI روزانه اتمسفر جهانی را با وضوح ۷ کیلومتر $\times$ ۳/۵ کیلومتر نقشه‌برداری می‌کند و این وضوح بالا امکان شناسایی جزئیات دقیق‌تر از جمله تشخیص گاز NO_2 (Shikwambana et al., 2020). در این تحقیق، از داده NRTI/L3_ NO_2 استفاده شده است. این داده‌ها در محیط Google Earth Engine تحلیل شده‌اند.

محدوده مورد مطالعه

کلان‌شهر تهران با مساحت ۶۱۵ کیلومترمربع در بخش شمالی فلات مرکزی ایران ($35^{\circ}07'$ شمالی؛ $51^{\circ}24'$ شرقی) قرار دارد. طبق سرشماری سال ۱۳۹۵، دارای ۸ میلیون و ۶۹۳ هزار و ۷۰۶ نفر جمعیت بوده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). میانگین ارتفاع شهر تهران حدود ۱۲۰۰ متر از سطح دریا است. این شهر ۲۰٪ از مساحت کل ایران را شامل می‌شود. تهران از سمت شمال و شمال شرقی توسط رشته‌کوه‌ها احاطه شده و در دشتی با ارتفاع بین ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است. میانگین دمای تهران حدود ۱۹/۱ درجه سانتی‌گراد است (Zargari et al., 2024) (شکل ۲).



شکل ۲. موقعیت شهر تهران و منطقه مورد مطالعه

یافته‌ها

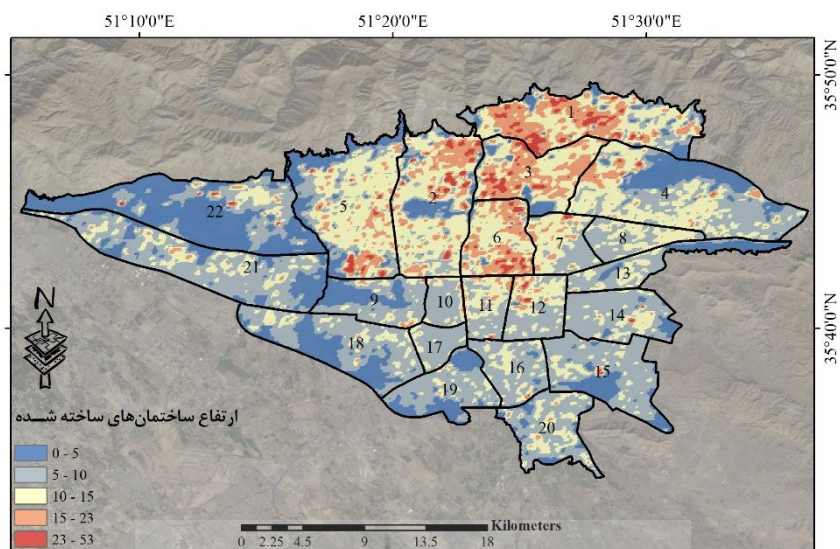
کالبد شهر

نتایج حاصل از تحلیل میانگین ارتفاع ساختمان‌ها نشان می‌دهد بیشترین ارتفاع به‌دست‌آمده برای ساختمان‌ها در منطقه مورد مطالعه برابر با ۵۳/۲ متر بوده است (شکل ۳) و مناطق شماره ۶، ۳ و ۱ به ترتیب با ارتفاع ۱۵/۹۱، ۱۵/۱۵ و ۱۴/۶۴ میانگین ارتفاعی بالاتری نسبت به دیگر مناطق داشته‌اند و مناطق شماره ۲۲، ۱۹ و ۱۸ به ترتیب با ارتفاع ۴/۳، ۶/۹۱ و ۷/۰۵ دارای ارتفاع ساختمان‌های کمتری نسبت به دیگر مناطق شهر تهران بوده‌اند. همچنین نقشه‌های سطوح ساخته‌شده نشان دادند که حداکثر بنای ساخته‌شده در هر پیکسل ۱۰۰ متر بوده است (شکل ۴) و مناطق شماره ۴، ۲۱ و ۲ به ترتیب دارای بیشترین سطوح ساخته‌شده هستند و مناطق شماره ۱۷، ۱۰ و ۱۳ به ترتیب دارای کمترین سطوح ساخته‌شده هستند و از طرف دیگر نقشه‌های پوشش گیاهی آشکار ساختند که حداکثر مقدار میانگین NDVI در منطقه مورد مطالعه برابر با ۰/۸۷ بوده است (شکل ۵) و مناطق شماره ۱، ۴ و ۵ به ترتیب دارای بیشترین مساحت پوشش گیاهی هستند و مناطق شماره ۱۰، ۱۷ و ۱۱ به ترتیب دارای پایین‌ترین میزان پوشش گیاهی بوده‌اند. نتایج حاصل از محاسبه تراکم سطوح ساخته‌شده نشان داد مناطق شماره ۲۲، ۱۹ و ۹ به ترتیب دارای بیشترین تراکم سطوح ساخته‌شده هستند و مناطق ۱۰، ۸ و ۱۷ به ترتیب دارای کمترین تراکم ساخته‌شده هستند (جدول ۲).

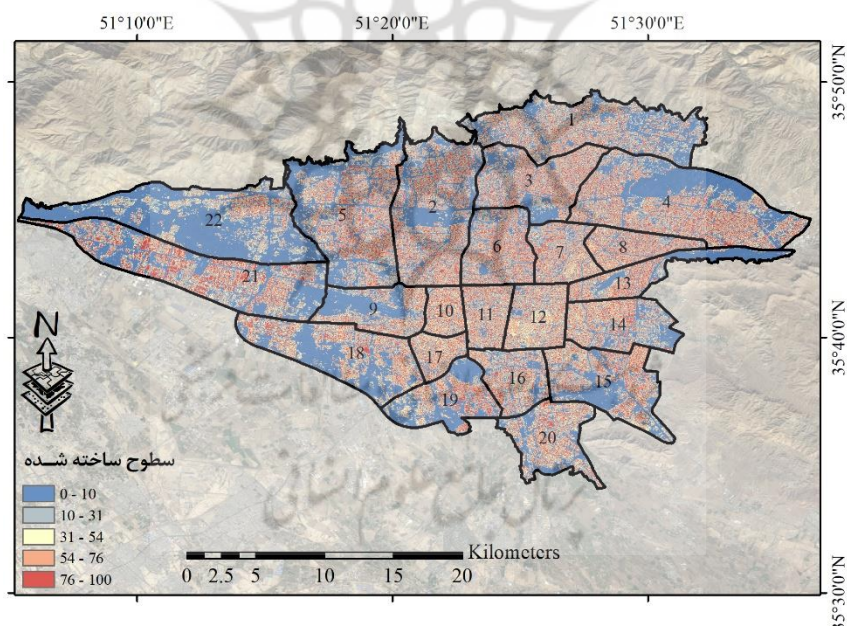
جدول ۲. ویژگی‌های کالبدی شهر تهران بر اساس تقسیم‌بندی مناطق بیست و دو گانه

شماره منطقه	میانگین ارتفاع ساختمان (متر)		مساحت (هکتار)		تراکم
			سطوح ساخته‌شده	پوشش گیاهی	
۱	۱۴/۶۴	۱۳۴۶/۶۷	۱۴۰۲/۰۵	۳/۴۴	۳/۳
۲	۱۳/۱۴	۱۵۴۳/۸۳	۱۰۴۱/۳۴	۳/۰۴	۴/۵۱
۳	۱۵/۱۵	۱۰۲۵/۲۳	۷۵۱/۵۵	۲/۸۶	۳/۹
۴	۹/۳۶	۱۸۴۹/۲۸	۱۳۳۴/۴۶	۳/۳۱	۴/۵
۵	۱۰/۹۳	۱۵۴۳/۲۳	۱۱۳۹/۳۱	۳/۴۴	۴/۶
۶	۱۵/۹۱	۸۴۷/۸۲	۴۱۸/۷۵	۲/۵۲	۵/۱۲
۷	۱۲/۴۴	۶۳۸/۸۶	۲۴۶/۱۲	۲/۴۰	۶/۲۴
۸	۱۱/۰۲	۵۸۷/۸۵	۱۹۷/۰۹	۲/۲۴	۶/۷
۹	۷/۰۸	۵۰۱/۷۴	۲۴۶/۲۲	۳/۹۲	۷/۹
۱۰	۱۰/۳۸	۳۷۸/۳۷	۹۴/۸۴	۲/۱۳	۸/۵
۱۱	۱۲/۰۷	۵۲۶/۵۷	۱۷۰/۹۲	۲/۲۸	۷/۰۳
۱۲	۱۱/۷۳	۶۹۵/۸۲	۲۲۷/۶۸	۲/۳	۷/۰۲
۱۳	۷/۶۲	۴۹۱/۶۸	۳۶۱/۹۱	۳/۴۳	۴/۶۷
۱۴	۹/۳۴	۷۸۲/۲۸	۴۰۴/۸۴	۲/۸۱	۵/۴۳
۱۵	۷/۸۱	۹۸۷/۲۷	۵۹۶/۷۸	۳/۱۴	۵/۱۹
۱۶	۹/۸۷	۶۰۷/۲۶	۳۰۴/۵۱	۲/۷۱	۵/۴۲
۱۷	۹/۶۷	۳۶۵/۶	۱۱۲/۹۸	۲/۲۵	۷/۲۹
۱۸	۷/۰۵	۱۰۳۰/۵۴	۶۱۷/۳۴	۳/۶۲	۶/۰۴
۱۹	۶/۹۱	۵۴۶/۴۴	۳۷۱/۴۴	۳/۹۶	۵/۸۲
۲۰	۹/۰۸	۷۶۱/۸۴	۴۱۲/۶۲	۲/۹۳	۵/۴۱
۲۱	۷/۹۷	۱۶۰۸/۲۶	۷۱۶/۱۲	۳/۱۹	۷/۱۸
۲۲	۴/۳	۷۴۹/۲۱	۱۰۱۳/۲۳	۷/۷	۵/۷۶
مجموع شهر	۱۰/۱۵	۱۹۴۱۵/۷۵	۱۲۱۸۲/۲۱	۳/۲	۵/۱۶

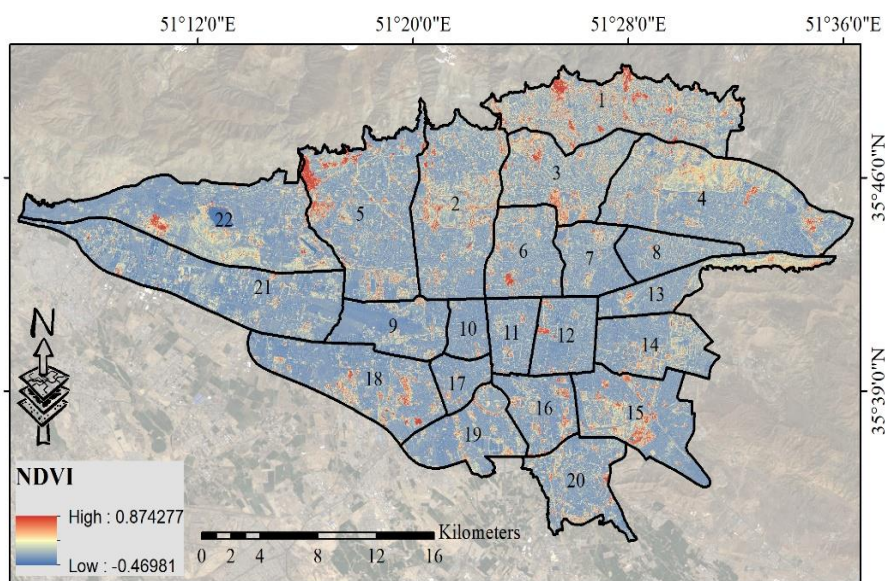
همچنین خروجی‌های نقشه تراکم پوشش گیاهی نشان داد که مناطق ۱۲، ۱۰ و ۸ دارای بالاترین تراکم پوشش گیاهی هستند و مناطق ۲۲، ۲۰ و ۱۸ به ترتیب دارای پایین‌ترین تراکم هستند (شکل ۵ و جدول ۲).



شکل ۳. ارتفاع ساختمان‌های ساخته‌شده در مناطق شهر تهران



شکل ۴. سطوح ساخته‌شده در مناطق در شهر تهران

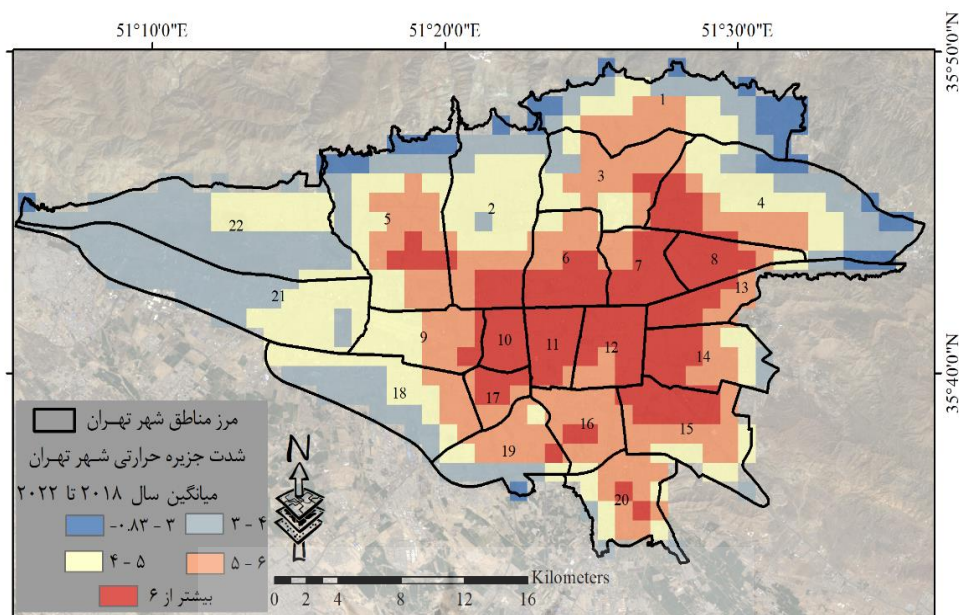


شکل ۵. پوشش گیاهی مناطق شهر تهران

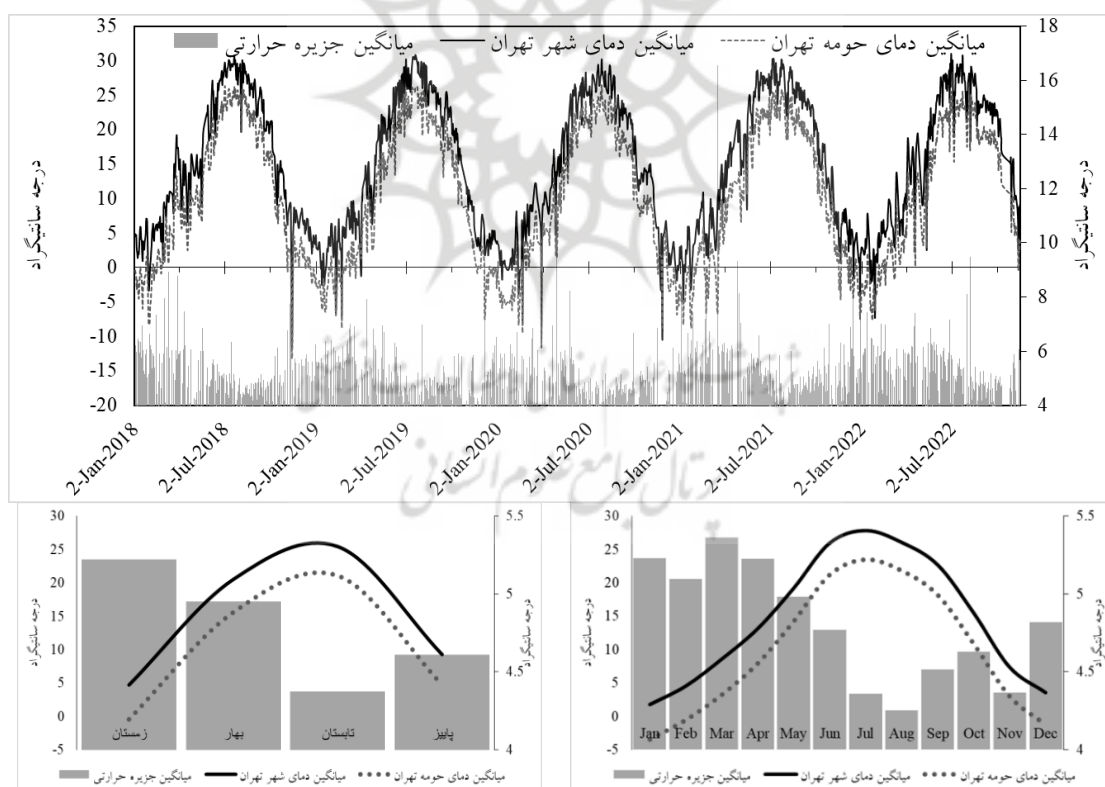
جزیره گرمایی شهر تهران

طی دوره زمانی مورد مطالعه (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲) بالاترین میانگین دمای سالانه ثبت شده در تهران مربوط به سال ۲۰۲۲ با ۱۷/۷ درجه سانتی گراد بوده و کمترین مقدار مربوط به سال ۲۰۲۰ با ۱۵/۳ درجه سانتی گراد بوده است. در مناطق حومه تهران نیز بیشترین میانگین دمای سالانه در سال ۲۰۲۲ با ۱۲/۸ درجه سانتی گراد و کمترین میزان آن در سال ۲۰۱۹ با ۱۰/۷ درجه سانتی گراد به ثبت رسیده است. واکاوی دمای شهر تهران طی فصل‌های مختلف نشان می‌دهد که میانگین دمای شهر تهران در تمامی فصول سال بالاتر از مناطق اطراف آن است. جزیره گرمایی کلان‌شهر تهران در زمستان به حداکثر مقدار خود ۵/۲ درجه سانتی گراد می‌رسد درحالی که در تابستان عدد ۴/۳ را نشان می‌دهد. جزیره گرمایی کلان‌شهر تهران در فصول سرد سال از شدت بیشتری نسبت به فصل گرم برخوردار است که یکی از دلایل آن می‌تواند ناشی از فعالیت‌های بیشتر انسانی و استفاده از تجهیزات گرمایشی در داخل شهر باشد. طی دوره زمانی مورد مطالعه بیشترین شدت جزیره گرمایی در سال ۲۰۲۱ با ۴/۹ درجه سانتی گراد رخ داده است، درحالی که کمترین میزان آن در سال ۲۰۲۰ با ۴/۴ درجه سانتی گراد مشاهده شده است. هسته اولیه شهر و مرکز شهر یعنی مناطق (۱۰ و ۱۱) از شدت جزیره گرمایی بالاتری برخوردار بوده است (شکل ۶، ۷ و ۸). نتایج حاصل تحلیل ماهانه دمای شهر تهران در بازه زمانی مورد مطالعه این پژوهش نشان می‌دهد که شهر تهران در تمامی ماه‌های سال دارای دمایی بالاتر از مناطق اطراف خود است که نشانگر وجود پدیده جزیره گرمایی شهری است. میانگین اختلاف دما بین شهر تهران و مناطق پیرامونی در طول سال متغیر بوده و بیشترین مقدار آن در ماه‌های گرم (ژوئن تا آگوست) مشاهده می‌شود. در این بازه (ماه‌های گرم)، دمای متوسط تهران به بیش از ۲۶ درجه سانتی گراد می‌رسد، درحالی که دمای مناطق اطراف آن حدود ۲۱ درجه سانتی گراد است که اختلافی نزدیک به ۵ درجه ایجاد می‌کند. در مقابل، در ماه‌های سرد (دسامبر و ژانویه)، این اختلاف کاهش می‌یابد و به حدود ۲ تا ۳ درجه سانتی گراد می‌رسد (شکل ۷). همچنین، میانگین شدت جزیره گرمایی در ماه‌های مختلف تغییر می‌کند. بیشترین مقدار این شدت در ماه‌های زمستانی (ژانویه و فوریه) با حدود ۵ درجه سانتی گراد مشاهده شده است، درحالی که در ماه‌های گرم تابستانی این مقدار کاهش می‌یابد که ممکن است ناشی از افزایش دمای کلی منطقه و تأثیر عوامل همرفتی باشد. این الگوها نشان می‌دهد که تأثیر جزیره گرمایی در تهران بیشتر در فصل سرد

محسوس است و در تابستان، اگرچه دمای کلی بالاتر است، اما اختلاف دمای بین شهر و مناطق اطراف آن کاهش می‌یابد (شکل ۷).



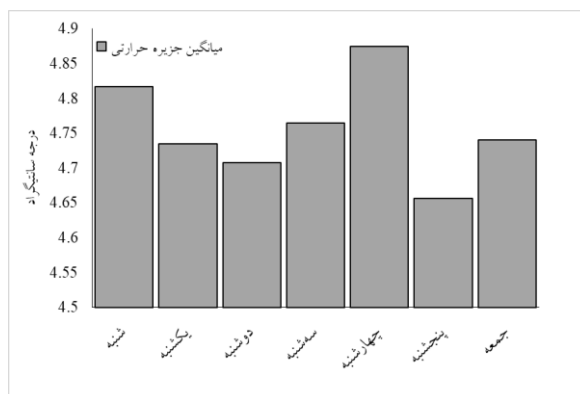
شکل ۶. میانگین شدت جزیره گرمایی شهر تهران در سال‌های مورد مطالعه



شکل ۷. میانگین فصلی دمای شهر تهران و مناطق پیرامونی آن و جزیره گرمایی شهر تهران طی دوره زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲

تغییرات شدت جزیره گرمایی و میانگین دمای شهر تهران و اطراف آن که روند آن در شکل ۸ آمده است نشان می‌دهد میانگین دمای شهر تهران در طول هفته نسبتاً ثابت است. بیشترین میزان اثر جزیره گرمایی شهری در روزهای

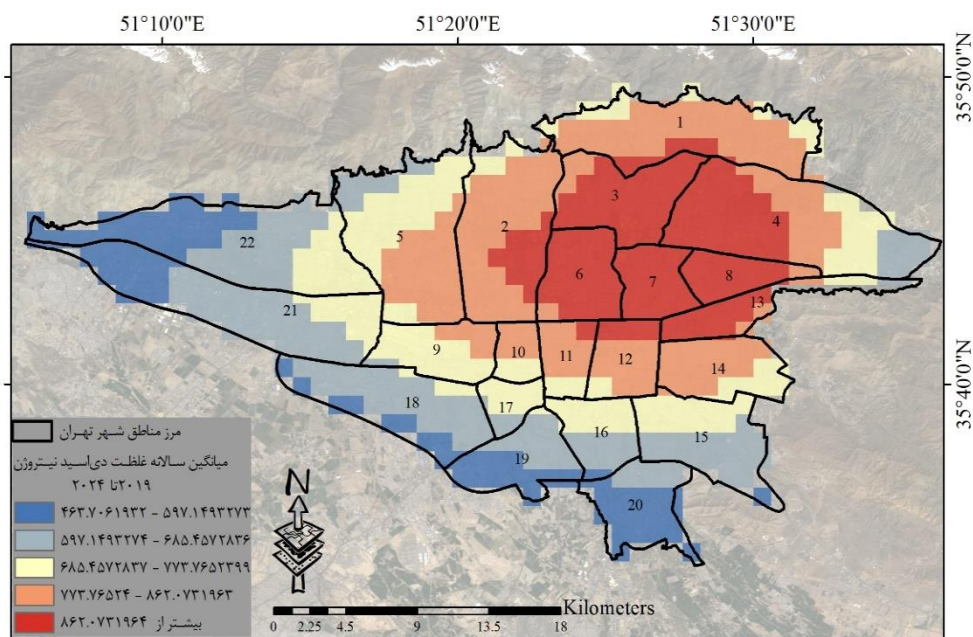
چهارشنبه و شنبه با به ترتیب با ۴/۸۷ و ۴/۸۱ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. در این روزها، میانگین دمای شهر تهران به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از میانگین دمای اطراف شهر تهران است. کمترین میزان جزیره گرمایی نیز در روز پنجشنبه با ۴/۶ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود (شکل ۸).



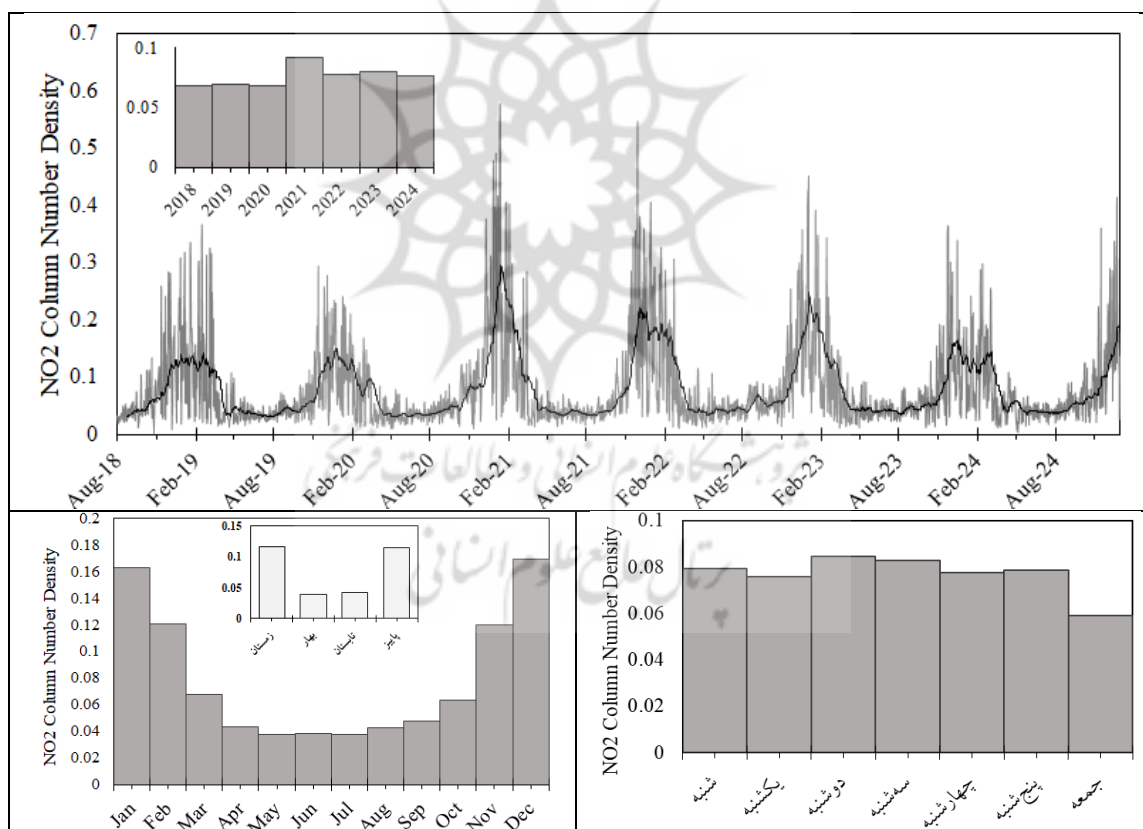
شکل ۸. میانگین روزانه جزیره گرمایی شهر تهران طی دوره زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲

دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)

نتایج بررسی میانگین غلظت دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) در سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که مناطق ۷ و ۸ به ترتیب غلظت بالاتری نسبت به دیگر مناطق دارند و مناطق ۲۰ و ۱۹ به ترتیب غلظت پایین‌تری را دارا هستند (شکل ۹). سری زمانی غلظت NO_2 در شهر تهران طی سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این دوره، نوسانات قابل‌توجهی در میزان NO_2 مشاهده می‌شود. بالاترین میزان NO_2 در سال ۲۰۲۱ ثبت شده است و پایین‌ترین میزان NO_2 در سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ مشاهده شده است البته لازم به ذکر است که داده‌ها برای سال ۲۰۱۸ از ماه هفتم به بعد در دسترس هستند (شکل ۱۰). اوج غلظت NO_2 در سال ۲۰۲۱ ممکن است با همه‌گیری کووید-۱۹ مرتبط باشد. قرنطینه‌ها و کاهش تردد در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ احتمالاً در ابتدا باعث کاهش غلظت NO_2 شدند، اما با ازسرگیری فعالیت‌های اقتصادی و افزایش انتشار آلاینده‌ها، در سال ۲۰۲۱ این آلودگی افزایش یافته است. میزان غلظت NO_2 در ماه‌های دسامبر و ژانویه به بالاترین حد خود می‌رسد (شکل ۱۰) که این افزایش می‌تواند به پدیده وارونگی دما (Inversion) در زمستان مرتبط باشد. در ماه‌های آوریل تا سپتامبر غلظت دی‌اکسید نیتروژن در پایین‌ترین حد خود می‌باشد همچنین غلظت NO_2 در ماه آوریل کمتر از مارس است که می‌تواند به کاهش فعالیت‌های شهری و صنعتی در تعطیلات نوروزی مرتبط باشد (شکل ۱۰).



شکل ۹. میانگین غلظت دی‌اکسید نیتروژن در شهر تهران در سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴



شکل ۱۰. میانگین روزانه غلظت NO₂ در سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴

نتایج حاصل از تحلیل روزانه غلظت NO₂ در شهر تهران در شکل ۱۰ آمده است. نتایج نشان می‌دهد غلظت NO₂ در روزهای دوشنبه تا پنجشنبه در بالاترین سطح قرار دارد که این موضوع می‌تواند ناشی از حجم بالای تردد وسایل نقلیه و فعالیت‌های صنعتی در روزهای کاری باشد. پایین‌ترین میزان آلودگی مربوط به روز جمعه است که روز تعطیل رسمی در

ایران است و مجدد در روز شنبه، غلظت NO_2 افزایش می‌یابد که بیانگر بازگشت فعالیت‌های شهری و صنعتی پس از تعطیلات می‌باشد.

بحث

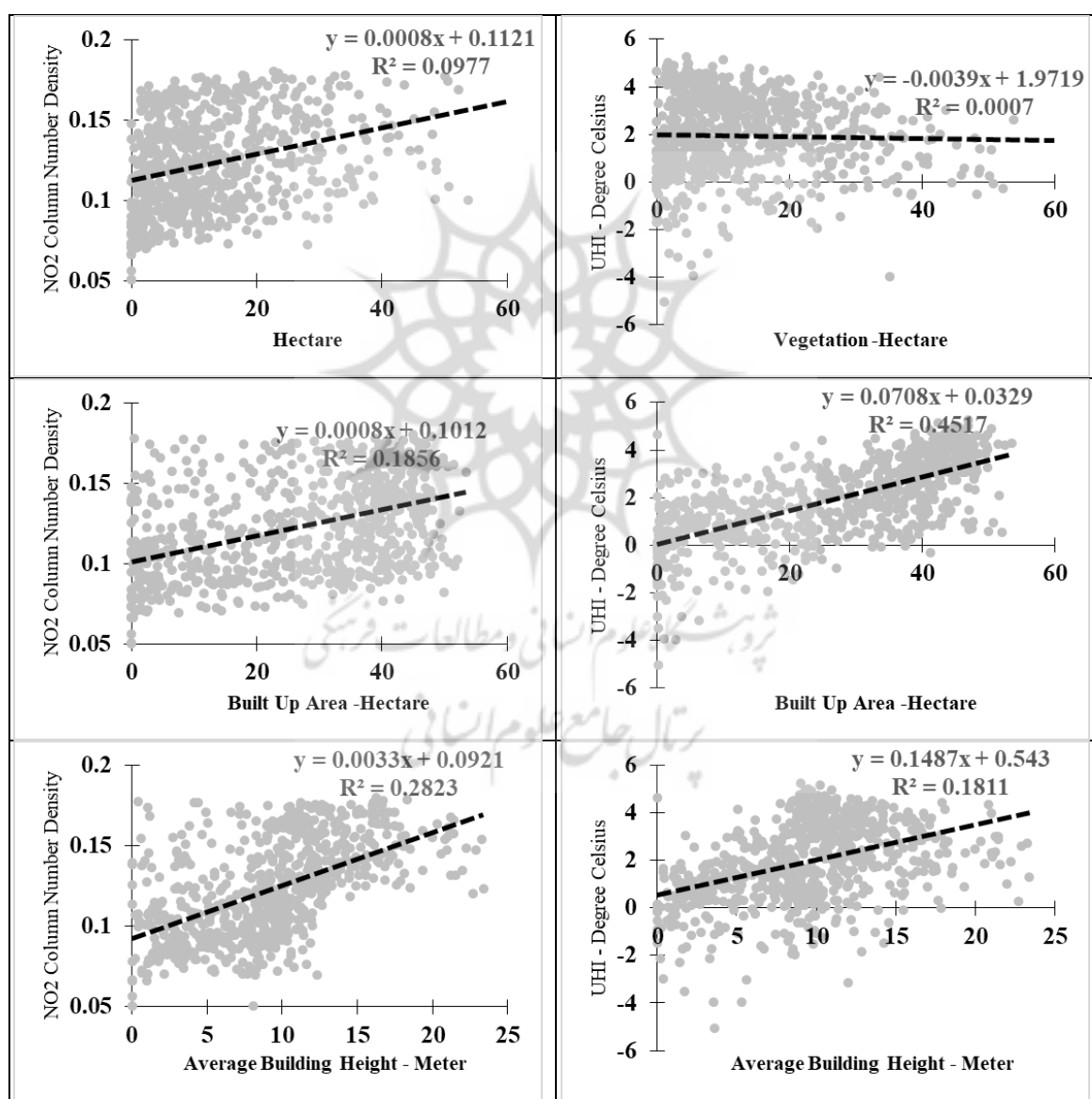
نتایج این پژوهش آشکار می‌سازد که جزیره گرمایی شهر تهران از الگویی فصلی برخوردار است و در فصل زمستان هم‌زمان با افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی شدت می‌گیرد و در تابستان از شدت آن کاسته می‌شود همچنین طی روزهای هفته متأثر از تعطیلی روزهای پنجشنبه و جمعه و متعاقب آن تعطیلی فعالیت‌های صنعتی و انسانی کمترین شدت جزیره گرمایی طی روزهای تعطیل شکل می‌گیرد این نکته نقش فعالیت‌های انسانی در شکل‌گیری جزیره گرمایی شهر را برجسته می‌کند که با نتایج صف‌رادی^۱ و همکاران (۲۰۲۲) هماهنگ است. یافته‌های این پژوهش، رابطه مستقیم و معناداری بین جزیره گرمایی شهر و سطوح ساخته‌شده و ارتفاع ساختمان‌ها در شهر را نشان می‌دهد همچنین مشخص می‌سازد که افزایش سطوح پوشش گیاهی منجر به کاهش اثر جزیره گرمایی در داخل شهر خواهند شد. هرچند ارتباط بین پوشش گیاهی و جزیره گرمایی معنادار نیست ولی ارتباط معکوس آن‌ها قابل توجه است (جدول ۳ و شکل ۱۱) این نتایج با مطالعات رضایی راد^۲ و همکاران (۲۰۲۳) مبنی بر ارتباط مستقیم ارتفاع ساختمان و دمای سطح زمین در شهر تهران هماهنگ است که نتایج تحقیقات ژانگ و وانگ^۳ (۲۰۰۸)، اوگاشاوارا^۴ (۲۰۱۲)، نگرامبه^۵ (۲۰۲۱) و شگرخدایی و همکاران (۱۴۰۲) نیز این موضوع را تأیید می‌کنند. طبق یافته‌های این تحقیق و یافته‌های باکارمان و چانگ^۶ (۲۰۱۵)، شی^۷ و همکاران (۲۰۲۱) و رحمانی و شریفی^۸ (۲۰۲۵) ارتفاع ساختمان‌ها با جزیره گرمایی رابطه مثبت دارد و به‌طوری‌که با افزایش ارتفاع ساختمان‌ها میزان جزیره گرمایی نیز بیشتر می‌شود. این نتایج تأیید می‌کنند که طراحی‌های فشرده و ساختمان‌های بلند در طول روز سایه ایجاد می‌کنند اما در شب گرما را به دام می‌اندازند که منجر به افزایش دما خواهند شد همچنین با نتایج Kim و همکاران (۲۰۲۵) که نشان دادند ترکیب بلندمرتبه‌سازی و پوشش گیاهی منجر به کاهش 0.94°C درجه سانتی‌گراد در دمای هوا می‌شود، هماهنگ است و از طرفی این نتایج با نتایج Wang, M., & Xu, H (۲۰۲۱)، که با بررسی تأثیر ارتفاع ساختمان بر دمای سطح زمین (LST) در شش کلان‌شهر چین، یک همبستگی لگاریتمی منفی معنادار بین ارتفاع ساختمان و LST پیدا کردند ناسازگار است. ارتباط معکوس بین پوشش گیاهی و جزیره حرارتی شهر در مطالعات پیشین مانند گروور^۹ و سینق^{۱۰} (۲۰۱۵) و فیض‌الله پور (۱۴۰۲) نیز تأیید شده بود.

1. safarrad
2. Rezaei Rad
3. Zhang and Wang
4. Ogashawara
5. Ngarambe
6. Bakmaran and chang
7. Xi
8. Rahmani and sharifi
9. Grover
10. Singh

جدول ۳. نتایج ضریب همبستگی پیرسون بین کالبد شهر با جزیره گرمایی و غلظت NO_2

		NO_2	UHI
سطوح ساخته شده	ضریب همبستگی	.431**	.672**
	Sig	0.00	0.00
	تعداد	728	728
ارتفاع ساختمان	ضریب همبستگی	.531**	.426**
	Sig	0.00	0.00
	تعداد	728	728
پوشش گیاهی	ضریب همبستگی	.313**	-0.027
	Sig	0.00	0.47
	تعداد	728	728

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).



شکل ۱۱. نمودار پراکنش داده‌های کالبد شهر نسبت به جزیره گرمایی

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش آشکار کرد که بین میزان ساخت‌وساز (مناطق ساخته‌شده) و ارتفاع ساختمان‌ها با شدت جزیره گرمایی (UHI) در تهران، ارتباط مستقیم و معناداری وجود دارد. زیرا، تبدیل سطوح طبیعی و غالباً نفوذپذیر به سطوح غیرقابل نفوذ مانند آسفالت و بتن، باعث کاهش تبخیر-تعرق و افزایش جذب و نگهداری گرما در سطح می‌شود (ما و پنگ^۱، ۲۰۲۱) و استفاده از مصالحی مانند بتن و آسفالت که دارای ضریب جذب بالای تابش خورشیدی هستند باعث افزایش دمای سطحی و تشدید UHI می‌گردد (ووچویچ^۲ و همکاران، ۲۰۲۱)، از طرف دیگر، افزایش ارتفاع ساختمان‌ها نیز می‌تواند جریان هوا را در سطح خیابان‌ها کاهش داده و از تهویه طبیعی جلوگیری کند. این امر سبب تجمع گرما در فضاهای شهری و افزایش شدت UHI می‌شود (شی^۳ و همکاران، ۲۰۲۳).

انتشار NO₂ در شهر تهران همانند جزیره گرمایی شهر از الگوی فصلی تبعیت می‌کند و در فصل زمستان با افزایش فعالیت‌های شهری افزایش می‌یابد و طی تابستان کاهش می‌یابد، نتایج حاصل از بررسی ارتباط بین هریک از متغیرهای سطوح ساخته‌شده، ارتفاع ساختمان‌ها و پوشش گیاهی با غلظت NO₂ آشکار می‌سازد که یک ارتباط قوی و مستقیم بین آن‌ها برقرار است (جدول ۳ و شکل ۱۱) به‌طوری‌که افزایش تراکم ساختمانی در یک منطقه با افزایش غلظت NO₂ در هوای آن منطقه مرتبط است. دلیل این امر آن است که گسترش سطوح ساخته‌شده و افزایش ارتفاع ساختمان‌ها معمولاً با تراکم بیشتر جمعیت، افزایش فعالیت‌های انسانی، مصرف انرژی و حجم بالاتر ترافیک همراه است که همگی به‌طور مستقیم در افزایش آلاینده‌هایی مانند NO₂ نقش دارند. مطالعات پیشین همانند وی^۴ و همکاران (۲۰۲۴)، بکل^۵ و همکاران (۲۰۱۱) نیز به ارتباط بین تراکم شهری و آلودگی هوا اشاره کرده‌اند. به‌طور کلی پذیرفته‌شده است که پوشش گیاهی شهری کیفیت هوا را بهبود می‌بخشد و نتایج تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که پارک‌ها در مناطق شهری به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای سطوح NO₂ کمتری نسبت به مناطق مجاور و نزدیک ترافیک دارند (Klingberg و همکاران ۲۰۱۷). باین‌حال، شواهد حاصل از نتایج این پژوهش در مورد پتانسیل پوشش گیاهی شهری برای کاهش آلودگی هوا صادق نیست و ارتباط مستقیم و معنادار بین پوشش گیاهی و غلظت NO₂ نشان‌دهنده افزایش غلظت NO₂ در مناطقی است که بیشترین مقادیر پوشش گیاهی را دارند این مهم به این دلیل رخ داده است که توپوگرافی (محصور بودن شمال، شمال شرق و شرق تهران) و جهت باد غالب (باد غربی و جنوب غربی) منجر به تمرکز آلاینده‌ها به‌ویژه NO₂ در مناطق شرقی و شمال شرقی شهر شده است که مناطق با بیشترین مساحت پوشش گیاهی هستند بنابراین این هم‌زمانی سبب رابطه فوق شده است که با نتایج Setälä و همکاران (۲۰۱۳) مبنی بر عدم توانایی پوشش گیاهی شهری در حذف آلاینده‌های هوا و همچنین عدم تأثیرگذاری متغیرهای محیطی مرتبط با پوشش گیاهی بر سطوح آلودگی هوا هماهنگ است.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

1. Ma & Peng
2. Vujovic
3. Shi
4. Wei
5. Bechle

تضاد و منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- آروین، عباسعلی. (۱۳۹۷). بررسی جزیره گرمایی در ارتباط با آلودگی هوا در شهر اصفهان. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۷(۱)، ۱۲۹-۱۱۵. <https://doi.org/10.22067/geo.v7i1.64590>
- شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ مهدیان ماه فروزی، مجتبی؛ اخوان، هانیه و حسین پور، زینب. (۱۳۹۱). واکاوی رفتار روزانه جزیره گرمایی شهر تهران. *محیط‌شناسی*، ۳۸(۶۳)، ۴۵-۵۶. doi: 10.22059/jes.2013.298
- صفراد، طاهر. (۱۴۰۰). تحلیل تغییرات زمانی شدت جزیره گرمایی شبانه شهر تهران. *پژوهش‌های تغییرات اقلیمی*، ۲(۸)، ۵۵-۶۵. doi: 10.30488/ccr.2021.319317.106,
- صلاحی، برومند؛ فروتن، مهدی و پاسبان، امیر حسام. (۱۴۰۳). واکاوی ارتباط آلودگی‌های مناطق شهری با جزایر حرارتی شهرستان اردبیل. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۴۶(۴)، ۹۵۴-۹۴۰. doi: 10.22034/gahr.2024.445528.2058
- عزیزی، قاسم؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ مهدیان ماه فروزی، مجتبی و میری، مرتضی. (۱۳۹۲). تأثیرپذیری شدت جزیره گرمایی شهری تهران از الگوهای همدیدی جو. *محیط‌شناسی*، ۳۹(۴)، ۶۵-۵۵. doi: 10.22059/jes.2014.36462
- فلاحی، فرشاد؛ حیدری سورشجانی، رسول و گنجی، محمد. (۱۴۰۲). تأثیر کالبد شهری بر فرهنگ شهروندی با رویکرد توسعه پایدار شهری در شهرهای کاشان و یاسوج. *جغرافیای اجتماعی شهری*، ۱۰(۱)، ۱۲۴-۱۰۳. doi: 10.22103/JUSG.2023.2091
- فیض‌اله پور، مهدی. (۱۴۰۲). برآورد دمای سطح زمین (LST) و مقایسه آن با شاخص‌های NDMI، NDWI و NDVI به منظور بررسی تنش آبی با تأکید بر تغییرات کاربری اراضی (LULC) در سیستم ماشین بردار پشتیبانی (SVM) منطقه مورد مطالعه: تالاب انزلی. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۰(۲)، ۱۴۸-۱۳۱. <http://dx.doi.org/10.61186/jsaeh.10.2.131>
- مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵
- مسعودیان، سید ابوالفضل و منتظری، مجید. (۱۳۹۹). رفتار زمانی - مکانی جزیره گرمایی کلان‌شهر اصفهان. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۹(۲۴)، ۴۶-۳۵. <https://doi.org/10.22111/jneh.2019.28437.1493>
- نوربخش، مهرداد و نظری‌نژاد، امیر. (۱۴۰۱). بررسی ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI با دمای سطح زمین در شهر تهران. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۱(۵)، ۲۳۶-۲۲۵. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453851.1401.5.1.12.1>

References

- Arvin, A. (2018). Investigation of the urban heat island in relation to air pollution in Isfahan city. *Geography and Environmental Hazards*, 7(1), 115-129. <https://doi.org/10.22067/geo.v7i1.64590> [In Persian]
- Azizi, Q., Shamsipour, A. A., Mahdian Mahfrozi, M., & Miri, M. (2013). The influence of synoptic atmospheric patterns on the intensity of the urban heat island in Tehran. *Journal of Environmental Studies*, 39(4), 55-66. <https://doi.org/10.22059/jes.2014.36462> [In Persian]
- Bechle, M. J., Millet, D. B., & Marshall, J. D. (2011). Effects of income and urban form on urban NO₂: Global evidence from satellites. *Environmental Science & Technology*, 45(11), 4914-4919. <https://doi.org/10.1021/es103866b>
- Budzik, G., Sylla, M., & Kowalczyk, T. (2025). Understanding urban cooling of blue-green infrastructure: A review of spatial data and sustainable planning optimization methods for

- mitigating urban heat islands. *Sustainability*, 17(1), 142. <https://doi.org/10.3390/su17010142>
- Das, M., & Das, A. (2020). Assessing the relationship between local climatic zones (LCZs) and land surface temperature (LST): A case study of Sriniketan–Santiniketan Planning Area (SSPA), West Bengal, India. *Urban Climate*, 32, 100591. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100591>
- Fallahati, F., Heydari Sureshjani, R., & Ganji, M. (2023). The impact of urban form on civic culture with a sustainable urban development approach in Kashan and Yasuj. *Urban Social Geography*, 10(1), 103–124. <https://doi.org/10.22103/JUSG.2023.2091> [In Persian]
- Fayzollahpour, M. (2023). Estimation of land surface temperature (LST) and its comparison with NDMI, NDWI, and NDVI indices to assess water stress using support vector machine (SVM) with emphasis on land use/land cover changes (Case study: Anzali Wetland). *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 10(2), 131–148. <http://dx.doi.org/10.61186/jsach.10.2.131> [In Persian]
- Grover, A., & Singh, R. B. (2015). Analysis of urban heat island (UHI) in relation to normalized difference vegetation index (NDVI): A comparative study of Delhi and Mumbai. *Environments*, 2(2), 125–138. <https://doi.org/10.3390/environments2020125>
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge University Press.
- Iran Statistical Center. (2016). *National population and housing census*. (In Persian)
- Kim, J., Yeom, S., & Hong, T. (2025). Analyzing the cooling effect, thermal comfort, and energy consumption of integrated arrangement of high-rise buildings and green spaces on urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 119, 106105. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106105>
- Li, S., Xu, L., Jing, Y., Yin, H., Li, X., & Guan, X. (2021). High-quality vegetation index product generation: A review of NDVI time series reconstruction techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 105, 102640. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102640>
- Lowry, W. P., & Lowry, P. P. II. (2001). *Fundamentals of biometeorology: Interactions of organisms and the atmosphere* (Vol. 2). Peavine.
- Masoudian, S. A., & Montazeri, M. (2020). Spatio-temporal behavior of the urban heat island in the metropolitan area of Isfahan. *Natural Environment Hazards*, 9(24), 35–46. <https://doi.org/10.22111/jneh.2019.28437.1493> [In Persian]
- Ma, X., & Peng, S. (2021). Assessing the quantitative relationships between impervious surface area and surface heat island effect during urban expansion. *PeerJ*, 9, e11854. <https://doi.org/10.7717/peerj.11854>
- National Center for Biotechnology Information. (n.d.). *Exposure to nitrogen dioxide: Assessment and health consequences*. National Library of Medicine.
- Ngarambe, J., Joen, S. J., Han, C.-H., & Yun, G. Y. (2021). Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO₂, NO₂, O₃ and urban heat island in Seoul, Korea. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123615. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123615>
- Norbakhsh, M., & Nazari-Nejad, A. (2022). Investigating the relationship between NDVI and EVI vegetation indices and land surface temperature in Tehran. *Geography and Human Relations*, 5(1), 225–236. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453851.1401.5.1.12.1> [In Persian]
- Ogashawara, I., & Bastos, V. D. S. B. (2012). A quantitative approach for analyzing the relationship between urban heat islands and land cover. *Remote Sensing*, 4(11), 3596–3618. <https://doi.org/10.3390/rs4113596>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Pesaresi, M., Schiavina, M., Politis, P., Freire, S., Krasnodebska, K., Uhl, J. H., et al. (2024). Advances on the global human settlement layer by joint assessment of Earth observation and population survey data. *International Journal of Digital Earth*, 17(1). <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2390454>
- Rad, H. R., Khodaei, Z., & Ghiai, M. M. (2023). The impact of building height on microclimate characteristics of urban open spaces (Case study: Narmak neighborhood). *International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning*, 33(4). <https://doi.org/10.22068/ijaup.779>
- Rahmani, N., & Sharifi, A. (2025). Urban heat dynamics in local climate zones (LCZs): A

- systematic review. *Building and Environment*, 267(Part B), 112225. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112225>
- Safarrad, T. (2021). Temporal analysis of nocturnal urban heat island intensity in Tehran. *Climate Change Research*, 2(8), 55–65. <https://doi.org/10.30488/ccr.2021.319317.106> [In Persian]
- Safarrad, T., Ghadami, M., & Dittmann, A. (2022). Effects of COVID-19 restriction policies on urban heat islands in some European cities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(11), 6579. <https://doi.org/10.3390/ijerph19116579>
- Salahi, B., Foroutan, M., & Pasban, A. H. (2024). Investigating the relationship between urban air pollution and heat islands in Ardabil County. *Geography and Human Relations*, 6(4), 940–954. <https://doi.org/10.22034/gahr.2024.445528.2058> [In Persian]
- Setälä, H., Viippola, V., Rantalainen, A. L., Pennanen, A., & Yli-Pelkonen, V. (2013). Does urban vegetation mitigate air pollution in northern conditions?. *Environmental Pollution*, 183, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.11.010>
- Shamsipour, A. A., Mahdian Mahfrozi, M., Akhavan, H., & Hosseinpour, Z. (2013). Analysis of the daily behavior of Tehran's urban heat island. *Journal of Environmental Studies*, 38. <https://doi.org/10.22059/jes.2013.29862> [In Persian]
- Shi, Z., Li, X., Hu, T., Yuan, B., Yin, P., & Jiang, D. (2023). Modeling the intensity of surface urban heat island based on impervious surface area. *Urban Climate*, 49, 101529. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101529>
- Shikwambana, L., Mhangara, P., & Mbatha, N. (2020). Trend analysis and first-time observations of sulphur dioxide and nitrogen dioxide in South Africa using TROPOMI/Sentinel-5P data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91, 102130. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102130>
- Vujovic, S., Haddad, B., Karaky, H., Sebaibi, N., & Boutouil, M. (2021). Urban heat island: Causes, consequences, and mitigation measures with emphasis on reflective and permeable pavements. *CivilEng*, 2(2), 459–484. <https://doi.org/10.3390/civileng2020026>
- Wang, M., & Xu, H. (2021). The impact of building height on urban thermal environment in summer. *PLOS ONE*, 16(4), e0247786. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247786>
- Wei, Y., Lemoy, R., & Caruso, G. (2024). The effect of population size on urban heat island and NO₂ air pollution. *City and Environment Interactions*, 24, 100161. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2024.100161>
- Xi, C., Ren, C., Wang, J., Feng, Z., & Cao, S.-J. (2021). Impacts of urban-scale building height diversity on urban climates. *Energy and Buildings*, 251, 111350. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111350>
- Xi, Z., Li, C., Zhou, L., Yang, H., & Burghardt, R. (2023). Built environment influences on urban climate resilience. *Science of the Total Environment*, 859(Part 2), 160270. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160270>
- Zargari, M., Mofidi, A., & Entezari, A., (2024). Climatic comparison of surface urban heat island using satellite remote sensing in Tehran and suburbs. *Scientific Reports*, 14, 643. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50757-2>
- Zhang, J., & Wang, Y. (2008). Relationships between the spatial extent of surface urban heat islands and urban characteristics. *Sensors*, 8(11), 7453–7468. <https://doi.org/10.3390/s8117453>
- Zhao, J., Chen, G., Yu, L., Ren, C., Xie, J., Chung, L., et al. (2023). Mapping urban morphology changes based on the local climate zone scheme. *Urban Climate*, 47, 101391. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101391>
- Zheng, S., Chen, X., & Liu, Y. (2023). Impact of urban renewal on urban heat island: Study of renewal processes and thermal effects. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104995. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104995>