

Original Article

Iranian Remote Sensing GIS
Journal of Sensing

Evaluating the Effect of Roughness Length Index on Modelling the Maximum Intensity of Urban Heat Islands Using Remote Sensing and Geospatial Information Systems (Case Study: District 22, Tehran)

Zahra Khadem Agheli^{1*}, Seyyed Hassan Hashemi Ashka², Sahar Alian³

Affiliation

1. Faculty of Engineering, Islamic Azad University (IAU), Ramsar Branch, Ramsar, Iran
2. Mapping and GIS Department at Management and Planning Organization, Guilan, Rasht, Iran
3. Faculty of Civil Engineering Rahman Institute of Higher Education: Ramsar, Ramsar, Iran

ABSTRACT

Introduction: In recent years, modeling and identifying spatial distribution patterns of the urban heat island phenomenon have increased. This trend is driven by the need to plan for the effects of the phenomenon and to predict the infrastructure required to provide better thermal comfort to citizens. Oke's model is one of the prominent models in this field that simulates the maximum intensity of the heat island based on the urban canyon's aspect ratio index. Since Oke's model depends on the climatic and physical conditions of cities, it must be modified before being used in any urban area if necessary. Considering the effects of aerodynamic resistance of urban canyons (roughness length) on the maximum intensity of the heat island, including this factor in the model localization process can affect the accuracy of the results. In this study, an attempt was made to localize Oke's model in an area of the 22nd district of Tehran, and to investigate the effect of roughness length in this process. Preparation of temperature data of urban canyons is one of the important challenges in the modeling process. Research shows that the air temperature in the central and suburban areas at night is close to the land surface temperature (LST), and canyons' LST can be used as a convenient approximation of the air temperature. Therefore, in this study, an attempt was made to solve the problem of preparing temperature data by using satellite thermal sensors and an appropriate LST retrieval algorithm. Calculating the geometric and aerodynamic strength indices of the canyons in the modeling process is complex and time-consuming due to the need to perform various spatial processes, and therefore, it is another challenge in this field. Geospatial information systems (GIS) with the ability to store the topological relationships of geographical features and analyze them can facilitate the calculation of these indicators. Therefore, in this study, geospatial information systems have been used.

Materials and Methods: In this study, in order to prepare the required temperature data, ASTER sensor data and meteorological data of the nearest meteorological station to the study area from 2016 to 2022 were used. These data were processed in MATLAB software using a separate window algorithm (SWA). The land surface temperature (LST) and the maximum heat island intensity in the study area were then calculated. Then, the canyons' aspect ratio and roughness length indicators, as well as their simulated maximum heat island intensity (based on Oke's model), were calculated by processing digital maps in the ModelBuilder program within the ArcGIS software environment. After dividing the study area into training and check areas, localization of the maximum heat island intensity model was performed in two different cases. In the first case, the coefficients of the local model of the training area were calculated by considering the aspect ratio index. For this purpose, the canyons were classified into 11 different classes based on their aspect ratio index, and their simulated and measured maximum heat island intensity were calculated; through regression analysis of these two sets of data, the localized Oke's model was obtained. In the second case, the canyons of the training area were classified into two separate classes based on their roughness length index. Then, the first and second classes were classified into 8 and 3 separate groups based on their aspect ratio. By calculating the simulated and measured maximum heat island intensity of each group and using regression analysis, the localized Oke's model was determined for each of the two mentioned classes.

Results and Discussion: By validating the obtained models in the check area, the values of R^2 , ρ , RMSE and MAE obtained from regression in the first case were 0.53, 0.73, 1.18± and 0.98, respectively. In the second case, they were 0.80, 0.89, 1.05± and 0.87, respectively. Comparison of these results shows that including the aerodynamic resistance index in modeling the maximum heat-island intensity, while increasing the correlation coefficients and the coefficient of determination, improved the accuracy of the local model and enhanced its performance.

Keywords: Urban heat islands, Oke's model, Roughness length, Remote sensing, Geospatial information systems.

Citation:

Khadem Agheli, Z., Hashemi Ashka, S. H., Alian, S., Evaluating the Effect of Roughness Length Index on Modelling the Maximum Intensity of Urban Heat Islands Using Remote Sensing and Geospatial Information Systems (Case Study: District 22, Tehran), *Iran J Remote Sens GIS*. 17(3): 75-100.

* Corresponding Author: s.agheli66@gmail.com
DOI: <https://doi.org/10.48308/gisj.2024.234358.1197>

Received: 2024.01.04
Accepted: 2024.06.29





ارزیابی تأثیر شاخص طول زبری در مدل سازی بیشینه شدت جزایر حرارتی شهری با استفاده از سنجش از دور و سیستم های اطلاعات مکانی (مطالعه موردی: منطقه ۲۲ شهر تهران)

زهرا خادم عاقلی^{۱*}، سید حسن هاشمی اشکاء^۲، سحر علیان^۳

سمت

۱. گروه مهندسی عمران- مهندسی سیستم های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رامسر، رامسر، ایران
۲. گروه نقشه و اطلاعات مکانی سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان گیلان، رشت، ایران
۳. گروه عمران مؤسسه آموزش عالی رحمان، رامسر، ایران

چکیده

سابقه و هدف: در سالیان اخیر، مدل سازی و شناسایی الگوی توزیع مکانی پدیده جزیره حرارتی شهری، با هدف برنامه ریزی برای مواجهه با تأثیرات این پدیده و پیش بینی در زمینه تأمین زیرساخت های مورد نیاز در تأمین آسایش حرارتی بهتر شهروندان، افزایش یافته است. مدل اوکه از مدل های مطرح در این زمینه است که بیشینه شدت جزیره حرارتی (UHI_{max}) را براساس شاخص نسبت منظر کانیون های شهری، شبیه سازی می کند. وابستگی مدل اوکه به شرایط اقلیمی و فیزیکی شهرها ایجاب می کند که این مدل، قبل از استفاده در هر منطقه شهری، ارزیابی شود تا در صورت نیاز، اصلاح گردد. با توجه به تأثیراتی که عامل مقاومت آبرودینامیک کانیون های شهری (طول زبری) در UHI_{max} دارد، لحاظ کردن شاخص این عامل در فرایند محلی سازی مدل می تواند دقت نتایج حاصل را تحت تأثیر قرار دهد. در این پژوهش سعی شده است، ضمن محلی سازی مدل اوکه در ناحیه ای از منطقه ۲۲ شهر تهران، تأثیر طول زبری نیز بررسی شود. تهیه داده های دمایی کانیون های شهری از جمله چالش های مهم در فرایند مدل سازی محسوب می شود. تحقیقات نشان می دهد دمای هوای مناطق مرکزی و حومه شهرها، هنگام شب، به دمای سطح زمین (LST) نزدیک است و LST کانیون ها را می توان، به منزله تقریب مناسبی از دمای هوا، به کار برد. بنابراین در این تحقیق سعی شد، با بهره گیری از داده های سنجنده های حرارتی ماهواره ای و استفاده از الگوریتمی مناسب برای بازیابی LST، مشکل تهیه داده های دمایی حل شود. محاسبه شاخص های هندسی و مقاومت آبرودینامیکی کانیون ها در فرایند مدل سازی، به علت نیاز به پردازش های گوناگون مکانی، پیچیده و زمان بر است و از این رو چالشی دیگر در این زمینه محسوب می شود. سیستم های اطلاعات مکانی (GIS)، با داشتن توانایی ذخیره سازی روابط توپولوژیک عوارض جغرافیایی و تحلیل آنها، می تواند محاسبه این شاخص ها را تسهیل کند و بنابراین، در این پژوهش، از سیستم های اطلاعات مکانی استفاده شده است.

مواد و روش ها: در این پژوهش، به منظور تهیه داده های دمایی مورد نیاز، از داده های سنجنده استر (ASTER) و داده های هواشناسی نزدیک ترین ایستگاه هواشناسی به محدوده مطالعاتی، طی فاصله زمانی سال های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ میلادی، استفاده شد. این داده ها در محیط نرم افزار متلب (MATLAB) و با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا پردازش شد و دمای سطح زمین و بیشینه شدت جزایر حرارتی سطحی در محدوده مطالعاتی به دست آمد. سپس شاخص های نسبت منظر، طول زبری و UHI_{max} شبیه سازی شده کانیون ها (براساس مدل اوکه)، از طریق پردازش نقشه های رقمی در برنامه ModelBuilder در محیط نرم افزار ArcGIS، محاسبه شد. پس از تقسیم بندی محدوده مطالعاتی به محدوده های آموزشی و محدوده چک، مدل UHI_{max} در دو حالت متفاوت محلی سازی شد. در حالت اول، ضرایب مدل محلی در محدوده آموزشی با لحاظ کردن شاخص نسبت منظر به دست آمد. بدین منظور، کانیون ها براساس شاخص نسبت منظر به یازده کلاس متفاوت طبقه بندی شدند و مقدار UHI_{max} شبیه سازی شده و اندازه گیری شده آنها در منطقه آموزشی محاسبه شد و از طریق تحلیل رگرسیون این دو دسته داده، مدل محلی اوکه در منطقه مطالعاتی به دست آمد. در حالت دوم، ابتدا کانیون های محدوده آموزشی براساس شاخص طول زبری در دو دسته جداگانه قرار گرفت و سپس دسته اول کانیون ها، براساس شاخص نسبت منظر، به هشت گروه مجزا و دسته دوم به سه گروه متفاوت طبقه بندی شد. با محاسبه UHI_{max} شبیه سازی شده و اندازه گیری شده هر یک از گروه ها و به کارگیری تحلیل رگرسیون، مدل محلی سازی شده اوکه برای هر یک از دو طبقه یادشده تعیین شد.

استناد:

خادم عاقلی، ز.، هاشمی اشکاء، س. ح.، علیان، س.، ارزیابی تأثیر شاخص طول زبری در مدل سازی بیشینه شدت جزایر حرارتی شهری با استفاده از سنجش از دور و سیستم های اطلاعات مکانی (مطالعه موردی: منطقه ۲۲ شهر تهران)، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴: ۷۵-۱۰۰.

بحث و نتیجه گیری: با اعتبارسنجی مدل های به دست آمده در محدوده چک، مقادیر R^2 ، $RMSE$ و MAE حاصل از رگرسیون در حالت اول، به ترتیب ۰/۵۳، ۰/۷۳، ۱/۱۸ ± و ۰/۹۸ و در حالت دوم، به ترتیب ۰/۸۰، ۰/۸۹، ۱/۰۵ ± و ۰/۸۷ به دست آمد. مقایسه این نتایج نشان می دهد در نظر گرفتن شاخص مقاومت آبرودینامیک در فرایند مدل سازی UHI_{max} ، ضمن افزایش ضرایب همبستگی و ضریب تشخیص رگرسیون، سبب افزایش دقت نتایج حاصل از مدل محلی و بهبود آن شده است.

واژه های کلیدی: جزایر حرارتی شهری، مدل اوکه، ضریب زبری، سنجش از دور، سیستم های اطلاعات مکانی.

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

* نویسنده عهده دار مکاتبات: s.agheli66@gmail.com

شناسه دیجیتال مقالات: https://doi.org/10.48308/gisj.2024.234358.1197



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

۱- مقدمه

شهرها سیستم‌های پیچیده، سازگار و خودسازمان‌دهی شمرده می‌شوند که گسترش سریع شهرنشینی آنها را با چالش‌های متعددی مانند آلودگی هوا، تهدیدات تغییرات اقلیمی و پدیده جزایر حرارتی شهری روبه‌رو کرده است (Kim et al., 2012). در میان این چالش‌ها، جزایر حرارتی شهری (UHI) به یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی شهری در جهان تبدیل شده است (Saadallah, 2018). جزایر حرارتی شهری که به افزایش دمای نواحی شهری در قیاس با مناطق روستایی اطراف اشاره دارد، نوعی پدیده انباشت گرما در محدوده شهری است که از بارزترین ویژگی‌های اقلیم شهری شناخته می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که این پدیده می‌تواند دمای هوای شهرها را بین ۵ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد (Santamouris, 2013). افزایش دمای ناشی از این پدیده، ضمن تأثیرگذاری در جریان مواد و انرژی در سیستم‌های اکولوژیکی شهری و ایجاد تغییر در ساختار و عملکرد آنها، مجموعه‌ای از تأثیرات اکولوژیکی و محیطی را در اقلیم شهری، محیط جوّی و سلامت شهروندان بر جای می‌گذارد (Yang et al., 2016). تغییر کاربری اراضی، کاهش پوشش گیاهی، هندسه شهری، تغییر شکل طبیعی محیط، تغییر ویژگی مواد سطح طبیعی زمین و فعالیت‌های روزمره گرمای شهروندان از دلایل اصلی بروز این پدیده است (Oke, 1982; EPA, 2008). با توجه به اینکه پارامترهای مرتبط با هریک از این عوامل تابع مکان‌اند، UHI پدیده‌ای مکان‌محور محسوب می‌شود که شدت آن، در نقاط متفاوت، متغیر است. در میان این عوامل، هندسه شهری به‌علت تأثیرش در جریان هوا و تبادلات تابشی میان زمین و آسمان، نقش مهمی در شکل‌گیری این پدیده ایفا می‌کند (Oke, 1981)؛ از این‌رو بررسی ارتباط میان این پدیده و هندسه شهری ضروری است (Bittencourt et al., 2010). مدل‌سازی و شناسایی الگوی توزیع مکانی UHI، بر مبنای هندسه شهری، امکان کنترل واکنش شهرها در برابر تابش‌های

خورشیدی و جریان هوا را از طریق بررسی تأثیر طرح‌های گوناگون معماری و شهرسازی در شدت جزایر حرارتی شهری، فراهم می‌آورد و از این‌رو مدل‌سازی یکی از روش‌های مهم در بررسی رفتار این پدیده و تصمیم‌گیری درباره تأثیرات اغلب منفی آن به شمار می‌رود. برای نمونه، مدل‌های شبیه‌ساز UHI را می‌توان با هدف به حداقل رساندن تأثیرات منفی این پدیده، در طراحی معماری و شهرسازی آن دسته از شهرهایی به کار برد که طی فصل تابستان در معرض گرمای بیش‌ازحد قرار دارند و با این کار، ضمن صرفه‌جویی در انرژی مورد نیاز برای تهویه مطبوع این شهرها، تلفات ناشی از استرس گرمایی را کاهش داد (Clarke, 1972). در زمینه مدل‌سازی UHI، متخصصان و پژوهشگران مطالعات چندی انجام داده‌اند که در ادامه، به برخی از آنها اشاره می‌شود. اوکه^۱ (۱۹۸۱) با استفاده از مدل فیزیکی ساده‌ای، ضمن بررسی تأثیرات اختلاف هندسه مناطق شهری و روستایی در پذیرش گرما، نشان داد هندسه کانیون‌ها، به دلیل نقشی که در تنظیم اتلاف گرمای تابشی امواج بلند دارند، پارامتر مهمی در ایجاد جزایر حرارتی شهری شبانه محسوب می‌شوند. در این تحقیق، مدل عددی-تجربی پیش‌بینی بیشینه شدت جزیره حرارتی (UHI_{max}) بر اساس نسبت منظر به‌منزله شاخص نشانگر هندسه کانیون‌های همگن، تهیه و مطرح شد. این پژوهشگر در تحقیقی دیگر (۱۹۸۷)، با تعریف شاخص طول زبری (Z_0) و طبقه‌بندی کانیون‌های ناهمگون برحسب این شاخص، بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌ها را مدل‌سازی کرد و نتایج را بهبود بخشید. ناکاتا و دسوزا^۲ (۲۰۱۳) در تحقیقی، با هدف بررسی نقش هندسه شهری در شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری و انطباق مدل اوکه با شرایط واقعی، بیشینه شدت جزایر حرارتی کانیون‌های شهری را اندازه‌گیری و از طریق مدل اوکه محاسبه کردند. بدین ترتیب این پدیده را مدل‌سازی محلی و

1. Oke

2. Nakata & De Souza

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، ابتدا محدوده مطالعاتی و داده‌های هندسی و ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق معرفی می‌شود و در ادامه، مبانی نظری- محاسباتی و روش انجام شدن کار در سه بخش، به تفصیل بیان می‌شود.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه، در این تحقیق، شامل بخش‌هایی از محلات زیبادشت و گلستان شرقی، واقع در منطقه ۲۲ شهر تهران می‌شود (شکل ۱). این محدوده که از شمال به بزرگراه خرازی، از شرق به خیابان طبیعت، از جنوب به بزرگراه همدانی و از غرب به دریاچه خلیج فارس محدود شده است، در ارتفاع متوسط ۱۳۱۵ متر از سطح دریا قرار دارد و ناحیه‌ای با مساحت تقریبی ۵۵۱ هکتار را شامل می‌شود. محدوده مذکور که شامل ۸۷۵۲ ساختمان و ۵۶۸ عدد کانیون شهری است، به دو بخش آموزشی و چک تقسیم شد. محدوده آموزشی در فرایند مدل‌سازی و محدوده چک در فرایند اعتبارسنجی و ارزیابی دقت مدل محلی تهیه‌شده به کار رفت.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق به شرح ذیل است: - داده‌های هندسه شهری: از Shapefile پارسل‌ها (شامل فیلد توصیفی ارتفاع از سطح آب‌های آزاد) و ساختمان‌های شهری (شامل فیلد توصیفی ارتفاع از سطح آب‌های آزاد) و همچنین لایه محور معابر (شامل فیلد توصیفی نام معبر و ارتفاع از سطح آب‌های آزاد) در برآورد مقادیر UHI_{max} حاصل از مدل اوکه و سایر پارامترها و شاخص‌های هندسی و مقاومت شهری مورد نیاز فرایند مدل‌سازی استفاده شد. این داده‌ها از سوی سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران تهیه شده است.

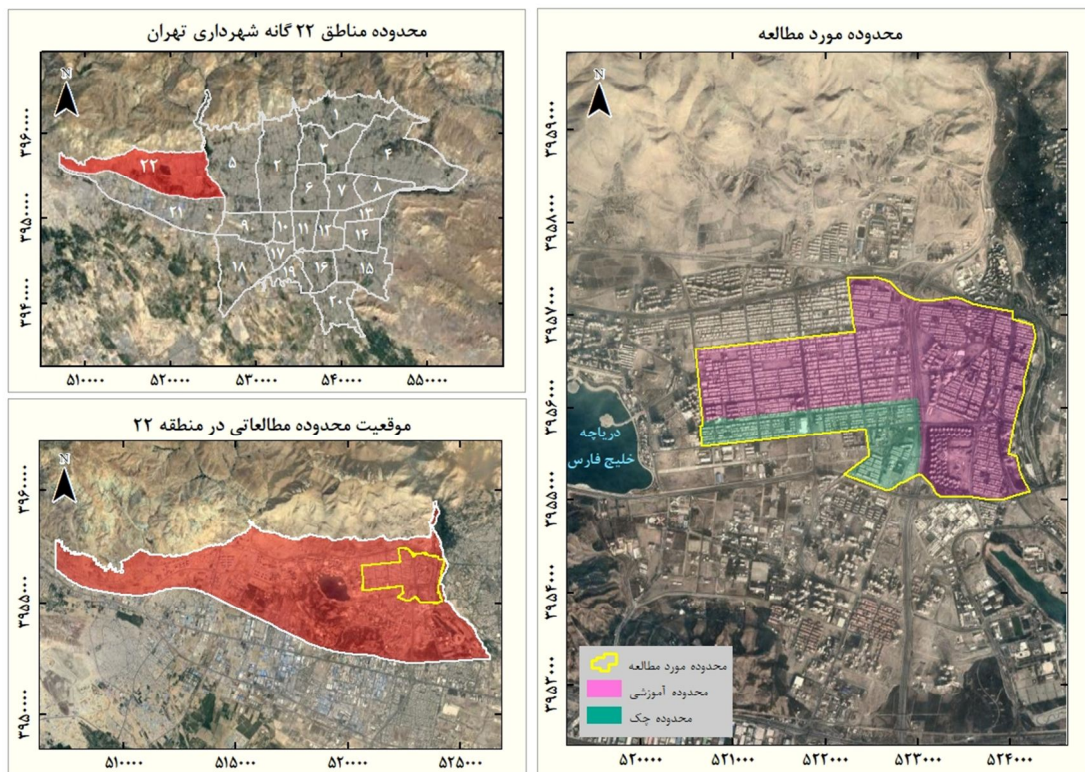
اعتبارسنجی کردند و نتایج به دست آمده نقش مؤثر هندسه شهری در تشکیل جزایر حرارتی شبانه را تأیید کرد. ناکاتا و همکاران (۲۰۱۸)، با تهیه و ارائه افزونه‌ای محاسباتی در محیط نرم‌افزار ArcGIS، در شهرهای بارو و سائوخوزه دو ریو پورتوی برزیل براساس مدل اوکه و شاخص طول زبری، به مدل‌سازی پدیده جزایر حرارتی شبانه و ارزیابی اثر هندسه شهری پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که در نظر گرفتن شاخص طول زبری، در فرایند مدل‌سازی، ضریب تشخیص را افزایش داده و همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های شبیه‌سازی شده را بهبود بخشیده است. مطیعیان و هاشمی اشکاء^۱ (۲۰۲۲)، با پردازش و تحلیل داده‌های هندسی کانیون‌های شهری و دمای سطح زمین حاصل از داده‌های سنجنده استر در بستر GIS، تأثیر شاخص نسبت منظر در شدت جزایر گرمایی شبانه شهری را بررسی و کارایی مدل اوکه را ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش وجود رابطه خطی نسبتاً قوی میان بیشینه شدت جزایر گرمایی شهری و شاخص نسبت منظر را تأیید کرد. صیادی^۲ و همکاران (۲۰۲۲) نیز تأثیر هندسه شهری در حداکثر شدت جزیره حرارتی را در بستر GIS بررسی کردند. برپایه نتایج این تحقیق، با افزایش شاخص نسبت منظر، بیشینه شدت جزیره حرارتی دچار افزایش محسوسی می‌شود. با این حال، از آنجاکه شدت جزایر حرارتی در نواحی مطالعه‌شده چندان شایان توجه نبود، می‌توان نتیجه گرفت که هندسه ساختمان‌ها در این مناطق دارای پیکربندی مناسبی است.

ارزیابی و بررسی تأثیرات آیرودینامیک هندسه شهری در نتایج مدل‌سازی بیشینه شدت جزایر حرارتی شهری، با استفاده از داده‌های دمایی سنجنده‌های حرارتی و قابلیت‌های سیستم‌های اطلاعات مکانی، از جمله موضوعاتی است که تا به حال، در مطالعات داخلی و خارجی، کمتر بدان پرداخته شده است. در این پژوهش، سعی شده است فرایند مدل‌سازی پدیده مذکور با توجه به این ملاحظات انجام شود و از این رو، از نوآوری‌های این پژوهش به حساب می‌آید.

1. Motieyan & Hashemi Ashka
2. Sayadi

داده‌های هواشناسی: برای محاسبه مقدار بخار آب هوای محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی مدنظر، از داده‌های دما و رطوبت نسبی هوای نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک هواشناسی به آن محدوده (ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد) استفاده شد. این داده‌ها که در وب‌گاه سرویس خدمات آب‌وهوایی Ogrimet در دسترس قرار دارد، در جدول ۲ آمده است.

داده‌های ماهواره‌ای: تصاویر روزانه و شبانه سنجنده استر در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲، برای استخراج داده‌های دمای سطح زمین (LST) و استفاده از آنها در فرایند مدل‌سازی محلی و اعتبارسنجی مقادیر UHI_{max} ، به کار رفتند. این تصاویر و داده‌ها در وب‌گاه سازمان زمین‌شناسی ایالات متحد آمریکا در دسترس است. در جدول ۱، مشخصات داده‌های مذکور آمده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در منطقه ۲۲ شهر تهران

جدول ۱. مشخصات داده‌های شبانه و روزانه سنجنده استر

تاریخ تصویربرداری	زمان تصویربرداری (UTC)	مسیر	ردیف	پوشش ابر	نوع داده
۲۰۱۶/۰۹/۰۵	۱۸:۴۷	۲۹	۲۰۹	۰	شبانه
۲۰۱۷/۰۹/۱۷	۱۸:۴۱	۲۹	۲۰۹	٪۱	شبانه
۲۰۱۷/۰۹/۱۹	۰۷:۲۶	۱۶۴	۳۵	۰	روزانه
۲۰۱۷/۰۹/۲۴	۱۸:۴۷	۲۹	۲۰۹	٪۸	شبانه
۲۰۱۷/۱۰/۱۹	۱۸:۴۰	۲۹	۲۰۹	۰	شبانه
۲۰۱۸/۰۶/۲۵	۱۸:۳۵	۲۹	۲۰۹	٪۱	شبانه
۲۰۱۹/۰۸/۱۳	۱۸:۳۵	۲۹	۲۰۹	٪۱۹	شبانه
۲۰۲۰/۰۵/۰۴	۱۸:۴۰	۲۹	۲۰۹	٪۱۳	شبانه
۲۰۲۱/۰۹/۱۹	۱۸:۴۲	۲۹	۲۰۹	٪۱	شبانه
۲۰۲۲/۰۶/۲۷	۱۸:۲۸	۲۹	۲۰۹	٪۱	شبانه

جدول ۲. اطلاعات ایستگاه سینوپتیک هواشناسی فرودگاه مهرآباد

طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	تاریخ	ساعت	دما (سانتی‌گراد)	رطوبت نسبی (درصد)
			۲۰۱۶/۰۹/۰۵	۲۱:۰۰	۲۵/۲	۲۰
			۲۰۱۷/۰۹/۱۷	۲۱:۰۰	۲۱/۷	۲۹
			۲۰۱۷/۰۹/۲۴	۲۱:۰۰	۲۲/۵	۲۶
			۲۰۱۷/۱۰/۱۹	۲۱:۰۰	۱۲/۷	۳۹
۵۱/۳۱۲۸	۳۵/۶۹۳۱	۱۱۹۱	۲۰۱۸/۰۶/۲۵	۲۱:۰۰	۳۱/۵	۱۳
			۲۰۱۹/۰۸/۱۳	۲۱:۰۰	۲۸/۲	۳۱
			۲۰۲۰/۰۵/۰۴	۲۱:۰۰	۱۹/۲	۲۷
			۲۰۲۱/۰۹/۱۹	۲۱:۰۰	۲۴/۱	۲۵
			۲۰۲۲/۰۶/۲۷	۲۱:۰۰	۳۰/۵	۱۰

۳-۲- مبانی نظری و محاسباتی

۳-۱- ارتباط جزایر حرارتی با هندسه شهری

در میان عوامل مؤثر در شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری، هندسه شهر نقش مهمی دارد؛ این عامل به چیدمان و تراکم ساختمان‌ها در شهر اشاره دارد (Chatzipoulka et al., 2014) و در اساس، محصول طراحی‌های شهری است. هندسه شهر با نقشی که در جریان هوا و تبادلات تابشی میان زمین و آسمان دارد، در تشکیل و تشدید این پدیده اثر می‌گذارد. سطوح معابر و ساختمان‌ها، به‌علت موانع شهری گوناگون، نمی‌توانند گرمای جذب‌شده در طول روز را به‌راحتی آزاد کنند و ضمن تبدیل آن به توده‌های حرارتی، موجب ایجاد پدیده جزایر حرارتی می‌شوند. طی مطالعات بررسی تأثیر هندسه شهری در جزایر حرارتی، اغلب کانیون‌های شهری مورد توجه قرار گرفته‌اند. کانیون شهری به فضای سه‌بعدی خیابان گفته می‌شود که با دیوارهای ساختمان‌های بلند در دو طرف آن محدود شده است. کانیون‌ها، از طریق فرایندهای گوناگون، در تشکیل جزایر حرارتی شهری اثرگذارند. آنها، با کاهش فضای دسترسی به آسمان، مانع خروج امواج نورانی رسیده به سطوح شهری می‌شوند و با ایجاد سطوح متعدد برای بازتاب‌های متوالی و جذب

چندگانه امواج، جذب انرژی حرارتی را افزایش می‌دهند و سبب بالا رفتن دمای منطقه شهری می‌شوند. انرژی حرارتی‌ای که کانیون‌ها جذب می‌کنند، در طول روز نگهداری و طی شب، با شدت بیشتری منتشر می‌شوند. در فرایندی دیگر، ساختمان‌های بلندی که در طرفین کانیون‌ها قرار دارند، با ایجاد سایه، دمای نواحی شهری را کاهش می‌دهند. این دو فرایند در همدیگر تأثیر متقابل دارند. در نهایت، کانیون‌های شهری با کاهش سرعت باد و تغییر جهت آن، جریان هوا را کاهش می‌دهند و از پخش گرمایش حاصل از فعالیت‌های روزمره شهروندان جلوگیری می‌کنند؛ بدین ترتیب سبب گرم‌تر شدن هوای نواحی شهری می‌شوند. تا کنون، درباره جزایر حرارتی و ارتباط آن با هندسه شهری، تحقیقات بسیاری انجام شده و در این میان، نتایج مطالعات اوکه مرجع بسیاری از این پژوهش‌ها بوده است. اوکه جزیره حرارتی را پدیده‌ای شبانه تعریف کرد که معمولاً، به‌علت واگرایی دمایی مناطق شهری-روستایی و سرعت سرمایش سطوح این مناطق در حوالی زمان غروب خورشید، ایجاد می‌شود. وی، با این تعریف، نشان داد که شدت این پدیده پس از گذشت سه تا پنج ساعت از غروب آفتاب (حوالی ۹ تا ۱۱ شب) به بیشترین مقدار خود می‌رسد و در حدود ظهر، کمینه

هندسه شهری تفاوت دارند و رفتار آنها در برابر جریان هوا متفاوت است و از این رو تأثیر متفاوتی در شکل‌گیری جزیره حرارتی شهری دارند. در مطالعات پدیده UHI، مقاومت موانع شهری در برابر جریان هوا معمولاً با استفاده از شاخص آیرودینامیک طول زبری اندازه‌گیری می‌شود. این شاخص که به میزان انباشت سطوح ناهموار و موانع شهری اشاره دارد، پارامتری مهم در تخمین شارهای سطحی به حساب می‌آید و به منزله ارتفاعی تعریف می‌شود که در آن سرعت باد، در شرایط خنثا، صفر می‌شود (Su et al., 2001). افزایش زبری سطوح سبب ایجاد انحراف بیشتر در جریان هوا و کاهش سرعت آن در نواحی شهری می‌شود و در نتیجه، نواحی بیشتری از سطح زمین در تماس با جریان هوا قرار می‌گیرد و تبادل حرارتی بین آنها کاهش می‌یابد. در پی این وضعیت، حرارت سطح زمین به نواحی فوقانی کانیون‌ها انتقال می‌یابد و شکل‌گیری جزایر حرارتی با شدت بیشتر آسان‌تر می‌شود. شاخص طول زبری مطابق رابطه (۲) به دست می‌آید (Oke, 1987).

$$Z_0 = 0.5 H(A^*/A) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه، H ، A^* ، A و Z_0 به ترتیب، میانگین ارتفاع ساختمان‌های کانیون (مترمربع)، میانگین مساحت نمای ساختمان‌های مشرف به معبر کانیون (مترمربع)، میانگین مساحت سطح اشغال ساختمان‌های مشرف به معبر کانیون (برحسب مترمربع) و ضریب طول زبری (متر) هستند. اوکه عامل ناهمگونی کانیون‌ها را در مدل‌سازی UHI_{max} در نظر گرفت و براساس شاخص طول زبری، روش دیگری را در برآورد UHI_{max} مطرح کرد. از آنجاکه کانیون‌های دارای دامنه مشابه ضریب زبری (Z_0) مقاومت نسبتاً یکسانی در برابر جریان هوا از خود نشان می‌دهند، می‌توان آنها را ابتدا، براساس شاخص طول زبری، طبقه‌بندی و سپس، براساس شاخص نسبت منظر، دسته‌بندی کرد. در ادامه، تحلیل رگرسیون و تهیه مدل UHI_{max} برای هر طبقه مربوط به مقادیر Z_0 انجام می‌شود و دقت نتایج بهبود می‌یابد

می‌شود (Stewart et al., 2021; Roth, 2013). اوکه (۱۹۸۱) اثر شاخص نسبت منظر کانیون‌های همگن شهری را (که براساس نسبت ارتفاع متوسط ساختمان‌های کانیونی به عرض متوسط معبر آن کانیون محاسبه می‌شود)، در بیشینه شدت جزایر حرارتی، بررسی کرد و با استفاده از تحلیل رگرسیون میان مشاهدات انجام‌شده و ویژگی‌های مشترک آنها، مدل عددی- تجربی برآورد بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌ها براساس شاخص نسبت منظر را به صورت رابطه (۱) مطرح کرد.

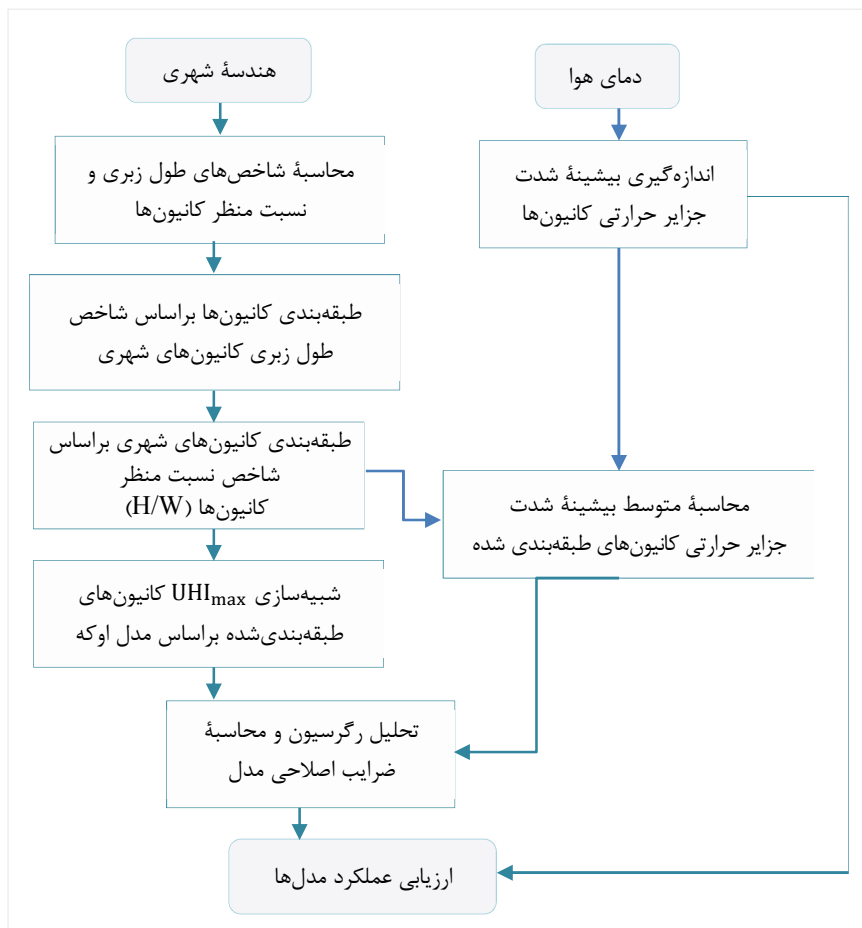
$$\text{رابطه (۱)} \quad UHI_{max} = 7.45 + 3.97 \ln(H/W)$$

در این معادله، پارامترهای H ، W و UHI_{max} به ترتیب، ارتفاع متوسط ساختمان‌ها (برحسب متر)، عرض متوسط معبر (برحسب متر) و بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون شهری (برحسب درجه سانتی‌گراد) است. نسبت H/W نیز مقدار شاخص نسبت منظر را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مدل اوکه به محل انجام شدن مشاهدات و شرایط اقلیمی آن وابسته است، به کار بردن این مدل بدون توجه به تفاوت‌های محیطی چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مدل یادشده، در بسیاری از شهرهای امریکای شمالی و اروپا، قدرت پیش‌بینی چشمگیری داشته؛ اما در شهرهای دارای شرایط اقلیمی متفاوت، مانند شهرهای کره و ژاپن، قادر به پیش‌بینی مقادیر پایین شدت جزیره حرارتی نبوده است (Montávez et al., 2008). علت این مسئله را می‌توان به تفاوت بسیار زیاد ویژگی‌های حرارتی این شهرها نسبت داد (Johnson et al., 1991). این موضوع، ضرورت ارزیابی و اعتبارسنجی اولیه مدل اوکه در مناطق مورد مطالعه و ارائه مدلی محلی و منطبق بر شرایط جغرافیایی و فیزیکی از منطقه را نمایان می‌کند. از طرفی، مدل اوکه با فرض وجود کانیون‌های همگن در منطقه مورد مطالعه مطرح شد که این فرض در واقعیت، در بیشتر شهرها، چندان مصداق ندارد. اغلب شهرها متشکل از کانیون‌هایی ناهمگن‌اند که از لحاظ شکل و

از این روش محدود و گاه ناممکن و اغلب پرهزینه و زمان‌بر شود. استفاده از سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند در برآورد شدت جزایر حرارتی نواحی شهری مطالعاتی و حل این چالش مفید باشد. چالش دوم این است که محاسبه مقادیر شاخص‌های هندسی مورد نیاز فرایند مدل‌سازی، به دلیل نیاز به پردازش‌ها و تحلیل‌های مکانی-توصیفی گوناگون، دشوار و زمان‌بر و گاه ناممکن است. بهره‌گیری از سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS) و ظرفیت‌های آن می‌تواند این چالش را برطرف کند. در ادامه، این موارد به تفصیل بیان می‌شود.

(Nakata et al., 2018; Oke, 1987). شکل ۲ فرایند توضیح داده شده را نشان می‌دهد.

فرایند مدل‌سازی و اعتبارسنجی UHI_{max} دو چالش اساسی را شامل می‌شود. چالش نخست به تهیه داده‌های درجه حرارت هوا بازمی‌گردد. این داده‌ها اطلاعات شدت جزایر حرارتی مورد نیاز در مدل‌سازی را فراهم می‌کنند. اندازه‌گیری دمای هوا و شدت جزیره حرارتی اغلب به روش مستقیم و با استفاده از شبکه ایستگاه‌های ثابت هواشناسی یا اتومبیل‌های دارای سنسورهای حرارتی انجام می‌شود (EPA, 2008). تراکم اندک این ایستگاه‌ها و محدودیت‌های دسترسی مستقیم به نواحی مورد مطالعه سبب می‌شود استفاده



شکل ۲. فلوچارت مدل‌سازی و اعتبارسنجی UHI_{max}

منبع: نگارندگان

۲-۳-۲- کاربرد سنجش از دور در مدل‌سازی بیشینه

شدت جزایر حرارتی شهری

داده‌های شدت جزایر حرارتی کانیون‌های شهری واقع در محدوده‌های مطالعاتی از جمله داده‌های اصلی مورد نیاز در فرایند مدل‌سازی UHI_{max} محسوب می‌شود. از سویی، داده‌های فروسرخ حرارتی سنجنده‌های ماهواره‌ای، همراه با الگوریتم‌های ارائه‌شده در سنجش از دور، امکان بازیابی غیرمستقیم دمای سطح زمین و برآورد شدت جزایر حرارتی سطحی نواحی مورد مطالعه را فراهم کرده است. سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحد، در پژوهشی، روند تغییرات روزانه و شبانه دمای سطح زمین و درجه حرارت هوا را براساس کاربری اراضی نواحی مطالعاتی بررسی کرد. طبق این پژوهش، دمای سطح زمین تأثیر درخور توجهی در دمای هوا دارد و الگوی دمای هوای شب‌هنگام، در مناطق شهری و حومه، از الگوی دمای سطح زمین پیروی می‌کند (EPA, 2008). با توجه به اینکه پدیده UHI پس از غروب آفتاب و هنگام شب تشدید می‌شود (Stewart et al., 2021; Roth, 2013)، دمای سطح زمین و شدت جزایر حرارتی سطحی کانیون‌ها را می‌توان، به ترتیب، به صورت تقریب مناسبی از دمای هوا و جایگزینی مناسب برای بیشینه شدت جزایر حرارتی آنها به کار برد. انتخاب سنجنده مناسب و نحوه بازیابی دمای سطح زمین از مواردی است که باید به دقت بدان توجه داشت. در بخش‌های بعد، به این موارد پرداخته می‌شود.

۱-۲-۳-۲- انتخاب سنجنده

داده‌های حرارتی با استفاده از سنجنده‌های گوناگونی به دست می‌آیند که در جدول ۳ به اسامی برخی از آنها اشاره شده است. نزدیکی زمان اخذ داده‌های حرارتی با محدوده زمانی رخداد بیشینه شدت جزایر حرارتی و همچنین توان تفکیک مکانی بالاتر این داده‌ها از مهم‌ترین معیارهای انتخاب سنجنده حرارتی مناسب در این مطالعه به شمار می‌رفت و با توجه به این شاخص‌ها، داده‌های سنجنده استر برای این تحقیق انتخاب شد.

۲-۳-۲-۲- محاسبه دمای سطح زمین

در چند دهه اخیر، بازیابی دمای سطح زمین با استفاده از سنجنده‌های ماهواره‌ای پیشرفت‌های چشمگیری داشته و الگوریتم‌های بسیاری در این زمینه ارائه شده است. این الگوریتم‌ها بر فرضیات و تقریب‌های متنوع از معادله تشعشی استوار است (Li et al., 2013).

در این میان، استفاده از الگوریتم پنجره مجزا به دلیل دقت و سادگی، رایج‌تر است. این الگوریتم، با استفاده از حذف تأثیرات اتمسفری و ترکیبات خطی و غیرخطی دمای ظاهری دو باند حرارتی مجاور، دمای سطح زمین را محاسبه می‌کند (Du, 2015). از مزایای این روش، می‌توان به نیاز نداشتن به پروفایل جوّی دقیق و کارآمدی در تمامی سنجنده‌های با حداقل دو باند حرارتی اشاره کرد. از محدودیت‌های این الگوریتم نیز می‌توان وابستگی ضرایب مدل به نوع منطقه و وابستگی

جدول ۳. مشخصات سنجنده‌های حرارتی

نام سنجنده	نام ماهواره	توان تفکیک مکانی (متر)	زمان تقریبی دریافت داده (UTC)
AVHRR	نوا	۱۱۰۰	۰۷:۳۰ و ۱۹:۳۰
SLSTR	سنتینل ۳	۱۰۰۰	۰۷:۰۰ و ۱۷:۰۰
MODIS	آکوا	۱۰۰۰	۰۱:۰۰ و ۱۵:۰۰
MODIS	ترا	۱۰۰۰	۱۰:۳۰ و ۲۴:۰۰
OLI/TIRS	لندست ۸	۱۰۰	۰۷:۱۵
ASTER	ترا	۹۰	۰۷:۳۰ و ۱۸:۴۵

$$LST = \frac{\{C_{14}(D_{13} + B_{13})\} - \{C_{13}(D_{14} + B_{14})\}}{(C_{14}A_{13} - C_{13}A_{14})} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این معادله، ضرایب A, B, C و D باندهای ۱۳ و ۱۴ مطابق روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$A_{13} = 0.145236 \times \varepsilon_{13} \times \tau_{13} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$B_{13} = 0.145236 \times T_{13} + 33.685 \times \varepsilon_{13} \times \tau_{13} - 33.685 \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$C_{13} = (1 - \tau_{13}) \times [1 + (1 - \varepsilon_{13}) \times \tau_{13}] \times 0.145236 \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$D_{13} = (1 - \tau_{13}) \times [1 + (1 - \varepsilon_{13}) \times \tau_{13}] \times 33.685 \quad \text{رابطه (۷)}$$

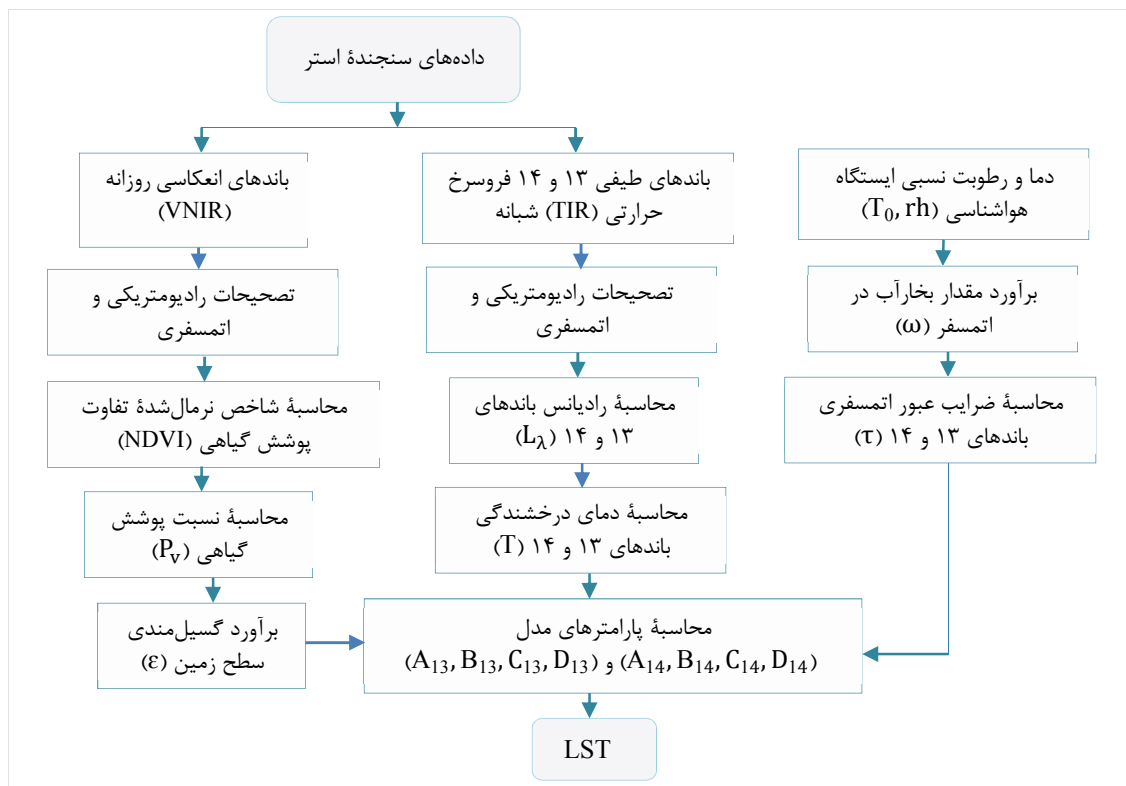
$$A_{14} = 0.13266 \times \varepsilon_{14} \times \tau_{14} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$B_{14} = 0.13266 \times T_{14} + 30.273 \times \varepsilon_{14} \times \tau_{14} - 30.273 \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$C_{14} = (1 - \tau_{14}) \times [1 + (1 - \varepsilon_{14}) \times \tau_{14}] \times 0.13266 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$D_{14} = (1 - \tau_{14}) \times [1 + (1 - \varepsilon_{14}) \times \tau_{14}] \times 30.273 \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

آن به اطلاع از ضریب گسیل‌مندی را برشمرد (Sobrinó & Jiménez-Muñoz, 2014; Jouybari, 2015). سنجنده استر دارای پنج باند حرارتی است که هر یک از آنها را می‌توان در این الگوریتم به کار برد. برمبنای تحقیقات، پنجره اتمسفری در محدوده طول‌موج‌های بین ۱۰ تا ۱۲ میکرومتر، در مقایسه با سایر پنجره‌های اتمسفری، دارای انتقال‌پذیری اتمسفری بیشتر و تغییرات گسیل‌مندی کمتر است. از این‌رو انتظار می‌رود محاسبه دمای سطح زمین در این محدوده دقیق‌تر باشد (Jiménez-Muñoz & Sobrinó, 2010). براین‌اساس، در این تحقیق، از باندهای طیفی ۱۳ و ۱۴ برای محاسبه دمای سطح زمین به‌روش پنجره مجزا استفاده شد. شکل ۳ فلوچارت مراحل محاسبه LST به‌روش پنجره مجزا را نشان می‌دهد. در این الگوریتم، دمای سطح زمین (برحسب درجه کلوین) مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Ndossi & Avdan, 2016).



شکل ۳. فلوچارت مراحل محاسبه دمای سطح زمین در الگوریتم پنجره مجزا

منبع: نگارندگان

در این معادله، ω مقدار بخار آب در جو (g/cm^2)، T_0 دمای هوا (درجه کلوین) و rh درصد رطوبت نسبی منطقه مورد مطالعه در زمان تصویربرداری سنجنده است. مقادیر T_0 و به‌ویژه، rh را در نقاط گوناگون پهنه مورد مطالعه نمی‌توان دقیق اندازه‌گیری کرد و از دیگر سو، تغییرات این دو پارامتر در این منطقه شایان توجه نیست و مقدار آنها تقریباً ثابت است. بنابراین، با توجه به اینکه شرایط آب‌وهوایی نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی و محدوده مورد مطالعه مشابه و تقریباً یکسان است، در رابطه (۱۶) می‌توان از داده‌های این ایستگاه بهره برد.

ضریب عبور اتمسفری باندهای طیفی ۱۳ و ۱۴ سنجنده استر، با توجه به مقدار بخار آب اتمسفر، براساس معادلات جدول ۴ محاسبه می‌شود (Pu et al., 2006).

جدول ۴. معادلات محاسبه ضریب عبور اتمسفری باندهای طیفی ۱۳ و ۱۴ سنجنده استر

معادله	مقدار بخار آب (g/cm^2)
$\tau_{13} = -0.071551 \omega + 0.962772$	۱/۶-۰/۲
$\tau_{14} = -0.091837 \omega + 0.986703$	
$\tau_{13} = -0.129086 \omega + 1.056086$	۴/۶-۱/۶
$\tau_{14} = -0.150982 \omega + 1.078407$	
$\tau_{13} = -0.059129 \omega + 0.740074$	۵/۲-۴/۶
$\tau_{14} = -0.62938 \omega + 0.685120$	

دمای درخشندگی باندهای حرارتی ۱۳ و ۱۴ از دیگر مقادیر مورد نیاز در محاسبه LST به شمار می‌رود. بدین منظور باید ابتدا، مطابق رابطه (۱۷)، شدت تابش امواج فروسرخ حرارتی در تصاویر به رادیانس تبدیل شود (Abrams et al., 2002).

$$L_{\lambda} = (DN-1) * UCC \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

در این معادله L_{λ} رادیانس، DN مقدار درجه خاکستری ثبت شده و UCC ضریب تبدیل واحد باند فروسرخ حرارتی است که مقدار آن، در مورد باندهای ۱۳ و ۱۴ به ترتیب، ۰/۰۰۵۶۹۳ و ۰/۰۰۵۲۲۵ است.

در روابط اشاره شده، ε قابلیت انتشار سطح زمین (گسیل‌مندی)، τ ضریب عبور اتمسفری و T دمای درخشندگی باندهای طیفی ۱۳ و ۱۴ است که نحوه محاسبه آنها در ادامه آورده شده است. برای محاسبه قابلیت انتشار سطح زمین، ابتدا باید شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) و نسبت پوشش گیاهی (P_v) محاسبه شود. شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی مطابق رابطه (۱۲) به دست می‌آید (Van de Griend & Owe, 1993).

$$\text{رابطه (۱۲)} \quad NDVI = (NIR-RED)/(NIR+RED)$$

در این معادله، NIR و RED به ترتیب، مقدار بازتابش باندهای فروسرخ و قرمز سنجنده استر است. نسبت پوشش گیاهی نیز با رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود (Carlson & Ripley, 1997).

$$P_v = [(NDVI - NDVI_s)/(NDVI_v - NDVI_s)]^2$$

رابطه (۱۳)

در این رابطه، $NDVI_v$ و $NDVI_s$ به ترتیب، حد آستانه شاخص NDVI برای پوشش‌های گیاهی و خاک‌اند و مقدار آنها، براساس هیستوگرام NDVI به ترتیب، ۰/۵ و ۰/۲ است. با محاسبه P_v ، مقادیر قابلیت انتشار سطح زمین برای باندهای طیفی ۱۳ و ۱۴ مطابق روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شود (Jiménez- (Muñoz et al., 2006).

$$\text{رابطه (۱۴)} \quad \varepsilon_{13} = 0.968 + 0.022 P_v$$

$$\text{رابطه (۱۵)} \quad \varepsilon_{14} = 0.970 + 0.020 P_v$$

مطالعات نشان می‌دهد بخار آب اتمسفر، در عبور امواج از جو زمین، تأثیر چشمگیری دارد و پارامتری تعیین‌کننده در این زمینه محسوب می‌شود (Pu et al., 2006). از این رو، به منظور محاسبه ضریب قابلیت عبور اتمسفری، باید مقدار بخار آب را به دست آورد. مقدار بخار آب در اتمسفر با رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود (Liu & Zhang, 2011).

$$\text{رابطه (۱۶)} \quad \omega = 0.0981 \times \left\{ 10 \times 0.6108 \times \exp \left[\frac{17.27 \times (T_0 - 273.15)}{237.3 + (T_0 - 273.15)} \right] \times rh \right\} + 0.1679$$

شهری‌اند. همان‌طور که در بخش ۲-۳-۱ مشاهده شد این شاخص‌ها، در هر کانیون، تابعی از میانگین ارتفاع، مساحت سطح اشغال، مساحت سطح نما و فاصله ساختمان‌ها از محور معبر آن کانیون‌اند که با استفاده از داده‌های هندسه شهری و از طریق روابط (۱۹) تا (۲۲) محاسبه می‌شوند.

$$D_{\text{right}} = (\sum_1^m D_r)/m, \quad D_{\text{left}} = (\sum_1^n D_l)/n,$$

$$W = D_{\text{right}} + D_{\text{left}} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$H = (\sum_1^s H_i)/s, \quad s = m + n \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$A^* = (\sum_1^s A_i^*)/s \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$A = (\sum_1^s A_i)/s \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

در این معادلات، D_{right} و D_{left} میانگین فاصله ساختمان‌های سمت راست و سمت چپ کانیون از محور آن، W میانگین عرض معبر، H میانگین ارتفاع، A میانگین مساحت سطح اشغال و A^* میانگین مساحت نمای ساختمان‌های مجاور با معبر کانیون است. m و n نیز تعداد ساختمان‌های سمت راست و چپ معبر و s تعداد کل ساختمان‌های موجود در کانیون است. شکل ۴ فرایند محاسبه شاخص‌های هندسی و مقاومت شهری را در یک کانیون نشان می‌دهد. درجه حرارت هوای کانیون‌ها نیز از دیگر داده‌های اساسی مورد استفاده در فرایند مدل‌سازی UHI_{max} است. در بخش ۲-۳-۲، بیان شد که دمای سطح زمین را می‌توان به‌منزله تقریب و جایگزینی مناسب برای درجه حرارت هوا به کار برد؛ بنابراین اندازه‌گیری LST در کانیون‌های شهری از دیگر پردازش‌هایی است که در این تحقیق باید به آن پرداخته شود. بدین‌منظور ابتدا لازم است محور معبر هریک از کانیون‌ها، با تصویر LST حاصل از پردازش داده‌های ماهواره‌ای، هم‌پوشانی داده شود. با توجه به اینکه ممکن است محور کانیون از میان چند پیکسل

در نهایت، دمای درخشندگی باندهای طیفی ۱۳ و ۱۴ با استفاده از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود (Jiménez-Muñoz & Sobrino, 2010; Abrams et al., 2002; Boori, 2015):

$$T = K_2 / \ln(K_1 / L_{\lambda} + 1) \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

در رابطه (۱۸)، K_1 و K_2 ثابت‌های تبدیل حرارتی باندی براساس طول موج عملکرد یک کانال فرسوخ حرارتی‌اند. در جدول ۵، مقادیر ضرایب یادشده برای باندهای ۱۳ و ۱۴ سنجنده استر آمده است.

جدول ۵. ضرایب K_1 و K_2 باندهای طیفی ۱۳ و ۱۴ سنجنده استر

شماره باند	K_1 [$W.m^2sr^{-1}.\mu m^{-1}$]	K_2 [$W.m^2sr^{-1}.\mu m^{-1}$]
۱۳	۸۶۵/۶۵	۱۳۴۹/۸۲
۱۴	۶۴۹/۶۰	۱۲۷۴/۴۹

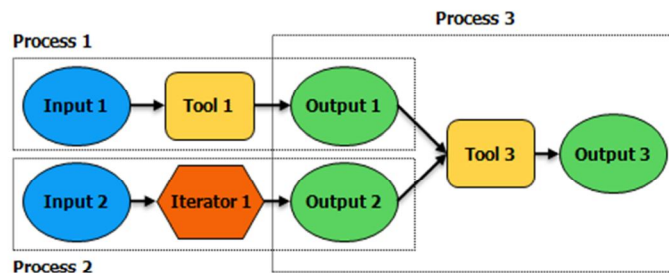
منبع: Jiménez-Muñoz & Sobrino, 2010

همه مراحل پیش‌پردازش و پردازش تصاویر دریافتی می‌تواند در محیط نرم‌افزار ENVI انجام شود. با توجه به تعدد مراحل و پیچیدگی و دشواری انجام شدنشان، به‌ویژه مراحل پردازشی و نیز لزوم تکرار آنها برای تمامی تصاویر ماهواره‌ای دریافتی در بازه زمانی مورد مطالعه، استفاده از برنامه‌ای که این کار را به‌صورت خودکار و بدون بروز هرگونه خطا انجام دهد، احساس می‌شود. کدنویسی برنامه را می‌توان در محیط ENVI یا دیگر نرم‌افزارها انجام داد؛ در این پژوهش، برنامه مذکور با استفاده از نرم‌افزار متلب^۱ نوشته شد. تمامی تصاویر دریافتی، پس از آماده‌سازی در نرم‌افزار ENVI و اعمال تصحیحات لازم روی آنها، در این برنامه پردازش شدند و بدین‌صورت، تصاویر LST آنها تهیه شد.

۳-۳-۲- کاربرد سیستم‌های اطلاعات مکانی در مدل‌سازی بیشینه شدت جزایر حرارتی شهری
مقادیر شاخص‌های نسبت منظر و طول زبری کانیون‌های شهری از مهم‌ترین و ضروری‌ترین داده‌ها در فرایند مدل‌سازی بیشینه شدت جزایر حرارتی

و شاخص‌های ضروری به تکرار مجموعه‌ای از روندهای مکانی و محاسباتی متوالی و متصل به یکدیگر در کانیون‌های محدوده مطالعاتی نیاز دارد که این مسئله، ضمن صرف زمان زیاد، احتمال بروز خطای عامل انسانی را بالا می‌برد. از این رو باید ترتیبی اندیشیده شود تا با خودکارسازی مراحل، ضمن جلوگیری از بروز هرگونه خطا، مدت زمان اجرای فرایندها نیز به حداقل برسد. به این دلیل، در این تحقیق، از برنامه استفاده ModelBuilder در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. ModelBuilder زبان برنامه‌نویسی تصویری و ابزاری کاربردی در پروسه‌های تکراری است که از طریق ایجاد مدل و مدیریت و خودکارسازی پروسه‌های متوالی و پیچیده، صرفه‌جویی زمان در اجرای کارهای تکراری را به همراه دارد. در ModelBuilder مدلی است متشکل از سه بخش ورودی‌ها، ابزارهای پردازشی و خروجی‌ها که با اتصال دهنده‌ها به یکدیگر وصل می‌شوند (شکل ۴). مدل‌های ساخته‌شده در ModelBuilder، مانند سایر ابزارهای GIS، قابلیت استفاده در سایر مدل‌های جدید را دارند. مزیت مهم این قابلیت آن است که می‌توان مدل‌های پیچیده را با هدف مدیریت بهتر و شناسایی و رفع خطاهای احتمالی، به مدل‌های ساده‌تر و کوچک‌تر (زیرمدل) تبدیل کرد و آنها را در مدل اصلی به کار برد. براین اساس، در تحقیق پیش رو، فرایندهای محاسباتی نمایش داده‌شده در شکل‌های ۵ و ۶ به دو مدل اصلی و ده زیرمدل در ModelBuilder تبدیل شد و پارامترها و شاخص‌های هندسی و همچنین LST کانیون‌ها محاسبه و به محور آنها منتسب شد.

عبور کند، باید دمای سطح زمین در هر قطعه از آن محور تعیین و متوسط مقادیر قطعات، به‌منزله دمای سطح زمین آن محور، منظور شود. پس از محاسبه دمای سطح زمین کانیون‌ها، محاسبه شدت جزیره حرارتی آنها در هریک از دوره‌های زمانی دریافت تصویر و درنهایت، محاسبه بیشینه شدت جزیره حرارتی ($SUHI_{max}$) هریک از آنها، در بازه زمانی مورد مطالعه، امکان‌پذیر می‌شود. شکل ۵ روند کار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، فرایندهای محاسبه مقادیر شاخص‌های نسبت منظر، طول زبری و دمای سطح زمین کانیون‌های شهری مجموعه‌ای از عملیات و پردازش‌های معمولاً مکانی متوالی و متصل به یکدیگر، مانند شناسایی و انتخاب ساختمان‌های سمت راست و چپ مجاور با معبر کانیون، شناسایی نمای مشرف به معبر کانیون، استخراج و محاسبه پارامترهای هندسه شهری و درانتها، محاسبه شاخص‌های مورد نظر را دربرمی‌گیرد. این کار، با توجه به تعدد کانیون‌های محدوده مطالعاتی و تعداد نسبتاً زیاد ساختمان‌های ناهمگون در آنها، به‌ویژه در مواجهه با داده‌های سنتی، سخت و زمان‌بر و چه‌بسا ناممکن است. با توجه به ماهیت عمدتاً مکانی داده‌ها و پردازش‌های مورد نیاز، می‌توان این فرایند را به سیستم‌های اطلاعات مکانی مرتبط کرد و از قابلیت‌های آن در مواجهه با داده‌های مکانی رقمی بهره گرفت تا امکان پردازش و انجام دادن محاسبات سریع‌تر برای دسترسی به شاخص‌های مورد نیاز فراهم آید. بر مبنای این نکته، در تحقیق حاضر، این بخش از کار در بستر GIS انجام شد. طبق شکل‌های ۵ و ۶، فرایند اندازه‌گیری و محاسبه پارامترها

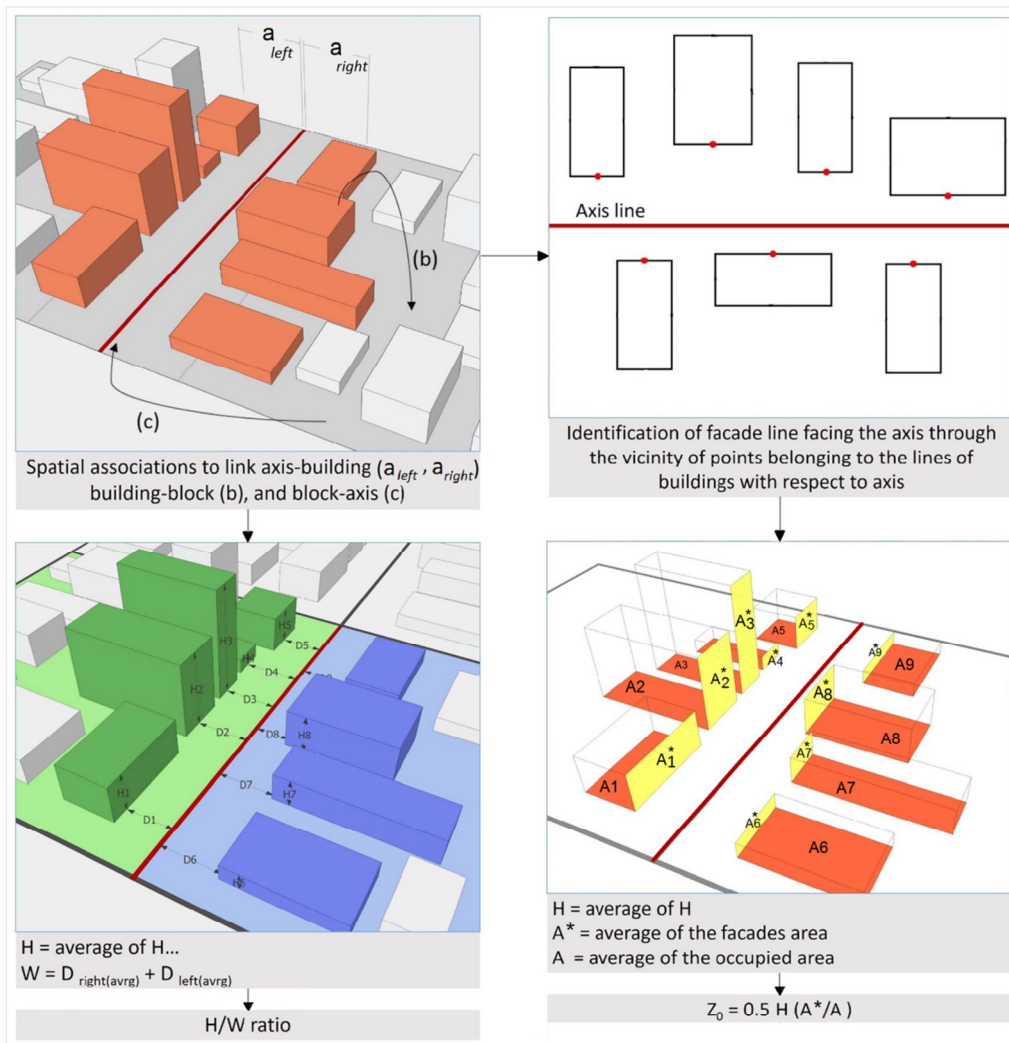


شکل ۴. بخش‌های گوناگون یک مدل در ModelBuilder

منبع: Esri, 2018.

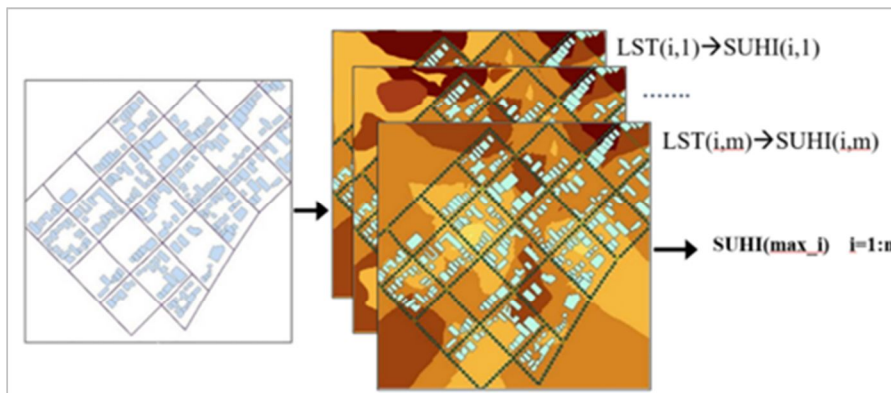
نشریه سنجش از دور و GIS ایران

سال ۱۷، شماره ۲، پاییز ۱۴۰۴



شکل ۵. مراحل محاسبه مقادیر نسبت منظر و طول زبری کانپون شهری

منبع: Nakata et al., 2018



شکل ۶. مراحل محاسبه پیشینه شدت جزایر سطحی کانپون های شهری

منبع: نگارندگان

نشریه سنجش از دور و GIS ایران

سال ۱۷، شماره ۲، پاییز ۱۴۰۴

۳- نتایج

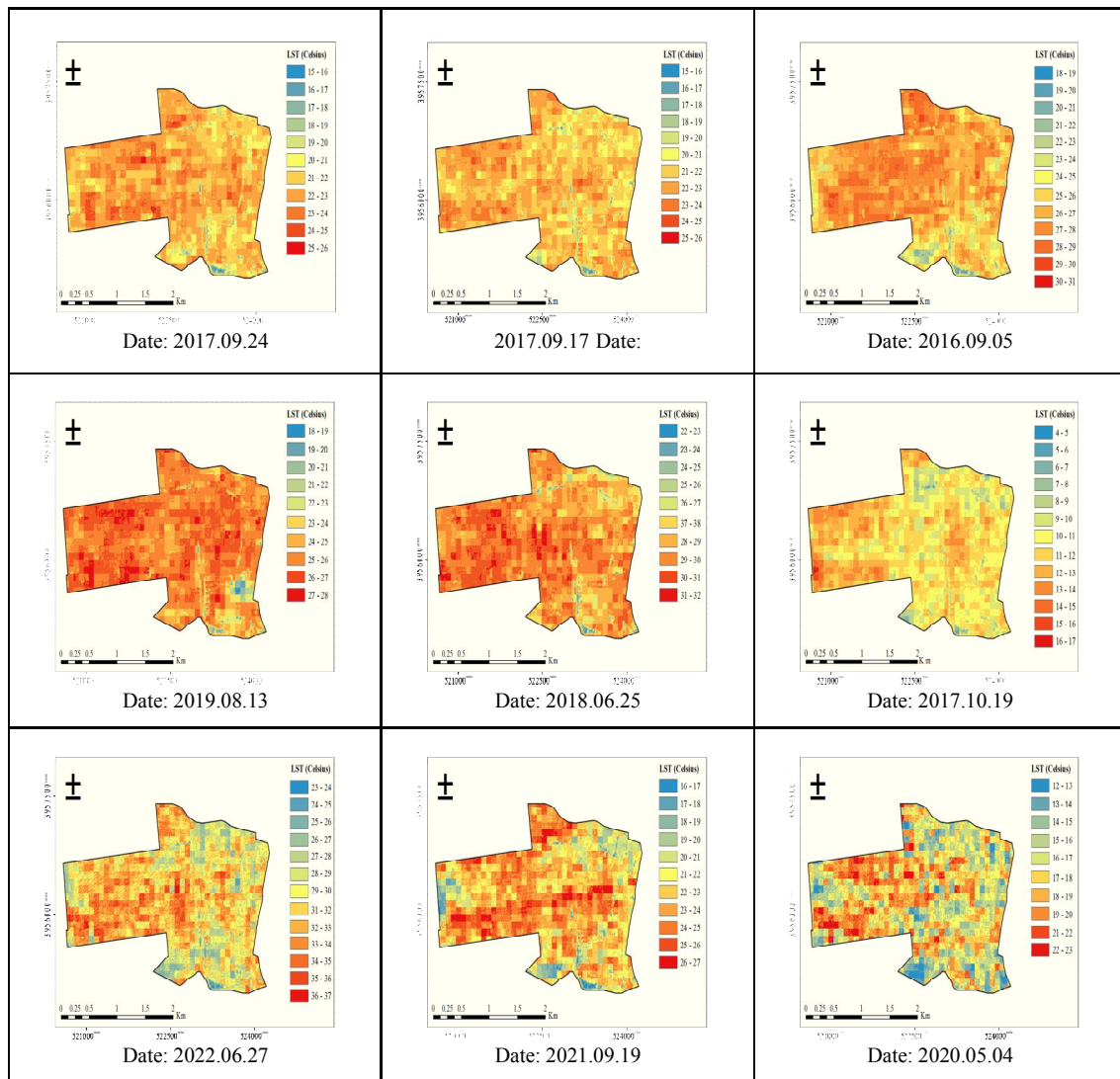
در این تحقیق، با اجرای مدل تهیه‌شده در محیط ModelBuilder، داده‌های هندسی ۴۴۸ کانیون شهری واقع در محدوده آموزشی پردازش شد و مقدار پارامترها، شاخص هندسی، شاخص مقاومت شهری و بیشینه شدت جزایر حرارتی آنها، براساس مدل اوکه، محاسبه شد. در ادامه، پیش‌پردازش‌های لازم روی تصاویر دریافتی از سنجنده استر در نرم‌افزار ENVI انجام شد و خروجی آنها، به‌منظور تهیه تصاویر LST به‌روش پنجره مجزا، در برنامه‌ای در محیط نرم‌افزار متلب پردازش شد. شکل ۷ نتیجه کار در محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد. در گام بعد، متوسط دمای سطح زمین کانیون‌ها با استفاده از تصاویر LST و مدل محاسبه دمای سطح زمین، تهیه‌شده در ModelBuilder، محاسبه شد و به محور هریک از آنها انتساب یافت. در نهایت، با استفاده از دمای سطح زمین منطقه روستایی سولقان در حومه شهر تهران و تفاضل دمای سطح زمین کانیون‌ها و این منطقه، شدت جزایر حرارتی سطحی کانیون‌ها در دوره‌های زمانی تصویربرداری به دست آمد و بیشینه مقدار آنها ($SUHI_{max}$) طی بازه زمانی ۲۰۱۶ تا

۲۰۲۲ تعیین شد. در جدول ۶، اطلاعات تعدادی از این کانیون‌ها آمده است.

۳-۱- ارزیابی و اعتبارسنجی اولیه مدل اوکه
با محاسبه مقدار شبیه‌سازی‌شده بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌ها با استفاده از مدل اوکه و مقایسه آنها با مقادیر اندازه‌گیری شده براساس تصاویر LST، فرایند ارزیابی و اعتبارسنجی اولیه مدل اوکه در محدوده مورد مطالعه انجام شد. با مقایسه دو دسته داده یادشده و محاسبه اختلاف آنها، مقدار خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و خطای متوسط حسابی (MAE) به ترتیب، $\pm 5/40$ و $5/28$ درجه سانتی‌گراد به دست آمد؛ این مقادیر بیانگر مطابقت نداشتن مدل اوکه با شرایط جغرافیایی و فیزیکی منطقه مورد مطالعه است. این مسئله ضرورت مدل‌سازی محلی UHI_{max} کانیون‌ها در محدوده مطالعاتی را نمایان کرد. بنابراین در ادامه این تحقیق، فرایند مدل‌سازی UHI_{max} در دو حالت متفاوت انجام شد. در حالت اول، ضرایب مدل محلی با لحاظ کردن شاخص نسبت منظر محاسبه و در حالت دوم، این مدل با لحاظ کردن هم‌زمان شاخص‌های طول زبری و نسبت منظر تعیین شد.

جدول ۶. پارامترها و شاخص‌های تعدادی از کانیون‌های آموزشی محدوده مطالعاتی

Axis_ID	پارامترهای هندسی				شاخص‌ها		شدت جزیره حرارتی	
	W	H	A	A*	H/W	Z ₀	$UHI_{max}(Oke)$	$SUHI_{max}$
۴۷	۱۰/۳۴	۱۰/۱۶	۸۱۲/۱۳	۲۴۰/۹۴	۰/۹۸	۱/۵۱	۷/۳۸	۷/۲۱
۶۶	۲۲/۶۰	۱۰/۲۳	۲۵۰/۰۶	۱۸۳/۳۵	۰/۴۵	۳/۷۵	۴/۳۰	۸/۷۶
۱۵۹	۲۵/۵۹	۲۱/۱۷	۹۲۸/۰۷	۳۶۱/۵۳	۰/۸۳	۴/۱۲	۶/۷۰	۸/۵۲
۲۰۲	۱۴/۹۲	۳۵/۸۹	۱۲۸۷/۷۸	۱۱۱۲/۴۳	۲/۴۰	۱۵/۵۰	۱۰/۹۴	۸/۸۳
۳۳۷	۱۶/۵۸	۱۲/۴۶	۱۲۵/۳۹	۱۱۲/۱۹	۰/۷۵	۵/۵۷	۶/۳۱	۹/۸۷
۳۷۱	۱۳/۶۰	۹/۶۴	۲۵۰/۴۷	۱۵۰/۶۰	۰/۷	۲/۸۹	۶/۰۸	۱۰/۳۱
۴۴۴	۶/۹۵	۱۷/۶۰	۱۶۸/۹۴	۲۷۸/۳۹	۲/۵۳	۱۴/۵۰	۱۱/۱۴	۱۰/۰۶



شکل ۷. تصاویر LST محدوده مورد مطالعه به روش SWA

منبع: نگارندگان

۳-۲- مدل‌سازی بیشینه شدت جزایر حرارتی با لحاظ

کردن شاخص نسبت منظر

فرایند کار در این حالت تقریباً مشابه فلوجارت ارائه شده در شکل ۲ است. پس از محاسبه پارامترها و شاخص‌های هندسی کانیون‌ها در محدوده آموزشی که مشخصات تعدادی از آنها در جدول ۶ آمده است، براساس شاخص نسبت منظر، کانیون‌ها در یازده کلاس متفاوت قرار گرفتند و مقادیر متوسط UHI_{max} و $SUHI_{max}$ در هر طبقه محاسبه شد. جدول ۷ مشخصات این کلاس‌ها و ستون‌های ۳ و ۴ این جدول

مقادیر محاسبه شده را نشان می‌دهد. با استفاده از تحلیل رگرسیون، تابع رگرسیون داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج شبیه‌سازی شده مدل اوکه به صورت رابطه (۲۳) تعیین شد.

$$SUHI_{max} = 0.1298UHI_{max} + 8.5045 \quad (23)$$

از تلفیق این معادله با رابطه (۱)، مدل محلی اوکه (مدل تعدیل شده) در محدوده مطالعاتی مطابق رابطه (۲۳) بیان می‌شود.

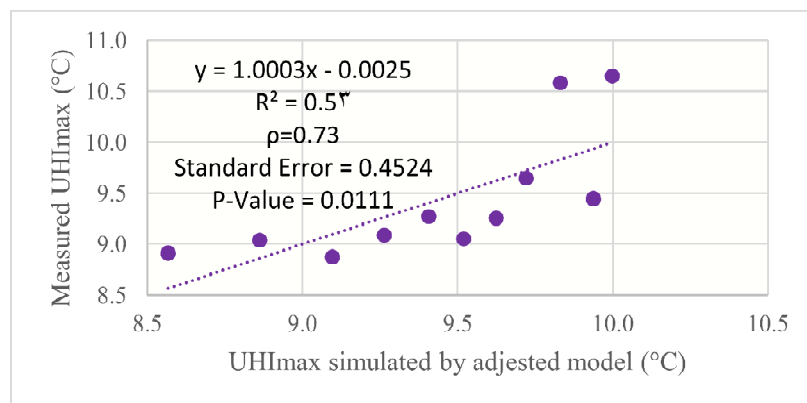
حرارتی اندازه‌گیری شده و برآورد شده از مدل اوکه و مدل محلی را نشان می‌دهند. بر مبنای مقایسه این مقادیر، نتایج مدل محلی در کانیون‌های طبقه‌بندی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک و مدل‌سازی سبب بهبود نتایج شده است. فرایند ارزیابی و اعتبارسنجی مدل محلی مطرح شده در رابطه (۲۳) از طریق برآورد مقادیر بیشینه شدت جزیره حرارتی ۱۲۰ کانیون واقع در محدوده چک و مقایسه آنها با مقادیر متناظر حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده (تصاویر LST) انجام شد و RMSE و MAE مدل در این محدوده به دست آمد. بر این اساس، مقادیر RMSE و MAE مدل به ترتیب، $1/118 \pm$ و $0/98$ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد که گویای دقت قابل قبول مدل مطرح شده است.

$$\text{SUHI}_{\text{max-adjusted}} = 0.1298 * [7.45 + 3.97 \ln(H/W)] + 8.5045 \quad (24)$$

ستون پنجم در جدول ۷ گویای مقادیر بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌های طبقه‌بندی شده حاصل از مدل محلی است. با تحلیل آماری داده‌های این جدول، مقدار ضریب تشخیص (R^2) و همبستگی (ρ) حاصل از رگرسیون داده‌های اندازه‌گیری شده (SUHI_{max}) و نتایج مدل محلی ($\text{SUHI}_{\text{max-adjusted}}$) کانیون‌های مورد اشاره، به ترتیب، $0/53$ و $0/73$ به دست آمد (شکل ۸) که با توجه به شاخص مقدار احتمال^۱ محاسبه شده، معنی‌دار است و به همبستگی نسبتاً بالا، در میان دو دسته داده مذکور، اشاره دارد. شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودار تغییرات بیشینه شدت جزیره

جدول ۷. مقدار UHI_{max} حاصل از مدل اوکه، تصاویر LST و مدل محلی در کانیون‌های طبقه‌بندی شده

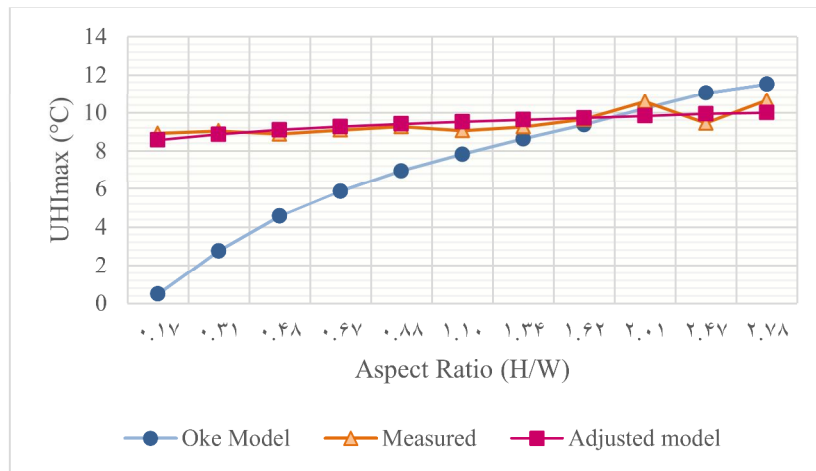
Class ID	H/W	$\text{UHI}_{\text{max-Oke}}$ (°C)	SUHI_{max} (°C)	$\text{SUHI}_{\text{max-adjusted}}$ (°C)
۱	۰/۱۷	۰/۴۸	۸/۹۱	۸/۵۷
۲	۰/۳۱	۲/۷۶	۹/۰۴	۸/۸۶
۳	۰/۴۸	۴/۵۷	۸/۸۸	۹/۱۰
۴	۰/۶۷	۵/۸۵	۹/۰۹	۹/۲۶
۵	۰/۸۸	۶/۹۵	۹/۲۷	۹/۴۱
۶	۱/۱۰	۷/۸۲	۹/۰۵	۸/۹۱
۷	۱/۳۴	۸/۶۳	۹/۲۶	۹/۵۲
۸	۱/۶۲	۹/۳۷	۹/۶۵	۹/۷۲
۹	۲/۰۱	۱۰/۲۲	۱۰/۵۸	۹/۸۳
۱۰	۲/۴۷	۱۱/۰۴	۹/۴۵	۹/۹۴
۱۱	۲/۷۸	۱۱/۵۱	۱۰/۶۵	۱۰/۰۰



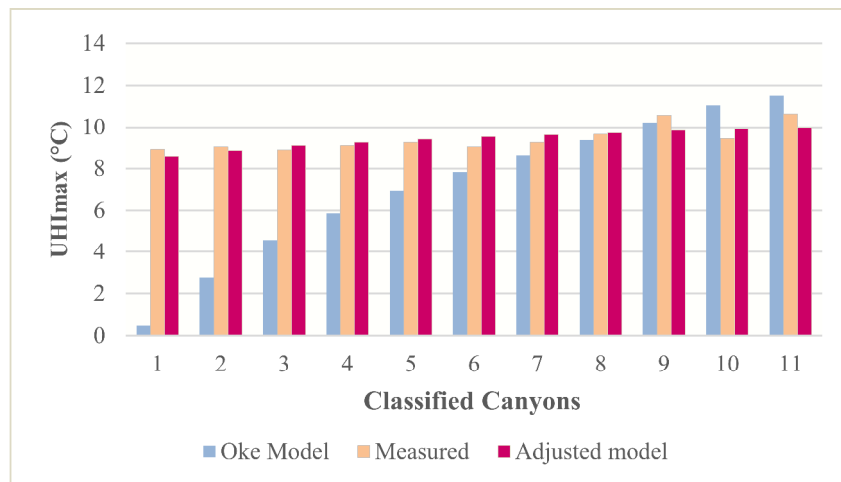
شکل ۸. رگرسیون UHI_{max} اندازه‌گیری و برآورد شده از مدل محلی

منبع: نگارندگان

1. P-Value



شکل ۹. نمودار تغییرات UHI_{max} اندازه‌گیری و برآورد شده از مدل‌های اوکه و محلی
منبع: نگارندگان



شکل ۱۰. مقایسه مقادیر UHI_{max} اندازه‌گیری و برآورد شده براساس مدل‌های اوکه و محلی
منبع: نگارندگان

۳-۳- مدل‌سازی بیشینه شدت جزایر حرارتی با لحاظ کردن شاخص‌های طول زبری و نسبت منظر
در این حالت نیز ابتدا، مطابق فلوجارت شکل ۲، شاخص‌های نسبت منظر و طول زبری کانیون‌های محدوده آموزشی محاسبه شد (جدول ۶). همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، کانیون‌هایی که شاخص مقاومت آیرودینامیکی شهری نسبتاً مشابهی دارند مقاومت نسبتاً مشابهی در برابر جریان هوا نشان می‌دهند؛ از این رو می‌توان آنها را بر این مبنا طبقه‌بندی، و مدل

محلی اوکه را برای هر دسته مجزا ارائه کرد. الگوی طبقه‌بندی مورد استفاده در این مطالعه، برای شاخص Z_0 ، الگوریتم شکستگی‌های طبیعی است. در این الگوریتم، مرزهای طبقه‌بندی به گونه‌ای تعیین می‌شود که در آن، تغییرات نسبی بزرگی در مقادیر شاخص طبقه‌بندی صورت پذیرد و ضمن آنکه کانیون‌های هر طبقه بیشترین شباهت را دارند، کلاس‌های ایجاد شده بیشترین تفاوت را با یکدیگر داشته باشند (Jenks, 1967). در تحقیق حاضر، این طبقه‌بندی با نرم‌افزار ArcGIS

با تلفیق معادلات (۲۵) و (۲۶) و رابطه (۱)، مدل محلی اوکه (تعدیل‌شده) در محدوده مطالعاتی، به صورت این معادلات بیان می‌شود:

$$SUHI_{max,adjusted1} = 0.0609 * [7.45 + 3.97 \ln(H/W)] + 8.770 \quad , \quad 0.40 \leq Z_0 \leq 10.46 \quad (27)$$

$$SUHI_{max,adjusted2} = 2.9947 * [7.45 + 3.97 \ln(H/W)] - 23.675 \quad , \quad 14.49 \leq Z_0 \leq 20.74 \quad (28)$$

با توجه به شکل ۱۱، Z_0 داده‌های واقعی منطقه مورد مطالعه در محدوده ۱۰/۴۶ تا ۱۴/۴۹ دارای شکاف است و این شکاف فرایند شبیه‌سازی را در این محدوده، با مشکل مواجه می‌کند. با استفاده از معادلات (۲۷) و (۲۸) و روش درون‌یابی، مقدار بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌هایی که ضریب زبری آنها در این محدوده قرار می‌گیرد، طبق این روابط به دست می‌آید:

$$SUHI_{max,Gap} = SUHI_{max,1} + (dZ_0 / \Delta Z_0) * \Delta SUHI_{max} \quad , \quad 10.46 < Z_0 < 20 \quad (29)$$

$$\Delta Z_0 = Z_{0,2} - Z_{0,1} \quad , \quad Z_{0,2} = 20.74 \quad , \quad Z_{0,1} = 10.46 \quad (30)$$

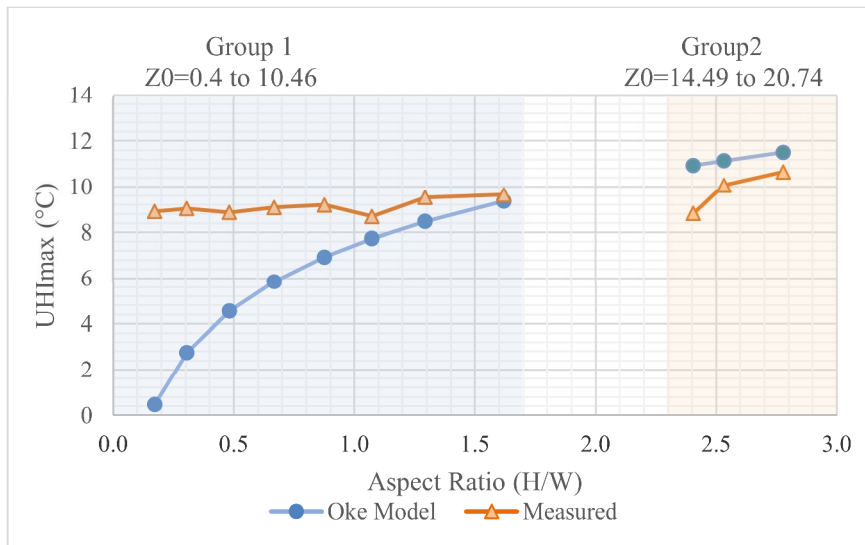
$$dZ_0 = Z_0 - Z_{0,1} \quad (31)$$

$$\Delta SUHI_{max} = SUHI_{max,2} - SUHI_{max,1} \quad (32)$$

انجام شد و کانیون‌ها، براساس شاخص Z_0 در دو دسته قرار گرفتند. دامنه تغییرات Z_0 کانیون‌های گروه اول محدوده ۰/۳۹ تا ۱۰/۴۶ و گروه دوم در محدوده ۱۴/۴۹ تا ۲۰/۷۴ است. سپس کانیون‌های این دو گروه، براساس شاخص نسبت منظر، به ترتیب به هشت و سه دسته مجزا تقسیم شد و مقدار متوسط UHI_{max} بررسی، مشخص شد که مقدار متوسط $SUHI_{max}$ کانیون‌های طبقه‌بندی‌شده گروه اول از مقدار متوسط UHI_{max} این کانیون‌ها بیشتر است و میانگین $SUHI_{max}$ کانیون‌های طبقه‌بندی‌شده در گروه دوم نیز از مقدار متوسط UHI_{max} آنها کمتر است (شکل ۱۱). این تمایز رفتار دو گروه مورد اشاره، بار دیگر، نقش شاخص ضریب زبری در مدل‌سازی محلی بیشینه شدت جزایر حرارتی کانیون‌ها را آشکار کرد. در ادامه، با تحلیل رگرسیون خطی دسته از داده‌های گروه‌های یادشده، تابع رگرسیون خطی گروه‌ها به صورت روابط شکل (۲۵) و (۲۶) تعیین شد.

$$SUHI_{max,1} = 0.0609 UHI_{max} + 8.7708 \quad , \quad 0.40 \leq Z_0 \leq 10.46 \quad (25)$$

$$SUHI_{max,2} = 2.9947 UHI_{max} - 23.6750 \quad , \quad 14.49 \leq Z_0 \leq 20.74 \quad (26)$$



شکل ۱۱. نمودار تغییرات مقادیر UHI_{max} اندازه‌گیری و برآوردشده براساس مدل اوکه

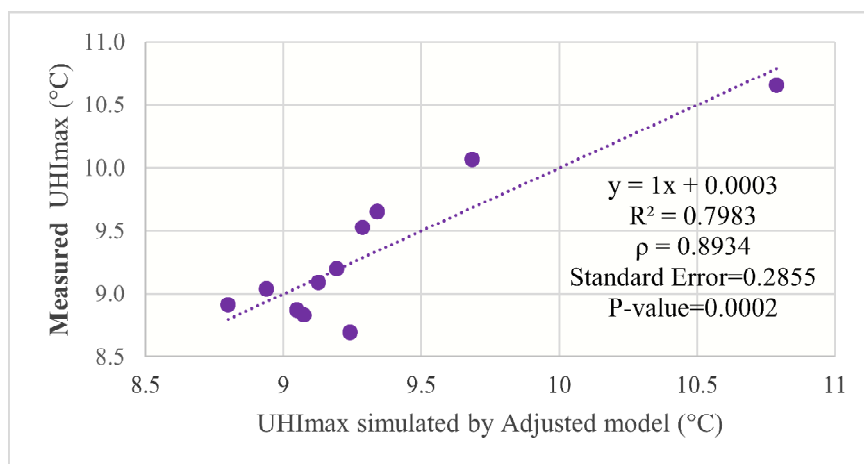
منبع: نگارندگان

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نیز نمودارهای مقدار بیشینه شدت جزیره حرارتی اندازه‌گیری شده، برآورد شده از مدل محلی و برآورد شده طبق مدل اوکه در کانیون‌های طبقه‌بندی شده را نشان می‌دهد. با بررسی این شکل‌ها مشخص می‌شود داده‌های به دست آمده براساس مدل محلی به داده‌های اندازه‌گیری شده نزدیک است و اختلاف پیش بینی مدل اوکه، در هر دو گروه از محدوده Z_0 حذف شده است.

جدول ۸ مقادیر UHI_{max} حاصل از مدل اوکه، تصاویر LST (اندازه‌گیری شده) و مدل محلی را در کانیون‌های طبقه‌بندی شده نشان می‌دهد. بر مبنای تحلیل آماری داده‌های این جدول، ضریب تشخیص (R^2) و همبستگی (ρ) حاصل از تحلیل رگرسیون داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج مدل محلی در کانیون‌های طبقه‌بندی شده، به ترتیب، ۰/۸۰ و ۰/۸۹ به دست آمد (شکل ۱۲)؛ با توجه به شاخص مقدار احتمال، این نتایج معنی‌دار است و وجود همبستگی بالا در میان دو دسته داده مذکور را می‌رساند.

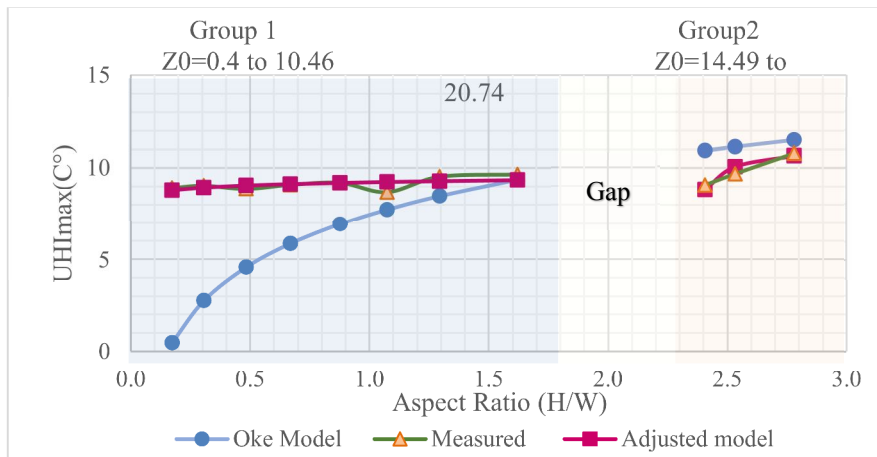
جدول ۸. مقدار UHI_{max} حاصل از مدل اوکه، تصاویر LST و مدل محلی در کانیون‌های طبقه‌بندی شده

	Class ID	H/W	$UHI_{max-Oke}$ (°C)	$SUHI_{max}$ (°C)	$SUHI_{max-adj}$ (°C)
Group ۱	۱	۰/۱۷	۰/۴۷	۸/۹۱	۸/۸۰
	۲	۰/۳۱	۲/۷۶	۹/۰۴	۸/۹۴
	۳	۰/۴۸	۴/۵۶	۸/۸۷	۹/۰۵
	۴	۰/۶۷	۵/۸۵	۹/۰۹	۹/۱۲
	۵	۰/۸۸	۶/۹۳	۹/۲۰	۹/۱۹
	۶	۱/۰۷	۷/۷۳	۸/۶۹	۹/۲۴
	۷	۱/۲۹	۸/۴۸	۹/۵۳	۹/۲۸
	۸	۱/۶۲	۹/۳۷	۹/۶۵	۹/۳۴
Group ۲	۹	۲/۴۱	۱۰/۹۴	۸/۸۳	۹/۰۸
	۱۰	۲/۵۳	۱۱/۱۴	۱۰/۰۷	۹/۶۹
	۱۱	۲/۷۸	۱۱/۵۱	۱۰/۶۵	۱۰/۷۹



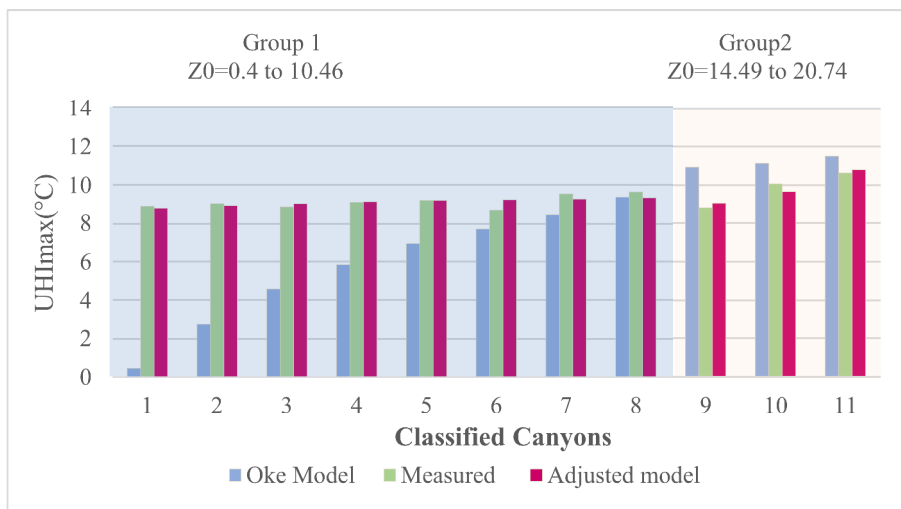
شکل ۱۲. رگرسیون UHI_{max} اندازه‌گیری و برآورد شده از مدل محلی

منبع: نگارندگان



شکل ۱۳. نمودار تغییرات UHI_{max} اندازه‌گیری و برآورد شده از مدل‌های اوکه و محلی

منبع: نگارندگان



شکل ۱۴. مقایسه مقادیر UHI_{max} اندازه‌گیری و برآورد شده براساس مدل‌های اوکه و محلی

منبع: نگارندگان

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر شاخص مقاومت آیرودینامیک شهری در مدل‌سازی بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌های شهری، با استفاده از فناوری سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات مکانی و تحلیل‌های آماری، بررسی شد. تهیه داده‌ها بر مبنای درجه حرارت هوای کانیون‌های شهری، از یک سو و محاسبه پارامترها و شاخص‌های مورد نیاز مدل‌سازی براساس داده‌های هندسه شهری، از دیگر سو، در زمره چالش‌های اساسی

فرایند ارزیابی و اعتبارسنجی مدل محلی ارائه شده در معادلات (۲۷) و (۲۸) براساس بیشینه شدت جزیره حرارتی برآورد شده ۱۲۰ کانیون واقع در محدوده چک و مقایسه مقدار آنها با مقادیر متناظر حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده در تصاویر LST انجام شد و RMSE و MAE مدل، به ترتیب، $1/05 \pm$ و $0/85$ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. این مقادیر دقت بالای مدل مطرح شده در شبیه‌سازی بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌ها را در سطح منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

مشابهت دارد. از طرفی، بررسی مقادیر RMSE و MAE حاصل از ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌های به‌دست‌آمده در تحقیق پیش رو نشان می‌دهد لحاظ کردن شاخص ضریب زبری، در فرایند مدل‌سازی، افزایش دقت بالاتر مدل و بهبود نتایج را به‌همراه داشته است.

نتایج این تحقیق، ضمن برآورد دقیق‌تر بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌های موجود شهری، امکان پیش‌بینی بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌ها را در مرحله طراحی معماری-شهرسازی و با دقت بیشتر، فراهم می‌کند. این نکته می‌تواند در مرحله طراحی‌های شهری، تأمین آسایش حرارتی بهتر شهروندان و پیش‌بینی بهینه در زمینه زیرساخت‌های آبی شهری مرتبط با موضوع پدیده جزایر حرارتی شهری را به‌دنبال داشته باشد. قدرت تفکیک مکانی و زمانی نسبتاً پایین سنجنده‌های حرارتی، از جمله سنجنده استر، امکان اندازه‌گیری دمای سطح زمین در بازه‌های زمانی کوتاه و با رزولوشن بالا را فراهم نمی‌کند؛ این مسئله از دقت اندازه‌گیری بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌ها، در محدوده مطالعاتی، می‌کاهد و در نتیجه، دقت مدل محلی ارائه‌شده را کاهش می‌دهد. این نکته از محدودیت‌های این تحقیق محسوب می‌شود و امید است، با افزایش قدرت تفکیک مکانی و زمانی سنجنده‌های حرارتی در آینده، از بین برود. طی پژوهش پیش رو، تأثیر شاخص طول زبری، به‌منزله نمونه‌ای از عوامل مقاومت سطوح شهری در برابر جریان هوا و ایجاد پدیده جزایر حرارتی شهری، در فرایند مدل‌سازی بررسی شد. در نظر گرفتن شاخص‌های دیگر مقاومت سطوح شهری در فرایند مدل‌سازی، مانند شاخص ناحیه قدامی (FAI) که بیانگر نسبت مساحت سطوح جانبی ساختمان‌های رو به جریان هوا یا باد به واحد سطح مناطق شهری است، می‌تواند به تکمیل مدل و بهبود نتایج بینجامد. از این رو پیشنهاد می‌شود، در پژوهش‌های آینده، به این شاخص توجه و تأثیرات آن در مدل‌سازی جزایر حرارتی، بررسی شود.

این تحقیق به شمار می‌رفت. چالش اول با استفاده از داده‌های سنجنده ماهواره‌ای استر و الگوریتم پنجره مجزا در سنجش از دور و چالش دوم با استفاده از قابلیت‌ها و امکانات موجود در بستر سیستم‌های اطلاعات مکانی رفع شد. در ادامه، فرایندهای مدل‌سازی و اعتبارسنجی بیشینه شدت حرارتی کانیون‌های شهری، از راه تحلیل رگرسیون نتایج مراحل قبل و در دو حالت متفاوت، انجام شد. در حالت اول، صرفاً با در نظر گرفتن شاخص نسبت منظر، مدل‌سازی شد و مقادیر R^2 و ρ مربوط به تحلیل رگرسیون داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده کانیون‌ها در این حالت، به ترتیب، $0/53$ و $0/73$ به دست آمد. با انجام شدن فرایند اعتبارسنجی مدل در محدوده چک، RMSE و MAE آن به ترتیب، برابر با $1/18 \pm$ و $0/98$ درجه سانتی‌گراد شد. در حالت دوم، از شاخص طول زبری نیز در فرایند مدل‌سازی و اعتبارسنجی استفاده شد و مقادیر R^2 و ρ حاصل از تحلیل رگرسیون داده‌های اندازه‌گیری و برآورد شده کانیون‌ها، در این حالت، به ترتیب، $0/80$ و $0/89$ به دست آمد. مقدار RMSE و MAE حاصل از اعتبارسنجی مدل در محدوده چک در این حالت نیز، به ترتیب، $1/05 \pm$ و $0/85$ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. بررسی و مقایسه مقادیر R^2 و ρ در حالت‌های مذکور نشان داد در نظر گرفتن شاخص مقاومت آیرودینامیک کانیون‌های شهری، در فرایند مدل‌سازی، سبب افزایش همبستگی میان داده‌های اندازه‌گیری شده با نتایج مدل شده است. در پژوهش ناکاتا و همکاران (۲۰۱۸)، مقادیر R^2 و ρ حاصل از تحلیل رگرسیون داده‌ها در حالت مدل‌سازی با شاخص نسبت منظر، به ترتیب، $0/64$ و $0/80$ و در حالت مدل‌سازی با شاخص طول زبری، $0/92$ و $0/96$ محاسبه شده است که افزایش همبستگی میان داده‌های اندازه‌گیری شده را با نتایج مدل‌سازی می‌رساند. با مقایسه، مشخص می‌شود نتایج تحقیق حاضر و پژوهش ناکاتا و همکاران (۲۰۱۸) با هم

- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2008, **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies**, <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>.
- Esti, 2018, **ModelBuilder—ArcMap | Documenta-tion (Version 10.6). ArcGIS Desktop Help**. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.6/analyze/modelbuilder/what-is-modelbuilder.htm>.
- Garratt, J., 1992, **The Atmospheric Boundary Layer**, Cambridge University Press: Cambridge.
- Jenks, G.F., 1967, **The Data Model Concept in Statistical Mapping**, International Yearbook of Cartography 7: 186-190, <https://doi.org/10.1002/qj.49712051919>.
- Jiménez-Muñoz, J.C. & Sobrino, J.A., 2010, **A Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from ASTER Data**, Ieee Geoscience And Remote Sensing Letters, 1, PP. 176-179, <https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2029534>.
- Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., Gillespie, A., Sabol, D. & Gustafson, W.T., 2006, **Improved Land Surface Emissivities over Agricultural Areas Using ASTER NDVI**, Remote Sens. Environ., 103, PP. 474-487, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.04.012>.
- Johnson, G.T., Oke, T.R., Steyn, D.G., Watson, I.D. & Voogt, J.A., 1991, **Simulation of Surface Urban Heat Island under 'Ideal' Conditions at Night**, Part 1, Theory and Tests against Field Data, Boundary-Layer Meteorology, 56, PP. 275-294, <https://doi.org/10.1007/BF00120424>.
- Jouybari Moghaddam, Y., Akhoondzadeh, M. & Saradjian, M., 2015, **A Split-Window Algorithm for Estimating LST from Landsat-8 Satellite Images**, Journal of Geomatics Science and Technology, JGST, 5(1), PP. 215-226, <http://jgst.issgeac.ir/article-1-225-fa.html>.
- Kim, S., Kim, M. & Kim, Y., 2012, **The Impacts of PTA Formation on Small Economies' Tax Competition for FDI Inflows, Economic Modelling**, Elsevier, 29(6), PP. 2734-2743, <http://dx.doi.org/10.1016/j.econmod.2012.08.003>.
- Levermore, G. & Cheung, H., 2012, **A Low-Order Canyon Model to Estimate the Influence of Canyon Shape on the Maximum Urban Heat Island Effect**, Building Services Engineering Research and Technology, 33(4), PP. 371-385, <https://doi.org/10.1177/0143624411417899>.
- ۵- تقدیر و تشکر**
- درخاتمه این تحقیق، از سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران، به‌ویژه جناب آقای مهندس احمد خان‌بیگی، کارشناس محترم آن سازمان، به‌دلیل همکاری ارزنده در ارائه داده‌های هندسی منطقه مورد مطالعه این تحقیق، صمیمانه قدردانی می‌کنیم.
- ۶- منابع**
- Abrams, M, Hook, S. & Ramachandran, B., 2002, **ASTER User Handbook**, version 2, Jet Propulsion Laboratory: Pasadena, CA, USA.
- Boori, M.S., 2015, **A Comparison of Land Surface Temperature, Derived from AMSR-2, Landsat and ASTER Satellite Data**, J. Geogr. Geol., 7, PP. 61-69, <http://dx.doi.org/10.5539/jgg.v7n3p61>.
- Bittencourt, L., Candido, C., Cândido, C. & de Dear R.J., 2010, **Air Movement Acceptability Limits and Thermal Comfort in Brazil's Hot Humid Climate Zone**, Building and Environment, 45(1), PP. 222-229, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.005>.
- Carlson, T.N. & Ripley, D.A., 1997, **On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index**, Remote Sens. Environ., 62, PP. 241-252, [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1).
- Clarke, J.F., 1972, **Some Effects of the Urban Structure on Heat Mortality**, Environ. Res., 5, P. 93, [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(72\)90023-0](https://doi.org/10.1016/0013-9351(72)90023-0).
- Chatzipoulka, C., Nikolopoulou, M. & Watkins, R., 2015, **The Impact of Urban Geometry on the Radiant Environment in Outdoor Spaces**, 9th International Conference on Urban Climate, ICUC9 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, <https://kar.kent.ac.uk/id/eprint/52695>.
- Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J. & Zhao, S., 2015, **A Practical Split-Window Algorithm for Estimating Land Surface Temperature from Landsat 8 Data**, Remote Sensing, 7(1), PP. 647-665, <http://dx.doi.org/10.3390/rs70100647>.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2003, **Beating the Heat: Mitigating Thermal Impacts**, Nonpoint Source News-Notes, 72, PP. 23-26.

- Li, Z.L., Tang, B.H., Wu, H., Ren, H.Z., Yan, G.J., Wan, Z.M., Trigo, I.F. & Sobrino, J.A., 2013, **Satellite-Derived Land Surface Temperature: Current Status and Perspectives**, *Remote Sensing of Environment*, 131, PP. 14-37, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>.
- Liu, L. & Zhang, Y., 2011, **Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong**, *Remote Sens.*, 3, PP. 1535-1552, <http://dx.doi.org/10.3390/rs3071535>.
- Martano, M., 2000, **Estimation of Surface Roughness Length and Displacement Height from Single-Level Sonic Anemometer Data**, *Journal of Applied Meteorology*, 39(5), PP. 708-715, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039%3C0708:EOSRLA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039%3C0708:EOSRLA%3E2.0.CO;2).
- Montávez, J.P., González-Rouco, J.F. & Valero, F., 2008, **A Simple Model for Estimating the Maximum Intensity of Nocturnal Urban Heat Island**, *International Journal of Climatology*, 28, PP. 235-242, <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1526>.
- Motieyan, H. & Hashemi Ashka, S.H., 2022, **Analysis of the Urban Geometry's Effects on Nocturnal Urban Heat Islands Using Remote Sensing and GIS (Case Study: Golestan Town, District 22 of Tehran)**, *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(30), PP. 51-68, <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.34497.1670>.
- Nakata, C.M. & De Souza, L.C.L., 2013, **Verification of the Influence of Urban Geometry on the Nocturnal Heat Island Intensity**, *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7(2), PP. 286-292, <http://dx.doi.org/10.4090/juee.2013.v7n2.286292>.
- Nakata, O.C.M., De Souza, L.C.L. & Rodrigues, D.S., 2015, **A GIS Extension Model to Calculate Urban Heat Island Intensity Based on Urban Geometry**, *Proceedings of CUPUM 2015, Conference Cambridge, Massachusetts (USA)*, PP. 1-16, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.09.007>.
- Nakata, C.M., De Souza, L.C.L. & Rodrigues, D.S., 2018, **THIS – Tool for Heat Island Simulation: A GIS Extension Model to Calculate Urban Heat Island Intensity Based on Urban Geometry**, *Computers, Environment and Urban Systems*, 67, PP. 157-168, <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.09.007>.
- Ndossi, M.I. & Avdan, U., 2016, **Inversion of Land Surface Temperature (LST) Using Terra ASTER Data: A Comparison of Three Algorithms**, *Remote Sens.*, 8, P. 993, <https://doi.org/10.3390/rs8120993>.
- Oke, T.R., 1981, **Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations**, *Journal of Climatology*, 1, 237-254. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370010304>.
- Oke, T.R., 1982, **The Energetic Basis of the Urban Heat Island**, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), PP. 1-24, <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>.
- Oke, T.R., 1984, **Towards a Prescription for the Greater Use of Climatic Principles in Settlement Planning**, *Energy and Buildings*, 7, PP. 1-10, [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(84\)90040-9](https://doi.org/10.1016/0378-7788(84)90040-9).
- Oke, T.R., 1987, **Boundary Layer Climates**, Second ed., Methuen, London.
- Rajagopalan, P., Lim, K.C. & Jamei, E., 2014, **Urban Heat Island and Wind Flow Characteristics of a Tropical City**, *Solar Energy*, 107, PP. 159-170. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.042>.
- Roth, M., 2013, **Urban Heat Islands**, In H.J. Fernando, *Handbook of Environmental Fluid Dynamics*, Vol. 2: Systems, Pollution, Modeling, and Measurements, PP. 143-159, CRC Press, <http://profile.nus.edu.sg/fass/geomr/roth%20uhi%20hefd13.pdf>.
- Pu, R., Gong, P., Michishita, R. & Sasagawa, T., 2006, **Assessment of Multi-Resolution and Multi-Sensor Data for Urban Surface Temperature Retrieval**, *Remote Sensing of Environment*, 104(2), PP. 211-225, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.09.022>.
- Saadallah, D., 2018, **Modelling the Interactions between Urban Heat Island and Urban Geometry**, *BAU Journal - Health and Wellbeing*, 1(3), <https://doi.org/10.54729/2789-8288.1066>.
- Santamouris, M., 2013, **Energy and Climate in the Urban Built Environment**, Routledge, Abingdon-on-Thames, UK, <http://dx.doi.org/10.4324/9781315073774>.
- Sayadi, F., Hejazizadeh, Z. & Saligheh, M., 2022, **The Effect of Urban Geometry on the Formation of Urban Heat Islands of Tehran (Case Study: Districts 2 and 6 of**

- Region 3**, Journal of Geography, 20(72), PP. 1-18, <https://dori.net/dor/> <http://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1401.20.72.1.7>.
- Sobrinho, J. & Jiménez-Muñoz, J., 2014, **Minimum Configuration of Thermal Infrared Bands for Land Surface Temperature and Emissivity Estimation in the Context of Potential Future Mission**, Remote Sensing Environment, 148, PP. 158-167, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.027>.
- Stewart I.D., Krayenhoff, E.S., Voogt, J.A., Lachapelle, J.A., Allen, M.A. & Broadbent, A.M., 2021, **Time Evolution of the Surface Urban Heat Island**, Earth's Future, 9, e2021EF002178, <https://doi.org/10.1029/2021EF002178>.
- Su, Z., Schmugge, T., Kustas, W.P. & Massman, W.J., 2001, **An Evaluation of Two Models for Estimation of the Roughness Height for Heat Transfer between the Land Surface and the Atmosphere**, J. Appl. Meteorol., 40, PP. 1933-1951, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040%3C1933:AEOTMF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040%3C1933:AEOTMF%3E2.0.CO;2).
- Tsai, J., Tsuang, B., Lu, P., Chang, K., Yao, M. & Shen, Y., 2010, **Measurements of Aerodynamic Roughness, Bowen Ratio, and Atmospheric Surface Layer Height by Eddy Covariance and Tethersonde Systems Simultaneously over a Heterogeneous Rice Paddy**, Journal of Hydrometeorology, 11(2), PP. 452-466, <https://doi.org/10.1175/2009JHM1131.1>.
- Van de Griend, A. & Owe, M., 1993, **On the Relationship between Thermal Emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index for Natural Surfaces**, Int. J. Remote Sens., 14, PP. 1119-1131, <https://doi.org/10.1080/01431169308904400>.
- Yang, L., Qian, F., Song, D. & Ke-Jia, Z., 2016, **Research on Urban Heat-Island Effect**, Procedia Engineering, 169, PP. 11-18, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.002>.

This Page is Intentionally Left Blank