



Heterogeneity of the Thermal Environment and its Ecological Evaluation in the Urban Region of Karaj

Zahra Mokhtari¹ | Shahindokht Barghjelveh² | Romina Sayahnia³

1. Department of Environmental Planning and Design, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: z_mokhtari@sbu.ac.ir

2. Corresponding author, Department of Environmental Planning and Design, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: s-barghjelveh@sbu.ac.ir

3. Department of Environmental Planning and Design, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: r_sayahnia@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 22 Sep 2021

Received in revised form: 22 Nov 2021

Accepted: 27 Nov 2021

Available online: 16 Dec 2021

Keywords:

Urban Cool Island,
Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI),
Ecological Evaluation of Thermal Environment,
Contribution Index,
Karaj City.

ABSTRACT

Temperature is one of the critical environmental parameters which is spatially heterogeneous, affecting biological, physical, and social interactions within an urban ecosystem. Therefore, the main purpose of this article is to investigate the contribution of various land covers in forming urban heat islands (UHIs) and urban cool islands (UCIs) and determining the pattern of UHI-UCI in an arid and semi-arid urbanization region of Karaj, Iran in July 2020. To achieve the goal, initially, the land surface temperature (LST) was retrieved using mono-window algorithm; maximum likelihood method was applied to generate the land cover/land use (LULC) map using Landsat 8 OLI-TIRS data. Then, the contribution index (CI) of each LULC in creating UHI and UCI was calculated. The thermal environment of the city was evaluated using Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI). The results showed that built-up surface (0.2) and green space (0.76) contributed the most in creating UCI, while the barren cover played a major role (1.53) in creating UHI. In addition, the urban hot spots were seen in the industrial zone and bare land (adjacent to the Payam airport) in the southwest of the region. The UTFVI analysis showed that the central areas of the city (old and dense residential areas) were ecologically better as compared to the urban periphery. Therefore, it is necessary to implement mitigation strategies in the marginal areas of the study area. In general, the results of this research can be helpful in urban planning to moderate urban temperature in ecologically stressed zones.

Cite this article: Mokhtari, Z., Barghjelveh, Sh., Sayahnia, R. (2021). Heterogeneity of the Thermal Environment and its Ecological Evaluation in the Urban Region of Karaj. *Geography and Sustainability of Environment*, 11 (4), 37-58. DOI: 10.22126/GES.2021.6654.2418





بررسی الگوی ناهمگنی محیط حرارتی شهر و ارزیابی اکولوژیک آن در منطقه شهری کرج

زهرا مختاری^۱ | شهیندخت برق جلوه^۲ | رومینا سیاح نیا^۳

۱. گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: z_mokhtari@sbu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: s-barghjvelh@sbu.ac.ir
۳. گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: r_sayahnia@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	در اکوسیستم‌های شهری، بررسی الگوی ناهمگنی محیط حرارتی و عوامل مؤثر بر آن در ارزیابی اکولوژیک
مقاله پژوهشی	و آسایش حرارتی محیط شهری ضروری است. از این رو هدف پژوهش حاضر بررسی ناهمگنی مکانی جزایر حرارتی و برودتی منطقه شهری با تأکید بر نقش پوشش اراضی در ایجاد آن و همچنین ارزیابی اکولوژیک محیط حرارتی است. از آنجا که اثرات جزایر حرارتی در فصل گرم سال اهمیت بیشتری دارد، این مطالعه در
تاریخچه مقاله:	تیرماه سال ۱۳۹۹ با استفاده از تصاویر ماهواره لندست-۸ در منطقه شهر کرج انجام شد. در این پژوهش،
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱	نقشه دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم تک‌پنجره و نقشه پوشش اراضی با روش حداکثر شباهت استخراج شد. سپس برای تعیین نقش پوشش اراضی در ایجاد جزایر حرارتی و برودتی، شاخص سهم برای
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱	سه طبقه عمده پوشش اراضی محاسبه گردید. در ادامه، از نمایه واریانس زمینه حرارتی شهر (UTFVI)
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶	به منظور ارزیابی اولیه اکولوژیکی استفاده شد. نتایج محاسبه شاخص سهم نشان داد اراضی بایر و رها شده
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۲۵	بیشترین نقش (۱/۵۳) را در تشکیل جزیره حرارتی داشت، در حالی که کمترین سهم به ترتیب مربوط به
کلیدواژه‌ها:	اراضی انسان‌ساخت (۰/۲) و طبقه باغات، فضای سبز و کشاورزی (۰/۷۶) بود. همچنین یافته‌ها نشان داد نقاط
جزیره برودتی شهر،	داغ حرارتی در شهرک‌های صنعتی حاشیه‌ای و اراضی بایر (حوالی فرودگاه پیام) در جنوب منطقه مورد
نمایه واریانس زمینه حرارتی	مطالعه واقع شده است. نتایج نمایه واریانس زمینه حرارتی شهر نشان داد مناطق داخل شهر (به‌ویژه بافت
شهری،	قدیمی و متراکم) از لحاظ اکولوژیکی و آسایش حرارتی، وضعیت بهتری از مناطق تازه توسعه یافته حواشی
ارزیابی اکولوژیک محیط حرارتی،	شهر دارند. به‌طور کلی از نتایج این پژوهش می‌توان در فرایند برنامه‌ریزی شهری، به‌منظور بهبود وضعیت
شاخص سهم،	اکولوژیک شهر از دیدگاه حرارتی، استفاده کرد.
کرج.	

استناد: مختاری، زهرا؛ برق جلوه، شهیندخت؛ سیاح نیا، رومینا (۱۴۰۰). بررسی الگوی ناهمگنی محیط حرارتی شهر و ارزیابی اکولوژیک آن در منطقه شهری کرج. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۱ (۴)، ۳۷-۵۸. DOI: 10.22126/GES.2021.6654.2418



مقدمه

با گسترش شهری، محیط حرارتی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فاکتورهای محیط‌زیستی، دستخوش تغییرات شدیدی می‌شود (ووگت و اوکه^۱، ۲۰۰۳؛ ونگ^۲، ۲۰۰۹). یکی از پدیده‌های مرتبط با تغییر محیط حرارتی شهر بر اثر گسترش شهری، تشکیل جزیره حرارتی است. جزیره حرارتی شهری^۳ به پدیده‌ای گفته می‌شود که دمای هوا یا دمای سطح زمین در شهرها بالاتر از مناطق اطراف آن است (ووگت و اوکه، ۲۰۰۳؛ بیانتیو و وو^۴، ۲۰۱۰). جزیره حرارتی در گذشته، بیشتر با پایش تغییرات دمای هوا با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی انجام می‌شد (استوارت و اوکه^۵، ۲۰۱۲). اما در دهه اخیر، با پیشرفت فناوری سنجش از دور، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، دمای سطح زمین^۶ به‌وسیله الگوریتم‌های مختلف استخراج می‌شود و در مطالعه جزیره حرارتی شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد (استوک^۷ و همکاران، ۲۰۱۷؛ مسعودی و تان^۸، ۲۰۱۹؛ شجاعی و همکاران، ۱۳۹۸). انتخاب الگوریتم و دقت آن با توجه به منطقه مورد مطالعه اهمیت زیادی در مطالعات دمای سطحی دارد (وانگ^۹ و همکاران، ۲۰۱۹).

علاوه بر جزایر حرارتی، نقاط داغ حرارتی شهری^{۱۰} استرس دمایی بسیار زیادی را به‌ویژه به‌علت فعالیت‌های انسانی در مناطق جزیره حرارتی ایجاد می‌کنند (چن^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۶؛ کوتس^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۶؛ لویز^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۷؛ رن^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۶؛ فیسا^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین تعیین این نقاط داغ با هدف کاهش دما^{۱۶} یکی از اقدامات مهم در جهت حفظ تعادل دمای شهر است (گوها^{۱۷} و همکاران، ۲۰۱۸).

درباره علت تشکیل جزیره حرارتی و ناهمگنی مکانی آن در شهرها مطالعات زیادی صورت گرفته است (مسعودی و تان، ۲۰۱۹؛ استوک و همکاران، ۲۰۱۷؛ لی^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۷؛ رسول^{۱۹} و همکاران، ۲۰۱۵). موضوع بسیاری از این پژوهش‌ها ارتباط بین دمای سطح زمین و تغییرات نوع کاربری اراضی / پوشش اراضی بوده است (ژانگ^{۲۰} و همکاران، ۲۰۱۳؛ یانگ^{۲۱} و همکاران، ۲۰۱۷). در این مطالعات، تصریح شده که دمای سطح زمین و در نتیجه تشکیل جزیره حرارتی به‌شدت تحت تأثیر تغییرات پوشش زمین است. ویژگی‌های فیزیکی و رطوبتی انواع پوشش شهری بر تعادل انرژی سطحی

1. Voogt & Oke
2. Weng
3. Urban Heat Island (UHI)
4. Buyantuyev & Wu
5. Stewart & Oke
6. Land Surface Temperature (LST)
7. Estoque
8. Masoudi & Tan
9. Wang
10. Urban hot spot
11. Chen
12. Coutts
13. Lopez
14. Ren
15. Feyisa
16. Mitigation
17. Guha
18. Li
19. Rasul
20. Zhang
21. Yang

و در نتیجه بر ناهمگنی حرارتی شهری اثر می‌گذارد؛ به این ترتیب که سطوح نفوذناپذیر^۱ (سطح آسفالت، بتون و...) انرژی خورشیدی را بیشتر جذب می‌کنند و ظرفیت گرمایی و انتقال حرارتی بیشتری دارند (آرنفیلد^۲، ۲۰۰۳؛ سان^۳ و همکاران، ۲۰۱۸)، درحالی که معمولاً فضای سبز شهری و مناطق طبیعی با پوشش گیاهی به واسطه تبخیر و تعرق و اثر سایه‌اندازی منجر به خنک‌سازی محیط و دمای کمتر می‌شود (زاردو^۴ و همکاران، ۲۰۱۷).

اما الگوی تغییرات دما-پوشش اراضی و همچنین تشکیل جزایر حرارتی در تمام شهرها یکسان نیست (رسول و همکاران، ۲۰۱۵؛ علی^۵ و همکاران، ۲۰۱۷). برای مثال برخی مطالعات نشان داده‌اند الگوی تشکیل جزایر حرارتی در مناطق خشک، نیمه‌خشک و بیابانی کاملاً متفاوت با مناطق معتدل با بستر جنگلی و علفزاری و مناطق حاره‌ای است (ایمهوف^۶ و همکاران، ۲۰۱۰؛ لازارینی^۷ و همکاران، ۲۰۱۳؛ ژانگ^۸ و همکاران، ۲۰۱۴). رسول و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه خود در شهر اربیل به این نتیجه رسیدند اراضی انسان‌ساخت عامل مؤثر در تشکیل جزایر برودتی در منطقه است تا تشکیل جزایر حرارتی. اژدری^۹ و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی خود در شهر شیراز که از لحاظ اقلیمی نیمه‌خشک است، الگوی متفاوتی مشاهده کردند و دریافتند که در مناطق توسعه‌یافته و متراکم مسکونی شهر شیراز دمای سطح زمین پایین است. در مطالعه‌ای دیگر (علی و همکاران، ۲۰۱۷)، الگوی تغییرات دما بر اساس نوع پوشش بین دو شهر لندن با آب‌وهوای معتدل اقیانوسی و بغداد با آب‌وهوای خشک نیمه‌گرمسیری مقایسه شد. بیشترین دما در شهر لندن در مناطق شهری دیده شد و برعکس در شهر بغداد مناطق شهری خنک و پوشش خاک گرم‌ترین طبقه ارزیابی گردید.

در برخی تحقیقات، شاخص سهم^{۱۰} یا شاخص توزیع^{۱۱} به منظور بررسی نقش هریک از پوشش‌های مختلف در تشکیل جزایر حرارتی معرفی شده است (لی و همکاران، ۲۰۱۷؛ ژائو^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۸). بررسی ارتباط بین ناهمگنی محیط دمایی و پوشش اراضی در برنامه‌ریزی شهری با هدف تعدیل دمای هوا و در نتیجه ایجاد آسایش حرارتی و بهبود وضعیت اکولوژیک ضروری است (مسعودی و همکاران، ۲۰۱۹). بر اساس مطالعات پیشین، پوشش اراضی بایر و انسان‌ساخت بیشترین نقش را در تشکیل جزیره حرارتی دارند، درحالی که جنگل و آب از اثرات جزیره حرارتی می‌کاهد (امیری^{۱۳} و همکاران، ۲۰۰۹).

به عبارت دیگر، دمای شهر بر کارکرد اکوسیستم و در نتیجه بر کیفیت زندگی انسان‌ها و سلامتی آن‌ها اثر می‌گذارد. تشکیل جزایر حرارتی اثرات منفی زیادی، مانند کاهش آسایش دمایی و مسائل بهداشتی و سلامتی (پاتز^{۱۴} و همکاران، ۲۰۰۵)، تهدید تنوع زیستی (هارول^{۱۵} و همکاران، ۲۰۰۲) و مصرف بالای انرژی (سان و همکاران، ۲۰۱۸)، دارد. از لحاظ

1. Impervious surface
2. Arnfield
3. Sun
4. Zardo
5. Ali
6. Imhoff
7. Lazzarini
8. Zhang
9. Azhdari
10. Contribution index
11. Distribution index
12. Zhao
13. Amiri
14. Patz
15. Harvel

محیط‌زیستی، ارزیابی اولیه اکولوژیک و در نتیجه آسایش حرارتی در شهرهای توسعه‌یافته بسیار مهم است (آلفرایهت^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). نمایه‌های زیادی مرتبط با اندازه‌گیری اثر جزیره حرارتی بر اکولوژی شهر و سلامتی انسان معرفی شده است. برخی از این نمایه‌ها عبارت‌اند از: نمایه رطوبت^۲ (کاکون^۳ و همکاران، ۲۰۱۰)، دمای معادل فیزیولوژیکی^۴ (ماتزاراکیس^۵، ۱۹۹۹؛ شرفخانی و همکاران، ۲۰۱۸) و شاخص واریانس زمینه حرارتی شهری (UTFVI)^۶ که ژانگ در سال ۲۰۰۶ معرفی کرد. از بین این شاخص‌ها، نمایه واریانس زمینه حرارتی شهری (UTFVI) که برای ارزیابی اکولوژیک محیط حرارتی استفاده می‌شود، به‌علت ارتباط مستقیم با دمای سطح زمین، کاربرد بیشتری دارد (آلفرایهت و همکاران، ۲۰۱۶؛ لی و همکاران، ۲۰۱۳؛ لیو و ژانگ^۷، ۲۰۱۱؛ مک‌ای^۸ و همکاران ۲۰۱۲).

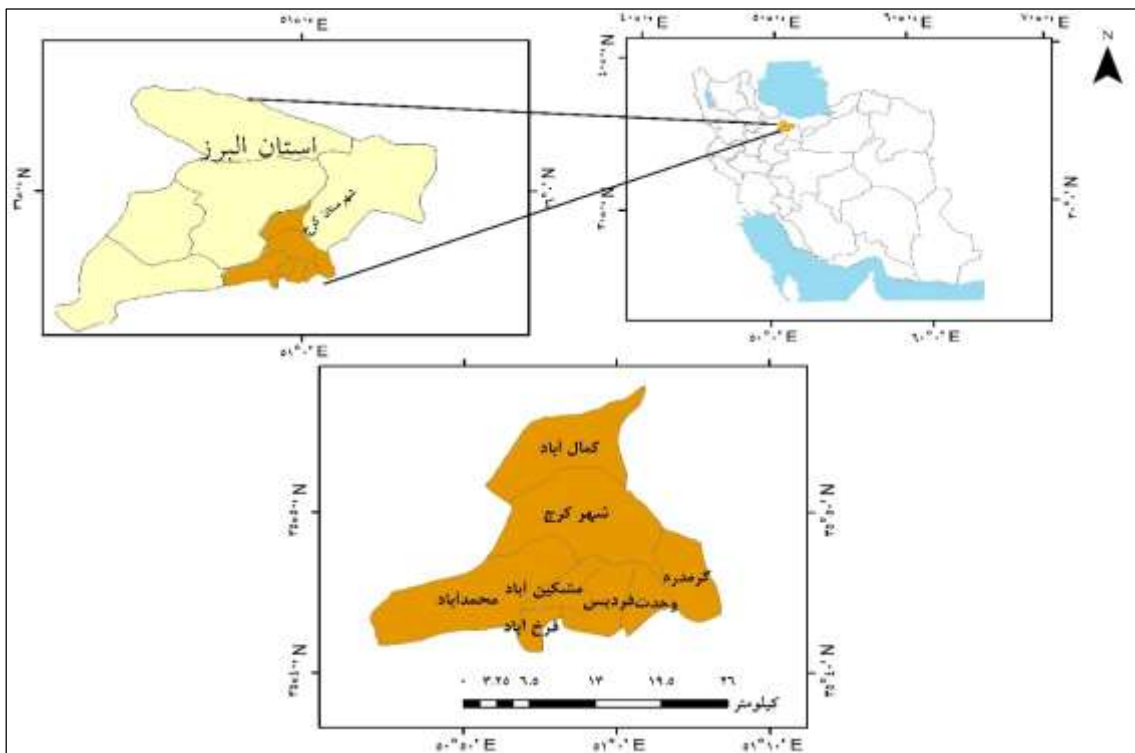
با اینکه مطالعات زیادی درباره تشکیل جزایر حرارتی صورت گرفته، الگوی تشکیل این پدیده در اقلیم خشک و نیمه‌خشک در مطالعات اندکی بررسی شده است؛ به‌طوری که در پژوهش‌های پیشین، پیشنهاد شده است دمای سطح در مناطق جغرافیایی مختلف بررسی شود تا بتوان به تعمیم مناسب‌تری در مورد ارتباط دمای سطح زمین و پوشش اراضی در منطقه خشک و نیمه‌خشک دست یافت (رسول و همکاران، ۲۰۱۵). از آنجا که کرج شهری است در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، این مطالعه می‌تواند به توسعه مطالعات الگوی جزیره حرارتی شهری کمک کند.

اهداف پژوهش عبارت‌اند از: ۱. استخراج دمای سطح زمین با روش تک‌پنجره^۹ از لندست-۸ و تهیه نقشه توزیع دمای سطح؛ ۲. تعیین جزایر حرارتی و جزایر برودتی و نقاط داغ حرارتی بر اساس دمای سطح زمین در فصل گرم سال؛ ۳. بررسی ارتباط بین تشکیل جزیره حرارتی و برودتی با پوشش اراضی با محاسبه شاخص سهم هریک از پوشش اراضی؛ ۴. ارزیابی اکولوژیک محیط حرارتی با استفاده از نمایه UTFVI.

معرفی منطقه مورد بررسی

منطقه مورد مطالعه به‌عنوان اقامتگاه شهری^{۱۰}، خوشه یا گروه شهری^{۱۱} (شهر به‌عنوان کلان‌شهر یا شهر مادر به همراه شهرهای کوچک‌تر که تمام آن‌ها از لحاظ زیرساختی به یکدیگر وابسته‌اند) شامل شهرهای کرج، کمال‌شهر، ماهدشت، گرمدره و محمدشهر است که در استان البرز، در غرب تهران و جنوب دامنه رشته‌کوه البرز واقع شده است (شکل ۱). استان البرز از بُعد جغرافیای طبیعی به چهار قسمت شرقی-غربی تقسیم می‌شود: کوهستان‌های شمالی، دشت مرکزی کرج-ساوجبلاغ، حوزه کویری نجم‌آباد-اشتهارد-ماهدشت و ارتفاعات داخل آن و نهایتاً ارتفاعات جنوب اشتهارد تا پلنگ‌آباد (قائمی و مقیم، ۱۳۹۵). منطقه مورد مطالعه در دشت مرکزی کرج-ساوجبلاغ واقع شده است.

1. Alfraihat
2. Humidity index
3. Kakon
4. Physiological equivalent temperature
5. Matzarakis
6. Urban Thermal Field Variance Index
7. Liu & Zhang
8. Mackey
9. Mono-window
10. Urban agglomeration
11. Urban cluster, group city



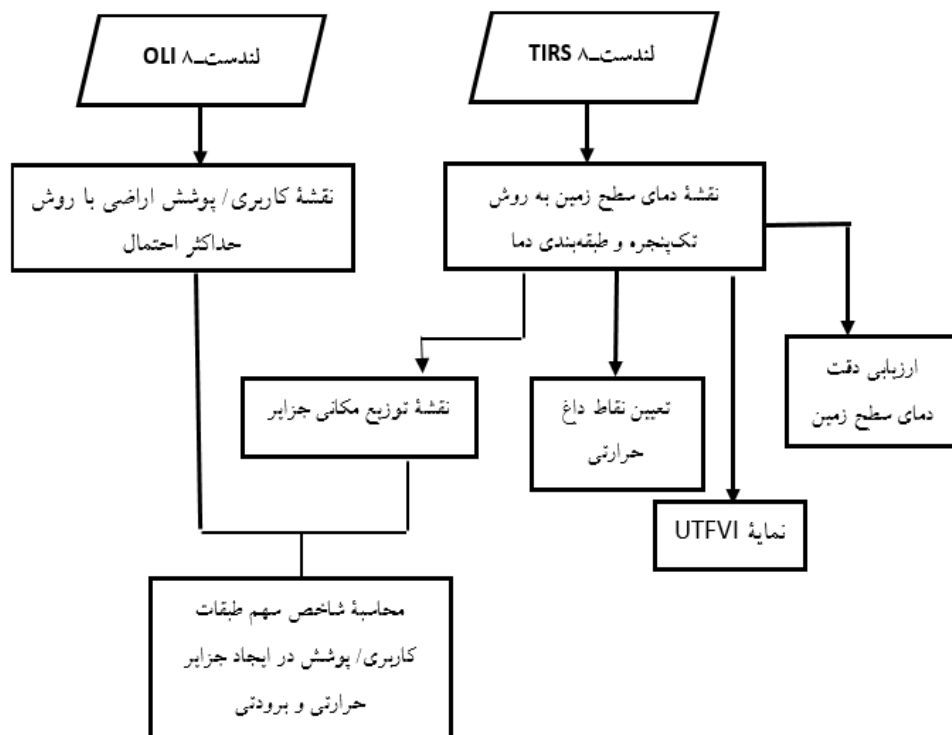
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (مجموعه شهر کرج و حومه) در استان البرز

این مجموعه شهری حدود ۸۷ درصد جمعیت کل استان را در خود جای داده است. بیشترین ساخت‌وساز و بیشترین نرخ رشد ده‌ساله در این مجموعه شهری اتفاق افتاده است (همان). مساحت تقریبی منطقه مورد مطالعه ۴۸ هزار هکتار است.

شهر کرج از لحاظ جمعیت چهارمین شهر پرجمعیت ایران، با جمعیت حدود ۱,۵۹۲,۴۹۰ نفر بر اساس آمار سال ۱۳۹۵، است. میانگین ارتفاع از سطح دریا در حدود ۱۳۰۰ متر، میانگین بارندگی ۲۴۷ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۴,۴ درجه است. به‌طور معمول، تیر با میانگین ۳۴/۶ درجه سلسیوس، گرم‌ترین ماه و بهمن با ۹/۲ درجه سلسیوس، سردترین ماه سال محسوب می‌شود و از لحاظ اقلیمی، در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است (همان).

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف مطالعه ناهمگنی محیط حرارتی و بررسی سهم پوشش اراضی در تشکیل جزایر حرارتی و برودتی صورت گرفت. همچنین وضعیت اکولوژیک دما و اینکه کدام پوشش‌ها از لحاظ اکولوژیک در شهر وضعیت بهتری دارد، ارزیابی شد. به این منظور، ابتدا نقشه دمای سطح زمین و نقشه پوشش اراضی تهیه شد. سپس جزایر حرارتی و برودتی بر اساس نقشه دمایی تعیین گردید. با استفاده از دمای به‌دست‌آمده برای هر طبقه پوشش، سهم هریک از آن‌ها در ایجاد محیط حرارتی محاسبه شد. روش کلی مطالعه به‌صورت نمودار در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. نمودار کلی روش مطالعه

تهیه نقشه دمای سطح زمین و شناسایی جزایر حرارتی و برودتی

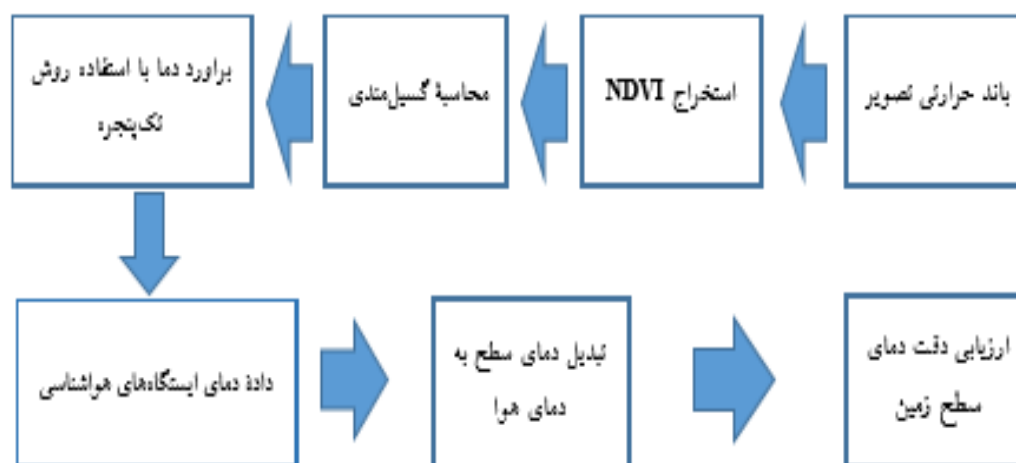
ابتدا تصویر ماهواره‌ای از سنجنده OLI-TIRS لندست-۸ از تارنمای سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده^۱ اخذ شد (مشخصات تصویر در جدول ۱ آمده است). برای استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، ابتدا کیفیت داده‌ها از نظر ابرناکی و نوارشدگی بررسی و سپس تصویر در نرم‌افزار انوی^۲ با روش فلش^۳ تصحیح اتمسفری شد. ادامه بررسی‌ها نشان داد که تصاویر مورد استفاده زمین‌مرجع بوده است.

1. www.usgs.gov
 2. ENVI
 3. FLAASH

جدول ۱. مشخصات تصویر مورد استفاده در مطالعه

نوع ماهواره و سنجنده	تاریخ	گذردیف ^۱	تعداد باندها	بزرگ‌نمایی
لندست-۸ OLI TIRS	۱۳۹۹/۰۴/۱۸	۱۶۵/۳۵	۱۱	۳۰ متر

در این مطالعه، به منظور استخراج دمای سطح زمین از الگوریتم تک‌پنجره استفاده شد که وانگ و همکاران (۲۰۱۵) آن را توسعه دادند. علت کاربرد الگوریتم مذکور این بود که فقط از باند ۱۰ استفاده می‌کند؛ زیرا گزارش‌هایی مبنی بر ناسازگاری باند ۱۱ در الگوریتم پنجره مجزا^۲ در برخی مطالعات آمده است (یو^۳ و همکاران، ۲۰۱۴). بنابراین روش تک‌پنجره‌ای به روش پنجره مجزا که از دو باند ۱۰ و ۱۱ استفاده می‌کند، ترجیح داده شد. همچنین نتیجه دمای سطح زمین با روش تک‌پنجره در مقایسه با الگوریتم تک‌کانالی^۴ از دقت بیشتری برخوردار است (لیو و ژانگ، ۲۰۱۵). این الگوریتم به سه پارامتر قابلیت انتشار سطح^۵، انتقال اتمسفری^۶ و میانگین دمای مؤثر اتمسفری^۷ نیاز دارد.^۸ مراحل استخراج دمای سطح زمین در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳. مراحل کلی استخراج دمای سطح زمین و ارزیابی دقت آن

1. Row-Path
2. Split window
3. Yu
4. Single channel
5. Ground Emissivity
6. Atmospheric Transmittance
7. Mean Atmospheric Temperature

۸. برای مطالعه جزئیات و رابطه‌ها و مراحل اجرای این الگوریتم به مقاله وانگ و همکاران (۲۰۱۵) مراجعه کنید.

به منظور ارزیابی دقت دمای سطح زمین به دست آمده با استفاده از رابطه ۱ ابتدا به دمای هوا تبدیل می‌شود.

$$T_a = 14.6 + 0.44 * T_s \quad \text{رابطه ۱}$$

این رابطه یک مدل خطی است که ارتباط بین دمای هوا و دمای سطح را نشان می‌دهد. از این رابطه در مناطق شهری استفاده می‌شود (گارسیا کوئتو^۱ و همکاران، ۲۰۰۷). مقدار به دست آمده از این رابطه با مقدار ثبت شده در ایستگاه هواشناسی کرج و پیام در منطقه مورد مطالعه مقایسه می‌شود. در این رابطه، T_a دمای هوا و T_s دمای استخراج شده نقطه ایستگاه هواشناسی مربوطه است.

پس از تهیه نقشه دمای سطح زمین، برای تحلیل بهتر، دمای سطح طبقه بندی شد. روش‌های مختلفی برای طبقه بندی دمای سطح وجود دارد. در این مطالعه، از روش اسمیت^۲ (۱۹۸۶) استفاده شد. در این روش، تصویر حرارتی بر اساس میانگین و انحراف معیار به پنج طبقه تقسیم می‌شود. جدول ۲ چگونگی محاسبه و طبقه بندی دمای سطح زمین را ارائه می‌دهد. در این جدول، μ و std به ترتیب میانگین و انحراف معیار است.

جدول ۲. محدوده طبقات دما بر اساس روش اسمیت (۱۹۸۶)

دامنه مربوط به هر طبقه بندی	طبقه بندی دما
$T_s < \mu - std$	دمای بسیار پایین (طبقه ۱)
$\mu - std \leq T_s < \mu - 0.5std$	دمای پایین (طبقه ۲)
$\mu - 0.5std \leq T_s \leq \mu + 0.5std$	دمای متوسط (طبقه ۳)
$\mu + 0.5std < T_s \leq \mu + std$	دمای بالا (طبقه ۴)
$T_s > \mu + std$	دمای بسیار بالا (طبقه ۵)

سپس جزایر حرارتی و برودتی به ترتیب با استفاده از روابط ۲ و ۳ تعیین می‌شود (گوها و همکاران، ۲۰۱۷).
 رابطه ۲ $LST > \mu + 0.5std$

رابطه ۳ $0 < LST \leq \mu + 0.5std$

در این فرمول، μ و std به ترتیب عبارت‌اند از میانگین و انحراف معیار.

برای بررسی دقیق تر دمای سطح زمین، نقاط داغ حرارتی به کمک نقشه دمای سطحی زمین تعیین شد. نقاط داغ حرارتی به معنی نقاطی است که بیش از حد داغ هستند و برای سکونت انسانی مناسب نیست و بیشتر در جزایر حرارتی تشکیل می‌شود. از رابطه ۴ برای تعیین این نقاط داغ حرارتی استفاده می‌شود (گوها و همکاران، ۲۰۱۷).

رابطه ۴ $LST > \mu + 2std$

در پژوهش حاضر، از نمایه UTFVI برای ارزیابی اکولوژیک منطقه در فصل تابستان استفاده شده است (آلفرایهت و همکاران، ۲۰۱۶). نمایه UTFVI با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است (ژانگ، ۲۰۰۶).

$$UTFVI = \frac{T_s - T_{mean}}{T_{mean}} \quad \text{رابطه ۵}$$

در این رابطه، T_s دمای سطح زمین و T_{mean} میانگین دمای سطح زمین است. لیو و ژانگ (۲۰۱۱) مقادیر UTFVI را با توجه به محدوده دمایی به شش طبقه تقسیم کردند که هر یک از مقادیر را می‌توان با ارزش‌های اکولوژیک و پدیده جزیره حرارتی تفسیر کرد.

تهیه نقشه پوشش اراضی

در مطالعه حاضر، طبقه‌بندی پوشش اراضی به روش نظارت‌شده حداکثر احتمال^۱ انجام شد. این روش یکی از متداول‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های طبقه‌بندی است که در آن واریانس و کواریانس طبقات ارزیابی می‌شود. یکی از شرایط مهم در طبقه‌بندی دقیق تصاویر، تعداد نمونه‌های تعلیمی است. تا حد امکان باید از تعداد نمونه متناسب با وسعت منطقه با پراکنش مناسب استفاده کرد تا ویژگی‌های طیفی مختلف مربوط به طبقات گوناگون در این گستره جای گیرد (علوی‌پناه و احسانی، ۱۳۸۴). با توجه به هدف پژوهش که در آن بررسی ارتباط ناهمگنی پوشش و دمای سطح مورد نظر است، پوشش اراضی به پنج طبقه عمده تقسیم شد (جدول ۳). پس از تهیه نقشه، نقاط تصادفی برای ارزیابی صحت طبقه‌بندی استفاده شد. این نقاط تصادفی با استفاده از تصویر گوگل ارث در تاریخ اخذشده تصویر (تیر ۱۳۹۹) صحت‌سنجی شد. سپس صحت کلی^۲ که حاصل تقسیم پیکسل‌هایی است که درست طبقه‌بندی شده‌اند، به کل پیکسل تصویر به دست آمد. ضریب کاپا^۳ نیز نشان می‌دهد چه میزان طبقه‌بندی حاصل با واقعیت زمین تطابق دارد و مقادیر آن بین ۰ و ۱ است که به درصد بیان می‌شود (سمیعی و همکاران، ۱۳۹۸).

جدول ۳. طبقات پوشش اراضی

طبقات	توضیحات
ساخت‌وسازشده	تمام اراضی مسکونی، تجاری و صنعتی
فضای سبز و کشاورزی	باغات، فضای سبز شهری و مناطق کشاورزی سبز
مرتع	مراتع تنک منطقه
بایر	اراضی رهاشده و لخت و زمین‌های کشاورزی که محصولات آن‌ها برداشت شده است.
جنگل	لکه نوازی جنگلی در شمال منطقه مورد مطالعه

1. Maximum Likelihood
2. Overall Accuracy
3. Kapa coefficient

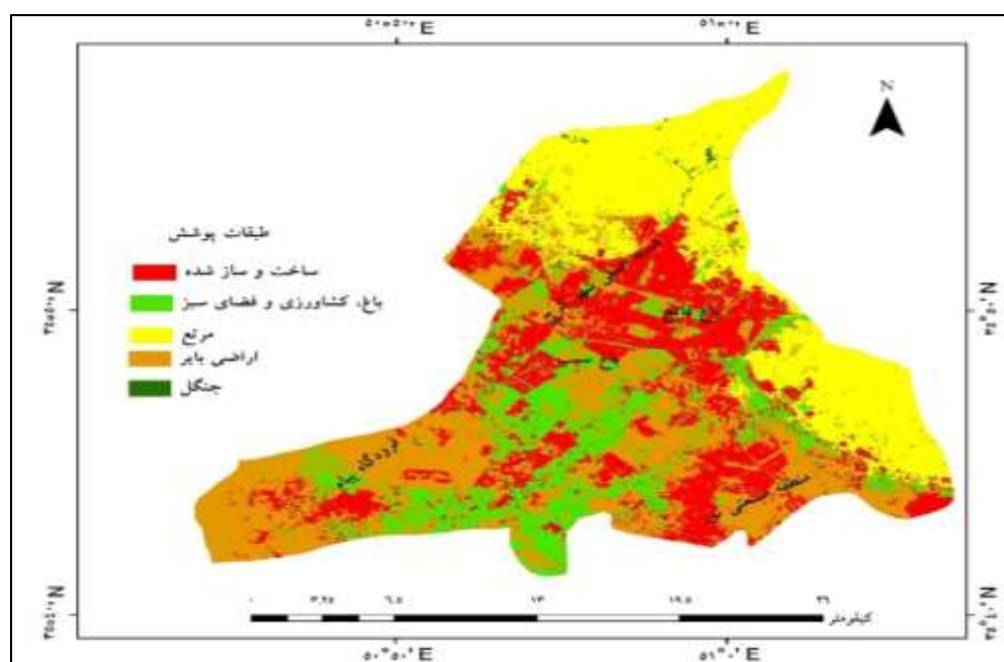
محاسبه شاخص سهم پوشش اراضی مختلف در تشکیل جزیره حرارتی و برودتی شهر

در پژوهش حاضر، از شاخص سهم به منظور کمی کردن نقش هریک از انواع پوشش اراضی و اثر آن بر محیط حرارتی (تشکیل جزیره حرارتی و برودتی) استفاده شد. تعاریف و رابطه‌های زیادی در تعیین این شاخص به کار می‌رود. شاخص سهم را می‌توان هم برای هر طبقه پوشش و هم برای کل مساحت مورد مطالعه برآورد کرد (ژائو و همکاران، ۲۰۱۸).

از رابطه ۶ برای برآورد نقش پوشش‌های انسان ساخت، کشاورزی و فضای سبز و اراضی بایر استفاده می‌شود:

$$CI = \frac{S_{ih}/S_h}{S_i/S} \quad \text{رابطه ۶}$$

در این رابطه، S_i مساحت طبقه نوع i نقشه پوشش اراضی، S_{ih} مجموع مساحت مناطق با دمای سطح بالا و بسیار بالا (جدول ۲) طبقه i ، S مجموع مساحت مورد مطالعه، S_h مجموع مساحت مناطق با دمای سطح بالا و بسیار بالا در کل منطقه است. اگر مقدار $CI > 1$ باشد، نوع پوشش به‌عنوان جزیره حرارتی است و چنانچه $CI < 1$ باشد، نوع پوشش جزیره برودتی تعریف می‌شود.



شکل ۴. نقشه طبقه‌بندی پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه

نتایج

تهیه نقشه کاربری اراضی و دمای سطح زمین

نقشه پوشش اراضی در پنج طبقه اراضی ساخت‌وساز شده، باغ، کشاورزی و فضای سبز، مرتع، اراضی بایر و جنگل با ضریب کاپا ۰/۸۳ و صحت کلی ۸۷ درصد تهیه شد (شکل ۴).

پس از تهیه نقشه دمای سطح زمین (شکل ۵)، به منظور ارزیابی صحت دمای سطح زمین، با استفاده از رابطه ۱ در دو نقطه ایستگاه هواشناسی در منطقه مورد مطالعه به دمای هوا تبدیل شد. جدول ۴ مقدار اختلاف دمای بین دمای سطح به دست آمده و داده‌های هواشناسی را ارائه می‌دهد. مقدار خطای مطلق میانگین^۱ حاصل ۰/۴ و مقدار خطای جذر میانگین مربعات^۲ ۰/۴۴ شد که نشان‌دهنده دقت زیاد محاسبه الگوریتم در دمای سطح زمین است.

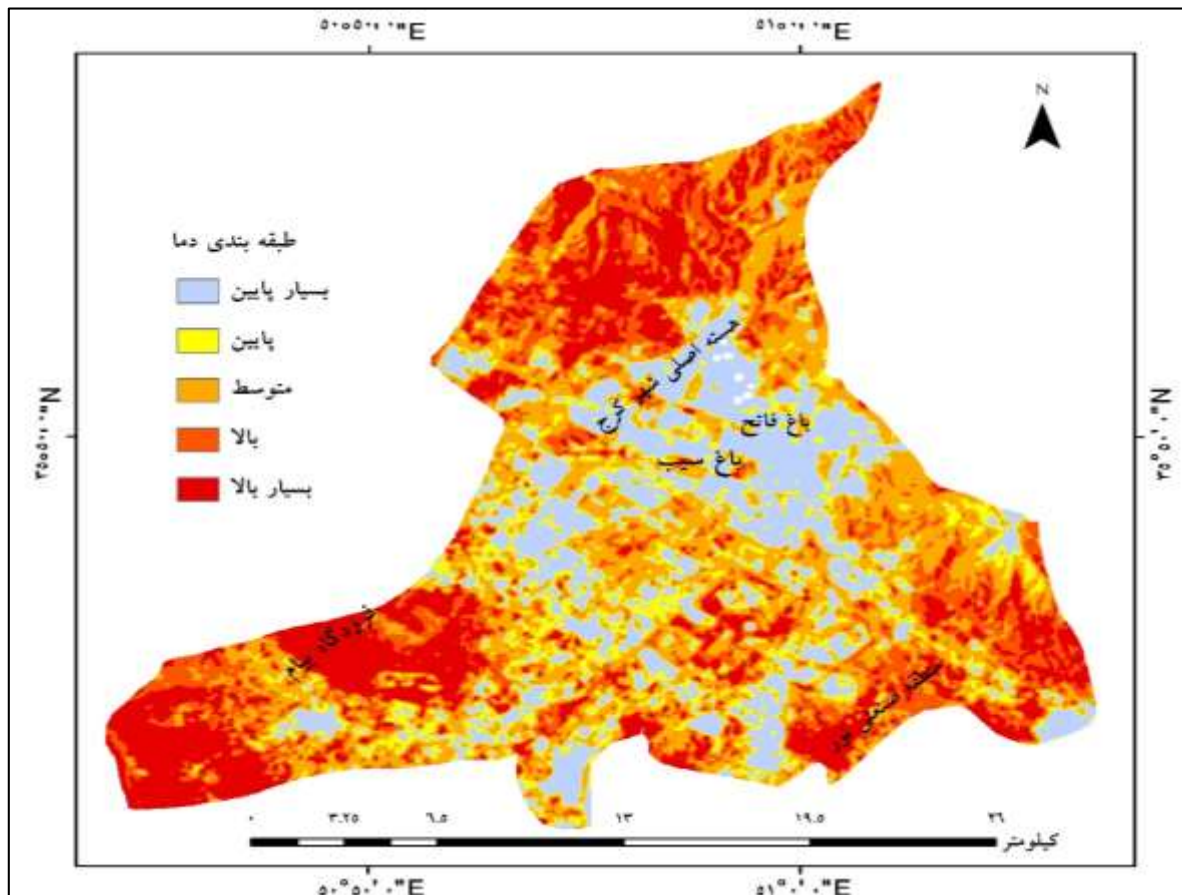
جدول ۴. اختلاف دمای اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی و دمای محاسبه شده (برحسب درجه سانتی‌گراد)

نام ایستگاه	دمای به دست آمده	داده‌های هواشناسی	اختلاف
کرج	۳۴/۸	۳۵	۰/۲
پیام	۳۵/۶	۳۵	۰/۶

1. Mean Absolute Error (MAE)

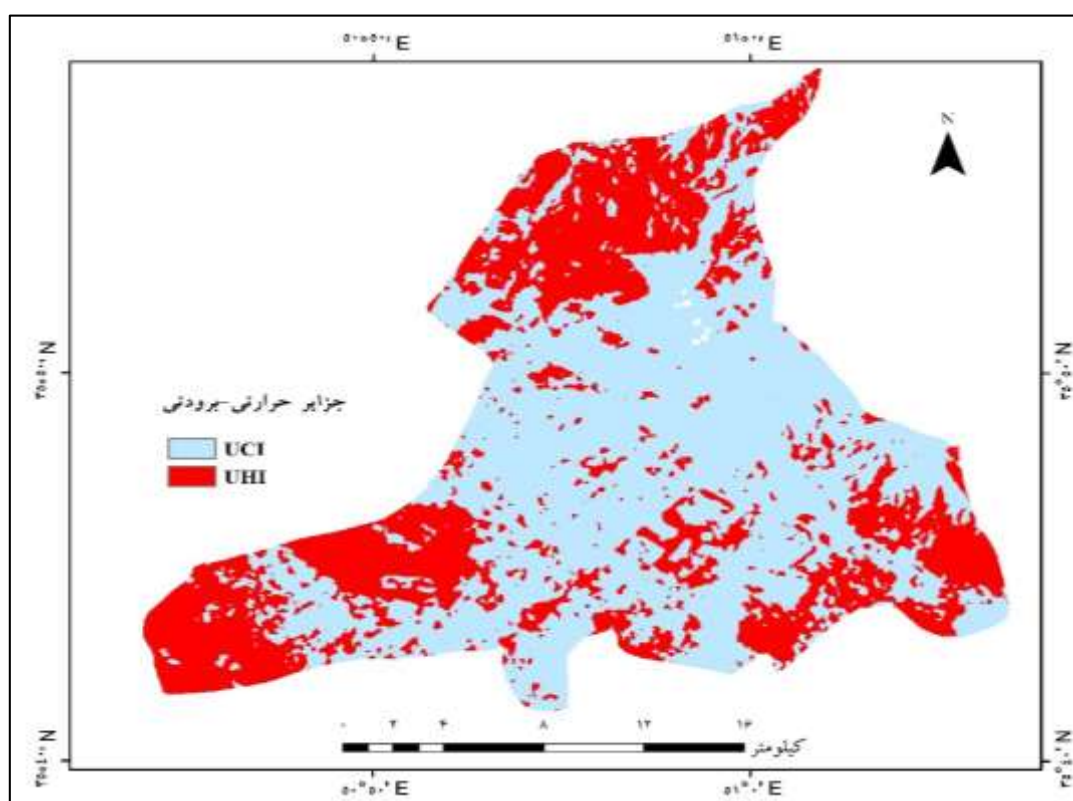
2. Root Mean Square Error (RMSE)

نقشه دما با استفاده از روش اسمیت به پنج طبقه تقسیم شد: حرارتی بسیار پایین، پایین، متوسط، بالا و بسیار بالا (شکل ۵). مقدار بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف معیار دمای سطح در منطقه به ترتیب عبارتند از: ۵۸، ۳۱/۶، ۴۴/۹ و ۵/۲۶ درجه سانتی‌گراد (لازم است ذکر شود مقدار دمای سطح بالاتر از دمای هواست).



شکل ۵. نقشه طبقه‌بندی دمای سطح زمین

در مرحله بعد، نقشه توزیع مکانی جزیره حرارتی و برودتی در سطح منطقه با استفاده از رابطه‌های ۲ و ۳ تهیه شد. بر اساس نقشه به دست آمده، الگوی پراکنش جزیره حرارتی و برودتی که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، به این شرح است: ۳۸ درصد منطقه مورد مطالعه جزایر حرارتی است که بیشتر در حاشیه منطقه مورد مطالعه تشکیل شده و ۶۲ درصد منطقه را جزایر برودتی به خود اختصاص داده و بیشتر در مناطق مسکونی و پوشش سبز، باغات و اراضی کشاورزی تشکیل شده است.



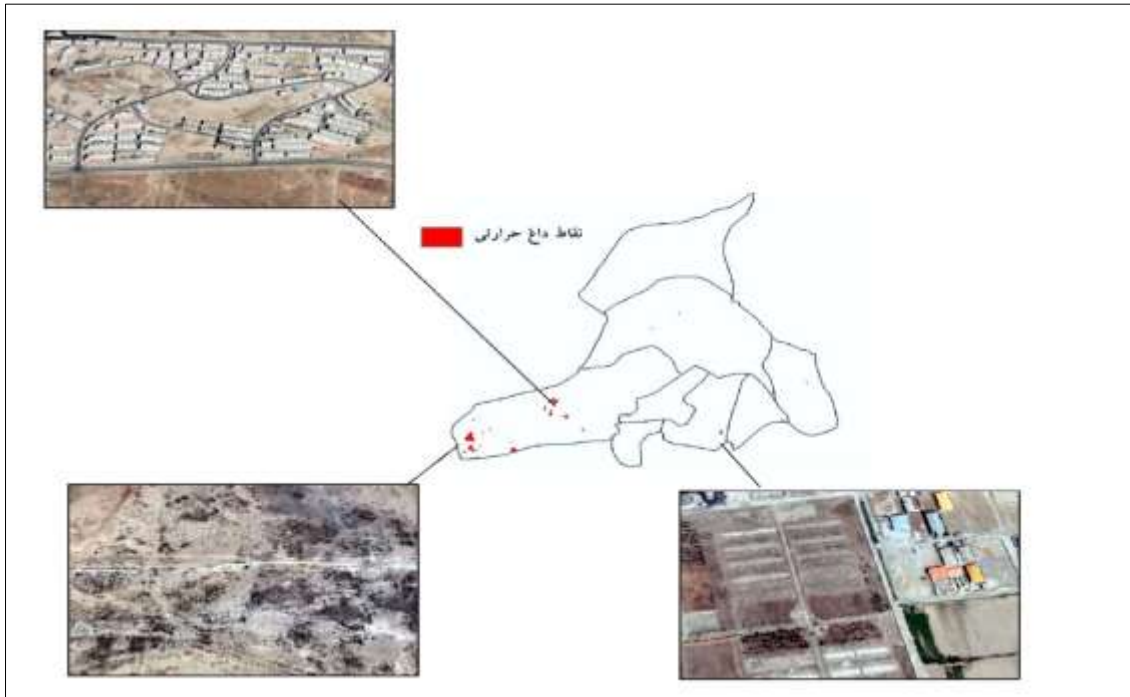
شکل ۶. نقشه توزیع مکانی جزایر حرارتی و برودتی منطقه

جدول ۵. مقادیر میانگین، بیشینه و کمینه جزایر حرارتی و برودتی شهر را نشان می‌دهد.

جدول ۵. آماره‌های دمایی در جزایر حرارتی و برودتی شهر

LST (انحراف معیار)		LST (میانگین)		LST (بیشترین)		LST (کمترین)	
UCI	UHI	UCI	UHI	UCI	UHI	UCI	UHI
۷/۹	۸/۳	۳۹/۵۶	۵۲/۷۶	۴۷/۵	۵۵	۳۱/۶	۴۷/۵

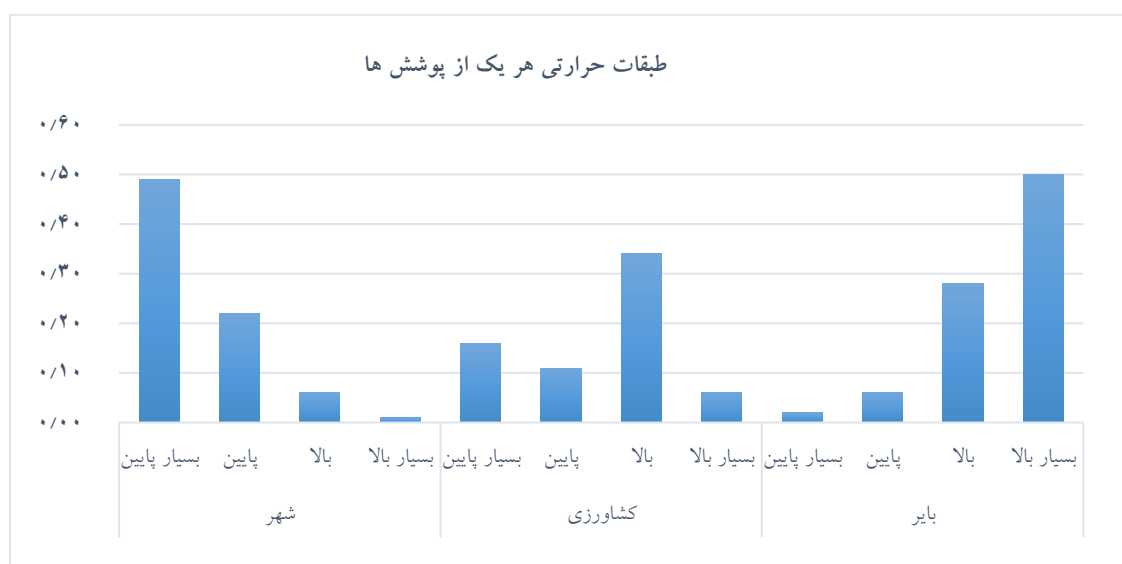
پس از تعیین نقاط داغ حرارتی، همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، این نقاط بیشتر در قسمت جنوبی و جنوب غربی در اراضی بایر (نزدیک به فرودگاه پیام) و همچنین در منطقه صنعتی نور شکل گرفته است. نقاط داغ در طول جزایر حرارتی با حد آستانه ۵۶ درجه سانتی‌گراد تعیین شد.



شکل ۷. توزیع نقاط داغ حرارتی (لکه‌های قرمز) در منطقه مورد مطالعه

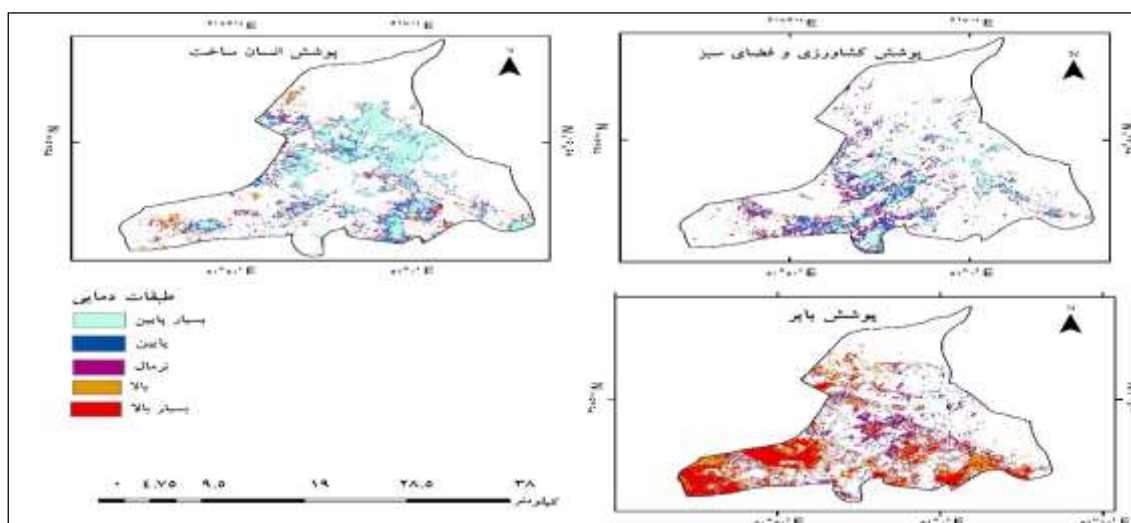
شاخص سهم پوشش اراضی در تشکیل جزایر حرارتی و برودتی شهر

شاخص سهم سه پوشش عمده انسان‌ساخت، کشاورزی و فضای سبز، و اراضی بایر در ایجاد جزیره حرارتی و برودتی با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شد. حدود ۷۰ درصد از اراضی پوشش انسان‌ساخت در طبقات دمای پایین و بسیار پایین (شکل ۸) و ۷۸ درصد از پوشش اراضی بایر در طبقه دمایی بالا و بسیار بالا قرار گرفته است (درصد طبقات نرمال در این نمودار نیامده؛ زیرا هدف تحلیل جزایر حرارتی و برودتی منطقه است).



شکل ۸. سهم پوشش‌های مختلف در تشکیل جزایر حرارتی و برودتی

شکل ۹ توزیع دمایی را در طبقات بسیار پایین، پایین، نرمال، بالا و بسیار بالا، در سه پوشش انسان‌ساخت، کشاورزی و فضای سبز، و اراضی بایر نشان می‌دهد. علاوه بر این، بر اساس رابطه ۶، مقدار نمایه سهم هر یک از پوشش‌های انسان‌ساخت، کشاورزی و فضای سبز، و اراضی بایر به ترتیب ۰/۲، ۰/۷۶ و ۱/۵۳ است (هرچه مقدار کمتر باشد، سهم بیشتری در ایجاد جزیره حرارتی دارد).



شکل ۹. توزیع مکانی دمای سطح در سه پوشش انسان‌ساخت، کشاورزی و فضای سبز، و بایر

در جدول ۶، آماره‌های کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف معیار دما مربوط به شش طبقه پوشش ارائه شده است. کمترین دما مربوط به پوشش انسان‌ساخت (۳۱/۶) است و بالاترین دما در پوشش بایر مشاهده می‌شود. میانگین دمایی در دو طبقه انسان‌ساخت، و کشاورزی، فضای سبز و باغ تقریباً برابر است (حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد).

جدول ۶. آماره‌های مختلف دمایی مرتبط با پوشش اراضی

پوشش اراضی	کمینه دما	بیشینه دما	میانگین دما	انحراف معیار دما
انسان‌ساخت	۳۱/۶	۵۵	۳۹/۹	۴/۱
کشاورزی، فضای سبز و باغ	۳۲	۵۴	۴۰	۳/۵
مرتع	۳۴	۵۶	۴۷/۸	۳/۱
بایر	۳۲	۵۸	۴۸	۳/۹
جنگل	۳۲	۵۱	۴۲/۵	۳/۳۴

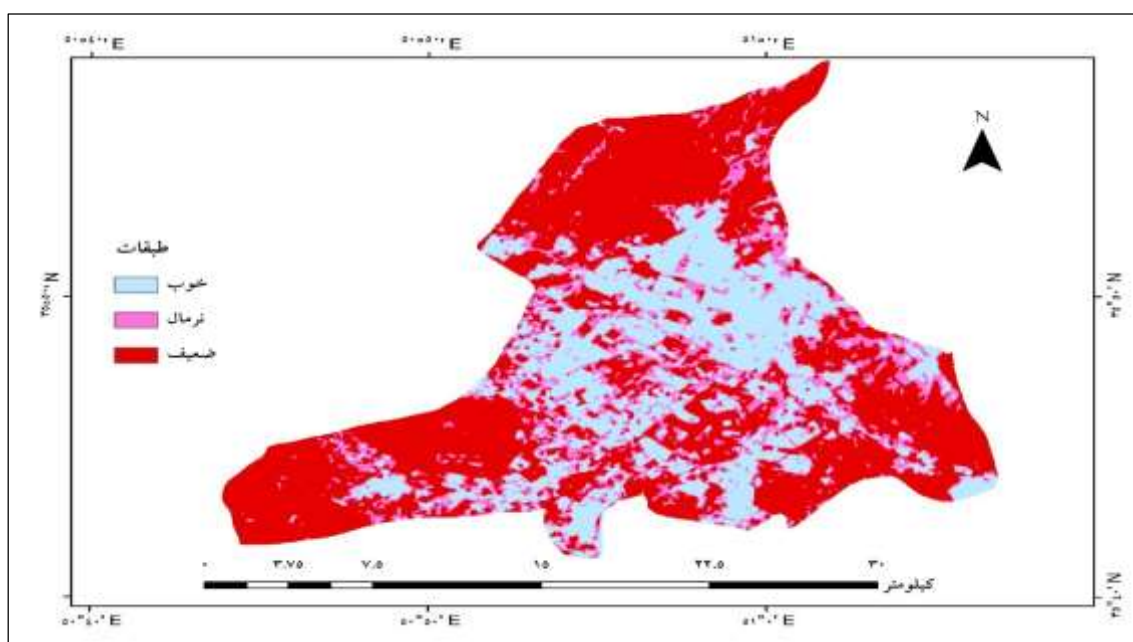
ارزیابی اکولوژیک منطقه با استفاده از نمایه UTFVI

همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها بیان شد، نمایه UTFVI به‌طور کلی در شش کلاس طبقه‌بندی می‌شود. اما استفاده از طبقه‌بندی شش‌تایی نتوانست به‌خوبی طبقات را در منطقه مورد مطالعه از یکدیگر مجزا کند. بنابراین با اعمال چندین طبقه‌بندی با آستانه‌های مختلف به روش صحیح و خطا، طبقه‌بندی نهایی با استفاده از حد آستانه‌های جدول ۷ صورت گرفت.

جدول ۷. آستانه تغییرات دما در نمایه ارزیابی اکولوژیک

UTFVI	UHI	وضعیت اکولوژیک	درصد مساحت
-۰.۸ - -۰.۳	ضعیف	خوب	۲۷/۵
-۰.۸ - -۰.۰	متوسط	نرمال	۱۸/۶۸
۰ - -۰.۳	قوی	ضعیف	۵۳

بنابراین، طبقه‌بندی به سه کلاس محدود شد: خوب، نرمال و ضعیف. هرچه مقدار UTFVI بیشتر باشد، جزیره حرارتی قوی‌تری تشکیل می‌شود و از لحاظ اکولوژیک، منطقه شکننده‌تر می‌گردد. شکل ۱۰ نتیجه این طبقه‌بندی و ارزیابی اکولوژیک شهر با استفاده از نمایه UTFVI را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، از لحاظ نمایه UTFVI، ۴۶ درصد منطقه شامل مناطقی با وضعیت اکولوژیک خوب و نرمال بود و ۵۳ درصد منطقه از لحاظ اکولوژیک ضعیف ارزیابی شد.



شکل ۱۰. نقشه ارزیابی اکولوژیک محیط حرارتی شهر بر اساس نمایه UTFVI

بحث

نتایج پژوهش نشان داد دمای سطح زمین با توجه به تنوع پوشش اراضی بسیار ناهمگن است، به طوری که اختلاف دما از مناطق مرکزی به مناطق حاشیه‌ای به طور میانگین به ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. دما در مناطق متراکم ساخت‌وساز شده کمتر از مناطق تازه توسعه یافته است. به عبارت دیگر، در طول روز در فصل گرم سال، مناطق مسکونی قدیمی و متراکم به صورت جزیره برودتی است. در مطالعه‌ای در شهر سنگاپور با آب‌وهوای گرمسیری، فضاهای سبز دمای کمتر را نشان داد، اما جزایر حرارتی کاملاً در مناطق شهری تشکیل شده بود (مسعودی و تان، ۲۰۱۹). در پژوهش دیگری در شهر سنژن با آب‌وهوای نیمه‌گرمسیری، مناطق دمای سطح در مناطق ساخت‌وساز شده بیشتر از مناطق دیگر بوده است (لی و همکاران، ۲۰۱۷). علی و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند الگوی ارتباط دمای سطح زمین-پوشش اراضی در دو شهر لندن با هوای مرطوب و بغداد با هوای خشک کاملاً با یکدیگر متفاوت است: جزایر حرارتی در شهر لندن کاملاً در مناطق توسعه یافته شهری تشکیل شده، در حالی که در شهر بغداد دمای سطح پوشش‌های ساخت‌وساز شده کمتر از اراضی توسعه نیافته بود (تشکیل جزیره برودتی در مناطق ساخت‌وساز شده). همچنین در مطالعه‌ای دیگر در شهر همدان، حداکثر دما در مناطق شهری مشاهده نشد (شجاعی و همکاران، ۱۳۹۸).

نقش عوامل دیگر مانند اندازه و نوع گسترش شهر (فشرده یا پراکنده) را نباید در الگوی تشکیل جزیره حرارتی و برودتی شهری نادیده گرفت (ژو^۱ و همکاران، ۲۰۱۷). برای مثال شهر کرج گسترش بسیار پراکنده‌ای دارد (رهنما و رضاییان، ۱۳۹۳) و ۵۲ درصد محدوده شهر زیر پوشش سطوح ناخالص (مانند اراضی بایر و کشاورزی و مراتع) است و

1. Zhou

۴۸ درصد آن به کاربری شهری اختصاص دارد (رزاقی و همکاران، ۱۳۹۰). بنابراین علاوه بر دما، می‌توان اثر نوع گسترش شهر کرج را بر الگوی تشکیل جزیره حرارتی و برودتی مطالعه کرد.

اما این بدین معنا نیست که اراضی با پوشش گیاهی (کشاورزی، فضای سبز و باغات) در خنک‌سازی منطقه مورد مطالعه نقشی ندارد؛ بلکه با بررسی دقیق پوشش گیاهی مشخص شد مناطق مشجر (باغات و فضای سبز درختی) با اثر سایه و تبخیر و تعرق بالا، دمای کمی دارد. برای مثال در منطقه مورد مطالعه، روستای فرخ‌آباد در شهرستان فردیس (جنوب منطقه) به علت تراکم بالای پوشش گیاهی و درختان پهن‌برگ، دمای بسیار کمی را نشان می‌دهد. همچنین مناطق کشاورزی دارای پوشش گیاهی که هنوز در تیر ماه سبز هستند و دارای محصول، اثر تبخیر و تعرق بالایی دارند و در نتیجه خنک هستند. هسته داخل (سطح مرکزی) لکه‌های کشاورزی بزرگ درجه حرارت کمی دارند و لکه‌های کشاورزی اطراف مناطق بایر درجه بیشتری را نشان می‌دهند. در پژوهش حاضر، اراضی بایر و همچنین کاربری‌های عمدتاً تازه‌توسعه‌یافته در حاشیه شهر، در روزهای تابستان دمای بسیار زیادی دارند؛ زیرا در مناطق بایر و لخت اثر تبخیر و تعرق و سایه‌اندازی ساختمان وجود ندارد و تمام زمین در معرض تابش خورشید قرار می‌گیرد (رسول و همکاران، ۲۰۱۵). در منطقه مورد مطالعه، مراتع با توجه به تنک بودن آن در تیر ماه بیشتر به صورت بایر درآمده است. بنابراین شباهت دمایی با محیط حرارتی اراضی بایر و لخت دارد.

با توجه به مقادیر شاخص سهم در ایجاد جزیره برودتی، بیشترین میزان سهم را اراضی انسان‌ساخت و سپس کشاورزی و فضای سبز دارد و اراضی بایر بیشترین نقش را در تشکیل جزایر حرارتی عهده‌دار است.

در این مطالعه، برخلاف مطالعات دیگر، شاخص UTFVI به سه طبقه تقسیم شد؛ زیرا طبقه‌بندی شش‌تایی که آفرایهت و همکاران (۲۰۰۶) استفاده کردند، نتوانست به‌طور واضح وضعیت دمایی را کمی کند و از الگوی مناسبی پیروی نکرد. لیو و ژانگ (۲۰۱۱) پیشنهاد دادند با توجه به گستره تغییرات دمایی می‌توان طبقه‌بندی را تغییر داد. بنابراین در این مطالعه با امتحان کردن حد آستانه‌های متفاوت، طبقه‌بندی در سه کلاس خوب، نرمال و ضعیف انجام شد. مناطق با وضعیت اکولوژیک خوب و نرمال تقریباً هم‌پوشانی زیادی با جزایر برودتی منطقه داشت. اراضی نرمال به صورت لکه‌های حاشیه‌ای و کوچک در اطراف طبقه خوب مشاهده شد. در مطالعه آفرایهت و همکاران نیز، اراضی نرمال از لحاظ اکولوژیک به صورت لکه‌هایی باریک در اطراف جزایر برودتی تشخیص داده شد. اما طبقه ضعیف اکولوژیک در این مطالعه بیشتر شامل مراتع تنک (در تیرماه تقریباً تبدیل به اراضی بایر شده) و اراضی بایر و برخی از اراضی تازه‌توسعه‌یافته بود. در مطالعه‌های دیگر از گوها و همکاران (۲۰۱۷) درباره شهرهای فلورانس و ناپلس، بر اساس شاخص UTFVI، مناطق خوب اکولوژیک در پوشش فضاهای سبز و تالاب و مناطق ضعیف اکولوژیک در داخل مناطق شهری قرار گرفت.

نتیجه‌گیری

بر مبنای یافته‌های این پژوهش، الگوریتم تک‌پنجره روش مناسب و دقیقی برای استخراج دمای سطح زمین در مناطق شهری است. در منطقه مورد مطالعه که از لحاظ اقلیمی در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته، مناطق انسان‌ساخت متراکم در طول روز در فصل گرم، از مناطق حاشیه‌ای و کم‌تراکم انسان‌ساخت خنک‌تر است (تشکیل جزایر برودتی). با اینکه انواع پوشش گیاهی منطقه (به جز مرتع) در یک کلاس طبقه‌بندی شد، از لحاظ دمایی بسیار ناهمگن بود؛ بدین ترتیب که اراضی با درختان (باغات و فضای سبز مشجر) که اثر سایه‌اندازی بالاتری داشت، دارای دمای خنک‌تری از اراضی کشاورزی بود. همچنین اراضی کشاورزی مرکز منطقه دمای خنک‌تری از اراضی کشاورزی حاشیه‌ای داشت. از

سوی دیگر، در این پژوهش، اراضی بایر بیشترین نقش را در ایجاد جزایر حرارتی دارد. این جزایر به صورت پراکنده در داخل شهر و به صورت لکه‌های بزرگ‌تر در حاشیه شهر شکل گرفته است. نقاط داغ حرارتی در اطراف شهرک‌های صنعتی و اراضی بایر جنوب و جنوب غرب منطقه شهری مشاهده شد. ارزیابی اولیه اکولوژیک با استفاده از نمایه UTFVI با طبقه‌بندی متناسب با گستره دمایی منطقه صورت گرفت. این ارزیابی نشان داد مناطق تازه توسعه یافته، صنعتی و بایر از لحاظ اکولوژیک جزء مناطق پرتنش (ضعیف) اکولوژیک است. برای بهینه‌سازی وضعیت اکولوژیک در این مناطق، با توجه به تحلیل هزینه و نظرات کارشناسی، اقدامات کاهش^۱ دما، مانند کاشت درختان، انجام می‌شود. الگوی ناهمگنی در محیط حرارتی شهر، به صورت دقیق‌تر، با بررسی چیدمان و فضا بندی پوشش اراضی در کنار یکدیگر صورت می‌گیرد. همچنین نتیجه این ارزیابی اکولوژیک را می‌توان با مطالعات اکولوژیک دیگر و با استفاده از پارامترها و نمایه‌های مختلف تلفیق کرد.

منابع

- رزاقی، حبیب‌الله؛ زیاری، کرامت‌الله؛ سعیدی رضوانی، نوید (۱۳۹۰) مدل چنددهسته‌ای و چندمرکزی شهر و کلان‌شهری، از نظریه تا عمل (مورد شهر کرج). *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۳ (۱۰۲)، ۱۷۳۲۳-۱۷۳۵۱.
- رهنما، محمدرحیم؛ رضایان، بیتا (۱۳۹۳). سنجش میزان پراکنش و فشردگی شکل کلان‌شهرهای ایران با استفاده از مدل‌های کمی. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۴ (۱۶)، ۱۰۷-۸۷.
- سمیعی، لیلیا؛ علی‌خواه اصل، مرضیه؛ رضوانی، محمد (۱۳۹۸). مقایسه روش‌های فازی و حداکثر احتمال برای تهیه نقشه پوشش اراضی تالاب گندمان با استفاده از تصاویر لندست. *فصلنامه انسان و محیط زیست*، ۱۷ (۱)، ۶۴-۴۹.
- شجاعی، مرضیه؛ شایسته، کامران؛ عطائیان، بهناز (۱۳۹۸). تأثیر الگوهای سیمای سرزمین بر تغییرات دمای شهری در همدان. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۹ (۳)، ۱۱۴-۹۹.
- علوی‌پناه، سید کاظم؛ احسانی، امیر هوشنگ (۱۳۸۴). تشخیص تغییرات و بیابان‌زایی با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و داده‌های ماهواره‌ای چندطیفی. *پژوهش‌های جغرافیایی*، ۵۱، ۵۰-۶۱.
- قائمی، ذبیح‌الله؛ مقیم، الهام (۱۳۹۵). *مطالعات آمایش سرزمین البرز*. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان البرز.

- Stewart, I. D. & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- Voogt, J. A. & Oke, T. R. (2003) Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384.
- Patz, J. A., Campbell-lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438, 310-317.
- Akbari, H., Pomerantz, M. & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295-310.
- Alavipanah, S. K. & Ehsani, A. H. (2004). Change Detection and Desertification Based on Geographic Information System and Multi-Spectral Satellite Data (Case Study: Damghan Playa). *Geographical Research*, 51, 50-61.

- Alfraihat, R., Mulugeta, G. & Gala, T. S. (2016). Ecological evaluation of urban heat island in Chicago City, USA. *Journal of Atmospheric Pollution*, 4(1), 23-29.
- Ali, J. M., Marsh, S. H. & Smith, M. J. (2017). A comparison between London and Baghdad surface urban heat islands and possible engineering mitigation solutions. *Sustainable Cities and Society*, 29, 159-168.
- Amiri, R., Weng, Q., Alimohammadi, A., & Alavipanah, S. K. (2009). Spatial-temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran. *Remote Sensing of Environment*, 113(12), 2606-2617.
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23, 1-26.
- Azhdari, A., Soltani, A. & Alidadi, M. (2018). Urban morphology and landscape structure effect on land surface temperature: Evidence from Shiraz, a semi-arid city. *Sustainable Cities and Society*, 41, 853-864.
- Buyantuyev, A. & Wu, J. (2010). Urban heat islands and landscape heterogeneity:
- Chen, X. C., Zhao, H. M., Li, P. X. & Yin, Z. Y. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104(2), 133-146.
- Coutts, A. M., White, E. C., Tapper, N. J., Beringer, J. & Livesley, S. J. (2016). Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(55), 55-68.
- Estoque, R. C., Murayama, Y. & Myint, S. W. (2017). Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of the Total Environment*, 577, 349-359.
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Jenerette, G. D. & Pauliet, S. (2016). Locally optimized separability enhancement indices for urban land cover mapping: Exploring thermal environmental consequences of rapid urbanization in Addis Ababa, Ethiopia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 14-31.
- García-Cueto, O. R., Jáuregui-Ostos, E., Toudert, D. & Tejeda-Martinez, A. (2007). Detection of the urban heat island in Mexicali, BC, México and its relationship with land use. *Atmósfera*, 20(2), 111-131.
- Ghaemi, Z. & Moghim, E. (2016). Alborz land-use planning studies. Management and Planning Organization of Alborz Province, <https://alborz.mporg.ir> (In Persian).
- Guha, S., Govil, H. & Mukherjee, S. (2017). Dynamic analysis and ecological evaluation of urban heat islands in Raipur city, India. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(3), 36020.
- Guha, S., Govil, H., Dey, A. & Gill, N. (2018). Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 667-678.
- Harvell, C. D., Mitchell, C. E., Ward, J. R., Altizer, S., Dobson, A. P., Ostfeld, R. S. & Samuel, M. D. (2002). Climate Warming and Disease Risks for Terrestrial and Marine Biota. *Science*, 296(5576), 2158-2163. <https://doi.org/10.1126/science.1063699>.
- Imhoff, M. L., Zhang, P., Wolfe, R. E. & Bounoua, L. (2010). Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 504-513.

- Kakon, A. N., Nobuo, M., Kojima, S. & Yoko, T. (2010). Assessment of thermal comfort in respect to building height in a high-density city in the tropics. *American Journal of Engineering and Applied Science*, 3(3), 545-551.
- Klok, L., Zwart, S., Verhagen, H. & Mauri, E. (2012). The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics. *Resources Conservation and Recycling*, 64(7), 23-29.
- Lazzarini, M., Marpu, P. R. & Ghedira, H. (2013). Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. *Remote Sensing of Environment*, 130, 136-152.
- Li, H., Zhou, Y., Li, X., Meng, L., Wang, X., Wu, S. & Sodoudi, S. (2018). A new method to quantify surface urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*, 624, 262-272.
- Li, W., Cao, Q., Lang, K. & Wu, J. (2017). Linking potential heat source and sink to urban heat island: Heterogeneous effects of landscape pattern on surface temperature. *Science of the Total Environment*, 586, 457-465.
- Li, Z. L., Ning, H. W., Shi, W., Sobrino, J. A., Wan, Z. B., Tang, H. & Yan, G. (2013). Land surface emissivity retrieval from satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9-10), 3084-3127.
- Linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. *Landscape Ecology*, 25(1), 17-33.
- Liu, L. & Zhang, Y. (2011). Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong. *Remote Sensing*, 3, 1535-1552.
- Lopez, J. M. R., Heider, K. & Scheffran, J. (2017). Frontiers of urbanization: Identifying and explaining urbanization hot spots in the south of Mexico City using human and remote sensing. *Applied Geography*, 79, 1-10.
- Mackey, C. W., Lee, X. & Smith, R. B. (2012). Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island. *Building and Environment*, 49, 348-358.
- Masoudi, M. & Tan, P. Y. (2019) Multi-year comparison of the effects of spatial pattern of urban green spaces on urban land surface temperature. *Landscape and Urban Planning*, 184, 44-58.
- Matzarakis, A., Mayer, H. & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76-84.
- Rahnama, M. M., & Rezaeian, B. (2014). Measuring the distribution and density of the metropolis of Iran by using quantitative models. *Arid Regions Geographic Studies*, 4(16), 87-107 (In Persian).
- Rasul, A., Balzter, H. & Smith, C. (2015). Spatial variation of the daytime Surface Urban Cool Island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8. *Urban Climate*, 14, 176-186.
- Razaghi, H., Ziari, K. & Rezvani, N. (2011). Multi-core and multi-center model of city and metropolis, from theory to practice (case of Karaj). *Geographical Research*, 3(102), 17351-17323 (In Persian).
- Ren, Y., Deng, L. Y., Zuo, S. D., Song, X. D., Liao, Y. L., Xu, X. D., ... Li, Z. W. (2016). Quantifying the influences of various ecological factors on land surface temperature of urban forests. *Environmental Pollution*, 216, 519-529.
- Samiee, L., Alikhah-Asl, M. & Rezvani, M. (2019). Comparing fuzzy and maximum likelihood methods to land cover mapping in Gandoman wetland using Landsat satellite data. *Human and Environment*, 17(1), 49-64 (In Persian).

- Sharafkhani, R., Khanjani, N., Bakhtiari, B., Jahani, Y. & Tabrizi, J. S. (2018). Physiological equivalent temperature index and mortality in Tabriz (the northwest of Iran). *Journal of Thermal Biology*, 71, 195-201.
- Shojaei, M., Shayesteh, K. & Attaeian, B. (2019). The Effect of Landscape Pattern on Urban Temperature Changes in Hamadan. *Geography and Sustainability of Environment*, 9(3), 99-114 (In Persian).
- Smith, R. M. (1986). Comparing traditional methods for selecting class intervals on choropleth maps. *The Professional Geographer*, 38(1), 62-67.
- Sun, R., Wang, Y. & Chen, L. (2018). A distributed model for quantifying temporal-spatial patterns of anthropogenic heat based on energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 170, 601-609.
- Sung, C. Y. (2013). Mitigating surface urban heat island by a tree protection policy: A case study of The Woodland, Texas, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(4), 474-480.
- Tran, H., Uchihama, D., Ochi, S. & Yasuoka, Y. (2006). Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(1), 34-48.
- Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A. & Zhao, S. (2015). An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. *Remote Sensing*, 7(4), 4268-4289.
- Wang, L., Lu, Y. & Yao, Y. (2019). Comparison of three algorithms for the retrieval of land surface temperature from Landsat 8 images. *Sensors*, 19(22), 5049.
- Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 335-344
- Yang, J., Sun, J., Ge, Q. & Li, X. (2017). Assessing the impacts of urbanization-associated green space on urban land surface temperature: A case study of Dalian, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 22, 1-10.
- Yu, X., Guo, X. & Wu, Z. (2014). Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*, 6(10), 9829-9852.
- 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.
- Zhang, H., Qi, Z. F., Ye, X. Y., Cai, Y. B., Ma, W. C. & Chen, M. N. (2013). Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China. *Applied Geography*, 44, 121-133.
- Zhang, P., Bounoua, L., Imhoff, M. L., Wolfe, R. E. & Thome, K. (2014). Comparison of MODIS land surface temperature and air temperature over the continental USA meteorological stations. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 40(2), 110-122.
- Zhang, Y. (2006). Land surface temperature retrieval from CBERS-02 IRMSS thermal infrared data and its applications in quantitative analysis of urban heat island effect. *Journal of Remote Sensing*, 10, 789-797.
- Zhao, H., Zhang, H., Miao, C., Ye, X. & Min, M. (2018). Linking heat source-sink landscape patterns with analysis of urban heat islands: Study on the fast-growing Zhengzhou City in Central China. *Remote Sensing*, 10(8), 1268.
- Zhou, B., Rybski, D. & Kropp, J. P. (2017). The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Scientific Reports*, 7(1), 1-9.