

## Evaluating the effects of climate change on urban runoff based on CMIP6 models (Case study: district 10 of Tehran municipality)

Mohammad Reza Hassani<sup>1</sup> , Mohammad Hossein Niksokhan<sup>2\*</sup> , Mojtaba Ardestani<sup>3</sup> ,  
Seyyed Farid Mousavi Janbehsarayi<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Graduated M.Sc. Student, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

### Abstract

#### Introduction

In recent years, the changes in the intensity and frequency of precipitation and the occurrence of severe floods and droughts have prompted decision-makers to consider the effects of climate change in their plans. Due to the existence of impervious areas in urban environments, a more significant part of precipitation is converted to runoff, and the changes in precipitation patterns resulting from climate change can affect the performance of drainage systems. On the other hand, with the change in precipitation pattern, the amount of pollutants washed from the surface is changed, and in this way, the quality of runoff is also affected. Nowadays, coupled atmosphere-ocean general circulation models (AOGCMs) are considered the most advanced and reliable tools for simulating climate change. Recently, a coupled model intercomparison project Phase 6 (CMIP6) has been introduced as the latest version of AOGCMs, which can simulate future periods with high accuracy. The sixth assessment report evaluates the changes in climate variables by combining Representative Concentration Pathway (RCP) and Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios. According to this report, in addition to covering different climates, future scenarios should also consider the socio-economic aspects of development. The CMIP6 models have higher spatial resolution than the models of previous reports. A review of the research background in the assessment of climate change effects on precipitation and runoff shows that most of the studies have been conducted using the models and scenarios of the fifth and earlier reports, and only a few of them have included the scenarios of the sixth report in their evaluations. In this regard, our research evaluated climate change effects on urban runoff based on the CMIP6 models' predictions.

#### Materials and Methods

District 10 of Tehran municipality is selected as the case study. This region is located in the south of Tehran and has an area of about 800 ha. Due to its high population density, lack of enough green space, and a high percentage of impervious areas, runoff management is a priority for this region. Moreover, the presence of agricultural land highlights the need for runoff quality management in the study area. The MehrAbad synoptic station is the nearest to the case study, and its observation data during the base period is gathered for evaluating the changes in hydrological variables under climate change. For implementing the methodology, different CMIP6 models were first assessed, and those with high performance in precipitation prediction in the historical period were selected. Their projections under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 for the future (2021-2050) were downscaled using the LARS-WG model. Then, the statistical method was employed for disaggregating the LARS-WG's daily output into 6-hour design precipitation. In the following, maximum and minimum values of precipitation were determined as optimistic and pessimistic scenarios, respectively, and the stormwater management model (SWMM) was implemented for simulating the runoff under these scenarios. The SWMM subdivides the watershed into sub-watersheds and utilizes three primary processes for runoff quality and quantity simulation. First, generated runoff is calculated by determining the hydrological characteristics of the sub-watersheds in the hydrologic process. Then, the canals route runoff to the outlet using a hydraulic process. In the quality process, the runoff quality is simulated using build-up and wash-off equations. In our research, the study area was subdivided into 84 sub-watersheds. Changes in runoff volume, peak flow, and total suspended solid

(TSS) concentration at the watershed outlet were evaluated under climate change. Correspondingly, for assessing the performance of the drainage system, the changes in the flooded volume of the system were quantified.

### Results and Discussion

According to the results, in all models under SSP5-8.5, monthly precipitation will increase in January, February, and March and decrease in August and September. Also, under SSP1-2.6, the precipitation trend is predicted to fall in September. The highest increase in precipitation compared to the base period is related to August under SSP1-2.6. In addition, with a decrease of 37.4 %, the highest reduction in precipitation is associated with February. The most evaluated prediction uncertainty is related to August under SSP1-2.6. This month, precipitation changes range from +226.31 to -18.34 % compared to the base period. Also, predictions on an annual scale do not show a specific trend. The changes in annual precipitation vary from a -9.8 % decrease to a 5.4 % increase compared to the base period. Then, by analyzing the 6-hour rain, the predicted values of HADGEM3-GC31-LL and CMCC-ESM2 were identified as the highest and lowest values, respectively. The 6 h rain with 5 and 10-year return periods under the pessimist scenario will increase by 31.4 and 26.8 % and decrease by 2.5 and 11.3 % under the optimistic scenario, respectively. The results of performing SWMM under a pessimistic scenario showed that in the return periods of 5 and 10 years, runoff volume would increase by 25.2 and 20.7 %, and TSS concentration will decrease by 21.4 and 18.2 %, respectively. Besides, in this scenario, the flooded volume of the basin increases to 42.12 %. Performing SWMM under an optimistic scenario revealed that with the reduction of precipitation compared to the base period, in the return period of 5 and 10-years, the runoff volume will decrease by 2.2 and 8.3 %, and the TSS concentration will increase by 2.5 and 10 %, respectively.

### Conclusion

Performing SWMM under an optimistic scenario shows that with the decrease of 6-hour design precipitation, the quantitative parameters (runoff volume and peak flow) decrease, and TSS concentration increases at the watershed outlet. Furthermore, under the pessimistic scenario, quantitative parameters increase, and TSS concentration decreases with the increase in precipitation. More examination revealed that despite the decline in precipitation, the number of flooded nodes remained constant under optimistic scenarios indicating the drainage system's vulnerability even under base-case rain and a little less. Moreover, the increase in flooded volume and the number of flooded nodes under the pessimistic scenario make it necessary to utilize management strategies to improve the runoff collection systems' performance under climate change. In this regard, low-impact development (LID) practices can be used as a climate change adaptive approach in future works.

**Keywords:** Climate change, CMIP6 models, SWMM, SSP scenario, Urban runoff

**Article Type:** Research Article

\*Corresponding Author, E-mail: niksokhan@ut.ac.ir

**Citation:** Hassani, M.R., Niksokhan, M.H., Ardestani, M., & Mousavi Janbehsarayi, S.F. (2023). Evaluating the effects of climate change on urban runoff based on CMIP6 models (case study: district 10 of Tehran municipality). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 269-285.

DOI: 10.22098/MMWS.2022.11849.1176

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.18.8

Received: 25 November 2022, Received in revised form: 19 December 2022, Accepted: 19 December 2022, Published online: 19 December 2022

*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2023, Vol. 3, No. 2, pp. 269-285

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب شهری بر اساس مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: منطقه ۱۰ شهرداری تهران)

محمد رضا حسنی<sup>۱</sup>، محمدحسین نیک‌سخن<sup>۲\*</sup>، مجتبی اردستانی<sup>۲</sup>، سید فرید جنبه‌سرای<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### چکیده

پیش‌بینی تغییرات بارش ناشی از پدیده تغییر اقلیم و تأثیر آن بر کمیت و کیفیت رواناب اهمیت زیادی در مدیریت منابع آب به‌ویژه در حوضه‌های شهری دارد. در همین راستا در پژوهش حاضر تأثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب شهری منطقه ۱۰ شهرداری تهران مورد بررسی قرار گرفته است. با ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در پیش‌بینی بارش دوره مشاهداتی (۲۰۱۰-۱۹۸۱)، پنج مدل با بهترین عملکرد جهت پیش‌بینی بارش دوره آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۱) انتخاب و پرونداد آن‌ها تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 با بهره‌گیری از مدل LARS-WG ریزمقیاس‌نمایی شد. نتایج تحلیل‌ها در مقیاس ماهانه نشان داد که در سناریوی SSP5-8.5، بارش در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس کاهش و در ماه‌های اوت و سپتامبر افزایش خواهد یافت. در سناریوی SSP1-2.6 نیز در ماه سپتامبر افزایش بارش پیش‌بینی شده است. پیش‌بینی‌ها در مقیاس سالانه روند مشخصی نداشته و در برخی مدل‌ها افزایش و در برخی دیگر کاهش بارش پیش‌بینی شده است. در ادامه و جهت پایش تغییرات رواناب، خروجی روزانه مدل LARS-WG با بهره‌گیری از روش چنک فراوانی به بارش‌های شش ساعته گسسته‌سازی شد. با تحلیل بارش‌های حدی، پیش‌بینی مدل‌های HADGEM3-GC31-LL و CMCC-ESM2 در سناریوی SSP5.8.5 به ترتیب به‌عنوان بدبینانه و خوش‌بینانه‌ترین سناریو نسبت به حالت پایه در نظر گرفته شد. سپس تغییرات رواناب در این دو سناریو با مدل SWMM ارزیابی شد. نتایج اجرای مدل در سناریوی بدبینانه نشان داد که با افزایش ۳۱/۴ و ۲۶/۸ درصد بارش در دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ سال نسبت به دوره پایه، حجم رواناب به ترتیب ۲۵/۲ و ۲۰/۷ درصد افزایش و غلظت ذرات جامد نیز به ترتیب ۲۱/۴ و ۱۸/۳ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین، در این سناریو حجم آب‌گرفتنی در حوضه تا ۴۲/۱۲ درصد افزایش می‌یابد. در سناریوی خوش‌بینانه نیز با کاهش بارش‌های حدی، در دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ سال، حجم رواناب به ترتیب ۲/۲ و ۸/۳ درصد کاهش و غلظت ذرات جامد به ترتیب ۲/۵ و ۱۰ درصد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. در این سناریو با وجود کاهش بارش همچنان تعداد گره‌های سیلابی حوضه ثابت است که این موضوع اهمیت بررسی رویکردهای مدیریت رواناب در منطقه مورد مطالعه را نمایان می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** تغییرات اقلیمی، سیلاب شهری، سناریوهای SSP، مدل SWMM، مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم

نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: niksokhan@ut.ac.ir

**استناد:** حسنی، محمد رضا، نیک‌سخن، محمدحسین، اردستانی، مجتبی، و موسوی جنبه‌سرای، سید فرید (۱۴۰۲). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب شهری بر اساس مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: منطقه ۱۰ شهرداری تهران). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، (۲)، ۲۸۵-۲۶۹.

DOI:10.22098/MMWS.2022.11849.1176

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.18.8



تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۷۰/۱/۰۹/۲۸

*مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۲، صفحه ۲۶۹ تا ۲۸۵

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان

## ۱- مقدمه

پدیده تغییر اقلیم با تأثیر بر متغیرهای هیدرولوژیکی نظیر بارش و دما و به دنبال آن تأثیر بر منابع آب سطحی و زیرزمینی به یکی از موضوعات حیاتی بشر تبدیل شده است. در سال‌های اخیر تغییر در شدت و فراوانی بارش‌ها، بروز سیلاب‌های شدید و خشکسالی‌های متعدد، مدیران و تصمیم‌گیران این حوضه را بر آن داشته تا تأثیرات پدیده تغییر اقلیم را در برنامه‌ریزی‌های خود لحاظ کنند. در محیط‌های شهری به دلیل وجود مناطق نفوذناپذیر، بخش بیش‌تری از بارش به رواناب تبدیل شده و تغییر الگوی بارش ناشی از تغییر اقلیم می‌تواند عملکرد سیستم‌های جمع‌آوری رواناب را تحت تأثیر قرار دهد (Binesh et al., 2019, Ghodsi et al., 2020). از طرف دیگر با تغییر رژیم بارش، میزان شست و شو و انتقال آلاینده‌ها از سطح تغییر کرده و از این طریق کیفیت رواناب نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Hua et al., 2020). امروزه مدل‌های جفت شده جوی-اقیانوسی (AOGCMs) به عنوان پیشرفته‌ترین و معتبرترین ابزار جهت شبیه‌سازی تغییر اقلیم به‌شمار می‌آیند (Zahmatkesh et al., 2015). تا به امروز نسخه‌های متفاوتی از این مدل‌ها ارائه شده است که از میان آن‌ها می‌توان به مدل‌های گزارش چهارم (CMIP4) و گزارش پنجم (CMIP5) اشاره کرد. اخیراً نیز سری مدل‌های CMIP6 به‌عنوان جدیدترین نسخه از مدل‌های اقلیمی در گزارش ششم معرفی شده‌اند که امکان شبیه‌سازی دوره آتی را با دقت بسیار بالا فراهم می‌کنند (Eyring et al., 2016, Stouffer et al., 2017).

پژوهش‌های زیادی با بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی تأثیر تغییر اقلیم بر بارش و رواناب را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. به‌عنوان مثال (Yazdandoost et al., 2013) در پژوهشی به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر میزان رواناب شهری و بررسی توان سیستم زهکشی شهر تهران در پرداختند. آن‌ها از مدل‌های اقلیمی گزارش چهارم تحت سناریوهای A2 و B1 برای پیش‌بینی بارش و از مدل شبیه‌ساز سیلاب شهری (SWMM) برای بررسی عملکرد سیستم زهکشی استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در هر دو سناریوی اقلیمی، حجم سیلاب و گره‌های سیلابی در سیستم زهکشی افزایش یافته است. در این راستا، Abdollah (2014) و Shamsheer and Nazariha تأثیر تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت رواناب را در منطقه سه شهرداری تهران مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش برای گزینش مدل مناسب، خروجی ۱۶ مدل اقلیمی ارائه شده در گزارش چهارم با داده‌های

مشاهداتی منطقه مقایسه شده و مدل MIROC3 به‌عنوان بهترین مدل برازشی انتخاب شده است. در ادامه از مدل LARS-WG جهت ریزمقیاس‌نمایی و از مدل SWMM جهت شبیه‌سازی کمی و کیفی رواناب استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده افزایش ۲۰ درصدی دبی پیک رواناب است. همچنین، در خصوص پارامترهای کیفی (TP، TN و TSS) نتایج بیان‌گر کاهش متوسط غلظت آلاینده‌هاست که هم‌چنان بیش‌تر از استانداردهای سازمان محیط زیست ایران بوده و نیاز است جهت بهبود کیفیت رواناب اقداماتی نظیر پیش‌تصفیه انجام پذیرد. در ادامه، Zahmatkesh et al. (2015) به بررسی میزان تغییرات رواناب حوضه‌ای واقع در شهر نیویورک در شرایط تغییر اقلیم پرداختند. ابتدا خروجی مدل‌های CMIP5 با روش عامل تغییر ریزمقیاس‌نمایی شده و مقادیر حداکثر، میانگین و حداقل بارش به‌عنوان سناریوهای تغییر اقلیم دوره آتی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که فراوانی وقوع بارش‌های حدی در دوره آتی افزایش قابل‌توجهی داشته است. در ادامه از ابزارهای توسعه کم‌اثر (LIDs) جهت مدیریت رواناب تحت تغییر اقلیم استفاده شده است. نتایج نشان داد که اگرچه در سناریوهای تغییر اقلیم میانگین حجم رواناب سالانه نسبت به دوره پایه ۴۸ درصد افزایش یافته است، به‌کارگیری LIDها می‌تواند این مقدار را تا ۴۱ درصد کاهش دهد. همچنین، Jeon et al. (2019) تغییرات بار کل فسفر (TP) در شرایط تغییرات اقلیم را در حوضه رودخانه یئونگسن در جنوب غربی کشور کره جنوبی مورد بررسی قرار دادند. سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ به‌عنوان دوره پایه در نظر گرفته شد و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی تحت سناریوهای RCP و برای سال‌های ۲۰۴۰ تا ۲۰۵۰ انجام گرفت. نتایج حاکی از افزایش قابل‌توجه بار کل فسفر در تمامی سناریوهای تغییر اقلیم آینده و در تمامی ماه‌های سال، به‌جز ماه‌های ژوئن بوده است.

در پژوهش دیگری Behzadi et al. (2019) پایداری شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی منطقه ۱۱ شهر تهران را تحت تأثیر تغییر اقلیم مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از مدل SWMM برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب و از مدل‌های گزارش پنجم تغییرات اقلیمی جهت شبیه‌سازی بارش در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۹) استفاده شده است. ابتدا خروجی ۱۰ مدل گردش عمومی تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 با استفاده از مدل LARS-WG ریزمقیاس‌نمایی شده و در ادامه از میان آن‌ها مدل‌های CESM1-WACCM و CanESM2 تحت سناریوی RCP2.6 به‌ترتیب به‌عنوان خوش‌بینانه و بدبینانه‌ترین سناریو نسبت به دوره پایه تعیین شد. نتایج اجرای

<sup>1</sup> Atmosphere-Ocean General Circulation Models

<sup>2</sup> Coupled Model Intercomparison Project (Version 4)

<sup>3</sup> Coupled Model Intercomparison Project (Version 5)

<sup>4</sup> Storm Water Management Model

<sup>5</sup> Change Factor

<sup>6</sup> Low-Impact Development Practices

سناریوهای اقلیمی و سناریوهای تغییر کاربری اراضی نشان داد که بیشینه افزایش میزان رواناب، TSS، TN و TP به ترتیب برابر ۶۷/۶، ۶۶/۷، ۶۳/۴ و ۶۹/۴ درصد خواهد بود.

مرور پیشینه پژوهش‌ها در بحث ارزیابی تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد که بیش‌تر پژوهش‌ها در این زمینه با بهره‌گیری از مدل‌ها و سناریوهای گزارش پنجم و قبل‌تر انجام شده است و مطالعات کمی سناریوهای گزارش ششم را در ارزیابی‌های خود لحاظ کرده‌اند. از جمله مطالعات انجام‌گرفته با بهره‌گیری از مدل‌های گزارش ششم می‌توان به مطالعه Sarabi et al. (2021) که با بهره‌گیری از مدل‌های CMIP6 به بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر میزان بارش حوضه آبریز سد طرک پرداختند. در این مطالعه تغییرات بارش در دو دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP3.7 و SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه ۱۹۹۳-۲۰۱۲ پایش شد. نتایج نشان داد که میزان بارش در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوی SSP1-2.6 افزایش و تحت دو سناریوی دیگر کاهش خواهد یافت. همچنین، نتایج برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ حاکی از افزایش بارش تحت سناریوی SSP5-8.5 و عدم تغییر آن در دو سناریوی دیگر بوده است. در پژوهشی جامع Ansari et al. (2022) با بهره‌گیری از ۱۰ مدل اقلیمی CMIP6، میزان متوسط تغییرات بارش و دما در افق ۲۰۳۹-۲۰۲۰ را نسبت به تغییرات آن در دوره پایه در حوضه‌های آبریز ایران مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج رتبه‌بندی مدل‌های اقلیمی بر اساس توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی دوره پایه نشان داد که عملکرد این مدل‌ها بسته به اقلیم نواحی مختلف ایران، متفاوت است. همچنین، نتایج حاکی از آن است که طی ۲۰ سال آینده، بارش از حدود ۱۹+ تا ۱۲- درصد و افزایش دما در حدود ۰/۱ تا ۶/۰ درجه سلسیوس تغییر خواهند کرد.

از جمله محدودیت‌ها و نواقص موجود در مدل‌های گزارش پنجم می‌توان به درک ضعیف واداشت تابشی در مدل‌های اقلیمی با خطاهای سامان‌مند، مشکل تعیین منافع و هزینه‌های هر یک از عملیات کاهشی به‌طور جداگانه و عدم تمرکز بر علوم خاص در شبیه‌سازی اشاره کرد (Stouffer et al., 2017). در این راستا مدل‌های CMIP6 برای برطرف کردن نواقص مذکور ارائه شده است (O'Neill et al., 2017). در گزارش ششم، نحوه تغییر متغیرهای اقلیمی به کمک ترکیب سناریوهای RCP و SSP انجام می‌پذیرد. بر اساس این گزارش، سناریوهای آینده باید علاوه بر پوشش اقلیم‌های متفاوت، جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی توسعه را نیز در نظر بگیرند (Riahi et al., 2017). مدل‌های موجود در CMIP6 به‌مراتب از مدل‌های گزارش‌های قبلی وضوح بالاتری دارند. افزایش تعداد لایه‌های عمودی نسبت به مدل‌های گزارش پنجم و به‌دنبال آن شبیه‌سازی بهتر اقلیم در استراتوسفر

مدل نشان داد که تحت هر دو سناریو، حجم سیلاب و تعداد نقاط آب‌گرفتگی شبکه در مقایسه با شرایط کنونی افزایش چشم‌گیری نخواهد داشت. در ادامه، Noori Khajehbolagh and Mousavi (2021) تأثیر تغییر اقلیم را بر کمیت و کیفیت رواناب شهری حوضه‌ای در شهر کرج مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از مدل SWMM جهت شبیه‌سازی رواناب و از مدل CanESM2 (از سری مدل‌های گزارش پنجم تغییرات اقلیمی) جهت شبیه‌سازی بارش در دوره آتی استفاده شده است. نتایج بیانگر آن است که میزان میانگین بارش ۲۴ ساعته در سناریوهای RCP 2.6 و RCP8.5 در دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۹) نسبت به مقادیر مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۰۵) به ترتیب ۲۱ و ۱۱ درصد افزایش داشته و حداکثر بارش ۲۴ ساعته نیز به ترتیب ۱۷ و ۲۳ درصد با کاهش روبه‌رو شده است. نتایج مدل‌سازی کمی و کیفی رواناب نشان می‌دهد که در دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 دبی سیلاب به ترتیب ۵/۸ و ۷/۱ درصد و حجم آب‌گرفتگی در سطح حوضه نیز به ترتیب ۱۳ و ۱۵/۲۸ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. مقادیر غلظت آلاینده‌ها در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5، شامل کل مواد جامد معلق به ترتیب با افزایش غلظت ۴۸/۷ و ۲۴/۹ درصد، نیترژن کل با افزایش غلظت ۶/۹۳ و ۸/۴۸ درصد و آلاینده سرب به ترتیب با افزایش غلظت ۷/۳۲ و ۸/۹۱ درصد نسبت به دوره پایه همراه خواهد بود. در پژوهشی، Hejazizadeh et al. (2022) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا در شهر تهران پرداختند و از مدل CanESM2 تحت سناریوی RCP8.5 برای پایش تغییرات دما و بارش در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۸۳) استفاده شد. نتایج نشان داده که شاخص‌های بارشی در ایستگاه ابعلی روند افزایشی و در دو ایستگاه شمیران و مهرآباد روند کاهشی دارد. همچنین، شبیه‌سازی حوضه آبریز کن با مدل HEC-HMS نشان داد که حجم رواناب در دوره آتی پنج درصد کاهش خواهد داشت. در مطالعه‌ای دیگر Jahangir et al. (2022) با بررسی تغییرات عوامل اقلیمی در ایستگاه سینوپتیک بروجرد از نتایج پیش‌بینی مدل CanESM2 تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده کاهش روند بارش تحت هر سه سناریو و در تمامی دوره‌های مورد بررسی بوده است. در پژوهشی دیگر Alamdari et al. (2022) تأثیر تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر کمیت و کیفیت رواناب را مورد ارزیابی قرار دادند. دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برای بررسی تغییر اقلیم و سه سناریو برای بررسی تغییرات کاربری اراضی تعیین شد. نتایج بررسی تأثیر سناریوهای اقلیمی نشان داد که میزان افزایش بارش سالانه در سناریوی RCP8.5 بیش‌تر از RCP4.5 است. در ادامه نتایج ترکیب

هر دو نوع کانال اصلی و فرعی در شبیه‌سازی لحاظ شده‌اند. برای شبیه‌سازی کانال‌ها از اطلاعات Zistab Consulting Engineering Company (2012) استفاده شده است. تراکم جمعیتی بالای این منطقه، مناطق نفوذناپذیر زیاد، معابر و خیابان‌های متعدد و وجود زمین‌های کشاورزی در جنوب تهران به‌عنوان پذیرنده رواناب خروجی از حوضه، اهمیت مدیریت کمی و کیفی رواناب در منطقه را دو چندان کرده است.

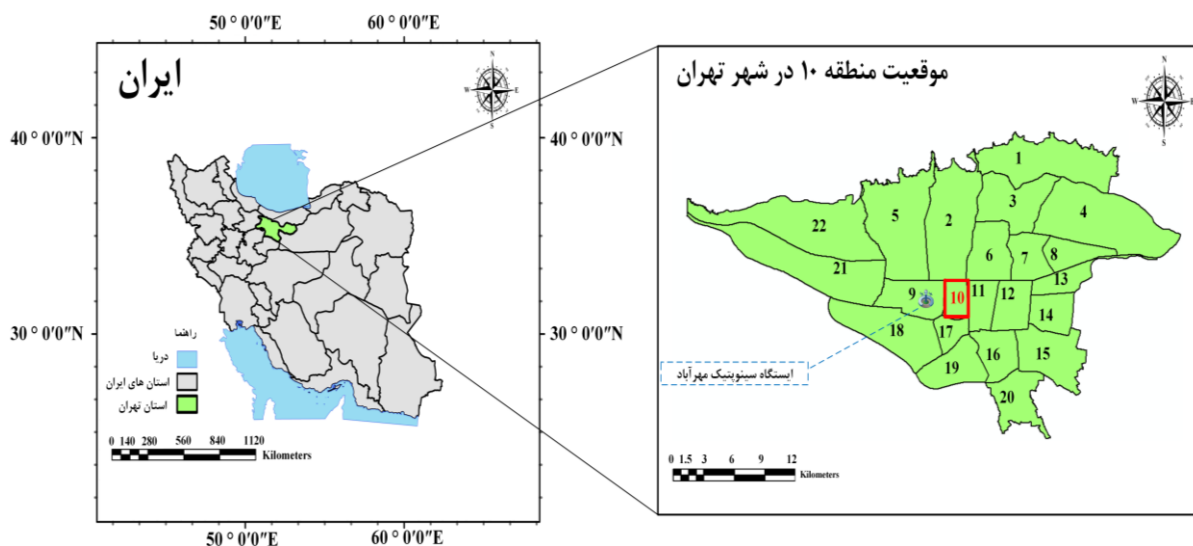
تغییرات بارش در اثر تغییرات اقلیمی در ایستگاه سینوپتیک مهرآباد مورد بررسی قرار می‌گیرد. ایستگاه مهرآباد به‌عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مورد مطالعه، در طول جغرافیایی  $35^{\circ}41'$  و عرض جغرافیایی  $52^{\circ}19'$  قرار دارد. ارتفاع این ایستگاه از سطح دریا  $119/08$  بوده و متوسط بارش سالانه آن  $232/7$  میلی‌متر گزارش شده است. در پژوهش حاضر برای بررسی عملکرد مدل‌های اقلیمی و در ادامه ریزمقیاس‌نمایی خروجی آن‌ها، از داده‌های روزانه بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه ثبت شده در این ایستگاه در طی سال‌های  $2010-1981$  استفاده شده است. شکل ۱ موقعیت منطقه ۱۰ و ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران را نشان می‌دهد.

از ویژگی‌های مدل‌های CMIP6 است (Stouffer et al., 2017). همچنین، سناریوهای بررسی شده در این گزارش نسبت به گزارش‌های قبلی توسعه یافته است که پژوهش‌گران را قادر می‌سازد تا تمامی جوانب توسعه را در پیش‌بینی‌های خود لحاظ کنند. بنابراین، در پژوهش حاضر ابتدا میزان تغییرات بارش در دوره آبی براساس پیش‌بینی مدل‌های CMIP6 پایش شده و سپس با بهره‌گیری از مدل شبیه‌ساز سیلاب شهری (SWMM) تأثیر این تغییرات بر کمیت و کیفیت رواناب در منطقه مورد مطالعه، ارزیابی شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر منطقه ۱۰ شهرداری تهران که با وسعت  $807$  هکتار در جنوب‌غربی استان تهران قرار دارد، انتخاب شده است (Behroozi et al., 2018). رواناب این منطقه توسط کانال‌های مختلف و مهمی از جمله کانال‌های کمیل و فیروزآبادی و رواناب تولیدی از زیرحوضه‌ها از طریق کانال‌های درجه دو زهکشی شده و به کانال‌های اصلی هدایت می‌شوند. بر اساس مطالعات هیدرولوژیکی کانال‌های اصلی، منطقه‌ای به وسعت  $1141$  هکتار را زهکشی می‌کنند (Behroozi et al., 2018). در این مطالعه



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه  
Figure 1- Location of the study area

برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در هر یک از سلول‌های شبکه بهره می‌گیرند (Marengo et al., 2010). مدل‌های GCM به سه دسته مدل‌های گردش عمومی جوی (AGCM)، گردش عمومی اقیانوسی (OGCM) و گردش عمومی جوی-اقیانوسی

### ۲-۲- شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی

#### ۲-۱-۱- مدل‌های گردش عمومی

مدل‌های گردش عمومی (GCM) قادر هستند تا تغییرات پارامترهای اقلیمی را در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم شبیه‌سازی نمایند. این مدل‌ها بر پایه قوانین فیزیک بنا شده و از روابط ریاضی

<sup>2</sup> Atmospheric General Circulation Models

<sup>3</sup> Oceanic General Circulation Model

<sup>1</sup> General Circulation Models

جنبه‌های پیشرفت اقتصادی و اجتماعی را نیز شامل شوند. در سناریوهای SSPs بر شبیه‌سازی چگونگی تغییر شرایط اقتصادی-اجتماعی مانند رشد جمعیت، رشد اقتصادی، آموزش، شهرنشینی، توسعه و تکنولوژی تأکید شده است (Riahi et al., 2017). در ادامه دو مورد از سناریوهای مورد نظر در این پژوهش به‌اختصار شرح داده می‌شود:

در سناریوی SSP1-2.6، با احترام به مرزهای محیط زیستی، جهان به سمت یک مسیر پایدارتر در استفاده از منابع طبیعی حرکت می‌کند. با سرمایه‌گذاری در بخش بهداشت و آموزش، رشد جمعیت تسریع شده و رشد اقتصادی به سمت تأکید بیش‌تر بر رفاه انسانی معطوف شده است. این سناریو با میزان اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی  $۲/۶۶$  وات بر مترمربع تا سال ۲۱۰۰، کم‌ترین میزان واداشت تابشی را برای دوره‌های آتی متصور شده است. سناریوی SSP5-8.5 حد بالای واداشت تابشی را پیشنهاد می‌دهد. در این سناریو سرمایه‌گذاری زیادی در زمینه بهداشت، آموزش و مؤسساتی برای افزایش سرمایه‌های انسانی و اجتماعی وجود دارد. در عین حال، فشار برای توسعه اقتصادی و اجتماعی، با بهره‌برداری از منابع سوخت فسیلی فراوان و اتخاذ شیوه زندگی متمرکز بر استفاده از منابع و انرژی در سراسر جهان همراه است (Riahi et al., 2017).

### ۲-۲-۳- ریزمقیاس‌نمایی

یکی از مشکلات استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی، بزرگ‌مقیاس بودن سلول‌های محاسباتی آن‌هاست. از این‌رو نمی‌توان از اطلاعات خام این مدل‌ها در مطالعات مربوط به مقیاس‌های کوچک‌تر استفاده کرد. در همین راستا، یاد خروجی این مدل‌ها با بهره‌گیری از روش‌های مناسب ریزمقیاس‌نمایی شود (Maraun et al., 2011).

ریزمقیاس‌نمایی به سه دسته روش‌های آماری، دینامیکی و تناسبی (دلتا) انجام می‌شود. در روش‌های آماری، ریزمقیاس‌نمایی با بهره‌گیری از روش‌های رگرسیونی و علم آمار و ایجاد ارتباط کمی بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس و متغیرهای کوچک‌مقیاس انجام می‌شود. از جمله روش‌های آماری می‌توان به مدل LARS-WG اشاره کرد. این مدل با دریافت اطلاعات تاریخی منطقه و شناخت ویژگی‌های آماری آن، وضعیت متغیرهای اقلیمی را در آینده پیش‌بینی می‌کند (Chisanga, 2017). در این پژوهش اطلاعات مربوط به متغیرهای بارش، دمای بیشینه، دمای کمینه و تعداد ساعات آفتابی مربوط به ایستگاه مهرآباد در طی سال‌های ۲۰۱۰-۱۹۸۱ به مدل LARS ارائه شده و پس از اطمینان از

(AOGCM) تقسیم می‌شوند. در حال حاضر معتبرترین ابزار برای مطالعه تغییرات اقلیمی مدل‌های AOGCM است (Roosbahani et al., 2020) که مهم‌ترین ورودی این مدل‌ها، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای که در قالب سناریوهای انتشار برای دوره‌های آتی ارائه شده، است (Behzadi et al., 2019).

مدل‌های اقلیمی عملکرد متفاوتی در پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی در نقاط مختلف دارند. از این‌رو می‌بایست قبل از استفاده از خروجی این مدل‌ها، توانایی آن‌ها مورد ارزیابی قرار داده شود. در همین راستا، در پژوهش حاضر برای انتخاب مدل‌های مناسب برای منطقه مورد مطالعه، ابتدا نتایج حاصل از پیش‌بینی بارش توسط مدل‌های اقلیمی (مربوط به نزدیک‌ترین سلول محاسباتی به ایستگاه مهرآباد) در دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۱) از سایت مرجع (ESGF) استخراج شد. در ادامه با مقایسه خروجی این مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی، مدل‌هایی که عملکرد مناسبی داشته باشند جهت پیش‌بینی بارش دوره آتی انتخاب می‌شوند. در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی از شاخص‌های  $R^2$  (King, 1986)،  $NSE$  (Nash and Sutcliffe, 1970) و  $RMSE$  (Barnston, 1992) استفاده شد (رابطه‌های ۱ تا ۳).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |o_i - p_i|^2}{\sum_{i=1}^n |o_i - \bar{o}_i|^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o}_i)(p_i - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p}_i)^2}} \right]^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{n}} \quad (3)$$

در این روابط  $O_i$  و  $P_i$  به ترتیب میانگین بلندمدت بارش پیش‌بینی شده و مشاهداتی در ماه  $n$ ام است و  $n$  هم نشان‌دهنده تعداد کل ماه‌های مورد بررسی؛ یعنی ۱۲ است.

### ۲-۲-۲- سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم

جدیدترین سناریوهای ارائه شده برای بررسی تغییرات اقلیمی، سناریوهای گزارش ششم (AR6) است. در این سناریوها چگونگی تغییر اقلیم در دوره‌های آتی بر اساس ترکیب سناریوهای انتشار (RCPs) و سناریوهای اقتصادی-اجتماعی (SSPs) بررسی می‌شود. در واقع بر اساس این گزارش، سناریوهای آینده علاوه بر توصیف اقلیم‌های متفاوت، باید

<sup>1</sup> Emission Scenarios

<sup>2</sup> Coefficient of Determination

<sup>3</sup> Nash-Sutcliffe Efficiency

<sup>4</sup> Root Mean Squared Error

<sup>5</sup> Sixth Assessment Report

<sup>6</sup> Radiative Forcing

در این مطالعه از مدل SWMM برای شبیه‌سازی کمیت و کیفیت رواناب در منطقه مورد پژوهش بهره گرفته شده است. مدل SWMM ابتدا در سال ۱۹۷۱ توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا<sup>۷</sup> (EPA) توسعه داده شد (Rossman, 2010) و تا به امروز چندین بار تحت نسخه‌های مختلف به‌روزرسانی شده است. در این مدل ابتدا منطقه مورد مطالعه به زیرحوضه‌هایی تقسیم می‌شود که هر کدام بارش و مؤلفه‌های هیدرولوژیکی را دریافت کرده و به ازای آن رواناب و آلاینده تولید می‌نمایند. سپس رواناب تولیدی از هر زیرحوضه آبریز وارد شبکه زهکشی شده و از طریق کانال‌ها به نقطه خروجی روندیابی می‌شود (Ghods et al., 2020). شبیه‌سازی در SWMM توسط سه فرآیند هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و کیفی انجام می‌پذیرد. ابتدا در فرآیند هیدرولوژیکی بارش به رواناب تبدیل شده و سپس با بهره‌گیری از فرآیند هیدرولیکی، رواناب تولیدی از طریق کانال‌ها زهکشی می‌شود. در این فرآیند از رابطه مانینگ برای تعیین رابطه میان نرخ تغییرات دبی، سطح مقطع، شیب و شعاع هیدرولیکی در کانال‌ها استفاده می‌شود. در فرآیند کیفی، نرم‌افزار با دریافت اطلاعاتی نظیر نوع آلاینده و کاربری اراضی در منطقه، کیفیت رواناب را با بهره‌گیری از دو فرآیند تجمع و آب‌شویی<sup>۹</sup> شبیه‌سازی می‌نماید. در این راستا ابتدا میزان آلاینده موجود بر روی سطح زمین با استفاده از تابع تجمع محاسبه شده و در ادامه شست و شو از سطح و انتقال این آلاینده‌ها در حین رخداد بارش با بهره‌گیری از تابع شست و شو شبیه‌سازی می‌شود. در این پژوهش از توابع نمایی (Rossman, 2010) برای شبیه‌سازی تجمع و آب‌شویی آلاینده‌ها استفاده شده است (رابطه‌های ۴ و ۵):

$$B = C_1(1 - e^{-C_2t}) \quad (4)$$

$$W = D_1 \times q^{D_2} \times B \quad (5)$$

در رابطه (۴)،  $C_1$ : بیش‌ترین میزان تجمع آلاینده (جرم/مساحت) و  $C_2$ : نرخ ثابت تجمع (زمان/۱) است. در رابطه (۵)،  $D_1$ : ضریب آب‌شویی،  $D_2$ : توان آب‌شویی،  $q$ : شدت بارندگی (میلی‌متر بر ساعت) و  $B$ : میزان تجمع آلاینده (جرم/مساحت) است.

#### ۲-۳-۲- شبیه‌سازی رواناب در منطقه مورد پژوهش

برای شبیه‌سازی رواناب در منطقه مورد پژوهش، ابتدا بر اساس شبکه اصلی و فرعی جمع‌آوری رواناب، منطقه به ۸۴ زیرحوضه آبریز تقسیم شده است. شمای کلی و موقعیت زیرحوضه‌های آبریز شبیه‌سازی شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

توانایی مدل در شناخت ویژگی‌های آماری ایستگاه مذکور، از این مدل جهت ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی تحت دو سناریوی SSP5-8.5 و SSP1-2.6 استفاده شده است. لازم به ذکر است که پیش‌تر توانایی مدل LARS-WG در ایستگاه مهرآباد و در طی دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۱) توسط Behzadi et al. (2019) تأیید شده است.

از آنجایی که مدل‌های گزارش ششم در نرم‌افزار LARS-WG تعریف نشده هستند بنابراین، نیاز است تا خروجی هر کدام از مدل‌ها با تعریف سناریو ریزمقیاس شود. به‌همین منظور داده‌های بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه مربوط به خروجی هر مدل برای دوره آتی تحت هر دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 استخراج شد. سپس برای پارامتر بارش، نسبت میانگین بلندمدت ماهانه دوره آتی به دوره پایه و برای پارامترهای دمای بیشینه و دمای کمینه، اختلاف میانگین بلندمدت ماهانه دوره آتی و دوره پایه محاسبه می‌شود. بنابراین، برای هر پارامتر در هر ماه ضریبی به‌دست می‌آید که از آن برای ایجاد سناریو در نرم‌افزار LARS-WG و ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های گزارش ششم استفاده می‌شود.

#### ۲-۴-۲- گسسته‌سازی بارش

از آنجایی که خروجی روزانه مدل LARS-WG برای انجام مطالعات مربوط به سیلاب بزرگ‌مقیاس است، در این پژوهش از روش ارائه شده در پژوهش Roozbahani et al. (2020) جهت گسسته‌سازی بارش‌های روزانه دوره آتی به بارش‌های شش ساعته استفاده شده است. در این روش ابتدا با بررسی توزیع‌های احتمالاتی متداول در علم هیدرولوژی نظیر توزیع نرمال، لوگ-نرمال دو و سه متغیره<sup>۱</sup>، پیرسون<sup>۲</sup>، لوگ-پیرسون نوع ۳<sup>۳</sup>، گامبل<sup>۵</sup> و مقادیر حدی تعمیم‌یافته<sup>۴</sup> مناسب‌ترین توزیع احتمالاتی به سری داده‌های حداکثر بارش سالانه دوره پایه در تداوم‌های ۶ و ۲۴ ساعته برآزش داده می‌شود. در ادامه در هر تداوم بارش‌هایی با دوره بازگشت ۵ و ۱۰ سال محاسبه شده و سپس با تقسیم این مقادیر، برای هر دوره بازگشت نسبتی به‌دست می‌آید که از آن برای محاسبه بارش‌های شش ساعته دوره آتی با دوره‌های بازگشت ۵ و ۱۰ سال استفاده می‌شود.

#### ۲-۳-۲- شبیه‌سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی

##### ۲-۳-۱- مدل SWMM

<sup>1</sup> Normal Distribution

<sup>2</sup> Two and Three-variable Log-Normal Distribution

<sup>3</sup> Pearson Distribution

<sup>4</sup> Log-Pearson type III Distribution

<sup>5</sup> Gumbel Distribution

<sup>6</sup> Generalized Extreme Value

<sup>7</sup> Environmental Protection Agency

<sup>8</sup> Build-up

<sup>9</sup> Wash-off



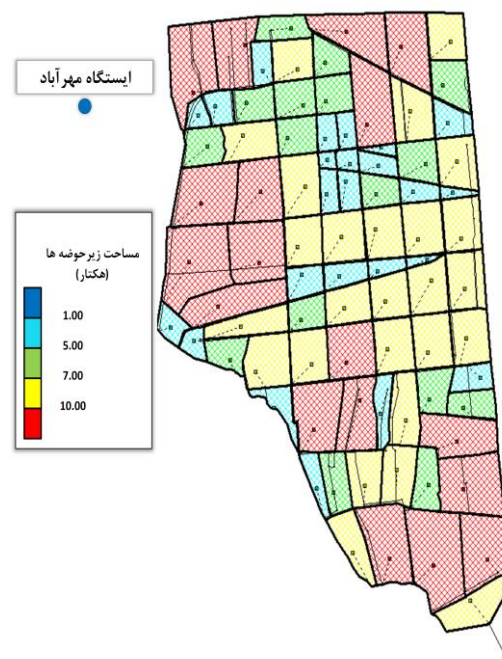
از بارش با مدت زمان شش ساعت جهت شبیه‌سازی استفاده شده است تا بتوان اطمینان حاصل کرد که تأثیر دورترین اجزای حوضه آبریز در تشکیل هیدروگراف خروجی لحاظ شده است. در این راستا در پژوهش حاضر بارش روزانه خروجی مدل LARS-WG با استفاده از روش ارائه شده در بخش قبلی (۲-۴) به بارش با تداوم شش ساعته گسسته شده است. بررسی ضوابط بین‌المللی نشان می‌دهد که معمولاً بارش طراحی شبکه‌های فرعی با دوره بازگشت ۲ تا ۱۰ سال انتخاب می‌شود (Debo and Reese, 2003). علت این موضوع اختلال شدید و جبران‌ناپذیر شبکه‌های فرعی در برابر بارش با دوره بازگشت بیش از ۱۰ سال است (Taheri Behbahani and Bozorgzadeh, 1996). از آنجایی که در این پژوهش شبکه‌های فرعی نیز در شبیه‌سازی هیدرولیکی لحاظ شده‌اند، دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال جهت شبیه‌سازی رواناب انتخاب شده است. برای تعیین توزیع زمانی بارش در طول تداوم آن از توزیع بارش شش ساعته ارائه شده توسط Mahab Ghods Consulting Engineering Company (2011) استفاده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی

با توجه به اهمیت مدل‌های اقلیمی به‌عنوان ابزار اصلی مطالعات تغییر اقلیم و نیز تعداد زیاد این مدل‌ها، انتخاب صحیح مدل‌هایی که توانایی بالایی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی دارند بسیار حائز اهمیت است و می‌تواند بر دقت و صحت پیش‌بینی‌ها و به‌دنبال آن تصمیم‌گیری در سطوح مختلف مدیریتی تأثیر به‌سزایی داشته باشد. در این راستا، عملکرد ۲۳ مدل اقلیمی از سری مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم در پیش‌بینی میانگین بلندمدت بارش در دوره پایه مورد ارزیابی قرار گرفت و پنج مدل با بهترین عملکرد برای پیش‌بینی بارش دوره آبی انتخاب جدول ۱ نتایج ارزیابی عملکرد این مدل‌ها را نشان می‌دهد.

شاخص‌های آماری محاسبه شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که مدل‌های MPI-ESM1-2-HR، KACE-1-0-G، MPI-CMCC و ESM1-2-LR، HADGEM3-GC31-LL و ESM2 نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری در برآورد بارش دوره پایه در ایستگاه مهرآباد داشته‌اند. از این‌رو از نتایج پیش‌بینی این مدل‌ها در دوره آبی جهت پایش تغییرات بارش در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است.



شکل ۲- زیرحوضه‌های آبریز شبیه‌سازی شده منطقه ۱۰ شهرداری تهران در SWMM  
Figure 2- Simulated sub-watersheds of District 10 of Tehran municipality in the SWMM

اطلاعات توپوگرافیک مربوط به زیرحوضه‌های آبریز شامل شیب، مساحت و درصد فضای نفوذناپذیر از طریق ArcMap 10.3.1 و لایه‌های اطلاعاتی موجود برای منطقه مورد مطالعه استخراج و به زیرحوضه‌های آبریز اختصاص داده شد. پارامتر عرض زیرحوضه آبریز با تقسیم مساحت زیرحوضه آبریز به بزرگ‌ترین طول آن محاسبه می‌شود. در این پژوهش با استفاده از ماژول تعبیه شده در نرم‌افزار Q-GIS، عرض هر زیرحوضه آبریز به‌صورت دقیق محاسبه و به آن‌ها اختصاص داده شد. برای شبیه‌سازی کیفیت رواناب نیز ضرایب مربوط به معادلات تجمع و آب‌شویی بر اساس مطالعه Soltani (2009) تعیین شده است. دستیابی به نتایج قابل اعتماد نیازمند واسنجی مدل شبیه‌ساز است. از این‌رو در پژوهش حاضر از مدل واسنجی شده منطقه مورد مطالعه انجام شده توسط Hassani et al. (2023) استفاده شده است.

بارش طراحی دارای چهار ویژگی اصلی عمق، تداوم، دوره بازگشت و توزیع زمانی است. عمق بارش در این پژوهش بر اساس پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 تعیین شده است. تداوم بارندگی می‌بایست به‌گونه‌ای انتخاب شود تا تأثیر رواناب دورترین نقاط حوضه آبریز در تشکیل هیدروگراف لحاظ شده باشد. این مدت زمان از لحاظ فنی برابر با زمان تمرکز حوضه آبریز و یا بیشتر از آن در نظر گرفته می‌شود (Marsalek and Watt, 1984). در این پژوهش

جدول ۱- عملکرد مدل‌های CMIP6 در پیش‌بینی بارش در دوره

پایه ایستگاه مهرآباد

Table 1- Performance of CMIP6 models in predicting precipitation during the base period in MehrAbad station

ردیف	مدل اقلیمی	شاخص آماری		
		NSE	RMSE	R <sup>2</sup>
1	CanESM5	0.186	13.94	0.25
2	INM-CM5	0.49	11.07	0.54
3	INM-CM4-8	0.16	14.12	0.29
4	CESM2-WACC	-1.32	23.55	0.004
5	GFDL-ESM4	-2.30	28.09	0.45
6	GISS-E2-1-G	0.007	15.40	0.29
7	GISS-E2-1-H	0.41	11.81	0.49
8	GISS-E2-2-H	0.001	15.45	0.13
9	KACE-1-0-G	0.72	8.05	0.80
10	IPSL-CM6A-LR	-3.59	23.15	0.88
11	NESM3	0.29	12.96	0.45
12	Miroc-ES2L	0.08	14.78	0.53
13	BCC-ESM1	-0.41	18.41	0.27
14	HADGEM3-GC31-LL	0.72	8.14	0.76
15	Miroc6	-1.68	25.33	0.22
16	MPI-ESM1-2-HR	0.50	10.86	0.70
17	MPI-ESM1-2-LR	0.80	6.74	0.84
18	EC-Earth3	0.32	12.74	0.38
19	IPSL-CM5A2-INCA	-0.42	18.46	0.73
20	IPSL-CM6A-LR-INCA	-3.12	31.37	0.78
21	MCM-UA-1-0	-0.08	16.05	0.23
22	KIOST-ESM	-0.78	20.63	0.01
23	CMCC-ESM2	0.75	7.64	0.77

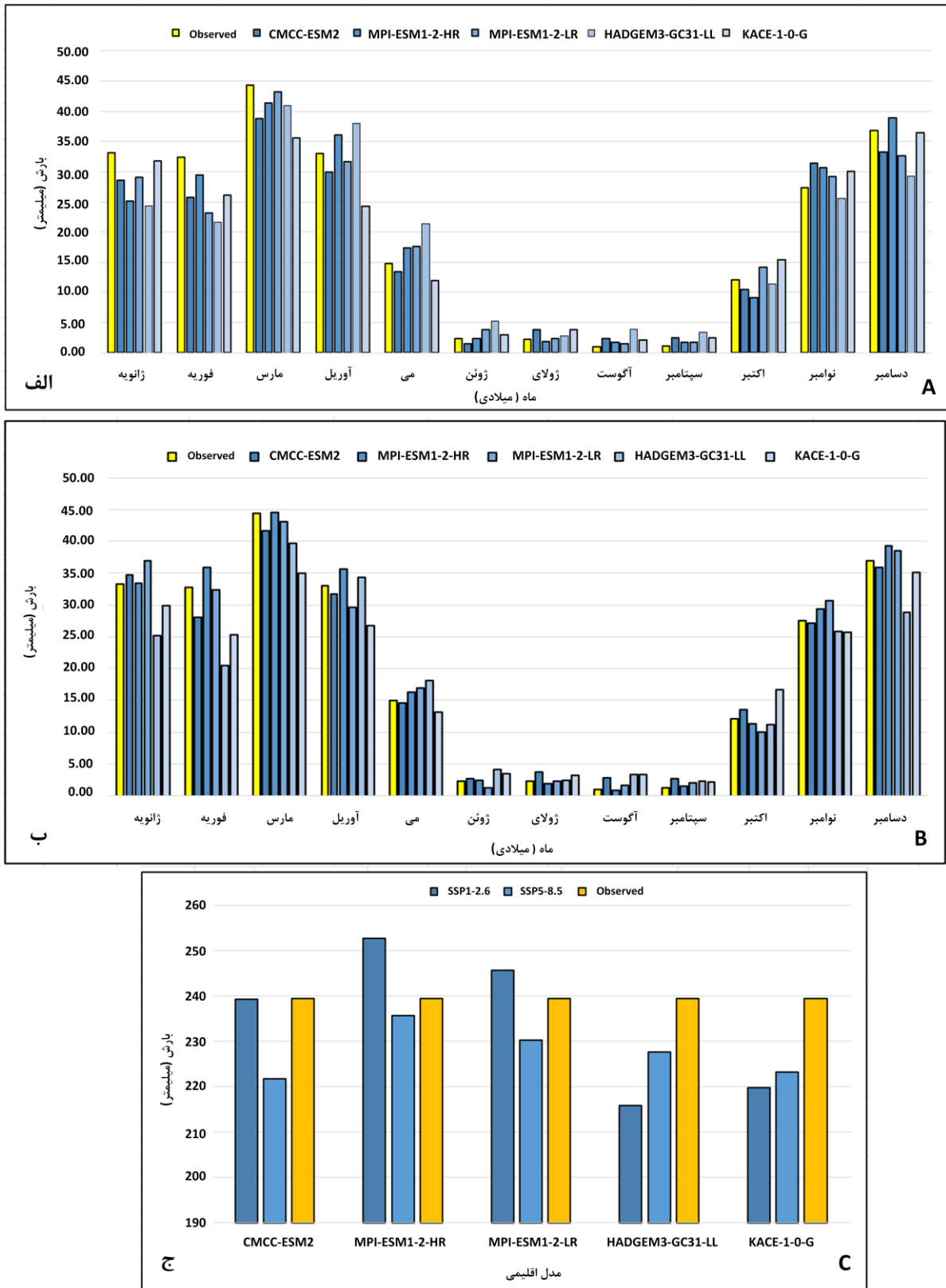
با توجه به آن که از چند شاخص جهت تحلیل عملکرد مدل‌ها استفاده شده است می‌توان از روش وزن‌دهی برای رتبه‌بندی مدل‌ها و انتخاب مدل‌های برتر استفاده کرد. در این روش در هر شاخص مدل‌ها بر اساس عملکرد از یک تا ۲۳ (تعداد مدل‌ها) نمره‌دهی خواهند شد. برای مثال بر اساس شاخص R<sup>2</sup> به مدل با بهترین عملکرد (بالاترین مقدار R<sup>2</sup>) نمره ۲۳ و به مدل‌های با دقت کمتر به نسبت نمره کم‌تری داده خواهد شد. همچنین، مدل‌ها بر اساس سایر شاخص‌ها و محدوده مناسب آن‌ها نمره‌دهی خواهند شد. در این حالت برای هر مدل سه نمره (با توجه به تعداد شاخص‌های مورد بررسی) حاصل می‌شود. در نهایت از نمرات به‌دست آمده برای هر مدل میانگین گرفته می‌شود و مدل‌هایی با بالاترین رتبه به‌عنوان مدل‌های برتر انتخاب می‌شوند.

۳-۲- ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر وضعیت بارش

پس از انتخاب مدل‌های اقلیمی مناسب برای منطقه مورد مطالعه، نتایج پیش‌بینی این مدل‌ها در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) ریزمقیاس‌نمایی شد. به‌منظور بررسی تغییرات بارش در دوره آتی متوسط ماهانه نتایج ریزمقیاس شده هر پنج مدل تحت دو سناریوی SSP 1-2.6 و SSP 5-8.5 محاسبه شد. شکل ۳-الف و ۳-ب به ترتیب نتایج پیش‌بینی بارش ماهانه تحت سناریوی SSP 5-8.5 و SSP 1-2.6 را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج، در تمامی مدل‌ها تحت سناریوی SSP 5-8.5 در ۸ ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس کاهش بارش و در ماه‌های اوت و سپتامبر افزایش بارش پیش‌بینی شده است. نتایج تحت سناریوی SSP 1-2.6 نشان از افزایش بارش در ماه سپتامبر دارد. سایر پیش‌بینی مدل‌ها از میزان تغییرات بارندگی ماهانه دوره آتی نسبت به دوره پایه هماهنگ نبوده و برخی مدل‌ها افزایش و برخی دیگر کاهش بارندگی را نشان می‌دهند. بیش‌ترین پیش‌بینی افزایش بارش نسبت به دوره پایه توسط مدل HADGEM تحت سناریوی SSP 1-2.6 مربوط به ماه اوت است. همچنین، بیش‌ترین کاهش بارش نیز توسط همین مدل و سناریو در ماه فوریه برابر با ۳۷/۴۷ درصد پیش‌بینی شده است. بیش‌ترین عدم قطعیت پیش‌بینی (اختلاف پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی مربوط به یک ماه خاص) نیز مربوط به ماه اوت تحت سناریوی SSP 1-2.6 است. در این ماه تغییرات بارش نسبت به دوره پایه از ۲۲۶/۳۱+ درصد افزایش برای مدل HADGEM تا ۱۸/۳۴- درصد کاهش برای مدل MPI-ESM1-2-HR متغیر است. نتایج پیش‌بینی بارش سالانه توسط مدل‌های اقلیمی نیز در شکل ۳-ج ارائه شده است.

با توجه به شکل ۳-ج، میانگین بارش سالانه در تمامی مدل‌ها تحت سناریوی SSP 5-8.5 نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. اما پیش‌بینی مدل‌ها تحت سناریوی SSP 1-2.6 روند مشخصی ندارد. در این سناریو در مدل‌های MPI-ESM1-2-HR و MPI-ESM1-2-LR افزایش بارش و در باقی مدل‌ها کاهش بارش پیش‌بینی شده است. بیش‌ترین کاهش بارش سالانه نسبت به دوره پایه برابر با ۹/۸ درصد مربوط به مدل HADGEM در سناریوی SSP 5.8.5 است. همچنین، با توجه به بیش‌ترین مدل MPI-ESM1-2-HR بیش‌ترین افزایش میانگین بارش سالانه ۵/۴ درصد نسبت به دوره پایه خواهد بود.



شکل ۳- مقایسه مقادیر بارش ماهانه ایستگاه مهرآباد تحت سناریوی SSP5-8.5 (الف)، مقایسه مقادیر بارش ماهانه ایستگاه مهرآباد تحت سناریوی SSP1-2.6 (ب) و

(ج) مقایسه مقادیر بارش سالانه ایستگاه مهرآباد تحت دو سناریوی SSP5-8.5 و SSP1-2.6

Figure 3- Comparison of monthly precipitation values of MehrAbad station under the scenario SSP5-8.5 (a), comparison of monthly the annual precipitation of MehrAbad precipitation values of MehrAbad station under the scenario SSP1-2.6 (b), and comparison of station under the scenario SSP1-2.6 and SSP5-8.5 (c)

نهایت با ضرب، ضریب گسسته‌سازی در این مقادیر، بارش‌های شش ساعته دوره آتی محاسبه شد. لازم به ذکر است که برای برآزش توزیع احتمالاتی به داده‌ها از نرم‌افزار HyfranPlus 2.2 یعنی Hydrological Frequency Analysis استفاده شد. مقادیر حداکثر بارش روزانه و شش ساعته در سناریوی SSP-1.2.6 و SSP-5.8.5 در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به نتایج، در تمامی مدل‌ها به جز مدل CMCC-ESM2 بارش‌های حدی افزایش دارد. همچنین، مقایسه حداکثر بارش‌های روزانه خروجی پنج مدل اقلیمی نشان می‌دهد (شکل ۴) که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان بارش به ترتیب توسط مدل‌های اقلیمی HADGEM3-GC31-LL و CMCC در سناریوی SSP5-8.5 برآورد شده است. حداکثر بارش‌های روزانه با دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال در سناریوی SSP5-8.5 در مدل HADGEM به ترتیب ۳۰ و ۲۶/۷ درصد افزایش و در مدل CMCC به ترتیب ۳/۵ و ۱۰/۲ درصد کاهش خواهند یافت. تحلیل بارش‌های شش ساعته نیز نشان داد که بیش‌ترین میزان تغییرات بارش در مدل HADGEM در سناریوی SSP5-8.5 با ۳۱/۴ و ۲۶/۸ درصد افزایش و کم‌ترین میزان تغییرات بارش نیز در مدل CMCC در سناریوی SSP5-8.5 با ۲/۵ و ۱۱/۳ درصد کاهش به ازای دوره بازگشت پنج و ۱۰ سال رخ می‌دهد.

برای بررسی تغییرات بارش‌های حدی و در ادامه شبیه‌سازی رواناب، بارش‌های روزانه خروجی مدل LARS-WG با روش آماری ارائه شده در بخش قبلی به بارش‌های شش ساعته گسسته‌سازی شدند. به دلیل یکسان بودن دوره مشاهده‌ای، از ضریب گسسته‌سازی ارائه شده توسط Roozbahani et al. (2020) برای تبدیل بارش‌های روزانه به شش ساعته بهره گرفته شد. با توجه به جدول ۲ ضریب گسسته‌سازی برای دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال ۰/۵۷ به دست آمده است.

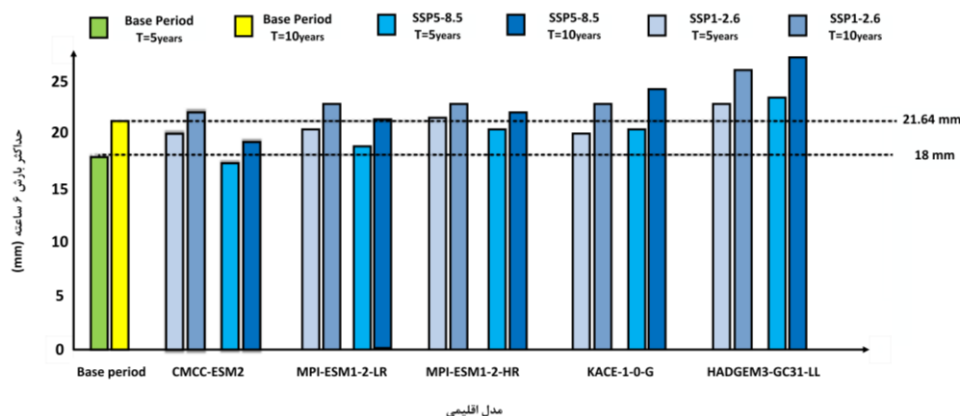
جدول ۲- مقادیر بارش دوره پایه در ایستگاه مهرآباد  
Table 2- Precipitation values of the base period in Merhabad synoptic station

متغیر	دوره بازگشت (سال)		تداوم (ساعت)
	10	5	
بارش (میلی‌متر)	37.9	31.8	24
ضریب گسسته‌سازی	0.57	0.57	6

در ادامه به سری داده‌های حداکثر بارش روزانه خروجی مدل LARS-WG تحت دو سناریوی SSP-1.2.6 و SSP-5.8.5 توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته (GEV) برآزش داده شد و بارش‌های روزانه با دوره بازگشت پنج و ۱۰ سال به دست آمد. در

جدول ۳- مقادیر بارش‌های شش و ۲۴ ساعته ایستگاه مهرآباد تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5  
Table 3- 6 and 24-hour precipitations values of MehrAbad station under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios

ردیف	مدل اقلیمی	بارش ۲۴ ساعته (میلی‌متر)				بارش شش ساعته (میلی‌متر)			
		SSP5-8.5		SSP1-2.6		SSP5-8.5		SSP1-2.6	
		10	5	10	5	10	5	10	5
1	CMCC-ESM2	19.43	17.55	22.34	20.46	34.1	30.8	39.2	35.8
2	MPI-ESM1-2-LR	21.60	19.20	22.97	20.86	37.9	33.7	40.3	36.6
3	MPI-ESM1-2-HR	22.34	20.57	23.08	21.71	39.2	36.1	40.5	38.1
4	KACE-1-0-G	24.39	20.57	23.19	20.06	42.8	36.1	40.7	35.2
5	HADGEM3-GC31-LL	27.45	23.66	26.25	23.06	48.16	41.51	46.07	40.47



شکل ۴- مقایسه مقادیر بارش شش ساعته با دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 با مقادیر مشاهده‌ای در ایستگاه مهرآباد  
Figure 4- Comparison of 6-hour precipitation with 5 and 10 years return periods under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios

خروجی حوضه آبریز نسبت به سناریوی پایه افزایش یافته است. این افزایش در بارش با دوره بازگشت پنج سال ۲/۵ درصد و در بارش با دوره بازگشت ۱۰ سال ۱۰ درصد خواهد بود.

جدول ۵- نتایج اجرای مدل SWMM در سناریوی خوش‌بینانه  
Table 5- SWMM results under an optimistic scenario

ردیف	متغیر	دوره بازگشت	
		10	5
1	حجم رواناب (۱۰ <sup>۳</sup> مترمکعب)	54.75	49.99
2	دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)	2.64	2.43
3	غلظت ذرات جامد معلق (میلی‌گرم بر لیتر)	355.32	391.7
4	حجم آب‌گرفتگی (۱۰ <sup>۳</sup> مترمکعب)	3.19	2.76

در سناریوی خوش‌بینانه با کاهش میزان بارش‌ها نسبت به دوره پایه، میزان شست و شوی آلاینده‌ها از سطح و نیز حجم رواناب خروجی از حوضه آبریز کاهش می‌یابد. در این سناریو کاهش در میزان حجم رواناب بیش‌تر از کاهش شست و شو از سطح بوده و به‌همین دلیل میزان غلظت آلاینده‌ها نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد.

به‌عبارتی در حوضه آبریز مورد مطالعه تأثیر کاهش بارش‌ها بر میزان حجم رواناب بیش‌تر از تأثیر آن بر شست و شوی آلاینده‌ها از سطح است. در این سناریو با توجه به کاهش بارش، سیستم با فشار کم‌تری نسبت به حالت پایه رواناب را منتقل می‌کند. در این سناریو حجم آب‌گرفتگی نسبت به سناریوی پایه تحت بارش با دوره بازگشت پنج سال ۴/۶ درصد و در بارش با دوره بازگشت ۱۰ سال ۱۲/۶۳ درصد کاهش می‌یابد. این سناریو با نتایج مطالعات (Jeon et al. (2019) و Noori و Khajehbolagh and Mousavi (2021) در مورد افزایش غلظت آلاینده‌ها در اثر تغییر اقلیم در دوره آتی و پژوهش Zhou et al. (2019) در مورد اثرگذاری تغییر اقلیم و توسعه شهری بر میزان رواناب مطابقت دارد.

جدول ۶ نتایج اجرای مدل برای سناریوی بدبینانه را نشان می‌دهد. در این سناریو نسبت به سناریوی پایه، حجم رواناب خروجی از حوضه آبریز به ازای بارش با دوره بازگشت پنج و ۱۰ سال به‌ترتیب با افزایش ۲۵/۲ و ۲۰/۷ درصدی برابر با ۶۴ و ۷۲/۱۸ هزار مترمکعب خواهد بود. دبی اوج رواناب نیز در این سناریو در بارش با دوره‌های بازگشت پنج و ۱۰ سال به‌ترتیب ۲۱/۴ و ۱۹/۹ درصد افزایش یافته است. هم‌چنین، متوسط غلظت ذرات جامد معلق در خروجی حوضه آبریز نسبت به مقادیر سناریوی پایه کاهش یافته است. در این سناریو با افزایش بارش‌ها نسبت به دوره پایه حجم رواناب خروجی از حوضه آبریز و میزان شست و شوی آلاینده‌ها از سطح افزایش می‌یابد. اما

در ادامه با توجه به موارد گفته شده و برای شبیه‌سازی منطقه مورد مطالعه و بررسی اثر تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت رواناب، خروجی مدل‌های HADGEM3-GC31-LL و CMCC-ESM2 تحت سناریوی SSP5-8.5 به‌ترتیب به‌عنوان سناریو بدبینانه و سناریوی خوش‌بینانه انتخاب شدند.

### ۳-۳- ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت رواناب

در این قسمت، ابتدا مدل SWMM برای سناریوی بارشی دوره پایه اجرا شده تا میزان تغییرات رواناب در سناریوهای تغییر اقلیم نسبت آن ارزیابی شود. جدول ۴ نتایج اجرای مدل با مقادیر بارش حالت پایه را نشان می‌دهد.

جدول ۴- نتایج اجرای مدل SWMM تحت سناریوی پایه  
Table 4- SWMM results under a base-case scenario

ردیف	متغیر	دوره بازگشت	
		10	5
1	حجم رواناب (۱۰ <sup>۳</sup> مترمکعب)	59.76	51.14
2	دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)	2.81	2.48
3	غلظت ذرات جامد معلق (میلی‌گرم بر لیتر)	322.96	382.12
4	حجم آب‌گرفتگی (۱۰ <sup>۳</sup> مترمکعب)	3.65	2.90

در این حالت به ازای بارش با دوره بازگشت ۵ سال حجم رواناب خروجی از حوضه آبریز ۵۱/۱۴ هزار مترمکعب بوده و با افزایش دوره بازگشت بارش به ۱۰ سال، حجم رواناب خروجی با افزایش ۱۶/۸ درصدی به ۵۹/۷۶ هزار مترمکعب می‌رسد. دبی اوج رواناب در خروجی حوضه آبریز به ازای بارش با دوره بازگشت پنج سال ۲/۴۸ مترمکعب بر ثانیه است و با افزایش دوره بازگشت بارش به ۱۰ سال دبی اوج رواناب با افزایش ۱۳/۳ درصدی به ۲/۸۱ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. هم‌چنین، متوسط غلظت ذرات جامد معلق در خروجی حوضه آبریز با افزایش دوره بازگشت بارش، با کاهش ۱۵/۴ درصدی از مقدار ۳۸۲/۱۲ (میلی‌گرم بر لیتر) در دوره بازگشت پنج سال به مقدار ۳۲۲/۹۶ میلی‌گرم به ازای دوره بازگشت ۱۰ سال می‌رسد. در این حالت در شش‌گه آب‌گرفتگی رخ داده است.

جدول ۵ نتایج اجرای مدل برای سناریوی خوش‌بینانه را نشان می‌دهد. در این سناریو به ازای بارش با دوره بازگشت پنج سال حجم رواناب خروجی نسبت به حالت پایه با کاهش ۲/۲ درصدی، ۴۹/۹۹ هزار مترمکعب و به ازای دوره بازگشت ۱۰ سال با کاهش ۸/۳ درصدی، ۵۴/۷۵ هزار مترمکعب خواهد بود. دبی اوج رواناب نیز در این سناریو نسبت به حالت پایه کاهش می‌یابد. این کاهش در بارش‌هایی با دوره بازگشت پنج و ۱۰ سال به‌ترتیب برابر با ۲ و ۶ درصد است. با کاهش میزان دبی خروجی از حوضه آبریز در این سناریو، متوسط غلظت ذرات جامد معلق در

نادرست شود. بنابراین، لحاظ نمودن اثرات تغییر اقلیم در شبیه‌سازی‌ها و طراحی‌های مربوط به آینده برای برنامه‌ریزی مناسب ضروری است. در این راستا، در پژوهش حاضر اثرات تغییر اقلیم بر بارش و به‌دنبال آن کمیت و کیفیت رواناب در منطقه ۱۰ شهر تهران مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از بررسی عملکرد مدل‌های اقلیمی در دوره مشاهداتی، پنج مدل با بهترین عملکرد انتخاب و پیش‌بینی این مدل‌ها تحت SSP1-2.6 و SSP5-8.5 مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل بارش‌های ماهانه نشان داد که در سناریوی SSP5-8.5 در تمامی مدل‌ها و سناریوها در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس کاهش بارش و در دو ماه اوت و سپتامبر افزایش بارش پیش‌بینی شده است. در مقیاس سالانه روند مشخصی وجود نداشته و در برخی مدل‌ها و سناریوها افزایش و در برخی دیگر کاهش بارش پیش‌بینی شده است. تغییرات میزان بارش سالانه نسبت به دوره پایه از ۹/۸- درصد کاهش تا ۵/۴+ درصد افزایش متغیر است. در ادامه و پس از تحلیل بارش‌های حدی شش ساعته، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار پیش‌بینی شده به‌ترتیب به‌عنوان سناریوی بدبینانه و خوش‌بینانه بارشی جهت پایش تغییرات رواناب تعیین شدند. در سناریوی خوش‌بینانه، با کاهش بارش‌های حدی نسبت به دوره پایه، متغیرهای کمی (حجم و دبی اوج سیلاب) کاهش و غلظت ذرات جامد در خروجی حوضه آبریز افزایش می‌یابد. در سناریوی دوم تحت عنوان سناریوی بدبینانه، با افزایش بارش‌های حدی، متغیرهای کمی افزایش و غلظت ذرات جامد معلق کاهش می‌یابد. با بررسی و مقایسه نتایج اجرای مدل مشخص شد که در سناریوی خوش‌بینانه، با وجود کاهش میزان بارش، هم‌چنان تعداد گره‌های سیلابی ثابت باقی‌مانده است که نشان‌دهنده آسیب‌پذیر بودن سیستم حتی در بارش حالت پایه و کمی کمتر از آن است. در سناریوی بدبینانه نیز افزایش حجم آب‌گرفتگی و تعداد گره‌های سیلابی لزوم استفاده از رویکردهای بهبود عملکرد سیستم جمع‌آوری رواناب در منطقه مورد مطالعه را نمایان می‌سازد. از لحاظ کیفی نیز استفاده از رویکردهای نوین برای کاهش بار آلودگی خروجی از سیستم در راستای کاهش آسیب‌پذیری بخش‌های پایین‌دست الزامی است. از این‌رو در مطالعات آتی استفاده از ابزارهای توسعه‌کم‌اثر به‌عنوان یکی از رویکردهای مؤثر مدیریت رواناب برای تطبیق با اثرات تغییر اقلیم توصیه می‌شود.

تأثیر افزایش بارش‌ها بر میزان حجم رواناب بیش‌تر از شست و شو از سطح بوده و به‌همین دلیل غلظت آلاینده‌ها در خروجی حوضه آبریز نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. این کاهش در بارش با دوره بازگشت پنج سال ۲۱/۴ درصد و در بارش با دوره بازگشت ۱۰ سال برابر با ۱۸/۳ درصد است.

جدول ۶- نتایج اجرای مدل SWMM تحت سناریوی بدبینانه  
Table 6- SWMM results under a pessimistic scenario

ردیف	دوره بازگشت		متغیر
	10	5	
1	72.18	64.04	حجم رواناب (۱۰ <sup>۳</sup> مترمکعب)
2	3.37	3.01	دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)
3	263.6	300	غلظت ذرات جامد معلق (میلی‌گرم بر لیتر)
4	4.97	4.12	حجم آب‌گرفتگی (۱۰ <sup>۳</sup> مترمکعب)

حجم آب‌گرفتگی در این سناریو نسبت به حالت پایه تحت بارش با دوره بازگشت پنج سال ۴۲/۱۲ درصد و تحت بارش با دوره بازگشت ۱۰ سال ۳۵/۹ درصد افزایش می‌یابد. هم‌چنین، در این سناریو یک گره نیز به گره‌های سیلابی سیستم افزوده شده است. خلاصه تغییرات بارش و متغیرهای کمی و کیفی رواناب در منطقه مورد مطالعه در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- درصد تغییرات (افزایش مثبت و کاهش منفی) متغیرهای رواناب نسبت به سناریوی پایه

Table 7- Percentage changes (positive increase and negative decrease) of runoff parameters compared to the base period

ردیف	سناریوی خوش‌بینانه				متغیر
	سناریوی بدبینانه		سناریوی خوش‌بینانه		
	10	5	10	5	
1	+26.8	+31.4	-11.3	-2.5	حداکثر بارش شش ساعته
2	+20.7	+25.2	-8.3	-2.2	حجم رواناب خروجی
3	+35.9	+42.1	-12.6	-4.6	حجم آب‌گرفتگی
4	+19.9	+21.4	-6	-2	دبی اوج
5	-18.3	-21.4	+10	+2.5	غلظت ذرات جامد معلق

#### ۴- نتیجه‌گیری

در گذشته، برنامه‌ریزی‌ها جهت مدیریت منابع آب بر اساس داده‌های تاریخی و با فرض تغییرات مشابه گذشته انجام می‌گرفت. در حالی که با توجه به اثرات تغییر اقلیم، اعتماد به آمار گذشته می‌تواند منجر به برنامه‌ریزی ناصحیح و اتخاذ تصمیمات

#### منابع

- انصاری، ثمین، دهبان، حسین، زارعیان، محمدجواد، و فرخ‌نیا، اشکان (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات دما و بارش حوضه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس برون‌داد مدل‌های
- CMIP6. پژوهش آب ایران، ۱۶(۱)، ۱۱-۲۴.  
doi:10.22034/IWRJ.2022.11204
- بهبودی، پریچهره، روزبهانی، عباس، و مساح بوانی، علی رضا (۱۳۹۸). تحلیل شاخص پایداری سیستم‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی

- منابع

- شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، (۱۳۹۱). طرح جامع مدیریت آب‌های سطحی تهران. جلد دوم، ۶۳ صفحه، تهران، ایران.
- شرکت مهندسی مشاور زیستاب، (۱۳۹۰). مطالعات جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی منطقه ده شهرداری تهران.
- طاهری بهبهانی، محمدطاهر، و بزرگ‌زاده، مصطفی (۱۳۷۴). سیلاب‌های شهری. مرکز انتشار مطالعات مرتبط با معماری و شهرسازی، تهران، ایران.
- عبدالله شمشیرساز، شاهین، و نظریها، مهرداد (۱۳۹۳). اثر تغییر اقلیم بر کیفیت رواناب شهری (مسئله زرگنده). دومین همایش منطقه‌ای تغییر اقلیم و گرمایش زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.
- نوری خواجه بلاغ، حامد، و موسوی، سید فرهاد (۱۴۰۰). اثرات تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت رواناب شهری قسمتی از حوضه آبریز کرج بر اساس سناریوهای RCP. *علوم آب و خاک*، ۳(۳)، ۵۹-۷۸.
- یزدان دوست، فرهاد، ملائکه پور شوشتری، سید محمدمهدی، و طهماسبی بیرگانی، یاسر (۱۳۹۲). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روند سیلاب‌های شهری و عملکرد سیستم زهکشی. کنفرانس ملی مدیریت سیلاب، تهران، ایران.
- تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: منطقه ۱۱ شهرداری تهران). *اكوهیدرولوژی*، ۳(۳)، ۶۳۱-۶۴۹. doi:10.22059/IJE.2019.274672.1035
- جهانگیر، محمدحسین، و روزبهانی، فاطمه (۱۴۰۱). تخمین بلندمدت تغییرات عوامل اقلیمی ایستگاهی تحت مدل CanESM2 (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک بروجرد). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۴)، ۳۷-۵۲. doi:10.22098/MMWS.2022.10479.1085
- حجازی‌زاده، زهرا، اکبری، مه‌ری، ساسان‌پور، فرزانه، حسینی، علیرضا، و محمدی، نیلوفر (۱۴۰۱). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا در استان تهران. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۲)، ۸۷-۱۰۵. doi:10.22098/MMWS.2022.9958.1075
- سرابی، مجتبی، دستورانی، محمدتقی، و زرین، آذر (۱۳۹۹). بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر وضعیت بارش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد طرق). هشتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- سلطانی، مریم (۱۳۸۸). مدل‌سازی کیفی نه‌رهای درون شهری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.

## References

- Abdollah Shamsirsaz, S.H., & Nazariha, M. (2014). The effects of climate change on urban runoff quality. the 2th Regional Conference on Climate Change and Earth Warming, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences Zanjan, Iran. [In Persian]
- Alamdari, N., Claggett, P., Sample, D.J., Easton, Z.M., & Yazdi, M.N. (2022). Evaluating the joint effects of climate and land use change on runoff and pollutant loading in a rapidly developing watershed. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129953. doi:10.1016/j.jclepro.2021.129953
- Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M., & Farokhnia, A. (2022). Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Researches Journal*, 16(1), 11-24. doi:10.22034/TWRJ.2022.11204 [In Persian]
- Barnston, A.G. (1992). Correspondence among the correlation, RMSE, and Heidke forecast verification measures; refinement of the Heidke score. *Weather and Forecasting*, 7(4), 699-709. doi:10.1175/1520-0434(1992)007<0699:CATCRA>2.0.CO;2
- Behroozi, A., Niksokhan, M.H., & Nazariha, M. (2015). Developing a simulation-optimisation model for quantitative and qualitative control of urban run-off using best management practices. *Journal of Flood Risk Management*, 11(1), 340-351. doi:10.1111/jfr3.12210
- Behzadi, P., Roozbahani, A., & Massah Bavani, A. (2019). Analysis of sustainability index in stormwater drainage systems under the climate change impacts (case study: District 11 of Tehran). *Iranian journal of Ecohydrology*, 6(3), 631-649. doi:10.22059/IJE.2019.274672.1035 [In Persian]
- Binesh, N., Niksokhan, M.H., Sarang, A., & Rauch, W. (2019). Improving sustainability of urban drainage systems for climate change adaptation using best management practices: a case study of Tehran, Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 64(4), 381-404. doi:10.1080/02626667.2019.158585710.4236/aicc.2017.63025
- Chisanga, C. B., Phiri, E., & Chinene, V. R. (2017). Statistical downscaling of precipitation and temperature using long Ashton research station weather generator in Zambia: a case of mount makulu agriculture research station. *American Journal of Climate Change*, 6(3), 487-512. doi:10.4236/ajcc.2017.63025
- Debo, T.N., & Reese, A. (2003). *Municipal stormwater management*. 2th Edition, CRC Press, 1172 pages.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., & Taylor, K.E. (2016). Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization.

- Geoscientific Model Development*. 9(5), 1937-1958. doi:10.5194/gmd-9-1937-2016
- Ghodsi, S.H., Zahmatkesh, Z., Goharian, E., Kerachian, R., & Zhu, Z. (2020). Optimal design of low impact development practices in response to climate change. *Journal of Hydrology*, 580, 124266. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124266
- Hassani, M.R., Niksokhan, M.H., Janbehsarayi, S.F., Mousavi Nikoo, M.R. (2023). Multi-Objective Robust Decision-Making for LIDs Implementation under Climatic Change. *Journal of Hydrology*, 128954. doi:10.1016/j.jhydrol.2022.128954
- Hejazizadeh, Z., Akbari, M., Sasanpour, F., Hosseini, A., & Mohammadi, N. (2022). Investigating the effects of climate change on torrential rains in Tehran province. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(2), 87-105. doi:10.22098/MMWS.2022.9958.1075 [In Persian]
- Hua, P., Yang, W., Qi, X., Jiang, S., Xie, J., Gu, X., Li, H., Zhang, J., & Krebs, P. (2020). Evaluating the effect of urban flooding reduction strategies in response to design rainfall and low impact development. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118515. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118515
- Jahangir, M.H., & Rouzbahani, F. (2022). Long-term estimation of changes in station climate parameters under the CanESM2 model (case study: Boroujerd synoptic station). *Water and Soil Management and Modeling*, 2(4), 37-52. doi:10.22098/MMWS.2022.10479.1085 [In Persian]
- Jeon, D.J., Ki, S.J., Cha, Y., Park, Y., & Kim, J.H. (2019). New methodology of evaluation of best management practices performances for an agricultural watershed according to the climate change scenarios: A hybrid use of deterministic and decision support models. *Ecological Engineering*, 119, 73-83. doi:10.1016/j.ecoleng.2018.05.006
- King, G. (1990). Stochastic variation: A comment on lewis-beck and skalaban's "the R-squared". *Journal Political Analysis*, 2, 185-200. doi:10.1093/pan/2.1.185
- MahabGhods Consulting Engineering Company, (2011). Integrated Plan of Tehran Surface Runoff Management, Second Volume: Primary Studies, First Section: Hydro Climatology Report. Tehran, Iran. [In Persian]
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A.M., Chandler, R.E., Kendon, E.J., Widmann, M.B., & Thiele-Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of geophysics*, 48(3). doi:10.1029/2009RG000314
- Marengo, J.A., Ambrizzi, T., Da Rocha, R.P., Alves, L.M., Cuadra, S.V., Valverde, M.C., Torres, R.R., Santos, D.C., & Ferraz, S.E. (2010). Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. *Climate Dynamics*, 35(6), 1073-1097. doi:10.1007/s00382-009-0721-6
- Marsalek, J., & Watt, M.E. (1984). Design storms for urban drainage design. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 11(3), 574-584. doi:10.1139/184-075
- Nash, J.E., & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Noori Kahajebolagh, H., & Mousavi, F. (2021). Effects of climate change on quantity and quality of urban runoff in a part of Karaj watershed based on RCP scenarios. *Journal of Water and Soil Science*, (3)25, 59-78. doi:10.47176/jwss.25.3.1013 [In Persian]
- O'Neill, B.C., Kriegler, E., Ebi, K.L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D.S., Van Ruijven, B.J., Van Vuuren, D.P., Birkmann, J., Kok, K., & Levy, M. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169-180. doi:10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004
- Riahi, K., Van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Crespo, C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Roa, Sh., Emmerling, J., ... & Tavoni, M. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
- Rouzbahani, A., Behzadi, P., & Bavani, A.M. (2020). Analysis of performance criteria and sustainability index in urban stormwater systems under the impacts of climate change. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122727. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122727
- Rossman, L.A. (2010). Storm water management model user's manual, version 5.0 (p. 276). Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Sarabi, M., Dastoorani, M.T., & Zarin, A. (2021). Evaluating the Effects of Climate Change on Future Rainfall (Case Study: Torogh Dam Basin). 8th National Conference on Water Resources Management. University of Ferdowsi, Mashhad, Iran. [In Persian]



- Soltani, M. (2009). Quality based modeling of inland channels. Master Thesis. Sharif University of Technology, Tehran, Iran. [In Persian]
- Stouffer, R.J., Eyring, V., Meehl, G.A., Bony, S., Senior, C., Stevens, B., & Taylor, K.E. (2017). CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 95-105. doi:10.1175/BAMS-D-15-00013.1
- Taheri Behbahani, M.T., & Bozorgzade, M. (1996). *Urban Floods*. Publication Center for Urban and Architecture Studies and Research, Tehran, Iran. [In Persian]
- Yazdandoost, F., Malaek poor shoostari, M.H., Tahmasbi birgani, Y. (2013). Evaluating the effects of climate change on urban stormwater trend and performance of drainage system. National Conference on Stormwater Management, Tehran, Iran. [In Persian]
- Zahmatkesh, Z., Karamouz, M., Goharian, E., & Burian, S.J. (2015). Analysis of the effects of climate change on urban storm water runoff using statistically downscaled precipitation data and a change factor approach. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(7), 05014022. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001064
- Zistab Consulting Engineering Company, (2012). Studies on surface water collection in district 10 of Tehran municipality. Tehran, Iran. [In Persian]
- Zhou, Q., Leng, G., Su, J., & Ren, Y. (2019). Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation. *Science of the Total Environment*, 658, 24-33. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.184