

**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 ۲۲, Tehran)**

Zahra Khadem Agheli^{*۱}, Seyyed Hassan Hashemi Ashka^۲, Sahar Alian^۳

۱. Faculty of Engineering, Islamic Azad University (IAU), Ramsar Branch, Ramsar, Iran

۲. Director of Mapping and GIS Department at Management and Planning Organization,
Guilan, Rasht, Iran

۳. Faculty of Civil Engineering Rahman Institute of Higher Education: Ramsar, Ramsar,
Iran

corresponding author: s.agheli11@gmail.com

Received: ۲۰۲۴, ۰۱, ۰۴

Accepted: ۲۰۲۴, ۰۶, ۲۹

Abstract

Introduction: In recent year, modeling and identifying spatial distribution patterns of urban heat islands phenomenon with the aim of planning to face the effects of this phenomenon and predicting the provision of infrastructure needed to provide better thermal comfort to citizens has increased. 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. The dependence of the Oke's model on the climatic and physical conditions of cities requires that this model be before being used in any urban area to be modified if needed. Considering the effects of aerodynamic resistance of urban canyons (roughness length) on the maximum intensity of the heat island, considering the index of this factor in the localization process of the model can affect the accuracy of the results. In this study, it has been tried to localize Oke's model in an area of the ۲۲nd 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 's LST can be used as a convenient approximation of the air temperature. Therefore, in this study, it was tried to solve the problem of preparing temperature data by using satellite thermal sensors and using 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 processing, 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 during the period of ۲۰۱۶ to ۲۰۲۲ were used. These data were processed in MATLAB software using a separate window algorithm (SWA) and the LST and the maximum intensity of surface heat islands in the study area were calculated. Then, canyons 's aspect ratio and roughness length indicators

and also, their simulated maximum intensity of heat island (based on Oke's model) were calculated by processing digital maps in the ModelBuilder program in 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 intensity heat island were calculated and 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 class 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 0.52, 0.73, $1.18 \pm$ and 0.98, respectively, and in the second case, 0.80, 0.89, $1.00 \pm$ and 0.87, respectively. Comparison of these results shows that the inclusion of the aerodynamic resistance index in the process of modeling the maximum intensity of the heat island, while increasing the correlation coefficients and the regression detection coefficient, has increased the accuracy of the results obtained from the local model and improved the model.

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

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

۱. گروه سیستم اطلاعات مکانی، 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 موسسه آموزش عالی رحمان، رامسر، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

*نویسنده عهده دار مکاتبات: s.agheli11@gmail.com

کد ارکید:

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 اثرات این پدیده و پیش بینی تأمین زیرساخت های مورد نیاز در تأمین آسایش حرارتی بهتر شهروندان افزایش یافته است. مدل اوکه از جمله مدل های مطرح در این زمینه است که بیشینه شدت جزیره حرارتی (UHI_{max}) را بر اساس شاخص نسبت منظر کانیون های شهری شبیه سازی می کند. وابستگی مدل اوکه به شرایط اقلیمی و فیزیکی شهرها ایجاب می کند؛ این مدل قبل از استفاده در هر منطقه شهری، مورد ارزیابی قرار گرفته تا در صورت نیاز، اصلاح شود. با توجه به تأثیراتی که عامل مقاومت آیرودینامیک کانیون های شهری (طول زبری) در UHI_{max} دارد، لحاظ کردن شاخص این عامل در فرآیند 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 در این فرآیند بررسی شود. تهیه داده های دمایی کانیون های شهری از جمله چالش های مهم در فرآیند مدل سازی محسوب می شود. تحقیقات نشان می دهد دمای هوای مناطق مرکزی و حومه شهرها در هنگام شب، به دمای سطح زمین (LST) نزدیک است و LST کانیون ها می تواند به عنوان یک تقریب مناسب از دمای هوا مورد استفاده قرار گیرد. لذا در این تحقیق سعی شد؛ با بهره گیری از داده های سنجنده های حرارتی ماهواره ای و استفاده از یک الگوریتم مناسب بازایی LST، مشکل تهیه داده های دمایی حل گردد. محاسبه شاخص های هندسی و مقاومت آیرودینامیکی کانیون ها در فرآیند مدل سازی، به علت نیاز به انجام 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 دارا بودن قابلیت ذخیره سازی روابط توپولوژیک عوارض جغرافیایی و تجزیه و تحلیل آن ها می تواند محاسبه این شاخص ها را تسهیل نماید. لذا در انجام 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 ASTER و داده های هواشناسی نزدیک ترین ایستگاه هواشناسی به محدوده مطالعاتی در فاصله زمانی سال های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ میلادی استفاده شد. این داده ها در محیط نرم افزار MATLAB و با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا مورد پردازش قرار گرفت و دمای سطح زمین و بیشینه شدت جزایر حرارتی سطحی در محدوده مطالعاتی محاسبه شد. سپس، محاسبه شاخص های نسبت منظر، طول زبری و UHI_{max} شبیه سازی شده کانیون ها (بر اساس مدل اوکه)؛ از طریق پردازش نقشه های رقومی در برنامه ModelBuilder در محیط نرم افزار ArcGIS صورت پذیرفت. پس از تقسیم بندی محدوده مطالعاتی به محدوده های آموزشی و محدوده چک، محلی سازی مدل UHI_{max} در دو حالت مختلف انجام شد. در حالت اول، ضرایب مدل محلی در محدوده آموزشی با لحاظ کردن شاخص نسبت منظر محاسبه شد. بدین منظور،

کانیون‌ها بر اساس شاخص نسبت‌منظر به یازده کلاس مختلف طبقه‌بندی گردید و مقدار UHI_{max} شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری 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، در ابتدا کانیون‌های محدوده آموزشی بر اساس شاخص طول زبری به دو دسته جداگانه طبقه‌بندی و سپس، دسته اول کانیون‌ها بر اساس شاخص نسبت‌منظر به هشت گروه مجزا و دسته دوم، به سه گروه مختلف طبقه‌بندی گردید. با محاسبه UHI_{max} شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده هر یک از گروه‌ها، و استفاده از تحلیل رگرسیون، مدل محلی‌سازی شده اوکه برای هر یک از ۲ طبقه مذکور تعیین گردید.

نتایج و بحث: با اعتبارسنجی مدل‌های به دست آمده در محدوده چک، مقادیر R^2 ، ρ ، RMSE و MAE حاصل از رگرسیون در حالت اول، به ترتیب: $0/53$ ، $0/73$ ، $1/18 \pm$ و $0/98$ و در حالت دوم، به ترتیب $0/80$ ، $0/89$ ، $1/05 \pm$ و $0/87$ محاسبه شدند. مقایسه این نتایج نشان می‌دهد لحاظ کردن شاخص مقاومت آیرودینامیک در فرآیند مدل‌سازی UHI_{max} ضمن افزایش ضرایب همبستگی و ضریب تشخیص رگرسیون؛ سبب افزایش دقت نتایج حاصل از مدل محلی و بهبود مدل شده است.

کلید واژه‌ها: جزایر حرارتی شهری، مدل اوکه، ضریب زبری، سنجش از دور، سیستم‌های اطلاعات مکانی

۱- مقدمه

شهرها سیستم‌های پیچیده، سازگار و خود سازمان‌دهی هستند که به دلیل شهرنشینی سریع با چالش‌های متعددی مانند آلودگی هوا، تهدیدات تغییرات اقلیمی و پدیده جزایر حرارتی شهری مواجه هستند (Kim and Han, ۲۰۱۲). در میان این چالش‌ها، جزایر حرارتی شهری (UHI) به یکی از مهم‌ترین مسائل زیست محیطی شهری در جهان تبدیل شده است (Saadallah, ۲۰۱۸). جزایر حرارتی شهری که به افزایش دمای نواحی شهری نسبت به مناطق روستایی اطراف اشاره دارد؛ نوعی پدیده انباشت گرما در محدوده شهری است که از بارزترین ویژگی‌های اقلیم شهری شناخته می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد این پدیده می‌تواند دمای هوای شهرها را بین ۵ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد (Santamouris, ۲۰۱۳). افزایش دمای ناشی از این پدیده، ضمن تأثیرگذاری بر جریان مواد و انرژی در سیستم‌های اکولوژیکی شهری و ایجاد تغییر بر ساختار و عملکرد آن‌ها، مجموعه‌ای از اثرات اکولوژیکی و محیطی را بر اقلیم شهری، محیط جوی و سلامت شهروندان اعمال می‌کند (Yang et al., ۲۰۱۶).

تغییر کاربری اراضی، کاهش پوشش گیاهی، هندسه شهری و تغییر شکل طبیعی محیط، تغییر ویژگی مواد سطح طبیعی زمین و فعالیت‌های روزمره گرمای شهروندان از جمله دلایل اصلی بروز این پدیده می‌باشد (Oke, ۱۹۸۲, EPA, ۲۰۰۸). با توجه به اینکه پارامترهای مرتبط با هر یک از این عوامل، تابع مکان هستند؛ UHI پدیده‌ای مکان‌محور محسوب می‌شود که شدت آن در نقاط مختلف متغیر است. در میان این عوامل، هندسه شهری به واسطه تأثیری که بر جریان هوا و تبادلات تابشی میان زمین و آسمان دارد، نقش مهمی را در شکل‌گیری پدیده مذکور ایفا می‌کند (Oke, ۱۹۸۱). لذا بررسی ارتباط میان این پدیده و هندسه شهری ضروری است (Bittencourt, Candido, ۲۰۱۰). 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 اثرات طرح‌های مختلف معماری و شهرسازی بر شدت جزایر حرارتی شهری فراهم می‌نماید و از این‌رو، مدل‌سازی، یکی از روش‌های مهم در بررسی رفتار این پدیده و تصمیم‌گیری در خصوص اثرات عمدتاً منفی آن به شمار می‌رود. برای مثال، مدل‌های شبیه‌ساز UHI می‌تواند با هدف به حداقل رساندن اثرات منفی این پدیده، در طراحی معماری و شهرسازی آن دسته از شهرهایی که در فصل تابستان در معرض گرمای بیش از حد قرار دارند؛ مورد استفاده قرار گیرد تا ضمن ایجاد صرفه‌جویی در انرژی مورد نیاز تهویه مطبوع این شهرها، تلفات ناشی از استرس گرمایی را کاهش دهد (Clarke, ۱۹۷۲).

در زمینه مدل‌سازی UHI مطالعات مختلفی توسط متخصصان و پژوهشگران انجام گرفته است که در ادامه به مواردی از آن‌ها اشاره می‌شود. اوکه (۱۹۸۱) با استفاده از یک مدل فیزیکی ساده، ضمن بررسی تأثیرات اختلاف هندسه مناطق شهری و روستایی در پذیرش گرما نشان داد؛ هندسه کانیون‌ها به دلیل ایفاء نقش در تنظیم اتلاف گرمای تابشی امواج بلند، یک پارامتر مهم 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 به عنوان شاخص نشان‌گر هندسه کانیون‌های همگن تهیه و ارائه شد. اوکه (۱۹۸۷) در تحقیقی دیگر، با تعریف شاخص طول زبری و طبقه‌بندی کانیون‌های ناهمگون بر حسب این شاخص، به مدل‌سازی بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌ها پرداخت و نتایج حاصل را بهبود بخشید. ناکاتا و دسوزا (۲۰۱۳) در یک تحقیق، با هدف بررسی نقش هندسه شهری در شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری و انطباق مدل اوکه با شرایط واقعی، با اندازه‌گیری بیشینه شدت جزایر حرارتی کانیون‌های شهری و محاسبه آنها از طریق مدل اوکه؛ به مدل‌سازی محلی این پدیده و اعتبارسنجی آن پرداختند که نتایج به دست آمده، نقش موثر هندسه شهری در تشکیل جزایر حرارتی شبانه را تأیید نمود. ناکاتا و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه جداگانه دیگر، از طریق ارائه یک افزونه محاسباتی در محیط نرم‌افزار ArcGIS به مدل‌سازی پدیده جزایر حرارتی شبانه و بررسی تأثیر هندسه شهری در شهرهای بارو و سائوخوزه‌دو ریو پرتوی برزیل بر مبنای مدل اوکه شاخص طول زبری پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد؛ لحاظ کردن شاخص طول زبری در فرآیند مدل‌سازی، سبب افزایش ضریب تشخیص و بهبود همبستگی میان داده‌های اندازه‌گیری‌شده با داده‌های شبیه‌سازی‌شده شده است. مطیعان و هاشمی اشکاء (۱۴۰۰) در پژوهش خود، از طریق پردازش و تحلیل داده‌های هندسی کانیون‌های شهری و دمای سطح زمین حاصل از داده‌های سنجنده ASTER در بستر GIS به بررسی تأثیر شاخص نسبت منظر بر شدت جزایر گرمایی شبانه

شهری و ارزیابی کارایی مدل اوکه پرداختند. نتایج این پژوهش، وجود رابطه خطی نسبتاً شدید بیشینه شدت جزایر گرمایی شهری با شاخص نسبت منظر را تأیید کرد. صیادی و همکاران (۱۴۰۱) نیز در یک پژوهش تأثیر هندسه شهری بر حداکثر شدت جزیره حرارتی را در بستر GIS بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد؛ با افزایش شاخص نسبت منظر، رشد حداکثر شدت جزیره حرارتی چشمگیرتر بوده است و با توجه به اینکه، شدت جزایر حرارتی در نواحی مورد مطالعه محسوس نبوده است؛ هندسه ساختمان‌ها در این نواحی از پیکربندی مناسبی برخوردار بوده است.

ارزیابی و بررسی تأثیرات آیرودینامیک هندسه شهری در نتایج حاصل از 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 پیشین داخلی و خارج از کشور، کمتر بدان توجه شده است. در این پژوهش سعی شده است فرآیند مدل‌سازی پدیده مذکور با توجه به این ملاحظات صورت پذیرد و از این رو، از نوآوری‌های این پژوهش به حساب می‌آید.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، در ابتدا محدوده مطالعاتی و داده‌های هندسی و ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق معرفی می‌شود و در ادامه، مبانی نظری-محاسباتی و روش انجام کار در ۳ بخش به تفصیل بیان می‌گردد.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این تحقیق، شامل قسمت‌هایی از محلات زیبادشت و گلستان شرقی واقع در منطقه ۲۲ شهر تهران می‌باشد (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 داشته و ناحیه‌ای به مساحت تقریبی ۵۵۱ هکتار را شامل می‌شود. محدوده مذکور که مشتمل بر ۸۷۵۲ ساختمان و ۵۶۸ عدد کانیون شهری است؛ به دو قسمت آموزشی و چک تقسیم‌بندی شد. از محدوده آموزشی در فرآیند مدل‌سازی و از محدوده چک در فرآیند اعتبارسنجی و ارزیابی دقت مدل محلی تهیه‌شده استفاده گردید.

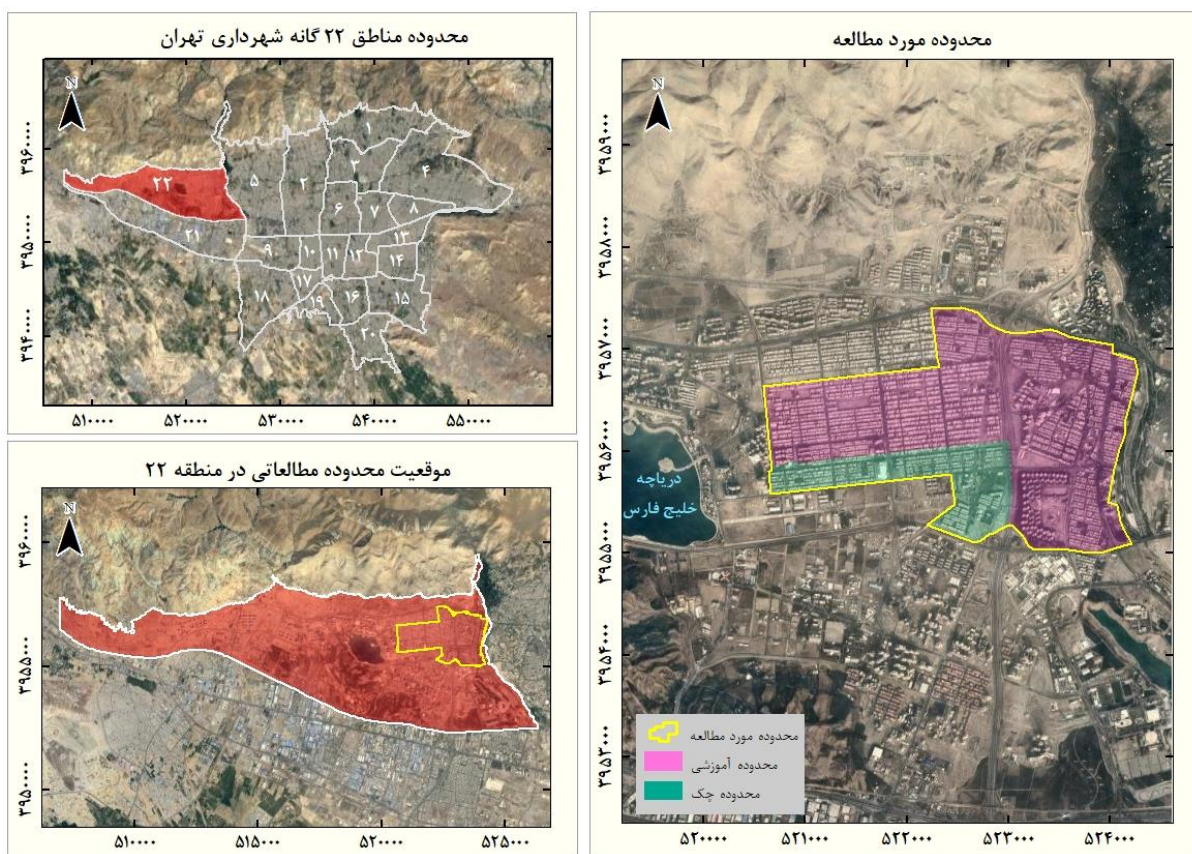
۲-۲- داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق به شرح ذیل است:

- **داده‌های هندسه شهری:** از Shapefile پارسل‌های شهری (شامل فیلد توصیفی ارتفاع از سطح آب‌های آزاد)، ساختمان‌ها (شامل فیلد توصیفی ارتفاع از سطح آب‌های آزاد) و 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 فرآیند مدل‌سازی استفاده شد. این داده‌ها توسط سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران تهیه شده است.

- **داده‌های ماهواره‌ای:** از تصاویر روزانه و شبانه سنجنده ASTER در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ برای محاسبه داده‌های دمایی سطح زمین (LST) مورد نیاز در فرآیند مدل‌سازی محلی و اعتبارسنجی UHI_{max} استفاده شد. این داده‌ها از طریق وب‌گاه سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا قابل دریافت است. در جدول ۱ مشخصات داده‌های مذکور آمده است.

- **داده‌های هواشناسی:** جهت محاسبه مقدار بخار آب هوای محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی مورد نظر، از داده‌های دما و رطوبت نسبی هوای نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک هواشناسی به محدوده مورد مطالعه (ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد) استفاده شد. این داده‌ها که از طریق وب‌گاه سرویس خدمات آب و هوایی Ogimet قابل دسترس می‌باشد، در جدول ۲ آمده است.



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

جدول ۱. مشخصات داده‌های شبانه و روزانه سنجنده ASTER

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

جدول ۲. اطلاعات ایستگاه سینوپتیک هواشناسی فرودگاه مهرآباد

طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	تاریخ	ساعت	دما (سانتی گراد)	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

۲-۳- مبانی نظری و محاسباتی

۲-۳-۱- ارتباط جزایر حرارتی با هندسه شهری

در میان عوامل موثر در شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری، هندسه شهر که به نحوه چیدمان شهری ساختمان‌ها و تراکم آن‌ها اشاره دارد (Chatzipoulka et al., ۲۰۱۴) و اساساً محصول طراحی‌های شهری می‌باشد؛ نقش مهمی را ایفا می‌کند. هندسه شهر از طریق تأثیر بر جریان هوا و تبادلات تابشی میان زمین و آسمان در تشکیل و تشدید این پدیده اثرگذار است. سطوح معابر و ساختمان‌ها به واسطه وجود انواع مختلف موانع شهری؛ نمی‌توانند گرمای جذب شده در طول روز را به راحتی آزاد نموده و ضمن تبدیل به توده‌های حرارتی، پدیده جزایر حرارتی را موجب می‌شوند. در مطالعات مربوط به بررسی تأثیرات هندسه شهری بر روی جزایر حرارتی، غالباً کانیون‌های شهری مورد توجه گرفته‌اند. یک کانیون شهری، توسط فضای سه بعدی یک خیابان همراه با دیوارهای ساختمان‌های بلند واقع در طرفین آن تعریف می‌شود. کانیون‌ها از طریق فرآیندهای گوناگون در تشکیل جزایر حرارتی شهری اثرگذارند. آنها از طریق کاهش فضای دسترسی به آسمان، مانع خروج امواج نورانی رسیده به سطوح شهری شده و با ایجاد سطوح بیشتر بازتاب‌های متوالی و جذب چندگانه امواج، سبب جذب بیشتر انرژی حرارتی می‌شوند و از این طریق، دمای منطقه شهری را افزایش می‌دهند. انرژی حرارتی جذب شده توسط کانیون‌ها، در طول روز نگهداری شده و در طول شب با شدت بیشتری منتشر می‌شوند. در فرآیندی دیگر، ساختمان‌های بلندی که در طرفین کانیون‌ها واقع شده‌اند، با ایجاد سایه دمای نواحی شهری را کاهش می‌دهند این دو فرآیند بر همدیگر تأثیر متقابل دارند. نهایتاً، کانیون‌های شهری با ایجاد کاهش در سرعت باد و تغییر جهت آن، موجبات کاهش جریان هوا را فراهم و از پخش گرمایش حاصل از فعالیت‌های روزمره شهروندان جلوگیری می‌کنند و از این طریق، سبب گرم‌تر شدن هوای نواحی شهری می‌شوند. تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص جزایر حرارتی و ارتباط آن با هندسه شهری صورت گرفته است که در این میان، نتایج حاصل از مطالعات انجام شده توسط اوکه، مرجع بسیاری از آن‌ها بوده است. اوکه با تعریف جزیره حرارتی، به عنوان یک پدیده شبانه، که عمدتاً به واسطه واگرایی دمای مناطق شهری-روستایی و سرعت سرمایش سطوح این مناطق در حوالی زمان غروب خورشید ایجاد می‌شود؛ نشان داد شدت این پدیده پس از گذشت ۳ تا ۵ ساعت از غروب آفتاب (حوالی ساعات ۹ تا ۱۱ شب) به بیشترین مقدار خود می‌رسد و در حوالی ظهر کمینه می‌گردد (Roth, ۲۰۱۳, Stewart et al., ۲۰۲۱). وی در این تحقیقات، اثر شاخص نسبت منظر کانیون‌های همگن شهری (که از نسبت ارتفاع متوسط ساختمان‌های یک کانیون به عرض متوسط معبر موجود در آن کانیون محاسبه می‌شود) را بر بیشینه شدت جزایر حرارتی مورد بررسی قرار داد و با استفاده از تحلیل رگرسیون میان مشاهدات انجام

شده و ویژگی‌های مشترک آن‌ها، مدل عددی-تجربی برآورد بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌ها بر اساس شاخص نسبت منظر را به شکل رابطه (۱) ارائه نمود (Oke, ۱۹۸۱):

$$UHI_{max} = 7.45 + 3.97 \ln(H/W) \quad (1)$$

در این رابطه پارامترهای H ، W و UHI_{max} به ترتیب ارتفاع متوسط ساختمان‌ها (بر حسب متر)، عرض متوسط معبر (بر حسب متر) و بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون شهری (بر حسب درجه سانتی‌گراد) است. نسبت H/W نیز مقدار شاخص نسبت منظر را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مدل اوکه به محل انجام مشاهدات و شرایط اقلیمی آن وابسته می‌باشد؛ استفاده از این مدل، بدون توجه به تفاوت‌های محیطی چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. بررسی‌ها نشان می‌دهد؛ مدل مذکور در بسیاری از شهرهای آمریکای شمالی و اروپا، از قدرت پیش‌بینی بالایی برخوردار بوده؛ 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., ۲۰۰۸). علت این امر را می‌توان به تفاوت بسیار زیاد خصوصیات حرارتی این شهرها نسبت داد (Johnson et al., ۱۹۹۱). این موضوع، ضرورت ارزیابی و اعتبارسنجی اولیه مدل اوکه در مناطق مورد مطالعه و ارائه یک مدل محلی منطبق بر شرایط جغرافیایی و فیزیکی از منطقه مورد را نمایان می‌کند. از طرفی، مدل اوکه با فرض وجود کانیون‌های همگن در منطقه مورد مطالعه ارائه گردید که این فرض در واقعیت، در غالب شهرها چندان مصداق ندارد. اکثر شهرها، متشکل از کانیون‌های ناهمگنی هستند که از لحاظ شکل و هندسه شهری متفاوت بوده و رفتار آن‌ها در برابر جریان هوا متفاوت است و از این‌رو، تأثیر متفاوتی را در شکل‌گیری جزیره حرارتی شهری دارند. در مطالعات مربوط به 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 موجود شهری اشاره دارد، پارامتری مهم در تخمین شارهای سطحی به حساب می‌آید و به عنوان ارتفاعی که در آن سرعت باد در شرایط خنثی صفر می‌شود؛ تعریف می‌گردد (Su et al., ۲۰۰۱). افزایش زبری سطوح، سبب ایجاد انحراف بیشتر در جریان هوا و کاهش سرعت جریان هوا در نواحی شهری شده و موجب می‌گردد نواحی بیشتری از سطح زمین در تماس با جریان هوا قرار بگیرد و تبادل حرارتی بین آن‌ها کاهش یابد. این موضوع، سبب انتقال حرارت سطح زمین به نواحی فوقانی کانیون‌ها شده و شکل‌گیری جزایر حرارتی با شدت بیشتر را آسان‌تر می‌کند. شاخص طول زبری مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Oke, ۱۹۸۷):

$$Z = 0.5 H(A^*/A) \quad (2)$$

در این رابطه H ، A^* و Z به ترتیب ارتفاع متوسط ساختمان‌های کانیون (متر مربع)، مساحت متوسط نمای ساختمان‌های مشرف به معبر کانیون (متر مربع)، مساحت متوسط سطح اشغال ساختمان‌های مشرف به معبر کانیون (بر حسب متر مربع) و ضریب طول زبری (متر) می‌باشد. اوکه با هدف در نظر گرفتن کردن عامل ناهمگونی کانیون‌ها در مدل‌سازی UHI_{max} یا در نظر گرفتن شاخص طول زبری، روش دیگری را در برآورد UHI_{max} ارائه نمود. از آنجایی که کانیون‌های دارای محدوده دامنه ضریب زبری (Z_0) مشابه، مقاومت نسبتاً مشابهی را در برابر جریان هوا از خود نشان می‌دهند، می‌توان آن‌ها را در ابتدا بر اساس شاخص طول زبری طبقه بندی و سپس، بر اساس مقدار شاخص نسبت منظر دسته بندی نمود و در ادامه، تحلیل رگرسیون و تهیه و ارزیابی مدل UHI_{max} را برای طبقات مختلف مربوط به مقادیر Z_0 انجام داد و دقت نتایج حاصل را بهبود بخشید (Nakata et al., ۲۰۱۸, Oke, ۱۹۸۷). شکل (۲) فرآیند شرح داده شده را نشان می‌دهد.

فرآیند مدل‌سازی و اعتبارسنجی UHI_{max} دو چالش اساسی را شامل می‌شود. چالش نخست، به تهیه داده‌های درجه حرارت هوا مربوط می‌شود. این داده‌ها، اطلاعات شدت جزایر حرارتی مورد نیاز در مدل‌سازی را فراهم می‌کنند. اندازه‌گیری دمای هوا و شدت جزیره حرارتی عموماً به روش مستقیم و با استفاده از شبکه ایستگاه‌های ثابت هواشناسی یا اتومبیل‌های دارای سنسورهای حرارتی صورت می‌پذیرد (EPA, ۲۰۰۸). تراکم پایین این ایستگاه‌ها و محدودیت‌های مرتبط با دسترسی مستقیم به نواحی مورد مطالعه،

استفاده از این روش را محدود، بعضاً غیرممکن یا پرهزینه و زمان‌بر می‌کند. 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 آن است که محاسبه مقادیر شاخص‌های هندسی مورد نیاز فرآیند مدل‌سازی، بعثت نیاز به انجام پردازش‌ها و تحلیل‌های مکانی-توصیفی مختلف، سخت، زمان‌گیر و بعضاً غیرممکن است که مربوط ساختن این موضوع به سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS) و بهره‌جستن از قابلیت‌ها و پتانسیل‌های آن در این زمینه، می‌تواند این چالش را مرتفع نماید. در ادامه، این موضوعات به تفصیل بیان می‌شود.



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 فرآیند مدل‌سازی UHI_{max} محسوب می‌شود. از طرفی، داده‌های مادون قرمز حرارتی سنجنده‌های ماهواره‌ای همراه با الگوریتم‌های ارائه شده در سنجش از دور، امکان بازیابی دمای سطح زمین و برآورد شدت جزایر حرارتی سطحی نواحی مورد مطالعه را به طور غیرمستقیم فراهم کرده است. سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده در یک پژوهش، روند تغییرات روزانه و شبانه دمای سطح زمین و درجه حرارت هوا را بر اساس کاربری اراضی نواحی مطالعاتی بررسی نمود و نشان داد؛ دمای سطح زمین به طور قابل توجهی بر دمای هوا تأثیرگذار است و الگوی دمای هوای شب هنگام در مناطق شهری و حومه، از الگوی دمای سطح زمین پیروی می‌کند (EPA, ۲۰۰۸). با توجه به اینکه پدیده UHI پس از غروب آفتاب و در هنگام شب تشدید می‌شود (Stewart et al., ۲۰۱۳, Roth, ۲۰۲۱)، دمای سطح زمین و شدت جزایر حرارتی سطحی کانیون‌ها می‌تواند به ترتیب، به عنوان تقریبی خوب از

دمای هوا و جایگزینی مناسب از بیشینه شدت جزایر حرارتی آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد. انتخاب سنجنده مناسب و نحوه بازایی دمای سطح زمین، از جمله موضوعاتی هستند که باید به دقت مورد توجه قرار گیرد. این موضوعات در قسمت‌های بعد، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲-۳-۱- انتخاب سنجنده

سنجنده‌های مختلفی در زمینه ارائه داده‌های حرارتی مورد نیاز وجود دارند که در جدول (۳) فهرست برخی از آن‌ها آمده است. نزدیکی و همزمانی 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 که با توجه به این شاخص‌ها، داده‌های سنجنده ASTER برای انجام این تحقیق انتخاب شد.

جدول ۳. مشخصات سنجنده‌های حرارتی

نام سنجنده	نام ماهواره	توان تفکیک مکانی (متر)	زمان تقریبی اخذ 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

۲-۳-۲- محاسبه دمای سطح زمین

در چند دهه اخیر، بازایی دمای سطح زمین با استفاده از سنجنده‌های ماهواره‌ای پیشرفت‌های زیادی داشته و الگوریتم‌های زیادی در این زمینه ارائه شده است. این الگوریتم‌ها بر پایه فرضیات و تقریب‌های متنوع از معادله تشعشعی استوار است (Li et al., ۲۰۱۳). در این میان، استفاده از الگوریتم پنجره مجزا به دلیل دقت و سادگی، رایج‌تر است. این الگوریتم، با استفاده از حذف اثرات اتمسفری و ترکیبات خطی و غیرخطی دمای ظاهری دو باند حرارتی مجاور، دمای سطح زمین را محاسبه می‌کند (Du, ۲۰۱۵). از مزایای این روش می‌توان به عدم نیاز به پروفایل جوی دقیق و کارآمدی در تمام سنجنده‌های با حداقل دو باند حرارتی اشاره نمود. از محدودیت‌های این الگوریتم نیز می‌توان به وابستگی ضرایب مدل به نوع منطقه و وابستگی آن به اطلاع از ضریب گسیل‌مندی اشاره کرد (Jouybari moghaddam et al., ۲۰۱۵; Sobrino, Jimenez Munoz, ۲۰۱۴). سنجنده ASTER دارای پنج باند حرارتی است که هر یک از آن‌ها می‌تواند در این الگوریتم استفاده شود. تحقیقات نشان می‌دهد؛ پنجره اتمسفری در محدوده طول‌موج‌های بین ۱۰ تا ۱۲ میکرومتر، دارای انتقال‌پذیری اتمسفری بالاتر و تغییرات گسیل‌مندی کمتر در مقایسه با سایر پنجره‌های اتمسفری است. از این‌رو، انتظار می‌رود محاسبه دمای سطح زمین در این محدوده دقیق‌تر باشد (Jimenez-Munoz, Sobrino, ۲۰۱۰). بر این اساس درانجام این تحقیق، از باندهای طیفی ۱۳ و ۱۴ در محاسبه دمای سطح زمین به روش پنجره مجزا استفاده شد. شکل (۳) فلوچارت مراحل انجام کار محاسبه LST را به روش پنجره مجزا نشان می‌دهد. در این الگوریتم، دمای سطح زمین (بر حسب درجه کلوین) مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود (Ndossi, Avdan, ۲۰۱۶):

$$LST = \{[C_{1f}(D_{1f} + B_{1f})] - [C_{1r}(D_{1r} + B_{1r})]\} / (C_{1f}A_{1f} - C_{1r}A_{1r}) \quad (3)$$

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

$$A_{13} = 0.145236 \times \varepsilon_{13} \times \tau_{13} \quad (4)$$

$$B_{13} = 0.145236 \times T_{13} + 33.685 \times \varepsilon_{13} \times \tau_{13} - 33.685 \quad (5)$$

$$C_{13} = (1 - \tau_{13}) \times [1 + (1 - \varepsilon_{13}) \times \tau_{13}] \times 0.145236 \quad (6)$$

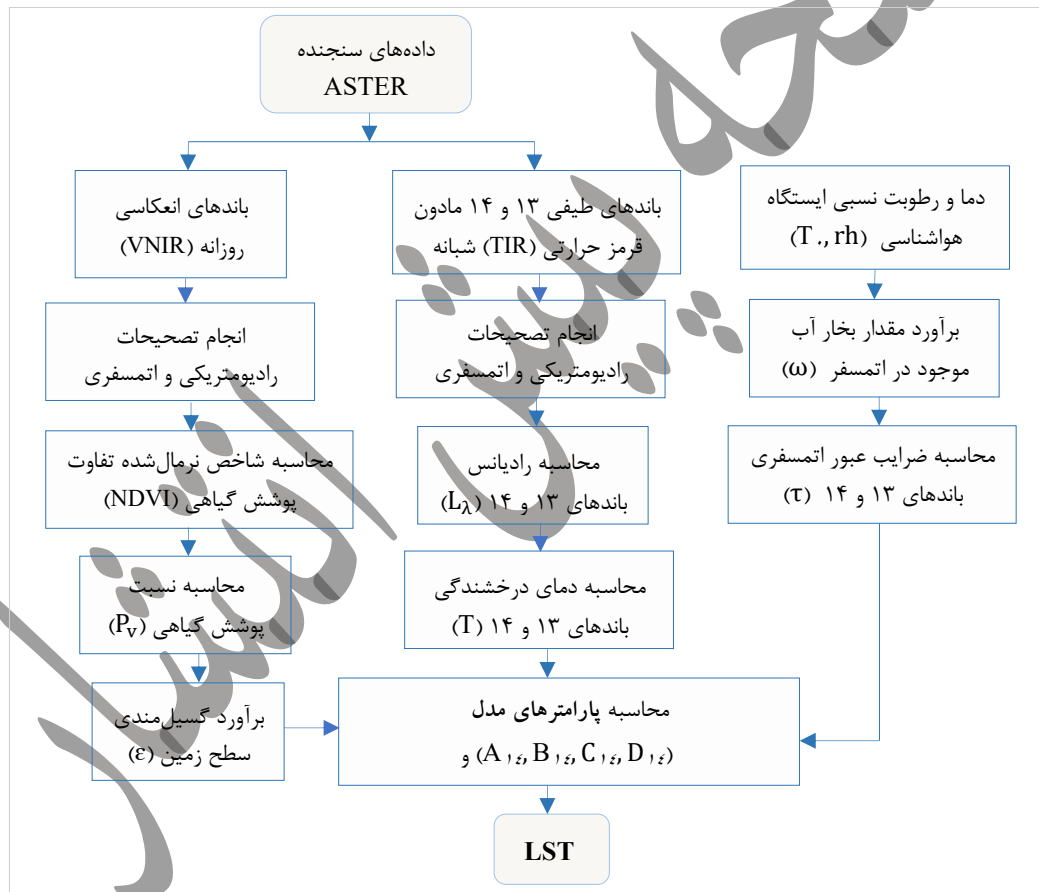
$$D_{13} = (1 - \tau_{13}) \times [1 + (1 - \varepsilon_{13}) \times \tau_{13}] \times 33.685 \quad (7)$$

$$A_{14} = 0.13266 \times \varepsilon_{14} \times \tau_{14} \quad (8)$$

$$B_{14} = 0.13266 \times T_{14} + 30.273 \times \varepsilon_{14} \times \tau_{14} - 30.273 \quad (9)$$

$$C_{14} = (1 - \tau_{14}) \times [1 + (1 - \varepsilon_{14}) \times \tau_{14}] \times 0.13266 \quad (10)$$

$$D_{14} = (1 - \tau_{14}) \times [1 + (1 - \varepsilon_{14}) \times \tau_{14}] \times 30.273 \quad (11)$$



شکل ۳: فلوچارت مراحل محاسبه دمای سطح زمین در الگوریتم پنجره مجزا، منبع: نگارندگان

در روابط فوق، 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 لازم است در ابتدا، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) و نسبت پوشش گیاهی (P_V) محاسبه گردد. شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی مطابق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود (Van de Griend & Owe, ۱۹۹۳):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (12)$$

در این رابطه NIR و RED به ترتیب مقدار بازتابش باندهای مادون قرمز و قرمز سنجنده ASTER است. نسبت پوشش گیاهی نیز توسط رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود (Carlson, Ripley, ۱۹۹۷):

$$P_v = [(NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s)]^2 \quad (13)$$

در این رابطه $NDVI_v$ و $NDVI_s$ به ترتیب حد آستانه شاخص NDVI برای پوشش‌های گیاهی و خاک می‌باشد که مقدار آن‌ها بر اساس هیستوگرام NDVI به ترتیب ۰/۵ و ۰/۲ می‌باشد. با محاسبه P_v مقادیر قابلیت انتشار سطح زمین برای باندهای طیفی ۱۳ و ۱۴ مطابق روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شود (Jimenez-Munoz et al., ۲۰۰۶):

$$\varepsilon_{13} = 0.968 + 0.022 P_v \quad (14)$$

$$\varepsilon_{14} = 0.970 + 0.020 P_v \quad (15)$$

مطالعات نشان می‌دهد بخار آب موجود در اتمسفر بر روی عبور امواج از جو زمین تأثیر زیادی داشته و پارامتری تعیین‌کننده در این زمینه محسوب می‌شود (Pu et al., ۲۰۰۶). از این رو، به منظور محاسبه ضریب قابلیت عبور اتمسفری، می‌بایست مقدار بخار آب محاسبه شود. مقدار بخار آب در اتمسفر مطابق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود (Liu & Zhang, ۲۰۱۱):

$$\omega = 0.0981 \times \left\{ 10 \times 0.6108 \times \exp \left[\frac{17.27 \times (T - 273.15)}{237.3 + (T - 273.15)} \right] \times rh \right\} + 0.1679 \quad (16)$$

در این رابطه ω مقدار بخار آب در جو (g/cm^2)، T دمای هوا (درجه کلوین) و rh درصد رطوبت نسبی منطقه مورد مطالعه در زمان تصویربرداری سنجنده است. اندازه‌گیری دقیق مقادیر T و به ویژه rh در نقاط گوناگون پهنه مورد مطالعه میسر نیست و از طرفی دیگر، تغییرات این دو پارامتر در محدوده مورد مطالعه قابل توجه نبوده و پارامترهای مذکور در منطقه مورد مطالعه تقریباً ثابت هستند. از این رو، با توجه به این که شرایط آب و هوایی نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی با شرایط آب و هوایی محدوده مورد مطالعه مشابه و تقریباً یکسان است، می‌توان در رابطه (۱۶) از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محدوده مطالعاتی استفاده نمود.

ضریب عبور اتمسفری باندهای طیفی ۱۳ و ۱۴ سنجنده ASTER، با توجه به مقدار بخار آب موجود در اتمسفر، مطابق روابط موجود در جدول (۴) محاسبه می‌شود (Pu et al., ۲۰۰۶):

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

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

دمای درخشندگی باندهای حرارتی ۱۳ و ۱۴ از دیگر مقادیر مورد نیاز در محاسبه LST به شمار می‌رود. بدین منظور لازم است در ابتدا و مطابق رابطه (۱۷) شدت تابش امواج مادون قرمز حرارتی در تصاویر به رادیانس تبدیل شود (Abrams et al., ۲۰۰۶):

$$L_\lambda = (DN - 1) * UCC \quad (17)$$

در این معادله L_λ رادیانس، DN مقدار درجه خاکستری ثبت شده و UCC ضریب تبدیل واحد باند مادون قرمز حرارتی است که مقدار آن برای باندهای ۱۳ و ۱۴ به ترتیب ۰/۰۰۵۶۹۳ و ۰/۰۰۵۲۲۵ می باشد. در نهایت، دمای درخشندگی باندهای طیفی ۱۳ و ۱۴ مطابق رابطه (۱۸) محاسبه می شود (Jimenez-Munoz, Sobrino, ۲۰۱۰; Abrams et al., ۲۰۰۶; Boori, ۲۰۱۵):

$$T = K_T / \ln(K_\lambda / L_\lambda + 1) \quad (18)$$

در معادله فوق K_λ و K_T ثابت های تبدیل حرارتی باندی بر اساس طول موج عملکرد یک کانال مادون قرمز حرارتی هستند. جدول (۵) مقادیر ضرایب مذکور برای باندهای ۱۳ و ۱۴ سنجنده ASTER را نشان می دهد.

جدول ۵. ضرایب K_λ و K_T باندهای طیفی ۱۳ و ۱۴ سنجنده ASTER (Jimenez-Munoz, Sobrino, ۲۰۱۰)

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

تمام مراحل پیش پردازش و پردازش تصاویر دریافتی می تواند در محیط نرم افزار ENVI انجام پذیرد. با توجه به تعدد مراحل و پیچیدگی و دشواری انجام مراحل، به ویژه مراحل پردازشی و همچنین، لزوم تکرار آن ها برای تمامی تصاویر ماهواره ای اخذ شده در بازه زمانی مورد مطالعه، استفاده از یک برنامه که بتواند این کار را به صورت خودکار و عاری از بروز هرگونه خطا انجام دهد؛ احساس می شد. کدنویسی مربوط به برنامه می تواند در محیط ENVI یا سایر نرم افزارها صورت پذیرد که در این پژوهش، برنامه مذکور با استفاده از نرم افزار MATLAB نوشته شد. کلیه تصاویر دریافتی، پس از آن که در نرم افزار ENVI آماده سازی شد و تصحیحات لازم بر روی آن ها اعمال گردید؛ در این برنامه مورد پردازش قرار گرفتند و بدین صورت، تصاویر LST آن ها تهیه شد.

۳-۳-۲- کاربرد سیستم های اطلاعات مکانی در مدل سازی پیشینه شدت جزایر حرارتی شهری

مقادیر شاخص های نسبت منظر و طول زبری کانیون های شهری از جمله مهم ترین داده های مورد نیاز در فرآیند مدل سازی پیشینه شدت جزایر حرارتی شهری محسوب می شوند. همان طور که در قسمت ۲-۳-۱ مشاهده شد؛ این شاخص ها در هر کانیون؛ تابعی از متوسط ارتفاع، مساحت سطح اشغال، مساحت سطح نما و فاصله ساختمان ها از محور معبر آن کانیون هستند که با استفاده از داده های هندسه شهری و از طریق روابط زیر محاسبه می شوند:

$$D_{right} = (\sum^m D_r) / m, \quad D_{left} = (\sum^n D_l) / n, \quad W = D_{right} + D_{left} \quad (19)$$

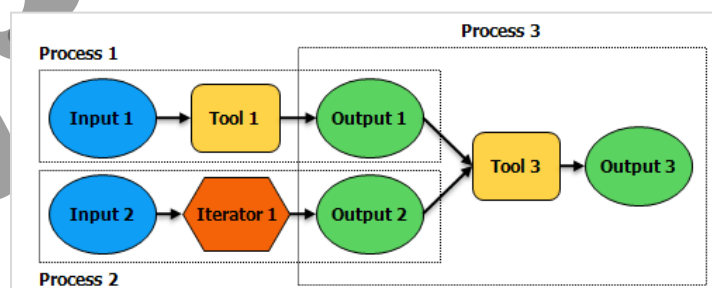
$$H = (\sum^s H_i) / s, \quad s = m + n \quad (20)$$

$$A^* = (\sum^s A_i^*) / s \quad (21)$$

$$A = (\sum^s A_i) / s \quad (22)$$

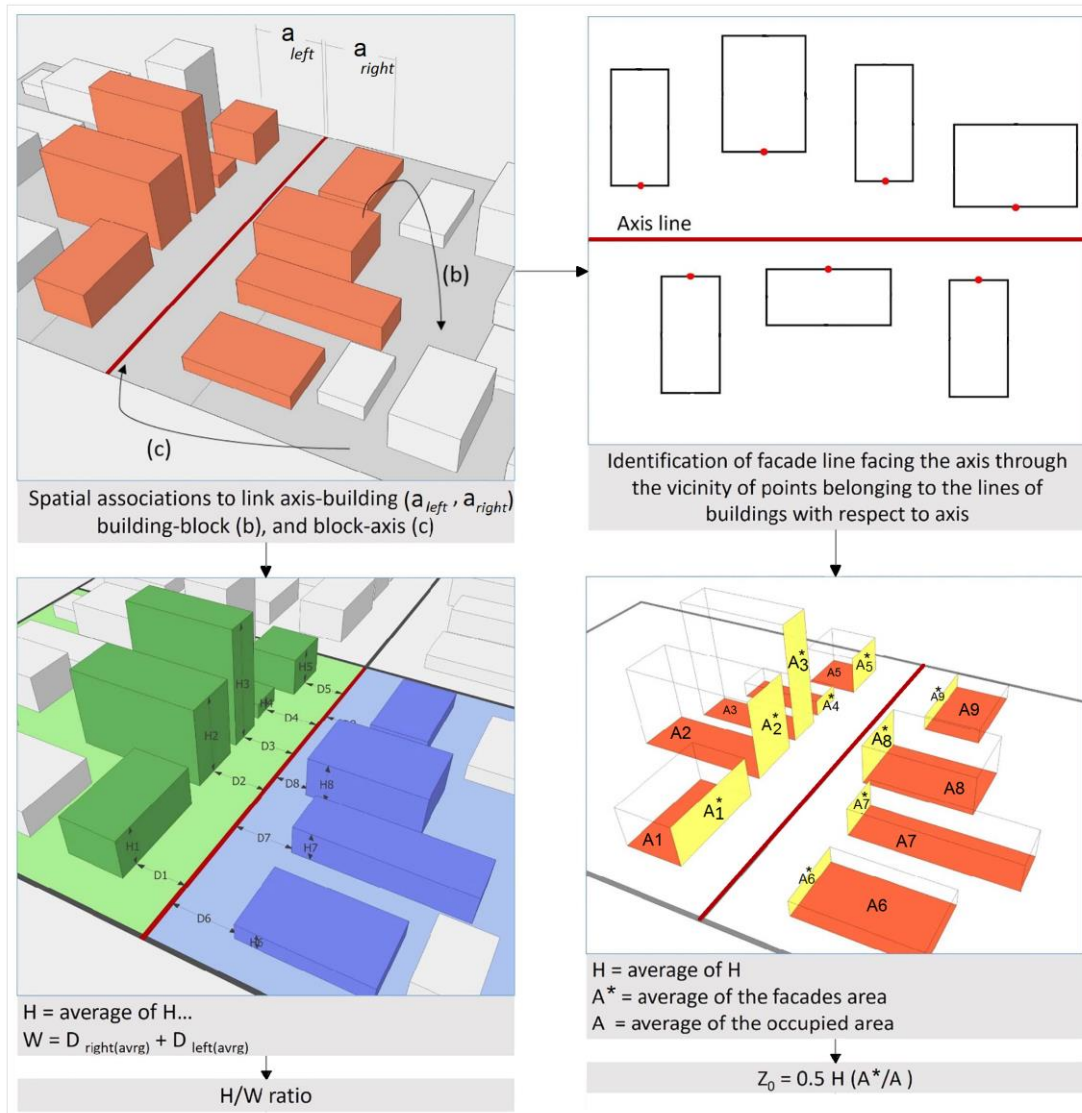
در این روابط D_{right} و D_{left} فاصله متوسط ساختمان های سمت راست و سمت چپ کانیون از محور آن، W عرض متوسط معبر، H ارتفاع متوسط، A مساحت متوسط سطح اشغال و A^* مساحت متوسط نمای ساختمان های مجاور با معبر کانیون می باشد. همچنین m و n تعداد ساختمان های سمت راست و ساختمان های چپ معبر و s تعداد کل ساختمان های موجود در کانیون است. شکل (۴) فرآیند محاسبه شاخص های هندسی و مقاومت شهری را در یک کانیون نشان می دهد. درجه حرارت هوای کانیون ها نیز از دیگر داده های اساسی مورد استفاده در فرآیند مدل سازی UHI_{max} می باشد. در قسمت ۲-۳-۲ بیان شد؛ دمای سطح زمین (LST) می تواند به عنوان یک تقریب و جایگزین مناسب از درجه حرارت هوا مورد استفاده قرار گیرد. لذا اندازه گیری LST در کانیون های

شهری، از دیگر پردازش‌هایی است که لازم است در این تحقیق به آن پرداخته شود. بدین منظور؛ لازم است در ابتدا محور معبر هر یک 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 عبور نماید، می‌بایست دمای سطح زمین در هر قطعه از آن محور تعیین و متوسط مقادیر قطعات، به عنوان دمای سطح زمین آن محور منظور شود. پس از محاسبه دمای سطح زمین کانیون‌ها، شدت جزیره حرارتی آن‌ها در هر یک از دوره‌های زمانی اخذ تصویر و نهایتاً بیشینه شدت جزیره حرارتی ($SUHI_{max}$) هر یک از آن‌ها در بازه زمانی مورد مطالعه امکان‌پذیر می‌شود. شکل (۵) روند انجام کار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود؛ فرآیندهای محاسبه مقادیر شاخص‌های نسبت‌منظر، طول زبری و دمای سطح زمین کانیون‌های شهری، مشتمل بر انجام یک مجموعه از عملیات و پردازش‌های عمدتاً مکانی متوالی و متصل به یکدیگر، مانند شناسایی و انتخاب ساختمان‌های طرف‌های راست و چپ مجاور با معبر کانیون، شناسایی نمای مشرف به معبر کانیون، استخراج و محاسبه پارامترهای هندسه شهری و نهایتاً محاسبه شاخص‌های مورد نظر است. انجام این امر با توجه به تعدد کانیون‌های محدوده مطالعاتی و تعداد نسبتاً زیاد ساختمان‌های ناهمگون موجود در آن‌ها، خصوصاً در مواجهه با داده‌های سنتی؛ سخت، زمان‌بر و شاید غیرممکن است. با توجه به ماهیت عمدتاً مکانی داده‌ها و پردازش‌های مورد نیاز، از مرتبط نمودن این فرآیند به سیستم‌های اطلاعات مکانی و بهره‌گیری از قابلیت‌های آن در مواجهه با داده‌های مکانی رقومی؛ می‌توان امکان پردازش و انجام محاسبات سریع‌تر را برای دسترسی به شاخص‌های مورد نیاز را فراهم نمود. با توجه به این موضوع، در این تحقیق، انجام این قسمت از کار در بستر GIS صورت پذیرفت. همان‌طور که از شکل‌های (۵) و (۶) بر می‌آید؛ فرآیند اندازه‌گیری و محاسبه پارامترها و شاخص‌های مورد نیاز، مستلزم تکرار انجام یک مجموعه از پروسه‌های مکانی و محاسباتی متوالی و متصل به یکدیگر در کانیون‌های محدود مطالعاتی است که این امر، ضمن نیاز به صرف زمان زیاد، احتمال بروز خطای عامل انسانی را بالا می‌برد. لذا باید ترتیبی اتخاذ شود تا با خودکارسازی پروسه‌ها، ضمن جلوگیری از بروز هرگونه خطا، مدت زمان اجرای فرآیندها را نیز به حداقل رساند. از این‌رو در انجام این تحقیق، از برنامه ModelBuilder در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. ModelBuilder زبان برنامه‌نویسی تصویری و ابزاری کاربردی در انجام 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 یک مدل از سه بخش مختلف ورودی‌ها، ابزارهای پردازشی و خروجی‌ها که توسط اتصال‌دهنده‌ها به یکدیگر وصل می‌شوند؛ تشکیل می‌شود (شکل ۴). مدل‌های ساخته‌شده در ModelBuilder به 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 از آن‌ها در مدل اصلی استفاده نمود.

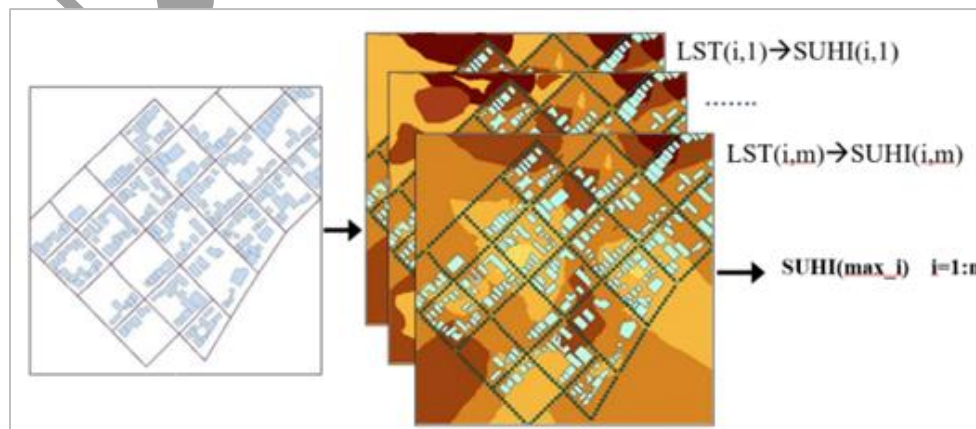


شکل ۴: بخش‌های مختلف یک مدل در ModelBuilder، منبع: نگارندگان

بر این اساس در انجام تحقیق حاضر؛ فرآیندهای محاسباتی نمایش داده شده 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 گردید.



شکل ۵: مراحل محاسبه مقادیر نسبت منظر و طول زیری کانیون شهری (Nakata et al., ۲۰۱۸)



شکل ۶: مراحل محاسبه بیشینه شدت جزایر سطحی کانیون های شهری، منبع: نگارندگان

۳- نتایج

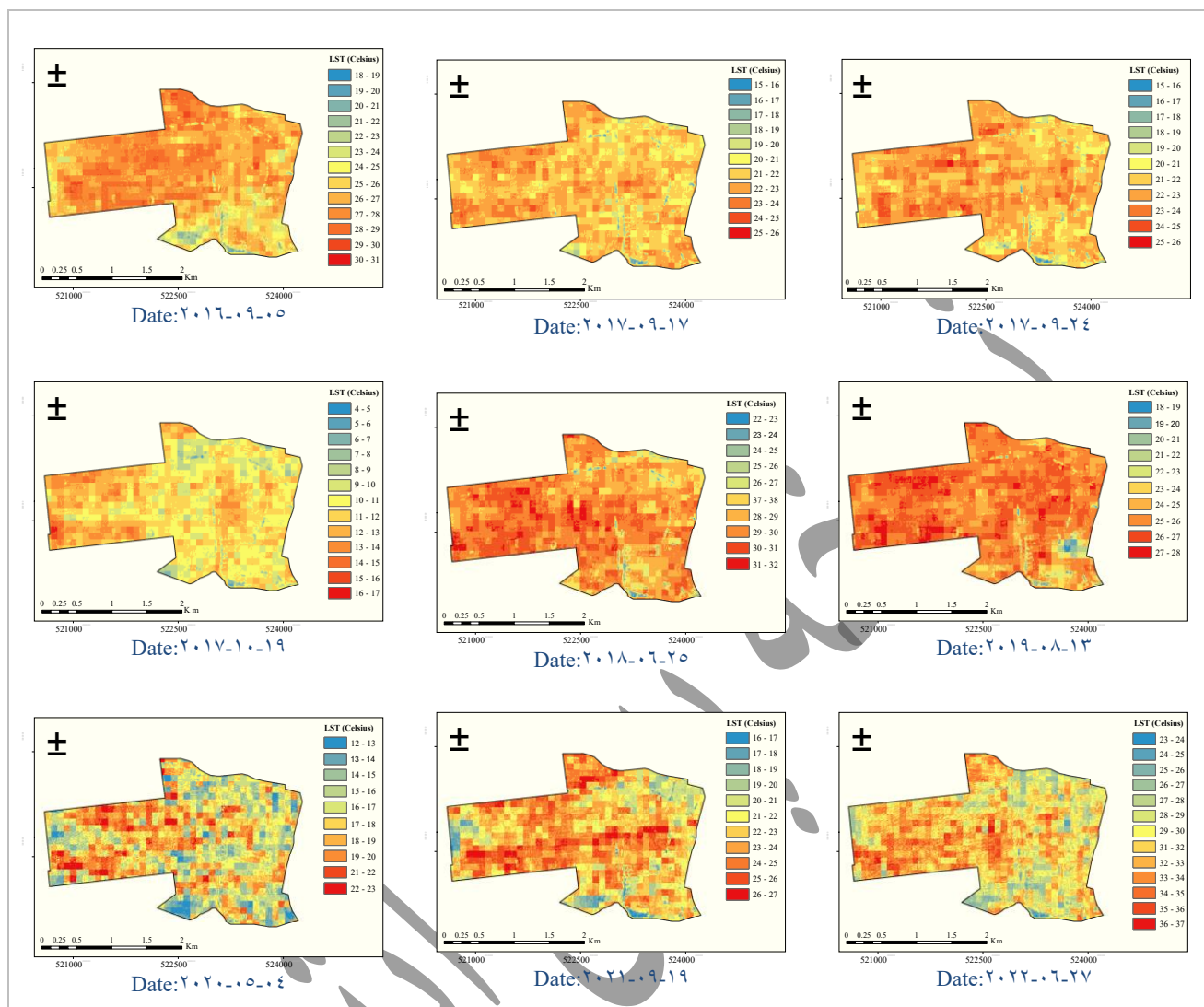
در این تحقیق، با اجرای مدل تهیه شده در محیط ModelBuilder داده‌های هندسی ۴۴۸ کانیون شهری واقع در محدوده آموزشی مورد پردازش قرار گرفت و مقدار پارامترها، شاخص هندسی و شاخص مقاومت شهری و بیشینه شدت جزایر حرارتی آن‌ها بر اساس مدل اوکه محاسبه شد. در ادامه، پیش‌پردازش‌های لازم بر روی تصاویر دریافتی از سنجنده ASTER در نرم‌افزار ENVI انجام شد و خروجی آن‌ها، جهت تهیه تصاویر LST به روش پنجره مجزا، در برنامه‌ای که در محیط نرم‌افزار MATLAB نوشته شد، مورد پردازش قرار گرفت که نتیجه کار در محدوده مطالعاتی در شکل (۷) نشان داده شده است. در گام بعد، مقدار متوسط دمای سطح زمین کانیون‌ها با استفاده از تصاویر LST و مدل محاسبه دمای سطح زمین تهیه شده در ModelBuilder محاسبه گردید و به محور هر یک از آن‌ها منتسب شد. نهایتاً 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 محاسبه شد و بیشینه مقدار آن‌ها ($SUHI_{max}$) در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ تعیین شد. در جدول (۶) اطلاعات تعدادی از این کانیون‌ها نشان داده است.

۳-۱- ارزیابی و اعتبارسنجی اولیه مدل اوکه

با محاسبه مقدار شبیه‌سازی شده بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌ها با استفاده از مدل اوکه و مقایسه آن‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده از تصاویر LST، فرآیند ارزیابی و اعتبارسنجی اولیه مدل اوکه در محدوده مورد مطالعه صورت پذیرفت. از مقایسه دو دسته داده مذکور محاسبه اختلاف آن‌ها، مقدار خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و خطای متوسط حسابی (MAE) به ترتیب $5/40 \pm$ و $5/28$ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد که این مقادیر، نشان‌دهنده عدم مطابقت مدل اوکه با شرایط جغرافیایی و فیزیکی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. این موضوع، ضرورت مدل‌سازی محلی UHI_{max} کانیون‌ها در محدوده مطالعاتی را نمایان کرد. لذا در ادامه این تحقیق، فرآیند مدل‌سازی UHI_{max} در دو حالت مختلف انجام شد. در حالت اول، ضرایب مدل محلی با لحاظ کردن شاخص نسبت‌منظر 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 جزیر حرارتی	
	W	H	A	A*	H/W	Z	$UHI_{max}(Oke)$	$SUHI_{max}$
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

۲-۳- مدل سازی بیشینه شدت جزایر حرارتی با لحاظ کردن شاخص نسبت منظر

فرآیند انجام 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، کانیون‌ها بر اساس شاخص نسبت منظر به ۱۱ کلاس مختلف طبقه‌بندی 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 مربوط به داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج شبیه‌سازی شده حاصل از مدل اوکه به شکل معادله (۲۲) تعیین شد:

$$SUHI_{max} = 0.1298 UHI_{max} + 1.045 \quad (22)$$

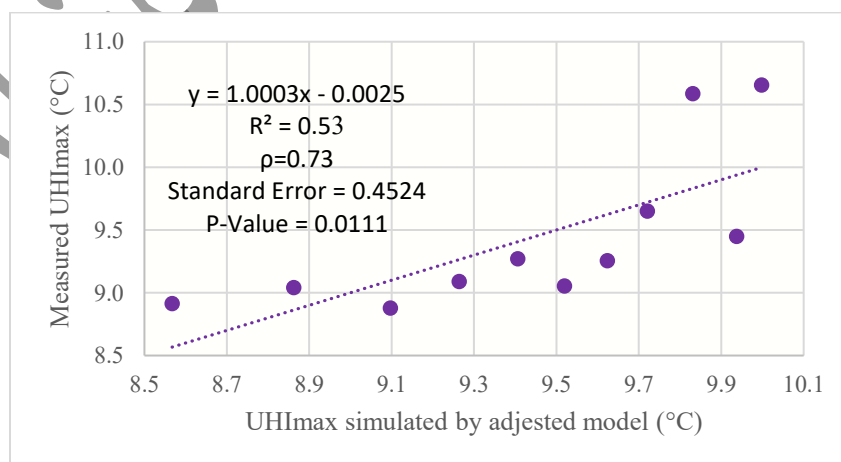
از تلفیق این معادله با معادله (۱) مدل محلی اوکه (مدل تعدیل شده) در محدوده مطالعاتی به شکل معادله (۲۳) بیان می‌شود:

$$SUHI_{max-adjusted} = 0.1298 * [7.45 + 3.97 \ln(H/W)] + 1.045 \quad (23)$$

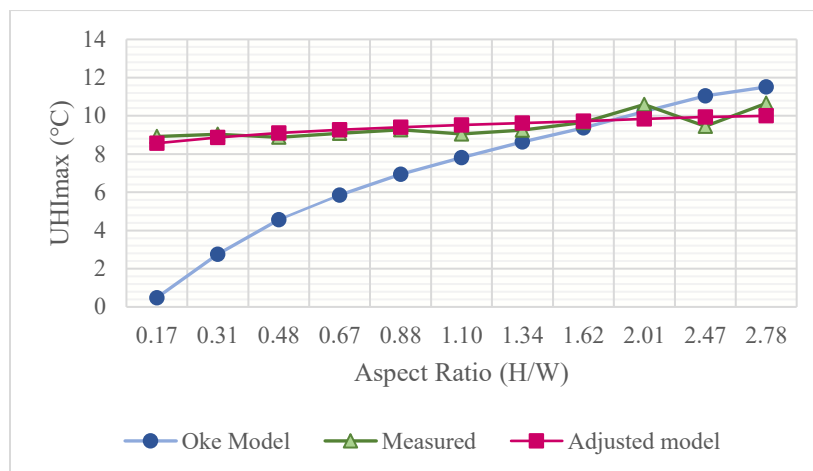
ستون ۵ جدول (۷) مقادیر بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌های طبقه‌بندی شده حاصل از مدل محلی را نشان می‌دهد. با تحلیل آماری داده‌های این جدول، مقدار ضریب تشخیص (R^2) و همبستگی (ρ) حاصل از رگرسیون داده‌های اندازه‌گیری شده ($SUHI_{max}$) و نتایج مدل محلی ($SUHI_{max}-adjusted$) کانیون‌های مذکور به ترتیب 0.53 و 0.73 محاسبه شد (شکل ۸) که با توجه به شاخص مقدار احتمال (P-Value) محاسبه شده، معنادار بوده و وجود یک همبستگی نسبتاً بالا در میان دو دسته داده مذکور را نشان می‌دهد. شکل‌های (۹) و (۱۰) نمودار تغییرات بیشینه شدت جزیره حرارتی اندازه‌گیری شده و برآورد شده از مدل اوکه و مدل محلی را نشان می‌دهد. مقایسه این مقادیر، نشان می‌دهد نتایج حاصل از مدل محلی در کانیون‌های طبقه‌بندی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک و مدل‌سازی، سبب بهبود نتایج شده است. فرآیند ارزیابی و اعتبارسنجی مدل محلی ارائه شده در معادله (۲۲)، 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) صورت پذیرفت و RMSE و MAE مدل در این محدوده محاسبه شد. بر این اساس، مقادیر RMSE و MAE مدل به ترتیب $1.18 \pm$ و 0.98 درجه سانتی‌گراد محاسبه گردید که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل ارائه شده می‌باشد.

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

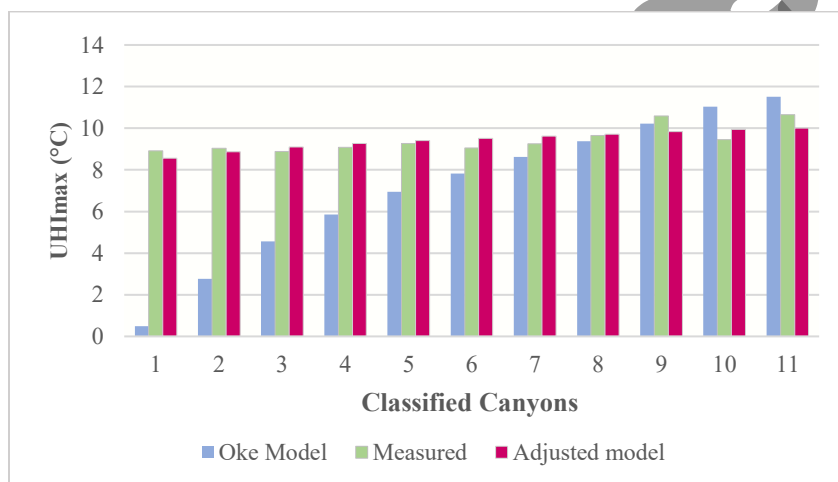
Class ID	H/W	$UHI_{max}-Oke$ (°C)	$SUHI_{max}$ (°C)	$SUHI_{max}-adjusted$ (°C)
۱	۰/۱۷	۰/۴۸	۸/۹۱	۸/۵۷
۲	۰/۳۱	۲/۷۶	۹/۰۴	۸/۸۶
۳	۰/۴۸	۴/۵۷	۸/۸۸	۹/۱۰
۴	۰/۶۷	۵/۸۵	۹/۰۹	۹/۲۶
۵	۰/۸۸	۶/۹۵	۹/۲۷	۹/۴۱
۶	۱/۱۰	۷/۸۲	۹/۰۵	۸/۹۱
۷	۱/۳۴	۸/۶۳	۹/۲۶	۹/۵۲
۸	۱/۶۲	۹/۳۷	۹/۶۵	۹/۷۲
۹	۲/۰۱	۱۰/۲۲	۱۰/۵۸	۹/۸۳
۱۰	۲/۴۷	۱۱/۰۴	۹/۴۵	۹/۹۴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



شکل ۸: رگرسیون UHI_{max} اندازه‌گیری و برآورد شده از مدل محلی، منبع: نگارندگان



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 از مدل‌های اوکه و محلی، منبع: نگارندگان

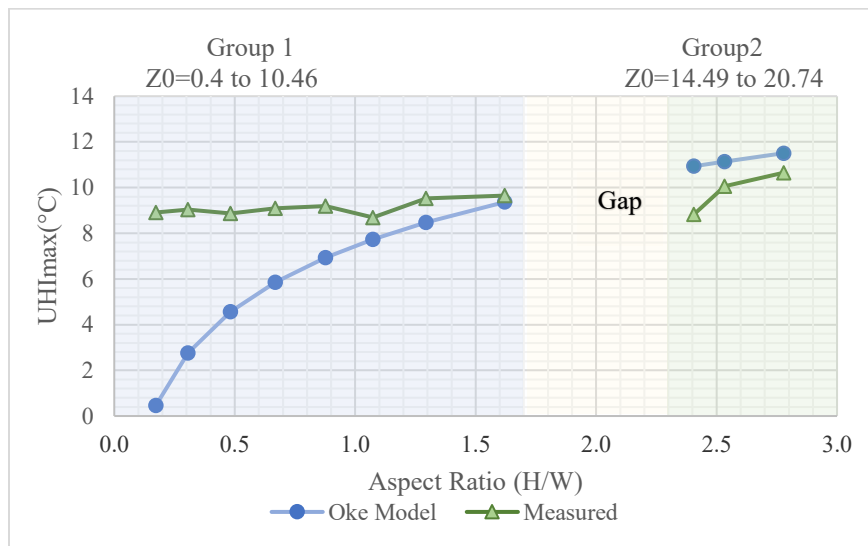
۳-۳- مدل‌سازی بیشینه شدت جزایر حرارتی با لحاظ کردن شاخص‌های طول زبری و نسبت‌منظر

در این حالت نیز، در ابتدا مطابق فلوچارت ارائه شده در شکل (۲)، شاخص‌های نسبت‌منظر و طول زبری کانیون‌های محدوده آموزشی محاسبه شد (جدول ۶). همان‌طور که قبلاً بیان شد؛ کانیون‌های دارای شاخص مقاومت آیرودینامیکی شهری نسبتاً مشابه، مقاومت نسبتاً مشابهی را در برابر جریان هوا از خود نشان می‌دهند. از این‌رو، می‌توان آن‌ها را بر این اساس طبقه‌بندی نمود و مدل محلی اوکه را برای هر دسته مجزا ارائه نمود. الگوی طبقه‌بندی مورد استفاده در این مطالعه برای شاخص Z ، 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 موجود در هر طبقه بیشترین شباهت را دارند؛ کلاس‌های ایجاد شده، بیشترین تفاوت را با یکدیگر داشته باشند (Jenks, ۱۹۶۷). در تحقیق حاضر، این طبقه‌بندی در نرم‌افزار ArcGIS انجام شد و کانیون‌ها بر اساس شاخص Z به دو دسته گروه‌بندی شدند. دامنه تغییرات Z کانیون‌های گروه اول محدوده ۰/۳۹ تا ۱۰/۴۶ و دامنه تغییرات Z کانیون‌های گروه دوم در محدوده ۱۴/۴۹ تا ۲۰/۷۴ است. سپس، کانیون‌های این دو گروه بر اساس شاخص نسبت‌منظر به ترتیب، به ۸ و ۳ طبقه مجزا تقسیم‌بندی شد و مقدار متوسط UHI_{max} و $SUHI_{max}$ هر یک از این طبقات محاسبه گردید. طبق بررسی انجام گرفته مشخص شد؛ مقدار متوسط $SUHI_{max}$ کانیون‌های طبقه‌بندی شده گروه اول از مقدار متوسط UHI_{max} این کانیون‌ها

بیشتر بوده و همچنین، مقدار متوسط $SUHI_{max}$ کانیون‌های طبقه‌بندی شده در گروه دوم از مقدار متوسط UHI_{max} آن‌ها کمتر است (شکل ۱۱) که این تمایز رفتار دو گروه مذکور، نقش شاخص ضریب زبری (Z_0) در مدل‌سازی محلی بیشینه شدت جزایر حرارتی کانیون‌ها را مجدداً آشکار کرد. در ادامه، با تحلیل رگرسیون هر دسته از داده‌های گروه‌های فوق، تابع رگرسیون خطی گروه‌ها به شکل معادلات (۲۳) و (۲۴) تعیین شد:

$$SUHI_{max,1} = 0.0609 UHI_{max} + 8.7708, \quad 0.40 \leq Z_0 \leq 10.46 \quad (23)$$

$$SUHI_{max,2} = 2.9947 UHI_{max} - 23.6750, \quad 14.49 \leq Z_0 \leq 20.74 \quad (24)$$



شکل ۱۱: نمودار تغییرات مقادیر UHI_{max} اندازه‌گیری و برآورد شده از مدل اوکه، منبع: نگارندگان

از تلفیق معادلات (۲۳) و (۲۴) با معادله (۱) مدل محلی اوکه (تعدیل شده) در محدوده مطالعاتی به شکل معادلات زیر بیان می‌شود:

$$0.40 \leq Z_0 \leq 10.46 \quad (25)$$

$$SUHI_{max,adjusted,1} = 0.0609 * [7.45 + 3.97 \ln(H/W)] + 8.770$$

$$SUHI_{max,adjusted,2} = 2.9947 * [7.45 + 3.97 \ln(H/W)] - 23.6750, \quad 14.49 \leq Z_0 \leq 20.74 \quad (26)$$

با توجه به شکل (۱۱) مشاهده می‌شود؛ Z_0 داده‌های واقعی منطقه مورد مطالعه در محدوده مقادیر ۱۰/۴۶ تا ۱۴/۴۹ دارای شکاف است که این شکاف، فرآیند شبیه‌سازی را در این محدوده مقادیر با مشکل مواجه کند. با استفاده از معادلات فوق و روش درونیابی، مقدار بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌هایی که ضریب زبری آن‌ها در این محدوده قرار می‌گیرند، توسط روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$SUHI_{max,Gap} = SUHI_{max,1} + (dZ_0/\Delta Z_0) * \Delta SUHI_{max}, \quad 10.46 < Z_0 < 20 \quad (28)$$

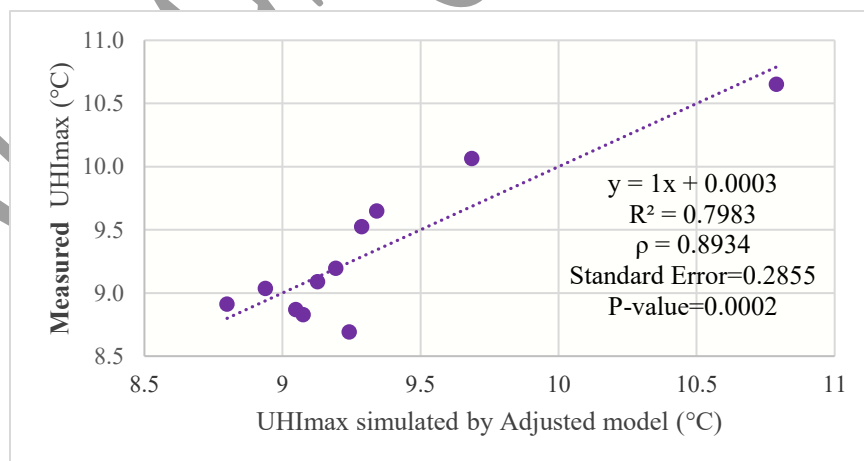
$$\Delta Z_0 = Z_{0,2} - Z_{0,1}, \quad Z_{0,2} = 20.74, \quad Z_{0,1} = 10.46 \quad (29)$$

$$dZ_0 = Z_0 - Z_{0,1} \quad (30)$$

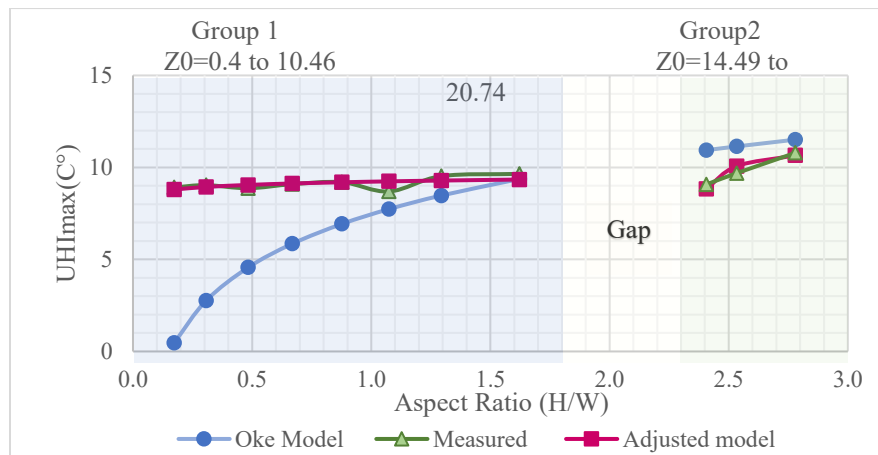
$$\Delta SUHI_{max} = SUHI_{max,2} - SUHI_{max,1} \quad (31)$$

جدول (۸) مقادیر UHI_{max} حاصل از مدل اوکه، تصاویر LST (اندازه‌گیری شده) و مدل محلی را در کانیون‌های طبقه‌بندی شده نشان می‌دهد. از 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 محاسبه شد (شکل ۱۲) که با توجه به شاخص مقدار احتمال (P-Value) معنادار بوده و نشان‌دهنده وجود یک همبستگی بالا در میان دو دسته داده مذکور است. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نیز نمودارهای مقادیر بیشینه شدت جزیره حرارتی اندازه‌گیری شده، برآورد شده از مدل محلی و برآورد شده از مدل اوکه در کانیون‌های طبقه‌بندی شده را نشان می‌دهد. بررسی شکل‌های مذکور نشان می‌دهد؛ داده‌های محاسبه شده از مدل محلی به داده‌های اندازه‌گیری شده نزدیک و اختلاف پیش‌بینی مدل اوکه در هر دو گروه از محدوده Z_0 حذف شده است. جدول ۸. مقدار UHI_{max} حاصل از مدل اوکه، تصاویر LST و مدل محلی در کانیون‌های طبقه‌بندی شده

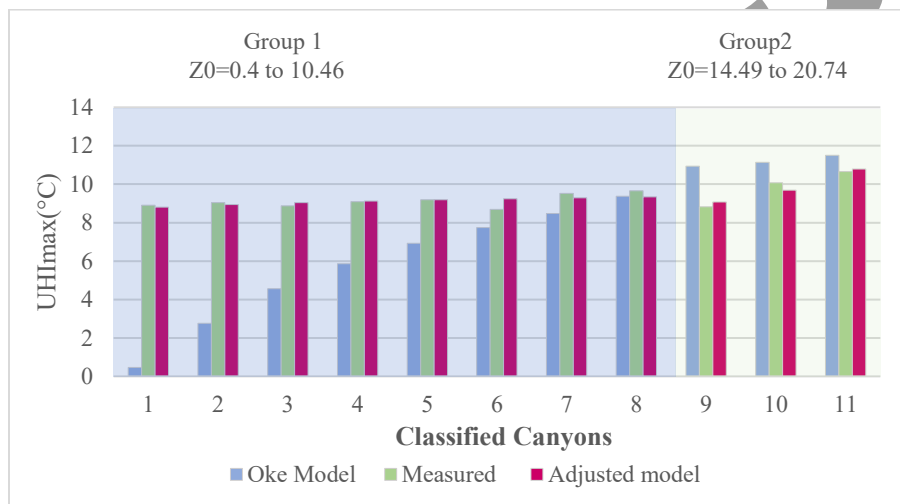
	Class ID	H/W	$UHI_{max-Oke}$ (°C)	$SUHI_{max}$ (°C)	$SUHI_{max-adj}$ (°C)
Group ۱	۱	۰/۱۷	۰/۴۷	۸/۹۱	۸/۸۰
	۲	۰/۳۱	۲/۷۶	۹/۰۴	۸/۹۴
	۳	۰/۴۸	۴/۵۶	۸/۸۷	۹/۰۵
	۴	۰/۶۷	۵/۸۵	۹/۰۹	۹/۱۲
	۵	۰/۸۸	۶/۹۳	۹/۲۰	۹/۱۹
	۶	۱/۰۷	۷/۷۳	۸/۶۹	۹/۲۴
	۷	۱/۲۹	۸/۴۸	۹/۵۳	۹/۲۸
	۸	۱/۶۲	۹/۳۷	۹/۶۵	۹/۳۴
Group ۲	۹	۲/۴۱	۱۰/۹۴	۸/۸۳	۹/۰۸
	۱۰	۲/۵۳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

فرآیند ارزیابی و اعتبارسنجی مدل محلی ارائه شده در معادلات (۲۵) و (۲۶) بر اساس بیشینه شدت جزیره حرارتی برآورد شده ۱۲۰ کانیون واقع در محدوده چک و مقایسه مقدار آن‌ها با مقادیر متناظر حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده از تصاویر LST انجام پذیرفت و مقادیر RMSE و MAE مدل به ترتیب $1/0.5 \pm$ و $0/85$ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. مقادیر مذکور دقت بالای مدل ارائه شده در شبیه‌سازی بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌ها را در سطح منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر شاخص مقاومت اُترودینامیک شهری بر مدل‌سازی بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌های شهری با استفاده از فناوری سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات مکانی و تحلیل‌های آماری مورد بررسی قرار گرفت. تهیه داده‌های درجه حرارت هوای کانیون‌های شهری از یک طرف و محاسبه پارامترها و شاخص‌های مورد نیاز مدل‌سازی از داده‌های هندسه شهری از طرفی دیگر، از چالش‌های اساسی پیش روی این تحقیق به شمار می‌رفت. چالش اول، با استفاده از داده‌های سنجنده ماهواره‌ای ASTER و الگوریتم پنجره مجزا در سنجش از دور و چالش دوم؛ از طریق استفاده از قابلیت‌های موجود در بستر سیستم‌های اطلاعات مکانی مرتفع شد. در ادامه، فرآیندهای مدل‌سازی و اعتبارسنجی بیشینه شدت حرارتی کانیون‌های شهری از طریق تحلیل رگرسیون نتایج حاصل از مراحل قبل و در دو حالت مختلف صورت پذیرفت. در حالت اول، فرآیند مدل‌سازی، صرفاً با در نظر گرفتن شاخص نسبت منظر انجام

گرفت 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 $0/73$ محاسبه شد. با انجام فرآیند اعتبارسنجی مدل در محدوده چک، مقادیر RMSE و MAE آن به ترتیب $1/18 \pm$ و $0/98$ درجه سانتی‌گراد محاسبه گردید. در حالت دوم، از شاخص طول زبری نیز در فرآیند مدل‌سازی و اعتبارسنجی استفاده شد که مقادیر R^2 و ρ حاصل از تحلیل رگرسیون داده‌های اندازه‌گیری و برآورد شده کانیون‌ها در این حالت، به ترتیب $0/80$ و $0/89$ محاسبه شد. همچنین، مقادیر RMSE و MAE حاصل از اعتبارسنجی مدل در محدوده چک در این حالت، این حالت به ترتیب $1/05 \pm$ و $0/85$ درجه سانتی‌گراد محاسبه گردید. بررسی و مقایسه مقادیر R^2 و ρ در حالت‌های مذکور نشان داد؛ لحاظ کردن شاخص مقاومت آئروپنمیک کانیون‌های شهری در فرآیند مدل‌سازی، سبب افزایش همبستگی میان داده‌های اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از مدل شده است. در پژوهش صورت گرفته توسط ناکاتا و همکاران (۲۰۱۸) مقادیر R^2 و ρ مربوط به 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 به ترتیب $0/92$ و $0/96$ محاسبه شده است که بیانگر افزایش همبستگی میان داده‌های اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از مدل‌سازی بوده است. مقایسه نتایج حاصل از تحقیق حاضر با پژوهش صورت گرفته توسط ناکاتا و همکاران (۲۰۱۸)، نشان می‌دهد نتایج به دست آمده در این دو تحقیق با هم مشابهت دارند. از طرفی، بررسی مقادیر RMSE و MAE مربوط به ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌های به دست آمده در تحقیق حاضر نشان می‌دهد؛ لحاظ کردن شاخص ضریب زبری در فرآیند مدل‌سازی، افزایش دقت بالاتر مدل و بهبود نتایج را به همراه داشته است. نتایج حاصل از انجام این تحقیق می‌تواند ضمن برآورد دقیق‌تر بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌های وضع موجود شهر، امکان پیش‌بینی بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌ها را در مرحله طراحی معماری-شهرسازی و با دقت بالاتر را فراهم نماید. این موضوع می‌تواند در مرحله طراحی‌های شهری، تأمین آسایش حرارتی بهتر شهروندان و پیش‌بینی بهینه زیرساخت‌های آبی شهری را در ارتباط با موضوع پدیده جزایر حرارتی شهری به همراه داشته باشد. قدرت تفکیک مکانی و زمانی نسبتاً پایین سنجنده‌های حرارتی، از جمله سنجنده ASTER، امکان اندازه‌گیری دمای سطح زمین در بازه‌های زمانی کوتاه و با رزولوشن بالا را فراهم نمی‌کند که این امر، دقت اندازه‌گیری بیشینه شدت جزیره حرارتی کانیون‌ها در محدوده مطالعاتی را کم نموده و در نتیجه، دقت مدل محلی ارائه شده را کاهش می‌دهد این موضوع، از محدودیت‌های این تحقیق محسوب می‌شود و امید است با افزایش قدرت تفکیک مکانی و زمانی سنجنده‌های حرارتی در آینده، این معضل مرتفع گردد. در انجام این تحقیق، تأثیر شاخص طول زبری، به عنوان یک نمونه از عوامل مقاومت سطوح شهری در برابر جریان هوا و ایجاد پدیده جزایر حرارتی شهری، در فرآیند مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. در نظر گرفتن سایر شاخص‌های مقاومت سطوح شهری در فرآیند مدل‌سازی، نظیر شاخص ناحیه قدامی (FAI) که از آن با عنوان مقدار مساحت سطح جانبی ساختمان‌های رو به جریان هوا/باد در واحد سطح مناطق شهری یاد می‌شود؛ می‌تواند به تکمیل مدل و بهبود نتایج حاصل منجر گردد. از این رو، در مطالعات آتی؛ لحاظ کردن این شاخص و بررسی تأثیرات آن در فرآیند مدل‌سازی جزایر حرارتی پیشنهاد می‌گردد.

۵- تقدیر و تشکر

در خاتمه این تحقیق، از سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران به ویژه جناب آقای مهندس احمد خان بیگی، کارشناس محترم آن سازمان، به واسطه همکاری ارزنده در ارائه داده‌های هندسی منطقه مورد مطالعه این تحقیق؛ صمیمانه قدردانی می‌گردد.

References:

Abrams, M, Hook, S., Ramachandran, B., ۲۰۰۲, **ASTER User Handbook**, version ۲, Jet Propulsion Laboratory: Pasadena, CA, USA.

Boori, M.S., ۲۰۱۵, **A comparison of land surface temperature, derived from AMSR-۲, Landsat and ASTER satellite data**, J. Geogr. Geol., ۷, ۶۱-۶۹.
<http://dx.doi.org/۱۰.۵۵۳۹/jgg.v۷n۳p۶۱>

Bittencourt L., Candido C., Cândido C., de Dear R.J., ۲۰۱۰, **Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone**, Building and Environment, ۴۵(۱), ۲۲۲-۲۲۹.
<https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.buildenv.۲۰۰۹.۰۶.۰۵>

Carlson T.N. و Ripley D.A., ۱۹۹۷, **On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index**, Remote Sens. Environ., ۶۲, ۲۴۱-۲۵۲. [http://dx.doi.org/۱۰.۱۰۱۶/S۰۰۳۴-۴۲۵۷\(۹۷\)۰۰۱۰۴-۱](http://dx.doi.org/۱۰.۱۰۱۶/S۰۰۳۴-۴۲۵۷(۹۷)۰۰۱۰۴-۱)

Clarke J. F., ۱۹۷۲, **Some effects of the urban structure on heat mortality**, Environ. Res., ۵, ۹۳.
[https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/۰۰۱۳-۹۳۵۱\(۷۲\)۹۰۰۲۳-۰](https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/۰۰۱۳-۹۳۵۱(۷۲)۹۰۰۲۳-۰)

Chatzipoulka C., Nikolopoulou M., Watkins R., ۲۰۱۵, **The impact of urban geometry on the radiant environment in outdoor spaces**, ۹th International Conference on Urban Climate. ICUC ۹th International Conference on Urban Climate jointly with ۱۲th Symposium on the Urban Environment.
<https://kar.kent.ac.uk/id/eprint/۵۲۶۹۵>

Du C., Ren H., Qin Q., Meng J., Zhao S., ۲۰۱۵, **A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat ۸ data**, Remote Sensing, vol.۷, no. ۱, pp. ۶۴۷-۶۶۵.
<http://dx.doi.org/۱۰.۳۳۹۰/rs۷۰۱۰۰۶۴۷>

EPA, ۲۰۰۳, **Beating the Heat: Mitigating Thermal Impacts**, Nonpoint Source News-Notes. ۷۲:۲۳-۲۶.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA), ۲۰۰۸, **Reducing urban heat islands: Compendium of strategies**. <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>.

Garratt J., ۱۹۹۲, **The Atmospheric Boundary Layer**. Cambridge University Press: Cambridge; ۳۳۶ pp.
Jenks G. F., ۱۹۶۷, **The Data Model Concept in Statistical Mapping**, International Yearbook of Cartography ۷: ۱۸۶-۱۹۰. <https://doi.org/۱۰.۱۰۰۲/qj.۴۹۷۱۲.۵۱۹۱۹>

Jiménez-Muñoz J.C., Sobrino J.A., Gillespie A, Sabol D., Gustafson W.T., ۲۰۰۶, **Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI**, Remote Sens. Environ., ۱۰۳, ۴۷۴-۴۸۷.
<https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.rse.۲۰۰۶.۰۴.۰۱۲>

Jimenez-Munoz J. C., Sobrino J. A., ۲۰۱۰, **A Single-Channel algorithm for land surface temperature retrieval from ASTER data**, IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, ۷: ۱۷۶ - ۱۷۹.
<https://doi.org/۱۰.۱۱۰۹/LGRS.۲۰۰۹.۲.۲۹۵۳۴>

Johnson G. T., Oke T. R., Steyn D. G., Watson I. D. & Voogt J. A., ۱۹۹۱, **Simulation of surface urban heat island under 'Ideal' conditions at night**, Part ۱, theory and tests against field data. Boundary-Layer Meteorology, ۵۶: ۲۷۵-۲۹۴. <https://doi.org/10.1007/BF00120424>

Jouybari moghaddam Y., Akhoondzadeh M., Saradjian M., ۲۰۱۵, **A Split-Window Algorithm for Estimating LST from Landsat-۸ Satellite Images**, Journal of Geomatics Science and Technology, JGST ۲۰۱۵; ۵ (۱): ۲۱۵-۲۲۶. <http://jgst.issgeac.ir/article-۱-۲۲۵-fa.html>

Kim S., Kim M., Kim Y., ۲۰۱۲, **The impacts of PTA formation on small economies' tax competition for FDI inflows**, Economic Modelling, Elsevier, ۲۹(۶), ۲۷۳۴-۲۷۴۳. <http://dx.doi.org/10.1016/j.econmod.2012.08.003>

Levermore G, Cheung H., ۲۰۱۲, **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. ۳۳(۴):۳۷۱-۳۸۵. <https://doi.org/10.1177/0143762411417899>

Li Z. L., Tang B.H., Wu H., Ren H.Z., Yan G.J., Wan, Z.M., Trigo I.F., Sobrino J.A., ۲۰۱۳, **Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives**, Remote sensing of environment, vol. ۱۳۱, pp. ۱۴-۳۷. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>

Liu L., Zhang, Y., ۲۰۱۱, **Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: A case study in Hong Kong**, Remote Sens., ۳, ۱۵۳۵-۱۵۵۲. <http://dx.doi.org/10.3390/rs3071535>

Martano M., ۲۰۰۰, **Estimation of Surface Roughness Length and Displacement Height from Single-Level Sonic Anemometer Data**, Journal of Applied Meteorology, vol. ۳۹, Issue ۵, pp. ۷۰۸-۷۱۵. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)039%3C%3E08%3E3.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)039%3C%3E08%3E3.0.CO;2)

Montávez J. P., González-Rouco J. F., Valero F. ۲۰۰۸, **A simple model for estimating the maximum intensity of nocturnal urban heat island**, International Journal of Climatology, ۲۸:۲۳۵-۲۴۲. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1526>

Motieyan, H., Hashemi Ashka, S. H., ۲۰۲۲, **Analysis of the Urban Geometry's Effects on Nocturnal Urban Heat Islands Using Remote Sensing and GIS (Case Study: Golestan town, District ۲۲ of Tehran)**. Journal of Natural Environmental Hazards, ۱۰(۳), ۵۱-۶۸. <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.34497,167>

Ndossi M.I., Avdan U., ۲۰۱۶, **Inversion of Land Surface Temperature (LST) Using Terra ASTER Data: A Comparison of Three Algorithms**. Remote Sens. ۸, ۹۹۳, <https://doi.org/10.3390/rs8120993>

Nakata, C. M., De Souza, L. C. L., ۲۰۱۳. **VERIFICATION OF THE INFLUENCE OF URBAN GEOMETRY ON THE NOCTURNAL HEAT ISLAND INTENSITY**. Journal of Urban and Environmental Engineering, ۷(۲), ۲۸۶-۲۹۲. <http://dx.doi.org/10.4090/juee.2013.v7n2.286292>

Nakata O C. M, De Souza L. C. L, Rodrigues D.S., ۲۰۱۵, **A GIS extension model to calculate urban heat island intensity based on urban geometry**, Proceedings of CUPUM ۲۰۱۵, Conference Cambridge, Massachusetts (USA): ۱-۱۶. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.09.007>

Nakata C.M., Souza, L.C.L., Rodrigues D.S., ٢٠١٨, **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, ٦٧:١٥٧-١٦٨. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.09.007>

Oke T.R., ١٩٨١, **Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations**. Journal of Climatology, ١, ٢٣٧-٢٥٤. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370010304>

Oke T. R., ١٩٨٢, **The energetic basis of the urban heat island**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, ١٠٨, (٤٥٥), ١-٢٤. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845002>

Oke T. R., ١٩٨٤, **Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning**, Energy and Buildings, ٧: ١-١٠. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(84\)90040-9](https://doi.org/10.1016/0378-7788(84)90040-9)

Oke, T. R., ١٩٨٧, **Boundary Layer Climates**, second ed, Methuen, London

Rajagopalan, P., Lim, K. C., Jamei, E., ٢٠١٤, **Urban heat island and wind flow characteristics of a tropical city**, Solar Energy, ١٠٧, ١٥٩-١٧٠. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.042>

Roth M., ٢٠١٣, **Urban Heat Islands**, In H. J. Fernando, Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Volume Two: Systems, Pollution, Modeling, and Measurements, pp. ١٤٣-١٥٩. CRC Press. <http://profile.nus.edu.sg/fass/geomr/roth%20uhi%20hefd%20.pdf>

Pu R., Gong P., Michishita R., Sasagawa T., ٢٠٠٦, **Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval**, Remote Sensing of Environment, Volume ١٠٤, Issue ٢, Pages ٢١١-٢٢٥. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.09.022>

Santamouris, M., ٢٠١٣, **Energy and climate in the urban built environment**, Routledge, Abingdon-on-Thames, UK. <http://dx.doi.org/10.4324/9781310573774>

Sobrinho J., & Jimenez-Munoz J., ٢٠١٤, **Minimum configuration of thermal infrared bands for land surface temperature and emissivity estimation in the context of potential future mission**, Remote Sensing Environment, ١٤٨, ١٥٨-١٦٧. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.027>

Saadallah, D., ٢٠١٨, **"MODELLING THE INTERACTIONS BETWEEN URBAN HEAT ISLAND AND URBAN GEOMETRY**, BAU Journal - Health and Wellbeing: Vol. ١: Iss. ٣, Article ١٤. <https://doi.org/10.54729/2589-8288.1066>

Sayadi F., Hejazizadeh Z., Saligheh M., ٢٠٢٢, **The Effect of Urban Geometry on the Formation of Urban Heat Islands of Tehran (Case study: Districts ٢ and ٦ of Region ٣)**, Journal of Geography Vol. ٢٠, No. ٧٢, PP. ١-١٨. <https://dorl.net/dor/http://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1401.20.72.1.7>

Su Z., Schmugge T., Kustas W.P., Massman W.J., ٢٠٠١, **An evaluation of two models for estimation of the roughness height for heat transfer between the land surface and the atmosphere**, J. Appl. Meteorol. ٤٠, ١٩٣٣-١٩٥١. [https://doi.org/10.1175/1050-0687\(2001\)40%3C1933:AEOTMF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1050-0687(2001)40%3C1933:AEOTMF%3E2.0.CO;2)

Tsai J., Tsuang B., Lu P., Chang K., Yao M., Shen Y., ٢٠١٠, **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 ۱۱(۲): ۴۵۲-۴۶۶. <https://doi.org/10.1175/2009JHM1131.1>

Van de Griend A., Owe M., ۱۹۹۳, **On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces**, Int. J. Remote Sens., ۱۴, ۱۱۱۹-۱۱۳۱. <https://doi.org/10.1080/01431169308904440>

Yang L., Qian F., Song D. , Ke-Jia Z., ۲۰۱۶, **Research on Urban Heat-Island Effect**, Procedia Engineering, Vol. ۱۶۹, PP. ۱۱-۱۸. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.002>

نسخه پیش انتشار

نسخه پیش انتشار