

Original Article



How the Spatial Pattern of Urban form Affects Temperature Adjustment Ecosystem Service Using the InVEST Urban Cooling Model in Tehran

Received: 2024.04.21

Accepted: 2024.10.13

Salimeh Ebadi Ghajari,^{1*} Mehrnaz Molavi,¹ Mostafa Keshtkar²

¹ Department of Urban Planning, Faculty of Architecture and Art, University of Guilan, Rasht, Iran

² Department of Environmental Design and Planning, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: The increasing growth of population and as the rapid expansion of urbanization has caused extensive changes in cities morphology, climate and natural environment. The continuation of such a trend, increases the emission of greenhouse gases and leads to formation of heat islands in urban areas. In the future, urban heat island effect will be one of the main challenges to be managed in urban areas. To achieve sustainable development, it is very important to use long-term benefits of ecosystem services in city planning and designing. Ecosystem services are defined as “the cornerstone of sustainable development science” due to the focus on interaction between nature and society. Therefore, the mapping and quantification of important ecosystem services is a tool for decision-makers and country managers to manage and monitor the supply level of ecosystem services. Urban cooling capacity is one of the benefits of urban ecosystem services that help reducing urban heat island effects. The purpose of this research is to present the long-term benefits of using nature-based planning approach in reducing heat islands effect in Tehran.

Material and Methods: In this research, Tehran is selected as the capital and also the most populous city of Iran, which has numerous heat islands focused on different activity centers. The cooling capacity of Tehran and its districts was evaluated using urban cooling capacity model in InVEST software, by statistical techniques such as Moran’s correlation model and Gates-Ord model.

Results and Discussion: Evaluating the Moran’s correlation model showed the spatial pattern of temperature adjustment ecosystem services in Tehran is structured and clustered. The identification of ecosystem service hotspots using Gates-Ord model showed, Cooling in Tehran areas is influenced by two factors: altitude and vegetation cover. The presence of natural infrastructure and vegetation reduces heat island effect and also reduces urban temperature in some areas; which have large green and open spaces (including districts 4 and 22). The high density of population, building and traffic in streets (including districts 10, 11 and 12) has led to a decrease in cooling capacity of these areas, which shows the necessity of redefining urban features to control temperature. The northern areas of Tehran, including districts 1, 2 and 5, have low reference evaporation and transpiration due to their location at high altitudes and low temperatures. These districts always experience lower temperatures due to the rivers, natural waterways, large green spaces and low-rise residential structure. We can see the effect of northern regions ecosystem on neighboring regions such as district 3. The reason is low height of buildings, natural corridors between natural spots and the green spaces cohesion, which has caused the effect of temperature adjustment penetrate to adjacent areas.

Conclusion: The output of urban cooling model shows urban green and open spaces play a valuable role in reducing the heat island phenomenon. The high density of buildings and population, in other words, the high level of built-up lands in the central regions, has led to a decrease in cooling capacity of central districts. It is important to develop effective solutions to maintain ecosystem services and increase vegetation and continuous green patches to control temperature of big cities such as Tehran. At the end, Using nature-based planning approach and integration ecosystem services in city planning will significantly reduce the heat islands effects and bring long-term benefits to cities in different dimensions.

Keywords: Ecosystem services, temperature adjustment, sustainable development, urban form, InVEST software

How to cite this article:
Ebadi Ghajari, S., Molavi, M., Keshtkar, M., 2025.
How the Spatial Pattern of Urban form Affects Temperature Adjustment Ecosystem Service Using the InVEST Urban Cooling Model in Tehran. Adv. Environ. Sci. 23(1): 73-94.

* Corresponding Author Email Address: s_ebadi@guilan.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1388



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

چگونگی اثرات الگوی فضایی فرم شهری بر عرضه خدمت اکوسیستمی تعدیل دما با استفاده از مدل خنک‌کنندگی شهری InVEST در شهر تهران

سلیمه عبادی قاجاری^{۱*}، مهرناز مولوی^۱، مصطفی کشتکار^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲

^۱ گروه شهرسازی، دانشکده معماری
و هنر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۲ گروه طراحی و برنامه‌ریزی محیطی،
پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه
شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: رشد روزافزون جمعیت و گسترش سریع شهرنشینی باعث تغییرات گسترده‌ای در مورفولوژی، اقلیم و محیط طبیعی شهرها شده است. چنین روندی باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تشکیل جزایر گرمایی در مناطق شهری می‌شود. در آینده، اثر جزیره گرمایی شهری یکی از چالش‌های اصلی برای مدیریت شهری خواهد بود. برای دستیابی به توسعه پایدار، استفاده از مزایای بلندمدت خدمات اکوسیستم در برنامه‌ریزی و طراحی شهری بسیار مهم است. خدمات اکوسیستم به دلیل تمرکز بر تعامل بین طبیعت و جامعه بعنوان "سنگ بنای علم توسعه پایدار" تعریف می‌شود. بنابراین نقشه‌سازی و کمی‌سازی خدمات اکوسیستمی مهم ابزاری برای تصمیم‌گیران و مدیران شهری به منظور مدیریت و پایش سطح عرضه خدمات اکوسیستمی است. ظرفیت خنک‌کنندگی یکی از مزایای خدمات اکوسیستم شهری است که به کاهش اثرات جزیره گرمایی شهری کمک می‌کند. پژوهش حاضر با هدف اثبات مزایای بلندمدت به کارگیری رویکرد برنامه‌ریزی مبتنی بر طبیعت در کاهش اثر جزایر گرمایی در شهر تهران انجام شد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش شهر تهران بعنوان پرجمعیت‌ترین شهر و پایتخت ایران در نظر گرفته شد. این شهر در سال ۱۴۰۳ معادل ۸۵۸۶۰۱۲۰ نفر جمعیت داشته که منجر به شکل‌گیری کانونی از جزایر گرمایی با هسته‌های متعدد شده است. ظرفیت خنک‌کنندگی شهر تهران و مناطق آن با استفاده از مدل خنک‌کنندگی شهری و استفاده از داده‌هایی همچون کاربری اراضی، تبخیر و تعرق مرجع، شاخص‌های دمایی و اثر سایه در نرم‌افزار InVEST ارزیابی شده است. مکان‌های هات اسپات و کلد اسپات در منطقه با توجه به آنالیز همبستگی موران و مدل گیتس-آرد خدمت اکوسیستمی خنک‌کنندگی شهری مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث: مدل همبستگی موران نشان داد که الگوی فضایی خدمت اکوسیستم خنک‌کنندگی شهری در تهران ساختاریافته و به صورت خوشه‌ای است. شناسایی هات اسپات خدمت خنک‌کنندگی شهری با استفاده از مدل گیتس-آرد نشان داد، خنک‌کنندگی در مناطق تهران تحت تأثیر دو عامل ارتفاع و پوشش گیاهی است. در مناطق بیرونی شهر (از جمله مناطق ۴ و ۲۲) که دارای فضاهای وسیع سبز و باز می‌باشند، وجود زیرساخت‌های طبیعی و پوشش گیاهی با فراهم آوردن سایه و افزایش خنک‌کنندگی از طریق تبخیر و تعرق به کاهش اثر جزیره گرمایی و کاهش دمای شهری کمک کرده است. از طرفی، در مناطق مرکزی شهر (از جمله ۱۰، ۱۱ و ۱۲) که دارای تراکم بالای جمعیت و ساختمان و ترافیک بالای خیابان‌ها هستند، با وجود برخی لکه‌های سبز بزرگ در محدوده، ظرفیت خنک‌کنندگی در این مناطق کاهش یافته است که نشان‌دهنده ضرورت بازتعریف اصول طراحی شهری جهت کنترل دمای شهر می‌باشد. مناطق شمالی تهران (مناطق ۱، ۲ و ۵) بدلیل قرارگیری در ارتفاعات و دمای پایین، دارای تبخیر و تعرق مرجع پایینی هستند. این مناطق به دلیل وجود رودخانه‌ها، آبراهه‌های طبیعی، فضاهای سبز وسیع و بافت مسکونی ویلایی همواره دمای کمتری را تجربه می‌کنند. اثری که اکوسیستم مناطق شمالی بر مناطق هم‌جوار نظیر منطقه ۳ دارند، به وضوح قابل رویت است. دلیل این امر نیز ارتفاع کم ساختمان‌ها، وجود کریدورهای طبیعی بین لکه‌های طبیعی و پیوستگی فضاهای سبز می‌باشد که موجب شده اثر تعدیل دما همواره به مناطق مجاور نیز نفوذ کند.

نتیجه‌گیری: خروجی مدل خنک‌کنندگی شهری به ما نشان می‌دهد فضاهای سبز و باز شهری نقش ارزشمندی در کاهش پدیده جزیره گرمایی دارند. تراکم زیاد ساختمان و جمعیت، به عبارتی سطح بالای اراضی ساخته‌شده در نواحی مرکزی منجر به کاهش ظرفیت خنک‌کنندگی مناطق مرکزی شده است. توسعه راه‌حل‌های مؤثر برای حفظ خدمات اکوسیستمی و افزایش پوشش گیاهی و لکه‌های سبز پیوسته برای کنترل دمای شهرهای بزرگی مانند تهران حائز اهمیت است. در نهایت می‌توان بیان کرد، استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی مبتنی بر طبیعت و یکپارچه‌سازی خدمات اکوسیستم در برنامه‌ریزی و طراحی شهرها به میزان قابل‌توجهی اثرات جزایر گرمایی را کاهش داده و مزایای بلندمدتی را برای شهرها در ابعاد مختلف به ارمغان می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: خدمات اکوسیستمی، خنک‌کنندگی، توسعه پایدار، طراحی شهری، InVEST

استناد به این مقاله: عبادی قاجاری، س.، م. مولوی و م. کشتکار. ۱۴۰۴. چگونگی اثرات الگوی فضایی فرم شهری بر عرضه خدمت اکوسیستمی تعدیل دما با استفاده از مدل خنک‌کنندگی شهری InVEST در شهر تهران. فصلنامه علوم محیطی نوین، ۷۳-۹۴: (۱) ۲۳.

* Corresponding Author Email Address: s_ebadi@guilan.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1388



مقدمه

و شرایط آب‌وهوایی رابطه نزدیکی دارد (Yang et al., 2016). در آینده، اثر جزیره گرمایی شهری یکی از چالش‌های اصلی برای مدیریت در مناطق شهری خواهد بود که نیاز به اتخاذ راهبردهایی جهت کاهش اثر جزیره گرمایی، سازگاری با تغییرات آب و هوایی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد (Solecki et al., 2005).

اکوسیستم‌ها ارزش‌های خدماتی فراوانی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم به انسان‌ها ارائه می‌دهند (Ruhl et al., 2008). ارزیابی اکوسیستم هزاره (۲۰۰۵)، اکوسیستم‌ها و خدمات حاصل از آن‌ها را در چهار دسته طبقه‌بندی کرد: (۱) خدمات تأمینی^۳ (مانند غذا و آب، ۲) خدمات تنظیمی^۴ مانند کنترل سیل و بیماری، (۳) خدمات حمایتی^۵ مانند چرخه مواد مغذی، که شرایط را برای زندگی فراهم می‌کند، و (۴) خدمات فرهنگی^۶ مانند مزایای معنوی، تفریحی و فرهنگی (Adhikari and Hartemink, 2016; Vaughn, 2017). مفهوم خدمات اکوسیستم^۷ (ES) در سال‌های اخیر توسط دانشمندان و سیاست‌گذاران به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (Notte et al., 2017) و بدلیل تمرکز بر تعامل بین طبیعت و جامعه به‌عنوان "سنگ بنای علم توسعه پایدار" تعریف شده است (Geneletti, 2012).

درک ارتباط بین سیستم‌های طبیعی و اجتماعی - اقتصادی به مدیریت بهتر و پایدارتر اکوسیستم‌ها کمک می‌کند (Grizzetti et al., 2016). در نظر گرفتن مزایای بلندمدت سرمایه طبیعی و یکپارچه‌سازی خدمات اکوسیستم در برنامه‌ریزی توسعه برای رشد و توسعه عادلانه و پایدار ضروری است (Kosmus et al., 2012). بنابراین، استفاده از رویکرد خدمات اکوسیستم در برنامه‌ریزی شهری، نگرشی جامع‌تر و یکپارچه‌تر به سیستم اجتماعی - زیست محیطی ارائه می‌دهد که به نظر می‌رسد از لحاظ تعامل و تأثیرگذاری بر ذینفعان و تصمیم‌گیرندگان مؤثر باشد (Baker et al., 2013). در این راستا، استفاده از نقشه‌های خدمات اکوسیستمی همچون تعدیل دما می‌تواند زمینه‌ی مشترکی را برای اتصال

امروزه ۵۵ درصد جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کنند، نسبتی که انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ به ۶۸ درصد افزایش یابد (Elmqvist et al., 2015; Ghosh and Das, 2018). چنین روندی با رشد بی‌سابقه، شهرهای معاصر را به یک منبع اصلی تغییرات چشم‌انداز و انتشار گازهای گلخانه‌ای تبدیل کرده است (Bosch et al., 2021)، که منجر به تشکیل جزیره گرمایی^۱ (HI) در شهرهای بزرگ و بویژه کلان‌شهرها و تغییرات مرتبط در مورفولوژی آن‌ها از جمله افزایش آلودگی و دمای هوا، در مقایسه با محیط روستایی پیرامون شده است (Ronchi et al., 2020). درواقع، اثر جزیره گرمایی با توسعه دمای بسیار بالاتر شهرها در مقایسه با مناطق روستایی محاط بر آن مشخص می‌شود (Ghosh and Das, 2018; Mohajerani et al., 2018; Yu et al., 2020). این موضوع می‌تواند تأثیرات منفی بسیاری بر محیط بگذارد که از مرز فیزیکی آن فراتر می‌رود (Zhou et al., 2019)؛ از جمله افزایش انتشار کربن دی‌اکسید، نرخ بالای مصرف انرژی (Debbage and Shepherd, 2015; He, 2018; Yu et al., 2020)، از بین رفتن زیستگاه‌ها، تغییرات آب و هوایی (Botham et al., 2015)، افزایش دمای شهری و حرکات زمین‌گرمایی (Ren et al., 2022). پدیده اثر جزیره گرمایی شهری عمدتاً توسط ساختار فیزیکی محیط ساخته‌شده ایجاد می‌شود که تشعشعات خورشیدی را جذب کرده و گرمای بیشتری نسبت به منظره طبیعی آزاد می‌کند (Ronchi et al., 2020) و در نتیجه سلامت و آسایش ساکنان شهر را به خطر می‌اندازد (Yu et al., 2020). لوک هاوارد^۲ اولین اقلیم‌شناس بود که مطرح کرد، آب‌وهوای شهرها و تعامل آن‌ها با نواحی اطراف توسط ماهیت تبادل انرژی سطحی آن‌ها تعیین می‌شود (Gunawardena et al., 2017). از آن زمان، بسیاری از محققان در سراسر جهان تحقیقات عمیقی در خصوص ویژگی‌ها و اثرات جزیره گرمایی شهری انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که اثر جزیره گرمایی با انتشار گرمای شهری، خواص و ساختار سطح زیرین، پوشش گیاهی، تراکم جمعیت

سیاست‌ها، برنامه‌ریزی فضایی و نیز برنامه‌ریزی کاربری اراضی فراهم کند. بعنوان مثال، سیاست‌های پیشنهادی توسط بخش‌های مختلف، قبل از تصویب، مورد ارزیابی قرار گیرند و اثر آن‌ها بر روی عملکرد اکوسیستم و نیز رفاه انسانی مورد سنجش قرار گیرد. بدین ترتیب، پیامدهای اجتماعی، اکولوژیکی و اقتصادی سناریوهای احتمالی مرتبط با سیاست مربوطه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و برای پشتیبانی از سیاست‌گذاری مورد استفاده قرار می‌گیرد (Helming et al., 2013). درواقع، راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت^۸ (NBS) برای تغییر مدل‌های برنامه‌ریزی شهری سنتی بر اساس مقررات کاربری اراضی، به سمت یک رویکرد برنامه‌ریزی مبتنی بر عملکرد^۹ نیاز است که خدمات اکوسیستم را برای تنظیم پارامترهای طراحی شهری و معیارهای برنامه‌ریزی در نظر گیرد (Ronchi et al., 2020).

ظرفیت خنک‌کنندگی شهری^{۱۰} (CC) یکی از مزایای خدمات اکوسیستم شهری است که به کاهش اثرات جزیره گرمایی شهری کمک می‌کند. هدف مدل خنک‌کنندگی شهری شبیه‌سازی توزیع فضایی جزایر گرمایی شهری بر اساس سه مکانیسم کلیدی، یعنی سایه ایجادشده توسط درختان، تبخیر و تعرق پوشش گیاهی شهری و آلودگی سطح شهری است (Bosch et al., 2021). تئوری اثرات جزیره خنک‌کننده شهری^{۱۱} (UCI) همراه با تحقیقات اثرات جزیره گرمایی شهری^{۱۲} (UHI) توسعه یافته است (Hongyu et al., 2016). UCI پدیده‌ای را توصیف می‌کند که دمای شهر کمتر از محیط اطراف می‌شود (Qiu and Baoquan, 2019). بدین ترتیب، استفاده از دستورالعمل‌های سبز برای برنامه‌ریزی شهری و فضای سبز شهری یکی از مؤثرترین راه‌ها برای کاهش اثر جزیره گرمایی است. پوشش گیاهی نه تنها محیط را زیبا می‌کند، با جذب کربن دی‌اکسید و آزادسازی اکسیژن، نقش محوری در کاهش دما ایفا می‌کند (wang et al., 2022). زیرساخت‌های طبیعی^{۱۳} و پوشش گیاهی با فراهم آوردن سایه و افزایش خنک‌کنندگی از طریق تبخیر و تعرق می‌توانند به کاهش اثر جزیره گرمایی شهری کمک کنند. فضای سبز

شهری با توجه به مقدار و ساختار پوشش گیاهی می‌تواند مناطق خنک ایجاد کند و اثر جزیره گرمایی شهری را تعدیل کند. درک چگونگی طراحی فضای سبز شهری توسط برنامه ریزان شهری جهت بهبود گرمایش شهری حیاتی است (Ren et al., 2021). هر چه پوشش گیاهی بهتر رشد کند، اثر خنک‌کنندگی آن قوی‌تر می‌شود. علاوه بر این، مسیر فضای سبز شهری با شکل پیچیده‌تر می‌تواند اثر خنک‌کنندگی عالی داشته باشد (Yang et al., 2020). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که عوامل متعددی از جمله عوامل طبیعی (بعنوان مثال، دما، بارندگی ماهانه و سرعت باد) و عوامل انسانی (بعنوان مثال، مناطق شهری و تراکم جمعیت) ممکن است بر خنک‌کنندگی فضای سبز شهری تأثیر بگذارند (Chen et al., 2021). قدرت همبستگی بین رطوبت نسبی و اثر خنک‌کنندگی فضای سبز شهری در مناطق آب و هوایی مختلف، متفاوت است. حتی در مناطق آب و هوایی مشابه، برای شهرهای با سرعت باد متفاوت، اثر خنک‌کنندگی نیز می‌تواند بسیار متفاوت باشد. بنابراین، تأثیر عوامل طبیعی و انسانی باید مورد توجه قرار گیرد و تنظیم این عوامل برای مناطق آب و هوایی مختلف جهت دستیابی به توسعه پایدار و کاهش اثرات جزایر گرمایی شهری ضروری است (wang et al., 2022). فضای سبز می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد، از جمله: جنگل‌های شهری، پارک‌ها، درختان خیابان‌ها و حاشیه‌ها، باغ‌های خصوصی، حاشیه راهروهای حمل‌ونقل و سقف‌ها و نماهای پوشیده از گیاه. فضای سبز در نتیجه "سرمایه زیست‌محیطی" است که می‌تواند برای کاهش اثرات نامطلوب جزیره گرمایی شهری و تغییرات آب و هوایی مورد استفاده قرار گیرد (Gunawardena et al., 2017). کاشت درختان در کنار خیابان‌ها یکی از راهکارهای اصلی ارتقای محیط حرارتی شهری می‌باشد. در شهرهای توسعه‌یافته، خیابان‌ها می‌توانند بیش از ۸۰ درصد فضاهای عمومی را تشکیل دهند که به سایه‌اندازی در تابستان‌های گرم، کاهش تابش مستقیم نور خورشید به افراد و ساختمان‌های کنار خیابان‌ها و کاهش مصرف انرژی برای خنک‌کنندگی کمک می‌کنند (Ren et al., 2021). برنامه‌ریزی

منطقه جنگل‌های شهری نیز برای دستیابی به بهترین اثر خنک‌کنندگی و کاهش گرمایش شهری مؤثرند. برخی مطالعات نشان داده‌اند که اندازه، شکل و سایر ویژگی‌های جنگل‌های شهری با شدت خنک‌کنندگی آن‌ها مرتبط است. اثر خنک‌کنندگی جنگل‌های شهری ممکن است رابطه قوی با ویژگی‌های توزیع فضایی گونه‌های درختی در مقیاس خوشه‌ای داشته باشد. بنابراین، توزیع فضایی گونه‌های درختی نیز باید برای تأثیر خنک‌کنندگی جنگل‌های شهری در نظر گرفته شود که می‌تواند به ارائه اقدامات مدیریتی مؤثر برای جنگل‌های شهری کمک کند و در نتیجه مزایای اکولوژیکی جنگل‌های شهری را افزایش دهد (Wang, 2023).

مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه ارزیابی خنک‌کنندگی شهری در بیشتر از یک دهه نشان می‌دهد، مدل‌سازی خنک‌کنندگی شهری در نرم‌افزار InVEST توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جذب کرده است که در جدول ۱ به برخی از آن‌ها اشاره شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، غالب پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه خارجی بوده و در ایران تحقیقات کمتری را به خود اختصاص داده است، این موضوع نشان‌دهنده نو بودن موضوع پژوهش حاضر است. مدل‌های InVEST مبتنی بر توابع تولیدی هستند که تعیین می‌کنند چگونه تغییرات در ترکیب،

پیکربندی و عملکرد یک اکوسیستم بر جریان و ارزش خدمات اکوسیستم در سراسر یک چشم‌انداز تأثیر می‌گذارد (Bratman et al., 2019). InVEST یک مجموعه نرم‌افزاری است که پیوند بین طبیعت و سیستم اجتماعی-اقتصادی را مدل‌سازی می‌کند. با استفاده از این نرم‌افزار، کاربران می‌توانند خدمات اکوسیستم را در ارزیابی‌ها و برنامه‌ریزی شهری ادغام کنند. هرچند که مدل‌سازی خنک‌کنندگی شهری در کشور ایران با چالش‌هایی مواجه است، بکارگیری آن جهت اتخاذ استراتژی‌های توسعه و کاهش جزایر حرارتی خالی از لطف نیست. در پژوهش حاضر نیز ظرفیت خنک‌کنندگی شهری با استفاده از مدل خنک‌کنندگی شهری InVEST ارزیابی شده است. علت بکارگیری نرم‌افزار مذکور را می‌توان به موفقیت‌های آن در زمینه تولید معیارهای معتبر، انعطاف‌پذیری در مقیاس‌ها و داده‌های در دسترس نسبت داد که برجستگی^{۱۴}، اعتبار^{۱۵}، مشروعیت^{۱۶} و دسترسی^{۱۷} آن را تضمین می‌کند (Hamel et al., 2021). از دیگر دلایل استفاده از مدل خنک‌کنندگی شهری InVEST، قدرت آن بخاطر استفاده از داده‌های پیکسلی است که می‌توان در تحلیل‌های فضایی و یا برنامه‌ریزی‌ها از آن به‌خوبی استفاده کرد. همچنین، از دیگر مزیت‌های آن می‌توان به قدرت تغییر اطلاعات و سناریونویسی و نیز قدرت کالپره آن اشاره کرد.

جدول ۱- پیشینه پژوهش

Table 1. Research background

مرجع Reference	عنوان Title	روش Method	نتیجه Conclusion
هریسچیان و همکاران (۱۴۰۲)	بررسی تأثیر خدمت اکوسیستمی خنک‌کنندگی زیرساخت‌های سبز شهری بر کاهش بار گرمای محیطی و بهروری انرژی در کلانشهر تبریز	ظرفیت کاهش جزایر گرمایی تبریز در سه دوره زمانی ۱۳۸۱، ۱۳۶۳ و ۱۴۰۱ در ۵ کلاس از بهترین حالت تا بدترین حالت با استفاده از مدل سرمایش شهری نرم‌افزار InVEST مورد ارزیابی قرار گرفت.	کلانشهر تبریز در کاهش جزایر گرمایی در هر سه دوره به خوبی عمل نکرده و در بدترین شرایط قرار دارد. الگوی کاهش جزایر گرمایی تبریز در سال ۱۴۰۱ بر خلاف سال‌های ۱۳۶۳ و ۱۳۸۱ بیشتر از نوع تکه تکه و کمتر از نوع خوشه‌ای و بلوکی بوده که این مورد نشان‌دهنده این است که زیرساخت‌های سبز تبریز رفته‌رفته تکه‌تکه و کوچک شده است.
Herischan et al., (2024)	Investigating the Effect of the Cooling Ecosystem Service of Urban Green Infrastructure on the Mitigating of Environmental Heat Load and Energy Efficiency in Tabriz	The mitigation capacity of the heat islands of Tabriz in all three periods of 1984, 2002, and 2022 was evaluated in 5 classes, from the best case to the worst case, using the urban cooling model of the InVEST software.	Tabriz metropolitan did not perform well in mitigating heat islands in all three periods and is in the worst condition. The pattern of mitigation of heat islands in Tabriz in 2022, unlike in 1984 and 2002, was more fragmented and less than cluster and block type, indicating that Tabriz's green infrastructure has gradually become fragmented and smaller.

ادامه جدول ۱- پیشینه پژوهش
Table 1. (cont.). Research background

مرجع Reference	عنوان Title	روش Method	نتیجه Conclusion
Hamel et al., (2024)	کالیبراسیون و اعتبارسنجی ارزش‌گذاری یکپارچه خدمات اکوسیستم و مدل خنک‌کنندگی شهری (InVEST) Calibrating and validating the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) urban cooling model	اعمال الگوریتم کالیبراسیون و ارزیابی مدل خنک‌کنندگی شهری در دو مطالعه موردی (فرانسه و آمریکا) با بررسی همبستگی فضایی بین پیش‌بینی‌های InVEST و داده‌های دمای مرجع در وضوح افقی یک کیلومتر. Apply the calibration algorithm and evaluate the urban cooling model in two case studies (France, and USA) by examining the spatial correlation between InVEST predictions and reference temperature data at a 1 km horizontal resolution.	در هر دو نمونه، عملکرد مدل مذکور برای دمای هوا در شب بالا، برای دمای سطح در طول روز متوسط، و برای دمای هوای روز پایین بوده که به دلیل محدودیت داده است. پژوهش با ارزیابی توانایی مدل برای شبیه‌سازی یک سناریوی زیرساخت سبز، کفایت آن را برای برنامه‌ریزی شهری نشان می‌دهد. In both case studies, model performance was high for nighttime air temperatures. It found medium performance for surface temperatures during daytime but low performance for daytime air temperatures, which is due to data limitations. It illustrate the model adequacy for urban planning by testing its ability to simulate a green infrastructure scenario.
Hu et al., (2023)	ارزیابی خدمت کاهش حرارت ارائه‌شده توسط فضاهای سبز و آبی: کاربرد مدل خنک‌کنندگی شهری InVEST در ووهان، چین Assessment of Heat Mitigation Services Provided by Blue and Green Spaces: An Application of the InVEST Urban Cooling Model with Scenario Analysis in Wuhan, China	استفاده از مدل سرمایش شهری InVEST و روش تحلیل سناریو جهت شبیه‌سازی الگوهای کاهش حرارت شهری برای سناریوها با فرم‌های متفاوت فضاهای آبی-سبز. تخمین سهم نسبی تغییرات فضای آبی-سبز در کاهش حرارت، با استفاده از روش‌های قیاسی، و شفاف‌سازی ارتباط بین اثرات کاهش حرارت و الگوهای فضایی آبی-سبز شهری با استفاده از روش‌های تحلیل فضایی. Utilizing the InVEST urban cooling model (UCM) and scenario analysis method to simulate urban heat mitigation patterns by setting up different blue-green space configuration scenarios. Estimating The relative contribution of blue-green space changes to the variation of heat mitigation benefits, using the difference comparison method, and elucidating the relationship between heat reduction effects and urban blue-green spatial patterns using spatial analysis methods.	در نظر گرفتن اثر خنک‌کنندگی تبخیر آب می‌تواند دقت شبیه‌سازی را تا حدودی بهبود بخشد. در ووهان، تفاوت‌های منطقه‌ای در الگوهای کاهش حرارت وجود داشت، و اثر کاهش حرارت در حومه شهر به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از شهر است. علاوه بر این، پارک‌های شهری، دریاچه‌ها و کوه‌های پراکنده مزیت خنک‌کنندگی قابل‌توجهی دارند. Consideration of the cooling effect of water evaporation can improve the simulation accuracy to some extent. In Wuhan, there were regional differences in heat mitigation patterns and the heat mitigation effect was significantly higher in the suburbs than in the city. Additionally, urban parks, lakes, and mountains with surface or block distribution had noticeable cooling benefits. The scenario simulation results demonstrate that green space was more efficient at mitigating heat, while blue space was more critical for the geographical partitioning of the UHI.
Bosch et al., (2021)	یک رویکرد فضایی دقیق برای شبیه‌سازی کاهش گرمای شهری با استفاده از نرم‌افزار InVEST A spatially explicit approach to simulate urban heat mitigation with InVEST	شبیه‌سازی توزیع فضایی دمای هوا در مناطق شهری لوزان و سوئیس با استفاده از داده‌های کاربری/پوشش زمین. استفاده از مدل خنک‌کنندگی شهری InVEST و برآورد ظرفیت خنک‌کنندگی بافت شهری بر اساس سه مکانیسم بیوفیزیکی سایه درخت، تبخیر و آلبیدو. Simulating the spatial distribution of air temperature in urban areas of Lausanne and Switzerland using land use/or land cover data. Using the InVEST urban cooling model and estimating cooling capacity of urban based on three biophysical mechanisms: tree shade, evaporation, and albedo.	مدل خنک‌کنندگی شهری بهتر از رگرسیون فضایی داده‌های ماهواره‌ای عمل می‌کند. این مدل به درک ظهور جزایر گرمایی شهری کمک می‌کند. این مدل تنها به داده‌های کاربری/پوشش زمین و دمای مرجع نیاز دارد که می‌تواند برای ارزیابی سناریوهایی مانند طرح‌های جامع، چشم‌انداز شهرنشینی و سناریوهای اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد. Urban cooling model works better than spatial regression of satellite data. This model helps to understand the emergence of urban heat islands. The model only needs land use data and/or land cover and reference temperature, which can be used to evaluate scenarios such as master plans, urbanization prospects, and climate scenarios.
Hamel et al., (2021)	نقشه‌سازی مزایای طبیعت در شهرها با استفاده از نرم‌افزار InVEST Mapping the benefits with of nature in cities software the InVEST	استفاده از ابزار منبع باز در نرم‌افزار InVEST. محاسبه معیارهای بیوفیزیکی و اجتماعی-اقتصادی در چین، فرانسه و ایالات متحده. استفاده از ابزار منبع باز در نرم‌افزار InVEST. Using open-source tool within the InVEST software. Computing biophysical and socio-economic metrics in data-rich or data-scarce contexts in china, France, and the United States.	اطلاعات فضایی در خصوص مزایای طبیعت، مدیریت شهری را از طریق ارزیابی اقتصادی، اولویت‌بندی تغییر کاربری اراضی، و ترویج برنامه‌ریزی فراگیر و گفت‌وگو با ذینفعان ارتقا می‌دهد. Spatially explicit information about benefits of nature enhances urban management by economic valuation, prioritizing land use change, and promoting inclusive planning and dialogue with stakeholders.

ادامه جدول ۱- پیشینه پژوهش
Table 1. (cont.). Research background

روش Method	عنوان Title	مرجع Reference
نماهای شرقی و غربی بیشترین تأثیر را بر خرد اقلیم دارند. خنک شدن نماهای شرقی و غربی منجر به حداکثر کاهش تابش خالص بر سطح زمین می‌شود. نماهای شمالی و جنوبی سهم ناچیزی در آسایش حرارتی عابر پیاده دارند. Eastern and western facades have the most impact on the microclimate. Cooling east and west facades led to the maximum net radiation reductions for the ground surface. Furthermore, north and south facades had negligible contributions to pedestrian thermal comfort.	مصالح با آلبیدوی بالا بر روی نماهایی با جهت‌گیری‌های مختلف اجرا شد. شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای برای محاسبه تابش نماهای مختلف، دمای سطح زمین و تعادل انرژی مورد استفاده قرار گرفت. High albedo materials were implemented on facades with different orientations. Computer simulations were employed to calculate the insolation of different façades, ground surface temperature, and surface energy balances.	خنک‌کنندگی شهری: کدام جهت نما بیشترین تأثیر را بر خرد اقلیم دارد؟ (فرودگاه لس‌آنجلس) Urban cooling: Which façade orientation has the most impact on a microclimate? (Los Angeles Airport) Taleghani et al., (2021)
رویکردهای مختلف برنامه‌ریزی شهری بر طراحی فضاهای سبز شهری، نفوذپذیری، ردپای ساخته‌شده، تراکم پوشش گیاهی و در نتیجه ظرفیت خنک‌کنندگی شهرها تأثیر گذاشته است. Different urban planning approaches have affected the design of urban green spaces, permeability, built-up footprint, vegetation density and, as a result, the cooling capacity of cities.	مدل‌سازی ظرفیت خنک‌کنندگی در میلان برای چهار دوره تاریخی با استفاده از نرم‌افزار InVEST Modeling cooling capacity in Milan for four historical periods using InVEST software.	کدام پارامترهای طراحی شهری، شهرهای مقاوم به آب‌وهوا را فراهم می‌کنند؟ Which urban design parameters provide climate-proof cities? Ronchi et al., (2020)
نقاط داغ شهری در مرکز ساکرامنتو و در امتداد کریدورهای حمل‌ونقل اصلی قرار دارند، مناطق پرخطر در مناطق فروت ریج و ساکرامنتو شمالی شناسایی شدند. Urban hot spots are located in central Sacramento and along major transportation corridors, while highest risk areas were identified in the community areas of Fruit ridge and North Sacramento.	ارزیابی گرمای شهری در مقیاس؛ با استفاده از رصد زمین ناسا و محصولات Landsat 8 Earth برای شناسایی نقاط داغ. استفاده از مدل خنک‌کنندگی شهری InVEST برای ارزیابی اثر سناریوهای افزایش تاج درخت. Assessing urban heat at the neighborhood scale; used NASA Earth observation and Landsat 8 Earth products to identify hot spots. Using InVEST urban cooling model to evaluate the effect of increased tree canopy scenarios.	کمی‌سازی و نقشه‌سازی گرمای شهری برای پشتیبانی طرح‌های برنامه‌ریزی شهری در ساکرامنتو، کالیفرنیا Quantifying and Mapping Urban Heat to Support Urban Initiatives in Planning Sacramento, California Karina et al., (2020)
۱) فضاهای سبز بزرگ و منظم نسبت به فضاهای کوچک و نامنظم شعاع خنک‌کنندگی بیشتری دارند. ۲) افزایش مساحت می‌تواند شدت خنک‌کنندگی فضای سبز را زمانی که کوچک‌تر از آستانه معین باشد، افزایش دهد. ۳) کاهش پیچیدگی شکل یک فضای سبز می‌تواند شدت خنک‌کنندگی را در زمانی که بزرگ‌تر از ۵ هکتار باشد، افزایش دهد. 1) large and regular green spaces have a greater cooling distance than small and irregular ones; 2) An increase of area can enhance the cooling intensity of a green space when it is smaller than a certain threshold; and 3) reducing the shape complexity of a green space can enhance cooling intensity when greens paces are larger than 5 ha.	مقادیر شعاع خنک‌کنندگی و شدت آن بر اساس دمای سطح زمین با استفاده از سنجش‌ازدور محاسبه شد. Cooling distance and intensity values were calculated based on the land surface temperature derived using remote sensing.	اثر مساحت و شکل فضای سبز بر خنک‌کنندگی شهری (نانجینگ، چین) Effects of Area and Shape of Green Space on Urban Cooling in (Nanjing, China) Zhou et al., (2019)

گرمایی متعدد، پرداخته شده است. هدف اصلی پژوهش، اثبات مزایای بلندمدت استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی مبتنی بر طبیعت در کاهش اثر جزایر گرمایی در شهر تهران است. برای این منظور، خدمت اکوسیستمی تعدیل دما مورد بررسی قرار گرفته است. سؤال اصلی تحقیق نیز شامل چگونگی اثرگذاری خدمت اکوسیستمی تعدیل دما در کاهش اثر جزایر گرمایی شهر تهران است. ظرفیت تعدیل دمای شهر تهران و

حفاظت از اکوسیستم و عملکردهای آن برای دستیابی به توسعه پایدار بسیار مهم است؛ و یکپارچه‌سازی این خدمات در ارزیابی‌ها و برنامه‌ریزی شهری را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. در پژوهش حاضر، بطور خاص به بررسی و تجزیه تحلیل نوع، میزان و توزیع خدمت اکوسیستمی تعدیل دمای شهری با استفاده از مدل تحلیل خنک‌کنندگی در شهر تهران، بعنوان مرکز سیاسی و پرجمعیت‌ترین شهر کشور و دارای جزایر

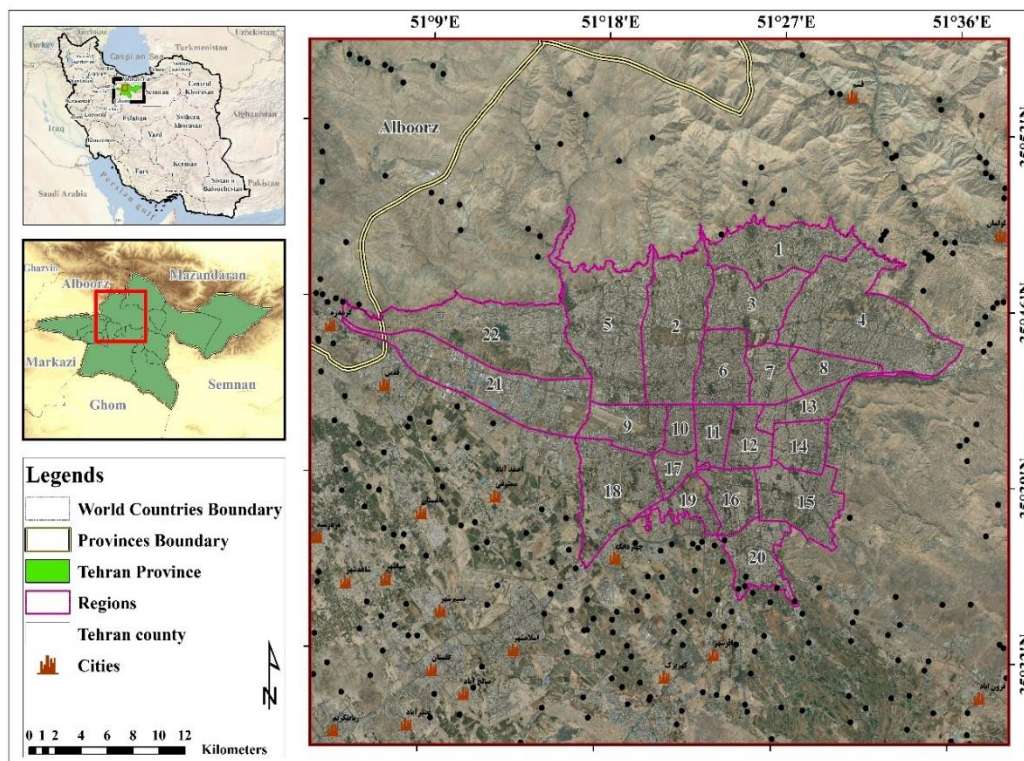
منطقه البرز واقع شده است. این استان با مساحت بالغ بر ۱۶/۵ هزار کیلومتر با متوسط ارتفاع ۹۰۰ الی ۱۸۰۰ متر، بین ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). ضریب توپوگرافی در شهر تهران بسیار بالا بوده و شرایط طبیعی منطقه به نحو چشمگیری از این موضوع متأثر شده است. بافت نامتراکم، وجود باغ‌های کهن، بوستان‌ها، فضای سبز حاشیه بزرگراه‌ها و کم‌بودن فعالیت‌های صنعتی در شمال شهر کمک کرده‌اند تا هوای مناطق شمالی به‌طور متوسط ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد خنک‌تر از مناطق جنوبی شهر باشد. کلان‌شهر تهران بعنوان مرکز سیاسی، اقتصادی و ارتباطی ایران، از الگوی شهرسازی به نسبت نامنظم و بدون برنامه برخوردار است. این حالت سبب شده تا شهر تهران از جزایر گرمایی با شدت نسبتاً بالایی برخوردار باشد و به‌صورت مجمع‌الجزایری با هسته‌های متعدد متمرکز بر مراکز فعالیتی مختلف شهر توزیع شود (Shamsipour et al., 2013).

مناطق با استفاده از مدل خنک‌کنندگی شهری^{۱۸} در نرم-افزار InVEST ارزیابی شده است. مدل خنک‌کنندگی شهری InVEST شاخص کاهش حرارت را بر اساس سایه، تبخیر و تعرق، آلبیدو (بازتاب نور خورشید) و همچنین فاصله از جزایر خنک‌کننده (بعنوان مثال پارک‌ها) محاسبه می‌کند. از شاخص پوشش گیاهی نیز برای تخمین کاهش دما استفاده می‌شود. خروجی مدل خنک‌کننده شهری به ما نشان می‌دهد که چگونه فرم شهری و معیارهای طراحی شهری نظیر اراضی ساخته‌شده، فضای سبز و باز، نوع پوشش گیاهی، تبخیر و تعرق و سایه‌اندازی ناشی از آن، تراکم جمعیت و.... بر ظرفیت تعدیل دمای شهری تأثیر دارند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

تهران بعنوان پرجمعیت‌ترین شهر و پایتخت کشور ایران، مطابق مرکز آمار ایران، در سال ۱۴۰۳ معادل ۸۵۸۶۰۱۲۰ نفر جمعیت داشته و با اقلیم نیمه‌خشک در شمال ایران و



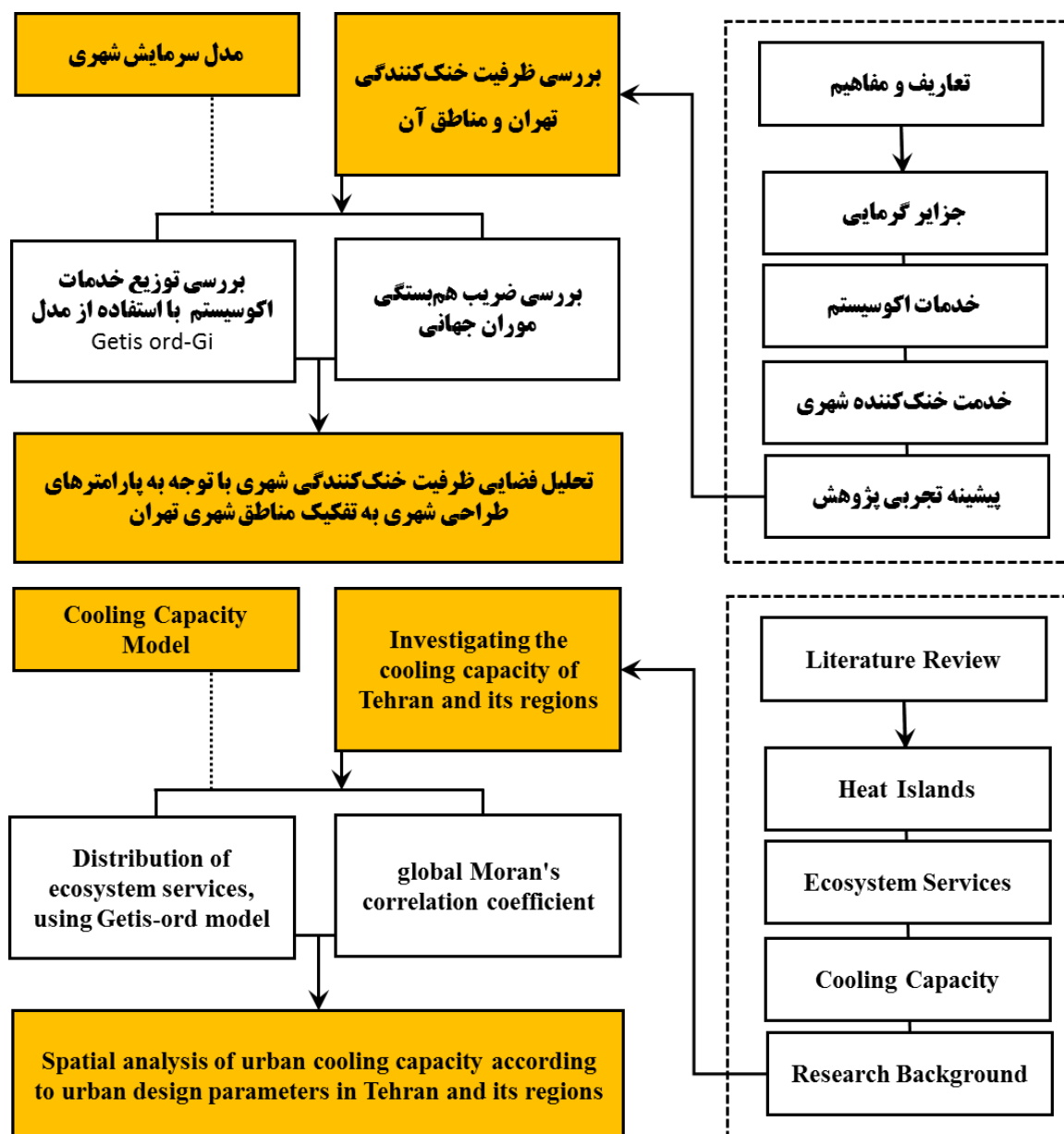
شکل ۱- موقعیت شهر تهران و مناطق آن

Fig. 1- Location of Tehran and its regions

روش‌شناسی پژوهش

چارچوب روش‌شناسی تحقیق در شکل ۲ چگونگی یکپارچه‌سازی خدمت اکوسیستمی تعدیل دما در برنامه‌ریزی شهر تهران را نشان می‌دهد که شامل سه بخش است: (۱) جمع‌آوری داده‌ها و پیش‌پردازش (۲) شناسایی و

مدل‌سازی خدمت اکوسیستمی تعدیل دما (۳) تحلیل فضایی. به‌صورت کلی پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و روش انجام آن توصیفی تحلیلی می‌باشد. توضیح دقیق فرآیند تحقیق بر اساس راهنمای کاربران نرم افزار^{۱۹} InVEST در بخش‌های زیر ارائه خواهد شد.



شکل ۲ - روش‌شناسی پژوهش

Fig. 2- Research methodology

جمع‌آوری اطلاعات و پیش‌پردازش

به‌منظور بررسی توزیع فضایی خدمت اکوسیستمی تعدیل دما از اطلاعات مختلفی استفاده شد. بدین منظور داده‌های پژوهش

حاضر از مطالعات کتابخانه‌ای، مراجعه به سایت‌های اینترنتی و پایگاه‌های علمی و همچنین سازمان‌های مرتبط جمع‌آوری شده است. اطلاعات ورودی اصلی مورد نیاز عبارت‌اند از (جدول ۲):

- (۱) کاربری / پوشش اراضی 20 (LULC)؛
- (۲) جدول بیوفیزیکی مناطق دارای پوشش گیاهی: این داده با استفاده از "تراکم پوشش درختی" محاسبه شده است (Kc) ضریب تبخیر و تعرق مرجع و مقداری بین ۰ و ۱ است. ضریب Albedo نسبت تابش خورشیدی است که مستقیماً توسط طبقات LULC منعکس می‌شود و مقداری بین ۰ و ۱ است؛
- (۳) تبخیر و تعرق مرجع (ET_0): داده‌های مربوطه از طریق سازمان هواشناسی جمع‌آوری شده و بر اساس روش مانتیس و فائو 21 محاسبه شده است.
- (۴) حداکثر فاصله خنک‌کننده (d_{cool}): حداکثر فاصله‌ای است که در آن مناطق سبز بزرگ اثر خنک‌کنندگی دارند و بر حسب متر بیان می‌شود.
- (۵) دمای هوای مرجع (T_{ref}): داده‌های مربوطه از پایگاه داده سازمان هواشناسی استان تهران استخراج شد.
- (۶) حداکثر اثر جزیره گرمایی شهری (UHI_{max}): تفاوت بین دمای مرجع روستایی و حداکثر دمای مشاهده‌شده در شهر است.
- (۷) حداکثر فاصله جهت ترکیب دمای هوا: شعاع جستجوی بکارگرفته‌شده برای محاسبه میانگین مؤثر در اختلاط دمای هوا است که به متر بیان می‌شود.
- علاوه بر داده‌های ذکر شده، داده‌های مصرف انرژی ساختمان نیز می‌توانند در مدل لحاظ شوند. در پژوهش حاضر، با توجه به عدم کفایت داده‌های جانبی در دسترس، مدل بدون ورودی اضافی اجرا شده است.

جدول ۲- لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. Data Layers used in this research

نام لایه اطلاعاتی Information layer	مقیاس Scale	روش مورد استفاده Used method	منبع دریافت اطلاعات Source of information
تصاویر ماهواره سنتینل ۲ Sentinel 2 Images	۱۰ متر 10 m	-	سازمان زمین‌شناسی آمریکا U.S. Geological center earthexplorer.usgs.gov
تبخیر و تعرق مرجع Reference Evapotranspiration	-	Fao EV0	اطلاعات پایه: سازمان هواشناسی ایران Base data: Iran Meteorological Organization
دما Temperature	-	درون‌یابی - روش IDW Interpolate using IDW	سازمان هواشناسی ایران Iran Meteorological Organization
نقشه‌های موضوعی GIS : منابع آب، تیپ‌های پوشش گیاهی GIS thematic maps Water sources, types of vegetation	۱:۲۰۰۰۰ الی ۱:۱۰۰۰۰۰ 1/100000 to 1/20000	تلفیقی - روی هم‌گذاری و استخراج به روش شی‌گرا	سازمان منابع طبیعی کشور وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب Organization of Natural Resources Ministry of Energy Water Resources Management Company
تصاویر و اطلاعات کمکی برداشت نمونه‌های آموزشی و نقاط کنترل زمینی* Images and auxiliary information Collection of training samples and ground control points	۳۰ سانتی‌متر الی ۳۰ متر 30 cm to 30 m	-	ArcBruTile Google Earth PRO Portable Base Map Server GPS ASTER GDEM V2
جدول بیوفیزیکی Biophysical Table (Kc, Albedo, Green Area, Building Intensity)	-	جدول ۴ Table 4	Bosch et al., (2021); Hu et al., (2023); InVEST User's Guide (2024)
فاصله خنک‌کنندگی فضای سبز Green area cooling distance	اطلاعات دستی Manual Information	1000	Ronchi et al., (2020); InVEST User's Guide (2024)
شعاع میانگین دمای هوا T air average radius	اطلاعات دستی Manual Information	2000	InVEST User's Guide (2024)
دمای مرجع T reference	اطلاعات دستی Manual Information	18	اطلاعات پایه: سازمان هواشناسی ایران و مرور منابع Base data: Iran Meteorological Organization and literature review
حداکثر اثر جزیره گرمایی شهری UHI max	اطلاعات دستی Manual Information	3.24	Kraemer and Kabisch (2022); InVEST User's Guide (2024)

* در پژوهش جهت تهیه نقشه کاربری و پوشش اراضی، اطلاعات با استفاده از روش شی‌گرا و تلفیقی در بستر نرم افزار Arc GIS روی هم‌گذاری شد. برای صحت‌سنجی داده‌ها نیز از نقاط کنترل زمینی استفاده شد.

$$CC_i = 1 - \text{building.intensity}$$

برای ارزیابی اثر خنک‌کنندگی فضاهای سبز بزرگ (> ۲ هکتار)، شاخص کاهش حرارت شهری (HM) محاسبه می‌شود (McDonald et al., 2016; Zardo et al., 2017). اگر پیکسل موردنظر تحت تأثیر فضای سبز بزرگ قرار نگیرد، HM با CC برابر است؛ در غیر این صورت، وزن مقادیر CC به‌طور متوسط با استفاده از فضای سبز بزرگ و پیکسل موردنظر تنظیم می‌شود. برای انجام این کار، ابتدا مقدار مناطق سبز در فاصله مشخص هر پیکسل (GA_i) و ظرفیت خنک‌کننده هر پارک (CC_{park_i}) محاسبه می‌شود:

$$GA_i = \text{cell area} \cdot j \in d \text{ radius from } igi$$

$$CC_{park_i} = \sum_{j \in d \text{ radius from } i} g_j \cdot CC_j \cdot e^{\left(\frac{-d(i,j)}{d_{cool}}\right)}$$

$cell_{area}$ مساحت یک سلول در هکتار است. اگر پیکسل j فضای سبز باشد، g_j برابر ۱ است؛ در غیر این صورت صفر است. $d(i, j)$ فاصله پیکسل i و j است. d_{cool} مسافتی است که فضای سبز در آن اثر خنک‌کنندگی دارد. CC_{park_i} میانگین وزنی فاصله مقادیر CC از فضای سبز است. LULC که بعنوان "فضای سبز" محسوب می‌شود، با پارامتر "green_area" در جدول بیوفیزیکی تعیین می‌شود. شاخص HM به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$HMi = \begin{cases} CC_i & \text{if } CC_i \geq CC_{park_i} \text{ or } GA_i < 2ha \\ CC_{park_i} & \text{otherwise} \end{cases}$$

برای تخمین کاهش حرارت در سطح شهر، مدل از بزرگنمایی UHI (UHI_{max}) استفاده می‌کند. مقادیر UHI از ادبیات محلی یا مطالعات جهانی قابل دستیابی است: به‌طور مثال، کاوشگر جهانی UHI که توسط دانشگاه ییل ساخته شد، تخمین‌های سالانه، فصلی، روزانه و شبانه را ارائه می‌دهد (<https://yceo.users.earthengine.net>). دمای هوا نیز برای هر پیکسل ($T_{airnomix}$) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{airnomix} = T_{airref} + (1 - HMi) \cdot UHI_{max}$$

T_{airref} دمای مرجع روستایی و UHI_{max} میزان حداکثر اثرگذاری UHI برای شهر است. بدلیل اختلاط هوا، این دما

مدل‌سازی پتانسیل خدمت تعدیل دما

در پژوهش حاضر، ظرفیت خنک‌کنندگی شهری توسط میانگین ظرفیت خنک‌کنندگی (ACC) با استفاده از نرم‌افزار InVest ارزیابی شده است. مدل مذکور ابتدا شاخص ظرفیت خنک‌کننده برای هر پیکسل را بر اساس شاخص‌های فضای سبز، تبخیر و تعرق و آلودگی محاسبه می‌کند. بر اساس شاخص‌های ارائه‌شده توسط Kunapo et al. (2018)، آلودگی بعنوان یک عامل مهم برای کاهش گرما در نظر گرفته شده است. بر اساس راهنمای نرم‌افزار (۲۰۲۰)، عامل "سایه" نسبت سایه‌بان درخت (برای درختان < ۲ متر) در طبقات مختلف کاربری و پوشش اراضی را نشان می‌دهد و مقدار آن بین ۰ تا ۱ است. شاخص تبخیر و تعرق نشان‌دهنده مقدار نرمال‌شده تبخیر و تعرق پوشش گیاهی است که برای هر پیکسل با حاصل‌ضرب تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) و ضریب محصول (K_c) تقسیم‌بر حداکثر مقدار پیکسل ET_0 در منطقه (ET_{max}) محاسبه می‌شود:

$$ET_i = (K_c \cdot ET_0) / ET_{max}$$

بنا بر فرض معادله، مناطق پوشش گیاهی به‌اندازه کافی آبیاری می‌شوند (اگرچه مقادیر K_c را می‌توان نسبت به محدودیت آب تغییر داد). دامنه عددی ضریب آلودگی بین ۰ و ۱ است که نسبت تابش خورشیدی منعکس‌شده را نشان می‌دهد (Phelan et al., 2015). این مدل سه فاکتور در شاخص خنک‌کننده (CC) را ترکیب می‌کند:

$$CC_i = 0.6 \cdot \text{shade} + 0.2 \cdot \text{albedo} + 0.2 \cdot ET_i$$

بر اساس داده‌های تجربی، وزن پیش فرض معدل برای سه فاکتور سایه، آلودگی و تبخیر و تعرق به ترتیب ۰/۶، ۰/۲ و ۰/۲ است که نشان‌دهنده اثر بیشتر فاکتور سایه نسبت به تبخیر و تعرق است (راهنمای نرم‌افزار InVest، ۲۰۲۰). به‌عنوان مثال، Zardo et al. (2017) بیان کرده‌اند: "در مناطق کوچک‌تر از دو هکتار، وزن تبخیر و تعرق ۰/۲ و وزن سایه ۰/۸ است. همچنین در مناطق بزرگ‌تر از دو هکتار، وزن تبخیر و تعرق و سایه به ترتیب ۰/۶ و ۰/۴ است."

به‌طور میانگین فضایی محاسبه می‌شود. همچنین، دمای هوای واقعی (T_{air}) با استفاده از $T_{airnomix}$ محاسبه می‌شود.

تحلیل فضایی

در مقاله حاضر، تحلیل فضایی خدمت اکوسیستم و ظرفیت خنک‌کنندگی مطابق مراحل زیر انجام شده است:

پراکنش ظرفیت خنک‌کنندگی شهری با استفاده از روش kernel در محیط پایتون: پراکنش ظرفیت خنک-

کنندگی شهری با استفاده از روش کرنل در محیط پایتون انجام شده است. تابع کرنل یکی از توابع تحلیل فضایی است که تراکم خدمات اکوسیستم را با توجه به مساحت منطقه و نوع خدمت در پهنه نشان می‌دهد. بیان فضایی خدمت اکوسیستمی تعدیل دما با استفاده از واحدهای فضایی همگن انجام می‌شود. در این مقاله، با ایجاد سلول‌های شبکه‌ای ۵۰۰ متری بر اساس داده‌های خروجی با استفاده از ArcToolbox و ابزار Generate Tesselation شبکه تولید شدند. با استفاده از این واحدهای فضایی همگن (شبکه) تحلیل فضایی انجام گرفت.

خوشه‌ای بودن خدمت اکوسیستمی تعدیل دما با استفاده از شاخص موران جهانی: برای استخراج

آماره‌های فضایی ابتدا با استفاده از دستور zonalstatistical میزان هر آماره برای محلات مناطق ۲۲ گانه شهر تهران استخراج گردید. میزان همبستگی فضایی شاخص‌ها با توجه به نوع رفتار و ویژگی‌های هر منطقه استخراج گردید. خروجی گرافیکی، خوشه‌ای یا پراکنده بودن داده‌ها را نشان می‌دهد. بطور کلی، اگر شاخص موران نزدیک به ۱+ شده است، داده‌ها دارای همبستگی فضایی و الگوی آن‌ها خوشه-ای است. اگر مقدار شاخص موران نزدیک به عدد ۱- باشد، داده‌ها از هم‌گسسته و پراکنده است. در شاخص همبستگی موران جهانی فرضیه صفر این‌گونه بیان می‌شود که هیچ نوع خوشه‌بندی فضایی بین مقادیر عنصر مرتبط با عوارض جغرافیایی موردنظر وجود ندارد. حال زمانی که مقدار p-value بسیار کوچک و مقدار z برآورد شده (قدر مطلق آن) بسیار بزرگ باشد (خارج از محدوده اطمینان قرار می‌گیرد)،

می‌توان فرضیه صفر را رد کرد.

توزیع فضایی خدمت اکوسیستمی تعدیل دما با

استفاده از تحلیل Gits_ard: پس از مشخص شدن واحد همگن برای منطقه مورد مطالعه، آماره شاخص گیتس -G statistic به‌منظور تعیین لکه‌های داغ^{۲۲} در سطوح اطمینان ۹۰، ۹۵ و ۹۹ استفاده شد. برای تحلیل لکه‌های داغ، آماره gits_ard برای عوارض موجود در داده‌ها محاسبه می‌شود. درواقع لکه‌های داغ باید از نظر آماری معنادار باشد و علاوه بر داشتن ارزش بالا، توسط دیگر عوارض بالارزش قابل‌ملاحظه احاطه شده باشد که به همراه p-value و z-score احتمال تصادفی بودن و انحراف معیار را نشان می‌دهند (Harirforoush and Bellalite, 2019).

تحلیل ظرفیت خنک‌کنندگی با توجه به پارامترهای

طراحی شهری: در این بخش، ارتباط ظرفیت خنک-کنندگی با پارامترهای طراحی شهری نظیر انعکاس نورخورشید، تبخیر و تعرق، فضای ساخته‌شده و فضای سبز و پوشش گیاهی از طریق مدل‌سازی GIS مورد تحلیل قرار گرفته است. تعریف اصطلاحات این بخش در ادامه ارائه شده است.

• **دمای میانگین کاهش‌یافته:** میزان اثری که

پوشش یا کاربری اراضی (اکوسیستم) بر دمای یک منطقه می‌گذارد که به‌واسطه عملکرد آن رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، میزان درجه خنک-کنندگی پوشش اراضی در منطقه را نشان می‌دهد.

• **تلورانس اختلاف دما:** میزان اثری که

اکوسیستم بر تلورانس دما در طول یک شبانه‌روز می‌گذارد. هر چه این میزان کمتر باشد، نقش اکوسیستم پررنگ‌تر است.

دمای مرجع: دمای مرجع روستایی (جایی که اثر جزیره

گرمای شهری مشاهده نشده باشد) برای بازه زمانی موردنظر که می‌تواند میانگین دمای شب و روز در منطقه مورد مطالعه باشد.

نتایج و بحث

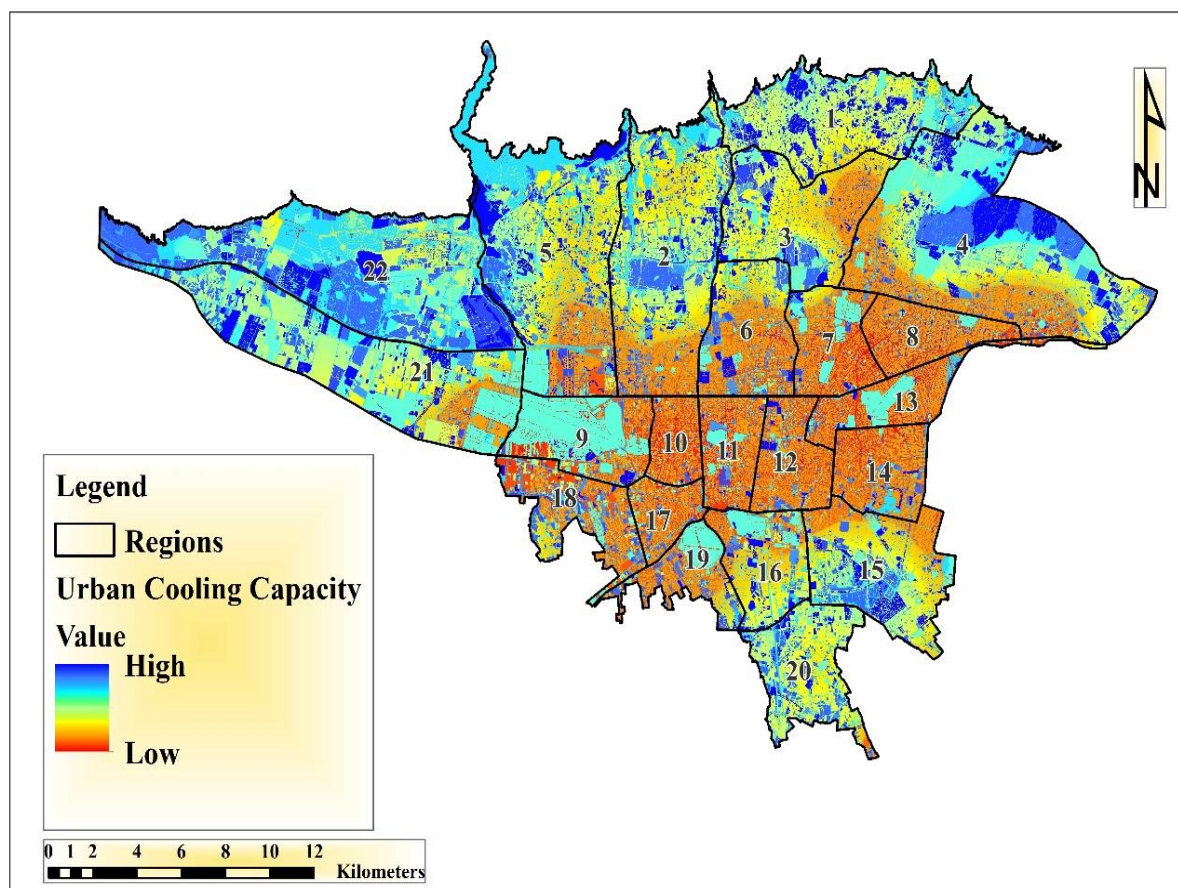
پراکنش ظرفیت خنک‌کنندگی شهری

شکل ۳ چگونگی رفتار آسایش حرارتی در شهر از مناطق پیرامونی تا هسته مرکزی را به خوبی ارائه می‌دهد. خروجی ظرفیت خنک‌کنندگی شهری با استفاده از روش تجزیه و تحلیل Kernel نشان می‌دهد که ظرفیت خنک‌کنندگی در کدام قسمت‌های شهر تهران بالاتر است (از آبی تیره تا قرمز تیره). با نگاهی به توزیع فضاهای باز شهری، آسایش حرارتی ناشی از آنها نیز قابل مشاهده است. فضاهای سبز و باز شهری نقش ارزشمندی در کاهش پدیده جزیره گرمایی دارند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، وجود اراضی سبز و باز در مناطق شمالی، شمال شرقی و غرب تهران، نقش قابل توجهی در ظرفیت خنک‌کنندگی شهری و کاهش اثر گرما داشته است. تراکم زیاد ساختمان و جمعیت،

به عبارتی سطح بالای اراضی ساخته شده در نواحی مرکزی منجر به کاهش ظرفیت خنک‌کنندگی مناطق مرکزی شده است.

خوشه‌ای بودن خدمت اکوسیستمی تعدیل دما

مقادیر همبستگی مکانی موران جهانی در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، مقدار شاخص موران برابر با ۰/۷۹ به دست آمده است. نتایج گواه این امر می‌باشد که شاخص دارای همبستگی مثبت در منطقه مورد مطالعه است. ارزیابی هم‌زمان مقادیر به دست آمده با آستانه معنادار نشان می‌دهد که مقادیر برآورد شده شاخص موران در سطح آلفا ۰/۰۱ معنی دار هستند. بنابراین، این نتیجه حاصل می‌شود که الگوی فضایی خدمت اکوسیستم تعدیل دما در منطقه مورد مطالعه ساختاریافته است و به صورت تصادفی توزیع نشده‌اند.



شکل ۳ - پراکنش ظرفیت خنک‌کنندگی شهری

Fig. 3- Urban cooling capacity in Tehran

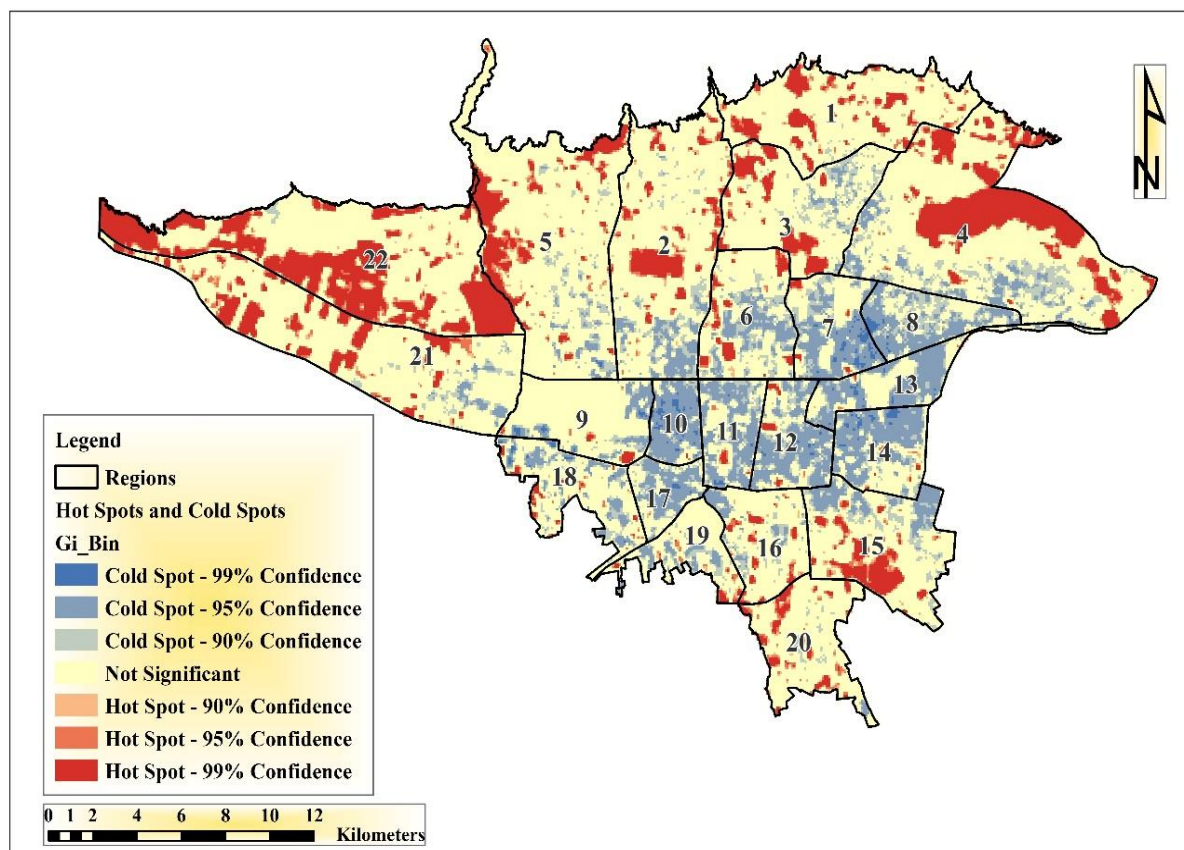
جدول ۳- مقادیر همبستگی موران برای خدمت اکوسیستمی تعدیل دما
Table 3. Moran's correlation values for urban cooling ecosystem services

شاخص موران Moran's Index	شاخص موردانتظار Expected index	واریانس Variance	p-value	z-score	نوع Type
0.792214	-0.000017	0.000008	0.00	274.269546	خوشه‌ای Clustered

توزیع فضایی خدمت اکوسیستمی تعدیل دما

شکل ۴ نتایج به دست آمده از آمارهای Getis Ord-Gi شناسایی لکه‌های داغ (پهنه‌های کلیدی) و لکه‌های سرد را نشان می‌دهد. مطابق این نقشه، لکه‌های سرد شامل ۷۷۲۷/۴۴ هکتار با سطح اطمینان بیش از ۹۹ درصد سطح و ۳۳۰۷/۹۷ هکتار با سطح اطمینان بیش از ۹۰ درصد به عنوان هات اسپات شناخته شده‌اند. همان گونه که شکل ۴ نشان می‌دهد، ۲۰/۱ درصد از منطقه را لکه‌های سرد با سطح اطمینان بیش از ۹۰ درصد تشکیل می‌دهد

که این میزان بیش تر از هات اسپات‌های کل منطقه است. بیشترین میزان لکه‌های داغ را مناطقی جنگلی در غرب شهر و نیز شرق آن و بیشترین مناطق یکپارچه لکه‌های سرد در مرکز شهر واقع شده است. مطابق این شکل مناطق سرد شامل مناطق ۱۰ و ۱۲ و ۱۷ با سطح اطمینان ۹۵ و منطقه ۷ با ۹۹ درصد سطح اطمینان و هات اسپات‌ها در مناطق ۲۲ و ۴ با ۹۹ درصد سطح اطمینان و منطقه ۵ و ۲ و ۱۵ با ۹۵ درصد سطح اطمینان برآورد شد.



شکل ۴- الگوی پراکنش لکه‌های داغ و سرد ارزش خدمت اکوسیستمی UC
Fig. 4- Hot and Cold spots of urban cooling ecosystem service pattern

تحلیل ظرفیت خنک‌کنندگی با توجه به

پارامترهای طراحی شهری

ارزیابی اثرگذاری اکوسیستم‌های طبیعی بر کاهش دما با توجه به تفکیک منطقه نشان می‌دهد، میزان کاهش دمای میانگین در منطقه ۴ و ۲۲ مشهود بوده است که ناشی از وجود فضاهای سبز گسترده و گونه‌های درختی سوزنی‌برگ همیشه‌سبز، دریاچه مصنوعی چیتگر و مناطق باز نظامی در غرب تهران (منطقه ۲۲) و همچنین، وجود چمن‌کاری‌های وسیع، فضاهای سبز وسیع و فضاهای باز نظامی در شرق تهران (منطقه ۴) بوده است (شکل ۵). وجود دریاچه‌های مصنوعی در غرب منطقه نقش بسیار مهمی در تعدیل دما دارد. در این منطقه به دلیل تبخیر و تعرق بالا، قرارگیری در کریدور بادی و همچنین وجود فضاهای باز گسترده، اثر خنک‌کنندگی سطح بیشتری را پوشش داده است (شکل ۶). وجود جنگل‌های سوزنی‌برگ در منطقه ۲۲ و اثر هم‌افزایی با دریاچه چیتگر باعث شده که منطقه ۲۲ دارای بیشترین هت‌اسپات‌های عرضه خدمت اکوسیستمی تعدیل دما باشد (شکل ۴). پارک‌های شهری زمانی می‌توانند مزایای ظرفیت خنک‌کنندگی ارائه دهند که دارای سطوح سبز فشرده با مساحت حداقل ۲ هکتار باشند (Ronchi et al., 2020). با وجود ساخت‌وسازهای جدید و بلندمرتبه در بخش شرق منطقه، همچنان غلبه پوشش وسیع جنگلی و فضاهای باز به تعدیل دمای منطقه کمک شایانی کرده است. ساخت‌وسازهای جدید در لایه پیرامونی دریاچه که جریان‌های بادی را کند کرده است، اثر تعدیل دمای این اکوسیستم نیمه‌طبیعی را کاهش داده است (شکل ۳). منطقه ۴ نیز جنگل‌های سوزنی‌برگ و چمن‌کاری‌های وسیعی را به خود اختصاص داده است، و به علت تبخیر و تعرق مرجع کمتر، خنک‌کنندگی قابل توجهی داشته است (شکل ۷). وجود مناطق نظامی گسترده در سمت غرب و شرق منطقه که نسبت قابل توجهی از منطقه را به خود اختصاص می‌دهند، باعث

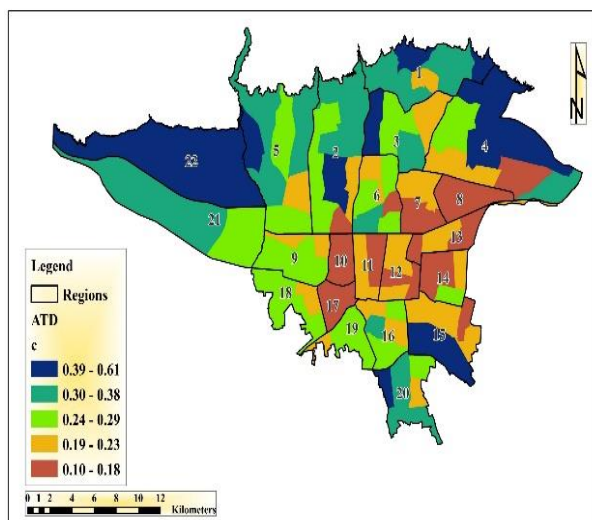
شده اثر تعدیل دمای اکوسیستم به مناطق مجاور نیز نفوذ کند. فضاهای نظامی ضمن داشتن ضریب آلبیدوی پایین، دارای سطح زیادی اراضی باز بوده و نسبت فضاهای ساخته‌شده در آن‌ها بسیار پایین است. در این مناطق اختلاف تفاوت دمایی در کمترین حالت ممکن قرار دارد (شکل ۸). ضریب سایه‌اندازی، ضریب آلبیدو، ضریب تبخیر و تعرق گیاهی، ضریب پوشش گیاهی و ضریب ساخته‌شده برای برخی کاربری‌های مهم و اثرگذار در جدول ۴ ارائه شده است.

مناطق شمالی تهران شامل مناطق ۱، ۲ و ۵ به دلیل قرارگیری در ارتفاعات و دمای پایین، دارای تبخیر و تعرق مرجع پایینی هستند (شکل ۷). منطقه ۵ دارای پوشش گیاهی خزان‌کننده از جنس درخت‌های توت و مناطق ۱ و ۲ دارای درختان سوزنی‌برگ در ارتفاعات هستند. این مناطق به دلیل وجود رودخانه‌ها، آبراهه‌های طبیعی، فضاهای سبز وسیع و بافت مسکونی ویلایی همواره دمای کمتری را تجربه می‌کنند (شکل ۵). بر اساس شکل ۳، اثری که اکوسیستم مناطق شمالی بر مناطق هم‌جوار نظیر منطقه ۳ دارند، به‌وضوح قابل‌رویت است. دلیل این امر نیز ارتفاع کم ساختمان‌ها، وجود کریدورهای طبیعی بین لکه‌های طبیعی و پیوستگی فضاهای سبز می‌باشد (به‌طور مثال اتصال فضاهای سبز به واسطه خیابان ولیعصر) که موجب شده است اثر تعدیل دما همواره به مناطق مجاور نیز نفوذ کند.

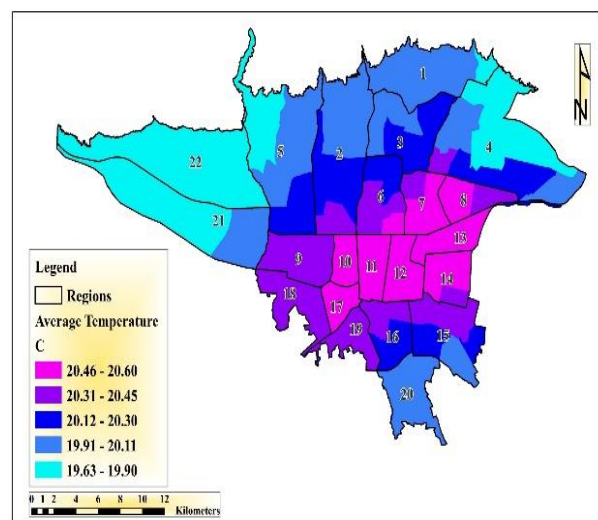
در منطقه ۲۱ نیز شاهد درختکاری‌ها، فضاهای سبز و باز وسیع و ساخت‌وسازهای کم‌ارتفاع هستیم، با این وجود اثرات اکوسیستم آن بر مناطق هم‌جوار بسیار ناچیز است. با اندکی تأمل، می‌توان دلیل آن را در وجود صنایع بزرگ-مقیاس در این منطقه جستجو کرد که دارای ضریب آلبیدوی بالایی هستند (تصویر ۸). بافت شطرنجی منظم در مناطق ۸ و ۹ که شامل درهم‌تنیدگی لکه‌های سبز با لکه‌های انسان‌ساخت می‌باشد، منجر به یکنواختی عرضه خدمت اکوسیستمی تعدیل دما در این مناطق شده است.

کاهش خدمت اکوسیستمی تعدیل دما در این مناطق شده است. از سوی دیگر در مناطق ۱۱ و ۱۲ وجود ارتفاع زیاد ابنیه و ضریب تراکم بالا در کنار ترافیک شهری منجر به کاهش اثر خنک‌کنندگی فضاهای سبز گسترده در این مناطق و پیرامون آن شده است (شکل ۵). در شکل ۴ می‌توان لکه‌های سرد خدمت اکوسیستمی ناشی از خنک‌کنندگی کمتر در این مناطق را به‌وضوح مشاهده کرد.

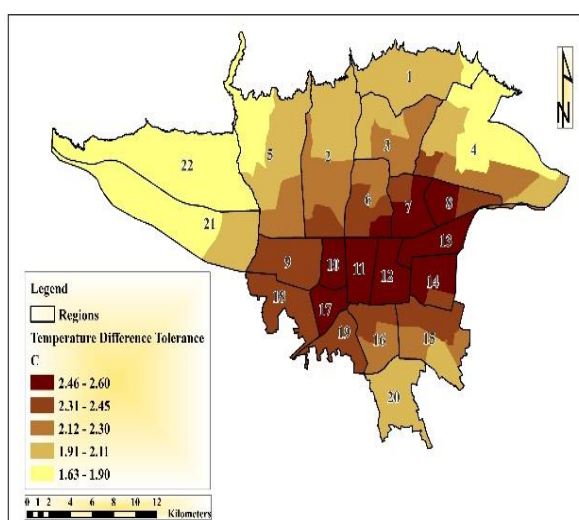
نمونه این امر را می‌توان در محله اکباتان مشاهده کرد. مناطق مرکزی تهران که شامل مناطق ۱۰ تا ۱۴ و منطقه ۱۷ می‌باشد، دارای دو گونه بافت می‌باشند؛ (۱) بافت فشرده و کم‌ارتفاع و (۲) بافت بلندمرتبه به‌همراه فضای سبز گسترده. مناطق ۱۰، ۱۷، ۱۳ و ۱۴ دارای تراکم بالای شهری با ارتفاع کم ساختمان‌ها هستند. در این مناطق فضای سبز کمتری مشاهده می‌شود. فضای سبز اندک به‌همراه ضریب تبخیر و تعرق مرجع بالا، منجر به



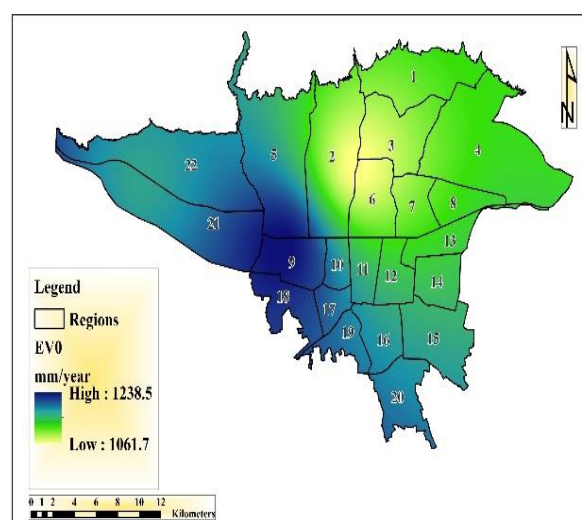
شکل ۶- توزیع دمای میانگین کاهش‌یافته
Fig. 6- Distribution of Average Temperature Decreased



شکل ۵- توزیع دمای میانگین
Fig. 5- Average Temperature Distribution



شکل ۸- توزیع تلورانس اختلاف دما
Fig. 8- Distribution of Temperature Differences Tolerance



شکل ۷- توزیع دمای مرجع
Fig. 7- Reference temperature (EV0) Distribution

جدول ۴- ضریب پارامترهای طراحی شهری مورد بررسی

Table 4. Coefficient of urban planning parameters

کاربری Land use	ضریب سایه اندازی Shading	ضریب تبخیر و تعرق گیاهی Evaporation and Transpiration	ضریب آلبدو Albedo	ضریب پوشش گیاهی Vegetation	ضریب فضای ساخته شده Built-up
صنایع Industry	0.10	0	0.13	0	0.99
نظامی Military	0	0	0.15	0	0.70
مسکونی Residential	1	0.30	0.40	0	0.90
جاده Road	0	0	0.50	0	1
باغ Garden	0.80	1	0.60	1	0.50
فضای سبز (دارای درختان پراکنده) Green Space (with scattered trees)	0.80	0.92	0.70	1	0.20
چمن کاری Grass	0.60	0.85	0.60	1	0.40
درختکاری (دارای درختان انبوه) Arboriculture (with dense trees)	1	1	0.70	1	0
دریاچه Lake	0.40	0.83	0.90	0	0

(منبع: Bosch et al., (2021); Hu et al., (2023); InVEST User's Guide (2024))

اصلی این خدمت معرفی می‌شود. می‌توان بیان کرد اثر همسایگی که یک طبقه پوشش گیاهی بر پیکسل هم‌جوار خود برای کاهش دمای شهری می‌گذارد و تفاوت دمایی که در صورت وجود و یا عدم وجود آن پوشش گیاهی منجر می‌شود، به عنوان خدمت اکوسیستمی تعدیل دما معرفی می‌شود.

نتایج حاصل از این پژوهش گواه بر تغییر شاخص‌ها در مناطق متراکم است. کلد اسپات‌ها که نشان‌دهنده سهم ضعیف خدمت اکوسیستمی تعدیل دما هستند، در مناطقی متمرکز شده‌اند که بعنوان محدوده طرح ترافیک شناخته می‌شود. مطابق با مطالعات کشتکار و همکاران (۲۰۲۱)، مناطق کلد اسپات با مناطق دارای آلودگی هوا همپوشانی بالایی دارند.

عرضه خدمت اکوسیستمی تعدیل دما به صورت مستقیم به دو پارامتر اقلیمی و ویژگی‌های طراحی شهری بستگی دارد. به واسطه شاخص خودهمبستگی، عرضه خدمت تعدیل دما

خنک‌کنندگی در مناطق تهران تحت تأثیر دو عامل ارتفاع و پوشش گیاهی است. مناطق شمالی تهران به واسطه افزایش ارتفاع، دمای کمتری دارند و اختلاف دمایی کمتری در این مناطق مشاهده می‌شود. در مناطق مرکزی علاوه بر میانگین دمای هوای بالاتر، اثر جزیره حرارتی نیز دیده می‌شود؛ که لزوم وجود پوشش گیاهی و فضای سبز در منطقه را آشکار می‌سازد. گرچه، تراکم زیاد ساختمان‌ها منجر به کاهش اثر خدمت خنک‌کنندگی پوشش گیاهی و فضای سبز در مناطق مرکزی می‌شود. این مهم در سمت شرق و غرب، به علت تراکم کمتر مسکونی، کمتر دیده می‌شود و اثرگذاری خدمت اکوسیستمی تعدیل دما در مناطق هم‌جوار به خوبی مشاهده می‌شود. در این مدل، شاخص ظرفیت خنک‌کنندگی بر اساس داده‌های تبخیر و تعرق و همچنین تفاوت دمای شهر تهران با دمای مرجع محاسبه شده است. درواقع اثر ایجاد سایه و نیز تلطیف هوایی که یک پوشش گیاهی ایجاد می‌کند، بعنوان پارامتر

نتیجه‌گیری

مدیریت پایدار هر شهر نیازمند واردسازی و یکپارچه‌سازی خدمات اکوسیستمی در پارامترهای طراحی شهری است. تأثیر نسبی هر پارامتر طراحی شهری در ارائه ظرفیت خنک-کنندگی بسیار متفاوت است. توجه به این پارامترها می‌تواند نقطه شروعی برای طراحی مناطق شهری با ظرفیت خنک-کنندگی بالا باشد. در این پژوهش، وضعیت توزیع خدمت تعدیل دمای شهری به‌عنوان وضعیت کلی از عرضه خدمات اکوسیستم محیط‌زیست شهری مورد پایش قرار گرفت که نتایج حاصل از این پژوهش گواه بر اثر هم‌زمان اقلیم و پارامترهای طراحی شهری در رفاه انسانی بوده است. برای این منظور، به بررسی پراکنش خدمت اکوسیستمی تعدیل دما، ظرفیت خنک‌کنندگی شهری در مناطق مختلف و اثرگذاری پارامترهای طراحی شهری بر میزان خنک‌کنندگی پرداخته شده است.

ظرفیت خنک‌کنندگی شهر تهران با استفاده از مدل خنک‌کنندگی شهری در نرم‌افزار InVEST ارزیابی شده است. خروجی مدل خنک‌کننده شهری به ما نشان می‌دهد فضاهای سبز و باز شهری نقش ارزشمندی در کاهش پدیده جزیره گرمایی دارند. تراکم زیاد ساختمان و جمعیت، به-عبارتی سطح بالای اراضی ساخته‌شده در نواحی مرکزی منجر به کاهش ظرفیت خنک‌کنندگی مناطق مرکزی شده است.

بررسی نوع خوشه‌بندی بر اساس مدل موران جهانی و کلد اسپات با استفاده از مدل گیتس - آرد نشان می‌دهد که در مناطق مرکزی شهر نیاز به بازتعریف اصول طراحی شهری جهت کنترل دمای شهر می‌باشد.

از آنجاییکه کاهش تراکم ساختمان‌ها قابل‌دستیابی نیست، باید راه‌حل‌های دیگری بررسی شود. بعنوان مثال، می‌توان ایجاد بام‌های سبز و یا مسیرهای سبز را برای کنترل دما در این مناطق در نظر گرفت. راه‌حل دیگر تشویق مالکان ساختمان‌ها به ایجاد دیوارهای سبز و بام سبز است که در مراحل بعدی می‌تواند اجباری باشد. برای تحقق این امر،

در شهر تهران از خوشه‌بندی پیروی می‌کند. نتایج مستخرج از آماره گیتس - آرد که وسعت لکه‌های داغ را در سطوح مختلف بررسی می‌کند، نشان داده شده است که بخش مرکزی شهر به علت سطح پایین خدمت اکوسیستمی تعدیل دما و ویژگی‌های طراحی شهری مؤثر بر آن، دارای لکه‌های سرد یکپارچه می‌باشند. از ویژگی‌های طراحی شهری این مناطق می‌توان به تراکم بالای شهری، سهم بالای فضای ساخته‌شده و کم بودن لکه‌های طبیعی اشاره کرد. وجود سطح وسیعی از فضاهای سبز و باز شامل دریاچه‌ها، جنگل‌های دست کاشت و نیز چمن‌زارها که به‌عنوان رکن اصلی عرضه خدمت اکوسیستمی تعدیل دما شناخته می‌شوند، موجب تراکم لکه‌های داغ در مناطق ۲۲ و ۴ شده‌اند. این موضوع در پژوهش Zuo et al. (2019) نیز مورد توجه قرار گرفته است، به‌طوری‌که وجود فضاهای سبز بزرگ و منظم خنک‌کنندگی بیشتری نسبت به فضاهای کوچک و نامنظم دارند.

مناطق شمالی تهران شامل مناطق ۱، ۲ و ۵ به دلیل قرارگیری در ارتفاعات و دمای پایین، دارای تبخیر و تعرق مرجع پایینی هستند. این مناطق به دلیل وجود روددره‌ها، آبراهه‌های طبیعی، فضاهای سبز وسیع و بافت مسکونی ویلایی همواره دمای کمتری را تجربه می‌کنند. اثری که اکوسیستم مناطق شمالی بر مناطق هم‌جوار نظیر منطقه ۳ دارند، به وضوح قابل‌رؤیت است. دلیل این امر نیز ارتفاع کم ساختمان‌ها، وجود کریدورهای طبیعی بین لکه‌های طبیعی و پیوستگی فضاهای سبز می‌باشد که موجب شده است اثر تعدیل دما همواره به مناطق مجاور نیز نفوذ کند.

درنهایت، بر اساس Ronchi et al. (2020) ابعاد فضاهای سبز برای تضمین آب‌وهوا بسیار مهم و مستلزم تغییر در برنامه‌ریزی سنتی است. بنابراین، اتخاذ رویکرد مبتنی بر خدمات اکوسیستمی اجازه می‌دهد تا بر سیستم استانداردهای برنامه‌ریزی سنتی غلبه کرده و امکان ادغام ملاحظات خدمات اکوسیستمی در فرآیند برنامه‌ریزی فراهم شود.

سیاست‌ها و پروژه‌های پیشنهادی همسو با پراکنش خدمات اکوسیستم در مناطق شهر تهران پرداخت.

سیاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از حمایت‌های دانشگاه گیلان جهت فراهم‌سازی امکان پژوهش در این زمینه تشکر و قدردانی به عمل آورند.

پی‌نوشت‌ها

- ¹ Heat Island
- ² Luke Howard
- ³ Provisioning Services
- ⁴ Regulating Services
- ⁵ Supporting Services
- ⁶ Cultural Services
- ⁷ Ecosystem Services
- ⁸ Nature-Based Solutions
- ⁹ Performance-Based Planning
- ¹⁰ Cooling Capacity
- ¹¹ Urban Cooling Island
- ¹² Urban heat Island
- ¹³ Nature Infrastructure
- ¹⁴ Salience
- ¹⁵ Credibility
- ¹⁶ Legitimacy
- ¹⁷ Accessibility
- ¹⁸ Urban Cooling Model
- ¹⁹ InVEST User's Guide (2024): https://invest-userguide.readthedocs.io/_/downloads/en/3.8.3/pdf/
- ²⁰ Land Use/ Land Cover
- ²¹ Mantis and FAO method

^{۲۲} هات‌اسپات خدمات اکوسیستمی به هر منطقه (واحد) جغرافیایی دارای ارزش بالا (عرضه خدمات اکوسیستمی) گفته می‌شود. اما کلد اسپات به مناطقی اطلاق می‌شود که کمترین میزان خدمات اکوسیستمی را دارد. داشتن میزان عرضه بالا کافی نمی‌باشد. برای اینکه یک عارضه، هات‌اسپات تلقی شود و از نظر آماری معنادار نیز باشد، هم خودش و هم عوارضی که در همسایگی‌اش قرار دارند، باید دارای مقادیر بالا باشند. این آماره مقادیر مربوط به عوارض مکانی زیاد یا کم که به‌صورت خوشه‌های داغ یا سرد تجمع یافته‌اند را نشان می‌دهد. برای اینکه یک سلول یا عارضه لکه داغ یا سرد معنی‌دار تلقی شود، باید خود و عوارضی که در همسایگی‌اش قرار دارد داغ یا سرد باشد تا از نظر آماری معنی‌دار باشد.

References

Adhikari, K. and Alfred, E., 2016. Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, 262. Elsevier B.V: 101–111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>.

شهرداری باید امکانات مورد نیاز برای انجام این پیشنهادات را فراهم کند. جلوگیری از ازدحام وسایل نقلیه شخصی در مناطق مرکزی نیز می‌تواند کمک‌کننده باشد. مسیرهای سبز راه‌حل دیگری است که دولت می‌تواند انجام دهد و نه تنها به تنظیم دما و کاهش جزایر گرمایی کمک می‌کند، بلکه کیفیت بصری شهر را از نظر زیبایی‌شناختی افزایش می‌دهد.

این رویکردها را می‌توان در مناطقی مانند منطقه ۲۲ در نظر گرفت که بالاترین سطح خدمت تنظیم دما را دارد. در سال‌های اخیر، در این منطقه ساخت‌وسازهای فراوانی انجام شده است که تأثیر منفی بر خدمات اکوسیستم خنک‌کننده شهری خواهد داشت. پیشگیری از تبدیل این منطقه به یک منطقه مشکل‌ساز نیاز به آینده‌نگری دارد و بررسی این موضوع در برنامه‌ریزی شهری و طراحی راهکارهای حفاظت از خدمات اکوسیستمی ضروری است. پیش‌بینی زمین‌های باز و پارک‌ها و حفظ آن‌ها راه‌حلی مؤثر و درعین‌حال ساده خواهد بود.

در پایان باید بیان کرد که لزوم تدبیر و ارائه راهکارهای مؤثر بر حفظ خدمات اکوسیستمی و افزایش پوشش گیاهی و لکه‌های سبز پیوسته جهت کنترل دمای کلان‌شهرها همچون شهر تهران حائز اهمیت است. گنجاندن کامل پارامترهای مربوط به کیفیت هوا در طراحی و ارزیابی سیاست‌های مربوط به تعدیل دما، نتایج بهتری را خواهد داشت.

پژوهش حاضر می‌تواند بعنوان راهنمایی برای تحقیقات بعدی جهت بررسی رویکردهای طراحی شهری در مناطق مختلف تهران و تأثیر آن‌ها بر پراکنش جزایر گرمایی باشد. همچنین، در ادامه پژوهش حاضر و با توجه به نتایج بدست‌آمده، می‌توان در پژوهش آتی به ارائه سناریوهای توسعه،

منابع

Baker, J., Sheate, W.R., Phillips, P., and Eales, R., 2013. Ecosystem services in environmental assessment — Help or hindrance? *Environmental Impact Assessment Review*, Volume 40, Pages 3-13.

<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.11.004>.

Bosch, M., Locatelli, M., Hamel, P., Remme, R., Chenal, J., and Stéphane J., 2021. A spatially explicit approach to simulate urban heat mitigation with InVEST. *Geosci. Model Development*, 14. Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union: 3521–3537. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3521-2021>.

Botham, M. D., Recktenwald, G. W., and David J. S., 2015. Thermal footprint effect of rooftop urban cooling strategies. Portland State University, made available under the Elsevier user license. <http://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0>.

Bratman, G., Anderson, C., Berman, M., Cochran, B., Vries, S., Flanders, J., Folke, C., Frumkin, H., Gross, J., Hartig, T., Kahn, P., Kuo, M., Lawler, J., Levin, P., Lindahl, T., Meyer, A., Mitchell, R., Ouyang, Z., Roe, J., Scarlett, L., Smith, J., Bosch, M., Wheeler, B., White, M., Zheng, H., and Gretchen C., 2019. Nature and mental health: An ecosystem service perspective. *Science Advances* (5) eaax0903, Social ScienceS. <https://www.science.org> on December 21.

Chen, S., Yu, Z., Liu, M., Da, L., Faiz Ul Hassan, M., 2021. Trends of the contributions of biophysical (climate) and socioeconomic elements to regional heat islands. *Sci. Rep.* 11, 12696. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92271-3>.

Debbage, N., and Shepherd, M., 2015. The urban heat island effect and city contiguity. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54. Elsevier Ltd: 181–194. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.08.002>.

Elmqvist, T., Setälä, H., Handel, S.N., van der Ploeg, S., Aronson, J., Blignaut, J.N., Go mez-Baggethun, E., Nowak, D.J., Kronenberg, J., and Groot, R., 2015. Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14. Elsevier B.V: 101–108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2015.05.001>.

Geneletti, D., 2012. Integrating Ecosystem Services in Land Use Planning: Concepts and Applications. *Journal of Working Papers Center for International Development at Harvard University*. <http://www.hks.harvard.edu/centers/cid/publication/s/research-fellow-graduate-student-working-papers/cid-research-fellow-and-graduate-student-working-paper-no.-54>.

Ghosh, S., and Das, A., 2018. Modelling urban cooling island impact of green space and water bodies on surface urban heat island in a continuously developing urban area. *Modeling Earth Systems and Environment*. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0456-7>.

Grizzetti, B., Lanzanova, D., Lique, C., Reynaud,

A., and Cardoso, A.C., 2016. Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environmental Science & Policy*, 61. Elsevier Ltd: 194–203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.008>.

Gunawardena, K.R., Wells, M.J., and Kershaw, T., 2017. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*, 584. Elsevier B.V: 1040–1055. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>.

Hamel, P., Bosch, M., Tardieu, L., Lemonsu, A., Munck, C., Nootenboom, C.H., Viguié, V., Lonsdorf, E., Douglass, J., and Sharp, R., 2023. Calibrating and validating the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) urban cooling model: case studies in France and the United States. *Geoscientific Model Development*, 17, 4755–4771. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-4755-2024>.

Hamel, P., Guerry, A. D., Polasky, S., Han, B., Douglass, J. A., Hamann, M., Janke, B., Kuiper, J. J., Levrel, H., Liu, H., Lonsdorf, E., McDonald, R. I., Nootenboom, C., Ouyang, Z., Remme, R. P., Sharp, R. P., Tardieu, L., Viguié, V., Xu, D., Zheng, H., and Daily, G. C., 2021. Mapping the benefits of nature in cities with the InVES software. *npj Urban Sustainability*, Published in partnership with RMIT University (25) 1-10. <https://doi.org/10.1038/s42949-021-00027-9>.

Harirforoush, H., and Bellalite, L., 2019. A new integrated GIS-based analysis to detect hotspots: A case study of the city of Sherbrooke. *National Library of Medicine, National center for biotechnology information*, 130. Elsevier Ltd: 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.08.015>.

Herischian, M., Mahmoudzadeh, H., and Ghorbani, R., 2024. Investigating the Effect of the Cooling Ecosystem Service of Urban Green Infrastructure on the Mitigating of Environmental Heat Load and Energy Efficiency in Tabriz Metropolitan. *Geographical Urban Planning Research Quarterly*, 11 (4), 175-203. <http://doi.org/10.22059/JURBANGEO.2024.363482.1850>.

He, B. J., 2018. Potentials of meteorological characteristics and synoptic conditions to mitigate urban heat island effects. *Urban Climate*, 24. Elsevier B.V: 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.01.004>.

Helming, K., Diehl, K., Geneletti, D., and Wiggering, H., 2013. Mainstreaming ecosystem services in European policy impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, Volume 40, Pages 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.01.004>.

Hongyu, D., Xuejun, S., Hong, J., Zenghui, K., Zhibao, W., and Cai, Y., 2016. Research on the cooling island effects of water body: A case study of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 67. Elsevier Ltd: 31–38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind>.

2016.02.040.

Hu, Y., Wang, CH., and Li, J., 2023. Assessment of Heat Mitigation Services Provided by Blue and Green Spaces: An Application of the InVEST Urban Cooling Model with Scenario Analysis in Wuhan, China. *Land*, 12, 963, 1-21. <https://doi.org/10.3390/land12050963>.

Karina, A., Elspeth, G., Nicole, K., and Anjelica, P., 2020. Sacramento Urban Development; Quantifying and Mapping Urban Heat to Support Urban Planning Initiatives in Sacramento, California. NASA DEVELOP National Program Virginia – Langley, Development Technical Report, and Final Draft- November 19.

Keshtkar, M., Heidari, H., Moazzeni, N., and Hossein, A., 2021. Analysis of changes in air pollution quality and impact of COVID 19 on environmental health in Iran: application of interpolation models and spatial autocorrelation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29. Springer-Verlag GmbH: 38505-38526. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17955-9>.

Kraemer, R., and Kabisch, N., 2022. Parks under stress: air temperature regulation of urban green spaces under conditions of drought and summer heat. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 849965. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.849965>.

Kosmus, M., Renner, I., and Silvia U., 2012. Integrating Ecosystem Services into Development Planning. *Environment and Climate Change*, A cooperation of Programme Implementing the Biodiversity Convention on behalf of the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ) and Future Innovation Project Biodiversity and Ecosystem Services.

Kunapo, J., Fletcher, T. D., Ladson, A. R., Cunningham, L., and Burns, M. J., 2018. A spatially explicit framework for climate adaptation. *Urban Water Journal*, 15(2), 159-166. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1424216>.

McDonald, R. I., Kroeger, T., Boucher, T., Wang, L., & Salem, R., 2016. Planting Healthy Air: A global analysis of the role of urban trees in addressing particulate matter pollution and extreme heat. The Nature Conservancy, Arlington, Virginia, USA.

Mohajerani, A., Bakaric, J., and Tristan J.B., 2018. The Urban Heat Island Effect, its Causes, and Mitigation, with Reference to the Thermal Properties of Asphalt Concrete. <https://www.researchgate.net/publication/323249649>.

Notte, A., D'Amato, D., Mäkinen, H., Paracchini, M., Liqueste, C., Egoh, B., Geneletti, D., and Neville, D. C., 2017. Ecosystem services classification: A systems ecology perspective of the cascade framework. *Ecological Indicators*, 74. Elsevier Ltd: 392-402. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016>.

11.030.

Phelan, P. E., Kaloush, K., Miner, M., Golden, J., Phelan, B., Iii, H. S., and Taylor, R. A., 2015. Urban Heat Island: Mechanisms, Implications, and Possible Remedies. *Annual Review of Environment and Resources*, 285-309. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021155>.

Qiu, K., and Baoquan, J., 2019. The roles of landscape both inside the park and the surroundings in park cooling effect. *Journal Pre-proof*, Published by Elsevier (19), 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101864>.

Ren, Z., Zhao, H., Fu, Y., and Xiao, L., 2021. Effects of urban street trees on human thermal comfort and physiological indices: a case study in Changchun city, China. *Journal of forestry research* 2022 v.33 no.3 pp. 911-922. DOI: 10.1007/s11676-021-01361-5.

Ren, Z., Fu, Y., Dong, Y., Zhang, P., and He, X., 2022. Rapid urbanization and climate change significantly contribute to worsening urban human thermal comfort: A national 183-city, 26-year study in China. *Urban Climate*, Volume 43, 101154. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101154>.

Ronchi, S., Salata, S., and Arcidiacono, A., 2020. Which urban design parameters provide climate-proof cities? An application of the Urban Cooling InVEST Model in the city of Milan comparing historical planning morphologies. *Sustainable Cities and Society*, 63. Elsevier Ltd: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102459>.

Ruhl, J.B, Kraft, S., and Christopher, L., 2008. The Law and Policy of Ecosystem Services. *Journal of Island Press*. <https://www.researchgate.net/publication/40777463>.

Shamsipour, A., Mahforuzi, M., and Hosseinpour, Z., 2013. Analyzing the spatial changes of the core of Tehran heat island. *Natural geography researches* 44, vol 3 (81) 127-146. (In Persian)

Solecki, W., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J., and Wiencke, M., 2005. Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Environmental Hazards*, 6. Elsevier Ltd: 39-49. doi:10.1016/j.hazards.2004.12.002.

Taleghani, M., Swan, W., Johansson, E., and Yingchun J., 2021. Urban cooling: Which façade orientation has the most impact on a microclimate? *Sustainable Cities and Society*, 64. Elsevier Ltd: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102547>.

Vaughn, C., 2017. Ecosystem services provided by freshwater mussels. *Hydrobiologia*, Springer International Publishing Switzerland, 1-13. DOI 10.1007/s10750-017-3139-x.

Wang, C., Ren, Z., Dong, Y., Zhang, P., Guo, Y., wang, W., and Guangdao B., 2022. Efficient cooling

of cities at global scale using urban green space to mitigate urban heat island effects in different climatic regions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74. Elsevier GmbH: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127635>.

Wang, C., Ren, Z., Chang, X., Wang, G., Hong, X., Dong, Y., Guo, Y., Zhang, P., Ma, Z., and Wang, W., 2023. Understanding the cooling capacity and its potential drivers in urban forests at the single tree and cluster scales. *Sustainable Cities and Society*, 93 (104531), <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104531>.

Yang, L., Qian, F., Song, D.X., and Zheng, K.J., 2016. Research on Urban Heat-island Effect. 4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island (UHI). *Procedia Engineering*, 169. Elsevier Ltd: 11 – 18. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>.

Yang, J., Yang, J., Xing, D., Luo, X., Lu, S., Huang, C., Hahs, A.K., 2020. Impacts of the remnant sizes, forest types, and landscape patterns of surrounding areas on woody plant diversity of urban remnant forest patches. *Urban Ecosyst.* 24, 345–354. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-01040-z>.

Yu, Z., Yang, G., Zuo, S., Jørgensen, G., and Koga, M., 2020. Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: A thresholdsize perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, 49. Elsevier GmbH: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126630>.

Zardo, L., Geneletti, D., Prez-soba, M., and Eupen, M., 2017. Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning. *Ecosystem Services*, 26. Elsevier Ltd: 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.016>

Zhou, W., Shen, X., Cao, F., and Yuan, S., 2019. Effects of Area and Shape of Greenspace on Urban Cooling in Nanjing, China. *Urban Plann Development*, 145(4): 1-9. 10.1061/ (ASCE) UP.1943-5444.0000520.

