

Projection of Heavy Rainfall in Northwestern Iran using the Statistical Downscaling Scaling of the Output of Selected CMIP6 Models by CMHyd Software

Shahi, A.¹  | Salahi, B.¹  | Najafi, M. S.² 

1. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2. Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute (WRI), Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: salahi@uma.ac.ir

(Received: 4 May 2025, Revised: 7 June 2025, Accepted: 29 July 2025, Published online: 20 Sep 2025)

Summary

Heavy rainfall is one of the types of environmental hazards that occur naturally and the role of humans in their aggravation is undeniable. In recent years, due to climate change, the occurrence of extreme weather events has increased. By using suitable climate models, it is possible to be prepared and reduce the harmful effects of climatic extremes through climate forecasting. In the northwest of Iran, the existence of mountainous topography provides the factor of ascent to create heavy convective rains, which is prone to flood phenomenon. In this research, two groups of observational and model data have been used daily to study heavy rainfalls. The daily rainfall data of 23 synoptic stations located in the northwest of Iran, including the provinces of East Azerbaijan, West Azerbaijan, Ardabil, North Kurdistan, and west of Zanjan province, were obtained from the Iranian Meteorological Organization (www.irimo.ir). The output of the CMIP6 models from the site <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/> for two periods 1990-2019 (historical period) and 2030-2059 (future period) based on three scenarios SSP1-2.6, SSP2 -4.5 and SSP5-8.5 were extracted as optimistic, medium and pessimistic scenarios, respectively. For this purpose, data of 8 AOGCM models (MIROC6, CANESM5, ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, NORESM2-LM, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0 and CNRM-CM6-1) from the CMIP6 model series were used. The raw rainfall output was first converted from NC to TXT format in the R software environment, and based on the coordinates of the stations in the study area, the output of the models was extracted for each station. After converting the unit to mm, the downscaling process was done by CMHyd software. The criterion of heavy rainfall in this research is the intensity of rainfall (99th percentile) and coverage of rainfall (simultaneous heavy rainfall in at least 30% of the stations). By calculating the PCC, KGE, RMSE, NSE, and R^2 statistical measures, the efficiency of the models was evaluated and the ranking of the models was determined based on their performance. Also, to select the appropriate downscaling method among the three methods of Precipitation Local Intensity, Power Transformation, and Distribution Mapping, statistical indices NSE, MAE, and Taylor's diagram were used. According to the heavy rainfall criteria used in this research, 43 extreme rainfall events were identified in the observation period (1990-2019). The verification of the raw output of the studied models with the downscaled results of the models by the KGE statistical measure indicates that the results of the models are optimized after downscaling compared to model output before downscaling. According to the results of this research, the CNRM model was identified as the best and the NORESM2 model as the worst model for simulation heavy rainfall in northwestern Iran. In the CNRM model, the highest and lowest values of the KGE index are assigned to Khalkhal and Sahand stations, respectively. The maximum and minimum measures of NSE also belong to Sahand and Kalibar stations, respectively. The maximum and minimum RMSE index belong to the Kalibar and Jolfa stations, respectively, and the maximum and minimum R index belong to the Zarineh and Parsabad stations, respectively. In the NORESM2 model, the maximum and minimum KGE index belong to the Saqez and Kalibar stations, respectively. The maximum and minimum values of NSE are assigned to Sahand and Mako stations, respectively, and the maximum and minimum RMSE indices are assigned to Kalibar and Jolfa stations, respectively. The maximum and minimum R measures are assigned to Piranshahr and Kalibar stations, respectively. In 23 synoptic stations and 8 models, the lowest RMSE value, and the highest NSE value jointly in all 8 models of the studied area belonged to Jolfa and Sahand stations, respectively based on 5 statistical measures. The produced ensemble model showed better performance than individual models. The results of the Mann-Kendall test in the base period (1990-2019) and the future period (2059-2030) based on z-statistics indicate a decreasing trend of heavy rainfall in the northwest of Iran, but it is not statistically significant. The results of the heavy rainfall projection in northwest Iran using 8 GCM models presented in the CMIP6 models at 23 synoptic stations, indicate that the number of heavy rainfall events in the studied area in the future period (2059-2030), compared to the previous period (1990-2019), will increase according to two pessimistic (SSP5-8.5) and moderate (SSP2-4.5) scenarios; but in the optimistic scenario (SSP1-2.6) there will be no change in the number of extreme precipitation events.

Keywords: CMHyd, CMIP6, Climate Change, Heavy Rainfall, Northwestern Iran.

Cite this article: Shahi, A., Salahi, B., & Najafi, M. S. (2025). Projection of Heavy Rainfall in Northwestern Iran using the Statistical Downscaling Scaling of the Output of Selected CMIP6 Models by CMHyd Software. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(2), 453-476. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.394471.1007687>

E-mail: (1) ali.shahi@uma.ac.ir (2) ms.najafi@wri.ac.ir



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.394471.1007687>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

پیش‌نگری رخدادهای بارش سنگین شمال غرب ایران با به‌کارگیری مقیاس کاهی آماری برونداد مدل‌های منتخب CMIP6 با نرم‌افزار CMHyd

علی شاهی^۱ | برومند صلاحی^۱ | محمدسعید نجفی^۲

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲. گروه مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: salahi@uma.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۲/۱۴، بازنگری: ۱۴۰۴/۳/۱۷، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۵/۷، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۶/۲۹)

چکیده

این پژوهش پیش‌نگری بارش سنگین در ۲۳ ایستگاه هم‌دید شمال غرب ایران را در سه دهه آتی ارائه می‌کند. برای این منظور، از داده‌های ۸ مدل AOGCM به نام‌های IPSL-CM6A-، NORESM2-LM، BCC-CSM2-MR، ACCESS-CM2، CANESM5، MIROC6، CNRM-CM6-1 و MRI-ESM2-0، LR، SSP5-8.5 و SSP2-4.5، SSP1-2.6 تحت سه سناریو CMIP6 از مجموعه مدل‌های سری CMIP6 تحت سه سناریو SSP5-8.5 و SSP2-4.5، SSP1-2.6 استفاده شد. دوره مشاهداتی ۱۹۹۰-۲۰۱۹ و دوره آینده ۲۰۳۰-۲۰۵۹ در نظر گرفته شدند. برونداد خام بارش در محیط نرم‌افزار R از فرمت NC به TXT تبدیل شد سپس خروجی مدل‌ها برای هر ایستگاه استخراج و بعد از تبدیل واحد به میلی‌متر توسط نرم‌افزار CMHyd مقیاس کاهی شد. کارایی مدل‌ها با محاسبه سنج‌های آماری PCC، KGE، RMSE، NSE و R^2 ارزیابی شدند و برای انتخاب روش مناسب مقیاس کاهی از میان سه روش Precipitation Local intensity، Power transformation و Distribution mapping از شاخص‌های آماری MAE، NSE و نمودار تیلور استفاده شد. به‌منظور کاهش عدم قطعیت با روش میانگین‌گیری وزنی، مدل همادی محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل همادی تولیدشده کارایی بهتری را نسبت به مدل‌های منفرد دارد. نتایج نشان داد که تعداد رخدادهای بارش سنگین در دوره آینده نسبت به دوره گذشته بر اساس دو سناریوی بدبینانه و متوسط افزایش خواهد یافت ولی در سناریو خوش‌بینانه تغییری در تعداد رخداد حدی بارش رؤیت نخواهد شد.

واژه‌های کلیدی: بارش سنگین، تغییر اقلیم، شمال غرب ایران، CMIP6، CMHyd.

۱. مقدمه

شرایط جدید آب‌وهوایی با آنچه در درازمدت از منطقه موردنظر رؤیت شده در تضاد است (آقاشاهی و همکاران، ۱۳۹۱). تغییر اقلیم یک پدیده مستند و مورد تأیید است که با تغییرات در الگوهای آب‌وهوایی شناخته می‌شود و به‌احتمال زیاد ادامه می‌یابد (دی اولویرا و همکاران، ۲۰۱۹). واداشت‌های اقلیمی مسبب اصلی تغییر اقلیم هستند، از قبیل تغییر سطح گازهای گلخانه‌ای در جو ناشی از فعالیت‌های انسانی یا به‌صورت طبیعی رخ می‌دهد (حمیدیان پور و شجاع، ۱۴۰۱). معتبرترین نظریه در زمینه تغییر اقلیم، تئوری گازهای گلخانه‌ای است (طائی سمیری و همکاران، ۱۳۹۴). ویژگی‌های تغییر اقلیم و آثار آن در مناطق مختلف

وقوع بارش‌های سنگین نشان‌دهنده بروز یک شرایط اقلیمی حدی (Extreme Climate Event) در منطقه است (فرج زاده، ۱۳۹۲). بارش‌های سنگین ایران بخش اندکی از تعداد روزهای بارشی را تشکیل می‌دهند و در تأمین آب کشور جزو منابع اصلی محسوب می‌شوند (علیجانی و همکاران، ۲۰۰۸). پس از دوران صنعتی شدن که انسان سرعت و میزان تولیدات خود را چندین برابر کرد، کره‌زمین با بحران جدیدی روبرو شد و واژه تغییر اقلیم توسط ویکونا و دراکوپ به ادبیات علمی جهان اضافه شد (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۵). تغییر اقلیم، دگرگونی شرایط جوی حاکم در یک مکان جغرافیایی است به‌طوری‌که این

استناد: شاهی، علی؛ صلاحی، برومند و نجفی محمدسعید (۱۴۰۴). پیش‌نگری رخدادهای بارش سنگین شمال غرب ایران با به‌کارگیری مقیاس کاهی آماری برونداد مدل‌های منتخب CMIP6 با نرم‌افزار CMHyd. مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۱ (۲)، ۴۵۳-۴۷۶. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.394471.1007687>

رایانامه: (۱) ali.shahi@uma.ac.ir (۲) ms.najafi@wri.ac.ir

دانشمندان جهت پیش‌نگری اقلیم آینده کره‌زمین اقدام به تولید سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای نموده‌اند (پدرسن و همکاران، ۲۰۲۲). میانگین دمای جهانی تا پایان قرن حاضر، افزایش ۱/۵ سلسیوس خواهد داشت (آلن و همکاران، ۲۰۱۹). گرم‌شدن اخیر سامانه آب‌وهوایی را می‌توان به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای نسبت داد که به دلیل فعالیت‌های انسانی است (استوکر و همکاران، ۲۰۱۴). افزایش دمای کره‌زمین به‌طور مستقیم باعث افزایش فراوانی رخدادهایی نظیر بارش سنگین خواهد شد و لذا مدیریت صحیح منابع آب الزامی است (لی و همکاران، ۲۰۲۰).

بر اساس رابطه کلاسیوس کلاپیرون، افزایش هر یک درجه ۰ سلسیوس گرمایش جهانی می‌تواند ۷ درصد بر محتوی بخار آب در جو بیفزاید و به همین میزان شدت بارش‌های سنگین را افزایش دهد (بابائیان و همکاران، ۱۴۰۲). با استفاده از داده‌های جهانی اگر دمای کره زمین به میزان یک درجه افزایش یابد، روان آب در مقیاس جهانی چهار درصد افزایش می‌یابد (کالکیک و همکاران، ۲۰۱۵). در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم به‌ویژه بارش‌های حدی در طراحی‌ها به منظور حفظ پایداری طولانی مدت انواع سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (تن تانه و دوتو آلدو رمو، ۲۰۱۸؛ شکوهی و حبیب نژاد، ۲۰۱۹). مطالعات انجام گرفته در ایران بیانگر روند کاهشی بارش، روند افزایش دما تحت تأثیر تغییر اقلیم بوده است (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹).

در مطالعه‌ای در جنوب و مرکز کانادا مشخص شد شدت بارش‌های سنگین به‌ویژه در اواخر قرن بیست افزایش یافته است (چنگ و همکاران، ۲۰۱۲). در منطقه فلات تبت به بررسی شاخص‌های حدی بارش تا سال ۲۰۹۹ پرداخته شد. نتایج حاکی از افزایش فراوانی و شدت بارش‌های سنگین بوده است (یانگ و همکاران، ۲۰۱۲). پیش‌نگری بارش‌های حدی در مقیاس زمانی زیر فصلی و فصلی بر اساس مدل همدادی در اداره هواشناسی استرالیا نتایج نشان داد که این مدل در پیش‌دیدهای دو هفته تا ماه نخست عملکرد مناسبی در پیش‌نگری مقادیر حدی بارش دارد

متفاوت است و نتایج مطالعات تغییر اقلیم در هر منطقه را نمی‌توان به سایر مناطق تعمیم داد (خزائی و همکاران، ۱۳۹۶). تغییر اقلیم می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر پارامترهای اقلیمی داشته باشد (دی هیپت و همکاران، ۲۰۱۹).

یکی از اهداف مدل‌سازی اقلیمی، پیش‌نگری رویدادهای حدی و مخاطره‌آمیز است به گونه‌ای که انسان قبل از رخداد آن قادر به آماده‌سازی باشد (حمیدیان پور و شجاع، ۱۴۰۱). هرگونه تغییر در دمای هوا منجر به تشدید فرین‌های آب‌وهوایی می‌شود (نی و همکاران، ۲۰۲۰). مطالعات متعدد نشان می‌دهد در دهه اخیر با وجود کاهش بارش سالانه، رخدادهای فرین بارشی در سراسر جهان به میزان چشمگیری افزایش یافته‌اند (کلوستره و همکاران، ۲۰۲۱).

انتخاب GCMها در مناطق گوناگون متفاوت خواهد بود، زیرا عملکرد GCM از نظر فضایی همگن نیست (زمانی و همکاران، ۲۰۲۰). IPCC در مورد مدل‌ها و سناریوها هیچ اولویت و رتبه‌بندی انجام نداده است (حمیدیان پور و شجاع، ۱۴۰۱). تغییر اقلیم با نوسانات اقلیمی تفاوت علمی دارد (گوهری و همکاران، ۲۰۱۳). عدم قطعیت یک حقیقت در به‌کارگیری مدل‌ها است (حمیدیان پور و شجاع، ۱۴۰۱). از آنجا که عوامل متعددی در پیش‌نگری پارامترهای اقلیمی منجر به عدم قطعیت می‌شوند اما عدم قطعیت مدل‌های GCM به عنوان اصلی‌ترین عامل ایجاد خطا شناسایی شده است (اقدامی‌راد و همکاران، ۲۰۱۷). می‌توان این عدم قطعیت‌ها را ناشی از سناریوهای انتشار، مدل‌های اقلیمی، پارامترهای اقلیمی و روش‌های مقیاس‌کاهی بیان کرد (قمیصی و همکاران، ۲۰۱۷). پیش‌نگری‌های بارش نسبت به دما درجه عدم قطعیت بیشتری دارند (چن و همکاران، ۲۰۱۳). در گزارش ششم تغییر اقلیم (AR6) تلفیق واداشت گازهای گلخانه‌ای خط سیرهای اقتصادی و اجتماعی جهت سناریوها استفاده شده است (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷). سایوکورامانابه دریافت که به منظور پژوهش در مورد تغییر اقلیم ضروری است که مدل‌های جوی و اقیانوسی با یکدیگر جفت شوند (به نقل از حمیدیان پور و شجاع، ۱۴۰۱).

(کینگ و همکاران، ۲۰۲۰). زمانی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از آماره‌های ضریب همبستگی، RMSE و نمودار تیلور اقدام به ارزیابی عملکرد مدل‌های دو پروژه CMIP5 و CMIP6 در پیش‌نگری بارش در شمال شرق ایران برای دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۷ کردند. نتایج پیش‌نگری همادی نشان داد که اریبی برای زمستان در تمام ایستگاه‌ها در مدل‌های CMIP6 کمتر از CMIP5 بود که نشان‌دهنده عملکرد بهتر و کاهش عدم قطعیت در مدل‌های CMIP6 است. بابائیان و همکاران (۲۰۲۱) افزایش معنی‌دار رخدادهای شدید بارشی را در شرایط گرمایش جهانی مشخص‌تر از تغییر در میانگین بارش برآورد کردند.

با توجه به عوامل محیطی و عناصر جغرافیایی در مناطق مختلف جهان، این مناطق با چالش‌های متمایزی روبرو خواهند شد؛ بنابراین، مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم حیاتی هست (لی و همکاران، ۲۰۲۲). در مطالعه تأثیر تغییر اقلیم روی بارش‌های حدی در شهر کاتماندو در نپال، نتایج نشان داد بارش‌های سنگین در آینده افزایش خواهد یافت و در این منطقه رخداد سیل نیز بیشتر خواهد شد (شریستا و همکاران، ۲۰۲۳). پژوهش تأثیرات تغییر اقلیم بر رخدادهای حدی بارش در مناطق ساحلی جهان حاکی از افزایش قابل توجه بارش سنگین در آینده است (یاداناپودی و همکاران، ۲۰۲۲). در پژوهش تأثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین در هند نتایج نشان دهنده افزایش بارش‌های حدی در آینده است (پانت و همکاران، ۲۰۲۴).

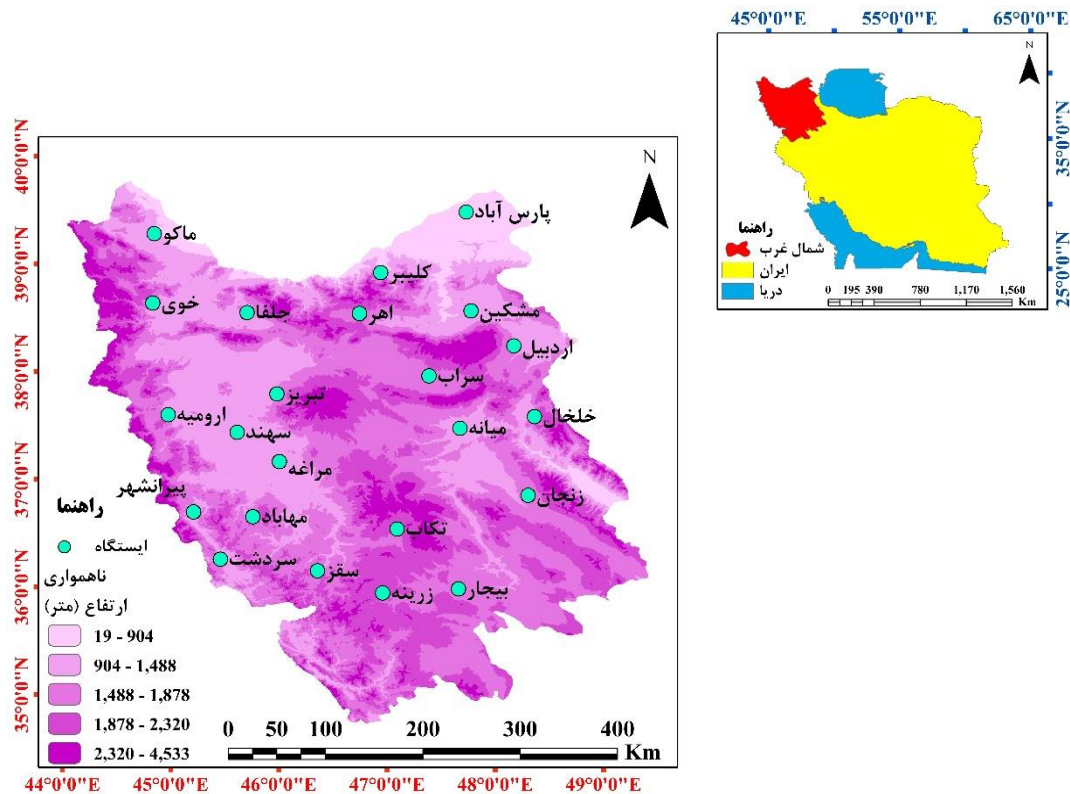
خورشیددوست و همکاران (۱۳۹۷) پیش‌بینی بارش‌های سنگین سواحل جنوبی دریای خزر تحت شرایط تغییر اقلیم در دوره ۱۳۸۹-۱۴۰۸ را انجام دادند. نتایج نشان داد که بر تعداد روزهای با بارش سنگین در دوره آتی نسبت به دوره پایه افزوده خواهد شد. عبدالعلی‌زاده و همکاران (۱۴۰۲) در پیش‌نگری چشم‌انداز آتی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه مبتنی بر مدل‌های CMIP6 بر اساس دو سناریو خوش‌بینانه و بدبینانه به این نتیجه رسیدند که دمای

منطقه مطالعه در هر دو سناریو افزایش خواهد یافت و بارش منطقه در هر دو سناریو کاهش خواهد یافت. چمانه‌فر و همکاران (۱۴۰۱) به پیش‌نگری شاخص‌های حدی بارشی و دمایی در دوره ۲۰۲۶-۲۱۰۰ بر اساس برونداد مدل‌های CMIP6 در مشهد پرداختند. محمودی و همکاران (۱۴۰۱) به شناسایی الگوهای ناهنجاری‌های همدیدی منجر به خشکسالی‌ها و ترسالی‌های فراگیر ایران پرداختند. مشایخ و لشکری (۱۴۰۲) ترسالی‌های شدید و خیلی شدید در جنوب ایران را به‌صورت هم‌دید تحلیل کردند. کریمی و حیدری (۱۴۰۲) در پژوهشی تغییرپذیری و روند تغییرات شدت-گستره ترسالی و خشکسالی در ایران را ارزیابی کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که استفاده از برونداد مدل‌های CMIP6 در برآورد بارش مورد توجه پژوهشگران است. شمال‌غرب ایران همواره شاهد بارش‌های سنگین بوده است و پیش‌نگری آن اهمیت فراوانی دارد. شناخت بهتر بارش‌های حدی حاصل از تغییر اقلیم در شمال‌غرب ایران و برنامه‌ریزی آگاهانه موجب افزایش سازگاری با این پدیده و مدیریت بهتر منابع آب به‌طور عام و مدیریت سیلاب به‌طور خاص می‌شود لذا در این مقاله به این مهم پرداخته شده است. هدف این مطالعه پیش‌نگری بارش سنگین در منطقه شمال‌غرب ایران است که برای این منظور از ۸ مدل گردش عمومی از مجموعه مدل‌های CMIP6 استفاده شد. این پژوهش با توجه به پیش‌نگری بارش سنگین انجام یافته دارای نوآوری است.

۲. روش پژوهش

۲-۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، شمال‌غرب ایران شامل استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل، شمال کردستان و غرب زنجان است و ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب در منطقه مطالعه، شامل ۲۳ ایستگاه هستند (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

ایستگاه همدیدی از ۲۳ ایستگاه (حداقل ۳۰ درصد)، به‌طور همزمان در منطقه مورد مطالعه دارای بارش حداقل ۲۰ میلی‌متر (صدک ۹۹ بارش‌های منطقه مورد مطالعه) بودند؛ به عنوان روز رویداد حدی بارش انتخاب شد که با توجه به این معیار، در دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۹)، ۴۳ رخداد بارش سنگین در شمال‌غرب ایران شناسایی شدند. در این مطالعه در ابتدا از بین مدل‌های سری CMIP6، آن دسته از مدل‌هایی که دارای داده‌هایی با دوره‌های مشترک تاریخی و پیش‌نگری بوده و تفکیک مکانی افقی ۲۵۰ کیلومتر و بهتر داشتند، مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۱).

بعد از استخراج برون‌داد مدل‌ها، به‌منظور کاهش عدم قطعیت از سه روش برای کوچک‌مقیاس کردن در نرم‌افزار CMHyd استفاده شد. برای مطالعات رخداد‌های شدید اقلیمی توصیه می‌شود از روش‌های Precipitation Local Distribution و Power Transform Intensity Mapping استفاده شود (بابائیان و همکاران، ۱۴۰۰) (جدول ۲). کارایی هر یک از سه روش مقیاس‌کاهی از طریق

در این پژوهش از دو گروه داده‌های مشاهداتی و مدل به‌صورت روزانه استفاده شده است. داده‌های بارش روزانه ۲۳ ایستگاه سینوپتیک واقع در شمال‌غرب ایران از سازمان هواشناسی ایران www.irimo.ir اخذ شد. نتایج مدل‌های CMIP6 مورد استفاده در گزارش ششم از سایت <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/> برای دو دوره زمانی ۱۹۹۰-۲۰۱۹ (دوره تاریخی) و ۲۰۳۰-۲۰۵۹ (دوره آتی) بر اساس سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌عنوان سناریوهای خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه استخراج شد.

برآوردهای حاصل از آزمون و خطا نشان داد که اگر صدک بالاتر از ۹۹ و مساحت تحت پوشش بارش سنگین (در منطقه مورد مطالعه) بیش از ۳۰ درصد انتخاب شود، شرایط همدید توجیه مناسبی برای بارش‌های سنگین ارائه خواهند داد (مفیدی و همکاران، ۱۳۸۶؛ علیجانی و همکاران، ۱۳۸۹؛ ستوده و علیجانی، ۱۳۹۴). بر اساس مطالب ذکر شده، در این تحقیق، روزهایی که حداقل ۷

نسبت به مرکز دایره و مقادیر RMSE به صورت دوایر متحدالمرکز نسبت به نقطه مرجع ترسیم می شود. برای انتخاب روش مناسب مقیاس کاهی از بین سه روشی که مطرح شد حدود ۱۵ درصد (۳ ایستگاه همدیدی) ایستگاه های منطقه تحقیق، بر اساس ارتفاع متفاوت، اقلیم (بارش) متفاوت و فاصله زیاد از همدیگر (برحسب کیلومتر) انتخاب شدند و بر روی نتایج تصحیح بایاس آن ها توسط سه روش مذکور، صحت سنجی با شاخص های آماری صورت گرفت.

سنجه های آماری MAE (میانگین خطای مطلق) (رابطه ۶)، NSE (ضریب کارایی نش-ساتکلیف) (رابطه ۵) و ترسیم نمودار تیلور مشخص شد. نمودار تیلور به طور همزمان نمایه های اریبی، انحراف معیار و جذر میانگین مربعات را در نظر می گیرد (تیلور، ۲۰۰۱). در این نمودار داده مشاهده شده به عنوان یک نقطه مرجع روی محور افقی مشخص می شود و بعد زاویه ای نشان دهنده همبستگی مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی است، مقادیر انحراف معیار به صورت دوایر متحدالمرکز

جدول ۱. مدل های CMIP6 با داده های بارش در دسترس پس از غربالگری داده های مشترک طبق سه سناریوی SSP و تاریخی.

مدل	کشور	موسسه توسعه دهنده	تفکیک افقی (بر حسب درجه)	ردیف
MRI	ژاپن	Meteorological Research Institute	$1/12 \times 1/12$	۱
MIROC6	ژاپن	National Institute for Environmental Studies, The University of Tokyo	$1/4 \times 1/4$	۲
NorESM2	نروژ	The Norwegian Earth System Model	$2/5 \times 1/9$	۳
BCC	چین	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	$1/12 \times 1/12$	۴
IPSL	فرانسه	Institute Pierre-Simon Laplace	$2/5 \times 1/26$	۵
ACCESS	استرالیا	CSIRO-ARCCSS; Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, and Bureau of Meteorology (Australia)	$1/92 \times 1/45$	۶
CanESM5	کانادا	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis-Canada	$2/81 \times 2/78$	۷
CNRM	فرانسه	Centre National de Recherche Météorologiques Scientifique (CNRM)	$1/4 \times 1/4$	۸

جدول ۲. فرایندها و فرمول ها مورد استفاده در روش های مقیاس کاهی نرم افزار CMHyd.

نام روش	توضیح روش مقیاس کاهی	منبع
Precipitation local intensity	به طور همزمان شدت و فرکانس بارش تصحیح می شود. ابتدا آستانه شدت بارش همراه تعیین می شود، سپس تعداد روزهای تر شبیه سازی فراتر از آستانه یاد شده با مقادیر دیدبانی مربوطه تطابق داده می شود.	شمیدلی و همکاران، ۲۰۰۶
Power transform	به دلیل ناتوانی روش های انتقال مانند LS و DC در شبیه سازی واریانس، روش غیر خطی به صورت ضریب توانی برای تصحیح واریانس بارش استفاده می شود.	لیندر و بوشاند، ۲۰۰۷
Distribution mapping	در این روش تابع توزیع داده های شبیه سازی به نحوی تصحیح می شود تا با توزیع دیدبانی مطابق باشد.	پانی و همکاران، ۲۰۱۰

۲-۲. مقیاس کاهی با استفاده از CMHyd

برونداد مدل‌های GCM به دلیل بزرگ‌مقیاس بودن به‌طور مستقیم قابل استفاده نیستند برای رفع مشکل تفکیک افقی مکانی کم از روش‌های مقیاس کاهی استفاده می‌شود (فلاح قاله‌ری و همکاران، ۲۰۱۹). جهت مقیاس کاهی برونداد مدل‌های گردش کلی از نرم‌افزار CMHyd استفاده شد. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی هیدرولوژی توسط (رادجنز و همکاران، ۲۰۱۶) در دانشگاه پردو آمریکا در محیط پایتون توسعه داده شده است که اغلب برای تصحیح اریبی داده‌های مقیاس کاهی شده دینامیکی از قبیل داده‌های CORDEX به کار می‌رود. در فرایند تصحیح اریبی الزاماً کاهش مقیاس انجام نمی‌شود و ممکن است تفکیک مکانی داده‌های تصحیح شده با داده‌های خام مشابه باشد. CMHyd از هشت روش تصحیح اریبی طی فرایندی مجزا برای بارش و دما استفاده می‌کند. از بین هشت روش یادشده، پنج روش مختص بارش است (جدول ۳). اجرای سریع و امکان انتخاب گزینه‌های مختلف از مزایای این نرم‌افزار است (بابائیان و همکاران، ۱۴۰۲). این نرم‌افزار نیازمند سه نوع داده، شامل داده دیدبانی، داده دوره گذشته مدل اقلیمی (تاریخی) و داده آینده (تحت سناریوهای مختلف) مدل‌های اقلیمی است. فرایند مقیاس کاهی در پنج مرحله انجام می‌شود که به ترتیب عبارت‌اند از: ورود متغیرهای دیدبانی (به صورت متنی)، انتخاب روش تصحیح اریبی، ورود داده‌های مدل در دوره تاریخی و سناریو (به دو صورت متنی یا NetCdf)، پردازش (شامل چک داده‌ها و اجرای مقیاس کاهی) و مرحله آخر (خروجی نتایج به دو شکل عددی و گراف). به عبارتی ابتدا داده‌های دوره

مشاهداتی به فرمت متنی به همراه متافایل مربوطه (مشخصات تک تک ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس مختصات) وارد نرم‌افزار می‌شود. در مرحله بعدی از بین ۵ روش ارائه شده در نرم‌افزار، روش تصحیح بایاس مورد نظر انتخاب می‌شود سپس داده‌های مربوط به مدل که در ۲ دوره شبیه‌سازی (تاریخی) و پیش‌نگری (آینده در قالب سناریو) هستند با یکی از حالت‌های متنی یا NC وارد نرم‌افزار می‌شود. گام آخر تعیین فایل خروجی برای انتقال داده‌های تصحیح شده توسط نرم‌افزار است (بابائیان و همکاران، ۱۴۰۰).

۲-۳. سنجه‌های ارزیابی عملکرد مدل‌ها

از شاخص‌های آماری برای راستی آزمایی عملکرد مدل‌ها استفاده می‌شود تا شباهت بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره تاریخی در قالب مقادیر آماری نشان داده شود (گوپتا و همکاران، ۲۰۰۹). برای تعیین دقت هر یک از ۸ مدل این تحقیق در ۲۳ ایستگاه شمال‌غرب ایران، پس از حذف اریبی، شاخص‌های آماری R^2 (ضریب تبیین)، RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا)، PCC (ضریب همبستگی پیرسن)، KGE (کلینگ - گوپتا)، NSE (ضریب کارایی نش - سائکلیف) برای آن‌ها محاسبه شد، در نهایت برآیند این آماره‌ها در ایستگاه‌های منطقه معیار ارزیابی قرار گرفت و از این طریق رتبه ۸ مدل در هر کدام از ۲۳ ایستگاه تعیین شد. مقادیر سنجه‌های NSE، KGE، R(PCC) و R^2 هرچه به عدد ۱ نزدیک باشند و MAE به عدد صفر نشان از توانایی بالای مدل هست (حمیدیان پور و شجاع، ۱۴۰۱).

جدول ۳. روش‌های اختصاصی مقیاس کاهی آماری برای بارش در نرم‌افزار CMHyd (رادجنز و همکاران، ۲۰۱۶).

ردیف	روش مقیاس کاهی	بارش
۱	Linear Scaling (LS) (multiplicative)	✓
۲	Linear Scaling (LS) (additive)	
۳	Delta-Change (DC) correction (multiplicative)	✓
۴	Delta-Change (DC) correction (additive)	
۵	Precipitation Local Intensity (LI) scaling	✓
۶	Power Transformation (PT) of precipitation	✓
۷	Variance Scaling (VS) of temperature	
۸	Distribution Mapping (DM) of precipitation and temperature	✓

۲-۴. وزن دهی مدل های GCM

با هدف کاهش عدم قطعیت در نتایج حاصل از مدل های CMIP6 این مدل ها بر مبنای دقت محاسبه شده در مرحله قبل، بر اساس معادله (۱) وزن دهی شدند. در این معادله، R_i رتبه هر مدل و W_i وزن هر مدل است (چن و همکاران، ۲۰۱۱).

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (1)$$

در این رابطه R رتبه هر مدل، W وزن هر مدل و n تعداد مدل ها است. تعیین وزن هر مدل با روش مبتنی به رتبه انجام گرفت (خان سالاری و همکاران، ۱۴۰۳).

۲-۵. مدل همادی

مدل همادی در مقایسه با مدل های منفرد نتایج بهتری ارائه می دهد (یو و کانگ، ۲۰۰۵). مدل همادی عدم قطعیت های مدل ساختاری را تا حد زیادی کاهش می دهد، پیش نگرهای آینده را به طور منطقی نشان می دهد (جی و همکاران، ۲۰۲۱). در این مرحله به منظور کاهش خطاهای به دست آمده اقدام به همادی سازی مدل های منفرد و تشکیل تنها یک سری داده که از مجموعه ای از مدل ها تشکیل شده است، برای هر کدام از ۲۳ ایستگاه همدید در شمال غرب شد. برای این منظور پس از تعیین وزن هر مدل با توجه به میزان تأثیر گذاری آن، اقدام به میانگین گیری وزنی از داده های مدل ها شد.

آزمون من کندانال مبتنی بر سری و یک روش غیر پارامتری است که به طور گسترده ای برای تعیین روند زمانی داده های

آب شناسی توسط سازمان هواشناسی جهانی توصیه شده است (زرنستاناک و همکاران، ۲۰۱۴). برای تعیین روند داده های مشاهداتی بارش در دوره پایه و همچنین روند یابی برونداد مدل همادی بر اساس سناریوهای خوش بینانه، متوسط و بد بینانه در دوره آتی از آزمون من کندانال استفاده شد. مراحل محاسبه آماره Z و شیب خط سن (s) در این آزمون در پژوهش (سلیمی، ۲۰۰۲) به تفصیل بیان شده است.

۲-۶. تصحیح بایاس به روش Linear Scaling (LS)

روش تصحیح خطی متعلق به خانواده روش عامل تغییر یا دلتا است (هی و همکاران، ۲۰۰۰) که از مزیت سادگی برخوردار است (رابطه ۲).

$$P^* = aP \quad a = O / P \quad (2)$$

P^* تعداد رخداد بارش تصحیح شده، O تعداد رخداد بارش دوره مشاهداتی، P تعداد رخداد بارش حدی دوره تاریخی مدل (حمیدیان پور و شجاع، ۱۴۰۱).

۳. نتایج و بحث

با توجه به معیارهای بارش سنگین در این مطالعه، ۴۳ رخداد حدی بارش در دوره مشاهداتی ۳۰ ساله (۱۹۹۰-۲۰۱۹) شناسایی شدند. از ۲۳ ایستگاه همدید در این پژوهش از طریق نمونه برداری بر اساس پهنه های اقلیمی، ارتفاعی متفاوت و همچنین تنوع رخداد بارش سنگین در دوره زمانی مورد مطالعه که در جدول زیر اشاره شده است، ۳ ایستگاه سردشت، خوی و پارس آباد به منظور مقایسه عملکرد ۳ روش مقیاس کاهی انتخاب شد (جدول ۴).

جدول ۴. مشخصات ۳ ایستگاه همدید منتخب.

پارامتر ایستگاه	میانگین بارش سنگین در دوره پایه	تعداد بارش سنگین در دوره پایه	موقعیت در منطقه مطالعه	ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر
پارس آباد	۲۲	۶	شمال شرقی	۷۷/۸
خوی	۲۸	۱۲	شمال غربی	۱۱۰۳/۴
سردشت	۵۵	۳۷	جنوب غربی	۱۵۵۶/۸

Intensity در هر ۸ مدل در هر سه ایستگاه از مقادیر نش ساتکلیف حاصل از دو روش دیگر بزرگ‌تر هستند. همچنین مقدار پارامتر میانگین خطای مطلق حاصل از روش Precipitation Local Intensity در هر ۸ مدل در هر سه ایستگاه از مقادیر میانگین خطای مطلق حاصل از دو روش دیگر کمتر هستند.

در جدول ۵ برای مقایسه ۳ روش تصحیح بایاس در ۳ ایستگاه مذکور برای ۸ مدل در دوره پایه، از سنج‌های آماری NSE و MAE استفاده شد، با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده توسط سنج‌های مذکور در جدول فوق برای هر سه ایستگاه، مقدار پارامتر Precipitation Local نش ساتکلیف حاصل از روش

جدول ۵. نتایج شاخص‌های آماری جهت ارزیابی روش‌های تصحیح بایاس، ایستگاه پارس‌آباد، ایستگاه خوی، ایستگاه سردشت.

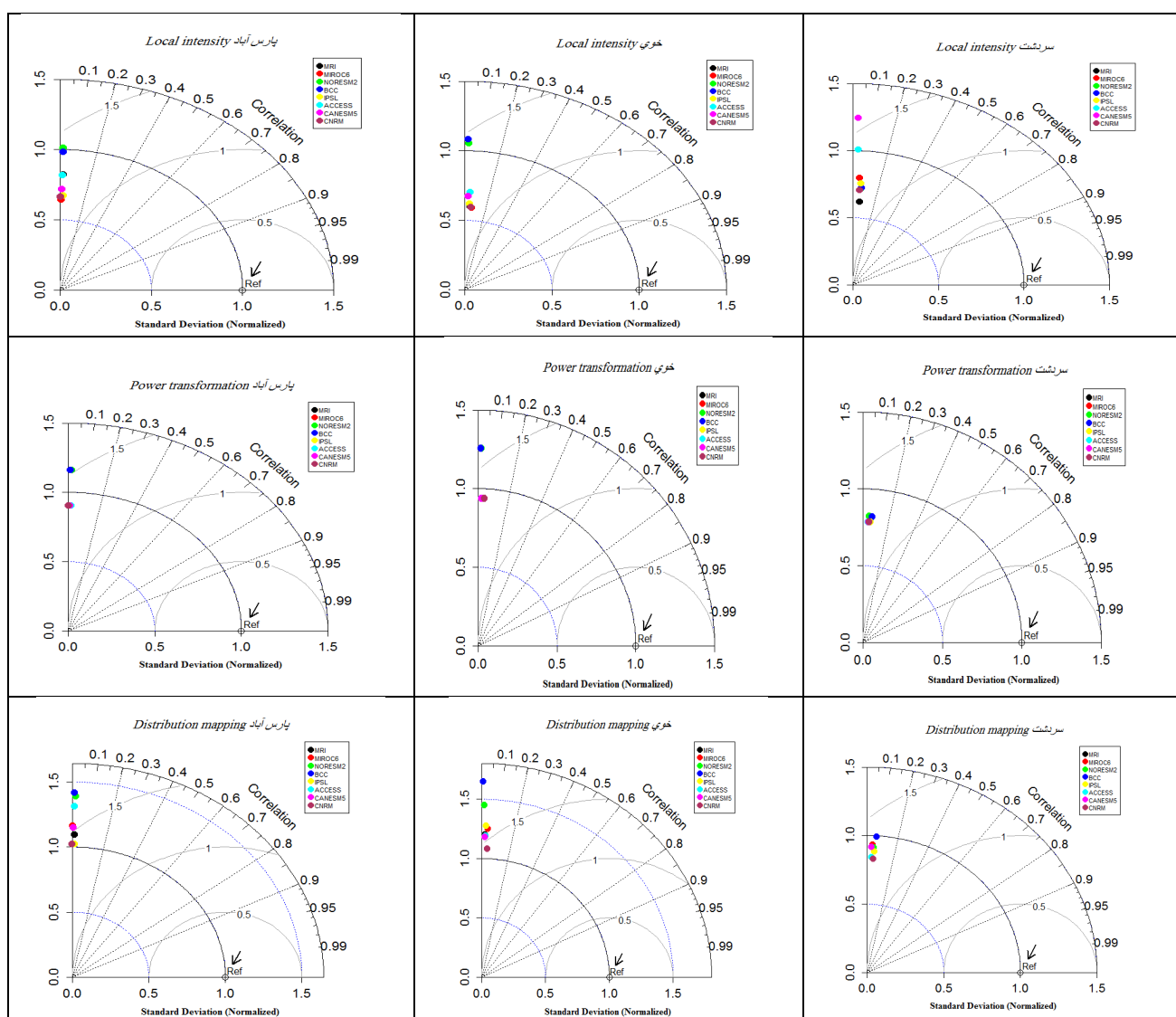
شاخص مدل	پارس‌آباد						a
	Precipitation local intensity		Power transform		Distribution mapping		
	NSE	MAE	NSE	MAE	NSE	MAE	
MRI	-۰/۵۹۴	۱/۳۶۸	-۰/۷۲۹	۱/۳۸	-۱/۰۷۹	۱/۴۲۷	
MIROC6	-۰/۳۷۷	۱/۳۶۷	-۰/۷۵۵	۱/۳۹	-۱/۲۴۷	۱/۴۶۳	
NORESM2	-۰/۹۱۷	۱/۴۰۶	-۱/۲۱۱	۱/۴۲۱	-۱/۷۴۶	۱/۴۸۸	
BCC	-۰/۸۶۷	۱/۴۰۸	-۱/۲۲۱	۱/۴۲۵	-۱/۸۲۲	۱/۵۰۹	
IPSL	-۰/۳۹۳	۱/۳۶۲	-۰/۷۳۲	۱/۳۸۵	-۰/۹۴	۱/۴۲	
ACCESS	-۰/۵۹۶	۱/۳۶۴	-۰/۷۳	۱/۳۷۳	-۱/۵۶۷	۱/۴۵۱	
CANESM5	-۰/۴۶۷	۱/۳۷۶	-۰/۷۴۶	۱/۳۸۵	-۱/۲۰۹	۱/۴۵۵	
CNRM	-۰/۴۰۴	۱/۳۷	-۰/۷۵۹	۱/۳۹۳	-۰/۹۷۱	۱/۴۳۹	

شاخص مدل	خوی						b
	Precipitation local intensity		Power transform		Distribution mapping		
	NSE	MAE	NSE	MAE	NSE	MAE	
MRI	-۰/۲۷	۱/۲۵۸	-۰/۷۴۸	۱/۲۹۴	-۱/۲۵	۱/۳۸۱	
MIROC6	-۰/۲۴۷	۱/۲۲۹	-۰/۷۲۵	۱/۲۶۵	-۱/۳۳	۱/۳۶۳	
NORESM2	-۰/۹۶۱	۱/۳۲۵	-۱/۳۸	۱/۳۵۷	-۱/۸۶	۱/۴۳۳	
BCC	-۱/۰۱۵	۱/۳۳۴	-۱/۳۸۶	۱/۳۵	-۲/۴۳	۱/۴۷۱	
IPSL	-۰/۲۹۵	۱/۲۵۵	-۰/۷۴۴	۱/۲۸۴	-۱/۴۱	۱/۳۷۹	
ACCESS	-۰/۳۹۳	۱/۲۶۸	-۰/۷۴۶	۱/۲۹۱	-۱/۲۳	۱/۳۶۷	
CANESM5	-۰/۳۷۴	۱/۲۷۳	-۰/۷۵۶	۱/۲۹۴	-۱/۲۲	۱/۳۵۷	
CNRM	-۰/۲۵۷	۱/۲۴۷	-۰/۷۲۲	۱/۲۸۱	-۰/۹۸	۱/۳۴۳	

شاخص مدل	سردشت						c
	Precipitation local intensity		Power transform		Distribution mapping		
	NSE	MAE	NSE	MAE	NSE	MAE	
MRI	-۰/۳۰۸	۴/۲۳۶	-۰/۵۴۱	۴/۳۲۵	-۰/۷۶۱	۴/۴۸۶	
MIROC6	-۰/۵۵۸	۴/۳۱۴	-۰/۵۴۲	۴/۳۱۱	-۰/۷۹۸	۴/۴۰۷	
NORESM2	-۰/۴۲۶	۴/۲۴۶	-۰/۵۹۶	۴/۳۱۷	-۰/۷۵	۴/۴۲۲	
BCC	-۰/۴۲۵	۴/۲۵۱	-۰/۵۵۸	۴/۳۰۲	-۰/۸۶۲	۴/۴۸۵	
IPSL	-۰/۴۸	۴/۲۵۷	-۰/۵۳	۴/۲۸۳	-۰/۶۹۳	۴/۳۶۴	
ACCESS	-۰/۹۵۶	۴/۵۳۲	-۰/۵۵۶	۴/۴۱۱	-۰/۶۵۶	۴/۳۲۳	
CANESM5	-۱/۴۷۷	۴/۵۵۷	-۰/۵۴۹	۴/۳۶۵	-۰/۷۸۴	۴/۱۸۶	
CNRM	-۰/۴۲۵	۴/۲۷۸	-۰/۵۴۲	۴/۳۲۷	-۰/۶۱۷	۴/۳۸	

با توجه به شکل ۲، نمودار تیلور ۳ ایستگاه مذکور برای مدل در دوره پایه، بر اساس پرونداد ۳ روش Power، Precipitation Local Intensity و Transform و Distribution Mapping نشان داد که روش Precipitation Local Intensity از دقت بالا و خطای کمتری نسبت به دو روش دیگر برخوردار است. در نمودارهای تیلور روش Precipitation Local Intensity متغیر انحراف استاندارد مقدار کمتر از ۱ را دارد در صورتی که در دو روش دیگر این متغیر

مقدار بزرگتر از ۱ را داراست، متغیر RMSE در Precipitation Local Intensity دارای محدوده ۱ تا ۱/۵ است در صورتی که در دو روش دیگر این متغیر مقدار بزرگتر از ۱/۵ را دارد. در نمودارهای تیلور ایستگاه‌های منتخب، ضریب همبستگی مقدار بزرگی را نشان نداد، به عبارتی برخلاف همبستگی دما که عدد بزرگی را نشان می‌دهد در مورد بارش همواره همبستگی پایین است که ریشه در ماهیت متغیر بارش دارد که با عدم قطعیت بالایی همراه است.



شکل ۲. نمودار تیلور سه روش تصحیح ارببی در سه ایستگاه منتخب در شمال غرب ایران در دوره ۳۰ ساله (پایه).

بیشینه و کمینه سنجه R به‌ترتیب به ایستگاه‌های زرینه و کلیر اختصاص دارد. در مدل MIROC6 بیشینه و کمینه سنجه KGE به‌ترتیب به ایستگاه‌های زرینه و سهند متعلق است، بیشینه و کمینه سنجه NSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های سهند و سقر اختصاص دارد، بیشینه و کمینه سنجه RMSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های کلیر و جلفا متعلق است و بیشینه و کمینه سنجه R به‌ترتیب به ایستگاه‌های ماکو و پارس‌آباد اختصاص دارد.

برونداد مدل‌های BCC و NORESM2 بر اساس آماره‌های ضریب همبستگی پیرسون، ضریب تعیین، نش ساتکیف، کلینگ گوپتا و ریشه دوم میانگین مربعات خطا ارزیابی شد و به تفکیک استان‌ها و ایستگاه‌های سینوپتیک در منطقه مورد تحقیق در جدول ۸ مشاهده می‌شود. در مدل BCC بیشینه و کمینه سنجه KGE به‌ترتیب به ایستگاه‌های سقر و سهند اختصاص دارد، بیشینه و کمینه سنجه NSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های سهند و جلفا تعلق دارد، بیشینه و کمینه سنجه RMSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های کلیر و جلفا متعلق است و بیشینه و کمینه سنجه R به‌ترتیب به ایستگاه‌های سردشت و کلیر اختصاص دارد. در مدل NorESM2 بیشینه و کمینه شاخص KGE به‌ترتیب به ایستگاه‌های سقر و کلیر تعلق دارد، بیشینه و کمینه سنجه NSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های سهند و ماکو اختصاص دارد، بیشینه و کمینه شاخص RMSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های کلیر و جلفا متعلق است و بیشینه و کمینه سنجه R به‌ترتیب به ایستگاه‌های پیرانشهر و کلیر اختصاص دارد.

بر اساس ارزیابی انجام‌گرفته توسط شاخص‌های آماری (جدول ۵) و نمودار تیلور (شکل ۲)، از میان سه روش تصحیح بایاس، روش Precipitation Local Intensity انتخاب شد و مقیاس‌کاهی برونداد مدل‌ها در این تحقیق با روش فوق در نرم‌افزار CMHyd انجام شد. راستی‌آزمایی برونداد خام مدل‌های مورد مطالعه با نتایج مقیاس‌کاهی شده مدل‌ها توسط سنجه آماری KGE، حاکی از بهینه شدن نتایج برونداد مدل‌ها بعد از مقیاس‌کاهی نسبت به قبل از مقیاس‌کاهی است. مقادیر KGE، در هر ۳ ایستگاه برای ۸ مدل نشان از نزدیک‌تر شدن مقادیر بعد از مقیاس‌کاهی به عدد ۱ و به عبارتی بزرگ‌تر بودن مقادیر بعد از مقیاس‌کاهی شدن از عدد قبل از مقیاس‌کاهی است. (جدول ۶).

نتایج راستی‌آزمایی برونداد مقیاس‌کاهی شده ۸ مدل، توسط ۵ سنجه آماری در ۲۳ ایستگاه همدید در دوره پایه در جدول‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰، منجر به رتبه‌بندی مدل‌ها در ۲۳ ایستگاه منطقه مورد مطالعه شد. برونداد مدل‌های MRI و MIROC6 بر اساس آماره‌های ضریب همبستگی، ضریب تبیین، نش ساتکیف، کلینگ گوپتا و ریشه دوم میانگین مربعات خطا مورد ارزیابی قرار گرفت و به تفکیک استان‌ها و ایستگاه‌های همدید در منطقه مطالعه در جدول ۷ مشاهده می‌شود. در مدل MRI بیشینه و کمینه سنجه KGE به‌ترتیب به ایستگاه‌های خلخال و سهند اختصاص دارد، بیشینه و کمینه سنجه NSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های سهند و پارس‌آباد اختصاص دارد، بیشینه و کمینه سنجه RMSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های مشکین‌شهر و جلفا تعلق دارد و

جدول ۶. صحت‌سنجی برونداد مدل‌ها قبل و بعد از تصحیح بایاس در ۳ ایستگاه منتخب در دوره پایه ۳۰ ساله.

مدل	MRI		MIROC 6		NorESM2		BCC		IPSL		ACCESS		CanESM5		CNRM	
شاخص	Kling-Gupta efficiency (KGE)															
ریز مقیاس	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد
پارس آباد	-۰/۰۳۲	۰/۰۰۲	-۰/۰۴۳۳	-۰/۰۵۶	۰/۰۰۵	۰/۰۱۴	-۰/۰۳۵	۰/۰۱۲	-۰/۰۶۰۵	-۰/۰۳۴	-۱/۱۸۹	-۰/۰۰۲	-۰/۰۲۳۸	-۰/۰۳۱	-۱/۱۶۶	-۰/۰۵۶
خوی	-۰/۰۸۰۸	-۰/۰۳۳	-۰/۰۶۴۹	-۰/۰۲۲	-۰/۰۳۳	۰/۰۱۶	-۰/۰۴۱	۰/۰۱۲	-۰/۰۹۲	-۰/۰۲۹	-۰/۰۵۸۴	-۰/۰۰۴	-۰/۰۵۳	-۰/۰۲۶	-۱/۰۵۰۳	-۰/۰۲۴
سردشت	-۰/۰۶۲	-۰/۰۳۲	-۰/۰۳۸۲	-۰/۰۰۷	-۰/۰۳۰۸	۰	-۰/۰۴۶	۰/۰۱۵	-۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	-۰/۰۲۷۲	۰/۰۱	-۰/۰۵۷۷	-۰/۰۲۴	۰/۰۰۵	-۰/۰۱

جدول ۷. صحت‌سنجی برون‌داد مدل‌های MRI و MIROC6.

ایستگاه		MRI					MIROC6				
		KGE	NSE	RMSE	R	R ²	KGE	NSE	RMSE	R	R ²
اردبیل	اردبیل	-۰/۰۰۷	-۰/۰۵۶۵	۳/۳۳۴	۰/۰۱۹	۰	۰/۰۰۱	-۰/۰۶۶۲	۳/۲۱۳	۰/۰۴۱	۰/۰۰۲
	خلخال	۰/۰۱۷	-۰/۰۵۴۷	۳/۹۰۷	۰/۰۴۱	۰/۰۰۲	۰/۰۳۴	-۰/۰۶۳۹	۴/۰۲	۰/۰۴۶	۰/۰۰۲
	پارس‌آباد	۰/۰۰۲	-۰/۰۶۴۷	۴/۱۱۳	۰/۰۱۸	۰	-۰/۰۰۵۶	-۰/۰۴۱۲	۳/۸۰۷	۰/۰۰۵	۰
	مشکین	-۰/۰۷۱۱	-۰/۰۲۱۳	۴۲/۰۱۷	۰/۰۲۶	۰/۰۰۱	-۰/۰۷۲۳	-۰/۰۲۱۵	۴۲/۰۴۶	۰/۰۱	۰
کردستان	زرینه	۰/۰۱۴	-۰/۰۳۸۶	۴/۲۸۱	۰/۰۶۵	۰/۰۰۴	۰/۰۵۳	-۰/۰۶۱۶	۴/۶۲۲	۰/۰۶۵	۰/۰۰۴
	سقز	۰/۰۰۲	-۰/۰۴۲۳	۵/۲۴۴	۰/۰۴۸	۰/۰۰۲	۰/۰۳۶	-۰/۰۶۵۱	۵/۶۴۸	۰/۰۴۷	۰/۰۰۲
	بیجار	-۰/۰۰۹	-۰/۰۳۳۱	۴/۰۴۳	۰/۰۵۸	۰/۰۰۳	۰/۰۲۳	-۰/۰۴۲۱	۴/۱۷۷	۰/۰۶۵	۰/۰۰۴
آذربایجان شرقی	سراب	-۰/۰۱	-۰/۰۴۴۵	۲/۷۰۳	۰/۰۳۵	۰/۰۰۱	۰/۰۳۲	-۰/۰۴۹۹	۲/۷۵۳	۰/۰۶	۰/۰۰۴
	مراغه	-۰/۰۰۶	-۰/۰۳۷۸	۳/۳۹۴	۰/۰۵۱	۰/۰۰۳	۰/۰۲۱	-۰/۰۳۶۱	۳/۳۷۳	۰/۰۷۵	۰/۰۰۶
	میانه	-۰/۰۴۱	-۰/۰۳۵۹	۳/۳۶۴	۰/۰۲۸	۰/۰۰۱	-۰/۰۱	-۰/۰۳۸	۳/۳۹	۰/۰۶	۰/۰۰۲
	تبریز	-۰/۰۱۵	-۰/۰۳۶	۲/۹۱۶	۰/۰۴۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	-۰/۰۳۰۹	۲/۸۶	۰/۰۷۵	۰/۰۰۶
	سهند	-۰/۰۷۲۳	-۰/۰۰۸۹	۲۸/۸۴۸	۰/۰۴۵	۰/۰۰۲	-۰/۰۷۴	-۰/۰۹۲	۲۸/۸۸۷	۰/۰۴۷	۰
	جلفا	۰/۰۰۶	-۰/۰۴۲	۲/۵۶۲	۰/۰۵۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	-۰/۰۳۳۲	۲/۴۸۲	۰/۰۷۵	۰/۰۰۵
	کلبر	-۰/۰۷۱۲	-۰/۰۴۸۴	۷۵/۲۵	۰/۰۰۹	۰	-۰/۰۷۱۶	-۰/۰۴۸۳	۵۷/۲۲۴	۰/۰۱۶	۰
آذربایجان غربی	اهر	۰/۰۰۳	-۰/۰۴۹۷	۳/۱۳۳	۰/۰۳۷	۰/۰۰۱	۰/۰۱۱	-۰/۰۳۶۴	۲/۹۹	۰/۰۶۹	۰/۰۰۴
	تکاب	-۰/۰۱۳	-۰/۰۳۴۸	۳/۶۴۵	۰/۰۵۱	۰/۰۰۳	۰/۰۲۷	-۰/۰۵۵۲	۳/۹۱۱	۰/۰۱۳	۰/۰۰۲
	ارومیه	-۰/۰۳۴	-۰/۰۳۲۵	۳/۹۴	۰/۰۴۱	۰/۰۰۲	-۰/۰۰۹	-۰/۰۴۰۲	۴/۰۵۳	۰/۰۶۷	۰/۰۰۲
	سردشت	-۰/۰۳۲	-۰/۰۳۱۱	۱۱/۳۳	۰/۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۰۷	-۰/۰۵۶۳	۱۲/۳۷۳	۰/۰۵	۰/۰۰۲
	پیرانشهر	-۰/۰۴۹	-۰/۰۲۷۷	۹/۳۷۹	۰/۰۵۶	۰/۰۰۳	-۰/۰۲۳	-۰/۰۳۰۲	۹/۴۷۱	۰/۰۴۴	۰/۰۰۵
	ماکو	-۰/۰۲۶	-۰/۰۳۰۸	۲/۹۸۹	۰/۰۵۱	۰/۰۰۳	۰/۰۱۱	-۰/۰۲۹۲	۲/۹۷۱	۰/۰۴۶	۰/۰۰۷
	خوی	-۰/۰۳۳	-۰/۰۳۰۳	۳/۱۹۹	۰/۰۴۸	۰/۰۰۲	-۰/۰۲۲	-۰/۰۲۷۸	۳/۱۶۸	۰/۰۶۹	۰/۰۰۴
زنجان	مهاباد	-۰/۰۱۵	-۰/۰۴۰۱	۴/۷۶۳	۰/۰۳۹	۰/۰۰۲	۰/۰۲۷	-۰/۰۳۸۲	۴/۷۳۲	۰/۰۷۵	۰/۰۰۶
	زنجان	-۰/۰۲۲	-۰/۰۴۴۴	۳/۵۱۴	۰/۰۲۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	-۰/۰۴۷۵	۳/۵۵۲	۰/۰۴	۰/۰۰۲

جدول ۸. صحت‌سنجی برون‌داد مدل‌های BCC و NorESM2.

ایستگاه		NorESM2					BCC				
		KGE	NSE	RMSE	R	R ²	KGE	NSE	RMSE	R	R ²
اردبیل	اردبیل	۰/۰۰۲	-۱/۳۰۵	۴/۰۳۵	۰/۰۱۷	۰	۰/۰۰۵	-۱/۳۳۴	۴/۰۶	۰/۰۲۳	۰/۰۰۱
	خلخال	۰/۰۱۹	-۱/۲۴۸	۴/۷۰۹	۰/۰۳۲	۰/۰۰۱	۰/۰۲۹	-۱/۲۲۶	۴/۶۸۶	۰/۰۴۳	۰/۰۰۲
	پارس‌آباد	۰/۰۱۴	-۰/۰۹۹۹	۴/۵۳۱	۰/۰۱۵	۰	۰/۰۱۲	-۰/۰۹۴۵	۴/۴۶۹	۰/۰۱۳	۰
	مشکین	-۰/۰۷۲۷	-۰/۰۲۲۴	۴۲/۱۹۸	-۰/۰۲۴	۰/۰۰۱	۰/۰۲۲	-۰/۰۲۲۲	۴۲/۱۷۳	-۰/۰۱۵	۰
کردستان	زرینه	۰/۰۳۷	-۰/۰۹۶۹	۵/۱۰۲	۰/۰۳۹	۰/۰۰۲	۰/۰۴۵	-۱/۰۵۵	۵/۲۱۳	۰/۰۴۹	۰/۰۰۲
	سقز	۰/۰۴۶	-۰/۰۸۲۵	۵/۹۳۷	۰/۰۴۸	۰/۰۰۲	۰/۰۵۳	-۰/۰۸۶۴	۶	۰/۰۵۴	۰/۰۰۳
	بیجار	۰/۰۳۹	-۱/۰۰۸	۵/۰۸۷	۰/۰۴۶	۰/۰۰۲	۰/۰۳۶	-۱/۰۰۳	۴/۹۵۹	۰/۰۳۸	۰/۰۰۱
آذربایجان شرقی	سراب	-۰/۰۳۴	-۱/۰۶۶	۳/۶۶۷	۰/۰۱۶	۰	۰/۰۲۴	-۱/۰۷۱۲	۳/۷۰۳	۰/۰۴۲	۰/۰۰۲
	مراغه	۰/۰۲۹	-۱/۰۳۱	۴/۲۲۱	۰/۰۳۷	۰/۰۰۱	۰/۰۴۳	-۱/۰۴۵	۴/۲۳۶	۰/۰۵۴	۰/۰۰۳
	میانه	۰/۰۰۲	-۱/۰۵۶	۴/۲۳۸	۰/۰۰۸	۰	۰/۰۰۳	-۱/۰۴۶	۴/۲۲۹	۰/۰۳۹	۰/۰۰۱
	تبریز	۰/۰۰۳	-۱/۰۲۶۷	۳/۷۶۴	۰/۰۱۶	۰	۰/۰۱۴	-۱/۰۳۸۹	۳/۸۶۵	۰/۰۴۳	۰/۰۰۲
	سهند	-۰/۰۷۲۲	-۰/۰۱	۲۹/۰۰۴	-۰/۰۰۶	۰	-۰/۰۷۳	-۰/۰۱۰۵	۲۹/۰۰۷	-۰/۰۲۴	۰/۰۰۱
	جلفا	-۰/۰۲۳	-۱/۰۶۲	۳/۴۸	۰/۰۲۷	۰/۰۰۱	-۰/۰۴۲	-۱/۰۴۲	۳/۵۶۱	۰/۰۲	۰
	کلبر	-۰/۰۷۲۹	-۰/۰۴۹۲	۵۷/۴۰۹	-۰/۰۳۸	۰/۰۰۱	-۰/۰۷۲۲	-۰/۰۴۹۱	۵۷/۳۸۵	-۰/۰۲۸	۰/۰۰۱
آذربایجان غربی	اهر	-۰/۰۰۲	-۱/۰۳۹۵	۳/۹۶۳	۰/۰۲۲	۰	۰	-۱/۰۴۴۵	۴/۰۰۳	۰/۰۲۹	۰/۰۰۱
	تکاب	۰/۰۲۲	-۱/۰۶۳	۴/۵۰۸	۰/۰۲۵	۰/۰۰۱	۰/۰۳۱	-۱/۰۴۸	۴/۶۰۱	۰/۰۳۹	۰/۰۰۱
	ارومیه	۰/۰۱۷	-۰/۰۹۲۲	۴/۷۴۶	۰/۰۲	۰	۰/۰۳۸	-۰/۰۸۶۱	۴/۶۷	۰/۰۴۱	۰/۰۰۲
	سردشت	۰	-۰/۰۴۳	۱۱/۸۳۵	۰/۰۵۶	۰/۰۰۳	۰/۰۱۵	-۰/۰۴۲۹	۱۱/۸۳۲	۰/۰۶۸	۰/۰۰۵
	پیرانشهر	-۰/۰۰۴	-۰/۰۴۰۸	۹/۸۴۸	۰/۰۵۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	-۰/۰۴۳۸	۹/۹۵۴	۰/۰۴۸	۰/۰۰۲
	ماکو	-۰/۰۰۴	-۱/۰۴۴۳	۴/۰۸۶	۰/۰۲۳	۰/۰۰۱	۰/۰۲۶	-۱/۰۲۵۸	۳/۹۲۸	۰/۰۴۲	۰/۰۰۲
	خوی	۰/۰۱۶	-۱/۰۷۴	۴/۰۳۶	۰/۰۱۹	۰	۰/۰۱۲	-۱/۰۳۵	۴/۰۹۴	۰/۰۱۷	۰
زنجان	مهاباد	۰/۰۳۹	-۰/۰۸۴۸	۵/۴۷۱	۰/۰۴۱	۰/۰۰۲	۰/۰۴۲	-۰/۰۹۰۷	۵/۵۵۸	۰/۰۴۳	۰/۰۰۲
	زنجان	۰/۰۱۶	-۱/۰۳۹	۴/۲۷۸	۰/۰۲۲	۰	۰/۰۲۱	-۱/۰۶۷	۴/۳۰۵	۰/۰۲۸	۰/۰۰۱

کلیر و جلفا متعلق است و بیشینه و کمینه سنجه R به‌ترتیب به ایستگاه‌های مهاباد و سهند اختصاص دارد. برون‌داد مدل‌های CanESM5 و CNRM بر اساس آماره‌های ضریب همبستگی پیرسون، ضریب آشکارسازی، نش ساتکلیف، کلینگ گوپتا و ریشه دوم میانگین مربعات خطا مورد ارزیابی قرار گرفت و به تفکیک استان‌ها و ایستگاه‌های سینوپتیک در منطقه مطالعه در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود. در مدل CanESM5 بیشینه و کمینه سنجه KGE به‌ترتیب به ایستگاه‌های خلخال و سهند اختصاص دارد، بیشینه و کمینه سنجه NSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های سهند و سقز تعلق دارد، بیشینه و کمینه شاخص RMSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های کلیر و جلفا اختصاص دارد و بیشینه و کمینه سنجه R به‌ترتیب به ایستگاه‌های خلخال و پارس آباد متعلق است.

برون‌داد مدل‌های ACCESS و IPSL بر اساس آماره‌های ضریب همبستگی، ضریب تشخیص، نش ساتکلیف، کلینگ گوپتا و ریشه دوم میانگین مربعات خطا مورد بررسی قرار گرفت و به تفکیک استان‌ها و ایستگاه‌های همدید در منطقه پژوهش در جدول ۹ مشاهده می‌شود. در مدل ACCESS بیشینه و کمینه شاخص KGE به‌ترتیب به ایستگاه‌های سقز و مشکین شهر متعلق است، بیشینه و کمینه سنجه NSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های سهند و سردشت اختصاص دارد، بیشینه و کمینه سنجه RMSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های کلیر و جلفا تعلق دارد و بیشینه و کمینه سنجه R به‌ترتیب به ایستگاه‌های ماکو و مشکین شهر اختصاص دارد. در مدل IPSL بیشینه و کمینه شاخص KGE به‌ترتیب به ایستگاه‌های مهاباد و سهند اختصاص دارد، بیشینه و کمینه سنجه NSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های سهند و زرینه تعلق دارد، بیشینه و کمینه سنجه RMSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های

جدول ۹. صحت‌سنجی برون‌داد مدل‌های ACCESS و IPSL

ایستگاه		IPSL					ACCESS				
		KGE	NSE	RMSE	R	R ²	KGE	NSE	RMSE	R	R ²
اردبیل	اردبیل	-۰/۰۴۵	-۰/۳۱۸	۳/۰۵۱	۰/۰۳۵	۰/۰۰۱	۰/۰۲۹	-۰/۶۸۱	۳/۴۴۵	۰/۰۳۹	۰/۰۰۲
	خلخال	-۰/۰۲۶	-۰/۴۳۱	۳/۷۵۷	۰/۰۲۵	۰/۰۰۱	۰/۰۳	-۰/۸۲۳	۴/۲۴۱	۰/۰۳۲	۰/۰۰۱
	پارس‌آباد	-۰/۰۳۴	-۰/۴۲۹	۳/۸۳	۰/۰۱۹	۰	-۰/۰۰۲	-۰/۶۵	۴/۱۱۵	۰/۰۱۵	۰
	مشکین	-۰/۷۲۸	-۰/۲۱۳	۴۲/۰۱	۰/۰۱۵	۰	-۰/۷۳۴	-۰/۲۲	۴۲/۱۳۱	-۰/۰۱۵	۰
کردستان	زرینه	۰/۰۳۹	-۰/۷۳۶	۴/۷۹۱	۰/۰۴۴	۰/۰۰۲	۰/۰۲۹	-۰/۹۴۵	۵/۰۷۲	۰/۰۲۹	۰/۰۰۱
	سقز	۰/۰۱۶	-۰/۴۹۷	۵/۳۷۸	۰/۰۴۸	۰/۰۰۲	۰/۰۳۲	-۰/۹۲۲	۶/۰۹۳	۰/۰۳۲	۰/۰۰۱
	بیجار	۰/۰۱۸	-۰/۶۳۶	۴/۴۸۲	۰/۰۳۲	۰/۰۰۱	۰/۰۲۷	-۰/۷۹۶	۴/۶۹۵	۰/۰۳	۰/۰۰۱
آذربایجان شرقی	سراب	-۰/۰۲۹	-۰/۳۲۷	۲/۵۹۱	۰/۰۴۴	۰/۰۰۲	۰/۰۲۴	-۰/۷۰۴	۲/۹۳۵	۰/۰۳۳	۰/۰۰۱
	مراغه	۰/۰۵۸	-۰/۶۶۲	۳/۷۲۸	۰/۰۶۵	۰/۰۰۴	۰/۰۲۳	-۰/۷۴۲	۳/۸۱۷	۰/۰۲۹	۰/۰۰۱
	میانه	-۰/۰۳۶	-۰/۳۱۲	۳/۳۰۶	۰/۰۴۳	۰/۰۰۲	۰/۰۲۳	-۰/۶۷۷	۳/۷۳۸	۰/۰۳۳	۰/۰۰۱
	تبریز	۰/۰۱۹	-۰/۳۸۲	۲/۹۳۹	۰/۰۶۹	۰/۰۰۵	۰/۰۲۷	-۰/۶۴۷	۳/۲۰۹	۰/۰۴	۰/۰۰۲
	سهند	-۰/۷۴۴	-۰/۰۹۳	۲۸/۹۱۱	۰/۰۰۳	۰	-۰/۷۲۷	-۰/۰۹۲	۲۸/۸۹۴	۰/۰۲۳	۰/۰۰۱
	جلفا	-۰/۰۲۵	-۰/۳۵۶	۲/۵۰۴	۰/۰۴۱	۰/۰۰۲	۰	-۰/۵۲	۲/۶۵۱	۰/۰۳۱	۰/۰۰۱
	کلیر	-۰/۷۱۲	-۰/۴۸۴	۵۷/۳۵۲	۰/۰۰۹	۰	-۰/۷۱	-۰/۴۸۶	۵۷/۲۸۳	۰/۰۰۴	۰
آذربایجان غربی	تکاب	-۰/۰۱۳	-۰/۴۲۱	۳/۷۴۲	۰/۰۳۷	۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱	-۰/۸۴۵	۴/۲۶۴	۰/۰۰۳	۰
	ارومیه	۰	-۰/۳۶۷	۴/۰۰۳	۰/۰۳۷	۰/۰۰۱	۰/۰۲۳	-۰/۵۷۴	۴/۲۹۵	۰/۰۴۳	۰/۰۰۲
	سردشت	۰/۰۰۹	-۰/۴۸۵	۱۲/۰۵۸	۰/۰۵۹	۰/۰۰۳	۰/۰۱	-۰/۹۶۵	۱۳/۸۷۴	۰/۰۲۸	۰/۰۰۱
	پیرانشهر	۰/۰۱	-۰/۴۲۱	۹/۸۹۵	۰/۰۷	۰/۰۰۵	-۰/۰۰۹	-۰/۴۹۶	۱۰/۱۵۲	۰/۰۴۲	۰/۰۰۲
	ماکو	-۰/۰۲۲	-۰/۳۷۲	۳/۰۶۱	۰/۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۱۶	-۰/۵۰۸	۳/۲۱	۰/۰۴۶	۰/۰۰۲
	خوی	-۰/۰۲۹	-۰/۳۳۱	۳/۲۳۳	۰/۰۴۳	۰/۰۰۲	-۰/۰۰۴	-۰/۴۴	۳/۳۳۳	۰/۰۴	۰/۰۰۲
	مهاباد	۰/۰۷۱	-۰/۶۴۸	۵/۱۶۷	۰/۰۷۸	۰/۰۰۶	۰/۰۱۲	-۰/۷۶	۵/۳۳۹	۰/۰۱۸	۰
زنجان	زنجان	-۰/۰۲	-۰/۳۶۲	۳/۴۱۳	۰/۰۴۳	۰/۰۰۲	۰/۰۱۹	-۰/۷۱۸	۳/۸۳۴	۰/۰۲۷	۰/۰۰۱

مدل CNRM قوی‌ترین و مدل NorESM2 ضعیف‌ترین مدل جهت پیش‌نگری بارش شمال‌غرب است. با توجه به جدول فوق در ایستگاه‌های منتخب واقع در استان اردبیل در بین ۴ ایستگاه مدل برتر CNRM است. در ایستگاه‌های منتخب در استان کردستان در هر ۳ ایستگاه مدل CNRM بالاترین رتبه را داراست. در استان آذربایجان شرقی در ۸ ایستگاه منتخب واقع در این استان مدل MIROC6 بیشترین رتبه اول را دارد. در استان آذربایجان غربی در ۷ ایستگاه منتخب این استان بیشترین رتبه اول به مدل CNRM اختصاص دارد و در ایستگاه همدید زنجان مدل برتر با بالاترین رتبه CNRM است. بر اساس رتبه مدل‌ها در هر ایستگاه و رابطه (۷) وزن هر مدل مشخص شد (جدول ۱۲).

در مدل CNRM بیشینه و کمینه مقدار شاخص KGE به‌ترتیب به ایستگاه‌های خلخال و سهند اختصاص دارد، بیشینه و کمینه سنج NSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های سهند و کلیبر تعلق دارد، بیشینه و کمینه شاخص RMSE به‌ترتیب به ایستگاه‌های کلیبر و جلفا متعلق است و بیشینه و کمینه شاخص R به‌ترتیب به ایستگاه‌های زرینه و پارس‌آباد اختصاص دارد. با توجه به موارد ذکر شده، در ۲۳ ایستگاه همدید و ۸ مدل بر اساس ۵ سنج آماری، کمترین مقدار سنج RMSE و بیشترین مقدار سنج NSE به‌طور مشترک در هر ۸ مدل منطقه مطالعه به‌ترتیب در ایستگاه‌های جلفا و سهند بوده است.

مطابق جدول ۱۱ رتبه مدل‌ها به تفکیک ایستگاه همدید در منطقه مطالعه تعیین شد. با توجه به جدول فوق

جدول ۱۰. صحت‌سنجی پرونداد مدل‌های CanESM5 و CNRM.

ایستگاه		CanESM5					CNRM				
		KGE	NSE	RMSE	R	R ²	KGE	NSE	RMSE	R	R ²
اردبیل	اردبیل	۰/۰۱۶	-۰/۵۹۱	۳/۳۵۲	۰/۰۳۳	۰/۰۰۱	-۰/۰۲	-۰/۳۱۷	۳/۰۵	۰/۰۵۳	۰/۰۰۳
	خلخال	۰/۰۵۳	-۰/۷۰۲	۴/۰۹۷	۰/۰۵۸	۰/۰۰۳	۰/۰۴۵	-۰/۴۱۸	۳/۷۴	۰/۰۸۳	۰/۰۰۷
	پارس‌آباد	-۰/۰۳۱	-۰/۵۰۹	۳/۹۳۶	۰/۰۰۷	۰	-۰/۰۵۶	-۰/۴۴۱	۳/۸۴۶	۰	۰
	مشکین	-۰/۷۱۷	-۰/۲۱۵	۴۲/۰۴۶	۰/۰۱۵	۰	-۰/۷۲۵	-۰/۲۱۳	۴۲/۰۱۱	۰/۰۱۷	۰
کردستان	زرینه	۰/۰۳	-۱/۰۳۲	۵/۱۸۴	۰/۰۳۱	۰/۰۰۱	۰/۰۳۵	-۰/۳۳۸	۴/۲۰۷	۰/۰۹	۰/۰۰۸
	سقز	-۰/۰۷۹	-۲/۰۵۷	۷/۶۸۶	۰/۰۲۳	۰/۰۰۱	۰/۰۱۸	-۰/۳۵	۵/۱۰۷	۰/۰۷۵	۰/۰۰۶
	بیجار	۰/۰۳۷	-۰/۸۸۸	۴/۸۱۴	۰/۰۲۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۸	-۰/۲۹۶	۳/۹۸۸	۰/۰۸	۰/۰۰۶
آذربایجان شرقی	سراب	۰/۰۳	-۰/۶۴۳	۲/۸۸۲	۰/۰۴۳	۰/۰۰۲	-۰/۰۰۹	-۰/۳۵۹	۲/۶۲۲	۰/۰۵۲	۰/۰۰۳
	مراغه	۰/۰۰۸	-۰/۵۳۷	۳/۵۸۵	۰/۰۳۵	۰/۰۰۱	۰/۰۱۱	-۰/۳۳۳	۳/۳۳۸	۰/۰۷۴	۰/۰۰۵
	میانه	۰/۰۲	-۰/۵	۳/۵۳۵	۰/۰۵	۰/۰۰۲	-۰/۰۲۸	-۰/۳	۳/۲۹۱	۰/۰۵۲	۰/۰۰۳
	تبریز	۰/۰۰۴	-۰/۴۸۲	۳/۰۴۴	۰/۰۳۹	۰/۰۰۲	-۰/۰۱	-۰/۳۵	۲/۹۰۵	۰/۰۵۳	۰/۰۰۳
	سهند	-۰/۷۳۹	-۰/۰۹۳	۲۸/۹۰۳	۰/۰۱۱	۰	-۰/۷۳۹	-۰/۰۹۲	۲۸/۸۸۸	۰/۰۱۶	۰
	جلفا	۰/۰۰۹	-۰/۴۶۱	۲/۵۹۹	۰/۰۴۸	۰/۰۰۲	-۰/۰۱۴	-۰/۳۷۴	۲/۵۲	۰/۰۴۵	۰/۰۰۲
	کلیبر	-۰/۷۰۷	-۰/۴۸۴	۵۷/۲۵۲	۰/۰۱۳	۰	-۰/۷۱	-۰/۴۸۲	۵۷/۲۱۱	۰/۰۲	۰
	اهر	۰/۰۲۷	-۰/۶۷۸	۳/۳۱۷	۰/۰۳۷	۰/۰۰۱	-۰/۰۰۹	-۰/۴۲	۳/۰۵۱	۰/۰۴	۰/۰۰۲
آذربایجان غربی	تکاب	۰/۰۳۳	-۰/۵۵۹	۳/۹۱۹	۰/۰۵۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	-۰/۳۱۸	۳/۶۰۳	۰/۰۷۵	۰/۰۰۶
	ارومیه	-۰/۰۲۱	-۰/۴۵۵	۴/۱۲۹	۰/۰۲۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	-۰/۲۵۵	۳/۸۳۶	۰/۰۸۹	۰/۰۰۸
	سردشت	-۰/۰۲۴	-۱/۴۹۲	۱۵/۶۲۱	۰/۰۲۴	۰/۰۰۱	-۰/۰۱	-۰/۴۲۹	۱۱/۸۳۱	۰/۰۵۲	۰/۰۰۳
	پیرانشهر	-۰/۰۲۵	-۰/۳۹۲	۹/۷۹۵	۰/۰۴۷	۰/۰۰۲	-۰/۰۴۶	-۰/۱۸۳	۹/۰۲۹	۰/۰۸۹	۰/۰۰۸
	ماکو	-۰/۰۱۸	-۰/۳۶۸	۳/۰۵۷	۰/۰۴۳	۰/۰۰۲	-۰/۰۰۹	-۰/۴۷۸	۳/۱۷۸	۰/۰۳	۰/۰۰۱
	خوی	-۰/۰۲۶	-۰/۴۱۹	۳/۳۳۸	۰/۰۲۷	۰/۰۰۱	-۰/۰۲۴	-۰/۲۸۸	۳/۱۸	۰/۰۵۸	۰/۰۰۳
	مهاباد	۰/۰۰۸	-۰/۵۹۴	۵/۰۸۱	۰/۰۲۸	۰/۰۰۱	۰/۰۱۲	-۰/۳۶	۴/۶۹۳	۰/۰۶۸	۰/۰۰۵
زنجان	زنجان	۰/۰۱۶	-۰/۵۳۱	۳/۶۱۹	۰/۰۴۳	۰/۰۰۲	-۰/۰۱۴	-۰/۳۳۵	۳/۳۷۹	۰/۰۵۴	۰/۰۰۳

جدول ۱۱. رتبه‌بندی مدل‌ها در ایستگاه‌های هم‌دید منطقه پژوهش.

ایستگاه هم‌دید		رتبه مدل‌ها							
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
اردبیل	اردبیل	CNRM	ACCESS	MIROC 6	IPSL	CanESM5	MRI	NorESM2	BCC
	خلخال	CNRM	CanESM5	MIROC 6	MRI	IPSL	BCC	ACCESS	NorESM2
	پارس‌آباد	IPSL	MIROC 6	MRI	ACCESS	CNRM	CanESM5	BCC	NorESM2
	مشکین‌شهر	MRI	CNRM	IPSL	CanESM5	MIROC 6	ACCESS	BCC	NorESM2
کردستان	زرنه	CNRM	MRI	MIROC 6	IPSL	BCC	NorESM2	CanESM5	ACCESS
	سقز	CNRM	BCC	MRI	IPSL	NorESM2	MIROC 6	ACCESS	CanESM5
	بیجار	CNRM	MIROC 6	MRI	NORESM2	IPSL	ACCESS	BCC	CANESM5
آذربایجان شرقی	سراب	MIROC 6	CNRM	IPSL	CanESM5	MRI	ACCESS	BCC	NorESM2
	مراغه	MIROC 6	CNRM	IPSL	BCC	MRI	NorESM2	CanESM5	ACCESS
	میانه	CNRM	CanESM5	IPSL	MIROC 6	BCC	ACCESS	MRI	NorESM2
	تبریز	MIROC 6	IPSL	CNRM	MRI	BCC	CANESM5	ACCESS	NORESM2
	سهند	MRI	ACCESS	CNRM	MIROC 6	CanESM5	IPSL	NorESM2	BCC
	جلفا	MIROC 6	MRI	CanESM5	CNRM	IPSL	ACCESS	NorESM2	BCC
	کلبر	CNRM	CanESM5	MIROC 6	MRI	IPSL	ACCESS	BCC	NorESM2
	اهر	MIROC 6	CNRM	ACCESS	MRI	CANESM5	IPSL	BCC	NORESM2
آذربایجان غربی	تکاب	CNRM	CanESM5	MRI	MIROC 6	BCC	IPSL	NorESM2	ACCESS
	ارومیه	CNRM	MIROC 6	MRI	ACCESS	IPSL	BCC	CanESM5	NorESM2
	سردشت	BCC	MRI	IPSL	NorESM2	CNRM	MIROC 6	ACCESS	CanESM5
	پیرانشهر	CNRM	IPSL	MIROC 6	MRI	NorESM2	BCC	CanESM5	ACCESS
	ماکو	MIROC 6	MRI	ACCESS	CanESM5	BCC	CNRM	IPSL	NorESM2
	خوی	MIROC 6	CNRM	MRI	IPSL	ACCESS	CanESM5	NorESM2	BCC
	مهاباد	IPSL	MIROC 6	CNRM	BCC	CanESM5	NorESM2	MRI	ACCESS
زنجان	زنجان	CNRM	IPSL	CanESM5	MIROC 6	BCC	ACCESS	MRI	NorESM2

جدول ۱۲. وزن مدل‌های GCM استفاده‌شده در تحقیق.

رتبه مدل‌ها	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم
وزن مدل‌ها	۰/۲۲۲	۰/۱۹۴	۰/۱۶۷	۰/۱۳۹	۰/۱۱۱	۰/۰۸۳	۰/۰۵۶	۰/۰۲۸

منفرد در آن ایستگاه (جدول‌های ۷ تا ۱۰) در ۲۳ ایستگاه منطقه تحقیق نشان داد که راستی آزمایی برون‌داد مدل همادی نسبت به برون‌داد مستقیم مدل‌ها، اریبی کمتری نسبت به داده‌های ایستگاهی در دوره تاریخی دارد.

نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که در ایستگاه‌های هواشناسی مختلف، توانایی مدل‌های AOGCM در برآورد بارش دوره پایه با یکدیگر متفاوت است. مقایسه نتایج صحت‌سنجی مدل همادی هر ایستگاه (جدول ۱۳) با ۸ مدل

جدول ۱۳. نتایج راستی آزمایی مدل همادی ۲۳ ایستگاه همدیدی منطقه مطالعه.

ایستگاه		مدل همادی				
		KGE	NSE	RMSE	R	R ²
اردبیل	اردبیل	-۰/۱۳۸	-۰/۰۴۸	۷/۷۲۱	۰/۰۸۶	۰/۰۰۷
	خلخال	-۰/۰۸۶	-۰/۰۴۸	۳/۲۱۵	۰/۱۱۸	۰/۰۱۴
	پارس آباد	-۰/۱۹۳	-۰/۰۷۵	۳/۳۲۲	۰/۰۳	۰/۰۰۱
	مشکین	-۰/۷۳۶	-۰/۲۱۱	۴۱/۹۷۳	۰/۰۲۶	۰/۰۰۱
کردستان	زرنه	-۰/۰۷۳	-۰/۰۳۹	۳/۷۰۷	۰/۱۳۲	۰/۰۱۷
	سقز	-۰/۰۸۳	-۰/۰۵۵	۴/۵۱۵	۰/۱۱۵	۰/۰۱۳
	بیجار	-۰/۱۱	-۰/۰۳۳	۳/۵۶۱	۰/۱۱۶	۰/۰۱۳
آذربایجان شرقی	سراب	-۰/۱۱۴	-۰/۰۴۲	۲/۲۹۶	۰/۱۰۵	۰/۰۱۱
	مراغه	-۰/۰۷۶	-۰/۰۳۸	۲/۹۴۶	۰/۱۳۱	۰/۰۱۷
	میانه	-۰/۱۳	-۰/۰۳۸	۲/۹۴	۰/۰۹۹	۰/۰۱
	تبریز	-۰/۱۰۳	-۰/۰۳۱	۲/۵۳۹	۰/۱۲۱	۰/۰۱۵
	سهند	-۰/۷۴	-۰/۰۸۹	۲۸/۸۵۵	۰/۰۳۹	۰/۰۰۲
	جلقا	-۰/۱۲۳	-۰/۰۳۱	۲/۱۸۳	۰/۱۰۹	۰/۰۱۲
	کلیبر	-۰/۷۲۷	-۰/۴۸۱	۵۷/۱۸۹	۰/۰۱۸	۰
	اهر	-۰/۱۲	-۰/۰۴۹	۲/۶۲۲	۰/۰۹۷	۰/۰۰۹
آذربایجان غربی	نکاب	-۰/۱۰۴	-۰/۰۴۳	۳/۲۰۶	۰/۱۱۱	۰/۰۱۲
	ارومیه	-۰/۱۲۳	-۰/۰۲۴	۳/۴۶۴	۰/۱۱۶	۰/۰۱۳
	سردشت	-۰/۱۱۷	-۰/۰۳۲	۱۰/۰۵۲	۰/۱۲۱	۰/۰۱۵
	پیرانشهر	-۰/۱۲۷	-۰/۰۰۳	۸/۳۱۳	۰/۱۴۳	۰/۰۲
	ماکو	-۰/۱۱۳	-۰/۰۳۵	۲/۶۵۹	۰/۱۱۲	۰/۰۱۳
	خوی	-۰/۱۴۶	-۰/۰۲۲	۲/۸۳۳	۰/۱۰۴	۰/۰۱۱
	مهاباد	-۰/۰۷۸	-۰/۰۴۲	۴/۱۰۷	۰/۱۲۷	۰/۰۱۶
زنجان	زنجان	-۰/۱۳۱	-۰/۰۴۸	۲/۹۹۴	۰/۰۹	۰/۰۰۸

آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۹) بر اساس آماره Z نشان دهنده روند کاهشی بارش سنگین است ولی ازلحاظ آماری معنی دار نیست و شیب سن نیز دارای وضعیت نزولی است (جدول ۱۴).

در این پژوهش به منظور بررسی معناداری آماری تفاوت میانگین تعداد رخداد های بارش سنگین بین دوره ی پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و دوره ی آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۹) تحت سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5، از آزمون ناپارامتری Mann-Whitney U استفاده شد. نتایج این آزمون نشان داد که در هیچ یک از سناریو های اقلیمی مورد بررسی، تفاوت آماری معناداری در سطح اطمینان ۹۵ درصد بین مقادیر دوره پایه و پیش نگری شده وجود ندارد ($p > 0.05$).

با توجه به ماهیت پیچیده و نوسان بالای عنصر اقلیمی بارش و همچنین عدم قطعیت بالای آن نمی توانیم انتظار مقادیر بالا برای شاخص های آماری نظیر ضریب همبستگی، NSE و KGE را داشته باشیم. بعد از محاسبه مدل همادی هر کدام از ۲۳ ایستگاه همدید شمال غرب ایران با توجه به معیار های بارش سنگین در این تحقیق همانند دوره مشاهداتی، بر اساس هر کدام از سناریو های خوش بینانه، متوسط و بدبینانه رخداد های بارش حدی در آینده استخراج شد. به دلیل اختلاف جزئی تعداد رخداد های حدی بارش دوره مشاهداتی (۴۳ رخداد) و دوره تاریخی مدل همادی (۴۰ رخداد)، با استفاده از روش تصحیح خطی (LS) (رابطه ۲) تصحیح بایاس انجام گرفت. نتایج آزمون من کندال در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۹) و دوره

جدول ۱۴. تعداد رخداد‌های حدی بارش تحت سناریوهای مختلف در منطقه مورد مطالعه و نتایج آزمون من-کندال.

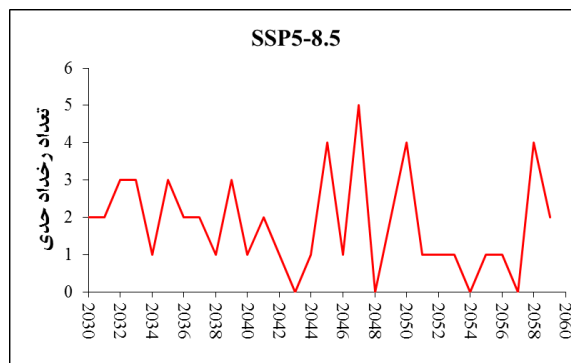
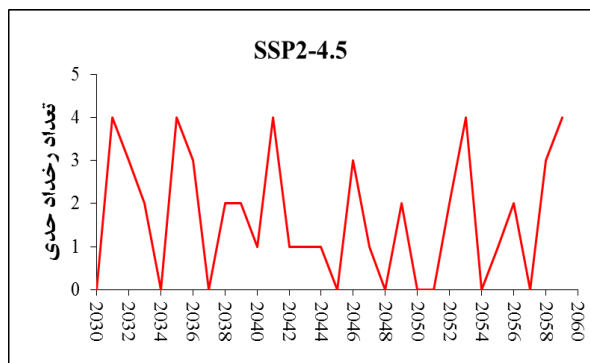
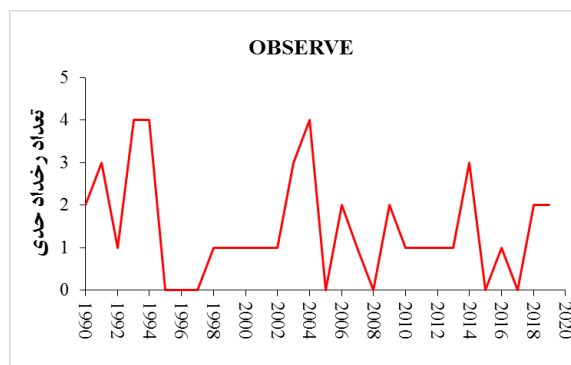
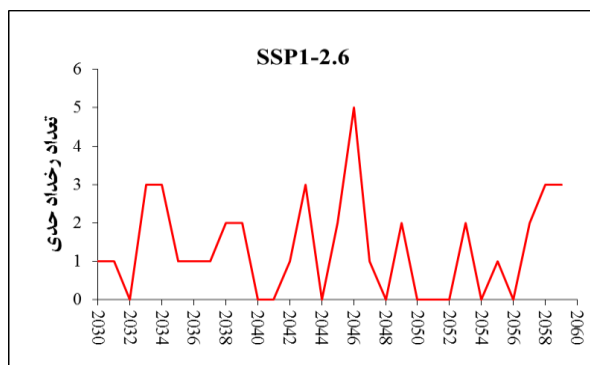
دوره مشاهداتی	رخداد بارش سنگین	z	سطح معنی‌داری	s	تصحیح بایاس	درصد تغییرات بارش سنگین
دوره مشاهداتی	۴۳	-۰/۴۵	معنی‌دار نیست	نزولی	-	-
دوره آتی مدل (SSP1-2.6)	۴۰	-۰/۰۴	معنی‌دار نیست	نزولی	۴۳	۰٪
دوره آتی مدل (SSP2-4.5)	۵۰	-۰/۰۵	معنی‌دار نیست	نزولی	۵۴	۲۶٪ (افزایش نسبت به دوره پایه)
دوره آتی مدل (SSP5-8.5)	۵۴	-۱/۴۸	معنی‌دار نیست	نزولی	۵۸	۳۵٪ (افزایش نسبت به دوره پایه)

جدول ۱۵. نتایج آزمون من-ویتنی برای ارزیابی اختلاف میانگین تعداد رخداد بارش سنگین دوره مشاهداتی با سناریوهای دوره آتی.

سناریو	W_Statistic	p-value	معناداری
SSP1-2.6	۴۷۴/۵	۰/۷۱	No
SSP2-4.5	۴۱۷	۰/۶۲	No
SSP5-8.5	۳۷۵	۰/۲۵	No

دیدبانی و دوره آتی با سناریو بدینانه (SSP5-8.5) در مقایسه با دوره آتی با سناریوهای متوسط و خوش‌بینانه شدیدتر است. همچنین مطابق این شکل ضریب تعیین (R^2) دوره مشاهداتی و دوره آتی با سناریو بدینانه (SSP5-8.5) نسبت به دوره آتی با سناریوهای متوسط (SSP2-4.5) و خوش‌بینانه (SSP1-2.6) دارای مقدار بیشتری است.

در شکل ۳ نمودارهای روند بارش سنگین در دوره گذشته و آتی ترسیم شد که با توجه به شیب خط رگرسیون و همچنین ضریب منفی معادلات رگرسیون (پارامتر ضرب شده به متغیر x) تأییدکننده نزولی بودن تعداد رخداد‌های بارش سنگین در دوره‌های گذشته و آینده بر اساس آزمون من کندال است. بر اساس شکل فوق شدت نزول تعداد رخداد حدی بارش در دوره



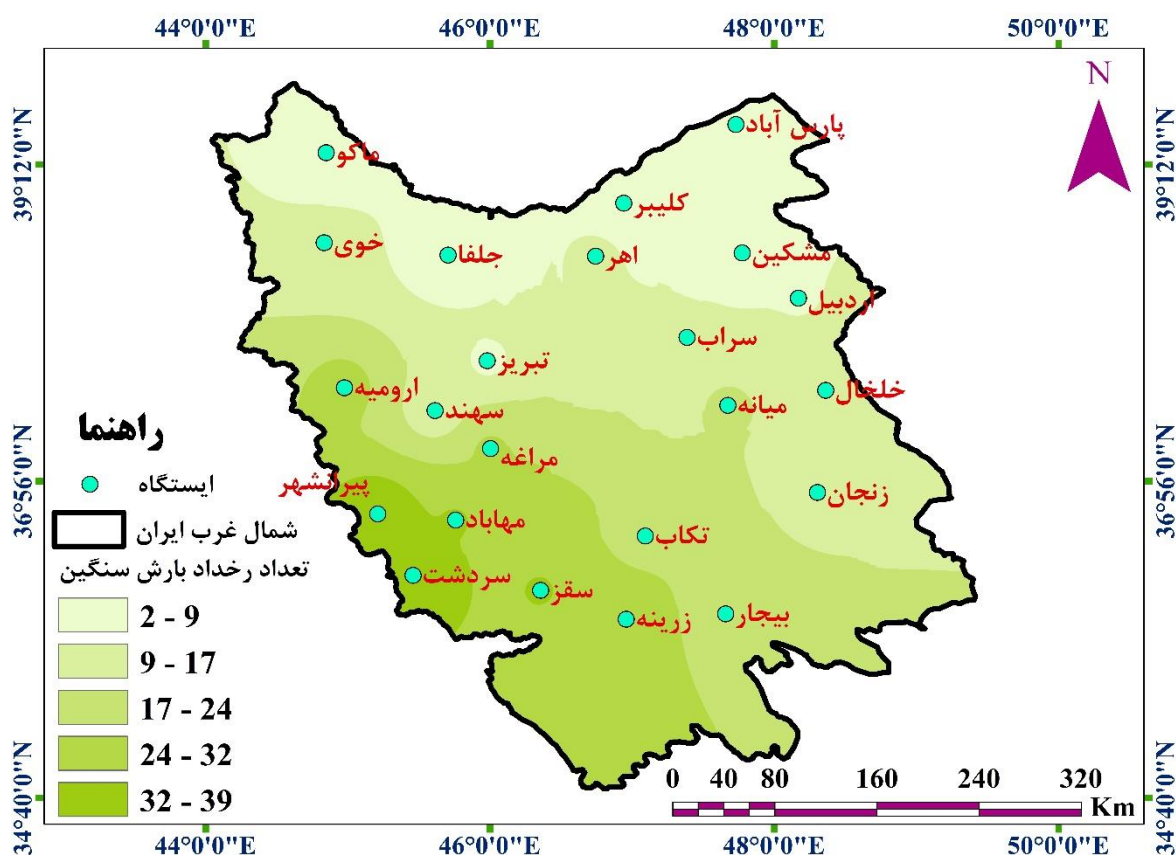
شکل ۳. روند بارش سنگین در دوره مشاهداتی و دوره آتی بر اساس سناریوهای مختلف در منطقه مطالعه.

۳-۱. دامنه عدم قطعیت

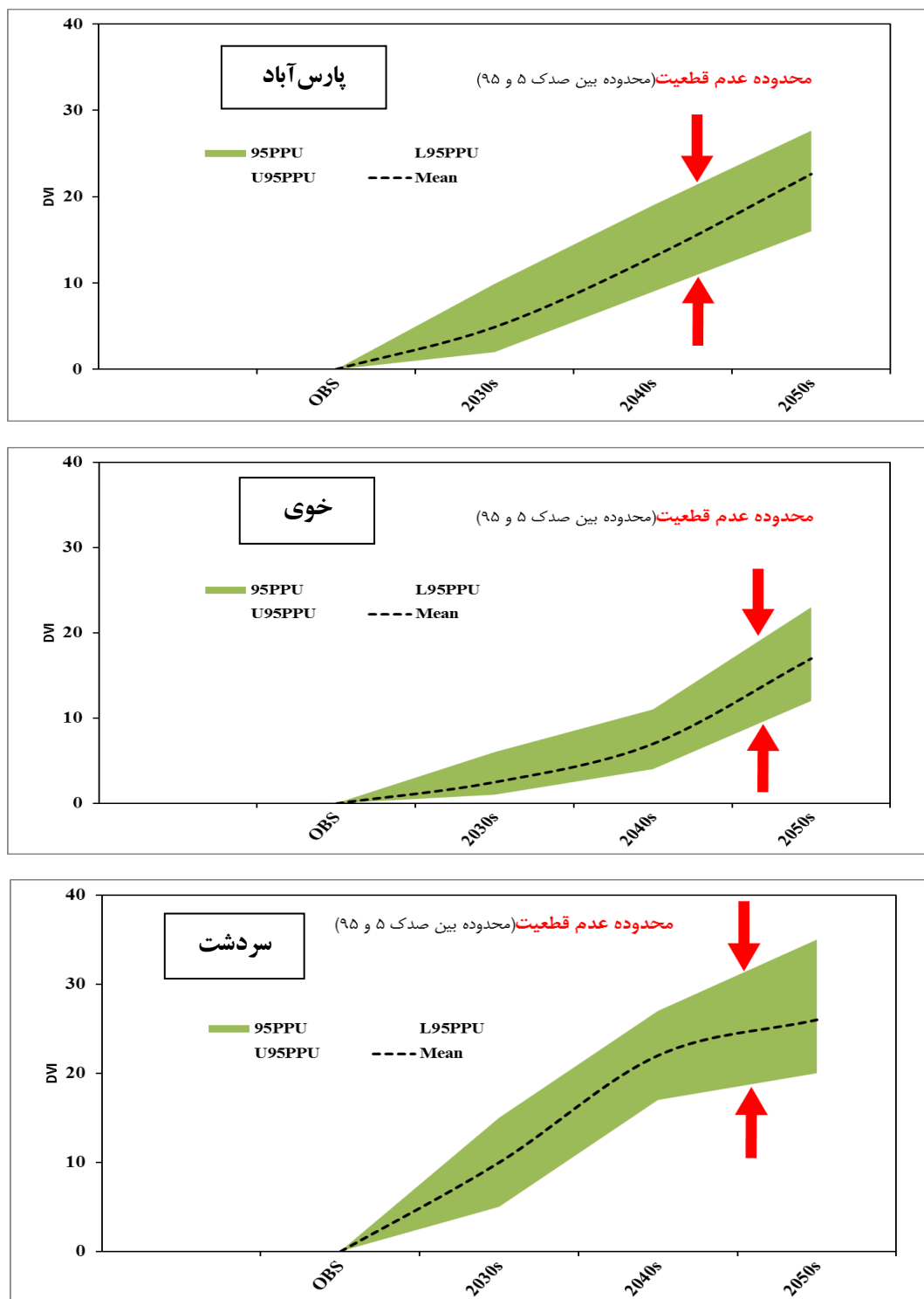
بارش متغیر پیچیده و با نوسان بالا است. میزان عدم قطعیت در پیش‌نگری این متغیر جوی نسبت به دما زیاد می‌باشد. در این پژوهش برای ۳ ایستگاه منتخب (خوی، پارس‌آباد و سردشت) میزان عدم قطعیت در تعداد رخدادهای بارش سنگین در دوره زمانی مورد مطالعه انجام شد (به دلیل اجتناب از افزایش حجم مقاله از ترسیم نمودار برای همه ۲۳ ایستگاه صرف نظر شد). بر اساس نمودار ترسیم شده برای هر ۳ ایستگاه با دور شدن از دوره مشاهداتی عدم قطعیت آغاز شده و با افزایش دوره مطالعه بر میزان آن افزوده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود دامنه عدم قطعیت از دهه ۲۰۴۰ به ۲۰۵۰ دهه تشدید شده است (محور قائم به میزان تغییرات تعداد رخداد بارش سنگین حول میانگین در محدوده صدک ۵ و ۹۵ اشاره دارد) (شکل ۵).

شکل ۴ پراکندگی تعداد رخدادهای بارش سنگین را در دوره مشاهداتی ۳۰ ساله (۱۹۹۰-۲۰۱۹) در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

بر اساس نقشه مذکور، از ۴۳ رخداد بارش سنگین در ۲۳ ایستگاه هواشناسی همدیدی شمال غرب ایران، بیشینه رخداد در نیمه جنوبی و کمینه رخداد در نیمه شمالی منطقه مورد مطالعه رخ داده است. بیشینه تعداد و کمینه تعداد رخداد بارش سنگین در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۳۹ و ۲ رخداد در طول ۳ دهه بوده است. ایستگاه‌های دارای بیشینه تعداد رخداد بارش سنگین در جنوب غربی شمال غرب ایران عبارت‌اند از سقز، سردشت، مهاباد و پیرانشهر که محدوده تعداد رخدادشان (۳۲ تا ۳۹) بوده است. ایستگاه‌های ماکو، جلفا، کلیبر، مشکین شهر و پارس‌آباد دارای کمینه تعداد رخداد بارش سنگین با محدوده تعداد رخداد (۲ تا ۹) در شمال منطقه مورد مطالعه قرار دارند.



شکل ۴. توزیع تعداد رخدادهای بارش سنگین در شمال غرب ایران در ۳ دهه دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۹).



شکل ۵. نمودار عدم قطعیت پیش‌نگری تعداد رخدادهای حدی بارش برای ۳ ایستگاه خوی، سردشت و پارس‌آباد در ۳ دهه آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۹).

۴. نتیجه‌گیری

در مقایسه با دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۹) در (۲۰۳۰-۲۰۵۹)

سناریو خوش‌بینانه (SSP1-2.6) تغییری در تعداد وقایع بارش حدی رخ نخواهد داد. علت عدم تغییر رخداد حدی بارش در این سناریو افزایش جزئی گازهای گلخانه‌ای در

نتایج مطالعه پیش‌نگری رخداد بارش سنگین در شمال‌غرب ایران با استفاده از ۸ مدل GCM از مجموعه مدل‌های CMIP6 در ۲۳ ایستگاه هم‌دید نشان داد که در دوره آینده

این سناریو است تا جایی که در این سناریو در سال ۲۰۵۰ روند گازهای گلخانه‌ای نرولی است؛ اما طبق سناریوهای متوسط (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5)، نتایج حاکی از آن است که تعداد رخداد بارش سنگین در منطقه پژوهش افزایش خواهد یافت، به‌طوری‌که در سناریو متوسط ۲۶ درصد و در سناریو بدبینانه ۳۵ درصد افزایش تعداد رخداد بارش سنگین نسبت به دوره پایه پیش‌نگری شد. علت این تغییرات در اثر افزایش شدید گازهای گلخانه‌ای جو تحت این سناریوها است که منجر به افزایش واداشت تابشی شده و با پاسخ اقلیم (بازخورد) برای ایجاد توازن باعث افزایش رخدادهای حدی مانند بارش سنگین می‌شود. بر اساس مطالعه انجام‌شده مدل همادی مستخرج از ۸ مدل نتایج بهتری نسبت به ۸ مدل مستقل در ۲۳ ایستگاه همدید شمال‌غرب ایران نشان داد. معمولاً بارش‌های سنگین (مستقیم یا غیرمستقیم) مسبب اصلی سیل هستند (برگوم و همکاران، ۲۰۲۰). در نتیجه پیش‌نگری بارش‌های سیل‌زا با کمترین عدم قطعیت از مهم‌ترین عواملی است که می‌تواند راهبردهای مناسب را در اختیار برنامه‌ریزان و مسئولان قرار دهد تا راهکارهای تطبیق با آن را جهت حفاظت از منابع آب، کشاورزی و منابع زیست‌محیطی مدنظر قرار دهند. با توجه به افزایش گازهای گلخانه‌ای بخصوص گاز دی‌اکسید کربن که نقش انسان در افزایش آن بسیار پررنگ است، در آینده نمی‌توان انتظار کاهش مخاطرات اقلیمی را داشت. به نظر می‌رسد تنها راه‌نجات کره‌زمین از بحران‌های پیش رو که یکی از آن‌ها بارش سنگین هست، استفاده از انرژی‌های پاک و تجدید پذیر بجای سوخت‌های فسیلی است، زیرا این سوخت‌ها عامل اصلی افزایش گاز دی‌اکسید کربن در جو هستند. در کشور ایران بر اساس آمار گزارش شده در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان (صرفه‌جویی در مصرف انرژی)، ۹۸ درصد نیروگاه‌های تولید برق از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند، به‌طوری‌که بیشترین مصرف انرژی با مقدار ۴۰ درصد در بخش خانگی رخ می‌دهد. با توجه به موارد ذکر شده پیشنهاد می‌شود پیش‌نگری رخدادهای حدی در مناطق مختلف کشور ایران توسط محققان در اولویت پژوهش‌های

جوی قرار گیرد و از طرفی فرهنگ‌سازی در زمینه مصرف بهینه انرژی از طریق ارگان‌ها برای مشترکین انجام شود تا با مدیریت نیروگاه‌ها و سوق دادن به سمت نیروگاه‌های سبز (انرژی‌های بادی و خورشیدی) شرایط حدی ناشی از تغییر اقلیم تا حدودی کنترل شود. نتایج تحقیق حاضر با نتایج کار خان‌سالاری و محمدی (۱۴۰۲) از لحاظ پیش‌نگری افزایش رخدادهای فرین بارش در سناریوهای مختلف در ایران همخوانی مطلوب دارد همچنین نتایج این مطالعه، نتایج پژوهش انجام شده توسط خواجه امیری و همکاران (۱۴۰۱) در زمینه عملکرد بهتر مدل همادی در مقایسه با مدل‌های منفرد و مستقل را تأیید می‌کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از مساعدت‌های جناب آقای دکتر ایمان بابائیان، جناب آقای دکتر محسن حمیدیان پور و خانم دکتر فائزه شجاع کمال قدردانی را دارند.

مراجع

- آقاشاهی، م.؛ اردستانی، م.؛ نیک‌سخن، م.ح. و طهماسبی، ب. (۱۳۹۱). معرفی و مقایسه مدل‌های LARS-WG و SDSM به منظور ریزمقیاس‌سازی پارامترهای زیست‌محیطی در مطالعات تغییر اقلیم. ششمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران. <https://civilica.com/doc/170203>
- بابائیان، ا.؛ مدیریان، ر.؛ خزانه‌داری، ل.؛ کوهی، م.؛ کوزه‌گران، س.؛ فلامرزی، ی.؛ کریمیان، م. و ملبوسی، ش. (۱۴۰۰). پیش‌نگری بارش کشور با استفاده از مقیاس-کاهی آماری برون‌داد مدل‌های CMIP6، پروژه داخلی پژوهشکده اقلیم‌شناسی، مشهد.
- بابائیان، ا.؛ مدیریان، ر.؛ خزانه‌داری، ل.؛ کریمیان، م.؛ کوزه‌گران، س.؛ کوهی، م.؛ فلامرزی، ی. و ملبوسی، ش. (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)، ۴۳۱-۴۴۹.

- چمانه‌فر، س.؛ موسوی بایگی، س. م.؛ بابائیان، ا. و مدرسی، ف. (۱۴۰۱). پیش‌نگری شاخص‌های حدی بارشی و دمایی در دوره ۲۰۲۶-۲۱۰۰ بر اساس برون‌داد مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: مشهد). *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۶(۵)، ۹۶۳-۹۷۶.
- حمیدیان پور، م. و شجاع، ف. (۱۴۰۱). *مقدمه‌ای بر روش‌ها و شگردهای مدل‌سازی اقلیم و تغییر اقلیم*. چاپ اول. سیستان و بلوچستان: انتشارات دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- خان سالاری، س. و محمدی، س. ع. (۱۴۰۲). پیش‌نگری بارش‌های فرین در ایران بر اساس رویکرد همادی مدل‌های CMIP6 در آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) با وزن‌دهی مبتنی بر رتبه. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۹(۳)، ۷۲۷-۷۴۶.
- خان سالاری، س.؛ محمدی، س. ع.؛ قصابی، ز. و صالحی، ح. (۱۴۰۳). پیش‌نگری تغییرات مقدار بارش فرین با دوره بازگشت‌های مختلف در ایران بر اساس رویکرد همادی ده مدل CMIP6 در آینده نزدیک. *مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۳(۳)، ۲۱۴-۲۴۶.
- خزایی، م. ر.؛ بایزیدی، م. و شرافتی، ا. (۱۳۹۶). اثر تغییر اقلیم بر دما و بارش سالانه استان زنجان با بررسی عدم قطعیت‌ها. *مجله اکوهیدرولوژی*، ۴(۳)، ۸۴۷-۸۶۰.
- خواجه امیری، چ.؛ خسروی، م.؛ طاوسی، ت.؛ حمیدیان پور، م. و کیانی مقدم، م. (۱۴۰۱). صحت‌سنجی عملکرد برون‌داد مدل اقلیمی CMIP6 با داده‌های مشاهده‌ای کرانه‌های مکران. *نشریه هواشناسی و علوم جو*، ۵(۱)، ۲۲-۴۱.
- خورشیددوست، ع. م.؛ ساری صراف، ب.؛ قرمزچشمه، ب. و جعفرزاده، ف. (۱۳۹۷). پیش‌بینی بارش‌های سنگین سواحل جنوبی دریای خزر تحت شرایط تغییر اقلیم در دوره‌ی ۱۴۰۸-۱۳۸۹. *مجله علوم و مهندسی آب‌بخیزداری ایران*، ۱۲(۴۲)، ۱۲۱-۱۲۹.
- زرین، آ. و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۳۹۹). پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌ساز فاز ششم (CMIP6).
- مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۶(۳)، ۵۸۳-۶۰۲.
- ستوده، ف. و علیجانی، ب. (۱۳۹۴). رابطه پراکندگی فضایی بارش‌های سنگین و الگوهای فشار در گیلان. *مجله تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۲(۱)، ۶۳-۷۳.
- طائی سمیرمی، س.؛ مرادی، ح. ر. و خداقلی، م. (۱۳۹۴). پیش‌بینی تغییرات برخی از متغیرهای اقلیمی با استفاده از مدل ریزمقیاس‌سازی LARS-WG و خروجی‌های مدل HADCM3 تحت سناریوهای مختلف. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۷(۲)، ۱۴۵-۱۵۶.
- عبدالعلی‌زاده، ف.؛ خورشیددوست، ع. م. و جهانبخش اصل، س. (۱۴۰۲). پیش‌نگری چشم‌انداز آتی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه مبتنی بر مدل‌های CMIP6. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۵(۱)، ۹۵-۱۱۲.
- علیجانی، ب.؛ خسروی، م. و اسماعیل نژاد، م. (۱۳۸۹). تحلیل هم‌مدیدی بارش سنگین ششم ژانویه ۲۰۰۸ در جنوب شرق ایران. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱(۳-۴)، ۱۴-۳.
- فرج زاده، م. (۱۳۹۲). *مخاطرات اقلیمی ایران*. چاپ اول. تهران: انتشارات سمت.
- کریمی، م. و حیدری، س. (۱۴۰۲). تغییرپذیری و روند تغییرات شدت-گستره‌ی ترسالی و خشکسالی در ایران. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۲(۳۶)، ۱۲۹-۱۵۰.
- گودرزی، م.؛ حسینی، ا. و مسگری، ا. (۱۳۹۵). *مدل‌های آب‌وهواشناسی*. چاپ اول. زنجان: انتشارات آذرکلک.
- محمودی، پیمان؛ طاووسی، تقی و کردی تمندانی، صابره. (۱۴۰۱). شناسایی الگوهای ناهنجاری‌های هم‌مدیدی منجر به خشکسالی‌ها و ترسالی‌های فراگیر ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۴(۱)، ۱-۲۰.
- مشایخ، فرناز و لشکری، حسن. (۱۴۰۲). تحلیل هم‌مدیدی ترسالی‌های شدید و فوق‌شدید در جنوب ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۵(۴)، ۱-۲۵.
- مفیدی، عباس؛ زرین، آذر و قبادی، غلامرضا جانباز. (۱۳۸۶). تعیین الگوی هم‌مدیدی بارش‌های شدید و

- Alijani, B., O'Brien, J., & Yarnal, B. (2008). Spatial analysis of precipitation intensity and concentration in Iran. *Theoretical and Applied climatology*, 94, 107-124. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0344-y>
- Allen, M., Antwi-Agyei, P., Aragon-Durand, F., Babiker, M., Bertoldi, P., Bind, M., Brown, S., Buckeridge, M., Camilloni, I., Cartwright, A., Cramer, W., Dasgupta, P., Diedhiou, A., Djalante, R., Dong, W., Ebi, K.L., Engelbrecht, F., Fifita, S., Ford, J., Fuß, S., et al. (2019). Technical Summary: Global warming of 1.5 C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://pure.iiasa.ac.at/15716>
- Babaeian, I., Rahmatinia, A. E., Entezari, A., Baaghideh, M., Aval, M. B., & Habibi, M. (2021). Future projection of drought vulnerability over northeast provinces of Iran during 2021–2100. *Atmosphere*, 12(12), 1704. <https://doi.org/10.3390/atmos12121704>
- Breugem, A. J., Wesseling, J. G., Oostindie, K., & Ritsema, C. J. (2020). Meteorological aspects of heavy precipitation in relation to floods—an overview. *Earth-Science Reviews*, 204, 103171. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103171>
- Camici, S., Brocca, L., & Moramarco, T. (2017). Accuracy versus variability of climate projections for flood assessment in central Italy. *Climatic Change*, 141, 273-286. DOI: 10.1007/s10584-016-1876-x
- Cheng, C. S., Auld, H., Li, Q., & Li, G. (2012). Possible impacts of climate change on extreme weather events at local scale in south-central Canada. *Climatic change*, 112, 963-979. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0252-0>
- Chen, J., Brissette, F. P., Chaumont, D., & Braun, M. (2013). Performance and uncertainty evaluation of empirical downscaling methods in quantifying the climate change impacts on hydrology over two North American river basins. *Journal of Hydrology*, 479, 200-214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.062>
- Chen, W., Jiang, Z., & Li, L. (2011). Probabilistic projections of climate change over China under the SRES A1B scenario using 28 AOGCMs. *Journal of Climate*, 24(17), 4741-4756. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4102.1>
- De Oliveira, V. A., de Mello, C. R., Beskow, S., Viola, M. R., & Srinivasan, R. (2019). Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. *Ecological Engineering*, 133, 20-31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>
- Eghdamirad, S., Johnson, F., & Sharma, A. (2017). Using second-order approximation to incorporate GCM uncertainty in climate change impact assessments. *Climatic Change*, 142, 37-52. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1944-x>
- Fallah Ghalhari, G. A., Yousefi, H., Hosseinzadeh, A., Alimardani, M., & Reyhani, E. (2019). Assessment of Climate Change in Bojnourd Station in 2016-2050 using Downscaling Models LARS WG and SDSM. *Iranian journal of Ecohydrology*, 6(1), 99-109. <https://doi.org/10.22059/ije.2018.265918.952>
- Gohari, A., Eslamian, S., Abedi-Koupaei, J., Bavani, A. M., Wang, D., & Madani, K. (2013). Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of the Total Environment*, 442, 405-419. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.029>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & 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>
- Ge, F., Zhu, S., Luo, H., Zhi, X., & Wang, H. (2021). Future changes in precipitation extremes over Southeast Asia: insights from CMIP6 multi-model ensemble. *Environmental Research Letters*, 16(2), 024013. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/abd7ad>
- Hay, L. E., Wilby, R. L., & Leavesley, G. H. (2000). A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 36(2), 387-397. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2000.tb04276.x>
- Shokoohi, A., & Habibnejad, R. (2019). Evaluating intensity, duration and frequency of short duration rainfalls using a regional climate change Model (Case study: Tehran). *Iran-Water Resources Research*, 15(4), 412-424. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1398.15.4.28.1>
- Kalcic, M. M., Chaubey, I., & Frankenberger, J. (2015). Defining Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic response units (HRUs) by field boundaries. *International*

- Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3), 69-80.
<http://dx.doi.org/10.3965/j.ijabe.20150803.951>
- Klutse, N. A. B., Quagrainne, K. A., Nkrumah, F., Quagrainne, K. T., Berkoh-Oforiwaa, R., Dzrobi, J. F., & Sylla, M. B. (2021). The climatic analysis of summer monsoon extreme precipitation events over West Africa in CMIP6 simulations. *Earth Systems and Environment*, 5, 25-41.
<https://doi.org/10.1007/s41748-021-00203-y>
- King, A. D., Hudson, D., Lim, E. P., Marshall, A. G., Hendon, H. H., Lane, T. P., & Alves, O. (2020). Sub-seasonal to seasonal prediction of rainfall extremes in Australia. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 2228-2249.
<https://doi.org/10.1002/qj.3789>
- Liu, L. Y., Wang, X. J., Gou, X. H., Yang, M. X., & Zhang, Z. H. (2022). Projections of surface air temperature and precipitation in the 21st century in the Qilian Mountains, Northwest China, using REMO in the CORDEX. *Advances in Climate Change Research*, 13(3), 344-358.
<https://doi.org/10.1016/j.accr.2022.03.003>
- Nie, S., Fu, S., Cao, W., & Jia, X. (2020). Comparison of monthly air and land surface temperature extremes simulated using CMIP5 and CMIP6 versions of the Beijing Climate Center climate model. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 487-502.
<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03090-x>
- de Hipt, F. O., Diekkrüger, B., Steup, G., Yira, Y., Hoffmann, T., Rode, M., & Näschen, K. (2019). Modeling the effect of land use and climate change on water resources and soil erosion in a tropical West African catchment (Dano, Burkina Faso) using SHETRAN. *Science of the Total Environment*, 653, 431-445.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.351>
- Pant, M., Bhatla, R., Ghosh, S., Das, S., & Mall, R. K. (2024). How climate change is affecting the summer monsoon extreme rainfall pattern over the Indo-Gangetic Plains of India: present and future perspectives. *Climate Dynamics*, 62(2), 1055-1075.
<https://doi.org/10.1007/s00382-023-06953-x>
- Pedersen, J. T. S., van Vuuren, D., Gupta, J., Santos, F. D., Edmonds, J., & Swart, R. (2022). IPCC emission scenarios: How did critiques affect their quality and relevance 1990–2022?. *Global Environmental Change*, 75, 102538.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102538>
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & 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>
- Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I., & Arnold, J. G. (2016). CMhyd User Manual: Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies. Texas: SWAT.
- Salmi, T. (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates-the Excel template application MAKESENS. Ilmatieteen laitos.
- Shrestha, D., Basnyat, D. B., Gyawali, J., Creed, M. J., Sinclair, H. D., Golding, B., ... & Haiju, R. (2023). Rainfall extremes under future climate change with implications for urban flood risk in Kathmandu, Nepal. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 97, 103997.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103997>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M., Allen, S. K., Boschung, J., & Midgley, P. M. (2014). Climate change 2013: the physical science basis: Contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change.
- Li, S.-Y., Miao, L.-J., Jiang, Z.-H., Wang, G.-J., Gnyawali, K. R., Zhang, J., Zhang, H., Fang, K., He, Y., & Li, C. (2020). Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015–2099. *Advances in Climate Change Research*, 11(3), 210-217.
<https://doi.org/10.1016/j.accr.2020.09.003>
- Tien Thanh, N., & Dutto Aldo Remo, L. (2018). Projected changes of precipitation idf curves for short duration under climate change in central Vietnam. *Hydrology*, 5(3), 33.
<https://doi.org/10.3390/hydrology5030033>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.
<https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Yang, T., Hao, X., Shao, Q., Xu, C. Y., Zhao, C., Chen, X., & Wang, W. (2012). Multi-model ensemble projections in temperature and precipitation extremes of the Tibetan Plateau in the 21st century. *Global and Planetary Change*, 80, 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.08.006>
- Yaddanapudi, R., Mishra, A., Huang, W., & Chowdhary, H. (2022). Compound wind and precipitation extremes in global coastal regions under climate change. *Geophysical Research Letters*, 49(15), e2022GL098974.
<https://doi.org/10.1029/2022GL098974>

- Yoo, J. H., & Kang, I. S. (2005). Theoretical examination of a multi-model composite for seasonal prediction. *Geophysical Research Letters*, 32(18). <https://doi.org/10.1029/2005GL023513>
- Zarenistanak, M., Dhorde, A. G., & Kripalani, R. H. (2014). Trend analysis and change point detection of annual and seasonal precipitation and temperature series over southwest Iran. *Journal of earth system science*, 123, 281-295. <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0395-7>
- Zamani, Y., Hashemi Monfared, S. A., Azhdari Moghaddam, M., & Hamidianpour, M. (2020). A comparison of CMIP6 and CMIP5 projections for precipitation to observational data: the case of Northeastern Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 1613-1623. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03406-x>.