

Forecasting Precipitation in the Northern Half of Iran Based on the Output of Selected CMIP6 Models

Ali Shahi¹, Bromand Salahi^{2*} 

¹ Ph.D. Student of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: Ali.shahi@uma.ac.ir

² Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: salahi@uma.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:

Received: 2025-05-10
Accepted: 2025-06-16

Keywords:

Climate Change
Ensemble
Modeling
Iran

ABSTRACT

This study aimed to forecast precipitation at 32 synoptic stations in the northern half of Iran in the next three decades. For this purpose, data from 5 AOGCM models, namely MPI-ESM1-2-HR, INM-CM5-0, CMCC-CM2-SR5, BCC-CSM2-MR, and EC-EARTH3-CC, from the CMIP6 series of models were used under 2 scenarios: SSP2-4.5 (moderate) and SSP5-8.5 (pessimistic). The observation period was 1985-2014 and the future period was 2030-2059. The raw precipitation output was downscaled by CMHyd software. The performance of the models was evaluated by calculating the KGE statistic measure and the Taylor diagram was used to select the appropriate downscaling method among Linear Scaling, Power transformation, and Distribution mapping methods. In order to reduce the uncertainty with the weighted averaging method (based on rank), the ensemble model was calculated. The calculations showed that the generated ensemble model has better performance than the individual models. The maximum decrease in precipitation on an annual scale in the future period will occur at Jolfa station with an approximate value of 40% in the average scenario, and the largest increase in precipitation will occur at Sahand station with an increase of 14% in the future period in the pessimistic scenario. The research findings indicate that the maximum, average, and minimum values of the KGE statistical index for the ensemble model compared to the precipitation values of the stations in the study area were 0.1, 0.05, and zero, respectively. The results showed that on an annual time scale, under the average scenario, 78% of the stations will experience a decrease in precipitation, while under the pessimistic scenario, 75% of the studied meteorological stations will have an increase in precipitation. According to the present study, 56% of the studied stations had increasing annual precipitation changes under the SSP585 scenario and decreasing under the SSP245 scenario.

Cite this article: Shahi, A., Salahi, B. (2025). Forecasting Precipitation in the Northern Half of Iran Based on the Output of Selected CMIP6 Models. Journal of the Climate Change research, 6 (23), 77-94.



پیش‌بینی پارامتر بارش در شمال ایران بر اساس مدل‌های منتخب CMIP6

علی شاهی^۱، برومند صلاحی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،

ایمانامه: Ali.shahi@uma.ac.ir

^۲ استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی	بارش یکی از فراسنج‌های جوی بسیار تغییرپذیر جوی است که چگونگی و زمان رخداد تغییرات آن توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در پژوهش حاضر به‌منظور شناسایی تغییرات رخ داده در بارش شمال غرب کشور بین سال‌های ۱۳۴۸-۱۳۹۷ (۱۹۷۰ تا ۲۰۱۹) و با در نظر گرفتن اثر دریای مدیترانه بر مقدار بارش ایران، به‌ویژه شمال غرب کشور، ارتباط نمایه‌ی پیوند از دور مدیترانه MOIac که در الجزایر و قاهره واقع است را با استفاده از روش همبستگی و رگرسیون حداقل مربعات خطا واکاوی شد. تمامی واکاوی‌ها بر روی فازهای مثبت و منفی نمایه نیز انجام گرفت. نتایج حاکی از آن است که به‌صورت کلی ارتباط ضعیف بین نمایه‌ی مورد مطالعه و بارش وجود داشت. این شرایط برای فازها نیز صادق است. با این وصف بیش‌ترین نواحی متأثر از نم این مطالعه با هدف پیش‌نگری بارش در ۳۲ ایستگاه همدیدی نیمه شمالی ایران در سه دهه آتی انجام گرفت. برای این منظور، از داده‌های ۵ مدل AOGCM به نام‌های EC-EARTH3-BCC-CSM2-MR، CMCC-CM2-SR5، JNM-CM5-0، MPI-ESM1-2-HR از مجموعه مدل‌های سری CMIP6 تحت ۲ سناریوی SSP2-4.5 (متوسط) و SSP5-8.5 (بدبینانه) استفاده شد. دوره مشاهداتی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ و دوره آینده ۲۰۳۰-۲۰۵۹ در نظر گرفته شدند. کارایی مدل‌ها با محاسبه سنجه آماری KGE ارزیابی شدند و برای انتخاب روش مناسب ریزمقیاس از میان روش‌های Linear Scaling، Power transformation و Distribution mapping نمودار تیلور استفاده شد. به‌منظور کاهش عدم قطعیت با روش میانگین‌گیری وزنی (مبتنی به رتبه)، مدل همادی محاسبه شد. محاسبات نشان داد که مدل همادی تولید شده کارایی بهتری را نسبت به مدل‌های منفرد دارد. بیشینه کاهش بارش در مقیاس سالانه در دوره آتی در ایستگاه جلفا با مقدار تقریبی ۴۰ درصد در سناریوی متوسط رخ خواهد داد و بیشترین افزایش بارش در ایستگاه سهند با افزایش ۱۴ درصدی در دوره آینده در سناریوی بدبینانه اتفاق خواهد افتاد. یافته‌های تحقیق حاکی از آن است که مقدار بیشینه، متوسط و کمینه شاخص آماری KGE برای مدل همادی در مقایسه با مقادیر بارش ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۰/۱، ۰/۵ و صفر بوده است. نتایج نشان داد که در مقیاس زمانی سالانه، تحت سناریوی متوسط، ۷۸ درصد ایستگاه‌ها کاهش بارش را تجربه خواهند کرد در صورتی که تحت سناریوی بدبینانه، ۷۵ درصد ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه افزایش بارش را خواهند داشت. مطابق تحقیق حاضر، ۵۶ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای تغییرات سالانه بارشی صعودی تحت سناریو SSP585 و نزولی تحت سناریو SSP245 بودند.

واژه‌های کلیدی:

تغییر اقلیم
مدلسازی
همادی
ایران

استناد: شاهی، علی؛ صلاحی، برومند. (۱۴۰۴). پیش‌بینی پارامتر بارش در شمال ایران بر اساس مدل‌های منتخب CMIP6.

نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۶ (۲۳)، ۹۴-۷۷.



مقدمه

تغییرات اقلیمی و پیامدهای آن بر محیط زیست، به یکی از ملموس‌ترین چالش‌های پیش روی جوامع انسانی تبدیل شده است (لی و همکاران، ۲۰۱۹). از جمله تبعات جدی تغییر اقلیم، می‌توان به اختلال در الگوی مکانی و زمانی بارش و تأثیر آن بر منابع آبی اشاره کرد (الملیکی و همکاران، ۲۰۲۲). در میان عناصر مختلف اقلیمی، بارش به دلیل نقش کلیدی آن در مدیریت پایدار منابع آب، کشاورزی و محیط زیست، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (دیرس و بداد، ۲۰۲۱). بارش بخش کلیدی چرخه آب‌شناسی است و هرگونه تغییر در الگوی آن به طور مستقیم بر منابع آب تأثیر می‌گذارد (پراوین و همکاران، ۲۰۲۰).

یکی از مهم‌ترین علل تغییر اقلیم که بیشتر مطالعات اقلیمی و نتایج داده‌های مشاهداتی آن را تصدیق می‌کنند، انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط فعالیت‌های انسان است. لذا، دانشمندان جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی اقلیم آینده کره زمین اقدام به تولید سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای نموده‌اند تا بر اساس سناریوها تغییر اقلیم را شبیه‌سازی نمایند (پدرسن و همکاران، ۲۰۲۲). مجموعه نتایج مربوط به خصوصیات و خروجی‌های مدل‌ها، در گزارش‌های دوره‌ای موسوم به گزارش‌های ارزیابی IPCC در طی سالیان گذشته منتشر شده است که در هر گزارش مجموعه ارتقاهایی در خصوص مدل‌های AOGCM صورت گرفته است. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم از سال ۲۰۱۶ تدوین گزارش ششم ارزیابی تغییر اقلیم (CMIP6) را با همکاری مراکز تحقیقاتی مختلف در سطح جهان آغاز کرده است. (تبادل و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات مقایسه‌ای میان مدل‌های نسل پنجم (CMIP5) و ششم (CMIP6) و بررسی رفتار آن‌ها در شبیه‌سازی پدیده‌های حدی اقلیمی در مقیاس جهانی، حاکی از آن است که مدل‌های CMIP6 در مقایسه با CMIP5، از عدم قطعیت کمتری برخوردارند (کیم و همکاران، ۲۰۲۰). مطالعات انجام گرفته در ایران بیانگر روند

کاهشی بارش، روند افزایشی دما و کاهش منابع آبی تحت اثر تغییر اقلیم است (شرافتی و همکاران ۲۰۲۰؛ زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹؛ فلاح قاله‌ری و همکاران، ۲۰۱۹). از سنجه‌های آماری که دارای تنوع زیادی هستند، برای ارزیابی و صحت سنجی برون‌داد مدل‌های اقلیمی استفاده می‌شود، مقادیر سنجه‌های KGE، NSE، R(PCC) و R2 هرچه به عدد ۱ نزدیک باشند و RMSE، MAE به عدد صفر نشان از توانایی بالای مدل است (حمیدیان پور و شجاع، ۱۴۰۱).

جیانگ و همکاران (۲۰۲۰) به پیش‌نگری تغییرات بارش در آسیای مرکزی بر اساس ۱۵ مدل GCM از CMIP6 تحت سناریوی SSP پرداختند. نتایج نشان داد بر اساس تمام سناریوها میانگین بارندگی سالانه افزایش خواهد یافت. سریواستاوا و همکاران (۲۰۲۰) شبیه‌سازی تاریخی مدل‌های CMIP6 برای بارش‌های ایالات متحده را انجام دادند. نتایج نشان داد که بیشتر مدل‌های میانگین، تغییرپذیری دوره‌های تر را بیش از حد و دوره‌های خشک را کمتر از حد نسبت به داده‌های مشاهداتی تخمین می‌زنند. لی و همکاران (۲۰۲۱) بارش آینده رودخانه یانگ تسه در چین را با استفاده از ۱۸ مدل CMIP6 مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس نتایج تحقیق، میزان بارش در دوره ۲۰۹۹ - ۲۰۱۵ تحت سناریوی SSP1-2.6 به میزان ۱۴/۷۶ میلی‌متر و تحت سناریوی SSP5-8.5 به میزان ۲۲/۴۷ میلی‌متر افزایش خواهد داشت.

سونگ و همکاران (۲۰۲۱) پیش‌بینی تغییرات اقلیمی قرن بیست‌ویکم با بهره‌گیری از مدل NIMS-KMA به‌عنوان یکی از مدل‌های مشارکت‌کننده در پروژه CMIP6 انجام گرفته و شبیه‌سازی‌ها بر اساس دوره پایه‌ی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ صورت پذیرفته است. نتایج شبیه‌سازی آینده نشان می‌دهد که دمای جهانی می‌تواند بین ۱/۹۲ تا ۲/۵ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش یابد. همچنین میانگین بارش جهانی با افزایشی در حدود ۵ تا ۱۰ درصد همراه خواهد بود و میزان پوشش یخ‌های دریایی در قطب شمال و جنوب کاهش خواهد یافت. ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) قابلیت‌های ۴۲ مدل از CMIP6 را جهت بازتولید دما و

میانگین وزن دهی (IWM) معرفی شد که مدل میانگین وزنی نتایج بهتری نشان داد.

باباییان و همکاران (۱۴۰۲) به مطالعه چشم‌انداز بارش ایران در قرن ۲۱ با به‌کارگیری مقیاس کاهی آماری برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMHyd پرداختند. در این پژوهش از ۴۳ ایستگاه هواشناسی و چهار مدل از نوع ESM به نام _____، BCC-CSM2-MR،

ACCESS-ESM1-5 و FGOALS_g3، MIROC6 تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شد. دوره مشاهداتی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ و دوره‌های آینده به صورت آینده نزدیک ۲۰۲۶-۲۰۵۰، آینده میانه ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و آینده دور ۲۱۰۰-۲۰۷۶ در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که تغییرات بارش آینده در حدود ۷۸ درصد از ایستگاه‌ها معنی‌دار نیستند و در ۱۹ و ۳ درصد ایستگاه‌ها به ترتیب افزایش و کاهش معنی‌داری دارند. بیشترین افزایش بارش در جنوب جنوب شرق و بیشترین کاهش در زاگرس مرکزی رخ خواهد داد.

سالاری فنودی و همکاران (۱۴۰۲) پیش‌نمایی بارش‌های تابستانه مونسونی جنوب شرق ایران مبتنی بر مدل همادی را مورد مطالعه قرار دادند. به منظور کاهش عدم قطعیت و بهبود پیش‌بینی‌های بارش، از داده‌های خروجی پروژه CORDEX و مدل‌های CMIP5 در کنار الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شد. نتایج حاصل، نشان‌دهنده تأثیر مثبت متغیرهایی چون دما، رطوبت و فشار هوا در ارتقاء دقت پیش‌بینی بارش و کاهش خطای مدل‌سازی بود. کاربرد شبکه‌های عصبی غیرخطی در تصحیح اربیبی داده‌های بارش مدل‌های CMIP5 و CORDEX، به‌ویژه در مطالعات آینده‌نگر در جنوب شرق ایران، مؤثر واقع شد. از نتایج قابل توجه این تحقیق، می‌توان به روند افزایشی بارش در جنوب شرق ایران، به‌ویژه نواحی ساحلی، اشاره کرد. این روند تا حدی می‌تواند ناشی از گسترش تأثیرگذاری بارش‌های مونسونی جنوب غرب هند باشد.

بارش در سین کیانگ چین طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۵ 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 (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.

زارعیان (۱۴۰۱) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تغییرات دما و بارش استان یزد بر اساس مدل‌های AOGCM ارائه شده در گزارش ششم IPCC تحت سناریوهای SSP245، SSP126 و SSP585 پرداخت. ترکیب این مدل‌ها، با روش وزن دهی بر اساس شاخص کلینگ گوپتا انجام شده است. با استفاده از LARS-WG داده‌های دما و بارش ایستگاه‌های هواشناسی استخراج شده است. نتایج نشان داد که مدل‌های CanESM5 و BCC CSM2-MR به ترتیب بیشترین توانایی را در شبیه‌سازی دما و بارش دوره تاریخی در تمامی ایستگاه‌های منطقه تحقیق دارند. در همه سناریوها دمای سالانه افزایش و بارندگی سالانه کاهش پیدا خواهد کرد؛ همچنین بیشترین میزان افزایش دما و کاهش بارندگی در این منطقه به ترتیب در فصول بهار و فصل پاییز رخ خواهند داد.

خواجه امیری و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی ارزیابی دقت مدل‌های اقلیمی CMIP6 در سواحل مکران را انجام دادند. به این منظور از ۱۱ مدل گردش سیاره‌ای در دوره تاریخی ۲۰۱۴ - ۱۹۸۵ استفاده شد. از شاخص‌های نش ساتکلیف (NSE)، ریشه دوم میانگین مربع خطاها (NRMSE) و کلینگ - گوپتا (KGE) به ارزیابی پرداختند. با توجه به بررسی‌ها شش مدل، CanESM5، MPI-ESM1، FGOALS، IPSL-CM6A، EC-EARTH3، MRI-ESM2، ACCESS-ESM بین ۱۱ مدل معین شده ابتدای تحقیق، به عنوان بهترین مدل انتخاب شدند. در ادامه دو مدل همادی (انسمبل) به روش میانگین حسابی و

ساری صراف و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی به ارزیابی ۷ مدل GCMs از CMIP6 در شبیه‌سازی بارش و پیش‌نگری تغییرات بارش در شمال غرب ایران تحت سه سناریوی (SSP) در سه دوره (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱، ۲۱۰۰-۲۰۸۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) پرداختند. 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 سنجه‌های متداول آماری، RMSE، MAE و R2 ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که مدل MPI-ESM1-2-LR نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بیشتری برخوردار است. در مجموع با توجه به سناریوهای مختلف، در بیشتر پهنه مورد مطالعه روند بارش تا پایان قرن ۲۱ کاهشی است.

جوان و عزیززاده (۱۴۰۳) به ارزیابی روش‌های مختلف تصحیح اریبی بر پیش‌نگری بارش مدل GFDL-ESM4 با دوره پایه ۱۹۹۰-۲۰۱۴ در حوضه دریاچه ارومیه پرداختند. پنج روش تصحیح اریبی شامل روش‌های نسبت گیری خطی (LS)، نسبت گیری شدت موضعی (LOCI)، تبدیل توانی (PT)، نگاشت توزیع (DM) و تغییر عامل دلتا (DC) را ارزیابی کردند. به منظور مقایسه داده‌های مشاهداتی و برون داد مدل برای انتخاب بهترین روش برای تصحیح داده‌های سناریوهای آینده از معیارهای ضریب همبستگی، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد اریبی (PBias) استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد که روش تغییر عامل دلتا برآوردهای خام را پس از اصلاح به طور قابل توجهی بهبود داد؛ علاوه بر این، پیش‌نگری‌های میانگین سالانه بارش در سناریوی SSP126 بین ۲ تا ۹ درصد، در SSP245 بین ۵ تا ۱۷ درصد و در SSP585 بین ۸ تا ۲۶ درصد کاهش را نسبت به داده‌های مشاهده‌ای نشان می‌دهند.

میان‌آبادی و سلاجقه (۱۴۰۳) به پیش‌نگری تغییر در تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی در ایستگاه‌های پسته‌خیز استان کرمان با

استفاده از برون داد مدل‌های اقلیمی CMIP6 پرداختند. به این منظور ابتدا ۵ مدل اقلیمی شامل BCC-CSM2-MR، CNRM-CM6-1، MRI-ESM2-0 و GFDL-ESM4.SR5 انتخاب شده و داده‌های دمای حداقل این مدل‌ها با مقادیر مشاهداتی در ۶ ایستگاه انار، کرمان، رفسنجان، شهر بابک، سیرجان و زرنده در مناطق پسته‌خیز کرمان و برای دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) مقایسه گردید. نتایج نشان داد که آخرین سرمازدگی بهاره در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه زودتر اتفاق خواهد افتاد و تعداد روزهای سرمازدگی نیز کاهش خواهد یافت.

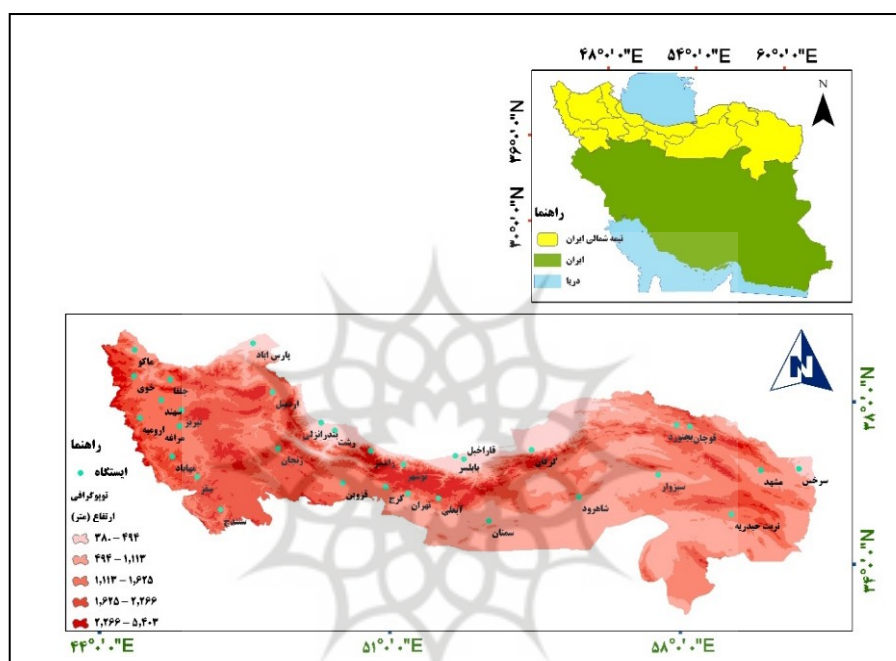
ناظری و همکاران (۱۴۰۴) مطالعه تغییرپذیری بارش و پیش‌بینی بارش‌های سالانه مرکز و جنوب شرق ایران با استفاده از مدل سری‌های زمانی تصادفی را انجام دادند. از داده‌های بارش سالانه ۱۵ ایستگاه همدید مرکز و جنوب شرق ایران استفاده کردند. نتایج نشان دادند که بهترین مدل برازش داده شده بر سری‌های زمانی بارش سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه (1, ARMA(2 می‌باشد. برای اندازه‌گیری دقت پیش‌بینی بارش‌های سالانه تا افق ۲۰۲۷ نیز از چهار معیار اعتبارسنجی MAE، RMSE، MSE، MAD استفاده شد. بر اساس این مدل مشاهده شد که روند مقادیر پیش‌بینی شده بارش‌های سالانه تا افق ۲۰۲۷ میلادی به‌استثنای دو ایستگاه فردوس و ایرانشهر که روند بارشی آن‌ها افزایشی بوده است، بقیه ایستگاه دارای روند کاهشی بوده‌اند.

نیمه شمالی کشور ایران دارای تنوع اقلیمی زیادی بوده و بخش‌های مختلف آن توپوگرافی متفاوتی دارد. مطالعات جمعیتی و تحلیل‌های فضایی بیانگر آن است که نیمه شمالی کشور ایران از تراکم جمعیتی بالاتری نسبت به نیمه جنوبی برخوردار است. با توجه به وابستگی عملکرد مدل‌های گردش عمومی جو به مکان مطالعه، طبیعی است که برای هر کدام از قسمت‌های نیمه شمالی برون داد متفاوتی را خواهد داشت. از طرفی به دلیل اهمیت متغیر بارش و عدم قطعیت بالای آن، مطالعه دقیق نیمه شمالی کشور ایران در زمینه تغییرات اقلیمی با توجه به عنصر اقلیمی بارش

ضرورت دارد. مطالعه پیش رو با ارزیابی ۳۲ ایستگاه منطقه مورد نظر و مقیاس کاهی با نرم‌افزار CMHYD، استفاده از مدل‌های با قدرت تفکیک افقی بالا، محاسبه مدل همادی، ارزیابی بارش در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه برای هر کدام از ایستگاه‌ها و همچنین محاسبه دامنه عدم قطعیت انجام گردید.

داده‌ها و روش‌ها

محدوده و قلمرو پژوهش: این پژوهش در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۳۵ تا ۴۰ درجه شمال و طول‌های جغرافیایی ۴۴ تا ۶۳ درجه شرقی در کشور ایران انجام شد. در این مطالعه ۱۴ استان، اردبیل، آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، زنجان، قزوین، کردستان، مازندران، گیلان، گلستان، خراسان شمال، خراسان رضوی، البرز، تهران و سمنان مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش از دو گروه داده‌های مشاهداتی و مدل به صورت روزانه برای ۳ دهه استفاده شده است. داده‌های بارش روزانه ۳۲ ایستگاه همدیدی واقع در نیمه شمالی ایران از سازمان هواشناسی کشور ایران www.irimo.ir اخذ گردید. نتایج مدل‌های گزارش ششم از سایت <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/> برای دو دوره زمانی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ (دوره تاریخی) و ۲۰۳۰-۲۰۵۹ (دوره آتی) بر اساس ۲ سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به عنوان سناریوهای به ترتیب متوسط و بدبینانه استخراج شد. 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 بالا داشتند انتخاب شدند (جدول ۱).

در این پژوهش از دو گروه داده‌های مشاهداتی و مدل به صورت روزانه برای ۳ دهه استفاده شده است. داده‌های بارش روزانه ۳۲ ایستگاه همدیدی واقع در نیمه شمالی ایران از سازمان هواشناسی کشور ایران www.irimo.ir اخذ گردید. نتایج مدل‌های گزارش ششم از سایت <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/> برای دو دوره زمانی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ (دوره تاریخی) و ۲۰۳۰-۲۰۵۹ (دوره آتی) بر اساس ۲ سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به عنوان سناریوهای به ترتیب متوسط و بدبینانه استخراج شد. در این مطالعه در ابتدا از بین مدل‌هایی که دارای داده‌هایی با دوره‌های مشترک تاریخی و پیش‌نگری بوده و تفکیک مکانی افقی بالا داشتند انتخاب شدند (جدول ۱).

جدول ۱: مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد بررسی در این پژوهش

ردیف	مدل	شرکت توسعه‌دهنده	کشور	قدرت تفکیک
۱	MPI-ESM1-2-HR	مرکز داده‌های اقلیمی آلمان	آلمان	۱۰۰ کیلومتر
۲	INM-CM5-0	موسسه ریاضیات عددی، آکادمی علوم روسیه	روسیه	۱۰۰ کیلومتر
۳	CMCC-CM2-SR5	مرکز اروپایی مدیریتانه‌ای	ایتالیا	۱۰۰ کیلومتر
۴	BCC-CSM2-MR	مرکز اقلیم پکن	چین	۱۰۰ کیلومتر
۵	EC-EARTH3-CC	اتحادیه‌ای از چندین شرکت تجاری	(۱۲ کشور اروپایی)	۱۰۰ کیلومتر

بعد از استخراج برون‌داد ۵ مدل منتخب، به‌منظور کاهش عدم قطعیت از ۳ روش Linear Scaling، Power Transformation و Distribution Mapping برای کوچک‌مقیاس کردن در نرم‌افزار CMHyd استفاده شد (جدول ۲). کارایی هر یک از ۳ روش ریزمقیاس از طریق ترسیم نمودار تیلور مشخص شد. نمودار تیلور به‌طور هم‌زمان نمایه‌های اریبی، انحراف معیار و جذر میانگین مربعات را در نظر می‌گیرد (Taylor, 2001). در این نمودار داده دیده‌بانی به‌صورت یک نقطه مرجع روی محور افقی تعیین می‌گردد و بعد زاویه‌ای نشان‌دهنده همبستگی

مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی است، مقادیر انحراف معیار به‌صورت دواير متحدالمرکز نسبت به مرکز دایره و مقادیر RMSE به‌صورت دواير متحدالمرکز نسبت به نقطه مرجع ترسیم می‌شود. برای انتخاب روش مناسب ریزمقیاس از بین سه روشی که مطرح شد ۱۰ درصد (۳ ایستگاه همدیدی) ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه، بر اساس ارتفاع (از سطح دریا برحسب متر)، اقلیم (تعداد بارش و میانگین بارش در بازه زمانی مورد مطالعه) و فاصله زیاد از همدیگر (بر اساس کیلومتر و موقعیت جغرافیایی) انتخاب شدند.

جدول ۲: فرایندها و فرمول‌ها مورد استفاده در روش‌های مقیاس کاهی نرم‌افزار CMHyd

نام روش	توضیح روش مقیاس کاهی	منبع
Linear Scaling	نسبت میانگین ماهانه مقادیر دیدبانی به تاریخی مدل در دوره یکسان به سری داده‌های شبیه‌سازی شده آینده ضرب می‌شود. این روش ترجیحاً برای مقیاس کاهی بارش، فشار بخار و تابش استفاده می‌شود.	مندز و همکاران، ۲۰۲۰
Power transform	به دلیل ناتوانی روش‌های انتقال مانند LS و DC در شبیه‌سازی واریانس، روش غیرخطی به‌صورت ضریب توانی برای تصحیح واریانس بارش استفاده می‌شود.	لیندر و بوشاند، ۲۰۰۷
Distribution mapping	در این روش تابع توزیع داده‌های شبیه‌سازی به نحوی تصحیح می‌شود تا با توزیع دیدبانی مطابق باشد.	پانی و همکاران، ۲۰۱۰

CMHyd: برون‌داد مدل‌های GCM به دلیل بزرگ‌مقیاس بودن به‌طور مستقیم قابل استفاده نیستند برای رفع مشکل قدرت تفکیک مکانی کم از روش‌های ریزمقیاس نمایی استفاده می‌گردد (Fallah, 2019). جهت مقیاس کاهی برون‌داد مدل‌های گردش کلی از نرم‌افزار CMHyd^۱ استفاده

شد. CMHyd از هشت روش تصحیح اریبی طی فرایندی مجزا برای بارش و دما استفاده می‌کند. از بین هشت روش، پنج روش مختص بارش است. اجرای سریع و امکان انتخاب گزینه‌های مختلف از مزایای این نرم‌افزار است (بابائیان و همکاران، ۱۴۰۲). این نرم‌افزار نیازمند سه نوع داده، شامل داده دیده‌بانی، داده دوره گذشته مدل اقلیمی (هیستوریکال) و داده سناریو

1. Climate Model data for Hydrologic modeling

طریق رتبه ۵ مدل در هر کدام از ۳۲ ایستگاه تعیین شد.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2} \quad (۱)$$

در این رابطه O_i و S_i به ترتیب مقادیر داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش هستند. μ میانگین و σ انحراف معیار و r ضریب همبستگی پیرسن است (زارعیان، ۱۴۰۱).

تعیین وزن مدل‌ها: با هدف کاهش عدم قطعیت در نتایج حاصل از مدل‌های CMIP6 این مدل‌ها بر مبنای دقت محاسبه شده در مرحله قبل، بر اساس معادله (۲) وزندهی شدند (میانگین وزنی مبتنی بر رتبه). در این معادله، R_i رتبه هر مدل و W_i وزن هر مدل است (Chen et al, 2011).

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (۲)$$

در این رابطه R رتبه هر مدل، W وزن هر مدل و n تعداد مدل‌ها است.

همادی‌سازی: مدل همادی^۳ در مقایسه با مدل‌های منفرد نتایج بهتری ارائه می‌دهد (Yoo and kang, 2005). مدل همادی عدم قطعیت‌های مدل ساختاری را تا حد زیادی کاهش می‌دهد، پیش‌بینی‌های آینده را به‌طور منطقی نشان می‌دهد (Ge et al, 2021). در این مرحله به‌منظور کاهش خطاهای به‌دست آمده اقدام به همادی‌سازی مدل‌های منفرد و تشکیل تنها یک سری داده که از مجموعه‌ای از مدل‌ها تشکیل شده است، برای هر کدام از ۳۲ ایستگاه همدید در نیمه شمالی ایران گردید. برای این منظور پس از تعیین وزن هر مدل با توجه به میزان تأثیرگذاری آن، اقدام به میانگین‌گیری وزنی از داده‌های مدل‌ها شد.

(آینده) مدل‌های اقلیمی است. فرایند مقیاس کاهی در پنج مرحله انجام می‌شود که به ترتیب عبارت‌اند از: ورود متغیرهای دیده‌بانی (به‌صورت متنی)، انتخاب روش تصحیح اریبی، ورود داده‌های مدل در دوره تاریخی و سناریو (به دو صورت متنی یا NetCDF^۱، پردازش (شامل چک داده‌ها و اجرای مقیاس کاهی) و مرحله آخر (خروجی نتایج به دو شکل عددی و گراف) (بابائیان و همکاران، ۱۴۰۰).

ارزیابی دقت مدل‌ها: شبیه‌سازی‌های تاریخی برای ارزیابی دقت مدل‌ها مفید هستند. دوره‌های تاریخی مدل‌ها ابزار مهمی برای تعیین سازگاری و حساسیت مدل‌های اقلیمی نسبت به داده‌های مشاهداتی و کنترل عدم قطعیت این مدل‌ها می‌باشند (ایرینگ و همکاران، ۲۰۱۶).

از شاخص‌های آماری برای راستی‌آزمایی عملکرد مدل‌ها استفاده می‌گردد تا همانندی بین داده‌های ایستگاهی و شبیه‌سازی شده در دوره تاریخی در قالب مقادیر آماری نشان داده شود (گوپتا و همکاران، ۲۰۰۹). برای تعیین دقت هر یک از ۵ مدل این تحقیق در ۳۲ ایستگاه نیمه شمالی ایران، پس از حذف اریبی، شاخص آماری KGE^2 (کلینگ - گوپتا) (معادله ۱) برای آن‌ها محاسبه شد. شاخص کلینگ - گوپتا یک شاخص ترکیبی بوده که قادر است چند شاخص آماری نظیر میانگین، انحراف معیار و همبستگی داده‌ها را با یکدیگر ترکیب کرده و دقت انتخاب مدل‌ها بر اساس توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی دوره تاریخی را افزایش دهد. به‌عبارت دیگر، زمانی که از چند شاخص آماری به‌صورت مجزا در این زمینه استفاده شود، امکان تصمیم‌گیری نهایی بدون بهره‌گیری از شاخص KGE دشوار خواهد بود (کنوبن و همکاران، ۲۰۱۹). درنهایت برآیند این آماره‌ها در ایستگاه‌های منطقه معیار ارزیابی قرار گرفت و از این

1. Network Common Data Form
2. Kling Gupta Efficiency

3. Ensemble

نتایج و بحث

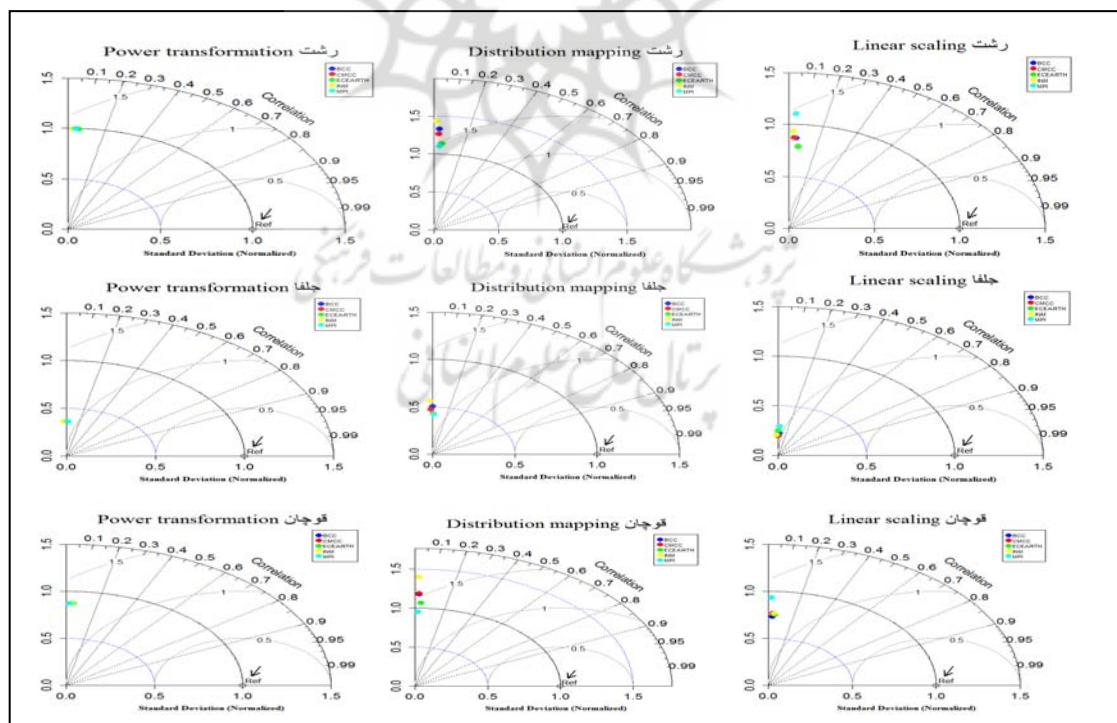
در این پژوهش از طریق نمونه‌برداری، ۳ ایستگاه رشت، جلفا و قوچان به منظور مقایسه عملکرد ۳ روش مقیاس‌کاهی انتخاب گردید (جدول ۳).

با توجه به شکل (۲)، نمودار تیلور ۳ ایستگاه مذکور برای ۵ مدل در دوره پایه، بر اساس برون‌داد ۳ روش Linear Scaling، Power Transformation، Distribution Mapping و Linear Scaling از دقت بالا و خطای کمتری نسبت به دو روش دیگر برخوردار است. در نمودارهای تیلور روش Linear Scaling متغیر انحراف استاندارد مقدار

کمتر از ۱ را دارد در صورتی‌که در ۲ روش دیگر این متغیر مقدار بزرگ‌تر از ۱ را داراست، متغیر RMSE دارای محدوده ۱ تا ۱/۵ است در صورتی‌که در ۲ 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.

جدول ۳: مشخصات ۳ ایستگاه همدید منتخب

ایستگاه	پارامتر	میانگین بارش سنگین در دوره پایه (میلی‌متر)	تعداد ماه‌های بدون بارش در دوره پایه	موقعیت در منطقه مورد مطالعه	ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر
رشت	۱۳۲۴	۱	شمالی	-۸/۶	
جلفا	۲۱۱	۱۲	شمال غربی	۷۳۶/۲	
قوچان	۳۰۸	۳۰	شمال شرقی	۱۲۸۷	



شکل ۲: نمودار تیلور ۳ روش تصحیح اریبی در ۳ ایستگاه منتخب در نیمه شمالی ایران در دوره ۳۰ ساله (پایه)

Scaling انتخاب شد و ریزمقیاس برون‌داد خام مدل‌ها در این تحقیق با روش فوق در نرم‌افزار CMHyd

بر اساس ارزیابی انجام‌گرفته توسط نمودار تیلور (شکل ۲)، از میان سه روش تصحیح بایاس، روش Linear

انجام گردید. بعد از مقیاس‌کاهی، برون داد بارش همه ایستگاه‌ها (۳۲ ایستگاه) در دوره تاریخی توسط ۵ مدل با روش KGE راستی آزمایی گردید. راستی آزمایی ۳ ایستگاه همدیدی منتخب به صورت نمونه در جدول (۴) قابل مشاهده است.

مطابق جدول (۵) رتبه مدل‌ها به تفکیک ایستگاه

همدیدی در منطقه مورد مطالعه تعیین شد (برای جلوگیری از افزایش صفحات مقاله برای ۳ ایستگاه نماینده، رتبه مدل‌ها آورده شده است). بر اساس رتبه مدل‌ها در هر ایستگاه و رابطه (۲) وزن هر مدل مشخص شد (جدول ۶).

جدول ۴: صحت سنجی برون داد ۵ مدل توسط سنجه KGE در ۳ ایستگاه منتخب در دوره پایه ۳۰ ساله (۱۹۸۵-۲۰۱۴)

MPI	CMCC	BCC	EC EARTH	INM	
۰/۰۳۳	۰/۰۲۴	۰/۰۳۷	۰/۰۴۴	۰/۰۲۴	رشت
-۰/۶۶۳	-۰/۶۷۵	-۰/۶۵۶	-۰/۶۹۱	-۰/۶۹۲	جلفا
۰/۰۱۶	۰/۰۰۸	-۰/۰۰۵	۰/۰۱۹	۰/۰۱۳	قوچان

جدول ۵: رتبه‌بندی مدل‌ها در ایستگاه‌های همدیدی منطقه مورد مطالعه

MPI	CMCC	BCC	EC EARTH	INM	
۳	۴	۲	۱	۵	رشت
۲	۳	۱	۴	۵	جلفا
۲	۴	۵	۱	۳	قوچان

جدول ۷: مقادیر KGE جهت مقایسه صحت سنجی مدل همادی و مدل برتر ۳ ایستگاه منتخب

مدل همادی	مدل منفرد برتر	
۰/۱۲	۰/۰۴۴	رشت
۰	-۰/۶۵۶	جلفا
۰/۰۸۵	۰/۰۱۹	قوچان

جدول ۶: وزن مدل‌های GCM استفاده شده در تحقیق

رتبه مدل‌ها	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم
وزن مدل‌ها	۰/۳۴	۰/۲۷	۰/۲	۰/۱۳	۰/۰۶

بر اساس مطالعه انجام شده، مدل همادی محاسبه شده بر اساس میانگین وزنی مبتنی بر رتبه، ملاک ارزیابی تغییرات بارش در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه برای دوره مشاهداتی با دوره آینده قرار گرفت. با توجه به محدودیت در صفحات مقاله، از میان پیش‌نگری‌های انجام شده برای ۳۲ ایستگاه همدیدی، ۱۰ ایستگاه منتخب (از بخش‌های مختلف منطقه مورد مطالعه) به عنوان نماینده انتخاب و نتایج آن‌ها در ادامه ارائه شده است.

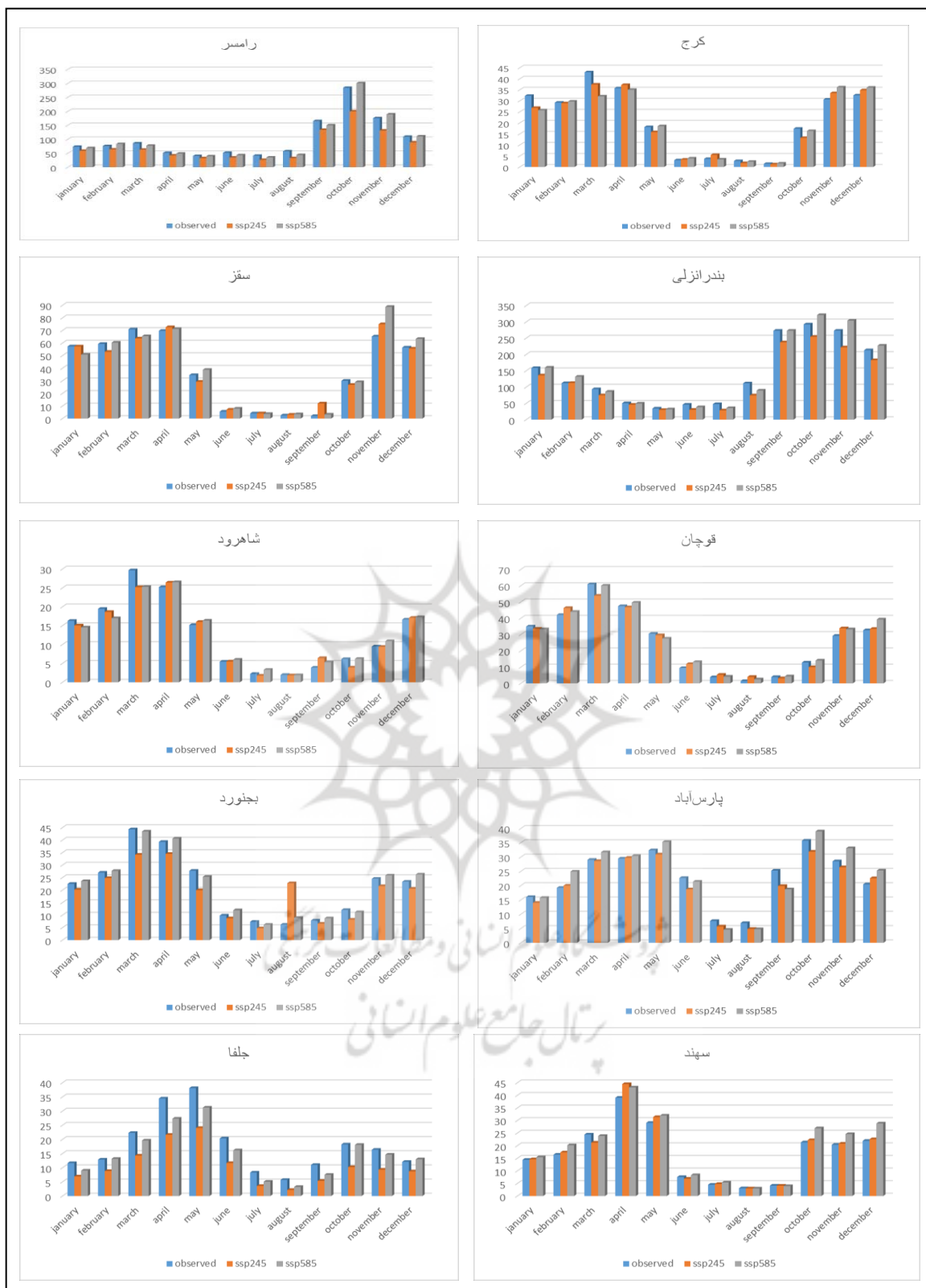
با توجه به شکل (۳) در ایستگاه کرج، بیشترین تغییرات کاهشی ماهانه بارش در ماه مارس در سناریو SSP585 و بیشترین تغییرات افزایشی ماهانه در ماه نوامبر در سناریو SSP585 پیش‌بینی شد. در ایستگاه رامسر، بیشینه تغییرات کاهشی و افزایشی ماهانه بارش در ماه اکتبر به ترتیب در سناریو SSP245 و سناریو SSP585 پیش‌بینی گردید. در ایستگاه سقز، حداکثر تغییرات کاهشی ماهانه بارش در ماه مارس در سناریو SSP245 و بیشترین تغییرات افزایشی ماهانه

نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که در ایستگاه‌های هواشناسی مختلف، توانایی مدل‌های AOGCM^۱ در برآورد بارش دوره پایه با یکدیگر متفاوت است. مقایسه نتایج صحت سنجی مدل همادی هر ایستگاه با ۵ مدل منفرد در آن ایستگاه در ۳۲ ایستگاه منطقه مورد مطالعه نشان داد که راستی آزمایی برون داد مدل همادی نسبت به برون داد مدل برتر هر ایستگاه، اریبی کمتری نسبت به داده‌های ایستگاهی در دوره تاریخی دارد. در جدول (۷) نتایج صحت سنجی مدل همادی و مدل برتر ۳ ایستگاه منتخب با سنجه KGE برای نمونه آورده شده است.

و قابل‌اغماضی در بارش نسبت به دوره مشاهداتی پیش‌نگری شد.

مطابق جدول (۸) در ایستگاه کرج، بیشینه تغییرات فصلی کاهشی بارش در فصل زمستان ۱۶ درصد در سناریو SSP585 و بیشینه تغییرات فصلی افزایشی بارش در فصل پاییز ۱۰ درصد در سناریو SSP585 رخ خواهد داد. در هر ۲ سناریو مقدار تغییرات بارش سالانه در ایستگاه کرج ۴ درصد و کاهشی پیش‌بینی شد. در ایستگاه رامسر، بیشترین تغییرات فصلی کاهشی بارش در فصل تابستان ۲۶/۷ درصد در سناریو SSP245 و حداکثر تغییرات فصلی افزایشی بارش در فصل پاییز ۵/۶۲ درصد در سناریو SSP585 رخ خواهد داد. در هر دو سناریو تغییرات بارش سالانه در ایستگاه رامسر کاهشی پیش‌بینی شد که در سناریو SSP245 با مقدار ۲۴/۹۵ درصد و در سناریو SSP585 با مقدار ۱/۶۵ درصد رخ خواهد داد. در ایستگاه سقز، بیشینه تغییرات فصلی کاهشی بارش در فصل زمستان ۷/۱۹ درصد در سناریو SSP245 و بیشینه تغییرات فصلی افزایشی بارش در فصل تابستان با میزان ۱۰۰ درصد در سناریو SSP245 رخ خواهد داد. در هر دو سناریو تغییرات بارش سالانه در ایستگاه افزایشی پیش‌بینی شد که برای سناریو متوسط ۰/۴۳ درصد و سناریو بدبینانه با مقدار ۶ درصد خواهد بود. در ایستگاه بندر انزلی، حداکثر تغییرات فصلی کاهشی بارش در فصل بهار ۱۹/۸ درصد در سناریو متوسط و بیشینه تغییرات فصلی افزایشی بارش در فصل پاییز ۹/۵ درصد در سناریو بدبینانه رخ خواهد داد. مقدار تغییرات بارش سالانه در ایستگاه بندر انزلی برای سناریو متوسط ۱۶/۹ درصد با کاهش و در سناریو بدبینانه با ۲/۴ درصد و افزایش پیش‌بینی شد. در ایستگاه شاهرود، بیشینه تغییرات فصلی کاهشی بارش در فصل زمستان ۱۳/۵ درصد در سناریو SSP585 و حداکثر تغییرات فصلی افزایشی بارش در فصل تابستان ۵۰ درصد در سناریو بدبینانه اتفاق خواهد افتاد. در هر دو سناریو تغییرات بارش سالانه در ایستگاه شاهرود نزولی پیش‌بینی شد.

در ماه نوامبر در سناریو SSP585 رخ خواهد داد. در ایستگاه بندر انزلی، ماکزیمم تغییرات کاهشی ماهانه بارش در ماه نوامبر در سناریو متوسط و بیشترین تغییرات افزایشی ماهانه در ماه اکتبر در سناریو بدبینانه اتفاق خواهد افتاد. در ایستگاه شاهرود، بیشترین تغییرات کاهشی ماهانه بارش در ماه مارس در سناریو SSP245 و بیشینه تغییرات افزایشی ماهانه در ماه نوامبر در سناریو بدبینانه پیش‌بینی شد. در ایستگاه قوچان، بیشینه تغییرات کاهشی ماهانه بارش در ماه مارس در سناریو میانه و بیشترین تغییرات افزایشی ماهانه در ماه دسامبر در سناریو SSP585 پیش‌بینی شد. در ایستگاه بجنورد، حداکثر تغییرات کاهشی ماهانه بارش در ماه مارس در سناریو SSP245 و بیشترین تغییرات افزایشی ماهانه در ماه اوت در سناریو متوسط رخ خواهد داد. در ایستگاه پارس‌آباد، بیشینه مقدار تغییرات کاهشی ماهانه بارش در ماه سپتامبر در سناریو SSP585 و بیشترین تغییرات افزایشی ماهانه در ماه نوامبر در سناریو SSP585 پیش‌بینی شد. در ایستگاه جلفا، ماکزیمم تغییرات کاهشی ماهانه بارش در ماه می در سناریو میانه رخ خواهد داد. تغییرات افزایشی ماهانه قابل توجه مشاهده نشد. در ایستگاه سهند، حداکثر تغییرات کاهشی ماهانه بارش در ماه مارس در سناریو SSP245 و بیشترین تغییرات افزایشی ماهانه در ماه دسامبر در سناریو SSP585 اتفاق خواهد افتاد. بر اساس ارزیابی صورت گرفته، در مقیاس زمانی ماهانه در منطقه مورد مطالعه، تغییرات بارش در دوره‌های آتی در بخش‌های مختلف از نظم خاصی برخوردار نیستند؛ ولی در اکثر ایستگاه‌های شمال غرب و شمال شرق منطقه مورد مطالعه، بیشینه تغییرات کاهشی بارش در ماه مارس و بیشینه تغییرات افزایشی بارش نسبت به دوره پایه در ماه نوامبر رخ خواهد داد. بطوریکه در بخش‌های شمالی منطقه مورد مطالعه حداکثر تغییرات کاهشی بارش در ماه نوامبر و ماکزیمم مقدار تغییرات افزایشی بارش در ماه اکتبر اتفاق خواهد افتاد. در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه در این تحقیق در ماه‌های ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر تغییرات بسیار ناچیز



شکل ۳: تغییرات ماهانه بارش تحت سناریوهای اقلیمی SSP245 و SSP585 برای ۱۰ ایستگاه منتخب طی دوره آتی نسبت به دوره پایه

جدول ۸. تغییرات سالانه و فصلی بارش تحت سناریوهای SSP245 و SSP585 برای ۱۰ ایستگاه منتخب طی دوره آینده نسبت به دوره پایه

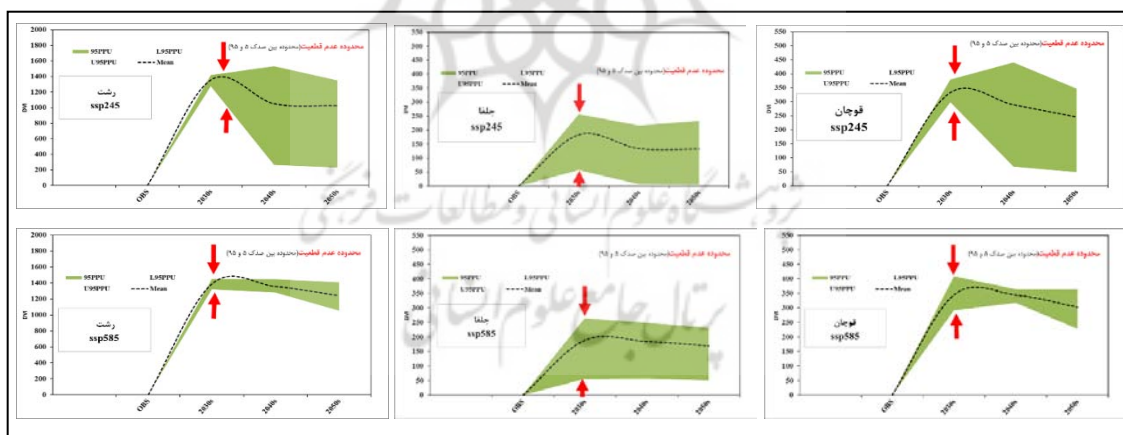
ایستگاه	فصل	بارش مشاهداتی (میلی‌متر)	تغییرات بارش (درصد)	
			SSP245	SSP585
رامسر	زمستان	۲۳۵/۰۵	-۲۱/۱۲	-۲/۵۵
	بهار	۱۴۳/۴۵	-۲۳/۸۲	-۷/۶۹
	تابستان	۲۶۳/۱۳	-۲۶/۷۰	-۱۲/۹۲
	پاییز	۵۶۹/۴۲	-۲۶/۰۷	۵/۶۲
	سالانه	۱۲۱۱/۰۶	-۲۴/۹۵	-۱/۶۵
کرج	زمستان	۱۰۴/۴	-۱۰/۸	-۱۶/۳۴
	بهار	۵۶/۸۶	-۰/۸۲	۰
	تابستان	۷/۷۸	۸/۳۵	-۱۲/۵
	پاییز	۸۰/۴۷	۱/۲۳	۱۰
	سالانه	۲۴۹/۵۱	-۴/۰۳	-۴
بندر انزلی	زمستان	۳۶۳/۹۱	-۱۱/۲۶	۳/۵
	بهار	۱۳۰/۵۰	-۱۹/۰۸	-۸/۴۶
	تابستان	۴۳۱/۸۴	-۲۱/۳	-۸
	پاییز	۷۷۸/۱۸	-۱۵/۴۲	۹/۵
	سالانه	۱۷۰۴/۴۵	-۱۶/۱۹	۲/۴
سقز	زمستان	۱۸۷/۵۴	-۷/۱۹	-۵/۸۸
	بهار	۱۰۹/۷۲	-۰/۹	۷/۲۷
	تابستان	۸/۶۰	۱۰۰	۱۱
	پاییز	۱۵۱/۷۱	۳/۲۸	۱۹
	سالانه	۴۵۷/۵۸	۰/۴۳	۶
قوچان	زمستان	۱۳۷/۶۹	-۳	-۱۳/۵
	بهار	۸۷/۲۳	-۱/۱۳	۳/۴۴
	تابستان	۸/۹۸	۳۳/۳۳	۲۲/۲۲
	پاییز	۷۴/۵۰	۲/۶۷	۱۶/۲۱
	سالانه	۳۰۸/۴۱	۰/۹۷	۵/۱۹
شاهرود	زمستان	۶۵/۳۹	-۱۰	-۱۳/۵
	بهار	۴۵/۸۱	۴	۶/۶۶
	تابستان	۸/۰۳	۲۵	۵۰
	پاییز	۳۲/۲۵	-۷	۶/۲۵
	سالانه	۱۵۱/۴۸	-۳	-۰/۶۶
پارس‌آباد	زمستان	۶۴/۱۶	-۲/۳۴	۱۲/۵
	بهار	۸۴/۴۳	-۵/۹۵	۳/۵۷
	تابستان	۳۹/۷۴	-۲۵	-۳۰
	پاییز	۸۴/۶۱	-۴/۷	۱۵/۴۷
	سالانه	۲۷۲/۹۵	-۷/۳۲	۴
بجنورد	زمستان	۹۳/۷۷	-۱۵/۹۵	۱
	بهار	۷۶/۸۳	-۱۸/۱۸	۰
	تابستان	۲۱/۳۲	۶۱/۹	۹/۵
	پاییز	۵۹/۹۴	-۱۶/۶۶	۵
	سالانه	۲۵۱/۸۷	-۹/۹۲	۲/۷۷
سهند	زمستان	۵۵/۲۴	-۳/۶۳	-۶/۷۷
	بهار	۷۵/۶۶	۹/۲۱	۹/۲
	تابستان	۱۱/۷۳	۰	۰
	پاییز	۶۳/۶۲	۴/۷۶	۲۵
	سالانه	۲۰۶/۲۶	۳/۳۹	۱۴
جلفا	زمستان	۴۶/۸	-۳۶/۱۷	-۱۰/۸۶
	بهار	۹۲/۹۱	-۳۸/۷	-۲۰/۴۳
	تابستان	۲۴/۹۵	-۵۶	-۴۰
	پاییز	۴۶/۶۳	-۴۰/۴۲	-۲/۲۲
	سالانه	۲۱۱/۳	-۳۹/۸۱	-۱۵/۶۳

۳۳/۳۳ درصد در سناریو SSP245 رخ خواهد داد. در هر دو سناریو تغییرات بارش سالانه در ایستگاه قوچان افزایشی پیش‌بینی شد. در ایستگاه بجنورد، بیشینه

در ایستگاه قوچان، ماکزیمم تغییرات فصلی کاهش‌ی بارش در فصل زمستان ۳ درصد در سناریو متوسط و بیشینه تغییرات فصلی افزایشی بارش در فصل تابستان

رخ خواهد داد. در هر دو سناریو تغییرات بارش سالانه در ایستگاه سهند صعودی پیش‌بینی شد. دامنه عدم قطعیت: بر اساس نمودار عدم قطعیت که برای ۳ ایستگاه همدیدی منتخب در منطقه نیمه شمالی ایران تحت ۲ سناریو SSP245 و SSP585 ترسیم شد، در همه سناریو برای هر ۳ ایستگاه با فاصله گرفتن از دوره مشاهداتی بر میزان عدم قطعیت افزوده گردیده است. افزایش دامنه عدم قطعیت از دهه ۲۰۴۰ تشدید شده است. نکته مهم در مقایسه نمودارهای دو سناریو وجود دارد، بهینه بودن نمودار عدم قطعیت سناریو بدبینانه نسبت به سناریو متوسط است که پهنای کم منحنی‌ها تأیید کننده این مطلب در هر ۳ ایستگاه است؛ بنابراین طبق ارزیابی ۲ سناریو بر اساس دامنه عدم قطعیت آن‌ها در زمینه پیش‌بینی بارش منطقه مورد مطالعه، نتایج حاصل از سناریو بدبینانه (SSP585) محتمل‌تر است و با عدم قطعیت کم‌تری نسبت به سناریو متوسط (SSP245) بارش نیمه شمالی ایران را در ۳ دهه آینده (۲۰۵۹-۲۰۳۰) پیش‌نگری می‌نماید.

تغییرات فصلی کاهشی بارش در فصل بهار ۱۸/۱۸ درصد در سناریو SSP245 و بیشترین تغییرات فصلی افزایشی بارش در فصل تابستان ۶۱/۹ درصد در سناریو SSP245 اتفاق خواهد افتاد. تغییرات بارش سالانه در ایستگاه بجنورد در سناریو متوسط کاهشی و سناریو بدبینانه افزایشی پیش‌بینی شد. در ایستگاه پارس‌آباد، حداکثر تغییرات فصلی کاهشی بارش در فصل تابستان ۲۵ درصد در سناریو میانه و بیشینه تغییرات فصلی افزایشی بارش در فصل پاییز ۱۵/۴۷ درصد در سناریو بدبینانه رخ خواهد داد. تغییرات بارش سالانه در ایستگاه پارس‌آباد در سناریو متوسط کاهشی و سناریو بدبینانه افزایشی پیش‌بینی شد. در ایستگاه جلفا، بیشینه تغییرات فصلی کاهشی بارش در فصل تابستان ۵۶ درصد در سناریو SSP245 پیش‌بینی شد. تغییرات بارش سالانه در ایستگاه جلفا در هر ۲ سناریو نزولی خواهد شد. در ایستگاه سهند، ماکزیمم تغییرات فصلی کاهشی بارش در فصل زمستان ۶/۷۷ درصد در سناریو بدبینانه و بیشینه تغییرات فصلی افزایشی بارش در فصل پاییز ۲۵ درصد در سناریو SSP585



شک ۴: نمودار عدم قطعیت برای ۳ ایستگاه نماینده منطقه مورد مطالعه تحت ۲ سناریو متوسط و بدبینانه

می‌کند. تغییر در الگوهای بارش در همه جهان و در کشور ایران به‌صورت واضح قابل اثبات است. اگر مسئولان و مدیران به‌صورت جدی این موضوع همه‌گیر را چاره‌اندیشی نکنند در آینده نزدیک تبعات سنگین این ام‌البلايا (تغییر اقلیم) دامن‌گیر کشور خواهد شد. نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم موضوعی بسیار حائز اهمیت در کل جهان است و مطابق تحقیقات دانشمندان مختلف به‌طور مسلم در حال رخ دادن است. مسئله افزایش بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای بخصوص گاز کربنیک که توسط انسان با شدت زیادی در حال افزایش است کره زمین و تمام موجودات آن را به‌صورت جدی تهدید

سالانه بارش صعودی خواهند داشت و در ۱۹ درصد از ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه تغییرات سالانه بارش تحت هر ۲ سناریو نزولی پیش‌بینی شد. همچنین نتایج نشان داد که دامنه عدم قطعیت پیش‌نگری بارش در این مطالعه تحت سناریو بدبینانه کم‌تر از سناریو متوسط است به عبارتی نتایج پیش‌نگری شده توسط سناریو SSP585 دارای قطعیت بیشتری نسبت به سناریو SSP245 است. تحقیق حاضر از لحاظ کاهش بارش در ایستگاه همدیدی تهران تحت هر دو سناریو SSP585 و SSP585 با مطالعه انجام شده توسط شجاع و شمسی‌پور (۱۴۰۲) هم سویی دارد. این مطالعه در زمینه کاهش بارش در ۲ سناریو SSP585 و SSP585 در ماه ژانویه و همچنین افزایش بارش در ماه دسامبر در ۲ سناریو ذکر شده در ایستگاه همدیدی مشهد با تحقیق سرابی و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت دارد. مطالعه انجام شده در زمینه کاهش بارش تحت سناریو متوسط در منطقه شمال غرب ایران با تحقیق ساری صراف و همکاران (۱۴۰۳) همخوانی مطلوبی دارد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از مساعدت‌های جناب آقای دکتر ایمان بابائیان قدردانی می‌کنند.

نتایج مطالعه پیش‌نگری بارش در نیمه شمالی ایران با استفاده از ۵ مدل GCM ارائه شده در گزارش ششم IPCC در ۳۲ ایستگاه هواشناسی همدیدی تحت ۲ سناریو متوسط و بدبینانه بر اساس ریز گردانی آماری با نرم‌افزار CMHYD نشان داد که در مقیاس زمانی ماهانه، بیش‌ترین تغییرات کاهش بارش در دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۹) نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) در منطقه مورد مطالعه در ماه‌های به ترتیب مارس و اکتبر و بیشینه تغییرات افزایش بارش در دوره زمانی مذکور در نیمه شمالی ایران در ماه‌های نوامبر و دسامبر رخ خواهد داد. بر اساس مطالعه انجام شده در مقیاس زمانی فصلی، بیشینه تغییرات کاهش بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه در فصل تابستان و بیش‌ترین تغییرات افزایش بارش در فصل پاییز مشاهده شد. طبق پژوهش انجام گرفته در مقیاس زمانی سالانه، تحت سناریو متوسط ۷۸ درصد ایستگاه‌ها کاهش بارش را تجربه خواهند کرد در صورتی که تحت سناریو بدبینانه ۷۵ درصد ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه افزایش بارش را خواهند داشت. مطابق تحقیق حاضر، ۵۶ درصد از ایستگاه‌ها دارای تغییرات سالانه بارشی صعودی تحت سناریو SSP585 و نزولی تحت سناریو SSP245 بودند، ۱۹ درصد از ایستگاه‌ها تحت هر ۲ سناریو تغییرات

منابع

۱. بابائیان، ایمان، مدیریان، راهله، خزانه‌داری، لیلی، کریمیان، مریم، کوزه‌گران، سعیده، کوهی، منصوره، فلامرزی، یاشار، و ملیوسی، شراره. (۱۴۰۲). چشم‌انداز بارش ایران در قرن ۲۱ با به‌کارگیری مقیاس‌کاهی آماری برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMHyd. فیزیکی زمین و فضا، ۴۹(۲)، ۴۳۱-۴۴۹. doi: 10.22059/jesphys.2023.332410.1007436
۲. بابائیان، ایمان؛ مدیریان، راهله؛ خزانه‌داری، لیلی؛ کوهی، منصوره؛ کوزه‌گران، سعیده؛ فلامرزی، یاشار؛ کریمیان، مریم و ملیوسی، شراره. (۱۴۰۰). پیش‌نگری بارش کشور با استفاده از مقیاس‌کاهی آماری برون‌داد مدل‌های CMIP6، پروژه داخلی پژوهشکده اقلیم‌شناسی، مشهد.
۳. جوان، خدیجه، و عزیززاده، محمدرضا. (۱۴۰۳). ارزیابی روش‌های مختلف تصحیح اریبی بر پیش‌نگری بارش مدل GFDL-ESM4 در حوضه دریاچه ارومیه. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۸(۸۸)، ۴۱۵-۳۹۷. doi: 10.22034/gp.2023.56731.3140
۴. حمیدیان پور، محسن و شجاع، فائزه. (۱۴۰۱). مقدمه‌ای بر روش‌ها و شگردهای مدل‌سازی اقلیم و تغییر اقلیم. چاپ اول. سیستان و بلوچستان: انتشارات دانشگاه سیستان و بلوچستان.

۵. خواجه امیری، چکاوک، خسروی، محمود، طاوسی، تقی، حمیدیان پور، محسن، و کیانی مقدم، منصور. (۱۴۰۱). صحت سنجی عملکرد برون‌داد مدل اقلیمی CMIP6 با داده‌های مشاهده‌ای کرانه‌های مکران. نشریه هواشناسی و علوم جو، ۵(۱)، ۴۱-۲۲. doi: 10.22034/jmas.2023.379448.1193
۶. زارعیان، محمدجواد. (۱۴۰۱). اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش استان یزد بر اساس خروجی ترکیبی مدل‌های CMIP6. علوم آب و خاک، ۲۶ (۲)، ۹۱-۱۰۵. doi: http://dx.doi.org/10.47176/jwss.26.2.31501.۱۰۵-۹۱
۷. زرین، آذر، و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۳۹۹). پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6). فیزیک زمین و فضا، ۴۶ (۳)، ۵۸۳-۶۰۲. doi: 10.22059/jesphys.2020.304870.1007226
۸. ساری صراف، بهروز، رستم زاده، هاشم، و محمدی، نبی. (۱۴۰۳). پیش‌نگری بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 تا پایان قرن ۲۱ در شمال غرب ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۳ (۱)، ۱۷۳-۱۹۴. doi: 10.22067/geoh.2022.76646.1223
۹. سالاری فنودی، محمدرضا، خسروی، محمود، طاوسی، تقی و حمیدیان پور، محسن. (۱۴۰۲). پیش‌نمایی بارش‌های تابستانه مونسونی جنوب شرق ایران مبتنی بر مدل همادی. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۴ (۱۵)، ۱-۲۲. doi: 10.30488/ccr.2023.390406.1123
۱۰. سرابی، مجتبی، دستورانی، محمدتقی، و زرین، آذر. (۱۳۹۹). بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر وضعیت دما و بارش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد طرق مشهد). نشریه هواشناسی و علوم جو، ۳ (۱)، ۶۳-۸۳. doi: 10.22034/jmas.2021.278862.1129
۱۱. شجاع، فائزه و شمسی‌پور، علی‌اکبر. (۱۴۰۲). پیش‌نمایی تغییرات بارش‌های آبی حوضه‌های آبخیز تأمین‌کننده آب شهر تهران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲ (۳۶)، ۱۵۱-۱۸۰. doi: 10.22111/jneh.2022.42622.1908
۱۲. میان‌آبادی، آمنه و سلاجقه، مریم. (۱۴۰۳). پیش‌نگری تغییر در تاریخ آخرین سرمازدگی بهار و تعداد روزهای سرمازدگی در ایستگاه‌های پسته‌خیز استان کرمان با استفاده از برون‌داد مدل‌های اقلیمی CMIP6. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۱۸ (۵)، ۱۱۹۴-۱۱۹۵. doi: 10.30488/ccr.2024.435000.1194
۱۳. ناظری، فائزه، محمودی، پیمان و امیر جهان‌شاهی، سید مهدی. (۱۴۰۴). تغییرپذیری بارش و پیش‌بینی بارش‌های سالانه مرکز و جنوب شرق ایران با استفاده از مدل سری‌های زمانی تصادفی. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۲۱ (۶)، ۱-۲۲. doi: 10.30488/ccr.2024.458098.1215
14. Al-Maliki, L. A., Al-Mamoori, S. K., Jasim, I. A., El-Tawel, K., Al-Ansari, N., Comair, F. G. (2022). Perception of climate change effects on water resources: Iraqi undergraduates as a case study. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(6), pp 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09695-y>
15. 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>
16. Diress, S. A., Bedada, T. B. (2021). Precipitation and Temperature trend analysis by Mann Kendall test: The case of Addis Ababa methodological station, Addis Ababa, Ethiopia. *African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences*, 4(4), pp517-526. <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.334454>
17. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016.
18. 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>

19. Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., & Dadashi-Roudbari, A. (2019). Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 138, 1539-1562. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-019-02906-9>
20. 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>
21. 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>
22. Jiang, J., Zhou, T., Chen, X., & Zhang, L. (2020). Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections. *Environmental Research Letters*, 15(5), 054009. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab7d03>
23. Kim, Y. H., Min, S. K., Zhang, X., Sillmann, J., & Sandstad, M. (2020). Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. *Weather and Climate Extremes*, 29, 100269. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100269>
24. Knoben, W. J., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
25. Li, Y., Li, Z., Zhang, Z., Chen, L., Kurkute, S., Scaff, L., Pan, X. (2019). High-resolution regional climate modeling and projection over western Canada using a weather research forecasting model with a pseudo-global warming approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11), pp 4635-4659. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4635-2019>
26. Li, Y., Yan, D., Peng, H., & Xiao, S. (2021). Evaluation of precipitation in CMIP6 over the Yangtze River Basin. *Atmospheric Research*, 253, 105406. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105406>
27. 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*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03916-2>
28. 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>
29. Praveen, B., Talukdar, S., Mahato, S., Mondal, J., Sharma, P., Islam, A. R. M., Rahman, A. (2020). Analyzing trend and forecasting of rainfall changes in India using non-parametrical and machine learning approaches. *Scientific reports*, 10(1), pp 1-21. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67228-7>
30. Sharafati, A., Nabaei, S., & Shahid, S. (2020). Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1864-1884. <https://doi.org/10.1002/joc.6307>
31. Srivastava, A., Grotjahn, R., & Ullrich, P. A. (2020). Evaluation of historical CMIP6 model simulations of extreme precipitation over contiguous US regions. *Weather and Climate Extremes*, 29, 100268. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100268>
32. Sung, H.M., Kim, J., & Shim, S. (2021). Climate Change Projection in the Twenty-First Century Simulated by NIMS-KMA CMIP6 Model Based on New GHGs Concentration Pathways. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 57, 851–862. <https://doi.org/10.1007/s13143-021-00225-6>

33. 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>
34. Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., ... & Ziehn, T. (2021). Climate model projections from the scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12(1), 253-293. <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>
35. 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>
36. Zhang, X., Hua, L., & Jiang, D. (2022). Assessment of CMIP6 model performance for temperature and precipitation in Xinjiang, China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 15(2), 100128. <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100128>

