

**Projection of Precipitation using CMIP6 Models Until the End of the 21st Century in the Northwest of Iran****Behrouz Sari Saraf^a, Hashem Rostamzadeh^b, Nabi Mohamadi^{c*}**^a Professor in Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran^b Assistant Professor in Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran^c PhD in Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran**Received: 17 April 2022****Revised: 2 June 2022****Accepted: 7 June 2022****Abstract**

Precipitation is the main component of the hydrological cycle, which is very important in many studies, including those focusing on management of irrigation and drainage systems, crop performance, environmental issues, floods, droughts, etc. Therefore, this study evaluated seven GCMs models of Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6) regarding the simulation and projection of precipitation changes in the northwest of Iran under three scenarios of SSP in three periods (2021-2050, 2051-2080, 2081-2100) and compared them to the historical period (2014-1985). The trend of precipitation changes was calculated using Mann-Kendall test and Sen's slope estimator. The Linear Scaling Bias Correction (LSBC) was used to downscaling the GCMs data and the validity of different models was evaluated using RMSE, MAE and R2 indices. The results of performance evaluation of CMIP6 models showed that among the studied models, MPI-ESM1-2-LR model with an average R2 of 0.86 and RMSE equal to 19.7 at the regional level were more accurate than other models in the simulation of precipitation. The results of projection also showed that precipitation according to SSP1-2.6 scenario will increase by 2.6% in the next three periods and on average in the end of 21st century and at most stations it is significant at the level of 0.01%. But according to SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios, the amount of precipitation will decrease by 14.5% and 3.6% in the end of 21st century, respectively, with the highest decrease being related to the rainy areas in the southwest of the region. In general, according to different scenarios, in most of the studied areas, the precipitation trend is decreasing until the end of 21st century, and it is necessary for officials and planners to adopt the required strategies to adapt to the resulting climate change.

Keywords: SSPs, CMIP6, Rain, Northwest, Climate Change

*. Corresponding author: Nabi Mohamadi: Email: n.mohamadi1974@gmail.com Tel: +989144192471

How to cite this Article: Sari Saraf, B., & Rostamzadeh, H. and Nabi Mohamadi (2024). Projection of precipitation using CMIP6 models until the end of the 21st century in northwest of Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(1), 173-194.

DOI:10.22067/geoeh.2022.76646.1223



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).





Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 13, Issue 1 - Number 49, Spring 2024

<https://geoeh.um.ac.ir>

 <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76646.1223> 


جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال سیزدهم، شماره چهل و نهم، بهار ۱۴۰۳، صص ۱۹۴-۱۷۳

مقاله پژوهشی

پیش‌نگری بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 تا پایان قرن ۲۱ در شمال غرب ایران

بهروز ساری صراف- استاد آب‌وهواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

هاشم رستم‌زاده- استادیار آب‌وهواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

نبی محمدی^۱ -  دکتری آب‌وهواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۲۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۱۲ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۳/۱۷

چکیده

بارش اصلی‌ترین جزء چرخه هیدرولوژی است که در بسیاری از مطالعات از جمله مدیریت سیستم‌های آبیاری و زهکشی، عملکرد محصولات کشاورزی، مطالعات زیست‌محیطی، سیلاب، خشکسالی و غیره از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا در این پژوهش به ارزیابی ۷ مدل GCMs از CMIP6 در شبیه‌سازی بارش و پیش‌نگری تغییرات بارش در شمال غرب ایران تحت سه سناریوی واداشت اجتماعی-اقتصادی (SSP) در سه دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۸۰، ۲۰۸۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) پرداخته شد. روند تغییرات بارش با استفاده از آزمون من کندال و تخمینگر شیب سن محاسبه گردید. جهت مقیاس کاهی داده‌های GCMs نیز از رویکرد مقیاس بندی خطی (LSBC) استفاده شد و صحت سنجی مدل‌های مختلف با استفاده از سنج‌های متداول آماری، RMSE، MAE و R2 ارزیابی گردید. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 نشان داد که از میان مدل‌های موردبررسی، مدل MPI-ESM1-2-LR با متوسط R2 برابر با ۰/۸۶ و RMSE برابر با ۱۹/۷ در سطح

Email: n.mohamadi1974@gmail.com

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۴۱۹۲۴۷۱

نحوه ارجاع به این مقاله:

ساری صراف، بهروز؛ رستم‌زاده، هاشم؛ محمدی، نبی؛ ۱۴۰۳. پیش‌نگری بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 تا پایان قرن ۲۱

در شمال غرب ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۳(۱). صص ۱۹۴-۱۷۳

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76646.1223>

منطقه از دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش برخوردار است. نتایج حاصل از پیش‌نگری تغییرات بارش نیز نشان داد بارش بر اساس سناریوی SSP1-2.6 در هر سه دوره آینده و به‌طور متوسط تا پایان قرن ۲۱ به میزان ۲/۶ درصد افزایش پیدا خواهد کرد و در بیشتر ایستگاه‌ها در سطح ۰/۰۱ درصد معنی‌دار شده است؛ اما بر اساس سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 میزان بارش تا پایان قرن ۲۱ به ترتیب ۱۴/۵ و ۳/۶ درصد کاهش پیدا خواهد کرد که بیشترین میزان کاهش آن نیز مربوط به مناطق پر بارش در جنوب غرب منطقه است. میزان کاهش در مناطق غربی و جنوب غربی در سطح ۰/۰۱ درصد معنی‌دار شده است. در مجموع با توجه به سناریوهای مختلف، در بیشتر پهنه مورد مطالعه روند بارش تا پایان قرن ۲۱ کاهشی است و لازم است مسئولان و برنامه ریزان راهکارهای لازم جهت سازگاری با تغییرات اقلیمی حاصل را اتخاذ نمایند.

کلیدواژه‌ها: بارش، تغییر اقلیم، شمال غرب، مقیاس بندی خطی، CMIP6.SSPs

۱- مقدمه

گرمایش جهانی در حال حاضر پذیرفته شده است (ژانگ و همکاران^۱، ۲۰۱۷). یکی از نمودهای گرمایش جهانی و تغییر اقلیم افزایش فراوانی و شدت دوره‌های همراه با دماهای بالا و پایین است و برخی مطالعات نشان داده‌اند که تأثیرات فرین‌های اقلیمی آشکارتر و مستقیم‌تر از میانگین‌های آب‌وهوایی است (هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم^۲، ۲۰۱۳). دمای بالاتر نگهداشت رطوبت جو را افزایش داده و این امر به نوبه خود می‌تواند منجر به افزایش بارش‌های فرین شود (یانگ و همکاران^۳، ۲۰۱۸). ممکن است فراوانی، شدت و وسعت فضایی رویدادهای فرین آب‌وهوایی افزایش یابد (هورتون و همکاران^۴، ۲۰۱۵). مسئله تغییر اقلیم امروزه به‌عنوان یکی از شایع‌ترین مباحث علمی و حتی سیاسی-اجتماعی مطرح است. اصولاً تغییر و حرکت جزء وجودی سامانه‌های طبیعی است. انسان در تلاش است که با ابزارها و دانستنی‌های خود قانونمندی این تغییرات را کشف کند و بدین‌وسیله اقدام به پیش‌بینی رفتارهای بعدی سامانه آب‌وهوا نماید (عزیری، ۱۳۸۳). فرایند تغییر اقلیم به‌ویژه تغییرات دما و بارش مهم‌ترین بحث مطرح در قلمرو علوم محیطی می‌باشد. این پدیده به دلیل ابعاد علمی و کاربردی (اثرات محیطی و اقتصادی-اجتماعی) آن از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است، چراکه سیستم‌های انسانی وابسته به عناصر اقلیمی مانند کشاورزی، صنایع و امثال آن بر مبنای ثبات و پایداری اقلیم طراحی شده و عمل می‌نمایند (ذهبیون و همکاران، ۱۳۸۹). در این بین نیز بارش مهم‌ترین متغیر

1 Zhang et al

2 IPCC

3 Yang et al

4 Horton et al

آب‌شناختی است که پیوند میان جو و فرآیندهای سطحی را برقرار می‌سازد و ناهنجاری‌های مثبت و منفی آن سبب بروز سیل و خشکسالی می‌شود (مسعودیان و همکاران، ۱۳۹۳). برای ارزیابی تغییرات اقلیمی مدل‌های جهانی اقلیم (GCMs) طراحی شده‌اند. این مدل‌ها خصوصیات فیزیکی، چرخش‌ها و حرکات اتمسفری را تحلیل می‌نمایند و به دنبال آن متغیرهای هواشناسی را در شبکه‌های خاص شبیه‌سازی می‌کنند، همچنین این مدل‌ها در حال حاضر قوی‌ترین ابزار به‌منظور تولید سناریوهای اقلیمی می‌باشند (شائمی و حبیبی‌نوخندان، ۱۳۸۸). مدل‌های GCM متعددی توسعه یافته است و به دلیل تفاوت ساختار این مدل‌ها و تفاوت شرایط اولیه‌ای که تحت آن اجرا می‌شوند، نتایج آن‌ها حتی برای یک سناریوی انتشار یکسان، متفاوت است. لذا برای استفاده در مطالعات منطقه‌ای، لازم است خروجی این مدل‌ها با استفاده از یک روش مناسب ریز مقیاس شود (کی و همکاران^۱، ۲۰۰۹). با توجه به اهمیت بارش لازم است این پارامتر در مناطق مختلف برآورد شود. پیش‌بینی بارش برای مناطقی که اقتصاد آن‌ها مبتنی بر کشاورزی است، بسیار مهم است. از طرفی با پیش‌بینی به‌موقع بارندگی امکان مقابله با سیلاب، خشک‌سالی و کاهش خسارت ناشی از آن‌ها نیز مهیا می‌شود. در این راستا فریرا و همکاران^۲ (۲۰۱۸) به پیش‌نگری تغییرات بارش‌های تابستانی در جنوب شرقی ایالات متحده پرداختند. نتایج حاکی از افزایش قابل‌ملاحظه بارش به دلیل افزایش دما و شار بخار آب بود. نیلاوار و ویکار^۳ (۲۰۱۹) به بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر جریان رودخانه پورنا در هند با استفاده از سناریوهای RCP پرداختند. نتایج نشان داد دما و بارش در دوره آینده افزایش پیدا خواهد کرد. جیانگ و همکاران^۴ (۲۰۲۰) به پیش‌نگری تغییرات بارش در آسیای مرکزی بر اساس ۱۵ مدل GCM از CMIP6^۵ تحت ۴ سناریوی SSP^۶ پرداختند. نتایج نشان داد بر اساس تمام سناریوها میانگین بارندگی سالانه افزایش خواهد یافت. ژانگ و همکاران^۷ (۲۰۲۱) قابلیت‌های ۴۲ مدل از CMIP6 را جهت بازتولید دما و بارش در سین کیانگ چین را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد این مدل‌ها توانایی خوبی در شبیه‌سازی دما و بارش دارند و استفاده از ترکیب چند مدل نیز عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های منفرد دارند. مجدی و همکاران^۸ (۲۰۲۲) به پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در خاورمیانه و شمال آفریقا با استفاده از متوسط ۲۳ مدل GCM و دو سناریوی SSP پرداختند. نتایج حاکی از افزایش دما و کاهش بارش در بیشتر مناطق مورد مطالعه است. صلاحی و همکاران (۱۳۹۵) به پیش‌بینی تغییرات دما و بارش با استفاده از داده‌های خروجی مدل

1 kay et al

2 Ferreira et al

3 Nilawar and Waikar

4 Jiang et al

5 Coupled Model Intercomparison Project phase 6

6 Shared Socioeconomic Pathways

7 Zhang et al

8 Majdi I et al

HadCM3 تحت سه سناریوی انتشار در حوضه آبریز دریاچه برداختند. نتایج حاکی از کاهش ۸/۲ درصدی بارش در دهه ۲۰۵۰ در حوضه مورد مطالعه است. خورشیددوست و همکاران (۱۳۹۷) به پیش‌بینی بارش‌های سنگین در سواحل جنوبی دریای خزر در دوره ۱۳۸۹ تا ۱۴۰۸ پرداختند. نتایج نشان داد در دوره آتی در مجموع بر تعداد روزهای همراه با بارش سنگین در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه افزوده خواهد شد. **خزائی و همکاران (۱۳۹۸)** با استفاده از مدل HadGEM2 به پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در حوضه سیرا پرداختند. نتایج نشان داد که در دوره آینده بارش کاهش و دما افزایش می‌یابد. **حیدری و همکاران (۱۳۹۸)** چشم‌انداز تغییرات بارش را در منطقه شمال غرب با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو و سناریوهای RCP مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داده که بیشتر مدل‌ها برای دوره‌های آینده افزایش بارش را پیش‌بینی می‌کنند. **کثیری و همکاران (۱۴۰۰)** به پیش‌نگری تغییرات بارش در سواحل جنوبی دریای خزر با استفاده از سناریوهای مختلف واداشت تابشی پرداختند. نتایج نشان داد بارش در سواحل جنوبی دریای خزر تا پایان قرن ۲۱ نسبت به دوره پایه به‌طور متوسط ۵/۷ درصد افزایش خواهد یافت.

جمع‌بندی پیشینه تحقیق نشان داد که بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه تغییر اقلیم در ایران و در منطقه شمال غرب با استفاده از برونداد مدل‌های گزارش سوم (CMIP3) و یا گزارش پنجم (CMIP5) و داده‌های این مدل‌ها صورت گرفته است و بررسی بارش به‌صورت جامع و با استفاده از مدل‌های گزارش ششم CMIP6 صورت نگرفته است. لذا در این پژوهش درستی سنجی مدل‌های متداول و پرکاربرد گزارش ششم در دسترس با استفاده از متداول‌ترین سنج‌های آماری بررسی شد و تغییرات بارش در شمال غرب ایران در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) با استفاده از خروجی مدل منتخب با کمترین میزان خطا تحت سناریوهای مختلف SSP پیش‌نگری گردید.

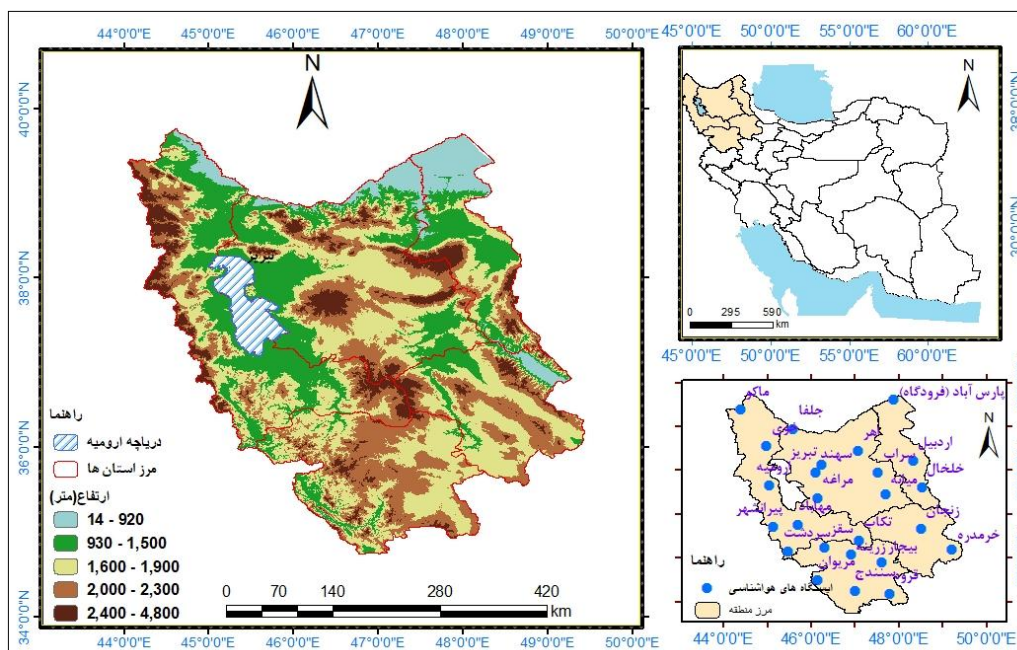
با توجه به آن که منابع آب در معرض خطرات ناشی از تغییرات اقلیم قرار دارند، بررسی تغییرات بارش در سال‌های آینده می‌تواند راهگشای معضلاتی همچون خشکسالی، سیلاب‌های ناگهانی و تخریب‌های زیست‌محیطی باشد.

۲- داده‌ها و روش‌شناسی

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این پژوهش، شمال غرب ایران است که از عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه الی ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه عرض شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ درجه و ۵ دقیقه الی ۴۹ درجه و ۵۲ دقیقه طول شرقی و شامل استان‌های آذربایجان شرقی و غربی، اردبیل، زنجان و کردستان است. جهت بررسی از داده‌های بارش ۲۵ ایستگاه همدیدی به‌صورت روزانه، با توزیع مناسب و دارای دوره آماری بلندمدت

(۲۰۱۴-۱۹۸۵)، حداقل سی ساله در سطح منطقه مورد مطالعه استفاده گردید که موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل (۱) آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی

۲-۳- مدل جهانی (GCM) و سناریوهای مورد بررسی

در این پژوهش از داده‌های بارش ایستگاه‌های هم‌دید شمال غرب کشور به صورت روزانه در دوره آماری بلندمدت و متناسب با دوره تاریخی مدل‌های جهانی (۲۰۱۴-۱۹۸۵) استفاده شد که از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. جهت بررسی تغییرات بارش در دوره‌های آینده مورد بررسی (۲۰۲۱-۲۱۰۰)، ابتدا ۷ مدل GCM از CMIP6 که دارای داده‌های بارش با وضوح بالا بودند انتخاب شدند. مشخصات مدل‌های مورد بررسی در جدول (۱) آورده شده است. داده‌های بارش مدل‌های مذکور از مرکز ESGF¹ دانلود گردید. سپس مقادیر بارش مشاهداتی و تاریخی برای هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه با تهیه برنامه در محیط MATLAB2020 با استفاده از نزدیک‌ترین گزیده داده‌های GCMs در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) استخراج گردید. سپس از روش تصحیح اریبی یا روش مقیاس کاهی خطی جهت ریزگردانی داده‌ها استفاده گردید. در ادامه اختلاف بین مقادیر بارش مشاهداتی و تاریخی با استفاده از شاخص‌های مجذور میانگین مربعات خطا

1 <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>

(RMSE¹)، میانگین مطلق خطا (MAE²) و ضریب تعیین (Rsqr) ارزیابی گردید. پس از ارزیابی مدل‌های مختلف GCM، با استفاده از بهترین مدل، تغییرات بارش در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) تحت سه سناریوی واداشت اجتماعی-اقتصادی (SSP) پیش‌نگری گردید و تغییرات آن در دوره آینده نسبت به دوره پایه محاسبه گردید. دلیل انتخاب مدل‌های مذکور از مجموعه مدل‌های CMIP6 اعتبار، دقت و در دسترس بودن سناریوهای موردنیاز جهت مطالعه است. پنج سناریوی SSP از SSP1 تا SSP5 وجود دارد که به ترتیب نشان‌دهنده گذر از جاده سبز، وسط جاده، جاده سنگی، جاده تقسیم شده و گرفتن بزرگراه است. کمیت‌های SSP بر اساس تلاش مشترک بین IAV و جامعه IAM ساخته شده است. سناریوهای مورد مطالعه در این پژوهش یعنی SSP126، SSP265 و SSP585 نشان‌دهنده انتهای پایین محدوده مسیرهای اجباری آینده، انتهای متوسط تا بالا محدوده مسیرهای اجباری آینده و انتهای بالای محدوده آینده هستند (زهرائی و حسینی، ۱۳۹۹). در ادامه با استفاده از آزمون آماری من کندال و تخمینگر شیب سن، روند و شیب تغییرات بارش در منطقه شمال غرب کشور مشخص گردید.

جدول ۱- مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد بررسی در این پژوهش

ردیف	مدل	موسسه / کشور	قدرت تفکیک
۱	MRI-ESM2-0	موسسه تحقیقات جوی، ژاپن	۱/۱×۱
۲	MPI-ESM1-2-LR	موسسه ماکس پلانک، آلمان	۰/۹×۰/۹
۳	GFGL-ESM4	آزمایشگاه ژئوفیزیک و دینامیک سیالات، ایالات متحده	۱/۲۵×۱
۴	MIROC6	موسسه تحقیقات جو و اقیانوس‌شناسی و موسسه ملی مطالعات محیطی، ژاپن	۱/۴×۱/۴
۵	MIROC-ES2L		۲/۸×۲/۸
۶	FGOALS-g3	موسسه فیزیک جو، چین	۱×۱
۷	CanESM5	مرکز تحلیل و مدل‌سازی اقلیمی، کانادا	۱/۱×۱/۱

منبع: ژانگ و همکاران (۲۰۲۱)

۲-۴- مقیاس کاهی

جهت مقیاس کاهی داده GCMs از روش مقیاس کاهی خطی استفاده گردید. مقیاس کاهی بر اساس میانگین تفاوت بین سری‌های زمانی مشاهده شده ماهانه و سری‌های زمانی دوره تاریخی GCM/RCM در همان دوره از سری زمانی مشاهده شده است. سپس این تفاوت‌ها برای داده‌های آب‌وهوایی شبیه‌سازی شده برای دریافت متغیرهای آب‌وهوایی با اربیی اصلاح شده اعمال می‌شوند (شرستا و همکاران، ۲۰۱۵). رویکرد

1 root-mean-square error

2 mean absolute error

مقیاس بندی خطی (LSBC)^۱ با مقادیر اصلاح شده ماهانه بر اساس تفاوت بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عمل می‌کند. داده‌های بارش با ضریبی بر اساس نسبت میانگین بلندمدت ماهانه داده‌های مشاهداتی و داده‌های کنترل اصلاح می‌شود. در این حالت شرط بر این است که ضرایب تصحیح اعمال شده و افزوده‌ها حتی برای شرایط آتی نیز بدون تغییر باقی می‌مانند (توچباین و همکاران، ۲۰۱۲).

$$P_{contr}^{BC}(t) = P_{contr}(t) \cdot \left[\frac{\mu_m P_{obs}(t)}{\mu_m P_{contr}(t)} \right] \quad (1)$$

$$P_{frc}^{BC}(t) = P_{frc}(t) \cdot \left[\frac{\mu_m P_{obs}(t)}{\mu_m P_{contr}(t)} \right] \quad (2)$$

در روابط بالا، P بارش است؛ contr تعداد سری‌های شبیه‌سازی شده GCM در طول دوره کنترل، obs دوره زمانی مشاهداتی frc سرس زمانی پیش‌نگری شده آینده است که باید اریبی آن حذف شود؛ BC سری زمانی پیش‌نگری شده آینده است که اریبی آن حذف شده است، t گام زمانی و μ_m میانگین بلندمدت ماهانه است (منذر و همکاران، ۲۰۲۰). با اعمال روش مقیاس‌کاهی بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده عملکرد مدل در شبیه‌سازی بلندمدت متغیر بارش به مقدار زیادی افزایش می‌یابد.

۲-۵- آزمون ناپارامتریک آماری من کندال

آزمون ناپارامتری من-کندال که توسط من در سال ۱۹۴۵ ارائه و سپس توسط کندال در سال ۱۹۷۵ تکمیل گردید، بر پایه‌ی مرتبه داده‌ها در یک سری زمانی استوار است. این آزمون برای بررسی تصادفی بودن داده‌ها (عدم وجود روند) در مقابل وجود روند در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۰). مزیت این آزمون نسبت به سایر آزمون‌های تعیین روند، استفاده از مرتبه داده‌ها در سری زمانی بدون در نظر داشتن مقدار متغیرها می‌باشد که به دلیل وجود چنین خاصیتی، می‌توان از این آزمون برای داده‌های دارای چولگی نیز استفاده کرد و نیازی نیست که داده‌ها در قالب توزیع خاصی در آیند. فرض موردبررسی در این آزمون به صورت زیر می‌باشد:

H_0 : داده‌ها به صورت تصادفی توزیع شده‌اند (روند ندارند).

H_1 : داده‌ها دارای روند هستند.

در این آزمون، اگر x_1, x_2, \dots, x_n مشاهدات مورد نظر باشند، آنگاه داریم:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (3)$$

که رابطه فوق x_j مقدار داده j ام و sgn تابع علامت می باشد که به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

در واقع در این آزمون هر داده با تمامی داده های پس از خود مقایسه می شود؛ در این مرحله می توان بجای استفاده از مقادیر اصلی داده ها، از مرتبه داده ها در مجموعه مورد نظر (سری زمانی) استفاده کرده و مرتبه ها را به همین روش مقایسه نمود. به این دلیل، این آزمون یک آزمون بر پایه مرتبه داده ها (Rank base) می باشد. با فرض این که داده ها مستقل بوده و توزیع یکنواخت دارند، میانگین و واریانس S از روابط زیر به دست می آید:

$$E(S) = 0 \quad (5)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (6)$$

در رابطه بالا:

n : تعداد داده ها، m : تعداد گره ها و t : تعداد داده در هر گره می باشد.

منظور از گره این است که اگر از یک مقدار داده، بیشتر از یکی وجود داشته باشد، این مقادیر مساوی، تشکیل یک گره را می دهند و تعداد این مقادیر مساوی در گره m ام برابر t می باشد. آماره این آزمون (Z) دارای توزیع نرمال بوده و از رابطه زیر به دست می آید:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

این آزمون، یک آزمون دو طرفه است. بنابراین در صورتی که $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$ باشد، در سطح اطمینان α فرض صفر پذیرفته می شود و در غیر این صورت، فرض صفر رد خواهد شد. در حالت رد فرض صفر

(وجود روند)، در صورتی که $S > 0$ باشد، سری زمانی دارای روند مثبت (صعودی) و در صورتی که $S < 0$ باشد، سری زمانی دارای روند منفی (نزولی) خواهد بود. اگر $|Z| > 1.64$ در سطح معنی‌داری ۱۰ درصد، اگر $|Z| > 1.96$ در سطح معنی‌داری ۵ درصد و اگر $|Z| > 2.57$ در سطح معنی‌داری ۱ درصد فرض صفر (عدم وجود روند) رد می‌شود (کندال، ۱۹۷۵).

۲-۶- تخمین‌گر شیب سن^۱

تخمین شیب خط روند توسط سن (۱۹۶۸) برای تشخیص روند در یک سری زمانی داده‌ها ارائه شد. این روش یک روش ناپارامتری است که با استفاده از تحلیل تفاوت بین مشاهده‌ای یک سری زمانی، یک شیب میانه را برای سری زمانی داده‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌کند. در روش سن برای هر دو جفت داده متوالی یک شیب محاسبه می‌شود. شیب‌های محاسبه شده تشکیل یک سری زمانی می‌دهند که میانه آن‌ها شیب خط روند را نشان می‌دهد. در آزمون من-کندال شیب خط روند سری داده‌ها با روش تخمین‌گر سن از رابطه ناپارامتری زیر محاسبه می‌گردد.

$$\beta = \text{Median} \left[\frac{X_j - X_i}{j - i} \right] (\forall j > i) \quad (8)$$

که در آن β برآوردگر شیب خط روند، X_j و X_i به ترتیب مقادیر مشاهداتی i ام j ام می‌باشند و Z یک واحد زمانی بعد از i می‌باشد مقادیر مثبت و منفی β نشان دهنده روند افزایشی و کاهش‌ی در سری داده-هاست (سن، ۱۹۶۸).

۲-۷- ارزیابی و صحت‌سنجی عملکرد مدل‌ها

پس از استخراج خروجی مدل‌ها برای صحت‌سنجی آن‌ها از سنج‌های متداول آماری استفاده شد که در ادامه شرح مختصری از این شاخص‌ها آورده شده است. در رابطه (۹) که تحت عنوان ضریب تعیین (Rsqr) شناخته می‌شود معیاری بدون بعد است و بهترین مقدار آن برابر یک می‌باشد (صدافت‌کردار و همکاران، ۱۳۸۷: ۶۷). مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) به‌عنوان قیاسی برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری به کار می‌رود این معیار که به‌صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود به‌عنوان مرسوم‌ترین شاخص خطا به کار می‌رود (لین و همکاران، ۲۰۰۶). میانگین مطلق خطا (MAE) برای

1 Sen's Slope Estimator

مقایسه عبارت به عبارت خطای نسبی مقادیر شبیه‌سازی شده با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده به کار می‌رود که به صورت رابطه (۱۱) ارائه می‌گردد (هو و همکاران، ۲۰۰۱).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N X_o X_s}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X_o^2 \sum_{i=1}^N X_s^2}} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2}{N}} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |X_o - X_s|}{N} \quad (11)$$

در روابط فوق X_o داده‌های مشاهداتی، X_s داده‌های شبیه‌سازی شده، \bar{X}_o میانگین داده‌های مشاهداتی، N تعداد داده‌ها می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از اعمال آزمون من-کندال و تخمینگر شیب سن بر روی داده‌های بارش سالانه در دوره آماری پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که بارش در ایستگاه‌های اردبیل، پارس‌آباد، خوی، جلفا، زنجان، سراب، سردشت و ماکو دارای روند افزایشی و در سایر ایستگاه‌ها دارای روند کاهشی است. بر اساس آزمون من کندال روند افزایشی بارش در هیچ‌کدام از ایستگاه‌های مورد مطالعه معنی‌دار نشده است و تغییرات مذکور از نوع نوسانات کوتاه‌مدت آب‌وهوایی در منطقه می‌باشد؛ اما روند کاهشی در ایستگاه‌های سنندج و مراغه در سطح ۰/۰۱ درصد و در ایستگاه‌های سهند و مریوان در سطح ۰/۰۵ درصد معنی‌دار شده است و حاکی از تغییرات کاهشی بارش در ایستگاه‌های مذکور است. بیشترین شیب تغییرات کاهشی نیز مربوط به ایستگاه مریوان با شیب سن برابر ۱۹/۲- است. بیشترین شیب تغییرات افزایشی نیز مربوط به ایستگاه سردشت با ۴/۵ است. در مجموع تغییرات کاهشی بارش در منطقه مورد مطالعه بیشتر از تغییرات افزایشی است. (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون‌های آماری بر روی سری‌های بارش سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه

ردیف	ایستگاه	ضریب من کندال	شیب سن	ردیف	ایستگاه	ضریب من کندال	شیب سن
۱	اردبیل	۰/۲۹	۰/۳۰	۱۴	زرینه	۰/۹۳-	-۲/۳۱
۲	ارومیه	۰/۲۹-	۰/۴۵-	۱۵	زنجان	۰/۵۴	۰/۸۵
۳	اهر	۱/۱۴-	۱/۱۸-	۱۶	سراب	۱/۴۴	۲/۰۹۷
۴	بیجار	۰/۹۷-	۱/۴۵-	۱۷	سردشت	۰/۷۳	۴/۵
۵	پارس‌آباد	۰/۸۲	۱/۰۳	۱۸	سقز	۱/۶۸-	-۴/۴۶
۶	پیرانشهر	۰/۲۸-	۰/۷۶-	۱۹	سنندج	**۳/۳۲-	-۶/۲۹
۷	تبریز	۰/۱۸-	۰/۲۸-	۲۰	سهند	**۲/۰۳۲-	۲/۰۳۹-
۸	تکاب	۱/۳۷-	۲/۸۹-	۲۱	قروه	۰/۷۵-	-۱/۳۲
۹	جلفا	۱/۵۸	۲/۳۰	۲۲	ماکو	۱/۱۱	۲/۰۶
۱۰	خرمدره	۰/۲۱-	۰/۶۶-	۲۳	مراغه	**۲/۸۹-	-۵/۷۹
۱۱	خلخال	۰/۸۵-	۱/۵۳-	۲۴	مریوان	**۲/۳۲-	-۱۹/۱۷
۱۲	خوی	۰/۴۳	۰/۷۶	۲۵	مهاباد	۰/۹۳-	-۲
۱۳	میانه	۰/۶۹-	۰/۷۶-				

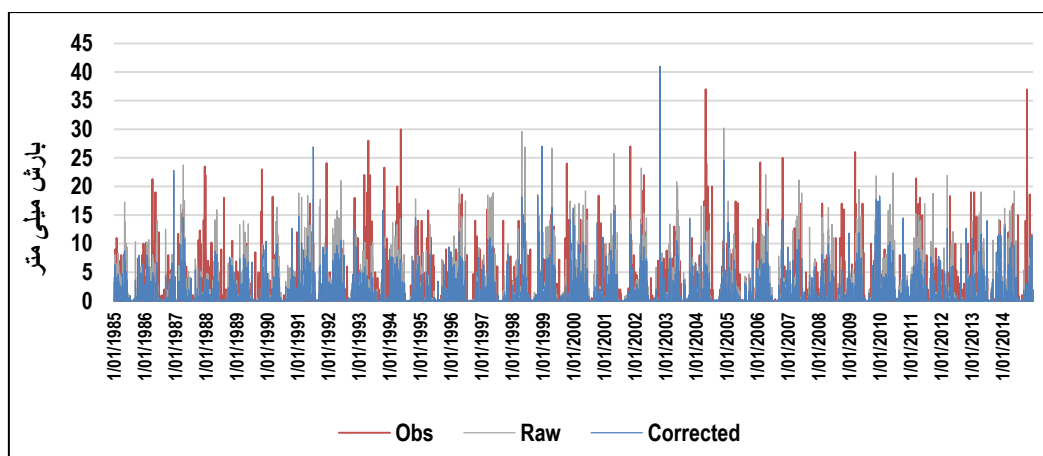
**معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ درصد *معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ درصد

توزیع فضایی تغییرات بارش نیز بر اساس آزمون من کندال و تخمینگر شیب سن نشان می‌دهد که به جز نواحی شمالی منطقه مورد و منطقه ارسباران و همچنین مناطقی به صورت پراکنده در شرق و غرب منطقه در سایر مناطق بارش دارای روند کاهشی است که بیشترین تغییرات آن نیز مربوط به نواحی جنوبی و جنوب غربی منطقه مورد مطالعه و همچنین جنوب شرق دریاچه ارومیه است.

در این پژوهش، ۷ مدل GCMs مورد ارزیابی قرار گرفت و پس از اصلاح اریبی به روش LSBC به ارزیابی عملکرد مدل‌ها، به بررسی داده‌های بارش مشاهداتی و تاریخی مدل‌ها در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) پرداخته شد. نمونه‌ای از اصلاح اریبی بر روی داده‌های بارش ایستگاه تبریز در شکل (۳) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌های بارش دارای عدم قطعیت زیادی است لذا انجام عمل اصلاح اریبی توانسته است به میزان زیادی عملکرد مدل را در شبیه‌سازی بلندمدت بارش در منطقه مورد مطالعه افزایش دهد. با توجه به تعداد زیاد ایستگاه‌ها و نمودارهای حاصل، فقط خروجی ایستگاه تبریز به صورت نمودار در این بخش ارائه گردید. برای مطالعه بیشتر می‌توان به مطالعات شرستا^۱ (۲۰۱۵) و تتچین^۲ (۲۰۱۲) در این زمینه مراجعه کرد.

1 Shrestha

2 Teutschbein



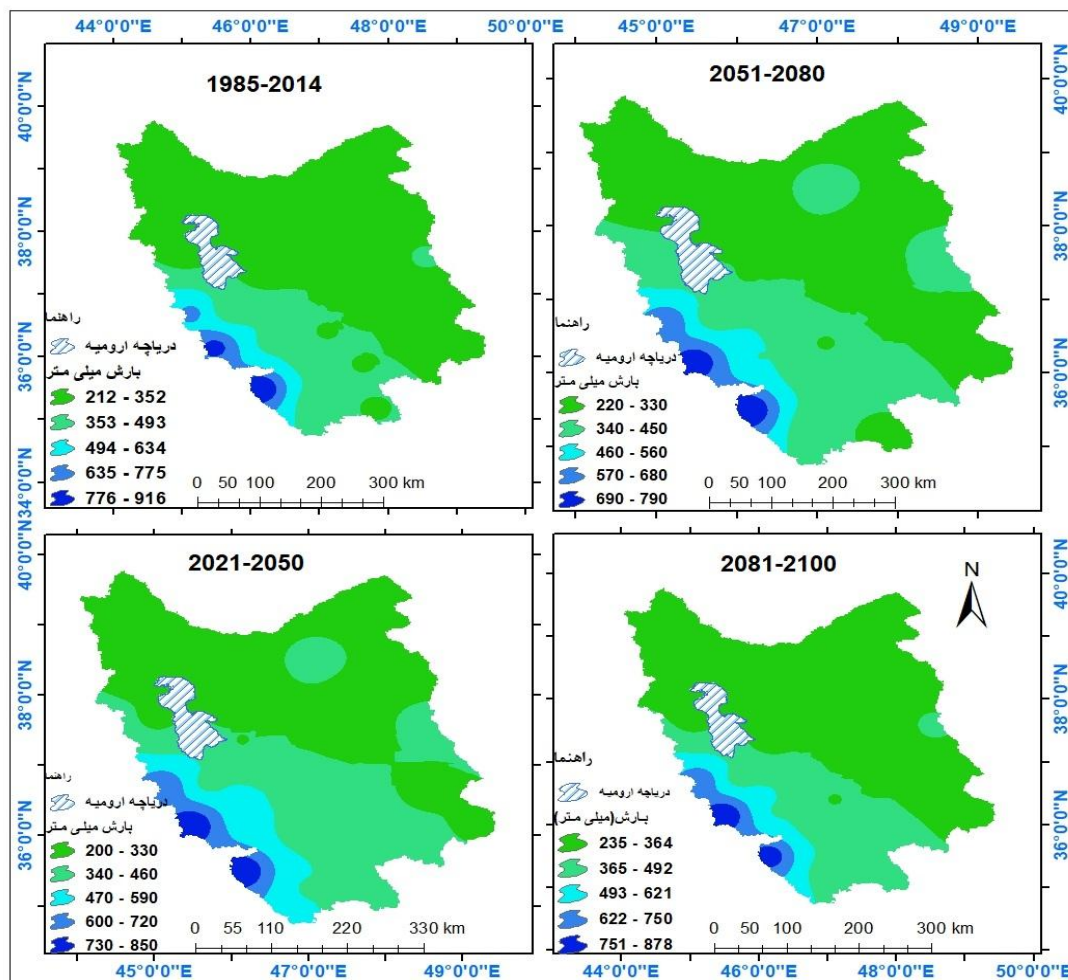
شکل ۳- مقادیر مشاهداتی، تاریخی و اصلاح شده بارش در ایستگاه تبریز در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴)

پس از مقیاس گاهی به نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌های مختلف با استفاده از شاخص مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه پرداخته شد. نتایج نشان داد دقت اکثر مدل‌های مورد بررسی در مناطق کم بارش و پربارش منطقه مورد مطالعه کمتر از مناطق دیگر است و می‌توان بیان کرد تغییرات زیاد بارش، توپوگرافی و سیستم‌های جوی مختلف از مهم‌ترین دلایل افزایش خطا در برخی ایستگاه‌ها و مناطق مورد مطالعه است. با این وجود برخی از مدل‌ها به‌طور رضایت بخشی مقادیر بارندگی‌های منطقه را شبیه‌سازی می‌کنند؛ اما نمی‌توانند الگوی بارش را به‌طور دقیق شبیه‌سازی کنند. در مجموع و بر اساس مقادیر R^2 مدل MPI-ESM1-2-LR در بیشتر پهنه مورد مطالعه از دقت بالاتری جهت شبیه‌سازی بارش برخوردار است. میزان متوسط R^2 این مدل با داده‌های بارش مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه برابر با ۰/۸۶ و میزان RMSE آن نیز برابر با ۱۹/۷ است. نتایج رتبه‌بندی عملکرد مدل‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی بارش شمال غرب کشور در جدول ۳ آورده شده است. پس از مدل MPI-ESM1-2-LR دو مدل MIROC-ES2L و MIROC6 هر دو با ضریب تعیین برابر با ۰/۸۵ بهترین مدل‌های CMIP6 برای پیش‌نگری بارش در منطقه مورد مطالعه هستند. همچنین مدل‌های MIROC-ES2L و FGOALS-g3 در حد متوسط هستند. مدل CanESM5 نیز با R^2 برابر با ۰/۴۹، ضعیف‌ترین عملکرد را در بین مدل‌های مورد بررسی جهت شبیه‌سازی بارش در منطقه مورد مطالعه داشته است. بر اساس شاخص RMSE و MAE نیز مدل MPI-ESM1-2-LR بهترین عملکرد را در بین مدل‌های مورد بررسی داشته است ولی در برخی مناطق دارای کم برآوردی و در برخی مناطق دیگر دارای بیش برآوردی بوده است. بر اساس دو شاخص مذکور نیز مدل FGOALS-g3 با RMSE برابر با ۴۰/۳ و MAE برابر با ۳۲/۸ ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است.

جدول ۳- رتبه‌بندی مدل‌های CMIP6 جهت شبیه‌سازی بارش بر اساس میانگین سنجه‌های خطاسنجی

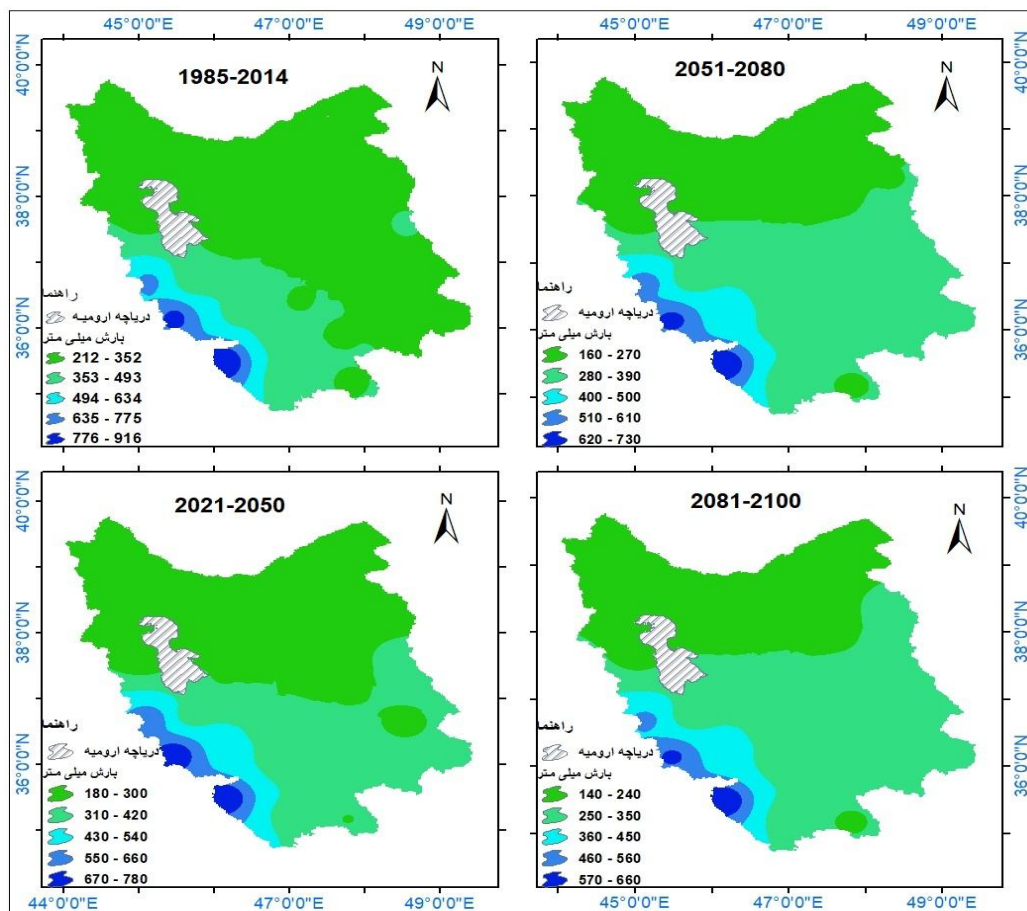
ردیف	مدل	ضریب تعیین	مجدور میانگین مربعات خطا	میانگین مطلق خطا
۱	MPI-ESM1-2-LR	۰/۸۶	۱۹/۷۱	۱۵/۱۰
۲	MIROC-ES2L	۰/۸۵	۲۲/۷۵	۱۹/۱۴
۳	MIROC6	۰/۸۵	۲۸/۰۵	۲۲/۸۹
۴	MRI-ESM2-0	۰/۸۲	۳۷/۱۴	۲۹/۸۴
۵	FGOALS-g3	۰/۶۵	۴۰/۳۲	۳۲/۷۶
۶	GFDL-ESM4	۰/۵۳	۳۶/۵۸	۲۸/۸۹
۷	CanESM5	۰/۴۹	۲۵/۹۱	۲۰/۳۹

پس از انتخاب بهترین مدل با بهترین عملکرد در شبیه‌سازی بارش منطقه مورد مطالعه یعنی مدل MPI-ESM1-2-LR، به پیش‌نگری بارش با استفاده از مدل مذکور در دوره‌های آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) بر اساس سه سناریوی مورد بررسی پرداخته شد. نتایج نشان داد که بر اساس سناریوی SSP1-2.6 بارش در منطقه مورد مطالعه در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) بین ۲۰۰ تا ۸۵۰ میلی‌متر خواهد بود که نسبت به دوره پایه به‌طور متوسط ۳/۲ درصد (۱۱/۷ میلی‌متر) در منطقه افزایش نشان می‌دهد. در دو دوره دیگر نیز (۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) میزان بارش به‌طور متوسط به ترتیب ۰/۰۶ و ۴/۶ درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت که نسبت به دوره قبلی کاهش زیادی را نشان می‌دهد. بر اساس توزیع فضایی بارش در دوره‌های آینده در هر سه دوره مورد بررسی بیشترین تغییرات افزایشی مربوط به بخش‌هایی شمالی منطقه مورد مطالعه یعنی منطقه جنگلی‌های ارسباران است که می‌تواند به دلیل پوشش جنگلی منطقه، نزدیکی به منابع آبی و همچنین توپوگرافی منطقه باشد. در سایر مناطق مورد مطالعه میزان بارش کاهش پیدا خواهد کرد که بیشترین میزان آن مربوط به نواحی جنوب غربی منطقه مورد مطالعه می‌باشد که جزو مناطق پربارش در منطقه مورد مطالعه نیز هستند. در مجموع میزان بارش بر اساس سناریوی SSP1-2.6 در هر سه دوره آینده نسبت به دوره پایه در منطقه مورد مطالعه افزایش پیدا خواهد کرد که میزان آن به‌طور متوسط در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ برابر با ۲/۶ درصد خواهد بود (شکل ۵).



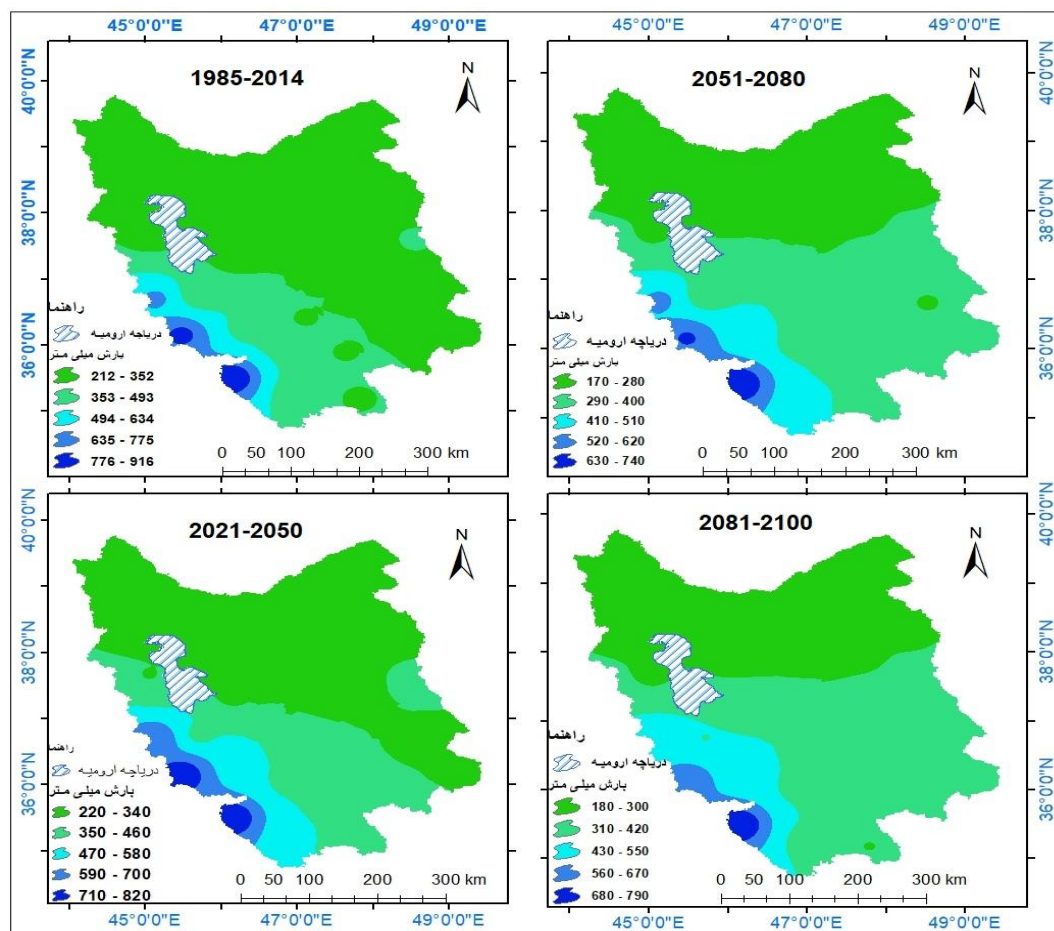
شکل ۵- توزیع فضایی بارش در منطقه شمال غرب کشور بر اساس سناریوی SSP1-2.6 در سه دوره آینده نسبت به دوره پایه

توزیع فضایی مقادیر بارش بر اساس سناریوی SSP3-7.0 نشان داد که بارش در منطقه مورد مطالعه در سه دوره آینده مورد بررسی (۲۰۲۱-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) به ترتیب، ۲۹/۸، ۴۸/۸ و ۸۲/۳ میلی متر کاهش خواهد یافت که نسبت به دوره پایه به ترتیب ۸/۱، ۱۳/۲ و ۲۲/۳ درصد کاهش را نشان می دهد. کمترین تغییرات کاهشی حاصل مربوط به نواحی شمالی منطقه و بیشترین تغییرات مربوط به نواحی جنوب غربی منطقه است. در مجموع با وجود تغییرات در برخی مناطق، میزان بارش با حرکت از شمال به جنوب منطقه مورد مطالعه کاهش پیدا خواهد کرد که این میزان کاهش در سطح منطقه در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ نسبت به دوره پایه به طور متوسط برابر با ۱۴/۵ درصد خواهد بود (شکل ۶).



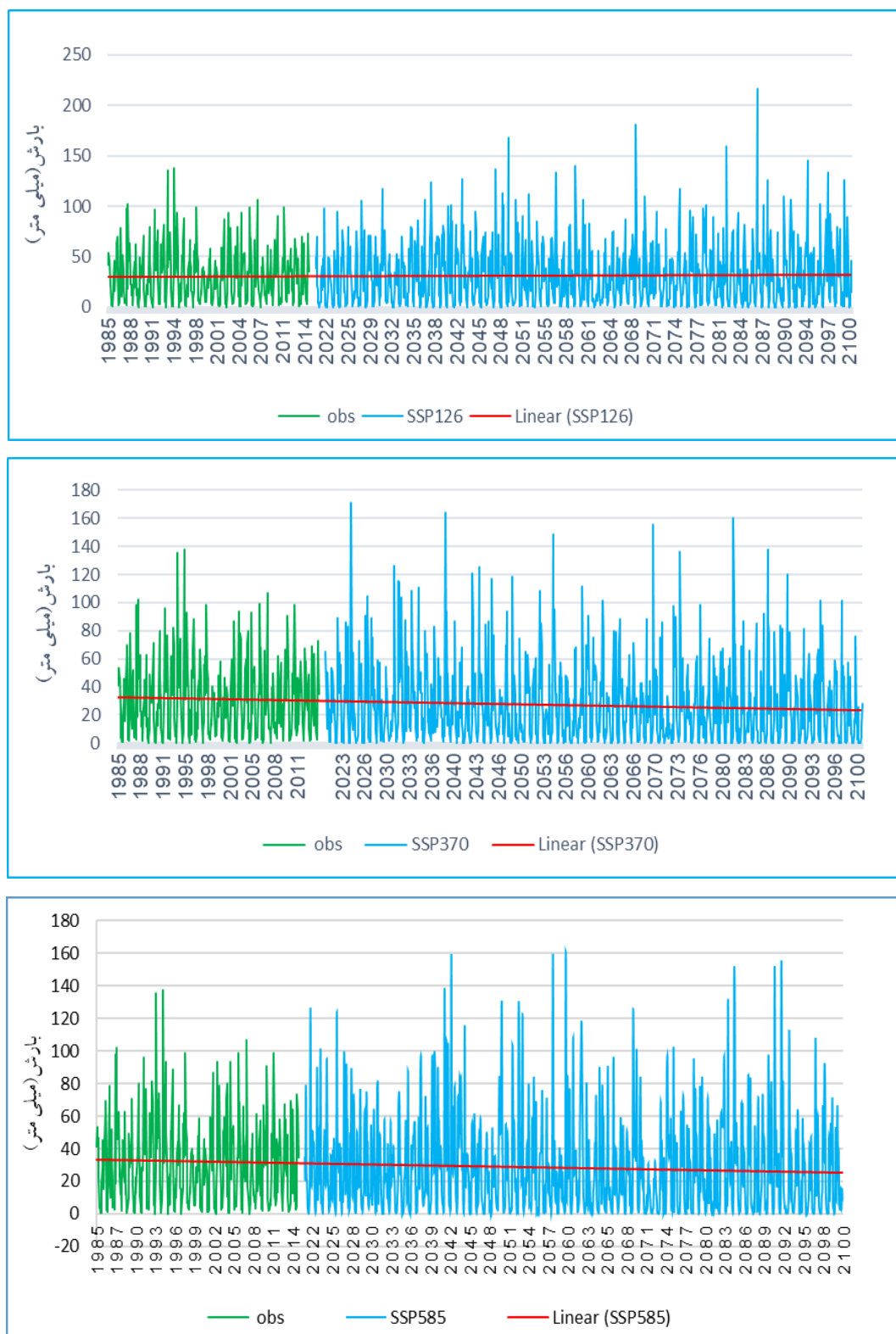
شکل ۶- توزیع فضایی بارش در منطقه شمال غرب کشور بر اساس سناریوی SSP3-7.0 در سه دوره آینده نسبت به دوره پایه

توزیع فضایی مقادیر بارش بر اساس سناریوی SSP5-8.5 نیز نشان داد که بارش در منطقه مورد مطالعه در دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) بین ۲۲۰ تا ۸۲۰ میلی‌متر خواهد بود که نسبت به دوره پایه ۳/۸ درصد (۱/۴ میلی‌متر) افزایش خواهد داشت؛ اما در دو دوره دیگر نیز (۲۰۵۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) میزان بارش به‌طور متوسط در منطقه مورد مطالعه به ترتیب، ۱۰/۲ و ۴/۵ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. بیشترین تغییرات افزایشی و کاهش‌ی در پهنه مورد مطالعه نیز همچون دو سناریوی قبلی به ترتیب مربوط به نواحی شمالی و جنوب غربی منطقه خواهد بود. در مجموع میزان بارش در پهنه مورد مطالعه بر اساس این سناریو در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ نسبت به دوره پایه ۳/۶ درصد کاهش پیدا خواهد کرد (شکل ۷).



شکل ۷- توزیع فضایی بارش در منطقه شمال غرب کشور بر اساس سناریوی SSP5-8.5 در سه دوره آینده نسبت به دوره پایه

در مجموع بر اساس نتایج حاصل از بررسی سناریوهای مختلف به جز سناریوی SSP1-2.6 روند بارش در دوره‌های مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه کاهش است و بیشتر تغییرات به مناطق پربارش منطقه مورد مطالعه اختصاص دارد. تغییرات افزایشی در برخی مناطق مورد مطالعه نیز می‌تواند ناشی از نزدیکی به منابع آبی و مسیر رطوبت دریای سیاه و مدیترانه و یا کوهستانی بودن و پوشش گیاهی و جنگلی آن منطقه باشد. مقایسه سناریوهای مختلف نیز نشان می‌دهد که سناریوی SSP3-7.0 تغییرات کاهش بیشتری نسبت به دیگر سناریوها نشان می‌دهد و برعکس سناریوی SSP1-2.6 تغییرات کمتری را نشان می‌دهد که ناشی از ویژگی‌هایی است که هر یک از سناریوها به نمایش می‌گذارند (شکل ۸).



شکل ۸- روند تغییرات بارش در منطقه شمال غرب کشور بر اساس سناریوهای مختلف تا پایان قرن ۲۱

۴- نتیجه‌گیری

پیشن‌نگری تغییرات بارش برای اطلاع از میزان تغییرات آن در آینده و در نظر گرفتن تمهیدات لازم برای تعدیل اثرات سوء ناشی از تغییرات آب‌وهوایی بر منابع آبی و کشاورزی از اهمیت زیادی برخوردار است. اهمیت پیشنهادی بارش زمانی آشکارتر است که در جایگاه‌های جغرافیایی ریزش ناچیز یا قابل توجه و یا ناگهانی حجم زیادی از بارش رخ دهد. لذا با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به ارزیابی ۷ مدل GCMs از CMIP6 در شبیه‌سازی بارش و همچنین پیشنهادی تغییرات بارش در منطقه شمال غرب کشور تحت سه سناریوی واداشت اجتماعی- اقتصادی (SSPs) در سه دوره زمانی آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) پرداخته شد. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل‌های GCM موردبررسی با استفاده از شاخص‌های خطاسنجی مختلف نشان داد که مدل MPI-ESM1-2-LR در منطقه مورد مطالعه از دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها جهت شبیه‌سازی بارش برخوردار است؛ بنابراین بر با استفاده از داده‌های مدل MPI-ESM1-2-LR و سناریوهای آن اقدام به پیشنهادی بارش گردید. نتایج حاصل از پیشنهادی تغییرات بارش نیز نشان داد که بارش بر اساس سناریوی خوش بینانه SSP1-2.6 تا پایان قرن ۲۱ در سطح منطقه حدود ۲/۶ درصد نسبت به دوره پایه افزایش پیدا خواهد کرد. با این وجود به‌جز نواحی شمالی منطقه مورد مطالعه در سایر پهنه‌های مورد مطالعه میزان بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت که بیشترین میزان کاهش آن نیز مربوط به نواحی پر بارش در جنوب غرب منطقه مورد مطالعه است. به‌جز ایستگاه‌های مریوان، ارومیه و تبریز و زرینه در سایر ایستگاه‌ها افزایش بارش معنی‌دار شده است که بیشترین افزایش در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ درصد مربوط به ایستگاه اردبیل می‌باشد؛ اما بر اساس سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 میزان بارش تا پایان قرن ۲۱ به ترتیب ۱۴/۵ و ۳/۶ درصد کاهش پیدا خواهد کرد و بیشترین کاهش آن نیز مربوط به نواحی جنوب غربی منطقه مورد مطالعه است. بر اساس سناریوی SSP3-7.0 در بیشتر ایستگاه‌های مورد مطالعه در منطقه بارش کاهشی و معنی‌دار شده است. بیشترین میزان کاهش بارش مربوط به ایستگاه‌های سردشت، خوی و جلفا می‌باشد که در سطح ۰/۰۱ درصد معنی‌دار شده است. نتایج حاصل از سناریوی SSP5-8.5 تا پایان قرن ۲۱ نیز نشان داد که بارش در منطقه به‌جز ایستگاه میانه در تمامی ایستگاه‌ها دارای روند کاهشی است و میزان این کاهش نسبت به سناریوی قبل اندکی بیشتر است. میزان این کاهش در مناطق غربی و جنوب غربی منطقه مورد مطالعه در ایستگاه‌های سردشت، پیرانشهر، مهاباد، پارس‌آباد، ماکو، جلفا و خوی در سطح ۰/۰۱ درصد معنی‌دار شده است. نتایج حاصل با مطالعات مجدی و همکاران (۲۰۲۲) مبنی بر کاهش بارش در بیشتر مناطق خاورمیانه و شمال آفریقا بر اساس متوسط ۲۳ مدل GCM، مطالعه **حیدری و همکاران (۱۳۹۸)** بر مبنای بررسی مدل‌های گردش کلی جو و استفاده از سناریوهای RCP مبنی بر کاهش بارش در دوره‌های (۲۰۷۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-

۲۰۸۰) و همچنین مطالعات **صلاحی و همکاران (۱۳۹۵)** مبنی بر کاهش ۸/۲ درصدی بارش در دهه ۲۰۵۰ در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه مطابقت دارد. از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان در مقابله با معضلاتی همچون خشکسالی، سیلاب‌های ناگهانی و تخریب‌های زیست‌محیطی و همچنین مدیریت منابع آب، کشاورزی، انرژی و غیره استفاده نمود و می‌تواند در اتخاذ برنامه‌های لازم برای سازگاری با کم بارشی و کاهش پیامدهای تغییرات اقلیمی کمک نماید.

کتابنامه

- حیدری تاشه کبود، شادیه؛ مفیدی، عباس؛ حیدری تاشه کبود، اکبر؛ ۱۳۹۸. چشم‌انداز تغییرات بارش در شمال غرب ایران با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو تحت سناریوهای اقلیمی، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۲۹، ۱۵۱-۱۳۳.
https://geoeh.um.ac.ir/article_33146.html
- خزائی، محمدرضا؛ تحسین‌زاده، نازیلا؛ شرافتی، احمد؛ ۱۳۹۸. تحلیل عدم قطعیت سناریوهای بارش و دمای حوضه سیرا تحت اثر تغییر اقلیم، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۴۵، ۵۱-۴۵.
<https://jwmsei.ir/article-1-815-fa.html>
- محمد خورشید دوست، علی؛ ساری صراف، بهروز؛ قرمز چشمه، باقر؛ جعفرزاده، فاطمه؛ ۱۳۹۷. پیش‌بینی بارش‌های سنگین سواحل جنوبی دریای خزر تحت شرایط تغییر اقلیم در دوره ۱۴۰۸ - ۱۳۸۹. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۴۲، ۱۲۹-۱۲۱.
<https://www.sid.ir/paper/134751/fa>
- زهرائی، اکبر؛ حسینی، سید اسعد؛ ۱۳۹۹. تغییر اقلیم و اثرات آن بر منابع آب، چاپ اول، انتشارات هاوار، ایلام.
<https://www.gisoom.com/book/>
- ذهبیون، باقر؛ گودرزی، محمدرضا؛ مساح بوانی، علیرضا؛ ۱۳۸۹. کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱ و ۲، ۵۸-۴۳.
<https://www.sid.ir/paper/213097/fa>
- شائمی، اکبر؛ حبیبی‌نوخندان، مجید؛ ۱۳۸۸. گرمایش جهانی و پیامدهای زیستی اکولوژیکی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
<https://www.gisoom.com/book/>
- صداقت‌کردار، علی؛ فتاحی، ابراهیم؛ ۱۳۸۷. شاخص‌های پیش‌آگاهی خشک‌سالی در ایران، فصلنامه جغرافیا و توسعه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۱، ۷۶-۵۹.
<https://ensani.ir/fa/article/>
- صلاحی، برومند؛ گودرزی، مسعود؛ حسینی، سید اسعد؛ ۱۳۹۵. پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در دهه ۲۰۵۰ در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه، نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، ۴، ۴۳۸-۴۲۵.
<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2016.107179>
- عزیزی، قاسم؛ ۱۳۸۳. تغییر اقلیم. تهران، نشر قومس.
<https://www.gisoom.com/book/>
- عزیزی، قاسم؛ صفرزاد، طاهر؛ محمدی، حسین؛ حسینی، فرجی سبکبار؛ ۱۳۹۵. ارزیابی و مقایسه داده‌های بازکاو شده بارش جهت استفاده در ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۸ (۱)، ۴۹-۳۳.
<https://ensani.ir/fa/article/352223>

- کثیری، مریم؛ گودرزی، مسعود؛ جانبازقبادی، غلامرضا؛ متولی، صدرالدین؛ ۱۴۰۰. پیش‌نگری تغییرات بارش در سواحل جنوبی دریای خزر تا پایان قرن ۲۱ با استفاده از سناریوهای مختلف واداشت تابشی. مجله آمایش جغرافیایی فضا، ۱۱ (۴۰)، ۱۱۸-۱۰۳.
<https://doi.org/10.30488/gps.2020.226852.3226>
- مسعودیان، ابوالفضل؛ کیخسروی، محمدصادق؛ رعیت پیشه، فاطمه؛ ۱۳۹۳. معرفی و مقایسه پایگاه داده اسفزاری با پایگاه داده gpcp, gpm, cmap, فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۱۲، ۸۸-۷۳.
<https://www.sid.ir/paper/29987/fa>

- Cheng, Q., Zhong, F., Wang, P., 2021. Potential linkages of extreme climate events with vegetation and large-scale circulation indices in an endorheic river basin in northwest China. *Atmospheric Research*, 247, 105256. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105256>.
- Ferreira, R N., Nissenbaum, M R., Rickenbach, TH M., 2018. Climate change effects on summertime precipitation organization in the Southeast United States. *Atmospheric Research*, 214, 348- 363. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.012>.
- Horton, D.E., Johnson, N.C., Singh, D., Swain, D.L., Rajaratnam, B., Diffenbaugh, N.S., 2015. Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends. *Nature*. 522 (7557), 465-469. <https://www.nature.com/articles/nature14550>,
- Hu, T.S., Lam, K.C., Ng, S.T., 2001. River flow time series prediction with a range dependent neural network. *Hydrological Science Journal*, 46, 729-745. <http://dx.doi.org/10.1080/02626660109492867>.
- Jiang, J., Zhou, T., Chen, X., Zhang, L., 2020. Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections, *Environ. Res. Lett*, 15, 1-4. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab7d03>.
- Kendall, M.G. 1975. Rank Correlation Measures, Charles Griffin, London. <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=2099295>.
- Kay, A. L.; Davies, H. N.; Bell, V. A.; Jones, R. G. 2009 Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Climatic Change*, 92 (1-2). 41-63. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-008-9471-4>.
- Lin, J.Y., Cheng, C.T., Chau, K.W., 2006. Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrological Science Journal*, 51, 599-612. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.4.599>.
- Majdi, F., Hosseini, S.A., Karbalaee, A., Kaseri, M., Marjanian, S. 2022. Future projection of precipitation and temperature changes in the Middle East and North Africa (MENA) region based on CMIP6. *Theoretical and Applied Climatology*, <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03916-2>
- Mendez, M; Maathuis, B; Griggs, D.H; Gamboa, L. F.A., 2020. Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica. *Water*, 12, 482. <http://dx.doi.org/10.3390/w12020482>.
- Nilawar, A P., Waikar, M L., 2019. Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India. *Science of The Total Environment*, 2. 2685-2696. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.334>.
- Sen, P.K., 1968. Estimates of the regression coefficients based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1968.10480934>.
- Shrestha, S., Shrestha, M., Babel, M.S., 2015. Modelling the potential impacts of climate change on hydrology of Indrawati River Basin in Nepal. *Environmental Earth Science simulating climate extremes over China? Adv. Atmos. Sci.*, <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9289-1>.

- Taylor, K.E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106, 7183-7192. <http://dx.doi.org/10.1029/2000JD900719>.
- Teutschbein, C., Seibert, J., 2012. Bias correction of regional climate model simulation for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *J. Hydrology*, 456-457. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>.
- Yang, X; Wood, E. F; Sheffield, J; Ren, L; Zhang, M. and Wang, Y., 2018. Bias Correction of Historical and Future Simulations of Precipitation and Temperature for China from CMIP5 Models. *Journal of Hydrometeorology*. <http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-17-0180.1>.
- You, Q; Cai,Z; Wu, F; Jiang. Z; Repin,N; Shem, S,S.P., 2021. Temperature dataset of CMIP6 models over China: evaluation, trend and uncertainty. *Climate Dynamics*. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-021-05691-2>.
- Zhang, L. Hua and D. Jiang., 2020. Assessment of CMIP6 model performance for temperature and precipitation in Xinjiang , China, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100128>.
- Zhang, X., Vincent, L.A., Hogg, W.D., Niitsoo, A., 2000. Temperature and rainfall trends in Canada during the 20th century. *Atmospheric Ocean*, 38, 395-429. <http://dx.doi.org/10.1080/07055900.2000.9649654>.
- Zheng, Y.T., Han, J.C., Huang, Y.F., Fassnacht, S.R., Xie, S., Lv, E., Chen, M., 2017. Vegetation response to climate conditions based on NDVI simulations using stepwise cluster analysis for the Three-River Headwaters region of China. *Ecol. Indic.* 92, 18-29. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.040>.

