



تحلیل تغییرات زمانی شدت جزیره حرارتی شبانه شهر تهران

طاهر صفرا^{۱*}

استادیار اقلیم شناسی گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۲۲

چکیده

پژوهش پیش رو سعی دارد تا با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای MODIS، درجه حرارت شبانه سطح زمین را در شهر تهران و حومه آن مورد واکاوی قرار دهد. بدین منظور ویژگی‌های درجه حرارت شبانه در شهر تهران و حومه آن از طریق داده‌های MOD11A2 نسخه ۶ به صورت میانگین‌های ۸ روزه برای شب (۲۲:۳۰) با قدرت تفکیک ۱ کیلومتر طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ جمع‌آوری شدند. سری زمانی درجه حرارت سطح زمین در مرکز و حومه شهر تهران بدست آمد و از طریق آن سری زمانی شدت جزیره حرارتی سطح زمین طی شب محاسبه گردید. یافته‌های پژوهش نشان داد که روند تغییرات درجه حرارت شبانه در مرکز شهر تهران کاملاً متفاوت از حومه آن است بدین صورت که همزمان با افزایش معنادار درجه حرارت شبانه سطح زمین در حومه شهر، روند معناداری در درجه حرارت شبانه سطح زمین در مرکز شهر مشاهده نمی‌شود. از این رو آهنگ شتابان افزایش درجه حرارت شبانه در حومه شهر نسبت به مرکز آن، روند نزولی جزیره حرارتی سطح شهر را سبب شده است بدین صورت که در مقیاس فصلی و سالانه روند کاهشی شدت جزیره حرارتی سطح شهر در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار بوده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان اظهار داشت، اگرچه در سال‌های اخیر زمین گرمتر شده است ولی میزان گرم شدن مرکز شهر و حومه آن به یک اندازه نبوده است بنابراین شدت جزیره حرارتی شبانه سطح زمین در تهران یک روند کاهشی معنادار را به صورت فصلی و سالانه ثبت کرده است.

واژه‌های کلیدی: جزیره حرارتی شبانه، درجه حرارت شبانه سطح زمین، سنجنده مادیس، تهران

مقدمه

میدارند از لحاظ ظرفیت حرارتی، زبری و آلیبدو تفاوت معناداری با محیط خارج از شهر دارند که این تفاوت‌ها می‌تواند بودجه انرژی سطح زمین را به میزان قابل توجهی تغییر دهد.

هووارد^۳ (۱۸۳۳) اولین فردی بود که شواهدی را دال بر بالاتر بودن دمای شهرها نسبت به حومه اطراف آنها ارائه داد و بعدها مطالعات اوک^۴ (اوک، ۱۹۷۳؛ اوک، ۱۹۷۶؛ اوک، ۱۹۸۳) و چاندلر^۵ (۱۹۶۷ و ۱۹۷۶) زمینه ساز پیشرفت‌های زیادی در مباحث مرتبط با اقلیم شهری و جزیره حرارتی شهرها شد. از آن زمان

مناطق شهری معمولاً گرمتر از محیط روستایی خود هستند، پدیده‌ای که تحت عنوان جزیره حرارتی شهر (UHI^۲) شناخته می‌شود. با توسعه شهرها، پوشش طبیعی زمین (پوشش گیاهی و زمین بایر) از بین می‌رود زیرساخت‌های شهری جایگزین آن می‌شوند. تغییر در پوشش زمین منجر به ایجاد سطوح نفوذناپذیر خواهد شد که سایه و رطوبت کمتر برای خنک نگه داشتن مناطق شهری را دارد. این سطوح نفوذناپذیر همزمان که آب کمتری را در خود نگه

3. Howard
4. Oke
5. Chandler

*نویسنده مسئول: t.safarrad@umz.ac.ir
2. Urban Heat Island

است. ساده‌ترین و کمی‌ترین شاخص بررسی تغییرات حرارتی اعمال شده توسط شهر بر محیط طبیعی، شدت جزیره حرارتی است که از اختلاف درجه حرارت شهر نسبت به محیط روستایی اطراف آن محاسبه می‌شود (کیم و بایک، ۲۰۰۲: ۶۵۲ و میمان^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۹: ۴۹۱) این اختلاف دمایی در شب بیشتر از روز است و در شرایط آسمان صاف با افزایش سرعت باد کاهش می‌یابد (کیم و بایک، ۲۰۰۲: ۶۵۲) و ممکن است سیکل‌های هفتگی ناشی از فعالیت‌های انسانی نیز در آن دیده شود (ارل^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۶: ۲) برخی از یافته‌ها افزایش UHI در شرایط آب و هوایی گرمتر را نشان می‌دهند (لی^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۴: ۲؛ لی و همکاران، ۲۰۱۵: ۲؛ رامامورتی و بوزیاد^{۱۳}، ۲۰۱۷) و برخی دیگر کاهش شدت آن را همزمان با افزایش دما در بیشتر شهرها به تصویر کشیده‌اند (اسکات^{۱۴}، ۲۰۱۸: ۱).

نتایج مشاهدات نشان می‌دهد که میانگین دمای کره زمین طی قرن ۲۰ حدود ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است که این امر مسبب نگرانی‌های زیادی در سرتاسر جهان شده است و نرخ افزایش درجه حرارت شهرهای بزرگ در همین دوره حدود ۲ تا ۳ درجه بوده است (صفرراد و همکاران، ۱۳۹۸؛ یاماموتو، 2006). اثر جزیره حرارتی شهر بسیار بیشتر از تغییرات ناشی از گرم شدن کره زمین است اگر این نکته را اضافه کنیم که در حال حاضر حدود ۵۵ درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کنند و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ این نسبت به ۶۸ درصد افزایش یابد (پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ حدود ۶/۷ میلیارد نفر از ۹/۸ میلیارد نفر ساکن در جهان ساکن شهرها باشند) (ریچی و روزر^{۱۵}، ۲۰۱۸) ضرورت مطالعه جزیره حرارتی شهرها بارزتر خواهد شد.

پژوهش‌های متفاوتی در رابطه با جزیره حرارتی شهر تهران انجام شده است که بیشتر آنها از تصاویر

تحقیقات زیادی در مناطق مختلف جهان در مورد ویژگی‌های جزیره حرارتی شهر و ویژگیها و پیامدهای آن انجام شده است. رویکردهای تجربی مبتنی بر درجه حرارت هوا یا LST^۱ غالباً سعی در برقراری ارتباط میان شدت UHI و تغییر در شاخص‌های توصیفی شهرها دارند در همین راستا خصوصیات بیوفیزیکی (پوشش گیاهی و سطوح نفوذناپذیر)، شاخص‌های اجتماعی-اقتصادی (تراکم جمعیت، تراکم ساختمان و تراکم ترافیک) و ویژگی‌های اقلیمی شهرها (بارش، تبخیر و تعرق و باد) بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. (ونگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۱؛ هولدرنز^۳ و همکاران، ۲۰۱۳؛ ژو^۴ و همکاران، ۲۰۱۳؛ مونالی^۵ و همکاران، ۲۰۱۹؛ کیم و بایک^۶، ۲۰۰۲؛ کاموانگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۵).

یاماموتو^۸ (۲۰۰۶: ۶۶) چهار عامل زیر را اصلی‌ترین دلایل ایجاد جزیره حرارتی شهری می‌داند:

۱) افزایش انتشار حرارت ناشی از فعالیت‌های انسانی که غالباً ناشی از مصرف انرژی در مناطق شهری است. ۲) تغییرات پوشش سطح زمین که سبب کاهش ظرفیت تبخیر و تعرق سطحی به دلیل فضای سبز کمتر می‌شود و اثر نگهداشت حرارت بواسطه مصالح ساختمانی مانند بتن و آسفالت. ۳) ساختار شهری، بواسطه ساختمان‌های متراکم و گسترش مناطق شهری، ایستایی حرارت در محیط شهری را سبب می‌شود و ۴) سایر موارد مانند اثرات گلخانه‌ای آلودگی هوای ریز ذرات در جو شهری.

یانگ^۹ و همکاران (۲۰۱۶: ۱۲) UHI را بارزترین ویژگی آب و هوای شهری می‌دانند و یاماموتو (۲۰۰۶: ۶۶) بیان می‌دارد که در هر کجا شهرهای بزرگ وجود داشته باشند، UHI هم وجود دارد و از بین بردن آن غیر عملی است و مسئله اصلی کاهش شدت و اثر آن

1. Land Surface Temperature
2. Weng
3. Holderness
4. Zhou
5. Manoli
6. Kim and Baik
7. Kammuang
8. Yamamoto
9. Yang

10. Memon

11. Earl

12. Li

13. Ramamurthy and Bou-Zeid

14. Scott

15. Ritchie and Roser

استفاده شد. محصول MOD11A2 نسخه ۶ در هر پیکسل، متوسط درجه حرارت سطح زمین و گسیلمندی (LST & E) را طی ۸ روز برای روز (۱۰:۳۰) و شب (۲۲:۳۰) با قدرت تفکیک ۱ کیلومتر در شبکه ای به ابعاد ۱۲۰۰ در ۱۲۰۰ کیلومتر ارائه می‌دهد. مقادیر MOD11A2 یک میانگین ساده از داده‌های MOD11A1 هستند که در دوره ۸ روزه جمع آوری شده است (وان و همکاران، ۲۰۱۵). این داده‌ها امکان ترسیم تصویری روشن از ویژگی سطح زمین را در روز و شب فراهم خواهند آورد و جهت مطالعه اقلیم در مقیاس میکرو و محلی مناسب هستند.

برای آگاهی از تغییرات رخ داده در جزیره حرارتی شهر تهران طی دوره زمانی مورد نظر، ابتدا درجه حرارت سطح زمین طی شب در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ بدست آمد. در این راستا ۹۹۹ تصویر سنجنده مادیس از ۱۸ فوریه ۲۰۰۰ تا ۲۵ نوامبر ۲۰۲۱ به صورت میانگین‌های ۸ روزه جمع آوری شدند.

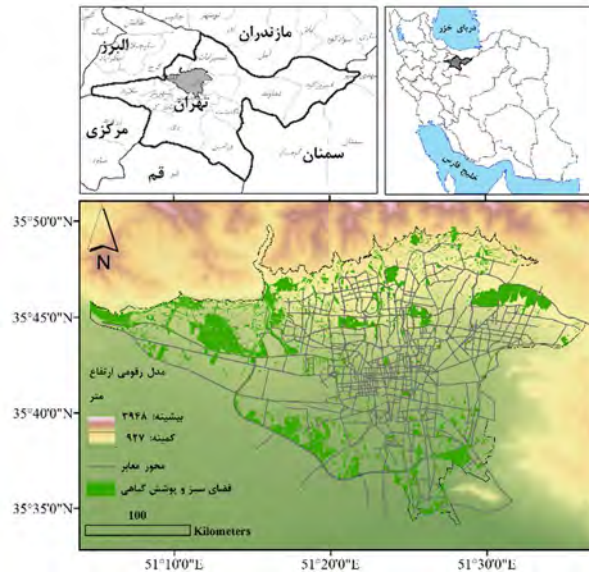
محدوده و قلمرو پژوهش

محدوده مورد مطالعه کلانشهر تهران، پایتخت ایران است. بزرگترین و پرجمعیت‌ترین شهر ایران که طبق سرشماری سال ۱۳۹۵، دارای ۸ میلیون و ۶۹۳ هزار و ۷۰۶ نفر جمعیت بوده است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵) و برآورد می‌شود که در پایان سال ۱۴۰۰، جمعیت کل استان به بیش از ۱۴ میلیون نفر برسد (سازمان جهاد کشاورزی استان تهران). موقعیت جغرافیایی شهر تهران در شکل ۱ نشان داده شده است.

ماهواره‌های لندست و استر استفاده کرده‌اند (مانند صادقی نیا و همکاران (۱۳۹۱) و توتاخانه و رضانی (۱۳۹۸)) از آنجا که این داده‌ها، دمای سطح زمین را قبل از ظهر اندازه‌گیری می‌کنند و در آن زمان، درجه حرارت سطوح خاک معمولاً بیشتر از سایر سطوح است، بنابراین امکان محاسبه جزیره حرارتی به صورت واقعی مهیا نیست، از طرف دیگر، داده‌های مذکور فاقد مشاهدات روزانه هستند و معمولاً بازه‌های زمانی به صورت انتخابی مورد بررسی قرار می‌گیرند لذا درک رفتار جزیره حرارتی طی زمان ناقص و مبهم خواهد ماند. پژوهش‌های چندی نیز (مانند ساسان‌پور و همکاران (۱۳۹۲) و علی طالشی و همکاران (۱۳۹۳)) به ارتباط درجه حرارت سطح زمین و نوع پوشش زمین پرداخته‌اند که فاقد هرگونه اطلاعات در مورد سری زمانی جزیره حرارتی شهر تهران هستند. بنابراین می‌توان گفت که واکاوی دقیق شدت جزیره حرارتی شهر تهران طی شب کاملاً مغفول مانده است و اندک پژوهش‌هایی مانند درویشی بلورانی و همکاران (۱۳۹۸)، با تمرکز روی ارتباط شدت جزیره حرارتی با ویژگی‌های سطح زمین مانند آلبیدو و پوشش زمین تا حدود زیادی توصیف کامل و درستی از آن ارائه داده‌اند اما چرایی تغییرات جزیره حرارتی شهر کماکان مورد توجه قرار نگرفته است. پژوهش پیش رو سعی دارد، سری زمانی شدت جزیره حرارتی شهر تهران طی شب را به صورت کامل و با تمرکز بر رفتار درجه حرارت شهر و حومه آن طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ مورد واکاوی و تحلیل قرار دهد.

روش تحقیق

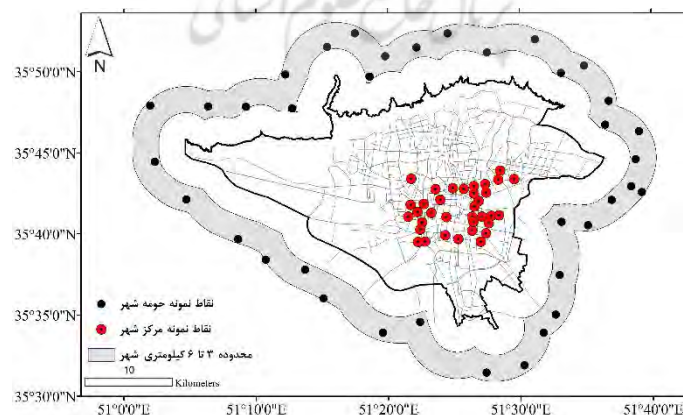
داده‌ها: جهت اطلاع از ویژگی‌های فضایی LST در شهر تهران و حومه آن از داده‌های MOD11A2



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی شهر تهران

شد. برای تشخیص سطوح نفوذپذیر از گوگل ارث و مشاهدات میدانی کمک گرفته شد (شکل ۲).
بخش مرکزی شهر: ارتباط مرکز شهر و درجه حرارت در تحقیقات زیادی مورد اشاره قرار گرفته است، در این پژوهش از معیار درجه حرارت سطح زمین برای شناسایی مرکز شهر استفاده شده است بنابراین با بررسی درجه حرارت شبانه سطح زمین طی دوره مورد مطالعه، مناطقی که به صورت نسبی در تمامی ماهها بیشترین درجه حرارت را به خودشان اختصاص داده بودند به عنوان بخش مرکزی شهر انتخاب شدند (۳۵ نمونه انتخاب شد) (شکل ۲).

شهر و حومه آن: جهت آشکار سازی تغییرات درجه حرارت شبانه و محاسبه جزیره حرارتی شهر تهران طی شب، دو بخش حومه و مرکز شهر از طریق دستورات عملی زیر جدا شدند؛
بخش حومه: تمامی مناطق حد فاصل ۳ تا ۶ کیلومتری شهر تهران که کاربری آنها جزء سطوح طبیعی (سطوح نفوذپذیر مانند زمین بایر، فضای سبز، زمین کشاورزی) قرار می‌گرفت، به عنوان حومه شهر در نظر گرفته شدند (۳۷ نمونه انتخاب شد). به دلیل تاثیر شهر بر محیط پیرامون از ۳ کیلومتر اول صرفنظر



شکل ۲: نقاط نمونه برداری شده به عنوان مرکز شهر و حومه آن در پژوهش پیش رو

می‌باشد. اولین مرحله، دادن رتبه سری زمانی است. فرض می‌شود γ_t رتبه‌های مقادیر سری زمانی هستند. در مرحله اول رتبه مربوط به مشاهده اول با دنباله‌های مقایسه $\gamma_t, t = 2, 3, \dots, n$ مقایسه می‌شود. به عبارت دیگر $n-1$ بار مقایسه صورت می‌گیرد که می‌توان آن را با n_1 نمایش داد. در مرحله بعد γ_2 با تمام دنباله‌های $\gamma_t, t = 3, 4, \dots, n$ مقایسه می‌شود به عبارت دیگر $n-2$ بار مقایسه صورت می‌گیرد که این بار با n_2 نمایش داده می‌شود این کار تا مقایسه γ_{n-1} با γ_n به تعداد 1 بار ادامه می‌یابد. در هر مقایسه اگر به ازای $i < j$ آنگاه $\gamma_i > \gamma_j$ باشد، 1 واحد به n_i اضافه می‌شود. آنگاه آماره من کندال از رابطه زیر محاسبه می‌شود (رابطه ۲).

$$T_{mk} = \sum_{k=1}^{n-1} n_k \quad \text{رابطه ۲}$$

برای n ‌های بزرگتر از 40 می‌توان از قضیه حد مرکزی استفاده نمود. امید ریاضی و واریانس T_{mk} از روابط زیر محاسبه می‌شوند (رابطه ۳ و ۴).

$$E(T_{mk}) = \frac{n(n-1)}{4} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\text{Var}(T_{mk}) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n + 5) - \sum_{i=1}^{ne} e_i(e_i - 1)(2e_i + 5) \right] \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن ne تعداد گروه‌های هم رتبه و e_i تعداد داده‌های هر گروه از هم رتبه‌ها می‌باشد. آماره U_{mk} که از رابطه زیر بدست می‌آید دارای توزیع نرمال است (رابطه ۵).

$$U_{mk} = \frac{T_{mk} - E(T_{mk})}{\sqrt{\text{Var}(T_{mk})}} \quad \text{رابطه ۵}$$

اگر رابطه $|U_{mk}| > Z_{(1-\alpha/2)}$ برقرار باشد، فرض روند صعودی و نزولی در سطح معنی داری α رد می‌شود که در آن $Z_{(1-\alpha/2)}$ جدول توزیع نرمال بدست می‌آید و مربوط به سطح معنی داری α است. همچنین اگر $U_{mk} > 0$ یا $U_{mk} < 0$ باشد، روند به ترتیب افزایشی یا کاهش‌ی است (رحیم‌زاده، ۱۳۹۰: ۳۲۷ و ۳۲۸).

شدت جزیره حرارتی شهر: جزایر حرارتی شهر در طول سال و در طی روز یا شب رخ می‌دهند و از آنجا که مناطق روستایی در طول شب سریعتر از شهرها خنک می‌شوند و حرارت خود را ازدست خواهند داد، اختلاف درجه حرارت مناطق شهری و روستایی اغلب در روزهای آرام و صاف و در ساعات پایانی روز بیشترین میزان را دارد زیرا سطوح نفوذناپذیر مانند جاده‌ها، ساختمان‌ها و سایر سازه‌های انسان ساخت دارای ظرفیت حرارتی بیشتری نسبت به سطوح نفوذپذیر مانند پوشش گیاهی و خاک هستند. در نتیجه، بیشترین اختلاف درجه حرارت شهری و روستایی، یا حداکثر شدت جزیره حرارتی شهر (SUHI)، اغلب سه تا پنج ساعت پس از غروب خورشید رخ خواهد داد (Runnalls and Oke, 2000; Van Hove et al, 2015; Stewart et al., 2021; همین اساس در پژوهش حاضر، تصاویر شبانه (۲۲:۳۰) برای واکاوی NSHUI انتخاب شدند.

در این تحقیق برای محاسبه شدت جزیره حرارتی از روش به کار گرفته شده توسط Scott et al., 2018 استفاده شده است آنها شدت جزیره حرارتی شبانه (NSUHI) برای شهر را به عنوان تفاوت دمای آن شهر (Tu) از حومه آن (Tr) در نظر گرفتند (رابطه ۱):

$$\text{NSUHI} = T_u - T_r \quad \text{رابطه ۱}$$

در این پژوهش T_u همان درجه حرارت شبانه سطح زمین است و T_r میانگین درجه حرارت حومه شهر است که برای هر تصویر به صورت جداگانه محاسبه شده است.

بررسی تغییرات زمانی: آزمون‌های تاو کندال و من کندال آزمون‌های ناپارامتریکی هستند که امروزه استفاده از آنها در مطالعات اقلیمی بویژه در بررسی معنی داری روند به سرعت گسترش یافته است. مبنای نظری آزمون من کندال که در بررسی وجود روند خطی با غیر خطی در اغلب گزارشات تخصصی توصیه شده است، مطابق با منطق تاو کندال است. برای این آزمون، مقایسه محدود به سری زمانی مورد نظر

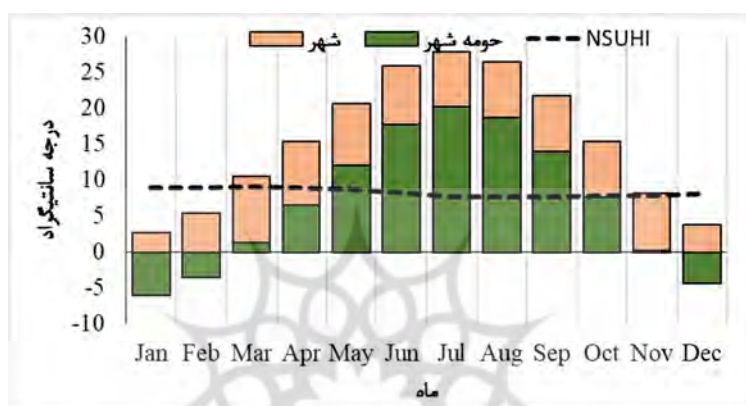
1 - Surface Urban Heat Island

2 - Nighttime Surface Urban Heat Island

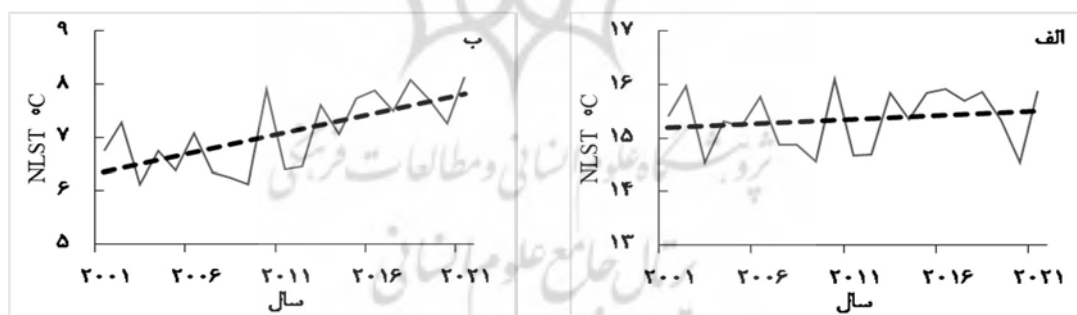
یافته‌های پژوهش

نتایج حاصل از تحلیل درجه حرارت سطح زمین در شهر و حومه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهد که به ترتیب تابستان و زمستان بیشترین و کمترین درجه حرارت را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳) و تقریباً در تمامی ماه‌های سال اختلاف درجه حرارت شهر و حومه حدود ۸ درجه سانتیگراد بوده که با اندکی تغییر در بهار به بیشترین مقدار (حدود ۹ درجه سانتیگراد) و در تابستان به کمترین

مقدار (۷/۶ درجه سانتیگراد) خواهد رسید (شکل ۳). همچنین مرور داده‌های NSUHI نشان می‌دهد که در شهر تهران، شدیدترین جزیره حرارتی رخ داده طی دوره زمانی مورد مطالعه مربوط به ۱۰ دسامبر ۲۰۰۴ (۱۲/۵۹ درجه سانتیگراد) و ۹ ژانویه ۲۰۰۸ (۱۲ درجه سانتیگراد) بوده است همچنین ضعیف‌ترین جزیره حرارتی رخ داده مربوط به ۱۶ نوامبر ۲۰۲۰ (۳/۴ درجه سانتیگراد) و ۲۴ نوامبر ۲۰۲۰ (۴/۵۱) درجه سانتیگراد) بوده است.



شکل ۳: تغییرات درجه حرارت سطح زمین در شهر تهران و حومه آن طی ماه‌های مختلف سال و اختلاف آنها با هم، خط چین مشکی NSUHI را نشان می‌دهد.



شکل ۴: سری زمانی NLST به صورت سالانه برای مرکز شهر تهران (الف) و حومه آن (ب) طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱.

زمانی NLST مرکز شهر هیچ روند معناداری مشاهده نمی‌شود حال آنکه در همان دوره زمانی، NLST حومه شهر روند افزایشی معناداری را نشان می‌دهد (شکل ۴ و جدول ۱).

تغییرات زمانی درجه حرارت شبانه: در این پژوهش، سری زمانی داده‌های درجه حرارت شبانه سطح زمین (NLST¹) در دو مقیاس میانگین سالانه و میانگین فصلی مورد توجه قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که آهنگ تغییرات NLST در شهر تهران و حومه آن متفاوت از هم هستند چنانچه در سری

1 - Nighttime Land Surface Temperature

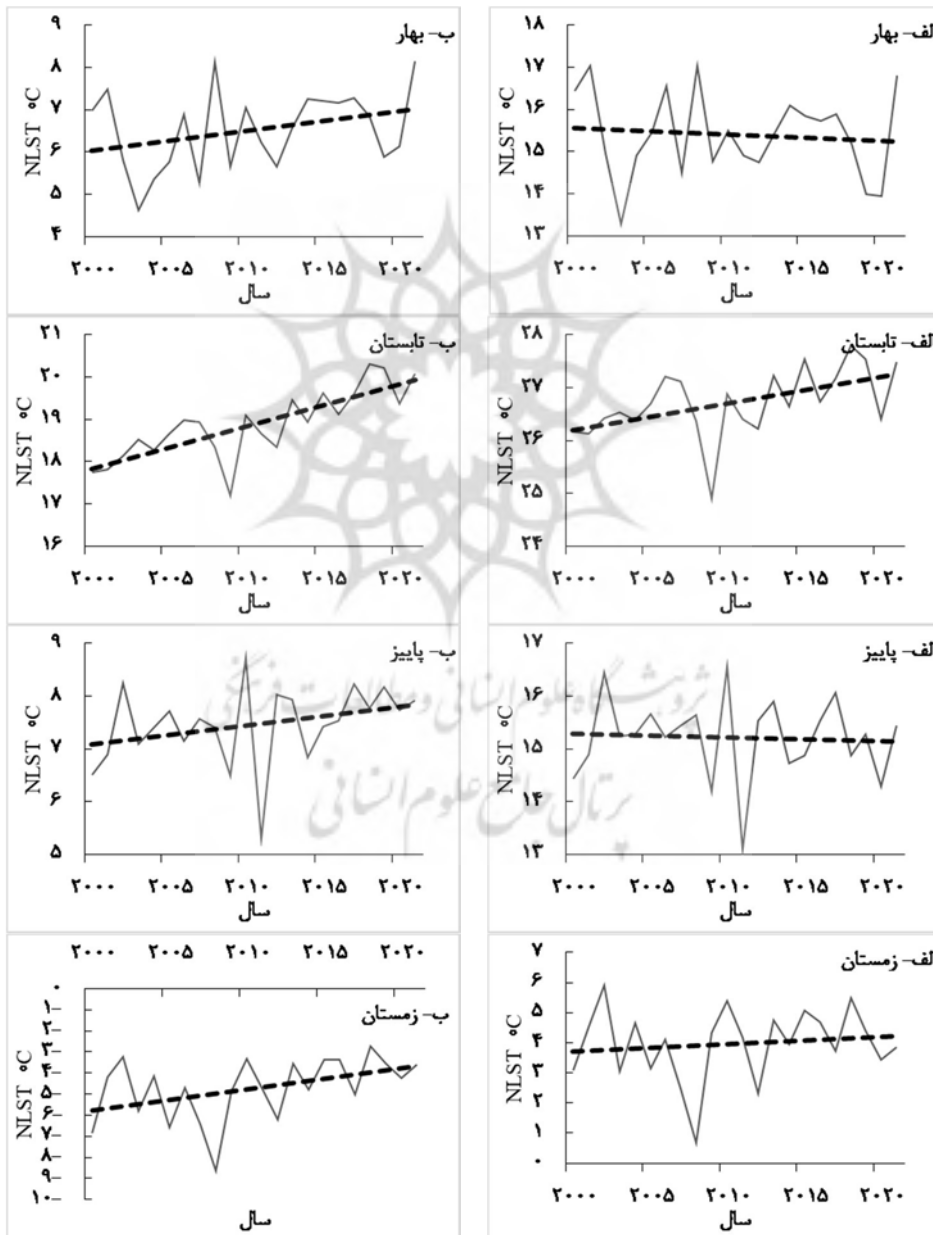
نشان دهنده نرخ افزایش بیشتر NLST در حومه شهر نسبت به مرکز آن است چنانچه در حومه تهران طی همه فصل‌ها، روند افزایشی مشاهده شده است و این روند به غیر از فصل بهار (با سطح اطمینان ۹۰ درصد) در سایر فصل‌ها با سطح اطمینان بیش از ۹۵ درصد معنادار است حال آنکه در مرکز شهر تنها روند افزایشی برای فصل تابستان معنادار بوده و در سایر فصل‌ها روند معنادار مشاهده نشده است لازم بذکر است که برای فصل بهار و پاییز روند کاهشی مشاهده شده است (شکل ۵ و جدول ۲).

جدول ۱: خلاصه نتایج حاصل از آزمون من کندی جهت بررسی وجود روند در داده‌های سالانه NLST.

| مرکز شهر | حومه شهر |
|----------|----------|
| ۱۴/۵۴ | ۶/۱۱ |
| ۱۶/۰۹ | ۸/۱۴ |
| ۱۵/۳۵ | ۷/۰۸ |
| ۰/۰۱۵ | ۰/۰۷۳ |
| ۰/۲۶۵ | ۰/۰۰** |
| P-Value | |

**روند در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار است.

بررسی روند سری زمانی NLST، در مقیاس فصلی



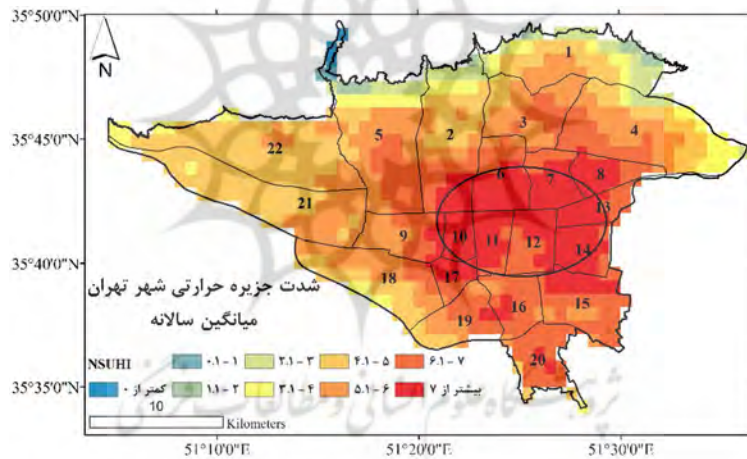
شکل ۵: سری زمانی فصلی NLST در مرکز شهر تهران (الف) و حومه آن (ب) طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱.

جدول ۲: نتایج حاصل از آزمون من کندانال جهت بررسی وجود روند در سری زمانی داده‌های فصلی NLST.

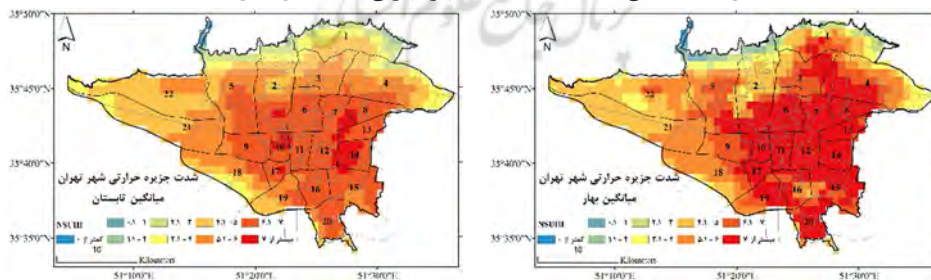
| | حومه شهر | | | | مرکز شهر | | | |
|---------------|----------|-------|---------|-------|----------|--------|---------|--------|
| | زمستان | پاییز | تابستان | بهار | زمستان | پاییز | تابستان | بهار |
| کمینه (° C) | -۸/۶ | ۵/۳ | ۱۷/۲ | ۴/۶ | ۰/۶۷ | ۱۳/۱ | ۲۴/۹ | ۱۳/۲ |
| بیشینه (° C) | -۲/۷ | ۸/۷ | ۲۰/۳ | ۸/۱ | ۵/۹ | ۱۶/۵ | ۲۷/۸ | ۱۷/۱ |
| میانگین (° C) | -۴/۷ | ۷/۴ | ۱۸/۸ | ۶/۵ | ۳/۹ | ۱۵/۲ | ۲۶/۷ | ۱۵/۴ |
| شیب خط | ۰/۰۹۸ | ۰/۰۳۶ | ۰/۱ | ۰/۰۴۶ | ۰/۰۲۴ | -۰/۰۰۷ | ۰/۰۵ | -۰/۰۱۵ |
| P-Value | ۰/۰۵* | ۰/۰۳* | ۰/۰۰** | ۰/۰۷ | ۰/۳۴ | ۰/۵ | ۰/۰۰** | ۰/۳۴. |

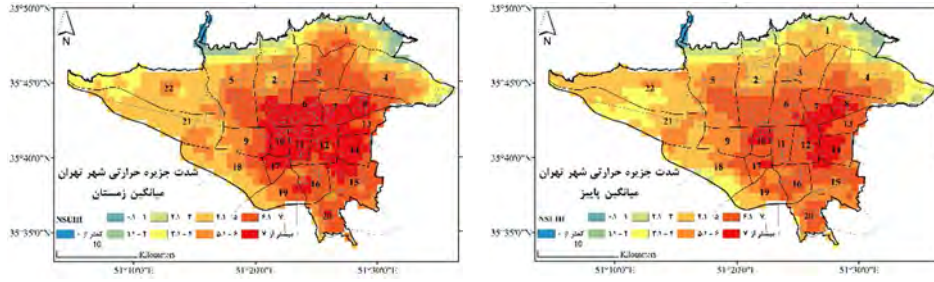
* روند در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است. ** روند در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار است.

تغییرات زمانی شدت جزیره حرارتی شبانه شهر: با مشخص شدن روند سری زمانی NLST در مرکز شهر تهران و حومه آن، محاسبه NSUHI در دستور کار قرار گرفت، بدین منظور برای تمامی تصاویر، NSUHI محاسبه شد و در نهایت میانگین‌های فصلی و سالانه استخراج شدند. در اینجا برای نمونه NSUHI شهر تهران برای سال ۲۰۲۰ به صورت میانگین فصلی و سالانه آورده شده است برای بقیه سال‌ها هم با اندکی تغییرات، الگوهای مشابه تکرار شدند. همانطور که دیده می‌شود بیشترین مقدار NSUHI برای میانگین سالانه، منطبق بر هسته اولیه شهر بوده که از لحاظ هندسی هم مرکز شهر تهران محسوب می‌شود از طرف دیگر، قوی‌تر بودن NSUHI در بهار و زمستان نسبت به سایر فصل‌ها به وضوح قابل مشاهده است (شکل ۶ و ۷).



شکل ۶: میانگین سالانه NSUHI شهر تهران (° C) در سال ۲۰۲۰.

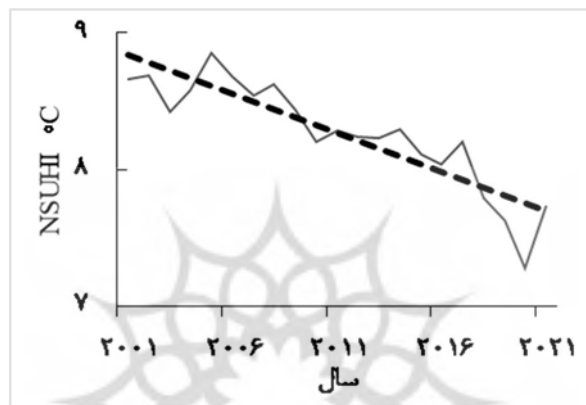




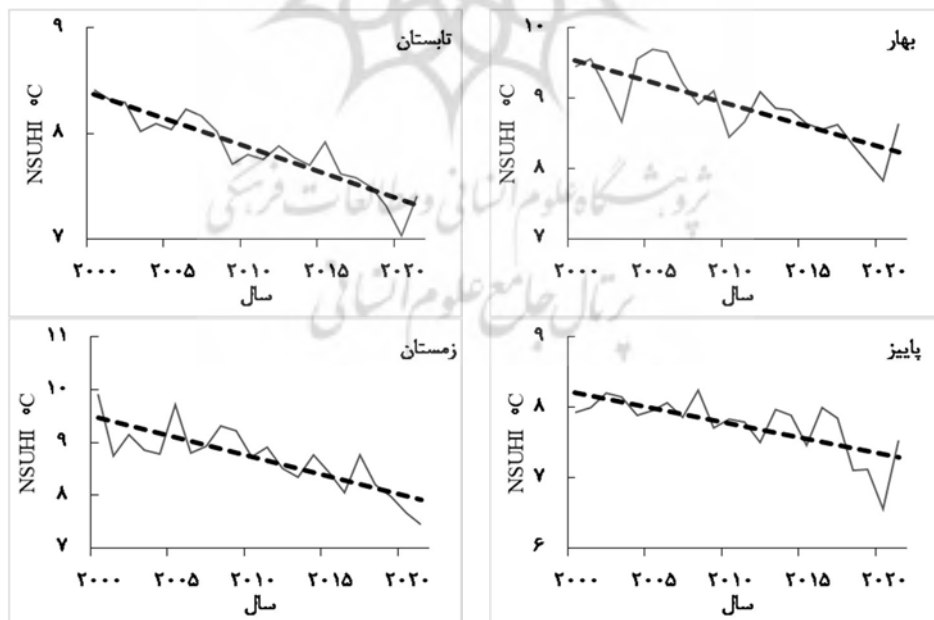
شکل ۷: NSUHI شهر تهران برای فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان (°C) سال ۲۰۲۰.

کاهش‌ی معنادار است (شکل ۸ و ۹ و جدول ۳).

بررسی روند تغییرات زمانی NSUHI شهر تهران در دو مقیاس سالانه و فصلی حاکی از وجود روند



شکل ۸: سری زمانی سالانه NSUHI در شهر تهران طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱.



شکل ۹: سری زمانی فصلی NSUHI در شهر تهران طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱.

جدول ۳: خلاصه نتایج حاصل از آزمون من کندال جهت بررسی وجود روند در سری زمانی NSUHI شهر تهران

| سالانه | بهار | تابستان | پاییز | زمستان | |
|--------|--------|---------|--------|--------|---------------|
| ۷/۲ | ۷/۸ | ۷/۱ | ۶/۵ | ۷/۴ | کمینه (C °) |
| ۸/۸ | ۹/۷ | ۸/۴ | ۸/۲ | ۹/۹ | بیشینه (C °) |
| ۸/۲ | ۸/۹ | ۷/۸ | ۷/۷ | ۸/۶ | میانگین (C °) |
| -۰/۰۵ | -۰/۰۶ | -۰/۰۵ | -۰/۰۴ | -۰/۰۷ | شب خط |
| **۰/۰۰ | **۰/۰۰ | **۰/۰۰ | **۰/۰۰ | **۰/۰۰ | P-Value |

** روند در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که تغییرات NLST در مرکز شهر تهران کاملاً متفاوت از حومه آن است بدین صورت که همزمان با افزایش معنادار NLST در حومه شهر، روند معناداری در NLST مرکز شهر مشاهده نمی‌شود این اتفاق تا حدود زیادی به خاطر تفاوت در خصوصیات بیوفیزیکی (پوشش گیاهی و سطوح نفوذناپذیر)، شاخص‌های اجتماعی-اقتصادی (تراکم جمعیت، تراکم ساختمان و تراکم ترافیک) و ویژگی‌های اقلیمی شهر (بارش، تبخیر و تعرق و باد) بوده که کاملاً متمایز با حومه شهر است. در داخل شهرها (بویژه مراکز آنها) سطوح نفوذناپذیر (آسفالت، بتن، سیمان و سنگ فرش) چهره اصلی سطح زمین محسوب می‌شوند که آب کمتری را در خود نگه میدارند و از لحاظ ظرفیت حرارتی، زبری و آلبیدو تفاوت معناداری با محیط خارج از شهر دارند (که غالباً از سطوح نفوذپذیر مانند خاک و پوشش گیاهی تشکیل شده‌اند)، این تفاوت‌ها می‌تواند بودجه انرژی سطح زمین را به میزان قابل توجهی تغییر دهد و در NSUHI منعکس گردد. بنابراین آهنگ شتابان افزایش

NLST در حومه شهر نسبت به مرکز آن، روند نزولی NSUHI را در پی خواهد داشت و همانگونه که در این پژوهش نیز نشان داده شده است در مقیاس فصلی و سالانه روند کاهشی NSUHI به همین دلیل به وضوح قابل مشاهده است روند نزولی اشاره شده در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار است. بنابراین برخلاف تصور اولیه، گرمایش جهانی و افزایش درجه حرارت شهر تهران نه تنها منجر به NSUHI قویتر نشده است بلکه به خاطر تفاوت در رفتار سری زمانی NLST در مرکز شهر و حومه آن، به صورت معنادار در هر دو مقیاس سالانه و فصلی کاهش داشته است. نتایج فوق، یافته‌های Scott et al, 2018 و درویشی بلورانی و همکاران، ۱۳۹۸ را تایید می‌نماید و با نتایج تحقیقات لیو^۱ و همکاران (۲۰۲۰) و یائو^۲ و همکاران (۲۰۱۷) در مورد شهرهای چین که روند افزایشی در شدت و میزان جزیره حرارتی شهر را نشان دادند، در تضاد است. بنابراین لازم است تا پژوهشگران هنگام مطالعه جزیره حرارتی شهر توجه ویژه به شرایط محلی و جغرافیای آن محل داشته باشند.

11. Earl, N., Simmonds, I., and Tapper, N. 2016. Weekly cycles in peak time temperatures and urban heat island intensity. *Environmental Research Letters*, 11(7), 074003.
12. Holderness, T., Barr, S., Dawson, R., and Hall, J. 2013. An evaluation of thermal Earth observation for characterizing urban heatwave event dynamics using the urban heat island intensity metric. *International journal of remote sensing*, 34(3), 864-884.
13. Howard, L. 1833. The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it (Vol. 3). Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley [and] R. Hunter.
14. Kammuang-Lue, N., Sakulchangsattajai, P., Sangnum, P., and Terdtoon, P. 2015. Influences of population, building, and traffic densities on urban heat island intensity in Chiang Mai City, Thailand. *Thermal Science*, 19(suppl. 2), 445-455.
15. Kim, Y.H., and Baik, J.J. 2002. Maximum urban heat island intensity in Seoul. *Journal of applied meteorology*, 41(6), 651-659.
16. Li, D., Bou-Zeid, E., and Oppenheimer, M. 2014. The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*, 9(5), 055002.
17. Li, D., Sun, T., Liu, M., Yang, L., Wang, L., and Gao, Z. 2015. Contrasting responses of urban and rural surface energy budgets to heat waves explain synergies between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 10(5), 054009.
18. Liu, X., Zhou, Y., Yue, W., Li, X., Liu, Y., and Lu, D. 2020. Spatiotemporal patterns of summer urban heat island in Beijing, China using an improved land surface temperature. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120529.
19. Manoli, G., Fatichi, S., Schläpfer, M., Yu, K., Crowther, T.W., Meili, N., ... and Bou-Zeid, E. 2019. Magnitude of urban heat islands largely explained by
- منابع**
۱. درویشی بلورانی علی، علوی پناه سیدکاظم، ملکی محمد، بیات رضا، هاشمی دره بادامی سیروس، ۱۳۹۷. تحلیل تغییرات جزیره حرارتی سطوح شهری در روز و شب با استفاده از محصولات چند زمانه سنجنده مادیس (مطالعه موردی: کلانشهر تهران)، فصلنامه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۹(۵۲)، ۱۱۳-۱۲۸.
۲. رحیم زاده، فاطمه، ۱۳۹۰. روشهای آماری در مطالعات هواشناسی و اقلیم‌شناسی، انتشارات آب و هوا، تهران.
۳. ساسان پور فرزانه، ضیاییان پرویز، بهادری مریم، ۱۳۹۲. بررسی رابطه کاربری و پوشش اراضی و جزایر حرارتی شهر تهران، فصلنامه جغرافیا، ۱۱(۳۹)، ۲۵۷.
۴. صادقی نیا علیرضا، علیجانی بهلول، ضیاییان فیروزآبادی پرویز، ۱۳۹۱. تحلیل فضایی- زمانی جزیره حرارتی کلان شهر تهران با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱(۴)، ۱.
۵. صفرراد طاهر، منصوری نیا مهران، انتظامی هیرش، ۱۳۹۸. بیان تابش و کاربری اراضی شهری. نمونه‌موردی: شهر کرمانشاه (نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۹(۵۳): ۲۳۱-۲۱۷).
۶. علی طالشی محمدصالح، ستوده احد، صبوحی مرتضی، نیازی یعقوب، ۱۳۹۳. ارزیابی اثرات پوشش زمین بر دمای سطح زمین با کاربرد سنجش از دور حرارتی مطالعه موردی: در تهران، مجله پژوهشهای محیط زیست، ۵(۱۰)، ۶۹.
۷. مجنونی توتاخانه علی، رضانی محمد ابراهیم، ۱۳۹۸. بررسی و ارزیابی وضعیت جزیره حرارتی کلان شهر تهران با استفاده از تصاویر ماهواره ای، نشریه محیط زیست طبیعی، ۱(۷۲)، ۲۹-۴۳.
8. Bjurström, A., and Polk, M. 2011. Physical and economic bias in climate change research: a scientometric study of IPCC Third Assessment Report. *Climatic Change*, 108(1-2), 1-22.
9. Chandler, T.J. 1967. Night-time temperatures in relation to Leicester's urban form. *Meteorol. Mag.*, 96, 244-250.
10. Chandler, T.J. 1976. The climate of towns. *The climate of the British Isles*, 307-329.

30. Van Hove, L.W.A., Jacobs, C.M.J., Heusinkveld, B.G., Elbers, J.A., Van Driel, B.L., and Holtslag, A.A.M. 2015. Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. *Building and Environment*, 83, 91-103.
31. Wan, Z., Hook, S., and Hulley, G. 2015. MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2021-09-28 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A2.006>.
32. Weng, Q., Rajasekar, U., and Hu, X. 2011. Modeling urban heat islands and their relationship with impervious surface and vegetation abundance by using ASTER images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(10), 4080-4089.
33. Yamamoto, Y. 2006. Measures to mitigate urban heat islands. NISTEP Science & Technology Foresight Center.
34. Yang, L., Qian, F., Song, D. X., and Zheng, K. J. 2016. Research on urban heat-island effect. *Procedia Engineering*, 169, 11-18.
35. Yao, R., Wang, L., Huang, X., Niu, Z., Liu, F., and Wang, Q. 2017. Temporal trends of surface urban heat islands and associated determinants in major Chinese cities. *Science of the Total Environment*, 609, 742-754.
36. Zhou, B., Rybski, D., and Kropp, J.P. 2013. On the statistics of urban heat island intensity. *Geophysical research letters*, 40(20), 5486-5491.
37. <https://www.amar.org.ir>
38. <https://www.tehran-agri.ir>
- climate and population. *Nature*, 573(7772), 55-60.
20. Memon, R.A., Leung, D.Y., and Liu, C.H. 2009. An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmospheric Research*, 94(3), 491-500.
21. Oke, T. R. 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), 7(8), 769-779.
22. Oke, T.R. 1976. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14(4), 268-277.
23. Oke, T. R. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
24. Oke, T.R. 1984. Methods in urban climatology. *Applied Climatology*, 14, 19-29.
25. Ramamurthy, P., Li, D., and Bou-Zeid, E. 2017. High-resolution simulation of heatwave events in New York City. *Theoretical and applied climatology*, 128(1-2), 89-102.
26. Ritchie, H., and Roser, M. 2018. Urbanization. *Our world in data*.
27. Runnalls, K.E., and Oke, T.R. 2000. Dynamics and controls of the near-surface heat island of Vancouver, British Columbia. *Physical Geography*, 21(4), 283-304.
28. Scott, A.A., Waugh, D.W., and Zaitchik, B.F. 2018. Reduced Urban Heat Island intensity under warmer conditions. *Environmental Research Letters*, 13(6), 064003.
29. Stewart, I. D., Krayenhoff, E.S., Voogt, J.A., Lachapelle, J A., Allen, M.A., and Broadbent, A. M. 2021. Time Evolution of the Surface Urban Heat Island. *Earth's Future*, 9(10), e2021EF002178.