









Projection of Iran's precipitation in 21st Century using downscaling of selected CMIP6 Models by CMHyd

Babaeian, I.¹  | Modirian, R.¹  | Khazanedari, L.¹  | Karimian, M.¹  | Kouzegaran, S.¹  | Kouhi, M.¹  | Falamarzi, Y.¹  | Malbusi, Sh.¹ 

1. Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Climate Research Institute, Mashhad, Iran.

Corresponding Author E-mail: ibabaeian@yahoo.com

(Received: 12 June 2022, Revised: 26 Nov 2022, Accepted: 10 Jan 2023, Published online: 30 Aug 2023)

Summary

Geographical location of Iran in arid and semi-arid regions has strongly affected its food security, water resources and weather- and climate-related extreme events due to climate change. Global warming, on average, increases precipitation on Earth by increasing evaporation from the oceanic surface that enters the atmosphere, but the response of the West Asian region to global warming is generally a decrease in precipitation. Some studies have confirmed a decrease in the average precipitation of Iran with an increase of precipitation in the south and southeast of the country. They also confirmed that the largest decrease in the precipitation of Iran occurs in the Zagros region.

To this end, in this study, an overview of possible changes in precipitation trends in 43 stations of Iran is presented. To achieve the goals of the paper, the data of four Earth System Models from CMIP6 models, including MIROC6, FGOALS_g3, BCC-CSM2-MR and ACCESS-ESM1-5 were used. The precipitation output of the selected models has been statistically downscaled using CMHyd software for 43 synoptic stations over Iran. Observational period of 1985-2014 and the next three 25-year periods as the near future 2020-2026, the mid future 2075-2051 and the far future 2100-2076 were considered as study periods. Future changes in precipitation under three Shared Socio-economic Pathways (SSP) scenarios of SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 were estimated. During the downscaling process, the Clausius-Clapiron (CC) rate was applied to increase the trend of heavy rainfall. The air holding capacity is controlled by the Clausius-Clapiron relation, which is the water vapour holding capacity of the air at 7% /oC, the so-called Clausius-Clapeyron

(CC) rate (bellow equation). $e_s = 6.1094e^{\frac{17.625T}{T+243.04}}$

Since the maximum temperature increase in the country was considered 10 degrees Celsius based on the worst possible scenario (SSP5-8.5), so all severe precipitation events were reduced to 130% of its normal amount.

The results showed that future rainfall changes were not significant in about 78% of the stations. The increase and decrease of rainfall were significant in 19% and 3% of the stations, respectively. The largest increase in precipitation will occur in the south-southeast and the largest decrease will occur in the central Zagros area. The average rainfall of the country will increase by 0.4% annually (with a uncertainty range of 14%). On a seasonal scale, precipitation changes in spring, summer, autumn and winter were estimated to be + 15.2, -11, -6 and +3.5, respectively. Although a 15.2% increase in precipitation is projected for spring, the range of uncertainty with 81.9% indicates a lack of confidence in future precipitation estimates of spring season. The maximum uncertainty is related to the spring rains, which shows that the rains of this season are becoming more and more distrustful. Under warming conditions, more spring rainfall increases will occur. In summer, in the near future, summer rains tend to increase and then decrease with more level of Global Warming. After spring, most uncertainty is related to summer precipitation. The autumn precipitation tends to be less than normal with lower amount of uncertainty, although its decrease is not significant. The small range of the autumn rainfall uncertainty chart indicates the agreement of different model-scenarios in projection of autumn rainfall. Winter rainfall projection does not have significant uncertainty and almost all model-scenarios agree on the relatively low trend of rainfall increase. In this season, under higher amount of Global Warming, the precipitation increases and the amplitude of uncertainty also increases. Among the next three periods, the lowest and highest range of uncertainty in the annual changes of precipitation in the first and last decade of the present century will occur with the range of changes of 14 and 29.1%, respectively. The lowest and highest amplitude of uncertainty on the seasonal scale with 3.6 and 81.9 are estimated in winter (near future) and spring (far future), respectively. This situation indicates that in the future most precipitation fluctuations will occur in the spring.

Keywords: Climate change, Precipitation, Iran, CMIP6, CMHyd.

Cite this article: Babaeian, I., Modirian, R., Khazanedari, L., Karimian, M., Kouzegaran, S., Kouhi, M., Falamarzi, Y., & Malbusi, Sh. (2023). Projection of Iran's precipitation in 21st Century using downscaling of selected CMIP6 Models by CMHyd. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(2), 431-449. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.332410.1007436>

E-mail: (1) r_modiryan@yahoo.com | l.khazanedari@yahoo.com | mkarimian59@yahoo.com | saeedeh_kouzegaran@yahoo.com | man_koohi@yahoo.com | yashar.fa@gmail.com | malbousi_434@yahoo.com



چشم‌انداز بارش ایران در قرن ۲۱ با به‌کارگیری مقیاس کاهی آماری برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMHyd

ایمان بابائیان^۱ | راهله مدیریان^۱ | لیلی خزانهداری^۱ | مریم کریمیان^۱ | سعیده کوزه‌گران^۱ | منصوره کوهی^۱ | یاشار
فلامرزی^۱ | شراره ملبوسی^۱

۱. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، مشهد، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: ibabaeian@yahoo.com

(دریافت: ۱۴۰۱/۳/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۵، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۶/۸)

چکیده

این پژوهش چشم‌انداز تغییرات محتمل بارش در ۴۳ ایستگاه هواشناسی کشور را تا انتهای قرن حاضر ارائه می‌کند. برای این منظور، از داده‌های چهار مدل از نوع ESM به نام‌های MIROC6، FGOALS_g3، BCC-CSM2-MR و ACCESS-ESM1-5 از مجموعه مدل‌های سری CMIP6 استفاده شد. برون‌داد خام بارش توسط نرم‌افزار CMHyd مقیاس‌کاهی شد. دوره مشاهداتی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ و دوره‌های آینده به‌صورت آینده نزدیک ۲۰۵۰-۲۰۲۶، آینده میانه ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و آینده دور ۲۱۰۰-۲۰۷۶ در نظر گرفته شدند. تغییرات بارش در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ بر مبنای سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی شد. نتایج نشان دادند که تغییرات بارش آینده در حدود ۷۸ درصد از ایستگاه‌ها معنی‌دار نیستند و در ۱۹ و ۳ درصد ایستگاه‌ها به‌ترتیب افزایش و کاهش معنی‌داری دارند. بیشترین افزایش بارش در جنوب-جنوب‌شرق و بیشترین کاهش در زاگرس مرکزی رخ خواهد داد. میانگین بارش کشور در مقیاس سالانه ۰/۴ درصد (با دامنه عدم قطعیت ۱۴ درصد) افزایش می‌یابد. پیش‌نگری در مقیاس فصلی نشانگر تغییرات در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به‌ترتیب به مقدار ۱۵/۲، -۱۱، -۶ و ۳/۵ درصد می‌باشد. اگرچه برای فصل بهار افزایش بارش ۱۵/۲ درصدی پیش‌نگری شده است، اما دامنه تغییرات ۸۱/۹ درصدی نشان از بی‌اعتمادی به بارش‌های آینده این فصل است.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، بارش، ایران، CMIP6، CMHyd.

۱. مقدمه

بابائیان و همکاران، (۱۳۸۸؛ ۲۰۲۱). کشورهای در حال توسعه به‌علت ظرفیت‌های سازگاری کم در مواجهه با رخدادهای شدید آب‌وهوایی، به پیامدهای تغییر اقلیم حساس‌تر هستند (پولیوتی و همکاران، ۲۰۰۹). از طرفی جمعیت رو به رشد در آنها، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر این‌گونه جوامع به‌ویژه در بخش کشاورزی، تولید و امنیت مواد غذایی را به یکی از چالش‌های اصلی تبدیل کرده است. آگاهی از روند تغییرات بارش و دیگر متغیرهای اقلیمی می‌تواند مقاومت و انعطاف‌پذیری جوامع را در برابر پیامدهای ناگوار تغییر اقلیم افزایش دهد. همچنین پیش‌نگری‌های اقلیمی می‌توانند مستقیماً در برنامه‌ریزی‌ها

گرمایش جهانی به‌طور میانگین از طریق افزایش تبخیر از سطوح اقیانوسی و ورود آن به جو موجب افزایش بارش در کره زمین می‌شود، اما پاسخ اقلیم منطقه غرب آسیا به گرمایش جهانی، در خصوص بارش، عموماً کاهش است. برخی مطالعات داخل و خارج از کشور کاهش میانگین بارش و افزایش بارش یا عدم تغییر آن‌را را در مناطقی از جنوب کشور تأیید کرده‌اند. آنها همچنین به وقوع بیشترین کاهش بارش در منطقه زاگرس صحنه گذاشته‌اند. برخی پژوهش‌ها افزایش معنی‌دار رخدادهای شدید بارشی را در شرایط گرمایش جهانی مشخص‌تر از تغییر در میانگین بارش برآورد کرده‌اند (IPCC، ۲۰۱۴ و ۲۰۲۱)؛

استناد: بابائیان، ایمان؛ مدیریان، راهله؛ خزانهداری، لیلی؛ کریمیان، مریم؛ کوزه‌گران، سعیده؛ کوهی، منصوره؛ فلامرزی، یاشار و ملبوسی، شراره (۱۴۰۲). چشم‌انداز بارش ایران در

قرن ۲۱ با به‌کارگیری مقیاس‌کاهی آماری برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMHyd. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۹(۲)، ۴۳۱-۴۴۹. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.332410.1007436>

رایانامه: (۱) r_modiriy@yaho.com | l.khazanedari@yahoo.com | mkarimian59@yahoo.com | saeedeh_kouzehgaran@yahoo.com | manboussi_434@yahoo.com | yashar.fa@gmail.com | man_koohi@yahoo.com



و سیاست‌گذاری‌های کلان در عرصه‌های مختلف مانند کشاورزی، زراعت، مدیریت منابع آب و مخاطرات جوی اقلیمی مورد استفاده قرار گیرند.

پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اقلیمی (CMIP) که ثمره گردهم‌آیی نمایندگان مراکز فعال در زمینه مدل‌سازی تغییر اقلیم در سال ۱۹۹۵ می‌باشد، مهم‌ترین ابزار برای پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی آینده در سطح کره زمین است. این پروژه نقش مهمی در تهیه گزارش‌های جامع تغییر اقلیم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) ایفا می‌کند. برآورد‌های اخیر از گرمایش جهانی حاکی از دقیق‌بودن داده‌های پروژه CMIP است که منجر به افزایش اعتماد به صحت پروژه مذکور شده است (بیکر و همکاران، ۲۰۱۳؛ بلزکیوز و همکاران، ۲۰۱۳). نتایج حاصل از مدل‌های جدید اقلیمی CMIP6 نوید بهبود و تقویت پیش‌نگری تغییر اقلیم برای مناطق مختلف را می‌دهد. در همین راستا تحقیقاتی با استفاده از داده‌های مدل‌های یادشده در جهان در حال انجام است. گنجاندن واداشت‌های خورشیدی از نوآوری‌های CMIP6 می‌باشد. متر و همکاران (۲۰۱۷) توصیف جامعی از واداشت‌های خورشیدی در مدل‌های CMIP6 ارائه کردند. آیرینگ و همکاران (۲۰۱۶) به بازنگری طراحی آزمایش‌ها و ساختار مدل‌های فاز ۶ پروژه مقایسه متقابل مدل‌های جفت‌شده پرداختند. به واسطه طراحی و توزیع شبهه‌سازی مدل‌های اقلیم جهانی در اقلیم گذشته، حال و آینده، پروژه مقایسه متقابل مدل‌های جفت‌شده به یکی از ارکان پایه در دانش اقلیم تبدیل شده است. نتایج گروس و همکاران (۲۰۲۰) در پیش‌نگری افق تغییر اقلیم استرالیا نشان داد که به‌طور کلی پیش‌نگری دما و بارندگی استرالیا از مجموعه مدل‌های در دسترس CMIP6 با مدل‌های CMIP5 همسو بودند، اما پیش‌نگری‌های همادی دامنه باریک‌تری از تغییرات بارش در تابستان برای شمال استرالیا و در زمستان برای جنوب آن را نشان می‌دهند. جیانگ و همکاران (۲۰۲۰) تغییرات آینده بارش در آسیای میانه بر اساس پیش‌نگری‌های CMIP6 را مورد بررسی قرار دادند. آنها با به‌کارگیری شبهه‌سازی تاریخی و پیش‌نگری اقلیم آینده بر مبنای چهار

سناریوی ترکیبی از SSPها (-SSP2, SSP1-2.6, SSP3-7.0 and SSP5-8.5, 4.5) از مدل گزارش AR6، تصویر جامعی از تغییرات بارش بر روی آسیای میانه را ارائه دادند. یافته‌های المزرعی و همکاران (۲۰۲۰)، نشان از وجود اریبی در شبهه‌سازی‌های مدل‌های CMIP6 در میانگین دما و بارش در آسیای جنوبی دارد. نتایج آنها گویای حساسیت بیشتر مدل‌های CMIP6 به انتشار گازهای گلخانه‌ای در منطقه جنوب آسیا در پیش‌نگری اقلیم آینده طی قرن ۲۱ در مقایسه با مدل‌های CMIP5 است. نتایج ۲۷ مدل CMIP6 افزایش پیوسته در میانگین دمای سالانه روی جنوب آسیا طی قرن ۲۱ تحت سه سناریوی آینده نشان داد که می‌تواند منجر به سرعت بیشتر در ذوب یخچال‌ها در این منطقه شود. میزان تغییر در میانگین بارش سالانه پیش‌نگری‌شده بین کشورهای آسیای جنوبی متفاوت است. برآورد می‌شود تا پایان قرن بیست‌ویکم، میانگین بارندگی سالانه با ۱۷/۱٪ در بنگلادش، ۱۸/۹٪ در بوتان، ۲۷/۳٪ در هند، ۱۹/۵٪ در نپال، ۱۹/۵٪ در پاکستان و ۲۵/۱٪ در سریلانکا تحت سناریوی SSP5-8.5 تغییرات داشته باشد. پیش‌نگری بارش فصلی نیز تغییرات زیادی را نشان داد. میزان بارش پیش‌نگری‌شده در زمستان نشان‌دهنده افزایش شدید بارش در هیمالیای غربی همراه با کاهش بارش در شرق آن بود. از سوی دیگر، بررسی بارش تابستان نشانگر افزایش شدید در بیشتر مناطق آسیای جنوبی است و بیشترین میزان افزایش در منطقه خشک جنوب پاکستان و مناطق مجاور هند، تحت بدترین سناریوی انتشار است.

زمانی و همکاران (۲۰۲۰) اقدام به ارزیابی عملکرد مدل‌های دو پروژه CMIP5 و CMIP6 در پیش‌نگری میانگین بارش در مقیاس‌های زمانی سالانه و فصلی در شمال و شمال غرب کشور طی دوره ۱۹۸۷-۲۰۰۵ با استفاده از آماره‌های ضریب همبستگی، RMSE، خطای نسبی و نمودار تیلور کردند. نتایج پیش‌نگری همادی نشان داد که بارش شبهه‌سازی‌شده توسط دو پروژه فوق متفاوت می‌باشد، به‌طوری‌که اریبی نسبی برای زمستان در تمام

به روش آماری مقیاس کاهی شده و چشم‌انداز تغییرات بارش در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱ نسبت به دوره پایه برآورد شده است. در بخش‌های بعدی این مقاله به معرفی روش پژوهش، منطقه و داده‌ها، کارایی مدل‌های CMIP6 و نتایج و بحث پرداخته می‌شود.

۲. روش پژوهش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه و داده‌های مشاهداتی

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق گستره ایران بوده و از دو نوع داده مشاهداتی و برون‌داد مدل‌های پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اقلیمی-فاز ششم تحت سناریوهای خط سیر مشارکتی اقتصادی اجتماعی (SSP) که در گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم به کار گرفته شده، استفاده شده است. داده‌های مشاهداتی شامل بارش روزانه ۴۳ ایستگاه همدیدی کشور در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) می‌باشد که فرایند همگن‌سازی داده‌ها بر روی همه آنها انجام گرفت. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

ایستگاه‌ها در مدل‌های CMIP6 کمتر از CMIP5 بود که نشان‌دهنده عملکرد بهتر و کاهش عدم قطعیت در مدل‌های CMIP6 است. تعدادی از محققان کشور به موضوع عدم قطعیت در مدل‌سازی‌های اقلیمی پرداخته‌اند که از جمله می‌توان به پژوهش کوهی و پاکدامن (۱۴۰۰) و لطفی و همکاران (۱۳۹۹) اشاره کرد که پیش‌نگری محتمل بارش به همراه عدم قطعیت مربوطه مورد بررسی قرار گرفته است. لحاظ محدودیت‌های فیزیکی می‌تواند بخشی از عدم قطعیت مقیاس کاهی آماری را کاهش دهد. در این ارتباط مطالعات نشان داده‌اند که روند افزایش رخداد‌های شدید بارشی اغلب از آهنگ کلاسیوس-کلاپیرون (۷ درصد بر درجه کلونین افزایش محتوای رطوبتی جو) پیروی می‌کند (هاردویچ و همکاران، ۲۰۱۰؛ دروینسکی و همکاران، ۲۰۱۶). برخی ضرورت‌های این تحقیق عبارت‌اند از: بررسی معنی‌داری و عدم قطعیت بارش‌های آینده کشور و مقیاس کاهی آن با لحاظ محدودیت ناشی از آهنگ کلاسیوس-کلاپیرون. در این پژوهش با لحاظ دیدگاه فوق، برون‌داد مدل‌های CMIP6

جدول ۱. ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه.

ردیف	استان	نام ایستگاه	ردیف	استان	نام ایستگاه	ردیف	استان
۱	آذربایجان شرقی	تبریز	۱۶	خراسان شمالی	بجنورد	۳۱	کهگیلویه و بویراحمد
۲	آذربایجان غربی	خوی	۱۷	خوزستان	اهواز	۳۲	کرمان
۳		ارومیه	۱۸		دزفول-فرودگاه	۳۳	
۴	اردبیل	اردبیل	۱۹	زنجان	زنجان	۳۴	گلستان
۵	اصفهان	اصفهان	۲۰	سمنان	شاهرود	۳۵	گیلان
۶	البرز	کرج	۲۱		سمنان	۳۶	
۷	ایلام	ایلام	۲۲	سیستان و بلوچستان	چابهار	۳۷	لرستان
۸	بوشهر	بوشهر-فرودگاه	۲۳		زابل	۳۸	مازندران
۹	تهران	تهران-فرودگاه	۲۴		زاهدان	۳۹	
۱۰	چهارمحال و بختیاری	شهرکرد	۲۵	فارس	شیراز	۴۰	مرکزی
۱۱	خراسان جنوبی	بیرجند	۲۶	قزوین	قزوین	۴۱	هرمزگان
۱۲		طبس	۲۷	قم	قم	۴۲	همدان
۱۳	خراسان رضوی	مشهد	۲۸	کردستان	سنندج	۴۳	یزد
۱۴		سبزوار	۲۹		سقز		
۱۵		تربت حیدریه	۳۰	کرمانشاه	کرمانشاه		

سناریوهای به نسبت زیادی از مدل‌های CMIP6 است، با این حال به دلیل سهولت در دانلود، امکان برش زمانی و مکانی داده‌ها و نیز وجود حداقل سناریوهای اصلی موردنیاز، مورد مراجعه تعداد به نسبت زیادی از محققان می‌باشد. آدرس دو پایگاه یاد شده به صورت زیر است:

<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6>

در این تحقیق از داده‌های بارش مدل‌های با تفکیک مکانی افقی ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلومتر در چهار بازه زمانی تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۵)، آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، آینده میانه (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) استفاده شد. اونیل و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تعداد ۱۳۷۸ مقاله در فاصله زمانی ۲۰۱۹-۲۰۱۴ تعداد سناریوهای کاربردی SSP را مشخص کردند. در مطالعه آنها سه سناریوی SSP2-4.5، SSP5-8.5 و SSP1-2.6 به ترتیب بیشترین حجم از مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند. بر این اساس در این مطالعه سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به عنوان سناریوهای خوشبینانه، متوسط و بدبینانه در نظر گرفته 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 ۲۵۰ و بهتر داشتند، مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۲).

۲-۲. داده‌ها و کارآیی مدل‌های CMIP6

از تفاوت‌های مهم مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اقلیمی نسبت به مدل‌های پیشین، استفاده از سناریوهای SSP است که تلفیقی از سناریوهای RCP و سیاست‌های اقتصادی اجتماعی است. علاوه بر آن، عمدتاً از مدل‌های سیستم زمینی ESM (Earth System Model) به جای مدل‌های گردش کلی (GCM) استفاده شده است. در مجموعه مدل‌های CMIP6 دو سری مدل‌های اقلیمی GCM و ESM وجود دارند که مدل‌های ESM به دلیل استفاده بیشتری از مؤلفه‌های سامانه زمین در شبیه‌سازی اقلیم دوره تاریخی و آینده، دارای توانمندی بیشتری نسبت به مدل‌های GCM می‌باشند؛ آنها نسل جدیدی از مدل‌های اقلیمی می‌باشند که به تدریج جایگزین مدل‌های GCM می‌شوند. در مدل‌های فاز ششم از تلفیق سناریوهای اجتماعی-اقتصادی و سناریوهای واداشت تابشی نماینده غلظت گازهای گلخانه‌ای برای تحلیل پس‌خورهای بین تغییر اقلیم و عوامل اجتماعی-اقتصادی مانند رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری استفاده شده است. داده‌های مدل‌های CMIP6 از دو پایگاه مهم ESGF و کوپرنیکس قابل دریافت می‌باشند که پایگاه ESGF به عنوان مرجع اصلی بوده و تمام اولویت‌های داده‌ای تعریف شده در پروژه CMIP6 را پوشش می‌دهد. پایگاه کوپرنیک (تا زمان تهیه این مقاله) فاقد واریانت‌ها و

جدول ۲. مدل‌های CMIP6 با داده‌های بارش در دسترس پس از غربالگری داده‌های مشترک سه سناریوی SSP و تاریخی.

variant	SS5-8.5	SSP2-4.5	SSP1- 2.6	Hist	Resolution(km)		Models	ردیف
					250	100		
$r_1i_1p_1f_1$	✓	✓	✓	✓	✓		ACCESS-ESM1-5	۱
$r_1i_1p_1f_1$	✓	✓	✓	✓		✓	BCC-CSM2-MR	۲
$r_1i_1p_1f_1$	✓	✓	✓	✓		✓	CESM2	۳
$r_1i_1p_1f_2$	✓	✓	✓	✓	✓		CNRM-CM6-1	۴
$r_1i_1p_1f_1$	✓	✓	✓	✓	✓		FGOALS-g3	۵
$r_1i_1p_1f_1$	✓	✓	✓	✓	✓		GISS-E2-1-G	۶
$r_1i_1p_1f_1$	✓	✓	✓	✓	✓		IPSL-CM6A-LR	۷
$r_1i_1p_1f_1$	✓	✓	✓	✓	✓		MIROC6	۸
$r_1i_1p_1f_1$	✓	✓	✓	✓		✓	MRI-ESM2-0	۹
$r_1i_1p_1f_1$	✓	✓	✓	✓	✓		NorESM2-LM	۱۰

کارآیی هر یک از مدل‌های CMIP6 در دسترس از طریق مقایسه داده‌های تاریخی آنها با داده‌های بازکاوی از طریق ترسیم نمودار تیلور (تیلور، ۲۰۰۱) مشخص شد. نمودار تیلور، مشخصه‌های نمایه‌های اریبی، انحراف معیار و جذر میانگین مربعات را دارا است.

۲-۳. مقیاس گاهی توسط CMHyd

جهت مقیاس‌گاهی برونداد مدل‌های گردش کلی از نرم‌افزار CMHyd (Climate Model data for Hydrologic modeling) 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 مقیاس‌گاهی شده دینامیکی از قبیل داده‌های CORDEX به کار می‌رود. در فرایند تصحیح اریبی الزاماً کاهش مقیاس انجام نمی‌شود و تفکیک مکانی داده‌های تصحیح شده با داده‌های خام مشابه است. CMHyd از هشت روش تصحیح اریبی طی فرایندی مجزا برای بارش و دما (شامل دمای بیشینه و کمینه) استفاده می‌کند. از بین هشت روش یادشده، پنج روش مختص بارش و چهار روش مختص دما می‌باشند (جدول ۳).

نرم‌افزار CMHyd از دو بخش اصلی پردازش (Processing) و ترسیم (plot) تشکیل شده است که در بخش پردازش کلیه مراحل مربوط به ورودی داده‌ها تا مقیاس‌گاهی قرار دارد و در بخش ترسیم، خروجی‌ها ترسیم می‌شوند. بخش پردازش خود به چهار زیربخش اصلی شامل ورودی داده‌های دیدبانی (observed climate input select)، ورودی مدل اقلیمی (climate model)، انتخاب دایرکتوری خروجی‌های مقیاس‌گاهی شده (output directory) و فرایند اجرای مدل (process) تقسیم می‌شود. در زیربخش ورودی داده‌های دیدبانی، در دایرکتوری مربوطه، یک فایل متادیتا (Location file) در برگزیده شماره مشخصه ایستگاه، نام، عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاع تمامی ایستگاه‌ها و تعدادی

فایل‌های متنی داده شامل داده‌های روزانه متغیر موردنظر به‌طور مجزا برای هر یک از ایستگاه‌ها قرار داده می‌شود. در این بخش فرمت داده‌های دیدبانی الزاماً به‌صورت ASCII است. در فایل ASCII، داده‌های بارش به‌صورت تک‌ستونی و دما به‌صورت دو ستونی (دمای بیشینه در ستون اول و دمای کمینه در ستون دوم) درج می‌شوند. همچنین در تمام فایل‌های متنی بارش و دما، روز شروع داده‌ها در اولین سطر درج می‌شود. همچنین خلاءهای آماری با کد ۹۹/۹- یا ۹۹/۰- نشان داده می‌شوند. در زیربخش مدل اقلیمی بایستی برای هر دوره-سناریوی مورد مطالعه دایرکتوری جداگانه حاوی فایل سناریو و تاریخی ایجاد شود. فرمت داده‌های این بخش می‌تواند به‌صورت متنی یا netcdf باشد. در زیربخش انتخاب دایرکتوری، مسیر ذخیره داده‌های مقیاس‌گاهی شده مشخص می‌شود. نهایتاً در زیربخش فرایند اجرای مدل، ابتدا طول دوره داده‌های دیدبانی و تاریخی و میزان همپوشانی آنها مشخص و چک می‌شوند و سپس فرایند مقیاس‌گاهی اجرا می‌شود. در هر یک از مراحل ورود داده‌های دیدبانی، ورود داده‌های مدل و چک کردن داده‌های تاریخی و دیدبانی، بخشی برای درج پیام‌های خطای احتمالی در نظر گرفته شده است. با کمی اغماض می‌توان از این نرم‌افزار برای مقیاس‌گاهی سایر متغیرهای مرتبط با بارش و دما استفاده کرد، در عین حال استفاده از آن برای سایر متغیرها نیاز به دقت نظر و توجه بیشتر است. اجرای سریع و امکان انتخاب گزینه‌های مختلف از مزایای این نرم‌افزار است. هشت روش مقیاس‌گاهی بارش (۵ روش) و دمای (۴ روش) مورد استفاده در مدل CMHyd از فرمول‌ها و فرایندهای زیر برای مقیاس‌گاهی استفاده می‌کنند. بایستی توجه شود که در تمامی مراحل مقیاس‌گاهی، داده‌های تاریخی و آینده در سال‌های کیبسه ۳۶۶ روز داده داشته باشند، وگرنه در پیش‌نگری برای انتهای قرن حاضر، داده‌ها یک ماه به عقب جابه‌جا می‌شوند. یک راه برای حل این مشکل استفاده از مدل‌های با تقویم کیبسه (۳۶۶ روزه) است.

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

ردیف	روش مقیاس‌کاهی	بارش	دما
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	✓	✓

جدول ۴. فرایندها و فرمول‌ها مورد استفاده در روش‌های مقیاس‌کاهی نرم‌افزار CMHyd.

نام روش	توضیح روش مقیاس‌کاهی	منبع
Linear scaling, additive	نسبت میانگین ماهانه مقادیر دیدبانی به تاریخی مدل در دوره یکسان به سری داده‌های شبیه‌سازی شده آینده ضرب می‌شود. این روش ترجیحاً برای مقیاس‌کاهی بارش، فشار بخار و تابش استفاده می‌شود.	منلز و همکاران، ۲۰۲۰
Linear scaling, multiplicative	تفاوت میانگین ماهانه داده‌های دیدبانی و تاریخی مدل در دوره یکسان به سری داده‌های شبیه‌سازی شده آینده اعمال می‌شود. این روش ترجیحاً برای مقیاس‌کاهی دما استفاده می‌شود.	
Delta change, additive	تفاوت بین مقادیر متغیر در شبیه‌سازی تاریخی و آینده به مقادیر دیدبانی افزوده می‌شود.	دیانیتو و ویلی، ۲۰۰۵
Delta change, multiplicative	نسبت بین مقادیر متغیر در شبیه‌سازی تاریخی و آینده در مقادیر دیدبانی ضرب می‌شود.	
Precipitation local intensity	به‌طور همزمان شدت و فرکانس بارش تصحیح می‌شود. ابتدا آستانه شدت بارش هر ماه تعیین می‌شود، سپس تعداد روزهای تر شبیه‌سازی فراتر از آستانه یادشده با مقادیر دیدبانی مربوطه تطابق داده می‌شود.	شمیدلی و همکاران، ۲۰۰۶؛ لو و همکاران،
Power transform	به‌دلیل ناتوانی روش‌های انتقال مانند LS و DC در شبیه‌سازی واریانس، روش غیرخطی به‌صورت ضرب توانی برای تصحیح واریانس بارش استفاده می‌شود.	لیندر و بویشاند، ۲۰۰۷
Variance scaling	این روش در سه مرحله میانگین و واریانس دما را تصحیح می‌کند.	ترینک و همکاران، ۲۰۱۰
Distribution mapping	در این روش تابع توزیع داده‌های شبیه‌سازی به نحوی تصحیح می‌شود تا با توزیع دیدبانی مطابق باشد.	پانی و همکاران، ۲۰۱۰

$$e_s = 6.1094e^{\frac{17.625T}{(T+243.04)}} \quad (1)$$

شرط فوق بر روی مقادیر مقیاس‌کاهی شده بارش ایستگاه‌های کشور اعمال شد و آن دسته از مقادیر بارش مقیاس‌کاهی شده که از آهنگ فوق بیشتر بودند تا حد بالای شاخص فوق (۱۳٪) بر درجه کلونین کاهش داده شدند. از آنجا که میزان افزایش دمای کشور بر اساس بدترین سناریوی ممکن (SSP5-8.5) ۱۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد، بنابراین تمامی رخداد‌های شدید بارشی پیش‌نگری شده که از آستانه ۱۳۰ درصد نسبت به دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۵ فراتر بودند تا حد ۱۳۰ درصد تقلیل داده شدند.

۲-۴. محاسبه معنی‌داری تغییرات بارش

در اغلب مطالعات، مقدار بارش آینده ایستگاه‌های

در طی فرایند مقیاس‌کاهی، محدودیت آهنگ کلاسیوس-کلاپیرون بر افزایش روند بارش‌های شدید اعمال شد. ظرفیت نگهداشت رطوبت توسط هوا به‌وسیله رابطه کلاسیوس-کلاپیرون (رابطه ۱) کنترل می‌شود که تقریباً ۷ درصد بر درجه کلونین است که به آن آهنگ کلاسیوس-کلاپیرون گفته می‌شود. بر اساس رابطه یادشده، هر یک درجه گرمایش جهانی می‌تواند ۷ درصد بر ظرفیت نگهداشت بخار آب در جو بیافزاید و به همین میزان شدت بارش‌های سنگین را افزایش دهد. در برخی پژوهش‌های مختلف محدوده ۶ تا ۱۳ درصد بر درجه کلونین برای آهنگ کلاسیوس-کلاپیرون ذکر شده است (هاردویچ و همکاران، ۲۰۱۰؛ ماتینکووا و کیسلی، ۲۰۲۰؛ دروینسکی و همکاران، ۲۰۱۶؛ مولنار و همکاران، ۲۰۱۵).

۳. نتایج و بحث

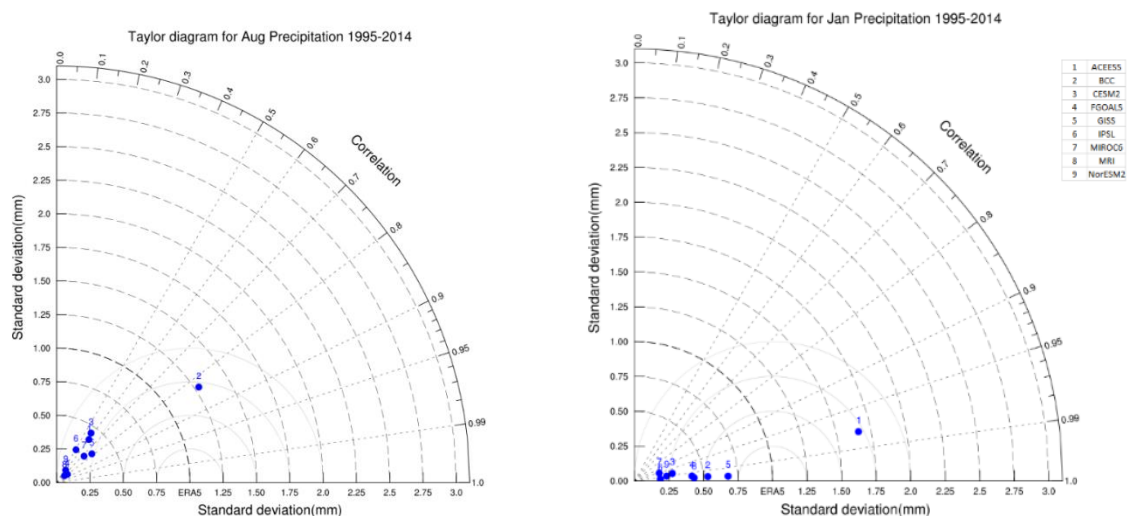
۳-۱. کارایی مدل‌های CMIP6

دوره پایه مورد مطالعه ۲۰۱۴-۱۹۸۵ در نظر گرفته شد. پس از استخراج دو سری از داده‌های تاریخی مدل‌های CMIP6 و داده‌های بازکاوی ERA5 برای دوره مشترک، کارایی هر یک از مدل‌های یادشده از طریق ترسیم نمودارهای تیلور و محاسبه مقادیر جذر مربع خطاها، همبستگی و انحراف استاندارد تعیین و مدل‌های بهتر از نظر شاخص‌های آماری برای مرحله مقیاس‌کاهی حفظ شدند. در این بخش به منظور انتخاب مدل‌های با کارایی بیشتر از نظر میزان تطابق داده‌های تاریخی آنها با داده‌های بازکاوی ERA5، نمودارهای تیلور برای ماه‌های مختلف ترسیم شدند. به دلیل حجم زیاد نمودارهای یادشده، یک نمونه از نمودارهای مربوط به ایستگاه مشهد در شکل ۱ آورده شده است. در محور افقی نمودارها موقعیت داده‌های ERA5 مشخص شده است. بر این اساس از بین ۱۰ مدل موجود در جدول ۲، تعداد چهار مدل ACCESS-، FGOALS-g3، BCC-CSM2-MR، ESM1-5 و MIROC6 (هیروکی و ماشیرو، ۲۰۱۸؛ همکاران، ۲۰۱۹؛ لیجان، ۲۰۱۹؛ تانگون و همکاران، ۲۰۱۸) به دلیل کارایی بیشتر به عنوان مدل‌های نهایی انتخاب شدند.

هواشناسی پیش‌نگری می‌شود اما کمتر به این موضوع پرداخته می‌شود که آیا تغییرات رخ داده از نظر آماری معنی‌دار هستند یا خیر. با توجه به این که در مقیاس سالانه توزیع بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه حداقل در سطح معنی‌داری ۰/۱ از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند، لذا از آزمون t-استیودنت برای بررسی وجود تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌های دو نمونه دیدبانی و پیش‌نگری شده تحت سناریوهای مختلف استفاده شد. آماره آزمون t-استیودنت از طریق معادله ۱ به دست می‌آید (جباری، ۱۳۹۲):

$$t = (\bar{X}_1 - \bar{X}_2) / \sqrt{\left(\frac{S_1^2}{N_1 - 1} + \frac{S_2^2}{N_2 - 1}\right)} \quad (2)$$

در صورتی که t به دست آمده از معادله فوق از t بحرانی جدول بیشتر باشد در آن صورت تغییر در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ مورد تأیید است در غیر این صورت تغییر پیش‌نگری شده برای بارش در محدوده نوسانات طبیعی بارش در ایستگاه مورد بررسی بوده و نمی‌توان به آن تغییر اطلاق کرد. علاوه بر برآورد تغییرات بارش (به درصد) و سطح معنی‌داری تغییرات، محدوده عدم قطعیت آنها نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ به این صورت که محدوده صدک ۲۵ و صدک ۷۵ پیش‌نگری‌ها به عنوان دامنه عدم قطعیت پیش‌نگری‌ها در نظر گرفته شد.



شکل ۱. نمونه نمودار تیلور بارش مدل در مقایسه با پایگاه ERA5 برای ماه‌های ژانویه و اوت در دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۵، ایستگاه مشهد.

دوره آینده در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نیست. در سناریوی میانه، در هر سه دوره آینده در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها تغییرات بارش معنی‌دار نیست، علی‌رغم این، میانگین بارش کشور با کاهش بین ۱۷-۱۳ درصد نسبت به دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۸۵ مواجه شده و در محدوده ۱۹۶-۱۸۷ م.م. قرار می‌گیرد که چنین کاهش در سطح آلفای ۰/۰۵ معنی‌دار نیست. در سناریوی بدبینانه-در مقایسه با دو سناریوی دیگر-تعداد ایستگاه‌های با روند کاهش معنی‌دار به نسبت افزایش یافته است، به طوری که در سه دوره آینده نزدیک، میانه و دور به ترتیب ۲، ۱۲ و ۲۸ درصد ایستگاه‌ها با کاهش معنی‌دار بارش مواجه خواهند شد. در مجموع در این مدل سه کانون کاهش بارش معنی‌دار در کشور مشاهده می‌شود که عبارت‌اند از شمال شرق، سواحل خزر و غرب کشور، در مقابل در جنوب شرق افزایش بارش در تعداد اندکی از ایستگاه‌ها مورد انتظار است. به طور کلی در این مدل گرمایش بیشتر با کاهش بارش در شمال و غرب کشور همراه است.

۲-۲-۳. مدل ACCESS

در شکل ۳ پیش‌نگری بارش کشور با استفاده از برونداد مدل ACCESS برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، میانه (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هر سه دوره آینده نزدیک، میانه و دور تحت سناریوی خوشبینانه (SSP1-2.6)، بارش کشور به ترتیب بین ۱۴، ۲۳ و ۲۴ درصد نسبت به دوره (۲۰۱۴-۱۹۸۵) پایه دیدبانی (۲۲۴ میلی‌متر) افزایش می‌یابد. در سه دوره یادشده، به ترتیب در ۱۴، ۴۰ و ۵۶ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه افزایش بارش معنی‌دار است. نکته قابل توجه این که کمترین تعداد ایستگاه‌های با افزایش معنی‌دار بارش در شمال غرب، استان‌های حاشیه دریای خزر و نوار غربی کشور قرار دارند. در سناریوی میانه (SSP2-4.5) تعداد ایستگاه‌هایی

۲-۳. پیش‌نگری ایستگاه‌های با تغییرات معنی‌دار

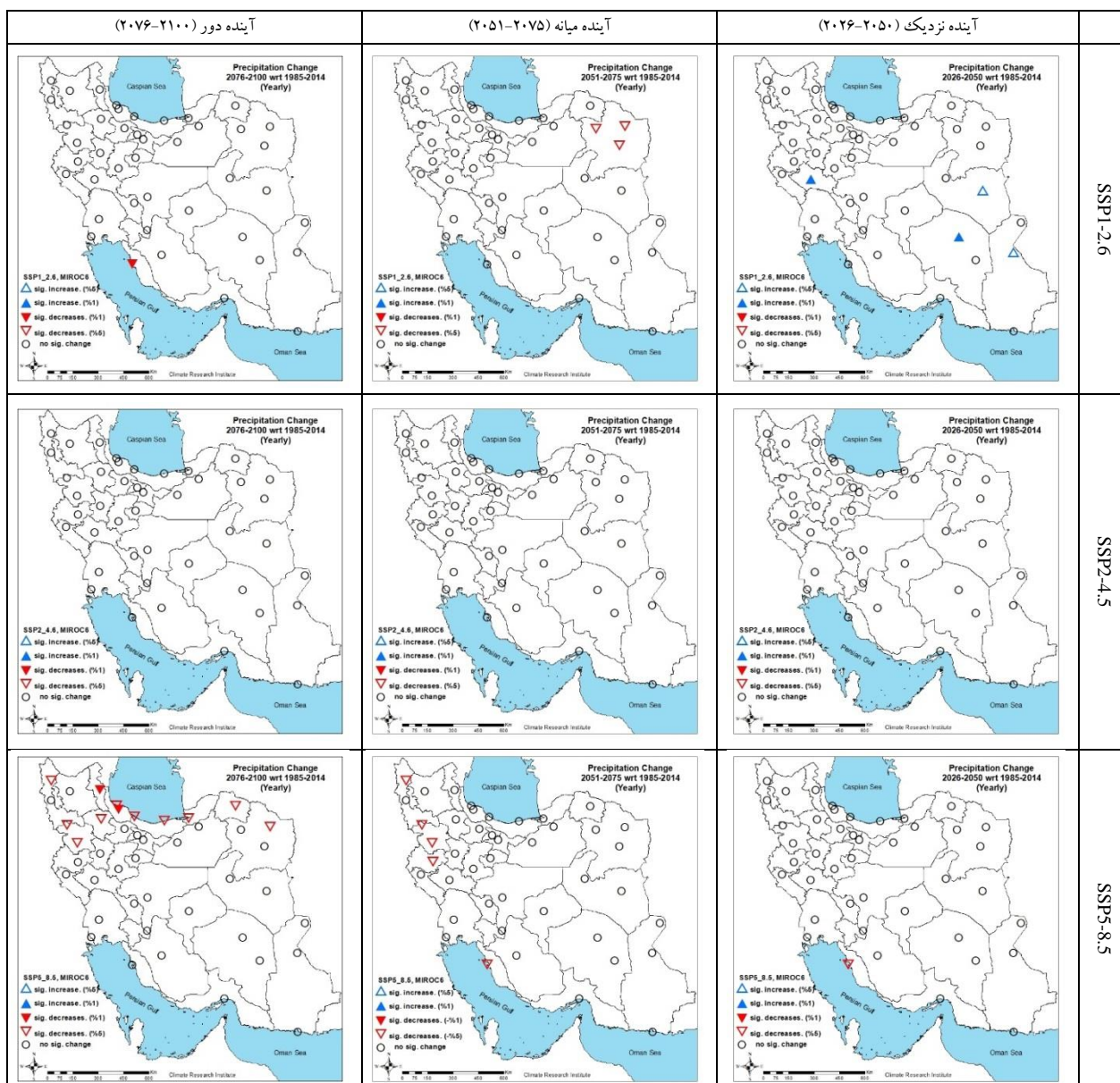
در این بخش سوی تغییرات (کاهش، افزایش یا عدم تغییر) بارش در ۴۳ ایستگاه هواشناسی کشور و معنی‌داری آنها برای سه دوره آینده، تحت مدل-سناریوهای مختلف در مقایسه با میانگین بارش دوره دیدبانی در سطح آلفای ۵ درصد برآورد شد.

۱-۲-۳. مدل MIROC6

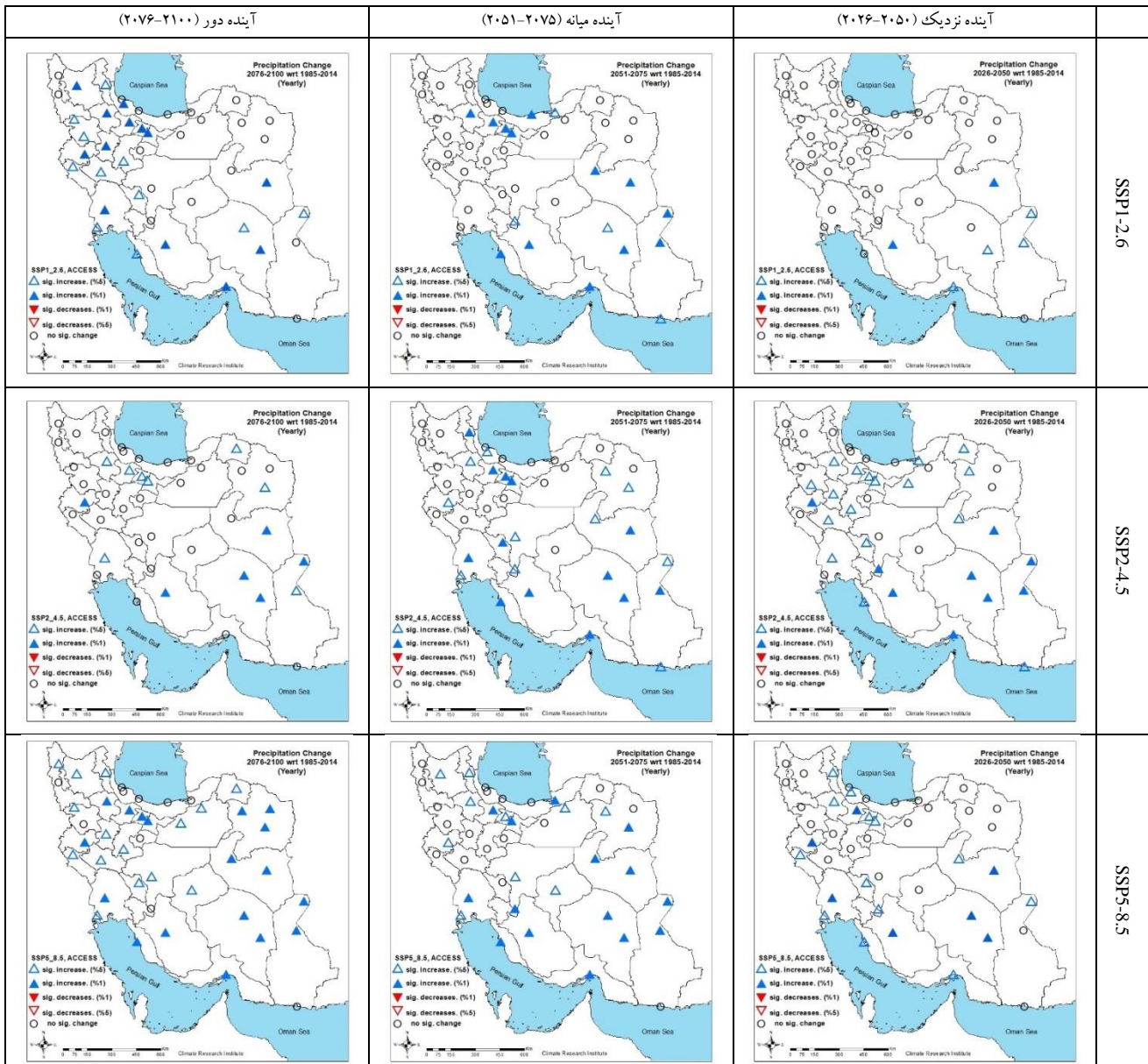
در شکل ۲ وضعیت معنی‌داری مقادیر پیش‌نگری شده بارش سالانه کشور با استفاده از مقادیر بارش مقیاس‌کاهی شده مدل MIROC6 برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، میانه (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سه دوره آینده و در هر سه سناریوی خوشبینانه، میانه و بدبینانه، عمدتاً تغییرات معنی‌داری در میانگین بارش کشور دیده نمی‌شود و تنها در دوره آینده نزدیک-سناریوی خوشبینانه در ۹ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه بارش نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد در حالی که در ۹۱ درصد ایستگاه‌ها تغییرات بارش معنی‌دار نیست. افزایش بارش‌ها عمدتاً در جنوب شرق-شرق کشور رخ می‌دهد. هر چند در این دوره در نوار جنوبی و جنوب شرق کشور هم افزایش بارش مشاهده شده ولی در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نیستند. در سایر دوره‌های این سناریو افزایش معنی‌دار بارش در هیچ‌یک از ایستگاه‌ها مشاهده نمی‌شود و به ترتیب در دو دوره آینده میانه و دور به ترتیب در ۷ و ۲ درصد ایستگاه‌ها کاهش بارش معنی‌دار خواهد بود. در سناریوی مذکور میانگین بارش در دو دوره آینده میانه و دور به ترتیب در ۹۳ و ۹۸ درصد ایستگاه‌ها تغییر معنی‌داری نمی‌کند. تغییرات فوق به گونه‌ای است که میانگین وزنی بارش کشور در سناریوی خوشبینانه طی سه دوره آینده بین ۱۳ تا ۲۳ درصد کاهش یافته و در محدوده م.م. ۱۹۳-۱۷۶ م.م. قرار می‌گیرد؛ با این حال تغییرات میانگین بارش کشور در سناریوی خوشبینانه برای هر سه

شرقی کشور افزایش می‌یابد و در شمال‌غرب نیز به ایستگاه‌های با افزایش معنی‌دار بارش افزوده می‌شود، اما در استان‌های ساحلی خزر افزایش بارش‌ها معنی‌دار نیست. در سناریوی بدبینانه میانگین بارش در سطح کشور در سه دوره آینده به ترتیب ۲۳، ۳۰ و ۳۲ درصد افزایش می‌یابد، همچنین افزایش بارش در ۴۷، ۵۸ و ۷۷ درصد ایستگاه‌ها حداقل در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. در مجموع در این مدل گرمایش بیشتر با افزایش بارش در کشور همراه است.

که دارای افزایش معنی‌دار هستند به ترتیب برای سه دوره آینده نزدیک، میانه و دور ۵۸، ۳۳ و ۵۶ درصد نسبت به کل ایستگاه‌های مورد مطالعه (۴۳ ایستگاه) می‌باشد. همچنین بارش کشور در سه دوره آینده به ترتیب ۲۳، ۱۹ و ۲۸ درصد نسبت به دوره دیدبانی افزایش می‌یابد. در این دوره نیز بیشترین ایستگاه‌های با افزایش معنی‌دار (به‌ویژه در سطح ۱٪) در مناطق جنوبی و شرقی کشور قرار دارند. در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5)، درصد تعداد ایستگاه‌های با افزایش معنی‌دار بارش در جنوب و نیمه



شکل ۲. پیش‌نگری بارش کشور در مقیاس سالانه با استفاده از پرونداد مدل MIROC طی دوره‌های ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5.

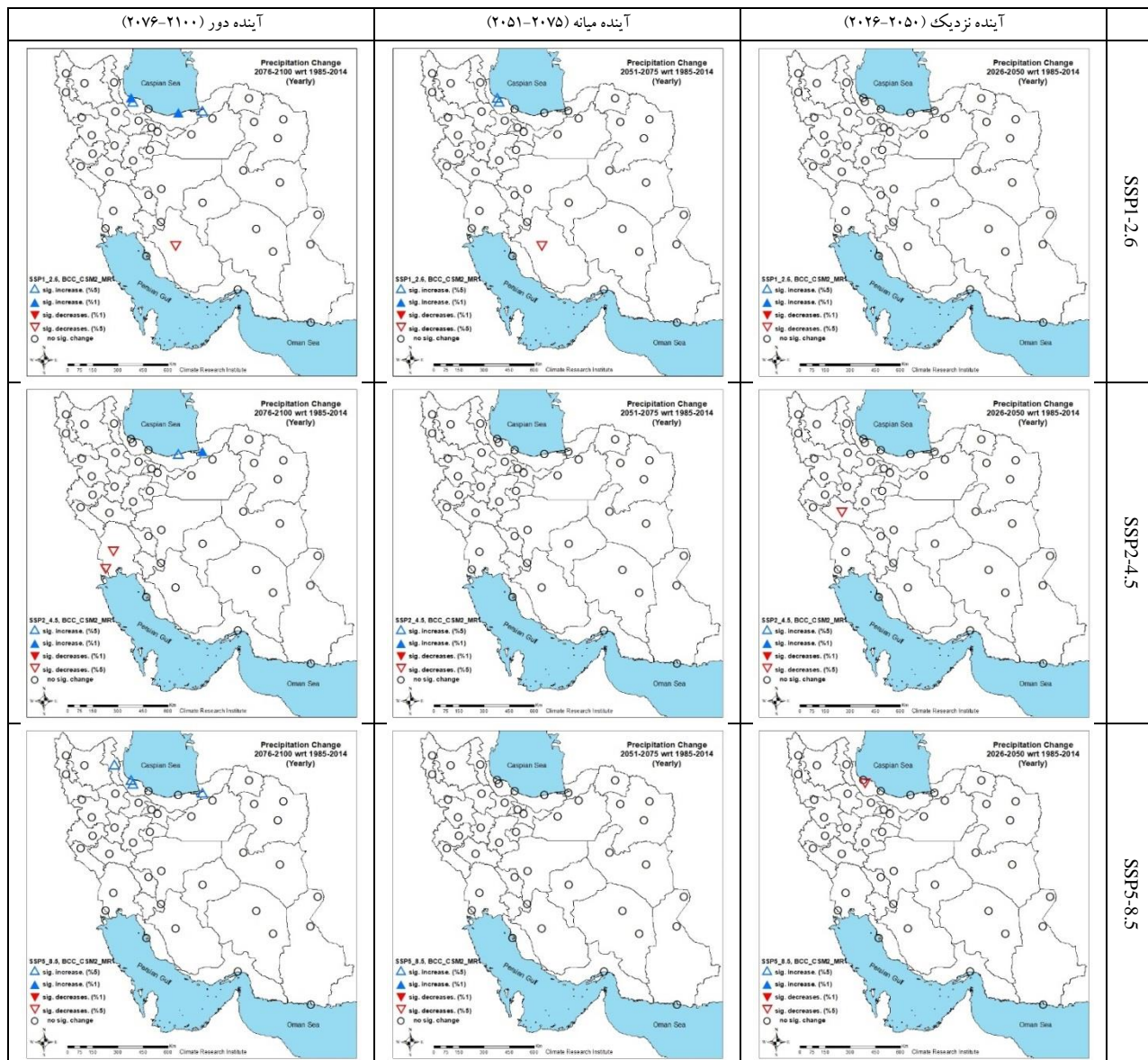


شکل ۳. پیش‌نگری بارش کشور در مقیاس سالانه با استفاده از برون‌داد مدل ACCESS طی دوره‌های ۲۰۵۱-۲۰۷۵، ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5.

نوسان بوده و به‌عبارتی بین ۲ تا ۵ درصد افزایش می‌یابد که چنین افزایشی در بیش از ۹۰ درصد ایستگاه‌ها معنی‌دار نیست. در سناریوی بدبینانه میانگین بارش کشور در سه دهه آینده نزدیک تا دور بین ۲۰۲ تا ۲۴۹ در نوسان بوده یا به‌عبارتی بین ۱۰ درصد کاهش تا ۱۱ درصد افزایش قرار دارد. به‌طور کلی در این مدل تغییرات بارش آینده کشور در دو منطقه خزری و استان فارس پیش‌نگری شده است که در برخی ایستگاه‌های ساحلی خزر افزایش معنی‌دار است و در ایستگاه شیراز کاهش معنی‌دار برآورد شده است.

۳-۲-۳ مدل BCC_CSM2_MR

در شکل ۴ پیش‌نگری بارش کشور با استفاده از برون‌داد مدل BCC-CSM2-MR برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بر اساس سناریوی خوش‌بینانه بارش کشور بین ۱ تا ۴ درصد افزایش می‌یابد که در بیش از حدود ۹۰ درصد ایستگاه‌ها افزایش یادشده معنی‌دار نیست. در سناریوی میانه میانگین سالانه بارش کشور بین ۲۱۴ تا ۲۴۲ م.م. در

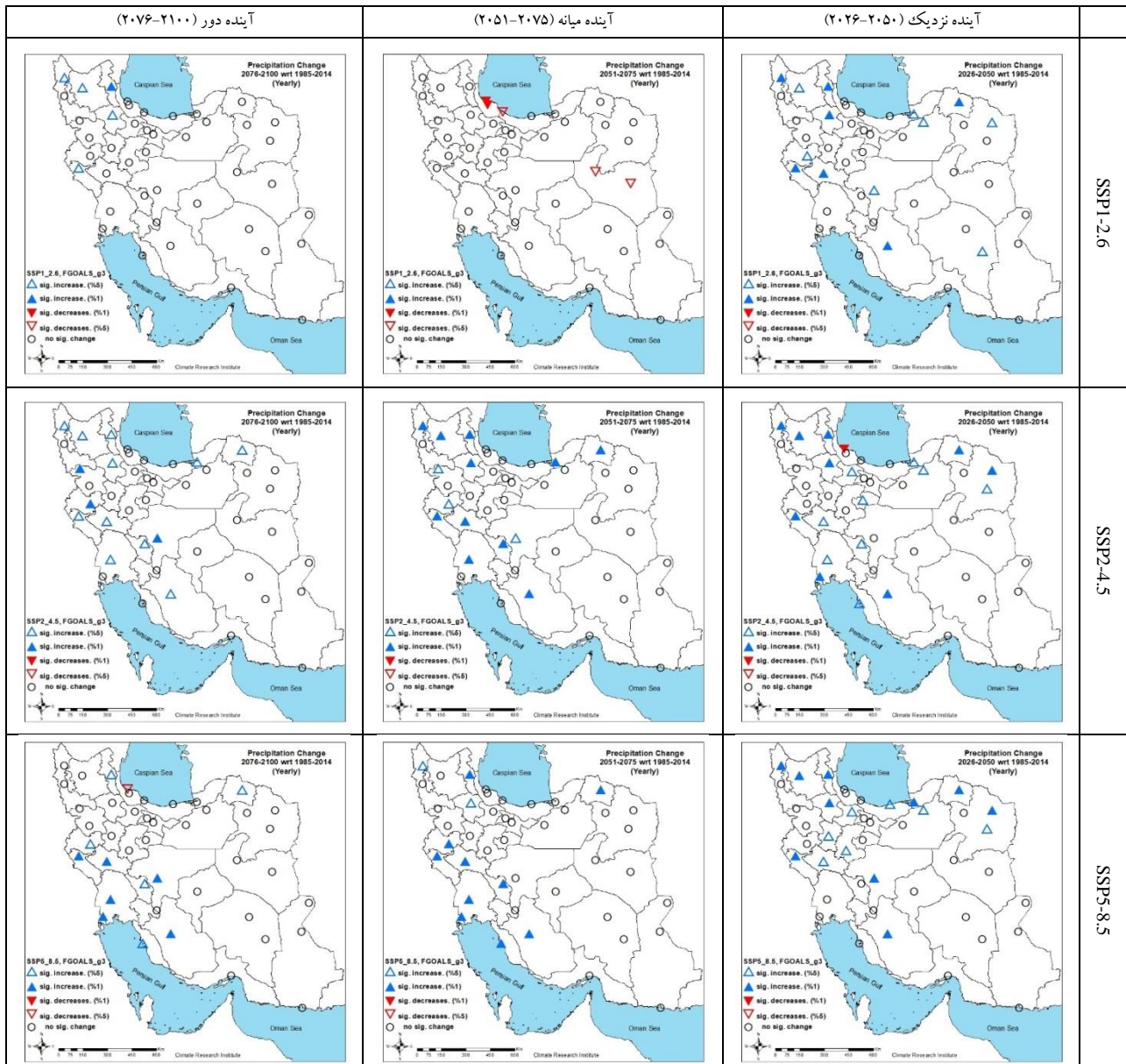


شکل ۴. پیش‌نگری بارش کشور در مقیاس سالانه با استفاده از برونداد مدل BCC طی دوره‌های ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5.

۳-۲-۴. مدل FGOALS-g3

در شکل ۵ پیش‌نگری بارش کشور در مقیاس سالانه با استفاده از برونداد مدل FGOALS برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 آورده شده است. در سناریوی خوشبینانه بارش عمدتاً در مناطق شمالی و غربی کشور افزایش یافته است و در سایر ایستگاه‌ها تغییر معنی‌داری رخ نداده است. در آینده میانه تنها در شرق و ایستگاه‌های ساحلی خزر کاهش بارش معنی‌دار است. در آینده دور در بخش‌هایی از شمال‌غرب و غرب افزایش بارش

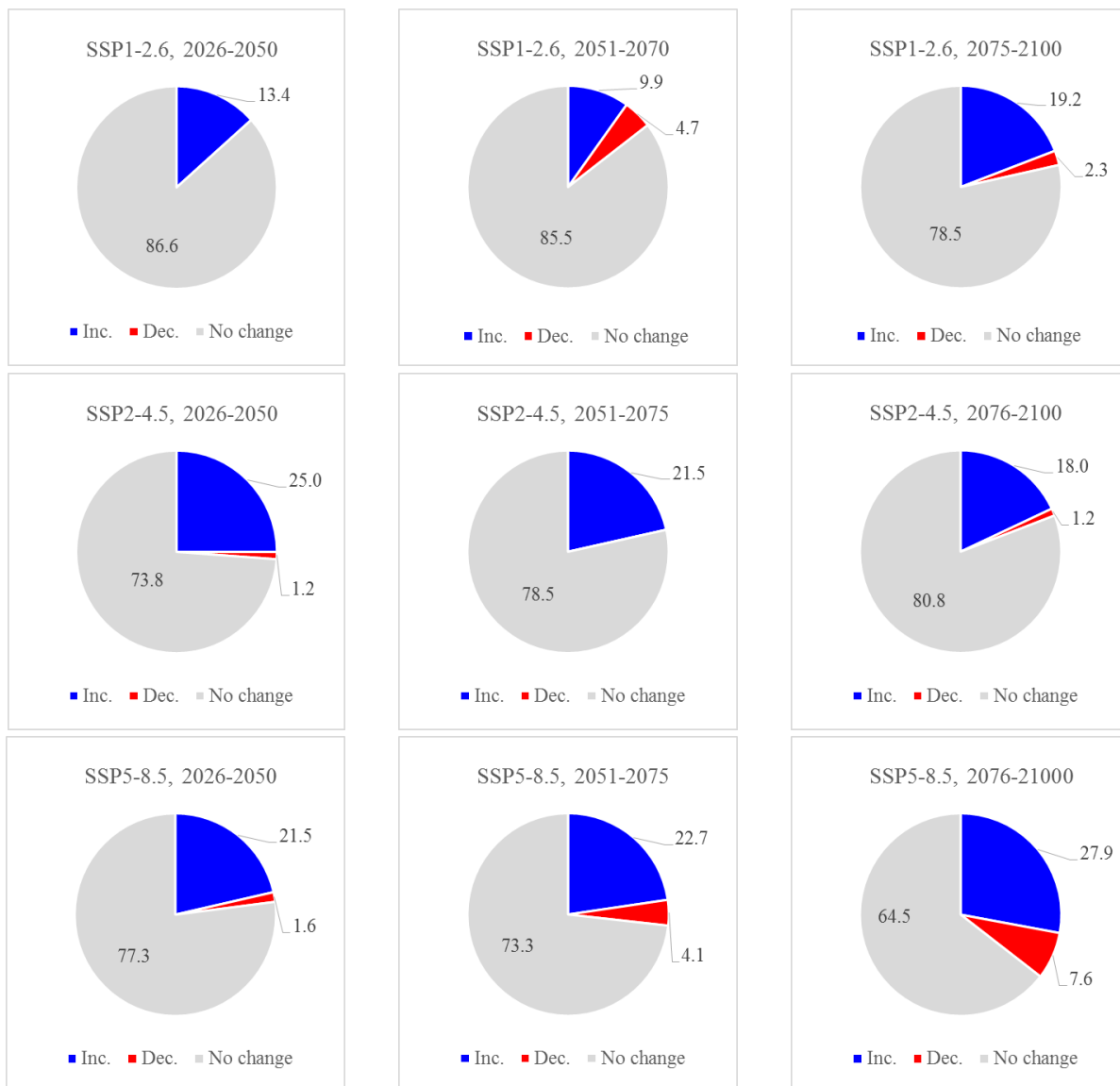
معنی‌دار است و در سایر مناطق تغییرات بارش معنی‌دار نخواهد بود. در سناریوهای میانه و بدبینانه و در هر سه دوره مورد مطالعه برای ایستگاه‌های واقع در غرب و شمال کشور افزایش بارش معنی‌دار است. در این مدل در سناریوهای بدبینانه و میانه افزایش بارش کشور بیشتر از سناریوی خوشبینانه است، به عبارتی گرمایش بیشتر با افزایش بارش در کشور همراه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که میانگین بارش سالانه کشور در سناریوی خوشبینانه بین ۱۴- تا ۲۰ درصد، سناریوی میانه بین ۱۷ تا ۲۴ درصد و در سناریوی بدبینانه بین ۱۴ تا ۲۳ درصد در نوسان خواهد بود.



شکل ۵. پیش‌نگری بارش کشور در مقیاس سالانه با استفاده از برون‌داد مدل FGOALS-g3 طی دوره‌های ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و ۲۰۵۱-۲۰۷۵، ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP5-8.5.

بیشتر، تعداد ایستگاه‌های با افزایش معنی‌دار بارش عمدتاً در ایستگاه‌های جنوبی و شرقی کشور افزایش می‌یابد. چنین افزایشی قدری گمراه‌کننده است؛ زیرا به دلیل افزایش به نسبت زیاد دما در دهه‌های آینده هر گونه افزایش احتمالی بارش عملاً تأثیر قابل توجهی بر تأمین نیاز آبی محیط طبیعی ندارد؛ زیرا نیاز آبی محیط طبیعی تنها وابسته به بارش نیست بلکه به عرضه و تقاضای آب وابسته است که تبخیر/ترقق حوضه نقش اساسی در آن دارد که دما از عوامل تعیین‌کننده در آن می‌باشد.

در شکل ۶ با در نظر گرفتن نتایج حاصل از ۴ مدل اقلیمی مورد بررسی، پیش‌نگری احتمالاتی تغییرات بارش کشور تحت سناریوهای مختلف در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۶ مشخص شده است. این شکل نشان می‌دهد که در سناریوی خوشبینانه در ۱۵ درصد از کل ایستگاه‌های مورد بررسی میانگین بارش سالانه افزایش می‌یابد در حالی که در ۲ درصد ایستگاه‌ها بارش کاهش می‌یابد. درصد تغییرات یادشده در سناریوهای میانه (بدبینانه) به ترتیب ۱۹ (۲۴) درصد افزایش و ۲ (۴) درصد کاهش است. در شرایط گرمایش جهانی



شکل ۶. درصد فراوانی ایستگاه‌های با تغییرات معنی‌دار در میانگین بارش سالانه نسبت به دوره پایه بر مبنای پیش‌نگری چهار مدل اقلیمی تحت سه سناریوی خوشبینانه، میانه و بدبینانه. رنگ آبی (Inc.): افزایش معنی‌دار، قرمز (Dec.): کاهش معنی‌دار و خاکستری (No change): بدون تغییر.

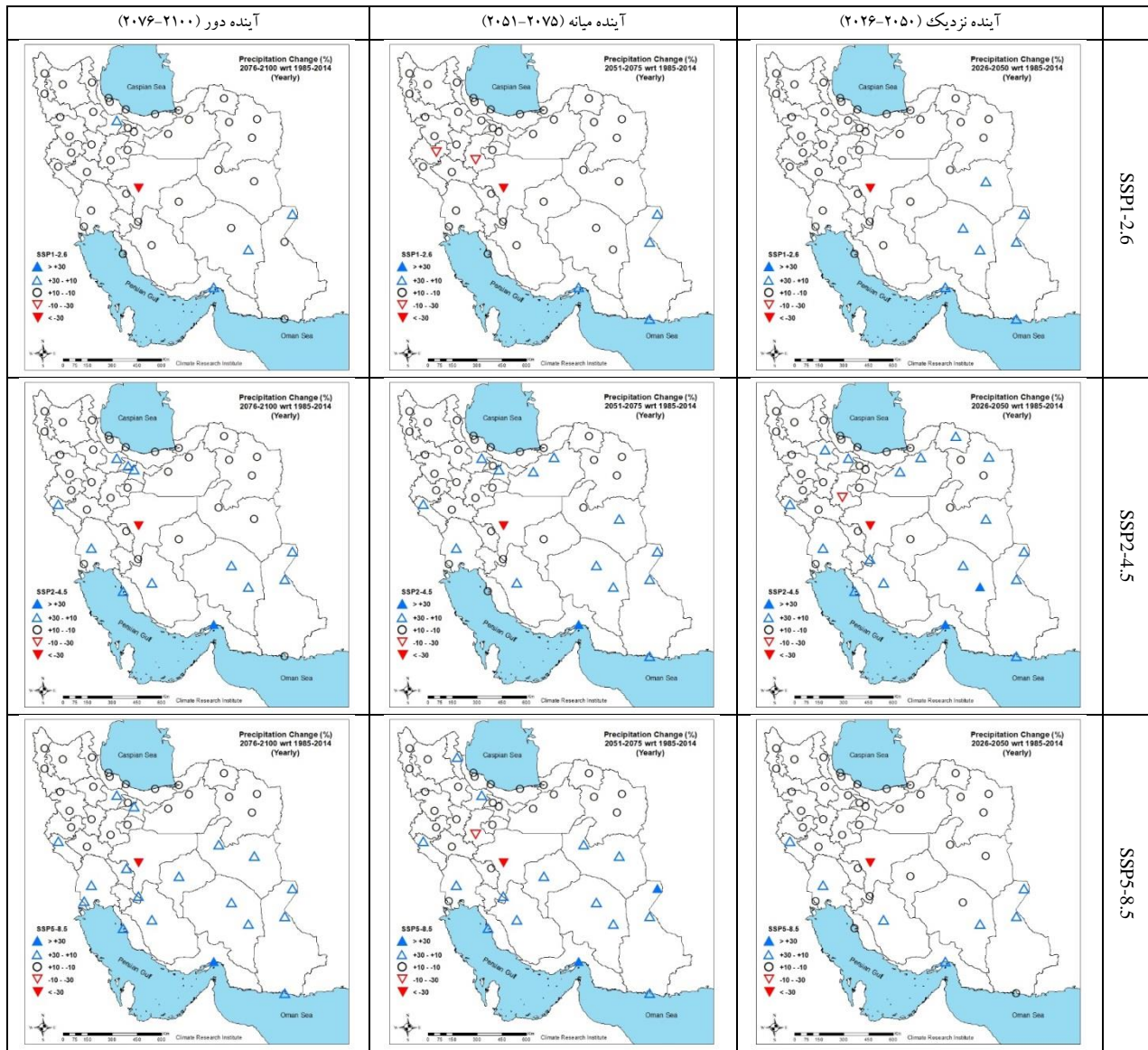
درصد در تعداد ایستگاه‌های همراه با کاهش بارش رخ خواهد داد. به عبارت دیگر دوره انتهایی قرن حاضر دوره‌ای است که تحت سناریوی SSP5-8.5 بیشترین تضاد بارشی در کشور رخ می‌دهد، به این صورت که در حالی که در ۲۸ درصد ایستگاه‌های کشور میانگین بارش نسبت به دوره نرمال (۲۰۱۴-۱۹۸۵) افزایش می‌یابد در مقابل در حدود ۸ درصد ایستگاه‌ها بارش کاهش معنی‌داری نسبت به دوره پایه دارد و در ۶۴ درصد ایستگاه‌ها نیز بارش تغییر معنی‌داری نسبت به دوره نرمال ندارد.

شکل همچنین نشان می‌دهد که در مجموع میانگین بارش در ۷۵ درصد از ایستگاه‌های کشور در شرایط مختلف گرمایش جهانی (از سناریوس خوشبینانه SSP1-2.6 تا سناریوی بدبینانه SSP5-8.5) در دوره‌های آینده - به استثنای دوره ۲۰۷۶-۲۱۰۰ در سناریوی SSP5-8.5 - بدون تغییر بوده و یا این که تغییرات آنها در بازه نوسانات نرمال خواهد بود. بیشترین افزایش در فراوانی ایستگاه‌های با افزایش معنی‌دار بارش در سناریوی SSP5-8.5 و در دوره ۲۰۷۶-۲۱۰۰ به مقدار ۲۷/۹ درصد رخ می‌دهد. در همین دوره و سناریو نیز بیشترین افزایش به مقدار ۷/۶

۳-۳. پیش‌نگری مقدار بارش

اصفهان، اراک و کرمانشاه کاهش بارش مشاهده می‌شود و سوم این‌که در سایر مناطق کشور تغییرات بارش در محدوده ۱۰ درصد کمتر از نرمال تا ۱۰ درصد بیشتر از نرمال در نوسان خواهد بود که چنین تغییراتی از نظر آماری معنی‌دار نیستند. نکته قابل ذکر در این بخش این است که مطابق شکل ۷، کاهش بارش در دوره‌ها و سناریوهای مختلف تنها در سه ایستگاه اصفهان، اراک و کرمانشاه از آستانه کاهش ۱۰ درصد عبور کرده است و در برخی ایستگاه‌های دیگر علی‌رغم این‌که مقدار بارش کاهشی است اما در محدوده نوسانات طبیعی ایستگاه قرار دارد.

در شکل ۷ پیش‌نگری تغییرات بارش کشور بدون لحاظ معنی‌داری تغییرات بر حسب درصد در سه دوره ۲۵ ساله آینده نشان داده شده است. نقشه‌ها با لحاظ میانگین نتایج حاصل از چهار مدل اقلیمی تهیه شده‌اند. چند نکته شاخص در نتایج دیده می‌شود: اول این‌که بیشترین توافق در افزایش بارش مربوط به محدوده جنوب-جنوب شرق کشور است، هر چند افزایش محدودی در دامنه جنوبی غرب البرز نیز مشاهده می‌شود. دوم این‌که در بخش‌هایی از ایستگاه‌های واقع در محدوده زاگرس مرکزی شامل ایستگاه‌های

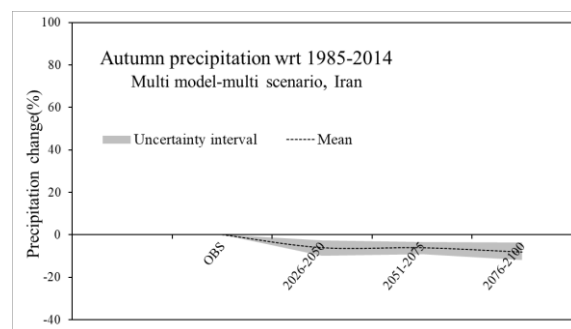
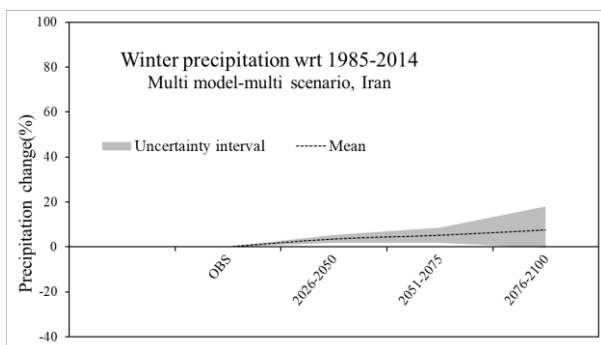
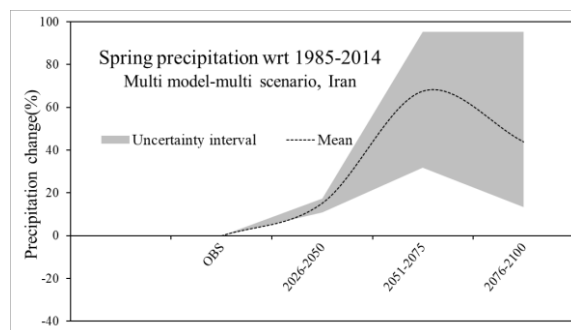
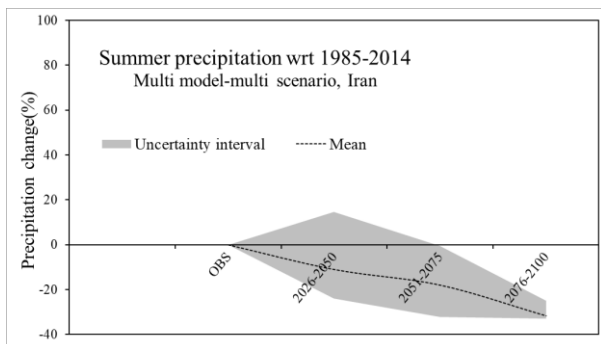


شکل ۷. پیش‌نگری تغییرات مقدار بارش کشور (بر حسب درصد) نسبت به دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴ در مقیاس سالانه با استفاده از برون‌داد چندمدلی طی دوره‌های ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

۳-۴. دامنه عدم قطعیت

دامنه عدم قطعیت پیش‌نگری بارش کشور در سه دوره آینده به تفکیک فصول مختلف با لحاظ برونداد بارش مدل-سناریوهای مختلف در شکل ۸ و جدول ۵ آورده شده است. مطابق شکل بیشترین عدم قطعیت مربوط به بارش‌های فصل بهار است که نشان می‌دهد بارش‌های این فصل هر چه بیشتر بی‌اعتماد می‌شوند. در شرایط گرمایش بیشتر بارش‌های فصل بهار افزایش می‌یابد. هر چند توزیع بارش‌های به گونه‌ای است که بیشترین افزایش‌ها عمدتاً در نیمه جنوبی رخ می‌دهند، در حالی که میانگین بارش منطقه زاگرس مرکزی گرایش به کمتر از نرمال دارد. در فصل تابستان در آینده نزدیک بارش‌های تابستانی گرایش به افزایش دارند و پس از آن با گرمایش بیشتر بارش‌ها کم می‌شوند. پس از فصل بهار بیشترین عدم قطعیت به فصل تابستان مربوط است. نمودار فصل پاییز نکته مهمی را نشان می‌دهد، این که با قطعیت به نسبت زیادی بارش این فصلی

گرایش به کمتر از نرمال دارد هر چند کاهش آن قابل توجه نیست. کم بودن پهنای نمودار عدم قطعیت بارش پاییز حاکی از اتفاق نظر مدل-سناریوهای مختلف در پیش‌نگری بارش پاییز است. پیش‌نگری بارش فصل زمستان دارای عدم قطعیت قابل توجهی نیست و تقریباً تمام مدل-سناریوها بر روند نسبتاً کم افزایش بارش آن اتفاق نظر دارند. در این فصل در شرایط گرمایش بیشتر افزایش بارش و دامنه عدم قطعیت بیشتر می‌شود. در بین سه دوره آینده کمترین و بیشترین دامنه عدم قطعیت در تغییرات سالانه بارش در دهه اول و پایانی قرن حاضر به ترتیب با دامنه تغییرات ۱۴ و ۲۹/۱ درصد رخ می‌دهد. کمترین و بیشترین دامنه عدم قطعیت در مقیاس فصلی با ۳/۶ و ۸۱/۹ به ترتیب در فصل زمستان (آینده نزدیک) و بهار (آینده دور) برآورد شده است. این وضعیت نشان می‌دهد که در آینده بیشترین نوسانات بارش در فصل بهار رخ خواهد داد.



شکل ۸. پیش‌نگری روند تغییرات و دامنه عدم قطعیت ناهنجاری فصلی بارش کشور با لحاظ نتایج مدل‌ها و سناریوهای مختلف تا انتهای قرن حاضر نسبت به دوره مشاهداتی ۲۰۱۴-۱۹۸۵.

جدول ۵. میانگین و دامنه تغییرات بارش کشور در فصول مختلف با لحاظ مدل-سناریوهای مختلف در سه دوره آینده نزدیک، میانه و دور (به درصد).

آینده دور		آینده میانه		آینده نزدیک		
دامنه تغییرات	میانگین	دامنه تغییرات	میانگین	دامنه تغییرات	میانگین	
۸۱/۹	۴۳/۹	۶۳/۵	۶۷/۵	۶/۷	۱۵/۲	بهار
۸	-۳۱/۷	۳۱/۴	-۱۸	۳۸	-۱۱	تابستان
۸/۳	-۸/۱	۵/۶	-۶/۱	۷/۲	-۶	پاییز
۱۸/۴	۷/۵	۷	۵/۲	۳/۶	۳/۵	زمستان
۲۹/۱	۲/۹	۲۶/۹	۱۲/۲	۱۴	۰/۴	سال

۴. نتیجه‌گیری

مورد مطالعه نداشته و تنها موجب کاهش در ۲ تا ۴ درصد از آنها می‌شود که عمدتاً در محدوده زاگرس مرکزی قرار دارند. ضمن این‌که در ۱۵ تا ۲۴ درصد از ایستگاه‌های هواشناسی کشور بارش افزایش می‌یابد که عمدتاً در جنوب شرق و جنوب کشور قرار دارند. نتایج این پژوهش از نظر تغییرات در مقدار بارش نشان دادند که میانگین بارش کشور در مقیاس سالانه ۰/۴ درصد (با دامنه عدم قطعیت ۱۴ درصد) نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد که چنین افزایشی در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نیست. در مقیاس فصلی تغییرات بارش در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۱۵/۲، ۱۱، ۶- و ۳/۵+ درصد برآورد شد. اگرچه برای فصل بهار افزایش بارش به میزان ۱۵/۲+ درصد پیش‌نگری شده است، اما دامنه تغییرات آن ۸۱/۹ درصد است که نشان‌دهنده بیشترین بی‌اعتمادی به بارش‌های آینده در مقیاس فصلی است. در مجموع می‌توان گفت بیشترین توافق از نظر سناریوها، مدل‌ها و دوره‌های پیش‌نگری برای افزایش بارش در محدوده جنوب-جنوب شرق کشور و کاهش بارش برای مناطقی از البرز مرکزی می‌باشد. یافته‌های این پژوهش با گزارش‌های پنجم و ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC، ۲۰۱۴ و ۲۰۲۱) مبنی بر افزایش بارش در کشورهای حاشیه جنوبی خلیج فارس و کاهش بارش در کشورهای واقع بر حوضه شرقی مدیترانه توافق دارد. با این وجود، چنین پیش‌نگری از افزایش بارش در جنوب کشور و همچنین عدم وجود تغییرات معنی‌دار در کاهش بارش در اغلب مناطق کشور، ممکن است قدری

آگاهی از بارش آینده کشور یکی از متغیرهای مؤثر در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت کشور به‌ویژه در حوزه آب، کشاورزی و امنیت غذایی است. لذا در این پژوهش تلاش شده است تا با استفاده از مقیاس‌گاهی برون‌داد مدل‌های منتخب از مجموعه مدل‌های سری CMIP6 تصویری نسبتاً کاربردی از وضعیت بارش آینده کشور ارائه شود. برای این منظور چند هدف در اجرای این پژوهش مدنظر بوده است که عبارت‌اند از: برآورد سطح معنی‌داری مقادیر پیش‌نگری شده، سطح تغییرات نسبی بارش در مقایسه با دوره پایه (بر حسب درصد)، دامنه عدم قطعیت پیش‌نگری‌ها و لحاظ محدودیت ظرفیت فیزیکی هوا در افزایش محتوای رطوبتی به‌ازای هر درجه سلسیوس (کلوین) گرمایش جهانی که محدودیتی برای آستانه رخدادهای شدید بارشی ایجاد می‌کند. نتایج این پژوهش از نظر تعداد ایستگاه‌های با تغییرات معنی‌دار بارش، نشان دادند که بر اساس سناریوی خوشبینانه (SSP1-2.6) در ۸۳ درصد از ایستگاه‌ها تغییرات بارش از نظر آماری معنی‌دار نبوده و در محدوده نوسانات بلندمدت آنها می‌باشد و در ۱۵ درصد از آنها میانگین بارش سالانه افزایش یافته و تنها در ۲ درصد ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین در سناریوی میانه SSP2-4.5 (بدبینانه SSP5-8.5) در ۷۹ (۷۲) از ایستگاه‌ها تغییرات بارش معنی‌دار نبوده و در ۱۹ (۲۴) درصد از آنها افزایش و در ۲ (۴) درصد آنها کاهشی است. به عبارت دیگر گرمایش جهانی تأثیری بر میانگین بلندمدت بارش ۷۲ تا ۸۳ درصد از ایستگاه‌های

جباری، ا. (۱۳۹۲). روش‌های آماری در علوم محیطی و جغرافیایی، انتشارات دانشگاه رازی کرمانشاه، چاپ سوم، ۲۹۴ صفحه.

کوهی، م. و پاکدامن، م. (۱۴۰۰). ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP5 در تحلیل فراوانی دو متغیره مفصل- مبنای ویژگی‌های خشکسالی در بخش جنوبی حوضه آبریز کارون. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۱۷۲-۱۵۳، (۱)۴۸.

لطفی، ی.؛ مفتاح هلقی، م. و قربانی، خ. (۱۳۹۹). بررسی عدم قطعیت پیش‌بینی‌های مدل‌های گردش کلی جو: مطالعه موردی: ایستگاه هاشم‌آباد گرگان. *مجله هواشناسی کشاورزی*، ۷۹-۷۵، (۱)۸.

گمراه‌کننده باشد، زیرا نیاز آبی محیط طبیعی صرفاً موکول به بارش نبوده و وابسته به بیلان عرضه-تقاضای آب است که به عوامل متعددی از جمله دمای هوا وابسته است.

منابع

بابائیان، ا.؛ نجفی نیک، ز.؛ زابل عباسی، ف.؛ حبیبی نوخندان، م.؛ ادب، ح. و ملبوسی، ش. (۱۳۸۸). ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHOG. *مجله جغرافیا و توسعه*، ۱۵۲-۱۳۵، (۱۶)۷.

- Almazroui, M., Saeed, S., Saeed, F., Islam, M. N., & Ismail, M. (2020). Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6. *J. Earth Systems and Environment*, 4(2), 297-320.
- 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. *J. Atmosphere*, 12, 1704.
- Baker, N., & Huang, H. (2013). A Comparative Study of Precipitation and Evaporation between CMIP3 and CMIP5 Climate Model Ensembles in Semiarid Regions. *J. Climate*, 27, 3731-3749.
- Blázquez, J., & Nuñez, M.N. (2013). Analysis of Uncertainties in Future Climate Projections for South America: Comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 Models. *J. Climate Dynamics*, 41, 1039-1056.
- Diaz-Nieto, J., & Wilby, R. L. (2005). A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. *J. Climate Change*, 69(2-3), 245-268.
- Drobinski, P., Alonzo, B., Bastin, S., Da Silva, N., & Muller, C.J. (2016). Scaling of precipitation extremes with temperature in the French Mediterranean region: what explains the hook shape?. *J. Geophys Res.*, 121(7), 3100-3119.
- 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. *J. Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958.
- Grose, M. R., Narsey, S., Delage, F. P., Dowdy, A. J., Bador, M., Boschat, G., & Power, S. (2020). Insights from CMIP6 for Australia's future climate. *J. Earth's Future*, 8(5), e2019EF001469.
- Hardwick, J., Westra, R. S., & Sharma, A. (2010). Observed relationships between extreme sub-daily precipitation, surface temperature, and relative humidity. *J. Geophys Res Lett*, 37, L22805.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press.
- Jiang, J., Zhou, T., Chen, X., & Zhang, L. (2020). Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections. *J. Environmental Research Letters*, 15(5), 054009.
- Leander, R., & Buishand, T.A. (2007). Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *J. Hydrol.*, 332, 487-496.
- Martinkova, M., & Kysely, J. (2020). Overview

- of Observed Clausius-Clapeyron Scaling of Extreme Precipitation in Midlatitudes. *J. Atmosphere*, 11, 786.
- Matthes, K., Funke, B., Andersson, M. E., Barnard, L., Beer, J., Charbonneau, P., & Versick, S. (2017). Solar forcing for CMIP6 (v3.2). *J. Geoscientific Model Development*, 10, 2247-2302.
- Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D., & Alvarado-Gamboa, L.-F. (2020). Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica. *J. Water*, 12, 482.
- Molnar, P., Fatichi, S., Gaál, L., Szolgay, J., & Burlando, P. (2015). Storm type effects on super Clausius-Clapeyron scaling of intense rainstorm properties with air temperature. *J. Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 1753-1766.
- O'Neill, B. C., Timothy R. C., Kristie, E., Paula, A., Harrison, E. K., & Kasper Kok, E. K. (2020). Achievements and needs for the climate change scenario framework. *J. Nature climate change*, 12, 1074-1084.
- Piani, C., Weedon, G., Best, M., Gomes, S., Viterbo, P., Hagemann, S., & Haerter, J. (2010). Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *J. Hydrol.*, 395, 199-215.
- 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, User manual, 1-17
- Schmidli, J., Frei, C., & Vidale, P.L. (2006). Downscaling from gcm precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *Int. J. Climatol.*, 26, 679-689.
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.
- Zamani, Y., Monfared, S. A. H., & Hamidianpour, M. (2020). A comparison of CMIP6 and CMIP5 projections for precipitation to observational data: the case of Northeastern Iran. *J. Theoretical and Applied Climatology*, 142(3), 1613-1623.