

Investigating the Relationship Between Urban Morphology and the Formation of Urban Heat Islands Through the Influence of Wind Flow: A Case Study of Sari, Iran

1. Reza Ghanbari Seyedkolaei✉: Department of Architecture, Sar.C., Islamic Azad University, Sari, Iran

2. Abdullah Ebrahimi✉*: Department of Architecture, Sar.C., Islamic Azad University, Sari, Iran.

3. Faezeh Ghaffari✉: Department of Architecture, Sar.C., Islamic Azad University, Sari, Iran

*Corresponding Author's Email Address: Abdollah.Ebrahimi@iau.ac.ir

How to Cite: Ghanbari Seyedkolaei, R., Ebrahimi, A., & Ghaffari, F. (2026). Investigating the Relationship Between Urban Morphology and the Formation of Urban Heat Islands Through the Influence of Wind Flow: A Case Study of Sari, Iran. *Manifestation of Art in Architecture and Urban Engineering*, 4(3), 1-25.

Abstract:

Urban growth and the rapid migration of rural populations to cities have directly contributed to climatic changes in urban areas and have raised concerns regarding global warming. Accordingly, studies of urban climate can contribute to improving outdoor thermal comfort. The urban heat island (UHI) is a phenomenon in which the air temperature within a city becomes higher than that of its surrounding areas, primarily because of human activities. Urban heat island intensity (UHII) is used to quantify the magnitude of the UHI effect and the temperature difference between urban and rural areas. Over the past four decades, Sari, the largest city in Mazandaran Province, has experienced substantial changes in its urban structure. These transformations have affected both the older parts of the city and newly developed neighborhoods, many of which initially emerged as informal peripheral settlements. Changes in building regulations during the implementation phase, along with the construction of buildings without obtaining the required permits in many peripheral neighborhoods, have transformed the urban morphology of this historic Iranian city. The morphological characteristics of these areas include low-rise buildings with high building density, narrow streets and alleys, limited vegetation, a lack of urban open spaces, and high building coverage ratios. Extensive calculations conducted using Landsat 8 satellite imagery acquired on August 8, 2021, the hottest day of that year in Sari, were used to investigate the formation of urban heat islands. The findings showed that the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was distributed relatively uniformly across Sari, and its effect on reducing ambient temperature was therefore approximately similar throughout the city. Regarding the moisture index, neighborhoods with higher moisture levels also exhibited higher temperatures, while wind strength was unable to produce a meaningful reduction in moisture. However, in locations with similar wind conditions, urban morphology was the determining factor influencing ambient temperature. Unless urban morphology facilitates airflow, wind strength alone cannot reduce ambient temperatures in areas affected by urban heat islands. Wind strength by itself cannot prevent the formation of urban heat islands and functions only as a contributing factor in reducing ambient temperature under favorable urban morphological conditions. Consequently, modifying urban morphology, as the most fundamental determinant of urban heat island formation, can help mitigate and control the urban heat island effect.

Keywords: Urban heat island, urban morphology, wind flow, Sari

Received: 31 January 2026

Revised: 06 July 2026

Accepted: 14 July 2026

Published: 23 September 2026



Copyright: © 2026 by the authors. Published under the terms and conditions of Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

بررسی ارتباط مورفولوژی شهری بر تشکیل جزایر گرمایی شهری بواسطه تاثیر ورزش باد (نمونه موردی: شهر ساری)

۱. رضا قنبری سیدکلانی[✉]: گروه معماری، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

۲. عبدالله ابراهیمی^{*}: گروه معماری، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران. (نویسنده مسئول)

۳. فائزه غفاری^{*}: گروه معماری، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: Abdollah.Ebrahimi@iau.ac.ir

نحوه استناددهی: قنبری سیدکلانی، رضا، ابراهیمی، عبدالله، و غفاری، فائزه. (۱۴۰۵). بررسی ارتباط مورفولوژی شهری بر تشکیل جزایر گرمایی شهری بواسطه تاثیر ورزش باد (نمونه موردی: شهر ساری). تجلی هنر در معماری و شهرسازی، ۴(۳)، ۲۵-۱.

چکیده

رشد شهرنشینی و مهاجرت شتابان روستاییان به شهرها تاثیر مستقیمی بر تغییرات اقلیمی در شهرها و باعث نگرانی هایی در زمینه گرم شدن زمین شده است. از این رو با مطالعات بر روی اقلیم شهری می توان آسایش حرارتی را بوجود آورد. جزیره گرمایی شهری (UHI) پدیده ای است که زمانی که دمای هوا در یک شهر نسبت به محیط اطراف آن به دلیل فعالیت های انسانی بیشتر می شود، رخ می دهد. شدت جزیره گرمایی شهری (UHII) برای توصیف میزان UHI و میزان تفاوت دما بین شهرها و مناطق روستایی استفاده می شود. طی چهاردهه شهر ساری به عنوان بزرگترین شهر استان مازندران شاهد تغییرات قابل توجهی در ساختار شهری بوده است. این تغییرات هم شامل قسمت های قدیمی شهر و هم در برگرفته محلات نوساز شهر بوده است که اکثر محلات نوساز بصورت حاشیه نشینی شروع به ساخت و ساز کردند. تغییرات قوانین ساختمان سازی در مرحله اجرا و حتی عدم دریافت مجوز شروع به ساختمان سازی در اکثر محلات حاشیه شهر، مورفولوژی شهری این شهر کهن ایران را دگرگون کرده است. خواص مورفولوژی شهری در این نقاط مانند ساختمان های کم ارتفاع با تراکم بالا، خیابانها و کوچه های باریک، عدم وجود پوشش گیاهی، عدم وجود فضای باز شهری، سطح اشغال زیاد برای ساختمانها می باشند. از محاسبات گسترده انجام شده با استفاده از ماهواره ۸ در تاریخ ۸ آگوست ۲۰۲۱ در شهر ساری (که گرمترین روز سال بوده) بر روی تشکیل جزایر گرمایی شهری، بدست آورده ایم که شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در شهر ساری تقریباً بصورت یکسان توزیع شده است و تاثیر آن در کاستن دمای محیط تقریباً یکسان است. در شاخص رطوبت نیز توزیع آن در شهر ساری، در محلاتی که رطوبت بیشتری داشته اند دمای بیشتری نیز دارند و قدرت باد نیز نمی تواند در کاهش رطوبت تاثیر گذارد اما در مکان های مشابه از نظر قدرت باد، مورفولوژی شهری عامل تعیین کننده دمای محیط است و تا مورفولوژی شهری اجازه ندهد قدرت باد به تنهایی نمی تواند باعث کاستن دمای محیط در نقاط ایجاد شده جزایر گرمایی باشد. تنها قدرت باد نمی تواند باعث عدم تشکیل جزایر گرمایی شود و فقط یک شاخص برای کاستن دمای محیط در شرایط مساعد مورفولوژی شهری است. در نتیجه با اصلاح مورفولوژی شهری که اساسی ترین شاخص تشکیل جزایر گرمایی است می توان به تشکیل جزایر گرمایی شهری غلبه کرد.

کلیدواژگان: جزایر گرمایی شهری، مورفولوژی، باد، ساری

تاریخ دریافت: ۱۱ بهمن ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۵ تیر ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۲۳ تیر ۱۴۰۵

تاریخ انتشار: ۱ مهر ۱۴۰۵



مقدمه

رشد شتابان و فزاینده شهرنشینی و در پی آن، افزایش جمعیت شهرها، پیامدهای مختلفی را در زمینه‌های گوناگون به دنبال داشته است. از جمله مهم‌ترین این پیامدها می‌توان به افزایش مصرف و تقاضا برای منابع انرژی اشاره کرد. طبق آمار جهانی، مصرف انرژی در جهان در هر دهه به دو برابر افزایش یافته و پیش‌بینی شده است که طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۵، روند مصرف انرژی در جهان به میزان ۵۴ درصد افزایش یابد (1). در حالی که ساکنان شهرها ۶۰ تا ۸۰ درصد انرژی جهانی را مصرف می‌کنند (2، 3) و مسئول بیش از ۷۰ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند (4). از همین رو است که بسیاری از دولت‌ها در حال برنامه‌ریزی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از تمامی بخش‌های اقتصادی خود هستند (5). گسترش شهرها در حال تبدیل شدن به یک نگرانی مشترک در سراسر جهان است؛ زیرا مردم مناطق روستایی را ترک کرده و در شهرها تجمع می‌کنند. رشد شهری منافع اقتصادی داشته، اما پیامدهای محیطی مرتبط با تغییرات اقلیمی و گرم شدن زمین را نیز در پی دارد و منجر به تأثیر مستقیم بر زندگی انسان می‌شود (6).

هندسه شهری از طریق ساختمان‌های بلند و خیابان‌ها می‌تواند از انتشار امواج بلند به اتمسفر جلوگیری کند (7). این عوامل موجب می‌شوند دمای سطح و هوای شهری از مناطق پیرامون بالاتر باشد که به این پدیده، جزیره حرارتی شهری می‌گویند. اثرات نامطلوب جزیره حرارتی شهری شامل افزایش مصرف انرژی (8)، افزایش مصرف آب در ایام گرم سال (9)، افزایش ناراحتی‌های حرارتی (10) و افزایش آلودگی هوا (11) است. شرایط اتمسفری راکد ناشی از موج گرما، آلاینده‌ها را در مناطق شهری به دام می‌اندازد و اضافه شدن بار شدید زباله‌های سمی به تنش خطرناک ناشی از هوای گرم، مشکلی بهداشتی در ابعادی ناشناخته به وجود می‌آورد. همچنین، در شب یا در زمستان، وجود هوای سرد در پشت‌بام‌ها باعث می‌شود که لایه هوای گرم‌تر زیر آن، به همراه لایه گردوغبار، ثابت بماند (10). جزیره گرمایی شهری پدیده‌ای شناخته‌شده است که بر طیف گسترده‌ای از عملیات‌های شهری تأثیر می‌گذارد (12). شهرها در اغلب موارد شرایط اقلیمی خاصی را تجربه می‌کنند که به آن اقلیم شهری گفته می‌شود. اقلیم شهری به واسطه تفاوتی که در متغیرهای اقلیمی شهر، شامل دمای هوا، رطوبت، سرعت و جهت باد و مقدار بارش، با نواحی کم‌تراکم‌تر اطراف آن وجود دارد، مشخص می‌شود (13). پس از مطرح شدن مفهوم جزیره حرارتی توسط لوک هاوارد در سال ۱۸۳۳، این موضوع مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفت (14).

با توجه به افزایش جزایر گرمایی شهری، شهرها به‌خصوص در برابر امواج گرما آسیب‌پذیر هستند و این امر باعث افزایش مرگ‌ومیر ناشی از گرما می‌شود (15، 16). جزیره گرمایی شهری (UHI) پدیده‌ای است که زمانی رخ می‌دهد که دمای هوا در یک شهر، به دلیل فعالیت‌های انسانی، نسبت به محیط اطراف آن بیشتر می‌شود (17). شدت جزیره گرمایی شهری (UHII) برای توصیف میزان UHI و میزان تفاوت دما میان شهرها و مناطق روستایی استفاده می‌شود. (18) UHI عموماً منجر به افزایش انرژی مصرفی خنک‌کننده‌ها و کاهش مصرف انرژی گرمایشی برای ساختمان‌های واقع در مناطق شهری، در مقایسه با ساختمان‌های واقع در مناطق روستایی، می‌شود. با توجه به گسترش شهرنشینی، مقیاس و عملکرد شهرها در حال افزایش است و این امر منجر به افزایش تدریجی UHII می‌شود (19). همچنین، جزیره گرمایی شهری (UHI) و اثرات گرم شدن کره زمین، دمای هوای شهرها و مصرف انرژی ساختمان‌ها را افزایش می‌دهند (20). جزایر حرارتی شهری تأثیر منفی بر کیفیت هوای مناطق شهری خواهند داشت؛ زیرا با توجه به تولید گازهای آلاینده‌ای همچون ازن، واکنش شیمیایی میان ترکیبات آلی آمیزه و اکسیدهای مختلف نیتروژن، مانند NO و NO₂، در آب‌وهوای گرم به تولید گازهای سمی منجر می‌شود (21). علاوه بر این، تأثیر بر کیفیت آب

شهری، ناهنجاری‌های دمایی، امواج گرمای تولیدشده و الگوهای آب‌وهوایی، مانند ویژگی‌های بارش باران و باد، از دیگر آثار سوء جزایر حرارتی شهری هستند (16). تمامی این آثار، تولید گازهای آلاینده، فشارهای روانی بر شهروندان و فرایند افزایش هزینه تولید انرژی را در سطح شهر به همراه خواهند داشت (22).

مواد و روش‌ها

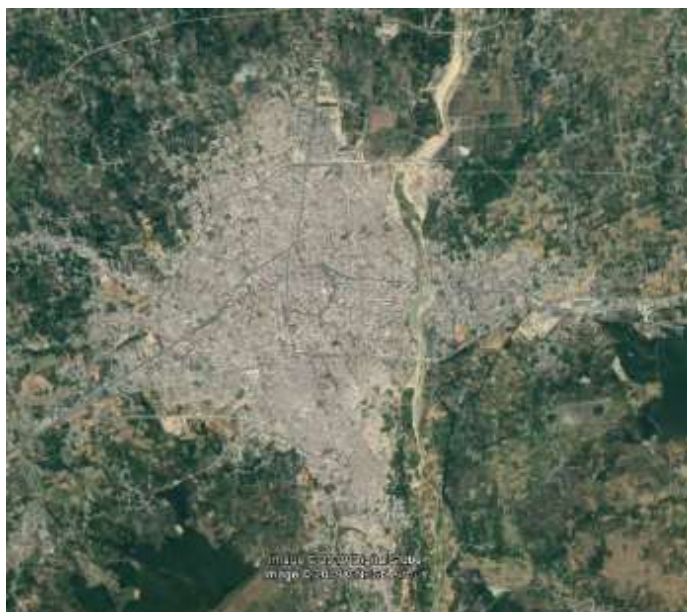
متغیرهای مهم تأثیرگذار بر مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش مسکونی عبارت‌اند از: تعداد واحدهای مسکونی، درآمد خانوار، کیفیت بنا، مساحت زیربنا، دوره ساخت، دمای درون و بیرون ساختمان، سطح اشغال، الگوی مسکن، میانگین بُعد خانوار، شیوه تصرف، شامل مالک، مستأجر و غیره، موقعیت مکانی، سیستم گرمایش مرکزی، قیمت سوخت، فقر سوخت، بهبود کارایی انرژی، شدت استفاده از وسایل برقی، عوامل طراحی مرتبط با مورفولوژی ساختمان‌ها، مانند شدت صیقلی و براق بودن و جهت‌گیری، ویژگی‌های حرارتی مصالح ساختمانی، مقادیر نسبی و ارزش U مصالح مصرفی، انرژی نهفته مصالح و عوامل طراحی مرتبط با هندسه شهری، مانند زاویه منع، که محصول ارتفاع و عمق نقشه یا فاصله تا ساختمان‌های مجاور است، و فرصت استفاده از انرژی خورشیدی منفعل (23).

بر طبق گزارش سازمان ملل متحد، فرم شهر دارای تأثیر مستقیم بر مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و دستیابی به توسعه پایدار است (3). در این میان، برخی از جنبه‌های ارتباط میان فرم شهر و میزان مصرف انرژی به‌خوبی توصیف شده‌اند، ولی چنین مطالعاتی عمدتاً یا بر بخش حمل‌ونقل تمرکز می‌کنند یا مدل‌های موجود مصرف انرژی در بخش ساختمانی بر ساختمان‌های منفرد متمرکز هستند و در نتیجه، اهمیت پدیده‌های بزرگ‌مقیاس نادیده گرفته می‌شود (24). بنابراین، آزمایش‌های سیستماتیک اندکی درباره عوامل اقتصادی - اجتماعی و فاکتورهای فرم شهر مؤثر بر میزان مصرف انرژی وجود دارد (25). با رشد سریع شهرنشینی، مورفولوژی بلوک‌های شهری از نوعی کم‌تراکم به نوعی متنوع و پرتراکم توسعه می‌یابد که تأثیر زیادی بر شرایط تهویه سطح زمین، مصرف انرژی و افزایش گرما در سطح منطقه‌ای دارد و در نتیجه، به افزایش اثر حرارتی شهری و افزایش مصرف انرژی ساختمان منجر می‌شود (26). راندمان تهویه هوای فضای بیرونی ساختمان بر آسایش حرارتی در داخل و بیرون ساختمان اثر می‌گذارد. شرایط مطلوب تهویه در اطراف ساختمان‌ها می‌تواند به‌طور مؤثری آلودگی‌ها و گرما را کاهش دهد. از سوی دیگر، کیفیت هوا و درجه حرارت فضای بیرونی نیز بر فضاهای داخلی تأثیر می‌گذارند که به‌طور مستقیم با مصرف انرژی ساختمان و انتشار آلاینده‌ها مرتبط است (27). جریان باد در فضاهای شهری به‌شدت تحت تأثیر مورفولوژی شهری است که توسط تراکم بلوک‌های ساختمانی و ساختار ساختمان شکل می‌گیرد (28). بدین ترتیب، برخورداری معماران از درک کامل نسبت به طرح ساختمان و راندمان تهویه برای بهبود کیفیت هوا و آسایش حرارتی ساختمان ضروری است. شکل ساختمان، تراکم، فاصله ساختمان‌ها از یکدیگر، تنوع ارتفاع آن‌ها، ساخت هندسه سقف و کاشت درخت (27) و نسبت ارتفاع ساختمان‌ها به فاصله مسیرهای میان آن‌ها، یعنی عمق و باریکی، بر تهویه فضای بیرونی تأثیرگذار است (28). از نظر فضایی، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون بر سطوح ماکرو، ملی یا بخشی، و میکرو، در مقیاس ساختمانی، تمرکز کرده‌اند و اطلاعات کمی درباره متابولیسم مصرف انرژی عملکردی در سطح محله و شهر وجود دارد. اثر حرارتی شهری بیشتر در معرض فرایند شتاب‌زده شهرنشینی است. با این حال، مطالعات اندکی به بررسی تأثیر فرم شهری بر دمای سطح زمین (LST) پرداخته‌اند (29).

گسترش وسیع شهرنشینی و رشد جمعیت باعث ایجاد مجموعه‌ای از مشکلات زیست‌محیطی، مانند بحران منابع (30)، تغییرات اقلیمی محلی (31)، آلودگی هوا (32)، افزایش ترافیک (33) و غیره شده است. یکی از جدی‌ترین مشکلات، تغییرات قابل‌توجه در دمای سطح زمین (LST) است که منجر به اثر جزایر گرمایی شهری (UHI) می‌شود (12). دمای پایدار ناشی از اثرات UHI ممکن است سکونت در یک شهر را تهدید کند و باعث افزایش مسائل زیست‌محیطی، مانند از دست رفتن تنوع زیستی (34) و مصرف بیش از حد آب (35)، شود. گرمای بیش از حد ممکن است بر سطح آسایش زندگی تأثیر بگذارد و به افزایش خطرات سلامتی، به‌ویژه در سالمندان (36) و کودکان (37) که نسبت به دماهای بالاتر حساس هستند، منجر شود. بنابراین، باید توجه زیادی به افزایش LST و اثرات مضر UHI ناشی از آن داشت.

ساکنان شهرها، در مقایسه با افرادی که در مناطق روستایی زندگی می‌کنند، به دلیل اثر جزیره گرمایی شهری (UHI) بیشتر از تنش گرمایی رنج می‌برند. بنابراین، کاهش UHI برای بهبود آسایش حرارتی انسان و محیط زندگی در مناطق مسکونی شهری ضروری است (38). ایران نیز در چند دهه اخیر، با افزایش شهرنشینی در بیشتر شهرها، دچار این مشکل شده است و میزان انرژی مصرفی، به‌ویژه در تابستان، به بیشترین حد خود می‌رسد. استان مازندران با ۲۳,۷۵۶ کیلومترمربع مساحت و ۲,۸۲۳,۶۰۶ نفر جمعیت، از شمال به دریا، از جنوب به استان‌های تهران و سمنان، از غرب به استان گیلان و از شرق به استان گلستان محدود است. تعداد ۱۵ شهرستان و ۴۵ شهر در مازندران وجود دارد که حدود ۵۰ درصد از شهرها در امتداد نوار ساحلی دریای کاسپین واقع شده‌اند. شهر ساری، واقع در کوهپایه‌های رشته‌کوه البرز، دارای دو بخش کوهستانی و دشتی است و در طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴ دقیقه شمالی قرار دارد. ساری مرکز استان مازندران در شمال ایران، یکی از بزرگ‌ترین شهرهای ناحیه شمالی ایران و بزرگ‌ترین شهر استان مازندران است. ساری نخستین پایتخت ایران در زمان پادشاهی قاجار، در ۲۳۰ سال قبل، بوده است. ساری به سه منطقه شهری تقسیم می‌شود و طبق سرشماری سال ۲۰۱۶، جمعیت آن ۳۴۷,۴۰۲ نفر برآورد شده است.

شهر ساری نیز در چند دهه اخیر، با رشد شهرنشینی و به‌ویژه حاشیه‌نشینی در مدت چند سال، دچار بی‌برنامگی در شهرسازی شده است. گرمایش ساختمان‌ها، آلودگی هوا، استفاده از مصالح نامناسب مانند آسفالت جاذب نور خورشید در کف‌سازی خیابان‌ها و کوچه‌ها، هم‌جواری‌ها، اشغال کامل سطح زمین به‌وسیله ساختمان‌ها، تراکم بیش از حد مجاز، کوچه‌های باریک و تفکیک‌های بدون توجه به اقلیم و تهویه هوای منطقه موجب شده‌اند که در این شهر واقع در منطقه معتدل و مرطوب ایران، جزایر گرمایی شهری شکل بگیرند و این اثر، شرایط نامطلوب و مشکلات بسیاری را برای شهر و شهروندان به وجود آورد.



تصویر ۱: نقشه هوایی شهر ساری

تئوری

اصلاح مورفولوژی شهری، که به عنوان جرم، تراکم و جهت گیری ساختمان‌ها در شهرها تعریف می‌شود، از جمله راهبردهای شناخته شده کاهش گرما است که جزایر حرارتی شهری (UHI) را در مقیاس‌های مختلف و در نتیجه، ناراحتی حرارتی را مورد توجه قرار می‌دهد (39). جزایر گرمایی شهری (UHIs) تأثیر منفی قابل توجهی بر سلامت انسان و پایداری شهری دارند (40). پیکربندی هندسی شهر بر دمای سطح زمین تأثیر می‌گذارد و آب و جنگل‌های متراکم، اثر خنک‌کنندگی قابل توجهی نشان می‌دهند. در مقایسه با ساختمان‌های متراکم، ساختمان‌های پراکنده اثر گرمایشی ضعیف‌تری نشان دادند (41). دمای سطح زمین عموماً در شهرها بیشتر از مناطق روستایی است. این پدیده که به عنوان جزیره حرارتی شهری سطحی (SUHI) شناخته می‌شود، خطر ابتلا به بیماری‌های انسانی و مرگ‌ومیر ناشی از گرما را افزایش می‌دهد (42).

طرح تحقیق

داده‌های به دست آمده از منابع مختلف، همچون تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت و هر یک با اعمال روش‌های طبقه‌بندی نظارت شده کاربری اراضی برای محدوده‌های مورد مطالعه استخراج می‌شوند و تغییرات کاربری‌ها برای هر دوره مشخص می‌شود. همچنین، با اعمال روش‌های استخراج دما، دمای سطح زمین برای دو دوره در محدوده مورد مطالعه محاسبه شد.

تصحیح اتمسفری

در مرحله نخست انجام کار، تصاویر اخذ شده لندست ۸ برای پردازش در مراحل بعد باید تحت تصحیحات اتمسفری قرار گیرند تا نتایج بهتری به دست آید. برای این پژوهش، از روش تصحیح اتمسفری FLAASH استفاده شده است.

برنامه FLAASH از معادله استاندارد تابش طیفی در سنجنده، که برای محدوده‌های طول موج خورشیدی، به‌جز محدوده حرارتی، در سطوح لامبرتی در نظر گرفته شده است، استفاده می‌کند. در زیر، معادله FLAASH ارائه شده است.

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a$$

در این معادله، L رادیانس طیفی در سنجنده بر حسب $\mu W/(cm^2 \cdot sr \cdot nm)$ ، ρ بازتابندگی سطح پیکسل، ρ_e میانگین انعکاس سطح پیکسل و محدوده اطراف آن، S آلبیدوی نیمکره اتمسفری و L_a تابش بازگشتی پراکنده‌شده از جو است. ضرایب A و B نیز وابسته به شرایط هندسی و جوی هستند که ارتباط سطحی ندارند.

برآورد دمای سطح زمین

برای انجام این تحقیق از تصاویر لندست ۸ استفاده شده است. همچنین، از نرم‌افزار ENVI ۵.۳ برای انجام تصحیح رادیومتریک تصاویر با استفاده از روش FLAASH استفاده شده است.

پس از آنکه تصاویر از لحاظ تصحیح رادیومتریک و اتمسفری آماده شدند، عملیات زیر به‌ترتیب برای دستیابی به هدف مورد نظر، یعنی برآورد دمای سطح زمین در منطقه مورد مطالعه، انجام گرفت.

بحث

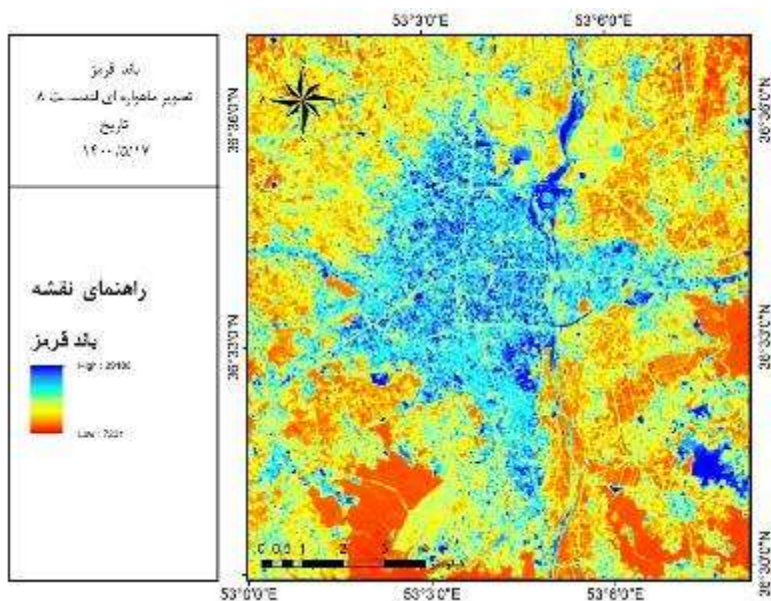
برآورد شاخص پوشش گیاهی (NDVI)

با توجه به اینکه شاخص پوشش گیاهی نقش عمده‌ای در انتقال انرژی میان زمین و اتمسفر دارد و آثار متفاوتی بر عناصر اقلیمی، از جمله دمای پیرامون خود، می‌گذارد، می‌توان آن را به‌عنوان یکی از فاکتورهای تأثیرگذار در محاسبه دمای سطح زمین (LST) در نظر گرفت. این شاخص از معروف‌ترین، ساده‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌های شناخته‌شده در زمینه مطالعات پوشش گیاهی است (43). الگوی کاربری زمین می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای محیط حرارتی شهری را شکل دهد. اگرچه مطالعات قبلی نشان داده‌اند که شدت جزیره گرمایی شهری (UHI) به‌آسانی تحت تأثیر الگوی منظر فضای سبز قرار می‌گیرد، رابطه میان الگوی فضایی مورفولوژیکی فضای سبز و شدت UHI هنوز به‌طور کامل کشف نشده است (44).

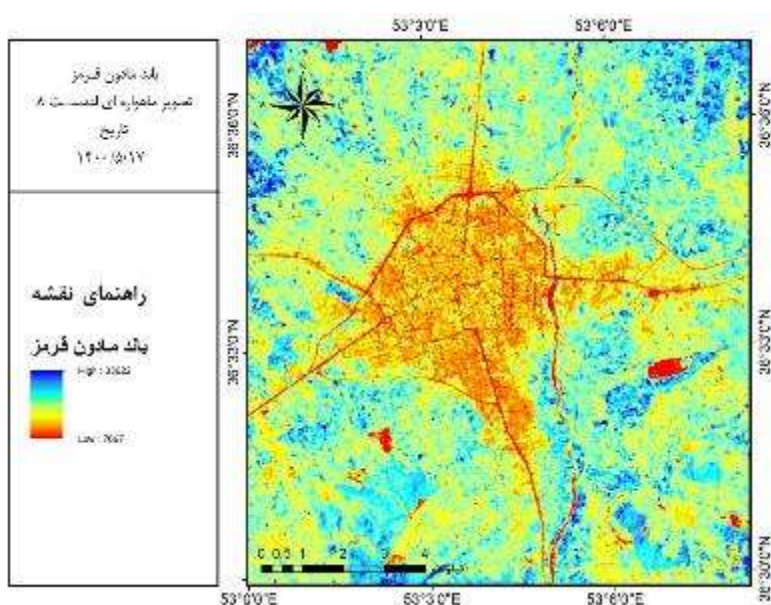
این شاخص فرایند محاسباتی ساده‌ای دارد و در مقایسه با دیگر شاخص‌ها، دارای بهترین توان دینامیکی است. این شاخص بیشترین حساسیت را به تغییرات پوشش گیاهی داشته و در برابر اثرات جوی و زمینه خاک، به‌جز در مواردی که پوشش گیاهی کم باشد، حساسیت کمتری دارد (45). گسترش مناطق شهری به‌طور مداوم جایگزین پوشش گیاهی (VC) می‌شود که انتشار کربن (CE) را تسریع می‌کند، دمای سطح زمین (LST) را افزایش می‌دهد و به گرم شدن کره زمین کمک می‌کند (46).

برای برآورد شاخص پوشش گیاهی، از باندهای قرمز (۴) و مادون قرمز (۵) تصاویر لندست استفاده شد. فرمول محاسبه شاخص پوشش گیاهی به شرح زیر

است:



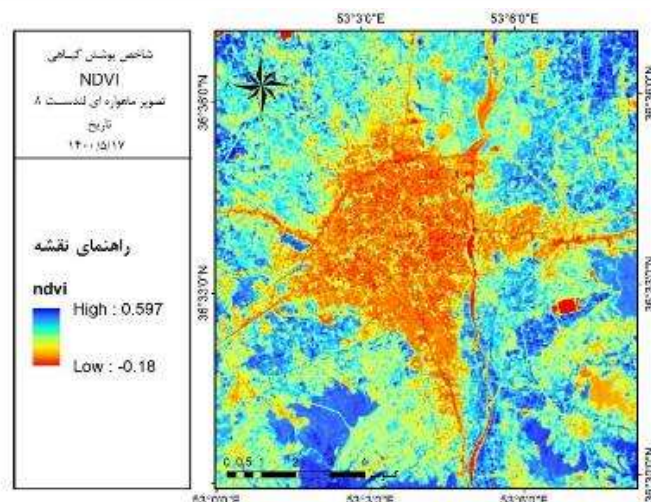
تصویر ۲- باند قرمز یا باند چهارم لندست ۸



تصویر ۳- باند مادون قرمز یا باند پنجم لندست ۸

$$NDVI = (Band - Band) / (Band + Band)$$

نتیجه حاصل از این فرمول، تصویری با دامنه بین $-1 < 0 < +1$ است.



تصویر ۴- شاخص پوشش گیاهی NDVI

برآورد ستون بخار آب (CWV)

ستون بخار آب در بهبود دقت و بازیابی دمای سطح زمین نقش مهمی ایفا می‌کند و با فرمول زیر قابل محاسبه است. در این فرمول، $C \dots C$ ضرایب ثابت به‌دست‌آمده از داده‌های شبیه‌سازی شده هستند (47).

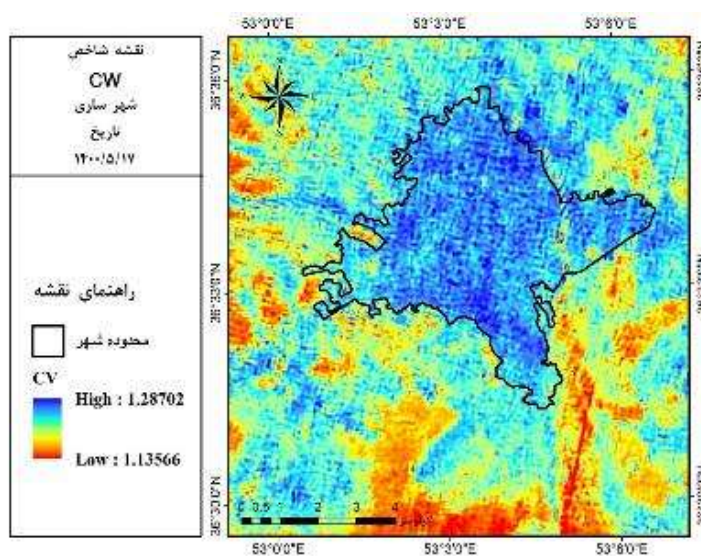
$$CWV = C + C \times (T / T) + C \times (T / T)$$

$$T / T = \text{میانگین دمای روشنایی}$$

$$C = -9.674$$

$$C = 0.653$$

$$C = 9.087$$

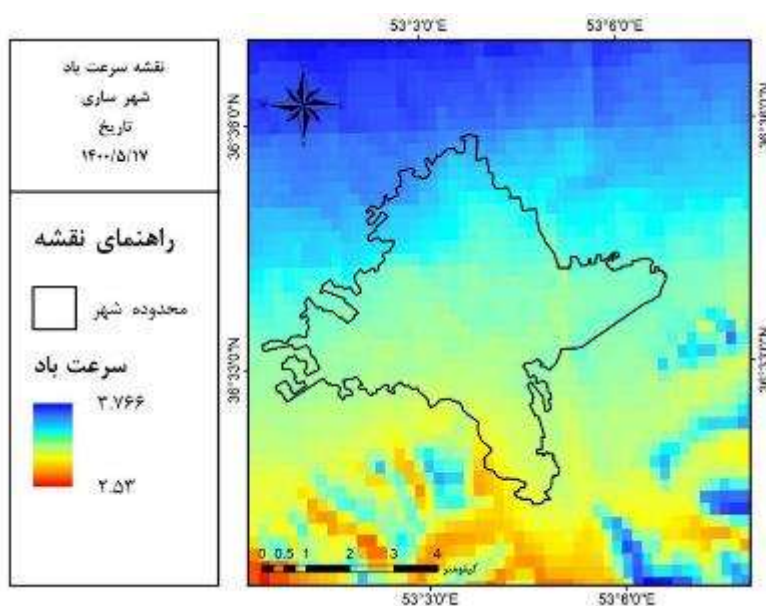


تصویر ۵- شاخص CWV

محاسبه سرعت و قدرت باد

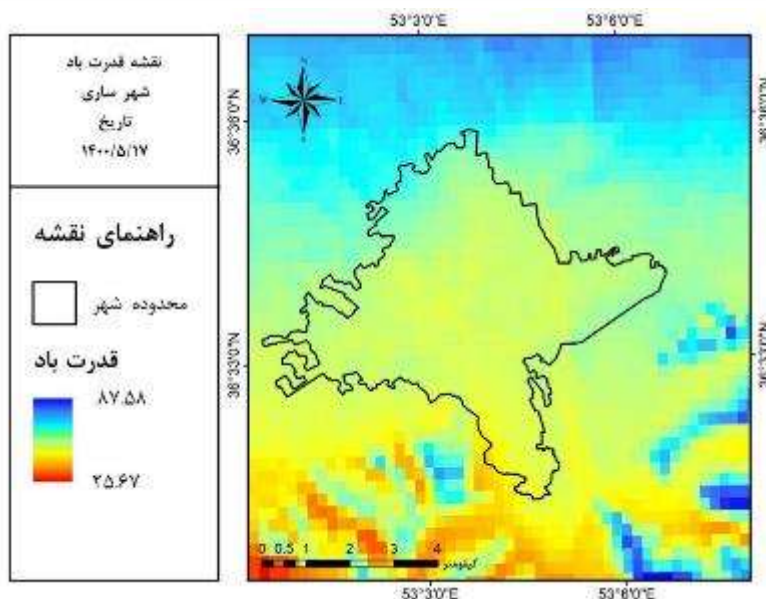
اثر خنک‌کننده حرکت هوا به‌طور گسترده به‌عنوان یک معیار کارآمد انرژی برای مدیریت محیط حرارتی در حالت خنک‌کنندگی شناخته شده است (48). برای محاسبه نقشه سرعت باد، از روش درون‌یابی فاصله معکوس وزن‌دار (IDW) استفاده شد. درون‌یابی در این شیوه به این ترتیب برآورد می‌شود که محدوده مورد نظر به ماتریسی با سلول‌های هم‌اندازه تبدیل می‌شود. مختصات مکانی این ماتریس مشخص است و دارای واحد اندازه‌گیری است؛ برای مثال، دارای سلول‌های 50×50 متری است. در این شبکه، مقدار متغیر در برخی سلول‌ها معلوم یا اندازه‌گیری شده است و در سایر سلول‌ها این میزان نامعلوم است. سلول‌هایی که ارزش آن‌ها نامعلوم است، با استفاده از سلول‌های اطراف در یک شعاع مشخص و براساس فرمول زیر برآورد می‌شوند.

در این فرمول، $Z(s_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده در موقعیت i th و λ_i وزن مقدار اندازه‌گیری شده در موقعیت i th است. همچنین، s موقعیت پیش‌بینی و N تعداد نقاط اندازه‌گیری شده یا معلوم است. λ_i تابعی از فاصله میان آن‌ها است؛ به عبارت دیگر، هرچه فاصله کمتر باشد، تأثیر نقطه مجهول بیشتر است. بنابراین، معکوس فواصل میان آن‌ها به‌عنوان وزن در مدل به کار می‌رود. ایستگاه‌های مورد استفاده شامل ایستگاه‌های ساری، قائم‌شهر، بهشهر و نکا هستند. نقشه محدوده مورد مطالعه، سرعت باد را در تاریخ ۸، ۲۰۲۱ August نشان می‌دهد که بین ۲.۵ تا ۳.۷ مایل بر ساعت است.



تصویر ۶- نقشه سرعت باد

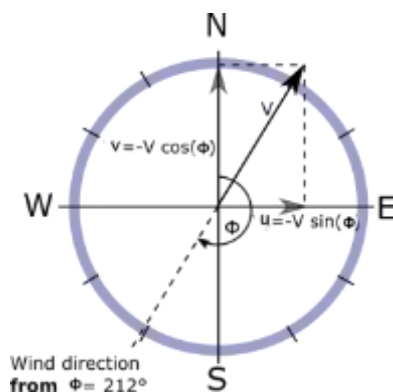
تصویر زیر قدرت باد را بین ۲۶ تا ۷۹ وات بر مترمربع (W/m^2) نشان می‌دهد.



تصویر ۷- نقشه قدرت باد

لایه جهت باد

جهت باد هواشناسی، جهتی است که باد از آن می‌وزد.



تصویر ۸- جهت باد هواشناسی

این نقشه با استفاده از فرمول‌های تقریبی محاسبه جهت باد در محیط ArcGIS ایجاد شد که به شرح زیر است.

جهت باد در جهت عقربه‌های ساعت افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که باد شمالی صفر درجه، باد شرقی ۹۰ درجه، باد جنوبی ۱۸۰ درجه و باد غربی ۲۷۰ درجه است. از آنجایی که مثلثات از یک سیستم مختصات قطبی استفاده می‌کند که در آن صفر درجه در امتداد محور X قرار دارد، تعریف زاویه هواشناسی می‌تواند در محاسبات زاویه‌ای معمولی ایجاد اشتباه کند. با این حال، با توجه به زاویه باد هواشناسی، محاسبه اجزای باد، یعنی u و v ، همچنان آسان است. فرض کنید Φ زاویه جهت باد هواشناسی باشد؛ در این صورت، معادلات زیر را می‌توان اعمال کرد:

$$u = -|\vec{V}| \sin \phi$$

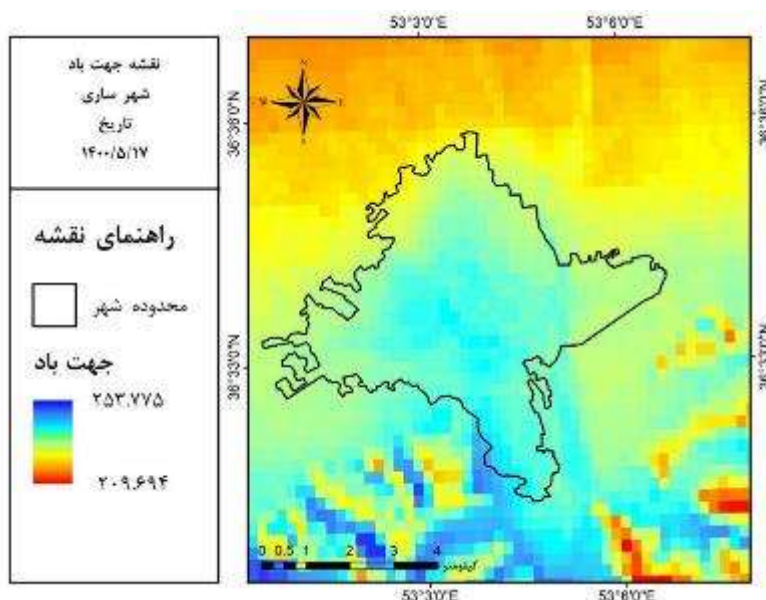
$$v = -|\vec{V}| \cos \phi$$

$$|\vec{V}| = \sqrt{u^2 + v^2}$$

توجه داشته باشید که Φ باید بر حسب رادیان باشد. چنانچه Φ بر حسب درجه باشد، پیش از استفاده از توابع مثلثاتی، زاویه را در $\pi/180$ ضرب کنید. همچنین، با استفاده از تابع atan2 می‌توان Φ را از u و v محاسبه کرد.

$$\phi = \text{mod} \left(180 + \frac{180}{\pi} \text{atan2}(v, u), 360 \right)$$

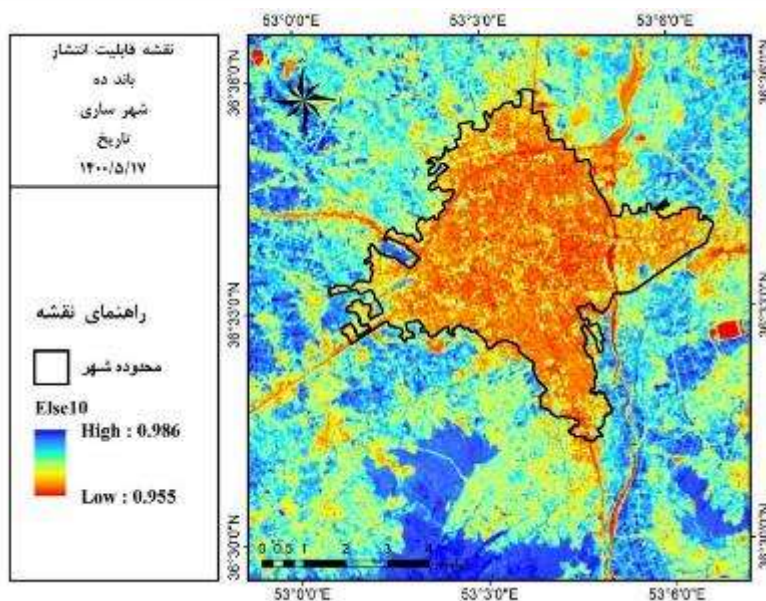
آرگومان‌های atan2 براساس نوع نرم‌افزار متفاوت هستند و در برخی برنامه‌ها، آرگومان‌های (v, u) تغییر می‌کنند. نقشه مذکور به محاسبه جهت باد در تاریخ ۸، ۲۰۲۱ August می‌پردازد. جهت باد در محدوده مورد مطالعه بین ۲۰۹ تا ۲۵۴ درجه است.



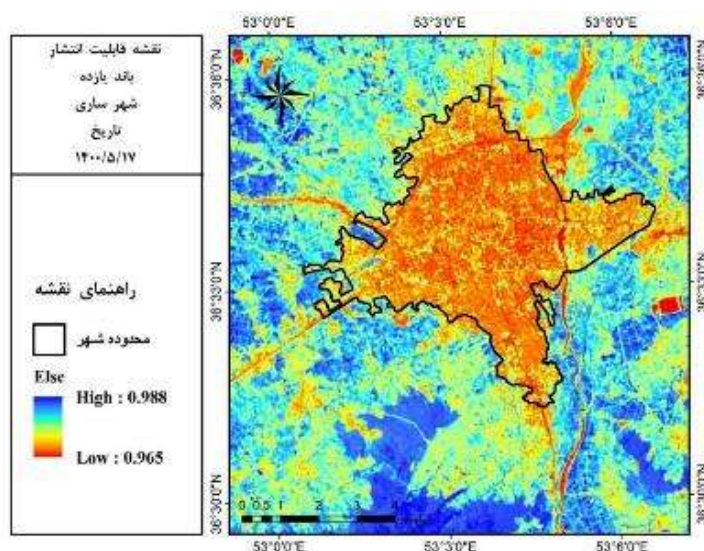
تصویر ۹- نقشه جهت باد در شهر ساری

برآورد قابلیت انتشار سطح زمین (Land Surface Emissivity)

یکی دیگر از معیارهای لازم و ضروری برای محاسبه دمای سطح زمین، برآورد قابلیت انتشار سطح زمین است. این معیار به صورت جداگانه در هر دو باند حرارتی ماهواره لندست ۸ محاسبه شد.



تصویر ۱۰- شاخص LSE باند ۱۰



تصویر ۱۱- شاخص LSE باند ۱۱

رابطه محاسبه LSE به صورت زیر است:

$$LSE = E (1 - FVC) + E \times FVC$$

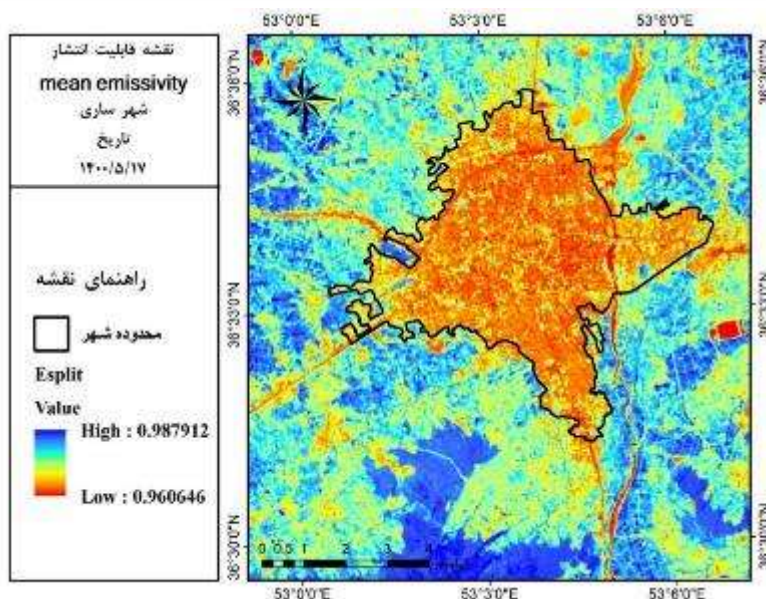
$LSE =$ قابلیت انتشار سطح زمین

$E =$ انتشار گیاه و خاک برای باندهای حرارتی، طبق جدول شماره ۱

$FVC =$ نسبت پوشش گیاهی

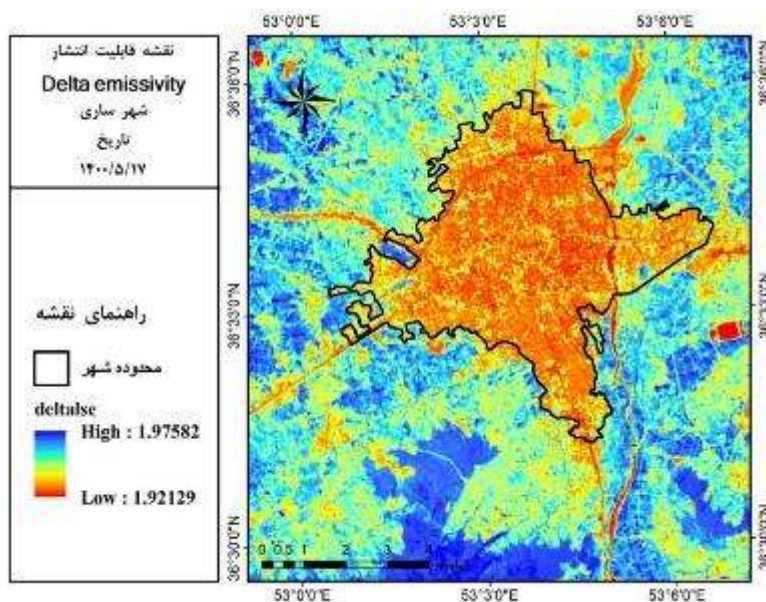
پس از محاسبه LSE برای هر یک از باندهای حرارتی، اختلاف و میانگین این دو باند نیز محاسبه شد:

$$Mean E = (E - E) / 2$$



تصویر ۱۲- شاخص میانگین LSE

$$\Delta E = (E - E)$$



تصویر ۱۳- شاخص اختلاف LSE باندهای ۱۰ و ۱۱

$$\text{LSE میانگین} = \text{Mean } E$$

$$\Delta E = \text{اختلاف LSE برای باندهای ۱۰ و ۱۱}$$

با این حال، کاربرد باندهای حرارتی بیشتر در این مراحل نمود پیدا می‌کند که در ابتدا نیازمند محاسبه رادیانس باندهای حرارتی تصویر لندست ۸ است. برای

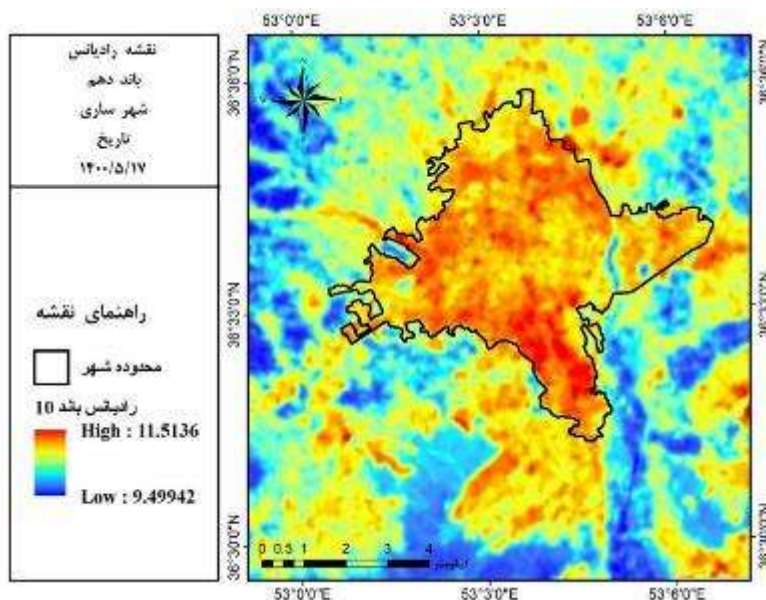
این منظور، می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد:

$$M \times Q + A =$$

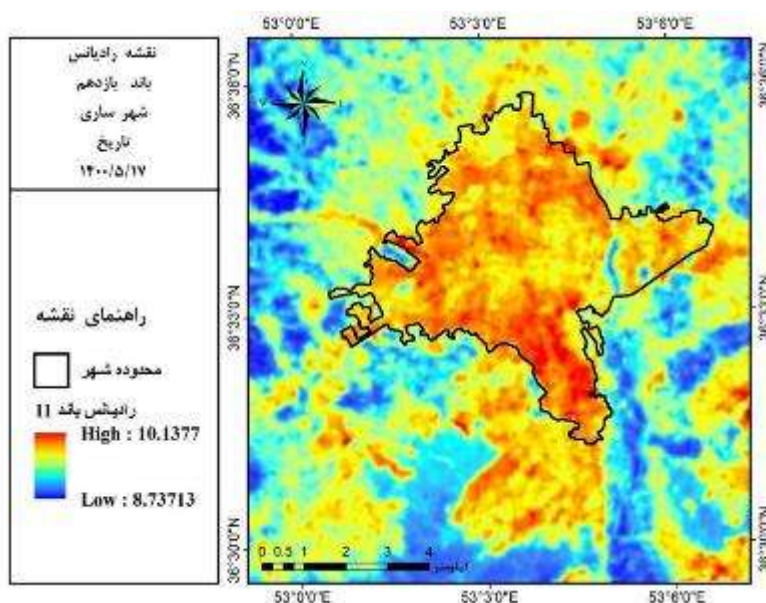
M = radiance_mult_band_۱۰/۱۱

Q = باندهای ۱۰ و ۱۱

A = radiance_add_band_۱۰/۱۱



تصویر ۱۴- رادیانس باند ۱۱



تصویر ۱۵- رادیانس باند ۱۲

برآورد دمای روشنایی ماهواره (Brightness Temperature)

داده‌های باند حرارتی را می‌توان با استفاده از ثابت حرارتی موجود در فایل فراداده، از طیف درخشندگی به دمای روشنایی تبدیل کرد. این امر با فرمول زیر

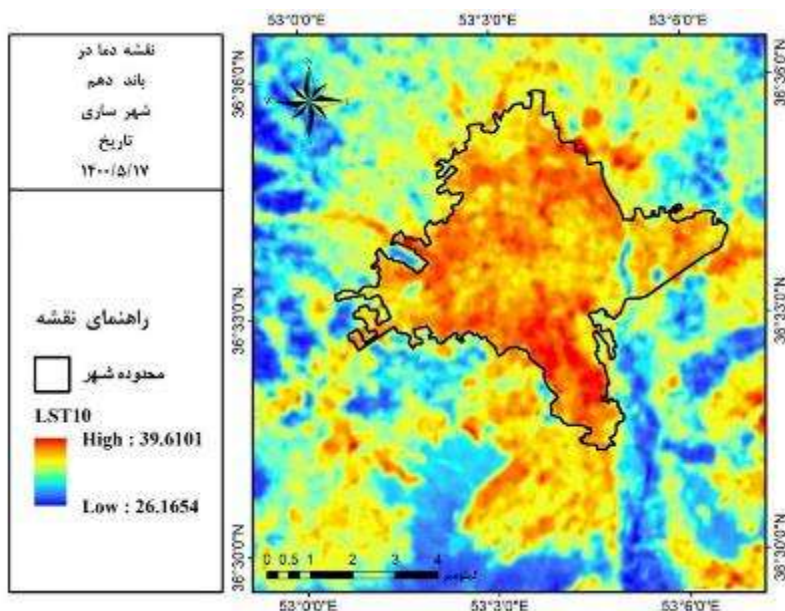
محاسبه می‌شود:

$$T = K / \ln (K / L + 1) - 272.15$$

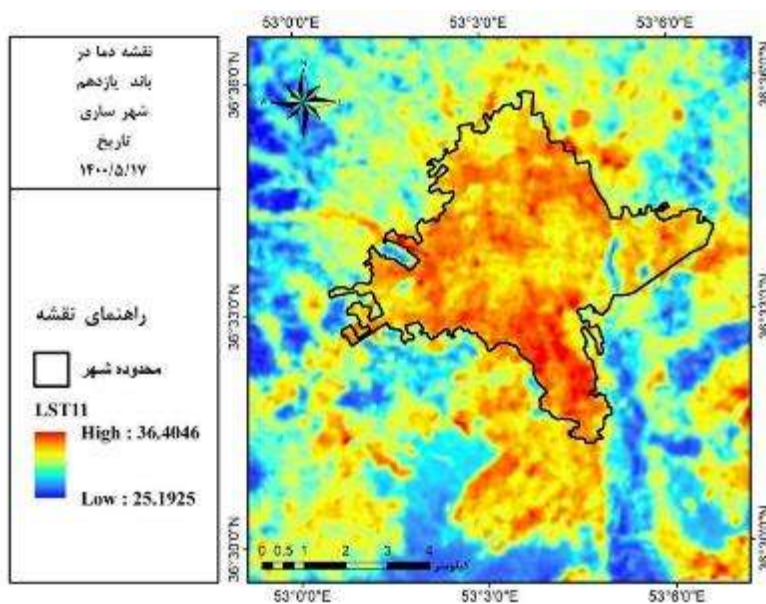
T = دمای روشنایی ماهواره بر حسب کلونین

$K - K$ = ثابت حرارتی برای هر دو باند حرارتی موجود در فراداده

L = درخشندگی بالای جو



تصویر ۱۶- تبدیل رادیانس به دما در باند ۱۰



تصویر ۱۷- تبدیل رادیانس به دما در باند ۱۱

الگوریتم Split-Window

این الگوریتم از جمله روش‌های مهم در برآورد دمای سطح زمین محسوب می‌شود و در مقایسه با سایر روش‌ها، از دقت بهتری برای محاسبه دمای سطح زمین برخوردار است. یکی از ویژگی‌های مهم این الگوریتم، حذف اثرات جوی است. با توجه به اینکه این الگوریتم به اطلاعات دقیق درباره پروفیل جوی در زمان اخذ تصاویر ماهواره‌ای نیاز ندارد، به‌طور گسترده برای بازیابی LST از چندین سنسور استفاده می‌شود.

۱- سنسور چندطیفی Multi Spectral

۲- سنسور حرارتی TIRS

با توجه به در دسترس نبودن یک پایگاه داده برای اندازه‌گیری‌های LST با لندست ۸، ضرایب C از طریق شبیه‌سازی با اعداد مختلفی از شرایط اتمسفری و سطح به دست آمدند.

جدول ۱: ضرایب الگوریتم Split-Window

Constant coefficients	C	C	C	C	C	C	C6
Values	-0.268	1.378	0.183	54.3	-2.238	-129.2	16.4

با به‌دست آمدن ضرایب فوق، تمامی مجهولات موجود در فرمول محاسبه دمای سطح زمین مشخص شدند و با جای‌گذاری مقادیر، دمای سطح زمین در محدوده مورد مطالعه به دست آمد.

$$LST = TB + C (TB - TB) + C (TB - TB) + C + (C + C W)(1 - \epsilon) + (C + C W) \Delta \epsilon$$

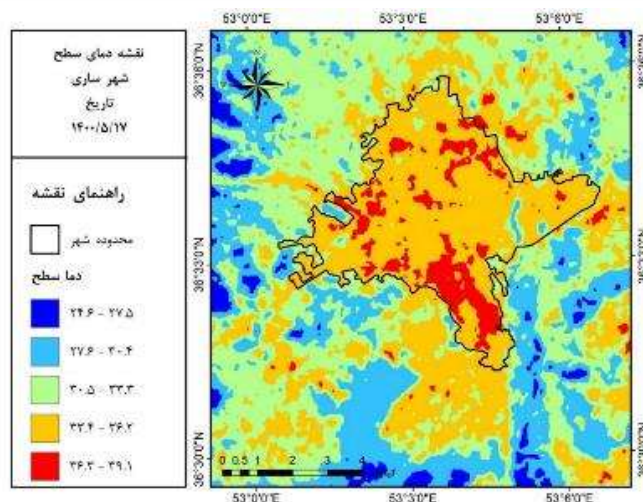
$$TB - TB = \text{دمای روشنایی}$$

$$C \dots C = \text{ضرایب الگوریتم}$$

$$W = \text{ستون بخار آب}$$

$$\Delta \epsilon = \text{اختلاف LSE}$$

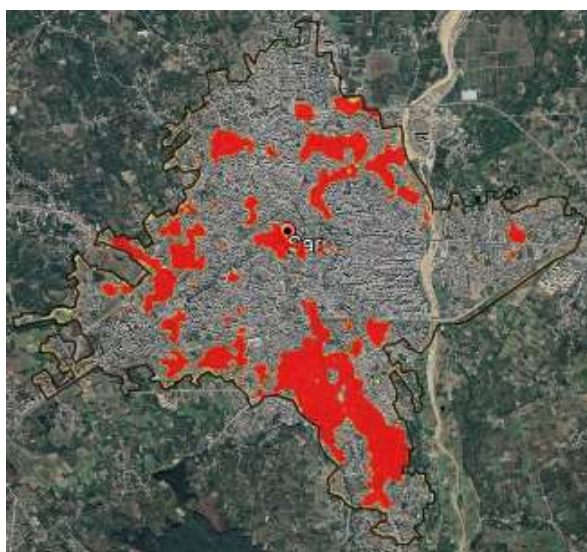
همان‌طور که گفته شد، روش الگوریتم SW از روش‌های مناسب برای تعیین دمای سطح زمین (LST) است. برای دستیابی به این هدف، از معیارهای مختلفی استفاده شد که هر یک از این معیارها با انجام روابط ریاضی محاسبه شدند و با جای‌گذاری در فرمول محاسبه دمای سطح زمین، دمای منطقه مورد مطالعه به دست آمد. برای تابستان و در تاریخ August ۸، ۲۰۲۱، مقادیر دما بین ۲۴ تا ۴۰ درجه در نوسان بوده است.



تصویر ۱۸- نقشه نهایی دمای سطح شهر ساری، با اختلاف دمای ۶ درجه‌ای در داخل و بیرون شهر

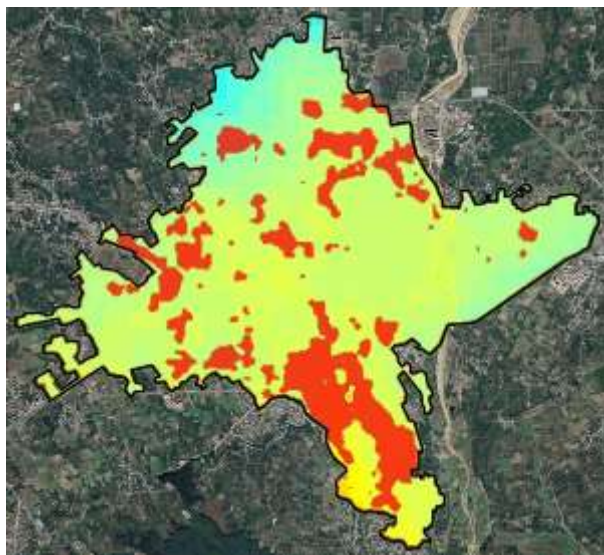
نتیجه‌گیری

تضاد میان گسترش شهری و جزایر گرمایی شهری (UHIs)، به دلیل شهرنشینی شتابان، به‌طور قابل توجهی در حال افزایش است و کاهش اثر UHI ضروری است (49). طی چهار دهه، شهر ساری، به‌عنوان بزرگ‌ترین شهر استان مازندران، شاهد تغییرات قابل توجهی در ساختار شهری بوده است. این تغییرات هم شامل قسمت‌های قدیمی شهر و هم دربرگیرنده محلات نوساز شهر بوده است که بیشتر آن‌ها به‌صورت سکونتگاه‌های حاشیه‌ای شروع به ساخت‌وساز کردند. تغییرات قوانین ساختمان‌سازی در مرحله اجرا و حتی آغاز ساختمان‌سازی بدون دریافت مجوز در بیشتر محلات حاشیه شهر، مورفولوژی شهری این شهر کهن ایران را دگرگون کرده است. مهاجرت روستاییان کوهستان‌های اطراف به نخستین مکان اتصال به حریم شهر، این مناطق حاشیه‌ای را به وجود آورده است که هم‌اکنون از مناطق پرجمعیت این شهر به شمار می‌روند. ویژگی‌های مورفولوژی شهری در این نقاط شامل ساختمان‌های کم‌ارتفاع با تراکم بالا، خیابان‌ها و کوچه‌های باریک، نبود پوشش گیاهی، نبود فضای باز شهری و سطح اشغال زیاد ساختمان‌ها است.

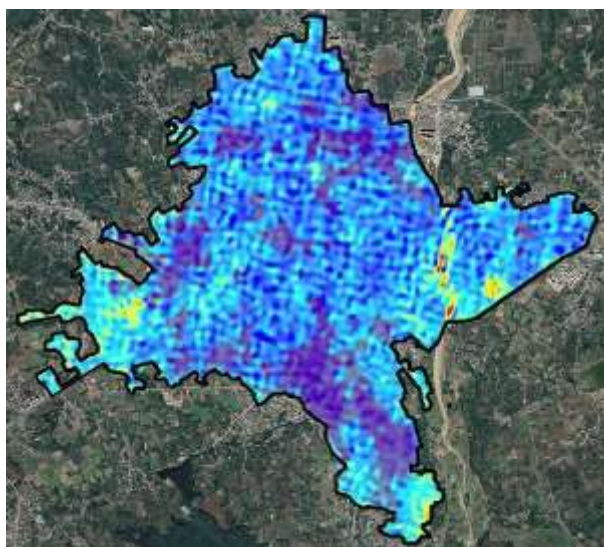


تصویر ۱۹- نقشه نقاط جزایر گرمایی در شهر ساری، با اختلاف ۶ درجه

در تصویر ۱۹، مکان‌هایی که اختلاف دمایی ۶ درجه‌ای با سایر مکان‌های شهری دارند، با تطبیق دو تصویر و با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. از این امر می‌توان نتیجه گرفت که توسعه شهر ساری در بخش‌های دارای ساختمان‌های کم‌ارتفاع با تراکم بالا و خیابان‌ها و کوچه‌های باریک، تأثیر بیشتری بر افزایش دما داشته است.



تصویر ۲۰- نقشه ارتباط قدرت باد و جزایر گرمایی در شهر ساری



تصویر ۲۱- نقشه ارتباط رطوبت و جزایر گرمایی در شهر ساری



تصویر ۲۲- بافت متراکم بخش جزایر گرمایی

از محاسبات گسترده انجام شده در این مقاله به دست آمده است که شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در شهر ساری تقریباً به صورت یکسان توزیع شده و تأثیر آن بر کاهش دمای محیط تقریباً یکسان است. در شاخص رطوبت نیز توزیع آن در شهر ساری نشان می‌دهد که محلات دارای رطوبت بیشتر، دمای بیشتری نیز دارند و رطوبت رابطه مستقیمی با افزایش دما دارد. قدرت باد نیز نمی‌تواند بر کاهش رطوبت تأثیر بگذارد. از این رو، می‌توان به این نتیجه رسید که قدرت باد در شهر ساری نقش مستقیمی در کاهش جزایر گرمایی دارد؛ اما در مکان‌های مشابه از نظر قدرت باد، مورفولوژی شهری عامل تعیین‌کننده دمای محیط است و تا زمانی که مورفولوژی شهری اجازه ندهد، قدرت باد به تنهایی نمی‌تواند باعث کاهش دمای محیط در نقاط دارای جزایر گرمایی شود. مورفولوژی شهری عامل اصلی ایجاد و از بین رفتن جزایر گرمایی شهری است. قدرت باد به تنهایی نمی‌تواند مانع تشکیل جزایر گرمایی شود و فقط شاخصی برای کاهش دمای محیط در شرایط مساعد مورفولوژی شهری است. در نتیجه، با اصلاح مورفولوژی شهری، که اساسی‌ترین شاخص تشکیل جزایر گرمایی است، می‌توان بر تشکیل جزایر گرمایی شهری غلبه کرد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که در طی مراحل این پژوهش به ما یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

موازن اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازن و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

خلاصه مبسوط

Extended Abstract

Rapid urbanization, population concentration, and the physical expansion of cities have substantially altered urban climatic conditions and increased demand for energy, water, infrastructure, and environmental resources. Urban areas currently account for a considerable proportion of global energy consumption and greenhouse gas emissions, mainly because of the concentration of residential buildings, transportation systems, industrial activities, and service functions within limited geographical spaces (2, 4). Although urban growth can promote economic development and improve access to services, it can also generate significant environmental consequences, including local climate change, air pollution, surface warming, increased energy consumption, and the deterioration of human thermal comfort (6, 31). One of the most important manifestations of urban climatic transformation is the urban heat island phenomenon, in which urban areas exhibit higher surface and air temperatures than their surrounding rural or less densely developed areas. The urban heat island effect is influenced by the replacement of natural surfaces with buildings, roads, asphalt, and other impervious materials, as well as by anthropogenic heat emissions, reduced evapotranspiration, limited vegetation, and restricted atmospheric circulation (10, 50). These changes can increase cooling energy demand, intensify thermal discomfort, contribute to air pollution, and increase heat-related health risks (8, 11, 16). Consequently, understanding the spatial and physical determinants of urban heat accumulation has become an essential requirement for climate-responsive urban management, sustainable planning, and the development of effective mitigation strategies.

Urban morphology is one of the principal factors affecting the formation, spatial distribution, and intensity of urban heat islands. The arrangement, density, height, orientation, and spacing of buildings determine the amount of solar radiation received and stored by urban surfaces, the capacity of the urban fabric to release longwave radiation, the degree of shading, and the movement of air through streets and open spaces (39, 40). High-density urban blocks, narrow streets, low sky-view factors, limited open spaces, and continuous building coverage can restrict wind movement and retain heat within urban canyons, particularly during warm seasons. Conversely, appropriate building spacing, height variation, vegetation, permeable surfaces, and connected open spaces can support ventilation and reduce thermal accumulation (27, 28). The relationship between urban form and heat is therefore not limited to surface characteristics, because urban geometry also determines whether prevailing winds can penetrate the built environment and remove accumulated heat. Research has shown that wind flow in urban areas is strongly modified by the configuration of building blocks and that the cooling effect of air movement is dependent on the degree to which the physical structure of the city permits ventilation (26, 48). Vegetation is also important because it reduces land surface temperature through shading and evapotranspiration, although its effectiveness varies according to spatial distribution, density, and morphological arrangement (44, 46). Accordingly, the combined analysis of land surface temperature,

vegetation, moisture, wind speed, wind power, wind direction, and urban form can provide a more comprehensive explanation of urban heat island development than the isolated assessment of any single climatic or physical variable.

The present study focused on Sari, the largest city and administrative center of Mazandaran Province in northern Iran. Sari is located in a temperate and humid climatic region near the Caspian Sea and at the foothills of the Alborz mountain range. During recent decades, the city has experienced substantial population growth, physical expansion, informal peripheral development, and significant changes in its urban structure. The transformation has affected both older neighborhoods and newly constructed peripheral districts, many of which initially developed through unplanned or weakly regulated construction. These areas are commonly characterized by low-rise buildings, high building density, narrow streets and alleys, high plot coverage, limited vegetation, insufficient urban open spaces, and inadequate consideration of local climatic conditions and natural ventilation. Previous studies conducted in Sari have shown that urban growth patterns, changes in land use, and spatial development have contributed to the intensification and redistribution of urban heat islands (17, 18). The city therefore provides an appropriate context for examining how urban morphology interacts with wind conditions in the formation of localized thermal hotspots. Particular attention was given to whether wind speed and wind power could independently reduce urban temperatures or whether their effectiveness depended on the physical permeability of the urban fabric. The research was based on the assumption that areas exposed to similar wind conditions may still exhibit different land surface temperatures because of differences in building density, street width, vegetation, surface coverage, and the capacity of the built environment to facilitate or obstruct airflow.

The study used a quantitative spatial-analytical design based on satellite remote sensing, geographic information systems, climatic data, and urban morphological interpretation. Landsat 8 imagery acquired on August 8, 2021, which represented one of the hottest days of the year in Sari, was used as the principal remote-sensing dataset. The imagery was subjected to radiometric and atmospheric correction using the FLAASH method in ENVI 5.3 to improve the accuracy of subsequent calculations. Land surface temperature was estimated through the split-window algorithm using the thermal infrared bands of Landsat 8. This process involved converting digital numbers to spectral radiance, calculating satellite brightness temperature, estimating land surface emissivity, determining vegetation cover proportions, calculating the difference and mean emissivity of the thermal bands, and incorporating atmospheric water vapor information. The Normalized Difference Vegetation Index was calculated using the red and near-infrared bands to evaluate the spatial distribution of vegetation and its potential contribution to surface cooling. NDVI is widely used in thermal remote-sensing studies because of its sensitivity to vegetation density and its applicability in estimating surface emissivity and temperature variations (43, 47). Column water vapor was also calculated to improve the accuracy of land surface temperature retrieval. Wind-speed values derived from meteorological stations in Sari, Qaemshahr, Behshahr, and Neka were spatially interpolated using the inverse distance weighting method. Wind power and meteorological wind direction were subsequently calculated, mapped, and compared with the spatial distribution of land surface temperature and urban heat island locations. The integration of these layers enabled the identification of areas where similar climatic conditions produced different thermal outcomes because of variations in urban morphology.

The results indicated that land surface temperature across the study area ranged approximately from 24°C to 40°C, with a temperature difference of about 6°C between several urban hotspots and surrounding areas. The most intense urban heat island locations were concentrated in neighborhoods characterized by compact low-rise development, narrow passageways, limited vegetation, inadequate open space, and extensive building coverage. The NDVI results showed that vegetation was distributed relatively uniformly across large portions of Sari; therefore, its cooling effect did not vary sufficiently to explain the most pronounced temperature differences. Although vegetation is generally associated with lower surface temperatures and the

mitigation of urban heat islands (34, 38), the relatively similar spatial pattern of vegetation in the study area suggested that urban morphology exerted a stronger influence on localized thermal conditions. The moisture analysis also showed that some neighborhoods with higher moisture values experienced higher temperatures, indicating that moisture alone did not produce an effective cooling outcome under the prevailing climatic and morphological conditions. Wind-speed values ranged from approximately 2.5 to 3.7 miles per hour, while wind power ranged from approximately 26 to 79 W/m², and wind direction varied between 209° and 254°. However, comparison of the wind layers with the surface-temperature map revealed that locations exposed to similar wind strength did not necessarily exhibit similar temperatures. In areas where dense buildings and narrow streets obstructed airflow, wind was unable to remove accumulated heat effectively. This finding supports the argument that the thermal benefits of wind movement depend on the spatial configuration and ventilation capacity of the built environment rather than merely on measured wind speed (28, 29).

The study concludes that urban morphology is the most decisive factor governing the formation and persistence of urban heat islands in Sari, while wind acts primarily as a secondary cooling mechanism whose effectiveness depends on favorable physical conditions. Wind strength alone cannot prevent urban heat island formation when the urban fabric is compact, poorly ventilated, and dominated by narrow streets, high building coverage, limited vegetation, and insufficient open space. The findings demonstrate that neighborhoods exposed to comparable wind conditions may experience substantially different temperatures because their morphological structures differ in the degree to which they permit air circulation and heat dissipation. Therefore, urban heat mitigation in Sari requires more than increasing vegetation or relying on natural wind; it requires the systematic reform of urban form. Planning measures should include controlling building density, reducing excessive plot coverage, widening critical ventilation corridors, preserving connected open spaces, improving building spacing, introducing height variation, preventing unregulated peripheral development, and aligning street orientation with prevailing wind directions. The integration of climate-responsive urban design principles into municipal regulations, land-use planning, redevelopment programs, and building-permit procedures can substantially improve thermal comfort and environmental quality. Overall, the research demonstrates that correcting urban morphology provides the most effective foundation for reducing urban heat island intensity, while wind can contribute to cooling only when the spatial structure of the city allows it to penetrate, circulate, and remove accumulated heat from the urban environment.

References

1. Manzour D, Majed V. Energy Planning Methodology. Iranian Energy Magazine. 2011;3:75-95.
2. Grubler A. Urban Energy Systems. Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future. Cambridge, UK; New York, NY; Laxenburg, Austria: Cambridge University Press and International Institute for Applied Systems Analysis; 2012. p. 1307-400.
3. Mitchell G. Urban Development, Form and Energy Use in Buildings: A Review for the Solutions Project. Solutions and EPSRC Consortium, School of Geography and Institute for Transport Studies, University of Leeds; 2005.
4. Protocol GHG. GHG Protocol for Cities. Greenhouse Gas Protocol. 2015.
5. Ward IC. What Are the Energy and Power Consumption Patterns of Different Types of Built Environment? Energy Policy. 2008;36:4622-9.
6. Xu H, Ding F, Wen X. Urban Expansion and Heat Island Dynamics in the Quanzhou Region, China. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2009;2:74-9.
7. Kleerekoper L, van Esch M, Salcedo TB. How to Make a City Climateproof, Addressing the Urban Heat Island Effect. Resources, Conservation and Recycling. 2012;64:30-8.
8. Akbari H. Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation. Lawrence Berkeley National Laboratory; 2005 2005/08/23.
9. Guhathakurta S, Gober P. The Impact of the Phoenix Urban Heat Island on Residential Water Use. Journal of the American Planning Association. 2007;73:317-29.
10. Almusaed A. The Urban Heat Island Phenomenon upon Urban Components. Biophilic and Bioclimatic Architecture: Springer London; 2011. p. 139-50.

11. Rosenfeld AH, Akbari H, Romm JJ, Pomerantz M. Cool Communities: Strategies for Heat Island Mitigation and Smog Reduction. *Energy and Buildings*. 1998;28(1):51-62.
12. Oke TR. The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects. Netherlands: Springer; 1995.
13. Rose AL, Devadas MD, editors. Analysis of Land Surface Temperature and Land Use/Land Cover Types Using Remote Sensing Imagery: A Case in Chennai City, India. The Seventh International Conference on Urban Climate; 2009 2009/06/29; Yokohama, Japan.
14. Chen Q, Ren J, Li Z, Ni C, editors. Urban Heat Island Effect Research in Chengdu City Based on MODIS Data. Proceedings of the 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, ICBBE 2009; 2009 2009/06/11; Beijing, China.
15. Gabriel KMA, Endlicher WR. Urban and Rural Mortality Rates during Heat Waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution*. 2011;159:2044-50.
16. Tan J, Kalkstein A, Yuan D, Zhen X, Song G, Li L, et al. The Urban Heat Island and Its Impact on Heat Waves and Human Health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*. 2010;54(1):75-84.
17. Mesri Alamdari P, Rasouli SH. Analysis of the Impact of Urban Climate Change on Spatial Population Distribution with Emphasis on Urban Heat Islands: A Case Study of Sari. *Geography and Planning*. 2021;25(77):231-43.
18. Bakhshi A, Rasouli SH, Rahimi N. Investigating the Role of Urban Growth Patterns in Creating Urban Heat Islands: Case Study of Sari City. *Urban Environmental Planning and Development*. 2022;2(6):77-94.
19. Oxizidis S, Dudek AV, Papadopoulos AM. A Computational Method to Assess the Impact of Urban Climate on Buildings Using Modeled Climatic Data. *Energy and Buildings*. 2008;40(3):215-23.
20. Hwang RL, Lin CY, Huang KT. Spatial and Temporal Analysis of Urban Heat Island and Global Warming on Residential Thermal Comfort and Cooling Energy in Taiwan. *Energy and Buildings*. 2016.
21. Agency USEP. Heat Island Impacts. 2012.
22. Devanathan P, Devanathan K. Heat Island Effects. In: Sabnis GM, editor. *Green Building with Concrete: Sustainable Design and Construction*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2011. p. 175-226.
23. Hajipour K, Foruzan N. Investigating the Effect of City Form on Functional Energy Consumption in the Residential Sector: Case Study of Shiraz City. *Honar-ha-ye-Ziba Memari-va-Shahrsazi*. 2014;19(4).
24. Marique AF, Reiter S. A Method to Evaluate the Energy Consumption of Suburban Neighborhoods. *HVAC&R Research*. 2011;18(1-2):88-99.
25. Troy P, Holloway D, Pullen S, Raymond B. Embodied and Operational Energy Consumption in the City. *Urban Policy and Research*. 2010;21(1):9-44.
26. Zhou Y, Zhuang Z, Yang F, Yu Y, Xie X, editors. Urban Morphology on Heat Island and Building Energy Consumption. 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017; 2017 2017/10/19; Jinan, China.
27. You W, Shen J, Ding W, editors. Improving Wind Environment of Residential Neighborhoods by Understanding the Relationship between Building Layouts and Ventilation Efficiency. The 8th International Conference on Applied Energy; 2017.
28. Ramponi R, Gaetani I, Angelotti A. Influence of the Urban Environment on the Effectiveness of Natural Night-Ventilation of an Office Building. *Energy and Buildings*. 2014;78:25-34.
29. Yin C, Yuan M, Lu Y, Huang Y, Liu Y. Effects of Urban Form on the Urban Heat Island Effect Based on Spatial Regression Model. *Science of the Total Environment*. 2018;634:696-704.
30. Liu Y, Wen C, Liu X. China's Food Security Soiled by Contamination. *Science*. 2013;339(6126):1382-3.
31. Parmesan C, Yohe G. A Globally Coherent Fingerprint of Climate Change Impacts across Natural Systems. *Nature*. 2003;421(6918):37.
32. Yuan M, Song Y, Huang Y, Hong S, Huang L. Exploring the Association between Urban Form and Air Quality in China. *Journal of Planning Education and Research*. 2017(24):0739456X1771151.
33. Evans GW, Carrère S. Traffic Congestion, Perceived Control, and Psychophysiological Stress among Urban Bus Drivers. *Journal of Applied Psychology*. 1991;76(5):658-63.
34. Li XX, Norford LK. Evaluation of Cool Roof and Vegetation in Mitigating Urban Heat Island in a Tropical City, Singapore. *Urban Climate*. 2016;16:59-74.
35. Lowe SA. An Energy and Mortality Impact Assessment of the Urban Heat Island in the US. *Environmental Impact Assessment Review*. 2016;56:139-44.
36. Chang CR, Li MH, Chang SD. A Preliminary Study on the Local Cool-Island Intensity of Taipei City Parks. *Landscape and Urban Planning*. 2007;80(4):386-95.
37. Ellis FP, Nelson F, Pincus L. Mortality during Heat Waves in New York City July, 1972 and August and September, 1973. *Environmental Research*. 1975;10(1):1-13.
38. Wang X, Li H, Sodoudi S. The Effectiveness of Cool and Green Roofs in Mitigating Urban Heat Island and Improving Human Thermal Comfort. *Building and Environment*. 2022;217:109082.
39. Banerjee S, Grace Ching NY, Sin Kang Y, Dzyuban Y, Crank PJ, Xin Yi R, et al. Analysing Impacts of Urban Morphological Variables and Density on Outdoor Microclimate for Tropical Cities: A Review and a Framework Proposal for Future Research Directions. *Building and Environment*. 2022;225.
40. Wu Y, Hou H, Wang R, Murayama Y, Wang L, Hu T. Effects of Landscape Patterns on the Morphological Evolution of Surface Urban Heat Island in Hangzhou during 2000-2020. *Sustainable Cities and Society*. 2022;79.
41. Wu W-B, Yu Z-W, Ma J, Zhao B. Quantifying the Influence of 2D and 3D Urban Morphology on the Thermal Environment across Climatic Zones. *Landscape and Urban Planning*. 2022;226.

42. Mentaschi L, Duveiller G, Zulian G, Corbane C, Pesaresi M, Maes J, et al. Global Long-Term Mapping of Surface Temperature Shows Intensified Intra-City Urban Heat Island Extremes. *Global Environmental Change*. 2022;72.
43. Kasa. Thermal Remote Sensing of Land Surface Temperature from Satellites: Current Status and Future Prospects. *Remote Sensing Reviews*. 1995;12(3-4):175-224.
44. Lin J, Qiu S, Tan X, Zhuang Y. Measuring the Relationship between Morphological Spatial Pattern of Green Space and Urban Heat Island Using Machine Learning Methods. *Building and Environment*. 2023;228:109910.
45. Alijani B, Mahmoudi P, Saligheh M, Rigi Chahi M. Investigation of Changes in Annual Minimums and Histories of Temperature in Iran. *Geographical Research Quarterly*. 2011;3:17352-74.
46. Zullyadini R, AlKafy A, Saha M, AbdulRahim A, Almulhim AI, Rahaman SHN, et al. Assessing the Impacts of Vegetation Cover Loss on Surface Temperature, Urban Heat Island and Carbon Emission in Penang City, Malaysia. *Building and Environment*. 2022;222.
47. Liu L, Zhang Y. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data. *Remote Sensing*. 2011;3:1535-52.
48. Zhang S, Niu D, Li T, Lin Z, Cheng F, Cheng Y. Cooling Effect of Air Movement on Heating Performances of Advanced Air Distribution. *Building and Environment*. 2022;226:109775.
49. Chen Y, Shan B, Yu X. Study on the Spatial Heterogeneity of Urban Heat Islands and Influencing Factors. *Building and Environment*. 2022;208:108604.
50. Oke TR. *Boundary Layer Climates*. 2nd ed. London: Methuen; 1987.