

GES	Journal of Geography and Environmental Studies, 13 (52), Winter 2024 https://sanad.iau.ir/journal/ges ISSN: 2008-7845 Doi: 10.71740/ges.2024.1106223
-----	--

Research Paper

Received: 04 June 2024

Revised: 31 August 2024

Accepted: 11 November 2024

Evaluating the Relationship between Heat Island and Atmospheric Pollutants (Case Study: Tehran Metropolis)

Bromand Salahi^{1*}, Mahdi Frotan²

1. Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Email: Salahi@uma.ac.ir

2. Ph.D. Student of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Abstract

An urban heat island is an area where the temperature has increased significantly and has many negative consequences. This study aimed to investigate the relationship between the heat island of Tehran and atmospheric pollutants in the period 2019 to 2024. To display the heat island, land surface temperature data from the MODIS Terra satellite was used on the Google Earth Engine platform. In this context, the land use status of the study area was also analyzed, and the NDVI index was calculated using Landsat 8 satellite images to obtain a view of the vegetation status of the area. Then, the status of atmospheric pollutants affecting the intensity and spread of the heat island, including water vapor, sulfur dioxide, nitrogen dioxide, methane, ozone, and aerosol optical depth, was extracted and processed from Sentinel 5 satellite data. In order to evaluate the relationship of these variables with land surface temperature, the coefficient of determination and correlation were calculated for 500 random points. The results showed that the average surface temperature of the earth increased from west to east of Tehran, and a heat halo with an average temperature of over 16 degrees Celsius has formed in the center and southeast of the city. The high density of residential areas and pollution from transportation in the eastern and southern areas are the main factors in the formation and intensification of this phenomenon. Among the factors studied, water vapor, with a positive and significant correlation coefficient of 0.648, had the greatest impact on the increase in local temperature, and sulfur dioxide and nitrogen dioxide also showed significant effects on temperature. In contrast, vegetation played an important role in moderating temperature. Also, the study of other pollutants such as aerosols, methane, and ozone showed that these gases have a lesser impact on local temperature.

Keywords: NDVI Index, Pollutants, Tehran City, Urban Heat Islands.

Citation: Salahi, B.; Frotan, M. (2024), Evaluating the Relationship between Heat Island and Atmospheric Pollutants (Case Study: Tehran Metropolis), Journal of Geography and Environmental Studies, 13 (52), 18-31. Doi: 10.71740/ges.2024.1106223

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open – access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



ارزیابی رابطه بین جزیره گرمایی با عناصر آلاینده جوی (مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران)

برومند صلاحی^{۱*}، مهدی فروتن^۲

۱. استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

چکیده

جزیره حرارتی شهری به منطقه‌ای اطلاق می‌شود که در آن دما به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و پیامدهای منفی فراوانی به همراه دارد. این پژوهش با هدف بررسی رابطه بین جزیره گرمایی شهر تهران با عناصر آلاینده جوی در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ انجام شده است. برای نمایش جزیره حرارتی، از داده‌های دمای سطح زمین ماهواره مودیس ترا در پلتفرم گوگل ارث انجین بهره گرفته شد. در این بستر، وضعیت کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه نیز تحلیل گردید و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، شاخص NDVI محاسبه شد تا نمایی از وضعیت پوشش گیاهی منطقه به‌دست آید. سپس، وضعیت آلاینده‌های جوی مؤثر بر شدت و گسترش جزیره حرارتی، شامل بخار آب، دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن، متان، ازن و عمق نوری آتروسول، از داده‌های ماهواره سنتینل ۵ استخراج و پردازش شد. به‌منظور ارزیابی ارتباط این متغیرها با دمای سطح زمین، ضریب تعیین و همبستگی برای ۵۰۰ نقطه تصادفی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که میانگین دمای سطح زمین از غرب به شرق تهران افزایش یافته و در مرکز و جنوب شرقی شهر، هاله حرارتی با میانگین دمای بالای ۱۶ درجه سانتی‌گراد شکل گرفته است. تراکم بالای مناطق مسکونی و آلودگی ناشی از حمل‌ونقل در نواحی شرقی و جنوبی، از عوامل اصلی شکل‌گیری و تشدید این پدیده به‌شمار می‌آیند. از میان عوامل مورد بررسی، بخار آب با ضریب همبستگی مثبت و معنادار ۰/۶۴۸ بیشترین تأثیر را بر افزایش دمای محلی داشته و دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن نیز تأثیرات قابل توجهی بر دما نشان داده‌اند. در مقابل، پوشش گیاهی نقش مهمی در تعدیل دما ایفا کرده است. همچنین بررسی سایر آلاینده‌ها همچون آتروسول، متان و ازن نشان داد که این گازها تأثیر کمتری بر دمای محلی دارند.

کلمات کلیدی: آلاینده‌ها، جزیره حرارتی، شاخص NDVI، شهر تهران.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

نویسنده مسئول: برومند صلاحی، استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

Salahi@uma.ac.ir

نحوه ارجاع به مقاله:

صلاحی، برومند؛ فروتن، مهدی (۱۴۰۳)، ارزیابی رابطه بین جزیره گرمایی با عناصر آلاینده جوی (مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران)، فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، ۱۳

Doi: 10.71740/ges.2024.1106223. ۱۸-۳۱، (۵۲)

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Journal of Geography and Environmental Studies. This is an open – access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



مقدمه

مفهوم «جزیره گرمایی» شهری از سال ۱۸۲۰ توسط لوک‌هاوارد شناخته شد، وی برای اولین بار این پدیده را برای لندن با مقایسه ساده دو ردیف از داده‌های دمای هوای T در داخل و خارج شهر کشف کرد. درواقع، هر شهر و حتی هر روستای کوچکی تقریباً در همه جا «جزیره گرمایی» خود را ایجاد می‌کند (لوکوشچونکو، ۲۰۱۴: ۵۵۲). مناطق شهری بر آب و هوا و هوای محلی و منطقه‌ای تأثیر می‌گذارند. شناخته‌شده‌ترین پدیده در محیط‌های شهری جزیره گرمایی شهری است. به‌طور کلی، با رشد شهر شدت جزیره گرمایی افزایش می‌یابد و روند دما را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (برندسما و ولترز، ۲۰۱۲: ۱۰۴۶). جزیره گرمای شهری (UHI) یک پدیده رایج در سراسر جهان است که دمای بالای مناطق شهری را در مقایسه با محیط اطرافشان توصیف می‌کند. به‌طور خاص، امواج گرما در دهه‌های گذشته پایدارتر و مکررتر مشاهده شده‌اند و پیش‌بینی می‌شود در آینده نیز تشدید شوند. علاوه بر این، امواج گرما استرس مضاعفی را بر شهرها وارد می‌کنند و نگرانی‌های جدی را در مورد رفاه عمومی و تهدیدات بالقوه برای سلامت انسان ایجاد می‌کنند که به نوبه خود نیازمند اقدامات سازگاری مؤثر برای کاهش UHI است. شدت UHI یک شهر تابع معیارهای تجربی و شاخص‌های مورد استفاده برای کمی‌سازی پدیده است. از سوی دیگر، هنگام تجزیه و تحلیل ماهیت فیزیکی آن، عوامل مختلفی تعیین می‌شود که می‌توان آن‌ها را به عوامل خارجی و داخلی طبقه‌بندی کرد. عوامل خارجی شامل موقعیت مکانی، آب و هوای پس‌زمینه (به‌ویژه باد)، نزدیکی به مسیرهای آب (مرتبط با گردش نسیم دریا یا دریاچه) و غیره است در حالی که عوامل داخلی نظیر اندازه شهر، پوشش زمین، انتشار گرمای انسانی و ... علیرغم این که از نتایج شهرنشینی طولانی‌مدت هستند، می‌توانند تغییر شکل دهند (ژو و همکاران، ۲۰۱۷: ۲). گرمای بیش از حد در مناطق شهری می‌تواند به‌طور قابل توجهی در نتیجه اثر UHI تشدید شود. در طول موج گرما، نرخ مرگ‌ومیر در شهرها اغلب بسیار بیش‌تر از محیط‌های روستایی است. افزایش دمای هوا در مناطق شهری همچنین می‌تواند چرخه‌های شیمیایی اتمسفر را تسریع بخشد و منجر به افزایش غلظت ازن در سطح زمین شود. بدتر شدن کیفیت هوا منجر به بروز بیش‌تر بیماری‌های تنفسی می‌شود که یکی دیگر از اثرات نامطلوب اثر UHI بر سلامت عمومی است (جیناروس و ملاس، ۲۰۱۲: ۱۰۴). در مورد جزیره گرمایی شهری مطالعات متعددی در سطح جهان انجام گرفته است. سیمواندا و همکاران (۲۰۱۹)، رابطه بین دمای سطح زمین (LST^۱) و الگوهای فضایی، ترکیب و پیکربندی سطوح غیرقابل نفوذ و فضاها را در چهار شهر آفریقایی، لاگوس (نیجریه)، نایروبی (کنیا)، آدیس آبابا (اتیوپی) و لوزاکا (زامبیا) بررسی نمودند و به این نتیجه دست یافتند که همبستگی قوی قابل توجهی بین میانگین LST و تراکم سطح غیرقابل نفوذ (مثبت) و فضای سبز (منفی) در امتداد شیب شهری-روستایی چهار شهر آفریقایی وجود دارد. آن‌ها هم‌چنین بیان داشتند شهرهایی که درصد بیشتری از سطح غیرقابل نفوذ داشتند، ۳ تا ۴ درجه سانتی‌گراد گرم‌تر بودند و بالعکس. ریزوی و همکاران (۲۰۱۹)، تغییرات مکانی-زمانی در جزیره گرمایی شهری و تعامل آن با موج گرما را در کلان‌شهر کراچی با استفاده از مشاهدات دمای ساعتی برای یک دوره ۱۰ ساله در دو فاز (الف) از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲ (ب) از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶ مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد در سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۰۱، حداکثر شدت جزیره گرمایی شهری (UHI) برای زمان شب در تابستان ۱/۹ درجه سانتی‌گراد بوده در حالی که در مرحله دوم (۲۰۱۶-۲۰۱۲)، ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. سانجیورجو و همکاران (۲۰۲۰)، در یک مطالعه جامع، تأثیر پارامترهای متعددی را در UHI کمی‌سازی نمودند. آن‌ها از یک شاخص جدید با هدف کمی کردن خطر حداکثر مطلق شدت UHI در مناطق شهری در طول فصل تابستان با در نظر گرفتن تمام پارامترهای مؤثر بر این پدیده چنین نتیجه گرفتند که آلودگی شهر و وجود فضای سبز به ترتیب با تأثیر ۲۹ درصد و ۲۱ درصد مهم‌ترین تأثیر را بر UHI داشته و در وهله بعد، تراکم جمعیت، عرض خیابان‌ها، جهت دره و ارتفاع ساختمان به ترتیب ۱۲، ۱۰، ۹ و ۸ درصد تأثیر متوسط داشته‌اند. دوان و

1- Urban Heat Island

2- Land Surface Temperature

همکاران (۲۰۲۱)، شدت جزیره گرمایی شهری در پنج شهر بزرگ بنگلادش را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از داده‌های LST روز و شب ماهواره مودیس برای دوره ۲۰۱۹-۲۰۰۰ برای تولید اطلاعات پایه در مورد شدت SUHI^۱ استفاده نمودند و چنین نتیجه گرفتند که SUHI سالانه در شهرهای بزرگ‌تر داکا و چیتاگونگ بیش‌تر از شهرهای کوچک‌تر بوده است. SUHI مشاهده شده در روز نیز بیش‌تر از شب بوده است. آن‌ها هم چنین بیان داشتند جمعیت (از نظر اندازه شهر و پوشش سطح)، عدم سرسبزی و نیروی انسانی عوامل اصلی مؤثر بر SUHI بودند. مورایتو و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی پدیده SUHI در طول روز تابستان و نقش سطوح غیرقابل نفوذ و پوشش درختی در ۱۰ کلان‌شهر شبه‌جزیره ایتالیا پرداختند و مقادیر LST در طول روز تابستان را با استفاده از داده‌های MODIS مربوط به ماه‌های ژوئن، ژوئیه و آگوست از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ ارزیابی نمودند نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد شدیدترین پدیده SUHI در تورین (بزرگ‌ترین کلان‌شهر ایتالیا) بوده و به ازای هر ۱۰ درصد افزایش در مناطقی با سطوح غیرقابل نفوذ و تراکم پوشش درختی کم در هسته کلان‌شهر، SUHI به‌طور قابل توجهی ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. ماراندو و همکاران (۲۰۲۲)، در مطالعه‌ی کاهش جزیره گرمایی شهری با زیرساخت سبز در مناطق شهری کاربردی اروپا مدلی را ارائه نمودند که تفاوت دما را بین یک سناریوی پایه و یک سناریوی بدون پوشش گیاهی شبیه‌سازی نموده و نقش زیرساخت پوشش گیاهی (UGI^۲) را در کاهش UHI در بافت‌های مختلف شهری برون‌یابی می‌کند. نتایج نشان داد UGI شهرهای اروپایی را به‌طور متوسط ۱/۰۷ تا ۲/۰۹ درجه سانتی‌گراد خنک می‌کند، اما برای دستیابی به کاهش ۱ درجه سانتی‌گراد در دمای شهری، پوشش درخت حداقل ۱۶ درصدی مورد نیاز است.

در ایران نیز احمدی و داداشی رودباری (۱۳۹۶) به شناسایی مناطق بحرانی زیست‌محیطی جزایر حرارتی شهری اصفهان پرداختند. آن‌ها پس از بررسی دمای سطح زمین (LST) و شاخص تفاضل نرمال‌شده گیاهی (NDVI^۳) برای دوره‌های گرم سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ برای شناسایی مناطق حساس از شاخص قیاسی وضع بحرانی زیست‌محیطی (ECI^۴) بهره بردند و به این نتیجه دست یافتند که بیش‌ترین حساسیت زیست‌محیطی در مناطق جنوبی شهر (منطقه ۶ شهری) و کم‌ترین حساسیت زیست‌محیطی نیز در مرکز شهر (مناطق ۱ تا ۳ شهری) بوده است. محمودزاده و همکاران (۱۳۹۷)، تأثیر کاربری‌های شهر مشهد را در ایجاد جزایر حرارتی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نقشه طبقات حرارتی شهر مشهد را با استفاده از داده‌های OLI^۵ و TIRS^۶ ماهواره لندست ۸ و با بهره‌گیری از الگوریتم دو پنجره بر اساس مقدار دمای سطح زمین و مقدار کسر پوشش گیاهی سطح، محاسبه نمودند و چنین نتیجه گرفتند که منطقه ۶ شهر مشهد بیش‌ترین دما و کم‌ترین فضای سبز و منطقه ۱۲ کم‌ترین دما و بیش‌ترین فضای سبز را دارد. حلبیان و سلطانی (۱۳۹۹)، به شناسایی پهنه‌های بحرانی زیست‌محیطی جزایر حرارتی شهری و ارزیابی تغییرات فضایی-زمانی جزایر گرمایی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی در شیراز پرداختند و چنین نتیجه گرفتند که اراضی بایر پیرامون شهر شیراز و مناطق مسکونی شهری به‌صورت پیوسته و متراکم دارای بیش‌ترین دما هستند و در عین حال، عکس این حالت برای مناطق با پوشش گیاهی دیده می‌شود. کاربری اراضی نیز نشان داد که کاهش اراضی بایر و پوشش گیاهی و تبدیل آن‌ها به مناطق شهری، بر گستره جزیره حرارتی شهری شیراز افزوده است.

فدایی (۱۳۹۹)، جزایر گرمایی شهر تهران را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مورد مطالعه قرار داد. ایشان پس از بررسی درجه حرارت زمین (LST) به محاسبه شاخص پوشش گیاهی NDVI نیز پرداخت و بیان داشت که مناطق با پوشش گیاهی کم و خاک لخت بیش‌ترین درجه حرارت زمین (LST) را داشته است. بیش‌ترین منطقه تحت تأثیر جزایر گرمایی شهری هم مربوط به بزرگراه

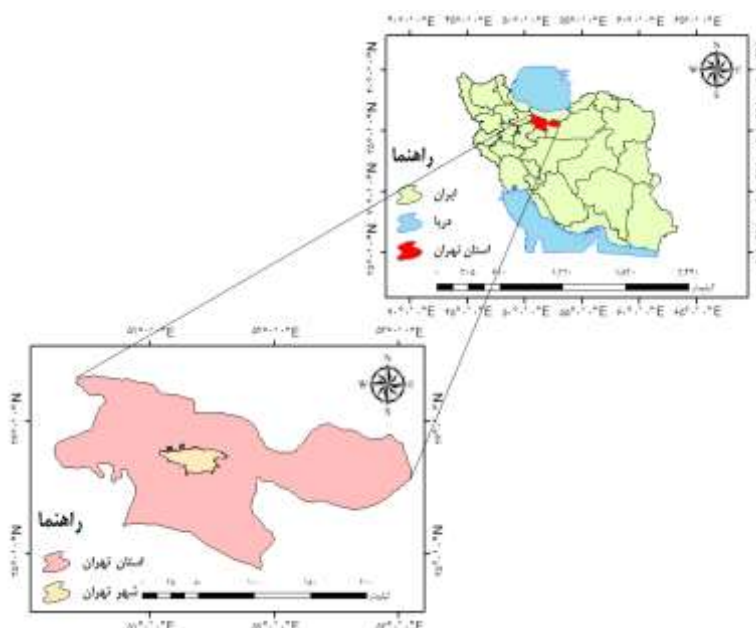
1- Sub Urban Heat Island
2- Urban Green Infrastructure
3- Normalized Difference Vegetation Index
4- Environmental Criticality Index
5- Operational Land Imager
6- Thermal Infrared Sensor

امام علی (ع) بوده که بیش‌ترین حجم ترافیک را داشته است اما مناطقی که آلودگی کم‌تر داشته‌اند در ایجاد جزایر گرمای شهری در حدود $R^2 = 0/59$ نقش کم‌تری داشته‌اند و مناطقی که آلودگی بیش‌تری داشته‌اند تأثیر بیش‌تری در ایجاد جزایر گرمای شهری در حدود $R^2 = 0/72$ داشته است. پورامین و همکاران (۱۳۹۹)، عوامل مؤثر بر شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری را با تأکید بر ویژگی‌ها و چالش‌های طراحی شهری مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها همچنین دست یافتند که جزیره حرارتی شهری متأثر از دو دسته عوامل هستند؛ اولین عامل، اقلیمی است که غیر قابل کنترل هستند که از این میان، خورشید و شدت باد را می‌توان مؤثرترین عوامل دانست و دومین عامل مرتبط با طراحی و ساخت شهر یا همان عوامل قابل کنترل هستند که کاربری زمین، پوشش گیاهی، حمل و نقل و مصالح سطح از مهم‌ترین آن‌ها است. محمدی و عقیفی (۱۴۰۰)، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER وقوع جزایر حرارتی شهری را در شیراز مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها پس از بررسی همبستگی بین دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی، ساختمانی، زمین لخت و آبی به این نتیجه رسیدند که بین شاخص پوشش گیاهی و آبی با دمای سطح زمین همبستگی منفی وجود دارد و زمین سبز و مناطق آبی اثر جزیره حرارتی را تضعیف نموده درحالی که بین شاخص ساختمانی و زمین لخت با دمای سطح زمین همبستگی مثبت وجود داشته و اثر جزیره حرارتی را افزایش داده است. با توجه به تحقیقات انجام گرفته می‌توان گفت بررسی جزایر حرارتی گرمایی در شهرهای بزرگ یکی از موضوعات پر اهمیت می‌باشد و با بررسی آن می‌توان بهترین راهکارها را برای مدیریت این پدیده پیدا نمود و از صرف هزینه‌های اضافی جلوگیری به عمل آورد هم‌چنین با بررسی و ارائه راهکارهای مقابله با آن می‌توان بر کیفیت هوای شهری افزود و سلامتی شهروندان را ارتقا داد. در شهر تهران نیز در سال‌های اخیر و تحت عوامل مختلف جغرافیایی و انسانی، جزیره حرارتی شهری شکل گرفته است که در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود.

داده‌ها و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی

شهر تهران با مساحتی حدود ۹۰۰ کیلومتر مربع در میان دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های البرز و حاشیه کویر مرکزی ایران قرار گرفته است. این شهر در مختصات ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۳ دقیقه و ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع آن از سطح دریای آزاد در نواحی جنوبی ۱۱۰۰ متر، در مرکز ۱۲۰۰ متر و در شمال ۱۷۰۰ متر می‌باشد (اسکانی کزازی و لاله سیاه پیرانی، ۱۳۸۹: ۱۴۷). شکل ۱، موقعیت جغرافیایی شهر تهران را در سطح استان تهران و کشور ایران نشان می‌دهد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی شهر تهران در سطح استان تهران و ایران

روش تحقیق

این پژوهش به بررسی رابطه بین جزیره گرمایی شهر تهران با عناصر آلاینده جوی در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ می‌پردازد. هدف اصلی تحقیق، شناسایی و تحلیل نقش کاربری اراضی، پوشش گیاهی و آلاینده‌های جوی در شدت و گسترش این پدیده است. در مرحله نخست، وضعیت کاربری اراضی منطقه مطالعه با استفاده از پروداکت آماده GLC-FCS30D در بستر پلتفرم گوگل ارث انجین مورد تحلیل قرار گرفت. این مرحله به منظور دستیابی به اطلاعات دقیق درباره توزیع مناطق مسکونی و دیگر کلاس‌های اراضی انجام شد. سپس، برای نمایش جزیره حرارتی شهر تهران، از داده‌های ماهواره مودیس ترا و باند یک کیلومتری LST-NIGHT استفاده گردید. این باند به دلیل حذف اثر تابش خورشیدی و نمایش واضح‌تر تفاوت دمایی نسبت به LST-DAY ترجیح داده شد. نقشه میانگین دمای تهران و نمودار جزیره حرارتی با استفاده از داده‌های LST-NIGHT در محیط برنامه‌نویسی گوگل ارث انجین ترسیم شد. در مرحله بعد، ارتباط پوشش گیاهی و چند آلاینده جوی مؤثر بر جزیره حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر ماهواره لندست ۸ برای نمایش وضعیت پوشش گیاهی به کار گرفته شد و شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) محاسبه گردید. فرمول این شاخص به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

رابطه ۱:

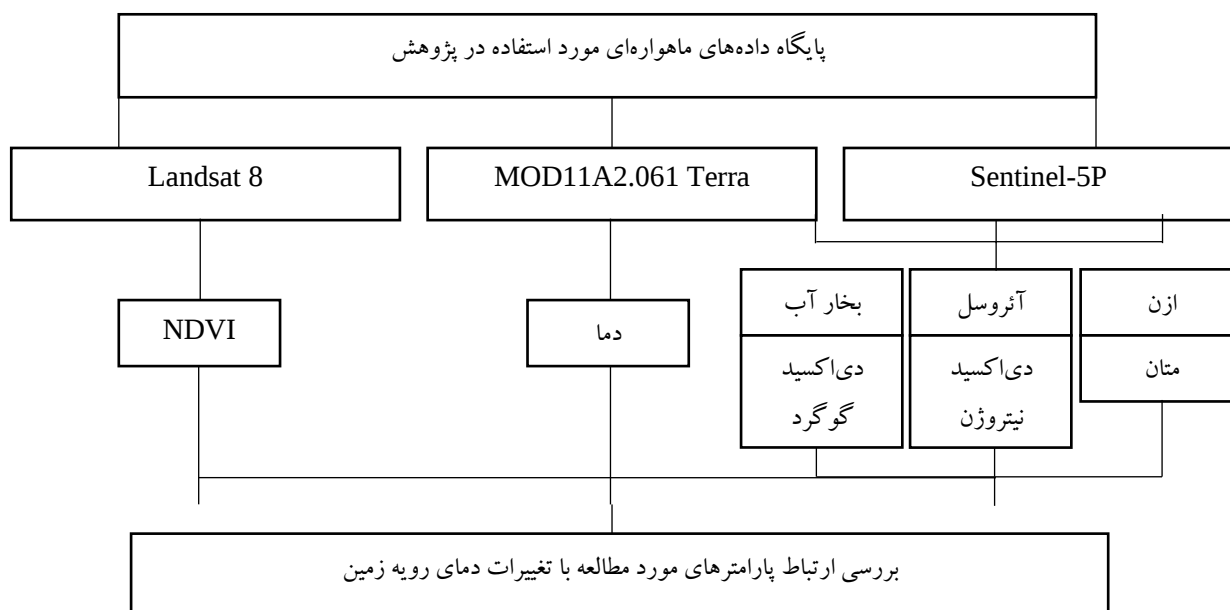
در رابطه فوق، NIR و RED به ترتیب نماینده بازتاب اندازه‌گیری شده در باند فروسرخ نزدیک و باند سرخ هستند و مقدار این نمایه بین ۱- و ۱+ می‌باشد. مقادیر بیش از ۰/۲+ نشان‌دهنده پوشش گیاهی و مقادیر بین صفر تا ۰/۲+ نشان‌دهنده خاک و مقادیر کم‌تر از صفر نشان‌دهنده آب، برف و یخچال‌های کوهستانی است (منتظری و کفایت‌مطلق، ۱۳۹۷: ۵).

علاوه بر پوشش گیاهی، تأثیر آلاینده‌های جوی نیز در این پژوهش بررسی شد. برای این کار از داده‌های ماهواره سنتینل ۵ برای اندازه‌گیری آلاینده‌هایی نظیر ازن، بخار آب، عمق نوری آئروسول، متان، دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد در محیط گوگل ارث انجین استفاده گردید. سپس برای تحلیل ارتباط میان آلاینده‌ها و دما، ۵۰۰ نقطه تصادفی از سطح منطقه انتخاب شد. ضریب تعیین و همبستگی میان مقادیر آلاینده‌ها و میانگین دما محاسبه گردید تا میزان تأثیر هر یک از این پارامترها بر شدت جزیره حرارتی مشخص شود. این تحلیل به شناسایی آلاینده‌هایی که بیشترین تأثیر را بر افزایش دما در مناطق شهری دارند، کمک می‌کند. مشخصات پایگاه داده و باندهای استفاده‌شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات پایگاه داده و باندهای هر یک از پارامترهای مورد مطالعه

متغیر	پایگاه داده	باندها	قدرت تفکیک مکانی (متر)
دما	MOD11A2.061 Terra	LST_Night_1km	۱۰۰۰
NDVI	Landsat 8	B4 (RED), B5 (NIR)	۳۰
ازن	Sentinel-5P	O3_column_number_density	۱۱۱۳/۲
آئروسول	Sentinel-5P	aerosol_optical_depth	۱۱۱۳/۲
بخار آب	Sentinel-5P	H2O_column_number_density	۱۱۱۳/۲
متان	Sentinel-5P	CH4_column_volume_mixing_ratio_dry_air	۱۱۱۳/۲
دی‌اکسید نیتروژن	Sentinel-5P	NO2_column_number_density	۱۱۱۳/۲
دی‌اکسید گوگرد	Sentinel-5P	SO2_column_number_density	۱۱۱۳/۲

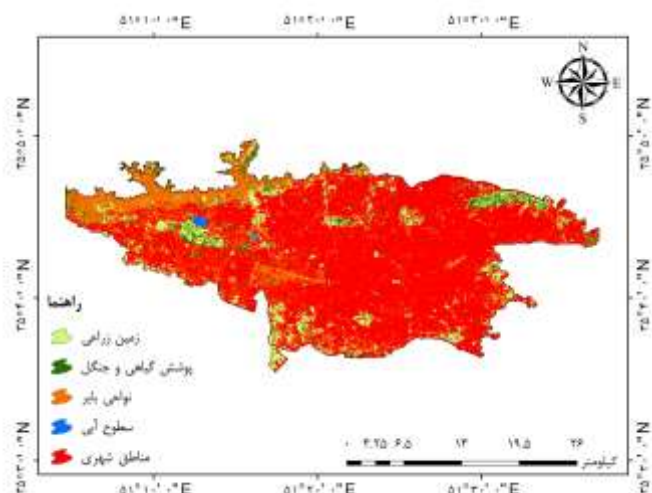
در شکل ۲، نمودار جریانی روش تحقیق حاضر ارائه گردیده است.



شکل (۲): نمودار جریان‌ی روش تحقیق

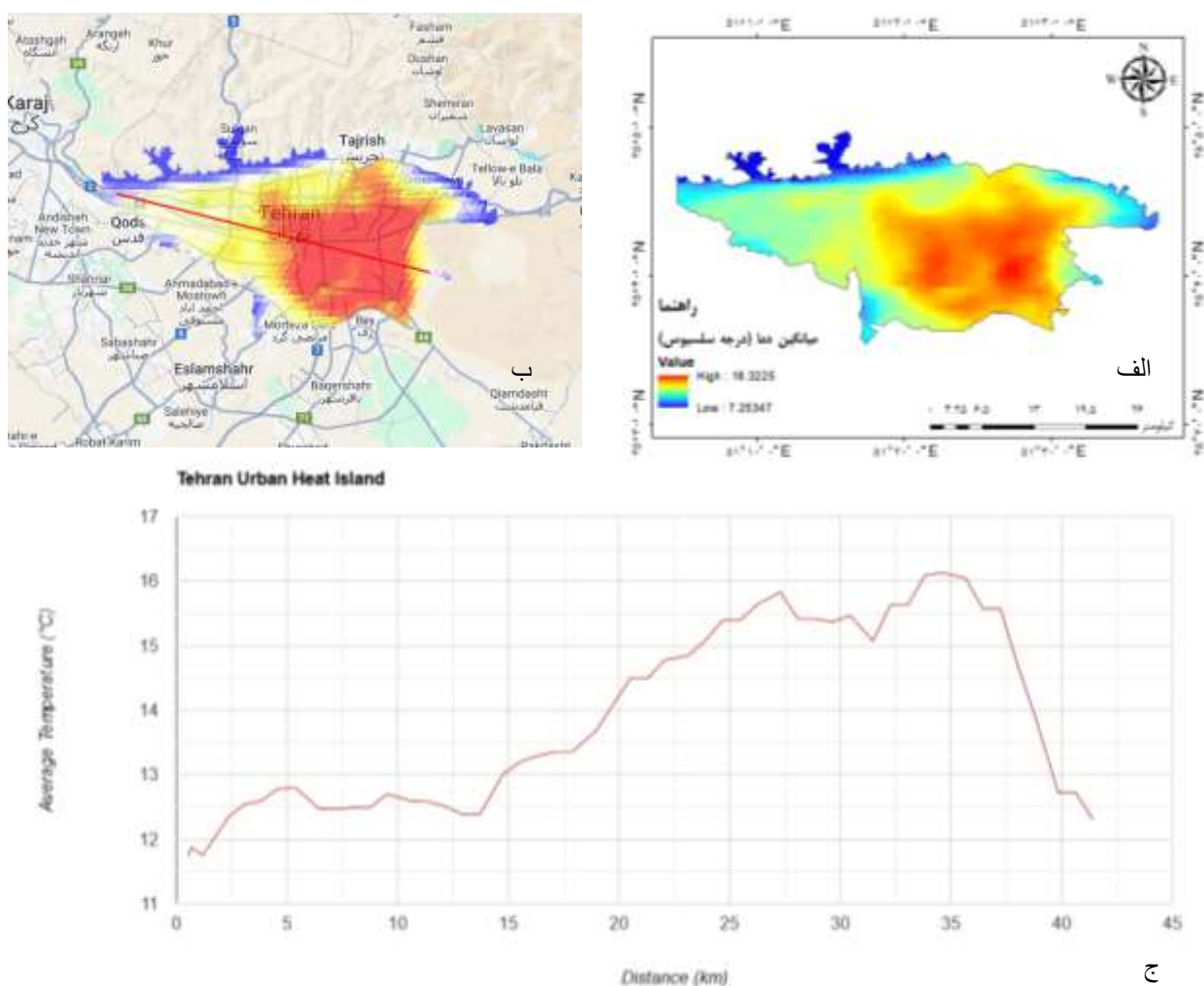
یافته‌های تحقیق

گسترش شهرها و توسعه ساخت‌وسازهای شهری می‌تواند اثرات قابل توجهی بر دمای محلی داشته باشد. این موضوع در بررسی پدیده جزیره گرمایی شهری اهمیت زیادی دارد و با مشاهده وضعیت کاربری اراضی مناطق مختلف، تغییرات شهری به وضوح قابل تشخیص است. در شکل ۳، نقشه کاربری اراضی شهر تهران برای سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ نمایش داده شده است. این نقشه با دقت کلی ۸۲ درصد، پنج کلاس اصلی کاربری را در سطح شهر تهران نشان می‌دهد. بر اساس این نقشه، بیشترین مساحت تحت پوشش مربوط به مناطق شهری است که وسعتی معادل ۴۶۱/۴۹ کیلومترمربع را شامل می‌شود. همچنین از غرب به شرق شهر، تراکم مناطق مسکونی افزایش یافته است که این امر می‌تواند به شکل‌گیری جزایر حرارتی و افزایش دما منجر شود. در مقابل، در بخش‌های غربی و شمال غربی منطقه مورد مطالعه، تراکم ساختمان‌های شهری به‌طور نسبی کاهش یافته است. در این مناطق، زمین‌های بایر، پوشش‌های گیاهی، زمین‌های زراعی و حتی سطوح آبی مشاهده می‌شود که کمترین وسعت آن‌ها مربوط به مناطق آبی است که به ۱/۵۸ کیلومترمربع می‌رسد. این عوامل می‌توانند نقش مهمی در کاهش دما نسبت به سایر بخش‌های غربی شهر تهران ایفا کنند.



شکل (۳): نقشه کاربری اراضی شهر تهران در سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۴

در شکل (۴، الف)، نقشه میانگین دمای رویه زمین شهر تهران برای سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴، بر اساس داده‌های ماهواره‌ای مودیس و بر حسب درجه سلسیوس ارائه شده است. این نقشه نشان می‌دهد که بین شمال غرب و جنوب شرق تهران اختلاف دمایی حدود ۹ درجه سلسیوس وجود دارد. در نیمه شرقی منطقه مطالعاتی، دما به اوج خود یعنی ۱۶/۳۲ درجه سلسیوس رسیده است که این امر به‌وضوح نشان‌دهنده تأثیر تراکم ساختمان‌های شهری و آلاینده‌های جوی در این بخش است. در مقابل، با حرکت به سمت شمال غرب، شدت گرمای هوا کاهش یافته و کمینه دما به ۷/۲۵ درجه سلسیوس می‌رسد. همچنین، با توجه به خط ممتدی که در شکل (۴، ب) بین غربی‌ترین و شرقی‌ترین نقاط شهر تهران ترسیم شده است، تغییرات دما در قالب نمودار در شکل (۴، ج) نمایش داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با نزدیک شدن به بخش‌های شرقی شهر تهران، جزیره حرارتی گرمایی شکل گرفته و دما از ۱۶ درجه سلسیوس فراتر رفته است. در این پروفیل دمایی افزایش دما در حد فاصل ۱۵ تا ۳۷ کیلومتری از غرب تهران به‌وضوح مشخص است.

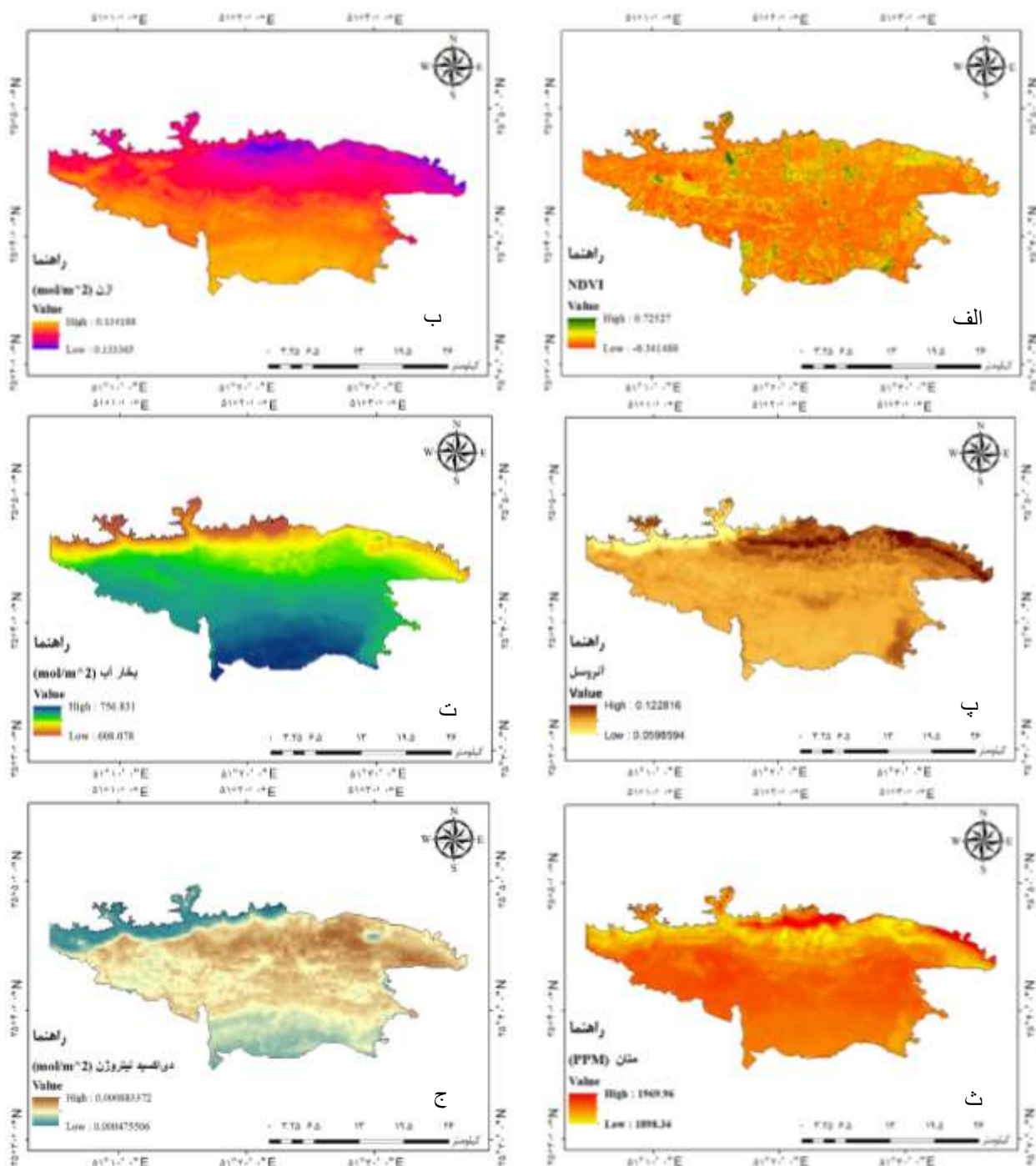


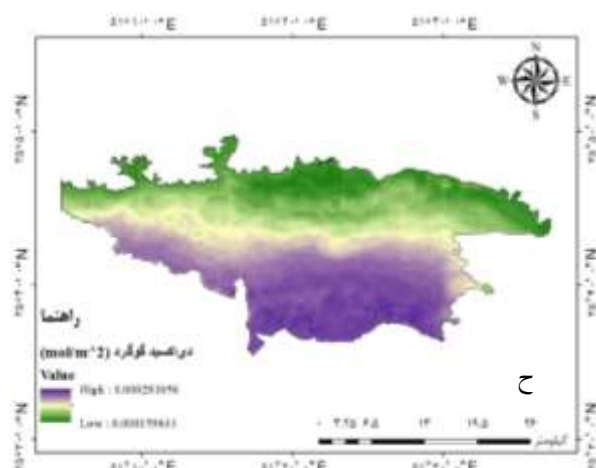
شکل (۴): الف و ب) میانگین دمای شهر تهران سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۴، ج) نمودار جزیره حرارتی شهری تهران سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۴

عوامل گوناگونی می‌توانند بر تغییرات دما تأثیر بگذارند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها تراکم پوشش گیاهی است. وضعیت پوشش گیاهی با استفاده از شاخص NDVI بررسی شده و نتایج آن برای دوره مورد مطالعه در شکل (۵، الف) ارائه شده است. بر اساس این داده‌ها، در شهر تهران، افزایش سطوح سخت نظیر آسفالت، بتن و ساختمان‌های شهری منجر به پراکندگی پوشش گیاهی شده است. به‌ویژه در مناطق مرکزی تا شرقی شهر، تقریباً هیچ پوشش گیاهی قابل مشاهده نیست و مقدار شاخص NDVI در این نواحی

به عدد ۰/۳۴- رسیده است. این وضعیت در بیشتر مناطق شهر غالب است و سطوح خاکی، به دلیل بازتاب بالای خورشید، می‌توانند به افزایش دما کمک کنند. در مقابل، در بخش‌هایی از شمال تهران، تراکم پوشش گیاهی افزایش یافته و مقدار شاخص در این نواحی به حداکثر ۰/۷۲ رسیده است. هرچند که این مناطق از نظر گستردگی مکانی محدودتر هستند و شاید تأثیر چشمگیری بر کاهش دما نداشته باشند. در شکل (ب)، وضعیت ازن در منطقه مورد مطالعه بررسی شده است. ازن، گازی متشکل از اکسیژن است که غلظت آن در جو می‌تواند مشابه گازهای گلخانه‌ای عمل کرده و به افزایش دما کمک کند. این تصویر، میزان ازن در ستون عمودی جو را نشان می‌دهد و تفاوت اندکی بین بیشترین و کمترین مقدار آن در سطح شهر تهران دیده می‌شود. با این حال، از شمال به سمت نیمه جنوبی شهر، غلظت مولکول‌های ازن به‌طور جزئی افزایش یافته و به ۰/۱۳۴ مول بر مترمربع رسیده است. این افزایش می‌تواند در بالا رفتن دمای محلی نقشی اندکی ایفا کند. وضعیت آئروسول در شکل پ، برای منطقه مطالعاتی برای سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۴ ترسیم شده است. عمق نوری آئروسول نشان‌دهنده میزان غلظت آئروسول در یک محیط مشخص است. غلظت آئروسول نیز نقش مهمی در افزایش دما دارد زیرا آئروسول‌ها حاوی ذرات معلق در هوا هستند که از جذب و انعکاس نور خورشید در جو زمین جلوگیری می‌کنند. مطابق نقشه ارائه شده، بخش‌های شمال و شمال غرب تهران دارای بیشترین تراکم آئروسول به میزان ۰/۱۲۲ هستند که موجب کاهش انعکاس نور خورشید به کمترین میزان می‌شود. این وضعیت می‌تواند به جذب بیشتر نور خورشید و کاهش بازتاب سطح زمین منجر شده و در نهایت دمای محلی را افزایش دهد. در مقابل، در مناطق غربی تهران، غلظت آئروسول به حداقل مقدار خود یعنی ۰/۰۵۹ رسیده است. این مقدار پایین نشان‌دهنده هوای پاک‌تر در مقایسه با شرق تهران است و نقش مهمی در تعدیل دما ایفا می‌کند. بخار آب یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای در جو است که نقش کلیدی در تنظیم دمای سطح زمین ایفا می‌کند در شکل ت، وضعیت آن برای منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده است. با توجه به نقشه تهیه شده مشخص است که غلظت بخار آب در نیمه جنوبی شهر تهران برابر با ۷۵۶/۸ مول بر مترمربع بوده و نسبت به شمال شهر که میزان آن به ۶۰۸ مول بر مترمربع تراکم بخار آب داشته تفاوت آشکاری وجود دارد و این افزایش بخار آب در جو نیمه جنوبی شهر تهران می‌تواند همانند گلخانه عمل نماید و باعث جذب انرژی خورشیدی و در نهایت افزایش دما شود. گاز متان نیز یکی از گازهای گلخانه‌ای است که باعث افزایش میانگین دمای جهانی می‌شود و در شرایط مختلف واکنش‌های متفاوتی را به همراه دارد. وضعیت این گاز در شکل ث، بر حسب کسر مولی نمایش داده شده است. مطابق نقشه، در نوار شمالی شهر تهران، تراکم گاز متان به بیشینه مقدار خود یعنی ۱۹۶۹/۹۶ ppm رسیده است. این افزایش، هرچند با شدت کمتر، در نیمه جنوبی شهر نیز مشاهده می‌شود. در این مناطق، گاز متان با جذب انرژی گرمایی (اشعه مادون قرمز) و توانایی نگهداشت بالای آن، نقش مهمی در افزایش دما ایفا می‌کند. از سوی دیگر، نواحی واقع بین شمالی‌ترین نقطه تهران و مرکز آن، تراکم کمتری از گاز متان را نشان می‌دهند، به‌طوری که مقدار آن به حدود ۱۸۹۸ ppm کاهش یافته است. این کاهش می‌تواند تأثیر کمتری در افزایش دما در این مناطق داشته باشد. کی دیگر از گازهای آلاینده مورد بررسی، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) است که وضعیت آن در شکل (ج) برای منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در نواحی غربی، مرکزی و شرقی تهران، غلظت این گاز به ۰/۰۰۸۸ مول بر مترمربع رسیده است. این مقدار تقریباً دو برابر غلظت ثبت شده در نوار شمالی و جنوبی شهر است که در این نواحی غلظت NO_2 به ۰/۰۰۴۷ مول بر مترمربع کاهش یافته است. دی‌اکسید نیتروژن نقشی کلیدی در تشکیل ازن تروپوسفری دارد و اگرچه قدرت تأثیرگذاری آن نسبت به گازهایی مانند متان یا دی‌اکسید کربن کمتر است، اما همچنان می‌تواند به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم در افزایش دمای محلی مؤثر باشد. علاوه بر این، در مناطقی که غلظت این گاز بیشتر است، احتمال افزایش دما و همچنین خطرات مرتبط با سلامتی، از جمله آسیب‌های تنفسی، بیشتر خواهد بود. دی‌اکسید گوگرد (SO_2) نیز یکی از آلاینده‌های مهم هوا به شمار می‌رود که افزایش غلظت آن می‌تواند منجر به مشکلات تنفسی و بیماری‌های قلبی شود. در شکل (ح)، وضعیت این گاز برای شهر تهران

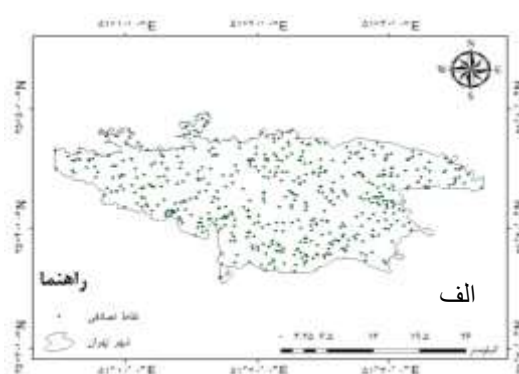
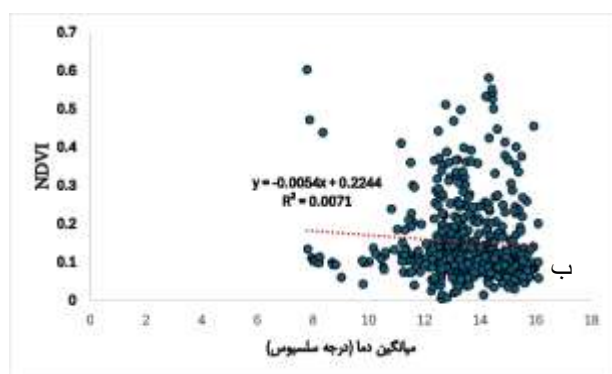
بررسی شده است و نتایج نشان می‌دهد که نیمه جنوبی شهر به‌طور قابل توجهی غلظت بیشتری نسبت به نیمه شمالی دارد، به‌طوری‌که اختلاف دو برابری بین این مناطق مشهود است در جنوب شهر تهران، غلظت دی‌اکسید گوگرد به 0.00029 مول بر مترمربع رسیده است. این افزایش می‌تواند به کاهش کیفیت هوا و همچنین افزایش دمای محلی منجر شود. در مقابل، کاهش غلظت این گاز به مقدار 0.00015 مول بر مترمربع، در نیمه شمالی منطقه مورد مطالعه تا حدی از خطرات احتمالی آن کاسته و هوای نسبتاً بهتری را در این بخش فراهم کرده است.

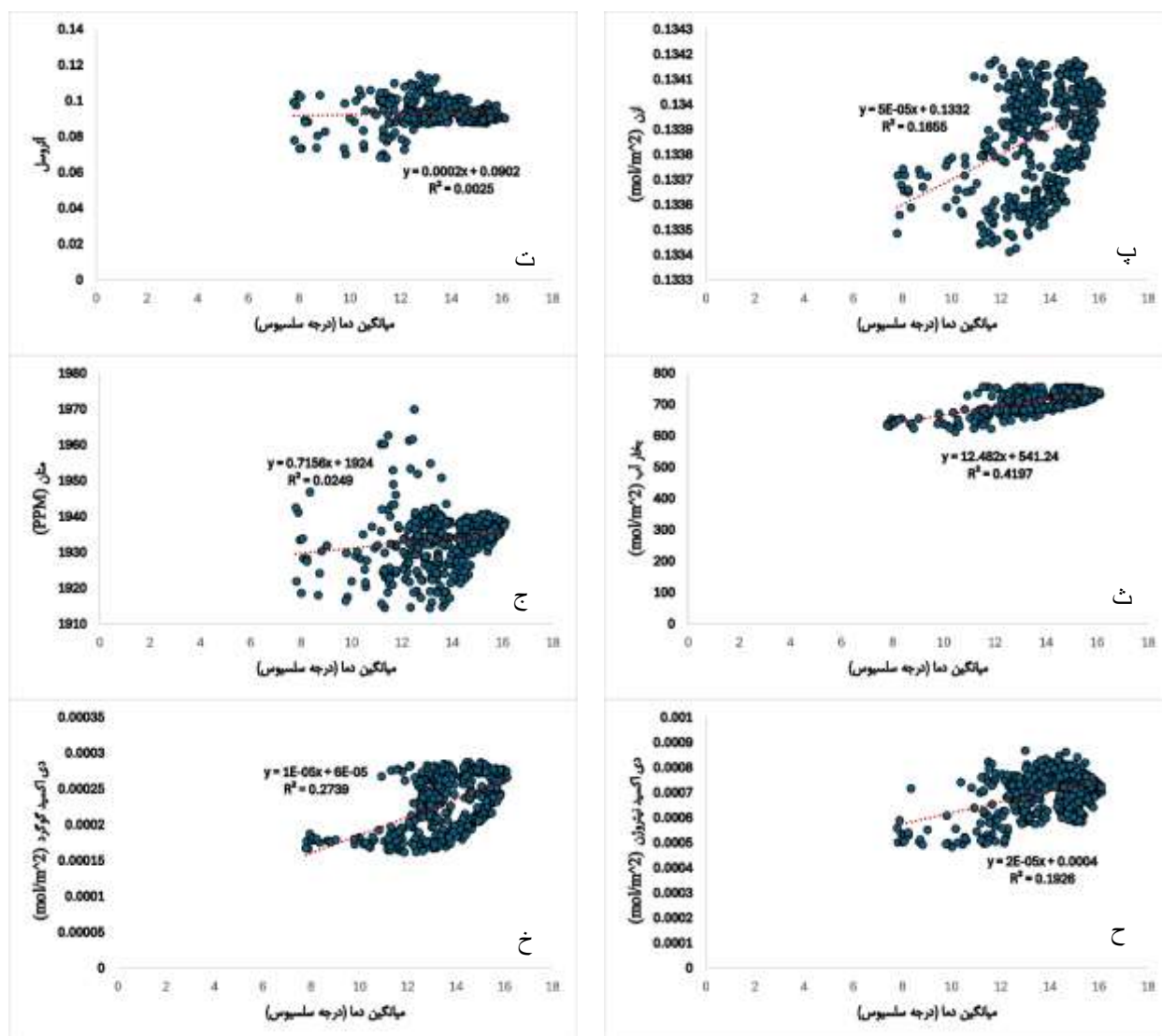




شکل (۵): الف) نقشه شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، ب) ازن، پ) آئروسول، ت) بخار آب، ث) متان، ج) دی‌اکسید نیتروژن، د) دی‌اکسید گوگرد برای شهر تهران در سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۴

در تحلیل تأثیر عوامل مختلف و آلاینده‌های جوی بر تغییرات دمای شهر تهران، از ۵۰۰ نقطه تصادفی در منطقه مورد مطالعه استفاده شد که در شکل (۶، الف) نشان داده شده است. نتایج این تحلیل که در شکل (۶) و جدول ۲ ارائه گردیده، به‌وضوح ارتباط میان هر یک از این عوامل با دما را مشخص می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که بخار آب بیشترین تأثیر را بر تغییرات دما دارد. با همبستگی مثبت ۰/۶۴۸ و ضریب تعیین ۰/۴۱۹، ارتباط قوی بین بخار آب و دما مشاهده می‌شود که این نقش بخار آب به‌عنوان یکی از گازهای گلخانه‌ای و مؤثر در افزایش دمای جو را نشان می‌دهد. همچنین، دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن تأثیرات متوسطی بر دما دارند؛ همبستگی‌های ۰/۵۲۳ و ۰/۴۳۹ این دو آلاینده نشان‌دهنده ارتباط مثبت و معناداری با دما هستند که به دلیل اثرات شیمیایی و گلخانه‌ای این آلاینده‌ها بر جو است. ازن نیز با همبستگی ۰/۴۰۷ تأثیر ضعیفی بر دما دارد، اما همچنان ارتباط مثبتی با تغییرات دما نشان می‌دهد. در مقابل، پوشش گیاهی با همبستگی ۰/۰۸۴- و ضریب تعیین پایین، همبستگی معکوسی با تغییرات دما داشته و به دلیل فرآیندهای تبخیر و تعرق یا سایه‌اندازی گیاهان به کاهش دما کمک منجر شده است. متان با همبستگی ۰/۱۵۸ و ضریب تعیین ۰/۰۲۴ تأثیر مثبت ضعیفی بر دما نشان داده است. در نهایت، آئروسول با همبستگی ۰/۰۵ و ضریب تعیین ۰/۰۰۲۵ تقریباً هیچ تأثیری بر دما نداشته است؛ بنابراین، این چنین می‌توان استنباط کرد که عوامل مؤثری چون بخار آب و دی‌اکسید گوگرد بیش‌ترین نقش را در افزایش دما داشته است.





شکل (۶): ضریب تعیین عوامل مؤثر بر تغییرات دمای شهر تهران طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۴

جدول (۲): الف) همبستگی عوامل مؤثر بر تغییرات دمای شهر تهران طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۴

همبستگی (پیرسون)	دی اکسید گوگرد	ازن	دی اکسید نیتروژن	پوشش گیاهی	بخار آب	متان	آرژون
دما	۰/۵۲۳**	۰/۴۰۷**	۰/۴۳۹**	-۰/۰۸۴	۰/۶۴۸**	۰/۱۵۸**	۰/۰۵

** همبستگی در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی داری

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر ارتباط بین جزیره گرمایی شهر تهران با عناصر آلاینده جوی در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان دادند میانگین دمای رویه زمین از غرب به شرق تهران افزایش یافته است و در مرکز و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه، یک هاله حرارتی با میانگین دمای بیش از ۱۶ درجه سانتی گراد شکل گرفته است. همچنین، نمودار حرارتی این مناطق وجود یک قله حرارتی را نمایان می‌سازد که بیانگر شکل‌گیری جزیره گرمایی است. با توجه به وضعیت کاربری اراضی شهر تهران می‌توان گفت گسترش ساخت‌وسازهای شهری در نواحی شرقی تهران، همراه با تراکم بالای مناطق مسکونی و افزایش آلودگی ناشی از حمل و نقل، نقش چشمگیری در شکل‌گیری و تشدید جزیره حرارتی شهری در این مناطق داشته و منجر به افزایش دما در این نواحی شده است. در مقابل، در مناطق غربی و شمالی که پوشش گیاهی و سطوح آبی پراکنده و محدودی دارند، دما

نسبتاً پایین‌تر است. این توزیع مکانی، نقش مؤثر پوشش گیاهی در کاهش دما را برجسته می‌سازد. تحلیل داده‌های ماهواره‌ای و شاخص‌های زیست‌محیطی نشان می‌دهد که بخار آب، به‌عنوان یکی از گازهای گلخانه‌ای، بیشترین تأثیر را بر افزایش دمای محلی داشته است. همبستگی قوی میان بخار آب و دما، به دلیل توانایی بالای این گاز در جذب انرژی گرمایی، بر این تأثیرگذاری تأکید دارد. همچنین، دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن به‌واسطه اثرات گلخانه‌ای و شیمیایی خود، به افزایش دمای محلی کمک کرده‌اند. تمرکز این آلاینده‌ها در نیمه جنوبی و شرقی شهر، همسو با تراکم بالای ساختمان‌ها و فعالیت‌های انسانی، موجب تشدید گرمای این مناطق شده است. از سوی دیگر، بررسی اثر گازهایی نظیر ازن، متان و آتروسول‌ها نشان می‌دهد که این عوامل، در مقایسه با بخار آب و دی‌اکسید گوگرد، تأثیر کمتری بر دما داشته‌اند. آتروسول‌ها که بیشتر در مناطق شمالی و غربی مشاهده شده‌اند، نقش تعدیل‌کننده‌ای در کاهش دما ایفا کرده‌اند. با این حال، افزایش غلظت گازهایی همچون متان و ازن در بخش‌هایی از شهر، می‌تواند به تشدید گرمای محلی در بلندمدت منجر شود؛ اما پوشش گیاهی تأثیری معکوس بر دما داشته و نقش مهمی در کاهش دمای محیط ایفا نموده است. نتایج تحقیق حاضر با نتایج کار محققینی همچون آروین (۱۳۹۷) که بیان داشتند در زمان رخداد حداکثر آلودگی در شهر اصفهان بر میانگین دما افزوده شده است و همبستگی معناداری این دو پدیده با هم داشته‌اند همسو بوده است. یافته‌های این پژوهش همچنین با کار یوسفی و همکاران (۱۳۹۶)، در بررسی جزیره حرارتی شهر بابل که اذعان داشتند این پدیده بر دما و رطوبت اثر داشته و فضای سبز در کاهش دمای بابل نقش مهمی دارد و نیز با نتایج مطالعه کارکن سیستمی و دوستان (۱۳۹۴) که به این نتیجه دست یافتند که در مناطق عاری از پوشش گیاهی و رطوبت کم، دما افزایش یافته و بالعکس، انطباق دارد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان راهنمایی کاربردی برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری به کار گرفته شوند. بر اساس نتایج تحقیق، گسترش و توسعه فضاهای سبز شهری، به‌ویژه در مناطق شرقی و جنوبی تهران که بیشترین شدت جزیره حرارتی را دارند، نقش مؤثری در تعدیل دما و بهبود کیفیت هوا خواهد داشت. همچنین، مدیریت آلودگی‌های جوی از طریق کاهش انتشار آلاینده‌هایی مانند دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن و بهبود کیفیت سوخت و حمل‌ونقل عمومی پاک، می‌تواند به کاهش دمای محلی و بهبود شرایط زیست‌محیطی این مناطق کمک کند. استفاده از مصالح ساختمانی مناسب با ضریب بازتاب بالا و توسعه بام‌های سبز نیز از دیگر اقدامات مؤثر برای کاهش جذب حرارت توسط ساختمان‌ها و تعدیل گرمای شهری است. برنامه‌ریزی پایدار شهری با توزیع متوازن فضاهای سبز و نظارت مستمر بر روند تغییرات دما از طریق داده‌های ماهواره‌ای، می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی شهروندان و کاهش اثرات جزیره حرارتی منجر شود.

پیشنهاده‌ها

- ۱- توسعه و حفظ فضاهای سبز، از جمله باغ‌ها، پارک‌ها و باغات شهری می‌تواند باعث کاهش دما و جلوگیری از افزایش جزیره حرارتی شهری شود
- ۲- کاهش فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و انسانی مثل (ساخت‌وسازه‌های بی‌برنامه و رفت‌وآمدها با وسایل نقلیه) در نواحی جزایر حرارتی که همگی به متصاعد شدن گازهای مضر و آتروسول‌های جوی می‌انجامد.

منابع

۱. احمدی، محمود؛ داداشی رودباری، عباسعلی (۱۳۹۶). شناسایی جزایر حرارتی شهری مبتنی بر رویکرد زیست‌محیطی، مطالعه موردی (کلان‌شهر اصفهان). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. ۲۸ (۳)، ۲۰-۱. <https://doi.org/10.22108/gep.2017.98318.0>

۲. اسکانی کزازی، غلامحسین؛ لاله سیاه پیرانی، میترا (۱۳۸۹). تحلیل سینوپتیکی آلودگی هوای شهر تهران. *فصلنامه علمی پژوهشی جغرافیا*. ۴ (۱۲)، ۱۶۱-۱۳۵.
۳. آروین، عباسعلی (۱۳۹۷). بررسی جزیره حرارتی در ارتباط با آلودگی هوا در شهر اصفهان. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۷ (۲۵)، ۱۱۵-۱۲۹. <https://doi.org/10.22067/geo.v7i1.64590>
۴. پورامین، کتابون؛ خاتمی، سیدمهدی؛ شمس‌الدینی، علی (۱۳۹۹). عوامل مؤثر بر شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری؛ با تأکید بر ویژگی‌ها و چالش‌های طراحی شهری. *سامانه نشریات دانشگاه تربیت مدرس*. ۱ (۱)، ۸۳-۶۹. <http://udd.modares.ac.ir/article-40-35601-fa.html>
۵. حلیان، امیرحسین؛ سلطانی، زهرا (۱۳۹۹). واکاوی تغییرات فضایی- زمانی جزایر گرمایی شهری و کاربری اراضی با رویکرد زیست‌محیطی در شیراز. *فصلنامه علمی مطالعات ساختار و کارکرد شهری*. ۷ (۲۴)، ۹۷-۷۳. [10.22080/usfs.2020.15874.1736](https://doi.org/10.22080/usfs.2020.15874.1736)
۶. فدایی، هادی (۱۳۹۹). بررسی جزایر گرمایی شهر تهران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. *فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی*. ۲۹ (۱۱۶)، ۱۳۰-۱۱۹. <https://www.doi.org/10.22131/sepehr.2021.242864>
۷. کارکن سیستمی، مرضیه؛ دوستان، رضا (۱۳۹۴). جزیره گرمایی کلان‌شهر مشهد. *جغرافیا و توسعه فضای شهری*. ۲ (۲)، ۱۳۸-۱۲۳. <https://doi.org/10.22067/gusd.v2i2.47438>
۸. محمدی، مجتبی؛ عقیقی، محمدابراهیم (۱۴۰۰). بررسی وقوع پدیده جزیره حرارتی شهری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER (منطقه مورد مطالعه: شهر شیراز). *جغرافیا و مطالعات محیطی*. ۱۰ (۳۷)، ۲۱-۴۴.
۹. محمودزاده، حسن؛ نقدبیشی، افسانه؛ مؤمنی، سحر (۱۳۹۷). تأثیر کاربری‌های شهری در ایجاد جزایر حرارتی (مطالعه موردی: شهر مشهد). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۷ (۳)، ۱۰۵-۱۱۹. <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.68150>
۱۰. منتظری، مجید؛ کفایت‌مطلق، امیدرضا (۱۳۹۷). واکاوی میانگین بلندمدت پوشش گیاهی ایران به کمک نمایه NDVI. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. ۲۹ (۳)، ۱۴-۱. <https://doi.org/10.22108/gep.2018.98301.0>
۱۱. یوسفی، بداله و دیگران (۱۳۹۶). بررسی پدیده جزیره حرارتی و اثر آن بر تغییرپذیری روز به روز دمای تابستان شهر بابل. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*. ۴۹ (۳)، ۵۰۱-۴۹۱. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.213105.1006913>
12. Brandsma, T. & Wolters, D. (2012). Measurement and statistical modeling of the urban heat island of the city of Utrecht (the Netherlands). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 51 (6), 1046-1060. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0206.1>
13. Dewan, A. et al (2021). Surface urban heat island intensity in five major cities of Bangladesh: Patterns. *Drivers and Trends*. 71, 102926. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102926>
14. Giannaros, T. & Melas, D. (2012). Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: The case study of Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Research*. 18, 103-120. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.006>
15. Lokoshchenko, M.A. (2014). Urban 'heat island' in Moscow. *Urban Climate*. 10 (3), 550-562. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.01.008>
16. Marando, F. et al (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*. 77, 103564. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103564>
17. Morabito, M. et al (2021). Surface urban heat islands in Italian metropolitan cities: Tree cover and impervious surface influences. *Science of The Total Environment*. 751, 142334. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142334>
18. Rizvi, Sh.; Alam, Kh. & Iqbal, M. (2019). Spatio-temporal variations in urban heat island and its interaction with heat wave. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 185, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.001>
19. Sangiorgio, V.; Fiorito, F. & Santamouris, M. (2020). Development of a holistic urban heat island evaluation methodology. *Scientific Reports*. 10, 17913. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75018-4>
20. Simwanda, M. et al (2019). Spatial analysis of surface urban heat islands in four rapidly growing African cities. *Remote Sens*. 11 (14), 1645. <https://doi.org/10.3390/rs11141645>
21. Zhou, B.; Rybski, D. & Kropp, J. (2017). The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Scientific Reports*. 7 (4791), 1-9.