



Research Article

The role of temperature changes in environmental sustainability of Tehran

Farimah Sadat Jamali¹, shahriyar, khaledi^{1*}

1-Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 13 Jul 2020 Accepted: 05 Jan 2021

Extended Abstract

Introduction

The global temperature in 2017 increased to almost 1°C above pre-industrial levels. The studies on temperature time series in Iran as well as the city of Tehran demonstrate substantial changes within recent decades. The increase in global warming, particularly in cities, influences human health and ecosystems. Meanwhile, different types of green spaces can be a comprehensive tool to maintain urban environmental sustainability by improving air quality, controlling temperature, and reducing the cost of energy consumption in buildings. On the other hand, through city development, the natural and green spaces are under the pressure of rapid urbanization. It is necessary to evaluate the sustainability of green spaces and their impact on urban sustainability to achieve environmental sustainability. This paper studies the changes in air temperature, land surface temperature, and land use/land cover of the city of Tehran within 30 years from 1988 to 2017 to evaluate the urban environmental sustainability.

Materials and Methods

The city of Tehran has 212.3mm annual precipitation and an average temperature of 17.6°C, based on Mehrabad station records from 1960 to 2017. It has a population density of almost 13600 persons per square kilometer. Daily temperature records of Mehrabad and Shemiran stations from 1988 to 2017 were obtained from Iran Meteorological Organization to measure the changes in air temperature. Anderson-Darling, Mann-Kendall, Sen's slope, and Pettitt's statistical tests as well as monthly plotting and annual temperature time series with trend components were employed to analyze monthly and annual temperatures. Two daytime Landsat images in summer were used to study the changes in land use/land cover and land surface temperature: images of 18 August 1988 (TM) and 25 July 2017 (OLI TIRS). Through supervised classification, land use/land cover was classified into four classes of water, vegetation, built-up and bare soil. Land surface temperatures were calculated by using thermal bands (band 6 of TM and band 10 of TIRS), calculating brightness temperature, NDVI, proportion of vegetation and emissivity. Consequently, environmental sustainability was evaluated by analyzing the changes in air temperature, vegetation cover and land surface temperature.

Results and Discussion

The Anderson-Darling test results for monthly and annual mean, maximum, and minimum air temperature time series showed that the time series are not normally distributed. Therefore, Mann-Kendall, seasonal Mann-Kendall, Sen's slope, and Pettitt's tests were employed to detect trends.

Citation: Sadat Jamali, F. and Khaledi, Sh., 2021. The role of temperature changes in environmental sustainability of Tehran, *Res. Earth. Sci.* 12(1), (222-235) DOI: 10.52547/esrj.12.1.222

* Corresponding author E-mail address: s-khaledi@sbu.ac.ir





The trends in monthly and annual air temperature time series (mean, maximum, and minimum) were statistically significant with p-values less than 0.05. Pettitt's test results showed that the changing points were in the late 1990s and early 2000s. The changes in temperature before and after the changing points show 0.8°C and 1°C increase in minimum temperature and 1.5°C and 1°C increase in maximum temperature in Shemiran and Mehrabad stations, respectively.

Comparing the land use/land cover and the extent of green spaces within the 30 years period, it demonstrates urban sprawl and expansion of built-up areas in western parts of Tehran. Also green patches, particularly farmlands and gardens, significantly shrunk in southwest, west and north Tehran. During this period, the extent of vegetation cover decreased by 6.8%. The minimum land surface temperature threshold within the study period increased 5.3°C in summer 2017 compared to 1988. The increase in surface temperature was accompanied by high temperatures in southern and western districts of the city, the districts with noticeable green patch decline. Uncontrolled construction, horizontal expansion of the concrete structures in the city, decrease in the extent and fragmentation of green spaces along with the increase in the mean land surface temperature by 2.6°C within the study period indicate the unsustainability of green spaces as an important element of urban land use and environmental infrastructure.

Conclusion

According to the results of the study, air temperature in Tehran has increased with a statistically significant trend. The changes in land use/land cover were accompanied by built-up development and vegetation cover decline while the land surface temperatures increased. The course of actions during the last three decades demonstrate the environmental unsustainability of the city of Tehran. Implementing strategies following nature-based approaches, suitable for the urban climate and existing limitations, may help adapt to the impacts of temperature rise and reduce greenhouse gases emission.

Keywords: Sustainability, Development, Tehran, Temperature, Trend.



نقش تغییرات دما در پایداری محیط زیست شهر تهران

فریماه سادات جمالی، شهریار خالدی*

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(علمی - پژوهشی)

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۴/۲۳ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶

چکیده

مطالعه حاضر با سنجش تغییرات کمینه، بیشینه و میانگین دمای هوا و دمای سطح زمین و تغییرات پوشش گیاهی در سه دهه اخیر، پایداری محیط زیست شهر را در برابر گرمایش بررسی می کند. برای این منظور، تغییرات دمای کمینه، بیشینه و میانگین ایستگاه های مهرآباد و شمیران از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار گرفته است. تصاویر لندست نیز برای بررسی تغییرات سطح زمین به کار رفته است. نتایج تحلیل دمای هوا نشان دهنده وجود روند افزایشی در دوره زمانی مذکور است. با انجام آزمون پتیت، نقطه تغییر در اواخر دهه ۱۹۹۰ و ابتدای ۲۰۰۰ میلادی به دست آمد؛ به طوری که میانگین دمای هوا 1°C در ایستگاه مهرآباد و $1/2^{\circ}\text{C}$ در شمیران نسبت به قبل از نقطه تغییر افزایش نشان می دهد. رشد افقی شهر با کاهش وسعت پوشش گیاهی همراه بوده و میانگین دمای سطح زمین بیش از 2°C افزایش یافته است. از این رو، روند افزایشی دما همراه با ساخت و سازهای بی رویه و ناپایداری فضای سبز، به عنوان عوامل اثرگذار بر پایداری محیط زیست مورد توجه قرار گرفته است. این مسئله نشانه ای از تشدید گرمایش و ضرورت ارائه راهکارهای مناسب است.

واژه های کلیدی: پایداری، توسعه، تهران، دما، روند.

مقدمه

مناطق انبوه شهری، از مخاطرات قابل توجه در شهرها هستند (خالدی و همکاران، ۱۳۹۶). افزایش گرمایش جهانی بر سلامت انسان و اکوسیستم‌ها اثر می‌گذارد و این تأثیر در شهرها به دلیل اثر جزیره گرمایی شهری بیشتر است (IPCC, 2018). در بسیاری از پژوهش‌ها، مطالعه تغییرات دمای سطح زمین برای بررسی اثر جزیره گرمایی شهر به کار رفته است (Mirzaei, 2015; Zhou et al, 2016; Marando et al, 2019). جزایر گرمایی در ۲۴ شهر مراکش، با آب‌وهوای معتدل در ساحل اقیانوس اطلس، نیمه‌خشک در مناطق جنوبی و خشک در صحرای بزرگ آفریقا بررسی شده است. در این مطالعه از تصاویر سال ۲۰۱۳ لندست ۸ برای طبقه‌بندی اراضی شهری، دمای سطح زمین به دست آمده از MYD11A2 و NDVI^۲ به دست آمده از MOD13A1 استفاده شده است. نتایج نشان داده اثر جزیره گرمایی تحت‌تأثیر پوشش گیاهی شهر و منظر اطراف شهر قرار دارد. مناطق شهری نواحی خشک نیز به دلیل پوشش گیاهی درون شهر اغلب خنک‌تر از اطرافند (Fathi et al, 2019). در تهران و حومه تفاوت دمای سطح زمین طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۱ میلادی در کنار تغییر پوشش زمین پهنه شهری بررسی شده و نتایج حاصله از پژوهش نشان داده که شهرنشینی تهران طی سه دهه مطالعاتی دو برابر شده است. شاخص پوشش گیاهی NDVI نیز عامل مؤثری برای تعدیل دمای سطح زمین در داخل شهر، نسبت به بیرون از شهر، شناخته شد (Tayyebi et al, 2018). در مطالعه‌ای دیگر، ویژگی‌های مکانی-زمانی دمای سطح زمین شهر تهران با اندازه‌گیری زمینی شش گونه پوشش زمین در ایستگاه ژئوفیزیک طی سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ و مدل‌سازی دمای سطح زمین به عنوان تابعی از دمای هوا با مدل SHRP بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین اثر جزیره

گزارش اخیر هیأت بین‌المللی تغییر آب‌وهوا (IPCC) به نام "گرمایش جهانی 1.5°C " در اکتبر ۲۰۱۸، بیانگر افزایش دمای جهانی در حدود 1°C در ۲۰۱۷ نسبت به دوره پیش از انقلاب صنعتی است، به طوری که میزان گرمایش (میانگین افزایش دمای هوا و دمای سطح دریا در سطح جهان در ۳۰ سال گذشته) در برخی از مناطق و برخی فصول بیش از میزان متوسط مشاهده شده است (IPCC, 2018). مطالعه سری‌های زمانی دمای کشور نیز نشان دهنده تغییرات قابل ملاحظه در دهه‌های اخیر بوده است. در ایران در پژوهشی با استفاده از داده‌های هواشناسی ۵ منطقه کشور از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۳، مشخص شد دماهای کمینه، بیشینه و میانگین روزانه در بیشتر مناطق ایران دارای روند افزایشی بوده‌اند و روند افزایش دمای کمینه بیش از دمای بیشینه است. بررسی نقطه تغییر دمای بیشینه و کمینه با روش بویشنند نیز نشان داد که در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ دما در ایران دچار یک جهش شده است (علیزاده چوبری و نجفی، ۱۳۹۶). همچنین، بررسی تغییر دمای شهر تهران (بر پایه داده‌های ایستگاه مهرآباد) بین سال‌های ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۵، با استفاده از روش آماری-گرافیکی من-کندال نشان دهنده وجود روند افزایشی در دما بوده است که تغییرات دمای سالانه و دمای کمینه و بیشینه سالانه در اوایل دهه ۲۰۰۰ میلادی بیشتر مشهود است (حجازی زاده و پروین، ۱۳۸۸). از سوی دیگر، طبق گزارش مجمع جهانی اقتصاد در ژانویه ۲۰۱۹، رخداد‌های فرین آب‌وهوایی از سال ۲۰۱۷ میلادی در صدر فهرست پنج ریسک جهانی از نظر احتمال رخداد قرار دارند (World Economic Forum, 2019). در این میان، شهرها در کانون چالش تغییر آب‌وهوا قرار دارند. جزایر گرمایی، دماهای بالای ناشی از شهرنشینی در

گرمایی در تابستان در مناطق با اراضی بدون پوشش گیاهی، ساخته شده و معابر دیده می‌شود و کمترین دمای سطح زمین در پهنه‌های آبی و پوشش گیاهی. روندی مشابه در زمستان نیز مشاهده می‌شود (Moghbel and Shamsipour, 2019). نتایج پژوهش‌ها در مورد سازگاری و پایداری محیط‌زیست شهری نشان داده که شهرهای با تراکم بالای جمعیت با کاهش و مدیریت ریسک بلایای ناشی از رخدادهای آب‌وهوایی در خط مقدم سازگاری با تغییر آب‌وهوا قرار دارند (Rosenzweig et al, 2018). دما و بارش، اکوسیستم شهری، منابع و کاربری زمین و توسعه نیز در مطالعات محیط انسان‌ساخت بررسی می‌شوند (Solecki et al, 2015). شهرها از عوامل تأثیرگذار در تولید گازهای گلخانه‌ای هستند و حفاظت از خدمات مهم اکوسیستمی و سازگاری با تغییر آب‌وهوا از موارد مهم در تاب‌آوری شهر است (خالدی و کرمی، ۱۳۹۵). در این راستا، گونه‌های متفاوت فضای سبز در سطح شهر (مانند کمر بند سبز، فضای سبز معابر، میدان‌ها و پارک‌ها) ابزار جامعی برای حفظ پایداری محیط‌زیستی شهر هستند که به بهبود کیفیت زندگی، بهبود کیفیت هوا، مهار جزایر گرمایی و کاهش هزینه انرژی مصرفی ساختمان‌ها کمک می‌کنند (Atiqul Haq, Martos et al, 2016; 2011; 2013). ارتباط میان پوشش گیاهی، دمای سطح زمین و دمای هوا در پهنه‌ای از منطقه ساحلی تا بیابانی ایالت کالیفرنیا در شهرهای لس‌آنجلس، ریورساید و پالم اسپرینگز بررسی شده است. داده‌های به‌کار رفته در این مطالعه عبارتند از: دمای هوای ثبت شده شبکه‌ای از ۳۰۰ دماسنج، دمای سطح زمین به دست آمده از سنجنده MASTER و NDVI به دست آمده از سنجنده AVIRIS. نتایج نشان داده به‌طور کلی پوشش گیاهی بر کاهش

دمای هوا و دمای سطح زمین مؤثر است، ولی اثر آن در مقیاس‌های زمانی (روزانه یا ماهانه) و مکانی (خرد یا منطقه‌ای) و بر حسب نوع پوشش (درخت یا چمن) تغییر می‌کند. اگرچه رابطه بین NDVI و دمای هوا در شب قوی‌تر است، اثر خنک‌کنندگی پوشش گیاهی در میانه روز در بسیاری از مناطق خشک به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در تمام مناطق خنک‌کنندگی پوشش گیاهی با رخداد موج‌های گرما بیشتر می‌شود (Shiflett et al, 2017). تغییر کاربری/پوشش زمین در دهه‌های اخیر در کشورهای در حال توسعه قابل توجه است (Wang et al, 2018)، درحالی‌که با رشد شهرها، اولویت توسعه اقتصادی بر حفظ فضای سبز سایه افکنده است. اثر تغییر پوشش و کاربری اراضی شهر نانجینگ، چین، بر دمای سطح زمین بین سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۹ با استفاده از تصاویر لندست بررسی شده است. نتایج نشان داده که با گسترش سریع شهر در دوره مطالعاتی، مهم‌ترین عامل افزایش دمای سطح زمین و تشدید جزیره گرمایی گسترش سطوح نفوذناپذیر بوده است. رشد جمعیت و رونق اقتصادی دلایل اصلی تغییر پوشش/کاربری اراضی شناخته شده‌اند (Wang et al, 2018). مطالعه‌ای بر روی تغییرات زیرساخت سبز شهر تهران (در دو دسته‌ی فضای سبز و اراضی باز) بین سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۳، با استفاده از دو تصویر ماهواره‌ای لندست و محاسبه نسبت مساحت لکه سبز، تراکم لکه و میانگین نزدیک‌ترین فاصله از همسایه انجام شده است. نتایج نشان داده که در طی این دوره اندازه لکه‌های سبز شهری در همه مناطق کاهش یافته است. این روند با توزیع نامناسب شبکه فضای سبز و خردشدن پهنه‌های طبیعی نیز همراه بوده است (یزدان‌پناه و همکاران، ۱۳۹۴). به‌طور خلاصه، با توسعه شهرها، فضاها طبیعی و سبز تحت فشار ناشی از شهرنشینی سریع قرار دارند و لازم است

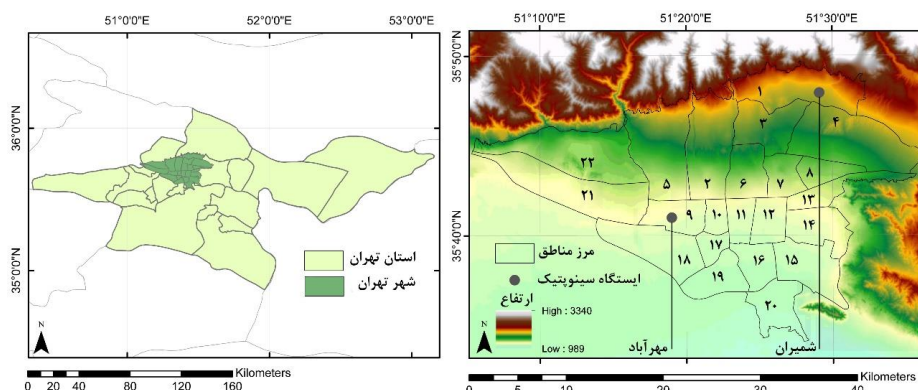
۵۱° شرقی و ایستگاه شمیران با ارتفاع ۱۵۴۹ متر، واقع در ۴۷' ۳۵° شمالی و ۲۹' ۵۱° شرقی استفاده شد (شکل ۱).

بارش متوسط سالانه شهر براساس داده‌های ایستگاه مهرآباد در دوره ۵۸ ساله ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۷، ۲۱۲/۳ میلی‌متر و میانگین دما ۱۷/۶°C است. جمعیت شهر طی ۶۰ سال از حدود ۱/۵ میلیون نفر در سال ۱۳۳۵ (۱۹۵۶ میلادی) به حدود ۶ میلیون نفر در ۱۳۶۵ (۱۹۸۶ میلادی) و به بیش از ۸/۷ میلیون نفر در ۱۳۹۵ (۲۰۱۶ میلادی) افزایش یافته است. با گسترش تهران تا ۶۳۹ کیلومترمربع، تراکم جمعیتی شهر حدود ۱۳۶۰۰ نفر در کیلومترمربع است (شکل ۱).

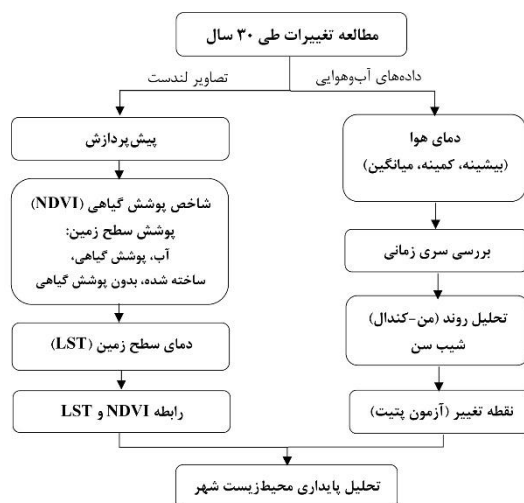
پایداری این فضاها و اثر آنها بر پایداری شهر برای دستیابی به پایداری محیط‌زیستی، در کنار دیگر اجزای زندگی و توسعه پایدار (توسعه اقتصادی و اجتماعی)، سنجیده شود. در پژوهش حاضر تغییرات دمای هوا، دمای سطح زمین و پوشش/کاربری زمین طی دوره زمانی ۳۰ ساله از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۷ برای بررسی پایداری محیط‌زیست شهر مطالعه می‌شود.

منطقه مورد مطالعه

برای مطالعه آب‌وهوای شهر تهران در دوره ۳۰ سال اخیر، از داده‌های ایستگاه مهرآباد با ارتفاع ۱۱۹۱ متر از سطح دریا، واقع در ۴۱' ۳۵° شمالی و ۱۹'



شکل ۱: موقعیت شهر تهران، مناطق و ایستگاه‌های سینوپتیک مهرآباد و شمیران



شکل ۲: فلوچارت مراحل انجام مطالعه پایداری محیط‌زیست شهر

مواد و روش‌ها

برای دستیابی به تغییرات دمای شهر و تغییرات دمای سطح زمین از داده‌های آب‌وهوایی و تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد. شکل ۲ خلاصه‌ای از مراحل طی شده برای ارزیابی پایداری محیط‌زیست شهر را نشان می‌دهد.

الف) بررسی سری‌های زمانی دما: داده‌های روزانه دمای هوای ایستگاه‌های مهرآباد و شمیران از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۷ میلادی از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. برای تحلیل دمای ماهانه و سالانه از آزمون‌های آماری اندرسون-دارلینگ^۲، من-کندال^۴، شیب سن^۵ و پتیت^۶ و ترسیم نمودارهای سری‌زمانی ماهانه و سالانه دما، با مؤلفه روند استفاده شد. تغییرات بیشنیه، کمینه و میانگین دمای هوا با برنامه‌نویسی در محیط RStudio بررسی شد. برای انجام آزمون نکویی برازش اندرسون-دارلینگ، برای تشخیص نرمال بودن داده‌ها، داده‌ها به صورت صعودی مرتب می‌شوند، Z_i به عنوان تابعی از X محاسبه می‌شود و آماره آزمون به صورت رابطه ۱ به دست می‌آید (Stephens, 1974):

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) [\ln(Z_i) + \ln(1 - Z_{n-i+1})]$$

رابطه (۱)
آزمون ناپارامتری من-کندال، با اندازه‌گیری بزرگی ارتباط بین نقاط داده‌های متوالی، برای بررسی معنی‌دار بودن روند سری زمانی به کار می‌رود (Mann, 1945; Kendall, 1976). این آزمون امکان پردازش داده‌های حدی و به کارگیری آن برای انواع سری‌های زمانی است که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند (قدوسی و همکاران، ۱۳۹۲). با فرض سری زمانی t_1, t_2, \dots, t_n که با سری داده X_1, X_2, \dots, X_n متناظرند، میزان آماری S آزمون من-کندال عبارتست از (Yeh et al, 2015):

رابطه (۲)

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j), \quad \text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1, & x_i - x_j > 0 \\ 0, & x_i - x_j = 0 \\ -1, & x_i - x_j < 0 \end{cases}$$

زمانی که $n \geq 10$ ، میزان آماری S من-کندال مشابه با توزیع نرمال با میانگین صفر است. واریانس عبارتست از:

رابطه (۳)

$$\text{Var}(S) = (n(n-1)(2n+5))/18$$

ضریب همبستگی رتبه‌ای کندال (τ) نیز به صورت S/D بیان می‌شود، به طوری که $D = n(n-1)/2$. بیشترین مقدار ممکن برای S است (Kendall, 1976).

با برآورد شیب سن، محاسبه شیب (روند خطی تغییر) و عرض از مبدأ امکان‌پذیر است. ابتدا شیب‌های خطی از رابطه ۴ به دست می‌آیند (Sen, 1968):

رابطه (۴)

$$d_{-k} = (X_{-j} - X_{-i}) / (j - i)$$

برای $i \geq 1, j \geq i+1, n \geq j$ ، d شیب، X متغیر، n تعداد داده‌ها و i و j اندیس‌اند. سپس شیب سن (b) به عنوان میانه تمام شیب‌ها (d_k) محاسبه می‌شود و عرض از مبدأ برای هر گام زمانی (t) به این صورت به دست می‌آید، به طوری که میانه تمام عرض از مبدأها است:

رابطه (۵)

$$a_t = X_t - b \times t$$

آزمون پتیت از انواع روش‌های ناپارامتری، با کمک روش آماری من-ویتنی^۷ برای شناسایی نقطه تغییر در متغیرهای مورد بررسی است (Pettitt, 1979). در این مطالعه از روش ارائه شده توسط یه و همکاران (Yeh et al, 2015)، روش من-ویتنی-پتیت، برای تعیین نقطه تغییر در سری زمانی به روش پتیت استفاده شده است. طبق تعریف، زمانی که نقطه تغییر X_n در سری اعداد $\{X_1, X_2, \dots, X_T\}$

می‌آید. میانگین متحرک (y_t) از رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

رابطه ۹)

$$y_t = \sum_{r=-q}^{+s} a_r x_{t+r}$$

که x_t مقدار مشاهداتی کمیت x در زمان t ، تعداد مشاهده پیش (q واحد) و پس (s واحد) از مشاهده کنونی، و a_t مجموعه‌ای از وزن‌ها با مجموع برابر با ۱ است (Dadson, 2017).

ب) بررسی تغییرات سطح زمین: برای بررسی تغییرات کاربری و پوشش زمین و دمای سطح زمین در طی دوره مطالعاتی ۳۰ ساله از دو تصویر لندست روزانه در ماه مرداد استفاده شد: تصاویر ۱۸ اوت ۱۹۸۸ (سنجنده TM) و ۲۵ ژوئیه ۲۰۱۷ (سنجنده OLI TIRS). با دریافت تصاویر و پیش‌پردازش شامل تصحیح اتمسفری به روش DOS1^{۱۰} (Chavez, 1996)، تبدیل باندهای مرئی به بازتاب و باندهای حرارتی به رادیانس، تصاویر برای طبقه‌بندی و تحلیل آماده شد. مراحل مرتبط با سنجش از دور در محیط QGIS و کاربرد افزونه SCP^{۱۱} انجام شده است.

طبقه‌بندی اراضی

طبقه‌بندی نظارت شده کاربری و پوشش اراضی در چهار طبقه آب، پوشش گیاهی، اراضی ساخته شده و اراضی بدون پوشش گیاهی انجام شده است. با استفاده از تصاویر با ترکیب رنگی کاذب، شاخص پوشش گیاهی و تعریف مناطق نمونه نشانگر طیفی ویژه هر طبقه در چند زیرگروه (Congedo, 2016)، نقشه‌های طبقه‌بندی پوشش و کاربری سطح زمین تولید شد. برای بررسی پوشش گیاهی و فضای سبز نیز از آستانه‌گذاری شاخص NDVI استفاده شد (He et al, 2010):

رابطه ۱۰)

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red}$$

که NIR و Red به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر

وجود دارد، $F_1(X) = \{X_1, X_2, \dots, X_T\} \neq$ $F_2(X) = \{X_{n+1}, X_{n+2}, \dots, X_T\}$ به عبارت دیگر، نقطه تغییر به عنوان نقطه‌ای تعریف می‌شود که مقادیر میانگین در دو سمت آن بیشتر یا کمتر از دیگر نقاط داده باشند. وقتی نقطه تغییری در سری اعداد باشد، $|U_{t,n}|$ کاهش می‌یابد و نقاط تحول را ایجاد می‌کند. زمانی که سری اعداد چند نقطه تحول را نشان دهد، ممکن است تعداد نقاط تغییر به‌طور بالقوه بیش از یک عدد باشد. رابطه نقطه تغییر عبارتست از:

رابطه ۶)

$$\text{Sign}(X_i - X_j) = \begin{cases} +1 & X_i - X_j > 0 \\ 0 & X_i - X_j = 0 \\ -1 & X_i - X_j < 0 \end{cases}, U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{Sign}(X_i - X_j)$$

رابطه ۷)

$$K_n = \text{Max}|U_{t,n}|, 1 \leq t < n$$

برای تعیین اینکه آیا نقاط تغییر وجود دارند، از K_n در رابطه بالا استفاده می‌شود که مقدار حدی $|U_{t,n}|$ است.

برای برآورد مؤلفه روند سری زمانی فصلی، از مدل جمعی^۸ و هموارسازی^۹ با میانگین متحرک استفاده می‌شود. مدل جمعی به کار رفته عبارتست از (Kendall et al, 1983):

رابطه ۸)

$$Y[t] = T[t] + S[t] + e[t]$$

که Y نشان دهنده سری زمانی با دوره کامل در واحد زمانی t ، T مؤلفه روند، S مؤلفه فصلی و e مؤلفه تصادفی (خطا) است. ابتدا مؤلفه روند به روش میانگین متحرک با وزن‌های مساوی تعیین و از سری زمانی جدا می‌شود. سپس مؤلفه فصلی با میانگین‌گیری هر واحد زمانی در طول دوره محاسبه می‌شود. با حذف مؤلفه‌های روند و فصلی از سری زمانی اصلی، مؤلفه تصادفی به دست

باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز است.

دمای سطح زمین

برای محاسبه دمای سطح زمین از روش پیشنهادی سوبرینو و همکاران (Sobrino et al, 2004) و اودان و یواکنوسکا (Avdan and Jovanovska, 2016) استفاده شد. در این روش با کاربرد باند حرارتی (باند ۶ سنجنده TM و باند ۱۰ سنجنده TIRS)، محاسبه دمای روشنایی 12 (BT)، NDVI، نسبت پوشش گیاهی 13 (Pv) و گسیل مندی 14 (ϵ) بر مبنای متوسط گسیل مندی خاک و پوشش گیاهی، دمای سطح زمین (LST) برحسب درجه سانتی گراد به دست می آید:

رابطه (۱۱)

$$BT = \frac{K_2}{\ln(1 + \frac{K_1}{L_\lambda})} - 273.15$$

رابطه (۱۲)

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2$$

رابطه (۱۳)

$$\epsilon = 0.004Pv + 0.986$$

رابطه (۱۴)

$$LST = \frac{BT}{1 + (\lambda BT / \rho) \ln(\epsilon)}, \rho = \frac{hc}{k}$$

که K_1 برحسب $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ و K_2 برحسب کلونین ضرایب ثابت سنجنده (در فایل متادیتای تصویر)، L_λ رادیانس طیفی بر حسب $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ و BT برحسب درجه سانتی گراد، λ طول موج متوسط باند حرارتی (μm)، k ثابت بولتزمن، h ثابت پلانک، c سرعت نور و ρ برابر با 0.1438 mK است.

پ) پایاداری محیطزیست: برای بررسی پایاداری محیطزیست شهر، تغییرات دما، نقشه‌های پوشش

گیاهی و دمای سطح زمین، که در مراحل پیش اشاره شد، مورد تحلیل قرار گرفت. برای مقایسه و تحلیل روند طی شده بین سال‌های ۱۹۸۸ و ۲۰۱۷ از وسعت پوشش گیاهی و لکه‌های فضای سبز به‌عنوان شاخصی از پایاداری محیطزیست شهر (رضویان و همکاران، ۱۳۹۵؛ Benton-Short et al, 2017)، و برای بررسی اثر پوشش گیاهی بر دمای سطح زمین از تفاوت دمای سطح زمین در طبقات مختلف پوشش/کاربری زمین استفاده شد.

نتایج و بحث

الف) دمای هوا از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۷: نتایج آزمون اندرسون- دارلینگ برای سری‌های زمانی ماهانه و سالانه دمای میانگین، بیشینه و کمینه نشان دهنده عدم توزیع نرمال داده‌ها است. از این‌رو برای شناسایی وجود روند از آزمون‌های من-کندال، من-کندال فصلی، شیب خط سن و پتیت استفاده شد. در سری زمانی ماهانه و سالانه دما (میانگین، بیشینه و کمینه) وجود روند معنی‌دار با p-value کمتر از ۰/۰۵ تأیید شد. جدول ۱ نتایج آزمون من-کندال، شیب سن و نقطه تغییر به دست آمده از روش پتیت را برای سری زمانی سالانه دما نشان می‌دهد. تغییرات دما پیش و پس از نقطه تغییر نشان دهنده افزایش دمای کمینه تا $0.8^\circ C$ و $1^\circ C$ و دمای بیشینه به میزان $1.5^\circ C$ و $1^\circ C$ به ترتیب برای ایستگاه‌های شمیران و مهرآباد است. نمودار مؤلفه روند سری زمانی دمای بیشینه و کمینه در شکل ۳ نشان داده شده است.

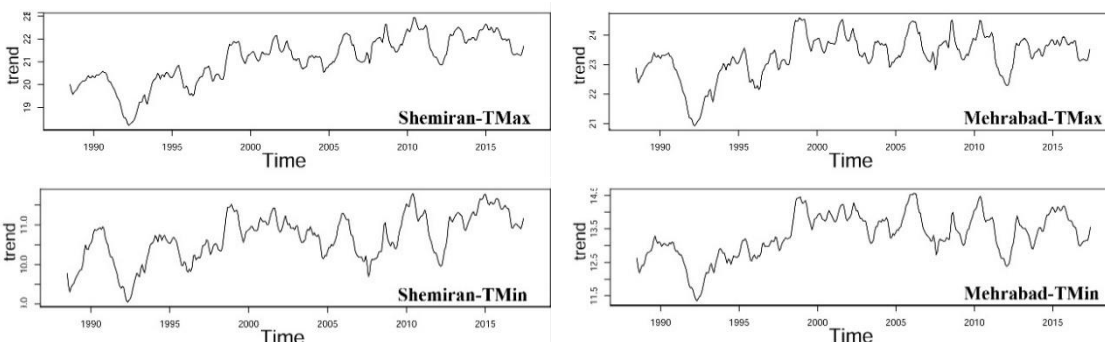
جدول ۱: شاخص τ آزمون من-کندال، شیب سن و نقطه تغییر به دست آمده از روش پتیت برای سری‌های سالانه دما

متغیر/ پارامتر	ایستگاه	τ من-کندال	شیب سن	نقطه تغییر پتیت (سال)	میانگین پیش از تغییر ($^\circ C$)	میانگین پس از تغییر ($^\circ C$)
دمای میانگین	شمیران	۰/۵۶۸	۰/۰۵۹	۱۹۹۸	۱۴/۸	۱۶/۰
میانگین بیشینه	شمیران	۰/۶۸۳	۰/۰۸۲	۲۰۰۱	۲۰/۲	۲۱/۷

۱۰/۹	۱۰/۱	۱۹۹۸	۰/۰۴۲	۰/۴۲۵	شمیران	میانگین کمینه
۱۸/۵	۱۷/۵	۱۹۹۸	۰/۰۳۷	۰/۳۶۱	مهرآباد	دمای میانگین
۲۳/۶	۲۲/۶	۱۹۹۸	۰/۰۲۹	۰/۲۹۲	مهرآباد	میانگین بیشینه
۱۳/۶	۱۲/۶	۱۹۹۸	۰/۰۳۲	۰/۳۸۴	مهرآباد	میانگین کمینه

انتهایی سده گذشته اشاره دارد، هم‌راستا با مطالعات حجازی‌زاده و پروین (۱۳۸۸) و علیزاده چوبری و نجفی (۱۳۹۶) است. ب) تغییرات سطح زمین: شکل ۴ مقایسه کاربری و پوشش زمین و گستره فضای سبز را در فاصله ۳۰ سال نشان می‌دهد. توسعه افقی شهر و گسترش ساختمان‌ها، معابر و سطوح ساخته شده در نیمه غربی تهران، و کاهش وسعت لکه‌های سبز، به‌ویژه اراضی زراعی و باغ‌ها، در مناطق جنوب‌غربی، غرب و شمال تهران قابل توجه است.

میانگین دمای ایستگاه‌های مهرآباد و شمیران بین سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۱۷ به ترتیب 1°C و $1/3^{\circ}\text{C}$ بیش از میانگین دما بین سال‌های ۱۹۸۸-۹۷ بوده است. اگرچه دماهای بیشینه و کمینه هر دو ایستگاه مورد مطالعه افزایش یافته‌اند، افزایش دمای بیشینه در ایستگاه شمیران بیش از مهرآباد و افزایش دمای کمینه مهرآباد بیش از شمیران است. نتایج به‌دست آمده از بررسی دمای هوای ایستگاه مهرآباد از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۷، که به وجود روند افزایشی دمای بیشینه و کمینه به‌ویژه از دهه



شکل ۳: مؤلفه روند سری‌های زمانی دمای ماهانه ایستگاه مهرآباد (راست) و ایستگاه شمیران (چپ) در دوره ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۷، از بالا به ترتیب دمای بیشینه و دمای کمینه

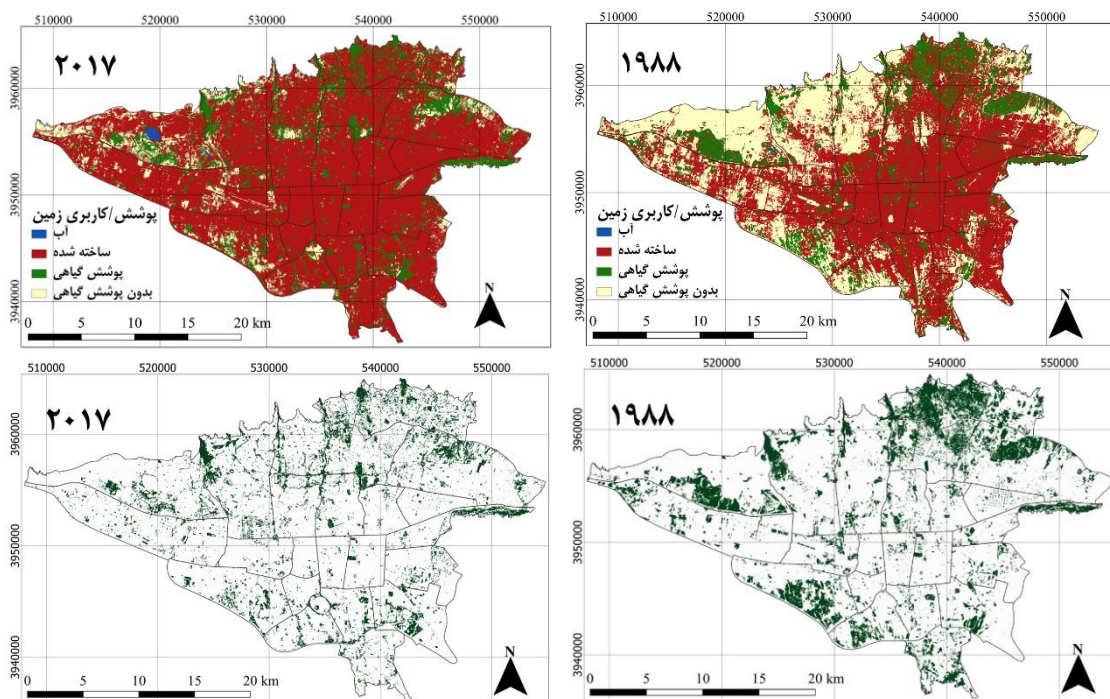
در مناطق جنوبی و غربی شهر همراه است، مناطقی که با کاهش قابل توجه لکه‌های سبز همراه بوده‌اند. کمینه دمای سطح زمین بیش از 5°C بین سال‌های ۱۹۸۸ و ۲۰۱۷ افزایش یافته است. افزایش دمای سطحی در تمام طبقات پوشش/کاربری مشاهده می‌شود و بیشترین تغییر دما ($4/8^{\circ}\text{C}$) طی ۳۰ سال مربوط به پوشش گیاهی است. افزایش قابل توجه دمای سطح زمین محاسبه شده برای سال ۲۰۱۷ (میانگین $38/7^{\circ}\text{C}$) نسبت به سال ۱۹۸۸

جدول ۲ میزان وسعت لکه‌های سبز نسبت به مساحت شهر و بیشینه و کمینه دمای سطح زمین را طی دوره مطالعاتی نشان می‌دهد که بیانگر افزایش $5/3^{\circ}\text{C}$ آستانه کمینه دمای سطحی محاسبه شده در تابستان سال ۲۰۱۷ نسبت به ۱۹۸۸ است. شکل ۵ نیز دمای زمین به‌دست آمده برای سال‌های ۱۹۸۸ و ۲۰۱۷ را نشان می‌دهد. افزایش دمای سطح زمین در سال ۲۰۱۷ نسبت به ۱۹۸۸ با گسترش دماهای بالا (نواحی قرمز پررنگ)

همکاران (Fathi et al, 2019) در مطالعه جزایر گرمایی شهرهای خشک در مراکش و اثر تبخیر و تعرق پوشش گیاهی داخل شهر بر کاهش دمای سطح زمین است.

پ) پایداری محیطزیست شهر: دمای کمینه و بیشینه ثبت شده در نیمه شمالی در ایستگاه شمیران (در پهنه مرتفع شهر) و مهرآباد در نیمه جنوبی (در بخش نیمه خشک و کم ارتفاع شهر) طی ۳۰ سال گذشته نشانگر روند افزایشی بوده است و افزایش دمای میانگین و بیشینه در ایستگاه شمیران، بیش از ایستگاه مهرآباد است.

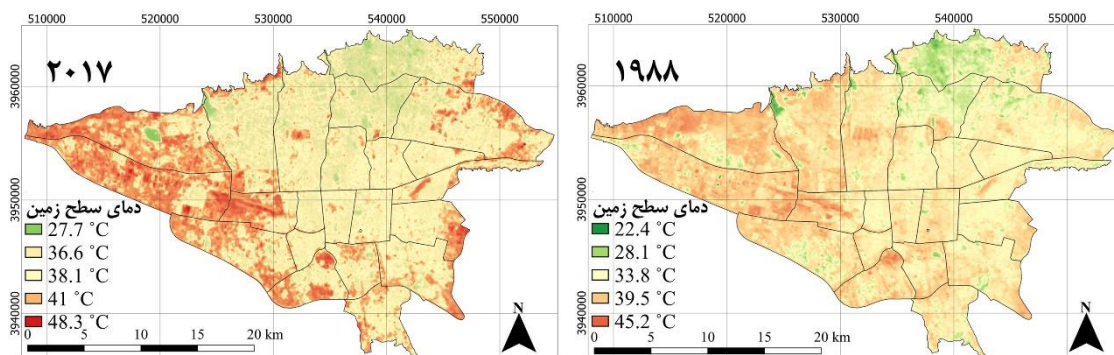
(میانگین $36/1^{\circ}\text{C}$)، همسو با مطالعات طبیعی و همکاران (Tayyebi et al, 2018) با محاسبه دمای سطح زمین تا سال ۲۰۱۱، و مقبل و شمسی پور (Moghbel and Shamsipour, 2019) با محاسبه دمای سطح تا سال ۲۰۱۳ است. با مقایسه دمای سطحی سالهای ۱۹۸۸ و ۲۰۱۷ مشاهده می شود اگرچه ساخت و ساز همراه با ایجاد فضای سبز در سطوح بدون پوشش گیاهی باعث کاهش دمای سطح زمین شده، ساخت و ساز همراه با تخریب پوشش گیاهی به افزایش دمای سطح زمین انجامیده است. این امر مشابه با نتیجه فتحی و



شکل ۴: مقایسه طبقات پوشش زمین (بالا) و فضای سبز تهران (پایین) در سالهای ۱۹۸۸ و ۲۰۱۷

جدول ۲: نسبت فضای سبز به مساحت شهر (درصد) و دمای سطح زمین ($^{\circ}\text{C}$) در دوره ۱۹۸۸-۲۰۱۷

سال	فضای سبز	کمینه دمای سطح زمین	بیشینه دمای سطح زمین	میانگین دمای سطح زمین
۱۹۸۸	۱۸/۷	۲۲/۴	۴۵/۲	۳۶/۱
۲۰۱۷	۱۱/۹	۲۷/۷	۴۸/۴	۳۸/۷



شکل ۵: مقایسه نقشه دمای سطح زمین در سال‌های ۱۹۸۸ و ۲۰۱۷

بدون پوشش گیاهی کمتر است. ارتباط دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی نیز نشان دهنده یکی از خدمات مهم اکوسیستمی فضای سبز، تنظیم آب‌وهوا و خنک‌کنندگی است (Shiflett et al, 2017; Marando et al, 2019)، که بسته به گونه فضای سبز دارای عملکرد متفاوت است. با خردشدن و کاهش وسعت فضای سبز تهران طی سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۷، که در مناطق شهر به میزان متفاوتی رخ داده است، یکی از عوامل اصلی خنک‌کننده و مؤثر بر دمای هوا و دمای سطح زمین تضعیف شده است. ساخت‌وساز بی‌رویه و رشد افقی شهری بتنی، کاهش وسعت و خردشدگی فضای سبز طی سال‌های مورد مطالعه نشان دهنده ناپایداری فضای سبز به عنوان بخش مهمی از کاربری زمین شهر است. فضای سبز که بخشی از زیرساخت محیط‌زیست محسوب می‌شود، نقش مهمی در حفظ کیفیت و پایداری محیط‌زیستی شهر (رضویان و همکاران، ۱۳۹۵)، تعدیل جزیره گرمایی، ترسیب گازهای گلخانه‌ای، سایه‌اندازی، مدیریت رواناب حاصل از باران و تصفیه آب (Benton-Short et al, 2017) ایفا می‌کند.

با توجه به نقشه دمای سطح زمین در سال ۲۰۱۷ (شکل ۵)، بخش‌هایی از مناطق نیمه شمالی شهر دمای کمتری نسبت به مناطق جنوبی و غربی دارند. دو منطقه غربی شهر (۲۱ و ۲۲) که نسبت به مناطق دیگر طی این سه دهه توسعه قابل توجهی را تجربه کرده‌اند و مناطق جنوب‌غربی شهر، با سطوح ساخته شده و خاک بدون پوشش گیاهی بیشترین دمای سطح زمین را به خود اختصاص داده‌اند. بیشینه دمای محاسبه شده برای سال ۲۰۱۷ نیز $3/2^{\circ}\text{C}$ نسبت به سال ۱۹۸۸ افزایش یافته است. اگرچه در برخی مناطق شمالی تهران، پوشش گیاهی ایجاد شده در امتداد معابر در سال ۲۰۱۷ با دمای نسبی پایین‌تر همراه است، میانگین دمای سطحی پوشش گیاهی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از سال ۱۹۸۸ است. به‌طور کلی، پایین‌ترین دماهای مشاهده شده در هر دو تصویر در پوشش سطحی آب و فضای سبز قرار دارند (جدول ۳)، به‌طوری که میانگین دمای سطح زمین با پوشش گیاهی در سال‌های ۱۹۸۸ و ۲۰۱۷ به ترتیب $3/6^{\circ}\text{C}$ و $1/9^{\circ}\text{C}$ نسبت به پوشش/کاربری ساخته شده و $5/8^{\circ}\text{C}$ و $5/2^{\circ}\text{C}$ نسبت به زمین‌های

جدول ۳: میانگین دمای طبقات مختلف پوشش/کاربری زمین در دوره ۱۹۸۸-۲۰۱۷ ($^{\circ}\text{C}$)

سال	آب	پوشش گیاهی	ساخته شده	بدون پوشش گیاهی
۱۹۸۸	۲۸/۴	۳۲/۰	۳۵/۶	۳۷/۸
۲۰۱۷	۲۹/۴	۳۶/۸	۳۸/۷	۴۲/۰

پژوهش حاضر در دو بخش، با مطالعه سری زمانی ماهانه و سالانه دمای ایستگاه‌های مهرآباد و شمیران، و تغییرات پوشش و دمای سطح زمین به بررسی پایداری محیط‌زیست تهران پرداخت. نتایج مطالعه دمای هوای هر دو ایستگاه، نشان دهنده روند معنی‌دار افزایشی دمای بیشینه و کمینه است. با انجام آزمون پتیت نقاط تغییر در سری زمانی دما در پایان دهه ۱۹۹۰ و ابتدای دهه ۲۰۰۰ میلادی مشاهده شد به طوری که کمینه دمای مهرآباد و شمیران به ترتیب از $12/6^{\circ}\text{C}$ و $10/1^{\circ}\text{C}$ بین سال‌های ۹۷-۱۹۸۸ به $13/6^{\circ}\text{C}$ و $10/9^{\circ}\text{C}$ بین سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۹۸ تغییر کرد. دمای بیشینه مهرآباد نیز از $22/6^{\circ}\text{C}$ بین سال‌های ۹۷-۱۹۸۸ به $23/6^{\circ}\text{C}$ بین سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۹۵ و دمای بیشینه شمیران از $20/2^{\circ}\text{C}$ بین سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۸۸ به $21/7^{\circ}\text{C}$ بین سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۹۵ رسید. افزایش دمای کمینه در ایستگاه مهرآباد (1°C) بیش از شمیران ($0/8^{\circ}\text{C}$) مشاهده می‌شود، درحالی‌که افزایش دمای بیشینه شمیران ($1/5^{\circ}\text{C}$) بیش از دمای بیشینه مهرآباد (1°C) است. طی ۳۰ سال دوره مطالعاتی، با توسعه سریع و رشد ساخت‌وساز، وسعت پوشش گیاهی در سطح شهر ۶/۸ درصد کاهش یافت. ناپایداری فضای سبز به عنوان بخش مهمی از محیط‌زیست شهر با افزایش سطوح انسان‌ساخت، افزایش میانگین دمای سطح زمین تا $2/6^{\circ}\text{C}$ و افزایش دمای بیشینه سطحی به $48/4^{\circ}\text{C}$ همراه بود.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با سنجش تغییرات دمای هوا، دمای سطح زمین و پوشش/کاربری زمین از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۷ به بررسی پایداری محیط‌زیست شهر تهران پرداخته است. با توجه به یافته‌های این پژوهش، هوای تهران طی ۳۰ سال گذشته با روندی

معنی‌دار گرم‌تر شده است. تغییرات پوشش و کاربری زمین و دمای سطحی نیز در این دوره گذشته قابل ملاحظه است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد توسعه و ساخت‌وساز در شهر به قیمت کاهش وسعت پوشش گیاهی و افزایش دمای سطح زمین، به‌ویژه دمای سطوح پوشش گیاهی، رخ داده است. علیرغم اینکه اطمینان از سرسبزی، ایمنی در برابر مخاطرات، کیفیت زندگی، رونق و پایداری شهری به عنوان بخشی از چشم‌انداز توسعه بلندمدت شهر تهران در نظر گرفته شده است (شهرداری تهران، ۱۳۸۶)، مسیر طی شده در سه دهه اخیر که با افزایش دمای هوا و دمای سطح زمین نیز همراه بوده است، نشان دهنده عدم پایداری محیط‌زیست شهر تهران است. با توجه به نتایج این پژوهش، به‌کارگیری راهکارهایی در راستای رویکردهای طبیعت‌محور و سازگار با آب‌وهوای شهر و محدودیت‌های موجود، می‌تواند به سازگاری با پیامدهای افزایش دما و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند. گفتنی است گونه‌های گیاهی سایه‌انداز بر مهار گرمایش در مناطق گرم و خشک مؤثرند (Hedquist and Brazel, 2014; Wang et al, 2015) و لازم است گونه‌های گیاهی با توجه به شرایط آب‌وهوایی و هدف از توسعه فضای سبز انتخاب شوند. برخی راهکارهای پیشنهادی برای دستیابی به هدف مهار گرمایش عبارتند از:

- جلوگیری از ساخت‌وسازهای بی‌رویه شهر
- اجرای دستورالعمل‌های طرح‌های جامع و تفصیلی و طرح پهنه‌بندی شهر تهران و رعایت پهنه G (فضای سبز)
- پایش شبکه فضای سبز شهر
- حفظ پوشش گیاهی موجود و انتخاب گونه‌های گیاهی متناسب با محیط تهران در رابطه با نیازها و محدودیت‌های تهران

توسعه شهر.

- ایجاد بام‌ها و نماهای سبز

- ایجاد کمربند سبز تهران برای محدود کردن

پانوش

1-Intergovernmental Panel on Climate Change
 2-Normalized Difference Vegetation Index
 3-Anderson-Darling test
 4-Mann-Kendall test
 5-Sen's slope
 6-Pettitt's test
 7-Mann-Whitney

8-Additive model
 9-Smoothing
 10-Dark Object Subtraction
 11-Semi-Automatic Classification Plugin
 12-Brightness temperature
 13-Proportion of vegetation
 14-Emissivity

منابع

-علیزاده چوبری، ا. و نجفی، م.، ۱۳۹۶. روند تغییرات دمای هوا و بارش در مناطق مختلف ایران، فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۳، شماره ۳، ص ۵۶۹-۵۸۴.

-قدوسی، م.، مرید، س. و دلاور، م.، ۱۳۹۲. مقایسه روش‌های روندزدایی در سری‌های زمانی دما و بارش، نشریه هواشناسی کشاورزی، جلد ۱، شماره ۲، ص ۳۲-۴۵.

-یزدان‌پناه، م.، یآوری، ا.، زبردست، ل. و آل‌محمد، س.، ۱۳۹۴. ارزیابی زیرساخت‌های سبز شهری به منظور اصلاح تدریجی آن‌ها در سیمای سرزمین تهران، محیط‌شناسی، دوره ۴۱، شماره ۳، ص ۶۲۵-۶۱۳.

-حجازی زاده، ز. و پروین، ن.، ۱۳۸۸. بررسی تغییرات دما و بارش تهران طی نیم قرن اخیر، جغرافیا و برنامه ریزی منطقه‌ای، پیش شماره پاییز و زمستان ۱۳۸۸، ص ۴۳-۵۶.

-خالدی، ش. و کرمی، ف.، ۱۳۹۵. شهرها و تغییر آب‌وهوا، قطب توسعه پایدار، تهران، ۱۲۰ ص.
 -خالدی، ش.، متولی، ص. و خالدی، ش.، ۱۳۹۶. میکروکلیماتولوژی، شهریار خالدی، تهران، ۲۱۰ ص.

-رضویان، م.، کانونی، ر. و یارمادی، ک.، ۱۳۹۵. محیط زیست شهری، نشر علم، تهران، ۳۷۷ ص.
 -شهرداری تهران، ۱۳۸۶. سند اصلی طرح راهبردی - ساختاری توسعه و عمران شهر تهران (طرح جامع تهران)، مصوبه شورای عالی شهرسازی و معماری ایران، شهرداری تهران، تهران، ۶۴ ص.

-Atiqul Haq, S.M., 2011. Urban Green Spaces and an Integrative Approach to Sustainable Environment: Journal of Environmental Protection, v. 2, p. 601-608.

-Avdan, U. and Jovanovska, G., 2016. Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using

LANDSAT 8 Satellite Data: Journal of Sensors, v. 2016, ID 1480307, p. 1-8.

-Benton-Short, L., Keeleya, M. and Rowland, J., 2017. Green infrastructure, green space, and sustainable urbanism: geography's important role: Urban Geography, v. 38, p. 1-22. <https://doi.org/10.1080/02723638.2017.1360105>

- Chavez, P.S.J., 1996. Image-based atmospheric corrections- revisited and revised: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 62(9), p. 1025-1036.
- Congedo, L., 2016. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation-Release 5.3.2.1. doi: 10.13140/RG.2.2.29474.02242/1
- Dadson, S.J., 2017. Statistical Analysis of Geographical Data: An Introduction. 1st Edition: John Wiley and Sons, Chichester, 264 p.
- Fathi, N., Bounoua, L. and Messouli, M., 2019. A Satellite Assessment of the Urban Heat Island in Morocco: Canadian Journal of Remote Sensing. doi: 10.1080/07038992.2019.1601007
- He, C., Shi, P., Xie, D. and Zhao, Y., 2010. Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach: Remote Sensing Letters, v. 1(4), p. 213-221.
- Hedquist, B.C. and Brazel, A.J., 2014. Seasonal variability of temperatures and outdoor human comfort in Phoenix, Arizona, U.S.A.: Building and Environment, v. 72, p. 377-388.
- IPCC, 2018. Special Report: Global Warming of 1.5°C- Summary for policymakers, World Meteorological Organization, Geneva, 32 p.
- Kendall, M.G., 1976. Rank Correlation Methods. 4th Edition: Charles Griffin, London, 202 p.
- Kendall, M., Stuart, A. and Ord, J.K., 1983. The Advanced Theory of Statistics, Vol.3. Design and Analysis, and Time Series. 4th Edition: Charles Griffin, High Wycombe, 780 p.
- Mann, H.B., 1945. Non-parametric test against trend: Econometrica, v. 13, p. 245-259.
- Marando, F., Salvatori, E., Sebastiani, A., Fusaro, L. and Manes, F., 2019. Regulating Ecosystem Services and Green Infrastructure: assessment of Urban Heat Island effect mitigation in the municipality of Rome, Italy: Ecological Modelling, v. 392, p. 92-102.
- Martos, A., Pacheco-Torres, R., Ordóñez, J. and Jadraque-Gago, E., 2016. Towards successful environmental performance of sustainable cities: Intervening sectors. A review: Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 57, p. 479-495.
- Mirzaei, P.A., 2015. Recent challenges in modeling of urban heat island: Sustainable Cities and Society, v. 19, p. 200-206.
- Moghbel, M. and Shamsipour, A.A., 2019. Spatiotemporal characteristics of urban land surface temperature and UHI formation: a case study of Tehran, Iran: Theoretical and Applied Climatology, p. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2735-7>
- Pettitt, A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem: Journal of the Royal Statistical Society, Applied Statistics, v. 28(2), p. 126-135.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Romeo-Lankao, P., Shagun, M., Dhakal, S. and Ali Ibrahim, S., 2018. Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 811 p.
- Sen, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau: Journal of the American Statistical Association, v. 63(324), p. 1379-1389.
- Shiflett, S.H., Liang, L.L., Crum, S.M., Feyisa, G.L., Wang, J. and Jenerette, G.D., 2017. Variation in the urban vegetation, surface temperature, air temperature nexus: Science of the Total Environment, v. 579, p. 495-505.
- Sobrino, J.A., Jimenez-Munoz, J.C. and Paolini, L., 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT

- TM 5: Remote Sensing of Environment, v. 90, p. 434-440.
- Solecki, W., Seto, K.C., Balk, D., Bigio, A., Boone, C.G., Creutzig, F., Fragkias, M., Lwasa, S., Marcotullio, P., Romero-Lankao, P. and Zwickel, T., 2015. A conceptual framework for an urban areas typology to integrate climate change mitigation and adaptation: *Urban Climate*, v. 14, p. 116-137.
- Stephens, M.A., 1974. EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons: *Journal of American Statistical Association*, v. 69(347), p. 730-737.
- Tayyebi, A., Shafizadeh-Moghadamb, H. and Tayyebi, A.H., 2018. Analyzing long-term spatio-temporal patterns of land surface temperature in response to rapid urbanization in the mega-city of Tehran: *Land Use Policy*, v. 71, p. 459-469.
- Wang, Y., Bakker, F., de Groot, R., Wortche, H. and Leemans, R., 2015. Effects of urban trees on local outdoor microclimate: synthesizing field measurements by numerical modelling: *Urban Ecosystems*, v. 18, p. 1305-1331.
- Wang, S., Ma, Q., Ding, H. and Liang, H., 2018. Detection of urban expansion and land surface temperature change using multi-temporal Landsat images: *Resources, Conservation and Recycling*, v. 128, p. 526-534.
- World Economic Forum, 2019. *The Global Risks Report 2019- 14th Edition*. The World Economic Forum, Geneva, 107 p.
- Yeh, C., Wang, J., Yeh, H. and Lee, C., 2015. Spatial and Temporal Streamflow Trends in Northern Taiwan: *Water*, v. 7, p. 634-651.
- Zhou, D., Zhang, L., Hao, L., Sun, G., Liu, Y. and Zhu, C., 2016. Spatiotemporal trends of urban heat island effect along the urban development intensity gradient in China: *Science of the Total Environment*, v. 544, p. 617-626.