

Simulation and identification of the best climate models for the effects of temperature and precipitation changes on Tehran metropolis

Mohammad Reza Yousefi¹; Shahriar Khaledi^{2*}, Farideh Asadian³

1. PhD Student, Department of Geography, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
- *2. Professor, Department of Geography, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Department of Geography, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Email Address: s-khaledi@sbu.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:
2024/12/27
Revised Date:
2025/02/03
Accepted Date:
2025/03/10
Published Date:
2025/07/09

Keywords:
Urban climate,
Precipitation,
Simulation,
,SSP5_8.5
Temperature.

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the performance of suitable models for assessing climate change in the Tehran metropolis. For this purpose, data from five synoptic stations in Tehran were analyzed using seven climate models from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) for the period 2030 to 2100. The accuracy of the models and future predictions were assessed using the Google Earth Engine system and a neural network algorithm. Changes in mean precipitation across different stations in Tehran under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios were analyzed for the 2030–2100 period. The results indicate that the CNRM-CM6-1 model showed the best performance at Chitgar, Doushan Tappeh, and Mehrabad stations, while the EC-Earth3 model exhibited higher accuracy at the Geophysics station. Precipitation changes across stations reveal an increase in some stations and a decrease in others. According to the SSP2-4.5 scenario, the FGOALS-g3 model demonstrated the best performance in simulating the mean maximum temperature across various Tehran stations. At the Chitgar station, the highest mean temperature in July reached 38.73°C, with a deviation of approximately 2.73°C from observed values. Similarly, under the SSP5-8.5 scenario, the FGOALS-g3 model exhibited comparable performance, with maximum summer temperatures ranging from 38°C to 39°C, while the CanESM5 model performed the weakest. Simulations of the mean minimum temperature across Tehran's stations revealed that the FGOALS-g3 model achieved higher accuracy in most stations. Across the stations, the highest and lowest minimum temperatures were simulated for July and June, respectively, by most models. Additionally, the difference between observed and simulated temperatures in most stations was less than 1°C.

Cite this article: Mohammad Reza Yousefi, Shahriar Khaledi, Farideh Asadian (2025). Simulation and identification of the best climate models for the effects of temperature and precipitation changes on Tehran metropolis, Journal of Environmental Sciences Studies, 10(2), Pages 9970 – 9985.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Human-induced climate change, driven by excessive use of fossil fuels, land-use changes, and population growth, has become one of the most critical global issues. These changes are particularly significant in urban areas, given the rapid population growth and increasing demand for various resources. Recent studies show that 55% of the global population resides in cities, a figure expected to rise to 68% by 2050. In this context, climate change will have major impacts on urban life, social and economic threats, and the occurrence of natural disasters. This study examines climate change in the metropolis of Tehran using advanced GCM models for future periods. The goal of this research is to analyze the effects of predicted changes in precipitation and temperature, which can assist policymakers in planning and mitigating the impacts of these changes. The use of CMIP6 models as advanced tools for more accurate future simulations, especially in long-term time scales, is essential in this study. The results of this research could help reduce the vulnerability of Tehran to climate change and improve urban planning strategies.

Materials and methods

This study focuses on simulating climate changes in Tehran, including precipitation, minimum and maximum temperatures, using the Google Earth Engine platform. For these simulations, neural network algorithms and classical methods have been employed, and their results have been calculated for five different stations over the period from 2030 to 2100. The data is divided into two categories: observational data from synoptic stations (1992-2018) and forecasted data from CMIP6 models for the future period. Two scenarios, SSP2-4.5 and SSP5-8.5, have been considered for evaluating climate changes. Model validation is carried out using the coefficient of determination (R^2), which indicates the correlation between observational data and model outputs. The use of Google Earth Engine, due to its capabilities in processing satellite data on a large scale and handling vast amounts of data, has enabled more accurate simulations. This research contributes to analysing and predicting future climate changes in Tehran.

Results and discussion

The analysis of climate change impacts in Tehran's metropolitan stations highlights significant variations in precipitation and temperature patterns. Seasonal precipitation is projected to increase in Chitgar and Doushan Tappeh during autumn and winter, consistent with Hassani et al. (2023) using CMIP5 models, likely due to intensified precipitation systems. This rise may benefit water resources in western Tehran. However, central and northern stations like Geophysics and Shemiran indicate reduced precipitation, potentially threatening groundwater availability. Maximum temperatures are expected to rise across all stations, particularly under the SSP5_8.5 scenario, during summer and winter, aligning with Ghasemzadeh & Sharifi (2020). This warming trend could strain urban cooling systems and amplify the urban heat island effect, especially in central areas. The CNRM-CM6-1 model has shown superior accuracy for regional simulations and future projections. These findings emphasize the need for integrated policies addressing water management, urban heat mitigation, and climate-adaptive infrastructure to tackle climate change effectively.

Conclusion

This study investigates the simulation of average minimum temperatures across various stations in the Tehran metropolis for the future period of 2030–2100 under SSP2_4.5 and SSP5_8.5 climate change scenarios. The findings indicate that different models exhibit varying performance in simulating temperatures. At Chitgar station, the FGOALS-g3, CMCC-ESM2, and ACCESS-CM2 models demonstrated the best performance in simulating the average minimum temperature. At Doushan Tappeh station, the FGOALS-g3 model provided the highest accuracy in minimum temperature simulation. Similarly, the FGOALS-g3 model outperformed others at Geophysics and Mehrabad stations, where the differences between observed and simulated values were less than 1°C for most months. At Shemiran station, the CanESM5 model exhibited higher accuracy in minimum temperature simulation. Overall, the study revealed that the FGOALS-g3 and CanESM5 models performed better in simulating temperatures in the Tehran metropolis. Additionally, the results indicate that the highest minimum temperatures are typically observed in July, while the lowest are recorded in June.



شبیه‌سازی و شناسایی بهترین مدل‌های آب‌وهوایی برای تأثیرات تغییرات دما و بارش بر کلانشهر تهران

محمد رضا یوسفی^۱، شهریار خالدی^{۲*}، فریده اسدیان^۳

۱- دانشجوی دکتری گروه جغرافیا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استاد گروه جغرافیا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار گروه جغرافیا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: s-khaledi@sbu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۰/۰۷

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۱۲/۲۰

تاریخ انتشار:

۱۴۰۴/۰۴/۱۸

کلید واژه‌ها:

اقلیم شهری،

بارش،

شبیه‌سازی،

SSP5_8.5

دما.

هدف این پژوهش بررسی عملکرد مدل‌های مناسب جهت ارزیابی تغییرات آب‌وهوای در کلانشهر تهران است. برای این منظور، داده‌های پنج ایستگاه سینوپتیکی تهران با استفاده از هفت مدل آب‌وهوایی گزارش ششم (CMIP6) در دوره زمانی ۲۰۳۰ تا ۲۱۰۰ مورد تحلیل قرار می‌گیرند. ارزیابی دقت مدل‌ها و پیش‌بینی‌های دوره آتی از طریق سامانه گوگل ارث انجین و با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی انجام گردید. تغییرات میانگین بارش در ایستگاه‌های مختلف کلانشهر تهران تحت سناریوهای SSP2.4.5 و SSP5_8.5 برای دوره آتی ۲۱۰۰-۲۰۳۰ نتایج نشان می‌دهند که مدل CNRM-CM6-1 بهترین عملکرد را در ایستگاه‌های چیتگر، دوشان تپه و مهرآباد دارد، در حالی که مدل EC-Earth3 برای ایستگاه ژئوفیزیک دقت بالاتری دارد. تغییرات بارش در ایستگاه‌های مختلف نشان‌دهنده افزایش بارش در برخی ایستگاه‌ها و کاهش آن در دیگر ایستگاه‌ها است. میانگین بیشینه دمایی طبق سناریو SSP2_4.5، مدل FGOALS-g3 بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی میانگین بیشینه دمایی در ایستگاه‌های مختلف تهران نشان می‌دهد. برای ایستگاه چیتگر، بیشینه میانگین دمایی در ماه جولای به ۳۸،۷۳ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و اختلاف دما با مقادیر مشاهداتی حدود ۲،۷۳ درجه است. در سناریو SSP5_8.5 نیز، مدل FGOALS-g3 عملکرد مشابهی دارد و مقدار بیشینه دمایی برای ایستگاه‌ها در ماه‌های تابستان بین ۳۸ تا ۳۹ درجه سانتی‌گراد متغیر است، در حالی که مدل CanESM5 ضعیف‌ترین عملکرد را دارد. نتایج شبیه‌سازی میانگین کمینه‌ی دمای ایستگاه‌های مختلف تهران نشان داد که مدل FGOALS-g3 در اکثر ایستگاه‌ها دقت بالاتری در شبیه‌سازی دما دارد. در ایستگاه‌های مختلف، بالاترین و پایین‌ترین دمای کمینه در ماه‌های جولای و ژوئن به ترتیب برای بیشتر مدل‌ها شبیه‌سازی شده است. همچنین، اختلاف بین دماهای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در اکثر ایستگاه‌ها کمتر از ۱ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

ناشر: انتشارات فن پایا

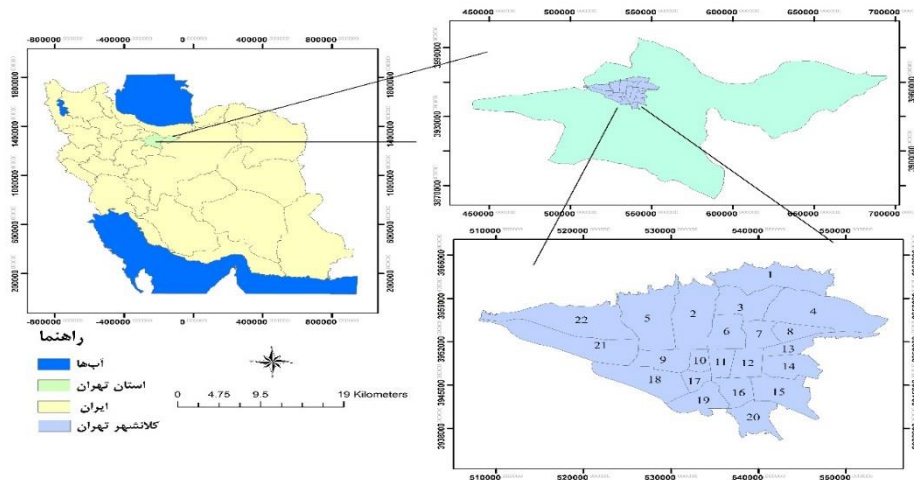
DOI: 10.22034/jess.2025.495931.2331

استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری اراضی، رشد جمعیت جهانی، و توسعه فزاینده فعالیت‌های صنعتی به منظور تأمین رفاه و نیازهای جمعیت، از زمان انقلاب صنعتی تاکنون موجب تغییرات قابل توجهی در اقلیم سیاره زمین شده است؛ پدیده‌ای که از آن به عنوان «تغییرات آب‌وهوایی» یاد می‌شود. تغییرات آب‌وهوایی در دو دهه اخیر به یکی از گسترده‌ترین و مهمترین موضوعات مورد بحث در حوزه شهری تبدیل شده است. شهرها، به‌عنوان جزئی از سیستم اقلیمی، نقشی چشمگیر در این تغییرات ایفا می‌کند. به‌ویژه در دوران معاصر، رشد جمعیت و افزایش نیاز به منابع آب و غذا منجر به مصرف فزاینده انرژی‌های فسیلی، آلودگی و گرمایش جهانی که همگی باعث اختلال و دگرگونی در سیستم آب‌وهوایی زمین شده‌اند. این اختلالات روز به روز تسریع و ادامه خواهد داشت، به ویژه از نظر تغییرات فعالیت‌های انسانی تخمین زده می‌شود که ۵۵ درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کنند و بر اساس پیش‌بینی‌های سازمان ملل، انتظار می‌رود جمعیت شهری جهان تا سال ۲۰۵۰ به ۶۸ درصد یا ۶٫۵ میلیارد نفر برسد. برنامه‌ریزی و اجرای ضعیف شهری و حکمرانی در بسیاری از کشورهای در حال توسعه تغییرات آب‌وهوایی را آسیب پذیرتر کرده است. در نتیجه، مردم شهرها در هنگام وقوع بلایای مرتبط با تغییرات آب‌وهوایی در معرض بیشتری آسیب پذیری قرار خواهند گرفت. این آب‌وهوایی شهری پایدار و توسعه اجتماعی و اقتصادی شهرها را تهدید می‌کند. و تغییرات آب و هوایی باعث می‌شود که بلاها شدیدتر و مکرر باشد. از طرفی افزایش دمای اقیانوس‌ها و جو زمین به افزایش شدت انواع طوفان‌ها کمک می‌کند. همانطور که ترکیب متفاوتی آنها تغییر می‌کند، شدت آنها نیز تغییر می‌کند. در نتیجه قبل از تشدید بیشتر و در معرض قرار گرفتن شهر در برابر تغییرات آب‌وهوایی نیاز هست که راهکارهای برای ارزیابی و اقداماتی برای این تغییرات آب‌وهوایی بکار گرفته شود. بنابراین در حال حاضر مدل‌های گردش عمومی جهان (GCM) تنها ابزاری هستند که اثر تغییرات آب‌وهوایی در سطح جهانی را برای عناصر اتمسفری در شبکه‌های بزرگ مکانی شبیه‌سازی می‌کنند. این مدل‌ها عناصر اتمسفری را در شبکه‌هایی به ابعاد بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر شبیه‌سازی می‌کنند. مدل گردش کلی جو یک مدل ریاضی است که بر اساس روابط ریاضی و دینامیکی جو طراحی شده است و برای شبیه‌سازی شرایط در جو، اقیانوس و یا هر دو به کار می‌رود. نسخه‌های متعددی از مدل‌های آب‌وهوایی توسعه یافته‌اند که هر یک برای مقیاس‌های زمانی مختلف، از دهه‌ها تا قرن‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. تاکنون مدل‌های آب‌وهوایی متنوعی ارائه شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل‌های مربوط به گزارش چهارم (CMIP4) و گزارش پنجم (CMIP5) اشاره کرد. اخیراً نیز نسل جدیدی از این مدل‌ها تحت عنوان CMIP6، به‌عنوان پیشرفته‌ترین نسخه در گزارش ششم معرفی شده‌اند، که امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر دوره‌های آینده را فراهم می‌کنند. پژوهش‌های متعددی با استفاده از مدل‌های آب‌وهوایی به بررسی و ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر الگوهای بارش و رواناب پرداخته‌اند. به عنوان نمونه Yang et al., (2024) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر تغییرات آب و هوایی بر تاب‌آوری جوامع در امتداد شیب‌های شهری-روستایی شانگهای پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از داده‌های CMIP6 و روش ریزمقیاس‌سازی Delta، خطرات آب‌وهوایی شدید برای سه جامعه مورد ارزیابی قرار گرفته دادند و مدل «فشار-وضعیت-پاسخ-پیش‌بینی» (PSRP) برای ارزیابی تاب‌آوری آب‌وهوایی در حال حاضر و دوره‌های آینده (نزدیک: ۲۰۲۵-۲۰۳۴، میانه: ۲۰۳۵-۲۰۴۴، بلندمدت: ۲۰۴۵-۲۰۵۴) توسعه داده‌اند. Oyelakin et al., (2024) در مطالعه‌ای تأثیر تغییرات آب‌وهوایی را بر سیلاب‌های شهرهای چین را با استفاده از داده‌های CMIP5 و CMIP6 بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که وقایع حدی سیلابی در دوره‌های آینده به‌ویژه در سال‌های ۲۰۷۰-۲۰۸۰ افزایش بی‌سابقه‌ای خواهند داشت. Nandi, & Swain (2023) در پژوهشی به تحلیل ویژگی‌های امواج گرما در دوره‌های تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۱۴)، آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۵) و آینده دور (۲۰۵۶-۲۰۹۰) را در سه شهر پرجمعیت جنوب هند، یعنی بنگلور، چنای و حیدرآباد پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تعداد روزهای موج گرما در سال‌های اخیر در این شهرها افزایش یافته و این روند در آینده تشدید خواهد شد، به‌ویژه در سناریوی SSP5-8.5 که نشان‌دهنده اثرات مستقیم فعالیت‌های انسانی بر افزایش فراوانی امواج گرما است. Arunrat et al., (2022) در پژوهشی تأثیر تغییرات آب‌وهوایی را بر عملکرد محصولات کشاورزی و نیاز آبی آن‌ها در شمال تایلند بررسی نمودند. نتایج پیش‌بینی آن‌ها نشان داد که عملکرد برنج در دوره‌های آینده تحت سناریو SSP2_4.5 افزایش و تحت SSP5_8.5 کاهش خواهد یافت. حسنی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی به پیش‌بینی تغییرات بارش ناشی از تغییر اقلیم و ارزیابی تأثیر آن بر رواناب شهری در منطقه ۱۰ شهرداری تهران پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در سناریوی بدبینانه (SSP5_8.5)، افزایش بارش‌های حدی باعث افزایش حجم رواناب و آب‌گرفتگی می‌شود، در حالی که در سناریوی خوش‌بینانه (SSP2_4.5)، کاهش بارش‌ها غلظت ذرات جامد را بیشتر می‌کند. Usta et al., (2022) در مطالعه‌ای از یک مجموعه ۱۳ عضوی مدل‌های CMIP5 برای تحلیل تغییرات آب‌وهوایی آینده ایران در خصوص دمای سطحی هوا استفاده کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین روند افزایش دما در ایران در دوره ۲۰۰۶-۲۰۵۰ با نرخ 0.74 ± 0.74 تا 4.72 ± 0.82 درجه سانتی‌گراد در هر قرن رخ داده است. همچنین، گرمایش در مناطق گرم‌تر ایران نسبت به مناطق سرد بیشتر مشاهده شد. این مطالعه بر لزوم تحقیق بیشتر در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای تأکید می‌کند. Shakeri et al., (2021) در پژوهشی تأثیرات تغییر آب و هوایی را بر متغیرهای اقلیمی مهم در تهران، ایران، برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ ارزیابی کرده‌اند. آن‌ها از هشت مدل CMIP5 تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای پیش‌بینی هفت متغیر آب‌وهوایی بکار بردند. نتایج آن‌ها نشان داد بیشترین افزایش در دما و سرعت باد برای سناریو RCP8.5 پیش‌بینی شده است. همچنین، پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که در تابستان دما افزایش قابل توجهی خواهد داشت، در حالی که بارش در زمستان و اوایل بهار افزایش خواهد یافت. بنابر اهمیت موضوع اثرات آب‌وهوایی و همچنین مرکزیت پایتختی کلانشهر تهران محققین در این پژوهش بر آن داشته تا بررسی تغییرات آب‌وهوایی را در قالب عناصر بارش، کمینه و بیشینه دمایی برای دوره آتی ۲۰۳۰ تا ۲۱۰۰ بپردازند. محققین در این پژوهش همچنین سعی کرده‌اند که از به روزترین مدل‌های آب‌وهوایی همراه با روش‌های روز دنیا استفاده نمایند (در پژوهش‌های قبلی به ندرت استفاده شده است) تا اثرات این تغییرات با دقت و ارزیابی بهتری انجام گیرد. با بررسی اقلیم شهری و اثرات آن بر کلانشهر تهران مسولان و برنامه‌ریزان در حوزه‌های مختلف از این نتایج استفاده می‌کنند. و این اثرات را در چهارچوب هشدارها، برنامه‌ها و طرح‌های در راستای حفظ تغییرات آب‌وهوایی کلانشهر تهران در نظر خواهند گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

• محدوده مورد مطالعه

کلانشهر تهران در دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز واقع شده است. این کلانشهر در طول‌های جغرافیایی بین ۵۱ درجه و ۲ دقیقه شرقی تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی، به طول تقریبی ۵۰ کیلومتر، و در عرض‌های جغرافیایی بین ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه شمالی تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی، به عرض تقریبی ۳۰ کیلومتر گسترده شده است. ارتفاع تهران از سطح دریا در بالاترین نقطه خود در شمال، حدود ۱۸۰۰ متر و در پایین‌ترین نقطه در جنوب، حدود ۹۵۰ متر است. به طور کلی، کلانشهر تهران بین نواحی کویری در جنوب و مناطق کوهستانی در شمال قرار دارد (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۰). موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. تأثیر شرایط و وضعیت عناصر آب و هوای بر مسئله کنترل تغییر اقلیم در محیط شهری از جنبه‌های مختلف قابل توجه است. مهم‌ترین پارامترهای پارامترهای اولیه و تأثیر گذار بارش، کمینه دمایی و بیشینه دمایی است که در تعیین وضعیت تغییرات آب‌وهوایی در محیط شهری به شمار می‌آید. این پارامترها تحت تأثیر عرض جغرافیایی، توپوگرافی محل و فصل سال قرار دارند.



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه

این پارامترهای مؤثر در زمینه تهویه مطلوب هوا با ایجاد پخش و پراکنش تغییرات آب‌وهوایی و نیز در حذف آثار آن از طریق شستشوی هوا از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران، ۱۳۹۳). با توجه به اهمیت این موضوع، در ادامه با استفاده از داده‌های بلندمدت آب‌وهوایی، به تحلیل سه پارامتر مهم بارش، کمینه و بیشینه دمایی که در تعیین اقلیم شهری مؤثر هستند، پرداخته شده است تا وضعیت اقلیم کلانشهر تهران از نظر تغییرات آب‌وهوایی در محیط شهری بررسی گردد.

• روش پژوهش

برای شبیه‌سازی عناصر آب‌وهوایی شامل بارش، دمای کمینه و بیشینه در کلانشهر تهران (برای پنج ایستگاه: چیتگر، دوشان‌تپه، ژئوفیزیک، شمیران و مهرآباد)، از سامانه ابری گوگل ارث انجین (Google Earth Engine) استفاده شد. در این سامانه، کد نویسی با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مبتنی بر شبکه‌های عصبی و روش‌های کلاسیک انجام شد. نتایج حاصل از این الگوریتم‌ها در شکل ۲ نشان داده شده و جزئیات هر الگوریتم در جداول ۱ و شکل ۲ ارائه گردیده است. محصول ماهواره‌ای انتخابی به دلیل ویژگی‌هایی مانند تفکیک زمانی ساعتی و دقیقه‌ای، به‌روز بودن و مدت زمان مناسب برای ارائه داده‌های هواشناسی، و همچنین تفکیک فضایی بالا، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای این شبیه‌سازی انتخاب گردیده است.

جدول ۱. ترکیب مدل‌های استفاده شده عناصر آب و هوایی در کلانشهر تهران

ردیف	CMIP6 Model	توضیحات	رزولوشن
۱	ACCESS-CM2	Common Scientific and Industrial Research Organization, Australian Research Council Centre of Climate System Science, Australia	۱/۳*۱/۹
۲	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	۱/۱۲*۱/۱۲
۳	CANESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	۲/۸*۲/۸
۴	CNRM-CM6-1	Center National de Recherches Meteorologiques, Center European	۱/۴*۱/۴
۵	CMCC-ESM2	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambia menticlimatici, Italy	۱/۳*۰/۹
۶	EC-Earth3	A European community Earth System Model	۲/۵*۲/۵
۷	FGOALS-g3	Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System-g3	۲/۵*۲/۵

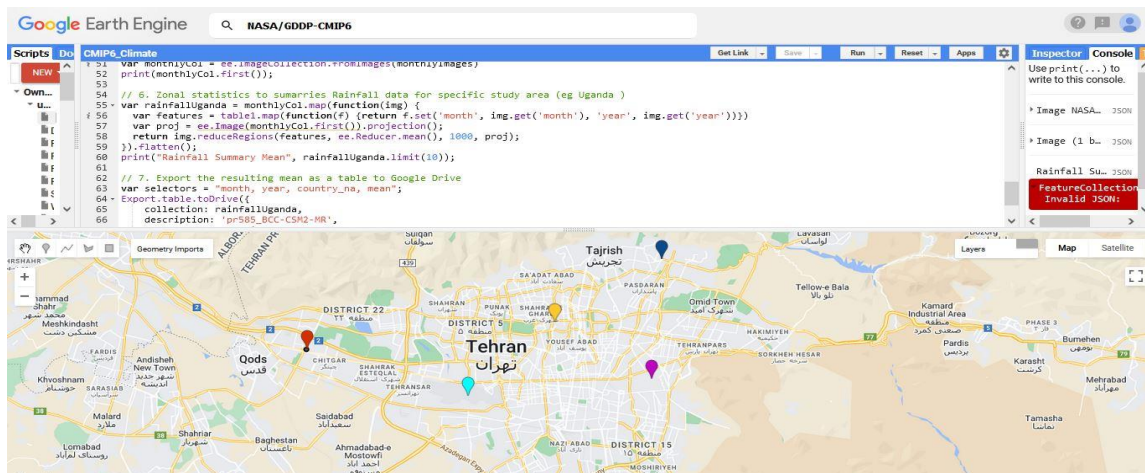
این انتخاب، امکان بررسی دقیق‌تر و جامع‌تر تغییرات آب و هوایی را فراهم آورده است. پس از انتخاب محصولات مناسب، با کدنویسی آن‌ها در محیط وب (Google Earth Engine (GEE) که از طریق نشانی <https://code.earthengine.google.com> در دسترس است، شبیه‌سازی‌ها انجام شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها مقدار عناصر آب و هوایی را در طول دوره آماری ۲۰۳۰-۲۱۰۰ برای ایستگاه‌های مطالعاتی محاسبه کرده است. این شبیه‌سازی‌ها کمک می‌کند تا دیدگاه بهتری نسبت به تغییرات آب و هوایی آینده و تأثیرات آن‌ها در منطقه مورد مطالعه به‌دست آید.

داده های مورد استفاده

داده های مورد استفاده شامل کمینه دمای روزانه، کمینه دمای روزانه و بارش می باشند. این داده ها به دو دسته تقسیم می شوند: الف). به منظور شبیه سازی تغییرات آب و هوایی در کلانشهر تهران از آمار ایستگاه های سینوپتیک سازمان هواشناسی استفاده گردید. این داده ها به صورت میلادی از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۸ می باشند.

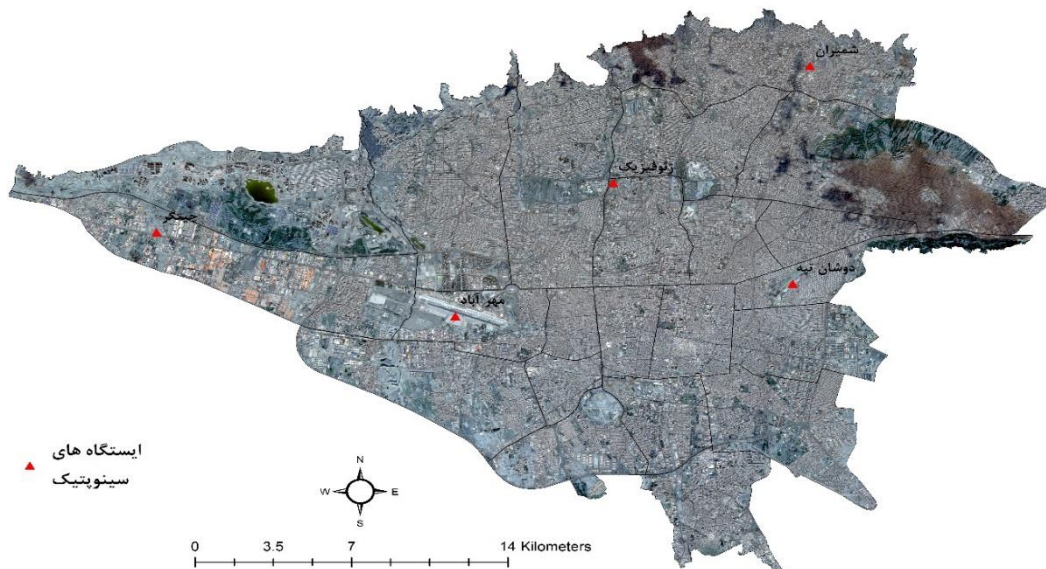
جدول ۲. مشخصات باند محصول پیش بینی تغییرات آب و هوایی (۲۱۰۰-۱۹۵۰)

Band	ImageCollection	Resolution (m)	Value		Units	Dataset Availability
			Min	Max		
Pr	NASA/GDDP-CMIP6	27830	0*	0.0083*	kg/m ² /s	1950-01-01T00:00:00Z -2100-12-31T00:00:00Z
tasmin			163.66*	334.92*	K	
tasmax			202.09*	352.77*		



شکل ۲. نمای از شبیه سازی عناصر آب و هوایی با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین

ب). داده های دوره آبی ۲۰۳۰ تا ۲۰۱۰۰ که برای مدل آب و هوایی گزارش ششم IPCC (CMIP6) دریافت شده است. این داده ها برای ۵ ایستگاه چیتگر، شمیران، ژئوفیزیک، مهرآباد و دوشان تپه بکار گرفته شده است. موقعیت مکانی ایستگاه های منتخب در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی ایستگاه های سینوپتیک کلانشهر تهران

سناریوهای مورد استفاده در پژوهش

در این تحقیق برای ارزیابی تغییرات آب‌وهوایی در شهر تهران، از داده‌های مدل‌های مجموعه CMIP6 که در گزارش ششم IPCC معرفی شده‌اند، استفاده شده است. برای انجام این ارزیابی، از دو سناریوی انتشار SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شده است که معادل سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در مجموعه مدل‌های CMIP5 می‌باشند.

سامانه گوگل ارث انجین

گوگل ارث انجین یک سامانه تحت وب است که به صورت رایگان و متن‌باز، امکانات پردازش داده‌های ماهواره‌ای را در مقیاس وسیع و با حجم‌های زیاد فراهم می‌کند. این سامانه از زبان‌های برنامه‌نویسی جاوا (Java) و پایتون (Python) پشتیبانی می‌کند و توانسته است فرآیندهای پردازش تصاویر ماهواره‌ای را در سال‌های اخیر بسیار تسهیل کند. ابزارهای مبتنی بر محاسبات ابری برای پردازش داده‌های جغرافیایی در مقیاس‌های بزرگ طراحی شده‌اند که گوگل ارث انجین یکی از این پلتفرم‌ها است. پردازش این تصاویر نیازمند دریافت نقشه‌های حجمی و متعدد از منابع مختلف است که زمان‌بر و نیازمند سخت‌افزار قدرتمند است، بنابراین اهمیت استفاده از سامانه GEE افزایش می‌یابد. در این تحقیق برای اعتبارسنجی مدل‌های آب‌وهوایی، از شاخص آماری ضریب تبیین (R^2) استفاده شده است. ضریب تبیین یکی از معیارهای متداول در اعتبارسنجی آماری است که نشان‌دهنده میزان همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های برآوردی مدل است.

ضریب تبیین (R^2)

محدوده مقدار: مقدار این شاخص بین ۰ و ۱ متغیر است. هرچه مقدار R^2 به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده همبستگی قوی‌تر بین داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی است.

معنی مقدار: اگر R^2 برابر ۱ باشد، یعنی مدل به طور کامل توانسته تغییرات داده‌های مشاهده‌ای را توضیح دهد. اگر R^2 برابر صفر باشد، مدل نتوانسته است هیچ‌کدام از تغییرات داده‌های مشاهده‌ای را پیش‌بینی کند.

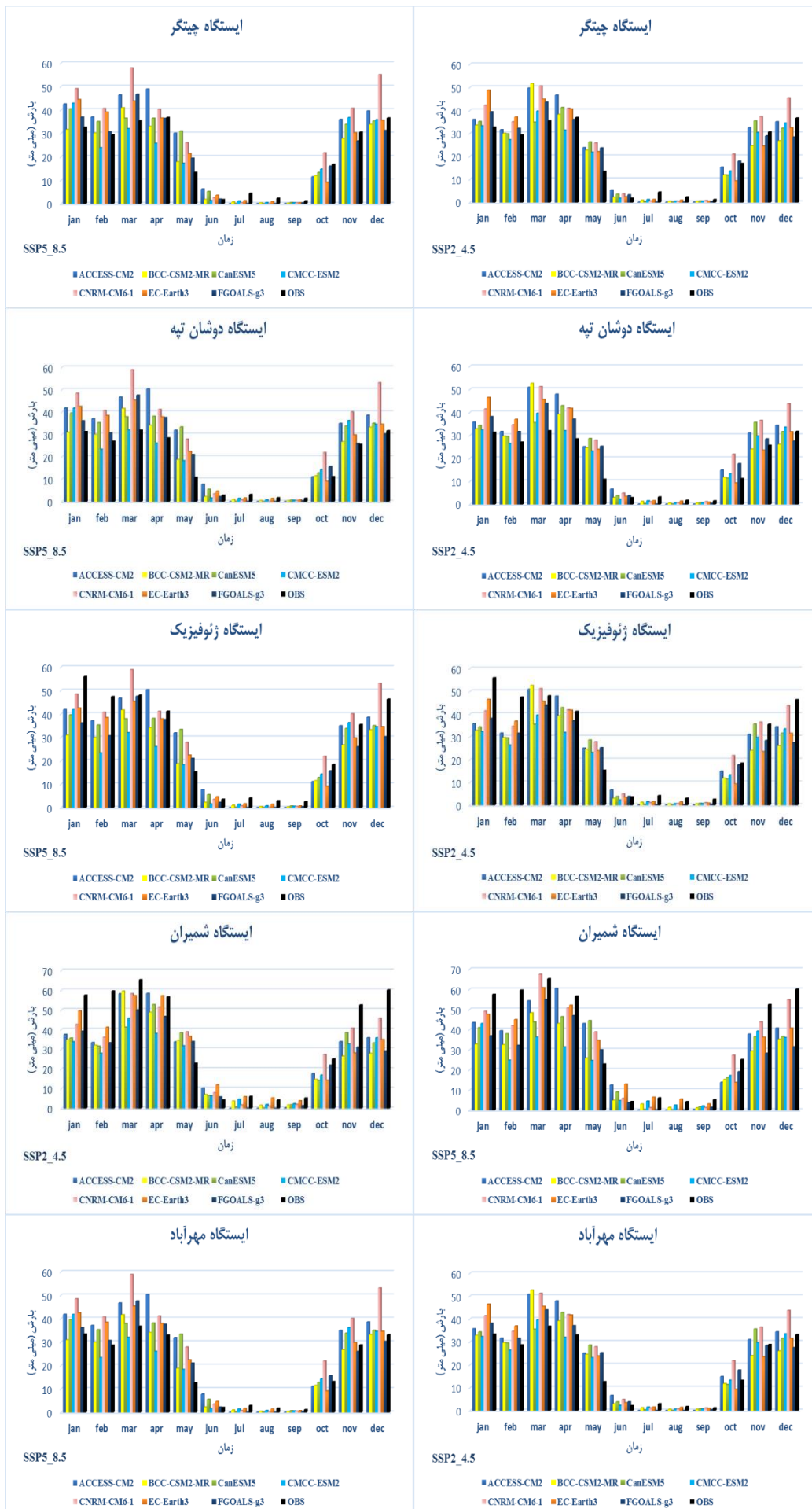
در این تحقیق، ضریب تبیین به عنوان شاخص اصلی برای سنجش دقت و اعتبار نتایج مدل‌های آب‌وهوایی به کار رفته است. این شاخص نشان می‌دهد که تا چه میزان مدل‌های استفاده‌شده توانسته‌اند با داده‌های مشاهده‌ای همخوانی داشته باشند و تغییرات آب‌وهوایی را به درستی برآورد کنند.

۳- نتایج

پیش‌بینی دوره آبی

میانگین بارش

میانگین بارندگی کلانشهر تهران در ایستگاه‌های چیتگر، دوشان تپه، ژئوفیزیک، شمیران و مهرآباد برای برون‌داد سناریوی SSP2.4.5 و SSP5_8.5 در شکل ۴ نشان داده است. این برون‌دادهای آب‌وهوایی برای دوره آبی ۲۱۰۰-۲۰۳۰ می‌باشند. نتایج مدل‌های آب‌وهوایی ایستگاه چیتگر حاکی از آن است که در ایستگاه، مدل آب و هوایی CNRM-CM6-1 دقت بالاتری در شبیه‌سازی میانگین بارش دارد. نسبت ضریب R^2 این مدل با توجه به هر دو سناریو SSP2.4.5 و SSP5_8.5 به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۸۷ می‌باشند. همچنین مقدار میانگین بارشی در هر دو سناریو به جز در فصل تابستان و برای دیگر فصول حالت افزایشی دارد. بیشترین افزایش بارش مربوط به سناریو SSP5_8.5 است. مقدار افزایش بارش‌ها به ترتیب سناریوها به ۱۲ و ۱۶ درصد می‌رسد. نتایج میانگین بارش ایستگاه دوشان تپه نشان داد که برای این ایستگاه مدل آب و هوایی CNRM-CM6-1 دقت بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها دارد. مقدار ضریب R^2 با توجه به سناریوی SSP2.4.5 و SSP5_8.5 به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۹۵ می‌باشد (شکل ۴). با توجه به این مدل بیشترین افزایش بارش‌ها مربوط به فصل بهار، زمستان و پاییز است. این درحالی است مقدار بارش‌ها برای فصل تابستان در ایستگاه دوشان تپه حالت کاهش‌ی دارد. مقدار میانگین بارشی برای ایستگاه دوشان تپه به ترتیب هر یک از این سناریوها ۲۰ و ۲۲ درصد افزایش می‌یابند. نتایج تغییرات میانگین بارش ایستگاه ژئوفیزیک برای دوره آبی ۲۱۰۰ - ۲۰۳۰ نشان داد که برای این ایستگاه مدل آب و هوایی EC-Earth3 دقت خوبی در شبیه‌سازی میانگین بارش دارد. به طوری که در این مدل با توجه به سناریو SSP2.4.5 و SSP5_8.5 مقدار ضریب R^2 به ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۹۳ می‌باشد. مقدار میانگین بارشی در این ایستگاه در سناریو SSP5_8.5 کاهش کمتری دارد. به عنوان نمونه مقدار میانگین بارش‌ها برای دوره آبی به ترتیب سناریو ۸ و ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. بررسی تغییرات مقدار میانگین بارشی برای ایستگاه شمیران نشان داد که در این ایستگاه مدل آب و هوایی CNRM-CM6-1 دقت بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها دارد. در این مدل مقدار ضریب R^2 به ترتیب برون‌داد سناریو SSP2.4.5 و SSP5_8.5 ۰/۸۵ و ۰/۹۰ می‌باشند. مقدار میانگین بارشی با توجه به ماه‌های مختلف به ترتیب سناریوها ۸ و ۴ درصد بارش‌ها در ایستگاه شمیران کاهش می‌یابد. جمع سالانه بارشی در دوره مشاهده‌ای ۴۱۹ میلی‌متر می‌باشد. در دوره آبی با توجه به سناریو SSP2_4.5 به ۳۵۳ میلی‌متر و در سناریو SSP5_8.5 به ۳۸۲ میلی‌متر می‌رسد. نتایج میانگین تغییرات بارش برای ایستگاه مهرآباد در دوره آبی با توجه به مدل‌های مختلف نشان داد که در این ایستگاه مدل آب‌وهوایی CNRM-CM6-1 دقت بهتری در شبیه‌سازی بارش با توجه به سناریو SSP5_8.5 دارد. به طوری که در این مدل ضریب R^2 برابر با ۰/۹۴ می‌باشد. در سناریوی SSP5_8.5 هم مدل آب و هوایی CNRM-CM6-1 دقت بهتری دارد که R^2 آن ۰/۹۳ است. با توجه به این سناریو مقدار بارش در این ایستگاه حالت افزایشی دارد به طوری که مقدار افزایش بارش به ترتیب سناریوها ۹ و ۵ درصد خواهد بود.

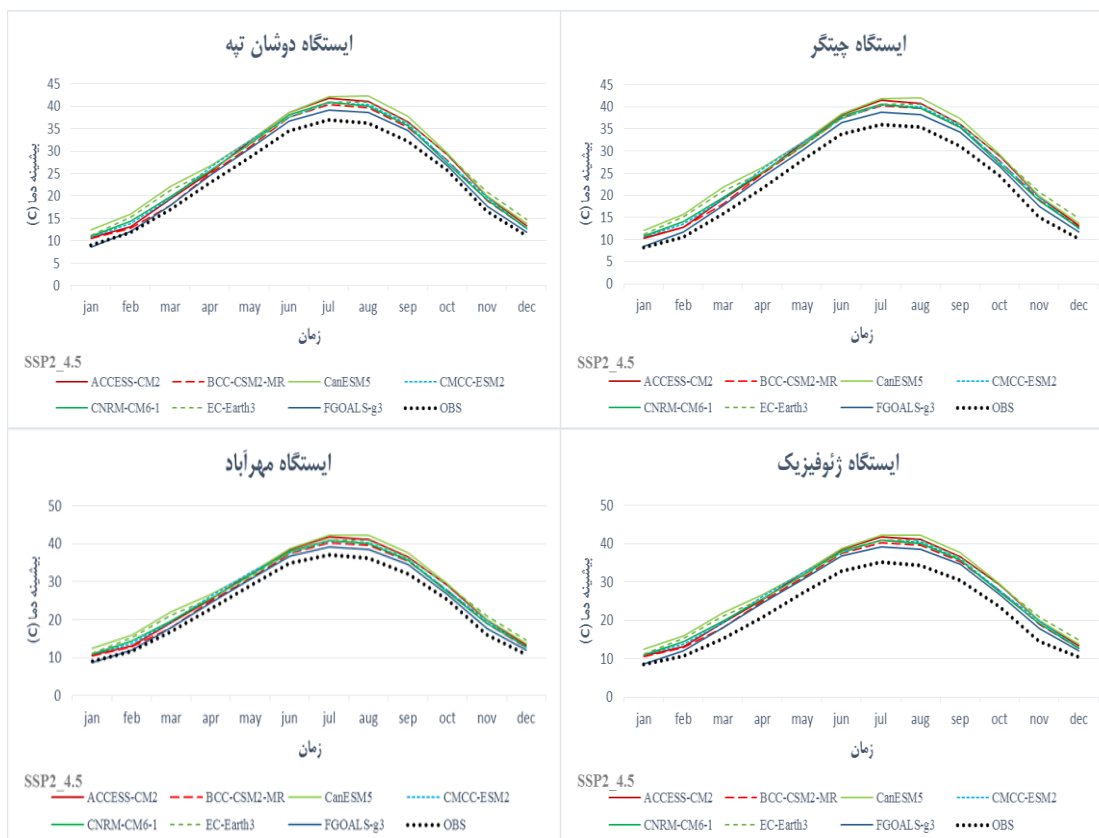


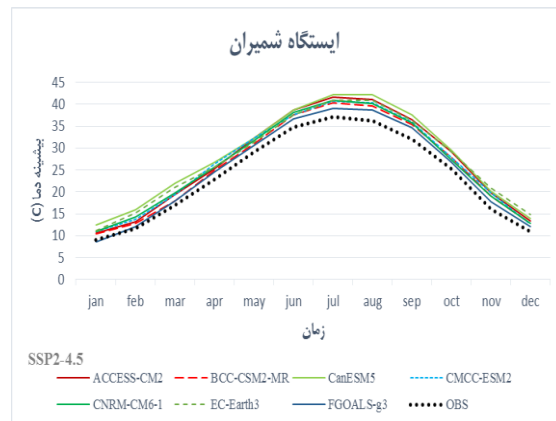
شکل ۴. میانگین بارندگی ماهانه ایستگاه‌های کلانشهر تهران با توجه به سناریوهای مختلف طی دوره آبی ۲۰۳۰-۲۱۰۰

میانگین بیشینه‌ی دمایی

سناریوی SSP2_4.5

در این بخش از پژوهش ارزیابی عملکرد مدل‌های گزارش ششم در دو سناریو SSP2_4.5 و SSP5_8.5 برای میانگین بیشینه‌ی دمایی کلان‌شهر تهران را نشان می‌دهد، اینکه هر کدام از مدل‌های آب‌وهوایی در ایستگاه‌های مختلف کلان‌شهر تهران چگونه عمل می‌کنند، در ادامه توضیح داده می‌شود. میانگین بیشینه‌ی دمایی سناریو SSP2_4.5 ایستگاه چیتگر در شکل ۵ آورده شده است. طبق این سناریو در ایستگاه چیتگر با توجه به بهترین مدل آب‌وهوایی آن (FGOALS-g3) مقدار بیشینه‌ی میانگین دمایی به $38/73$ درجه سانتی‌گراد در ماه جولای می‌رسد. در این ماه مقدار اختلاف دمایی با مقدار مشاهداتی $2/73$ درجه سانتی‌گراد است. که این مقدار افزایشی را نسبت به دوره مشاهداتی نشان می‌دهد. همچنین طبق این مدل آب‌وهوایی میانگین بیشینه‌ی دمایی در ماه‌های زمستان اختلاف پایین‌تری را با مقدار مشاهداتی نشان می‌دهد به طوری که این اختلاف در ماه ژوئن $0/26$ درجه سانتی‌گراد است. بررسی برون‌داد سناریو SSP2_4.5 دوره آتی ۲۰۳۰ تا ۲۱۰۰ ایستگاه دوشان تپه حاکی از آن است که میانگین بیشینه‌ی دمایی مربوط به ماه جولای با $36/88$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. کمترین مقدار بیشینه‌ی دمایی در ماه ژوئن با 9 درجه سانتی‌گراد است. این مقادیر با توجه به بهترین مدل آب‌وهوایی آن یعنی FGOALS-g3 است. همچنین مقدار اختلاف دمایی با مقدار مشاهداتی در ماه ژوئن به کمتر از 1 درجه سانتی‌گراد که در واقع $-0/34$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (شکل ۵). نتایج شبیه‌سازی بیشینه‌ی دمایی برای ایستگاه ژئوفیزیک نشان دهنده آن است. که در این ایستگاه مدل آب‌وهوایی FGOALS-g3 بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی بیشینه‌ی دمایی دارد به طوری که در این مدل، مقدار میانگین بیشینه‌ی دمایی $39/11$ درجه سانتی‌گراد در دوره آتی می‌رسد. مقدار اختلاف دمایی با مقدار مشاهداتی $3/5$ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. در این مدل همچنین برای ماه‌های سرد سال مقدار شبیه‌سازی دمایی بسیار بهتر از ماه‌های گرم سال است. به عنوان مثال در فصل زمستان برای ماه‌های ژوئن و فوریه به ترتیب اختلاف دمایی با مقدار مشاهداتی $0/09$ و $1/35$ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. (شکل ۵). بررسی نتایج برون‌داد سناریو SSP2_4.5 دوره آتی ۲۰۳۰ تا ۲۱۰۰ ایستگاه مهرآباد حاکی از آن است که در این ایستگاه همانند دیگر ایستگاه‌ها مدل FGOALS-g3 ارزیابی و عملکرد بسیار بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها دارند به طوری که در این مدل مقدار بیشینه‌ی میانگین دمایی برای گرم‌ترین ماه سال (جولای) $37/12$ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این مدل آب‌وهوایی، مقدار بیشینه‌ی دمایی را با دقت بسیار بالاتری برای ایستگاه مطالعاتی شبیه‌سازی می‌نماید به طوری که در این ایستگاه مقدار اختلاف دمایی با مقدار مشاهداتی در فصل زمستان برای ماه‌های ژوئن، فوریه و مارس به ترتیب $-0/31$ ، $0/37$ و $0/96$ درجه سانتی‌گراد است. مقدار میانگین بیشینه‌ی دمایی این ماه‌ها به ترتیب $12/06$ ، $17/96$ و $12/06$ درجه سانتی‌گراد در دوره آتی می‌رسد (شکل ۵). میانگین بیشینه‌ی دمایی ایستگاه شمیران برای دوره‌ی آتی ۲۰۳۰ تا ۲۱۰۰ سناریوی SSP2_4.5 حاکی از آن است که طبق بهترین مدل آب‌وهوایی FGOALS-g3 مقدار بیشینه‌ی میانگین بیشینه‌ی دمایی در ماه‌های جولای و اگوست $37/12$ و $36/16$ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. پایین‌ترین میانگین بیشینه‌ی دمایی مربوط به ماه‌های ژوئن و فوریه با $12/06$ و $8/68$ درجه سانتی‌گراد در دوره آتی می‌رسد. مقدار اختلاف دمایی ایستگاه مهرآباد با مقدار مشاهداتی برای این ماه‌های سرد سال به ترتیب $-0/31$ و $-0/37$ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۵).

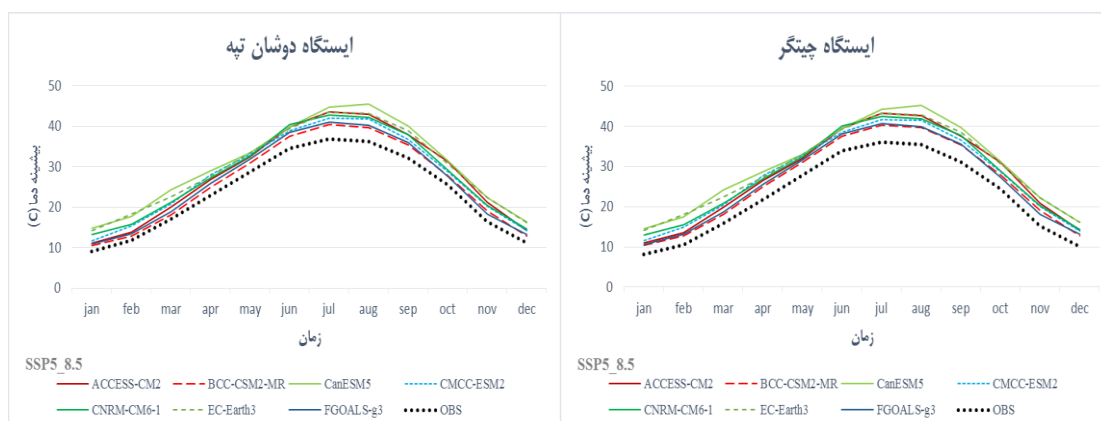


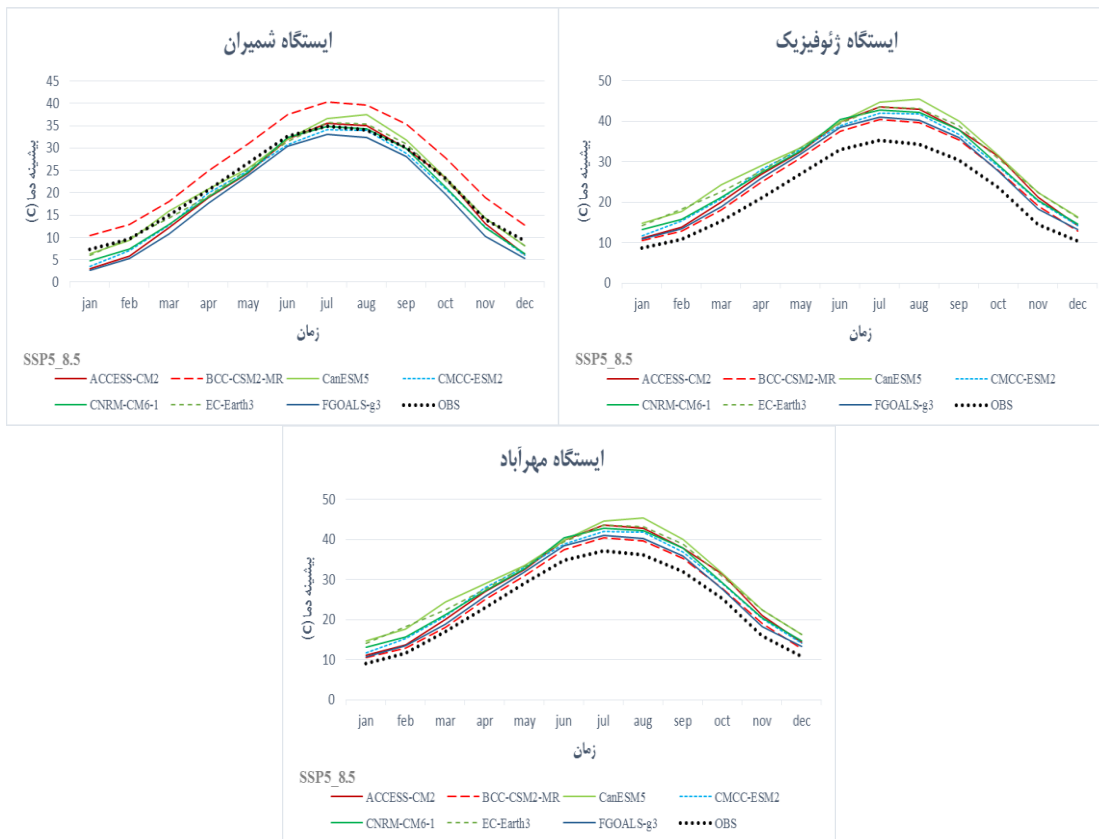


شکل ۵. میانگین بیشینه دمای ایستگاه های کلانشهر تهران تحت سناریو SSP2_4.5 برای دوره آتی ۲۰۳۰-۲۰۱۰

سناریوی SSP5_8.5

بررسی میانگین بیشینه دمای دوره آتی ۲۰۳۰-۲۰۱۰ برای ایستگاه چیتگر طبق سناریوی SSP5_8.5 نشان داد که مدل FGOALS-g3 بهترین عملکرد را برای شبیه‌سازی بیشینه دمای دارد به طوری که در این مدل اختلاف مقدار میانگین بیشینه دمای در بعضی از ماه‌های سال مانند ژوئن، فوریه، مارس و دسامبر به کمتر از ۱/۵ درجه سانتی‌گراد در ماه می‌رسد. ضعیف‌ترین مدل در بین مدل‌های منتخب شده مربوط به مدل CanESM5 است که برای ماه‌های مورد نظر اختلاف دمای با مقدار مشاهداتی بالاترین بین ۵ تا ۶ درجه سانتی‌گراد در ماه است (شکل ۶). میانگین بیشینه دمای ایستگاه دوشان تپه حاکی از آن است که مدل FGOALS-g3 همچنان داری عملکرد بهترین نسبت به دیگر مدل‌های در شبیه‌سازی دمای دوره آتی دارد. با این تفاوت که در این ایستگاه، مقدار اختلاف دمای با دوره مشاهداتی به کمتر از ۱ درجه سانتی‌گراد در ماه می‌رسد، و مربوط به ماه‌های زمستان و پاییز هستند. مقدار شبیه‌سازی دمای برای ماه‌های تابستان بالاتر از دیگر ماه‌ها است به طوری که در این ماه‌ها شبیه‌سازی بیشینه دمای کلانشهر تهران در این منطقه ایستگاهی بین ۲/۲۲ تا ۲/۴۵ درجه سانتی‌گراد اختلاف دمای وجود دارد. در این ایستگاه طبق دوره‌ی آتی میانگین بیشینه دمای بین ۳۶ تا ۳۹ درجه دمای متغیر است که مربوط به ماه‌های تابستان است (شکل ۶). میانگین بیشینه دمای ایستگاه ژئوفیزیک برای دوره آتی ۲۰۳۰-۲۰۱۰ طبق سناریو SSP5_8.5 حاکی از آن است که در بین مدل‌های آب‌وهوایی مدل FGOALS-g3 بهترین دقت و مدل CanESM5 ضعیف‌ترین عملکرد را در بین مدل‌ها دارند به طوری که طبق بهترین مدل آب‌وهوایی، در این سناریو میانگین بیشینه دمای برای ایستگاه ژئوفیزیک در ماه‌های جولای و اوت به ترتیب ۳۹/۱۱ و ۳۸/۵۴ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۶). در این ایستگاه مقدار اختلاف دمای با مقدار مشاهداتی در بعضی ماه‌ها مانند ژوئن، فوریه و دسامبر به کمتر از ۱/۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. مقدار میانگین بیشینه دمای برای ایستگاه شمیران حاکی از آن است که مدل آب‌وهوایی FGOALS-g3 همچنان عملکرد بهتری در شبیه‌سازی میانگین بیشینه دمای دارد. با توجه به این مدل بیشینه دمای برای ایستگاه شمیران کلانشهر تهران در ماه‌های ژولای، اوت و سپتامبر بالاترین میانگین بیشینه دما در دوره آتی ۲۰۳۰-۲۰۱۰ دارند. در این ماه‌ها به ترتیب مقدار میانگین بیشینه دمای ۳۸/۷۸، ۳۸/۲۹ و ۳۴/۳۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. میانگین پایین‌ترین میانگین بیشینه دمای مربوط به ماه‌های ژوئن، فوریه و مارس است. مقدار میانگین بیشینه دمای به ترتیب ۱۱/۷۶، ۱۷/۶۷ و ۱۷/۶۷ درجه سانتی‌گراد خواهد بود (شکل ۶). میانگین بیشینه دمای ایستگاه مهرآباد برای دوره آتی و طبق سناریو SSP5_8.5 نشان دهنده آن است که مقدار بیشینه دمای با عملکرد بهتری شبیه‌سازی شده است. به عنوان مثال میانگین بیشترین، بیشینه دمای مربوط به ماه‌های اوت و سپتامبر به ترتیب ۲/۵۴ و ۲/۴۲ درجه سانتی‌گراد در ماه می‌باشد. این دقت مربوط به مدل آب‌وهوایی FGOALS-g3 است. مقدار اختلاف دمای با مقدار مشاهداتی برای ماه‌های زمستان ژوئن، فوریه و مارس به ترتیب ۰/۳۱، ۰/۳۷ و ۰/۹۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. مقدار میانگین بیشینه دمای برای ایستگاه مهرآباد در تابستان (ژولای، اوت و سپتامبر) به ترتیب میانگین بیشینه دمای ۳۹/۱۱، ۳۸/۵۹ و ۳۴/۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد (شکل ۶).



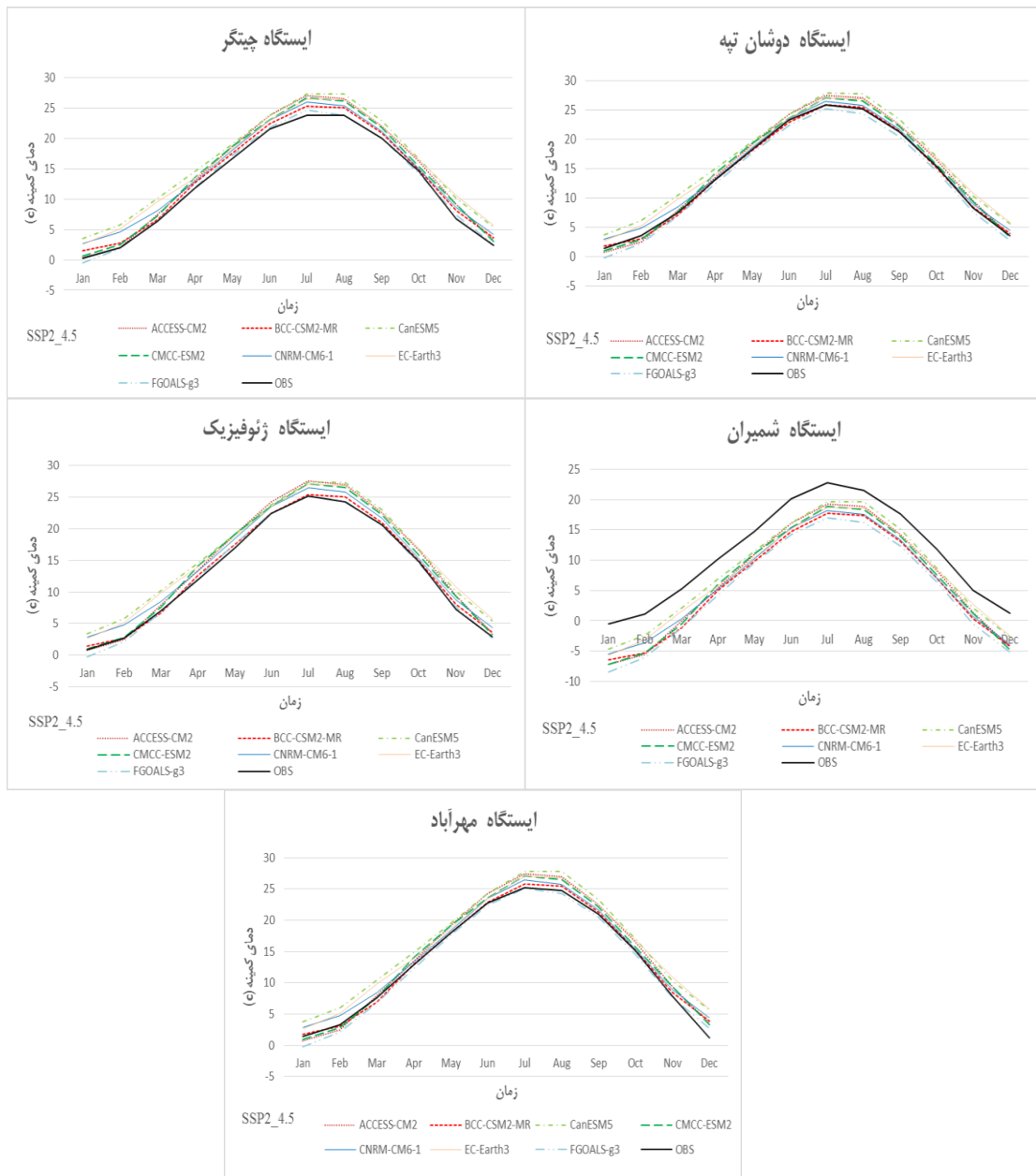


شکل ۶ میانگین بیشینه‌ی دمایی ایستگاه‌های کلاشهر تهران تحت سناریو SSP5_8.5 برای دوره آتی ۲۱۰۰-۲۰۳۰

میانگین کمینه‌ی دمایی

سناریوی SSP2_4.5

میانگین کمینه‌ی دمایی ایستگاه‌های چیتگر، دوشان تپه، ژنوفیزیک، مهرآباد و شمیران برای دوره آتی ۲۱۰۰-۲۰۳۰ با توجه به سناریو SSP2_4.5 و SSP5_8.5 در شکل ۷ آورده شده است. بررسی میانگین کمینه‌ی دمایی ایستگاه چیتگر با توجه به سناریو SSP2_4.5 حاکی از آن است. از بین مدل‌های آب و هوایی مدل ACCESS-CM2، CMCC-ESM2، FGOALS-g3 و BCC-CSM2-MR دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی دارند. در این مدل‌ها مقدار اختلاف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به ترتیب این مدل‌ها ۰/۹، ۱/۴۴ و ۱/۶۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. نتایج میانگین کمینه‌ی دمایی ایستگاه دوشان تپه برای دوره آتی ۲۱۰۰-۲۰۳۰ با توجه SSP2_4.5 نشان داد که بهترین مدل‌ها شبیه‌سازی در این ایستگاه مدل FGOALS-g3 است. در این مدل بالاترین کمینه‌ی دمایی ماهانه در ماه جولای با ۲۵ درجه سانتی‌گراد و کمترین مقدار کمینه‌ی دمایی مربوط به ماه ژوئن با ۰/۲۰- درجه سانتی‌گراد است. اختلاف مقدار کمینه‌ی دمایی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در اکثریت ماه‌ها به جز ماه ژوئن و فوریه (با اختلاف ۱/۵ درجه سانتی‌گراد) با کمتر از ۰/۰۸ درجه سانتی‌گراد خواهد بود (شکل ۷). در ایستگاه ژنوفیزیک نتایج نشان دهنده آن است که مدل FGOALS-g3 نسبت به دیگر مدل‌ها مقدار کمینه‌ی دمایی را بسیار بهتر از دیگر مدل‌ها شبیه‌سازی می‌کند. در این مدل مقدار کمینه‌ی دمایی در فصل تابستان و در ماه جولای که بالاترین مقدار دمایی را دارد به ۲۵/۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. مقدار اختلاف کمینه‌ی دمایی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در این ماه به صفر درجه سانتی‌گراد می‌رسد. کمترین دمایی کمینه‌ی دمایی مربوط به ماه ژوئن خواهد بود. در این ماه مقدار کمینه‌ی دمایی صفر درجه سانتی‌گراد می‌رسد. مقدار اختلاف شبیه‌سازی شده و با مقدار مشاهداتی ۰/۸۵ سانتی‌گراد می‌باشد (شکل ۷). میانگین دمایی کمینه‌ی دمایی در ایستگاه شمیران حاکی از آن است که در این ایستگاه مدل CanESM5 دقت بهتری در شبیه‌سازی برای دوره آتی ۲۱۰۰-۲۰۳۰ دارد. در این ایستگاه مقدار کمینه‌ی دمایی با توجه مدل مورد نظر در بالاترین حد خود به ۱۹/۶۲ درجه سانتی‌گراد در ماه جولای خواهد رسید. پایین‌ترین مقدار کمینه‌ی دمایی مربوط به ژوئن با ۴/۶۴- می‌باشد (شکل ۷). نتایج ایستگاه مهرآباد با توجه به سناریو SSP2_4.5 نشان داد که در این ایستگاه مدل‌های آب‌وهوایی FGOALS-g3 و BCC-CSM2-MR دقت بسیار خوبی دارند. در این مدل‌ها میانگین کمینه‌ی دمایی ماه جولای است که به ترتیب این مدل‌ها ۲۵/۱۰ و ۲۵/۸۴ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید. مقدار اختلاف کمینه‌ی دمایی با مقدار مشاهداتی در این مدل‌ها همچنین ۰/۱۱- و ۰/۶۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. پایین‌ترین میانگین کمینه‌ی دمایی با توجه به مدل BCC-CSM2-MR، ۱/۷۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

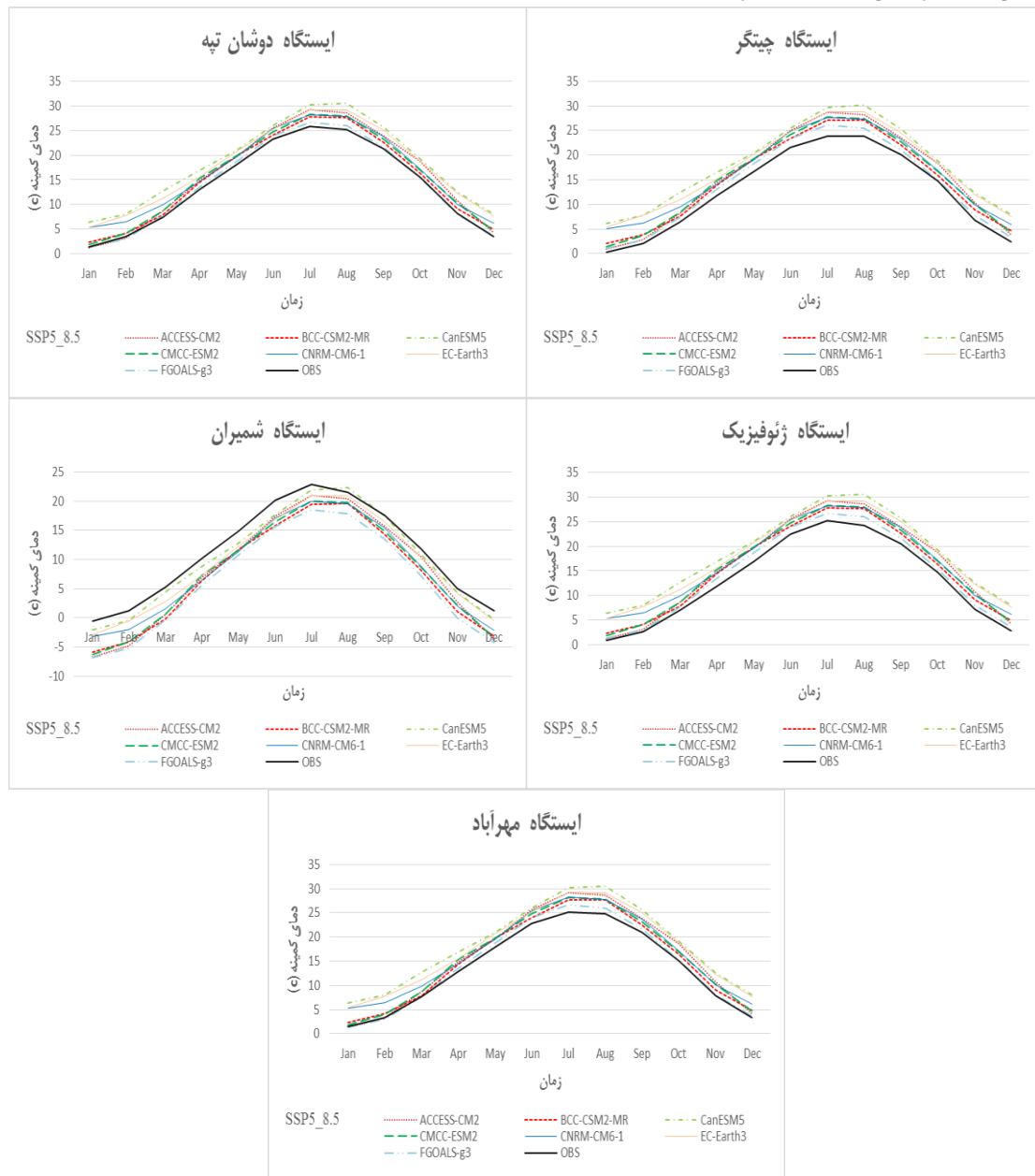


شکل ۷. میانگین کمینه دمایی ایستگاه‌های کلانشهر تهران تحت سناریو SSP2_4.5 برای دوره آتی ۲۰۳۰-۲۱۰۰

سناریوی SSP5_8.5

برونداد سناریو SSP5_8.5 برای هر یک از ایستگاه‌های واقع در کلانشهر تهران با توجه به دوره آتی ۲۰۳۰-۲۱۰۰ در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج مربوط به ایستگاه چیتگر نشان می‌دهد که در این ایستگاه مقدار میانگین کمینه‌ی دمایی در مدل FGOALS-g3 دقت بالاتری در شبیه‌سازی دارد. در این مدل ماه ژوئن و جولای به عنوان سردترین و گرم‌ترین ماه سال شناخته می‌شوند. مقدار میانگین کمینه‌ی دمایی در این ماه‌ها به ترتیب $۱/۰۳$ و $۲۶/۱۴$ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. نتایج تغییرات آب‌وهوایی با توجه به مدل‌های برونداد گزارش ششم در ایستگاه دوشان تپه حاکی از آن است که در این ایستگاه مدل FGOALS-g3 کارایی بسیار خوبی در شبیه‌سازی میانگین کمینه‌ی دمایی دارد به طوری که در این مدل مقدار اختلاف شبیه‌سازی شده با مقدار مشاهداتی به کمتر از ۱ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. بالاترین و پایین‌ترین مقدار کمینه‌ی میانگین دمایی در ماه جولایی و ژوئن می‌باشند. مقدار میانگین کمینه‌ی دمایی به ترتیب این ماه‌ها $۲۶/۶۸$ و $۱/۳۸$ درجه سانتی‌گراد برای دوره آتی ۲۰۳۰-۲۱۰۰ خواهد بود (شکل ۸). نتایج مقدار میانگین کمینه‌ی دمایی در ایستگاه ژئوفیزیک با توجه سناریو SSP5_8.5 نشان داد که در این ایستگاه همانند بیشتر ایستگاه‌ها مدل FGOALS-g3 دقت بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها در شبیه‌سازی دارد. در این مدل برای ایستگاه ژئوفیزیک مقدار میانگین دمایی برای گرم‌ترین و سردترین ماه‌ها به ترتیب $۲۶/۶۹$ و $۱/۳۵$ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. مقدار اختلاف این مقادیر با مقدار شبیه‌سازی شده به ترتیب ماه‌های جولای و ژوئن $۱/۵۶$ و $۰/۵۱$ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید (شکل ۸). بررسی نتایج سناریو SSP5_8.5 برای ایستگاه شمیران نشان دهنده آن است که مدل CanESM5 دقت بهتری در شبیه‌سازی میانگین دمایی کمینه برای دوره آتی ۲۰۳۰-۲۱۰۰ دارد. با توجه به بهترین مدل مشخص شده، مقدار گرم‌ترین و سردترین ماه‌های (جولای و ژوئن) کمینه‌ی دمایی به ترتیب $۲۲/۳۰$ و $-۲/۴۳$ خواهد بود. مقدار اختلاف این مقادیر با مقدار مشاهداتی به ترتیب ماه‌ها $-۰/۹۰$ و $-۱/۴۷$ درجه سانتی‌گراد می‌رسد (شکل ۸).

نتایج این سناریو برای ایستگاه مهرآباد متفاوت خواهد بود به طوری که در این ایستگاه مدل FGOALS-g3 دقت و عملکرد بالاتری نسبت به دیگر مدل‌ها دارد (شکل ۸). در این مدل مقدار اختلاف شبیه سازی شده با مشاهداتی در گرم‌ترین و سردترین ماه سال (جولای و ژوئن) به ترتیب ۱/۴۵ و ۰/۰۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. طبق این مدل همچنین مقدار میانگین دمای کمینه به ترتیب گرم‌ترین و سردترین این ماه‌های سال ۲۵/۹۳ و ۱/۳۷ درجه سانتی‌گراد در دوره آتی ۲۱۰۰-۲۰۳۰ خواهد رسید.



شکل ۸ میانگین کمینه دمایی ایستگاه‌های کلانشهر تهران تحت سناریو SSP5_8.5 برای دوره آتی ۲۱۰۰-۲۰۳۰

تحلیل تغییرات آب‌وهوایی در ایستگاه‌های مختلف کلانشهر تهران نشان‌دهنده تأثیرات متنوعی بر الگوهای بارشی و دمایی این منطقه است. براساس نتایج حاصل از مدل‌سازی آب‌وهوایی، بارش فصلی در ایستگاه‌هایی مانند چیتگر و دوشان تپه در فصل پاییز و زمستان افزایش نشان می‌دهد این نتایج با نتایج تحقیقات حسنی و همکاران (۱۴۰۲) که از مدل گزارش پنجم (CMIP5) استفاده کردند همخوانی دارد. به احتمال تقویت فعالیت سامانه‌های بارشی در این نواحی مرتبط است. این افزایش می‌تواند به بهبود منابع آبی در مناطق غربی کلانشهر کمک کند. از سوی دیگر، ایستگاه‌های ژئوفیزیک و شمیران، واقع در مناطق مرکزی و شمالی تهران، کاهش بارش را نشان می‌دهند که ممکن است به کاهش دسترسی به منابع آب زیرزمینی در این مناطق منجر شود. در بخش دمایی، افزایش بیشینه در تمام ایستگاه‌ها مشهود است، اما شدت این افزایش در سناریوی انتشار SSP5_8.5 به‌ویژه در تابستان و زمستان، بیشتر است. این روند گرمایش می‌تواند فشار مضاعفی بر سیستم سرمایش شهری، به‌ویژه در نواحی پرجمعیت و صنعتی، وارد کند این نتایج با نتایج تحقیقات (Nokhandan et al 2011, Ghasemzadeh & Sharifi, 2020) مطابق دارد. به طور خاص، افزایش دمای تابستانی به تشدید اثر جزیره گرمایی شهری منجر می‌شود که در مناطق مرکزی مانند ژئوفیزیک و شمیران تأثیر چشمگیری خواهد داشت. مدل CNRM-CM6-1 عملکرد مطلوب‌تری در شبیه‌سازی داده‌های این منطقه داشته و می‌تواند برای پیش‌بینی تغییرات آتی در سطح محلی به کار رود. این نتایج نشان می‌دهد که کلانشهر تهران نیازمند سیاست‌های جامع‌تری برای مدیریت منابع آب، کاهش گرمایش شهری و بهبود زیرساخت‌های سازگار با تغییرات آب‌وهوایی است تا بتواند اثرات این تغییرات را به حداقل برساند.

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش شنا سایی بهترین مدل‌های آب‌وهوایی در کلان‌شهر تهران طبق سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره آتی ۲۰۳۰ تا ۲۱۰۰ می‌باشد. همانگونه که در نتایج مشاهده نمودید نتایج نشان داد که مدل‌های مختلف آب‌وهوایی عملکرد متفاوتی در شبیه‌سازی بارش و دما در ایستگاه‌های مختلف کلان‌شهر تهران داشته‌اند. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده پیچیدگی‌های طبیعی و مکانی در پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی است. به‌طور کلی، مدل CNRM-CM6-1 توانسته است دقت بالاتری در شبیه‌سازی میانگین بارش در اکثر ایستگاه‌ها نشان دهد، به‌ویژه در سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 این مدل پیش‌بینی کرده است که بارش‌ها در بیشتر ایستگاه‌ها در آینده افزایش خواهند یافت، به‌ویژه در فصل‌های پاییز، زمستان و بهار که افزایش بارش‌ها بیشتر مشهود است. از سوی دیگر، مدل‌های دیگر، مدل‌های دیگر نظیر EC-Earth3 و HadGEM3-GC31-LL نتایج متفاوتی ارائه داده‌اند که نشان‌دهنده وجود تفاوت‌های منطقه‌ای و مدل‌های مختلف در شبیه‌سازی بارش‌ها است. در مقابل، مدل‌های پیش‌بینی دما نتایج قابل توجهی را ارائه داده‌اند. مدل FGOALS-g3 به‌ویژه در پیش‌بینی تغییرات دمایی در ماه‌های تابستان عملکرد بهتری داشته و پیش‌بینی کرده است که دمای بی‌شینه در بیشتر ایستگاه‌ها افزایش خواهد یافت. این افزایش دما به‌ویژه در فصل تابستان که به‌طور طبیعی دماهای بالاتری دارد، تأثیرات چشم‌گیری خواهد داشت. این مدل پیش‌بینی کرده است که در برخی ایستگاه‌ها، تفاوت دما در مقایسه با دوره مشاهداتی قابل توجه است، به‌طوری که این تغییرات می‌تواند بر مشکلات زیست‌محیطی همچون آلودگی هوا و شرایط زیست‌محیطی را بدتر کرده و کیفیت هوا را کاهش دهد تأثیرات منفی بگذارد. در نتیجه، ترکیب اطلاعات مربوط به بارش و دما به‌ویژه در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف می‌تواند به‌طور مؤثری در برنامه‌ریزی‌های آبی، انرژی، بهداشت عمومی و بهبود زیرساخت‌های شهری در برابر تغییرات آب‌وهوایی استفاده شود. همچنین، این نتایج اهمیت انتخاب مدل مناسب بر اساس ویژگی‌های خاص منطقه‌ای و شرایط آب‌وهوایی محلی را نمایان می‌کند. در نهایت، این تحقیق به‌عنوان مبنای مهمی برای تحلیل و پیش‌بینی تغییرات آب‌وهوایی در آینده و برنامه‌ریزی‌های بهینه در این زمینه در کلان‌شهر تهران و مناطق مشابه به کار خواهد رفت.

منابع

- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539-42559.
- Adamo, N., Al-Ansari, N., & Sissakian, V. (2021). Review of climate change impacts on human environment: past, present and future projections. *Engineering*, 13(11), 605-630.
- Arunrat, N., Sereenonchai, S., Chaowiwat, W., & Wang, C. (2022). Climate change impact on major crop yield and water footprint under CMIP6 climate projections in repeated drought and flood areas in Thailand. *Science of the Total Environment*, 807, 150741.
- Caldwell, P. M., Terai, C. R., Hillman, B., Keen, N. D., Bogenschutz, P., Lin, W., & Zender, C. S. (2021). Convection-permitting simulations with the E3SM global atmosphere model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(11), e2021MS002544.
- Chylek, P., Folland, C., Klett, J. D., Wang, M., Hengartner, N., Lesins, G., & Dubey, M. K. (2022). Annual mean Arctic amplification 1970–2020: Observed and simulated by CMIP6 climate models. *Geophysical Research Letters*, 49(13), e2022GL099371.
- Eyring, V., Gentine, P., Camps-Valls, G., Lawrence, D. M., & Reichstein, M. (2024). AI-empowered next-generation multiscale climate modelling for mitigation and adaptation. *Nature Geoscience*, 1-9.
- Ghasemzadeh, B., & Sharifi, A. (2020). Modeling and analysis of barriers to climate change adaptation in Tehran. *Climate*, 8(10), 104.
- Hassani, M. R., Niksokhan, M. H., Ardestani, M., & Janbehsarayi, S. F. M. (2023). Evaluating the effects of climate change on urban runoff based on CMIP6 models (case study: district 10 of Tehran municipality).
- Hohenegger, C., Kornblueh, L., Klocke, D., Becker, T., Cioni, G., Engels, J. F. & Stevens, B. (2020). Climate statistics in global simulations of the atmosphere, from 80 to 2.5 km grid spacing. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 98(1), 73-91.
- Javadinejad, S., Eslamian, S., Ostad-Ali-Askari, K., Nekooei, M., Azam, N., Talebmorad, H., & Mousavi, M. (2019). Relationship between climate change, natural disaster, and resilience in rural and urban societies. *Handbook of climate change resilience*, 1-25.
- Jia, Q., Jia, H., Li, Y., & Yin, D. (2023). Applicability of CMIP5 and CMIP6 models in China: reproducibility of historical simulation and uncertainty of future projection. *Journal of Climate*, 36(17), 5809-5824.

- Kajiita, R. M., & Kang'ethe, S. M. (2024). Socio-Economic Dynamics Inhibiting Inclusive Urban Economic Development: Implications for Sustainable Urban Development in South African Cities. *Sustainability*, 16(7), 2803.
- Leal Filho, W., Balogun, A. L., Olayide, O. E., Azeiteiro, U. M., Ayal, D. Y., Muñoz, P. D. C., ... & Li, C. (2019). Assessing the impacts of climate change in cities and their adaptive capacity: Towards transformative approaches to climate change adaptation and poverty reduction in urban areas in a set of developing countries. *Science of the Total Environment*, 692, 1175-1190.
- Maher, P., Gerber, E. P., Medeiros, B., Merlis, T. M., Sherwood, S., Sheshadri, A., & Zurita-Gotor, P. (2019). Model hierarchies for understanding atmospheric circulation. *Reviews of Geophysics*, 57(2), 250-280.
- Maja, M. M., & Ayano, S. F. (2021). The impact of population growth on natural resources and farmers' capacity to adapt to climate change in low-income countries. *Earth Systems and Environment*, 5(2), 271-283.
- Mehryar, S., Sasson, I., & Surminski, S. (2022). Supporting urban adaptation to climate change: What role can resilience measurement tools play. *Urban Climate*, 41, 101047.
- Nandi, S., & Swain, S. (2023). Analysis of heatwave characteristics under climate change over three highly populated cities of South India: a CMIP6-based assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(44), 99013-99025.
- Nokhandan, M. H., Haghtalab, N., Malboosi, S., Abasi, F., & Goodarzi, M. (2011). Quantitative Assessment of Climate Change by Weather Generation Models and Downscaling GCM Data in Tehran, Iran. *Global Food Insecurity: Rethinking Agricultural and Rural Development Paradigm and Policy*, 233-244.
- Oyelakin, R., Yang, W., & Krebs, P. (2024). Analysing Urban Flooding Risk with CMIP5 and CMIP6 Climate Projections. *Water*, 16(3), 474.
- Ramyar, R., Ackerman, A., & Johnston, D. M. (2021). Adapting cities for climate change through urban green infrastructure planning. *Cities*, 117, 103316.
- Rehman, A., Ma, H., Ozturk, I., & Ulucak, R. (2022). Sustainable development and pollution: The effects of CO₂ emission on population growth, food production, economic development, and energy consumption in Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-12.
- Shakeri, H., Motiee, H., & McBean, E. (2021). Projection of important climate variables in large cities under the CMIP5–RCP scenarios using SDSM and fuzzy downscaling models. *Journal of Water and Climate Change*, 12(5), 1802-1823.
- Soltani, K., Amiri, A., Ebtehaj, I., Cheshmehghasabani, H., Fazeli, S., Gumiere, S. J., & Bonakdari, H. (2024). Advanced Forecasting of Drought Zones in Canada Using Deep Learning and CMIP6 Projections. *Climate*, 12(8), 119.
- Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., & Ziehn, T. (2021). Climate model projections from the scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12(1), 253-293.
- Usta, D. F. B., Teymouri, M., Chatterjee, U., & Koley, B. (2021). Temperature projections over Iran during the twenty-first century using CMIP5 models. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-12.
- Vacek, Z., Vacek, S., & Cukor, J. (2023). European forests under global climate change: Review of tree growth processes, crises and management strategies. *Journal of Environmental Management*, 332, 117353.
- Velazquez-Gonzalez, R. S., Garcia-Garcia, A. L., Ventura-Zapata, E., Barceinas-Sanchez, J. D. O., & Sosa-Savedra, J. C. (2022). A review on hydroponics and the technologies associated for medium-and small-scale operations. *Agriculture*, 12(5), 646.
- Yang, C., Wu, H., Xie, C., Wan, Y., Qin, Y., Jiang, R. & Che, S. (2024). Community future climate resilience assessment based on CMIP6, A case study of communities along an urban-rural gradient in Shanghai. *Urban Climate*, 56, 101966.
- Ye, B., Jiang, J., Liu, J., Zheng, Y., & Zhou, N. (2021). Research on quantitative assessment of climate change risk at an urban scale: Review of recent progress and outlook of future direction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110415.
- Zhang, M., Yang, X., Ren, L., Pan, M., Jiang, S., Liu, Y., & Fang, X. (2021). Simulation of extreme precipitation in four climate regions in China by general circulation models (GCMs): performance and projections. *Water*, 13(11), 1509.

- اداره کل هواشناسی استان تهران، ۱۴۰۰
- رحیمی، ج. بذرافشان، ج و رحیمی، ع. ۱۳۹۰، بررسی تغییرات روزهای بارشی تحت تأثیر خرد اقلیم شهری در کلانشهر تهران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۷۷، ص ۹۳-۱۰۸
- سالنامه‌های آماری استان تهران، ۱۴۰۱
- علمداری، ز، سبحانی، ن، ا صلاحی، ب، مهدی و محمدی، م. ۱۴۰۳، پهنه بندی بارش و دمای استان خراسان رضوی با استفاده از داده های گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6)، مطالعات علوم محیط زیست، دوره نهم، شماره ۴، ص ۹۷۶۶-۹۷۵۳
- فخیمی، س، زینالی، ب، صلاحی، ب. ۱۴۰۳، پیش نگرى اثرات تغییر اقلیم بر بارش استان آذربایجان شرقی، مطالعات علوم محیط زیست، دوره نهم، شماره ۴، ص ۹۵۷۶-۹۵۶۰