



University of Tehran Press

Town & Country Planning

Home Page: <https://jtcp@ut.ac.ir>

Online ISSN: 2423-6268

Unraveling the Effectiveness of Nature-based Solutions in Mitigating Urban Heat Island Intensity

Bahman Veisi Nabikandi¹ | Faeze Shoja^{2*}

1. Department of Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: bahmanveisi19@gmail.com

2. Corresponding author, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: faeze.shoja@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received December 17, 2024

Revised February 23, 2025

Accepted March 01, 2025

Published online March 19, 2025

Keywords:

Heat mitigation index,
Land use/land cover,
Nature-based solutions,
Urban cooling model,
Urban heat island.

ABSTRACT

The rapid pace of urbanization has significantly altered land use/land cover (LULC) patterns, replacing natural landscapes with impervious surfaces and thereby intensifying the urban heat island (UHI) effect. This study evaluates the effectiveness of nature-based solutions (NBS) in mitigating UHI intensity in Qaem Shahr, Iran, by integrating remote sensing data and the InVEST-Urban Cooling Model (UCM). LULC maps for 2003, 2013, and 2023 were derived from Landsat imagery, while projections for 2033 were modeled under business-as-usual (BAU) and NBS scenarios using the CA-Markov model. The UCM was employed to analyze spatial changes in the Heat Mitigation Index (HMI), considering the biophysical attributes of urban green and blue spaces, such as shade, evapotranspiration, and albedo. Results revealed significant decreases in tree cover (15.2 km²) and water bodies (3.8 km²) from 2003 to 2013, alongside expansions in agricultural land (55.5 km²) and human settlements (26.3 km²). By 2023, only 67% of the region maintained a high cooling capacity (CC > 0.9), compared to 91% in 2003. Future projections indicate a 23% reduction in cooling capacity under BAU, even with NBS implementation. Tree cover demonstrated the highest cooling potential, reducing UHI intensity by 3.32°C on average, followed by grasslands at 3.21°C. The findings of this study emphasize the importance of implementing NBS strategies, such as the expansion of urban vegetation, the use of green roofs and walls, in mitigating the effects of urban heat islands and achieving sustainable urban development.

Cite this article: Veisi Nabikandi, B. & Shoja, F. (2024-25). Unraveling the Effectiveness of Nature-based Solutions in Mitigating Urban Heat Island Intensity. *Town and Country Planning*.16 (2), 343-361. <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.387194.670487>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.387194.670487>



واکاوی اثربخشی راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت در کاهش شدت جزیره گرمایی شهری

بهمن ویسی نیکدی^۱ | فائزه شجاع^{۲*}

۱. گروه مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: bahmanveisi19@gmail.com
 ۲. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: faeze.shoja@yahoo.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

کلیدواژه:

جزیره گرمایی شهری، راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت، ظرفیت خنک‌کنندگی، کاربری و پوشش اراضی، مدل سرمایه‌های شهری.

روند سریع شهرنشینی به طور قابل توجهی الگوهای کاربری و پوشش اراضی (LULC) را تغییر داده و با جایگزینی مناظر طبیعی، با سطوح نفوذناپذیر، شدت اثر جزیره گرمایی شهری (UHI) را افزایش داده است. این مطالعه اثربخشی راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت (NBS) را در کاهش شدت UHI در شهر قائم‌شهر ایران با استفاده از داده‌های دورسنجی و مدل سرمایه‌های شهری (UCM) InVEST (UCM) ارزیابی می‌کند. نقشه‌های LULC برای سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۱۳، و ۲۰۲۳ از تصاویر ماهواره‌ای لندست استخراج و پیش‌بینی‌های سال ۲۰۳۳ تحت سناریوهای توسعه پایه (BAU) و مبتنی بر طبیعت (NBS) با استفاده از مدل CA-Markov انجام شد. مدل UCM برای تحلیل تغییرات مکانی شاخص کاهش گرما (HMI) با در نظر گرفتن ویژگی‌های زیست‌فیزیکی فضاهای سبز و آبی شهری مانند سایه، تبخیر-تعرق، و بازتاب به کار گرفته شد. نتایج نشان داد از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ پوشش درختی (۱۵/۲ کیلومتر مربع) و پهنه‌های آبی (۳/۸ کیلومتر مربع) به طور قابل توجهی کاهش یافته؛ درحالی‌که اراضی کشاورزی (۵۵/۵ کیلومتر مربع) و ساخت‌وسازهای انسانی (۲۶/۳ کیلومتر مربع) افزایش داشته‌اند. تا سال ۲۰۲۳ تنها ۶۷ درصد منطقه دارای ظرفیت خنک‌کنندگی بالا ($CC > 0.9$) بود؛ درحالی‌که این مقدار در سال ۲۰۰۳ حدود ۹۱ درصد بود. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد حتی با اجرای NBS، در سناریوی BAU، ظرفیت خنک‌کنندگی منطقه تا سال ۲۰۳۳ حدود ۳۳ درصد کاهش خواهد یافت. بیشترین اثر خنک‌سازی متعلق به پوشش درختی با کاهش میانگین دمای ۳/۳۲ درجه سانتی‌گراد بود و مراتع با کاهش ۳/۲۱ درجه در رتبه بعدی قرار گرفتند. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت اجرای راهکارهای NBS مانند توسعه پوشش گیاهی شهری و استفاده از بام‌ها و دیوارهای سبز در کاهش اثر جزیره گرمایی شهری و دستیابی به توسعه شهری پایدار تأکید دارد.

استناد: ویسی نیکدی، بهمن و شجاع، فائزه (۱۴۰۳). واکاوی اثربخشی راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت در کاهش شدت جزیره گرمایی شهری. *آمایش سرزمین*، ۱۶ (۲) ۳۴۳-۳۶۱. <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.387194.670487>



بیان مسئله

در دهه‌های اخیر، گرمایش جهانی، گسترش بی‌رویه شهرنشینی، رشد جمعیت، و کاهش فضاها سبز-آبی منجر به افزایش مداوم دمای سطح زمین^۱ (LST) شده است که این مسئله موجب بروز برخی مسائل مرتبط با محیط گرمایی شهری می‌شود (Qiu et al., 2023). بر اساس گزارش «شهرهای جهان ۲۰۲۲»: چشم‌اندازی برای آینده شهرها^۲، نرخ شهرنشینی از ۵۶ درصد در سال ۲۰۲۱ به ۶۸ درصد تا سال ۲۰۵۰ افزایش خواهد یافت و جمعیت شهری جهان تا این سال به میزان ۲/۲ میلیارد نفر گسترش پیدا می‌کند (WHO, 2023). در چنین فرایند شهرنشینی مستمر و سریعی، مناظر فیزیکی مانند توده‌های آبی و پوشش گیاهی با سطوح ناصاف مصنوعی و آلودگی پایین جایگزین می‌شوند و پدیده جزیره گرمایی شهری^۳ (UHI) به یک مسئله زیست‌محیطی جدی در سراسر شهرهای جهان تبدیل می‌شود (Yue et al., 2019; Wu et al., 2019). UHI یکی از مهم‌ترین پارامترهای متأثر از کاربری اراضی/پوشش زمین^۴ (LULC) در مناطق شهری شناخته می‌شود (Singh et al., 2017). شدت UHI به وضعیت پوشش گیاهی، آب، مناطق ساخته‌شده، و تغییرات آن‌ها در طول زمان بستگی دارد. تحقیقات نشان می‌دهد تغییرات طبیعی یا انسانی در الگوی کاربری زمین می‌تواند دمای سطح و اتمسفر را چندین درجه در مقایسه با محیط توسعه‌نیافته مجاور افزایش دهد (Sultana & Satyanarayana, 2020). این افزایش دما ناشی از UHI به‌ویژه در ترکیب با تغییر اقلیم و رویدادهای شدید مانند خشک سالی و امواج گرما به طور قابل توجهی خطر مرگ و میر و ابتلا به بیماری‌های مرتبط با گرما را تشدید خواهد کرد. افزون بر این، گسترش تقاضا برای سیستم‌های خنک‌کننده و تهویه هوا به منظور بهبود آسایش حرارتی در مناطق شهری به دلیل پدیده UHI سبب افزایش مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، و آلودگی هوا می‌شود. بنابراین، نظارت مستمر و ارزیابی دقیق UHI به عنوان یک ضرورت اساسی در مدیریت شهری مطرح است تا از یک سو پایداری زیست‌محیطی را تضمین کند و از سوی دیگر کیفیت زندگی شهروندان را ارتقا دهد (Diem et al., 2023; Yadav et al., 2023).

اکوسیستم شهری یکی از اصلی‌ترین مکان‌ها جهت ایجاد پیوند بین انسان و طبیعت است که به عنوان مرکز تقاضای عظیم برای دریافت خدمات اکوسیستمی^۴ نیز معرفی می‌شود. در واقع، شهرها مناظر بسیار مدیریت‌شده‌ای هستند که برای تاب‌آوری شهری و سازگاری با تغییر اقلیم نیاز به خدمات اکوسیستم دارند (Haque & Sharifi, 2024). به همین دلیل در سال‌های اخیر محققان و برنامه‌ریزان شهری به دنبال راهکارهایی جهت تلفیق محیط‌های مصنوعی و طبیعی بوده‌اند تا هم کیفیت زندگی شهری را بهبود بخشند و هم پایداری محیط زیست را افزایش دهند. امروزه راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت^۵ (NBS) به عنوان رویکردهای نوآورانه و پایدار در مدیریت شهری به طور فزاینده مورد توجه قرار گرفته‌اند. این راهکارها که از فرایندهای طبیعی الهام می‌گیرند پتانسیل بالایی در کاهش اثر نامطلوب توسعه شهری، از جمله UHI، دارند. مثلاً، ایجاد فضاها سبز شهری، احیای تالاب‌ها، و استفاده از پوشش گیاهی بومی می‌تواند به طور قابل توجهی دمای هوا را کاهش دهد و کیفیت زندگی شهروندان را بهبود بخشد. با توجه به افزایش جمعیت شهری و تغییرات اقلیمی، اهمیت NBS در ایجاد شهرهای پایدار و تاب‌آور بیش از پیش احساس می‌شود (Abdulateef & Al-Alwan, 2022; Hayes et al., 2022). در عصر حاضر، بیش از نیمی از جمعیت جهان در مناطق شهری سکونت دارند و روند رو به رشد شهرنشینی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، مانند ایران، چالش‌های متعددی را در زمینه‌های اجتماعی، اقتصادی، و زیست‌محیطی ایجاد کرده است (Veisi Nabikandi et al., 2024). قائم‌شهر در استان مازندران یکی از واضح‌ترین این نمونه‌ها است. زیرا اکوسیستم‌های طبیعی شهری و پیراشهری همچون پوشش‌های گیاهی و پهنه‌های آبی متأثر از افزایش فعالیت‌های انسانی و تغییر کاربری دچار تخریب شده و ساخت‌وسازهای انسانی افزایش یافته است (Sadat et al., 2020). در چنین شرایطی، نظارت بر تغییرات LULC و ارزیابی اثر آن بر خدمات اکوسیستمی در این مناطق گامی ضروری در جهت اتخاذ تصمیمات مدیریتی مؤثر و پایدار است.

1. Land Surface Temperature
2. Urban Heat Island
3. Land Use/Land Cover
4. Ecosystem Services
5. Nature-based Solutions

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

جهت نظارت بر تغییرات LULC، داده‌های دورسنجی^۱ (RS) و تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲ (GIS) چندین دهه ابزاری کارآمد در استفاده از زمین و مدیریت منابع طبیعی شناخته می‌شدند. RS تصاویر ماهواره‌ای با وضوح طیفی، زمانی، و مکانی بالا فراهم می‌کند که تشخیص تغییرات سطح زمین را در زمان کمتر با هزینه‌ای پایین‌تر نسبت به روش‌های سنتی ممکن می‌سازد (Koko et al., 2020) و کاربردهای متعددی در برنامه‌ریزی شهری، کشاورزی، مدیریت منابع طبیعی، و نقشه‌برداری کاربری اراضی دارد. با این حال، تحلیل داده‌های RS به دلیل بزرگی، پیچیدگی، و نیاز به ابزارها و دانش تخصصی تاکنون نسبتاً دشوار و پیچیده بوده است. امروزه سامانه مبتنی بر وب و برنامه‌نویسی گوگل ارث انجین^۳ (GEE) ابزاری قدرتمند برای تحلیل داده‌های مکانی است. GEE به کاربران امکان دسترسی به حجم عظیمی از تصاویر ماهواره‌ای و دیگر داده‌های مکانی از منابع مختلف را می‌دهد و به یکی از ابزارهای محبوب برای نقشه‌برداری کاربری اراضی تبدیل شده است (Patel et al., 2024).

برای درک بهتر تأثیرات LULC بر UHI و برنامه‌ریزی جهت کاهش آن ضرورت دارد از مدل‌سازی و سناریوهای آینده‌نگر بهره گرفته شود (Liang et al., 2021). مدل خودکار مارکوف (CA-Markov) به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند در این زمینه امکان پیش‌بینی تغییرات آتی LULC و ارزیابی اثر آن بر UHI را فراهم می‌آورد (El Haj et al., 2023); اصغری سراسکانرود و اصغرپور، ۱۴۰۳). از سوی دیگر، روش‌های بیوفیزیکی نظیر اندازه‌گیری دمای هوا، تحلیل تصاویر سنجنش از دور، و شبیه‌سازی‌های محیط گرمایی شهری ابزارهایی ارزشمند برای ارزیابی مستقیم تأثیر انواع مختلف کاربری اراضی بر UHI محسوب می‌شوند. با این حال، اجرای این روش‌ها نیازمند داده‌های دقیق و فراوانی است که در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، با محدودیت مواجه است (Zawadzka et al., 2021). در این راستا، مدل سرمایه‌گذاری شهری^۴ InVEST به عنوان یک ابزار کارآمد برای ارزیابی ظرفیت کاهش UHI توسط انواع مختلف کاربری اراضی مطرح شده است. InVEST، با ارائه مجموعه‌ای از مدل‌های خدمات اکوسیستمی، امکان ارزیابی کمی و کیفی خدمات اکوسیستمی مرتبط با تنظیم آب‌وهوا را فراهم می‌آورد.

اثر تغییرات LULC ناشی از گسترش شهرنشینی و افزایش فعالیت‌های انسانی بر UHI در مطالعات پژوهشگران متعدد در مناطق مختلف جهان، از جمله چین و هند و مالزی، مورد بررسی قرار گرفته است (Singh et al., 2017; Zhou & Chen, 2023; He et al., 2023; Rendana et al., 2018). مثلاً وانگ و همکارانش (۲۰۱۹) با تمرکز بر تغییرات فضایی-زمانی پوشش زمین و اثر UHI در یک مطالعه موردی در چین الگوی فضایی افزایش LST را تحت تأثیر تغییرات گسترده در پوشش زمین، به‌ویژه افزایش تراکم و توسعه عمودی ساختمان‌های موجود، تحلیل کردند. ماراندو^۵ و همکارانش (۲۰۲۲) با تأکید بر نقش زیرساخت‌های سبز^۶ (UGI) شهری در کاهش اثر UHI و افزایش تاب‌آوری یک مدل خدمات اکوسیستمی برای تنظیم میکرواقلیم توسعه دادند و آن را در ۶۰۱ شهر اروپایی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد UGI به طور میانگین دمای شهرهای اروپایی را ۱/۰۷ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد و در برخی موارد این کاهش دما به ۲/۹ درجه سانتی‌گراد نیز می‌رسد. مطابق پژوهش ایشان برای دستیابی به کاهش ۱ درجه‌ای دمای شهری وجود حداقل ۱۶ درصد پوشش درختی در شهرها ضروری است. در همین راستا عبداللطیف^۷ و ال-الوان (۲۰۲۲) با ارزیابی اثربخشی UGI در کاهش اثر جزیره گرمایی سطحی در شهر بغداد بر اساس سناریوهای استفاده از مصالح خنک‌کننده و افزودن دارایی‌های سبز و آبی مختلف به کاربری‌های خاکستری (ساخته‌شده) نشان دادند این زیرساخت‌ها نقش مؤثری در کاهش دما بین ۴ تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد داشته است. دامنه و همکارانش (۲۰۲۴) نیز به تأثیر مستقیم تغییرات کاربری اراضی و کاهش پوشش گیاهی بر افزایش LST و تشدید پدیده UHI اشاره کردند. در مطالعه‌ای دیگر شجاع و همکارانش (۱۴۰۳) با ارزیابی زیرساخت‌های سبز-آبی در کلان‌شهر تهران و تأثیر آن بر UHI به این نتیجه رسیدند که پوشش درختان انبوه و پراکنده در منطقه قادر است تا ۲/۸۴ درجه سانتی‌گراد از اثر UHI را خنثی کند.

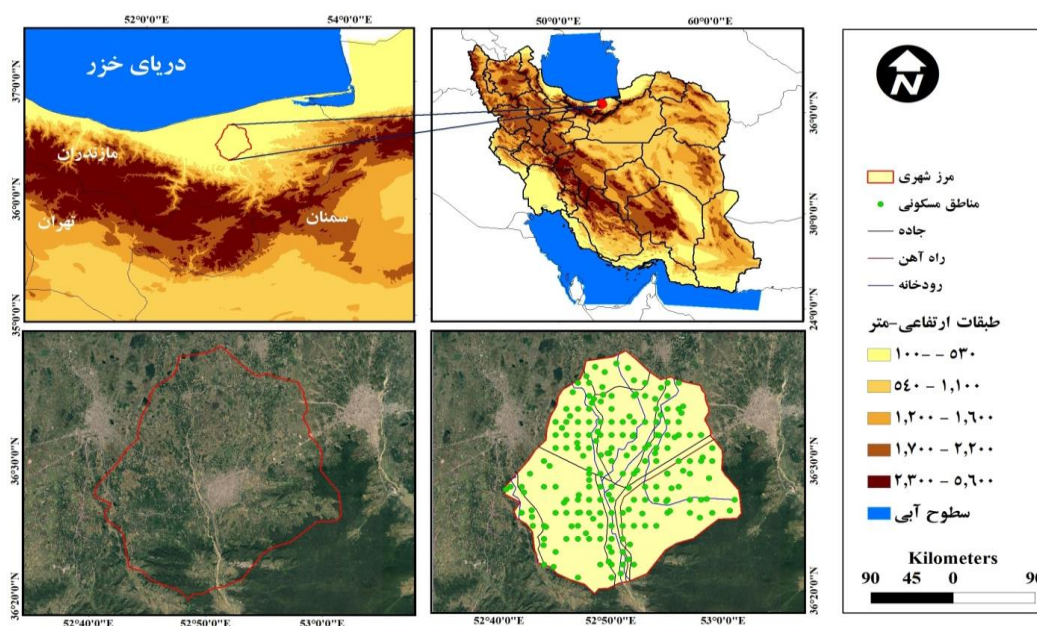
1. Remote Sensing
2. Geographic Information System
3. Google Earth Engine
4. Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs
5. Marando
6. Urban Green Infrastructure
7. Abdulateef

پژوهش حاضر در تمایز با مطالعات یادشده که عمدتاً به تحلیل تغییرات گذشته LULC و تأثیر آن بر UHI محدود شده‌اند، با رویکردی نوآورانه، به ارزیابی کارآمدی راهکارهای مبتنی بر طبیعت در کاهش شدت UHI می‌پردازد. این مهم از طریق تلفیق داده‌های سنجش از دور و مدل سرمایه‌گذاری شهری InVEST و با طراحی و مقایسه دو سناریوی توسعه، شامل سناریوی پیشنهادی با وضعیت پایه^۱ (BAU) و سناریوی NBS، محقق می‌شود. رویکرد حاضر، با ارائه تحلیل‌های آینده‌نگرانه و کاربردی، می‌تواند به عنوان مکملی برای پژوهش‌های داخلی، که عموماً بر تحلیل‌های توصیفی تمرکز دارند، مطرح شود و به غنای تحقیقات در این حوزه بیفزاید. به علاوه، این مطالعه با تمرکز بر شهر قائم‌شهر در شمال ایران تأثیرات محلی و منطقه‌ای تغییرات کاربری اراضی بر UHI را بررسی می‌کند و راهکارهای عملی و سیاست‌مدارانه برای مدیریت پایدار شهری ارائه می‌دهد.

با توجه به مباحث مطرح‌شده، اهداف اصلی مطالعه حاضر عبارت‌اند از: ۱. تولید نقشه‌های LULC با استفاده از پلتفرم GEE برای سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۱۳، ۲۰۲۳ و ارزیابی دقت آن‌ها؛ ۲. پیش‌بینی تغییرات LULC برای سال ۲۰۳۳ با کاربرد مدل CA-Markov تحت دو سناریوی BAU و NBS برای کل منطقه مورد مطالعه؛ ۳. ارزیابی کمی خدمت اکوسیستمی کاهش UHI در دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۳۳ با استفاده از مدل سرمایه‌گذاری شهری InVEST و مقایسه آن در دو سناریوی BAU و NBS.

محدوده مورد مطالعه

برای اجرا و ارزیابی تأثیر تغییرات LULC بر UHI در این تحقیق محدوده قائم‌شهر در استان مازندران با مساحت حدود ۶۷۷/۱۰ کیلومترمربع انتخاب شد (شکل ۱). قائم‌شهر یکی از مهم‌ترین شهرهای شمال ایران است که در مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. نرخ رشد جمعیت این شهر طی دوره ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵ معادل ۱۷/۲ درصد بوده است. رشد جمعیت مثبت در این منطقه در کنار توسعه فیزیکی شهر و تغییرات کاربری اراضی عمدتاً به واسطه وجود جنگل‌های هیرکانی، شرایط آب‌وهوایی مطلوب، سطح بالای آب‌های زیرزمینی، مناطق سرسبز، و مجاورت با دریای خزر است. این عوامل طبیعی و اقلیمی، به عنوان جاذبه‌هایی برای سکونت و فعالیت‌های اقتصادی، منجر به گسترش ساخت‌وسازهای غیر منظم، تشکیل سکونتگاه‌های غیر رسمی، و الحاق مناطق روستایی مجاور به شهر شده که در نهایت تراکم جمعیت و توسعه گسترده و متراکم شهری در دهه‌های اخیر را به دنبال داشته است (Kamran et al., 2020). عوامل یادشده مهم‌ترین دلایل انتخاب این منطقه برای انجام دادن مطالعه پیش رو هستند.

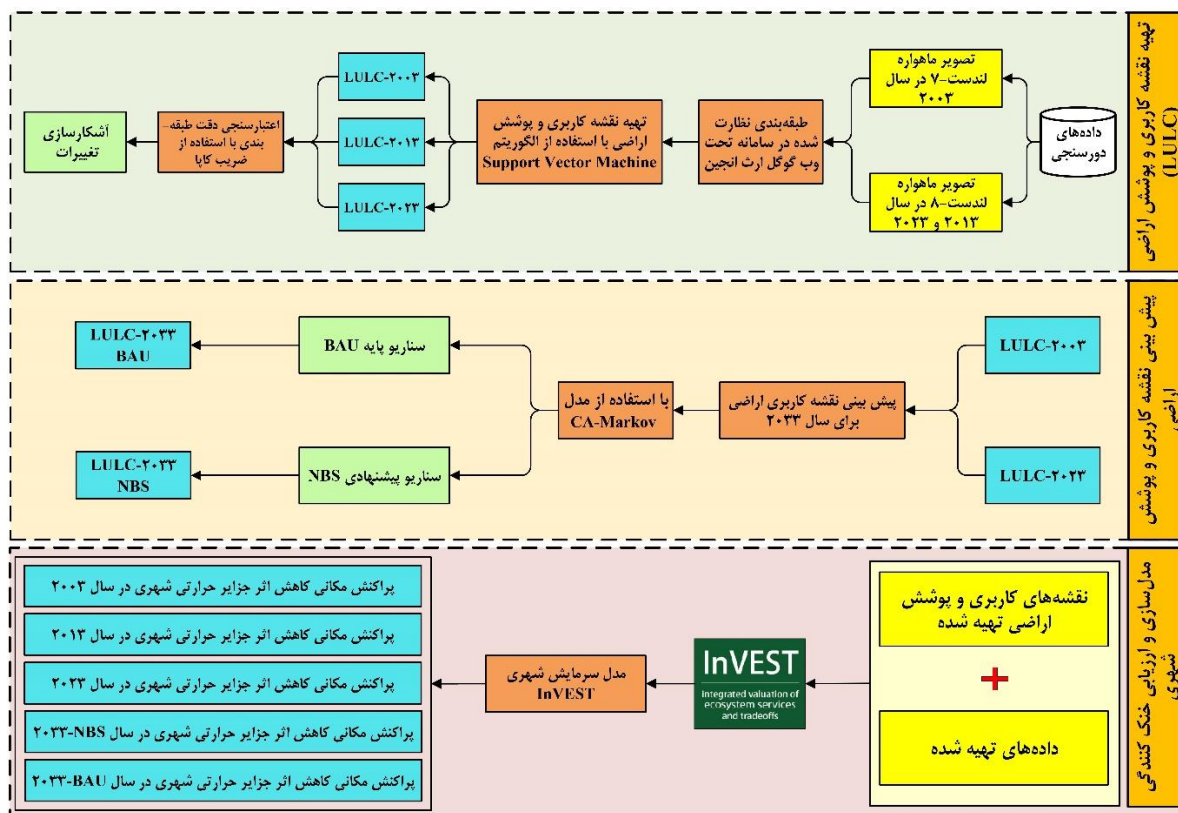


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

روش و ابزار تحقیق

مطالعه حاضر مبتنی بر یک رویکرد چندرشته‌ای انجام گرفته که جنبه‌های مختلف خدمات اکوسیستم (کاهش گرما)، اقلیم شهری، تغییرات کاربری اراضی / پوشش زمین، و سناریوهای آینده را به هم مرتبط می‌کند. به عبارت دیگر چارچوب تحقیق مطابق شکل ۲ از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

- تهیه نقشه LULC منطقه مطالعاتی: LULC مهم‌ترین ورودی مدل‌های مختلف InVEST محسوب می‌شود. بنابراین در گام نخست، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat در بستر GEE، نقشه LULC محدوده شهری قائم‌شهر در شمال ایران تهیه شد.
- شبیه‌سازی سناریوهای LULC در افق آینده: به منظور پیش‌بینی تغییرات آتی از مدل سلولی-مارکوف (CA-Markov) برای شبیه‌سازی LULC قائم‌شهر در سال ۲۰۳۳ تحت سناریوی پایه (BAU) و سناریوی مبتنی بر طبیعت (NBS) استفاده شد.
- محاسبه مدل سرمایه‌شهری InVEST (UCM^۱): در نهایت، با کاربرد مدل UCM تغییرات مکانی شاخص کاهش گرما^۲ (HMI) در منطقه مطالعاتی مورد ارزیابی قرار گرفت. شرح کامل روش‌های به‌کارگرفته‌شده در این پژوهش در زیربخش‌های بعدی ارائه می‌شود.



شکل ۲. چارچوب کلی و ساده‌شده تحقیق

داده‌های مورد استفاده در تحقیق

جهت انجام دادن این تحقیق، نخست نقشه‌های LULC منطقه مورد مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ برای سال ۲۰۰۳ و لندست ۸ برای سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ در محیط پلتفرم GEE به دست آمد. تصاویر یادشده در این سامانه پیش‌پردازش شده و

1. Urban Cooling Model
2. Heat Mitigation Index

دارای وضوح ۳۰ متری است. همچنین برای دقت بالاتر نقشه کاربری اراضی و وضوح بهتر پوشش گیاهی، تصاویر فصل تابستان که پوشش ابری کمتر از ۵ درصد را ارائه می‌کردند مورد استفاده قرار گرفت (ویسی‌نبی‌کندی و همکاران، ۱۴۰۳). نقشه ارتفاع منطقه مورد مطالعه نیز، که در شکل ۱ نشان داده شده است، از نسخه رایگان داده‌های ASTER GDEM با استفاده از وبسایت Vertex (<https://search.asf.alaska.edu>) با وضوح ۱۲/۵ متری تهیه شد. برای محاسبه مقادیر تبخیر-تعرق مرجع محدوده مطالعاتی نیز به عنوان یکی از ورودی‌های مورد نیاز مدل سرمایه‌شهری میانگین کمینه و بیشینه دمای هوا برای ۷ ایستگاه سینوپتیک واقع در حوضه مورد نظر طی دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. مشخصات ایستگاه‌های منتخب استفاده‌شده در پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در منطقه مطالعاتی

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (m)
بابلسر	۳۶/۷	۵۲/۶۴	-۲۱
پل سفید	۳۶/۱۳	۵۳/۰۸	۶۱۰
دشت ناز	۳۶/۶۴	۵۳/۲	۱۶/۷
ساری	۳۶/۵۴	۵۲/۹۹	۲۳
قراخیل	۳۶/۴۵	۵۲/۷۷	۱۴/۷
کیاسر	۳۶/۲۵	۵۳/۵۵	۱۲۹۴/۳

تهیه نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی در گوگل ارث انجین

در سال‌های اخیر با پیشرفت فناوری‌های نوین RS، ابزارهای جدیدی پدید آمده‌اند که می‌توانند حجم وسیعی از داده‌های مکانی را به سرعت و کارآمد پردازش کنند. GEE به عنوان یکی از این ابزارها یک سامانه تحت وب است که با فراهم کردن دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای و سایر داده‌های مکانی حوزه RS را متحول کرده است (Patel et al., 2024). در این تحقیق تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ پس از فراخوانی با استفاده از کد خط فرمان به صورت فضایی توسط شیپ فایل منطقه مورد مطالعه و در بازه زمانی تعیین شده به صورت مکانی و زمانی فیلتر شدند. برای هر سال نزدیک به ۵۰۰ نمونه جهت طبقه‌بندی پنج کلاس (ساخت‌وسازهای انسانی، پوشش درختی، کشاورزی، مرتع، و پهنه‌های آبی) به صورت نظارت‌شده برداشت شد. جدول ۲ خصوصیات بیشتری از هر یک از این کاربری‌ها را نشان می‌دهد. نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در GEE با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM) تهیه شدند. SVM به عنوان یکی از قدرتمندترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده شناخته می‌شود که بر پایه اصول آماری استوار است (Tamiminia et al., 2020).

جدول ۲. مشخصات هر یک از کاربری‌ها (USGS, 2022)

دسته‌بندی ویژگی‌ها	LULC
مناطق مسکونی شهری و روستایی، مناطق صنعتی، خیابان، و جاده‌ها	ساخت‌وسازهای انسانی
جنگل‌ها، درختچه‌ها، و باغات	پوشش‌های درختی
مزارع و دیگر زمین‌های زراعی	کشاورزی
چراگاه‌ها، علفزارها، و بوته‌زارها	مرتع
رودخانه، زمین آب، استخرهای پرورشی، و امکانات حفاظت از آب	پهنه‌های آبی

ارزیابی صحت فرایندی ضروری برای تعیین دقت و قابلیت اعتماد نتایج طبقه‌بندی است. این فرایند مستلزم مقایسه نقشه طبقه‌بندی‌شده با کلاس‌های واقعی است که در داده‌های حقیقی زمینی مانند گوگل ارث نشان داده شده است. این مقایسه یک ارزیابی دقیق از عملکرد طبقه‌بندی را با برجسته کردن مناطق درست و اشتباه بین دو مجموعه داده ارائه می‌کند. تعدادی از

مراحل همچون دقت کلی، دقت هر کاربری، و محاسبه ضریب کاپا در فرایند ارزیابی صحت دقت دخیل هستند. هر یک از این مراحل برای ارزیابی دقت نتایج طبقه‌بندی LULC ضروری است و اطلاعات روشنی در مورد عملکرد الگوریتم طبقه‌بندی ارائه می‌دهد (ویسی‌نبی‌کندی و شهبازی، ۱۴۰۳).

پیش‌بینی نقشه کاربری و پوشش اراضی برای سال ۲۰۳۳ تحت سناریوهای پایه و پیشنهادی

به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر تغییرات LULC بر UHI، در این پژوهش، نقشه‌های کاربری اراضی برای سال ۲۰۳۳ تحت دو سناریوی توسعه پایه و پیشنهادی با استفاده از مدل CA-Markov پیش‌بینی شد. Veisi Nabikandi و همکارانش (۲۰۲۴) نشان دادند که شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی ابزاری قدرتمند برای ارزیابی دقیق‌تر اثر بخشی سیاست‌ها و برنامه‌های مدیریتی در اکوسیستم‌ها فراهم می‌کند. مدل CA-Markov در نرم‌افزار TerrSet امکان ایجاد سناریوهای مختلفی را از طریق تغییر ماتریس احتمال انتقال و تصاویر ورودی ایجاد می‌کند. هدف از پیش‌بینی سناریوهای آینده در این تحقیق به حداقل رساندن تأثیر بالقوه LULC بر منطقه مورد مطالعه با بازیابی ظرفیت اکوسیستم‌ها است. در سناریوی BAU توزیع و پیش‌بینی کاربری اراضی در سال ۲۰۳۳ بر اساس وضعیت و روند موجود (دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳) است. در واقع در این سناریو هیچ‌گونه تغییر سیاستی یا مداخله‌ای در الگوهای کنونی کاربری اراضی در نظر گرفته نشده و صرفاً داده‌های موجود LULC منطقه مورد مطالعه به عنوان منای پیش‌بینی قرار گرفته‌اند. سناریوهای پایه به طور گسترده در مطالعات علوم زمین به عنوان نقطه مرجعی برای مقایسه با سناریوهای مداخله‌ای و ارزیابی اثر بخشی سیاست‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند (Beroho et al., 2023). به‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در حفاظت از محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی همچنان در حال تخریب هستند و بر تنوع زیستی و رفاه انسان تأثیر منفی می‌گذارند. در سال‌های اخیر، راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت به عنوان روشی نوین و مؤثر برای کاهش اثر تخریبی بر محیط زیست مورد توجه قرار گرفته است. این رویکرد با تقویت تعامل بین فضاها طبیعی و انسانی، به تحقق اهداف توسعه پایدار کمک شایانی می‌کند (Cohen-Shacham et al., 2019). به همین منظور در این پژوهش، با الهام از رویکردهای مبتنی بر طبیعت، سناریوی NBS به‌ویژه جنگل‌ها و مراتع توسعه یافته است. هدف از این سناریو حفظ کارکردهای اکولوژیکی این زیستگاه‌ها و ارتقای خدمات اکوسیستمی آن‌هاست.

سنجش خدمت اکوسیستمی خنک‌کنندگی شهری

InVEST یک نرم‌افزار مدل‌سازی مستقل است که مجموعه‌ای از ابزارها را برای نقشه‌برداری و ارزش‌گذاری اقتصادی کالاها و خدماتی که منابع طبیعی را تأمین می‌کنند در اختیار می‌گذارد. هدف نهایی این نرم‌افزار ارتقای درک ما از فوایدی است که طبیعت برای زندگی بشر به ارمغان می‌آورد. این ماژول از نقشه‌های رستری و برداری به عنوان ورودی اکوسیستم یا منطقه مورد مطالعه استفاده می‌کند و نتایج را در قالب کمیت‌های بیوفیزیکی یا ارزش‌های اقتصادی ارائه می‌دهد (محمدیاری، ۱۴۰۲). UCM یکی از ابزارهای InVEST است که شاخص تعدیل گرما را تحت تأثیر فضاها سبز و آبی شهری و با توجه به ویژگی‌های بیوفیزیکی تعریف شده برای هر طبقه کاربری اراضی بر اساس ضریب سایه، ضریب تبخیر- تعرق (ET)، و ضریب بازتاب (آلبدو) محاسبه می‌کند (Zardo et al., 2017).

ورودی‌های اصلی این مدل عبارت‌اند از:

- نقشه رستری کاربری اراضی / پوشش زمین (LULC)
- نقشه رستری تبخیر- تعرق مرجع
- جدول بیوفیزیکی حاوی اطلاعات مدل برای هر طبقه LULC: هر ردیف از جدول بیوفیزیکی نشان‌دهنده یک طبقه LULC و دارای ستون‌های زیر است:
- lucode: کد طبقه LULC به همان شکلی که در نقشه رستری نشان داده شده است.
- Shade (سایه): مقداری بین صفر و یک که نشان‌دهنده نسبت پوشش درختی در یک طبقه خاص LULC است.
- Kc: ضریب تبخیر- تعرق

- Albedo (آلبدو): مقداری بین صفر و یک که نشان‌دهنده نسبت بازتاب مستقیم تابش خورشیدی توسط طبقه کاربری اراضی و پوشش زمین است.
- Green_area مشخص می‌کند که آیا طبقه LULC مورد نظر باید به عنوان یک فضای سبز در نظر گرفته شود یا خیر.
- Building_intensity (حجم ساختمان): مقداری بین صفر و یک که نشان‌دهنده نسبت بین مساحت طبقات و مساحت زمین (برای شبیه‌سازی‌های شبانه) است.

شاخص ظرفیت خنک‌کنندگی استفاده‌شده در مدل InVEST بر پایه شاخص‌های پیشنهادشده توسط زاردو و همکارانش (۲۰۱۷) بنا شده که بر سایه و تبخیر- تعرق تمرکز دارند. مدل InVEST با افزودن یک عامل برای در نظر گرفتن آلبدو این شاخص‌ها را گسترش می‌دهد. بدین ترتیب، برای هر پیکسل (i) در نقشه رستری LULC شاخص ظرفیت خنک‌کنندگی با رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$CC_i = w_S \cdot S_i + w_{AL} \cdot AL_i + w_{ET} \cdot ET_i \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه S_i ، AL_i و ET_i به ترتیب مقادیر سایه درخت، آلبدو، و نرخ تبخیر- تعرق پیکسل i را نشان می‌دهند که در جدول بیوفیزیکی تعریف شده‌اند. همچنین w_S ، w_{AL} و w_{ET} وزن‌هایی هستند که به هر مؤلفه اختصاص داده می‌شوند. مقادیر S_i و AL_i بر اساس کلاس LULC پیکسل i از جدول بیوفیزیکی بازیابی می‌شوند. سایه درخت با روی هم قرار دادن ماسک باینری تاج‌پوش درختان با نقشه رستری پوشش اراضی محاسبه می‌شود، به گونه‌ای که برای هر طبقه LULC با کد k ضریب سایه S_k با میانگین نسبت تاج‌پوش در تمام پیکسل‌های LULC از کلاس k مطابقت دارد. به عبارت دیگر:

$$S_k = \frac{1}{|\Omega_k|} \sum_{j \in \Omega_k} x_j \quad \text{رابطه ۲}$$

در اینجا، Ω_k مجموعه پیکسل‌های ماسک پوشش تاج درخت است که موقعیت آن‌ها با کلاس k در نقشه رستری LULC مطابقت دارد. x_j نیز مقدار پیکسل j در ماسک پوشش تاج درخت است، به این معنا که اگر پیکسل j نشان‌دهنده درخت باشد، مقدار آن یک است و در غیر این صورت صفر در نظر گرفته می‌شود. ضرایب آلبدو در این مطالعه بر اساس طبقه‌بندی ناحیه آب‌وهوایی محلی توسط استوارت و اوک (۲۰۱۲) تعیین شده‌اند.

شاخص تبخیر- تعرق (ETI) به عنوان یک مقدار نرمال‌شده از تبخیر- تعرق بالقوه محاسبه می‌شود (رابطه ۳):

$$ETI = \frac{K_c \cdot ET_{ref}}{ET_{max}} \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه K_c بیانگر ضریب تبخیر- تعرق و ET_{ref} یک نقشه رستری از تبخیر- تعرق مرجع برای دوره و منطقه مورد مطالعه است. ET_{max} نیز حداکثر مقدار تبخیر- تعرق مشاهده‌شده در منطقه مورد نظر است.

به پیروی از توصیه‌های آلن و همکارانش (۱۹۹۸)، تبخیر- تعرق مرجع روزانه (ET_{ref}) بر حسب میلی‌متر بر روز برای هر پیکسل با استفاده از معادله هارگریوز (هارگریوز و سامانی، ۱۹۸۵) به صورت رابطه ۴ برآورد شد:

$$ET_{ref} = 0.0023 \cdot (T_{avg} + 17.8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5} \cdot R_a \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه ۴ T_{avg} ، T_{max} و T_{min} به ترتیب میانگین، حداکثر، و حداقل دمای هوا (بر حسب درجه سانتی‌گراد) را برای هر روز نشان می‌دهند. R_a نیز تشعشع فرازمینی (بر حسب میلی‌متر بر روز) است. تهیه رستر تبخیر و تعرق منطقه مورد مطالعه از طریق داده‌های هواشناسی مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی منطقه صورت گرفت. استفاده از این داده‌ها جهت ارزیابی دقیق‌تر مدل ضروری است و در مطالعات مشابه همچون شهر ناگپور هندوستان (Kadaverugu et al., 2021) و شهر ووهان چین (Hu et al., 2023) نیز استفاده شده است.

به منظور در نظر گرفتن اثر خنک‌کننده فضاهای سبز بزرگ شاخص ظرفیت خنک‌کنندگی محاسبه‌شده برای پیکسل‌هایی که بخشی از مناطق سبز بزرگ (< ۲ هکتار) هستند به شکل رابطه ۵ تعدیل می‌شود:

$$CC_i^{green} = \sum_{j \in \Omega_i} g_j \cdot CC_j \cdot e^{-\frac{d(i,j)}{d_{cool}}} \quad \text{رابطه ۵}$$

g_i در صورتی که پیکسل i یک فضای سبز باشد مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد (همان‌طور که در جدول بیوفیزیکی تعریف شده است)، $d(i, j)$ فاصله بین پیکسل‌های i و j است، d_{cool} به عنوان یک پارامتر فاصله‌ای را که یک فضای سبز بر روی آن اثر خنک‌کننده دارد تعریف می‌کند، و Ω_i مجموعه پیکسل‌هایی هستند که فاصله آن‌ها تا i کمتر از d_{cool} است. بدین ترتیب شاخص HMI به شرح رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$HM_i = \begin{cases} CC_i & \text{if } i \text{ is part of a large green area} \\ CC_i^{green} & \text{or } CC_i > CC_i^{green} \\ & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه ۶}$$

برای شبیه‌سازی توزیع مکانی دمای هوا (T_{air}) مدل به دو ورودی اضافی نیاز دارد. اولین ورودی دمای مرجع روستایی (T_{ref}) است که در آن اثر UHI مشاهده نمی‌شود، مانند مناطق حاشیه‌ای شهر. ورودی دوم، شدت اثر جزیره گرمایی شهری (UHI_{max}) است که نشان‌دهنده اختلاف بین دمای مرجع روستایی و حداکثر دمای هوای (T_{air}) مشاهده‌شده در مرکز شهر است. این دو پارامتر با HM_i ترکیب می‌شوند تا دمای هوا (T_i) برای هر پیکسل (i) از منطقه مورد مطالعه مطابق رابطه ۷ محاسبه شود:

$$T_i^{nomix} = T_{ref} + (1 - HM_i) \cdot UHI_{max} \quad \text{رابطه ۷}$$

در نهایت، مقادیر دمای هوا (T_{air}) برای هر پیکسل T_i^{nomix} با استفاده از یک تابع گاوسی با شعاع هسته (r) که توسط کاربر تعریف می‌شود میانگین‌گیری فضایی می‌شوند.

یافته‌های پژوهش

اعتبارسنجی مدل

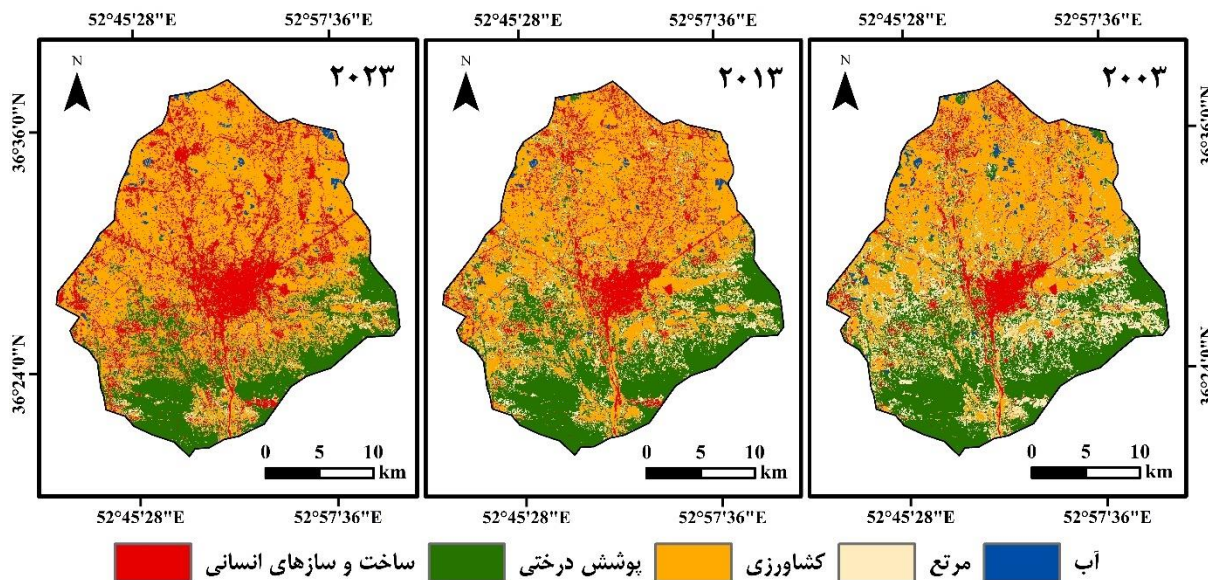
به منظور ارزیابی دقت نتایج طبقه‌بندی LULC، از ضریب کاپا به عنوان معیار سنجش توافق بین نقشه‌های طبقه‌بندی شده و داده‌های مرجع تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث استفاده شد. نتایج حاصل از محاسبه ضریب کاپا برای سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۱۳، و ۲۰۲۳ به ترتیب ۰/۹۰، ۰/۹۳، و ۰/۹۱ بود که حاکی از دقت بسیار بالایی نقشه‌های کاربری اراضی تولیدشده و اعتبارسنجی دقیق آن‌هاست (جدول ۳). مطابق یافته‌های کافی و همکاران (۲۰۲۳) ضریب کاپای بالاتر از ۰/۸۵ نشان‌دهنده دقت بسیار بالای فرایند طبقه‌بندی است.

جدول ۳. دقت طبقه‌بندی کلاس‌های مختلف بر اساس معیارهای ارزیابی

سال			LULC
۲۰۲۳	۲۰۱۳	۲۰۰۳	
۹۷/۶	۹۳/۶	۹۵/۶	ساخت‌وسازهای انسانی
۱۰۰	۹۸/۹	۹۴/۱	پوشش‌های درختی
۸۴/۵	۹۱/۱	۸۶/۷	کشاورزی
۹۰/۰	۹۰/۳	۸۷/۵	مرتع
۹۲/۵	۱۰۰	۱۰۰	پهنه‌های آبی
۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۹۰	ضریب کاپا (Kappa Coefficient)
۹۳/۵	۹۴/۷	۹۲/۶	دقت کلی (Overall Accuracy)

تجزیه و تحلیل تغییرات کاربری و پوشش اراضی طی دوره زمانی ۲۰۲۳ - ۲۰۰۳

شکل ۳ نقشه‌های LULC طبقه‌بندی شده در سامانه GEE را در طول دوره ۲۰۰۳ - ۲۰۲۳ در پنج کلاس ساخت‌وسازهای انسانی، پوشش‌های درختی، کشاورزی، مرتع، و پهنه‌های آبی در سراسر منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۳. نقشه توزیع فضایی LULC منطقه مورد مطالعه در دوره ۲۰۲۳ - ۲۰۰۳

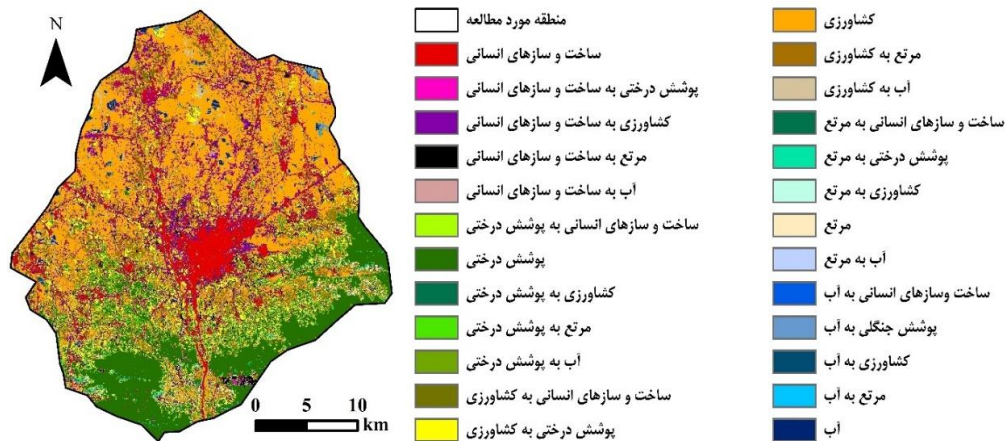
تحلیل‌های آماری برای سال ۲۰۰۳ نشان‌دهنده این است که کشاورزی (۴۳/۱٪) و پوشش درختی (۲۸/۵٪) کاربری غالب در بین کلاس‌های LULC در منطقه مطالعاتی هستند. پس از آن مرتع (۱۷/۲٪)، ساخت‌وسازهای انسانی (۹/۸٪)، و پهنه‌های آبی (۱/۴٪) در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند (جدول ۳). علاوه بر این، وسعت مساحت محاسبه شده برای هر کلاس LULC در سال ۲۰۱۳ بیانگر این است که مراتع به میزان ۶۲/۸ کیلومتر مربع، معادل ۹/۳ درصد، نسبت به سال ۲۰۰۳ کاهش یافته است. افزون بر این تغییرات کاهش قابل توجهی برای پوشش‌های درختی (۱۵/۲ کیلومتر مربع) و پهنه‌های آبی (۳/۸ کیلومتر مربع) مشاهده می‌شود. در حالی که، اراضی کشاورزی و ساخت‌وسازهای انسانی به ترتیب با ۵۵/۵ و ۲۶/۳ کیلومتر مربع افزایش روند صعودی را طی دوره ۲۰۰۳ - ۲۰۱۳ نشان می‌دهند. در دوره ۲۰۱۳ - ۲۰۲۳ بیشترین تغییر متعلق به ساخت‌وسازهای انسانی (۷/۶٪) و پوشش درختی (۷/۰٪) است. در همین دوره وسعت نواحی کشاورزی با افزایش ۴/۶ درصدی در سال ۲۰۲۳ به ۳۷۸/۸ کیلومتر مربع می‌رسد که بیش از نیمی از مساحت کل منطقه را دربرمی‌گیرد (۵۶/۰٪). جزئیات بیشتر در ارتباط با تغییرات LULC از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ در جدول ۴ قابل مشاهده است.

جدول ۴. مساحت و تغییرات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در دوره ۲۰۲۳ - ۲۰۰۳

۲۰۲۳-۲۰۱۳		۲۰۱۳-۲۰۰۳		2023		2013		2003		LULC
(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	
۷/۶	۵۱/۵	۳/۹	۲۶/۳	۲۱/۳	۱۴۴/۴	۱۳/۷	۹۲/۹	۹/۸	۶۶/۶	ساخت‌وسازهای انسانی
-۷/۰	-۴۸/۰	-۲/۲	-۱۵/۲	۱۹/۱	۱۲۹/۶	۲۶/۲	۱۷۷/۶	۲۸/۵	۱۹۲/۸	پوشش درختی
۴/۶	۳۱/۴	۸/۲	۵۵/۵	۵۶/۰	۳۷۸/۸	۵۱/۳	۳۴۷/۴	۴۳/۱	۲۹۱/۹	کشاورزی
-۵/۵	-۳۶/۹	-۹/۳	-۶۲/۸	۲/۵	۱۶/۷	۷/۹	۵۳/۶	۱۷/۲	۱۱۶/۴	مرتع
۰/۳	۲/۰	-۰/۶	-۳/۸	۱/۱	۷/۶	۰/۹	۵/۶	۱/۴	۹/۴	پهنه‌های آبی

جهت آشکارسازی بهتر تغییرات بین کاربری‌های مختلف در دوره ۲۰۰۳-۲۰۲۳ از دستور CrossTab در نرم‌افزار TerrSet استفاده شد (شکل ۴). نتایج نشان از تغییرات گسترده (بیشترین ترکیب رنگی) در محدوده شهری و لبه‌های جنگلی پایین دست و

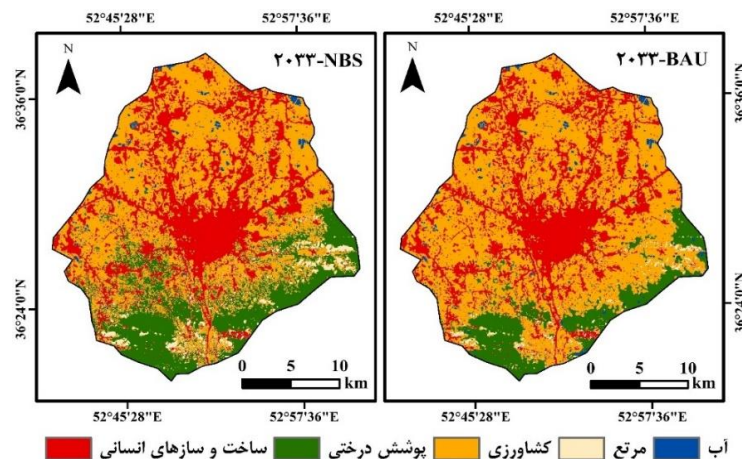
مجاور اتوبان‌های بین شهری داشت. بیشترین تغییر بین کاربری‌ها در این دوره به ترتیب مربوط به تبدیل مرتع به کشاورزی با ۷۴/۳ کیلومترمربع (۱۱/۰٪) و تبدیل کشاورزی به ساخت‌وسازهای انسانی با ۶۴/۷ کیلومتر مربع (۹/۶٪) است. همچنین تبدیل پوشش درختی به کشاورزی (۹/۳٪) و مرتع به ساخت‌وسازهای انسانی (۳/۱٪) از دیگر تغییرات چشمگیر بین کاربری‌ها طی دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ است.



شکل ۴. تغییرات در بین کلاس‌های مختلف LULC (۲۰۰۳ - ۲۰۲۳)

پیش‌بینی تغییرات کاربری و پوشش اراضی برای سال ۲۰۲۳ تحت دو سناریوی پایه و پیشنهادی

شکل ۵ نقشه توزیع فضایی کاربری و پوشش اراضی پیش‌بینی‌شده منطقه مورد مطالعه را برای سال ۲۰۲۳ در دو سناریوی BAU و NBS با استفاده از مدل CA-Markov نشان می‌دهد. در جدول ۵ نیز مساحت و درصد هر یک از LULCها تحت هر دو سناریو و نیز مقایسه تغییرات آن‌ها با سال ۲۰۲۳ ارائه شده است. در سال ۲۰۲۳ طبق سناریوی BAU، ساخت‌وسازهای انسانی نسبت به سال ۲۰۲۳ حدود ۷/۲ درصد افزایش می‌یابد و به بالاترین میزان خود یعنی ۱۹۳/۱ کیلومترمربع در طول دوره مطالعاتی می‌رسد. مساحت کاربری کشاورزی نیز همان‌طور که انتظار می‌رفت در سناریوی BAU افزایش خواهد یافت (۱/۷٪)؛ درحالی‌که از وسعت پوشش درختی و مرتع به ترتیب به میزان ۸/۲ و ۰/۸ درصد کاسته می‌شود. سناریوی پیشنهادی (NBS) نیز حاکی از افزایش ۴۸/۷ و ۲۸ درصدی مناطق تحت تأثیر زمین‌های کشاورزی و ساخت‌وسازهای انسانی است. علاوه بر این در سناریوی یادشده نسبت به سناریوی BAU پوشش درختی و مرتع به عنوان فضاهای طبیعی به ترتیب ۵۴/۱ و ۱۲/۳ کیلومترمربع افزایش مساحت داشتند و در هر دو سناریو تغییرات سطوح آبی ناچیز بوده است. یافته‌های این بخش نشان می‌دهد سیاست‌های تغییر کاربری اراضی می‌توانند به عنوان ابزاری مؤثر در جهت ترویج توسعه پایدار شهری مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۵. نقشه توزیع فضایی LULC منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۲۳ در دو سناریو (NBS و BAU)

جدول ۵. مساحت و تغییرات LULC منطقه مورد مطالعه در آینده

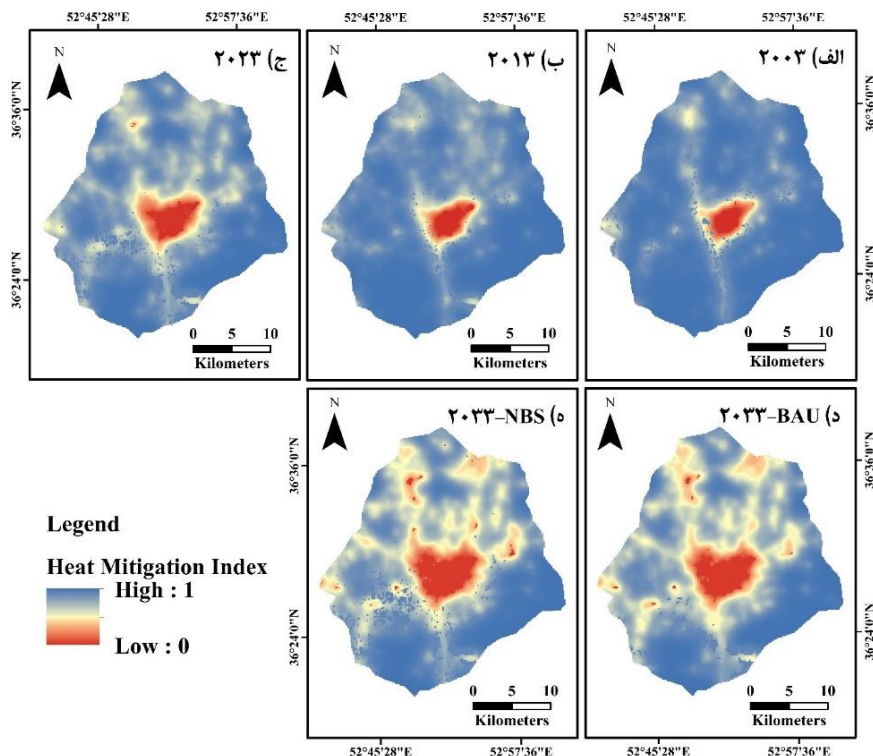
۲۰۲۳-NBS		۲۰۲۳-BAU		۲۰۳۳-NBS		۲۰۳۳-BAU		LULC
(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	
۶/۷	۴۵/۱	۷/۲	۴۸/۷	۲۸/۰	۱۸۹/۵	۲۸/۵	۱۹۳/۱	ساخت‌وسازهای انسانی
-۰/۲	-۱/۳	-۸/۲	-۵۵/۴	۱۸/۹	۱۲۸/۳	۱۱/۰	۷۴/۲	پوشش درختی
-۷/۳	-۴۹/۳	۱/۷	۱۱/۶	۴۸/۷	۳۳۹/۵	۵۷/۶	۳۹۰/۴	کشاورزی
۱/۰	۶/۹	-۰/۸	-۵/۴	۳/۵	۲۳/۶	۱/۷	۱۱/۳	مرتع
-۰/۲	-۱/۴	۰/۱	۰/۵	۰/۹	۶/۲	۱/۲	۸/۱	آب

ظرفیت کاهش جزایر گرمایی شهری

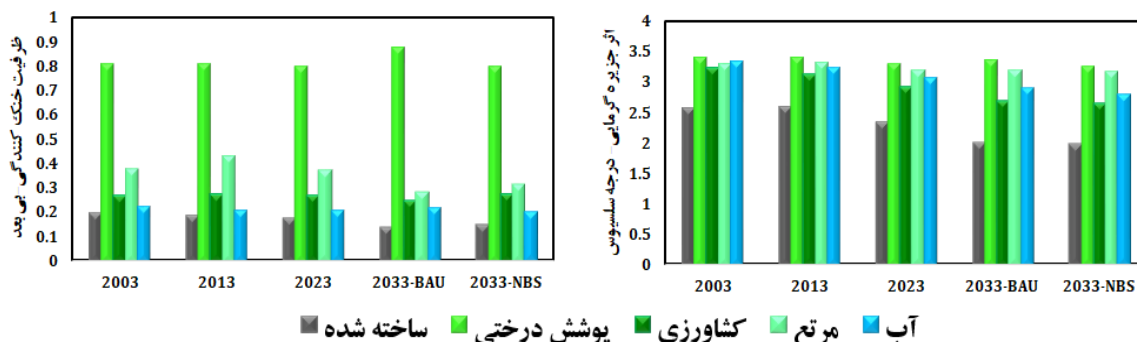
شکل ۶ تغییرات مکانی شاخص تعدیل گرما (HMI) را در بازه زمانی ۳۱ ساله (۲۰۰۳ - ۲۰۳۳) نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، مقادیر این شاخص در محدوده ۰ تا ۱ نوسان می‌کنند که در سال ۲۰۰۳ کمترین نرخ آن (۰/۱-۰/۳) در قسمت‌های مرکزی شهر به وسعت ۶۵/۴۹ کیلومترمربع عمدتاً تحت سلطه کاربری‌های ساخته‌شده انسانی متمرکز شده است. موقعیت منظر مطالعاتی در عرض‌های شمالی کشور و حاکمیت کاربری‌های سبز بر بخش قابل توجهی از حوضه باعث شده در سال ۲۰۰۳ نیمه شمالی منظر با کاربری زمین‌های کشاورزی و بخش‌های جنوبی با پوشش‌های درختی مشخص شوند که این دو LULC روی هم‌رفته با پوشش ۷۲ درصدی منطقه (۴۸۹/۳۲ کیلومترمربع) و ظرفیت خنک‌کنندگی (CC) بیش از ۰/۹ نقش غیر قابل انکاری در کاهش دمای شهر ایفا می‌کنند.

با توسعه شهرنشینی و ساخت‌وسازهای انسانی طی دوره‌های بعدی و روند صعودی این نوع LULC تا سال ۲۰۳۳، به مرور از وسعت مناطق تحت پوشش درختان جنگلی و مراتع کاسته شده و زمین‌های کشاورزی گسترش چشمگیری یافته‌اند. این تغییرات در سال ۲۰۲۳ به وضوح قابل مشاهده است؛ همان‌طور که در شکل ۵ ج نمایان است. در این سال، ۲۷/۵ درصد از منطقه دارای ظرفیت خنک‌کنندگی بین ۰/۴-۰/۸ بوده و تنها در ۶۷ درصد از حوضه مقادیر شاخص به بیش از ۰/۹ می‌رسد. این در حالی است که طی سال ۲۰۰۳ حدود ۹۱ درصد منطقه دارای شاخص HMI بسیار مطلوب از نظر تعدیل اثر جزیره گرمایی شهری بوده است. سناریوهای پایه و پیشنهادی تغییرات بارزتری را در این روند نشان می‌دهند. مطابق شکل ۶ د و ه، تحت هر دو سناریوی BAU و NBS به دلیل کاهش وسعت زیرساخت‌های سبز در ۲۳ درصد از چشم‌انداز مورد مطالعه نرخ CC به کمتر از ۰/۶ می‌رسد. در صورتی که مطابق شکل ۶ الف، در سال ۲۰۰۳ تنها ۴ درصد از منطقه دارای شاخص HMI کمتر از ۰/۶ بوده است.

نمودارهای ارائه‌شده در شکل ۷ نرخ ظرفیت خنک‌کنندگی و نیز توانایی اثر جزیره گرمایی را به تفکیک هر یک از LULC‌ها در بازه زمانی مورد نظر نشان می‌دهد. مطابق شکل، حداکثر ظرفیت خنک‌کنندگی در چشم‌انداز مورد مطالعه متعلق به پوشش‌های درختی است که این نوع LULC‌ها به طور متوسط قادرند، با نرخ $CC=0/81$ ، درجه سلسیوس از اثر جزیره گرمایی شهر را خنثی کنند (از ۳/۵ درجه سلسیوس اختلاف با حومه). LULC مراتع نیز که شامل پوشش علفزار و بوته‌زار است توانایی تعدیل گرمای محیط به میزان ۳/۲۱ درجه سلسیوس را دارد و از این لحاظ نسبت به کاربری آب و زمین‌های کشاورزی شرایط مطلوب‌تری در خنثی کردن اثر جزیره گرمایی دارد. این مهم بیانگر آن است که مناطق تحت سیطره فضاها سبز، از درختان انبوه و پراکنده گرفته تا انواع پوشش‌های گیاهی کم‌تراکم و تنک، به دلیل تأثیر سه عامل مهم سایه و تبخیر و تعرق، و آلودگی اثر کاهنده گرمای قوی از خود نشان می‌دهند.



شکل ۶. تغییرات مکانی شاخص HMI در محدوده مورد مطالعه



شکل ۷. نرخ ظرفیت خنک‌کنندگی و شدت اثر جزیره گرمایی شهری در LULC‌های مورد مطالعه

بحث

این مطالعه با استفاده از داده‌های دورسنجی و مدل سرمایه‌گذاری شهری InVEST تأثیر راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت را در کاهش اثر جزیره گرمایی شهری در شهر قائم‌شهر ایران مورد بررسی قرار داد. در گام نخست، تغییرات LULC طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ به طور جامع تحلیل شد. نتایج نشان داد در بازه زمانی ۲۰۰۳ - ۲۰۱۳ کاهش معناداری در وسعت مراتع و پوشش‌های درختی رخ داده است. در مقابل، اراضی کشاورزی و ساخت‌وسازهای انسانی به ترتیب با افزایش ۵/۵۵ و ۲/۲۶ کیلومتر مربع رشد قابل توجهی را تجربه کرده‌اند. در دهه دوم (۲۰۱۳ - ۲۰۲۳) بیشترین تغییرات مربوط به افزایش ساخت‌وسازهای انسانی (۷/۶٪) و کاهش پوشش درختی (۰/۷٪-) بود. وسعت اراضی کشاورزی نیز با افزایش ۴/۶ درصدی به ۳۷۸/۸ کیلومتر مربع رسید و بیش از نیمی از مساحت کل منطقه را شامل شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد فضاهای اکولوژیک و پوشش‌های سبز در دو دهه گذشته به طور پیوسته در حال کاهش بوده‌اند که این موضوع با نتایج مطالعات سارلی و همکارانش (۲۰۱۹) و سادات و همکارانش (۲۰۲۰) هم‌سو است. مطالعه صفراد و همکارانش (۱۴۰۰) نیز نشان داد افزایش جمعیت و ساخت‌وسازهای انسانی در قائم‌شهر طی دوره

۱۹۷۸ - ۲۰۱۷ منجر به افزایش سطوح نفوذناپذیر و کاهش فضای سبز شده و دمای سطح زمین را تا ۴ درجه سلسیوس افزایش داده است.

در ادامه پژوهش، تغییرات LULC برای سال ۲۰۳۳ تحت دو سناریوی BAU و NBS پیش‌بینی شد. نتایج حاکی از آن بود که در سناریوی BAU ساخت‌وسازهای انسانی و کشاورزی به ترتیب با افزایش ۷/۲ و ۱/۷ درصدی به حداکثر میزان خود خواهند رسید؛ درحالی‌که پوشش درختی و مرتع به ترتیب ۸/۲ و ۰/۸ درصد کاهش می‌یابند. در مقابل، سناریوی NBS با تأکید بر توسعه پایدار افزایش ۴۸/۷ و ۱۲/۳ درصدی را در مناطق تحت پوشش درختی و مرتع نشان داد. این نتایج بر اهمیت سیاست‌های مدیریتی در کاهش اثر منفی تغییرات کاربری اراضی تأکید دارد. سناریوی NBS با بهبود شاخص‌های مرتبط با سلامت و رفاه انسان، کیفیت و تنظیم آب، جذب کربن، و تنوع زیستی به افزایش مقاومت و کیفیت زندگی شهروندان کمک می‌کند (Veisi Nabikandi et al., 2025). همچنین، با توجه به نقش شهرها در تغییرات اقلیم جهانی NBS با ذخیره کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به کاهش پیامدهای این تغییرات کمک خواهد کرد.

در نهایت، ظرفیت کاهش UHI با استفاده از شاخص HMI ارزیابی شد. نتایج نشان داد در سال ۲۰۰۳ شاخص خنک‌کنندگی در ۹۱ درصد از مساحت منطقه شرایطی مطلوبی داشته که این میزان تا سال ۲۰۲۳ به ۶۷ درصد کاهش یافته است. برای سال ۲۰۳۳ نیز تحت هر دو سناریوی BAU و NBS در ۲۳ درصد منطقه میزان شاخص HMI به کمتر از ۰/۶ می‌رسد. این کاهش ظرفیت خنک‌کنندگی به‌ویژه در مناطق پوشش درختی و مراتع مشهود است که ناشی از نقش این کاربری‌ها در تعدیل دما از طریق سایه و تبخیر و تعرق و آلودگی است. این یافته‌ها بر اهمیت حفظ و احیای فضاهای سبز شهری به عنوان راهکاری کلیدی در کاهش اثر UHI تأکید دارد. یافته‌های این پژوهش مبنی بر تأثیر مثبت زیرساخت‌های سبز و آبی بر کاهش دمای محیط با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد. سانوسی و جلیل (۲۰۲۱) نیز به طور مشابه نشان دادند پوشش گیاهی نسبت به عناصر آبی تأثیر بیشتری در کاهش دما دارد و در مجموع هر دو نوع زیرساخت، به‌ویژه در مقایسه با فضاهای باز، منجر به کاهش دمای هوا تا ۱/۶ درجه سلسیوس می‌شوند. لوموئن-رودریگز و همکارانش (۲۰۲۲) نیز در مطالعه‌ای بر روی شهرهای نیمه‌حاره‌ای کاهش حدود ۲ درجه سانتی‌گرادی دمای سطحی جزیره گرمایی شهری را در پی ایجاد فضاهای سبز با مساحت بیش از ۲ هکتار گزارش کردند. همچنین، گرینو و همکارانش (۲۰۲۰) با بررسی تأثیر فضاهای سبز با مساحت‌های کوچک‌تر به نقش مؤثر این فضاها در تنظیم خرداقلیم و کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی پی بردند.

در مجموع، نتایج این پژوهش بر اهمیت حفظ و افزایش پوشش گیاهی در مناطق شهری و لزوم برنامه‌ریزی دقیق برای مدیریت کاربری اراضی به منظور کاهش اثر جزایر گرمایی شهری تأکید دارد. اجرای سیاست‌های مناسب در زمینه توسعه شهری، حفظ فضای سبز، و استفاده از مصالح ساختمانی با قابلیت جذب حرارت کمتر می‌تواند به بهبود شرایط اقلیمی شهری و افزایش کیفیت زندگی شهروندان کمک شایانی کند. افزون بر این، نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنایی برای تدوین برنامه‌های جامع مدیریت شهری و محیط زیستی در مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثربخشی راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت در کاهش شدت پدیده جزیره گرمایی شهری به پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در آینده و تحلیل تأثیر این تغییرات بر شرایط اقلیم شهری قائم‌شهر می‌پردازد. در واقع این مطالعه مبتنی بر یک رویکرد چندرشته‌ای انجام گرفته که جنبه‌های مختلف خدمات اکوسیستم، اقلیم شهری، تغییرات LULC، و سناریوهای آینده را به هم مرتبط می‌کند. تحلیل تغییرات کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه نشان داد طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ پوشش‌های درختی و آبی به طور قابل توجهی کاهش یافته و ساخت‌وسازهای انسانی و اراضی کشاورزی افزایش چشمگیری داشته‌اند. پیش‌بینی‌ها حاکی از تداوم این روند در آینده و کاهش بیشتر سطوح سبز در صورت عدم اجرای راهکارهای مناسب است. نتایج حاصل از اجرای مدل سرمایش شهری نیز حاکی از این بود که تغییرات کاربری اراضی تأثیر مستقیم بر پدیده جزیره گرمایی شهری دارد و کاهش پوشش گیاهی به معنای کاهش ظرفیت خنک‌کنندگی منطقه است. همچنین تجزیه و تحلیل سناریوهای آینده نشان داد در صورت ادامه روند فعلی توسعه روند کاهش پوشش گیاهی و افزایش دمای سطح زمین تشدید

خواهد شد و حتی با اجرای اقدامات مبتنی بر طبیعت همچنان انتظار می‌رود بخش قابل توجهی از منطقه با کاهش ظرفیت خنک‌کنندگی مواجه شود.

در راستای کاهش اثر پدیده جزیره گرمایی شهری، اجرای راهکارهایی جامع از جمله توسعه کمربند سبز شهری، بهره‌گیری از بام‌ها و دیوارهای سبز، استفاده از مصالح ساختمانی خنک، و توسعه فضاهای سبز- آبی ضروری است. همچنین، به‌کارگیری مصالح ساختمانی با قابلیت انعکاس حرارت و نفوذپذیری بالا همراه با تدوین سیاست‌های مدیریتی برای حفظ فضاهای سبز و محدودیت تغییر کاربری اراضی می‌تواند مؤثر واقع شود. اجرای موفق این راهکارها نیازمند آموزش و آگاه‌سازی شهروندان، همکاری و مشارکت تمامی ذی‌نفعان، و بررسی دقیق شرایط محیطی و اجتماعی و اقتصادی شهر است.

منابع

- اصغری سراسکانرود، صیاد و اصغری‌پور، اسما (۱۴۰۳). بررسی روند تغییرات جنگل‌های شهرستان نمین و پیش‌بینی روند آینده آن. *آمایش سرزمین*، ۱۶ (۱)، ۲۰۷ - ۲۲۲.
- شجاع، فائزه؛ صادقی، سلیمه و شمسی‌پور، علی‌اکبر (۱۴۰۴). کمی‌سازی ظرفیت تعدیل گرما تحت تأثیر چشم‌اندازهای سبز-آبی در کلانشهر تهران. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۵ (۷۸).
- صفراد، طاهر؛ یوسفی، یداله و رضایی طالعی، عاطفه (۱۴۰۰). واکوی تغییرات سطوح نفوذناپذیر و دمای سطح زمین در قائم شهر. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۱ (۶۲)، ۱۸۳ - ۱۹۹.
- محمدیاری، فاطمه (۱۴۰۲). ارزیابی آثار تغییرات کاربری اراضی بر خدمات اکوسیستم بر اساس مدل InVEST (مطالعه موردی: استان چهارمحال و بختیاری). *آمایش سرزمین*، ۱۵ (۲)، ۳۲۷ - ۳۴۲.
- ویسی نبی‌کندی، بهمن؛ راست خدیو، آرمان و شجاع، فائزه (۱۴۰۳). مدل‌سازی تأثیر تغییر کاربری اراضی/پوشش زمین بر تاب‌آوری اکولوژیک شهری در برابر سیلاب (مطالعه شهر رشت). *محیط زیست طبیعی*، ۷۷ (۳)، ۳۸۵ - ۴۰۰.
- ویسی نبی‌کندی، بهمن و شهبازی، فرزین (۱۴۰۳). تعیین محتوی ذخیره کربن در مخزن‌های مختلف تحت کاربری‌های متفاوت در منطقه میان‌دوآب با استفاده از دورسنجی و مدل InVEST. *محیط زیست طبیعی*، ۷۷ (۲)، ۲۴۱ - ۲۵۳.
- Abdulateef, M. F. & Al-Alwan, H. A. (2022). The effectiveness of urban green infrastructure in reducing surface urban heat island. *Ain Shams Engineering Journal*, 13 (1), 101526.
- Asghari Saraskanroud, S. & Asgharpour, A. (2024). Investigating the changes in the forests of Namin city and predicting its future trends. *Town and Country Planning*, 16 (1), 207-222. (in Persian)
- Beroho, M., Briak, H., Cherif, E. K., Boulahfa, I., Ouallali, A., Mrabet, R., ... & Aboumaria, K. (2023). Future scenarios of land use/land cover (LULC) based on a CA-markov simulation model: case of a mediterranean watershed in Morocco. *Remote Sensing*, 15 (4), 1162.
- Cohen-Shacham, E., Andrade, A., Dalton, J., Dudley, N., Jones, M., Kumar, C., ... & Walters, G. (2019). Core principles for successfully implementing and upscaling Nature-based Solutions. *Environmental Science & Policy*, 98, 20 - 29.
- Damaneh, H. E., Khosravi, H., & Damaneh, H. E. (2024). Investigating the land use changes effects on the surface temperature using Landsat satellite data. In *Remote Sensing of Soil and Land Surface Processes* (155 - 174). Elsevier.
- Diem, P. K., Nguyen, C. T., Diem, N. K., Diep, N. T. H., Thao, P. T. B., Hong, T. G., & Phan, T. N. (2023). Remote sensing for urban heat island research: Progress, current issues, and perspectives. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 101081.
- El Haj, F. A., Ouadif, L., & Akhssas, A. (2023). Simulating and predicting future land-use/land cover trends using CA-Markov and LCM models. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, 100342.
- Grilo, F., Pinho, P., Aleixo, C., Catita, C., Silva, P., Lopes, N., ... & Branquinho, C. (2020). Using green to cool the grey: Modelling the cooling effect of green spaces with a high spatial resolution. *Science of the Total Environment*, 724, 138182.
- Haque, M. N. & Sharifi, A. (2024). Justice in access to urban ecosystem services: A critical review of the literature. *Ecosystem Services*, 67, 101617.
- Hayes, A. T., Jandaghian, Z., Lacasse, M. A., Gaur, A., Lu, H., Laouadi, A., ... & Wang, L. (2022). Nature-based solutions (nbss) to mitigate urban heat island (UHI) effects in Canadian cities. *Buildings*, 12 (7), 925.
- He, T., Wang, N., Tong, Y., Wu, F., Xu, X., Liu, L., ... & Qiao, Z. (2023). Anthropogenic activities change population heat exposure much more than natural factors and land use change: An analysis of 2020–2100 under SSP-RCP scenarios in Chinese cities. *Sustainable Cities and Society*, 96, 104699.
- Hu, Y., Wang, C., & 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 (5), 963.
- Kadaverugu, R., Gurav, C., Rai, A., Sharma, A., Matli, C., & Biniwale, R. (2021). Quantification of heat mitigation by urban green spaces using InVEST model—a scenario analysis of Nagpur City, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1 - 13.
- Kafy, A. A., Saha, M., Fattah, M. A., Rahman, M. T., Dutti, B. M., Rahaman, Z. A., ... & Sattar, G. S. (2023). Integrating forest cover change and carbon storage dynamics: Leveraging Google Earth Engine and InVEST model to inform conservation in hilly regions. *Ecological Indicators*, 152, 110374.
- Kamran, J. G., Musa, K. K., & Sadegh, G. F. (2020). An investigation into urban development patterns with sprawl and other corresponding changes: A case study of Babol City. *Urban Culture Research*, 20 (1), 26 - 43.

- Koko, A. F., Yue, W., Abubakar, G. A., Hamed, R., & Alabsi, A. A. N. (2020). Monitoring and predicting spatio-temporal land use/land cover changes in Zaria City, Nigeria, through an integrated cellular automata and markov chain model (CA-Markov). *Sustainability*, 12 (24), 10452.
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L., Falfán, I., & MacGregor-Fors, I. (2022). Too hot to handle? On the cooling capacity of urban green spaces in a Neotropical Mexican city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127633.
- Liang, X., Guan, Q., Clarke, K. C., Liu, S., Wang, B., & Yao, Y. (2021). Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 85, 101569.
- Marando, F., Heris, M. P., Zulian, G., Udías, A., Mentaschi, L., Chrysoulakis, N., ... & Maes, J. (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103564.
- Mohammadyari, F. (2023). Evaluation the effects of land use changes on ecosystem services based on the InVEST model (Case study: Chaharmahal and Bakhtiari province). *Town and Country Planning*, 15 (2), 327-342. (in Persian)
- Patel, A., Vyas, D., Chaudhari, N., Patel, R., Patel, K., & Mehta, D. (2024). Novel approach for the LULC change detection using GIS & Google Earth Engine through spatiotemporal analysis to evaluate the urbanization growth of Ahmedabad city. *Results in Engineering*, 21, 101788.
- Qiu, X., Kil, S. H., Jo, H. K., Park, C., Song, W., & Choi, Y. E. (2023). Cooling effect of urban blue and green spaces: A case study of Changsha, China. *International journal of environmental research and public health*, 20 (3), 2613.
- Rendana, M., Idris, W. M. R., Rahim, S. A., Abdo, H. G., Almohamad, H., Al Dughairi, A. A., & Al-Mutiry, M. (2023). Relationships between land use types and urban heat island intensity in Hulu Langat district, Selangor, Malaysia. *Ecological Processes*, 12 (1), 33.
- Sadat, M., Zoghi, M., & Malekmohammadi, B. (2020). Spatiotemporal modeling of urban land cover changes and carbon storage ecosystem services: case study in Qaem Shahr County, Iran. *Environment, development and sustainability*, 22 (8), 8135 - 8158.
- Sanusi, R. & Jalil, M. (2021, November). Blue-Green infrastructure determines the microclimate mitigation potential targeted for urban cooling. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 918 (1), 012010. IOP Publishing.
- Sarli, R., Roshan, G., & Grab, S. (2019). Evaluation and prediction of vegetation changes of Mazandaran, Iran from 2005 to 2017 using Markov chain method and Geographical Information Systems (GIS). *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)* 28, 149 - 162.
- Shoja F, Sadeghi S, Shamsipour. (2025). Quantifying the Heat Mitigation Capacity of Green-Blue Infrastructures in the Metropolis of Tehran. *jgs*. 25(78). (in Persian)
- Singh, P., Kikon, N., & Verma, P. (2017). Impact of land use change and urbanization on urban heat island in Lucknow city, Central India. A remote sensing based estimate. *Sustainable cities and society*, 32, 100 - 114.
- Sultana, S. & Satyanarayana, A. N. V. (2020). Assessment of urbanisation and urban heat island intensities using landsat imageries during 2000–2018 over a sub-tropical Indian City. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101846.
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152 - 170.
- USGS, 2022. The United States Geological Survey, Land Cover Class Legend. <https://www.usgs.gov/media/images/land-cover-class-legend>.
- Veisi Nabikandi, B. & Shahbazi, F. (2024). Determining carbon storage content at different pools under various land uses in Miandoab region using remotely-sensed data and InVEST model. *Journal of Natural Environment*, 77 (2), 241 - 253. (in Persian)
- Veisi Nabikandi, B., Rastkhadiv, A., & Shoja, F. (2024). Modeling of land use/land cover change impact on urban ecological flood resilience: A case study of Rasht city. *Journal of Natural Environment*, 77 (3), 385 - 400. (in Persian)
- Veisi Nabikandi, B., Rastkhadiv, A., Feizizadeh, B., Gharibi, S., & Gomes, E. (2025). A scenario-based framework for evaluating the effectiveness of nature-based solutions in enhancing habitat quality. *GeoJournal*, 90(2), 55.
- Veisi Nabikandi, B., Shahbazi, F., Hami, A., & Malone, B. (2024). Exploring carbon storage and sequestration as affected by land use/land cover changes toward achieving sustainable development goals. *Soil Advances*, 2, 100017.
- Wang, K., Aktas, Y. D., Stocker, J., Carruthers, D., Hunt, J., & Malki-Epshtein, L. (2019). Urban heat island modelling of a tropical city: Case of Kuala Lumpur. *Geoscience Letters*, 6 (1), 1 -11.

- World Health Organization (2023). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum*, 2023. Food & Agriculture Org., 2023.
- Wu, C., Li, J., Wang, C., Song, C., Chen, Y., Finka, M., & La Rosa, D. (2019). Understanding the relationship between urban blue infrastructure and land surface temperature. *Science of the Total Environment*, 694, 133742.
- Yadav, N., Rajendra, K., Awasthi, A., Singh, C., & Bhushan, B. (2023). Systematic exploration of heat wave impact on mortality and urban heat island: A review from 2000 to 2022. *Urban Climate*, 51, 101622.
- Yue, W., Liu, X., Zhou, Y., & Liu, Y. (2019). Impacts of urban configuration on urban heat island: An empirical study in China mega-cities. *Science of the Total Environment*, 671, 1036-1046.
- Zardo, L., Geneletti, D., Pérez-Soba, M., & Van Eupen, M. (2017). Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning. *Ecosystem services*, 26, 225-235.
- Zawadzka, J. E., Harris, J. A., & Corstanje, R. (2021). Assessment of heat mitigation capacity of urban greenspaces with the use of InVEST urban cooling model, verified with day-time land surface temperature data. *Landscape and Urban Planning*, 214, 104163.
- Zhou, X. & Chen, H. (2018). Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon. *Science of the Total Environment*, 635, 1467 - 1476.