

Construction of Urban Heat Island Network Based on Morphological Network Analysis and Graph Theory

Mahdis Sadat¹, Mahmood Zoghi², Esmail Salehi³

1. Department of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: mahdissadat74@ut.ac.ir
2. Department of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: zoghi87@ut.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: tehranssaleh@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 17 January 2025
Received in revised form: 25 April 2025
Accepted: 7 May 2025
Available online: 10 June 2025

Keywords:

*Heat transfer corridor,
Land surface temperature,
Morphological spatial pattern
Analysis,
Urban heat island.*

ABSTRACT

Objective: The increase in ecological vulnerability in cities due to rising temperatures has received much attention in recent years. Accurate identification of the urban heat island network is very important for effectively reducing its impact. In many studies, the impact of heat island connectivity on these networks has been largely ignored. This study was conducted to fill this research gap by creating an urban heat island network based on the connectivity perspective to understand the structural characteristics of the effect of this network and evaluate it in order to determine the priority level for implementing temperature reduction measures in the Tehran metropolis.

Method: To achieve the above goal, after analyzing the ground surface temperature, areas with high temperatures were identified. Then, morphological spatial pattern analysis, morphological structure evaluation, and recognition of the importance of heat island sources were carried out. In the next stage, the resistance level against thermal diffusion was constructed, and, then, using the minimum cumulative resistance method, heat transfer corridors were identified and analyzed.

Results: The findings of this study identified 29 strong heat island cores in Tehran with a relatively scattered distribution, 8 of which showed very high heating power. 31 corridors connected these islands, 10 of which had the potential to increase temperatures significantly. In addition, in terms of spatial distribution, the heat island network fragments in Tehran were more densely located in the western and southern areas. The high density of heat islands in the western part of Tehran made planning to combat them more difficult and increased their influence. Also, the very dense islands located in the southwest of Tehran led to the identification of short heat corridors in this part of the city, which justified the increase in temperature. On the other hand, the results showed that the cores had the largest share in the heat island network in Tehran, which indicated the size of the heat islands and their regional distribution in the study area.

Conclusions: In this study, special attention has been paid to the structural characteristics of the urban heat islands of the study area and their degree of importance. This approach is simpler than previous methods of determining the size or density of blue-green spaces to achieve cooling effects. This framework can be used as a strategic measure to prevent the coalescence and expansion of urban heat islands and to avoid the unplanned increase of blue-green spaces aimed at reducing temperatures in urban areas.

Cite this article: Sadat, M., Zoghi, M., Salehi, E. (2025). Construction of Urban Heat Island Network Based on Morphological Network Analysis and Graph Theory. *Journal of Environmental Studies*, 51 (1), 19-40. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.385006.1008547>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.385006.1008547>

Introduction

Urbanization is a phenomenon that has disrupted the surface energy balance. In a way, urban areas can be clearly identified by absorbing higher atmospheric and surface temperatures than their surrounding rural areas. This observable phenomenon is known as the urban heat island effect (Manoli et al., 2019). The impacts of this effect are deeply reflected throughout ecological ecosystems and human life, leading to consequences such as increased energy demand (Santamouris, 2014), deterioration of air quality (Santamouris, 2020), and increased mortality from biological stress (He et al., 2022).

In recent years, the increase in urban population and the intensification of human activities have contributed to the gradual reduction of green spaces and exacerbated the urban heat island effect (Debbage and Shepherd, 2015; Qian et al., 2020). In particular, high-density building construction impedes air flow, thereby reducing wind speed within the city and exacerbating the urban heat island (UHI) effect (Chen et al., 2023). In addition, reduced urban ventilation is also an important cause of UHI due to lack of local air circulation (Yu et al., 2021). Urban green infrastructure, such as parks, lakes, green roofs, and urban green spaces in general, can reduce the heat generated by impervious substrates through blocking direct sunlight and help create a more pleasant urban environment (Hong et al., 2023). In addition, green patches with large areas, complex shapes, and high densities have higher cooling efficiency than smaller green patches with simpler shapes and lower densities (Aram et al., 2019). Green spaces with water bodies have greater cooling benefits than spaces without water (Du et al., 2017). It has also been proven that urban parks larger than 10 hectares are more effective in reducing regional temperatures (Aram et al., 2019). More specifically, at the micro scale, different tree species, vegetation configuration, planting design, and facade greening can have different cooling and thermal comfort effects (Hami et al., 2019; Lai et al., 2023; Peng et al., 2020). At the macro scale, modifications to the green space system have a major impact on the spatial pattern of the urban thermal environment (Cai et al., 2019; Yang et al., 2017). Therefore, it can be stated that the UHI effect is particularly severe in metropolitan areas with high density of construction and lack of green space (Demuzere et al., 2014). Extensive research has also proven that blue-green spaces serve as a primary approach for reducing UHI effects. However, insufficient attention has been paid to the practical aspects of zoning and spatial arrangements of blue-green landscapes in cities in many of these studies (Zhao et al., 2024). In addition, considering urban land use regulations and financial considerations, urban planners should prioritize measures and plans for controlling urban air temperature in areas with specific thermal effects, or heat islands, as studies emphasize the critical importance of such strategic zoning.

In this study, an attempt has been made to evaluate a UHI network based on the perspective of the connectivity created and the importance of each structural feature in the UHI network, and to determine the parts with the most severe thermal patterns. These areas have been identified as key regions for future temperature reduction projects. In this study, Tehran metropolis, the capital of Iran, was selected as a case study to achieve the following objectives:

- To establish a UHI network based on the connectivity perspective in the city of Tehran in order to understand the structural characteristics of the UHI effect.
- To assess the UHI network in the city of Tehran in order to determine the priority level for implementing temperature reduction measures.

Method

In the first step, the land surface temperature (LST) for Tehran was calculated using the split window algorithm. After that, the normalized land surface temperature data was divided into five classes according to the mean standard deviation, and areas with very high temperatures were selected as representatives of UHI spots. Then, island cores were selected using Conefor 2.6 software to measure the connectivity of UHI sources. To determine the urban heat islands, the MCR model was used to connect level 1 and 2 heat islands to each other and level 3 islands to connect two or more input areas. Finally, corridors with a path cost less than the average path cost of the identified corridors were classified as strong corridors, while those with an average path cost greater than the identified corridors were classified as weak heat corridors.

Results

The results of this study showed that on June 17, 2023, the average LST for the entire city of Tehran was 41.8°C, while the average LST in the identified heat islands was 47.8°C. This indicates that the UHIs had a positive warming effect. Thus, determining the spatial pattern that intensifies these islands can be an effective step towards mitigating their cumulative effects.

According to the results, in terms of spatial distribution, UHI patches in Tehran were denser in the western and southern areas. The reason for this phenomenon could be attributed to the mountains located in the north of Tehran, the north-south elevation gradient, the significant difference in green space in eastern parts of the city compared to the west, the presence of industrial uses and pollution caused by them, and significant impervious surface areas in western Tehran. The high density of heat islands in the western part of Tehran has increased its influence and made planning efforts to combat them more difficult. The results of this part of the study are in line with the research of Sadeghinia et al. (2012) and Shakiba et al. (2009). Also, based on the results obtained, it can be concluded that the cores have the largest share in the heat island network of Tehran, which indicates the size of the heat islands and their regional distribution in the study area. According to the research results, a total of 29 strong heat island cores were identified in the city of Tehran with a relatively scattered distribution, most of which are concentrated in the south and southwest of the city. Also, 8 cores with high connectivity with an area of 19.6 square kilometers were identified, which were located in the southwest and southeast of the region. In addition, 29 cores with low connectivity were identified in Tehran with a total area of 17 square kilometers, which played a significant role in preventing the adjustment and cooling of the air in the surrounding areas. Among the identified cores, 8 first-level cores with a high thermal effect were located in the southwest and southeast of the study area. Based on the results of the connectivity analysis in Tehran heat network, 32 thermal corridors were identified, with a total length of 132 km. These corridors were located in the southern, western and northwestern parts of the region, connecting most of the identified heat island cores, forming the main framework of Tehran's heating network. Among them, 16 connecting corridors in the network were identified as strong thermal corridors with a length of approximately 77 km and 15 weak connecting corridors with a length of 54.6 km. Based on the results of the connectivity analysis in Tehran's heating network, 10 first-level corridors with a total length of 47.3 km, concentrated in the south and northwest of Tehran, 20 second-level corridors with a length of 8.2 km, and 1 third-level corridor with a length of 1.5 km were identified in the UHI network Tehran. The western part of the city had a continuous and long thermal corridor with the ability to increase the temperature in this area due to the interconnection of the heat islands located in this part of the city. Also, the highly dense islands located in the southwest of Tehran led to the identification of short thermal corridors, which led to the increase in temperature in this area.

Conclusions

The results of this study showed that the urban heat islands in Tehran had a positive warming effect. In terms of spatial distribution, these islands were denser in the western and southern parts of the city, affected by the mountains located in the north of Tehran, the elevation gradient from north to south, the significant difference in green space between the east and west of Tehran, and the presence of industrial uses and pollution caused by them, along with a significant amount of impervious surfaces in the west of Tehran. Also, based on the results obtained, the cores had a major contribution to the network of heat islands in Tehran, which indicates the size of the heat islands and their regional distribution in the study area. Among the identified cores, eight first-level cores are located in the southwest and southeast of Tehran, which have high thermal effects. Accordingly, in this study, ten first-level corridors were identified in the southern and northwest parts of the city, along with twenty second-level corridors and one third-level corridor in the UHI network of Tehran. Meanwhile, the western part of the region had a long and continuous thermal corridor in the western part of the study area, which increased the potential for temperature increase in this region due to the interconnectedness of heat islands located in this part of the city. In addition, the very dense heat islands in the southwest of Tehran had caused the creation of short thermal corridors, leading to an increase in temperatures. The findings of this study can be used to provide strategic solutions to mitigate the negative effects of the UHI network of cities and facilitate urban management with the aim of reducing temperatures in large cities.

Author Contributions

Mahdis Sadat: Conceptualization, Methodology, Software, Visualization, Writing, Reviewing and Editing, Mahmood Zoghi: Methodology, Software, Data Curation, Conceptualization, Reviewing and Editing, Esmail Salehi: Data Curation, Reviewing and Editing.

Data Availability Statement

Data will be made available on request.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to all the participants involved in this study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

There are no funders to report for this article.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



University of Tehran Press

نشریه محیط شناسی

دوره ۵۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴

شاپای چاپی: ۸۶۲۰-۱۰۲۵
شاپای الکترونیکی: ۶۹۲۲-۲۳۴۵

Homepage: <http://Jes.ut.ac.ir>

ساخت شبکه جزایر حرارتی شهری بر اساس تجزیه و تحلیل شبکه مورفولوژیک و تئوری گراف

مهديس سادات^۱، محمود ذوقی^۲، اسماعیل صالحی^{۳✉}

۱. گروه برنامه ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mahdissadat74@ut.ac.ir
۲. گروه برنامه ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: zoghi87@ut.ac.ir
۳. نویسنده مسئول، گروه برنامه ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: tehranssaleh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰

هدف: افزایش آسیب پذیری اکولوژیکی در شهرها به سبب افزایش دمای آن‌ها، طی سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. شناسایی دقیق شبکه جزیره گرمایی شهری برای کاهش مؤثر اثر آن بسیار مهم است. در بسیاری از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، عمدتاً تأثیر اتصال جزایر حرارتی بر این شبکه‌ها نادیده گرفته شده است. این مطالعه جهت پرداختن به این شکاف تحقیقاتی، با ایجاد یک شبکه جزایر گرمایی شهری بر اساس دیدگاه اتصال در راستای درک ویژگی‌های ساختاری اثر این شبکه و ارزیابی آن در راستای تعیین سطح اولویت برای اجرای اقدامات کاهنده دما در کلان‌شهر تهران انجام شده است.

روش پژوهش: جهت دستیابی به هدف فوق، پس از تجزیه و تحلیل دمای سطح زمین در شهر تهران، مناطق دارای دمای بالا شناسایی گردید. سپس تحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی، ارزیابی ساختار مورفولوژیکی و شناخت اهمیت منابع جزیره گرمایی صورت گرفت. پس از آن، سطح مقاومت در برابر انتشار حرارتی ساخته و با استفاده از روش حداقل مقاومت جمعی، شناسایی کریدورهای انتقال حرارت و تجزیه و تحلیل آن‌ها صورت گرفت.

یافته‌ها: یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ۲۹ عدد هسته جزیره حرارتی قوی در شهر تهران با توزیع نسبتاً پراکنده وجود دارند که ۸ عدد از آن‌ها قدرت گرمایشی بسیار بالایی دارند. تعداد ۳۱ کریدور، این جزایر را به یکدیگر متصل می‌کند که ۱۰ عدد از پتانسیل افزایش دمای بسیار بالایی را دارند. به‌علاوه از نظر توزیع فضایی تکه‌های شبکه جزایر گرمایی شهر تهران، در نیمه غربی و جنوبی از تراکم بالاتری برخوردارند. تراکم بالای جزایر حرارتی در بخش غربی تهران، برنامه‌ریزی برای مقابله با آن را سخت‌تر و اثرگذاری این پدیده را افزایش می‌دهد. همچنین جزایر حرارتی بسیار متراکم واقع در جنوب غربی شهر تهران، سبب شناسایی راهروهای کوتاه حرارتی در این بخش شده است که این امر افزایش دما در این قسمت را توجیه می‌کند. از سوی دیگر نتایج نشان می‌دهد که بیشترین سهم را در شبکه جزایر حرارتی شهر تهران، عارضه هسته‌ها دارند که این امر نشان‌دهنده بزرگی جزایر حرارتی و توزیع منطقه‌ای آن‌ها در منطقه مورد مطالعه است.

نتیجه گیری: در این پژوهش به ویژگی‌های ساختاری جزایر حرارتی منطقه مورد مطالعه و درجه اهمیت آن‌ها توجه خاصی شده است. این چارچوب می‌تواند به‌عنوان یک اقدام استراتژیک در جلوگیری از به هم پیوستن و گسترش جزایر حرارتی شهری مورد استفاده قرار گیرد و به افزایش بدون برنامه فضاهای سبز- آبی جهت کاهش دما در مناطق شهری پایان دهد.

استناد: سادات، مهديس؛ ذوقی، محمود؛ صالحی، اسماعیل. (۱۴۰۴). ساخت شبکه جزایر حرارتی شهری بر اساس تجزیه و تحلیل شبکه مورفولوژیک و تئوری گراف. نشریه محیط شناسی، ۵۱(۱)، ۱۹-۴۰. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.385006.1008547>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.385006.1008547>

۱. مقدمه

شهرنشینی پدیده‌ای است که تعادل انرژی سطحی را مختل کرده است. به‌گونه‌ای که مشخصاً مناطق شهری را می‌توان با استناد بر ثبت دمای اتمسفری و سطحی بالاتر در مقایسه با مناطق روستایی اطراف خود مشخص نمود. این پدیده قابل‌مشاهده به‌عنوان اثر جزیره حرارتی شهری شناخته می‌شود (Manoli et al., 2019). عواقب این اثر عمیقاً در سراسر اکوسیستم‌های اکولوژیکی و زندگی انسان بازتاب پیدا کرده و پیامدهایی همچون افزایش تقاضای انرژی (Santamouris, 2014)، تخریب کیفیت هوا (Santamouris, 2020)، و افزایش شیوع مرگومیر ناشی از استرس بیولوژیکی (He et al., 2022) را به دنبال دارد.

در سال‌های اخیر، افزایش جمعیت شهری و تشدید فعالیت‌های انسانی به کاهش تدریجی فضاهاى سبز منجر شده و اثر جزایر حرارتی شهرها را تشدید می‌کند (Debbage & Shepherd, 2015; Qian et al., 2020). به‌طور خاص، ساخت ساختمان‌هایی با تراکم بالا، مانع ایجاد جریان هوا شده و در نتیجه سرعت باد را در داخل شهر کاهش داده و اثر جزایر حرارتی شهری^۱ (UHI) را تشدید می‌کند (Chen et al., 2023). به‌علاوه کاهش تهویه شهری نیز یکی از علل مهم این پدیده به دلیل گردش هوای موضعی است (Yu et al., 2021). در مقابل زیرساخت‌های سبز شهری، مانند پارک‌ها، دریاچه‌ها، بام‌های سبز و به‌طور کلی فضاهاى سبز شهری، می‌توانند گرمای تولید شده توسط بسترهای نفوذناپذیر را با مسدود کردن نور مستقیم خورشید کاهش داده و به ایجاد محیط شهری دلپذیرتر کمک کنند (Hong et al., 2023). به‌علاوه لکه‌های سبز با مساحت بزرگ، شکل پیچیده و تراکم بالا، دارای راندمان خنک‌کنندگی بالاتری نسبت به لکه‌های سبز کوچک‌تر با شکل ساده‌تر و تراکم کمتر هستند (Aram et al., 2019). از سوی دیگر فضاهاى سبزی که دارای توده‌های آبی هستند، مزایای خنک‌کنندگی بیشتری نسبت به فضاهاى بدون آب دارند (Du et al., 2017). همچنین ثابت‌شده است که پارک‌های شهری بزرگ‌تر از ۱۰ هکتار، کارایی بیشتری در کاهش دمای منطقه دارند (Aram et al., 2019). به‌طور دقیق‌تر، در مقیاس خرد، گونه‌های مختلف درخت، پیکربندی پوشش گیاهی، طراحی کاشت، و ایجاد نمای سبز می‌توانند اثرات خنک‌کنندگی و آسایش حرارتی متفاوتی داشته باشند (Hami et al., 2020; Peng et al., 2023; Lai et al., 2019). در مقیاس کلان نیز، تغییر در سیستم فضای سبز به‌طور چشمگیری بر الگوی فضایی محیط حرارتی شهری تأثیر می‌گذارد (Cai et al., 2019; Yang et al., 2017). بنابراین می‌توان بیان کرد که اثر جزیره حرارتی شهری به‌ویژه در کلان‌شهرهایی که ساخت‌وساز بسیار متراکم داشته و فاقد فضای سبز هستند، بسیار شدید است (Demuzere et al., 2014). تحقیقات گسترده ثابت کرده است که فضاهاى سبز-آبی به‌عنوان یک رویکرد اولیه برای کاهش اثرات این پدیده عمل می‌کنند. اما توجه ناکافی به بررسی جنبه‌های عملی انتخاب مکان و ترتیبات فضایی مناظر آبی-سبز در شهرها در بین مطالعات وجود دارد (Zhao et al., 2024). علاوه بر این، با توجه به مقررات کاربری زمین شهری و ملاحظات مالی، برنامه‌ریزان شهری باید اقدامات و برنامه‌ریزی‌ها پیرامون کنترل دمای هوای شهرها را برای مناطقی با اثرات حرارتی مشخص یا همان جزایر حرارتی در اولویت قرار دهند، زیرا مطالعات بر اهمیت حیاتی انتخاب مکان استراتژیک تأکید می‌کنند.

در این پژوهش سعی شده است تا یک شبکه جزایر حرارتی شهری بر اساس دیدگاه اتصال ایجاد شده و اهمیت هر یک از ویژگی‌های ساختاری در این شبکه ارزیابی و در نهایت قطعات دارای شدیدترین الگوهای حرارتی تعیین گردد. این قطعات به‌عنوان مناطق کلیدی برای پروژه‌هایی با هدف کاهش دما در آینده تعیین می‌شود. در این پژوهش کلان‌شهر تهران به‌عنوان پایتخت ایران به‌عنوان نمونه برای دستیابی به اهداف زیر انتخاب گردید:

- ایجاد یک شبکه جزایر حرارتی شهری بر اساس دیدگاه اتصال در شهر تهران در راستای درک ویژگی‌های ساختاری اثر جزایر حرارتی شهری،
- ارزیابی شبکه جزایر حرارتی شهری در شهر تهران در راستای تعیین سطح اولویت برای اجرای اقدامات کاهنده دما.

۲. پیشینه پژوهش

۲-۱. مطالعات داخلی

در سطح ملی پژوهش‌هایی پیرامون جزایر حرارتی و دمای سطح زمین انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات ذیل اشاره نمود:

بخشی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی نقش الگوی رشد شهری در ایجاد جزایر حرارتی در شهر ساری پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که شکل‌گیری جزایر حرارتی در شهر ساری وابسته به هر دو نوع رشد شهر (عمودی و افقی) بوده و ایجاد نواحی حرارتی با نوع پوشش زمین، تراکم جمعیتی و ساختمانی رابطه معناداری داشته است. همچنین اکثر نواحی حرارتی فعلی شهر ساری شامل نواحی بوده است که در دهه‌های گذشته به شهر اضافه شده‌اند.

مرتضوی اصل و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر کاربری اراضی بر پراکنش فضایی جزایر خنک در شهر تهران پرداختند. بر اساس نتایج این مطالعه، پایین‌ترین میزان جزایر خنک به ترتیب در بهاران، نیاوران و دربند بود و در طرف مقابل بالاترین میزان جزیره حرارتی به ترتیب در محله بوستان ولایت، شهرک شهید باقری و فرودگاه مهرآباد مشاهده شد. همچنین نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که بالاترین میانگین دمایی در بین کاربری‌ها مربوط به مناطق سیمانی / سنگفرش شده و پایین‌ترین میانگین دما مربوط به کاربری آب (۳۲/۴) درجه سانتی‌گراد) بود. بر اساس نتایج و مقایسه درصد هر کدام از کاربری‌های اراضی در مناطق دارای جزایر حرارتی و جزایر خنک، در مناطق سرد سهم پوشش گیاهی و در مناطق گرم سهم کاربری سیمانی / سنگفرش چشمگیر بود. با این تفاسیر، یکی از راه‌های کارآمد پیشنهادی در این تحقیق، برای تبدیل جزایر گرمایی به جزایر خنک و مدیریت جزایر حرارتی، استفاده از گیاهان با نیاز آبی کم در پشت‌بام‌ها با عنوان پشت‌بام‌های سبز است.

جعفرزاده و حسنی تبار (۱۴۰۰) در پژوهشی به مطالعه حداقل دمای سطح زمین^۱ (LST) و بررسی انطباق آن با الگوهای کاربری اراضی پرداختند. در این تحقیق، جهت ارزیابی ارتباط بین دمای سطح زمین و نوع کاربری اراضی، با استفاده از تصویر TIRS-Landsat-8 اقدام به محاسبه دمای سطح زمین به روش Window Split و استخراج الگوی کاربری اراضی به روش طبقه‌بندی شیء-گرا در منطقه‌ای به وسعت ۲۲۱۸/۳۳ کیلومترمربع، واقع در شمال غرب ایران شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که دمای سطح زمین به‌شدت از رطوبت سطحی و تراکم پوشش گیاهی تأثیر می‌پذیرد، به طوری که سطوحی که دارای رطوبت کم و پوشش گیاهی کم تراکم باشند، بیشترین دما را بر روی تصاویر حرارتی از خود نشان می‌دهند.

درویشی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی ارتباط بین دمای سطح زمین و کاربری اراضی با استفاده از ماهواره لندست طی یک دوره ۳۳ ساله در شهرستان مریوان پرداختند. نتایج به‌دست آمده مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد، با افزایش مساحت زمین‌های مسکونی و بایر و همچنین با کاهش پوشش گیاهی و زمین‌های کشاورزی در دوره‌های مورد مطالعه، دما روند افزایشی داشته است.

۲-۲. مطالعات خارجی

در سطح بین‌المللی نیز مطالعاتی پیرامون دمای سطح زمین، جزایر حرارتی و جزایر سرد در سال‌های اخیر انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات ذیل اشاره نمود:

سهبانی (۲۰۲۱) در پژوهشی به بررسی ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی LST در یک ذخیره‌گاه زیست‌کره واقع در کشور هندوستان با استفاده از تصویر ماهواره‌ای Landsat و الگوریتم تک کانال پرداخت. نتایج این مطالعه نشان داد که بین LST با تراز ارتفاع، شاخص‌های پوشش گیاهی، شاخص برف و شاخص آب همبستگی وجود دارد. این همبستگی به‌گونه‌ای است که LST با شاخص‌های پوشش گیاهی همبستگی مثبت و با شاخص برف و آب همبستگی منفی داشتند. همچنین بررسی الگوی خوشه‌ای مکانی-زمانی و پرت LST از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۹ نشان داد که تغییر مکانی-زمانی قابل توجه LST در منطقه مورد مطالعه در این بازه زمانی مشاهده شده است (Sahani, 2021).

1. Low Surface Temperature

گوها و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهش خود به تجزیه و تحلیل فصلی بلندمدت و رابطه بین LST و NDBI با استفاده از داده‌های Landsat در شهر ریرپور کشور هندوستان پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد در منطقه مورد مطالعه این پژوهش، LST در تمامی فصول دمای سطح زمین همبستگی مثبتی با NDBI دارد. به صورت دقیق‌تر، قوی‌ترین میزان همبستگی بین این دو عامل در فصل پس از موسمی (۰/۷۲) بوده و پس از آن فصل‌های موسمی (۰/۶۹)، پیش از موسمی (۰/۶۷) و زمستان (۰/۵۷) به ترتیب بیشترین همبستگی را داشتند. همبستگی LST با پوشش گیاهی، قوی، با زمین‌های ساخته شده و باز، قوی تا متوسط و با بدنه‌های آبی، متوسط بدست آمده است (Guha et al., 2021).

کیو و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی نحوه اتصال جزایر سرد برای بهینه‌سازی الگوی فضایی جزایر سرد پرداختند و با ارائه یک چارچوب اتصال جزیره سرد در منطقه نانجینگ کشور چین، منابع خنک‌کننده- شبکه‌های خنک‌کننده را شناسایی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در مجموع ۲۷ منطقه منبع خنک‌کننده و ۵۲ راهرو خنک‌کننده در منطقه شناسایی گردید. این چارچوب ارائه شده می‌تواند به عنوان یک اقدام استراتژیک برای جلوگیری از تکه‌تکه شدن و جداسازی جزیره سرد مورد استفاده قرار گیرد، که پیامدهایی را برای جلوگیری از گسترش بیشتر جزیره گرمایی شهری فراهم می‌کند (Qiu et al., 2023).

هانگ و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه خود به بررسی رابطه مکانی و زمانی بین زیرساخت سبز و جزیره گرمایی شهری در فصول بهار و تابستان در شهر فوژو در کشور کره پرداختند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که داده‌های سنجش از راه دور می‌توانند به طور مؤثر برای وارونگی UHI مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این، این مطالعه نشان داد که پیچیدگی زیرساخت‌های سبز، از منظر الگوی کلی یا مطالعه طبقه‌بندی بر اساس نسبت ناحیه هسته، بر کاهش UHI در هر دو فصل تأثیر دارد. در نتیجه، این مطالعه بر اهمیت یک طرح معقول زیرساخت سبز شهری برای کاهش UHI تأکید می‌کند (Hong et al., 2023).

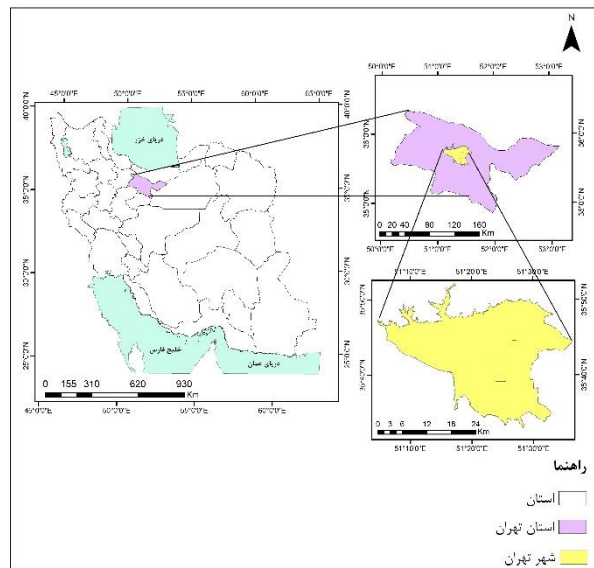
لین و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی به بررسی ارتباط بین خصوصیات مورفولوژیکی مناطق ساخته شده و جزایر حرارتی سطحی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در مقایسه با الگوی سیمای سرزمین، ویژگی مورفولوژیکی کاربری اراضی نقش مهم‌تری در محیط‌های حرارتی شهری ایفا می‌کند. به طوری که شدت پدیده جزایر حرارتی سطحی در منطقه سنژن کشور چین به طور مثبت به نسبت هسته، لبه، و پل مناطق ساخته شده مرتبط بود، اما به نسبت جزیره حرارتی ارتباط منفی داشت. نتایج این تحقیق می‌تواند به برنامه‌ریزان شهری کمک کند تا بر تأثیر ویژگی مورفولوژیکی در مرحله اولیه طراحی محیط حرارتی تأکید کنند (Lin et al., 2024).

به طور کلی با استناد به مطالعات انجام شده قبلی و ادبیات موضوعی تحقیق می‌توان گفت در مطالعات پیشین، اتصال فضایی بین لکه‌های حرارتی نادیده گرفته شده است. حال از آن جایی که افزایش اتصال جزایر حرارتی می‌تواند قدرت اثرات آن‌ها را تشدید کند (Zhou et al., 2018)، بنابراین نتایج پژوهش‌های قبلی نماینده ویژگی‌های الگوی فضایی واقعی اثرات UHI نیستند.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳-۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر تهران که عنوان پایتخت ایران را به همراه دارد، با وسعت ۷۳۰ کیلومتر مربع بین ۳۴ دقیقه و ۳۵ درجه تا ۳۵ درجه و ۵۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی واقع شده است. گستره کنونی تهران از ارتفاع ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متری از سطح دریا امتداد یافته است؛ این ارتفاع از شمال به جنوب کاهش می‌یابد. تهران دارای اقلیم نیمه‌خشک بوده و مسیر اصلی و جهت باد غالب شهر تهران، شمال غرب به جنوب شرق است (شکل شماره ۱). این شهر پرجمعیت‌ترین شهر و پایتخت ایران، مرکز استان تهران و شهرستان تهران است. شهر تهران در برآورد سال ۱۴۰۱ بالغ بر ۹۰۳۹۰۰۰ تن جمعیت داشته است و بر اساس برآورد سال ۲۰۱۸ سازمان ملل متحد، سی و چهارمین شهر پرجمعیت جهان و پرجمعیت‌ترین شهر غرب آسیا هست. کلان‌شهر تهران نیز دومین کلان‌شهر پرجمعیت خاورمیانه است.



شکل ۱. معرفی منطقه مطالعاتی شهر تهران (منبع: نگارندگان)

از منظر فضای سبز شهری در حالت کلی شهر تهران دارای ۵۹۴۹ هکتار فضای سبز می‌باشد که از این میزان مساحت فضای سبز معابر شهری ۸۲۵۳ هکتار و کمربند سبز پیرامون شهر ۴۲۸۵۲ هکتار است. همچنین مجموع مساحت فضای سبز درون شهری و برون شهری تهران ۵۶۷۸۴ هکتار است که از این رقم سرانه فضای سبز درون شهری تهران ۱۶/۳۳ مترمربع و سرانه فضای سبز برون شهری تهران ۵۰/۲۴ مترمربع است (جاویدی، ۱۳۹۹).

۲-۳. محاسبه دمای سطح زمین

روش‌های متعددی برای بازیابی LST زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توسعه یافته است (Soleimani Vosta Kolaei & Akhoondzadeh, 2018). تفاوت اصلی این روش‌ها در فرمول ریاضی و پارامترهای ورودی است (Jos'e et al., 2004). در تمام روش‌های تخمین LST با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، تخمین تابش طیفی و دمای روشنایی نیز ضروری است (Kant et al., 1998). در این پژوهش دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا (SW) محاسبه شد. روش SW با استفاده از اختلاف رادیانس در باندهای مختلف، آثار اتمسفری را به حداقل می‌رساند و گسیلمندی، شاخص ورودی در آن در نظر گرفته می‌شود. فرمول کلی این الگوریتم جهت محاسبه LST به شکل زیر است:

$$LST = TB_{10} + (TB_{10} - TB_{11}) + C_2 (TB_{10} - TB_{11})^2 + CO + (C_3 + C_4W) (1 - \varepsilon) + (C_5 + C_6W) \Delta\varepsilon \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این فرمول LST دمای سطح زمین برحسب کلوین، C_0 تا C_6 مقادیر ضریب SW، TB_{10} و TB_{11} دمای درخشندگی باندهای ۱۰ و ۱۱ برحسب کلوین، ε میانگین انتشار سطح زمین باندهای TIRS، W محتوای بخار آب اتمسفر است و $\Delta\varepsilon$ تفاوت در LSE است. مقادیر ضرایب SW در جدول ۱ آورده شده است (Juan et al. 2014).

جدول ۱. مقادیر ضرایب پنجره مجزا (Juan et al. 2014)

ثابت	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
مقدار	-۰/۲۶۸	۱/۳۷۸	۰/۱۸۳	۵۴/۳۰۰	-۲/۲۳۸	-۱۲۹/۲۰۰	۱۶/۴۰۰

روش گام‌به‌گام برای الگوریتم SW استفاده شده به شرح زیر است:

۳-۳. محاسبه دمای درخشندگی باند ۱۰ و ۱۱

دمای درخشندگی برای باندهای ۱۰ و ۱۱ تخمین زده می‌شود. دمای درخشندگی تابش الکترومغناطیسی است که از بالای جو زمین به سمت بالا حرکت می‌کند. یک فرآیند کالیبراسیون حرارتی با تبدیل مقادیر DN حرارتی باندهای حرارتی خام (۱۰ و ۱۱) TIRS به تابش طیفی TOA و پس از استفاده از TB مطابق شکل زیر انجام شده است:

$$TB = K2 / (\ln (K1 / L\lambda + 1)) - 273.15 \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این فرمول K1 و K2 مقادیر ثابت حرارتی باندهای ۱۰ و ۱۱ هستند، و L بالای تابش طیفی اتمسفر است (Zanter, 2019).

$$K1_CONSTANT_BAND_10 = 774.8853 \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$K2_CONSTANT_BAND_10 = 1321.0789$$

$$K1_CONSTANT_BAND_11 = 480.8883$$

$$K2_CONSTANT_BAND_11 = 1201.1442$$

۳-۴. محاسبه رادیانس باندهای حرارتی

برای محاسبه این امر از باندهای ۱۰ و ۱۱ TIRS بر اساس فرمول زیر استفاده گردید.

$$L\lambda = ML * Qcal + AL \quad \text{رابطه (۴)}$$

در فرمول فوق $L\lambda$ بیانگر رادیانس طیفی بالای اتمسفر به $(m^2 * srad * \mu m)$ ، ML فاکتور ضربی خاص باند ۱۰ و ۱۱، Qcal تصویر باندهای ۱۰ و ۱۱، AL بیانگر فاکتور افزایشدهنده خاص باندهای ۱۰ و ۱۱ می‌باشد (Chander et al., 2009). لازم به توضیح است که AL و ML در فایل مرجع تصویر مورد استفاده قابل دسترسی است.

۳-۵. محاسبه ضریب گسیلمندی

برای محاسبه ضریب گسیلمندی ابتدا باید فاکتور پوشش گیاهی جزء به جزء (FVC) را محاسبه نمود. این پارامتر با استفاده از فاکتور NDVI منطقه طبق فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$FVC = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right) \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه $NDVI_s$ و $NDVI_v$ شاخص‌های NDVI برای خاک و پوشش گیاهی هستند (Dymond et al., 1992). سپس بعد از محاسبه FVC، ضریب گسیلمندی بر اساس رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$LSE = \varepsilon_s (1 - FVC) + \varepsilon_v * FVC \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این فرمول ε_s نشان‌دهنده گسیلمندی خاک، ε_v گسیلمندی پوشش گیاهی و FVC بیانگر پوشش گیاهی جزء به جزء می‌باشد (Coll et al., 1997). لازم به ذکر است که در این مطالعه، کلیه مراحل فوق در سامانه Google earth engine کدنویسی شده و در نهایت فاکتور LST برای سال ۲۰۲۳ در منطقه مورد مطالعه محاسبه گردید.

۳-۶. طبقه‌بندی تصویر ماهواره‌ای سال ۲۰۲۳ شهر تهران

در این پژوهش، تصویر ماهواره‌ای لندست با توجه به سطح تفصیلی داده‌های مورد نیاز و شناخت کلی الگوی فضایی منطقه انتخاب شد. این تصاویر پاسخگوی اهداف این تحقیق در مقیاس میانی می‌باشد. انتخاب این تصاویر مزیت‌هایی همچون دید وسیع و یکپارچه، چند

طیفی بودن تصاویر و پوشش تکراری تصاویر را در مقیاس‌های مختلف زمانی دارد. در این مطالعه از تصاویر سنجنده OLI لندست ۸ با توان تفکیک 30×30 مربوط به آگوست (مرداد) سال ۲۰۲۳ استفاده شد. به این منظور داده‌های ماهواره‌ای لندست پس از انجام تصحیح و پردازش اولیه با استفاده از روند نظارت‌شده طبقه‌بندی انجام گرفت. جهت طبقه‌بندی پوشش زمین از روش بیشترین واحد همسایگی و نرم‌افزار ENVI-5، استفاده و طبقات پوشش زمین استخراج گردید. با توجه به این که یکی از متداول‌ترین الگوهای رده‌بندی پارامتریک، روش بیشترین احتمال است، این روش در پژوهش حاضر به کار گرفته شد. دقت تصاویر حاصله نیز از طریق نرم‌افزار ArcMap 10.7 محاسبه و ارائه شد. این الگو، هر پیکسل مجهول را به محتمل‌ترین رده اختصاص می‌دهد. در این روش فرض بر این است که توزیع داده‌های آموزشی هر رده نرمال باشد. شکل ۲ بخش اول فرایند طبقه‌بندی تصاویر ماهواره لندست به‌طور خلاصه را نمایش می‌دهد.

۷-۳. استخراج جزایر حرارتی شهری

برای تجزیه و تحلیل تغییرات در الگوی فضایی اثر جزایر حرارتی شهری (UHI) در منطقه مورد مطالعه، طبقه‌بندی دمای سطح نرمال شده ضروری است. استفاده از روش میانگین انحراف استاندارد نشان می‌دهد که نتایج طبقه‌بندی مشتق شده از محیط حرارتی با شرایط رایج واقعی منطقه مورد مطالعه مطابقت دارد (Tian et al., 2021). این روش داده‌های دمای سطح نرمال شده را در پنج سطح مجزا دسته‌بندی می‌کند: دماهای خیلی کم، دمای کم، دمای متوسط، دمای زیاد و دمای خیلی زیاد (Sun et al., 2021) (جدول ۲). تحقیقات قبلی عمدتاً مناطق با دمای بالا و دمای خیلی بالا را به‌عنوان لکه‌های UHI شناسایی کرده‌اند (Xiang et al., 2023; Zhao et al., 2024). با این حال، با توجه به شرایط اقلیمی و آب‌وهوایی کلان‌شهر تهران، در این تحقیق، منحصراً مناطق با دمای خیلی بالا را به‌عنوان نماینده تکه‌های UHI تعیین شد.

جدول ۲. طبقه‌بندی استاندارد دمای سطح زمین

طبقه‌بندی استاندارد	دمای سطح زمین
$T_n < T_{mean} - STD$	دمای خیلی پایین
$T_{mean} - STD \leq T_n < T_{mean} - 0.5 STD$	دمای پایین
$T_{mean} - 0.5 STD \leq T_n < T_{mean} + 0.5 STD$	دمای متوسط
$T_{mean} + STD \leq T_n < T_{mean} + 2STD$	دمای بالا
$T_n \geq T_{mean} + 2STD$	دمای خیلی بالا

در جدول فوق T_{mean} میانگین دمای نرمال شده تمام پیکسل‌ها در منطقه مورد مطالعه در یک زمان مشخص، T_n دمای سطحی نرمال شده یک پیکسل خاص و انحراف معیار دمای سطح زمین در منطقه مورد مطالعه در یک زمان مشخص است.

۸-۳. تجزیه و تحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی

تحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی^۱ (MSPA) رویکردی است که برای شناسایی تکه‌های الگوریتمی مهم مبتنی بر مورفولوژی پیشنهاد شده است (Wei et al., 2022). این روش برای مشخص کردن شکل جغرافیایی و اتصال اجزای تصویر استفاده می‌شود و برای تجزیه و تحلیل تقسیم‌بندی هر دو پیش‌زمینه و پس‌زمینه قابل استفاده است.

این روش همچنین برای شناسایی هفت کلاس الگوی اساسی در سطح UHI و ساخت یک شبکه حرارتی برای کاهش اثر UHI استفاده شد (Zhang et al., 2023). در این تحقیق از ابزار Guidos toolbox برای تحلیل الگوی فضایی جزایر حرارتی استفاده شده است. در این راستا در این پژوهش قانون ۸ همسایه در جهت طبقه‌بندی مورفولوژیکی UHI به هفت دسته الگوی متمایز انتخاب گردید (جدول ۳). از این میان، هسته معمولاً الگوی فضایی غالب UHI هستند که از اهمیت خاصی برخوردارند. ناحیه هسته جزایر حرارتی اثر گرمایشی پایداری

دارد. علاوه بر این، ناحیه هسته در این شبکه به‌خوبی به سایر اجزا متصل است و برای ساخت یک شبکه حرارتی مناسب است. اثر گرمایش و اتصال جزایر حرارتی شهری با اندازه جزیره همبستگی مثبت دارد، به‌طوری‌که جزایر کوچک‌تر در شهرها ظرفیت گرمایشی و اتصال کمتری دارند (Lin et al., 2021; Zhao et al., 2024). در همین حال، جزایر حرارتی شهری کوچک‌تر در برابر توده‌های شهری آسیب‌پذیر هستند و ظرفیت گرمایشی‌کنندگی آن‌ها به‌شدت کاهش می‌یابد (Gao et al., 2022). بنابراین در این پژوهش از رویکرد MSPA جهت تجزیه و تحلیل مورفولوژیکی UHI شهر تهران و استخراج هسته‌های جزایر استفاده گردید.

جدول ۳. طبقه‌بندی تجزیه و تحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی و معانی آن‌ها در الگوی جزایر حرارتی (Yu et al., 2021)

طبقه الگو	معنی در زمینه جزایر حرارتی
هسته ^۱	تکه‌هایی از HUI که فاصله آن‌ها تا مناطق غیر UHI بیشتر از عرض لبه داده شده باشد.
جزیره کوچک ^۲	تکه‌های کوچک UHI که برای داشتن پیکسل‌های هسته بسیار کوچک هستند
سوراخ شدگی ^۳	شبیبه یک لبه است اما مربوط به مرز داخلی یک ناحیه هسته (UHI) است.
لبه یا حاشیه ^۴	مجموعه‌ای از پیکسل‌های UHI که فاصله آن‌ها تا لبه جزیره کمتر یا مساوی با عرض لبه داده شده باشد.
پل ^۵	مجموعه‌ای از پیکسل‌های UHI غیرهسته‌ای به‌هم‌پیوسته تعریف می‌شود که انتهای حداقل دو ناحیه هسته متفاوت را به هم متصل می‌کند.
پیچ ^۶	شبیبه به پل‌ها است اما انتهای عنصر به قسمت‌های مختلف یک ناحیه هسته (UHI) متصل است.
شاخه ^۷	مجموعه‌ای کشیده از پیکسل‌های UHI متوالی که از یک ناحیه UHI سرچشمه می‌گیرد و در انتهای دیگر به هیچ ناحیه UHI دیگری متصل نیست

۳-۹. تجزیه و تحلیل پیوستگی

تجزیه و تحلیل اتصال سیمای سرزمین ابزاری جامع برای سنجش تأثیرات ادغام شده فرآیندهای اکولوژیکی شامل انرژی، تبادل مواد، مهاجرت و نرخ حرکت تکه‌ها در میان عناصر منظر است (سادات و همکاران، ۱۳۹۹). اتصال یک عامل محوری در ارزیابی اهمیت لکه‌های چشم‌انداز حرارتی است. از طریق تجزیه و تحلیل اتصال، اهمیت منابع UHI انتخاب شده را می‌توان ارزیابی نموده و در نهایت منابعی که اتصال بالاتری را برقرار می‌کنند، به‌عنوان منابع UHI مهم‌تر در نظر گرفت. با کاهش سطح اتصال این منابع مهم جزایر حرارتی، می‌توان اثر UHI در منطقه را کاهش داد. در این پژوهش شاخص یکپارچه اتصال (IIC) و احتمال اتصال (PC) در نرم‌افزار Conefor 2.6 برای سنجش اتصال سیمای سرزمین حرارتی منابع UHI انتخاب شدند که تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی هسته‌های جزایر حرارتی را تسهیل می‌کنند. فرمول‌های دقیق برای محاسبه IIC و PC به شرح زیر است:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n p_{ij}^* a_i a_j}{A^2 L} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i a_j}{1 + \text{anl}_{ij}}}{A^2 L} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

در این روابط، n تعداد کل تکه‌ها در سطح HUI، a_i و a_j به ترتیب مساحت تکه‌های جزایر حرارتی i و j ، anl_{ij} تعداد کل اتصالات بین جزایر حرارتی i و j در کوتاه‌ترین مسیر، P_{ij} حداکثر احتمال اتصال بین جزایر i و j و L و A مساحت کل جزایر حرارتی را نشان می‌دهد (Herrera et al., 2017). شاخص dPC ارزیابی خوبی از قدرت اثر گرمادهی در منابع حرارتی ارائه می‌دهد. بر اساس مقادیر dPC داده‌های محاسبه شده توسط نرم‌افزار Conefor 2.6، از روش نقطه شکست طبیعی برای طبقه‌بندی جزایر حرارتی به دو دسته، استفاده شد. به‌طوری

1. Core
2. Islet
3. Perforation
4. Edge
5. Bridge
6. Loop
7. Branch

که لکه‌هایی که دارای مقادیر $dPC > 1$ هستند به‌عنوان جزایر حرارتی قوی و آن‌هایی که dPC کمتر از ۱ دارند به‌عنوان جزایر حرارتی ضعیف در نظر گرفته می‌شوند. سپس قدرت اتصال مناطق منبع حرارتی توسط متریک $dIIC$ رتبه‌بندی می‌شود. در این مرحله نیز بر اساس مقادیر $dIIC$ محاسبه شده توسط نرم‌افزار Conefor 2.6، از روش نقطه شکست طبیعی برای طبقه‌بندی $dIIC$ ها به دو دسته استفاده شد. گونه‌ای جزایری که $dIIC$ کمتر از ۱۳ دارند به‌عنوان جزایر اتصال ضعیف و آن‌هایی که $dIIC > 13$ دارند به‌عنوان جزایر با اتصال قوی در نظر گرفته می‌شوند. در نهایت، بر اساس نتایج شناسایی شده در بالا، جزایری با اثر حرارت‌دهی قوی و اتصال قوی به‌عنوان سطح ۱، اثر حرارت‌دهی ضعیف و اتصال ضعیف سطح ۳ و بقیه در سطح ۲ درجه‌بندی می‌شوند (Qiu et al., 2023). بنابراین در این پژوهش هسته‌های استخراج شده از مرحله پیشین، پس از غربالگری از نظر برخورداری از حداقل مساحت، به‌عنوان جزایر حرارتی مهم کلان‌شهر تهران، با روش فوق مورد بررسی و تجزیه و تحلیل پیوستگی قرار گرفتند. در مرحله بعد کریدورهای اتصال‌کننده جزایر حرارتی سطح ۱ و ۲ به یکدیگر و جزایر سطح ۳ شناسایی گردید.

۱۰-۳. ساخت سطح مقاومتی

انواع مختلف پوشش زمین، ظرفیت مشخصی از انتقال گرما را نشان می‌دهند که بر درجه تداخل حرارتی در طی فرآیندهای انتشار تصادفی تأثیر می‌گذارد (Sheng et al., 2017). بنابراین، در این تحقیق، با تکیه بر تحقیقات (Hu & Li, 2022)، تأثیر کاربری زمین را بر مسیرهای انتشار UHI، در نظر گرفته شد تا سطح مقاومتی ایجاد شود که مقاومت افقی را در الگوهای فضایی پیچیده مشخص می‌کند. بدنه‌های آبی و تالاب‌ها معمولاً دارای رسانایی حرارتی پایین و نرخ گرمایش آهسته هستند که در نتیجه دمای محیط را کاهش می‌دهند (Coutts et al., 2013). بنابراین، به آن‌ها مقدار مقاومت ۱۰۰ اختصاص داده شد. اراضی جنگلی به دلیل پوشش گیاهی متراکم، ارزش مقاومت ۷۵ را به خود اختصاص داده‌اند. زمین‌های زراعی از «اثر خنک‌کنندگی آبیاری» بهره می‌برند. زیرا محصولات کاشته شده، اثر پوشش گیاهی را فراهم می‌کنند (Sacks et al., 2009). بنابراین، مقدار مقاومت آن‌ها ۵۰ در نظر گرفته شد. علفزارها که به دلیل دمای متوسط بالاتر در انواع پوشش گیاهی شناخته می‌شوند (Zou et al., 2021)، مقدار مقاومت ۲۵ را دریافت می‌کنند. زمین‌های ساختمانی، که با تراکم ساختمانی بالا، تهویه محدود و ضرایب هدایت حرارتی بالا شناخته می‌شوند (Yu et al., 2021)، دارای مقدار مقاومت ۵ هستند. زمین‌های بلااستفاده که اغلب فاقد پوشش بوده و مستقیماً تحت تأثیر تشعشع خورشید قرار می‌گیرند (Tran et al., 2017)، بالاترین دما را نشان می‌دهد و مقدار مقاومت برای آن‌ها ۱ در نظر گرفته شد (Zhao et al., 2024).

۱۱-۳. ساخت شبکه حرارتی

۱۱-۳-۱. ساخت راهروهای حرارتی

در این مطالعه جهت اتصال جزایر حرارتی سطح ۱ و ۲ به یکدیگر و جزایر سطح ۳ از مدل MCR جهت اتصال بین دو یا چند ناحیه ورودی استفاده شد (Dai et al., 2021). استفاده از این روش به تسهیل شناخت مسیرهای متصل‌کننده جزایر حرارتی کمک می‌کند. لذا الگوی فضایی جهت شناسی مسیر انتقال گرما امکان‌پذیر می‌شود (Zhao et al., 2024). فرمول محاسبه به شرح زیر است:

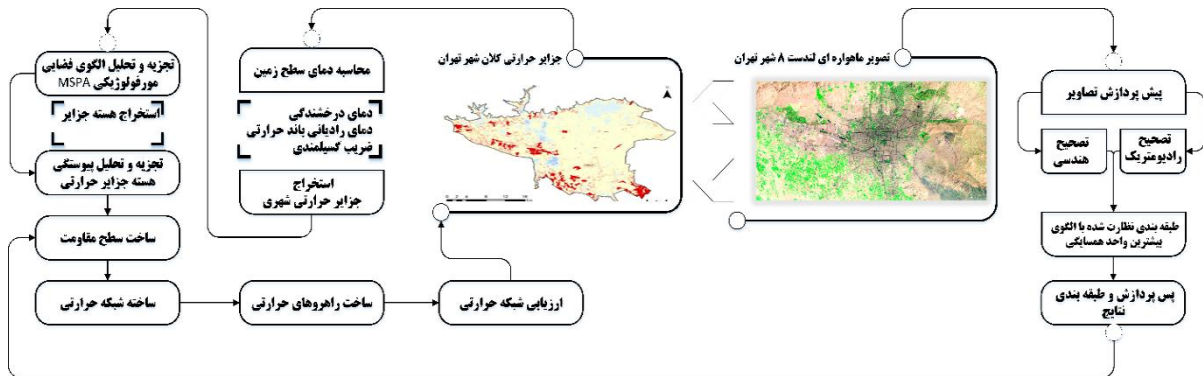
$$MCR = f_{min} \sum_{i=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (\text{رابطه ۸})$$

در این فرمول D_{ij} نشان‌دهنده فاصله فضایی جزایر حرارتی از نقطه مبدأ Z تا جزیره اکولوژیکی i است و R_i جابه‌جایی از ضریب مقاومت واحد سیمای سرزمین i به یک لکه خاص است.

۱۱-۳-۲. ارزیابی شبکه حرارتی

جهت ارزیابی و طبقه‌بندی کریدورهای حرارتی شهر تهران در ابتدا از میانگین هزینه مسیر استفاده شد. بدین ترتیب راهروهایی که هزینه مسیر آن‌ها از میانگین هزینه مسیر کل راهروهای شناسایی شده، کمتر بود به‌عنوان راهروهای قوی و راهروهایی که میانگین مسیر

آن‌ها از میانگین هزینه مسیر کل راهروهای شناسایی شده بیشتر بود، به‌عنوان راهروهای حرارتی ضعیف شناسایی شدند. سپس، مسیرهای حرارتی با نقشه درجه‌بندی LST مقایسه و تجزیه و تحلیل شدند تا پتانسیل گرمایشی این مسیرها مشخص شود. در نهایت، راهروهای اتصال بالا با اثرات حرارتی قوی به‌عنوان راهروهای سطح ۱، راهروهای اتصال پایین با اثرات گرمایشی ضعیف به‌عنوان راهروهای سطح ۳ و بقیه به‌عنوان راهروهای حرارتی سطح ۲ انتخاب شدند. شکل شماره ۲ به‌طور خلاصه فرایند انجام تحقیق را نمایش می‌دهد.

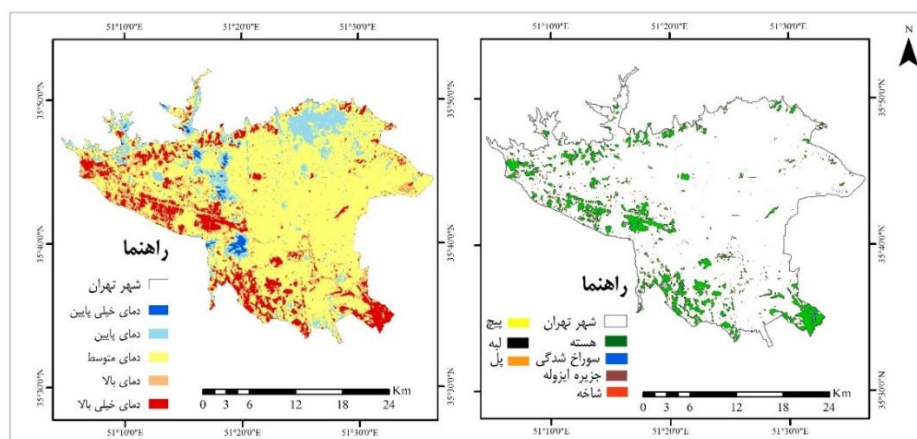


شکل ۲. فرایند انجام تحقیق

۴. یافته‌های پژوهش

۴-۱. شناسایی منابع و هسته‌های جزایر حرارتی شهری

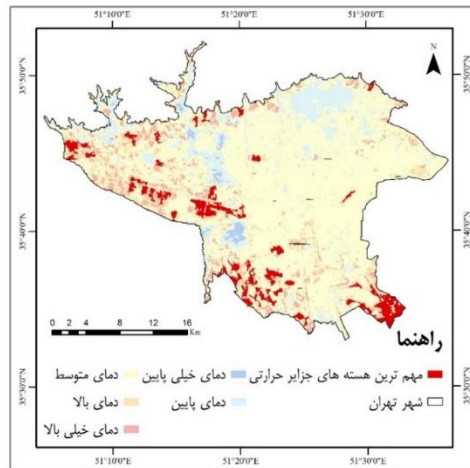
براساس نتایج به دست آمده، در مجموع تعداد ۶۹۸ منطقه با دمای خیلی بالا، که به‌عنوان لکه‌های UHI در شهر تهران در نظر گرفته می‌شوند، شناسایی شده‌اند که وسعتی معادل با ۸۸/۵۷ کیلومترمربع، معادل ۱۱/۷ درصد از کل منطقه مورد مطالعه را دارند. به‌طور خاص، پهنه‌هایی با دمای بالا مساحت ۹۰/۳۱ کیلومترمربع را پوشش می‌دهد که ۱۱/۹ درصد از کل منطقه را تشکیل می‌دهد. علاوه بر این، مساحت مناطق دارای دمای متوسط ۶۴/۵ درصد از منطقه تحقیقاتی، معادل ۴۸۹ کیلومترمربع را شامل می‌شود. پس از آن مناطق دارای دمای پایین و خیلی پایین به ترتیب تقریباً ۱۱ و ۱ درصد از مساحت شهر تهران را تشکیل می‌دهند (شکل ۳). از نظر تحلیل فضایی، تراکم تکه‌های UHI در نیمه غربی و جنوبی شهر تهران به‌صورت تکه‌تکه بیشتر از نیمه شمالی و شرقی و ناحیه مرکزی شهر می‌باشد.



شکل ۳. حداقل دمای سطح زمین و عناصر شبکه جزایر حرارتی کلان شهر تهران (منبع: یافته‌های تحقیق)

در شبکه جزایر حرارتی شهر تهران، مهمترین عارضه هسته‌ها هستند که ۶۰/۵ درصد از شبکه را تشکیل می‌دهند که مساحتی معادل با ۳۳/۵ کیلومترمربع دارند. در رتبه دوم پس از هسته، عارضه لبه ۲۸/۷ درصد از این شبکه را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین شاخه‌ها

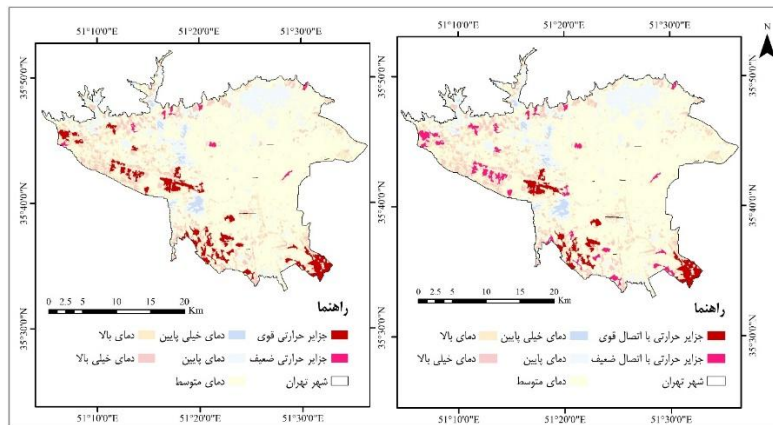
و جزایر ایزوله به‌عنوان سومین و چهارمین عنصر شبکه به ترتیب $5/4$ و $3/6$ درصد از شبکه جزایر حرارتی شهر تهران را در برمی‌گیرند. سهم مابقی عوارض در این شبکه ناچیز و در مجموع حدود ۲ درصد از شبکه جزایر حرارتی شهر تهران را تشکیل می‌دهند. از مجموع جزایر شناسایی در شهر تهران، تعداد ۳۷ جزیره از حداقل مساحت موردنظر برخوردار بودند که به‌عنوان مهمترین UHI‌های شهر تهران معرفی و در ادامه مورد تحلیل قرار گرفتند (شکل ۴).



شکل ۴. مهمترین جزایر حرارتی کلان‌شهر تهران (منبع: یافته‌های تحقیق)

۴-۲. بررسی درجه اهمیت هسته‌های UHI

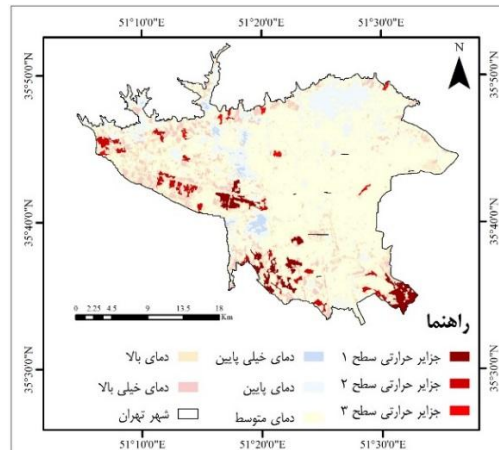
مطابق نتایج تحقیق در مجموع، ۲۹ عدد هسته جزیره حرارتی قوی در شهر تهران با توزیع نسبتاً پراکنده با تمرکز بر جنوب و جنوب‌غربی شهر، شناسایی شده است. همچنین تعداد ۸ هسته با قدرت اتصال بالا با مساحت بالغ بر $19/6$ کیلومترمربع مشخص گردیده است که در جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی منطقه قرار دارند. به‌علاوه ۲۹ هسته با قدرت اتصال کم نیز در شهر تهران شناسایی شده که مجموعاً مساحتی معادل با ۱۷ کیلومترمربع دارند که نقش به‌سزایی در ممانعت از تعدیل و خنک شدن هوا در مناطق پیرامون خود دارند (شکل ۵).



شکل ۵. اهمیت و قدرت اتصال جزایر حرارتی کلان‌شهر تهران (منبع: یافته‌های تحقیق)

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، از نتایج جزایر قوی و ضعیف و جزایر دارای اتصال قوی و ضعیف، درجه‌بندی اتصالات صورت گرفت. تعداد ۸ هسته UHI سطح اول با مساحت $20/6$ کیلومترمربع در جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی قرار دارند که دارای اثر حرارتی بالا هستند. همچنین ۲۱ هسته UHI سطح ۲ با مساحت حدود ۱۳ کیلومترمربع و به‌صورت پراکنده در نیمه غربی و جنوبی منطقه وجود دارند. به‌علاوه

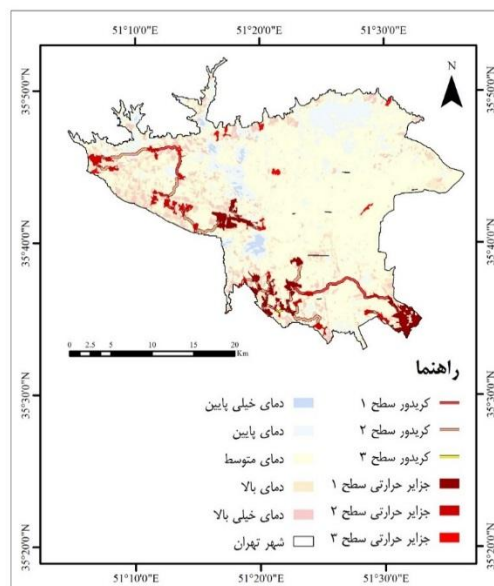
۸ هسته سطح ۳ با اثر حرارتی کم به صورت پراکنده با تمرکز در قسمت شمال غربی و مرکز شهر تهران شناسایی شده‌اند که در مجموع مساحتی معادل با ۳/۴۴ کیلومترمربع را دارند (شکل ۶).



شکل ۶. سطح‌بندی جزایر حرارتی کلان‌شهر تهران (منبع: یافته‌های تحقیق)

۳-۴. شناسایی کریدورهای حرارتی

همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است تعداد ۳۲ کریدور حرارتی شناسایی شده است که در مجموع طولی معادل ۱۳۲ کیلومتر دارند. این راهروها در بخش‌های جنوبی، غربی و شمال غربی منطقه قرار دارند. این راهروها اکثر هسته‌های جزایر حرارتی شناسایی شده را به هم متصل می‌کنند و چارچوب اصلی شبکه حرارتی شهر تهران را تشکیل می‌دهند. در این میان ۱۶ راهروی متصل‌کننده در شبکه به‌عنوان راهروی حرارتی قوی به طول تقریبی ۷۷ کیلومتر و ۱۵ راهروی متصل‌کننده ضعیف به طول ۵۴/۶ کیلومتر شناسایی شده است. بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل اتصال در شبکه حرارتی شهر تهران نیز تعداد ۱۰ راهرو سطح ۱ جمعاً به طول ۴۷/۳ کیلومتر با تمرکز در جنوب و شمال غربی شهر تهران، تعداد ۲۰ راهرو سطح ۲ به طول ۸/۲ کیلومتر و ۱ راهروی سطح ۳ به طول ۱/۵ کیلومتر در شبکه UHI شهر تهران شناسایی شده است.



شکل ۷. سطح‌بندی کریدورهای متصل‌کننده جزایر حرارتی سطح ۱ و ۲ به یکدیگر و سطح ۳ در کلان‌شهر تهران (منبع: یافته‌های تحقیق)

۵. بحث و نتیجه گیری

در سال‌های اخیر، افزایش مساحت شهرها و تغییر کاربری‌های ایجاد شده که منتج به افزایش اراضی نفوذناپذیر شده است، سبب افزایش دمای شهرها و ایجاد پدیده جزایر حرارتی شهری در برخی از مناطق شده است. بنابراین طی سال‌های گذشته، مقابله با این موضوع، تحقیقات بسیاری از پژوهشگران حوزه برنامه‌ریزی محیط‌زیست را به خود اختصاص داده است. هدف از انجام این مطالعه ساخت شبکه جزایر حرارتی شهری (UHI) و تشخیص موقعیت مکانی مناطقی با اثرات شدید UHI در محدوده کلان‌شهر تهران است که از تکیه صرف بر افزایش فضاهای سبز-آبی و اقدامات مدیریتی نابه‌جا در شهر جلوگیری می‌کند. زیرا اتصال بین جزایر می‌تواند انتشار گرما را تشدید کند. در این راستا، در این پژوهش به ویژگی‌های ساختاری جزایر حرارتی منطقه مورد مطالعه و درجه اهمیت آن‌ها توجه خاصی شده است. رویکردی که در مقایسه با روش‌های قبلی تعیین اندازه یا تراکم فضاهای آبی-سبز برای دستیابی به اثرات خنک‌کننده ساده‌تر است (Yu et al., 2021; Masoudi et al., 2019; et al., 2017). به علاوه در این پژوهش، سعی شده است تا تأکید ویژه‌ای بر اتصال جزایر حرارتی با توجه به اهمیت هر یک از کریدورها گردد تا کریدورهای دارای اولویت برای درمان جزایر حرارتی شناسایی شود. زیرا با جستجوی مناطقی با اتصال بیشتر و مهمتر در شبکه، می‌توان قسمت‌هایی از شهر را که اثر UHI در آن‌ها شدیدتر است، مشخص شود. این امر محدودیت‌های مطالعات قبلی که عمدتاً مبتنی بر دیدگاه اتصال جزایر حرارتی بودند را برطرف می‌کند (Qiu et al., 2023). زیرا امروزه پژوهشگران معتقدند که اتصال شبکه حرارتی شهرها مهمتر از قدرت حرارتی یک لکه است. بنابراین، اگر اتصال شبکه در یک منطقه خاص بالاتر از سایر مناطق باشد، آنگاه اثر UHI در آن منطقه شدیدتر است. این بدان معناست که باید اقدامات سرمایه‌گذاری در آن منطقه در اولویت قرار گیرد که این امر می‌تواند روش هدفمندتر و کارآمدتری برای هدایت پروژه‌های کاهش دما در شهرها، ارائه دهد (Zhao et al., 2024).

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میانگین LST در شهر تهران در تاریخ ۱۷ ژوئن سال ۲۰۲۳ برابر با $41/8^{\circ}\text{C}$ بوده در حالی که میانگین LST در جزایر حرارتی شهر تهران $47/8^{\circ}\text{C}$ بوده است. بنابراین جزایر حرارتی شهری شناسایی شده دارای اثر گرم‌کنندگی مثبت هستند و شناسایی الگوی فضایی تشدیدکننده این جزایر می‌تواند گامی مؤثر در جهت شکست اثرات تجمعی آن‌ها باشد. از نظر توزیع فضایی تکه‌های UHI شهر تهران، در نیمه غربی و جنوبی از تراکم بالاتری برخوردارند. علت این امر را می‌توان در کوه‌های مستقر در شمال تهران، گرادیانت ارتفاعی شمال به جنوب آن، تفاوت قابل ملاحظه فضای سبز شرق تهران نسبت به غرب آن و وجود کاربری‌های صنعتی و آلودگی‌های ناشی از حضور آن‌ها و سطوح قابل توجه نفوذناپذیر در غرب تهران دانست. نکته حائز اهمیت در این میان، تراکم بالای جزایر حرارتی در بخش غربی تهران است که برنامه‌ریزی برای مقابله با آن را سخت‌تر و اثرگذاری آن را افزایش می‌دهد. نتایج این بخش از مطالعه با پژوهش‌های صادقی‌نیا و همکاران (۱۳۹۱) و شکیبا و همکاران (۱۳۸۸) همسو است. همچنین بر اساس نتایج حاصله می‌توان گفت که بیشترین سهم را در شبکه جزایر حرارتی شهر تهران، عارضه هسته‌ها دارند که این امر نشان‌دهنده بزرگی جزایر حرارتی و توزیع منطقه‌ای آن‌ها در منطقه مورد مطالعه است. در میان هسته‌های شناسایی شده تعداد ۸ هسته سطح اول، در جنوب غربی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه قرار دارند که دارای اثر حرارتی بالا هستند. بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل اتصال در شبکه حرارتی شهر تهران نیز تعداد ۱۰ راهرو سطح ۱ با تمرکز در جنوب و شمال غربی شهر تهران، تعداد ۲۰ راهرو سطح ۲ و ۱ راهروی سطح ۳ در شبکه UHI شهر تهران شناسایی شده است. بخش غربی منطقه دارای یک راهروی پیوسته و طولانی حرارتی است که قابلیت افزایش دما در این منطقه را با توجه به، به هم پیوستن جزایر حرارتی مستقر در این بخش شهر، دارد. همچنین جزایر بسیار متراکم واقع در جنوب غربی شهر تهران، سبب شناسایی راهروهای کوتاه حرارتی در این بخش شده است که این امر افزایش دما در این قسمت را توجیه می‌کند. یافته‌های این پژوهش را می‌توان برای توسعه مداخلات راهبردی برای ایجاد اختلال شبکه UHI شهرها و تسهیل مدیریت شهری جهت کاهش دمای شهرهای بزرگ مورد استفاده قرار داد. بنابراین این تحقیق بینش‌های ارزشمندی را برای درک پیکربندی فضایی شبکه‌های UHI و ابداع اقدامات پیشگیرانه برای انطباق با محیط‌های حرارتی شهری و کاهش آن ارائه می‌دهد. در نهایت پیشنهادها ذیل جهت مقابله با جزایر حرارتی شهری در تهران پیشنهاد می‌گردد:

- طراحی فضاهای سبز شهر تهران با مساحت بزرگ‌تر، شکل پیچیده‌تر و تراکم بالاتر

- طراحی لکه‌های آب (استخر و آب‌نما) در پارک‌ها
- طراحی فضاهای سبز شهر تهران با مساحت بیش از ۱۰ هکتار
- ایجاد فضای سبز در حاشیه خیابان‌ها، روی بام‌ها و غیره
- مکان‌یابی فضاهای سبز شهر تهران بر اساس مطالعه UHI
- از بین بردن هسته‌های جزایر حرارتی شهر تهران با اولویت ۸ عدد هسته قوی در جنوب و جنوب‌غربی تهران
- کاهش پتانسیل اتصال هسته‌های جزایر حرارتی با ساخت فضاهای سبز- آبی در راهروهای اتصال‌دهنده آن‌ها به‌ویژه ۱۰ راهروی سطح اول

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مهدیس سادات: مدل‌سازی، کمی‌سازی، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج آن‌ها، تهیه پیش‌نویس مقاله
 محمود ذوقی: جمع‌آوری مدل‌سازی داده‌ها، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله
 اسماعیل صالحی: مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر حامی مالی ندارد.

منابع

- بخشی، امیر؛ رسولی، سیدحسن؛ و رحیمی، نیما. (۱۴۰۱). بررسی نقش الگوی رشد شهری در ایجاد جزایر حرارتی در شهرها (نمونه موردی: شهر ساری). *برنامه‌ریزی و توسعه محیط شهری*، ۲(۶)، ۹۴-۷۷.
- جاویدی، ریحانه. (۱۳۹۹). گزارش آماری شهر از وضعیت بوستان‌ها و فضای سبز شهر تهران در سال ۱۳۹۸. پایگاه خبری تحلیلی شهر. <https://shahr.ir/news/4348>
- جعفرزاده، جعفر؛ و حسنی‌تبار، سیدمحمد. (۱۴۰۰). به کارگیری سنجش از دور حرارتی در استخراج دمای سطح زمین و بررسی انطباق آن با الگوهای کاربری اراضی. *کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم محیطی*، ۱(۱)، ۶۶-۵۱.
- درویشی، شادمان؛ رشیدیپور، مصطفی؛ و سلیمانی، کریم. (۱۳۹۸). بررسی ارتباط تغییرات کاربری اراضی با دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مطالعه موردی: شهرستان مریوان. *نشریه جغرافیا و توسعه*، ۱۷(۵۴)، ۱۶۲-۱۴۳.
- سادات، مهدیس؛ صالحی، اسماعیل؛ امیری، محمدجواد؛ و احسانی، امیرهوشنگ. (۱۳۹۹). بهینه‌سازی ساختار سیمای سرزمین با رویکرد تجزیه تحلیل شبکه اکولوژیک و تئوری گراف. *محیط‌شناسی*، ۴(۴)، ۶۴۴-۶۲۵.
- شکیبا، علیرضا؛ ضیائیان فیروزآبادی، پرویز؛ عاشورلو، داوود؛ و نامداری، سودابه. (۱۳۸۸). تحلیل رابطه کاربری و پوشش اراضی و جزایر حرارتی شهر تهران، با استفاده از داده‌های ETM⁺: *نشریه سنجش از دور و GIS/بیران*، ۱(۱)، ۵۶-۳۹.
- صادقی‌نیا، علیرضا؛ علیجانی، بهلول؛ و ضیائیان فیروزآبادی، پرویز. (۱۳۹۱). تحلیل فضایی- زمانی جزیره حرارتی کلان‌شهر تهران با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱(۴)، ۱۷-۱.
- مرتضوی اصل، سید کامیار؛ سعیدی رضوانی، نوید؛ و رضایی، محمود. (۱۴۰۰). تأثیر کاربری اراضی بر پراکنش فضایی جزایر خنک در شهر تهران. *مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی*، ۲(۲)، ۳۳-۵۰.

References

- Aram, F., García, E.H., Solgi, E., & Mansournia, S. (2019). Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, 5 (4), e01339. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>
- Bakhshi, A., rasouli, H., & Rahimi, N. (2022). Investigating the role of urban growth pattern in creating thermal islands in cities Case study: Sari. *Urban Environmental Planning and Development*, 6 (2), 77-94. <https://sid.ir/paper/1021873/fa> [in Persian]
- Cai, Y., Chen, Y., & Tong, C. (2019). Spatiotemporal evolution of urban green space and its impact on the urban thermal environment based on remote sensing data: a case study of Fuzhou City, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 41, 333-343. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.04.012>
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113 (5), 893-903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chen, H., Deng, Q., Zhou, Z., Ren, Z., & Shan, X. (2022). Influence of land cover change on spatio-temporal distribution of urban heat island —a case in Wuhan main urban area. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103715. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103715>
- Chen, Y., Yang, J., Yu, W., Ren, J., Xiao, X., & Cecilia Xia, J. (2023). Relationship between urban spatial form and seasonal land surface temperature under different grid scales. *Sustainable Cities and Society*, 89, 104374. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104374>
- Coll, C., & Caselles, V. (1997). A split-window algorithm for land surface temperature from advanced very high-resolution radiometer data: validation and algorithm comparison. *Journal of Geophys Research*, 102 (D14), 16697-16713. <https://doi.org/10.1029/97JD00929>
- Coutts, A.M., Tapper, N.J., Beringer, J., Loughnan, M., & Demuzere, M. (2013). Watering our cities: The capacity for Water Sensitive Urban Design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 37 (1), 2-28. <https://doi.org/10.1177/0309133312461032>
- Dai, L.u., Liu, Y., & Luo, X. (2021). Integrating the MCR and DOI models to construct an ecological security network for the urban agglomeration around Poyang Lake. *Science of the Total Environment*, 754, 141868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141868>
- Darvishi, S., rashidpour, M., & soleimani, K. (2019). Analysis of Land Use Role in the Formation of Thermal Islets of Marivan County Using Landsat Satellite Images. *Geography and Development*, 17(54), 143-162. https://gdij.usb.ac.ir/article_4361.html [in Persian]
- Debbage, N., & Shepherd, J.M. (2015). The urban heat island effect and city contiguity. *Computers, Environment and Urban System*, 54, 181-194. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.08.002>
- Demuzere, M., Orru, K., Heidrich, O., Olazabal, E., Geneletti, D., Orru, H., Bhave, A.G., Mittal, N., Feliu, E., & Faehnle, M. (2014). Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 146, 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.025>
- Dymond, J.R., Stephens, P.R., Newsome, P.F., & Wilde, R.H. (1992). Percentage vegetation cover of a degrading rangeland from SPOT. *Remote Sensing*, 13 (11), 1999-2007. <https://doi.org/10.1080/01431169208904248>
- Gao, J., Gong, J., Yang, J., Li, J., & Li, S., (2022). Measuring Spatial Connectivity between patches of the heat source and sink (SCSS): A new index to quantify the heterogeneity impacts of landscape patterns on land surface temperature. *Landscape and Urban Planning*, 217, 104260. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104260>
- Guha, S., Govil, H., Gill, N., & Dey, A. (2021). A long-term seasonal analysis on the relationship between LST and NDBI using Landsat data. *Quaternary International*, 575, 249-258. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.06.041>
- Hami, A., Abdi, B., Zarehaghi, D., & Maulan, S. B. (2019). Assessing the thermal comfort effects of green spaces: a systematic review of methods, parameters, and plants' attributes. *Sustainable Cities and Society*, 49, 101634. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101634>
- He, B.J., Zhao, D.X., Dong, X., Xiong, K., Feng, C., Qi, Q.L., Darko, A., Sharifi, A., & Pathak, M. (2022). Perception, physiological and psychological impacts, adaptive awareness and knowledge, and climate justice under urban heat: A study in extremely hot-humid Chongqing. China. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103685. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103685>
- Herrera, L.P., Sabatino, M.C., Jaimes, F.R., & Saura, S. (2017). Landscape connectivity and the role of small habitat patches as stepping stones: an assessment of the grassland biome in South America. *Biodivers Conservation*, 26 (14), 3465-3479. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1416-7>
- Hong, T., Huang, X., Chen, G., Yang, Y., & Chen, L. (2023). Exploring the spatiotemporal relationship between green infrastructure and urban heat island under multi-source remote sensing imagery: A case study of Fuzhou City. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 8(4), 1337-1349. <https://doi.org/10.1049/cit2.12272>

- Hu, C.G., & Li, H. (2022). Reverse thinking: The logical system research method of urban thermal safety pattern construction, evaluation, and optimization. *Remote Sensing*, 14 (23), 6036. <https://doi.org/10.3390/rs14236036>.
- Isazade, V., asiabi, S., & isazadeh, E. (2021). Surface temperature monitoring using Landsat 8 images and single channel and separate window algorithms (Study area: Dezful city). *Geography and Human Relationships*, 3(3), 8-25. https://www.gahr.ir/article_120954.html [in Persian]
- Jafarzadeh, J., & Hassanitabar, S. M. (2022). Application of remote sensing in extracting ground surface temperature and examining its compliance with land use patterns. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 1(1), 51-66. https://rsgi.tabrizu.ac.ir/article_14398.html [in Persian]
- Jafarzadeh, J., & Hassanitabar, S. M. (2022). Application of remote sensing in extracting ground surface temperature and examining its compliance with land use patterns. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 1(1), 51-66. [http:// https://rsgi.tabrizu.ac.ir/article_14398.html](http://https://rsgi.tabrizu.ac.ir/article_14398.html) [in Persian]
- Juan, Y., Feng, X., Jia, L., Xudong, A., & Yongqiang, J. (2014). The reverberation suppression in wideband diver detection sonar. In *2014 Oceans-St. John's*, 1-4. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7003121>
- Jimenez-Munoz, J.C., Sobrino, J.A., Skokovic, D., Mattar, C., & Cristobal, L. (2014). Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 11 (10), 1840–1843. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6784508>
- Kant, Y., & Badarinath, K.V.S. (1998). A method for estimating the land surface temperature from satellite data using emissivity derived from vegetation index. *Research communications*, 75(2), 139–145. <https://www.jstor.org/stable/24100536>.
- Ke, X.L., Men, H.L., Zhou, T., Li, Z.Y., & Zhu, F.K. (2021). Variance of the impact of urban green space on the urban heat island effect among different urban functional zones: A case study in Wuhan. *Urban for. Urban Green*, 62, 127159. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127159>.
- Lai, D., Liu, Y., Liao, M., & Yu, B. (2023). Effects of different tree layouts on outdoor thermal comfort of green space in summer Shanghai. *Urban Climate*, 47, 101398. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101398>.
- Lin, J., Huang, C., Wen, Y., & Liu, X. (2021). An assessment framework for improving protected areas based on morphological spatial pattern analysis and graph-based indicators. *Ecological Indicator*, 130, 108138. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108138>
- Lin, J., Wei, K., & Guan, Z. (2024). Exploring the connection between morphological characteristic of built-up areas and surface heat islands based on MSPA. *Urban Climate*, 53, 101764. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101764>
- Manoli, G., Fatichi, S., Schlapfer, M., Yu, K.L., Crowther, T.W., Meili, N., Burlando, P., Katul, G.G., & Zeid, E.B. (2019). Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 573 (7772), 55–60. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9>
- Masoudi, M., Tan, P.Y., & Liew, S.C. (2019). Multi-city comparison of the relationships between spatial pattern and cooling effect of urban green spaces in four major Asian cities. *Ecological Indicator*, 98, 200–213. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.058>
- Mortazavi Asl, S K., Saeedi Rezvani, N, Rezaei, M. (2021). The Effect of Land Use on the Spatial Distribution of Cool Islands in Tehran. *JGSMA*, 2 (2), 33-50. <http://gsma.lu.ac.ir/article-1-152-fa.html>. [in Persian]
- Mortazavi Asl, S.K., Saeedi Rezvani, N, & Rezaei, M. (2021). The Effect of Land Use on the Spatial Distribution of Cool Islands in Tehran. *Journal of the Geographical Studies of Mountainous Areas*, 2 (2), 33-50. doi:10.52547/gsma.2.2.31 [in Persian]
- Peng, L.L.H., Jiang, Z., Yang, X., He, Y., Xu, T., & Chen, S.S. (2020). Cooling effects of blockscale facade greening and their relationship with urban form. *Building and Environment*, 169, 106552. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106552>
- Qian, Y., Chakraborty, T.C., Li, J.F., Li, D., He, C.L., Sarangi, C., Chen, F., Yang, X.C., & Leung, L.R. (2022). Urbanization impact on regional climate and extreme weather: Current understanding, uncertainties, and future research directions. *Advances in Atmospheric science*, 39 (6), 819–860. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1371-9>
- Qiu, J., Li, X., & Qian, W. (2023). Optimizing the spatial pattern of the cold island to mitigate the urban heat island effect. *Ecological Indicators*, 154, 110550. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110550>
- Rongali, G., Keshari, A. K., Gosain, A. K., & Khosa, R. (2018). Split-window algorithm for retrieval of land surface temperature using Landsat 8 thermal infrared data. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 2, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s41651-018-0021-y>
- Sacks, W.J., Cook, B.I., Buening, N., Levis, S, Helkowski, J.H. (2009). Effects of global irrigation on the near-surface climate. *Climate Dynamic*. 33 (2–3), 159–175. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0445-z>
- Sadat, M., Salehi, E., Amiri, M. J, & Ehsani, A. H. (2021). Optimization of Landscape Structure Based on Ecological Network Analysis and Graph theory. *Journal of Environmental Studies*, 46(4), 625-644. https://jes.ut.ac.ir/article_83012.html?lang=en. [in Persian]

- Sadeghinia, A., Alijani, B., & Zeaieanfirouzabadi, P. (2013). Analysis of Spatial - Temporal Structure of the Urban Heat Island in Tehran through Remote Sensing and Geographical Information System. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 1(4), 1-17. https://geoeh.um.ac.ir/article_25985.html. [in Persian]
- Sahani, N. (2021). Assessment of spatio-temporal changes of land surface temperature (LST) in Kanchenjunga Biosphere Reserve (KBR), India using Landsat satellite image and single channel algorithm. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 24, 100659. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100659>.
- Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy Build.* 207, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>.
- Santamouris, M., 2014. On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy Build*, 82, 100–113. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.022>.
- Shakiba, A., Ziaeeyan Firoozabadi, P., Ashoorloo, D., & Namdari, S. (2009). Analysis of Relationship between Land use/cover and Urban Heat Island, Using ETM+. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 1(1), 39-58. https://gisj.sbu.ac.ir/article_94232.html?lang=en. [in Persian]
- Sheng, Y.L., Liu, X.P., Yang, X.C., Xin, Q.C., Deng, C.B., & Li, X. (2017). Quantifying the spatial and temporal relationship between air and land surface temperatures of different land-cover types in Southeastern China. *International Journal of Remote Sensing*, 38 (4), 1114–1136. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1280629>.
- Sobrino, J.A., Jimenez-Muñoz, J.C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90 (4), 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>.
- Soleimani Vosta Kolaei, F., & Akhoondzadeh, M. (2018). A comparison of four methods for extracting Land Surface Emissivity and Temperature in the Thermal Infrared Hyperspectral Data. *Earth Observation and Geomatics Engineering*, 2(1), 56-63. https://eoge.ut.ac.ir/article_66951.html.
- Sun, D.Q., Hu, C.G., Wang, Y., Wang, Z.Y., & Zhang, J.X. (2021). Examining Spatio- Temporal Characteristics of Urban Heat Islands and Factors Driving Them in Hangzhou, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 8316– 8325. <https://www.researchgate.net/publication/353993777> Examining Spatio Temporal Characteristics of Urban Heat Islands and Factors Driving Them in Hangzhou Chia
- Tian, P., Li, J.L., Cao, L.D., Pu, R.L., Wang, Z.Y., Zhang, H.T., Chen, H.L., & Gong, H.B. (2021). Assessing spatiotemporal characteristics of urban heat islands from the perspective of an urban expansion and green infrastructure. *Sustainable Cities and Society*, 74, 103208. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103208>.
- Tran, D.X., Pla, F., Latorre-Carmona, P., Myint, S.W., Caetano, M., & Kieu, H.V. (2017). Characterizing the relationship between land use land cover change and land surface temperature. *ISPRS Journal of Photogramm. Remote Sensing*, 124, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.01.001>.
- Wei, Q., Halike, A., Yao, K., Chen, L., & Balati, M. (2022). Construction and optimization of ecological security pattern in Ebinur Lake Basin based on MSPA-MCR models. *Ecological Indicators*, 138, 108857. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108857>.
- Xiang, Y., Cen, Q.Y., Peng, C.C., Huang, C.B., Wu, C.G., Teng, M.J., & Zhou, Z.X. (2023). Surface urban heat island mitigation network construction utilizing source-sink theory and local climate zones. *Building and Environment*, 243, 110717. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110717>
- Yang, J., Sun, J., Ge, Q., & Li, X. (2017). Assessing the impacts of urbanization-associated green space on urban land surface temperature: a case study of Dalian, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 22, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.01.002>.
- Yu, Y., Duan, S., Li, Z., Chang, S., Xing, Z., Leng, P., & Gao, M. (2021). Interannual spatiotemporal variations of land surface temperature in China from 2003 to 2018. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 1783–1795. <https://doi.org/10.1109/jstars.2020.3048823>
- Yu, Z.W., Guo, X.Y., Jørgensen, G., & Vejre, H. (2017). How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities? *Ecological Indicators*, 82, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.002>.
- Yu, Z.W., Zhang, J.G., & Yang, G.Y. (2021). How to build a heat network to alleviate surface heat island effect?. *Sustainable Cities and Society*, 74, 103135. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103135>
- Zandi, R., Karami, M., & Taheri, J. (2020). The role of land use changes in spatial form of heat islands in Mashhad city. *Physical Social Planning*, 6(4), 93-104. https://psp.journals.pnu.ac.ir/article_6590.html?lang=en. [in Persian]
- Zandi, R., Karami, M., & Taheri, J. (2020). The role of land use changes in spatial form of heat islands in Mashhad city. *Physical Social Planning*, 6(4), 93-104. <https://sid.ir/paper/378302/fa>. [in Persian]
- Zanter, K. (2019). USGS Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook-v5.0.pdf

- Zhang, W., Li, Y., Zheng, C, & Zhu, Y. (2023). Surface urban heat island effect and its driving factors for all the cities in China: Based on a new batch processing method. *Ecological Indicators*, 146, 109818. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109818>.
- Zhao, Z., Li, W., Zhang, J, & Zheng, Y. (2024). Constructing an urban heat island network based on connectivity perspective: A case study of Harbin, China. *Ecological Indicators*, 159, 111665. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111665>.
- Zhou, D.C., Bonafoni, S., Zhang, L.X, & Wang, R.H. (2018). Remote sensing of the urban heat island effect in a highly populated urban agglomeration area in East China. *Science of Total Environment*, 628–629, 415-429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.074>
- Zou, Z.D., Yan, C.H., Yu, L.Y., Jiang, X.C.H., Ding, J.S., Qin, L.J., Wang, B, & Qiu, G.Y. (2021). Impacts of land use/land cover types on interactions between urban heat island effects and heat waves. *Building and Environment*, 204, 108138. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132321005394>