Journal of Natural Environment Hazards
University of Sistan and Baluchestan
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol.12, Issue 36, June 2023

Projection of future Precipitation changes in Tehran's water supply watersheds

Faeze Shoja[1], Ali Akbar Shamsipour[2*]

1. Postdoctoral researcher in climatology, Department of Physical Geography, University of Tehran, Iran
2. *Corresponding Author*, Associate professor in Climatology, Department of Physical Geography, University of Tehran, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 14 June 2022
Revised: 08 November 2022
Accepted: 17 November 2022

Keywords:
Bias correction, Climate change, CMIP6, Precipitation, SSP scenarios, Trend Tests.

ABSTRACT

This study identifies the impact of climate change on precipitation in watersheds of Tehran water supply in the horizon 2025-2050 under the scenarios of CMIP6. Therefore, first, the changes in precipitation trends in the base period were calculated using the precipitation data of the study area's 33 synoptic and rain gauge stations for the period 1989-2019. Then changes soon based on four models, CanESM5, CNRM-CM6-1, MIROC6, and MRI-ESM2-0, and under two scenarios, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 were projected. Due to the large scale of atmospheric general circulation models, two methods of linear scaling (LS) and distribution mapping (DM) were used for downscaling selected GCMs. Finally, the DM method was chosen to produce climatic scenarios due to its higher accuracy after calculating the validation indices of the models. The trend tests showed that in a significant part of the study basin, an increasing trend (with confidence levels of 0.95 and 0.99) in autumn and a decreasing trend in winter are observed during the observation period. In spring, the eastern and northeastern regions show a decreasing trend, and the northern and northwestern regions show an increasing precipitation trend. According to the output of GCM models, spring precipitation under the SSP2-4.5 scenario increases in all stations and decreases in 17 stations according to SSP5-8.5. Changes in summer precipitation are not significant in the present and future conditions, and winter and autumn are somewhat consistent with the changes in the observation period. Thus, in winter, precipitation, according to both scenarios, is less than in the current situation and is more in autumn under the SSP5-8.5 scenario. The effect of climate change on the amount of water in the watersheds also showed that the maximum water volume in the current conditions is related to the Karaj watershed. Between 2025 and 2050, the water content of this watershed increases by 8.9% in the CNRM-CM6-1 model according to the SSP2-4.5 But in MIROC6, MRI-ESM2-0, and CanESM5 models, it decreases by 5.3, 6.3, and 59.6 percent, respectively.

Cite this article: Shoja, F., & Shamsipour, A. (2023). Projection of future Precipitation changes in Tehran's water supply watersheds. Journal of Natural Environmental Hazards, 12(36), 151-180. DOI: 10.22111/jneh.2022.42622.1908

© Ali Akbar Shamsipour
Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2022.42622.1908

* Corresponding Author Email: shamsipr@ut.ac.ir

مخاطرات محیط طبیعی
شاپا چاپی: ۲۶۷۶-۴۳۷۷ شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۳۸۵
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۲، شماره ۳۶، تیر ۱۴۰۲

پیش‌نمایی تغییرات بارش‌های آتی حوضه‌های آبخیز تأمین‌کننده آب شهر تهران

فائزه شجاع[۱]، علی‌اکبر شمسی‌پور[۲*]

۱. محقق پسادکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول)
۲. دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۴

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۱/۰۸/۲۶

واژه‌های کلیدی:
آزمون‌های روند، بارش، تصحیح اُریبی، تغییر اقلیم، سناریوهای SSP، CMIP6.

چکیده

هدف این پژوهش شناخت اثر تغییر اقلیم بر مقدار بارش حوضه‌های آبخیز تأمین‌کننده آب شهر تهران در افق ۲۰۲۵-۲۰۵۰ تحت سناریوهای پروژه CMIP6 است. بنابراین، نخست تغییرات روند بارش در دوره پایه با بکارگیری داده‌های بارش ۳۳ ایستگاه همدیدی و بارانسجی حوضه مطالعاتی برای بازه زمانی ۱۹۸۹-۲۰۱۹ ارزیابی شد. سپس این تغییرات در افق آینده نزدیک بر مبنای برونداد ۴ مدل CanESM5، CNRM-CM6-1، MIROC6 و MRI-ESM2-0 و تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پیش‌نمایی گردید. با توجه به بزرگ مقیاس بودن مدل‌های گردش کلی جو از دو روش تصحیح اُریبی مقیاس‌گذاری خطی (LS) و نگاشت توزیع (DM) برای ریزگردانی GCMهای منتخب استفاده شد که در نهایت روش DM براساس مقادیر به‌دست آمده از معیارهای اعتبارسنجی مدل‌ها، به دلیل دقت بالاتر، برای تولید سناریوهای اقلیمی انتخاب گردید. نتایج آزمون‌های روند نشان داد که در دوره مشاهداتی، بخش قابل توجهی از حوضه مورد مطالعه در فصل پاییز روند افزایشی بارش (با سطوح اطمینان ۰/۹۵ و ۰/۹۹) و در زمستان روند کاهشی بارش را تجربه می‌کند، اما در بهار مناطق شرقی و شمال-شرقی روند کاهشی و مناطق شمال و شمال غرب روند افزایشی بارش را نشان می‌دهند. مطابق خروجی مدل‌های GCM، بارش در بهار تحت سناریوی SSP2-4.5، در تمام ایستگاه‌ها افزایش و مطابق SSP5-8.5 در ۱۷ ایستگاه کاهش خواهد یافت. تغییرات بارش تابستانه، در چشم انداز حال و آینده قابل توجه نیست و در زمستان و پاییز تا حدودی منطبق بر تغییرات دوره مشاهداتی است. بدین ترتیب که در زمستان، بارش برمبنای هر دو سناریو کمتر از شرایط کنونی و در پاییز تحت سناریوی SSP5-8.5 بیشتر خواهد بود. اثر تغییر اقلیم بر حجم آب حوضه‌ها نیز نشان داد که بیشترین حجم آب در شرایط فعلی مربوط به زیرحوضه‌ی کرج است که طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۰، در مدل CNRM-CM6-1 مطابق سناریوی SSP2-4.5، 8/9 درصد افزایش و در مدل‌های MIROC6 و MRI-ESM2-0 و CanESM5 به ترتیب به میزان ۵/۳، ۶/۳ و ۵۹/۶ درصد کاهش می‌یابد.

استناد: شجاع، فائزه، شمسی پور، علی اکبر. (۱۴۰۲). پیش‌نمایی تغییرات بارش‌های آتی حوضه‌های آبخیز تأمین‌کننده آب شهر تهران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۶)، ۱۸۰-۱۵۱. DOI: 10.22111/jneh.2022.42622.1908

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© فائزه شجاع، علی‌اکبر شمسی‌پور*.

*- علی‌اکبر شمسی‌پور (نویسنده مسئول)
Email: shamsipr@ut.ac.ir

مقدمه

تغییرات اقلیمی و خطرات بالقوه آن برای محیط‌زیست و جامعه به یکی از آشکارترین مسائل انسانی تبدیل‌شده است (لی و همکاران، ۲۰۱۹). امروزه اغلب محققان علوم جوی بر مسئله گرم شدن زمین و تأثیر آن بر چرخه آب اتفاق‌نظر دارند. افزایش دمای سطح زمین و تغییر در الگوهای بارندگی پدیده‌های غالب در تغییر اقلیم بوده و این دو کمابیش تمام بخش‌های دیگر چرخه آب را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند (احمدآبادی و صدیقی‌فر، ۱۳۹۷). در میان متغیرهای مختلف آبی- اقلیمی، بارش به‌دلیل اهمیت آن برای مدیریت پایدار آب، کشاورزی و اکولوژیکی، مهم‌ترین و مورد مطالعه‌ترین متغیر است (دیرس[1] و همکاران، ۲۰۲۱) و پیش‌بینی صحیح تغییرات بارش می‌تواند نقش مهمی در مدیریت منابع آبی جوامع داشته باشد (احمد و همکاران، ۲۰۱۵). بارش مستقیماً تحت تأثیر افزایش دمای جهانی است که سبب افزایش میزان تبخیر و تعرق و در نتیجه غلظت بخارآب موجود در جو می‌گردد. بنابراین، تغییرپذیری در ویژگی‌های مختلف بارش یعنی شدت، فراوانی، نوع و توزیع زمانی آن در مناطق مختلف مورد انتظار است (نسیدی[2] و همکاران، ۲۰۲۱). دوره[3] (۲۰۰۵) نشان داد که در چند سال گذشته بارش در مناطق پرباران، روند افزایشی داشته، درحالی‌که مناطق خشک و بیابانی خشکی بیشتری را تجربه کرده‌اند. طبق پژوهش دش[4] و همکاران (۲۰۰۷)، فراوانی رویدادهای شدید بارشی در بسیاری از مناطق آسیا افزایش یافته، حال‌آنکه شمار روزهای بارانی و میزان کل بارش سالانه کاهش پیدا کرده است. بارش بخش کلیدی چرخه هیدرولوژیکی است و هرگونه تغییر در الگوی آن به طور مستقیم بر منابع آب تأثیر می‌گذارد (پراوین[5] و همکاران، ۲۰۲۰). اثرات فاجعه بار تغییر اقلیم بر منابع آب شامل توزیع نابرابر بارش از نظر زمانی و مکانی است (المليکی[6] و همکاران، ۲۰۲۲) به طوریکه توزیع مکانی نامنظم بارندگی منجر به اختلاف قابل توجه در دسترسی به آب، بین مناطق مختلف گردیده و نیاز به مدیریت آب را تشدید می‌کند (ورسینی[7] و همکاران، ۲۰۱۶).

مادرشهر تهران با تراکم بالای جمعیت در چند دهه اخیر فشار زیادی به منابع اکولوژیک و بخصوص آب وارد نموده است. این شهر نظیر بسیاری از مادر شهرهای جهان با افزایش تقاضا برای آب شیرین و محدودیت منابع موجود مواجه است (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۸). موقعیت جغرافیایی شهر تهران و رشد بی‌رویه تقاضای آب برای مصارف جدید، علی‌رغم استفاده از منابع آب مجاور و حومه شهر، مدیریت آب شهری تهران را با شرایطی دشوار مواجه کرده (صلوی تبار و همکاران، ۱۳۸۵) که این مهم، در شرایط تغییر اقلیم ملموس‌تر می‌شود. اهمیت مسئله آب در مادرشهر تهران موجب گردید پژوهش حاضر بر آشکارسازی روند تغییرات فضایی و زمانی بارش در حوضه‌های آبخیز تأمین کننده آب این منطقه در شرایط فعلی و همچنین ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6[8] در بازتولید بارش سالانه و فصلی تحت سناریوهای ترکیبی مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSPs[9]) در اقلیم آینده متمرکز گردد.

1 - Diress
2 - Nasidi
3 - Dore
4 - Dash
5 - Praveen
6 - Al-Maliki
7 - Versini
8 - Coupled Model Intercomparison Project
9 - Shared Socioeconomic Pathways

بنابراین مشخص می‌شود وضعیت بارش حوضه‌های آبخیز منطقه مطالعاتی در شرایط فعلی به چه شکلی است و حجم آب این حوضه‌ها در اقلیم در حال گذار چه تغییراتی خواهد کرد.

مطالعات متعدد عملکرد مدل‌های GCM را در شبیه‌سازی ویژگی‌های بارش در مقیاس‌های مختلف ارزیابی کرده‌اند. منون[1] و همکاران (۲۰۱۳) که بارش‌های موسمی تابستانه هند را براساس ۲۰ مدل CMIP5 در شرایط آینده بررسی کردند به این نتیجه رسیدند که میانگین بارش فصلی در طول دوره‌های موسمی تابستانی به‌طور مداوم افزایش خواهد یافت. طبق پژوهش هومسی[2] و همکاران (۲۰۲۰) پیش‌بینی می‌شود که بارش در بخش وسیعی از کشور سوریه تحت سناریوی RCP6.0 کاهش یابد، درحالی‌که در برخی نقاط و برمبنای سایر RCP[3]ها در طول فصل مرطوب افزایش خواهد یافت. نتایج پژوهش شین[4] و همکاران (۲۰۲۱) نشان دهنده این بود که بارش در قرن بیست و یکم برمبنای SSPهای مختلف روند افزایشی داشته که این افزایش در آینده دور نسبت به آینده نزدیک و متوسط به میزان قابل توجهی بیشتر خواهد بود. مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر روند پارامترهای اقلیمی حوضه‌ی آبخیز باراندوزچای در آذربایجان غربی نشان داد که میانگین سالانه بارندگی دوره‌ی پایه در حوضه مذکور ۲۸۷/۳۷ میلی‌متر بوده و این میزان برای دوره‌ی آتی و تحت دو سناریوی A1B و A2 در مدل CNRMCM3 به‌ترتیب برابر۳۲۶/۵۵ و ۳۵۹/۲۸ میلی‌متر و برای سه سناریوی A1B، A2 و B1 در مدل IPSLCM4 برابر با ۳۲۰/۶۶، ۳۳۳/۹ و۳۲۶/۹۳ میلی‌متر می‌باشد. هرچند که در بعضی از سناریوها کاهش بارندگی مشاهده می‌گردد؛ اما افزایش بارش در اکثر سناریوهای مورد مطالعه این مدل‌ها غالب است (محمدلو و همکاران، ۱۳۹۵). نوده فراهانی و همکاران (۱۳۹۷) با بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشکسالی‌های دوره آتی حوضه شادگان نشان دادند که بارش در دوره آتی روند مشخصی ندارد. دولابیان و همکاران (۲۰۲۱) نیز که اثرات تغییر اقلیم را بر دما و بارش شش ایستگاه هواشناسی سینوپتیک به‌عنوان نماینده مناطق مختلف اقلیمی ایران ارزیابی کردند به این نتیجه رسیدند که دمای هوای سطحی در تمام ماه‌ها و احتمالاً برای همه مناطق افزایش می‌یابد، درحالی‌که برای بارش، عدم قطعیت‌های بزرگ وجود دارد. اگرچه برخی معتقدند که افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در نتیجه‌ی تغییر اقلیم می‌تواند با تسریع چرخه‌ی هیدرولوژیکی، باعث افزایش منابع آبی قابل دسترس در جو و تغییر فصلی بارش و دما در بسیاری از نقاط جهان گردد و در نهایت، این آشفتگی‌های اقلیمی منجر به افزایش تعداد بارش‌های سنگین در نیمه دوم قرن بیستم و یکم شود (IPCC, ۲۰۱۳)، لکن باید توجه داشت که پاسخ تمامی نقاط کره‌ی زمین به پدیده‌ی گرمایش جهانی صرفاً به صورت افزایش بارش نخواهد بود. به عبارتی، به دلیل تغییر الگوهای فشاری، برخی نقاط نیز می‌توانند با کاهش بارش مواجه گردند (بابائیان و همکاران، ۱۳۸۸؛ قلی‌پور و همکاران، ۱۴۰۰). در همین راستا استاد علی عسکری و همکاران (۲۰۲۰) که تغییرات الگوهای بارش را طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۴ برای دشت اصفهان-برخوار و با استفاده از پنج مدل گردش کلی جو مورد مطالعه قرار دادند به این نتیجه دست یافتند که بارش در همه سناریوهای انتشار کاهش می‌یابد که این کاهش در سناریوی انتشار RCP8.5 بیشتر از سایر RCPها است. پیش‌نگری تغییرات دمای هوا و بارش در نیمه غربی

[1] - Menon
[2] - Homsi
[3] - Representative Concentration Pathway
[4] - Qin

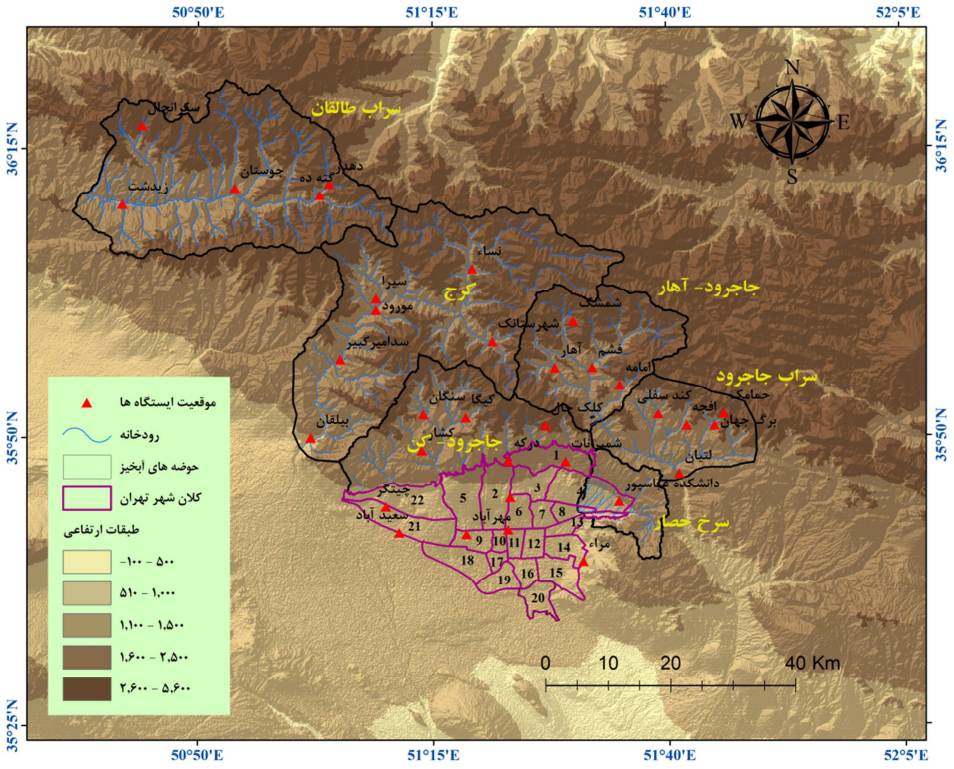
ایران بیانگر روند کاهشی معنی‌دار بارش در بیشتر مناطق بخصوص مناطق پربارش زاگرس مرتفع و شیب منفی در بیشتر ایستگاه‌ها می‌باشد (عبدلی و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین پیش‌بینی چندسالانه بارش ایران با مقیاس‌کاهی برونداد مدل‌های DCPP[1] نشان می‌دهد که مجموع میانگین بارش، در دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۳ در محدوده نرمال تا کمتر از نرمال است (بابائیان و همکاران، ۱۴۰۰). طبق پژوهش انصاری مهابادی و همکاران (۱۴۰۱) بارش دوره آتی در برخی از حوضه‌های آبریز کشور از جمله حوضه‌های شرقی افزایش و در برخی دیگر مانند حوضه‌های غربی کاهش خواهد یافت. بنابراین گرم شدن کره زمین و افزایش دما منجر به ایجاد الگوی متغیر در بارندگی شده که خود باعث وقوع مخاطرات سیل یا خشکسالی از مکانی به مکان دیگر می‌گردد، این مسئله چرخه آب را تحت تأثیر قرار داده و در نتیجه مخاطرات شدید و مکرر آب و هوایی اتفاق می‌افتد (محمدی، ۱۴۰۰). تغییر الگوی بارندگی در نتیجه تغییرات اقلیمی در حال حاضر دغدغه مدیران منابع آب و هیدرولوژیست‌ها است. با توجه به نتایج مطالعه اسلام[2] و همکاران (۲۰۱۲) تغییر در مقدار و فرکانس بارش‌ها می‌تواند الگوی جریان رودخانه و تقاضای آن، تخصیص مکانی و زمانی رواناب، ذخایر آب زیرزمینی و رطوبت خاک را تغییر دهد و این تغییرات منابع آب، محیط زیست، اکوسیستم زمینی، اقیانوس‌ها، تنوع زیستی، کشاورزی و امنیت غذایی را تحت تأثیر قرار خواهد داد. با توجه به پیشینه مطالعات انجام گرفته، در مناطق مختلف جهان، الگوها و روندهای بارشی متنوعی بدست آمده است که عدم قطعیت در رابطه با اثرات تغییر اقلیم را تشدید و لزوم مطالعه حوضه‌ای و منطقه‌ای را به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک تقویت می کند. بنابراین وضعیت مادرشهر تهران با شرایط اقلیمی، محیطی و ویژگی‌های انسانی و شهری خاص آن در برابر تغییر اقلیم به‌خصوص در بخش آب قابل توجه و ارزیابی اثرات آن بر منابع تأمین آب این منطقه ضروری است.

داده‌ها و روش‌ها

معرفی منطقه موردمطالعه:

منطقه مورد مطالعه مادرشهر تهران است که با ۲۲ منطقه، ۱۳۴ ناحیه و ۳۵۴ محله و وسعتی حدود ۷۳۰ کیلومتر مربع بین ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی واقع شده است. شهر تهران بین دو زون کوهستان البرز از شمال و شرق و دشت کویر از جنوب قرار گرفته و از سمت غرب، دشت ساوجبلاغ در جنوب کوه‌های منطقه ری و بی‌بی شهربانو و دشت‌های منتهی به کویر نمک، این شهر را محصور کرده‌اند (سالنامه آماری شهر تهران، ۱۳۹۶). بدلیل اختلاف ارتفاع بین شمال و جنوب شهر تهران و جهت شیب عمومی جنوب در حومه و بستر شهر، حوضه‌های آبخیز تأمین کننده آب این منطقه، در نوار شمالی شهر تهران در دامنه‌های جنوبی البرز قرار گرفته و محدوده حوضه‌های آبخیز با دو رود اصلی کرج در غرب و جاجرود در شرق کشیده شده‌اند. آبراهه‌ها و سرشاخه‌های متعددی در زیرحوضه‌ها جریان دارند و در کل با جریان های دایمی یا فصلی در جهت جنوب سبب تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی دشت تهران شده یا به رودخانه‌های بزرگتر متصل می‌شوند. موقعیت جغرافیایی مادرشهر تهران به همراه حوضه‌های آبخیز تأمین کننده آب این منطقه در شکل (۱) نشان داده شده است.

[1] - Decadal Climate Prediction Project
[2] - Islam



شکل ۱: موقعیت منطقه موردمطالعه و حوضه‌های آبخیز تأمین کننده آب شهر تهران. *منبع: وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران (۱۳۹۱)*

پژوهش حاضر در سه بخش انجام می‌شود:

روش‌های تحلیل روند:

بخش اول، تحلیل روند تغییرات بارش حوضه مورد مطالعه در شرایط فعلی است. برای ارزیابی و تحلیل روند، سری‌های زمانی طولانی مدت از پارامترهای اقلیمی مورد نیاز است تا از این طریق بتوان تغییرات در الگوهای آب‌وهوایی را به درستی شناسایی کرد و روند دقیق پارامترها را نشان داد. بنابراین آمار روزانه پارامتر بارش برای ۳۳ ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی مورد نیاز طی دوره زمانی ۳۱ ساله (۱۹۸۹-۲۰۱۹) از سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو دریافت شد و روند تغییرات، در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه ارزیابی گردید. موقعیت ایستگاه‌های منتخب پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است.

برای بررسی روند بارش از روش ناپارامتریک من-کندال و جهت تخمین بزرگی روند از برآوردگر شیب سن استفاده گردید. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که آزمون ناپارامتریک من-کندال جزء پرکاربردترین روش‌های تحلیل روند در

مطالعات هواشناسی و هیدرولوژی است (امیررضائیه و همکاران، ۱۳۹۵؛ اسود[1] و همکاران، ۲۰۲۰). مراحل محاسبه آماره این آزمون‌ها در پژوهش سلمی[2] و همکاران (۲۰۰۲) به تفصیل بیان شده است.

مدل‌های GCM و سناریوهای SSP:

بخش دوم پژوهش واکاوی اثرات تغییر اقلیم بر الگوهای بارش محدوده مورد مطالعه است. برای این منظور مدل‌های گردش عمومی (GCM) از فاز ششم پروژه مقایسه‌ای مدل جفت شده (CMIP6) انتخاب گردید. پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده گزارش ششم هیئت بین دولتی تغییر اقلیم از سناریوهای جدیدی به نام مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک (SSP) استفاده می‌کند که با نماینده خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP) پروژه گزارش پنجم IPCC ترکیب شده است (آیرینگ[3] و همکاران، ۲۰۱۶). سناریوهای جدید اضافه شده در CMIP6 شامل SSP1-1.9، SSP4-3.4، SSP3-7.0 هستند که چهار سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP4-6.0 و SSP5-8.5 نیز به‌روزشده سناریوهای RCP2.6، RCP4.5،RCP6.0 و RCP8.5 موجود در CMIP5 می‌باشند (گوپتا[4] و همکاران، ۲۰۲۰).

مدل‌های آب‌وهوایی فعلی قوی‌تر از مجموعه‌های قبلی CMIP هستند و پیشرفت‌های مؤثری را در بازتولید الگوهای بزرگ مقیاس متغیرهای آب‌وهوایی نشان داده‌اند (چن[5] و همکاران، ۲۰۲۰؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ آکینسانولا[6] و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژای[7] و همکاران، ۲۰۲۰). در تحقیق حاضر نیز خروجی ۴ مدل GCMs شامل CanESM5، CNRM-CM6-1، MIROC6 و MRI-ESM2-0 برای دوره تاریخی (۱۹۸۹-۲۰۱۴) و آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۵۰) از وب سایت پروژه مقایسه مدل جفت شده گزارش ششم به آدرس https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/ دریافت گردید. جزئیات مربوط به مدل‌ها و مؤسسه‌های توسعه دهنده آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

پیش‌نگری بارش در ایستگاه‌های موردمطالعه در این تحقیق برمبنای دو سناریوی SSP2-4.5 وSSP5-8.5 انجام می‌گردد. در SSP2-4.5، پیش‌بینی می‌شود که انتشار جهانی از الگوهای فعلی پیروی کند (جیمنز-ناوارو[8] و همکاران، ۲۰۲۱). این حاکی از موانع قابل‌توجهی برای کاهش و انطباق است. از سوی دیگر،SSP5-8.5 سناریویی را نشان می‌دهد که در آن توسعه اقتصادی بر اثرات زیست محیطی اولویت دارد. در نتیجه، مقابله با چالش‌های ناشی از تغییرات آب‌وهوایی دشوار است. این دو سناریو به طور گسترده در پژوهش‌های مربوط به تغییرات آب‌وهوایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، زیرا امکان مقایسه بین چشم‌انداز مثبت‌تر (SSP2-4.5) که در آن انتشار گازهای گلخانه‌ای متوسط بوده و اثرات تغییرات آب‌وهوایی به آن شدید نیست را در مقابل یک چشم انداز شدیدتر (SSP5-8.5) که در آن چالش‌های تغییر اقلیم بیشتر است، فراهم می‌کنند (جیمنز-ناوارو و همکاران، ۲۰۲۱).

---

[1] - Aswad
[2] - Salmi
[3] - Eyring
[4] - Gupta
[5] - Chen
[6] - Akinsanola
[7] - Zhai
[8] - Jiménez-Navarro

جدول ۱: مشخصات مدل‌های GCM مورد استفاده در تحقیق

ردیف	نام مدل	کشور/توسعه دهنده	عرض/ طول
۱	CanESM5[1]	CCCMA/Canada	۱۲۸×۶۴
۲	CNRM-CM6-1[2]	CNRM-CERFACS/France	۲۵۶×۱۲۸
۳	MIROC6[3]	MIROC/Japan	۲۵۶×۱۲۸
۴	MRI-ESM2-0[4]	MRI/Japan	۳۲۰×۱۶۰

روش‌های تصحیح اُریبی:

با توجه به اینکه مدل‌های اقلیمی به دلیل بزرگ مقیاس بودن سلول محاسباتی آن‌ها به لحاظ مکانی و زمانی نسبت به منطقه مورد مطالعه، نیازمند ریزگردانی هستند، بنابراین در ادامه پژوهش از دو روش تصحیح اُریبی مقیاس‌گذاری خطی و روش نگاشت توزیع برای ریزگردانی برونداد مدل‌های GCM استفاده شد و در نهایت روشی که کمترین مقادیر خطا را با داده‌های مشاهداتی نشان داد به‌عنوان روش مناسب جهت تولید سناریوهای اقلیمی مورد استفاده قرار گرفت.

مقیاس‌گذاری خطی (LS[5])

هدف روش LS تطبیق کامل میانگین ماهانه مقادیر اصلاح شده با مقادیر مشاهده شده است. این روش با مقادیر تصحیح شده ماهانه بر اساس تفاوت بین داده‌های مشاهده شده و خام عمل می‌کند. در روش LS بارش معمولاً با یک ضرب و دما با یک مقدار افزایشی به صورت ماهانه تصحیح می‌شوند (رابطه ۱):

$$P_{cor,m,d} = P_{raw,m,d} \times \frac{\mu(P_{obs,m})}{\mu(P_{raw,m})} \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، $P_{cor,m,d}$ بارش تصحیح شده را در روز dام از ماه mام نشان می‌دهد. $P_{raw,m,d}$ نیز بارش حاصل از خروجی مدل در روز dام از ماه mام است. $\mu(.)$ عملگر مورد انتظار را نشان می‌دهد (به عنوان مثال $\mu(P_{obs,m})$ نشان دهنده مقدار میانگین بارش مشاهده شده در ماه معین ام می‌باشد (فانگ و همکاران، ۲۰۱۵).

روش نگاشت توزیع (DM[6])

تکنیک DM برمبنای رویکردهای مختلفی مانند نگاشت توزیع احتمال[7]، نگاشت توابع توزیع تجمعی تجربی[8]، نگاشت چندک[9] و نگاشت توزیع چگالی کرنل[10] ارائه شده (مک گینیس[11] و همکاران، ۲۰۱۵) که در مطالعات متعدد جهت

[1] - Canadian Earth System Model
[2] - Centre National de Recherches Météorologiques
[3] - Model for Interdisciplinary Research on Climate
[4] - Meteorological Research Institute Earth System Model
[5] - Linear Scaling
3- Distribution Mapping
[7] - Probability Mapping
[8] - Empirical CDF Mapping
[9] - Quantile Mapping
[10] - Kernel Density Distribution Mapping
[11] - McGinnis

شبیه‌سازی آب و هوا استفاده می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲). این روش برای تصحیح میانگین، انحراف استاندارد و چندک‌ها با یکسان‌سازی توابع توزیع خروجی‌های مدل و داده‌های مشاهده‌ای به کار می‌رود. در روش DM فرض بر این است که بارش شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده، توزیع پیشنهادی یکسانی را دنبال می‌کنند که به نوبه خود ممکن است باعث ایجاد اُریبی گردد. بر این اساس برای توزیع رویدادهای بارشی، غالباً توزیع گاما با شکل α و مقیاس β استفاده می‌شود. رابطه (۲) (گوناواتی و سلواسیدو[1]، ۲۰۲۱؛ یی‌بوا[2] و همکاران، ۲۰۲۲):

$$f_\gamma(x|\alpha,\beta) = x^{\alpha-1} * \frac{1}{\beta^\alpha * \lceil(\alpha)} * e^{\frac{-x}{\beta}}; x \geq 0; \alpha,\beta > 0 \quad (۲)$$

در این معادله، f_γ تابع توزیع گاما، x متغیر تصادفی، $\lceil(.)$ نشان دهنده تابع گاما است و α و β به ترتیب، شکل و مقیاس پارامتر هستند که برای هر توزیع گاما با استفاده از تخمین حداکثر درستنمایی تعیین می‌شوند (اینس و هانسن[3]، ۲۰۰۶). e نیز عدد ثابت اویلر[4] (۲/۷۱۸۲۸) یک ثابت مهم است که در بسیاری از زمینه‌ها یافت می‌شود و پایه لگاریتم‌های طبیعی است (توچبین و سیبرت[5]، ۲۰۱۲).

قبل از اجرای روش DM، روش مقیاس‌گذاری شدت محلی[6] برای تعیین روزهای مرطوب با استفاده از آستانه‌های خاص اعمال می‌شود؛ سپس خروجی‌های مدل بر حسب تابع توزیع تجمعی گاما (Fγ) و تابع معکوس آن (F-1γ) مطابق روابط ۳ و ۴ تصحیح می‌گردند:

$$P^*_{control}(d) = F_\gamma^{-1}(F_\gamma(P_{control}(d)|\alpha_{control,m},\beta_{control,m})|\alpha_{observed,m},\beta_{observed,m}) \quad (۳)$$

$$P^*_{scenario}(d) = F_\gamma^{-1}\left(F_\gamma\left(P_{scenario}(d)|\alpha_{control,m},\beta_{control,m}\right)|\alpha_{observed,m},\beta_{observed,m}\right) \quad (۴)$$

در روابط بالا، منظور از $P_{control}$ و $P_{scenario}$ بارش در دوره تاریخی و آینده است. همچنین P^* نشان دهنده اُریبی تصحیح شده، P بارش و d سری زمانی روزانه است. F_γ و F_γ^{-1} نیز به ترتیب توابع توزیع تجمعی گاما (CDFs) و معکوس آن‌ها را نشان می‌دهند.

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌ها:

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های CanESM5، CNRM-CM6-1، MIROC6 وMRI-ESM2-0 در تولید داده‌های بارشی، پس از حذف اُریبی با هر دو روش LS و MD، دوره تاریخی این مدل‌ها با داده‌های مشاهده‌ای تمام ایستگاه‌های واقع در حوضه مطالعاتی مقایسه گردید. سپس سنجه‌های آماری RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا)، R2 (ضریب تبیین) و MAE (میانگین خطای مطلق)، برای آن‌ها محاسبه شد (حسینی‌خواه و همکاران، ۱۳۹۳؛ نسیدی و همکاران، ۲۰۲۱؛ فلاح کلاکی و همکاران، ۱۴۰۰؛) در نهایت میانگین این آماره‌ها در ایستگاه‌های منطقه معیار ارزیابی قرار گرفت.

---

[1] - Gunavathi & Selvasidhu
[2] - Yeboah
[3] - Ines & Hansen
[4] - Euler's number
[5] - Teutschbein & Seibert
[6] - Local Intensity Scaling Method

برآورد حجم آب حوضه‌های آبخیز:

در بخش پایانی تحقیق وضعیت حجم آب حوضه‌های آبخیز تأمین کننده‌ی آب شهر تهران در شرایط فعلی و تحت سناریوهای SSP در دوره آینده ارزیابی می‌گردد. برای این منظور، نخست آمار و اطلاعات مربوط به حوضه‌های آبخیز محدوده‌ی مورد مطالعه از شرکت مدیریت منابع آب ایران دریافت شد. سپس حوضه‌های آبخیز بالادست شهر تهران برمبنای مسیر آبراهه‌ها به زیر حوضه‌های کوچکتر سراب طالقان، کرج، جاجرود- آهار، سراب جاجرود، سرخ حصار و جاجرود- کن تقسیم (شکل ۱) و مساحت هر یک از این زیرحوضه‌ها در محیط ArcMap محاسبه گردید. در ادامه برای برآورد حجم آب، ایستگاه‌های واقع در هر یک از حوضه‌های آبخیز که آمار کاملتری داشتند انتخاب شدند و میانگین بارش سالانه آن‌ها برای دوره مشاهداتی (۱۹۸۹-۲۰۱۴) و همچنین آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۵۰) به دست آمد. از آنجاییکه هدف این مرحله برآورد کلی حجم آب حوضه آبخیز بدون در نظر گرفتن مقادیر تبخیر و تعرق، نفوذ و ... است، بنابراین با استفاده از روش تجربی ساده، میانگین بارش سالانه (بر حسب متر) ایستگاه‌های واقع در حوضه مورد نظر در مساحت حوضه (مترمربع) ضرب و مقدار حجم آب بر حسب متر مکعب در طول دوره‌ی آماری برآورد گردید (لنکستر و لیپکیس[1]، ۲۰۱۰).

نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل‌های CMIP6 و انتخاب روش تصحیح اُریبی:

مطابق نتایج ارئه شده در جدول ۲، روش‌های LS و MD عملکرد بسیار نزدیکی دارند که با توجه به اختلافات جزئی در شاخص RMSE و اهمیت بیشتر این شاخص در ارزیابی عملکرد مدل‌ها (یعقوب زاده و همکاران، ۱۴۰۰)، روش تصحیح خطای MD برای مطالعه حاضر انتخاب گردید. از طرف دیگر مدل‌های منتخب نیز از توانایی مشابه و نسبتاً مناسبی در باز تولید بارش دوره تاریخی حوضه مورد مطالعه برخوردار هستند؛ بنابراین به جهت کاهش عدم قطعیت، میانگین GCMهای منتخب (Ensemble) به‌جای مدل‌های منفرد برای پیش‌نمایی بارش در شرایط آتی مورد توجه قرار گرفت. مدل Ensemble بهتر از هر مدل جداگانه برای همه شاخص‌ها عمل می‌کند و از آنجاییکه عدم قطعیت‌های مدل ساختاری را تا حد زیادی حذف می‌کند، پیش‌بینی‌های آینده را به‌طور منطقی نشان می‌دهد (جی[2] و همکاران، ۲۰۲۱).

[1] - Lancaster & Lipkis
[2] - Ge

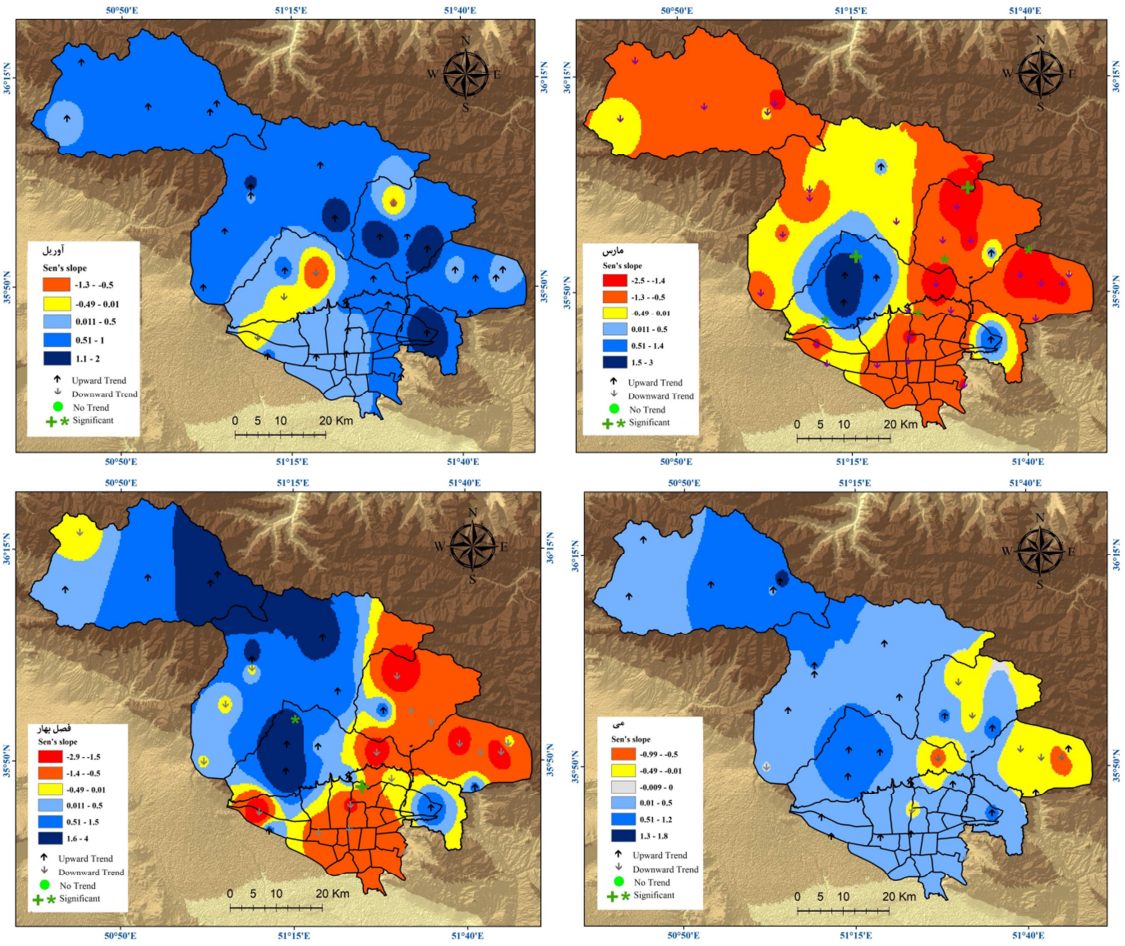
جدول ۲: معیارهای آماری استاندارد جهت ارزیابی روش‌های تصحیح اُریبی برای هرGCM

نام مدل	MRI-ESM2-0						MIROC6						CNRM-CM5-1						CanESM5					
تصحیح	LS		MD				LS		MD				LS		MD				LS		MD			
شاخص	RMSE	MAE	MD	RMSE	MAE	MD	RMSE	MAE	MD	R2	RMSE	MAE	MD	R2	RMSE	MAE	MD	R2	RMSE	MAE	MD	R2	RMSE	MAE	MD
زندشت	۲/۱۰۸	۲/۱۰	۲/۱۲۳	۰/۹۹۹۸	۱/۹۰	۱/۷۸	۲/۵۷	۲/۱۰	۳/۲۸	۰/۹۹۹۸	۲/۵۷	۲/۱۴	۳/۶۵	۰/۹۹۹۸	۲/۳۳	۲/۱۴	۳/۶۲	۰/۹۹۹۸	۳/۲۲	۳/۹۱	۴/۰۱	۰/۹۹۹۴		
دره که	۴/۸۰	۲/۲۴	۲/۸۷	۰/۹۹۸۹	۴/۶۲	۳/۶۰	۵/۳۰	۴/۲۴	۳/۷۸	۰/۹۹۸۹	۵/۳۰	۴/۲۸	۴/۶۸	۰/۹۹۸۹	۳/۶۵	۳/۱۰	۶/۳۵	۰/۹۹۸۹	۵/۷۰	۶/۱۰	۶/۹۹	۰/۹۹۸۴		
کلک چال	۴/۸۳	۴/۴۶	۳/۱۷	۰/۹۹۹۱	۴/۶۵	۲/۷۳	۵/۳۲	۴/۴۵	۳/۱۱	۰/۹۹۹۱	۵/۳۲	۴/۴۹	۶/۱۵	۰/۹۹۹۱	۳/۳۵	۴/۰۱	۶/۱۵	۰/۹۹۹۱	۴/۸۴	۶/۰۴	۶/۲۰	۰/۹۹۷۷		
عزرود	۴/۲۰	۲/۹۸	۲/۹۲	۰/۹۹۹۸	۴/۰۲	۲/۳۷	۳/۹۸	۲/۹۸	۳/۷۶	۰/۹۹۹۸	۴/۶۹	۴/۹۳	۷/۲۷	۰/۹۹۹۸	۳/۸۹	۴/۶۳	۷/۲۷	۰/۹۹۹۸	۵/۸۳	۶/۴۸	۶/۸۳	۰/۹۹۸۳		
سعید آباد	۵/۲۰	۴/۸۹	۲/۹۲	۰/۹۹۹۱	۵/۵۲	۴/۸۹	۴/۶۹	۴/۱۲	۳/۸۷	۰/۹۹۹۱	۶/۱۹	۴/۹۳	۷/۴۸	۰/۹۹۹۱	۳/۸۹	۴/۱۶	۶/۴۸	۰/۹۹۹۱	۵/۶۰	۶/۷۸	۷/۲۷	۰/۹۹۸۳		
نساء	۵/۲۰	۴/۳۱	۲/۳۶	۰/۹۹۹۹	۱/۸۰	۱/۷۰	۲/۳۷	۲/۱۲	۳/۷۰	۰/۹۹۹۷	۲/۳۶	۲/۶۳	۳/۱۵	۰/۹۹۹۹	۲/۱۸	۲/۱۶	۳/۲۹	۰/۹۹۹۹	۳/۲۹	۳/۶۹	۴/۱۳	۰/۹۹۹۵		
افجه	۴/۳۶	۲/۱۲	۳/۵۲	۰/۹۹۹۷	۴/۱۸	۴/۰۷	۴/۱۵	۴/۰۷	۳/۷۰	۰/۹۹۹۷	۴/۱۵	۴/۶۴	۵/۶۳	۰/۹۹۹۷	۴/۰۵	۴/۱۱	۵/۶۳	۰/۹۹۹۷	۷/۵۲	۸/۴۴	۸/۹۳	۰/۹۹۹۳		
کند سفلی	۶/۰۰	۲/۶۲	۵/۴۴	۰/۹۹۹۷	۷۳۱	۵۵۷	۵۵۰	۶/۶۲	۳/۱۰	۰/۹۹۹۷	۶/۴۶	۴/۶۶	۷/۶۲	۰/۹۹۹۷	۶/۳۱	۴/۶۶	۷/۶۲	۰/۹۹۹۷	۸/۴۴	۹/۳۱	۹/۷۹	۰/۹۹۸۹		
مراء	۶/۰۶	۳/۸۰	۲/۹۸	۰/۹۹۹۷	۳/۶۶	۲/۸۹	۳/۱۰	۳/۷۹	۳/۱۰	۰/۹۹۹۷	۳/۱۹	۳/۸۳	۴/۶۵	۰/۹۹۹۷	۳/۸۳	۳/۱۹	۴/۶۵	۰/۹۹۹۷	۵/۶۲	۵/۹۸	۶/۳۱	۰/۹۹۸۹		
لتیان	۱/۲۲	۱/۴۲	۱/۷۵	۰/۹۹۹۹	۱/۰۳	۱/۰۶	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۷۳	۰/۹۹۹۹	۱/۴۱	۱/۴۱	۲/۱۹	۰/۹۹۹۹	۱/۴۱	۱/۴۱	۲/۱۹	۰/۹۹۹۹	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۱۷	۰/۹۹۹۶		
شمشک	۴/۳۳	۲/۸۳	۳/۶۸	۰/۹۹۹۸	۴/۱۴	۴/۱۴	۳/۱۲	۴/۱۴	۳/۵۸	۰/۹۹۹۸	۴/۱۴	۴/۱۴	۵/۱۲	۰/۹۹۹۸	۴/۱۴	۴/۱۴	۵/۱۲	۰/۹۹۹۸	۵/۱۴	۵/۱۴	۵/۱۴	۰/۹۹۹۴		
شهرستانک	۱/۹۱	۲/۳۴	۲/۳۴	۰/۹۹۹۸	۱/۹۳	۱/۶۹	۲/۲۷	۲/۰۴	۲/۴۵	۰/۹۹۹۷	۲/۴۵	۲/۲۵	۳/۱۲	۰/۹۹۹۸	۲/۳۳	۲/۲۱	۳/۱۲	۰/۹۹۹۸	۳/۱۶	۳/۱۶	۳/۱۶	۰/۹۹۹۳		
بیلقان	۲/۲۷	۲/۲۸	۲/۵۴	۰/۹۹۹۷	۲/۰۹	۱/۹۳	۲/۲۷	۲/۰۴	۲/۴۵	۰/۹۹۹۷	۲/۴۵	۲/۲۵	۳/۱۲	۰/۹۹۹۷	۲/۳۳	۲/۲۱	۳/۱۲	۰/۹۹۹۷	۳/۱۶	۳/۱۶	۳/۱۶	۰/۹۹۹۳		
سیرا	۲/۲۵	۲/۸۷	۳/۱۷	۰/۹۹۹۸	۲/۷۲	۲/۷۴	۳/۱۷	۲/۸۷	۳/۱۷	۰/۹۹۹۸	۳/۱۷	۳/۱۷	۴/۱۳	۰/۹۹۹۸	۳/۱۷	۲/۸۷	۴/۱۳	۰/۹۹۹۸	۴/۱۷	۴/۱۷	۴/۱۷	۰/۹۹۹۵		
قشم	۲/۶۵	۲/۶۷	۲/۶۰	۰/۹۹۹۸	۲/۴۶	۱/۸۹	۲/۶۷	۲/۶۷	۲/۴۶	۰/۹۹۹۸	۲/۴۶	۲/۴۶	۳/۱۲	۰/۹۹۹۸	۲/۴۶	۲/۴۶	۳/۱۲	۰/۹۹۹۸	۳/۱۶	۳/۱۶	۳/۱۶	۰/۹۹۹۴		
آهار	۷/۰۱	۶/۴۶	۵/۶۰	۰/۹۹۹۷	۵/۵۷	۵/۲۹	۶/۴۶	۶/۴۶	۵/۴۶	۰/۹۹۹۷	۵/۴۶	۵/۴۶	۶/۲۹	۰/۹۹۹۷	۵/۴۶	۵/۴۶	۶/۲۹	۰/۹۹۹۷	۷/۲۶	۷/۲۶	۷/۲۶	۰/۹۹۷۶		
سدامیرکبیر	۱/۰۰	۱/۵۷	۱/۵۳	۰/۹۹۹۹	۰/۸۲	۰/۸۴	۱/۱۵	۱/۲۴	۱/۷۳	۰/۹۹۹۹	۱/۲۴	۱/۲۴	۲/۱۴	۰/۹۹۹۹	۱/۲۴	۱/۲۴	۲/۱۴	۰/۹۹۹۹	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۱۷	۰/۹۹۹۵		
آبهای	۲/۹۸	۲/۹۱	۲/۸۸	۰/۹۹۹۶	۲/۸۱	۲/۴۷	۲/۷۹	۲/۷۸	۲/۸۷	۰/۹۹۹۶	۳/۴۸	۳/۲۹	۴/۱۳	۰/۹۹۹۶	۳/۲۹	۲/۷۸	۴/۱۳	۰/۹۹۹۴	۴/۶۰	۴/۶۰	۴/۶۰	۰/۹۹۹۴		
حمامک	۵/۷۴	۴/۶۳	۵/۶۰	۰/۹۹۹۴	۴/۱۳	۴/۱۸	۵/۶۰	۵/۶۰	۴/۱۲	۰/۹۹۹۴	۴/۱۳	۴/۱۳	۵/۱۲	۰/۹۹۹۳	۴/۱۳	۴/۱۳	۵/۱۲	۰/۹۹۹۳	۵/۹۵	۵/۹۵	۵/۹۵	۰/۹۹۹۳		
برگ جهان	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۳۰	۰/۹۹۹۲	۲/۰۳	۰/۹۲	۲/۲۰	۲/۲۱	۱/۴۱	۰/۹۹۹۲	۲/۲۴	۲/۲۴	۳/۱۲	۰/۹۹۹۲	۲/۲۴	۲/۲۴	۳/۱۲	۰/۹۹۹۲	۳/۲۶	۳/۲۶	۳/۲۶	۰/۹۹۷۶		
جوستان	۰/۸۸	۱/۳۱	۱/۴۶	۰/۹۹۹۹	۰/۷۰	۰/۸۴	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۴۶	۰/۹۹۹۹	۱/۴۶	۱/۴۶	۲/۱۴	۰/۹۹۹۹	۱/۴۶	۱/۴۶	۲/۱۴	۰/۹۹۹۵	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۱۷	۰/۹۹۹۴		
گنه ده	۲/۵۱	۲/۳۲	۲/۲۹	۰/۹۹۹۷	۲/۴۴	۲/۸۷	۳/۲۶	۲/۴۹	۳/۲۶	۰/۹۹۹۷	۳/۲۶	۳/۲۶	۴/۲۱	۰/۹۹۹۷	۳/۲۶	۲/۴۹	۴/۲۱	۰/۹۹۹۲	۴/۲۵	۴/۲۵	۴/۲۵	۰/۹۹۹۲		
سکرانجال	۴/۶۰	۲/۹۰	۳/۷۲	۰/۹۹۹۷	۴/۴۲	۴/۴۲	۴/۶۵	۳/۲۹	۴/۶۵	۰/۹۹۹۷	۴/۶۵	۴/۶۵	۵/۶۱	۰/۹۹۹۷	۴/۶۵	۴/۶۵	۵/۶۱	۰/۹۹۹۸	۵/۱۱	۵/۱۱	۵/۱۱	۰/۹۹۹۲		
میرآباد	۰/۰۱	۱/۷۳	۱/۹۴	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۲	۱/۱۸	۱/۷۳	۱/۹۴	۱/۷۳	۰/۹۹۹۹	۱/۹۴	۱/۹۴	۲/۱۸	۰/۹۹۹۹	۱/۹۴	۱/۹۴	۲/۱۸	۰/۹۹۹۸	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۰/۹۹۹۸		
شمیرانات	۰/۰۱	۲/۵۰	۲/۷۳	۰/۹۹۹۹	۰/۰۱	۰/۷۷	۱/۰۱	۰/۰۰۱	۲/۵۰	۰/۹۹۹۹	۲/۵۰	۲/۵۰	۳/۱۱	۰/۹۹۹۹	۲/۵۰	۲/۵۰	۳/۱۱	۰/۹۹۹۸	۳/۳۸	۳/۳۸	۳/۳۸	۰/۹۹۹۸		
میانگین	۴/۳۱	۲/۱۵	۳/۱۱	۰/۹۹۹۷	۳/۱۳	۲/۶۰	۳/۱۵	۳/۱۵	۳/۰۱	۰/۹۹۹۷	۳/۱۹	۳/۱۹	۴/۱۵	۰/۹۹۹۲	۳/۱۵	۳/۱۵	۴/۱۵	۰/۹۹۹۲	۴/۰۲	۴/۰۲	۴/۰۲	۰/۹۹۹۲		

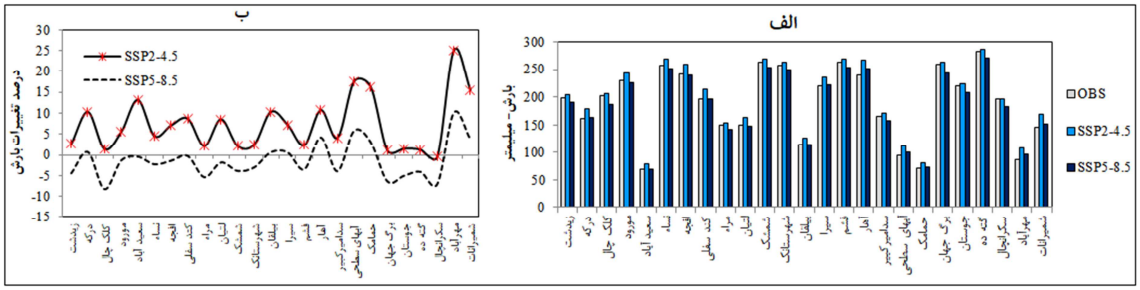
واکاوی تغییرات روند در شرایط فعلی و عملکرد مدل‌های GCM در پیش‌نمایی بارش در افق ۲۰۲۵-۲۰۵۰:

نتایج تحلیل روند بارش ایستگاه‌های مورد بررسی در سطوح اطمینان ۰/۹۵ و ۰/۹۹ بر مبنای سری‌های زمانی بلندمدت در مقیاس‌های زمانی ماهانه و فصلی در شکل‌های ۲ تا ۸ نشان داده شده است. با توجه به نقشه‌های هم‌روند، تغییرات متفاوتی در ایستگاه‌های مطالعه شده به چشم می‌خورد. شکل ۲ توزیع مکانی میانگین روند بارش را طی دوره زمانی ۳۱ ساله در ماه‌های فصل بهار نشان می‌دهد. نقشه‌ی پهنه‌بندی هم‌روند در ماه مارس گویای این است که به‌جز ایستگاه‌های واقع در حوضه جاجرود در محدوده شمال و شرق تهران، بارش در سایر قسمت‌های حوضه روند کاهشی داشته و بیشینه این کاهش در سطح اطمینان ۰/۹۹ متعلق به ایستگاه‌های کند سفلی، کلک‌چال، چیتگر، ژئوفیزیک و شمشک است. پهنه‌های زرد، نارنجی و قرمزرنگ در نقشه حکایت از غلبه مقادیر منفی برآوردگر شیب سن در محدوده‌های یادشده در ماه مذکور دارد که این مقادیر منفی کاهش بارش را تأیید می‌کنند. گسترش سطوح آبی‌رنگ در قسمت‌های مختلف حوضه طی ماه‌های آوریل و می بیانگر این موضوع هستند که برخلاف مارس، بارش در این دو ماه روند افزایشی پیدا کرده که بیشینه این روند مربوط به حوضه سراب طالقان و نواحی شمالی شهر تهران است. اما بخش‌های شرقی حوضه که شامل ایستگاه‌های حمامک، افجه و کند سفلی است، همچنان روند کاهشی دارند، اگرچه این کاهش نسبت به مارس کمتر است. بنابراین با توجه به تضادهای موجود در وضعیت بارش طی ماه‌های مختلف فصل بهار می‌توان این‌گونه استنباط کرد که حوضه مطالعاتی ازنظر تغییرات روند در این فصل به دو بخش تقسیم می‌گردد: بخش‌های شرقی و شمال‌شرقی حوضه روند کاهشی و مناطق شمال و شمال غرب روندهای افزایشی بارش را تجربه می‌کنند. شرایط ذکرشده در شکل شماره (۲) قابل‌مشاهده است.

تغییرات بارش در فصل بهار، با توجه به اینکه ۳۹٪ بارش‌های حوضه‌ی مورد بررسی در این فصل اتفاق می‌افتد، بسیار حائز اهمیت است. واکاوی پارامتر مذکور در مدل‌های GCM مورد مطالعه، نشانگر آن است که برخلاف روندهای حاکم در شرایط فعلی، در اقلیم آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۵۰) تحت سناریوی SSP2-4.5، بارش، در بیشتر ایستگاه‌ها تغییرات افزایشی داشته و ایستگاه‌های آهار، شمیرانات، مهرآباد و افجه به ترتیب با ۲۵، ۲۲، ۲۱ و ۱۷ میلیمتر، بالاترین میزان افزایش را نشان می‌دهند (شکل ۳، الف). وضعیت ذکر شده در شکل ۳ (ب) که نمودار درصد تغییرات بارش را در دوره آینده نسبت به شرایط مشاهداتی نشان می‌دهد کاملاً مشهود است؛ اما در سناریوی بدبینانه اجتماعی- اقتصادی SSP5-8.5 شرایط به گونه‌ای دیگر است؛ به طوریکه در ۱۷ ایستگاه مورد بررسی بارش در دوره زمانی ۲۰۲۵-۲۰۵۰، نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۸۹-۲۰۱۴) کاهش یافته و مقدار این کاهش در ایستگاه‌ها از ۱ تا ۱۶ میلیمتر متغیر است. با توجه به شکل ۳ (ب) بارش‌های بهار در ۸ ایستگاه بیلقان، درکه، سیرا، حمامک، شمیرانات، آب‌های سطحی، مهرآباد و آهار افزایش خواهد یافت که مهرآباد و آب‌های سطحی به ترتیب با ۱۰ و ۵/۸ درصد افزایش بیشترین تغییرات مثبت را نشان می‌دهند.



شکل ۲: توزیع مکانی تغییرات میانگین روند ماهانه و فصلی بارش طی دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۹: شکل‌ها از سمت راست به ترتیب ماه‌های مارس، آوریل، می و فصل بهار را نشان می‌دهند. پهنه‌های رنگی بیانگر برآوردگر شیب خط سن و فلش‌ها آماره Z من- کندال هستند. *منبع: نگارندگان*



شکل ۳: تغییرات فصلی بارش (بهار) ایستگاه‌های مورد مطالعه در شرایط آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۵۰) تحت سناریوهای SSP در مقایسه با دوره پایه. نمودار (الف) مقادیر بارش (میلیمتر) و نمودار (ب) درصد تغییرات (٪) را نشان می‌دهد. *منبع: نگارندگان*

شایان ذکر است که بارش در فصل تابستان در حوضه مطالعاتی ناچیز بوده و میانگین آن طی ۳۱ سال مورد بررسی ۲۵/۳۸ میلیمتر برآورد گردیده است. به عبارت دیگر تنها ۵٪ بارش‌های حوضه مورد نظر در تابستان می‌بارد. مطابق

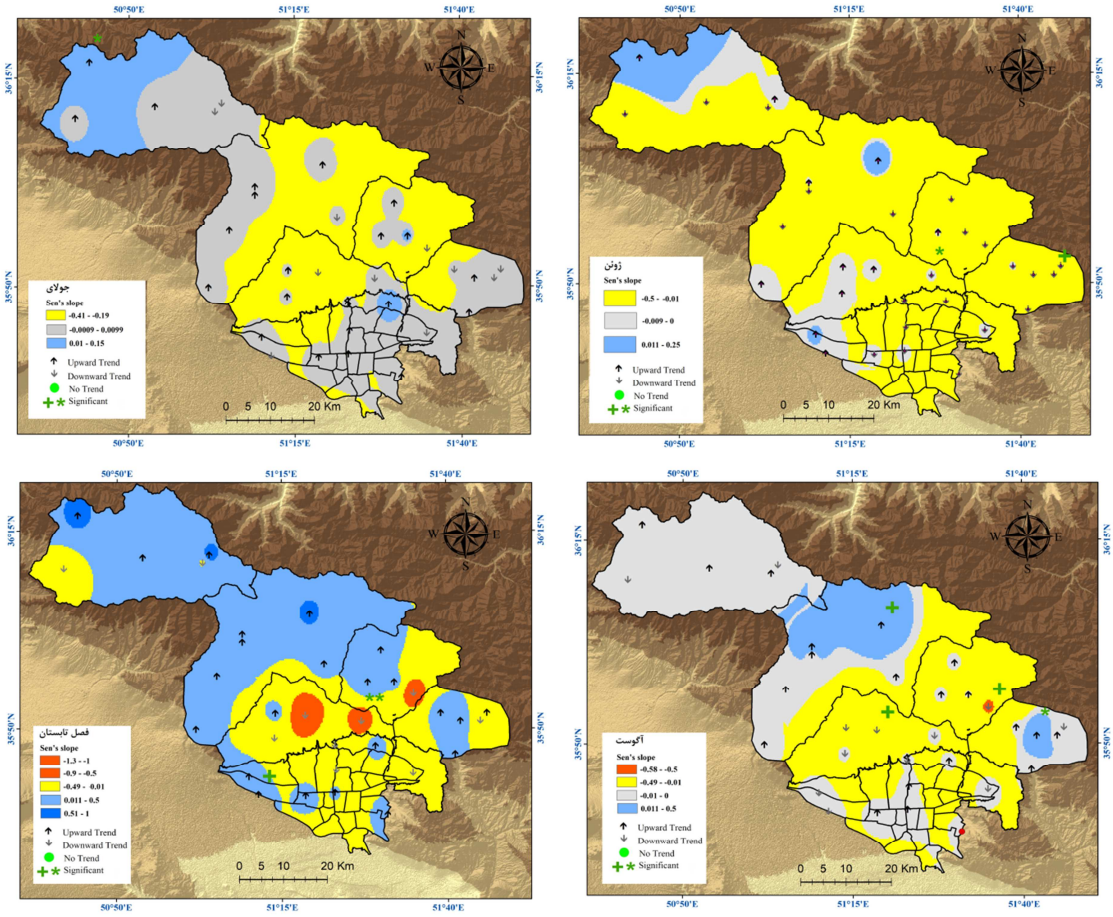
نقشه هم‌روند در ماه ژوئن به‌جز ایستگاه‌های سکرانچال، چیتگر، کیگا، سنگان، دهدر، بیلقان، سیرا، آهار و نسا که آماره Qmed (برآوردگر شیب سن) مثبت است، در بقیه ایستگاه‌ها شیب سن منفی و روند بارش کاهشی می‌باشد (شکل ۴).

در جولای نیز اگرچه بارش در ۲۲ ایستگاه سیر افزایشی دارد اما این روند تنها در سکرانچال در سطح اطمینان ۰/۹۹ معنی‌دار است و پهنه‌های مثبت شیب سن به‌دلیل اینکه در بقیه ایستگاه‌ها به صفر بسیار نزدیک هستند در نقشه هم‌روند با رنگ خاکستری مشخص شده‌اند.

در آگوست، ایستگاه‌های واقع در حوضه‌های آبخیز سراب طالقان و کرج روندهای مثبتی را نشان می‌دهند که در این بین افزایش بارش در ایستگاه نسا در سطح اطمینان ۰/۹۵ معنی‌دار است. همچنین فلش‌های رو به بالا که به صورت پراکنده در بخش‌های مختلف حوضه قابل‌مشاهده هستند حاکی از افزایش بارش در این نواحی است که در اینجا نیز به‌جز ایستگاه افجه بقیه ایستگاه‌ها روند خاصی را نشان نمی‌دهند. پهنه‌های زردرنگ در نقشه هم‌روند این ماه مبین تغییرات کاهشی بارش بوده و این سیر نزولی در ایستگاه‌های کیگا و امامه در سطوح تعریف شده آزمون من کندال معنی‌دار است.

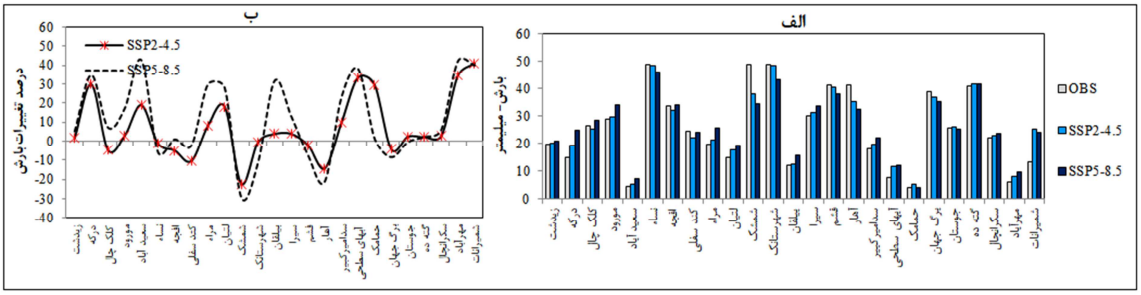
همان‌گونه که در نقشه فصلی تغییرات روند مشاهده می‌گردد (شکل ۴) هرچند در طول فصل تابستان روندهای مثبت بارش در منطقه حاکم هستند اما گستره‌ی میدان‌های آبی کم‌رنگ حاکی از مقادیر بسیار پایین شیب سن بوده که بین ۰/۰۱ تا ۰/۵ در منطقه متغیر هستند و فقط در برخی ایستگاه‌ها آماره‌ی شیب سن به بیش از ۰/۵ می‌رسد. همچنین بیشترین مقادیر منفی Z را می‌توان در ایستگاه‌های کلک‌چال، کیگا و امامه مشاهده نمود که به ترتیب برابر ۲/۶۳-، ۱/۳۳- و ۱/۲۶- است.

به پیروی از شرایط فعلی مقادیر کاهشی یا افزایشی بارش تابستانه، در چشم‌انداز آینده نیز قابل توجه نیست؛ باتوجه به نمودار ستونی در شکل ۵ (الف) بارش‌های فصل تابستان در ۱۶ ایستگاه مطالعاتی تحت سناریوی بینابین SSP2-4.5 بیشتر از شرایط پایه هستند. اگرچه این افزایش بسیار ناچیز و در اکثر ایستگاه‌ها ۱ میلیمتر و کمتر است اما ایستگاه‌های شمشک، آهار، کند سفلی، افجه، برگ جهان، کلک چال، فشم، نساء و شهرستانک در این سناریو نسبت به شرایط مشاهداتی خشک‌تر شده‌اند. تحت سناریوی SSP5-8.5 نیز ایستگاه‌های یاد شده به جز کلک چال و افجه بارش‌های کمتری را نسبت به دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۴ دریافت خواهند کرد و در سایر ایستگاه‌ها بارش افزایش قابل توجهی نشان نمی‌دهد. برخلاف مقادیر بارش، نمودار درصد تغییرات (شکل ۵، ب) حاکی از تغییرپذیری شدید پارامتر یادشده در شرایط آینده است که با توجه به بارش‌های ناچیز این فصل قابل توجیه می‌باشد، به عنوان مثال افزایش بارش در ایستگاه آب‌های سطحی از ۷/۶ به ۱۱/۷ و ۱۲/۰۷ میلیمتر تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 موجب گردیده تغییرات این پارامتر در دوره آینده، ۵۳/۳۴ و ۵۸/۲۲ درصد باشد.



شکل ۴: توزیع مکانی تغییرات میانگین روند ماهانه و فصلی بارش طی دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۹: شکل‌ها از سمت راست به ترتیب ماه‌های ژوئن، جولای، آگوست و فصل تابستان را نشان می‌دهند. پهنه‌های رنگی بیانگر برآوردگر شیب خط سن و فلش‌ها آماره Z من- کندال هستند.

منبع: نگارندگان



شکل ۵: تغییرات فصلی بارش (تابستان) ایستگاه‌های مورد مطالعه در شرایط آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۵۰) تحت سناریوهای SSP در مقایسه با دوره پایه. نمودار (الف) مقادیر بارش (میلیمتر) و نمودار (ب) درصد تغییرات (٪) را نشان می‌دهد. *منبع: نگارندگان*

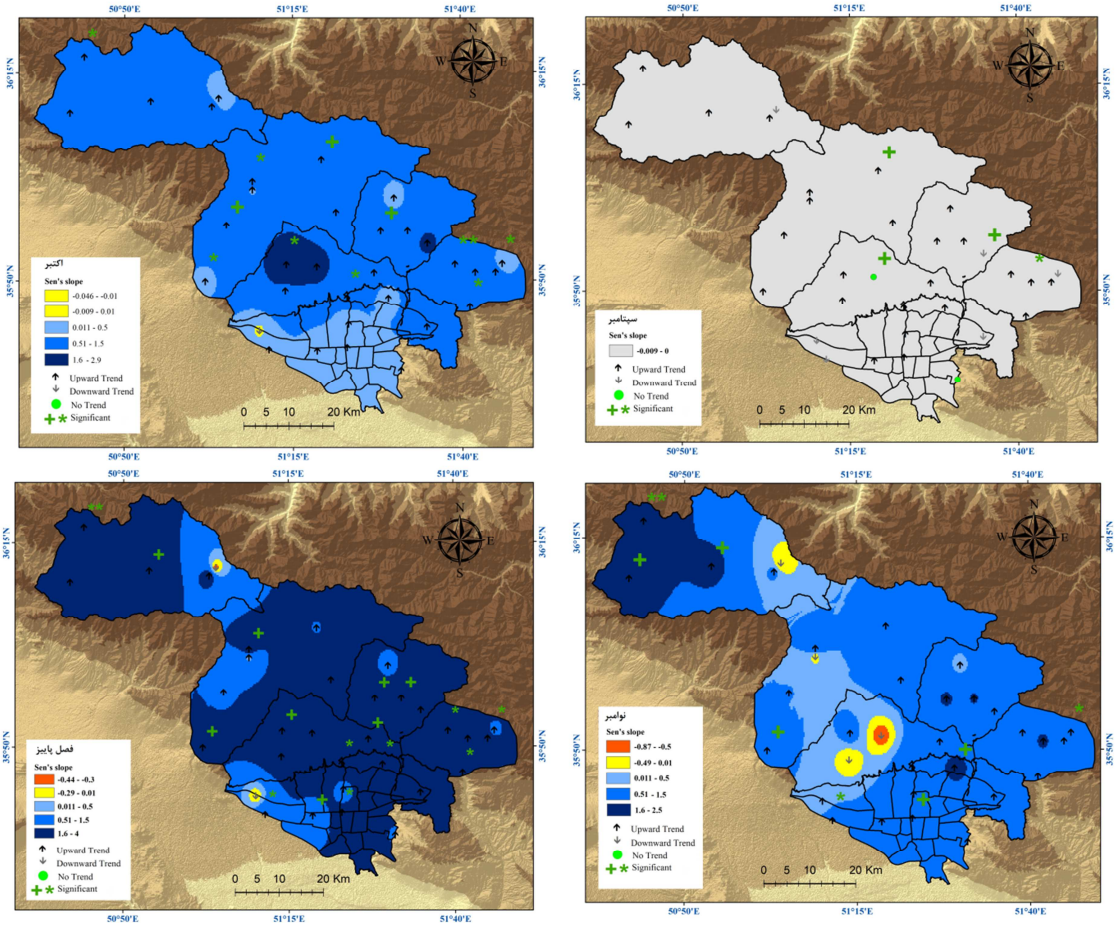
نکته قابل‌توجه در ماه سپتامبر این است که مقادیر برآوردگر شیب سن در تمام ایستگاه‌ها برابر صفر بوده و به همین دلیل در نقشه روند تنها یک پهنه خاکستری‌رنگ قابل‌مشاهده است (شکل ۶). اما با توجه به جهت فلش‌ها و مقادیر نمره Z، درمجموع می‌توان گفت بارش از اواسط تابستان در منطقه روند صعودی پیدا کرده و در ابتدای پاییز بیشتر

ایستگاه‌ها به‌جز چیتگر، دانشکده عباسپور، امامه، دهدر، سعیدآباد و حمامک افزایش بارش را نشان می‌دهند. ادامه این روند افزایشی را با شدت بیشتر می‌توان در اکتبر مشاهده نمود. سیطره‌ی پهنه‌های آبی‌رنگ با طیف‌های مختلف در کل حوضه موردمطالعه بیانگر وضعیت‌های مثبت و روندهای افزایشی قابل‌توجه در این ماه است؛ به‌طوری‌که مقادیر نمره Z در ۱۱ ایستگاه در سطوح اطمینان ۰/۹۵ و ۰/۹۹ من کندال معنی‌دار است و تنها در ایستگاه چیتگر بارش با نمره Z، ۰/۱- روند کاهشی دارد (شکل ۶).

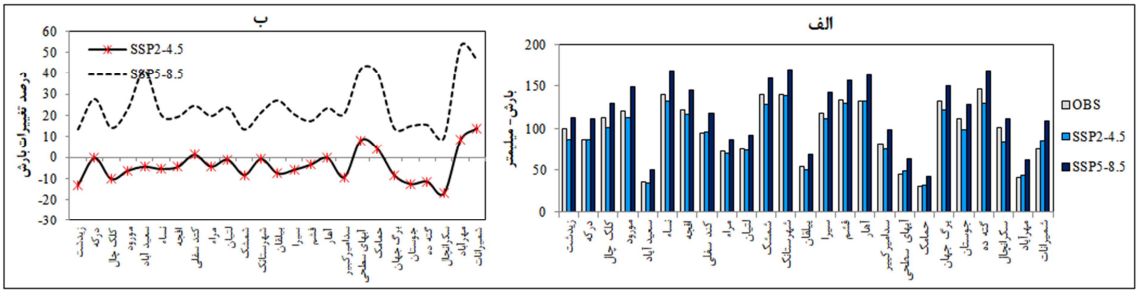
روند افزایشی بارش در نوامبر نیز چشمگیر است؛ مقادیر بالای نمره Z و شیب سن در ایستگاه‌های سکرانچال، زیدشت و جوستان حاکی از افزایش معنی‌دار بارش در این قسمت از حوضه سراب طالقان طی بازه زمانی ۳۱ ساله می‌باشد.

با توجه به این شرایط، تغییرات افزایشی بارش حوضه مورد بررسی در فصل پاییز، که ۲۰٪ بارش‌های منطقه را به خود اختصاص داده، کاملاً محسوس است، به‌طوری‌که نیمی از ایستگاه‌ها روند رو به بالای مثبت در سطوح اطمینان ۰/۹۵ و ۰/۹۹ نشان می‌دهند. وضعیت‌های یادشده در نقشه هم‌روند فصل پاییز در شکل ۶ نمایش داده شده است.

برونداد مدل‌های GCM حاکی از این است که از ۲۵ ایستگاه مورد بررسی، ۲۰ ایستگاه در سناریوی SSP2-4.5 در شرایط آینده نزدیک تغییرات کاهشی بارش را تجربه خواهند نمود و فقط در ایستگاه‌های کند سفلی، حمامک، مهرآباد، آب‌های سطحی و شمیرانات بارش بین ۱ تا ۱۰ میلیمتر افزایش خواهد داشت (شکل ۷، الف). روند کاهشی بارش نیز در این سناریو از ۰/۳ تا ۱۶/۹ درصد در ایستگاه‌های مختلف متغیر است و حداکثر درصد کاهش را می‌توان در ایستگاه‌های سکرانچال، زیدشت و جوستان مشاهده نمود (شکل ۷، ب). برخلاف سناریوی بینابین، به نظر می‌رسد روند افزایشی بارش در دوره پایه، تحت سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) نیز ادامه پیدا کند؛ مطابق این سناریو در شرایط آینده نزدیک، بارش افزایش قابل توجهی در حوضه مورد بررسی خواهد داشت. حداکثر میزان افزایش را ایستگاه‌های شمیرانات، آهار و شهرستانک تجربه می‌کنند که بارش در این مناطق تقریباً ۳۰ میلیمتر نسبت به شرایط مشاهداتی افزایش خواهد داشت. کمترین مقادیر افزایش مربوط به ایستگاه‌های سکرانچال، حمامک و زیدشت می‌باشد (شکل ۷).



شکل ۶: توزیع مکانی تغییرات میانگین روند ماهانه و فصلی بارش طی دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۹: شکل‌ها از سمت راست به ترتیب ماه‌های سپتامبر، اکتبر، نوامبر و فصل پاییز را نشان می‌دهند. پهنه‌های رنگی بیانگر برآوردگر شیب خط سن و فلش‌ها آماره Z من- کندال هستند. *منبع: نگارندگان*



شکل ۷: تغییرات فصلی بارش (پاییز) ایستگاه‌های مورد مطالعه در شرایط آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۵۰) تحت سناریوهای SSP در مقایسه با دوره پایه. نمودار (الف) مقادیر بارش (میلیمتر) و نمودار (ب) درصد تغییرات (٪) را نشان می‌دهد. *منبع: نگارندگان*

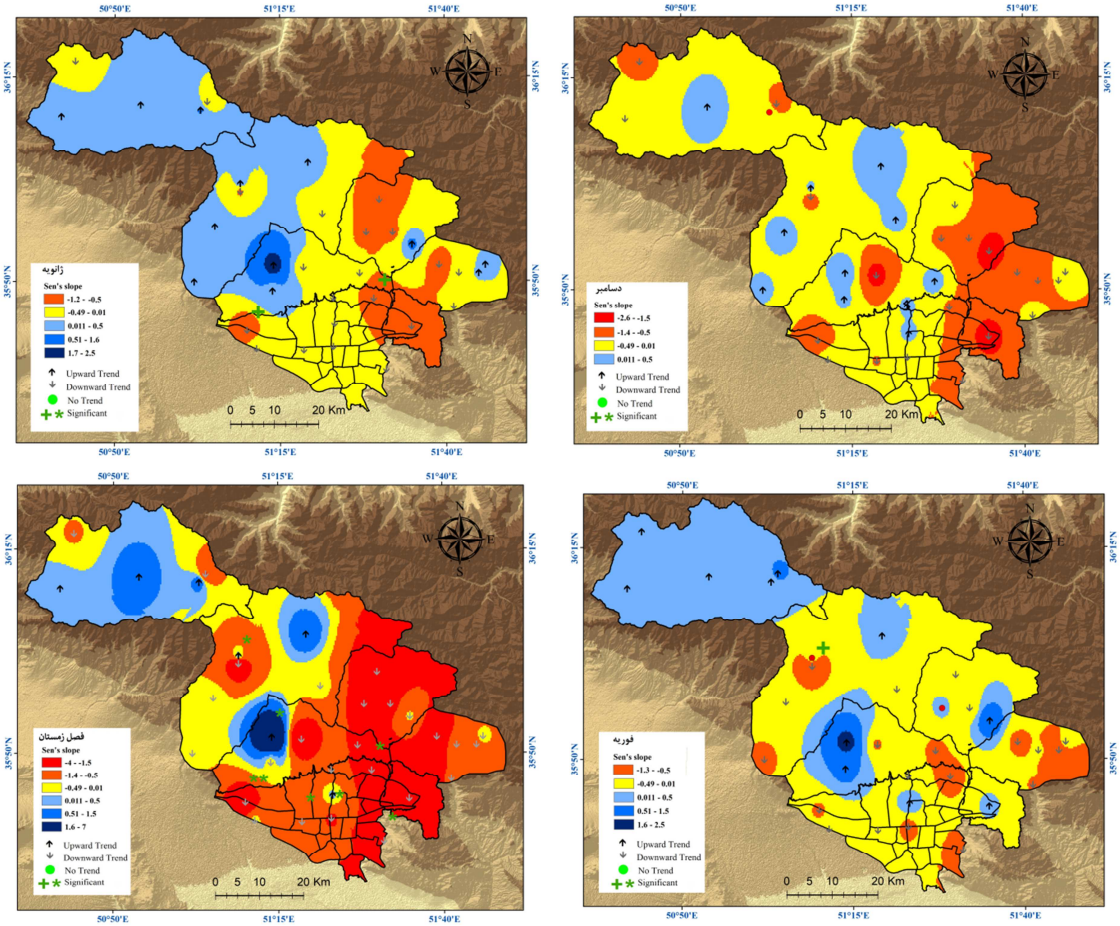
زمستان دومین فصل پربارش محدوده مطالعاتی است و ۳۶٪ بارش‌های حوضه در این فصل رخ داده است. تغییرات روند بارش در دسامبر نشان‌دهنده حاکمیت مقادیر منفی آماره Qmed بر منطقه است (شکل ۸). به‌طوری‌که از ۳۳

ایستگاه مطالعه شده، نمرهZ من کندال در ۱۱ مورد مثبت و در بقیه منفی می‌باشد. اگرچه سیر کاهشی بارش در منطقه در هیچ سطحی معنی‌دار نیست اما بارش در بخش شرقی روندهای کاهشی قابل‌ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. در ژانویه نیز بارش در بخش‌های غربی و شمال غربی حوضه دارای روند مثبت و در نیمه شرقی روند منفی دارد، ولی هیچ‌یک از روندهای افزایشی و کاهشی در این ماه نیز طبق سطوح تعریف شده آزمون من کندال معنی‌دار نیست. بیشینه روند صعودی در ژانویه با نمرهZ ۱/۴۷ مربوط به ایستگاه سنگان و حداکثر روندهای کاهشی به ترتیب با مقادیر ۱/۹۲- و ۱/۶۹- در شمیرانات و چیتگر مشاهده می‌گردد.

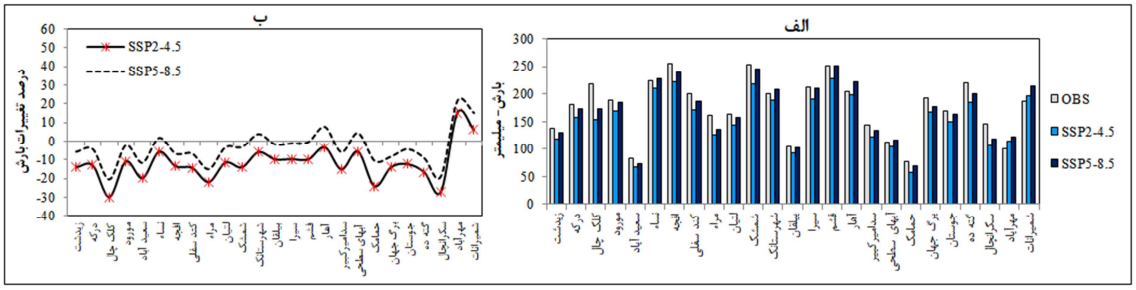
مطابق شکل ۸ در فوریه همانند ژانویه، بارش در حوضه آبخیز سراب طالقان طی ۳۱ سال مورد مطالعه دارای روند مثبت بوده و افزون بر آن ایستگاه‌های ژئوفیزیک، دانشکده عباسپور، کشار، سنگان، نسا و امامه روندهای افزایشی را نشان می‌دهند. در سایر ایستگاه‌ها بارش سیر کاهشی داشته و این تغییرات منفی در ایستگاه مورود در سطح اطمینان ۰/۹۵ معنی‌دار است. درون‌یابی مقادیر شیب سن در ماه فوریه مؤید روندهای کاهشی در این ماه در بخش‌های قابل توجهی از حوضه مطالعاتی است.

درمجموع، حاکمیت مقادیر منفی آماره Z و برآوردگر شیب سن طی ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه منجر گردیده که در فصل زمستان تغییرات کاهشی بارش در بخش وسیعی از حوضه، الگوی غالب این دوره باشد. درواقع در نقشه هم‌روند فصل زمستان، همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، به‌جز ۵ ایستگاه سنگان، جوستان، نسا، گته ده و زیدشت در سایر ایستگاه‌ها بارش سیر کاهشی داشته و این روند منفی در چیتگر، مورود، مرا، آب‌های سطحی، مهرآباد و شمیرانات در سطح اطمینان ۰/۹۹ معنی‌دار است.

شکل ۹ تغییرات فصلی بارش زمستانه ایستگاه‌های مورد مطالعه را در شرایط آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۵۰) نشان می‌دهد. با توجه به نمودار (شکل ۹، الف) و تحت سناریوی SSP2-4.5 بارش در این فصل به جز ایستگاه‌های مهرآباد و شمیرانات که به ترتیب به میزان ۱۵ و ۱۱ میلیمتر بیشتر از دوره پایه است، در سایر ایستگاه‌ها کاهش خواهد یافت که از این جهت کلک چال با ۳۰ درصد کاهش نسبت به دوره پایه، بیشترین تغییرات را نشان می‌دهد (شکل ۹، ب). اما خط داستانی SSP5-8.5 شرایط متفاوتی دارد؛ به نظر می‌رسد ریزش‌های جوی در سناریوی بدبینانه مدل‌های گردش کلی جو، نسبت به شرایط بینابین افزایش پیدا کرده است. به عبارت دیگر مطابق سناریوی SSP5-8.5 به جز ایستگاه‌های کلک چال (۲۰/۴۳ درصد کاهش)، سکرانچال (۱۸/۸۹ درصد کاهش) و مرا (۱۵ درصد کاهش) در اکثر ایستگاه‌های منطقه، کاهش بارش به کمتر از ۱۰ درصد می‌رسد و با توجه به شکل (۹، ب)، بارش زمستانه علاوه بر مهرآباد و شمیرانات، در ایستگاه‌های نسا، آب‌های سطحی، شهرستانک و آهار تغییرات مثبتی نسبت به دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۴ داشته است.



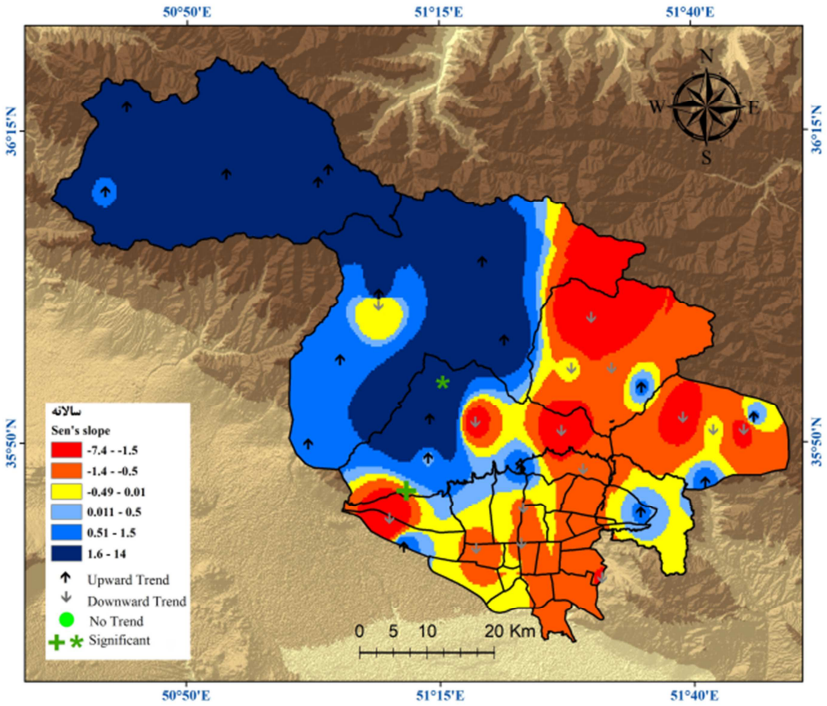
شکل ۸: توزیع مکانی تغییرات میانگین روند ماهانه و فصلی بارش طی دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۹: شکل‌ها از سمت راست به ترتیب ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه و فصل زمستان را نشان می‌دهند. پهنه‌های رنگی بیانگر برآوردگر شیب خط سن و فلش‌ها آماره Z من- کندال هستند. *منبع: نگارندگان*



شکل ۹: تغییرات فصلی بارش (زمستان) ایستگاه‌های مورد مطالعه در شرایط آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۵۰) تحت سناریوهای SSP در مقایسه با دوره پایه. نمودار (الف) مقادیر بارش (میلیمتر) و نمودار (ب) درصد تغییرات (٪) را نشان می‌دهد. *منبع: نگارندگان*

مطابق شکل ۱۰ آماره Z من- کندال در الگوی سالانه‌ی روند در ایستگاه‌های واقع در حوضه سراب طالقان و کرج تغییرات افزایشی را نشان می‌دهد و بیشترین مقادیر آن برابر ۲/۲۴، ۱/۵ و ۱/۴۶ به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های

سنگان، جوستان و نسا می‌باشد. به‌طورکلی تغییرات بارش در نقشه هم‌روند سالانه به تبعیت از الگوهای ماهانه و فصلی در بخش غربی حوضه افزایش و در بخش قابل‌توجهی از نواحی شرقی کاهش پیدا کرده است. در این مورد ایستگاه‌های چیتگر، کلک‌چال و شمشک بالاترین مقادیر منفی آماره Z و Qmed را نشان می‌دهند.



شکل ۱۰: توزیع مکانی تغییرات میانگین روند سالانه بارش برای دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۹. پهنه‌های رنگی بیانگر برآوردگر شیب خط سن و فلش‌ها آماره Z من- کندال هستند. *منبع: نگارندگان*

اثر تغییر اقلیم بر حجم آب حوضه‌های تأمین کننده آب شهر تهران در شرایط آتی:

شکل ۱۱ تغییرات حجم آب حوضه‌های آبخیز تأمین کننده آب شهر تهران را در شرایط کنونی و افق ۲۰۲۵-۲۰۵۰ نشان می‌دهد. از بین زیرحوضه‌های مطالعه شده، بیشترین حجم آب در شرایط فعلی مربوط به زیرحوضه‌ی کرج است که میانگین حجم آب این زیرحوضه با استفاده از فرمول‌های تجربی و براساس تعداد ایستگاه‌های واقع در آن ۵۸۳/۵۲ میلیون‌متر مکعب در شرایط فعلی (۱۹۸۹-۲۰۱۴) برآورد گردیده است (جدول ۳). پیش‌نمایی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت آب زیرحوضه یاد شده حاکی از این است که تحت GCMهای مختلف و همچنین سناریوهای اقتصادی- اجتماعی حجم آب آن تغییرات قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. نمودار مربوط به زیرحوضه‌ی کرج نشان می‌دهد که در مدل CNRM-CM6-1 میزان آب حوضه در هر دو سناریوی حدواسط و بدبینانه افزایش داشته که در سناریوی SSP5-8.5 این افزایش به بیش از ۱۱ درصد می‌رسد. سایر مدل‌ها حکایت از کاهش حجم آب حوضه در اقلیم آتی دارند. مدل‌های MIROC6 و MRI-ESM2-0 شرایط نسبتاً مشابهی را نشان می‌دهند اما برونداد مدل CanESM5 نشان‌دهنده کاهش ۶۰ و ۵۰ درصدی مقدار آب، به ترتیب طبق سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 است (شکل ۱۱).

زیرحوضه‌ی سراب طالقان با میانگین حجم آب معادل ۵۱۸/۶ میلیون‌متر مکعب در دوره پایه، رتبه دوم را در بین حوضه‌های مورد مطالعه به خود اختصاص داده است. در این حوضه نیز مطابق مدل CNRM-CM6-1، حجم آب در افق ۲۰۲۵-۲۰۵۰ تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۴/۸ و ۶/۵ درصد افزایش خواهد یافت. سایر مدل‌ها تغییرات حجم آب این حوضه را منفی و کاهشی برآورد کرده‌اند و بیشترین مقادیر کاهش متعلق به مدل CanESM5 است. میانگین حجم آب در سه زیرحوضه دیگر جاجرود- آهار، جاجرود- کن و سراب جاجرود، به ترتیب برابر ۲۸۰/۹۱، ۲۳۹/۴۹ و ۱۴۲/۶۰ میلیون‌متر مکعب در شرایط فعلی می‌باشد که در جدول ۳ درج گردیده است. پیش‌نمایی تغییرات بارش ایستگاه‌های واقع در حوضه‌های مذکور نشان می‌دهد که از بین این سه حوضه نیز بیشترین کاهش حجم آب مربوط به مدل CanESM5 در زیرحوضه سراب جاجرود است؛ به طوریکه در چشم انداز آینده نزدیک حجم آب این زیرحوضه طبق خروجی مدل مذکور در هردو سناریوی حدواسط و بدبینانه SSP بیش از ۸۰ درصد کاهش خواهد یافت. مدل MIROC6 نیز در هر سه حوضه تغییرات کاهشی حجم آب را نشان می‌دهد اما با توجه به مدل CNRM-CM6-1 میانگین حجم آب در شرایط آینده در حوضه‌های جاجرود- آهار و سراب جاجرود افزایش خواهد یافت. این وضعیت‌ها در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که متوسط حجم آب در کوچکترین حوضه‌ی آبخیز مورد مطالعه (سرخ حصار) در شرایط فعلی (۲۰۰۰-۲۰۱۴) برابر ۵۲/۷۱ میلیون متر مکعب بوده که به دلیل کوتاه بودن طول دوره پایه، تغییرات آن در شرایط آینده مورد ارزیابی قرار نگرفت.

جدول ۳: ویژگی حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه

نام حوضه آبخیز	مساحت (کیلومترمربع)	حجم آب (میلیون‌متر مکعب)	حداکثر ارتفاع ایستگاه (متر)	حداقل ارتفاع ایستگاه (متر)
کرج	۱۱۰۸/۶۹	۵۸۳/۵۲	نساء- ۲۲۰۳	بیلقان- ۱۳۶۰
سراب طالقان	۹۴۹/۳۱	۵۱۸/۶	دهدر- ۲۸۰۰	زیدشت- ۱۷۵۱
جاجرود- کن	۴۴۹/۵۸	۲۳۹/۴۹	کلک چال- ۲۴۷۰	
جاجرود- آهار	۴۲۴/۴۶	۲۸۰/۹۱	شمشک- ۲۷۰۰	فشم- ۱۹۴۰
سراب جاجرود	۳۰۲/۶۵	۱۴۲/۶۰	برگ جهان- ۲۰۰۰	لتیان- ۱۵۶۳
سرخ حصار	۱۵۴/۰۲	۵۲/۷۱	دانشکده عباس‌پور- ۱۴۸۲	



شکل ۱۱: درصد تغییرات حجم آب (میلیون متر مکعب) در زیر حوضه‌های آبخیز شهر تهران تحت GCMهای مورد مطالعه نسبت به دوره پایه. *منبع: نگارندگان*

تغییرات فراوانی روزهای بارشی در سناریوهای SSP:

تحلیل توزیع‌های بارش روزانه و الگوهای بارش زمانی در تحقیقات آب و هوایی مهم هستند؛ تغییر در شدت، مقدار و نوع الگوی بارشی می‌تواند باعث تشدید رویدادهای فرین مانند خشکسالی‌ها و سیلاب گردد (لی و همکاران، ۲۰۱۱؛ کاسکرلی[1] و همکاران، ۲۰۱۲) و این رویدادها بر فرسایش، کشاورزی، منابع آب، زهکشی آب طوفان، تولید انرژی و غیره تأثیر می‌گذارند (کالویرو[2] و همکاران، ۲۰۱۴). در برخی موارد، با وجود کاهش یا روند پایدار در میانگین بارش، فرین‌ها اتفاق افتاده است. بنابراین، اطلاعات مربوط به الگوهای در حال تغییر بارش برای ارزیابی دقیق منابع آب، کنترل خشکسالی و سیل، مدیریت مؤثر آب و درک تغییرات آب و هوایی قابل توجه است (هوانگ[3] و همکاران، ۲۰۱۸). جهت بررسی الگوهای توزیع زمانی بارش روزانه در حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه ابتدا از هر حوضه یک ایستگاه نماینده انتخاب شد و طول دوره آماری در ایستگاه منتخب به ۵ دوره ۵ ساله تقسیم گردید. بدین ترتیب مقدار بارش روزانه در هر ماه در شرایط حال حاضر با دوره متناظر در آینده تحت هر دو سناریوی SSP از نظر مقدار و

[1] - Coscarelli
[2] - Caloiero
[3] - Huang

فراوانی روزهای بارشی مقایسه گردید تا مشخص گردد که بین مقادیر بارش و تعداد روزهای بارشی در وضعیت حال و آینده چه تفاوتی وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد که طی ماه‌های فصل بهار و پاییز فراوانی تعداد روزهای بارشی ایستگاه‌های منتخب طبق برونداد هر دو سناریوی SSP در آینده از شرایط کنونی بیشتر است؛ هرچند ماه سپتامبر در برخی دوره‌ها الگوی مشخصی ندارد. اختلاف فراوانی روزهای بارشی بین دوره‌های آینده و حال در جولای و آگوست متغیر بوده اما ژوئن تعداد روزهای بارشی بیشتری را در سناریوهای SSP تجربه خواهد کرد. توزیع الگوی بارشی روزانه در ماه‌های زمستان نسبت به بهار و پاییز نامنظم‌تر است و در ایستگاه‌های لتیان، کلک چال و زیدشت طی برخی دوره‌های آینده، فراوانی تعداد روزهای بارشی نسبت به اقلیم کنونی کاهش یافته است (جدول ۴).

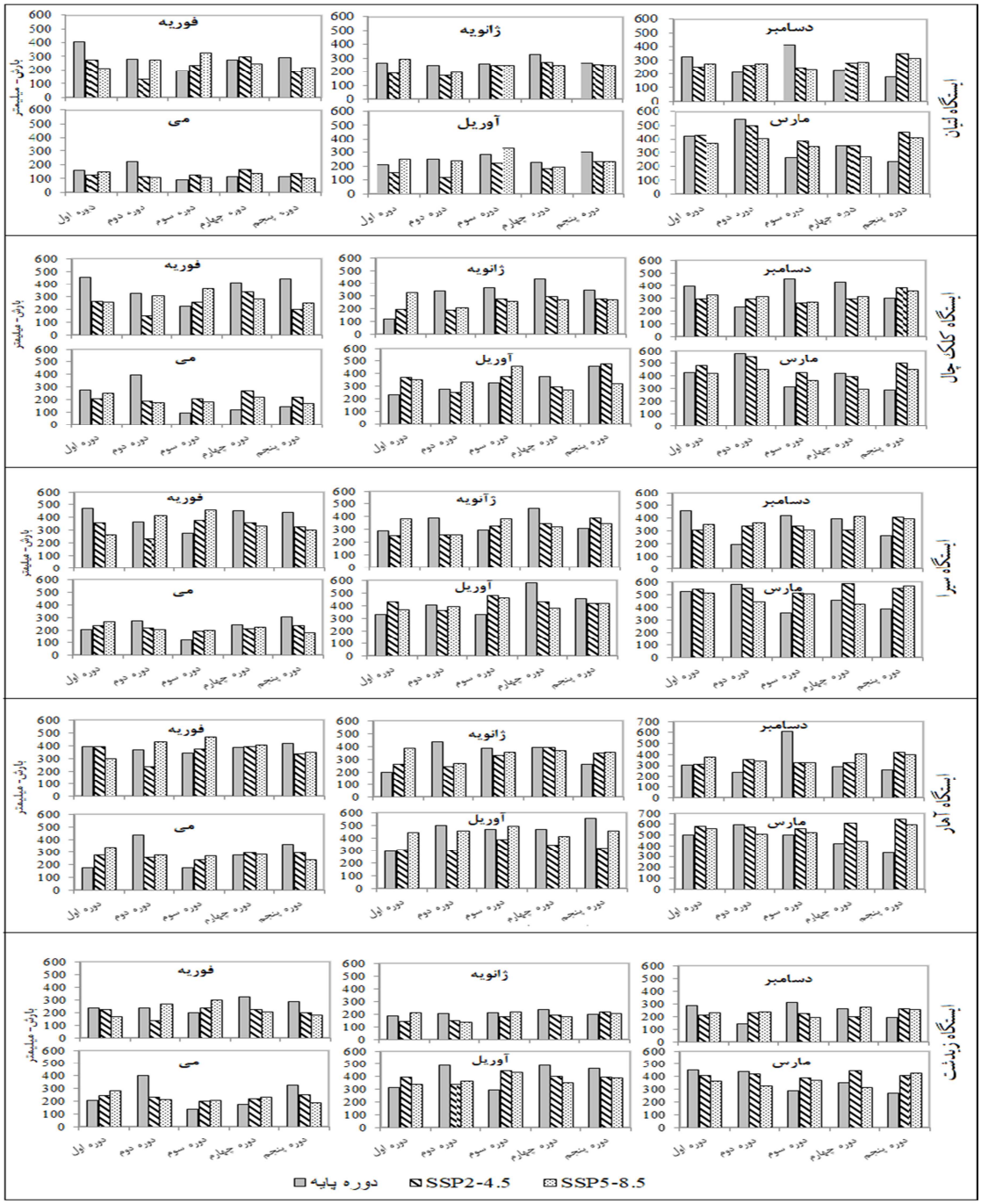
پس از بررسی الگوی زمانی توزیع بارش، مقدار بارش رخ داده نیز برای هر یک از ماه‌های بهار و زمستان، به عنوان پرباران‌ترین فصول منطقه مطالعاتی، طی دوره‌های ۵ ساله مشاهداتی و آینده با یکدیگر مقایسه گردید (شکل ۱۲). نتایج این قسمت نشان می‌دهد بارش در ایستگاه لتیان در ماه دسامبر طی دوره‌ی اول و دوم نسبت به آینده بیشتر و در دوره‌ی دوم، چهارم و پنجم کمتر است. اگر چه این دوره‌های متوالی هیچ الگوی مشخصی را از نظر روند افزایشی یا کاهشی بارش دنبال نمی‌کنند اما در مجموع بین مقدار بارش و توزیع روزهای بارشی توازنی معقول مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر بارش در این ماه طی دوره ۵ ساله اول مقادیر ۴۰۸/۵، ۲۴۷ و ۲۳۴ میلیمتر را به ترتیب در شرایط پایه و تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SS5-8.5 نشان می‌دهد که این مقدار بارش به طور متوسط در ۱۱، ۸ و ۹ روز باریده است. مشابه دسامبر در ژانویه نیز فراوانی روزهای بارشی با مقدار بارش هر دوره همخوانی دارد. اما برای سایر ماه‌ها چنین تناسبی مشاهده نمی‌گردد؛ دوره اول ماه فوریه مقدار بارش در وضعیت مشاهداتی برابر ۴۰۷ میلیمتر بوده که به طور میانگین طی ۱۱ روز اتفاق افتاده حال آنکه بارش در آینده بسیار کمتر ولی فراوانی روزهای بارشی تغییر چندانی نکرده است. وضعیت ذکر شده در فصل بهار به‌خصوص آوریل و می آشکارتر می‌باشد. در ماه می اگرچه بارش طی دوره‌های سوم، چهارم و پنجم در اقلیم آتی بیشتر از وضعیت کنونی است، اما افزایش تعداد روزهای بارشی تفاوت بسیار چشمگیری با شرایط پایه دارد.

در ایستگاه کلک چال نیز طی ماه‌های ژانویه و فوریه بین مقدار بارش رخ داده در شرایط کنونی و آینده از یک سو و تعداد روزهای بارشی از سوی دیگر همخوانی وجود دارد اما توزیع فراوانی روزهای بارشی در دسامبر در مقابل مقدار بارش این ماه کمی نامنظم‌تر است. برای ماه‌های مارس، آوریل و می توزیع فراوانی روزهای بارشی در مقابل تغییر مقادیر بارش‌ها در شرایط آینده نسبت به دوره پایه قابل تأمل است. نتایج حاصل از بررسی‌های آماری ۵ ایستگاه منتخب بیانگر این است که تعداد روزهای بارشی تحت سناریوهای SSP بینابین و بدبینانه در اقلیم آینده نسبت به شرایط حال بسیار بیشتر است، این مسئله در دوره‌هایی حائز اهمیت است که میزان بارش در آن دوره تحت سناریوهای تغییر اقلیم کاهش یافته اما این مقدار بارش کمتر در تعداد روزهای بیشتری توزیع گردیده است. به عنوان نمونه در ایستگاه سیرا برای ماه می در دوره پنجم ۳۰۳ میلیمتر بارش در شرایط پایه ثبت گردیده که این مقدار به طور متوسط در ۱۱ روز باریده است؛ حال آنکه مقادیر بارش دوره‌های متناظر در آینده تحت SSP2-4.5، ۲۳۳ میلیمتر و SSP5-8.5، ۱۷۵ میلیمتر براورد شده که به ترتیب طی ۲۰ و ۱۹ روز اتفاق افتاده است. مشابه این مسئله در ایستگاه‌های دیگر نیز در فصل بهار مشاهده می‌گردد (شکل ۱۲).

جدول ۴: الگوی میانگین توزیع زمانی فراوانی روزهای بارشی در دوره‌های پایه و آینده برمبنای سناریوهای SSP

بازه زمانی	دوره	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
ایستگاه لتیان													
۱۹۹۳-۱۹۸۹	پایه	۱۰	۱۱	۱۳	۷	۸	۲	۱	۰	۰	۴	۶	۹
۲۰۲۹-۲۰۲۵	SSP2-4.5	۸	۱۰	۱۵	۱۰	۱۴	۸	۰	۱	۲	۵	۶	۸
۲۰۲۹-۲۰۲۵	SSP5-8.5	۱۱	۸	۱۳	۱۷	۱۷	۴	۱	۱	۱	۱۰	۱۲	۱۰
۱۹۹۸-۱۹۹۴	پایه	۸	۹	۱۱	۸	۹	۴	۰	۱	۲	۴	۵	۷
۲۰۳۴-۲۰۳۰	SSP2-4.5	۶	۶	۱۵	۹	۱۳	۵	۰	۰	۲	۵	۱۱	۹
۲۰۳۴-۲۰۳۰	SSP5-8.5	۷	۹	۱۴	۱۴	۱۴	۶	۱	۰	۲	۱۱	۱۱	۹
۲۰۰۳-۱۹۹۹	پایه	۸	۶	۷	۷	۴	۱	۲	۱	۱	۵	۸	۱۱
۲۰۳۹-۲۰۳۵	SSP2-4.5	۱۰	۹	۱۲	۱۱	۱۵	۴	۱	۱	۲	۹	۱۲	۸
۲۰۳۹-۲۰۳۵	SSP5-8.5	۹	۱۰	۱۳	۱۶	۱۳	۷	۱	۰	۲	۱۲	۱۳	۹
۲۰۰۸-۲۰۰۴	پایه	۱۱	۹	۷	۸	۶	۱	۲	۲	۱	۴	۹	۷
۲۰۴۴-۲۰۴۰	SSP2-4.5	۱۰	۹	۱۵	۱۱	۱۵	۴	۱	۰	۳	۹	۱۱	۸
۲۰۴۴-۲۰۴۰	SSP5-8.5	۸	۹	۱۱	۱۴	۱۴	۶	۱	۱	۳	۹	۱۰	۸
۲۰۱۳-۲۰۰۹	پایه	۷	۹	۸	۸	۸	۲	۱	۲	۱	۴	۱۰	۶
۲۰۴۹-۲۰۴۵	SSP2-4.5	۱۰	۹	۱۴	۱۲	۱۵	۵	۰	۱	۳	۱۱	۱۰	۱۲
۲۰۴۹-۲۰۴۵	SSP5-8.5	۹	۸	۱۳	۱۵	۱۳	۲	۱	۱	۱	۱۲	۱۳	۱۰
ایستگاه کلک چال													
۱۹۹۳-۱۹۸۹	پایه	۵	۸	۶	۴	۵	۲	۱	۰	۰	۳	۳	۷
۲۰۲۹-۲۰۲۵	SSP2-4.5	۶	۶	۱۳	۱۳	۱۳	۷	۰	۱	۲	۵	۵	۸
۲۰۲۹-۲۰۲۵	SSP5-8.5	۱۰	۷	۱۲	۱۵	۱۶	۴	۱	۰	۱	۹	۱۱	۹
۱۹۹۸-۱۹۹۴	پایه	۸	۷	۱۰	۵	۹	۳	۱	۱	۱	۴	۵	۶
۲۰۳۴-۲۰۳۰	SSP2-4.5	۶	۵	۱۴	۱۱	۱۲	۵	۰	۰	۱	۴	۱۰	۸
۲۰۳۴-۲۰۳۰	SSP5-8.5	۶	۸	۱۲	۱۳	۱۱	۶	۰	۰	۲	۹	۱۰	۸
۲۰۰۳-۱۹۹۹	پایه	۱۰	۵	۷	۸	۳	۱	۲	۱	۰	۶	۷	۱۰
۲۰۳۹-۲۰۳۵	SSP2-4.5	۸	۷	۱۱	۱۴	۱۴	۳	۱	۰	۲	۷	۱۱	۷
۲۰۳۹-۲۰۳۵	SSP5-8.5	۷	۹	۱۰	۱۵	۱۱	۷	۱	۰	۱	۹	۱۱	۸
۲۰۰۸-۲۰۰۴	پایه	۸	۸	۷	۷	۵	۱	۳	۱	۱	۵	۷	۷
۲۰۴۴-۲۰۴۰	SSP2-4.5	۸	۸	۱۳	۱۳	۱۳	۳	۱	۰	۳	۸	۱۰	۶
۲۰۴۴-۲۰۴۰	SSP5-8.5	۷	۸	۹	۱۲	۱۳	۵	۱	۱	۱	۸	۸	۸
۲۰۱۳-۲۰۰۹	پایه	۷	۱۰	۷	۹	۷	۱	۱	۲	۱	۴	۱۰	۷
۲۰۴۹-۲۰۴۵	SSP2-4.5	۹	۷	۱۳	۱۵	۱۳	۴	۰	۰	۲	۹	۹	۱۰
۲۰۴۹-۲۰۴۵	SSP5-8.5	۸	۷	۱۱	۱۴	۱۱	۲	۰	۱	۱	۱۱	۱۱	۹
ایستگاه سیرا													
۱۹۹۳-۱۹۸۹	پایه	۱۰	۱۰	۱۱	۹	۹	۳	۱	۰	۰	۵	۶	۱۰
۲۰۲۹-۲۰۲۵	SSP2-4.5	۱۰	۱۱	۱۸	۲۰	۲۱	۱۰	۱	۲	۴	۷	۸	۹
۲۰۲۹-۲۰۲۵	SSP5-8.5	۱۳	۹	۱۷	۱۹	۲۳	۷	۲	۲	۳	۱۱	۱۲	۱۲
۱۹۹۸-۱۹۹۴	پایه	۹	۱۰	۱۳	۱۱	۱۱	۴	۲	۱	۲	۵	۷	۷
۲۰۳۴-۲۰۳۰	SSP2-4.5	۱۰	۱۰	۱۶	۱۸	۱۸	۸	۲	۲	۴	۹	۱۲	۱۰
۲۰۳۴-۲۰۳۰	SSP5-8.5	۹	۱۲	۱۶	۱۹	۲۱	۱۰	۱	۲	۳	۱۱	۱۳	۱۲
۲۰۰۳-۱۹۹۹	پایه	۸	۹	۸	۱۱	۶	۲	۲	۱	۲	۷	۹	۱۲
۲۰۳۹-۲۰۳۵	SSP2-4.5	۱۱	۱۳	۱۴	۲۰	۱۹	۶	۲	۲	۴	۱۲	۱۴	۱۱
۲۰۳۹-۲۰۳۵	SSP5-8.5	۱۲	۱۲	۱۸	۱۸	۱۹	۱۱	۲	۲	۵	۱۳	۱۴	۱۱
۲۰۰۸-۲۰۰۴	پایه	۱۲	۱۱	۱۱	۱۲	۱۳	۳	۴	۳	۲	۷	۱۱	۱۱
۲۰۴۴-۲۰۴۰	SSP2-4.5	۱۳	۱۲	۲۰	۲۰	۱۹	۶	۲	۳	۵	۱۳	۱۲	۱۱
۲۰۴۴-۲۰۴۰	SSP5-8.5	۹	۱۱	۱۵	۱۷	۱۸	۱۰	۲	۱	۴	۱۳	۱۲	۱۳
۲۰۱۳-۲۰۰۹	پایه	۱۰	۱۳	۱۰	۱۵	۱۱	۷	۲	۲	۴	۵	۱۲	۹
۲۰۴۹-۲۰۴۵	SSP2-4.5	۱۲	۱۲	۱۹	۱۸	۲۰	۸	۲	۲	۴	۱۲	۱۲	۱۴
۲۰۴۹-۲۰۴۵	SSP5-8.5	۱۰	۱۱	۱۸	۱۷	۱۹	۶	۲	۳	۳	۱۵	۱۵	۱۲

ایستگاه آهار													
۱۹۹۳-۱۹۸۹	پایه	۶	۶	۹	۶	۵	۱	۱	۰	۰	۱	۲	۴	۶
۲۰۲۹-۲۰۲۵	SSP2-4.5	۱۰	۱۰	۱۷	۱۴	۱۷	۸	۰	۳	۱	۰	۵	۹	۹
۲۰۲۹-۲۰۲۵	SSP5-8.5	۱۲	۹	۱۶	۱۸	۱۹	۶	۲	۲	۱	۲	۱۲	۱۳	۱۲
۱۹۹۸-۱۹۹۴	پایه	۷	۶	۹	۸	۱۰	۵	۱	۲	۱	۱	۵	۵	۵
۲۰۳۴-۲۰۳۰	SSP2-4.5	۸	۸	۱۵	۱۳	۱۴	۷	۱	۲	۱	۱	۶	۱۲	۱۰
۲۰۳۴-۲۰۳۰	SSP5-8.5	۹	۱۱	۱۵	۱۷	۱۷	۷	۱	۳	۰	۱	۱۱	۱۳	۱۰
۲۰۰۳-۱۹۹۹	پایه	۷	۴	۷	۱۰	۵	۱	۲	۱	۲	۲	۷	۸	۱۰
۲۰۳۹-۲۰۳۵	SSP2-4.5	۱۲	۱۱	۱۳	۱۴	۱۵	۶	۱	۴	۱	۱	۱۰	۱۴	۹
۲۰۳۹-۲۰۳۵	SSP5-8.5	۱۱	۱۱	۱۵	۱۸	۱۶	۷	۱	۲	۰	۱	۱۲	۱۳	۱۰
۲۰۰۸-۲۰۰۴	پایه	۸	۸	۷	۷	۸	۲	۴	۲	۲	۲	۵	۸	۷
۲۰۴۴-۲۰۴۰	SSP2-4.5	۱۳	۱۰	۲۰	۱۵	۱۷	۴	۲	۴	۰	۲	۱۱	۱۲	۱۰
۲۰۴۴-۲۰۴۰	SSP5-8.5	۱۰	۱۲	۱۲	۱۶	۱۶	۹	۱	۳	۱	۱	۱۱	۱۳	۱۱
۲۰۱۳-۲۰۰۹	پایه	۶	۷	۵	۱۰	۸	۴	۲	۲	۲	۲	۳	۷	۵
۲۰۴۹-۲۰۴۵	SSP2-4.5	۱۱	۱۱	۱۷	۱۳	۱۸	۷	۰	۴	۱	۲	۱۱	۱۰	۱۲
۲۰۴۹-۲۰۴۵	SSP5-8.5	۱۱	۱۰	۱۵	۱۶	۱۶	۴	۱	۲	۱	۱	۱۳	۱۴	۱۱
ایستگاه زیدشت														
۱۹۹۳-۱۹۸۹	پایه	۷	۶	۱۰	۷	۷	۲	۱	۱	۰	۳	۳	۶	۸
۲۰۲۹-۲۰۲۵	SSP2-4.5	۹	۱۰	۱۶	۱۸	۱۹	۹	۰	۱	۳	۱	۶	۷	۸
۲۰۲۹-۲۰۲۵	SSP5-8.5	۱۰	۹	۱۴	۱۶	۲۰	۵	۱	۱	۲	۱	۹	۱۰	۱۰
۱۹۹۸-۱۹۹۴	پایه	۸	۱۰	۱۳	۱۲	۱۱	۶	۲	۱	۳	۱	۵	۷	۶
۲۰۳۴-۲۰۳۰	SSP2-4.5	۸	۷	۱۵	۱۶	۱۵	۷	۰	۱	۳	۱	۷	۱۱	۱۰
۲۰۳۴-۲۰۳۰	SSP5-8.5	۷	۱۱	۱۴	۱۶	۱۸	۸	۱	۱	۲	۱	۱۰	۱۱	۱۰
۲۰۰۳-۱۹۹۹	پایه	۹	۹	۸	۱۱	۶	۲	۲	۱	۱	۱	۷	۸	۱۲
۲۰۳۹-۲۰۳۵	SSP2-4.5	۸	۱۱	۱۲	۱۷	۱۷	۵	۱	۱	۳	۱	۱۰	۱۲	۹
۲۰۳۹-۲۰۳۵	SSP5-8.5	۱۱	۱۱	۱۶	۱۷	۱۷	۸	۱	۱	۳	۱	۱۱	۱۳	۹
۲۰۰۸-۲۰۰۴	پایه	۱۰	۱۰	۱۰	۱۲	۹	۱	۳	۰	۱	۱	۷	۹	۸
۲۰۴۴-۲۰۴۰	SSP2-4.5	۱۱	۹	۱۷	۱۷	۱۷	۵	۲	۱	۴	۱	۱۱	۱۱	۹
۲۰۴۴-۲۰۴۰	SSP5-8.5	۷	۹	۱۲	۱۴	۱۷	۸	۱	۱	۲	۱	۱۱	۹	۱۱
۲۰۱۳-۲۰۰۹	پایه	۸	۱۰	۷	۱۱	۱۰	۲	۲	۲	۲	۲	۴	۱۱	۷
۲۰۴۹-۲۰۴۵	SSP2-4.5	۱۰	۱۰	۱۷	۱۶	۱۹	۷	۱	۱	۳	۱	۱۰	۱۱	۱۱
۲۰۴۹-۲۰۴۵	SSP5-8.5	۹	۸	۱۶	۱۵	۱۷	۳	۱	۲	۲	۱	۱۴	۱۳	۱۰



شکل ۱۲: مقایسه مقدار بارش روزانه بین شرایط مشاهداتی و سناریوهای SSP طی ۵ دوره مورد بررسی. *منبع: نگارندگان*

نتیجه‌گیری

شهر تهران با توجه به افزایش سریع جمعیت و نیز محدود بودن منابع تأمین آب در سال‌های اخیر در معرض خشکسالی‌ها و کمبودهای متعدد منابع آب بوده است که اگر تأثیرات افزایش جمعیت و تغییر اقلیم در آینده مدنظر قرار گیرد، این کمبودها می‌تواند تبدیل به بحرانی گسترده گردد (شمس و علیمحمدی، ۱۳۹۴). با توجه به اهمیت مسئله آب در مادرشهر تهران در پژوهش حاضر سعی گردید تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر مقدار بارش و حجم آب حوضه‌های آبخیز تأمین‌کننده آب این شهر در سناریوهای SSP مورد واکاوی قرار گیرد. نتایج مطالعه نشان داد که در فصل بهار و شرایط فعلی، بارش در نواحی شرقی و شمال شرقی حوضه روند کاهشی و در مناطق شمال و شمال غرب روند افزایشی داشته است. اما برونداد GCMهای مورد بررسی گویای این بود که این روندها در آینده نزدیک به این شکل ادامه پیدا نمی‌کند؛ به طوریکه تحت سناریوی SSP2-4.5 بارش در تمام ایستگاه‌ها سیر صعودی و براساس SSP5-8.5 در ۱۷ ایستگاه سیرکاهشی خواهد داشت. تغییرات افزایشی یا کاهشی بارش‌های فصل تابستان، با توجه به اینکه تنها ۵ درصد بارش حوضه‌ی مطالعاتی را تشکیل می‌دهد، قابل توجه نبود. پارامتر یادشده در فصل پاییز و دوره مشاهداتی کمابیش در کل حوضه روند افزایشی داشت که این روند در نیمی از ایستگاه‌ها در سطوح اطمینان تعریف شده آزمون من-کندال معنی دار بود اما پیش نمایی بارش بر مبنای SSP2-4.5 نشان دهنده این بود که بارش منطقه در ۲۰ ایستگاه کاهش خواهد یافت ولی طبق سناریوی SSP5-8.5 روند افزایشی بارش در دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۰ مشابه دوره مشاهداتی ادامه می‌یابد. هر چند بارش‌های فصل زمستان به عنوان دومین فصل پربارش در تأمین آب منطقه اهمیت ویژه‌ای دارند اما نتایج آماری تحلیل شاخص‌های روند گویای این بود که بارش حوضه در این فصل در شرایط کنونی در اکثر ایستگاه‌ها کاهش داشته و این سیر کاهشی در افق ۲۰۲۵-۲۰۵۰ نیز با تغییراتی جزئی ادامه پیدا می‌کند. پس از ارزیابی‌های روند، مقادیر حجم آب ۶ زیر حوضه‌ی تأمین کننده آب شهر تهران در شرایط کنونی و تحت سناریوهای SSP در آینده نزدیک مورد سنجش قرار گرفت، نتایج این مرحله بدین صورت بود: زیرحوضه‌ی کرج با ۵۸۳/۵۲ میلیون‌متر مکعب آب، بیشترین حجم آب را در دوره‌ی پایه به خود اختصاص داده که برمبنای برونداد مدل CNRM-CM6-1 میزان آب این حوضه در هر دو سناریوی حدواسط و بدبینانه افزایش خواهد داشت که در سناریوی SSP5-8.5 این افزایش به بیش از ۱۱ درصد می‌رسد. اما در مدل‌های MIROC6 و MRI-ESM2-0 و CanESM5 حجم آب حوضه تغییرات کاهشی داشته که حداکثر آن به میزان ۶۰ و ۵۰ درصد طبق سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در مدل CanESM5 است. در بین حوضه‌های مطالعه شده بیشترین کاهش حجم آب مربوط به مدل CanESM5 در زیرحوضه سراب جاجرود است؛ به طوریکه در چشم انداز آینده نزدیک، حجم آب این زیرحوضه طبق خروجی مدل مذکور در هردو سناریوی حدواسط و بدبینانه SSP بیش از ۸۰ درصد کمتر خواهد شد. در انتها، نتایج حاصل از بررسی تغییرات فراوانی روزهای بارشی نشان داد که تعداد روزهای بارشی تحت سناریوهای SSP بینابین و بدبینانه در اقلیم آینده نسبت به شرایط حال بیشتر خواهد بود، این مسئله در دوره‌هایی حائز اهمیت است که میزان بارش در آن دوره تحت سناریوهای تغییر اقلیم کاهش یافته اما این مقدار بارش کمتر، در تعداد روزهای بیشتری توزیع گردیده است. نتایج به دست آمده از واکاوی تغییرات روند بارش در شرایط فعلی با پژوهش‌های خزاعی و همکاران (۱۳۹۸)، خوش‌روش و همکاران (۱۳۹۶)، بینش و همکاران (۱۳۹۶)، امیر رضائیه و همکاران (۱۳۹۵) هم راستا است. همچنین رحیمی (۱۳۹۷) و شمس و علیمحمدی (۱۳۹۴) که اثر تغییر اقلیم در

استان تهران را برمبنای سناریوهای RCP مورد ارزیابی قرار دادند به نتایج مشابهی در زمینه تغییر اقلیم در حوضه مورد بحث دست یافتند. علاوه براین محمدی و همکاران (۱۴۰۱) با پیش‌نگری تغییرات بارش برمبنای مدل‌های CMIP6 در شمال غرب ایران نشان دادند که تا پایان قرن ۲۱ بارش بر اساس سناریوی SSP1-2.6 به طور متوسط به میزان ۲/۶ درصد افزایش و براساس سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب ۱۴/۵ و ۳/۶ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. مطالعه تأثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین ایران با بکارگیری مدل همادی CMIP6 بیانگر افزایش روزهای همراه با بارش سنگین در تمامی حوضه‌های آبخیز ایران است (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰). مطابق پژوهش روشنی و حمیدی (۱۴۰۰) نیز میانگین مقدار بارش سالانه ایستگاه ساری حدود ۲۶ تا ۳۰ درصد در مدل‌های CMIP6 افزایش خواهد یافت. نتایج پژوهش حاضر همانند مطالعات ذکر شده نشان‌دهنده تغییرات کاهشی و افزایشی الگوهای بارش در فصول مختلف سال در منطقه مورد مطالعه بود که این تغییرات در افق آتی و تحت سناریوهای SSP بیشتر به چشم می‌آمد. با عین حال علیرغم پیش‌بینی افزایش بارش در برخی حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه در فصول پاییز و بهار، ولی افزایش دما به همراه تبخیر و تعرق، این افزایش بارش را خنثی می‌کند. به همین دلیل مدیریت منابع آب در محدوده مطالعه شده مستلزم برنامه‌ریزی جامع در راستای سازگاری با تغییرات اقلیمی است.

تقدیر و تشکر

این پژوهش مستخرج از طرح تحقیقاتی به شماره ۴۰۰۰۷۱۶ می‌باشد که تحت حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) و پشتیبانی دانشگاه تهران قرار گرفته است. نویسندگان از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران و دانشکده جغرافیا به جهت مهیانمودن شرایط انجام تحقیق و همچنین سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌ها کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

احمدآبادی، علی؛ صدیقی‌فر، زهرا. (۱۳۹۷). پیش بینی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز کن بر اساس مدل ریز مقیاس نمایی آماری. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۸(۵۱)، ۱۰۳-۱۱۴.

امیررضائیه، علیرضا؛ پرهمت، جهانگیر؛ احمدی، فرشاد. (۱۳۹۵). بررسی روند تغییرات بارش و دمای شمال‌غرب کشور در نیم قرن اخیر. آبیاری و زهکشی ایران، ۱۰(۶)، ۷۹۷-۸۰۹.

انصاری مهابادی، ثمین؛ دهبان، حسین؛ زارعیان، محمد جواد؛ فرخنیا، اشکان. (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات دما و بارش و اثر آن بر پتانسیل منابع آب ورودی به سد طالقان. پژوهش آب ایران، ۱۶(۱)، ۱۱-۲۴.

بابائیان، ایمان؛ مدیریان، راهله؛ کریمیان، مریم؛ جوانشیری، زهره. (۱۴۰۰). پیش‌بینی چندسالانه بارش ایران با مقیاس‌کاهی برونداد مدل‌های DCPP، مطالعه موردی: دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۳. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۲(۶)، ۶۳-۷۸.

بابائیان، ایمان؛ نجفی نیک، زهرا؛ زابل عباسی، فاطمه؛ حبیبی نوخندان، مجید؛ ادب، حامد؛ ملبوسی، شراره. (۱۳۸۸). ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHOG. جغرافیا و توسعه، ۷ (۱۶)، ۱۳۵-۱۵۲.

بینش، نگین؛ نیک سخن، محمدحسین؛ سارنگ، امین. (۱۳۹۶). آشکارسازی روند تغییرات دما و بارش سالانه و فصلی تهران طی دوره ۱۹۸۴-۲۰۱۴. نیوار، ۹۶ و ۹۷، ۳۶-۴۵.

حسینی‌خواه، منصور؛ زینی وند، حسین؛ حقی‌زاده، علی؛ طهماسبی‌پور، ناصر. (۱۳۹۳). صحت سنجی مقادیر دما و بارش مدل‌های گردش عمومی در ایستگاه‌های کرمانشاه، روانسر و اسلام‌آباد غرب. اکوهیدرولوژی، ۱(۳)، ۱۹۵-۲۰۶.

خزاعی، سحر؛ براتی، رضا؛ قندهاری، احمد؛ صادقی فرد، محمدرضا. (۱۳۹۸). تحلیل روند بارش با استفاده از روش نوین Sen و مقایسه نتایج روش های متداول (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). آب و توسعه پایدار، ۶(۱)، ۴۱-۵۰.

خوش‌روش، مجتبی؛ میرناصری، محمد؛ پسرکلو، مهسا. (۱۳۹۶). آشکارسازی روند تغییرات بارش شمال کشور با استفاده از آزمون غیرپارامتری من-کندال، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز. ۸(۱۶)، ۲۲۳-۲۳۱.

ذرین، آذر؛ داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰). تاثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین ایران با بکارگیری مدل همادی CMIP6. آب و توسعه پایدار، ۸(۴)، ۱۱۹-۱۲۴.

رحیمی، فراز. (۱۳۹۷). مدلسازی اثرات تغییرات اقلیم در حوضه آبخیز استان تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر سید جواد ساداتی نژاد، دکتر حسین یوسفی، دانشگاه تهران.

روشنی، ادیب؛ حمیدی، مهدی. (۱۴۰۰). پیش‌بینی اثرات سناریوهای تغییر اقلیم بر دما و بارش بر اساس مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: ایستگاه ساری). مدیریت آب و آبیاری، ۱۱(۴)، ۷۸۱-۷۹۵.

سالنامه آماری شهر تهران، ۱۳۹۶.

شمس، رضا؛ علیمحمدی، سعید. (۱۳۹۴). بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع و تامین آب کلان شهر تهران، اولین کنگره سالیانه جهان و بحران انرژی، شیراز.

صلوی‌تبار، عبدالرحیم؛ ضرغامی، مهدی؛ ابریشم‌چی، احمد. (۱۳۸۵). مدل پویایی سیستم در مدیریت آب شهری تهران. مجله آب و فاضلاب، ۱۷(۳)، ۱۲-۲۸.

عبدلی، سعدی؛ عزیزی، قاسم؛ برنا، رضا. (۱۴۰۱). ارزیابی تغییرات دمای هوا و بارش در منطقه پربارش نیمه غربی ایران تحت شرایط تغییر اقلیم. جغرافیای طبیعی، ۱۴(۵۳)، ۱-۱۸.

فلاح کلاکی، محمد؛ شکری کوچک، وحید؛ رمضانی اعتدالی، هادی. (۱۴۰۰). شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبریز طشک-بختگان). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۷(۳)، ۳۴۵-۳۵۹.

قلی‌پور، جمیله؛ موسوی بایگی، محمد؛ بابائیان، ایمان؛ جباری نوقابی، مهدی. (۱۴۰۰). بررسی روند رخدادهای حدی بارشی استان خراسان جنوبی در اثر گرمایش جهانی (بازه اقلیمی: ۱۹۸۹-۲۰۱۸). پژوهش‌های اقلیم شناسی، ۱۲(۴۶)، ۲۹-۴۲.

محمدلو، محمد؛ حقی‌زاده، علی؛ زینی وند، حسین؛ طهماسبی‌پور، ناصر. (۱۳۹۵). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر روند تغییرات دما و بارندگی حوضه‌ی آبخیز باراندوزچای در استان آذربایجان غربی با استفاده از مدل‌های چرخش عمومی جو. فضای جغرافیایی، ۱۶(۵۶)، ۱۵۱-۱۶۸.

محمدی، نبی؛ ساری‌صراف، بهروز؛ رستم‌زاده، هاشم. (۱۴۰۱). پیش‌نگری بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 تا پایان قرن ۲۱ در شمال غرب ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی، انتشار آنلاین. Doi: 10.22067/geoeh.2022.76646.1223

محمدی، نیلوفر، ۱۴۰۰، اثرات تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا در استان تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر زهرا بیگم حجازی‌زاده، دکتر مهری اکبری، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی.

میرزائی، عزت اله؛ جلالی، عبداله؛ جودکی، حمیدرضا؛ اربابی سبزواری، آزاده. (۱۳۹۸). تحلیل میزان تاب‌آوری شهری در برابر بحران آب مطالعه موردی: شهرتهران. شهر ایمن، ۲(۵)، ۱-۱۲.

نوده فراهانی، محمدعلی؛ راسخی، آنا؛ پرماس، بهنام؛ کشوری، عبدالرحمان. (۱۳۹۵). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشکسالی‌های دوره آتی حوضه شادگان. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۳)، ۱۶۰-۱۷۳.

وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، دفتر مطالعات پایه منابع آب. (۱۳۹۱). مطالعات تدقیق مرز محدوده‌های مطالعاتی و حوضه‌های آبریز کشور.

یعقوب‌زاده، مصطفی؛ پوررضا بیلندی، محسن؛ خاشعی سیوکی، عباس؛ رمضانی مقدم، جواد. (۱۴۰۰). عدم قطعیت مدل‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم در برآورد دما و بارش. فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۱۳(۵۱)، ۲۱-۳۷.

Ahmad, I., Tang, D., Wang, T., Wang, M., Wagan, B. (2015). Precipitation trends over time using Mann-Kendall and spearman's rho tests in Swat river basin, Pakistan. Advances in Meteorology, 2015(2), pp 1-15.

Akinsanola, A. A., Kooperman, G. J., Pendergrass, A. G., Hannah, W. M., Reed, K. A. (2020). Seasonal representation of extreme precipitation indices over the United States in CMIP6 present-day simulations. Environmental Research Letters, 15(9), pp 1-12.

Al-Maliki, L. A., Al-Mamoori, S. K., Jasim, I. A., El-Tawel, K., Al-Ansari, N., Comair, F. G. (2022). Perception of climate change effects on water resources: Iraqi undergraduates as a case study. Arabian Journal of Geosciences, 15(6), pp 1-13.

Aswad, F. K., Yousif, A. A., Ibrahim, S. A. (2020). Trend Analysis Using Mann-Kendall and Sen's Slope Estimator Test for Annual and Monthly Rainfall for Sinjar District, Iraq. Journal of Duhok University, 23(2), pp 501-508.

Caloiero, T. (2014). Analysis of daily rainfall concentration in New Zealand. Natural hazards, 72(2), pp 389-404.

Chen, Z., Zhou, T., Zhang, L., Chen, X., Zhang, W., Jiang, J. (2020). Global land monsoon precipitation changes in CMIP6 projections. Geophysical Research Letters, 47(14), pp 1-9.

Coscarelli, R. A., Caloiero, T. (2012). Analysis of daily and monthly rainfall concentration in Southern Italy (Calabria region). Journal of Hydrology, 416, pp 145-156.

Dash, S. K., Jenamani, R. K., Kalsi, S. R., Panda, S. K. (2007). Some evidence of climate change in twentieth-century India. Climatic change, 85(3), pp 299-321.

Diress, S. A., Bedada, T. B. (2021). Precipitation and Temperature trend analysis by Mann Kendall test: The case of Addis Ababa methodological station, Addis Ababa, Ethiopia. African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences, 4(4), pp 517-526.

Dore, M. H. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: what do we know? Environment International, 31(8), pp 1167-1181.

Doulabian, S., Golian, S., Toosi, A. S., Murphy, C. (2021). Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature for Iran using RCP scenarios. Journal of Water and Climate Change, 12(1), pp 166-184.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K. E. (2015). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development Discussions, 8(12), pp 1937-1958.

Fang, G. H., Yang, J., Chen, Y. N., Zammit, C. (2015). Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. Hydrology and Earth System Sciences, 19(6), pp 2547-2559.

Ge, F., Zhu, S., Luo, H., Zhi, X., Wang, H. (2021). Future changes in precipitation extremes over Southeast Asia: insights from CMIP6 multi-model ensemble. Environmental Research Letters, 16(2), pp 1-10.

Gunavathi, S., Selvasidhu, R. (2021). Assessment of Various Bias Correction Methods on Precipitation of Regional Climate Model and Future Projection, Research Square, doi:10.21203/rs.3.rs-339080/v1.

Gupta, V., Singh, V., Jain, M. K. (2020). Assessment of precipitation extremes in India during the 21st century under SSP1-1.9 mitigation scenarios of CMIP6 GCMs. Journal of Hydrology, 590, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125422.

Homsi, R., Shiru, M. S., Shahid, S., Ismail, T., Harun, S. B., Al-Ansari, N.,... Yaseen, Z. M. (2020). Precipitation projection using a CMIP5 GCM ensemble model: a regional investigation of Syria. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 14(1), pp 90-106.

Huang, Y., Wang, H., Xiao, W., Chen, L. H., Yan, D. H., Zhou, Y. Y.,... Yang, M. Z. (2018). Spatial and temporal variability in the precipitation concentration in the upper reaches of the Hongshui River basin, southwestern China. Advances in Meteorology, 2018, DOI: 10.1155/2018/4329757.

Hussain, F., Nabi, G., Boota, M. W. (2015). Rainfall trend analysis by using the Mann-Kendall test & sen's slope estimates: a case study of district Chakwal rain gauge, Barani area, northern Punjab Province, Pakistan. Science International, 27(4).

Ines, A. V., Hansen, J. W. (2006). Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. Agricultural and forest meteorology, 138(1-4), pp 44-53.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 1535 pp.

Islam, T., Rico-Ramirez, M. A., Han, D., Srivastava, P. K., Ishak, A. M. (2012). Performance evaluation of the TRMM precipitation estimation using ground-based radars from the GPM validation network. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 77, pp 194-208.

Jiménez-Navarro, I. C., Jimeno-Sáez, P., López-Ballesteros, A., Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J. (2021). Impact of Climate Change on the Hydrology of the Forested Watershed That Drains to Lake Erken in Sweden: An Analysis Using SWAT+ and CMIP6 Scenarios. Forests, 12(12), 1803.
Lancaster, B., Lipkis, A. (2010). Rainwater Harvesting for Drylands and Beyond, Volume 2: Water-Harvesting Earthworks (Vol. 2). Rainsource Press.
Li, X., Jiang, F., Li, L., Wang, G. (2011). Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree, and concentration period in Xinjiang, China. International Journal of Climatology, 31(11), pp 1679-1693.
Li, Y., Li, Z., Zhang, Z., Chen, L., Kurkute, S., Scaff, L., Pan, X. (2019). High-resolution regional climate modeling and projection over western Canada using a weather research forecasting model with a pseudo-global warming approach. Hydrology and Earth System Sciences, 23(11), pp 4635-4659.
McGinnis, S., Nychka, D., Mearns, L. O. (2015). A new distribution mapping technique for climate model bias correction. In Machine learning and data mining approaches to climate science (pp. 91-99). Springer, Cham.
Menon, A., Levermann, A., Schewe, J., Lehmann, J., Frieler, K. (2013). Consistent increase in Indian monsoon rainfall and its variability across CMIP-5 models. Earth System Dynamics, 4(2), pp 287-300.
Nasidi, N. M., Wayayok, A., Abdullah, A. F., Mohd Kassim, M. S. (2021). Dynamics of potential precipitation under climate change scenarios at Cameron Highlands, Malaysia. SN Applied Sciences, 3(3), pp 1-17.
Ostad-Ali-Askari, K., Ghorbanizadeh Kharazi, H., Shayannejad, M., Zareian, M. J. (2020). Effect of climate change on precipitation patterns in an arid region using GCM models: a case study of Isfahan-Borkhar Plain. Natural Hazards Review, 21(2).
Praveen, B., Talukdar, S., Mahato, S., Mondal, J., Sharma, P., Islam, A. R. M., Rahman, A. (2020). Analyzing trend and forecasting of rainfall changes in India using non-parametrical and machine learning approaches. Scientific reports, 10(1), pp 1-21.
Qin, J., Su, B., Tao, H., Wang, Y., Huang, J., Jiang, T. (2021). Projection of temperature and precipitation under SSPs-RCPs Scenarios over northwest China. Frontiers of Earth Science, 15(1), pp 23-37.
Salmi, T., Määttä, A., Anttila, P. Ruoho, T, Amnell, T (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates –the Excel template application MAKE SENSE. Publications on Air Quality No. 31: Report code FMI-AQ-31.
Teutschbein, C., Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. Journal of Hydrology, 456, pp 12-29.
Versini, P. A., Pouget, L., McEnnis, S., Custodio, E., Escaler, I. (2016). Climate change impact on water resources availability: a case study of the Llobregat River basin (Spain). Hydrological Sciences Journal, 61(14), pp 2496-2508.
Wang, B., Jin, C., Liu, J. (2020). Understanding future change of global monsoons projected by CMIP6 models. Journal of Climate, 33(15), pp 6471-6489.
Yeboah, K. A., Akpoti, K., Kabo-bah, A. T., Ofosu, E. A., Siabi, E. K., Mortey, E. M., Okyereh, S. A. (2022). Assessing climate change projections in the Volta Basin using the CORDEX-Africa climate simulations and statistical bias correction. Environmental Challenges, 6, pp 1-18.
Zhai, J., Mondal, S. K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., ... Uddin, M. J. (2020). Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. Atmospheric Research, DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105111.
Zhang, Z., Ren, H. (2022). Evaluation of four bias correction methods and random forest model for climate change projection in the Mara River Basin, East Africa. Journal of Water and Climate Change, 13(4), pp 1900-1919.

University of Sistan and Baluchestan
Journal of Natural Environment Hazards
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

References

References (in Persian)

Abdoli, S., Azizi, Gh., Borna, R. (2021). Evaluation of air temperature and precipitation changes in the rainy region of western Iran under climate change conditions, Physical Geography, 14(53), pp 1-18. [In Persian]
Ahmadabadi, A., Sedighifar ,Z. (2019). Prediction of climate change induced hydrogeomorphology by using SDSM in Can watershed, Quarterly journal of geographical sciences, 18 (51), pp 103-114. [In Persian]
Amirrezaeieh, A., Porhemmat, J., Ahmadi, F. (2017). Investigation of precipitation and temperature trend across the northwest of Iran in recent half of the century, Iranian journal of irrigation and drainage, 1 (6), pp 797-809. [In Persian]
Ansari Mahabadi, S., Dehban, H., Zareian, M.J., Farokhnia, A. (2022).Investigation of temperature and precipitation changes in Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model, Iranian Water Research, 16(1), pp 11-24. [In Persian]
Babaeian, I., Modiriyan, R., Karimian, M., Javanshiri, Z. (2021).Annual to Decadal Prediction of Precipitation over Iran during 2019-2023 using statistical downscaling of DCPP models, Case study: 2019-2023 period, Climate Change Research, 2(6), pp 63-78. [In Persian]
Babaeian, I., Nagafineik, Z., Zabolabasi, F., Habeibei Nokhandan, M., Adab, H., Malbosei, Sh. (2010). Climate Change Assessment over Iran During 2010-2039 by Using Statistical Downscaling of ECHO- G Model, Geography and Development, 7(16), pp 135-152. [In Persian]
Binesh, N., Nik Sokhan, M. H., Sarang, A. (2017). Trend detection in Tehran temperature and precipitation during 1984-2014, Nivar, 96-97, pp 36-45. [In Persian]
Fallah Kalaki, M., Shokri Kuchak, V., Ramezani Etedali, H. (2021). Simulating the effects of climate change on runoff using the CMIP5 and CMIP6 climate models by SWAT hydrological model (Case study: Tashk-Bakhtegan Basin), Iran- Water Resources Research, 17 (3), pp 345-359. [In Persian]
Gholipour, J., Mousavi Bayegi, M., Babaeian, I., Jabbari Nooghabi, M. (2021). Investigating the Trend of extreme Precipitation Events South Khorasan province Due to global warming (Climatic range: 1989-2018), Journal of Climate Research, 12(46), pp 29-42. [In Persian]
Hosseinikhah, M., Zeinivand, H., Haghizadeh., A.,Tahmasebipour., N. (2015). Validation of global climate models (GCMS) temperature and rainfall simulation in Kermanshah, Ravansar and West Islamabad stations, Ecohydrology, 1 (3), pp 195-206. [In Persian]
Khazaei,S., Barati, R., Ghandehari, A., Sadeghifard, M. R. (2019). Rainfall trend Analysis using Innovative-Şen method and comparison with traditional methods (Case Study: Khorasan Razavi Province), Water and Sustainable Development, 6 (1), pp 41-50. [In Persian]
Khoshroush, M., Mirnaseri, M., Pesarkolo, M. (2018). Change detection of precipitation trend of the northern part of Iran using Mann- Kendall non-parametric test, Journal of Watershed Management Research, 8 (16), pp 223-231. [In Persian]
Ministry of Energy, Iran Water Resources Management. (2012). Studies on the accuracy of the boundaries of the study areas and watersheds of Iran. [In Persian]
Mirzaei, E., Jalali, A., Judaki, H. R ., Arbabi Sabzevari, A. (2019). Analysis of urban resilience to water crisis Case study: Tehran, Resilient City, 2 (5), pp 1-12. [In Persian]
Mohammad lu, M., Haghizadeh., A., Zeinivand, H., Tahmasebipour., N. (2017). Evaluation of climate change on temperature and precipitation trends in Barandozchay watershed, In West Azerbaijan, using General Circulation Models, Geographic Space, 16 (56), pp 151-168. [In Persian]
Mohammadi, N. (2021). Investigating the effects of climate change on torrential rains in Tehran province, Master Thesis, Supervisors: Dr. Zahra Hejazizadeh; Dr. Mehry Akbari, Kharazmi University. [In Persian]
Mohammadi, N., Sari Saraf, B., Rostamzadeh, H. (2022). Rainfall forecasting using CMIP6 models until the end of the 21st century in northwest Iran, Geography and Environmental Hazards, Online publication, Doi: 10.22067/geoeh.2022. 76646.1223. [In Persian]
Node Farahani, M. A., Rasekhi, A., Parmas, B., keshvari, A. (2018). The effects of climate change on temperature, precipitation, and drought in the future Shadegan basin, Iran- Water Resources Research, 14 (3), pp 160-173. [In Persian]
Rahimi, F. (2019).Modeling of climate change effects in Tehran Province Watershed, Master Thesis, Supervisors: Dr. Seyed Javad Sadatinejad; Dr. Hossein Yousefi, University of Tehran. [In Persian]
Roshani, A., Hamidi., M. (2022). Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature & precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station), Water and Irrigation Management, 11(4), pp 781-795. [In Persian]
Salvitabar, A., Zarghami, M., Abrishamchi, A. (2006). System Dynamic model in Tehran urban water management, Quarterly Water and Wastewater, 17 (3), pp 12-28. [In Persian]
Shams, R., Ali Mohammadi, S. (2015). Investigating the impact of climate change on resources and water supply in Tehran, The first Annual Congress on World and Energy Crisis, Shiraz. [In Persian]
Tehran Statistical Year Book, (2017). [In Persian]

Yaghob Zadeh, M., Poor Reza Belandi, M., Khashei Syoki, A., Ramezani Moghadam, J. (2021). Uncertainty of the models of the fifth report on climate change in estimating temperature and precipitation, Journal of Physical Geography, 13 (51), pp 21-37. [In Persian]

Zarrin, A., Dadashi Roudbari, A.A. (2022). The Impact of Climate Change on Heavy Rainfall in Iran Using Hamadi Model CMIP6, Water and Sustainable Development, 8(4), pp 119-124. [In Persian]

References (in English)

Ahmad, I., Tang, D., Wang, T., Wang, M., Wagan, B. (2015). Precipitation trends over time using Mann-Kendall and spearman's rho tests in Swat river basin, Pakistan. Advances in Meteorology, 2015(2), pp 1-15.

Akinsanola, A. A., Kooperman, G. J., Pendergrass, A. G., Hannah, W. M., Reed, K. A. (2020). Seasonal representation of extreme precipitation indices over the United States in CMIP6 present-day simulations. Environmental Research Letters, 15(9), pp 1-12.

Al-Maliki, L. A., Al-Mamoori, S. K., Jasim, I. A., El-Tawel, K., Al-Ansari, N., Comair, F. G. (2022). Perception of climate change effects on water resources: Iraqi undergraduates as a case study. Arabian Journal of Geosciences, 15(6), pp 1-13.

Aswad, F. K., Yousif, A. A., Ibrahim, S. A. (2020). Trend Analysis Using Mann-Kendall and Sen's Slope Estimator Test for Annual and Monthly Rainfall for Sinjar District, Iraq. Journal of Duhok University, 23(2), pp 501-508.

Caloiero, T. (2014). Analysis of daily rainfall concentration in New Zealand. Natural hazards, 72(2), pp 389-404.

Chen, Z., Zhou, T., Zhang, L., Chen, X., Zhang, W., Jiang, J. (2020). Global land monsoon precipitation changes in CMIP6 projections. Geophysical Research Letters, 47(14), pp 1-9.

Coscarelli, R. A., Caloiero, T. (2012). Analysis of daily and monthly rainfall concentration in Southern Italy (Calabria region). Journal of Hydrology, 416, pp 145-156.

Dash, S. K., Jenamani, R. K., Kalsi, S. R., Panda, S. K. (2007). Some evidence of climate change in twentieth-century India. Climatic change, 85(3), pp 299-321.

Diress, S. A., Bedada, T. B. (2021). Precipitation and Temperature trend analysis by Mann Kendall test: The case of Addis Ababa methodological station, Addis Ababa, Ethiopia. African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences, 4(4), pp 517-526.

Dore, M. H. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: what do we know? Environment International, 31(8), pp 1167-1181.

Doulabian, S., Golian, S., Toosi, A. S., Murphy, C. (2021). Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature for Iran using RCP scenarios. Journal of Water and Climate Change, 12(1), pp 166-184.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K. E. (2015). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development Discussions, 8(12), pp 1937-1958.

Fang, G. H., Yang, J., Chen, Y. N., Zammit, C. (2015). Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. Hydrology and Earth System Sciences, 19(6), pp 2547-2559.

Ge, F., Zhu, S., Luo, H., Zhi, X., Wang, H. (2021). Future changes in precipitation extremes over Southeast Asia: insights from CMIP6 multi-model ensemble. Environmental Research Letters, 16(2), pp 1-10.

Gunavathi, S., Selvasidhu, R. (2021). Assessment of Various Bias Correction Methods on Precipitation of Regional Climate Model and Future Projection, Research Square, doi:10.21203/rs.3.rs-339080/v1.

Gupta, V., Singh, V., Jain, M. K. (2020). Assessment of precipitation extremes in India during the 21st century under SSP1-1.9 mitigation scenarios of CMIP6 GCMs. Journal of Hydrology, 590, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125422.

Homsi, R., Shiru, M. S., Shahid, S., Ismail, T., Harun, S. B., Al-Ansari, N.,... Yaseen, Z. M. (2020). Precipitation projection using a CMIP5 GCM ensemble model: a regional investigation of Syria. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 14(1), pp 90-106.

Huang, Y., Wang, H., Xiao, W., Chen, L. H., Yan, D. H., Zhou, Y. Y.,... Yang, M. Z. (2018). Spatial and temporal variability in the precipitation concentration in the upper reaches of the Hongshui River basin, southwestern China. Advances in Meteorology, 2018, DOI: 10.1155/2018/4329757.

Hussain, F., Nabi, G., Boota, M. W. (2015). Rainfall trend analysis by using the Mann-Kendall test & sen's slope estimates: a case study of district Chakwal rain gauge, Barani area, northern Punjab Province, Pakistan. Science International, 27(4).

Ines, A. V., Hansen, J. W. (2006). Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. Agricultural and forest meteorology, 138(1-4), pp 44-53.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 1535 pp.

Islam, T., Rico-Ramirez, M. A., Han, D., Srivastava, P. K., Ishak, A. M. (2012). Performance evaluation of the TRMM precipitation estimation using ground-based radars from the GPM validation network. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 77, pp 194-208.

Jiménez-Navarro, I. C., Jimeno-Sáez, P., López-Ballesteros, A., Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J. (2021). Impact of Climate Change on the Hydrology of the Forested Watershed That Drains to Lake Erken in Sweden: An Analysis Using SWAT+ and CMIP6 Scenarios. Forests, 12(12), 1803.

Lancaster, B., Lipkis, A. (2010). Rainwater Harvesting for Drylands and Beyond, Volume 2: Water-Harvesting Earthworks (Vol. 2). Rainsource Press.
Li, X., Jiang, F., Li, L., Wang, G. (2011). Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree, and concentration period in Xinjiang, China. International Journal of Climatology, 31(11), pp 1679-1693.
Li, Y., Li, Z., Zhang, Z., Chen, L., Kurkute, S., Scaff, L., Pan, X. (2019). High-resolution regional climate modeling and projection over western Canada using a weather research forecasting model with a pseudo-global warming approach. Hydrology and Earth System Sciences, 23(11), pp 4635-4659.
McGinnis, S., Nychka, D., Mearns, L. O. (2015). A new distribution mapping technique for climate model bias correction. In Machine learning and data mining approaches to climate science (pp. 91-99). Springer, Cham.
Menon, A., Levermann, A., Schewe, J., Lehmann, J., Frieler, K. (2013). Consistent increase in Indian monsoon rainfall and its variability across CMIP-5 models. Earth System Dynamics, 4(2), pp 287-300.
Nasidi, N. M., Wayayok, A., Abdullah, A. F., Mohd Kassim, M. S. (2021). Dynamics of potential precipitation under climate change scenarios at Cameron Highlands, Malaysia. SN Applied Sciences, 3(3), pp 1-17.
Ostad-Ali-Askari, K., Ghorbanizadeh Kharazi, H., Shayannejad, M., Zareian, M. J. (2020). Effect of climate change on precipitation patterns in an arid region using GCM models: a case study of Isfahan-Borkhar Plain. Natural Hazards Review, 21(2).
Praveen, B., Talukdar, S., Mahato, S., Mondal, J., Sharma, P., Islam, A. R. M., Rahman, A. (2020). Analyzing trend and forecasting of rainfall changes in India using non-parametrical and machine learning approaches. Scientific reports, 10(1), pp 1-21.
Qin, J., Su, B., Tao, H., Wang, Y., Huang, J., Jiang, T. (2021). Projection of temperature and precipitation under SSPs-RCPs Scenarios over northwest China. Frontiers of Earth Science, 15(1), pp 23-37.
Salmi, T., Määttä, A., Anttila, P. Ruoho, T, Amnell, T (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates –the Excel template application MAKE SENSE. Publications on Air Quality No. 31: Report code FMI-AQ-31.
Teutschbein, C., Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. Journal of Hydrology, 456, pp 12-29.
Versini, P. A., Pouget, L., McEnnis, S., Custodio, E., Escaler, I. (2016). Climate change impact on water resources availability: a case study of the Llobregat River basin (Spain). Hydrological Sciences Journal, 61(14), pp 2496-2508.
Wang, B., Jin, C., Liu, J. (2020). Understanding future change of global monsoons projected by CMIP6 models. Journal of Climate, 33(15), pp 6471-6489.
Yeboah, K. A., Akpoti, K., Kabo-bah, A. T., Ofosu, E. A., Siabi, E. K., Mortey, E. M., Okyereh, S. A. (2022). Assessing climate change projections in the Volta Basin using the CORDEX-Africa climate simulations and statistical bias correction. Environmental Challenges, 6, pp 1-18.
Zhai, J., Mondal, S. K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., ... Uddin, M. J. (2020). Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. Atmospheric Research, DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105111.
Zhang, Z., Ren, H. (2022). Evaluation of four bias correction methods and random forest model for climate change projection in the Mara River Basin, East Africa. Journal of Water and Climate Change, 13(4), pp 1900-1919.