



Study of future climate change on the temperature and precipitation trends in Qarasu basin based on the CMIP6 models

Leyli GhorbaniMinaei¹ | Abolfazl Mosaedi² | Mehdi Zakerinia^{3✉} | Elham Kalbali⁴ |
Mohammad GhabaeiSough⁵

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: Leyli.ghorbani.minaei@gmail.com.
2. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashad, Mashad, Iran. E-mail: Mosaedi@um.ac.ir.
3. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: mzakerinia@gmail.com.
4. Department of Agriculture Economy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: Elham.kalbali@yahoo.com.
5. IRAN Water Resources Management Company, Tehran, Iran. E-mail: Ghabaei.m63@gmail.com.

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 5, 2023

Revised: Jan. 6, 2024

Accepted: Jan. 30, 2024

Published online: April. 2024

Keywords:

Climate Change,
CMIP6 Models,
Multi Model Execution,
Precipitation,
Trend.

ABSTRACT

Determining the future climate situation by using climate models seems necessary to consider in the field of adaptation or reducing the adverse effects of climate change. In this research, the temporal trend of rainfall, minimum and maximum temperature in the four stations in the Qarasu basin and in addition to, investigated using Thiessen's interpolation method. Among the five models of the CMIP6, three models were selected as the best models and used for MME. Biass Correction was done with CMHyd software for scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 in periods 2026-2050, 2051-2075 and 2076-2100. The trend of variables in the base period (1990-2014) and future were investigated with Mann-Kendall test and sens slope. The results of analysis significant trends annual average maximum and minimum temperature of all stations and in catchment area according to SSP2.4-5 scenario in two near and middle future periods and for SSP5-8.5 scenario in all three future periods have a significant trend at the 99% level. In analysis significant trend seasonal rainfall according to SSP2.4-5 scenario in the summer season distant future all stations and in near future of the station area of Gorgan regional water company at the 95% level and for the SSP5-8.5 scenario only in the winter season in the distant future Ghafarhaji station has a significant trend at the 99% level. The future monthly rainfall in the catchment area according to scenario of SSP2.4-5 in August at the 99% probability level and SSP5-8.5 in March at the 95% probability level have a significant trend.

Cite this article: GhorbaniMinaei, L., Zakerinia, M., Mosaedi, A., Kalbali, E., & GhabaeiSough, M. (2024) Study of future climate change on the temperature and precipitation trends in Qarasu basin based on the CMIP6 models, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (2), 245-268. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.369146.669613>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.369146.669613>



بررسی تغییر اقلیم بر روند دما و بارش آتی حوضه قره‌سو طبق مدل‌های CMIP6

لیلی قربانی مینائی^۱ | ابوالفضل مساعدی^۲ | مهدی ذاکری‌نیا^۳ | الهام کلبعلی^۴ | محمد قبائی سوق^۵

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه:

Leyli.ghorbani.minaei@gmail.com۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: Mosaedi@um.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

mzakerinia@gmail.com رایانامه:۴. گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: Elham.kalbali@yahoo.com۵. شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران، ایران. رایانامه: Ghabaei.m63@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

ارزیابی وضعیت اقلیمی دوره‌های آتی با استفاده از مدل‌های اقلیمی برای در نظر گرفتن اقدامات لازم در زمینه سازگاری و یا کاهش اثرات پدیده تغییر اقلیم ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش روند زمانی بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر در محدوده چهار ایستگاه در زیرحوضه قره‌سو و علاوه بر آن به روش درون‌یابی تیسن در مقیاس منطقه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. از بین پنج مدل از مجموعه مدل‌های CMIP6، سه مدل به‌عنوان مدل برتر انتخاب و برای اجرای گروهی مدل‌ها استفاده شدند. مقیاس‌کاهی با نرم‌افزار CMHyd برای دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در سه دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ انجام شد. بررسی روند متغیرها در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و آتی با آزمون من‌کنندال و شیب سن انجام شد. نتایج بررسی روند معنی‌داری داده‌های میانگین سالانه متغیر دمای حداکثر و حداقل تمام ایستگاه‌ها و محدوده مورد مطالعه طبق سناریوی SSP2.4-5 در دو دوره آینده نزدیک و میانه و برای سناریوی SSP5-8.5 در هر سه دوره آتی در سطح ۹۹ درصد دارای روند معنی‌دار افزایشی است. در بررسی روند معنی‌داری داده‌های فصلی بارش طبق سناریوی SSP2.4-5 در فصل تابستان آینده دور تمام ایستگاه‌ها و آینده نزدیک ایستگاه محوطه اداره آب گرگان در سطح احتمال ۹۵ درصد و سناریوی SSP5-8.5 فقط در فصل زمستان آینده دور ایستگاه غفارحاجی در سطح احتمال ۹۹ درصد دارای روند معنی‌دار است. داده‌های ماهانه بارش آینده دور محدوده مورد مطالعه طبق سناریوی SSP2.4-5 در ماه Aug در سطح احتمال ۹۹ درصد و SSP5-8.5 در ماه Mar در سطح احتمال ۹۵ درصد دارای روند معنی‌دار است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۱۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰
تاریخ انتشار: اردیبهشت ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

اجرای گروهی مدل،
بارش،
تغییر اقلیم،
روند،
مدل‌های CMIP6.

استناد: قربانی مینائی، لیلی؛ مساعدی، ابوالفضل؛ ذاکری‌نیا، مهدی؛ کلبعلی، الهام؛ و قبائی سوق، محمد (۱۴۰۲). بررسی تغییر اقلیم بر روند دما و بارش آتی حوضه قره‌سو

طبق مدل‌های CMIP6، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۲)، ۲۴۵-۲۶۸. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.369146.669613>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.369146.669613>

مقدمه

امروزه گرمایش جهانی به‌عنوان تهدیدی جدی برای حیات بشریت مطرح است که وقوع پدیده‌ای به نام تغییر اقلیم^۱ یکی از آن‌ها است. به‌طور کلی، اگر رفتار اقلیمی فعلی در منطقه‌ای نسبت به رفتار مورد انتظار در اطلاعات ثبت شده و مشاهداتی درازمدت آن منطقه متفاوت باشد، بحث تغییر اقلیم مطرح می‌شود (Zarei et al., 2019). شواهد نشان می‌دهد که میانگین دمای زمین به‌ویژه در سال‌های اخیر به‌طور فزاینده‌ای در حال افزایش است (Cheng et al., 2019). فراتر از آن، شدت بارش در طول زمان به‌طور قابل توجهی تغییر کرده است. انتظار می‌رود تغییرات دما و بارندگی باعث ایجاد یک‌سری تغییرات شدید آب و هوایی شود (Duan et al., 2021). چالش گرمایش جهانی و تغییر اقلیم به اندازه‌ای مهم است که اگر انتشار گازهای گلخانه‌ای متوقف گردد، افزایش دما و تأثیر آن بر روی چرخه هیدرولوژی (مانند موجودیت آب، کمبود آب، طغیان رودخانه‌ها و...) برای چندین سال ادامه خواهد داشت (Gudmundsson et al., 2021). مدل‌های گردش عمومی نمایش جامع و فزاینده‌ای از سامانه اقلیم ارائه می‌کنند و به‌عنوان ابزار اصلی برای درک و پیش‌بینی تغییر اقلیم استفاده می‌شوند (زرین و همکاران، ۱۴۰۰).

در سال‌های اخیر، گروه بین‌المللی از پژوهش‌گران اقلیم‌شناسی و اقتصاددانان، طیف وسیعی از مسیرهای جدید انتشار را مورد بررسی قرار دادند که چگونگی تغییر اقلیم و جامعه جهانی را از لحاظ جمعیت، اقتصاد و انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول قرن آینده بیان می‌کند. جدیدترین مسیر به‌عنوان مسیرهای مشترک اقتصادی-اجتماعی^۲ شناخته می‌شود و در پنج دسته SSP1 تا SSP5 قرار گرفته است. نحوه نمایش این سناریوها به‌صورت SSPx-y می‌باشد که x نشان‌دهنده دسته SSP و y نمایانگر واداشت تابشی بر حسب وات بر مترمربع (w/m^2) در سال ۲۱۰۰ است (Gupta et al., 2020). هدف اصلی مدل‌های جفت‌شده فاز ششم^۳ پاسخ به سه سوال مهم چگونگی واکنش ساختار زمین به سه بخش عدم قطعیت ناشی از سناریو، پاسخ مدل و وردایی طبیعی است. تعداد لایه‌های عمودی در تمام مدل‌های CMIP6 نسبت به مدل‌های CMIP5 بهبود یافته که یکی از این مزایای افزایش، شبیه‌سازی دقیق‌تر در استراتوسفر است و همچنین تعداد سناریوهای آینده بررسی شده گسترش قابل توجهی یافته است. سناریوهای جدید اضافه شده در CMIP6 شامل: SSP1-1.9، SSP4-3.4، SSP3-7.0 بوده که چهار سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP4-6.0 و SSP5-8.5 نیز به روز شده سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 موجود در CMIP5 است (روشنی و حمیدی، ۱۴۰۰؛ Gupta et al., 2020; Su et al., 2021). به‌طور کلی می‌توان گفت مدل‌های CMIP6 نسبت به نسل‌های قبلی مدل‌ها عدم قطعیت کمتری در مقیاس جهانی دارند (Carvalho et al., 2022).

هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم^۴ (IPCC) در ششمین گزارش ارزیابی خود افزایش میانگین دمای جهانی برای سناریوی SSP2-4.5 را $۲/۱-۳/۵$ درجه سلسیوس و برای سناریوی SSP5-8.5 را حدود $۳/۳-۵/۷$ سلسیوس اعلام کرده است (IPCC., 2021). سناریوهای بدبینانه انتشار، منجر به برآورد تغییرات قابل ملاحظه‌تری در مقدار متغیرهای دما و بارش در آینده می‌شود که این مسئله در مطالعات پیشین نیز دیده شده است (Newton et al., 2021; Almazroui et al., 2021). در صورتی که این پیش‌بینی‌ها درست باشد، افزایش دمای هوا حتی با عدم کاهش یا افزایش معنی‌دار بارش می‌تواند با افزایش تقاضای آب (تقاضای برداشت بیشتر منابع سطحی و زیرزمینی)، کاهش کیفیت آب (افزایش غلظت نمک، افزایش دمای آب، کاهش اکسیژن محلول در آب و...)، افزایش تبخیر و ترقق و کاهش رطوبت خاک همراه باشد و کشاورزی اعم از آبی و حتی دیم را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین مدیران باید درکی از وضعیت فعلی و تغییرات احتمالی آینده داشته باشند تا گرفتن بهترین تصمیم امکان‌پذیر باشد (میان‌آبادی و همکاران، ۱۴۰۲). با توجه به این امر که جهان در حال حرکت به سمت تکنولوژی‌های سازگاری با محیط‌زیست از جمله قوانین بین‌المللی مبنی بر رعایت اصول زیست‌محیطی در راستای کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌باشد، می‌توان گفت در نظر گرفتن سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 برای مبنای تصمیم‌گیری مقابله و سازگاری با شرایطی که ممکن است در آینده رخ دهد تا حد زیادی غیر منطقی است. همچنین انتخاب سناریوی SSP1-2.6 که سناریوی خوشبینانه معرفی شده است به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری در برابر کشورهای توسعه نیافته و یا در حال توسعه که در ابتدای راه تغییر و تحول سازگاری با محیط‌زیست قرار گرفته‌اند بسیار ساده‌انگاری است. بنابراین به نظر می‌رسد سناریوی حد واسط SSP2-4.5 به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری مناسبی به‌منظور برنامه‌ریزی برای پیشنهاد راهکار مقابله و سازگاری با شرایطی که در آینده رخ خواهد داد انتخاب شود (نیرومند و همکاران، ۱۴۰۱).

1 Climate Change

2 Shared Socio-economic Pathways (SSP)

3 Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)

4 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

مدل‌های اقلیمی برای شبیه‌سازی دارای توانمندی بالایی هستند اما همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه هستند که از عمده‌ترین دلایل آن می‌توان به ساده‌سازی‌های صورت گرفته در شرایط اولیه مدل‌ها و پارامترهای مدل که ناشی از عدم شناخت کامل برخی از فرآیندها در سامانه اقلیمی است، اشاره کرد. بر همین مبنا به منظور کاهش خطا و عدم قطعیت پیش‌بینی‌های بالا در مدل‌های تک‌ی، هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم استفاده از مجموعه‌ای از مدل‌ها که اجرای گروهی^۱ نام دارد را توصیه کرده است (Bağçaci et al., 2021). مساح بوانی و همکاران، همکاران، (۱۴۰۰). نکته جالبی که در مورد ترکیب مدل‌ها با توانایی‌های مختلف وجود دارد این است که حتی اضافه کردن یک مدل ضعیف به یک مدل منفرد نیز شبیه‌سازی بهتری برای تغییر اقلیم انجام می‌دهد. تعداد مدل‌ها در اجرای گروهی معمولاً از سه تا ده مدل است (Cavazos and Arriaga-Ramírez., 2012). روش‌های مختلفی برای اجرای فرآیند گروهی وجود دارد که عمده‌ترین آن‌ها شامل میانگین حسابی، میانگین وزنی و رگرسیون چندگانه است (زارع ایبانه و همکاران، ۱۳۹۳).

با توجه به اهمیت بروز پدیده تغییر اقلیم، بررسی تغییر پارامترهای اقلیمی و روند آن‌ها برای آگاهی از شرایط آینده و اتخاذ تصمیمات مدیریتی دارای اهمیت می‌باشد و مطالعات مختلفی در این زمینه انجام شده است. Siabi et al. (۲۰۲۳) به بررسی تغییر اقلیم طبق سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 با استفاده از اجرای گروهی شش مدل IPSL-CM6A، CanESM5، BCC-CSM2-MR، MRI-ESM2-0 و MPI-ESM1-2-LR، MPI-ESM1-2-HR، CMHyd^۲ برای دوره (۲۰۱۵-۲۰۵۹) در منطقه آکرا پرداختند. نتایج ایشان نشان داد در این منطقه دمای حداکثر و دمای حداقل افزایش و بارش کاهش خواهد داشت. بنابراین احتمال افزایش دما در آینده نزدیک به‌ویژه در شب وجود دارد. Kofi Mensah و همکاران (۲۰۲۳) به ارزیابی سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در حوضه ولتای سفید به اجرای گروهی ۷ مدل از مدل‌های گزارش ششم شامل ACCESS-ESM1-5، BCC-CSM2-MR، CanESM5، JNM-CM4-8، IPSL-CM6A-LR، MRI-ESM2-0 و MPI-ESM1-2-LR با مقیاس‌کاهی توسط نرم‌افزار CMHyd برای سه دوره آماری آینده (۲۰۱۰-۲۰۳۹)، (۲۰۴۰-۲۰۶۹) و (۲۰۷۰-۲۱۰۰) پرداختند. نتایج ایشان نشان داد سطح بارش در مقایسه با دوره پایه در تمام دوره‌های آتی برای سناریوی SSP2-4.5 کاهش و سناریوی SSP5-8.5 افزایش می‌یابد. دمای ماکزیمم دوره پایه در مقایسه با سناریوی SSP5-8.5 دوره‌های آتی به میزان قابل توجهی بالا خواهد بود و تغییرات میانگین ماهانه حداکثر دما از ۲/۴۳-۰/۶۳ درجه سلسیوس است. رشیدی قانع و همکاران (۱۴۰۲) با انتخاب سه مدل MRI-ESM2-0، ACCESS-CM2 و MIROC6 از مجموعه مدل‌های فاز ششم به مقیاس‌کاهی برونداد دما و بارش با سه روش نسبت‌گیری خطی، نگاشت توزیع و تغییر دلتا توسط نرم‌افزار CMHyd در حوضه آبریز کشف‌رود پرداختند. نتایج ایشان نشان داد هر سه مدل در شبیه‌سازی دمای کمینه و بیشینه روزانه و ماهانه توانایی بالایی دارند در صورتی که برای متغیر بارش به دلیل تغییرات مکانی و زمانی بسیار زیاد آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک توانایی بالایی در شبیه‌سازی این متغیر ندارند. میان‌آبادی و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی تغییرات توزیع بارش و دما در ایستگاه سینوپتیک کرمان بر مبنای سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در دوره آینده (۲۰۵۱-۲۱۰۰) پرداختند. از بین مدل‌های مورد بررسی بعد از اصلاح آریبی توسط نرم‌افزار CMHyd، مدل ACCESS-CM2 برای تخمین دما و مدل MRI-ESM2-0 برای تخمین بارش از دقت بالاتری برخوردار بودند. نتایج بررسی روند تغییرات بارش نشان‌دهنده عدم معنی‌داری روند تغییرات و عدم معنی‌داری تغییر میانگین بارش بود. بنابراین احتمال افزایش وقوع بارش‌های حدی از نظر آماری قابل انتظار نیست اما روند تغییرات و میانگین دما از نظر آماری معنی‌دار بوده و احتمال وقوع تنش‌های گرمایی در آینده افزایش خواهد یافت. نیرومندفرد و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی چشم‌انداز اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای حداکثر دما، حداقل دما و بارش ایستگاه بیرجند با مقیاس‌کاهی داده‌ها توسط نرم‌افزار CMHyd و معرفی مدل MIROC-ES2L به‌عنوان مناسب‌ترین مدل تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره آینده (۲۰۲۲-۲۰۵۰) پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد تغییرات دمای حداکثر و حداقل در دوره آینده نسبت به داده‌های مشاهداتی دارای روند افزایشی و پارامتر بارش دارای روند سینوسی است و در برخی ماه‌ها افزایشی و در برخی کاهش‌ی است.

با توجه به پیشینه پژوهش و مطالعات انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر دما و بارش به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر مدیریت منابع آب، دارای تغییرات محسوس در آینده خواهند بود به گونه‌ای که به نظر می‌رسد در بسیاری از مناطق افزایش معنی‌دار دما و توزیع نامتوازن بارش رخ داده باشد. از این‌رو هدف از این پژوهش بررسی اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای حداکثر دما، حداقل دما و بارش و روند تغییرات این پارامترها در سطح حوضه قره‌سو استان گلستان با استفاده از دو سناریوی حدواسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-

1 Multi Model Ensemble (MME)

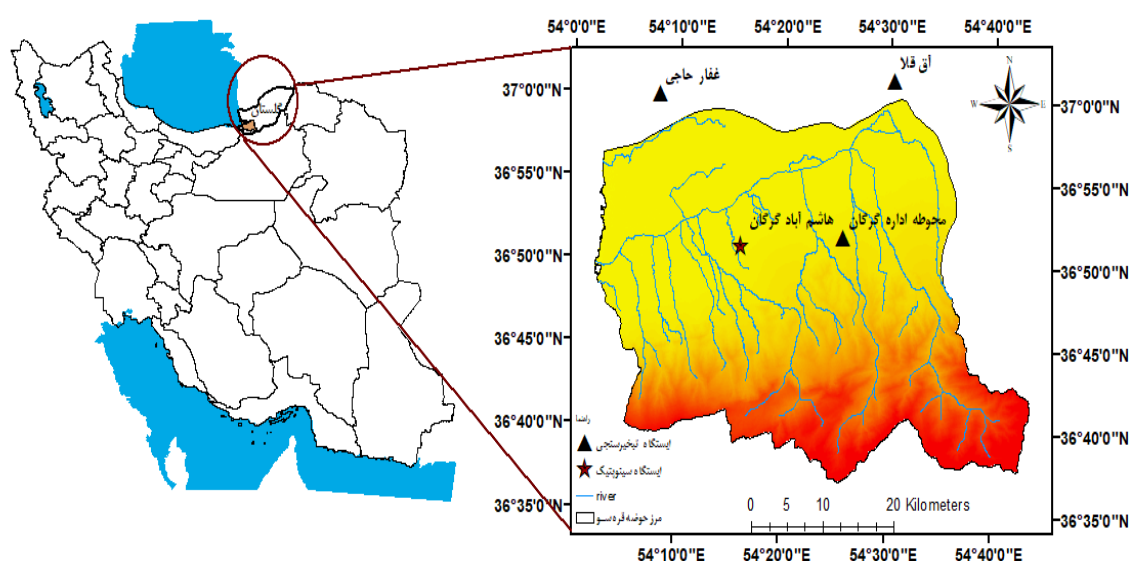
2 Climate Model data for Hydrologic modeling (CMHyd)

8.5) گزارش ششم با مقیاس گاهی توسط نرم‌افزار CMHyd در سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، میانه (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) است.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

حوضه قره‌سو یکی از حوضه‌های آبریز اصلی در استان گلستان است که حدود ۸ درصد مساحت این استان را در بر می‌گیرد. ارتفاع متوسط حوضه از سطح آب‌های آزاد ۶۲۴ متر، حداکثر ارتفاع حوضه حدود ۳۳۰۰ متر در ارتفاعات البرز و حداقل آن ۲۸- متر در خروجی حوضه (خلیج گرگان) است. در این مطالعه از یک ایستگاه سینوپتیک و سه ایستگاه تبخیرسنجی استفاده شد که موقعیت جغرافیایی حوضه و ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و ایستگاه‌های محدوده مطالعاتی در حوضه آبریز قره‌سو

داده‌های مورد استفاده مدل اقلیمی

برای انجام این پژوهش، داده‌های روزانه حداکثر دما، حداقل دما و بارش از سازمان هواشناسی کشور و شرکت آب منطقه‌ای گلستان دریافت شد. موقعیت جغرافیایی و وضعیت آب و هوایی ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره پایه در جدول ۱ ارائه شده‌اند. داده‌های بزرگ مقیاس مدل‌های به‌کار گرفته شده در مجموعه CMIP6 با توان تفکیک مکانی مورد نظر برای دوره تاریخی و دوره آتی منتخب استخراج گردید. پایگاه‌های اینترنتی مختلفی در زمینه ارائه اطلاعات اقلیمی مربوط به پروژه‌های CMIP از جمله تارنمای (ESGF) و (copernicus) وجود دارند. در پایگاه ESGF داده‌ها در مقیاس جهانی داده می‌شود، حجم داده‌ها بسیار زیاد و به‌صورت منسجم و یکپارچه نیست اما در پایگاه کوپرنیکس داده‌ها را می‌توان به‌صورت محدوده ایران تعریف کرد که دسترسی به حجم کمتری از داده‌ها و به‌صورت یکپارچه و منسجم امکان‌پذیر است. استخراج داده باید براساس غربالگری مدل‌های مشترک برای هر سه متغیر مورد نیاز (بارش، حداکثر و حداقل دما) با در دسترس بودن دوره‌های تاریخی و سناریوهای مدنظر انجام شود. در این تحقیق از دو سناریوی حدواسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) گزارش ششم استفاده شد. سناریوی SSP2-4.5 دنیایی با توسعه اقتصادی-اجتماعی در شرایط معمول را با آسیب‌پذیری و سطح واداشت تابشی متوسط در نظر می‌گیرد و سناریوی SSP5-8.5 نیز حد بالای واداشت تابشی را ارائه می‌دهد که در آن پیشرفت با استفاده از سوخت فسیلی و الگوی مصرف بالای انرژی همراه است (Estoque et al., 2020). لیست مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش و مشخصات آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های محدوده مطالعاتی در حوضه آبریز قره‌سو

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	میانگین پارامترها در دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۴
				دمای حداکثر (C°) دمای حداقل (C°) بارش (mm)
هاشم‌آباد	۵۴/۲۷	۳۶/۸۵	۱۳/۳	۲۳/۱۴ ۱۲/۸۸ ۵۲۶
آق‌قلا	۵۴/۵۱	۳۷/۰۲	-۱۱	۲۷/۳۳ ۱۰/۹۶ ۴۱۵
غفارحاجی	۵۴/۱۳	۳۷/۰۰	-۲۲	۲۲/۹۳ ۱۱/۶۱ ۴۵۴
محوطه اداره گرگان	۵۴/۴۳	۳۶/۸۶	۷۵	۲۳/۴۷ ۱۲/۹۷ ۶۰۳

جدول ۲. لیست مدل‌های CMIP6 مورد استفاده در این پژوهش

نام مدل	رزولوشن افقی	مؤسسه ارائه دهنده
ACCESS-CM2	192×144 250 km	CSIRO-ARCCSS; Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science, Australia
MIROC6	256×128 250 km	MIROC; MIROC Consortium (JAMSTEC, AORI, NIES, R-CCS), Japan
MRI-ESM2-0	320×160 100 km	MRI; Meteorological Research Institute, Japan
MIROC-ES2L	128×64 250 km	Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC), Japan
MPI-ESM1-2-LR	192×96 250 km	MPI-M, AWI; Max Planck Institute for Meteorology, Alfred Wegener Institute, Germany

آزمون همگنی

برای بررسی همگنی داده‌های مورد استفاده، از آزمون‌های ارائه شده در بسته trend در محیط RStudio استفاده شد. آزمون‌های نرمال استاندارد شده (SNH)^۱، دامنه بیشاند (BHR)^۲، پتیت (PET)^۳، نسبت ون-نیومن^۴ (VON) به صورت ترکیبی استفاده شدند. فرض صفر در همه چهار آزمون همگنی ذکر شده بر این اساس است که داده‌های هر متغیر مورد بررسی، مستقل و دارای توزیع یکسانی هستند. Wijngaard et al (۲۰۰۳) با به‌کارگیری چهار آزمون SNH، BHR، PET و VON در سطح اطمینان یک درصد دسته‌بندی زیر را ارائه کردند (جدول ۳). هنگامی که داده‌ها در کلاس همگن قرار گیرند با اطمینان می‌توان داده‌ها را برای محاسبات و مطالعات بعدی مورد استفاده قرار داد. داده‌ها در کلاس شک‌برانگیز ممکن است ناهمگن باشند و باید با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرند. داده‌های کلاس مشکوک را باید اصلاح نمود و یا آنکه از ادامه مطالعات بعدی حذف کرد.

جدول ۳. کلاس‌های همگنی داده‌ها (Wijngaard et al., 2003)

وضعیت همگنی	بررسی آزمون‌های همگنی برای سری داده‌ها
مناسب (Useful)	در تمام چهار آزمون مورد بررسی در سطح اطمینان یک درصد، فرض صفر را تایید کنند و یا فقط در یکی از آن‌ها به فرض یک برسند.
شک‌برانگیز (Doubtful)	از بین چهار آزمون فوق در دو مورد در سطح اطمینان یک درصد به فرض یک برسند.
مشکوک (Suspect)	در سه یا چهار آزمون مورد بررسی در سطح اطمینان یک درصد به فرض یک برسند.

مقیاس کاهی

در این پژوهش از نرم‌افزار CMhyd به علت برخورداری از هشت روش مختلف مقیاس کاهی، اجرای سریع و هزینه‌ی کم محاسباتی برای مقیاس کاهی داده‌های بارش و دمای برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 استفاده شد. در راهنمای مدل از واژه تصحیح اریبی (Bias Correction) استفاده شده است با توجه به این نکته که در این پژوهش داده‌ها تا سطح ایستگاه مقیاس کاهی می‌شوند بنابراین عملاً تصحیح اریبی همان مقیاس کاهی خواهد بود، به عبارتی تصحیح اریبی یکی از روش‌های مقیاس کاهی آماری است. شرح کامل مقیاس کاهی توسط مدل CMHyd در پژوهش بابائیان و همکاران (۱۴۰۲) آورده شده است. داده‌های ورودی این نرم‌افزار شامل سه نوع داده دیدبانی (observation)، داده دوره گذشته مدل اقلیمی (تاریخی یا Historical) و

1 Standard Normal Homogeneity
2 Buishand Range
3 Pettitt
4 Von Neumann Ratio

داده سناریوی آینده (SSP) مدل‌های اقلیمی است. فرمت داده‌ها می‌تواند به دو فرمت^۱ (ASCII) و یا^۲ (NetCDF) باشد. در صورت برش داده‌ها به فرمت NC برای محدوده ایران امکان استفاده از آن‌ها به‌عنوان ورودی وجود دارد و یا می‌توان فرمت داده‌های NC را با کدنویسی در محیط نرم‌افزار R تبدیل به فایل‌های ASCII نمود. داده‌های ورودی مورد استفاده در این پژوهش به‌صورت روزانه و به روش نسبت‌گیری خطی^۳ (LS) مقیاس‌کاهی شدند. روش Linear scaling (multiplicative) تفاوت میانگین ماهانه داده‌های دیده‌بانی و تاریخی مدل در دوره یکسان به سری داده‌های شبیه‌سازی شده آینده اعمال می‌شود و ترجیحاً برای مقیاس‌کاهی دما استفاده می‌شود. روش Linear (additive) scaling نسبت میانگین ماهانه مقادیر دیده‌بانی به تاریخی مدل در دوره یکسان به سری داده‌های شبیه‌سازی شده آینده ضرب می‌شود و ترجیحاً برای مقیاس‌کاهی بارش، فشاربخار و تابش استفاده می‌شود (Mendez et al., 2020).

معیارهای ارزیابی مدل‌های اقلیمی

پارامترهای دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش مشاهداتی و مدل‌های منتخب گزارش ششم با معیارهای ضریب همبستگی^۴ (R)، ریشه میانگین مربعات خطا^۵ (RMSE)، میانگین انحراف خطا^۶ (MBE)، میانگین خطای مطلق^۷ (MAE)، معیار نش-ساتکلیف^۸ (NSE) و کلینگ گوپتا^۹ (KGE) مورد ارزیابی قرار گرفتند که روابط آن‌ها به‌ترتیب در ادامه بیان شده است.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad \text{رابطه ۱}$$

R بین -۱ و ۱ هست، هر چقدر مقدار آن به یک (همبستگی مثبت) نزدیکتر باشد خروجی‌های شبیه‌سازی شده، شباهت بیشتری به داده‌های مشاهداتی دارند. هر چقدر نزدیک آن به -۱ (همبستگی منفی) نزدیک‌تر باشد یعنی نه تنها شباهتی بین دو خروجی وجود ندارد بلکه رفتاری کاملاً متضاد دارند. عدد صفر هم نشان می‌دهد که بین متغیرها هیچ ارتباط خطی یا یکنواختی وجود ندارد (Schober et al., 2018; Willmott., 1981).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

RMSE واحدی برابر با بُعد داده‌ها دارد که کمتر شدن آن نشان از برتری روش دارد و کمترین و ایده‌آل‌ترین مقدار آن صفر می‌باشد و هر چه مقدار آن بزرگتر باشد نشان می‌دهد که خطای مدل بیشتر است و محدودیت خاصی برای حد بالای آن تعریف نشده است (Hodson., 2022; Willmott., 1981).

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad \text{رابطه ۳}$$

مقدار ایده‌آل MBE برابر با صفر است ولی ممکن است مثبت یا منفی باشد که نشان‌دهنده بیش‌برآوردی و یا کم‌برآوردی مدل است (Willmott., 1981).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad \text{رابطه ۴}$$

مقدار MAE هم هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است (Hodson., 2022).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

دامنه تغییرات ضریب نش-ساتکلیف از منفی بی‌نهایت الی یک متغیر است. اگر مقدار آن برابر یک باشد تناسب کاملی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی وجود دارد و اگر مقدار آن بزرگتر از ۰/۷۵ باشد نتایج شبیه‌سازی خوب توصیف می‌شود و چنانچه مقدار این ضریب بین ۰/۳۶-۰/۷۵ باشد نتایج مدل خوب تا متوسط به شمار می‌رود. در واقع هر چه مقدار NSE به عدد یک نزدیک‌تر شود مدل از عملکرد

1 American Standard Code for Information Interchange (ASCII)

2 Network Common Data Form (NC)

3 Linear Scaling (LS)

4 Correlation coefficients

5 Root-Mean-Square deviation (RMSE)

6 Mean Bias Error (MBE)

7 Mean of Absolute Error (MAE)

8 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

9 Kling-Gupta Efficiency (KGE)

بهتری برخوردار است (Nash and Sutcliffe., 1970).

$$KGE = 1 - \sqrt{(R - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_p}{\mu_o} - 1\right)^2} \quad \text{رابطه ۶}$$

KGE تلفیقی از سه شاخص میانگین، ضریب همبستگی و انحراف معیار استاندارد است که هر چه به عدد ۱ نزدیکتر باشد نشان دهنده توانمندی بیشتر شبیه‌سازی است (Gupta et al., 2009).

در روابط بالا P_i و \bar{P} به ترتیب داده‌های شبیه‌سازی شده و میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده مدل، O_i و \bar{O} به ترتیب داده‌های مشاهداتی و میانگین داده‌های مشاهداتی، n تعداد داده‌ها، σ انحراف معیار، μ میانگین و R همبستگی خطی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است.

بررسی وضعیت روند پارامترهای دما و بارش

آزمون ناپارامتری من-کندال^۱ به صورت گسترده برای ارزیابی روند داده‌های سری زمانی پارامترهای آب و هواشناسی مانند بارندگی، دما، رواناب و تبخیر و تعرق استفاده می‌شود (Mann., 1945; Kendall., 1948). برای انجام آزمون من کندال باید در ابتدا مقدار S بر اساس مقایسه هر یک از داده‌ها با داده‌هایی که بعد از آن به وقوع پیوسته‌اند با توجه به رابطه ۷ مشخص گردد.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad \text{رابطه ۷}$$

در رابطه بالا n مدت سری زمانی داده‌ها، X_j و X_i مقدار داده‌ها در سری زمانی i و j است. علامت تابع به صورت رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1; & \text{if } X_j > X_i \\ 0; & \text{if } X_j = X_i \\ -1; & \text{if } X_j < X_i \end{cases} \quad \text{رابطه ۸}$$

مقدار Z استاندارد به صورت رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}; & \text{if } S > 0 \\ 0 & ; \text{if } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}; & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه ۹}$$

در رابطه ۹ مقدار انحراف معیار به صورت رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^P t_i(t_i-1)(2t_i+5) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در رابطه ۱۰، t_i تعداد مقادیر مشابه برای مقدار P ام و P تعداد مقادیر مشابه در سری را نشان می‌دهند. برای تعیین روند در سطح معنی‌داری α ، اگر مقدار مطلق Z از مقدار $Z_{1-\alpha/2}$ که از جدول‌های توزیع تجمعی نرمال استاندارد استخراج می‌شود بزرگتر باشد فرض صفر مبنی بر نداشتن روند رد می‌شود. در این پژوهش $\alpha = 0.05$ در نظر گرفته شده است. مقدار مثبت Z روند صعودی و مقادیر منفی Z روند نزولی سری داده‌ها را نشان می‌دهد.

روش ناپارامتریک شیب سن^۲ برای برآورد شیب واقعی روند در سری زمانی کاربرد دارد و مانند بسیاری دیگر از روش‌های ناپارامتریک تفاوت بین مشاهدات سری زمانی را ارزیابی می‌کند. ابتدا باید شیب هر جفت داده‌ی متوالی سری را از رابطه زیر به دست آورد:

$$Q_i = \frac{(X_j - X_i)}{j - i} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه ۱۱}$$

در این رابطه X_j و X_i به ترتیب مقادیر داده‌ها در زمان‌های j و i است که با هم یک واحد زمانی اختلاف دارند. Q_i مقدار میانه‌ی n برآورد شده شیب نمودار سن است. اگر n فرد باشد، برآورد کننده شیب سن بر اساس معادله ۱۲ محاسبه خواهد شد:

1 Mann-Kendall (MK)

2 Sen's Slope

$$Q_{med} = Q_{(n+2)/2} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

و اگر n زوج باشد، برآورد کننده شیب سن بر اساس معادله ۱۳ به دست می آید:

$$Q_{med} = (Q_{(n)/2} + Q_{(n+2)/2})/2 \quad \text{رابطه ۱۳}$$

در این پژوهش محاسبات مربوط به این دو روش با استفاده از برنامه XLSTAT انجام شده است.

پلی گون های تیسن^۱

از آنجایی که که آمارهای موجود به صورت ایستگاهی می باشند لازم است تا برای بررسی جامع یک حوضه یا منطقه، این آمار به تمامی مساحت آن محدوده تعمیم داده شود. با توجه به این نکته که محدوده تحت تأثیر هر ایستگاه هواشناسی، دارای رفتار آب و هوایی مانند آن ایستگاه است. بنابراین روند موجود در آمار ایستگاه مورد نظر قابل تعمیم به محدوده تحت تأثیر آن ایستگاه می باشد (مدرسی و همکاران، ۱۳۸۸). روش پلی گون تیسن به عنوان یکی از روش های درون یابی محسوب می گردد که در آن، ارزش یک نقطه را به کلیه نقاطی که در مساحت منطقه ای آن نقطه قرار می گیرند نسبت می دهند و طبق رابطه ۱۴ به دست می آید:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

که در این رابطه \bar{P} میانگین وزنی، A مساحت هر پلی گون و n تعداد پلی گون ها است (Thiessen., 1911). در نتیجه با به کارگیری روش چندضلعی های تیسن، محدوده تحت تأثیر هر ایستگاه تعیین و نواحی مختلف حوضه از لحاظ وقوع پدیده تغییر اقلیم مورد ارزیابی قرار می گیرد.

یافته های پژوهش

نتایج آزمون های همگنی

بر پایه نتایج به دست آمده آزمون های همگنی (جدول ۴) از بررسی همگنی داده های بارش تمامی ایستگاه ها در کلاس مناسب (useful)، داده های دمای حداکثر تمامی ایستگاه ها جز ایستگاه آق قلا در کلاس مناسب (useful) ولی همگنی داده های دمای حداقل تمامی ایستگاه ها جز ایستگاه غفارحاجی (که همگنی مناسب داشت) در کلاس مشکوک (suspect) قرار گرفتند.

جدول ۴. نتایج بررسی همگنی داده های دما و بارش (دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۹۰)

پارامتر	ایستگاه	آزمون نرمال استاندارد شده (SNH)	پتیت (PET)	نسبت ون-نیومن (VON)	دامنه بیشاند (BHR)	کلاس همگنی
	هاشم آباد	P1	P5	NS	P5	مناسب
دمای	آق قلا	P1	P1	P1	P1	مشکوک
حداکثر	غفارحاجی	P5	P5	P5	NS	مناسب
	محوطه اداره گرگان	P5	P5	NS	P5	مناسب
	هاشم آباد	P1	P1	P1	P1	مشکوک
دمای	آق قلا	P1	P1	P1	P1	مشکوک
حداقل	غفارحاجی	P1	NS	NS	NS	مناسب
	محوطه اداره گرگان	P1	P1	P1	P1	مشکوک
	هاشم آباد	NS	NS	NS	NS	مناسب
	آق قلا	NS	NS	NS	NS	مناسب
بارش	غفارحاجی	NS	NS	NS	NS	مناسب
	محوطه اداره گرگان	NS	NS	NS	NS	مناسب

P1: نشان دهندهی معنی داری در سطح ۱ درصد، P5: نشان دهندهی معنی داری در سطح ۵ درصد و NS: عدم معنی داری

همان گونه که آورده شد به منظور انتخاب بهترین مدل، معیارهای مختلف اعتبارسنجی مورد بررسی قرار گرفتند و عملکرد مدل ها به صورت منفرد بر اساس معیارهای ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین انحراف خطا (MBE)، میانگین خطای

مطلق (MAE)، معیار نش-ساتکلیف (NSE) و کلینگ گوپتا (KGE) مورد ارزیابی قرار گرفتند. به‌عنوان نمونه رتبه هر یک از مدل‌ها در هر یک از متغیرها در مورد ایستگاه هاشم‌آباد در جدول ۵ نشان داده شده است (در مورد سایر ایستگاه‌ها به دلیل محدودیت شدید تعداد صفحات مجاز مقاله، نتایج ارائه نشده‌اند). در شبیه‌سازی دمای حداکثر تمامی ایستگاه‌ها مدل MIROC-ES2L دارای برترین عملکرد است. مدل ACCESS-CM2 برای ایستگاه هاشم‌آباد و آق‌قلا و مدل MIROC6 برای ایستگاه غفارحاجی و محوطه اداره گرگان در رتبه دوم قرار دارند. مدل MRI-ESM2-0 برای ایستگاه هاشم‌آباد، مدل MIROC6 برای ایستگاه آق‌قلا، مدل MPI-ESM1-2LR برای ایستگاه غفارحاجی و مدل ACCESS-CM2 برای ایستگاه محوطه اداره گرگان در رتبه بعدی قرار دارند. در شبیه‌سازی دمای حداقل مدل MIROC-ES2L برای سه ایستگاه هاشم‌آباد، آق‌قلا و غفارحاجی در رتبه اول و برای ایستگاه محوطه اداره گرگان در رتبه دوم قرار دارد. مدل ACCESS-CM2 برای ایستگاه هاشم‌آباد و آق‌قلا در رتبه دوم و برای ایستگاه محوطه اداره گرگان در رتبه سوم قرار دارد. مدل MIROC6 برای ایستگاه محوطه اداره گرگان در رتبه اول، برای ایستگاه غفارحاجی در رتبه دوم و برای ایستگاه هاشم‌آباد و آق‌قلا در رتبه سوم و مدل MPI-ESM1-2-LR برای ایستگاه غفارحاجی در رتبه سوم قرار دارد. در شبیه‌سازی بارش برای تمامی ایستگاه‌ها، مدل MIROC-ES2L دارای عملکرد برتر، مدل ACCESS-CM2 در رتبه دوم و مدل MIROC6 در رتبه بعدی قرار دارد.

جدول ۵. رتبه‌بندی آماره‌های سنجش خطا در مدل‌های منفرد و اجرای گروهی ۳ مدل برتر در مقایسه با داده‌های مشاهداتی ایستگاه هاشم‌آباد (دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۰)

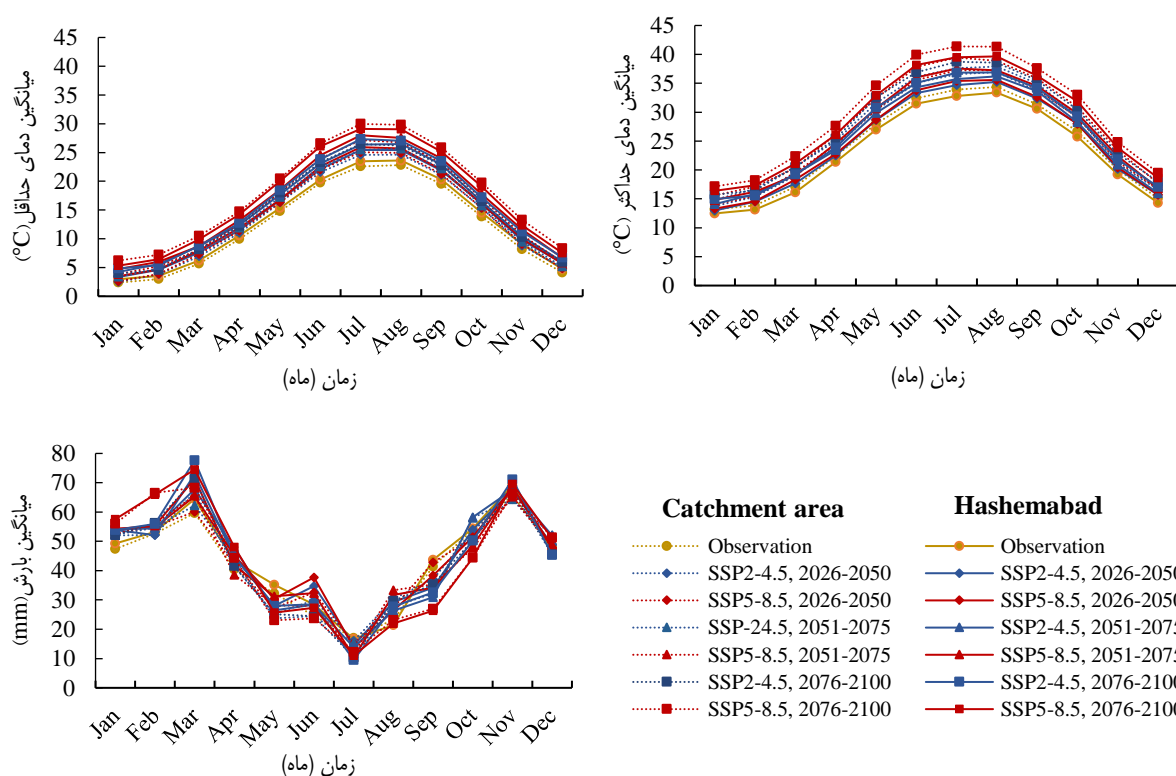
پارامتر	مدل	آماره‌های سنجش خطا					ترکیب رتبه‌بندی	
		R	RMSE	MBE	MAE	NSE		KGE
دمای حداکثر	ACCESS-CM2	۰/۹۵	۲/۵۰	۰/۰۰	۱/۹۵	۰/۹۰	۰/۹۵	۲
	MIROC6	۰/۹۲	۳/۱۹	۰/۰۰	۲/۵۳	۰/۸۴	۰/۹۲	۴
	MRI-ESM2-0	۰/۹۳	۲/۹۴	۰/۰۰	۲/۳۹	۰/۸۶	۰/۹۳	۳
	MIROC-ES2L	۰/۹۶	۲/۳۰	۰/۰۰	۱/۸۱	۰/۹۱	۰/۹۶	۱
	MPI-ESM1-2-LR	۰/۹۲	۳/۲۸	۰/۰۰	۲/۴۹	۰/۸۳	۰/۹۱	۵
دمای حداقل	ACCESS-CM2	۰/۹۷	۱/۹۶	۰/۰۰	۱/۵۵	۰/۹۳	۰/۹۷	۲
	MIROC6	۰/۹۶	۲/۰۱	۰/۰۰	۱/۶۱	۰/۹۳	۰/۹۶	۳
	MRI-ESM2-0	۰/۹۶	۲/۱۸	۰/۰۰	۱/۷۱	۰/۹۲	۰/۹۶	۴
	MIROC-ES2L	۰/۹۷	۱/۶۹	۰/۰۰	۱/۳۰	۰/۹۵	۰/۹۷	۱
	MPI-ESM1-2-LR	۰/۹۶	۲/۲۶	۰/۰۰	۱/۶۸	۰/۹۱	۰/۹۵	۵
بارش	ACCESS-CM2	۰/۲۳	۴۱/۳۶	۰/۰۰	۲۹/۳۷	-۰/۶۰	۰/۲۳	۲
	MIROC6	۰/۱۹	۳۹/۷۵	۰/۰۱	۲۹/۵۴	-۰/۴۷	۰/۱۸	۳
	MRI-ESM2-0	۰/۲۲	۴۲/۶۳	۰/۰۱	۳۰/۰۹	-۰/۷۰	۰/۲۲	۴
	MIROC-ES2L	۰/۲۹	۳۵/۸۶	-۰/۰۲	۲۶/۷۳	-۰/۲۰	۰/۲۷	۱
	MPI-ESM1-2-LR	۰/۰۷	۷۲/۵۴	۰/۰۱	۴۴/۹۵	-۳/۹۱	-۰/۴۰	۵
دمای حداکثر		۰/۹۷	۲/۰۳	۰/۰۱	۱/۶۱	۰/۹۳	۰/۹۶	
دمای حداقل	اجرای گروهی ۳ مدل برتر	۰/۹۸	۱/۴۳	۰/۰۰	۱/۱۰	۰/۹۶	۰/۹۸	
بارش		۰/۳۷	۳۲/۶۵	۱/۰۷	۲۴/۲۳	۰/۰۰۵	۰/۳۳	

نتایج انتخاب مدل‌های برتر CMIP6

نتایج تحقیقاتی از جمله اشرف و همکاران (۱۳۹۲) نشان داد در یک منطقه لزوماً یک مدل یکسان، دقیق‌ترین پیش‌بینی را برای همه پارامترهای اقلیمی ارائه نمی‌دهد و ممکن است بهترین پیش‌بینی برای پارامترهای دما و بارش آن منطقه توسط دو مدل مختلف ایجاد شود. بنابراین در ابتدا باید به انتخاب مدل بهینه به‌طور جداگانه برای هر پارامتر در هر منطقه پرداخته شده تا نتایج هر چه واقعی‌تر حاصل شود. همچنین با توجه به تعداد مدل‌های اقلیمی و در دسترس آسان به داده‌های خروجی آن‌ها پیشنهاد می‌شود تا حد امکان از چندین مدل به جای یک مدل در مطالعات تغییر اقلیم استفاده شود تا عدم قطعیت تا حد قابل قبول تری کاهش یابد. به‌طور کلی با توجه به رتبه‌بندی‌ها، سه مدل MIROC-ES2L، ACCESS-CM2 و MIROC6 به‌عنوان سه مدل برتر انتخاب و به روش میانگین حسابی برای اجرای گروهی مدل انتخاب شدند. بنابراین در ادامه معیارهای مختلف اعتبارسنجی برای اجرای گروهی مدل‌های برتر مورد بررسی

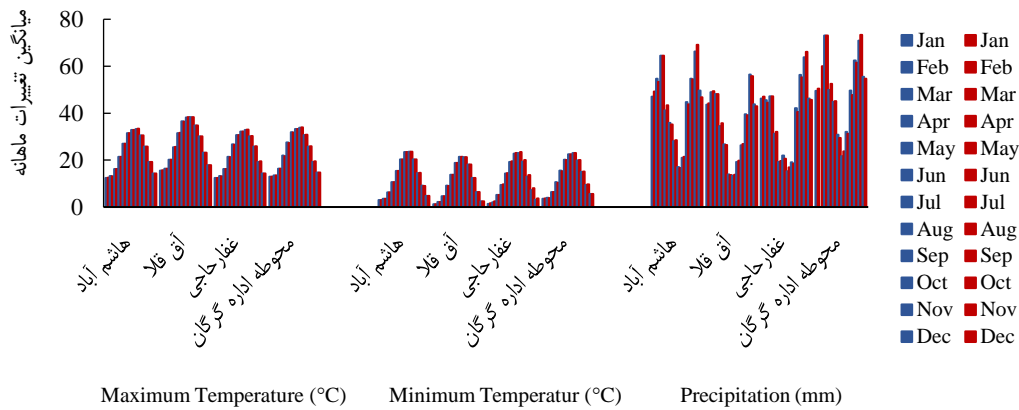
گرفت. نتایج بررسی استفاده از چندین مدل به جای اجرای منفرد مدل‌ها، کاهش عدم قطعیت در مقایسه با استفاده از یک مدل منفرد را تأیید نمود.

مقایسه میانگین ماهانه پارامترهای حداکثر دما، حداقل دما و بارش سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره‌های گذشته و آینده در دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و سه دوره آتی (آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰)) سناریوی SSP2-4.5 و سناریوی SSP5-8.5 ایستگاه هاشم‌آباد و محدوده مورد مطالعه، میانگین ماهانه متغیر دمای حداکثر و حداقل به ترتیب در ماه Aug و Jan کمترین و بیشترین مقدار است. کمترین مقدار میانگین ماهانه متغیر بارش ایستگاه هاشم‌آباد و محدوده مورد مطالعه در ماه Jul و بیشترین مقدار متغیر بارش در دوره پایه، سناریوی خیلی بدبینانه دوره نزدیک و سناریوی حدواسط دوره میانه در ماه Nov و سایر حالات در ماه Mar داده است. دامنه تغییرات میانگین ماهانه متغیر حداکثر دما، حداقل دما و بارش در دوره مشاهداتی ایستگاه هاشم‌آباد به ترتیب $12/33-48/38^{\circ}C$ ، $2/23-97/45^{\circ}C$ و $16/69-67/16$ mm برای سناریوی SSP2-4.5 در دوره آینده نزدیک $99/23-12/35^{\circ}C$ ، $12/35-36/44^{\circ}C$ و $14/72-60/87$ mm، دوره آینده میانه $14/36-09/19^{\circ}C$ ، $4/26-23/48^{\circ}C$ و $4/26-85/59$ mm و دوره آینده دور $14/36-97/87^{\circ}C$ ، $4/27-86/32^{\circ}C$ و $9/77-48/65$ mm است و برای سناریوی SSP5-8.5 در دوره آینده نزدیک $30/58-13/35^{\circ}C$ ، $3/25-50/92^{\circ}C$ و $13/68-77/26$ mm، آینده میانه $14/37-82/20^{\circ}C$ ، $4/27-73/99^{\circ}C$ و $4/27-54/32$ mm و آینده دور $16/39-40/65^{\circ}C$ ، $6/29-21/96^{\circ}C$ و $21/74-04/52$ mm است. دامنه تغییرات میانگین ماهانه متغیر حداکثر دما، حداقل دما و بارش در دوره مشاهداتی محدوده مورد مطالعه به ترتیب $13/34-21/36^{\circ}C$ ، $2/22-37/81^{\circ}C$ و $17/65-01/74$ mm برای سناریوی SSP2-4.5 در دوره آینده نزدیک $13/36-75/93^{\circ}C$ ، $2/24-48/62^{\circ}C$ و $2/24-48/62$ mm، دوره آینده میانه $14/37-85/89^{\circ}C$ ، $14/37-36/67^{\circ}C$ و $3/25$ و $15/64-26/33$ mm و دوره آینده دور $15/38-72/72^{\circ}C$ ، $3/26-98/46^{\circ}C$ و $3/26-40/23$ mm است و برای سناریوی SSP5-8.5 در دوره آینده نزدیک $14/37-06/28^{\circ}C$ ، $2/25-62/05^{\circ}C$ و $2/25-62/05$ mm، آینده میانه $15/39-58/44^{\circ}C$ ، $15/39-58/44$ mm و آینده دور $11/65-67/71$ mm و $3/27-85/14^{\circ}C$ ، $17/41-16/37^{\circ}C$ و $6/29-21/96^{\circ}C$ است (شکل ۲).



شکل ۲. مقایسه میانگین ماهانه متغیر حداکثر دما، حداقل دما و بارش دوره مشاهداتی، سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 دوره‌های آتی ایستگاه هاشم‌آباد و محدوده مورد مطالعه.

بین میانگین مقادیر متغیرهای دوره مشاهداتی و تاریخی اختلاف چندانی وجود ندارد و تقریباً در همه موارد بر هم منطبق هستند (شکل ۳). در مورد سایر ایستگاه‌ها دامنه تغییرات میانگین ماهانه حداکثر دما، حداقل دما و بارش در دوره مشاهداتی و برای هر دو سناریوی مورد بررسی و دوره‌های آتی، رفتاری کم و بیش مشابه با همین ایستگاه مشاهده می‌شود.



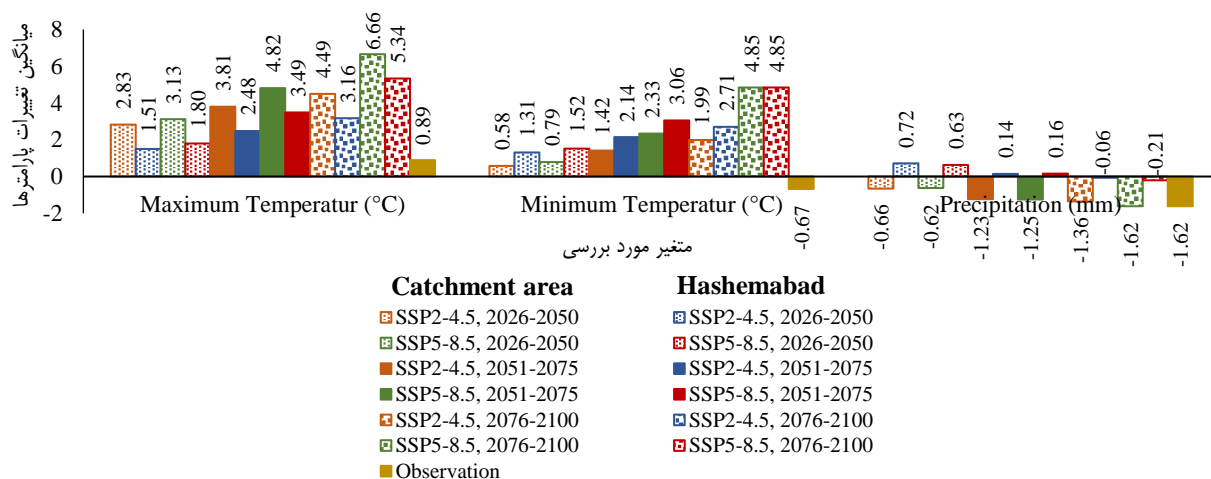
شکل ۳. مقایسه میانگین تغییرات ماهانه متغیر حداکثر دما، حداقل دما و بارش دوره پایه (مشاهداتی و تاریخی)

مقایسه تغییرات میانگین ماهانه متغیرهای دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش نسبت به دوره مشاهداتی

در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، میانگین تغییرات ماهانه متغیر دمای حداکثر سناریوی SSP2-4.5 ($1/51^{\circ}\text{C}$) است که بیشترین اختلاف ($2/20^{\circ}\text{C}$) مربوط به ماه Oct و کمترین ($0/55^{\circ}\text{C}$) مربوط به ماه Jan است. میانگین تغییرات ماهانه متغیر دمای حداکثر سناریوی SSP5-8.5 ($1/80^{\circ}\text{C}$) است که بیشترین اختلاف ($2/57^{\circ}\text{C}$) مربوط به ماه Jul و کمترین ($0/86^{\circ}\text{C}$) در ماه Jan است. بیشترین تغییرات ماهانه متغیر دمای حداقل سناریوی SSP2-4.5 و سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دوره مشاهداتی در ماه Jul به ترتیب ($1/97^{\circ}\text{C}$) و ($2/46^{\circ}\text{C}$) و کمترین در ماه Jan ($0/39^{\circ}\text{C}$) و ($0/57^{\circ}\text{C}$) است در حالی که متوسط این تغییرات ($1/31^{\circ}\text{C}$) و ($1/52^{\circ}\text{C}$) است. بیشترین میانگین تغییرات ماهانه متغیر بارش سناریوی SSP2-4.5 نسبت به دوره مشاهداتی در ماه Aug ($8/29\text{ mm}$) و سناریوی SSP5-8.5 در ماه Jun ($9/61\text{ mm}$) و کمترین تغییرات برای هر دو سناریو در ماه Sep به ترتیب ($-10/53\text{ mm}$) و ($-6/42\text{ mm}$) است. متوسط تغییرات بارش سناریوها در آینده نزدیک به ترتیب ($0/72\text{ mm}$) و ($-0/63\text{ mm}$) است. لازم به ذکر است علامت مثبت در تغییرات نشان دهنده افزایش و علامت منفی نشان دهنده کاهش نسبت به دوره مشاهداتی است (شکل ۳). در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، میانگین تغییرات ماهانه پارامتر دمای حداکثر به ترتیب در سناریوی حدواسط و خیلی بدبینانه ($2/48^{\circ}\text{C}$) و ($3/49^{\circ}\text{C}$) است. بیشترین این تغییرات در ماه Sep ($3/07^{\circ}\text{C}$) و ماه Jul ($4/75^{\circ}\text{C}$) و کمترین تغییرات در ماه Nov ($1/61^{\circ}\text{C}$) و Jan ($2/38^{\circ}\text{C}$) است. میانگین تغییرات ماهانه متغیر دمای حداقل سناریوی SSP2-4.5 و ($2/14^{\circ}\text{C}$) و ($3/06^{\circ}\text{C}$) است. بیشترین این تغییرات برای هر دو سناریو در ماه Jul ($2/40^{\circ}\text{C}$) و ($4/53^{\circ}\text{C}$) و کمترین تغییرات در ماه Jan ($1/26^{\circ}\text{C}$) و ($1/76^{\circ}\text{C}$) است. میانگین تغییرات ماهانه پارامتر بارش سناریوی حدواسط و خیلی بدبینانه به ترتیب ($0/14\text{ mm}$) و ($0/16\text{ mm}$) است. بیشترین تغییرات سناریوی حدواسط در ماه Jan ($7/16\text{ mm}$) و برای سناریوی خیلی بدبینانه در ماه Aug ($10/70\text{ mm}$) است در حالی که کمترین تغییرات برای هر دو سناریو در ماه Sep ($-13/85\text{ mm}$) و ($-10/50\text{ mm}$) است (شکل ۴). در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰)، میانگین تغییرات ماهانه متغیر دمای حداکثر سناریوی حدواسط و خیلی بدبینانه نسبت به دوره مشاهداتی به ترتیب ($3/16^{\circ}\text{C}$) و ($5/34^{\circ}\text{C}$) است. برای هر دو سناریو بیشترین تغییرات در ماه Jul ($4/04^{\circ}\text{C}$) و ($6/69^{\circ}\text{C}$) است. کمترین تغییرات برای سناریوی حدواسط در ماه Feb ($2/41^{\circ}\text{C}$) و در سناریوی خیلی بدبینانه در ماه Jan ($3/95^{\circ}\text{C}$) است. میانگین تغییرات ماهانه دمای حداقل سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در مقایسه با دوره مشاهداتی به ترتیب ($2/71^{\circ}\text{C}$) و ($4/85^{\circ}\text{C}$) است. بیشترین تغییرات برای هر دو سناریو در ماه Jul به ترتیب ($3/86^{\circ}\text{C}$) و ($1/82^{\circ}\text{C}$) و کمترین تغییرات در ماه Jan ($6/49^{\circ}\text{C}$) و ($3/24^{\circ}\text{C}$) است. میانگین تغییرات ماهانه بارش در سناریوی حدواسط و خیلی بدبینانه نسبت به دوره مشاهداتی به ترتیب ($-0/06\text{ mm}$) و ($-0/21\text{ mm}$) است. بیشترین تغییرات سناریوی حدواسط در ماه Mar ($11/57\text{ mm}$) و سناریوی خیلی بدبینانه در ماه Feb ($11/39\text{ mm}$) است در حالی که کمترین تغییرات برای هر دو سناریو در ماه Sep به ترتیب ($-12/14\text{ mm}$) و ($-18/45\text{ mm}$) است (شکل ۴).

به طور کلی می توان نتیجه گرفت در ایستگاه هاشم آباد و همچنین محدوده مورد مطالعاتی میانگین ماهانه متغیر دمای حداکثر و دمای حداقل هر دو سناریو در سه دوره آتی نسبت به مشاهداتی افزایش داشته است و این افزایش در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریوی SSP2-4.5 مشهودتر است. میانگین ماهانه متغیر بارش سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریوی SSP2-4.5 ایستگاه هاشم آباد در دو دوره آینده نزدیک و آینده دور کاهش داشته و در دوره میانه تغییر چندانی نداشته است.

میانگین ماهانه متغیر بارش در محدوده مورد مطالعاتی هر دو سناریوی دوره های آتی نسبت به دوره مشاهداتی ایستگاه هاشم آباد کاهش داشته است که این کاهش در هر دو سناریو در دو دوره آینده نزدیک و میانه تفاوت چندانی ندارد اما در آینده دور این تفاوت چشمگیرتر است. اما در بررسی میانگین تغییرات ماهانه متغیر دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش دوره تاریخی ایستگاه هاشم آباد نسبت به دوره مشاهداتی، تغییرات بسیار ناچیز است (شکل ۲). در بررسی میانگین تغییرات ماهانه متغیر دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش محدوده مورد مطالعه نسبت به دوره مشاهداتی ایستگاه هاشم آباد به ترتیب افزایش (به مقدار 0.89°C)، کاهش (0.67°C) و کاهش (به مقدار 1.62mm) نشان داد (شکل ۴). در مورد سایر ایستگاه ها این موارد تا حد زیادی مشابه می باشند که به دلیل جلوگیری از افزایش تعداد صفحات مقاله جزئیات آن ها بیان نشده است.



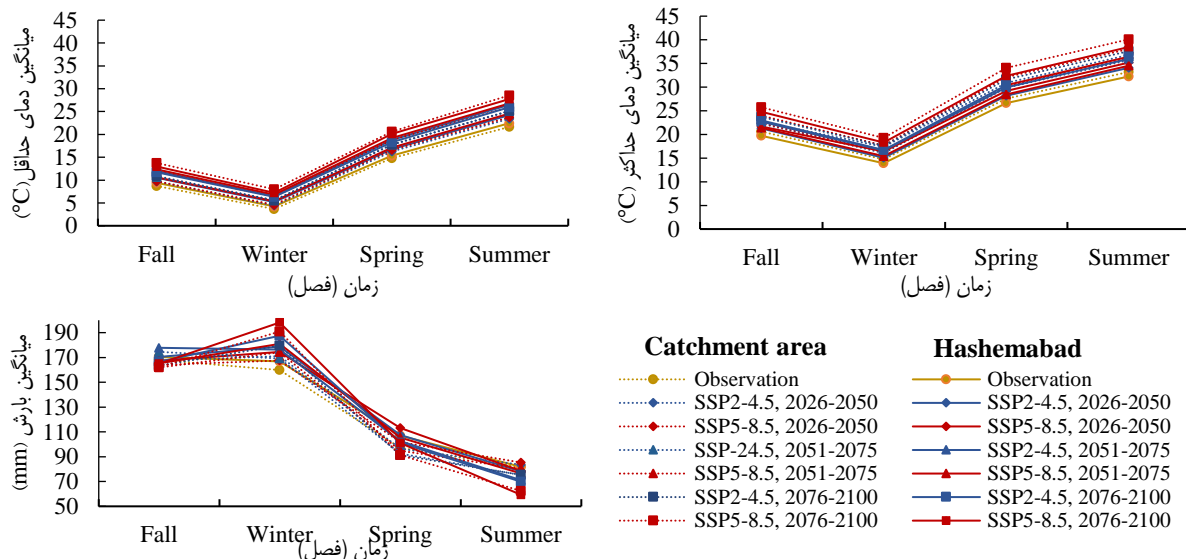
شکل ۴. مقایسه میانگین تغییرات ماهانه متغیر حداکثر دما، حداقل دما و بارش سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ایستگاه هاشم آباد در دوره های آتی و محدوده مورد مطالعه نسبت به دوره مشاهداتی ایستگاه هاشم آباد.

مقایسه میانگین فصلی متغیرهای دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش در سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره های گذشته و آینده مقادیر میانگین فصلی متغیرهای دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش در سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره های گذشته و آینده در ایستگاه های مختلف هم مورد مقایسه قرار گرفتند که فقط نتایج ایستگاه هاشم آباد و محدوده مورد مطالعه در شکل ۵ ارائه شده است و از ارائه نتایج برای سایر ایستگاه ها خودداری شده است. در دوره پایه و هر دو سناریوی دوره های آتی تمامی ایستگاه ها و محدوده مورد مطالعه، بیشترین و کمترین مقدار میانگین فصلی دمای حداکثر و دمای حداقل به ترتیب در فصل تابستان (summer) و زمستان (winter) مشاهده داده است اما در رابطه با میانگین فصلی بارش، کمترین مقدار در فصل تابستان (summer) و بیشترین مقدار در فصل زمستان (winter) و یا فصل پاییز (Fall) بوده است.

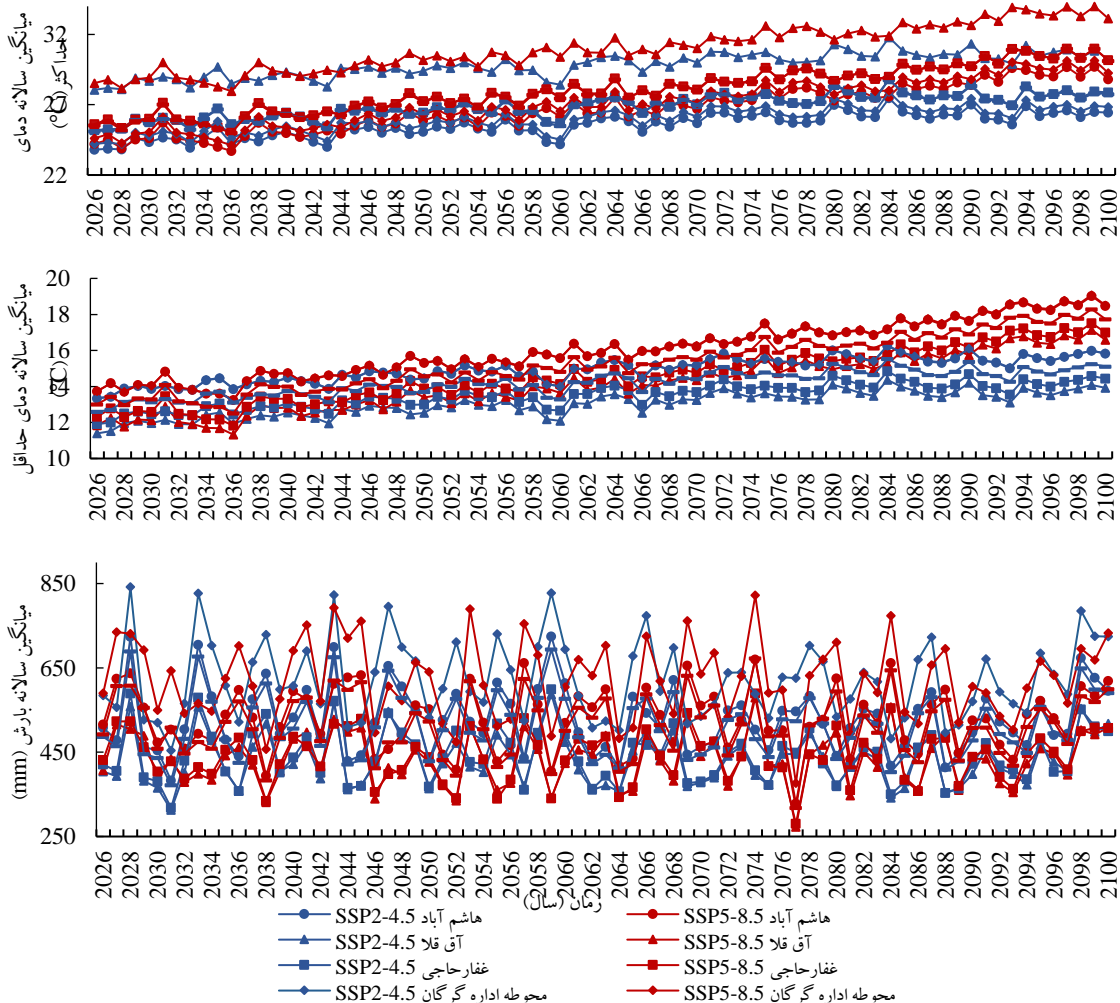
مقایسه میانگین سالانه متغیرهای دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره های گذشته و آینده سری زمانی مقادیر میانگین سالانه متغیر دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش ایستگاه ها تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره های آتی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل کاملاً مشهود است مقادیر سالانه دمای حداکثر و دمای حداقل در همه سناریو ها در طول زمان در حال افزایش هستند و این افزایش در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریوی SSP2-4.5 بیشتر است به نحوی که میانگین مقادیر سالانه دمای حداکثر در طی دوره های آتی (نزدیک، میانه و دور) سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریوی SSP2-4.5 ایستگاه هاشم آباد و محدوده مورد مطالعه به ترتیب به مقدار 0.29°C ، 1°C و 2.17°C درجه سانتی گراد و میانگین مقادیر سالانه دمای حداقل به مقدار 0.21°C ، 0.92°C و 2.14°C درجه سانتی گراد افزایش می یابد.

میانگین مقادیر بارش سالانه رفتار متفاوتی دارد و در ایستگاه هاشم آباد سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریوی SSP2-4.5 طی دوره

های آینده نزدیک و دور به ترتیب به مقدار ۱/۰۵ و ۱/۷۹ میلی‌متر کاهش و در دوره آینده میانه به مقدار ۰/۲۱ میلی‌متر افزایش و در محدوده مورد مطالعه در آینده نزدیک به مقدار ۰/۴۱ میلی‌متر افزایش و در آینده میانه و دور به ترتیب به مقدار ۰/۲۷ و ۳/۱۲ میلی‌متر کاهش نشان می‌دهد.



شکل ۵. مقایسه میانگین فصلی متغیر دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش دوره مشاهداتی، سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 دوره‌های آبی ایستگاه هاشم‌آباد و محدوده مورد مطالعه.



شکل ۶. مقایسه میانگین سالانه پارامتر دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش ایستگاه‌ها و محدوده مورد مطالعه طبق سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره‌های آبی.

بررسی وضعیت روند متغیرهای دما و بارش در دوره گذشته و دوره‌های آتی تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم

نتایج آزمون ناپارامتریک من-کندال و شیب سن متغیرهای دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش برای دوره مشاهداتی در جدول ۶ و سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) طبق دو سناریوی حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) ایستگاه‌ها و محدوده مورد مطالعه در شکل ۸-۶ نشان داده شده است.

در بررسی روند معنی‌داری میانگین ماهانه، فصلی و سالانه متغیر دمای حداکثر ایستگاه هاشم‌آباد در دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) براساس مقادیر p-value، میانگین دمای حداکثر در ماه Aug و Sep، فصل تابستان (summer) و سالانه (Annual) در سطح معناداری ۹۹ درصد و در ماه Jun و فصل زمستان (Winter) در سطح معناداری ۹۵ درصد دارای روند افزایشی است. میانگین ماهانه، فصلی و سالانه پارامتر دمای حداقل در ماه‌های May، Jun، Jul و Sep، فصل تابستان (summer) و بهار (Spring) و سالانه (Annual) در سطح معناداری ۹۹ درصد و در ماه Mar و Oct در سطح معناداری ۹۵ درصد دارای روند افزایشی است. میانگین فصلی بارش در بهار (Spring) در سطح معناداری ۹۹ درصد و میانگین ماهانه بارش فقط در ماه May در سطح معناداری ۹۵ درصد دارای روند کاهشی است. در مابقی ماه‌ها و فصول، عدم وجود روند و تایید فرض H_0 مشاهده می‌گردد (جدول ۶).

میانگین ماهانه، فصلی و سالانه دمای حداکثر دوره مشاهداتی ایستگاه آق‌قلا در تمامی ماه‌ها جز Mar، May و Jun، در هر چهار فصل و سالانه در سطح معناداری ۹۹ درصد و در سه ماه نامبرده در سطح معناداری ۹۵ درصد دارای روند کاهشی است. میانگین ماهانه، فصلی و سالانه دمای حداقل از ماه May تا Sep و ماه Mar، در همه فصول جز فصل زمستان (Winter) و سالانه در سطح معناداری ۹۹ درصد و در ماه Oct در سطح معناداری ۹۵ درصد دارای روند افزایشی است. میانگین بارش فقط در ماه May و فصل بهار (Spring) در سطح معناداری ۹۵ درصد دارای روند کاهشی است (جدول ۶).

میانگین ماهانه، فصلی و سالانه دمای حداکثر دوره مشاهداتی ایستگاه غفارحاجی در ماه Aug و Sep و فصل تابستان (summer) در سطح معناداری ۹۹ درصد و در ماه Mar و July و سالانه در سطح معناداری ۹۵ درصد دارای روند افزایشی است. میانگین ماهانه، فصلی و سالانه دمای حداقل در ماه May و Jun و فصل بهار (Spring) در سطح معناداری ۹۹ درصد و در ماه Mar، Jul و Sep، فصل تابستان (summer) و سالانه در سطح معناداری ۹۵ درصد دارای روند افزایشی است. میانگین بارش فقط در ماه May در سطح معناداری ۹۵ درصد دارای روند کاهشی است (جدول ۶).

میانگین ماهانه، فصلی و سالانه دمای حداکثر دوره مشاهداتی ایستگاه محوطه اداره گرگان در ماه Sep در سطح معناداری ۹۹ درصد و در ماه Jul و Aug، فصل زمستان (Winter)، تابستان (summer) و سالانه در سطح معناداری ۹۵ درصد دارای روند افزایشی است. داده‌های میانگین ماهانه دمای حداقل از ماه May تا Oct و ماه Mar، فصل بهار (Spring)، تابستان (summer) و سالانه در سطح معناداری ۹۹ درصد و در ماه Apr و فصل زمستان (Winter) و پاییز (Fall) در سطح معناداری ۹۵ درصد دارای روند افزایشی است. داده‌های میانگین بارش فقط در فصل بهار (Spring) در سطح معناداری ۹۵ درصد دارای روند کاهشی است (جدول ۶).

در بررسی وضعیت روند میانگین متغیر دمای حداکثر سناریوی SSP2-4.5 آینده نزدیک، هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه در ماه Aug، فصل تابستان (Summer) و سالانه، ایستگاه آق‌قلا، غفارحاجی، محوطه اداره گرگان و محدوده مورد مطالعه در ماه Dec، ایستگاه هاشم‌آباد در ماه Apr، ایستگاه غفارحاجی در ماه Jul در سطح ۹۹ درصد و هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه در فصل پاییز (Fall)، ایستگاه آق‌قلا، محوطه اداره گرگان و محدوده مورد مطالعه در ماه Jul در سطح ۹۵ درصد دارای روند معنی‌دار است. آینده میانه هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه در ماه Oct، فصل پاییز (Fall) و سالانه در سطح ۹۹ درصد، هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه در فصل بهار (Spring) و تابستان (Summer)، ایستگاه آق‌قلا، غفارحاجی و محوطه اداره گرگان در ماه Sep، ایستگاه هاشم‌آباد در ماه Nov، ایستگاه غفارحاجی در ماه Jul در سطح ۹۵ درصد دارای روند معنی‌دار است. آینده دور ایستگاه هاشم‌آباد در ماه Jan و Jul در سطح ۹۵ درصد دارای روند معنی‌دار است (شکل ۶).

در بررسی وضعیت روند میانگین متغیر دمای حداقل سناریوی SSP2-4.5 آینده نزدیک، در هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه میانگین سالانه، ایستگاه غفارحاجی و محوطه اداره گرگان در ماه May، ایستگاه آق‌قلا، غفارحاجی و محوطه اداره گرگان و محدوده مورد مطالعه در ماه Aug، فصل پاییز (Fall) و تابستان (Summer)، ایستگاه هاشم‌آباد در ماه Sep و Nov، محدوده مورد مطالعه در ماه Dec در سطح ۹۹ درصد، ایستگاه آق‌قلا، غفارحاجی، محوطه اداره گرگان و محدوده مورد مطالعه در ماه Jul و فصل بهار (Spring)، ایستگاه هاشم‌آباد در ماه Mar، Aug و Oct، آق‌قلا و محدوده مورد مطالعه در ماه May و محدوده مورد مطالعه در ماه Oct در سطح ۹۵ درصد دارای روند معنی‌دار است. آینده میانه ایستگاه آق‌قلا، غفارحاجی و محوطه اداره گرگان در ماه Sep و فصل تابستان (Summer)، ایستگاه آق‌قلا، محوطه



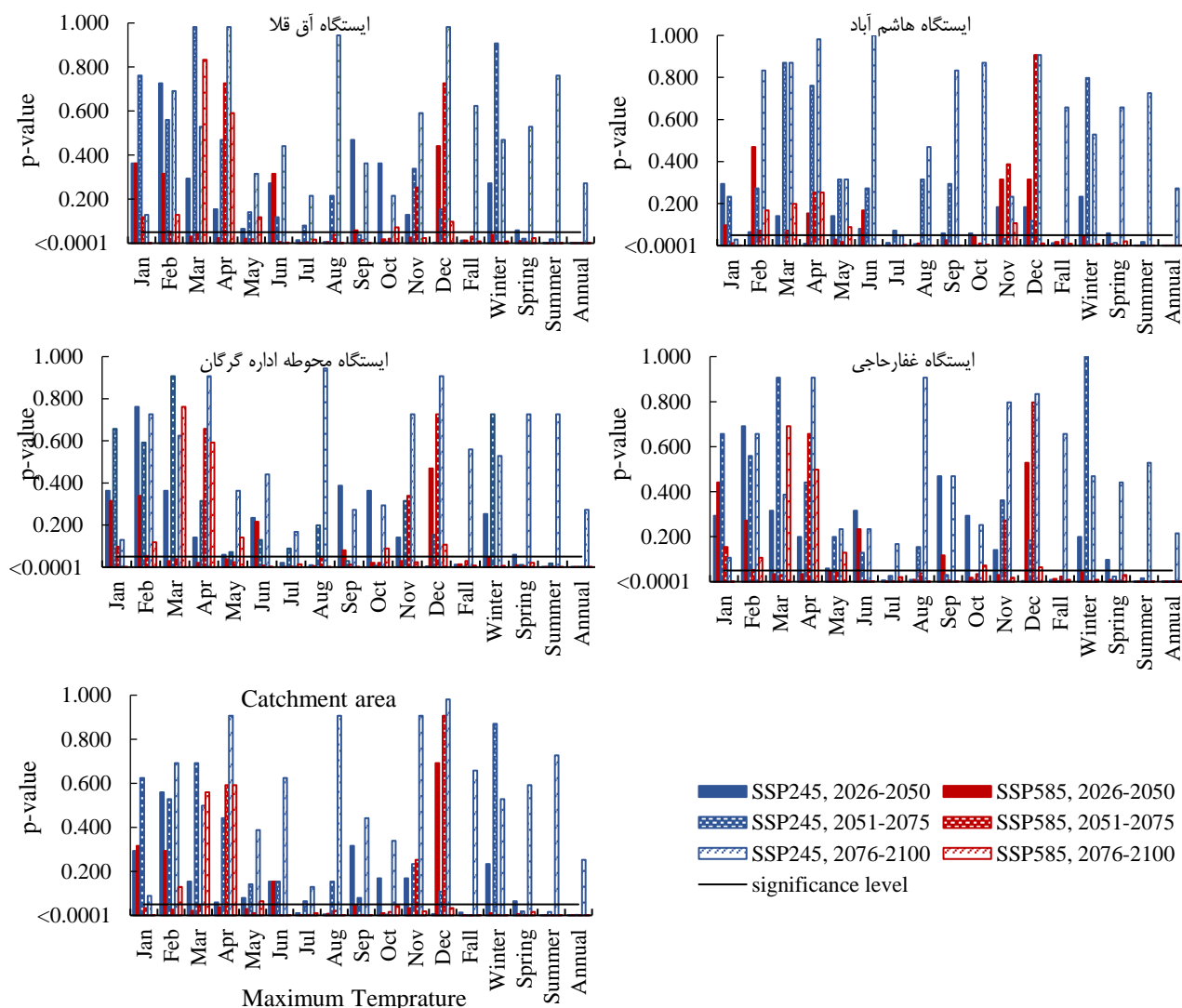
اداره گرگان و محدوده مورد مطالعه در ماه May، ایستگاه هاشم‌آباد، آق‌قلا و محدوده مورد مطالعه در فصل بهار (Spring) و ایستگاه هاشم‌آباد در ماه Nov در سطح ۹۵ درصد، هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه در ماه Oct، فصل پاییز (Fall) و سالانه، ایستگاه هاشم‌آباد و محدوده مورد مطالعه در فصل تابستان (Summer) در سطح ۹۹ درصد دارای روند معنی‌دار است. آینده دور ایستگاه آق‌قلا، غفارحاجی و محوطه اداره گرگان در ماه Jul در سطح ۹۵ درصد و ایستگاه هاشم‌آباد و محدوده مورد مطالعه در ماه Jul در سطح ۹۹ درصد دارای روند معنی‌دار است (شکل ۶).

جدول ۶. بررسی وضعیت روند متغیر حداکثر دما، حداقل دما و بارش داده‌های اقلیمی ایستگاه‌ها در دوره مشاهداتی (۲۰۱۴-۱۹۹۰)

	هاشم‌آباد						آق‌قلا					
	دمای حداکثر		دمای حداقل		بارش		دمای حداکثر		دمای حداقل		بارش	
	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q
Jan	-۰/۲۷۳	-۰/۰۹۸	-۰/۰۸۳	-۰/۰۲۵	-۰/۰۶۳	-۰/۲۵۸	***-۰/۴۷	-۰/۲۶۹	-۰/۱۹۰	-۰/۰۲۹	-۰/۰۳۷	-۰/۲۶۰
Feb	-۰/۰۰۷	-۰/۰۱۵	-۰/۱۴۷	-۰/۰۶۲	-۰/۰۸۷	-۰/۷۰۴	***-۰/۰۵	-۰/۳۱۰	-۰/۰۳۳	-۰/۰۱۰	-۰/۰۶۴	-۰/۳۳۲
Mar	-۰/۲۸۰	-۰/۱۳۲	**۰/۳۳۳	-۰/۰۸۶	-۰/۰۰۰	-۰/۰۱۲	**۰/۳۱۳	-۰/۱۷۷	***۰/۴۱۱	-۰/۱۱۳	-۰/۱۹۴	-۰/۷۸۲
Apr	-۰/۰۳۳	-۰/۰۱۱	-۰/۱۱۳	-۰/۰۲۹	-۰/۱۴۷	-۰/۶۰۴	***-۰/۰۴	-۰/۳۴۷	-۰/۲۶۴	-۰/۱۳۰	-۰/۰۹۰	-۰/۲۹۴
May	-۰/۲۴۷	-۰/۰۹۲	***۰/۴۷۱	-۰/۰۹۶	**۰/۲۸۷	-۰/۳۵۴	**۰/۳۶۷	-۰/۲۰۱	***۰/۵۴۰	-۰/۳۱۰	**۰/۳۲۹	-۱/۱۴۳
Jun	**۰/۳۴۷	-۰/۰۰۸	***۰/۴۲۷	-۰/۰۸۸	-۰/۰۷۳	-۰/۲۵۱	**۰/۳۳۳	-۰/۲۲۵	***۰/۴۷۳	-۰/۱۷۵	-۰/۱۸۶	-۰/۴۴۵
Jul	-۰/۲۶۷	-۰/۰۹۲	***۰/۳۸۷	-۰/۰۵۷	-۰/۰۸۴	-۰/۰۱۵	***-۰/۵۳۱	-۰/۳۵۲	***۰/۵۶۰	-۰/۱۸۴	-۰/۰۳۷	-۰/۰۰۰
Aug	***۰/۴۲۰	-۰/۱۵۶	-۰/۱۴۰	-۰/۰۲۴	-۰/۰۴۷	-۰/۲۰۰	***-۰/۴۲۴	-۰/۲۳۵	***۰/۴۴۴	-۰/۱۴۸	-۰/۰۹۸	-۰/۴۱۴
Sep	***۰/۴۶	-۰/۱۱۷	***۰/۴۲۷	-۰/۱۰۰	-۰/۰۲۷	-۰/۱۲۶	***-۰/۴۲	-۰/۱۵۴	***۰/۴۷۳	-۰/۲۱۰	-۰/۰۸۰	-۰/۴۰۲
Oct	-۰/۱۶۷	-۰/۰۵۲	**۰/۳۰۰	-۰/۰۹۶	-۰/۰۵۷	-۰/۵۷۲	***-۰/۴۹	-۰/۲۴۲	**۰/۳۰۰	-۰/۱۳۶	-۰/۰۸۳	-۰/۳۹۹
Nov	-۰/۰۲۷	-۰/۰۰۵	-۰/۰۷۷	-۰/۰۲۵	-۰/۰۰۷	-۰/۱۳۳	***-۰/۵۴	-۰/۳۳۵	-۰/۲۰۷	-۰/۰۷۵	-۰/۰۴۳	-۰/۲۹۰
Dec	-۰/۰۹۳	-۰/۰۱۸	-۰/۱۱۳	-۰/۰۱۵	-۰/۰۵۳	-۰/۲۱۲	***-۰/۴۵	-۰/۳۳۷	-۰/۱۶۰	-۰/۰۲۸	-۰/۰۳۷	-۰/۰۷۳
Fall	-۰/۱۳۳	-۰/۱۰۶	-۰/۲۵۳	-۰/۲۰۱	-۰/۰۵۳	-۰/۷۱۷	***-۰/۶۱	-۰/۸۶۵	***۰/۳۷۳	-۰/۲۵۹	-۰/۰۴۳	-۰/۱۷۶
Winter	**۰/۲۹۳	-۰/۲۵۳	-۰/۲۲۷	-۰/۱۴۲	-۰/۱۲۷	-۰/۷۴۵	***-۰/۴۹	-۰/۶۹۱	-۰/۰۶۷	-۰/۰۳۹	-۰/۰۴۰	-۰/۳۳۹
Spring	-۰/۲۲۰	-۰/۱۹۷	***۰/۴۶	-۰/۲۰۵	**۰/۰۳۹	-۰/۲۲۹	***-۰/۴۳	-۰/۷۷۴	***۰/۴۸۷	-۰/۵۷۰	**۰/۰۳۵۳	-۲/۳۰۸
Summer	***۰/۵۱۳	-۰/۳۱۷	***۰/۴۴۰	-۰/۱۶۰	-۰/۰۶۰	-۰/۴۲۹	***-۰/۵۱۰	-۰/۷۲۰	***۰/۵۶۰	-۰/۴۴۲	-۰/۲۱۷	-۲/۰۷۹
Annual	***۰/۴۲	-۰/۶۶۲	***۰/۴۵	-۰/۵۸۳	-۰/۰۴۷	-۰/۴۸۵	***-۰/۶۱۰	-۳/۰۴۲	***۰/۵۲۷	-۱/۰۵۷	-۰/۰۰۷	-۰/۲۶۵
	غفارحاجی						محوطه اداره گرگان					
	دمای حداکثر		دمای حداقل		بارش		دمای حداکثر		دمای حداقل		بارش	
	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q
Jan	-۰/۲۱۳	-۰/۰۷۰	-۰/۰۴۰	-۰/۰۰۹	-۰/۰۶۷	-۰/۶۰۱	-۰/۲۶۰	-۰/۱۱۶	-۰/۱۸۷	-۰/۰۷۴	-۰/۱۶۷	-۰/۷۲۳
Feb	-۰/۰۲۷	-۰/۰۱۲	-۰/۱۵۳	-۰/۰۵۸	-۰/۱۲۳	-۰/۷۹۰	-۰/۰۹۳	-۰/۰۲۳	-۰/۱۶۷	-۰/۰۸۶	-۰/۱۴۷	-۱/۱۱۶
Mar	**۰/۲۹۳	-۰/۱۱۲	**۰/۳۱۳	-۰/۰۶۶	-۰/۱۵۰	-۰/۷۴۵	-۰/۲۶۰	-۰/۱۶۶	***۰/۴۷۳	-۰/۱۳۲	-۰/۰۸۰	-۰/۲۵۹
Apr	-۰/۰۶۰	-۰/۰۱۱	-۰/۱۶۰	-۰/۰۲۵	-۰/۰۷۰	-۰/۲۶۹	-۰/۰۲۰	-۰/۰۱۰	**۰/۲۹	-۰/۰۸۷	-۰/۰۸۷	-۰/۳۰۴
May	-۰/۲۸۰	-۰/۰۹۲	***۰/۴۳۳	-۰/۰۹۶	***-۰/۳۴۰	-۰/۹۶۷	-۰/۲۴۰	-۰/۰۸۳	***۰/۵۳۱	-۰/۲۳۶	-۰/۲۲۰	-۱/۴۸۲
Jun	-۰/۲۴۷	-۰/۰۶۹	***۰/۴۲۰	-۰/۰۸۴	-۰/۰۷۷	-۰/۲۷۳	-۰/۱۲۷	-۰/۰۴۳	***۰/۴۴۰	-۰/۱۶۳	-۰/۱۴۰	-۰/۶۶۵
Jul	**۰/۳۲۰	-۰/۰۷۹	**۰/۳۵۳	-۰/۰۷۴	-۰/۰۳۴	-۰/۰۱۸	**۰/۲۸۷	-۰/۱۰۵	***۰/۵۲۰	-۰/۱۵۱	-۰/۰۶۷	-۰/۰۸۵
Aug	***۰/۲۸۴	-۰/۱۳۷	-۰/۰۸۷	-۰/۰۲۱	-۰/۰۵۱	-۰/۰۱۰	**۰/۳۰۷	-۰/۱۴۱	***۰/۴۵۳	-۰/۱۵۹	-۰/۰۶۷	-۰/۱۹۶
Sep	***۰/۳۸۰	-۰/۰۸۵	**۰/۳۴۷	-۰/۰۹۰	-۰/۱۳۴	-۰/۶۱۵	***-۰/۴۰۷	-۰/۱۱۴	***۰/۴۴۷	-۰/۱۴۲	-۰/۰۶۷	-۰/۶۲۳
Oct	-۰/۱۶۴	-۰/۰۲۸	-۰/۲۲۷	-۰/۰۷۶	-۰/۱۲۷	-۰/۸۸۲	-۰/۰۰۷	-۰/۰۳۵	***۰/۴۰۷	-۰/۱۴۰	-۰/۰۶۰	-۰/۵۲۸
Nov	-۰/۰۲۰	-۰/۰۱۴	-۰/۰۶۷	-۰/۰۱۹	-۰/۰۸۷	-۰/۷۸۸	-۰/۰۱۰	-۰/۰۰۴	-۰/۲۱۳	-۰/۰۶۰	-۰/۱۲۷	-۱/۰۰۴
Dec	-۰/۰۰۰	-۰/۰۰۳	-۰/۰۳۳	-۰/۰۰۹	-۰/۰۸۷	-۰/۳۹۷	-۰/۰۳۳	-۰/۰۰۸	-۰/۱۲۷	-۰/۰۳۰	-۰/۱۷۳	-۰/۷۴۱
Fall	-۰/۰۶۷	-۰/۰۴۲	-۰/۲۷۳	-۰/۱۳۶	-۰/۰۵۳	-۰/۸۷۵	-۰/۰۶۷	-۰/۰۵۹	**۰/۳۶۰	-۰/۲۵۵	-۰/۱۶۷	-۲/۴۲۸
Winter	-۰/۲۴۰	-۰/۲۰۸	-۰/۱۳۳	-۰/۰۸۴	-۰/۰۶۷	-۰/۹۲۵	**۰/۲۹۳	-۰/۲۶۹	**۰/۳۴۷	-۰/۲۶۳	-۰/۱۷۳	-۲/۴۳۳
Spring	-۰/۲۲۷	-۰/۲۰۵	***۰/۳۷۳	-۰/۲۱۰	-۰/۱۸۴	-۱/۰۳۰	-۰/۱۷۳	-۰/۱۶۱	***۰/۵۳۳	-۰/۴۸۶	**۰/۰۳۰۰	-۱/۵۸۳
Summer	***۰/۴۲۷	-۰/۲۴۵	**۰/۳۲۷	-۰/۱۳۲	-۰/۱۱۳	-۱/۵۱۷	**۰/۳۶۰	-۰/۳۳۰	***۰/۵۵۳	-۰/۴۱۴	-۰/۰۹۳	-۱/۱۹۰
Annual	**۰/۳۶۷	-۰/۶۲۸	**۰/۳۶۷	-۰/۵۰۹	-۰/۰۳۳	-۰/۲۹۸	**۰/۳۰۷	-۰/۹۶۱	***۰/۶۹۳	-۱/۴۸۸	-۰/۲۶۷	-۶/۲۰۱

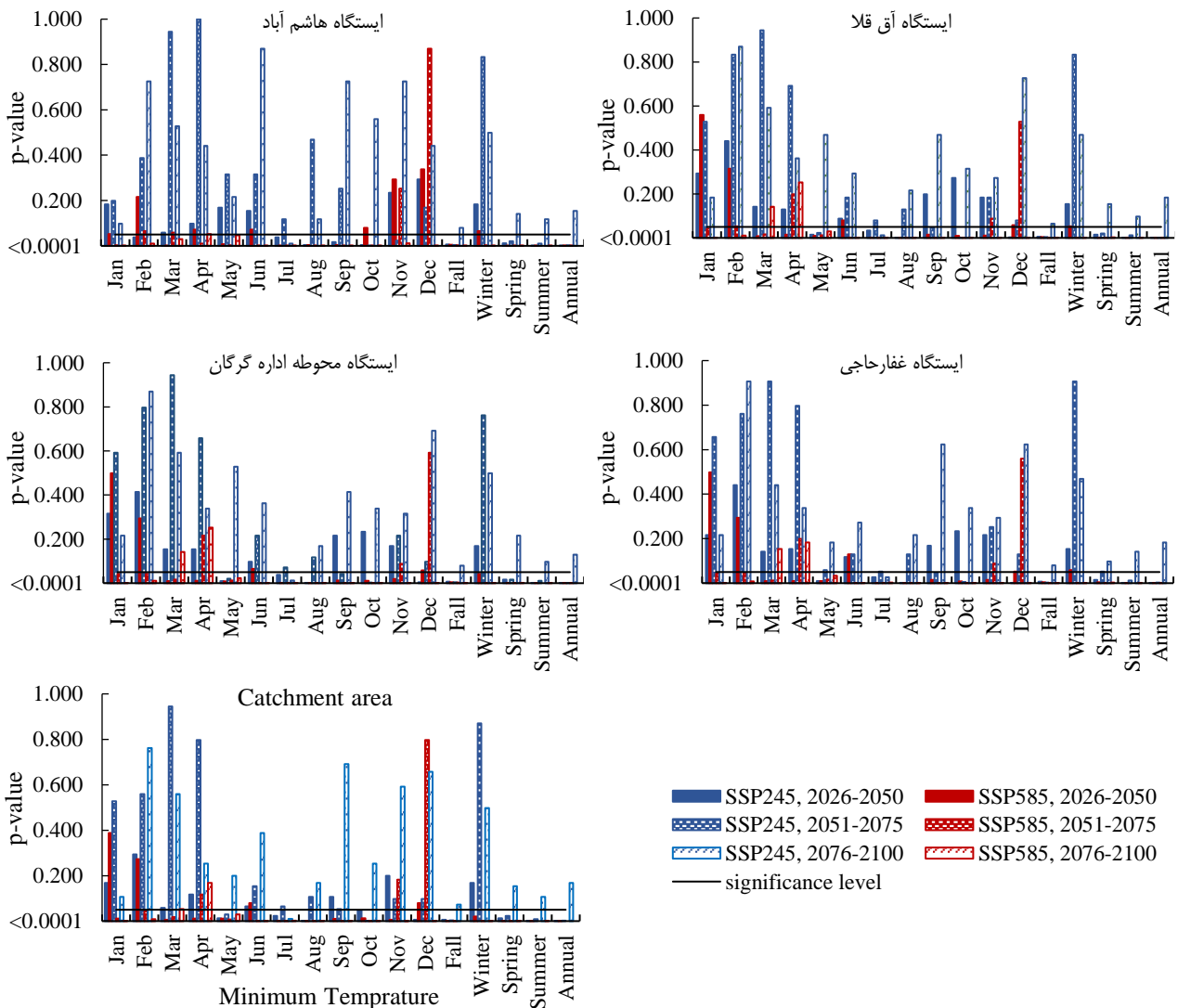
** : معنی‌داری روند در سطح ۹۵٪ *** : معنی‌داری روند در سطح ۹۹٪

در بررسی وضعیت روند میانگین متغیر دمای حداکثر سناریوی SSP5-8.5 آینده نزدیک، هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه در فصل تابستان (Summer) و سالانه، ایستگاه هاشم‌آباد و محدوده مورد مطالعه در ماه Mar, Jul و فصل بهار (Spring) و محدوده مورد مطالعه در فصل پاییز (Fall)، زمستان (Winter) و ماه Aug در سطح ۹۹ درصد و ایستگاه هاشم‌آباد در ماه May، از Aug تا Oct، فصل پاییز (Fall) و زمستان (Winter) و محدوده مورد مطالعه در ماه Apr، May و از ماه Sep تا Nov در سطح ۹۵ درصد دارای روند معنی‌دار است. آینده میانه هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه در ماه Jan و Jul، فصل بهار (Spring)، تابستان (Summer) و سالانه، ایستگاه آق‌قلا، غفارحاجی، محوطه اداره گرگان و محدوده مورد مطالعه در فصل زمستان (Winter)، ایستگاه هاشم‌آباد در ماه Aug، ایستگاه غفارحاجی و محدوده مورد مطالعه در ماه Sep و محدوده مورد مطالعه در فصل پاییز (Fall) در سطح ۹۹ درصد و هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه در ماه May، ایستگاه آق‌قلا، غفارحاجی و محوطه اداره گرگان در ماه Mar، Oct و فصل پاییز (Fall)، ایستگاه آق‌قلا، غفارحاجی، محوطه اداره گرگان و محدوده مورد مطالعه در ماه Aug، ایستگاه هاشم‌آباد، آق‌قلا و محوطه اداره گرگان در ماه Sep، ایستگاه هاشم‌آباد در ماه Jan و فصل زمستان (Winter) و محدوده مورد مطالعه از ماه Jan تا Mar و ماه Oct در سطح ۹۵ درصد دارای روند معنی‌دار است. آینده دور هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه در ماه Jun، Aug و Sep، همه فصول جز بهار (Spring) و سالانه، ایستگاه هاشم‌آباد، آق‌قلا و محوطه اداره گرگان و محدوده مورد مطالعه در ماه Jan و ایستگاه هاشم‌آباد در ماه Jul و Oct در سطح ۹۹ درصد، هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه در فصل بهار (Spring)، ایستگاه آق‌قلا، غفارحاجی و محوطه اداره گرگان در ماه Jul و Nov، ایستگاه هاشم‌آباد در ماه Dec، ایستگاه غفارحاجی در ماه Jan و محدوده مورد مطالعه از ماه Oct تا Dec و ماه Jul در سطح ۹۵ درصد دارای روند معنی‌دار است (شکل ۷).



شکل ۷. بررسی وضعیت روند متغیر حداکثر دمای ایستگاه‌ها و محدوده مورد مطالعه در دوره‌های آبی طبق سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5

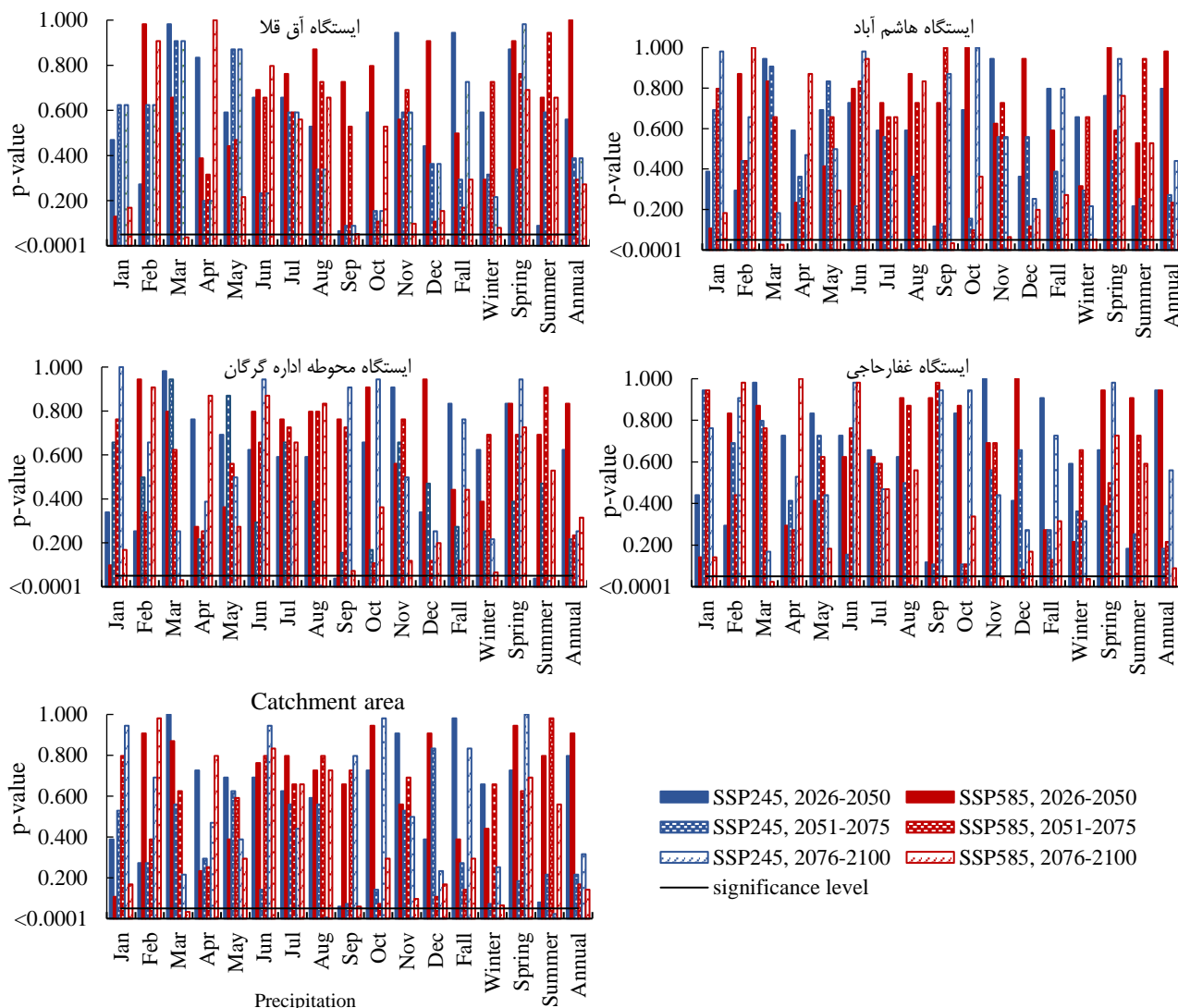
در بررسی وضعیت میانگین متغیر دمای حداقل سناریوی SSP5-8.5 آینده نزدیک هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه در ماه Mar، Aug، Jul، May، همه فصول جز زمستان (Winter) و سالانه، ایستگاه هاشم‌آباد و محدوده مورد مطالعه در ماه Sep و محدوده مورد مطالعه در ماه Aug و Nov در سطح ۹۹ درصد، ایستگاه آق‌قلا، غفارحاجی و محوطه اداره گرگان در ماه Sep و Nov، ایستگاه غفارحاجی و محوطه اداره گرگان در ماه Oct، ایستگاه محوطه اداره گرگان در فصل زمستان (Winter) و محدوده مورد مطالعه در ماه Apr و Oct در سطح ۹۵ درصد دارای روند معنی‌دار است. در آینده میانه هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه از ماه Jun تا Oct، تمام فصول و سالانه، ایستگاه هاشم‌آباد در ماه Jan، May و محدوده مورد مطالعه در ماه May در سطح ۹۹ درصد، ایستگاه آق‌قلا، غفارحاجی و محوطه اداره گرگان در ماه Jan، May و Mar، ایستگاه غفارحاجی و محوطه اداره گرگان در ماه Feb، ایستگاه هاشم‌آباد در ماه Apr و محدوده مورد مطالعه از Jan تا ماه Mar در سطح ۹۵ درصد دارای روند معنی‌دار است. آینده دور هر ۴ ایستگاه در ماه Jan، Dec و از Jun تا Oct، تمام فصول و سالانه، ایستگاه آق‌قلا، غفارحاجی و محوطه اداره گرگان در ماه Nov، ایستگاه هاشم‌آباد و غفارحاجی در ماه Feb و محدوده مورد مطالعه از ماه Jun تا Dec و در ماه Jan، Feb، تمام فصول و سالانه در سطح ۹۹ درصد و هر ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه در ماه May، ایستگاه آق‌قلا و محوطه اداره گرگان در ماه Feb، ایستگاه هاشم‌آباد در ماه Mar و Nov در سطح ۹۵ درصد دارای روند معنی‌دار است (شکل ۸).



شکل ۸. بررسی وضعیت روند متغیر حداقل دمای ایستگاه‌ها و محدوده مورد مطالعه در دوره‌های آبی طبق سناریوی SSP5-8.5 و SSP2-4.5

در بررسی وضعیت روند میانگین متغیر بارش در دوره‌های آبی، سناریوی SSP2-4.5 در آینده دور تمامی ایستگاه‌ها جز آق‌قلا و محدوده مورد مطالعه در ماه Aug در سطح ۹۹ درصد، آینده دور تمامی ایستگاه‌ها در فصل تابستان (Summer) و آینده نزدیک ایستگاه

محوطه اداره گرگان فقط در ماه Sep و فصل تابستان (Summer) در سطح ۹۵ درصد دارای روند معنی دار است. در بررسی آینده دور سناریوی SSP5-8.5 ایستگاه غفارحاجی در فصل زمستان (Winter) در سطح ۹۹ درصد و آینده دور تمامی ایستگاه ها و محدوده مورد مطالعه در ماه Mar، ایستگاه غفارحاجی در ماه Sep و Nov و ایستگاه هاشم آباد در ماه Sep در سطح ۹۵ درصد دارای روند معنی دار است (شکل ۹).



شکل ۹. بررسی وضعیت روند متغیر بارش ایستگاه‌ها و محدوده مورد مطالعه در دوره‌های آبی طبق سناریوی SSP5-8.5 و SSP2-4.5

تاکنون، مدل‌های فاز ششم برای تخمین مقدار متغیرهای بارش و دما در مطالعات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. برخی از مطالعات نشان داده است که میزان بیش‌برآورد یا کم‌برآورد مقدار بارش به فصول مختلف سال و شرایط توپوگرافی منطقه بستگی داشته است (Yang et al., 2021; Assamnew and Tsidu, 2020). تغییرات توزیع دما نشان می‌دهد از سناریوی SSP1-2.6 به سمت سناریوی SSP5-8.5 احتمال وقوع دوره‌های گرم و تنش‌های گرمایی افزایش خواهد یافت. اگرچه اکثر مطالعات افزایش دما در اقلیم آینده را نشان داده‌اند، اما متغیر بارش در مناطق مختلف نتایج متفاوتی را به همراه داشته است. اغلب مدل‌های مورد بررسی در مناطق پرباران، افزایش بارش و در مناطق خشک، کاهش بارش را پیش‌بینی نموده‌اند (میان‌آبادی و همکاران، ۱۴۰۲). در مناطق ساحلی به دلیل تغییرات آب و هوایی جهانی شاهد افزایش بارش این مناطق هستیم که ممکن است سبب تغذیه آبخوان‌های ساحلی شده است زیرا در حقیقت تنوع و الگوی بارش، ویژگی‌های زمین و آبخوان نیز نقش بسیار مهمی در فرآیندهای هیدرولوژیکی دارند (Tam et al., 2016). روشنی و حمیدی (۱۴۰۰) با تعیین مناسب‌ترین مدل (ACCESS-CM2) از بین مجموعه مدل‌های برون‌داد اقلیمی سری ششم به بررسی اثر سناریوهای SSP5-8.5 و SSP2-4.5 بر دما و بارش ایستگاه ساری در دوره (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و (۲۰۸۱-۲۱۰۰) پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد برای

هر دو سناریو میانگین تغییرات ماهانه و فصلی دمای حداکثر و حداقل و تغییرات سالانه بارش افزایش می‌یابد. سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریوی SSP2-4.5 افزایش دمای بیشتری را نشان می‌دهد. نتایج آزمون شیب سن سالانه دمای حداکثر و حداقل در دوره مشاهداتی (۲۰۱۹-۲۰۰۰) نشان‌دهنده صعودی بودن روند این دو متغیر و برای بارش با وجود نبودن روند معنی‌دار، روند شیب سن نزولی است. که با نتایج این پژوهش همخوانی دارند.

نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم و گرمایش جهانی یکی از عمده‌ترین چالش‌های جهانی است که برای مقابله یا سازگاری با آن می‌بایست شرایط اقلیم آینده برای هر منطقه بر اساس سناریوهای مختلفی که یکی و یا ترکیبی از آن‌ها ممکن است در آینده رخ دهد پیش‌نگری شود. در این پژوهش با بررسی مدل‌های CMIP6 و بر اساس آماره‌های خط‌سنجی به انتخاب سه مدل از مدل‌های ذکر شده به‌عنوان مدل برتر پرداخته شد. سپس به‌منظور کاهش عدم قطعیت به اجرای گروهی آن‌ها پرداخته شد. دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای سه دوره آتی نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) توسط نرم‌افزار CMHyd مورد بررسی قرار گرفتند. از آنجایی که متغیر بارش و دما به‌صورت نقطه‌ای اندازه‌گیری یا برآورد می‌شود نیاز به تعمیم این داده‌ها از حالت نقطه‌ای به منطقه‌ای است. پس از پیش‌نگری مقادیر دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش در دوره آتی و تحت سناریوهای ذکر شده برای هر یک از ۴ ایستگاه مورد بررسی به‌صورت نقطه‌ای و محدوده مورد مطالعه به روش درون‌یابی تیسن، وضعیت روند در سری زمانی این داده‌ها با استفاده از آزمون من‌کندال و شیب سن مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی نتایج آماره‌های سنجش خطا نشان داد اکثریت مدل‌ها توانایی مناسبی در برآورد بارش ندارند و از عدم قطعیت بالایی برخوردارند اما برای متغیر دما نتایج مناسب‌تری در بر خواهند داشت و استفاده از اجرای گروهی توانست تا حد امکان عدم قطعیت را کاهش دهد. در بررسی وضعیت روند میانگین سالانه متغیر دمای حداکثر و حداقل در دوره گذشته، ۲ ایستگاه هاشم‌آباد و آق‌قلا در سطح ۹۹ درصد، ایستگاه غفارحاجی در سطح ۹۵ درصد و ایستگاه محوطه اداره گرگان به‌ترتیب در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد و در دوره‌های آتی تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم برای هر یک از ۴ ایستگاه و محدوده مورد مطالعه در آینده نزدیک، میانه و سناریوی SSP5-8.5 آینده دور در سطح ۹۹ درصد دارای روند معنی‌دار افزایشی است که صعودی بودن روند این دو متغیر، نشان‌دهنده گرم‌تر شدن دمای هوا در حوضه قره‌سو است. این افزایش دما و گرم‌تر شدن هوای منطقه در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریوی SSP2-4.5 مشهودتر است. وضعیت روند میانگین سالانه متغیر بارش در دوره گذشته و دوره‌های آتی فاقد روند معنی‌دار است که با وجود نبودن روند معنی‌دار، وضعیت روند نتایج متفاوتی به همراه داشته است و در برخی موارد افزایشی و در برخی کاهش‌ی است. نتایج بررسی وضعیت روند میانگین فصلی و ماهانه پارامترهای مورد بررسی در دوره گذشته و دوره‌های آتی تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم نشان داد برخی از فصول و ماه‌ها دارای روند و برخی دیگر فاقد روند معنی‌دار است. نتایج این پژوهش در بررسی تغییرات دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش با اکثر مطالعات انجام شده مطابقت دارد. افزایش معنی‌دار دما حتی با عدم وجود روند معنی‌دار برای بارش در دوره‌های آتی می‌تواند بر کمیت و کیفیت منابع آبی تأثیر گذار باشد ضمن آنکه بر مقدار تبخیر و تعرق، نیاز آبی گیاه و حتی تنش‌های محیطی وارد شده به گیاه تأثیر خواهد گذاشت. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی به بررسی اثر تغییر اقلیم بر تولیدات محصولات زراعی و همچنین میزان تبخیر و تعرق و رواناب در این منطقه پرداخته شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- اشرف، بتول؛ علیزاده، امین؛ موسوی بایگی، محمد؛ بنایان اول، محمد (۱۳۹۲). صحت‌سنجی داده‌های دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط اجرای منفرد و گروهی پنج مدل AOGCM برای منطقه شمال شرق ایران. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۸ (۲)، ۲۶۶-۲۵۳.
- بابائیان، ایمان؛ مدیریان، راهله؛ خزانه داری، لیلی؛ کریمیان، مریم؛ کوزه‌گران، سعیده؛ کوهی، منصوره؛ فلامرزی، یاشار و ملبوسی، شراره (۱۴۰۲). چشم‌انداز بارش ایران در قرن ۲۱ با به‌کارگیری مقیاس‌کاهی آماری برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMHyd. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۹ (۲)، ۴۴۹-۴۳۱.
- رشیدی قانع، محبوبه؛ متولی، صدرالدین؛ جانباز قبادی، غلامرضا؛ کوهی، منصوره (۱۴۰۲). ارزیابی توانمندی سه روش آماری ریزمقیاس‌گردانی برون‌داد دما و بارش مدل‌های CMIP6 در حوضه آبریز کشف‌رود. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۴ (۵۳)، ۱۳۲-۱۱۷.

- روشنی، ادیب و حمیدی، مهدی (۱۴۰۰). پیش‌بینی اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر دما و بارش براساس مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: ایستگاه ساری). *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۱ (۴)، ۷۸۱-۷۹۵.
- زارع ایبانه، حمید؛ قبائی سوق، محمد؛ مساعدی، ابوالفضل (۱۳۹۳). پایش خشکسالی بر مبنای شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) تحت تأثیر تغییر اقلیم. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۹ (۲)، ۳۷۴-۳۹۲.
- زرین، آذر و داداشی رودباری، عباسعلی (۱۴۰۰). تأثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین ایران با به‌کارگیری مدل همادی CMIP6. *نشریه آب و توسعه پایدار*، ۸ (۴)، ۱۱۹-۱۲۴.
- مدرسی، فرشته؛ عراقی‌نژاد، شهاب؛ ابراهیمی، کیومرث؛ خلقی؛ مجید (۱۳۸۸). بررسی منطقه‌ای پدیده تغییر اقلیم با استفاده از آزمون‌های آماری (مطالعه موردی: حوضه آبریز گرگانرود-قره سو). *نشریه آب و خاک*، ۲۴ (۳)، ۴۸۹-۴۷۶.
- مساح بوانی، علی‌رضا؛ قاسم‌زاده، سجاد؛ روزبهانی، عباس؛ رجائی، فاطمه (۱۴۰۰). پیش‌بینی تغییر اقلیم با استفاده از رویکرد مدل‌های چندگانه گروهی در حوضه آبخیز قره‌سو. *اکوهیدرولوژی*، ۸ (۴)، ۱۱۹۷-۱۱۸۹.
- میان‌آبادی، آمنه؛ باطنی، محمدمهدی؛ محمدی، صدیقه (۱۴۰۲). پیش‌نمایی تغییرات توزیع بارش و دما با استفاده از شبیه‌سازی اصلاح‌اریبی شده مدل‌های اقلیمی گزارش ششم (مطالعه موردی: ایستگاه همدیدی کرمان). *نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی*، ۴ (۱۳)، ۶۵-۸۴.
- نیرومندفرد، فریبا؛ خاشعی سیوکی، عباسی؛ هاشمی، سیدرضا؛ قربانی، خلیل (۱۴۰۱). بررسی پیش‌نگری تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: ایستگاه بیرجند). *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۹)، ۲۰۲۶-۲۰۰۹.

REFERENCES

- Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M. N., Rashid, I. U., Kamil, S., Abid, M. A., ... & Sylla, M. B. (2021). Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Systems and Environment*, 5(2), 155-183. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>.
- Ashraf, B., Alizade, A., Mousavi Baygi, M., Bannayan Aval, M. (2013). Verification of Temperature and Precipitation Simulated Data by Individual and Ensemble Performance of Five AOGCM Models for North East of Iran. *Journal of Water and Soil*, 28(2), 253-266. <https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.38011>. (In Persian).
- Assamnew, A. D., and Tsidu, G. M. (2020). The performance of regional climate models driven by various general circulation models in reproducing observed rainfall over East Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 1169-1189. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03357-3>.
- Babaeian, I., Modirian, R., Khazanedari, L., Karimian, M., Kouzegaran, S., Kouhi, M., Falamarzi, Y., & Malbusi, Sh. (2023). Projection of Iran's precipitation in 21st Century using downscaling of selected CMIP6 Models by CMHyd. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(2), 431-449. <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.332410.1007436>. (In Persian).
- Bağçacı, S. Ç., Yucel, I., Duzenli, E., and Yilmaz, M. T. (2021). Intercomparison of the expected change in the temperature and the precipitation retrieved from CMIP6 and CMIP5 climate projections: A Mediterranean hot spot case, Turkey. *Atmospheric Research*, 256, 105576. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105576>.
- Carvalho, D., Rafael, S., Monteiro, A., Rodrigues, V., Lopes, M., and Rocha, A. (2022). How well have CMIP3, CMIP5 and CMIP6 future climate projections portrayed the recently observed warming. *Scientific Reports*, 12(1), 11983. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16264-6>.
- Cavazos, T., and Arriaga-Ramírez, S. (2012). Downscaled climate change scenarios for Baja California and the North American monsoon during the twenty-first century. *Journal of Climate*, 25(17), 5904-5915. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00425.1>.
- Cheng, T. F., Lu, M., and Dai, L. (2019). The zonal oscillation and the driving mechanisms of the extreme western North Pacific subtropical high and its impacts on East Asian summer precipitation. *Journal of Climate*, 32(10), 3025-3050. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0076.1>.
- Duan, R., Huang, G., Li, Y., Zhou, X., Ren, J., and Tian, C. (2021). Stepwise clustering future meteorological drought projection and multi-level factorial analysis under climate change: A case study of the Pearl River Basin, China. *Environmental Research*, 196, 110368. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110368>.
- Estoque, R. C., Ooba, M., Togawa, T., and Hijioka, Y. (2020). Projected land-use changes in the Shared Socioeconomic Pathways: Insights and implications. *Ambio*, 49, 1972-1981. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01338-4>.
- Gudmundsson, L., Boulange, J., Do, H. X., Gosling, S. N., Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G. and Zhao, F. (2021). Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. *Science*,



- 371(6534), 1159-1162. <https://doi.org/10.1126/science.aba3996>.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
- Gupta, V., Singh, V. and 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(1), 125422. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125422>.
- Haider, S., Masood, M. U., Rashid, M., Alshehri, F., Pande, C. B., Katipoğlu, O. M., & Costache, R. (2023). Simulation of the Potential Impacts of Projected Climate and Land Use Change on Runoff under CMIP6 Scenarios. *Water*, 15(19), 3421. <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/19/3421>.
- Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15(14), 5481-5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>.
- IPCC. (2021). Summary for policymakers Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods.
- Kofi Mensah, J., AKPOTI, K., Ofori, E. A., Kobo-bah, A. T., Siabi, E. K., Asare, A., ... and Yidana, S. M. (2023). Evaluating Climate Change Scenarios in the White Volta Basin: A Statistical Bias-Correction Approach. *Komlavi and Ofori, Eric Antwi and Kobo-bah, Amos Tierayangn and Siabi, Ebenezer K. and Asare, Austin and Bakuri, Ransford W. and Yidana, Sandow Mark, Evaluating Climate Change Scenarios in the White Volta Basin: A Statistical Bias-Correction Approach*. <https://ssrn.com/abstract=4581412> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4581412>.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>.
- Massah Bavani, A., Ghasemzadeh, S., and Rozbahani, A. (2021). Predicting Climate Change Using the Multiple Group Model Approach in Qarasu Watershed. *Iranian journal of Ecohydrology*, 8(4), 1189-1197. <https://doi.org/10.22059/IJE.2022.329152.1541>. (In Persian).
- Meinshausen, M., Nicholls, Z. R., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., ... and Wang, R. H. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3571-3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>, 2020.
- Mianabadi, A., Bateni, M. M., Mohammadi, S. (2023). Projection of Change in the Distribution of Precipitation and Temperature Using Bias-Corrected Simulations of CMIP6 Climate Models (Case Study: Kerman Synoptic Station). *Journal of Climate Change Research*, 4(13), 65-84. <https://doi.org/10.30488/CCR.2023.399780.1139>. (In Persian).
- Modaresi, F., Araghinejad, Sh., Ebrahimi, K., and Kholghi, M. (2010). Regional Assessment of Climate Change Using Statistical Tests: Case Study of Gorganroud-Gharehsou Basin. *Journal of Water and Soil*, 24 (3), 476-489. <https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.3613>. (In Persian).
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Newton, B. W., Farjad, B., & Orwin, J. F. (2021). Spatial and temporal shifts in historic and future temperature and precipitation patterns related to snow accumulation and melt regimes in Alberta, Canada. *Water*, 13(8), 1013. <https://doi.org/10.3390/w13081013>.
- Niroumand fard, F., Khashei Sivaki, A., Hashemi, R., Ghorbani, Kh. (2022). Investigation of Climate Change Projection on Temperature and Precipitation Parameters Using CMIP6 Models (Case Study: Birjand Station). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(9), 2009-2026. <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343936.669284>. (In Persian).
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Vuuren, D. P. V., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... and Meehl, G. A. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.
- Rashidi Ghane, M., Motevalli, S., Janbaz Ghobadi, Gh.R., Kouhi, M. (2023). Evaluation of the ability of three statistical methods to downscale the output of temperature and precipitation of CMIP6 models in the Kashfrud basin. *Journal of Climate Research*. 14(53), 117-132. (In Persian).
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... and 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.

- <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- Roshani, A., and Hamidi, M. (2022). Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature & precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). *Journal of Water and Irrigation Management*, 11(4), 781-795. 10.22059/JWIM.2022.330603.920. (In Persian).
- Schober, P., Boer, C., and Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & analgesia*, 126(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>.
- Siabi, E. K., Awafo, E. A., Kabo-bah, A. T., Derkyi, N. S. A., Akpoti, K., Mortey, E. M., and Yazdanie, M. (2023). Assessment of Shared Socioeconomic Pathway (SSP) climate scenarios and its impacts on the Greater Accra region. *Urban Climate*, 49, 101432. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101432>.
- Su, B., Huang, J., Mondal, S. K., Zhai, J., Wang, Y., Wen, S., Gao, M., Yanran, L., Jiang, S., Jiang, T., and Aiwei, L. (2021). Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in china. *Atmospheric Research*, 250, 105375. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105375>.
- Tam, V. T., Batelaan, O., & Beyen, I. (2016). Impact assessment of climate change on a coastal groundwater system, Central Vietnam. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5718-y>.
- Thiessen, A. H. (1911). Precipitation averages for large areas. *Monthly weather review*, 39(7), 1082-1089. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1911\)39<1082b:PAFLA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1911)39<1082b:PAFLA>2.0.CO;2).
- Wijngaard, J. B., Klein Tank, A. M. G., and Können, G. P. (2003). Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 23(6), 679-692. <https://doi.org/10.1002/joc.906>.
- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical geography*, 2 (2), 184-194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>.
- Yang, X., Zhou, B., Xu, Y., & Han, Z. (2021). CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38, 817-830. <https://link.springer.com/10.1007/s00376-021-0351-4>.
- Zare Abyaneh, H., Ghabaei Sough, M., and Mosaedi, A. (2015). Drought Monitoring Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) Under the Effect of Climate Change. *Journal of Water and Soil*, 29(2), 384-392. <https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.36472>. (In Persian).
- Zarei, A., Mousavi, S. F., Gordji, M. E., and Karami, H. (2019). Optimal reservoir operation using bat and particle swarm algorithm and game theory based on optimal water allocation among consumers. *Water Resources Management*, 33(9), 3071-3093. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02286-9>.
- Zarrin, A., and Dadashi-Roudbari, A. (2022). Technical Note: Assessing the Effect of Climate Change on Heavy Precipitation in Iran Based on a CMIP6 Ensemble Model. *Journal of Water and Sustainable Development*, 8(4), 119-124. 20.1001.1.24235474.1400.8.4.14.9. (In Persian).



Evaluation the Effect of Future Climate Change on the Temperature and Precipitation Trends in the Gharesou Basin Based on the CMIP6 Models

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Determining the future climate situation by using climate models with emphasis on temperature and precipitation seems necessary to consider the necessary measures in the field of adaptation or reducing the adverse effects of climate change.

Materials and Methods

In this research, the temporal trend of rainfall, minimum temperature and maximum temperature in the four stations of Hashemabad, Aqqla, Ghafarhaji and the area of Gorgan Water Department in the Qarasu basin of Golestan province have been investigated. In addition to point methods, Thiessen's interpolation method and geostatistics were used in the regional scale for rainfall and temperature. In this method, in addition to the value of the variable at the measurement station, its relationship with the value and position of the variable at other stations is considered. The performance of the models was evaluated based on the correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), root mean square error (MBE), mean absolute error (MAE), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) and Kling Gupta Efficiency (KGE). Among the five models of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report (AR6), three models, MIROC-ES2L, ACCESS-CM2, and MIROC6, were selected as the best models and were used by the arithmetic mean method for Multi Model Ensemble (MME). Downscaling Correction was done with CMHyd (Climate Model data for hydrologic modeling) tool for two scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 in three periods of the near future (2026-2050), middle (2051-2075) and long term (2076-2100). The trend of the parameters of maximum temperature, minimum temperature and precipitation in the historical period (1990-2014) and the future periods were investigated by Mann-Kendall and sens slope tests.

Results and Discussion

The results of the analysis of the significant trends of the annual average data of the maximum temperature and the minimum temperature of all stations and in the catchment area according to under the SSP2.4-5 scenario in the two near and middle future periods and for the SSP5-8.5 scenario in all three future periods have a significant trend at the 99% level. The annual average of the precipitation parameter in the observation period and future periods under both scenarios lacks a significant trend. In the analysis of the significant trend of the seasonal average of the maximum and minimum temperature parameters of the SSP2.4-5 scenario in autumn, spring and summer and the SSP5-8.5 scenario in all seasons of the future periods there is a significant trend. seasonal rainfall data under the SSP2.4-5 scenario in the summer season in the distant future of all stations and in the near future of the station of the area of Gorgan regional water company at the 95% level and for the SSP5-8.5 scenario only in the winter season in the distant future Ghafarhaji station has a significant trend at the 99% level. In the analysis of the significant trend of the monthly rainfall data of the SSP2.4-5 and SSP5-8.5 scenarios, the catchment area has a significant trend only in the month of August at the 99% probability level and in the month of March at the 95% probability level respectively.

Conclusion

In general, the investigation of temperature and precipitation in the future of the Gharesou basin under two scenarios and three future periods has brought a significant increase in the level of 95 and 99% for the temperature parameter and different results for the precipitation parameter. As expected, the increase in temperature is more evident in the SSP5-8.5 scenario than in the SSP2-4.5 scenario.

Keywords: Climate Change, CMIP6 Models, Multi Model Execution, Precipitation, Trend.