

Detection of the effect of climate change on the mechanism of heat islands in Tehran province

Mohammadi, N.¹  | Hejazizadeh, Z.²  | Zeaiean Firouzabadi, P.³  | Karbalaee, A.⁴ 

1. Ph.d student in Climatology, Department of Climatology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.
2. Professor Department of Climatology Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.
3. Associate Professor Department of Remote Sensing and GIS, at o, Kharazmi University, Tehran, Iran.
4. Assistant Professor Department of Climatology Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: hedjazizadeh@khu.ac.ir

(Received: 11 Feb 2024, Revised: 29 May 2024, Accepted: 12 Jun 2024, Published online: 12 Jun 2024)

Abstract

Global climate has had significant changes and consequences during the last century with the development of urbanization. So the combination of urbanization development and climate change has caused cities globally to become hotter and more dangerous places. Iran is a country that has become extremely vulnerable to the effects of climate change, this vulnerability will probably become more severe in the future in industrial metropolises, including Tehran. Therefore, the aim of this research was to reveal the effect of climate change on the mechanism of thermal islands in Tehran province. In the first step, the data of the common daily period of the synoptic stations (Mehrabad, Shemiran, Abali, Firouzkoh, Chitgar, and Geophysics) of Tehran province in the period (1996-2020) were obtained from the Meteorological Organization. In this research, the Mann-Kendall test was used to examine the trend of temperature and precipitation, and the LARS-WG7 model was used to predict temperature and precipitation, in order to identify the changes in the temperature of the earth's surface in the time period (2000-2023) from the data of satellite images. Modis was used in Google Earth Engine. Examining the trend of the temperature time series with Mann-Kendall test of all stations showed an increasing trend, in the exam of the rainfall time series of the stations (Abali, Shemiran and Mehrabad) in the months of October and November, it was accompanied by sudden changes and jumps, which due to the increase in extreme events It is justifiable. in the HadGEM3 model according to the SSP5 scenario; The temperature forecast of Mehrabad station during the period (2060 to 2021) has shown the highest temperature compared to the base period in July with a 5% increase; And the most rainy period is projected to early autumn and winter in the period (2021-2060). According to the analysis with MODIS satellite images, the night temperature changes in the northern areas of Tehran were an increasing trend. Examining the changes in the average night temperature, except for the northern and northeastern areas of Tehran, other areas showed an increase in temperature due to high density and expansion of urbanization. So, this increase in average temperature is shown more in the west of Tehran than in the central and eastern areas of Tehran. that the heat island effect is more in these areas. Tehran has faced climate change caused by global warming. Considering Tehran's new climate, it is necessary to develop a national climate change action plan to reduce emissions, pay attention to the future urban temperature, and adapt to global warming.

Keywords: Climate change, Heat island, Scenario, MODIS, Mann-Kendall, LARS Model

Cite this article: Mohammadi, N., Hejazizadeh, Z., Zeaiean Firouzabadi, P., & Karbalaee, A. (2024). Detection of the effect of climate change on the mechanism of heat islands in Tehran province. *Journal of the Nivar*, 48(124-125), 203-224. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.442784.1281>

E-mail: (1) lotusclimatology@gmail.com (3) zeaiean@khu.ac.ir (4) karbalaee20@gmail.com



آشکارسازی تاثیر تغییر اقلیم بر مکانیزم جزایر حرارتی استان تهران

نیلوفر محمدی^۱ | زهرا حجازی زاده^۲ | پرویز ضیائیان فیروزآبادی^۳ | علیرضا کربلائی^۴

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
۲. استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
۳. دانشیار گروه آموزشی سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
۴. استادیار آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: hedjazizadeh@khu.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۳، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۳/۲۳)

چکیده

اقلیم جهانی طی قرن گذشته با توسعه شهرنشینی تغییرات و پیامدهای قابل توجهی داشته است. به طوری که ترکیب توسعه شهرنشینی و تغییر اقلیم، موجب شده است شهرهای سراسر جهان به مکان‌هایی گرم‌تر و خطرناک‌تر مستعد گردند. ایران کشوری است که به شدت در برابر اثرات تغییر اقلیم آسیب‌پذیر شده است، این آسیب‌پذیری احتمالاً در آینده در کلان‌شهرهای صنعتی از جمله تهران شدیدتر خواهد شد. بنابراین هدف این پژوهش، آشکارسازی تاثیر تغییر اقلیم بر مکانیزم جزایر حرارتی استان تهران بوده است. در گام نخست، داده‌های دوره مشترک روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک (مهرآباد، شمیران، آبدلی، فیروزکوه، چیتگر و ژئوفیزیک) استان تهران در بازه زمانی (۲۰۲۰-۱۹۹۶) از سازمان هواشناسی اخذ شد. در این پژوهش، جهت بررسی روند دما و بارش از آزمون Mann-Kendall و جهت پیش‌نمایی دما و بارش از مدل LARS-WG7 بهره گرفته شده است، به منظور شناسایی تغییرات دمای سطح زمین در بازه زمانی (۲۰۲۳-۲۰۰۰) از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای مودیس در گوگل ارث انجین استفاده شد. بررسی روند سری زمانی دما با آزمون من‌کنندال کلیه ایستگاه‌ها روند افزایشی بود، در بررسی روند سری زمانی بارش ایستگاه‌های (آبدلی، شمیران و مهرآباد) در ماه‌های اکتبر و نوامبر با تغییرات ناگهانی و جهش‌هایی همراه بود، که با توجه به افزایش رخدادهای حدی قابل توجه است. در مدل HadGEM3 طبق سناریو SSP5؛ پیش‌بینی دمای ایستگاه مهرآباد طی بازه زمانی (۲۰۶۰ تا ۲۰۲۱)، در ماه ژوئیه با ۵ درصد افزایش، بالاترین دما نسبت به دوره پایه را نشان داده است؛ و بیش‌ترین دوره بارشی به اوایل پاییز و زمستان در بازه زمانی (۲۰۶۰-۲۰۲۱) پیش‌نمایی شده است. طبق بررسی با تصاویر ماهواره‌ای مودیس تغییرات دمای شبانه در مناطق شمالی تهران روند افزایشی بود. بررسی تغییرات میانگین دمای شبانه به جز مناطق شمالی و شمال شرق تهران، سایر نواحی به دلیل تراکم بالا و گسترش شهرنشینی افزایش دما را نشان داد. به طوری که این افزایش میانگین دما، در غرب تهران نسبت به نواحی مرکزی و شرق تهران بیش‌تر نشان داده شده است، که اثر جزیره گرمایی در این نواحی بیش‌تر است. تهران با تغییر اقلیم ناشی از گرمایش جهانی مواجه شده است. با توجه به اقلیم جدید تهران، لزوم تدوین برنامه اقدام ملی تغییر اقلیم برای کاهش انتشار، توجه به دمای شهری آینده و سازگاری با گرمایش جهانی ضروری می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، جزیره حرارتی، سناریو، مودیس، من-کنندال، مدل لارس

۱. مقدمه

استناد: محمدی، نیلوفر؛ حجازی زاده، زهرا؛ ضیائیان فیروزآبادی، پرویز؛ و کربلائی، علیرضا. (۱۴۰۳). آشکارسازی تاثیر تغییر اقلیم بر مکانیزم جزایر حرارتی استان تهران.

مجله نیوار، ۴۸ (۱۲۴-۱۲۵)، ۲۰۳-۲۲۴. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.442784.1281>

رایانامه: (۱) lotusclimatology@gmail.com (۳) zeaiean@khu.ac.ir (۴) karbalaee20@gmail.com

ناشر: سازمان هواشناسی کشور.



DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.442784.1281>

چالش تغییر اقلیم در شهرها مواجه شده است (چمانه فر و همکاران، ۱۴۰۱، یرگین^۴، ۲۰۲۱). مناطق شهری بزرگ در مقایسه با مناطق روستایی در امان نبوده‌اند و دمای بالاتر، وارونگی حرارتی، افزایش دمای سطح زمین، آلودگی بیش‌تر و اثرات منفی بر سلامت بیش‌تری را تجربه می‌کنند (نجفیان‌گرگی و همکاران، ۱۳۹۶؛ عزیزی، ۱۳۸۳). امروزه ترکیب توسعه شهرنشینی و تغییر اقلیم، موجب شده است شهرهای سراسر جهان به مکان‌هایی گرم‌تر و خطرناک‌تر مستعد گردند. این امر به ویژه برای مناطق پرجمعیت (خاورمیانه، هند و شرق آفریقا) صادق است. چرا که شهرها عموماً ابری‌تر، گرم‌تر، مه‌دارتر و مرطوب‌تر از حومه و روستاهای اطراف هستند (عزیزی، ۱۳۸۳). به عبارتی دیگر جزایر حرارتی شهری^۵ مناطق شهری گرم‌تری نسبت به مناطق اطراف هستند. این مناطق می‌توانند تأثیر بسیاری بر تغییرات اقلیم داشته باشند (مک‌کارتی و همکاران^۶، ۲۰۱۰). بنابراین پدیده‌ای که در آن دمای برخی از مناطق شهری نسبت به حومه‌های اطراف یا محدوده‌های روستایی بالاتر است، به عنوان جزیره گرمایی شهری^۵ (UHI) شناخته می‌شود. طبق جدیدترین گزارش سازمان جهانی هواشناسی، بیش‌ترین افزایش دمای هوا بر روی منطقه آسیا رخ داده است (سازمان جهانی هواشناسی، ۲۰۲۴). بنابراین ایران از این قاعده مستثنی نبوده است. کشور ایران به شدت در برابر تأثیرات تغییرات اقلیم آسیب‌پذیر شده است و در منطقه‌ای واقع است که در حال حاضر اثرات تغییر اقلیم مانند سیل، خشکسالی و موج گرما را تجربه می‌کند که احتمالاً در آینده در کلان‌شهرهای صنعتی از جمله تهران شدیدتر خواهد شد (مرکز پژوهش‌های اتاق ایران، ۱۴۰۲). با توجه به خطر تبدیل شهرها به جزایر حرارتی تاکنون مطالعات گوناگونی در داخل و سطح بین‌الملل به دو روش (داده‌های مشاهداتی و ماهواره‌ای، الگوهای همدید جو) صورت گرفته است (نجفیان‌گرگی و

آب و هوای جهانی طی قرن گذشته تغییرات قابل توجهی را تجربه کرده است. به طوری که گرم شدن کره زمین به یک چالش بزرگ تبدیل گشته و نگرانی‌های بسیاری را برای جامعه علمی و مردم به‌وجود آورده است (لی و همکاران^۱، ۲۰۱۸). طی دهه‌های اخیر، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در آب و هوای جهانی تغییراتی را ایجاد کرده است؛ به طوری که با افزایش دما در الگوهای مکانی-زمانی بارش تغییراتی رخ داده است، این امر از نشانه‌های بارز تغییر اقلیم با مقیاس جهانی به‌ویژه در شهرها است که با افزایش رخدادهای حدی (خشکسالی و سیل) محسوس‌تر شده است. با توجه به گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۲ هرگونه افزایش دما، در آینده تمایل به ادامه انتشار گازهای گلخانه‌ای خواهد داشت. که این میزان افزایش انتشار و دما، نقش عمده‌ای در مرگ و میر انسان‌ها و سایر مخاطرات زیست محیطی دارد (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۷، ساچیندرا و همکاران^۳، ۲۰۱۶). به این معنا که، جو زمین مانند یک گلخانه عمل می‌کند، پرتوهای خورشیدی با طول موج کوتاه به راحتی می‌توانند از جو عبور کنند و به سطح زمین برسند. اما پرتوهای خورشیدی با طول موج بلند که از سطح زمین ساطع می‌شوند، نمی‌توانند به راحتی از جو عبور کنند و به فضا بازگردند. این امر باعث می‌شود که دمای جو افزایش یابد. به این پدیده، اثر گلخانه‌ای گفته می‌شود (فدایی، ۱۳۹۹). نخستین بار اثر گلخانه‌ای توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در سال ۱۹۰۰ اعلام شد و علت را ناشی از فعالیت‌های انسانی دانست. و بعد آن در گزارش‌های چهارم و پنجم تغییر اقلیم (۲۰۱۴ و ۲۰۰۷) بسیار قاطع‌تر انسان را مسئول این گرمایش دانسته است؛ طبق گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، تمامی سناریوهای تغییر اقلیم و مدل‌های گردش عمومی جو نشان می‌دهند که انتشار و غلظت گازهای گلخانه‌ای موجب افزایش دمای سطح کره زمین خواهد شد (بندار و همکاران، ۱۴۰۰)، به موجب این امر، امروزه جهان با

⁴ yergin

⁵ Urban heat island

⁶ McCarthy et al

¹ Li et al

² Intergovernmental Panel on Climate Change

³ Sachindra et al

پرفشار و سکون هوا، شدت جزیره گرمایی افزایش یافته اما در شرایط کم فشار شرایطی برعکس خواهد داشت. سلیقه (۱۳۹۴) در مطالعه شهر تهران نشان داده است که فعالیت‌های انسانی موجب ایجاد جزیره حرارتی شهری و اثرات ناشی از آن در تهران شده است. جزایر حرارتی موجب انتقال بادها از حومه به مرکز تهران شده است، که در نتیجه همراه خود آلودگی‌های جوی را در مرکز شهر به ارمغان می‌آورد. بنابراین تغییر میدان باد شهری یکی از اثرات جزیره حرارتی شهر تهران بوده است. ملکی و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای دریافتند که شهر ارومیه، در مرکز جزیره حرارتی با محدوده‌های مجاور خود تضاد دمایی بین ۴/۲ الی ۲۹/۴۱ درجه سانتی‌گراد وجود دارد. که با توجه به این که مرکز این شهر دارای حجم بالایی از جمعیت، ترافیک شهری و ساخت و ساز را دارا می‌باشد، بنابراین از میانگین دمایی بالایی هم برخوردار بوده است که با دور شدن از مرکز شهر از شدت جزیره حرارتی گرمایی کاسته می‌شود. یوسفی (۱۳۹۹) مطالعه‌ای در مورد تغییرپذیری دمایی فضای شهری بابلسر انجام داده است. این مطالعه نشان داده است که اختلاف دمایی بین شب و روز در شهر و حومه دیده نمی‌شود و تغییرپذیری دمایی در کلیه ایستگاه‌ها شباهت به هم داشته است. اما از لحاظ تشکیل جزیره حرارتی با توجه به الگوی زمانی در شهر و تغییرپذیری داده‌ها در بابلسر، این شهر مانند سایر شهرهای ساحلی دنیا نشان خاصی از جزیره گرمایی دیده نمی‌شود. در مطالعه‌ای دیگر بندار و همکاران (۱۴۰۰) در دشت مشهد نشان دادند که تغییرات مکانی و زمانی میانگین دمای سطح زمین^۴ در طی روز به طور میانگین بین ۱۷/۹ تا ۴۹/۰ بوده است، و کمینه و بیشینه میانگین دمای سطح زمین را در کاربری شهری و مناطق کوهستانی نشان داده شده است. ضمن این که مناطق شهری دارای تفاوت محسوس دمای سطح زمین نسبت به سایر کاربری‌ها بوده‌اند. مک‌کارتی^۵ و

همکاران، (۱۳۹۶) در ادامه خلاصه‌ای از این مطالعات تشریح می‌شود. به طور واضح اثر انسان بر اقلیم میکروکلیمای موجود را از بین برده است و یک میکروکلیمای پیچیده را جایگزین کرده است (عزیزی، ۱۳۸۳). تاریخچه مطالعه اثر دمای نزدیک سطح زمین به بیش از ۲۰۰ سال قبل باز می‌گردد. اولین مطالعه سیستماتیک در سال ۱۸۱۰ توسط لاک‌هاوارد در مورد بالا بودن طبقه‌بندی دمای شهرها و اقلیم لندن توصیف شد. خاطر نشان شده بود که با توجه به شرایط جوی لندن افزایش دما بین شهر و روستاهای آن بسیار چشمگیر است (عزیزی، ۱۳۸۳). در طی قرن نوزدهم و بیستم، مطالعه جزایر گرمایی توسط اقلیم‌شناسانی که به تغییرات آب و هوایی در مقیاس محلی علاقه داشتند، محدود می‌شد. بخش زیادی از مطالعات اولیه در شهرهای عرض میانه در اروپای غربی و ژاپن انجام شد، اما پس از سال ۱۹۴۵ این مطالعات بسیار رایج‌تر گردید (استورات و میلز^۱، ۲۰۲۱). از جمله مطالعات اوک (۱۹۷۳، ۱۹۷۶، ۱۹۸۳) و چاندلر (۱۹۶۷)، (۱۹۷۶) نیز به پیشرفت دانش بشر در مورد اقلیم شهری و جزیره حرارتی شهری کمک کرد. گرم‌تر بودن شهرها نسبت به مناطق اطراف آن‌ها به دلیل فعالیت‌های انسان‌ها است. بنابراین یکی از دلایل اصلی ایجاد جزایر گرمایی شهری، تغییر کاربری زمین و توسعه شهرنشینی است (هوانگ و لو^۲، ۲۰۱۵؛ ساچیندرا و همکاران، ۲۰۱۶؛ منصور و همکاران، ۱۴۰۰؛ صفراد، ۱۴۰۰؛ رنجبر سعادت آبادی و همکاران، ۱۳۸۴). شدت جزیره گرمایی شهری معمولاً در شب بیش‌تر از روز است و به عوامل مختلفی مانند اقلیم، فصل و زمان روز بستگی دارد. در برخی از شهرهای جهان، شدت جزیره گرمایی شهری در زمستان نیز بیش‌تر بوده است (آندراده و همکاران^۳، ۲۰۲۳). عزیزی و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای به اثر شدت جزیره حرارتی شهر تهران با به‌کارگیری الگوهای جوی پرداختند. نتایج نشان داد به دلیل استقرار

^۴ Land Surface Temperature (LST)

^۵ McCarthy et al

^۱ Stewart and Mills

^۲ Huang and Lu

^۳ Andrade et al

قابل توجهی بالاتر از میانگین بوده است. و میانگین مقادیر دمای سطح زمین (LST) برای مناطق آب و درختان متراکم به طور قابل توجهی کم تر از سایر مقادیر متوسط دمای سطح زمین (LST) بوده است. دمای سطح زمین (LST) در هر نقشه منطقه اقلیم محلی پایدار بوده و ارتباط کمی را نشان داده است. راثو و همکاران^۳ (۲۰۲۳) طی مطالعه‌ای که در ایتالیا (ایمولا) با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۵/۸ صورت گرفته بود، نشان دادند که دمای سطح زمین (LST) در سال ۲۰۲۱ به میزان ۳۸/۳۶ درصد از سال ۱۹۹۱ افزایش داشته است، اما میانگین شاخص ایجاد اختلاف نرمال شده ۷۵/۴۳ درصد افزایش را نشان داده که با افزایش سطح تنش حرارتی ارزیابی شده با استفاده از شاخص ارزیابی اکولوژیکی مرتبط بوده است. در نهایت، خروجی مدل‌سازی شده این مطالعه نشان داده که پوشش گیاهی به شدت بر دمای سطح زمین (LST) تأثیر داشته است. مطالعات داخلی و خارجی، نشان می‌دهند که دخالت‌های انسانی، افزایش میانگین دما در پیدایش جزیره حرارتی شهری نقش داشته‌اند. که تهران از این امر مستثنی نبوده است. تهران با قدمت ده‌ها سال و دارا بودن تراکم جمعیتی بالا، تمرکز کارخانه‌ها و کارگاه‌ها در مرکز شهر و حومه در توسعه شهرنشینی پیشتاز بوده است (شکیبا و همکاران، ۱۳۸۸). از گذشته تاکنون، پژوهشگران بسیاری از جمله (رنجبر سعادت‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۴؛ صفرراد، ۱۴۰۰؛ زرگری و همکاران، ۲۰۲۴)^۴ پدیده جزیره حرارتی استان تهران را مورد مطالعه قرار داده‌اند. اما هم‌چنان یک شکاف مطالعاتی وجود دارد، و پژوهشی جامع تاکنون صورت نگرفته است که جزیره گرمایی شهری را به تغییر اقلیم در تهران نسبت دهد، از آنجا که جای خالی این نوع پژوهش در میان مطالعات محسوس می‌باشد، و این امر ضرورت بررسی این استان را با توجه به شرایط خاص آن دو چندان می‌نماید. این پژوهش با هدف

همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی به اثر تغییر اقلیم و گرمایش جهانی در شهرها پرداختند، آن‌ها نشان دادند که تا سال ۲۰۵۰ شهرهای جهان تحت تأثیر گرمایش جهانی، که یکی از مهم‌ترین اثرات تغییر اقلیم در شهرها، ایجاد جزیره گرمایی شهری است قرار خواهند گرفت. مدل HadAM3 در این مطالعه نشان داده که مناطق دارای رشد سریع شهری، به‌ویژه در خاورمیانه، هند و شرق آفریقا، پتانسیل بالایی برای ایجاد جزیره گرمایی شهری دارند. این امر موجب می‌شود که شب‌های مناطق شهری در مقایسه با مناطق روستایی، گرم‌تر باشند. شارما و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای با مدل UrbClim در دهلی با بهره‌گیری از RCP 8.5 نشان دادند که شدت موج گرما برای کاربری‌های شهری از ۴۰ درجه به ۴۵ درجه سانتی‌گراد، و در پیش‌بینی کوتاه مدت به ۴۹ درجه سانتی‌گراد در افق دور افزایش می‌یابد. این مقادیر برای استفاده از زمین‌های غیرشهری ۳۳ درجه در طول دوره زمانی پایه بوده است و نتایج به وضوح سهم اثرات جزیره حرارتی را در تشدید اثرات گرمای شدید و تنش گرمایی در شهر نشان داده است. در مطالعه‌ای هی و همکاران^۱ (۲۰۲۳) بر اساس سیستم منطقه اقلیمی محلی این مطالعه در چین طی سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۱۰، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۰ برای تحلیل تأثیر تغییرات آب و هوایی در دمای سطح زمین، انواع مختلف پوشش زمین را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داده که نقشه منطقه اقلیم محلی تولید شده بر اساس پایگاه داده شهری و ابزارهای پورتال دسترسی بهبود یافته جهانی (WUDAPT) دقیق‌تر و کارآمدتر از روش سنتی است. که با دقت بیش از ۱۵٪ افزایش را نشان داده است. در استان هونان چین سه شهر (CZT^۲) وجود دارد، که ساختار شهری هر یک از این مناطق از ساختمان‌های بلند مرتبه، متراکم و صنعتی شکل گرفته است. بنابراین میانگین دمای سطح زمین (LST) در مناطق بزرگ کم ارتفاع و صنایع سنگین به طور

^۳ Rao et al^۴ Zargari et al^۱ He et al^۲ Chang-Zhu-Tan, includes three cities: Changsha, Zhuzhou, and Xiangtan

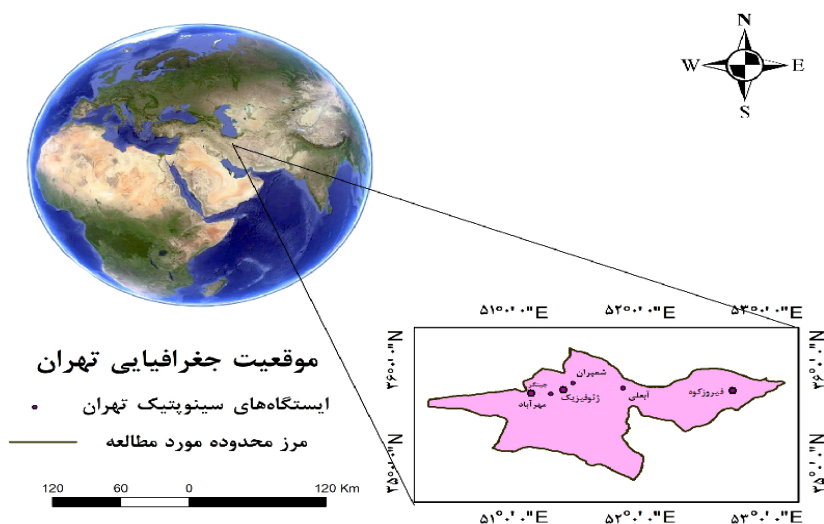
جنوبی البرز صورت گرفته است. ارتفاعات شمالی و شرقی، شرایط جغرافیایی خاص بیابانی جنوب و بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی، سبب محدودیت توسعه در این منطقه شده است (حجازی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱؛ طباطبایی، ۱۳۹۲). از لحاظ جریان‌ات جوی تهران عمدتاً تحت اثر جریان‌ات مدیترانه و سیبری قرار دارد. و خیلی به ندرت این استان تحت پوشش دامنه اثرات جریان‌ات اقیانوس هند و عربستان است. توزیع زمانی و مکانی بارش و دما رابطه معکوسی دارد. به این معنا که بیشینه میزان بارش در پاییز و زمستان رخ می‌دهد، و موجب شده است از لحاظ بارشی وضعیت مناسبی را دارا نباشد. طبق داده‌های دریافتی از سازمان هواشناسی کشور طی دوره ۵۰ ساله، حداکثر دمای ایستگاه مهرآباد ۴۳ درجه در ۶ July سال ۱۹۷۵ بوده است، که طی سال‌های بعدی (۲۰۱۳، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۳) در همین ماه و ایستگاه، بالاترین دما ۴۲/۶ درجه ثبت شده است. در نهایت از منظر سیستم طبقه‌بندی اقلیمی، این استان در حد واسط دو اقلیم نیمه خشک مرطوب و خشک کویری است و از تنوع اقلیمی بالایی برخوردار است و بیش‌تر پهنه آن در اقلیم خشک و نیمه خشک در دو کلاس اقلیم ۵ (نیمه خشک، زمستان خیلی سرد و تابستان گرم) و کلاس اقلیم ۷ (خشک، زمستان سرد و تابستان گرم) قرار گرفته است (علی‌محمدی و غفاریان، ۱۳۸۸).

آشکارسازی تاثیر تغییر اقلیم بر مکانیزم جزایر حرارتی استان تهران با بهره گرفتن از ترکیب داده‌های اقلیمی جدیدتر (۱۹۹۶-۲۰۲۰) و با شبیه‌سازی سناریوهای CMIP6 و داده‌های دمای سطح زمین (LST) در بازه زمانی (۲۰۰۰-۲۰۲۳) به عنوان مولفه دمایی در فناوری سنجش از دور به آن پرداخته است.

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲. منطقه مورد مطالعه

تهران در موقعیت جغرافیایی بین $35^{\circ}0'0''$ تا $37^{\circ}0'0''$ عرض شمالی و $49^{\circ}0'0''$ تا $53^{\circ}0'0''$ درجه طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). افزایش جمعیت نسبت به بستر طبیعی شهر و وسعت آن از دوران قاجار شروع شده است؛ و اکنون طبق سرشماری سال ۱۳۹۵ کلان‌شهر تهران حدود ۸ میلیون و ۶۹۳ هزار و ۷۰۶ نفر جمعیت را دارا می‌باشد (طباطبایی، ۱۳۹۲؛ صفرراد، ۱۴۰۰). از لحاظ ساختار طبیعی، تهران به سه بخش کوهستانی، کوهپایه‌ای و دشت تقسیم می‌شود. اختلاف ارتفاع بین بخش‌های پست و مرتفع، حدود ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متر است. این اختلاف ارتفاع، موجب ایجاد تنوع اقلیمی و پوشش گیاهی در شمال تهران شده است. توسعه فیزیکی تهران عمدتاً در محدوده کوهپایه‌ای و دشت در دامنه‌های



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان تهران

(۲۰۴۱) ریزگردانی شد (تانویتثاپون و همکاران^۳، ۲۰۲۳). در واکاوی مدل لارس جهت پیش‌بینی کوتاه مدت (دوره نزدیک)^۴ تا اواسط قرن ۲۰۵۰ می‌شود، بنابراین پیش‌نمایی دوره آتی (کوتاه مدت) بر همین مبنا بوده است (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۳). جهت صحت‌سنجی مدل لارس در برآورد بارش، دمای بیشینه و کمینه از مقدار ضریب همبستگی (R)، که یک ابزار ریاضی جهت تحلیل‌های اقلیمی است و ارتباط خطی را بین دو متغیر محاسبه می‌کند، و از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، که جز پرکاربردترین شاخص خطا بوده است و قیاسی برای بیان اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر تخمین زده شده می‌باشد، در محیط اکسل بهره گرفته شد (خواجهمیری‌خالدی، ۱۴۰۱؛ روشنی و حمیدی، ۱۴۰۰). در گام بعدی از پارامتر مهم دمای سطحی زمین (LST) بهره گرفته شد. در واقع یکی از عامل‌های مهم در مطالعه محیط حرارتی شهرها دمای سطح زمین است (فائق ابراهیم، ۲۰۱۷: ۶). بنابراین از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده مودیس (MODIS/061/MOD11A2) جهت پایش تغییرات دمای سطح زمین^۵ (شبهانه و روزانه) در سری زمانی ۲۰۲۳-۲۰۰۰ با میانگین دمایی ۸ روزه و تفکیک مکانی 1KM بر حسب سانتی‌گراد که منبع و تولید داده‌های آن سامانه گوگل ارث انجین^۶ (EEG) است، بهره گرفته شد (صفراد، ۱۴۰۰). سپس نتایج خروجی سامانه ارث انجین، در محیط ARC GIS مورد واکاوی قرار گرفت.

۲-۲. آزمون من-کندال

آزمون ناپارامتری من-کندال به طور معمول برای آشکارسازی روندهای یکنواخت در سری داده‌های محیطی، داده‌های اقلیمی یا داده‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. این آزمون ابتدا توسط من (۱۹۴۵) ارائه شد و توسط کندال (۱۹۷۵) توسعه پیدا کرد؛ و در سال ۱۹۸۸ توسط سازمان جهانی هواشناسی جهت تحلیل روند سری‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی پیشنهاد گردید (محمدی و حجازی‌زاده،

این مطالعه از نوع کاربردی، و به دو مبحث (هواشناسی و فناوری سنجش از دور) پرداخته است. بررسی پیشینه این پژوهش بر پایه مطالعات اسنادی و کتابخانه‌ای، و از ترکیب روش‌های آزمون آماری، مدل‌سازی و از تصاویر ماهواره‌ای جهت تحقق هدف بهره گرفته شده است. بدین منظور ابتدا داده‌های دما و بارش ایستگاه‌های سینوپتیک استان تهران (شمیران، آبدلی، مهرآباد، ژئوفیزیک، چیتگر و فیروزکوه) با دوره مشترک ۲۴ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۶) از سازمان هواشناسی دریافت شد. سپس کنترل کیفی گردید و جهت بررسی روند سری زمانی (ماهانه، فصلی و سالیانه) این داده‌ها از گذشته (۱۹۹۶) تا زمان حال (۲۰۲۰) از آزمون من‌کندال در ماکرو اکسل مورد واکاوی قرار گرفت. در مطالعات هواشناسی از آزمون من‌کندال، با هدف وجود روند یا نبود سیر نزولی یا صعودی داده‌ها بهره گرفته می‌شود. در این پژوهش برای توزیع غیرنرمال پارامتر دما و بارش مقدار آماره Z در سطح ۹۹ و ۹۵ درصد در محیط ماکرو اکسل که توسط موسسه هواشناسی فنلاند در سال (۲۰۰۲) طراحی شده است، محاسبه شد. این ماکرو در محیط Visual Basic در EXCEL 97 کدنویسی شده است (سلمی و همکاران، ۲۰۰۲).^۱ سپس نتایج روند آزمون من‌کندال که در ماکرو اکسل مورد واکاوی قرار گرفته بود، به صورت سری زمانی ماهانه در قالب نمودار ترسیم شد و جهت پهنه‌بندی روند سری زمانی فصلی و سالانه به روش درون‌یابی IDW در ARC GIS نشان داده شد (فریق حسین و بلیج^۲، ۲۰۲۲؛ حجازی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱؛ میرزایی حسنلو و همکاران، ۱۳۹۹؛ صفراد، ۱۴۰۰). در ادامه جهت پیش‌نمایی دما و بارش، ایستگاه مهرآباد به‌عنوان ایستگاه مرکزی شهر تهران و ایستگاه نمونه درون شهری انتخاب شد، سپس از مدل ریز مقیاس LARS-WG نسخه ۷ طبق بدینانه‌ترین سناریو SSP5 که دارای حد بالای واداشت تابشی و سوخت‌های فسیلی است، طبق مدل HadGEM3، بر اساس دوره پایه ۲۰۱۰-۱۹۸۰ و طی دو دوره آتی نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) و آتی دور (۲۰۶۰-

^۴ Near-time

^۵ LST

^۶ <https://earthengine.google.com>

^۱ Selmi et al

^۲ Fareeq Hussein and Bleej

^۳ Thanvisitthapon et al

فراوانی داده با ارزش یکسان در یک دنباله بوده که در نهایت

آماره Z با یکی از روابط زیر استخراج می‌گردد: (۴)

$$z = \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} \quad \text{for } s > 0$$

$$z = 0 \quad \text{for } s = 0$$

$$z = \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} \quad \text{for } s < 0$$

در این مطالعه با سطوح اعتماد ۹۵٪ و ۹۹٪ محاسبه شده است. مقادیر مثبت Z نشان دهنده روندهای افزایشی خواهد بود، و اگر منفی باشد با روند نزولی و کاهشی در نظر گرفته می‌شود. فرض صفر در این مطالعه مبنی بر وجود نداشتن روند در داده‌های بزرگ‌تر از مقادیر Z رد می‌شود. در این مطالعه اگر مقدار P value از ۰.۰۵ کم‌تر باشد فرضیه H_0 که بر نبود وجود روند در سری زمانی است؛ دلالت دارد. اما در مقابل اگر مقدار سطح معنی‌داری از ۰.۰۵ بیش‌تر باشد قبول فرضیه H_1 و دال بر وجود روند می‌باشد (بارانی و کرمی، ۱۳۹۸؛ پولرت، ۲۰۲۰؛ محمدی، ۱۴۰۰).

۳-۲. مدل LARS-WG7

از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا، مدل LARS-WG است. نسخه اولیه این مدل در بوداپست در سال (۱۹۹۰) بر اساس بخشی از پروژه ارزیابی ریسک کشاورزی در مجارستان با هدف رفع محدودیت‌های زنجیره مارکوف در برآورد میزان بارش ارائه شد. این ابزار در نسخه جدید خود در تاریخ 07/08/2023 با نام LARS-WG 7^۲ به‌روزرسانی گردید. یک ابزار ریز مقیاس محاسباتی که برای تولید سناریوهای آب و هوای روزانه در مقیاس محلی بر اساس پیش‌بینی‌های آب و هوایی از مدل‌های جهانی آب و هوا برای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم استفاده می‌شود. LARS-WG در بیش از ۷۵ کشور در زمینه تحقیقات و آموزش مورد استفاده قرار گرفته است. LARS-WG در

۱۴۰۲؛ پولرت ۱، ۲۰۲۰). در این مطالعه بررسی روند سری زمانی عناصر اقلیمی (دما و بارش) بر اساس آماره Z در ماکرو اکسل و جهت به‌دست آوردن معنی‌داری یا عدم معنی‌داری متغیرها در ایستگاه‌های سینوپتیک (مهرآباد، شمیران، ژئوفیزیک، چیتگر، فیروزکوه و آبدلی) در مقطع زمانی ۲۴ ساله (۱۹۹۶-۲۰۲۰) محاسبه شده است (محمدی و حجازی‌زاده، ۱۴۰۲؛ بارانی و کرمی، ۱۳۹۸). (۱)

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

$$\text{sng}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

طبق این فرمول (۱)، n تعداد مشاهدات سری، و X_j و X_k به ترتیب داده‌های j و k سری است. که در ادامه همان‌طور که رابطه (۲) نشان داده است تابع علامت sgn محاسبه می‌گردد:

(۲)

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = +1 \quad \text{for } (x_j - x_k) > 0$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = 0 \quad \text{for } (x_j - x_k) = 0$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = -1 \quad \text{for } (x_j - x_k) < 0$$

در رابطه (۳) محاسبه واریانس S را نشان داده است: (۳)

$$\text{for } n > 10$$

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18}$$

$$\text{for } n < 10$$

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

در گام بعدی n و m تعداد دنباله‌هایی را نشان داده است که در آن حداقل یک داده تکراری وجود داشته باشد. t بیان‌گر

² <https://sites.google.com/view/lars-wg/>

¹ Pohlert

۲-۵. سناریوهای انتشار SSP

در گزارش پنجم تغییر اقلیم سناریوها بر اساس واداشت‌های تابشی^۴ RCP تخمین زده می‌شود. اما در گزارش ششم تغییر اقلیم بر اساس پنج روایت منطقی از روند اقتصادی-اجتماعی همراه لحاظ کردن RCPها، دنیای آینده را تا پایان قرن ۲۱ در نظر می‌گیرد. این سناریوها چالش‌های سازگاری و کاهش اثرات را نشان می‌دهند؛ دنیایی همراه توسعه پایدار و برابری (SSP1)، دنیایی حد واسطه که از روند گذشته پیروی می‌نماید (SSP2)، جهانی تکه تکه از ناسیونالیسم احیاگر (SSP3)، جهانی از افزایش نابرابری (SSP4) و در نهایت دنیایی از رشد سریع و نامحدود در تولیدات انرژی و اقتصادی همراه توسعه سوخت‌های فسیلی (SSP5)، را در نظر دارد. در این مطالعه از SSP5 که دارای حساسیت بالایی است، بهره گرفته شده است که در نهایت شاخص خطای عملکرد مدل محاسبه شده است (بابائیان و همکاران، ۱۴۰۰).

۲-۶. صحت‌سنجی

در این پژوهش جهت اعتماد بیش‌تر به پیش‌نمایی‌های آینده مدل LARS-WG7 از آماره‌های ضریب همبستگی و میانگین مربع خطا جهت واکاوی و ارزیابی داده‌های تولید شده مشاهداتی نسبت به داده‌های پایه طبق روابط (۱ و ۲) بهره گرفته شد (خواجه امیری خالیدی و همکاران، ۱۴۰۱؛ پناهی و خرم‌آبادی، ۱۳۹۸؛ حشمتی و رضضانی‌اعتدالی، ۱۴۰۰).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (1)$$

$$R = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

۲-۷. سنجنده مودیس^۵

آب و هوای متنوع جهان به خوبی اعتبارسنجی شده است. نسخه فعلی LARS-WG7 پیش‌بینی‌های آب و هوا را از ۱۵ مدل جهانی آب و هوا (GCMs) از آخرین مجموعه CMIP6 که در گزارش ارزیابی IPCC مورد استفاده قرار گرفته است، ادغام می‌کند. این ابزار داده‌های بارش روزانه، تابش، حداقل و حداکثر دمای روزانه را تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده مورد بررسی و محاسبه قرار می‌دهد. در این مدل جهت شبیه‌سازی بارش و احتمال رخداد آن از روش توزیع نیمه تجربی و زنجیره مارکوف، و جهت شبیه‌سازی تابش از توزیع نیمه تجربی و در نهایت شبیه‌سازی دما بر اساس سری فوریه انجام می‌گیرد (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۸؛ سمنیوف و بارو^۱، ۲۰۰۲).

۲-۴. مدل HadGEM3

در سال ۲۰۰۶ نسخه جدید HadGEM1 توسط جونز و همکاران^۲ (۲۰۰۶) طراحی شد. که در گزارش چهارم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفت. نسخه دوم این مدل در گزارش پنجم تغییر اقلیم تحت عنوان HadGEM2 به کار گرفته شد. اما در حال حاضر HadGEM3 از نسل سوم خانواده مدل‌های آب و هوایی HadGEM می‌باشد. در مجموعه مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس از سری ششم گزارش تغییر اقلیم (CMIP6) در چارچوب پروژه IPCC توسعه پیدا کرده و ارائه شده است. یکی از مزیت‌های اصلی این مدل نسبت به نسخه‌های قبلی خود، لحاظ کردن چارچوب مدل‌سازی اقیانوس^۳ NEMO است، که هم‌چنین در سیستم پیش‌بینی اقیانوس، از پایگاه Met Office بهره گرفته می‌شود.

⁴ Radiative Forcing

⁵ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

¹ Semenov and Barrow

² Jones et al

³ Nucleus for European Modelling of the Ocean (<https://www.nemo-ocean.eu/>)

در این پژوهش جهت پایش تغییرات دمای سطح زمین از سنجنده مودیس استفاده شد. با بهره گرفتن از داده‌های این سنجنده می‌توان تغییرات طبیعی و مصنوعی ایجاد شده در سطح زمین را مشخص نمود. با مدل‌سازی حرکات در سطح زمین می‌توان تغییراتی که در سطح زمین رخ می‌دهد را پیش‌بینی نمود. همچنین این سنجنده می‌تواند برای اندازه‌گیری دمای سطح زمین، پوشش ابرها، بخار آب، و عناصرهای مهم اقلیمی مورد استفاده باشد. از این جهت، سنجنده مودیس بر روی دو ماهواره Terra و Aqua قرار دارد. که داده‌های ماهواره Terra از سال ۲۰۰۰ در دسترس قرار گرفت، بنابراین بازه زمانی داده در این پژوهش (۲۰۲۳ الی ۲۰۰۰) می‌باشد. نوع محصول انتخابی در این سنجنده (تابش و دمای سطح زمین) از کالکشن MODIS/061/MOD11A2 واقع در گوگل ارث انجین بوده است. که دارای تفکیک مکانی ۱Km و تفکیک زمانی میانگین دمایی (۸ روز) بر حسب سانی گراد است، از مزیت اصلی داده‌های میانگین ۸ روزه این بوده است که دارای ابر کم‌تری نسبت داده‌های ۱ روزه، می‌باشد (صفرراد، ۱۴۰۰؛ هیمن^۱، ۱۹۹۶).

۳. بحث

۳-۱. روند سری زمانی عناصر اقلیمی (دما و بارش)

از گذشته تا حال با آزمون من‌کندال

در شکل (۲) بررسی روند دما و بارش در بازه زمانی (۲۰۲۰-۱۹۹۶) در ایستگاه‌های (مهرآباد، آبعلی، چیتگر، فیروزکوه، ژئوفیزیک و شمیران) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲) پیدا است، روند دمای ماهانه کلیه ایستگاه‌ها به‌صورت افزایشی بوده است. که در تمامی ایستگاه‌ها در ماه‌های (ژانویه، فوریه، مارس، مه، ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر) روند صعودی و معنی‌دار در سطح صدک ۹۵، ۹۹ و ۸۰ درصد است؛ و سایر ماه‌ها عدم روند معنی‌داری را نشان

داده است. در شکل (۳) پهنه‌بندی سری زمانی فصلی و سالانه دما ایستگاه‌های (چیتگر، ژئوفیزیک، فیروزکوه، مهرآباد، آبعلی و شمیران) را نشان داده است. ضمن روند صعودی و معنی‌دار در ایستگاه‌های (شمیران، آبعلی و فیروزکوه)، روند افزایشی فصل‌های (پاییز، زمستان و بهار) در سطح معنی‌داری ۹۵ و ۹۹ درصد بیش‌تر مشهود بود. در شکل (۲) بررسی روند ماهانه بارش در ایستگاه‌های (ژئوفیزیک، چیتگر، فیروزکوه، مهرآباد، آبعلی و شمیران) در بازه زمانی ۲۴ ساله نشان داد که بارش در ایستگاه‌های (مهرآباد، شمیران و آبعلی)، در ماه‌های (اکتبر و نوامبر) روند افزایشی داشته که در ایستگاه آبعلی صعودی و معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد بوده است. روند بارش در کلیه ایستگاه‌های (ژئوفیزیک، چیتگر و فیروزکوه) کاهش معنی‌دار در سطح صدک ۸۰ در ماه‌های (مارس، سپتامبر، اکتبر و نوامبر) نشان داده شده است. از این میان ایستگاه مهرآباد در ماه‌های (ژانویه، مارس، ژوئیه، اوت و دسامبر) روند کاهشی بارش که در ماه دسامبر معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد را نشان داده است و در ایستگاه آبعلی روند بارش در ماه (ژانویه، مارس، سپتامبر و دسامبر) کاهشی بود. اما در ایستگاه شمیران بارش ماهانه در (ژانویه، فوریه، مارس، ژوئن، اوت و دسامبر) روند کاهشی بارش را نشان داده است. که در ماه‌های (ژانویه و دسامبر) روند کاهشی معنی‌دار در سطح صدک ۸۰ درصد بود. شکل (۳) پهنه‌بندی سری زمانی فصلی و سالانه بارش ایستگاه‌های (ژئوفیزیک، چیتگر، فیروزکوه، مهرآباد، آبعلی و شمیران) نشان داده شده است. بررسی روند فصلی بارش در ایستگاه‌های (چیتگر و فیروزکوه) کاهشی معنی‌دار در سطح ۹۵ درصد بود. که تنها در فصل‌های تابستان و پاییز در ایستگاه چیتگر روند بارش کاهشی معنی‌دار در سطح ۸۰ درصد را نشان داد. در نهایت در ایستگاه ژئوفیزیک در فصل‌های (پاییز و زمستان) روند بارش کاهشی معنی‌دار در سطح ۸۰ درصد بود. بنابراین آن‌چه سری زمانی بارش نشان داد گرچه در ایستگاه‌های (چیتگر،

¹ Hyman

ایستگاه‌ها بیش‌تر روند صعودی بود، به‌ویژه در ایستگاه‌های (شمیران، مهرآباد) با توجه به قرار داشتن در محدوده شمالی و مرکز شهر، نتایج مورد تایید بوده است. ضمن این‌که نتایج این پژوهش با مطالعات (اصغری سراسکانرود و زینالی، ۱۳۹۴؛ حجازی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱؛ بینش و همکاران، ۱۳۹۶) هم‌خوانی دارد.

ژئوفیزیک، فیروزکوه، مهرآباد، آبدلی و شمیران) روند بارش کاهشی بود، اما در برخی ماه‌ها تغییرات ناگهانی مشاهده می‌شود. یعنی روند تغییر بارش تهران در حال تغییر و نامنظم‌تر شده و در مقطعی کوتاه، با حجم بالایی از بارش حدی، تهران مواجه می‌شود. این امر می‌تواند رخداد تغییر اقلیم در استان تهران را تقویت نماید. از طرفی روند دمای ماهانه در کلیه

سری زمانی	مقدار Z	Z	سطح معنی‌داری
ژانویه	۱.۳۷		
فوریه	۰.۰۲		
مارس	۰.۸۶		
آوریل	-۰.۸۱		
مه	۱.۱۴		
ژوئن	۱.۶۵		+
ژوئیه	۱.۶۱		
اوت	-۱.۷۹		+
سپتامبر	-۰.۱۶		
اکتبر	-۱.۸۹		+
نوامبر	-۱.۰۹		
دسامبر	۰.۲۵		

دما ایستگاه مهرآباد

سری زمانی	مقدار Z	Z	سطح معنی‌داری
ژانویه	-۰.۹۵		
فوریه	۰.۳		
مارس	-۰.۲۵		
آوریل	۰		
مه	۰.۴۹		
ژوئن	-۰.۰۴		
ژوئیه	-۱		
اوت	-۱.۱۹		
سپتامبر	۰.۲۱		
اکتبر	۰.۹۵		
نوامبر	۰.۸۱		
دسامبر	-۲.۲۱		*

بارش ایستگاه مهرآباد

سری زمانی	مقدار Z	Z	سطح معنی‌داری
ژانویه	۱.۶۵		+
فوریه	۱.۴۷		
مارس	۱.۷۵		+
آوریل	-۰.۶۷		
مه	۱.۱۴		
ژوئن	۱.۳۳		
ژوئیه	۱.۸۲		+
اوت	-۱.۳۷		
سپتامبر	۰.۰۷		
اکتبر	-۱.۷		+
نوامبر	-۰.۷۷		
دسامبر	۰.۷۲		

دما ایستگاه آبدلی

سری زمانی	مقدار Z	Z	سطح معنی‌داری
ژانویه	-۰.۷۲		
فوریه	۰.۲۵		
مارس	-۱.۲۸		
آوریل	۱.۵۱		
مه	۰.۷۷		
ژوئن	۰.۲۳		
ژوئیه	۰.۰۹		
اوت	۰		
سپتامبر	-۰.۲۵		
اکتبر	۲.۲۱		*
نوامبر	۰.۶۷		
دسامبر	-۰.۳۹		

بارش ایستگاه آبدلی

سری زمانی	مقدار Z	Z	سطح معنی داری
ژانویه	۲.۱۲		*
فوریه	۰.۹۵		
مارس	۱.۷۵		+
آوریل	-۰.۰۷		
مه	۲.۰۷		*
ژوئن	۲.۸۲		**
ژوئیه	۲.۹۶		**
اوت	۱.۶۵		+
سپتامبر	۲.۱۷		*
اکتبر	-۰.۶۷		
نوامبر	۰.۱۱		
دسامبر	۰.۹۵		

دما ایستگاه شمیران

سری زمانی	مقدار Z	Z	سطح معنی داری
ژانویه	-۱.۹۳		+
فوریه	-۰.۲۵		
مارس	-۰.۴۹		
آوریل	۱.۷		+
مه	۰.۸۱		
ژوئن	-۰.۸۱		
ژوئیه	۰.۱۴		
اوت	-۱.۰۹		
سپتامبر	۰.۳۲		
اکتبر	۱.۰۵		
نوامبر	۱.۲۸		
دسامبر	-۱.۸۹		+

بارش ایستگاه شمیران

سری زمانی	مقدار Z	Z	سطح معنی داری
ژانویه	-۱.۲۷		
فوریه	-۱.۷		=
مارس	-۱.۲۳		
آوریل	-۱.۶۵		+
مه	-۰.۲۵		
ژوئن	۰.۲۵		
ژوئیه	۰.۴۹		
اوت	-۰.۲۹		
سپتامبر	۰		
اکتبر	-۲.۳۱		*
نوامبر	-۱.۶۱		
دسامبر	-۱.۲۴		

دما ایستگاه چیتگر

سری زمانی	مقدار Z	Z	سطح معنی داری
ژانویه	-۰.۹۸		
فوریه	-۱.۴۲		
مارس	-۱.۸۹		+
آوریل	-۱.۰۵		
مه	-۱.۱۹		
ژوئن	-۱.۱۹		
ژوئیه	-۰.۷۹		
اوت	-۰.۵۱		
سپتامبر	-۱.۶۵		+
اکتبر	-۱.۴۷		
نوامبر	-۱.۴۲		
دسامبر	-۰.۵۶		

بارش ایستگاه چیتگر

سری زمانی	مقدار Z	Z	سطح معنی داری
ژانویه	-۰.۱۶		
فوریه	۱.۲۸		
مارس	۰.۴۹		
آوریل	-۱.۲۳		
مه	۰.۱۶		
ژوئن	۲.۳۱		*
ژوئیه	۲.۴		*
اوت	-۰.۲۱		
سپتامبر	۱.۰۵		
اکتبر	-۲.۵۴		*
نوامبر	-۰.۸۶		
دسامبر	-۱.۵۶		

دما ایستگاه فیروزکوه

سری زمانی	مقدار Z	Z	سطح معنی داری
ژانویه	-۰.۴۹		
فوریه	۰		
مارس	-۱.۰۵		
آوریل	-۰.۳۹		
مه	-۰.۴۴		
ژوئن	-۰.۴۴		
ژوئیه	۰		
اوت	۰		
سپتامبر	۰		
اکتبر	۰		
نوامبر	-۰.۲۶		
دسامبر	۰		

بارش ایستگاه فیروزکوه

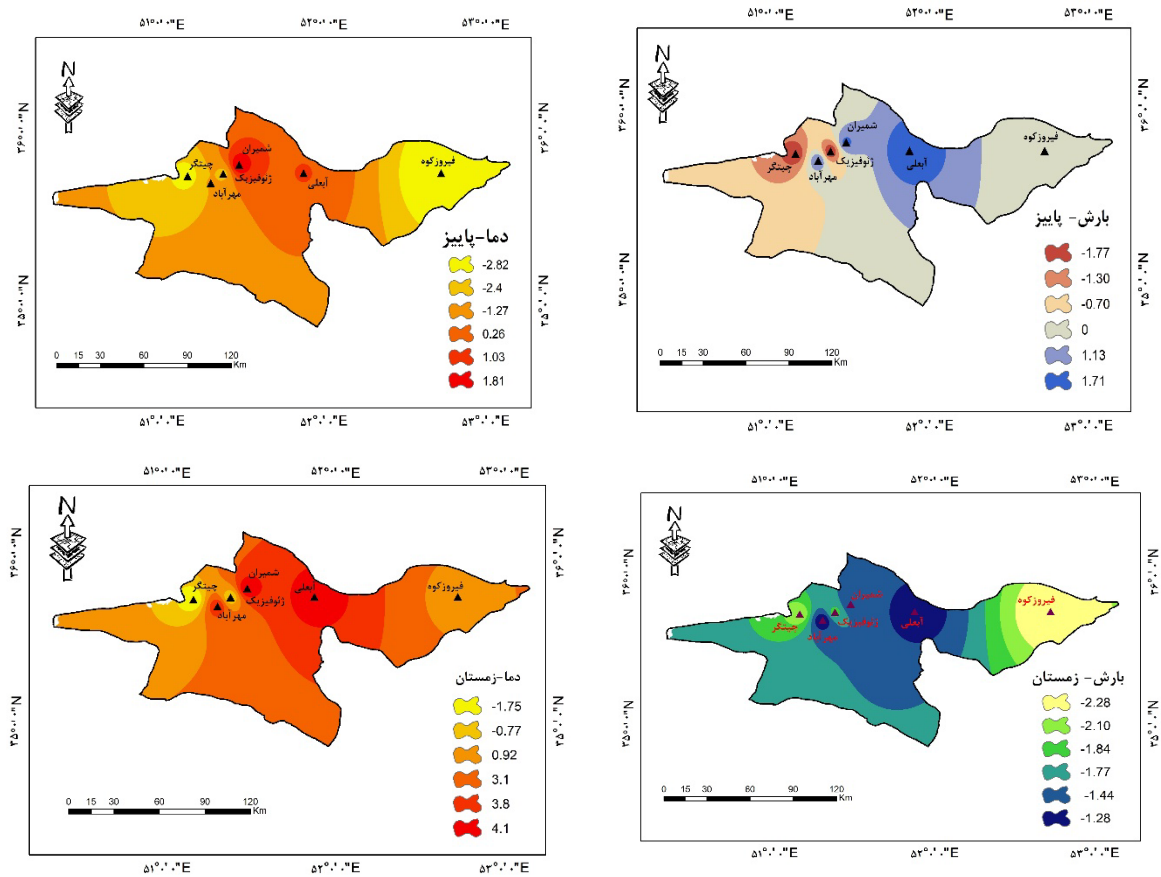
سری زمانی	مقدار Z	Z	سطح معنی داری
ژانویه	-۰.۶۷		
فوریه	-۰.۸۱		
مارس	-۰.۲۱		
آوریل	-۱.۹۸		*
مه	۰.۱۶		
ژوئن	۰.۶۷		
ژوئیه	۲.۶۸		**
اوت	-۰.۳۹		
سپتامبر	-۱.۱۹		
اکتبر	-۲.۲۶		*
نوامبر	-۱.۱۹		
دسامبر	-۱.۷۵		+

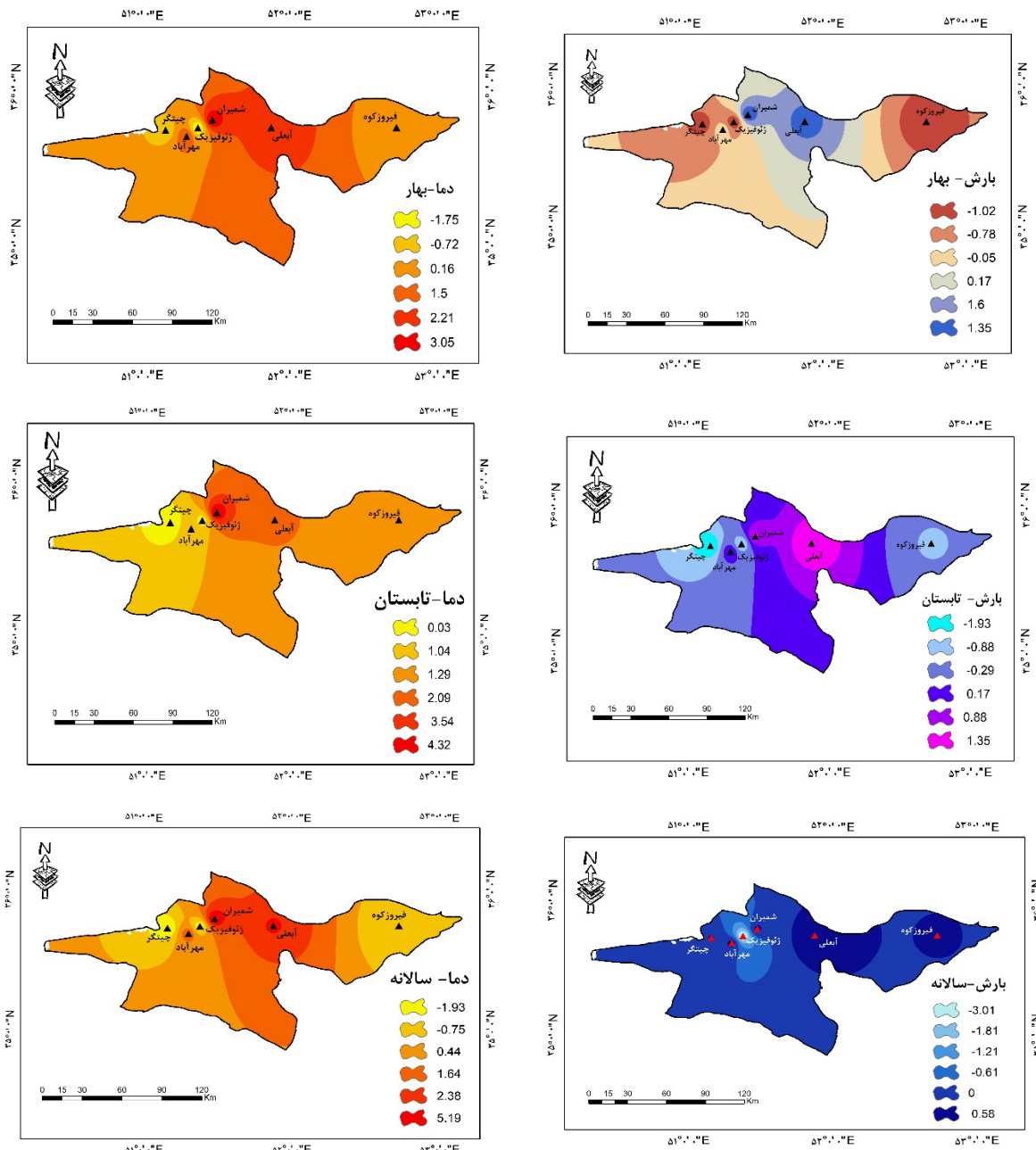
دما ایستگاه ژئوفیزیک

سری زمانی	مقدار Z	Z	سطح معنی داری
ژانویه	-۰.۶۵		
فوریه	-۱.۱۲		
مارس	-۰.۶۷		
آوریل	-۰.۳۵		
مه	-۰.۶۷		
ژوئن	-۰.۶		
ژوئیه	۰		
اوت	-۰.۳۹		
سپتامبر	-۱.۰۲		
اکتبر	-۱.۶۵		+
نوامبر	-۱.۷		+
دسامبر	-۰.۶		

بارش ایستگاه ژئوفیزیک

شکل ۲- روند سری زمانی ماهانه بارش و دما ایستگاه‌های (مهرآباد، آبدلی، چیتگر، فیروزکوه، ژئوفیزیک و شمیران) در بازه زمانی ۲۰۲۰ الی ۱۹۹۶.





شکل ۳. پهنه‌بندی روند سری زمانی فصلی و سالانه بارش و دما ایستگاه‌های (مهرآباد، آبعلی، چیتگر، فیروزکوه، ژئوفیزیک و شمیران) در بازه زمانی ۲۰۲۰ الی ۱۹۹۶.

همان‌طور که از شکل (۴) پیداست، مدل HadGEM3 در بازسازی داده‌های مشاهداتی بارش و دمای ایستگاه مهرآباد از عملکرد مطلوب و دقت بالایی در پیش‌نمایی آینده‌دارا است. مدل در دوره‌های آتی نزدیک و دور (۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۰) طبق سناریو با حساسیت بالا، مجموع بارش نسبت به دوره مشاهداتی کاهش بارندگی برآورد نموده است. ضمن این‌که روند بارش کاهشی خواهد بود، بیش‌ترین

۲-۳. بررسی دما و بارش آینده با مدل LARS-WG7

در شکل (۴) بررسی تغییرات بارش و دمای دوره مشاهداتی (۱۹۸۰-۲۰۱۰) و دوره آتی نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) و دوره آتی دور (۲۰۴۱-۲۰۶۰) طبق سناریو SSP5 که دارای بالاترین حساسیت بر اساس گزارش CMIP6 را نشان داده است. در این مطالعه ایستگاه مهرآباد به نمایندگی سایر ایستگاه‌ها و به‌عنوان ایستگاه مرکزی انتخاب شده است.

دوره آتی دور (۲۰۴۱-۲۰۶۰) حدود ۲۷ درجه سانتی گراد برآورد شده است. در کل پیش‌نمایی دمایی بیشینه و کمینه در دوره آتی دور (۲۰۴۱-۲۰۶۰) بالاترین دماها را نسبت به دوره مشاهداتی نشان داده است. در نهایت محاسبه شاخص‌های عملکرد لارس نسبت به داده‌های پایه و مدل شده مقدار همبستگی بارش را $R=0.99$ و میزان به‌دست آمده از شاخص ریشه دوم میانگین مربع خطا $RMSE=2.04$ و میزان خطای نرمال شده استاندارد را $NRMSE=5.51\%$ نشان داده است. به این معنا که شبیه‌سازی لارس برای بارش در مقیاس ماهانه $2/04$ میلی‌متر، به میزان $5/51$ درصد خطا را تخمین زده است؛ که عملکرد عالی را برای پیش‌نمایی بارش داشته است. از طرفی شاخص‌های نکویی برازش در مورد پارامتر دمایی حداقل $R=0.99$ ، $RMSE=0.19$ و دمایی حداکثر $R=0.99$ ، $RMSE=0.198$ برآورد شده که نشان می‌دهد عملکرد لارس برای پیش‌نمایی دما خطای ناچیزی دارد و بسیار عالی بوده است. از این جهت با توجه به تغییرات بارش و دما در دوره آتی ایستگاه مهرآباد با روند افزایش دما و روند کاهش بارش روبرو خواهد بود. عملکرد لارس با توجه به قرار گرفتن ایستگاه مهرآباد در مرکز شهر و صنعتی بودن قابل قبول است. نتایج پژوهش (حق‌طلب و همکاران، ۱۳۹۲) با نتایج خروجی مدل طبق سناریو SSP5 در این مطالعه مطابقت دارد.

ماه‌های بارشی در افق نزدیک در ماه‌های (دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس) تعلق خواهد گرفت. بدین جهت در دوره افق دور (۲۰۴۱-۲۰۶۰) میزان مجموع بارش نسبت به دوره نزدیک روندی کاهشی پیدا خواهد کرد. از طرفی در ماه (اوت) این ایستگاه نسبت به بارش مشاهداتی، کاهش بارندگی را نسبت به دوره مشاهداتی تجربه خواهد کرد؛ ضمن این‌که ماه اوت به عنوان خشک‌ترین ماه طی دوره آتی نزدیک (۲۰۳۱-۲۰۵۰) و دوره آتی دور (۲۰۴۱-۲۰۶۰) خواهد بود. به طوری که بیش‌تر بارش‌ها در دوره آتی نزدیک به اوایل پاییز و زمستان تعلق خواهد داشت. در شکل (۴) همان‌طور که پیداست برآورد دمایی بیشینه مشاهداتی و دوره آتی تقریباً با هم برابر بوده است و بیش‌آوردی ناچیزی نشان داده است، و مدل عملکرد قوی و قابل قبولی داشته است. در برآورد میانگین دمایی بیشینه و کمینه ایستگاه مهرآباد طی دوره آتی نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) و دوره آتی دور (۲۰۴۱-۲۰۶۰) دمای حداکثر را در کلیه ماه‌ها روند افزایشی نشان داده است. که بیش‌ترین دما متعلق به ماه‌های (ژوئن و ژوئیه) با ۵ درصد اختلاف نسبت به دوره مشاهداتی به‌عنوان بالاترین دما ثبت کرده است؛ که بیش‌ترین روند افزایش دما به ماه ژوئیه به ترتیب در دوره آتی نزدیک ۳۸ درجه سانتی‌گراد و دوره آتی دور در حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد را نشان داده است. جهت برآورد دمایی حداقل را در همین ماه (ژوئیه) حدود ۲۶ درجه سانتی‌گراد در دوره آتی نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) و در

جدول ۱. شاخص‌های عملکرد مدل HadGEM3 نسبت به داده‌های بارش و دمایی پایه.

Statistical test	Model AOGSM (HadGEM3)
R	Precipitation 0.99
	Maximum temperature 0.99
	Minimum temperature 0.99
RMSE	Precipitation 2.04
	Maximum temperature 0.198
	Minimum temperature 0.19
NRMSE	Precipitation 5.51



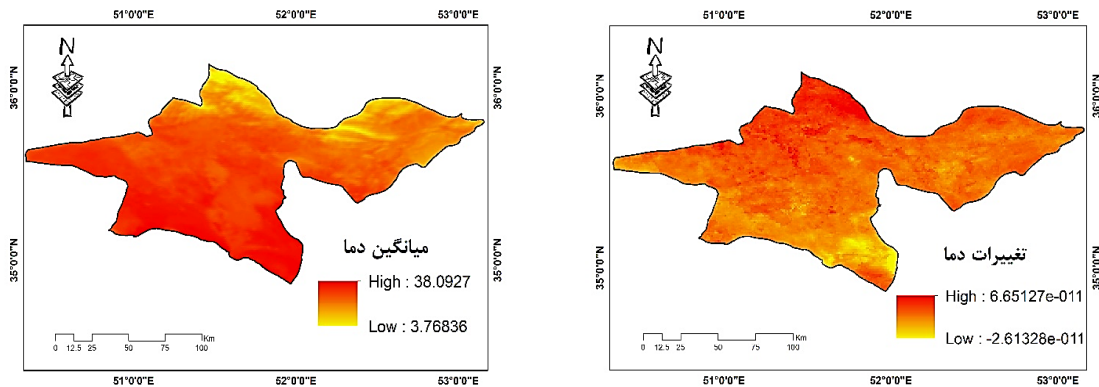
شکل ۴. مجموع و میانگین دما و بارش دوره‌آنی طبق سناریو SSP5 با LARS-WG.

در شکل (۵) تغییرات و میانگین دمای سطح زمین استان تهران طی دوره (۲۰۰۰-۲۰۲۳) نشان داده شده است. همان‌طور که

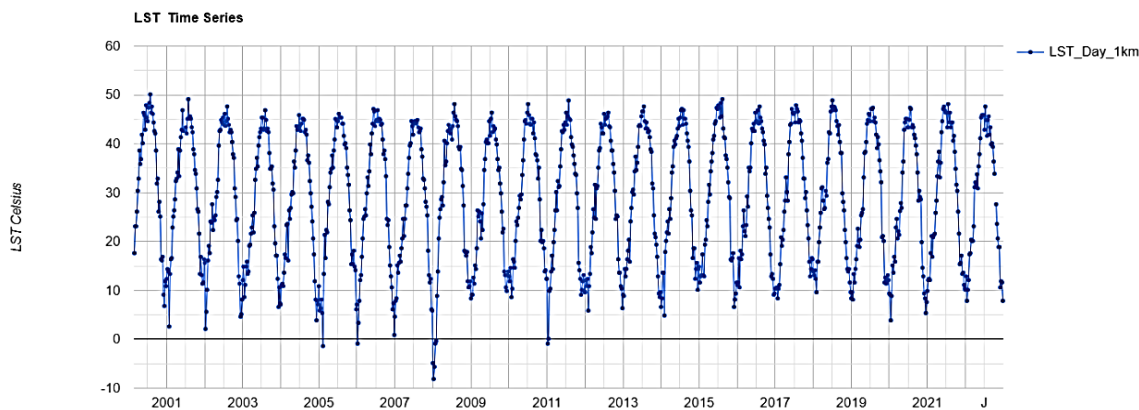
۳-۴. بررسی تغییرات دمای سطح زمین در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۳ با سنجد مودیس

به‌خوبی روند مثبت تغییرات افزایشی دما را در بخش‌های شمالی تهران دیده می‌شود. تغییرات دمایی در مناطق (۲۰ و ۱۶، ۱۱، ۵، ۴، ۲) نسبت به سایر مناطق و روستاهای استان تهران روند صعودی و بالایی نشان داده است. نتایج میانگین دمای شبانه با مطالعه (زرگری و همکاران، ۲۰۲۴)^۱؛ مجنونی تو تاخانه و رمضانی، (۱۳۹۸) مطابقت دارد. در شکل (۶) سری زمانی تغییرات دمای سطح زمین روزانه دوره ۲۳ ساله تهران را نشان داده است. آن‌طور که پیداست توسعه شهرنشینی در استان تهران موجب روند کاهشی دمای روزانه شده است. بدین جهت که ضمن روزهایی که تهران دمای بالای ۴۵ درجه سانتی‌گراد را تجربه کرده است، کاهش دمای روزانه هم داشته است و در ۲۶ فوریه ۲۰۰۸ دمای کمینه تا منفی ۵ درجه سانتی‌گراد را سپری کرده است. که موجب شده گرمایش شبانه استان تهران را بیش‌تر نماید، این نتایج با مطالعات (علی‌زاده جویباری و همکاران، ۲۰۱۶) مطابقت داشته است.

در شکل (۵) به‌خوبی دیده می‌شود، میانگین دمای شبانه بدون اثر تابش خورشید، که نشان از تابش کم‌تر در شب است، در نواحی شمالی و شمال شرقی تهران طی بازه زمانی ۲۳ ساله کاملاً مشهود است. میانگین دمایی در نواحی که قرمز رنگ هستند، نواحی پر تراکم‌تر و دمای بالاتری نسبت به سایر مناطق تهران را نشان می‌دهد. اثرات جزیره حرارتی روی این مناطق بیش‌تر قرار داشته است. مناطق (۲۲، ۲۱ و ۹) و نواحی شمالی مناطق (۸ و ۵) و قسمت شرقی منطقه ۴ از افزایش میانگین دمای شبانه بالاتری برخوردار هستند. و اما تغییرات دما مناطقی که قرمز هستند نشان از وجود شهرک‌های ایجاد شده، مناطق مسکونی، گسترش و توسعه شهری است. که سبب ایجاد تغییرات و افزایش دما شده است. در واقع وجود ساختمان‌های با ارتفاع متوسط و مترکم در مناطق مرکزی شهر تهران و تراکم بالا و ساختمان‌های بلند در محدوده‌های شمالی، موجب افزایش گرما در محدوده‌های شمالی و مرکزی تهران شده است. یافته‌های این پژوهش با مطالعات (سپاسی‌زنگی آبادی، ۱۴۰۲) مطابقت داشت. در شکل (۵)



شکل ۵. روند تغییرات و میانگین دمای شبانه تهران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در بازه زمانی (۲۰۰۰-۲۰۲۳).



شکل ۶. سری زمانی تغییرات دمای سطح زمین روزانه تهران در بازه زمانی (۲۰۰۰-۲۰۲۳).

۴. نتیجه گیری

بود، زیرا دما در شروع ماه تابستان روند افزایشی دارد به این دلیل تغییرات افزایش دما در این فصل محسوس تر بوده است. در نهایت روند تغییرات دمای شبانه با تصاویر ماهواره‌ای مودیس از سال (۲۰۲۳-۲۰۰۰) روند افزایشی در برخی مناطق و نواحی شمالی تهران نشان داد. در نتیجه برای کلان‌شهری نظیر تهران که در حال گسترش است، با توجه به ساختمان‌های فعلی مسکونی زمان حال و اقلیم کنونی تهران شرایط لازم برای آینده را ندارد و تغییر خواهد کرد. اثر جزایر گرمایی شهری با توجه به مصالح و ساختمان‌های متراکم موجب تشدید و افزایش دما می‌شود. انتظار می‌رود مناطق شمالی و شمال شرق تهران و حومه با توجه به توپوگرافی منطقه و گسترش شهرک‌ها بیش‌تر مستعد افزایش گرمایی شهری شوند. در نتیجه تهران به‌عنوان کلان‌شهر، آسیب‌پذیری بیش‌تری در برابر تغییر اقلیم در آینده را دارا است، بنابراین نتایج این مطالعه طبق شواهد علمی از آخرین گزارش سازمان جهانی هواشناسی در سال ۲۰۲۳، مبنی بر این که دمای هوای ایران با روند افزایشی دما و کاهش بارش همراه بوده است و تهران هم طبق یافته‌های این پژوهش با افزایش دما و کاهش بارش روبرو است (سازمان هواشناسی جهانی، ۲۰۲۴؛ طاوسی و همکاران، ۱۳۹۹؛ بینش و همکاران، ۱۳۹۶؛ سپاسی زنگی‌آبادی، ۱۴۰۲؛ چَپ‌من^۱ و همکاران، ۲۰۱۷) مطابقت و هم‌خوانی داشت. با توجه به اقلیم شهری جدید پیش‌روی تهران، لزوم داشتن برنامه‌ای جامع و تدوین برنامه اقدام ملی

امروزه توسعه شهرنشینی، تغییرات کاربری و پوشش زمین بر اقلیم در مقیاس محلی تا جهانی اثر گذاشته است. هرگونه الگوی تغییر منجر به تغییر آلبدو و بارش می‌شود، کاهش بارش می‌تواند جنگل‌ها را به علف‌زار تبدیل نماید، و منجر به تشدید خشکسالی شود؛ این امر موجب افزایش آلبدو می‌شود. در مناطق شهری رفتار آلبدو کم‌تر بوده و این مکان‌ها بیش‌تر مستعد جزایر گرمایی شهری می‌گردد. از آن‌جا که تهران کلان‌شهری بوده است که درگیر این پدیده شده است، این پژوهش با هدف آشکارسازی تاثیر تغییر اقلیم بر مکانیزم جزایر حرارتی استان تهران به رشته تحریر در آمده است. نتایج آزمون من‌کندال طی دوره (۲۰۲۰-۱۹۹۶) روند سری زمانی افزایشی و معنی‌دار عنصر دما در کلیه ایستگاه‌های (شمیران، آبعلی، مهرآباد، فیروزکوه، چیتگر و آبعلی) مشهود بود. بررسی سری زمانی بارش روندی ایستا و کاهشی بوده که تنها در دو ماه (اکتبر و نوامبر) در ایستگاه‌های (مهرآباد، شمیران و آبعلی) جهش و تغییرات ناگهانی دیده شد. بررسی شبیه‌سازی با مدل HadGEM3 طبق سناریو SSP5 نشان داد مدل در پیش‌نمایی بارش و دما عملکرد خوب و مطلوبی داشته است. بررسی بارش در دوره آتی نزدیک (۲۰۳۱-۲۰۵۰) در ایستگاه مهرآباد شاخص عملکرد مدل را تنها ۵/۵۱ درصد خطا نشان داد که قوی و خوب بوده است. شبیه‌سازی بالاترین دمای ثبت شده برای دوره آتی نزدیک ماه (ژوئیه)

¹ Chapman et al

۸. حق طلب، ن، گودرزی، م، حبیبی نوخندان، م، یآوری، ا، و جعفری، ح. (۱۳۹۲). مدل سازی اقلیم استان های تهران و مازندران با استفاده از مدل اقلیمی LARS-WG و مقایسه تغییرات آن در جبهه های شمالی و جنوبی البرز مرکزی. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۵(۱) (۵۶)، ۳۷-۴۹.

۹. حجازی زاده، ز، اکبری، م، ساسان پور، ف، حسینی، ع، و محمدی، ن. (۱۴۰۱). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بارش های سیل آسا در استان تهران. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۲(۲)، ۸۷-۱۰۵.

۱۰. حشمتی، س، و رضانی اعتدالی، ه. (۱۴۰۰). پیش بینی وضعیت خشک سالی در دوره های آتی با استفاده از مدل LARS-WG (مطالعه موردی: شهرستان کرمانشاه). مجله علمی "آمایش سرزمین"، ۱۳(۲)، ۶۴۷-۶۶۹.

۱۱. خواجه امیری خالیدی، چ، خسروی، م، طاوسی، ت، حمیدیان پور، م، و کیانی مقدم، م. (۱۴۰۱). صحت سنجی عملکرد برون داد مدل اقلیمی CMIP6 با داده های مشاهده ای کرانه های مکران. نشریه هواشناسی و علوم جو، ۱۵(۱)، ۲۲-۴۱.

۱۲. رنجبر سعادت آبادی، ع، بیدختی، ع، و حسینی، س. (۱۳۸۵). آثار جزیره گرمایی و شهرنشینی روی وضع هوا و اقلیم محلی در کلان شهر تهران. محیط شناسی، ۳۲(۳۹).

۱۳. روشنی، ا، و حمیدی، م. (۱۴۰۰). پیش بینی اثرات سناریو های تغییر اقلیم بر دما و بارش بر اساس مدل های CMIP6 (مطالعه موردی: ایستگاه ساری). مدیریت آب و آبیاری، ۱۱(۴)، ۷۸۱-۷۹۵.

۱۴. سلیقه، م. (۱۳۹۴). تغییر آب و هوا و مخاطرات آب و هوایی شهر تهران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۲(۳)، ۱۵-۳۲.

۱۵. سپاسی زنگی آبادی، س، شمسی پور، ع، و حسینی، ع. (۱۴۰۲). پهنه بندی آب و هوای محلی کلان شهر تهران بر پایه ساختار فیزیکی. فصل نامه مطالعات شهری، ۱۲(۴۸).

تغییر اقلیم و تشکیل ستادهای تغییر اقلیم برای کاهش انتشار، توجه به دمای شهری آینده و سازگاری با گرمایش جهانی ضروری می باشد.

۵. مراجع

۱. اصغری سراسکانرود، ص، و زینالی، ب. (۱۳۹۴). مطالعه تاثیرات اقلیمی توسعه شهری در شهرستان تهران. علوم جغرافیایی (جغرافیای کاربردی)، ۱۱(۲۲)، ۵۸-۷۰.
۲. بارانی، ن، و کرمی، آ. (۱۳۹۸). تحلیل روند سالانه پارامترهای اقلیمی دما و بارش در نواحی ده گانه زراعی-اکولوژیکی ایران. علوم محیطی، ۱۷(۴)، ۷۵-۹۰.
۳. بینش، ن، نیک سخن، م، و سارنگ، ا. (۱۳۹۶). آشکارسازی روند تغییرات دما و بارش سالانه و فصلی تهران طی دوره ۱۹۸۴-۲۰۱۴. نیوار، ۴۱(۹۶-۹۷)، ۳۶-۴۵.
۴. بابائیان، ا، مدیریان، ر، خزانه داری، ل، کریمیان، م، کوزه گران، س، کوهی، م، فلامرزی، ی، و ملبوسی، ش. (۱۴۰۰). پیش نگرایی بارش کشور با استفاده از مقیاس کاهی آماری برون داد مدل های CMIP6، پروژه داخلی پژوهشکده اقلیم شناسی، مشهد.
۵. بندار، ح، موسوی بایگی، م، و قهرمان، ب. (۱۴۰۰). بررسی و تفکیک جزیره حرارتی و گرمایش جهانی در دشت مشهد. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۵(۱)، ۱۵۱-۱۳۷.
۶. پناهی، ع، و خرم آبادی، ف. (۱۳۹۹). ارزیابی دقت داده های CSIRO و مدل LARS-WG در شبیه سازی متغیرهای اقلیمی استان آذربایجان شرقی. دگرگونی ها و مخاطرات آب و هوایی، ۱(۲)، ۱۳۹-۱۶۳.
۷. چمانه فر، س، موسوی بایگی، م، بابائیان، ا، و مدرسی، ف. (۱۴۰۱). پیش نگرایی شاخص های حدی بارشی و دمای در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۶ بر اساس برون داد مدل های CMIP6 (مطالعه موردی: مشهد). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۶(۵)، ۹۶۳-۹۷۶.

۱۶. سادات طباطبایی، ش. (۱۳۹۲). بررسی مدیریت شهری - زیست محیطی تهران در طی سه دوره تاریخی قاجار، پهلوی، انقلاب اسلامی. فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۲(۸۸)، ۶۹-۷۴.
۱۷. شکیبیا، ع، ضیائیان فیروزآبادی، پ، عاشورلو، د، و نامداری، س. (۱۳۸۸). تحلیل رابطه کاربری و پوشش اراضی و جزایر حرارتی شهر تهران، با استفاده از داده‌های ETM+. نشریه سنجش از دور و GIS ایران، ۱(۱).
۱۸. صفرزاده، ط. (۱۴۰۰). تحلیل تغییرات زمانی شدت جزیره حرارتی شبانه شهر تهران. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۲(۸)، ۵۵-۶۵.
۱۹. طاوسی، ت، خواجه امیری خالدی، ج، و سالاری فنودی، م. (۱۳۹۹). بازنگری طبقه‌بندی اقلیمی کشور ایران بر پایه متغیرهای اقلیمی. مدیریت بیابان، ۸(۱۶)، ۱۷-۳۶.
۲۰. عزیزی، ق. (۱۳۸۳). تغییر اقلیم (چاپ اول)، تهران: نشر قومس.
۲۱. علی محمدی، ع، و غفاریان، ح. (۱۳۸۸). تحلیل وضعیت اقلیم استان تهران معاونت برنامه‌ریزی استان داری تهران: طرح تهیه و تدوین برنامه آمایش استان تهران، مطالعات منابع طبیعی و محیط زیست.
۲۲. عزیزی، ق، شمسی‌پور، ع، مهدیان ماهفروزی، م، و میری، م. (۱۳۹۲). تأثیرپذیری شدت جزیره گرمایی شهری تهران از الگوهای همدیدی جو. محیط شناسی، ۳۹(۴)، ۵۵-۶۶.
۲۳. فدایی، ه. (۱۳۹۹). بررسی جزایر گرمایی شهر تهران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۹(۱۱۶)، ۱۱۹-۱۳۰.
۲۴. میرزایی حسنلو، ا، عبقری، ه، و عرفانیان، م. (۱۳۹۹). تحلیل روند بارندگی و شاخص تمرکز بارش در ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه ارومیه. نشریه جغرافیا و توسعه، ۱۸(۵۹)، ۲۱-۴۰.
۲۵. ملکی، س، شجاعیان، ع، و فرهنگند، ق. (۱۳۹۷). ارزیابی تغییرپذیری فضایی - زمانی جزایر حرارتی در ارتباط با کاربری‌های شهری - مطالعه موردی: شهر ارومیه.
- فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۷(۱۰۵)، ۱۹۷-۱۸۳.
۲۶. محمدی، ن (۱۴۰۰). اثرات تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا در استان تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی تهران. بازیابی از: <https://ganj.irandoc.ac.ir>
۲۷. محمدی ن، حجازی‌زاده، ز. (۱۴۰۲). بررسی اثرات گرمایش جهانی بر افزایش ریسک آتش‌سوزی جنگل‌های ایران. دانش پیشگیری و مدیریت بحران، ۱۳(۳): ۳-۳.
۲۸. مقیمی، ا، محمدی، ح، و نجفیان گرجی، م. (۱۳۹۶). ارزیابی روند تغییرات دما، الگوی جزیره حرارتی و پوشش گیاهی ایام گرم شهر تهران. جغرافیای طبیعی، ۱۰(۴ (پیاپی ۳۸))، ۱-۱۸.
۲۹. منصور، س، خالدی، ش، برنا، ر، و اسدیان، ف. (۱۴۰۰). نقش جزیره گرمایی در روند تغییرات دمایی منطقه یک شهری تهران. جغرافیای سرزمین، ۱۸(۷۰)، ۸۴-۶۵.
۳۰. مجنون توتاخانه، ع، و رضانی، م. (۱۳۹۸). بررسی و ارزیابی وضعیت جزیره حرارتی کلان‌شهر تهران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. نشریه محیط زیست طبیعی، ۷۲(۱)، ۴۳-۲۹.
۳۱. مرکز پژوهش‌های اتاق ایران. (۱۴۰۲). تغییرات اقلیمی و آینده تجارت جهانی، بخش مدیریت اقتصاد کلان و آینده‌پژوهی.
۳۲. نجفیان گرجی، م، مقیمی، ا، و محمدی، ح. (۱۳۹۶). ارزیابی روند تغییرات دما، الگوی جزیره حرارتی و پوشش گیاهی ایام گرم شهر تهران. جغرافیای طبیعی، ۱۰(۳۸)، ۱-۱۸.
۳۳. یرگین، د. (۲۰۲۱). انرژی، آب و هوا و نزاع ملت‌ها، مترجم: ابوالفضل مالکی (۱۴۰۱). تهران: ستاره جاوید.
۳۴. یوسفی، ی. (۱۳۹۹). بررسی تغییرپذیری دمایی فضاها شهری بابلسر برای شناخت جزیره حرارتی. مطالعات ساختار و کارکرد شهری، ۷(۲۵)، ۱۷۹-۱۹۱.

- P.M. Midgley (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
44. Johns, T. C., Durman, C. F., Banks, H. T., Roberts, M. J., McLaren, A. J., Ridley, J. K., and Searl, Y. 2006. The new Hadley Centre climate model (HadGEM1): Evaluation of coupled simulations. *Journal of climate*, 19(7), 1327-1353.
 45. Li, G., Zhang, X., Mirzaei, P. A., Zhang, J., and Zhao, Z. 2018. Urban heat island effect of a typical valley city in China: Responds to the global warming and rapid urbanization. *Sustainable cities and society*, 38, 736-745.
 46. Madec, G., and M. Imbard. 1996. A global ocean mesh to overcome the north pole singularity. *Climate Dynamics*, vol 12, p381-388.
 47. McCarthy, M. P., Best, M. J., and Betts, R. A. 2010. Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical research letters*, 37(9).
 48. Pohlert, T. 2020. Non-parametric trend tests and change-point detection. *CC BY-ND*, 4, 1-18.
 49. Rao, P., Tassinari, P., and Torreggiani, D. 2023. Exploring the land-use urban heat island nexus under climate change conditions using machine learning approach: A spatio-temporal analysis of remotely sensed data. *Heliyon*, 9(8).
 50. R, Fareeq Hussein and D. A., Bleej. 2022. Spatiotemporal analysis of relative humidity using gis, idw interpolation method and mann-kendal test for kurdistan region of Iraq, *International Journal of Applied Science and Engineering Review (IJASER)* 3 (6): 153-172.
 51. Stewart, I. D., and Mills, G. 2021. *The Urban Heat Island*. Elsevier, <https://doi.org/10.1016/C2017-0-02872-0>
 52. Sachindra, D. A., Ng, A. W. M., Muthukumaran, S., and Perera, B. J. C. 2016. Impact of climate change on urban heat island effect and extreme temperatures: a case-study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(694), 172-186.
 53. Sharma, R., Hooyberghs, H., Lauwaet, D., and De Ridder, K. 2019. Urban heat island and future climate change—Implications for Delhi's heat. *Journal of Urban Health*, 96, 235-251.
 54. Semenov, M.A. and Barrow, A. 2002 LARS-WG: A Stochastic Weather
 35. Alizadeh-Choobari, O., Ghafarian, P., and Adibi, P. 2016. Inter-annual variations and trends of the urban warming in Tehran. *Atmospheric Research*, 170, 176-185.
 36. Andrade, C., Fonseca, A., and Santos, J. A. 2023. Climate Change Trends for the Urban Heat Island Intensities in Two Major Portuguese Cities. *Sustainability*, 15(5), 3970.
 37. Chapman, S., Watson, J. E., Salazar, A., Thatcher, M., and McAlpine, C. A. 2017. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecology*, 32, 1921-1935.
 38. Faqe Ibrahim, G. R. 2017. Urban land use land cover changes and their effect on land surface temperature: Case study using Dohuk City in the Kurdistan Region of Iraq. *Climate*, 5(1), 13.
 39. Hyman, A. H. 1996. Information presentation for new sensors: a focus on selected sensors of the Earth Observing System (EOS). *Progress in physical geography*, 20(2), 146-158.
 40. Huang, Q., and Lu, Y. 2015. The effect of urban heat island on climate warming in the Yangtze River Delta urban agglomeration in China. *International journal of environmental research and public health*, 12(8), 8773-8789.
 41. He, F., Liu, L., Huang, Y., Bedra, K. B., and Zhang, M. 2023. Investigating the Spatial Heterogeneity of Urban Heat Island Responses to Climate Change Based on Local Climate Zones. *Sustainability*, 15(7), 6298.
 42. IPCC. 2007. *Climate change 2007: Synthesis report*. In *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Pachauri RK, Reisinger A. (eds.) IPCC: Geneva, Switzerland. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm (accessed 1 February 2014).
 43. IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and

58. World Meteorological Organization. 2024. State of the Climate in Asia 2023, Geneva. Available at <https://wmo.int/publication-series/state-of-climate-asia-2023>
59. Zargari, M., Mofidi, A., Entezari, A., and Baaghdeh, M. 2024. Climatic comparison of surface urban heat island using satellite remote sensing in Tehran and suburbs. Scientific Reports, 14(1), 643.
60. <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadgem3#:~:text=The%20HadGEM3%20family%20includes%20a,ocean%20biology%20and%20atmospheric%20chemistry>.
- Generator for Use in Climate Impact Studies. Hertfordshire, UK.
55. Salami, T., Maatta, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T., and Amnell, T. 2002. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates. Publications on Air Quality, (31).
56. Thanvisitthapon, N., Nakburee, A., Khamchiangta, D., and Saguansap, V. 2023. Climate change-induced urban heat Island trend projection and land surface temperature: A case study of Thailand's Bangkok metropolitan. Urban Climate, 49, 101484.
57. While, A., and Whitehead, M. 2013. Cities, urbanisation and climate change. Urban Studies, 50(7), 1325-1331.