



Application of Linear Scaling Post-Processing Method for Bias Correction of Climate Models Outputs Retrieved from CMIP6

F. ErshadFath¹, M. Raeini Sarjaz², A. Shahnazari^{3*},
and J. Eivind Olesen⁴

Abstract

Global warming changes precipitation and temperature patterns. In this study, the linear scaling post-processing method was used to correct the biases of seven climate models (GCMs) under the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). Also, the performance of these models was evaluated for simulating temperature and precipitation in the Hamedan-Bahar plain in the baseline period of 1990 to 2014. Three performance indicators (mean square root error, Nash-Sutcliffe, coefficient of correlation) were used to quantify the models' reproducibility to climatic parameters for the historical period (1990–2014). Based on the results, CMCC-ESM2, MIROC 6, and NorESM2-MM models were selected and their ensemble were used to project temperature and precipitation in near (2026–2050), mid (2051–2075) and far futures (2076–2100) under three socioeconomic shared pathway (SSP) 1–2.6, 2–4.5 and 5–8.5. Based on the obtained results, in all three periods, the average precipitation decrease in summer is higher than the other seasons, and the highest amount of decrease will occur in the mid future period under the SSP5-8.5 scenario (67%). Moreover, the minimum and maximum temperatures increased in all three future periods and under all three scenarios. The highest increase of temperature occurred in January and February. Predicting climate parameters using selected models in this study can be a basis for planning and managing water resources and developing the necessary measures to climate change adaptation in Hamadan-Bahar region.

Keywords: Climate Change, Linear Scaling, SSP Scenarios, CMIP6.

Received: August 25, 2022

Accepted: November 9, 2022

کاربرد روش پس پردازش مقیاس دهی خطی برای تصحیح اریبی برونداد مدل های اقلیمی CMIP6

فرناز ارشادفتح^۱، محمود رائینی سرجاز^۲، علی شاهنظری^{۳*} و
یورن ایویند اولسون^۴

چکیده

گرمایش سامانه اقلیمی الگوهای بارش و دما را تغییر می دهد. در این مطالعه روش پس پردازش مقیاس بندی خطی برای تصحیح اریبی برونداد هشت مدل اقلیمی (GCM) از مجموعه مدل های فاز ششم پروژه مقایسه مدل جفت شده (CMIP6) به کار رفت و عملکرد مدل ها برای شبیه سازی دما و بارش در دشت همدان-بهار در دوره تاریخی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس نتایج، سه مدل CMCC-ESM2، MIROC 6 و NorESM2-MM که دارای کمترین مقدار میانگین مربع خطای ریشه و بیشترین مقادیر کارایی نش-ساتکلیف و ضریب همبستگی بودند انتخاب و از میانگین برونداد آن ها برای پیش نگری فراسنجه های بارش و دمای کمینه و بیشینه برای سه دوره ۲۵ ساله در آینده تحت سه سناریوی خوش بینانه (SSP1-2.6)، میانه (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) استفاده شد. با توجه به پیش نگری های اقلیمی، در همه دوره های آتی عمدتاً بارش در فصل های تابستان و پائیز کاهش و در فصل بهار افزایش می یابد. فصل تابستان در هر سه دوره از کاهش بارش بیشتری نسبت به سایر فصول برخوردار خواهد بود و بیشترین مقدار کاهش در دوره آینده میانی تحت سناریوی SSP5-8.5 و به مقدار ۶۷ درصد رخ خواهد داد. همچنین، دمای کمینه و بیشینه در هر سه دوره و تحت هر سه سناریو، افزایش خواهد یافت. بیشترین افزایش دما مربوط به فصل زمستان و ماه های ژانویه و فوریه می باشد. پیش نگری فراسنجه های اقلیمی با استفاده از مدل های برگزیده در این مطالعه می تواند مبنایی برای برنامه ریزی و مدیریت منابع آب و توسعه اقدامات لازم برای سازگاری با تغییر اقلیم در منطقه همدان-بهار باشد.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، مقیاس بندی خطی، سناریوهای SSP، CMIP6.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۶/۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۸/۱۸

1- M.Sc. Graduate of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agriculture and Natural Sciences, Sari, Iran.

2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agriculture and Natural Sciences, Sari, Iran.

3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari University of Agriculture and Natural Sciences, Sari, Iran. Email: aliponh@yahoo.com

4- Professor, Department of Climate and Water, Faculty of Agroecology, Aarhus University, Viborg, Denmark

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1401.18.3.9.1](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1401.18.3.9.1)

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه کشاورزی و علوم طبیعی ساری، ساری، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه کشاورزی و علوم طبیعی ساری، ساری، ایران.

۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه کشاورزی و علوم طبیعی ساری، ساری، ایران.

۴- استاد، گروه آب و اقلیم شناسی، دانشکده آگرواکولوژی، دانشگاه آرهوس، ویبورگ، دانمارک.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۱ امکان پذیر است.



تصحیح اریبی انجام می‌شود و بر این فرض استوار است که داده‌های مشاهداتی و برون‌داد مدل‌های اقلیمی دارای همبستگی بوده و الگوی تغییر رفتار داده‌ها در گذشته و آینده یکسان است. تصحیح اریبی در واقع به مقیاس‌بندی برون‌داد مدل‌های آب و هوایی برای منعکس کردن ویژگی‌های آماری آن‌ها مثل میانگین و واریانس داده‌ها در منطقه مورد مطالعه می‌پردازد. از بین روش‌های تصحیح اریبی، روش مقیاس‌دهی خطی با توجه به دقت بالا، سهولت و حفظ کیفیت داده‌ها پس از تصحیح اریبی بسیار پرکاربرد است (Räty et al., 2014). استفاده از روش‌های پس‌پردازش در هر مطالعه بستگی به نوع مدل اقلیمی و ویژگی‌های اقلیمی منطقه مورد مطالعه دارد (Lou et al., 2018).

بررسی ادبیات پژوهشی نشان می‌دهد که پژوهش‌گران اخیراً عملکرد مناسب مدل‌های CMIP6 را در شبیه‌سازی اقلیم تاریخی منطقه‌ای مثبت ارزیابی کرده‌اند (Fan et al., 2020). Kamworapan et al. (2021) عملکرد ۱۳ مدل آب و هوای جهانی CMIP6 را برای شبیه‌سازی دما در تایلد طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ ارزیابی کردند و مدل CNRM-CM6-1 را به عنوان مناسب‌ترین مدل معرفی نمودند. (Almazroui et al., 2020). تغییر دما و بارش را در آفریقا با استفاده از ۲۷ GCM مربوط به CMIP6 پیش‌نگری کردند. پیش‌نگری‌ها با استفاده از بدبینانه‌ترین سناریو نشان داد که میانگین دمای سالانه در پایان سال ۲۱۰۰ در منطقه صحرا و آفریقای مرکزی شرقی به ترتیب به میزان ۵/۶ و ۳/۵ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. در پژوهشی (Chen et al., 2022) به ارزیابی عملکرد ۲۸ مدل CMIP6 برای شبیه‌سازی دمای هوای سطحی بر روی فلات تبت در سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۴ استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد، که استفاده از میانگین نتایج چند مدل نسبت به نتایج هر مدل به تنهایی، الگوهای مکانی-زمانی دمای هوای سطحی را برای دهه‌های گذشته به‌طور دقیق‌تری به تصویر می‌کشد.

در ایران نیز به تازگی برخی از پژوهش‌گران به ارزیابی GCM‌های گزارش ششم پرداخته‌اند. برای نمونه، Zarrin and Salehabadi (2020) در مطالعه‌ای بر اساس برون‌داد سه مدل GFDL-CM4، BCC-CSM2-MR و MRI-ESM-0 و کاربرد روش تصحیح اریبی عامل تغییر دلتا به پیش‌نگری شدت و مدت خشکسالی در تهران پرداختند. براساس گزارش ایشان مدل BCC در مقایسه با دو مدل GFDL و MRI دارای دقت مناسب‌تری برای مطالعه‌ی بارش و خشکسالی در این منطقه است. در پژوهش دیگری Zarrin and Dadashi Roudbari (2020) برون‌داد سه مدل BCC-CSM2-

گرمایش سامانه اقلیمی رویدادی است که در دهه‌های اخیر توجه گسترده مردم، دولت‌ها و پژوهش‌گران را به خود جلب کرده است (Gou et al., 2021). این گرمایش باعث تغییراتی در سامانه زمین می‌شود که با برهم‌کنش‌های شدید بین فرآیندهای هواپیهر، آب‌سپهر، یخ‌سپهر و زیست‌سپهر همراه است و منجر به تهدیدات زیست‌محیطی مانند عقب‌نشینی یخچال‌های طبیعی، فروپاشی کوه‌های یخ، گسترش دریاچه‌های یخچالی و غیره می‌شود (Yao et al., 2019). این تغییرات بر چرخه آب‌شناختی منطقه‌ای و جهانی و در نتیجه بر زندگی انسان، تولیدات کشاورزی، کاربری زمین و زیست‌بوم‌های طبیعی تأثیرات قابل توجهی می‌گذارد و می‌تواند مانع از توسعه اجتماعی-اقتصادی کشورها شود (Zheng et al., 2021). درک عمیق تغییرات اقلیمی در هر منطقه مبنای دستیابی به راهبردهای سازگاری با این معضل برای کاهش خطرات آتی است.

برای پیش‌بینی تغییرات آتی اقلیمی از مدل‌های ریاضی موسوم به مدل‌های گردش عمومی^۱ (GCM) استفاده می‌شود. قابلیت اطمینان این مدل‌ها به توانایی آن‌ها در بازتولید ویژگی‌های آب و هوایی تاریخی و آتی بستگی دارد. در حال حاضر فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده^۲ (CMIP6) در حال انتشار است. در هر تکرار جدید از پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده، مدل‌ها به تدریج از نظر کارایی محاسباتی، قدرت تفکیک‌پذیری و نمایش فرآیندهای فیزیکی بهبود می‌یابند. در گزارش ششم در مقایسه با گزارش‌های پیشین به‌روز رسانی‌هایی در مورد افزودن پارامترها و فرآیندهای فیزیکی جدید و افزایش تفکیک‌پذیری مکانی ارائه شده است (Eyring et al., 2019). برون‌داد مدل‌های فاز ششم فرصت جدیدی برای بررسی سامانه‌ی اقلیمی و پیش‌بینی‌های منطقه‌ای تحت سناریوهای جدید معروف به SSP^۳ که تغییرات محتمل آینده را برپایه جنبه‌های اجتماعی مانند عوامل جمعیتی، فنی، اقتصادی، حاکمیتی و محیطی توصیف می‌کنند، فراهم می‌آوردند (O'Neill et al., 2019).

با وجود این پیشرفت‌ها، شبیه‌سازی GCM‌ها اغلب دارای اریبی قابل توجهی است و تفکیک‌پذیری مکانی کم آن‌ها از توانایی این ابزار برای بازتولید داده‌های اقلیمی در مقیاس محلی و منطقه‌ای به‌ویژه در مناطق کوهستانی می‌کاهد (Fang et al., 2015). بنابراین، برای انجام پیش‌نگری‌های قابل اعتماد در مقیاس محلی، برون‌داد GCM‌ها قبل از استفاده باید پس‌پردازش شوند (Kolachian et al., 2019). پس‌پردازش مدل‌های اقلیمی با استفاده از روش‌های مقیاس‌کاهی یا

بیشینه و بارش، تحت تصحیح اریبی با روش مقیاس‌دهی خطی، (۲) انتخاب مدل‌های مناسب برای پیش‌نگری تغییرات اقلیمی و (۳) پیش‌نگری فراسنجه‌های مورد بررسی در سه دوره زمانی آینده با استفاده از میانگین برون‌داد مدل‌های اقلیمی برگزیده در منطقه مطالعاتی همدان-بهار انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر برای مقایسه برون‌داد هشت مدل از مجموعه مدل‌های گزارش ششم برای پیش‌بینی بارش و دمای کمینه و بیشینه در منطقه مطالعاتی همدان-بهار انجام شد. این منطقه در بازه طول‌های ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۴ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵ دقیقه شمالی قرار دارد (شکل ۱) و قسمت‌های از شهرهای همدان، لالچین، بهار و صالح‌آباد را در استان همدان در خود جای داده است. میانگین ارتفاع آن از سطح دریا ۲۰۳۸ متر است. براساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن آب و هوای این منطقه نیمه‌خشک با میانگین کمینه و بیشینه دمای سالانه به ترتیب ۲/۸ و ۱۹/۲ درجه سلسیوس و بارندگی بلندمدت سالانه ۳۴۵ میلی‌متر است (IRIMO, 2019). کشاورزی یکی از عمده فعالیت‌های اقتصادی در این منطقه است.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

از مجموعه هشت ایستگاه موجود در منطقه همدان-بهار با داده‌های کامل در طول دوره آماری مورد نیاز (۲۰۱۴-۱۹۹۰)، پنج ایستگاه به نمایندگی از هر تراز ارتفاعی به منظور درستی‌سنجی شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی انتخاب شدند (جدول ۱). همچنین، انتخاب GCM‌ها از مجموعه مدل‌های CMIP6 براساس کامل بودن داده‌های تاریخی و سناریوهای مورد نیاز و عدم مطالعه آن‌ها در منطقه مورد نظر توسط سایر پژوهش‌گران بود. داده‌های روزانه بارش و دمای کمینه و بیشینه مدل‌ها برای دوره تاریخی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ و برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) از تارنمای ESGF (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6>) برداشت شد. جدول ۲ اطلاعاتی را در مورد GCM‌ها ارائه می‌دهد. همچنین، داده‌های مشاهداتی برای دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۴ از سازمان هواشناسی ایران تهیه شد (IRIMO, 2019). سناریوهای موجود در مدل‌های فاز ششم براساس پنج فرض اجتماعی-اقتصادی توسعه داده شده‌اند. پیش‌فرض‌های هر یک از این سناریوها در

MR، CSM1-0، CAMS و MRI-ESM-0 از مجموعه مدل‌های CMIP6 تحت روش تصحیح اریبی عامل تغییر دلتا را برای پیش‌نگری بلندمدت دمای آینده ۴۳ ایستگاه همدیدی در ایران مورد بررسی قرار دادند. بنابر گزارش ایشان در میان سه مدل مورد بررسی مدل MRI-ESM-0 برای پیش‌نگری دمای آبی کشور دارای عملکرد بهتری می‌باشد. همچنین، (Roshani and Hamidi, 2021) به شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش ایستگاه ساری با استفاده از سه مدل ACCESS-CM2، HadGEM3-GC31-LL و NESM3 از مدل‌های اقلیمی سری ششم پرداختند. آن‌ها با انتخاب مدل ACCESS-CM2 به عنوان بهترین مدل پیش‌نگری داده‌ها را تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در آینده انجام دادند. در این مطالعه اشاره‌ای به نوع روش تصحیح اریبی مورد استفاده نشده است. بنابر نتایج ایشان در این ایستگاه دما از ۱/۱۶ تا ۴/۰۹ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت و میانگین مقدار بارش سالانه نیز در حدود ۲۴ تا ۳۶ درصد فزونی می‌یابد. از آنجایی که GCM‌های شرکت‌کننده در پروژه‌های CMIP توسط مؤسسات مختلف آب و هوایی در سراسر جهان تولید می‌شوند، پارامترهای فیزیکی و راهبردهای توسعه‌ی متفاوتی در توسعه‌ی هر GCM وجود دارد (Taylor et al., 2012). بنابراین بررسی چندین GCM به‌طور همزمان می‌تواند چشم‌انداز بهتری از وضعیت اقلیمی یک منطقه ایجاد کند. با توجه به بررسی‌های انجام شده کارایی بسیاری از مدل‌های CMIP6 در ایران هنوز مورد بررسی قرار نگرفته است و در بیشتر مطالعات تنها به ارزیابی دو یا سه مدل پرداخته شده است. همچنین، بررسی مطالعات پیشین در ایران خلائی را در کاربرد روش‌های نوین تصحیح اریبی نشان می‌دهد.

روش‌های تصحیح اریبی شامل روش‌های پویا و آماری، برای پر کردن شکاف بین تفکیک‌پذیری کم GCM‌ها و نیاز به تولید داده‌های آب و هوایی در مقیاس محلی، استفاده می‌شوند (Su et al., 2016). روش‌های تصحیح اریبی آماری برای بارش و دما شامل تغییر عامل دلتا، مقیاس‌دهی خطی^۵، نقشه‌برداری توزیع^۶، و نقشه‌برداری چندکی تجربی^۷ هستند. از برتری‌های روش‌های آماری می‌توان به اجرای آسان و الزامات محاسباتی کمتر آن‌ها اشاره کرد. انتخاب روش دقیق تصحیح اریبی در هر منطقه می‌تواند به پیش‌نگری بهتر تغییرات داده‌های اقلیمی در آینده و کاهش خطرات مورد انتظار ناشی از رویدادهای فاجعه‌آمیز کمک کند.

به این ترتیب، این مطالعه با هدف (۱) ارزیابی عملکرد هشت مدل از مجموعه مدل‌های در دسترس CMIP6 در شبیه‌سازی دمای کمینه و

این داده‌ها دارد. در مطالعه حاضر برونداد بارش و دمای کمینه و بیشینه مدل‌های اقلیمی با استفاده از روش مقیاس‌دهی خطی تصحیح اریبی خواهد شد.

مطالعات (O'Neill et al. 2019) با جزئیات توضیح داده شده است. در مطالعه حاضر از سناریوهای بدبینانه (SSP5-8.5)، میانه (SSP2-) و خوش‌بینانه (SSP1-2.6) برای پیش‌نگری چگونگی تغییرات اقلیمی در این منطقه استفاده شد.

در روش مقیاس‌دهی خطی داده‌های بارش و دما به ترتیب با استفاده از روابط (۱) تا (۴) تصحیح اریبی می‌شوند:

۳-۲- پس‌پردازش با روش تصحیح اریبی

مقایسه خروجی GCM با داده‌های مشاهداتی نشان از اریبی شدید

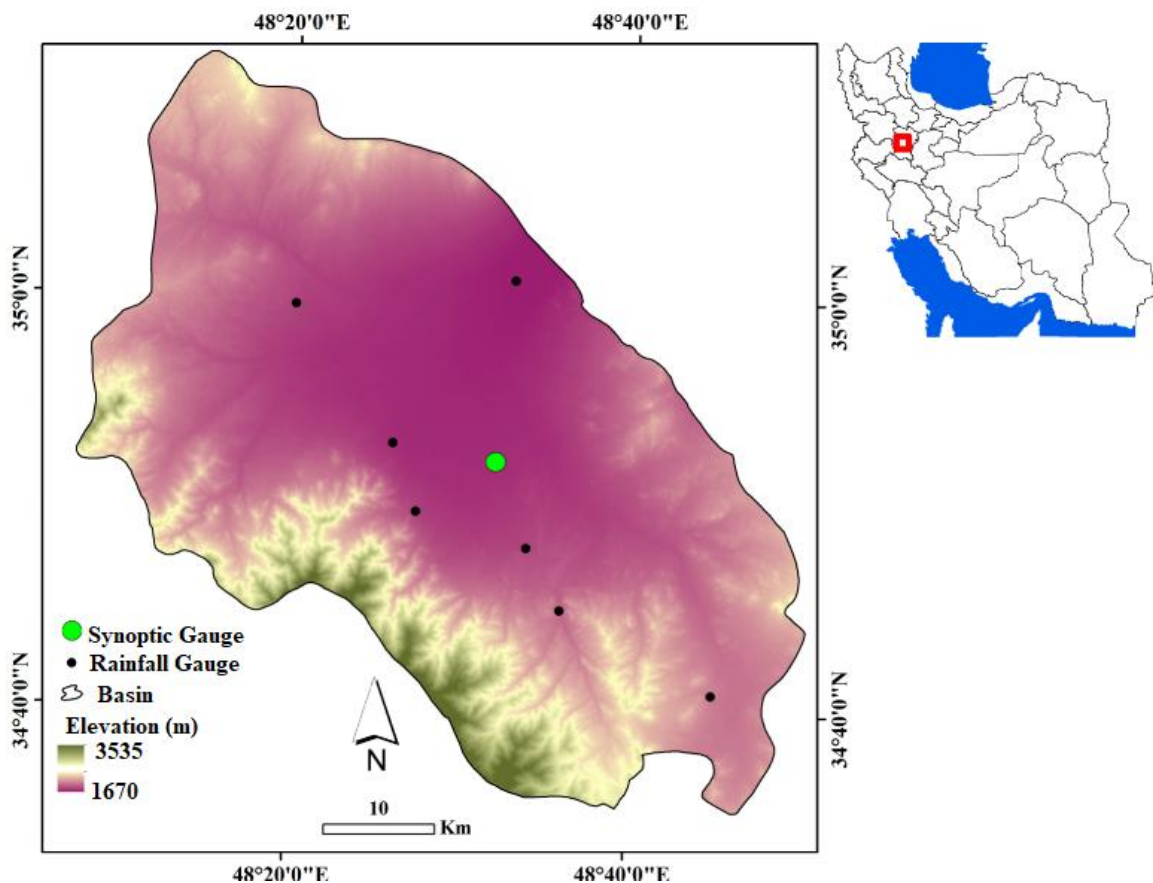


Fig. 1- Hamedan-Bahar plain and meteorological stations

شکل ۱- دشت همدان-بهار و ایستگاه‌های هواشناسی واقع در آن

Table 1- Details of stations used in the study

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی

Stations	Type of Station	Elevation (m)	Longitude	Latitude
Koshkabad*	Rain Station	1684	48.55	35.01
Airport*	Synoptic	1740	48.53	34.86
Bahar	Rain Station	1770	48.43	34.88
Sheverin*	Rain Station	1830	48.56	34.8
Maryanaj	Rain Station	1841	48.45	34.82
Aghkahriz*	Rain Station	1844	48.33	34.99
Ekbatan Dam*	Rain Station	1940	48.6	34.75
Gonbad*	Rain Station	2050	48.75	34.68

*Stations used to validate climatic model simulations

Table 2- Detailed description of GCMs used in this study

جدول ۲- مشخصات GCM های مورد استفاده

Model	Institution/Country	Resolution
CMCC-ESM2	Euro-Mediterranean Centre on Climate Change coupled climate model, Italy	0.94 × 1.25°
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute, Ibaraki, Japan	1.12 × 1.12°
NOR-ESM2-MM	Norwegian Climate Center, Norway	0.94 × 1.25°
GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NJ, USA	1.00 × 1.25°
MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Germany	1.87 × 1.86°
IPSL-CM6A-LR	Institute Pierre Simon Laplace (IPSL), Paris, France	2.50 × 1.27°
ACCESS-CM2	Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science, Australia	1.87 × 1.25°
MIROC6	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Kanagawa, Japan	1.40 × 1.40°

مقادیر همبستگی، میانگین مربع خطای ریشه و انحراف معیار را به تصویر می‌کشد. هرچقدر محل قرارگیری داده‌های شبیه‌سازی شده به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر باشند تطابق بیشتری بین این دو سری داده وجود دارد.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- درستی‌سنجی شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی

پیش از کاربرد مدل‌های اقلیمی برای پیش‌نگری تغییرات اقلیمی در آینده باید عملکرد آن‌ها در شبیه‌سازی شرایط اقلیمی در زمان حال و گذشته بررسی شود (Zhao et al., 2015). بنابراین، نخست عملکرد مدل‌های اقلیمی CMIP6 در شبیه‌سازی داده‌های مشاهداتی طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰)، با استفاده از معیارهای ارزیابی نام‌برده در بالا در پنج ایستگاه برگزیده، بررسی شد. با توجه به همانندی نتایج به دست آمده در ایستگاه‌های مورد بررسی، در این مقاله تنها به ارائه نتایج مربوط به ایستگاه همدیدی فرودگاه پرداخته شده است. براساس یافته‌ها (جدول ۳)، مدل‌های ACCESS-CM2 و MIROC 6 به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار RMSE برای هر سه فراسنجه مورد بررسی هستند. مدل MPI-ESM1-2-LR کمترین ضریب همبستگی را به خود اختصاص داد. از بین مدل‌های بررسی شده سه مدل CMCC-ESM2، MIROC 6 و NorESM2-MM دارای کمترین مقدار میانگین مربع خطای ریشه و بیشترین کارایی نش-ساتکلیف و ضریب همبستگی بودند (جدول ۳) و در نزدیک‌ترین مکان در نمودار تیلور نسبت به داده‌های مشاهداتی قرار گرفتند (شکل ۲). همچنین با توجه به یافته‌های آزمون t استیودنت، مقادیر p-value در سه مدل نام‌برده برای همه فراسنجه‌ها بالاتر از ۰/۰۵ است که حاکی از نبود تفاوت معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد، بین میانگین داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط این سه مدل

$$T_{his}^*(d) = T_{his}(d) + [\mu_m(T_{obs}(d)) - \mu_m(T_{his}(d))] \quad (۱)$$

$$T_{sim}^*(d) = T_{sim}(d) + [\mu_m(T_{obs}(d)) - \mu_m(T_{his}(d))] \quad (۲)$$

$$P_{his}^*(d) = P_{his}(d) \times \left[\frac{\mu_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{his}(d))} \right] \quad (۳)$$

$$P_{sim}^*(d) = P_{sim}(d) \times \left[\frac{\mu_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{his}(d))} \right] \quad (۴)$$

در این معادلات T و P به ترتیب نشان‌دهنده دما و بارش، d نمایش‌گر روزانه بودن داده‌ها، μ_m میانگین بلندمدت ماهانه، * داده‌ی تصحیح‌اریبی شده، his داده تاریخی GCM، obs داده مشاهداتی و sim داده شبیه‌سازی شده توسط GCM برای آینده است (Shrestha et al., 2016).

۴-۲- معیارهای ارزیابی

به منظور مقایسه میانگین ماهانه داده‌های مشاهداتی و میانگین ماهانه داده‌های تصحیح‌اریبی شده در دوره تاریخی و آینده از سه معیار شامل میانگین مربع خطای ریشه (RMSE)، کارایی نش-ساتکلیف (NSE) و ضریب همبستگی (r) استفاده شد. این معیارها به طور گسترده برای ارزیابی آماری خروجی‌های GCM استفاده می‌شوند. RMSE، یک نشان‌گر بزرگی خطا است که هر چه دقت یک مدل بیشتر باشد، این معیار به صفر نزدیک‌تر است. NSE قدرت GCM را در تولید داده مشاهداتی ارزیابی می‌کند. بازه NSE بین صفر و یک است و هرچه نتیجه به یک نزدیک شود، دقت تخمین GCM بالاتر است. ضریب همبستگی (r) رابطه بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. دامنه تغییر این معیار بین منفی یک و یک است و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده رابطه ضعیف بین دو گروه داده است (Sarabi et al., 2018). همچنین، تفاوت میانگین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با استفاده از آزمون t استیودنت^۸ محاسبه شد. برای تجسم و ارزیابی میزان مطابقت الگوی داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی از نمودار تیلور استفاده شد (شکل ۳). این نمودار

است. در ادامه از میانگین برون‌داد این سه مدل برای پیش‌نگری فراسنجه‌های بارش و دمای کمینه و بیشینه برای سه دوره ۲۵ ساله در آینده تحت سه سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، میانه (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) استفاده شد.

۲-۳- پیش‌نگری فراسنجه بارش در آینده

نتایج پیش‌نگری بارش در منطقه مورد مطالعه تحت سه سناریوی مورد بررسی در سه دوره آینده در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل‌ها SSPها نمایش‌گر یافته‌های سه سناریوی برگزیده و OBS نمایش‌گر داده‌های مشاهداتی دوره پایه می‌باشد. در طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) هر سه سناریو در ماه‌های ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر و دسامبر کاهش بارش و در ماه‌های مارچ، آپریل و نوامبر افزایش را نشان دادند، در سایر ماه‌ها نتایج سناریوها یکسان نمی‌باشد. تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 بیشترین افزایش بارش در ماه آپریل و به ترتیب به مقدار ۲۲/۱۹ و ۱۸/۲۵ میلی‌متر رخ داد. همچنین، بیشترین کاهش بارش در ماه آگوست و تحت سناریوی SSP5-8.5 به مقدار ۵/۶ میلی‌متر پیش‌نگری شد. در این دوره بررسی میانگین بارش سالانه تحت هر سه سناریو کاهش بارش را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. بیشترین کاهش میانگین بارش سالانه تحت سناریوی SSP5-8.5 و به مقدار ۸/۴ درصد رخ خواهد داد. بررسی فصلی بارش در این دوره نشان می‌دهد که در فصل تابستان و پاییز تحت همه سناریوها تغییرات کاهش یافته است. به طوری که در فصل تابستان و تحت سناریوی SSP5-8.5 بارش به اندازه ۵۲/۳۶ درصد کاهش یافته است. فصل بهار نشان از تغییرات افزایشی بارش دارد و بیشترین افزایش تحت سناریوی SSP2-4.5 و به مقدار ۱۶/۷۵ درصد رخ خواهد داد. تغییرات در فصل زمستان تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب به مقدار ۲/۲ و ۴/۱

درصد کاهشی و تحت سناریوی SSP2-4.5 به مقدار ۳/۵ درصد افزایشی خواهد بود.

در دوره آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) ماه‌های جولای، آگوست، سپتامبر، اکتبر و دسامبر تحت هر سه سناریو کاهش بارش را تجربه خواهند کرد. بیشترین و کمترین میزان کاهش بارش در ماه‌های آگوست و اکتبر به ترتیب تحت سناریوهای SSP5-8.5 و SSP2-4.5 به میزان ۵/۵۸ و ۰/۴۳ میلی‌متر رخ خواهد داد. در این دوره بارش تنها در ماه آپریل تحت تمامی سناریوها افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار این افزایش تحت سناریوی SSP1-2.6 و به مقدار ۱۹/۰۳ میلی‌متر پیش‌نگری شده است. میانگین بارش سالانه تحت هر سناریو نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد که تحت سناریوی SSP5-8.5، بیشترین مقدار کاهش به اندازه ۱۰/۸ درصد رخ خواهد داد. همانند دوره قبل فصل‌های تابستان و پاییز با کاهش بارش روبرو خواهند شد. انتظار بیشترین مقدار کاهش فصلی بارش را در فصل تابستان و تحت سناریوی SSP5-8.5 به میزان ۶۷/۹ درصد خواهیم داشت. همچنین، فصل بهار تحت سناریوی SSP1-2.6 افزایش ۲۷/۹ درصدی بارش را تجربه خواهد کرد.

نتایج به دست آمده در دوره آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) حاکی از آن است که بارش در ماه‌های ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر، اکتبر و دسامبر تحت همه سناریوهای مورد بررسی کاهش خواهد یافت و ماه آگوست تحت سناریوی SSP5-8.5 بیشترین کاهش را به اندازه ۵/۴۱ میلی‌متر خواهد داشت. همچنین، در این دوره ماه‌های مارچ و نوامبر تحت هر سه سناریو افزایش بارش را تجربه خواهند کرد. بیشترین افزایش بارش مربوط به ماه آپریل و تحت سناریوی SSP1-2.6 به مقدار ۴۰/۱۵ میلی‌متر و کمترین افزایش مربوط به ماه مارچ در سناریوی SSP5-8.5 و به مقدار ۳/۷۹ میلی‌متر خواهد بود.

Table 3- Performance of metric CMIP6 models in simulating precipitation (PCP) and temperature during historical period in Hamadan Airport station

جدول ۳- آماره‌های ارزیابی شبیه‌سازی بارش (PCP) و دما در طول دوره تاریخی در ایستگاه فرودگاه همدان

MODEL	RMSE		NSE			r			P-value				
	PCP	T max	T min	PCP	T max	T min	PCP	T max	T min	PCP	T max	T min	
ACCESS-CM2	14.71		10.46	9.42	0.45	0.48	0.53	0.46	0.64	0.66	0.046	0.021	0.015
CMCC-ESM2	3.74		5.96	6.24	0.61	0.73	0.65	0.81	0.91	0.93	0.239	0.61	0.71
GFDL-ESM4	10.99		8.35	9.83	0.43	0.54	0.52	0.52	0.61	0.6	0.037	0.025	0.031
IPSL-CM6A-LR	12.48		8.55	9.93	0.53	0.46	0.48	0.45	0.52	0.55	0.014	0.018	0.012
MIROC 6	3.71		6.71	5.56	0.63	0.66	.7	0.83	0.94	0.89	0.45	0.33	0.66
MPI-ESM1-2-LR	11.99		9.46	8.33	0.43	0.46	0.52	0.41	0.52	0.43	0.038	0.006	0.032
MRI-ESM2-0	9.95		10.45	9.29	0.52	0.46	0.41	0.51	0.61	0.63	0.042	0.04	0.029
NorESM2-MM	4.12		6.87	6.24	0.58	0.64	0.57	0.80	0.83	0.88	0.51	0.15	0.21

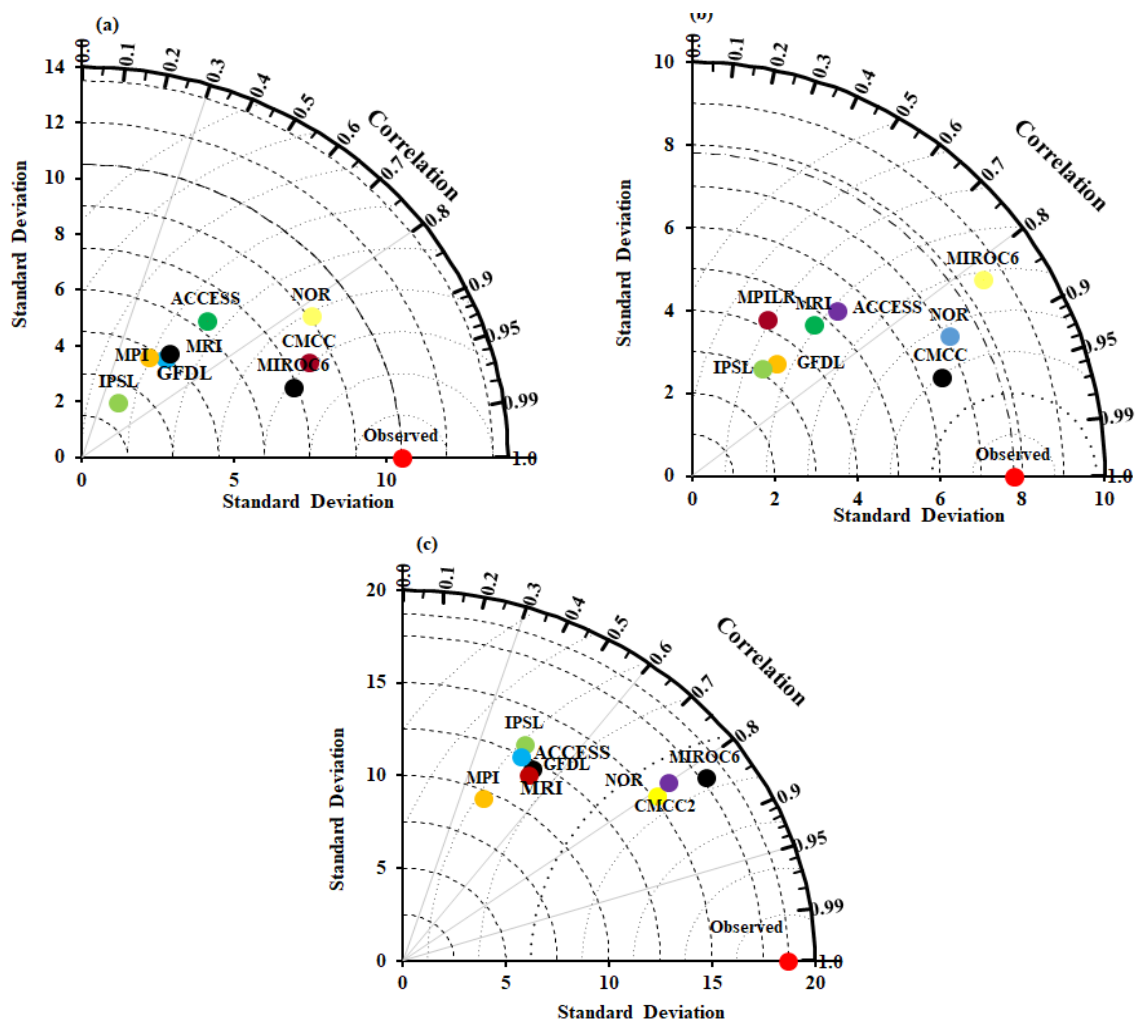


Fig. 2- Taylor's diagram to compare the simulation of climate models for (a) maximum temperature, (b) minimum temperature and (c) precipitation.

شکل ۲- نمودار تیلور برای مقایسه شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی برای فراسنجه‌های (الف) دمای بیشینه، (ب) دمای کمینه و (ج) بارش

در دوره‌های آتی نمایش می‌دهند. با توجه به نتایج به دست آمده در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) در همه ماه‌های سال شاهد افزایش مقدار میانگین دمای بیشینه در مقایسه با داده‌های مشاهداتی خواهیم بود. ماه ژانویه در این دوره تحت هر سه سناریو بیشترین تغییرات دما را نشان می‌دهد. این تغییرات به ترتیب برابر با ۲/۸۵، ۳/۰۹ و ۳/۸۵ درجه سلسیوس برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 می‌باشد. همچنین، ماه آگوست کمترین مقدار افزایش دما را در این دوره به خود اختصاص داد به طوری که به ترتیب تحت سه سناریوی نامبرده افزایشی برابر با ۰/۱، ۰/۳۵ و ۱/۱۲ درجه سلسیوس را نشان داد.

در این دوره میانگین سالانه بارش تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب به مقدار ۱۲/۶ و ۳/۲ درصد کاهش خواهد یافت. میانگین بارش فصلی در این دوره نشان‌دهنده کاهش بارش در فصل‌های تابستان و پاییز می‌باشد. بیشترین کاهش بارش فصلی مربوط به فصل تابستان تحت سناریوی SSP5-8.5 و به مقدار ۶۲/۲ درصد است. بنابر نتایج آزمون t استیودنت اثر همه سناریوها بر تغییرات بارش در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار می‌باشد.

۳-۳- پیش‌نگری فراسنجه دمای بیشینه در آینده

شکل ۴ نتایج پیش‌نگری دمای بیشینه را تحت سه سناریوی مختلف

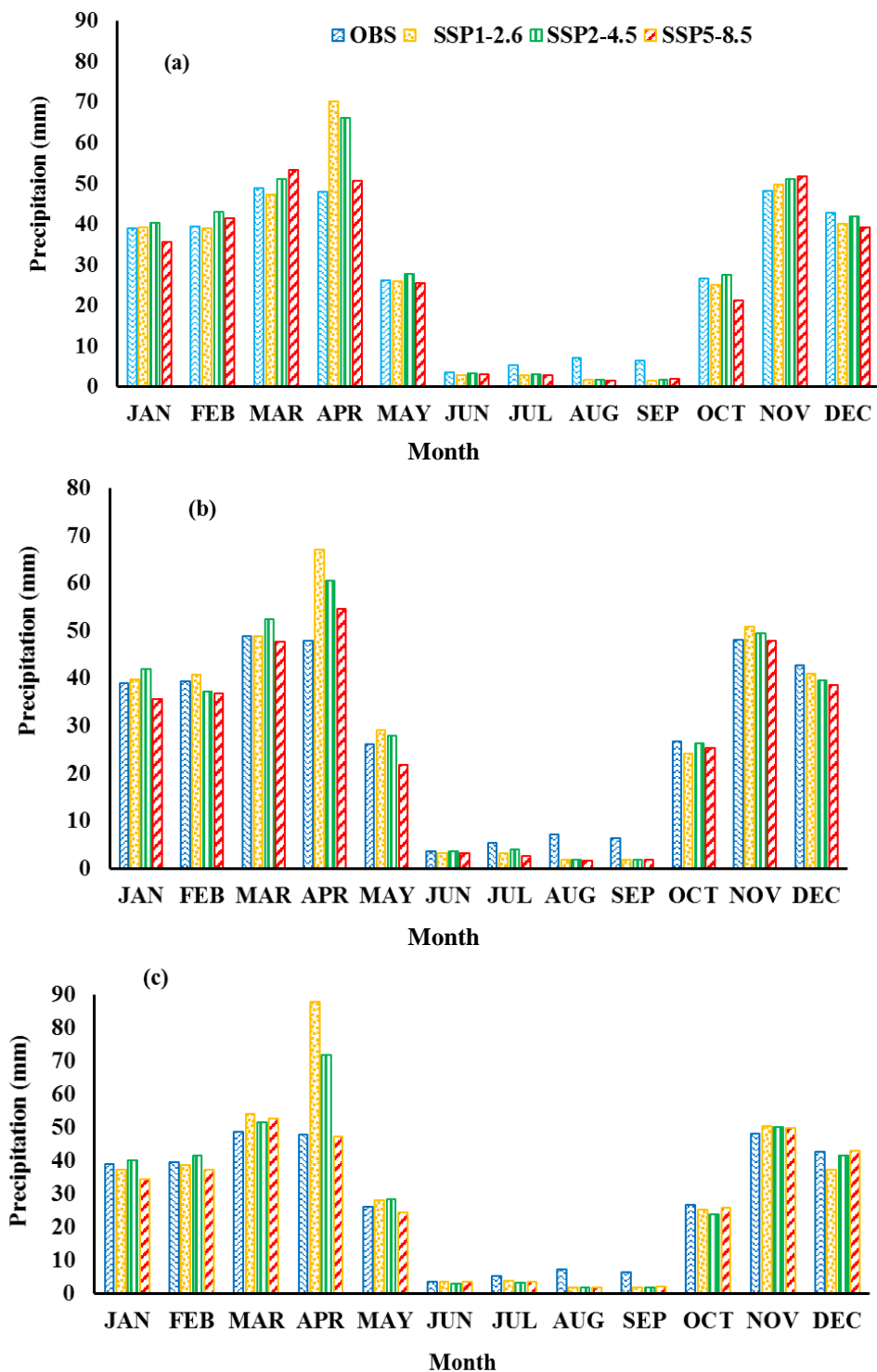


Fig. 3- Projected precipitation using selected models ensemble under SSP1.2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios for (a) near future (2026-2050), (b) mid future (2051-2075), and (c) far future (2076-2100) in Hamedan-Bahar plain. OBS is observed data.

شکل ۳- پیش‌نگری بارش با استفاده از مجموعه مدل‌های انتخاب شده تحت سناریوهای SSP1.2.6، SSP2.4.5 و SSP5.8.5 برای (الف) آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، (ب) آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵)، (ج) آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) در دشت همدان-بهار. داده‌های مشاهده‌ای است

بیشترین و کمترین مقدار تغییر میانگین دمای سالانه در این دوره مربوط به دو سناریوی SSP5-8.5 و SSP1-2.6 به ترتیب به مقدار ۲/۲۵ و ۱/۴۸ درجه سلسیوس است.

در دوره آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) ماه‌های مختلف سال افزایش میانگین دمای بیشینه را نسبت به دوره تاریخی نشان می‌دهند. در این دوره بیشترین تغییرات میانگین دمای بیشینه ماهانه مربوط به ماه ژانویه به مقدار ۲/۵۵ و ۳/۹۲ به ترتیب برای دو سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 است. تحت سناریوی SSP5-8.5 بیشترین تغییر میانگین دمای بیشینه ماهانه مربوط به ماه نوامبر و به اندازه ۳/۹۷ درجه سلسیوس می‌باشد. کمترین تغییر میانگین دمای بیشینه ماهانه تحت سناریوی SSP1-2.6 در ماه اگوست و به اندازه ۰/۰۶ درجه سلسیوس رخ داد در حالی که تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 کمترین مقدار تغییر دمای بیشینه در ماه جولای و به ترتیب به اندازه ۰/۴۵ و ۰/۴۲ درجه سلسیوس پیش‌نمایی شد. مقدار تغییرات میانگین سالانه دمای بیشینه در این دوره تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب به اندازه ۶/۸ و ۹/۹ و ۱۱/۹ درصد افزایش داشته است.

با توجه به نتایج به دست آمده در دوره آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶)، در همه ماه‌های سال افزایش مقدار میانگین دمای بیشینه در مقایسه با داده‌های دوره پایه مورد انتظار است، ماه ژانویه در این دوره تحت هر سه سناریو بیشترین تغییرات دما را نشان می‌دهد. این تغییرات به ترتیب برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برابر با ۲/۸۷، ۳/۶۸ و ۴/۴۷ درجه سلسیوس می‌باشد. کمترین مقدار افزایش دما در این دوره تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 مربوط به ماه جولای و به ترتیب برابر با ۰/۱۱ و ۰/۴۴ درجه سلسیوس می‌باشد و تحت سناریوی بدبینانه کمترین مقدار افزایش در ماه اگوست و به مقدار ۱/۸۹ درجه سلسیوس پیش‌نمایی شد. بیشترین و کمترین مقدار تغییر میانگین دمای سالانه در این دوره مربوط به دو سناریوی SSP5-8.5 و SSP1-2.6 به ترتیب به مقدار ۱۴/۲ و ۶/۴ درصد نسبت به دوره پایه است. بنابر نتایج آزمون t استیودنت اثر همه سناریوها بر تغییرات دمای بیشینه در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است.

۳-۴- پیش‌نگری فراسنجه دمای کمینه در آینده

نتایج پیش‌نگری دمای کمینه تحت سه سناریوی مورد بررسی در سه دوره آینده در شکل ۵ نشان داده شده است. براساس نتایج به دست

آمده در دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) در همه ماه‌های سال شاهد افزایش مقدار میانگین دمای کمینه در مقایسه با داده‌های مشاهداتی هستیم، در این دوره بیشترین تغییر دما تحت سناریوی SSP1-2.6 در ماه ژانویه و به مقدار ۲/۷۶ درجه سلسیوس رخ داد. همچنین، تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بیشترین افزایش میانگین دمای کمینه در ماه فوریه و به ترتیب برابر با ۳/۲۲ و ۳/۶۳ درجه سلسیوس رخ داد. تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 ماه اگوست کمترین مقدار افزایش دما را به ترتیب به مقدار ۰/۰۲ و ۰/۲۸ درجه سلسیوس تجربه خواهد کرد. تحت سناریوی SSP5-8.5 کمترین مقدار افزایش دما مربوط به ماه جولای و به اندازه ۰/۹۱ درجه سلسیوس خواهد بود. بیشترین و کمترین مقدار تغییر میانگین دمای سالانه در این دوره نسبت به دوره پایه مربوط به دو سناریوی SSP5-8.5 و SSP1-2.6 به ترتیب به مقدار ۳۵/۸ و ۲۷/۲ درصد است.

در دوره آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) ماه‌های مختلف سال افزایش میانگین دمای کمینه را نسبت به دوره تاریخی نشان می‌دهند. در این دوره بیشترین تغییرات میانگین دمای کمینه ماهانه تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مربوط به ماه فوریه و به ترتیب به مقدار ۳/۹۴ و ۴/۳۹ و ۴/۵۶ درجه سلسیوس است. کمترین تغییر میانگین ماهانه دمای کمینه تحت سناریوی SSP2-4.5 در ماه جولای و به اندازه ۰/۵۸ درجه سلسیوس رخ داد در حالی که تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 کمترین مقدار تغییر دمای کمینه در ماه اگوست و به ترتیب به اندازه ۰/۰۱ و ۱/۲۹ درجه سلسیوس پیش‌نمایی شد. مقدار تغییرات میانگین سالانه دمای کمینه در این دوره تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب به اندازه ۳۱/۹ و ۳۸/۳ و ۴۵/۱ درصد افزایش داشته است.

بررسی نتایج تغییرات میانگین دمای کمینه در دوره آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) نسبت به دوره پایه نشان‌دهنده افزایش این فراسنجه در همه ماه‌های سال است. در این دوره تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 ماه ژانویه بیشترین تغییرات دما را به ترتیب به مقدار ۲/۹ و ۳/۵۳ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. همچنین، تحت سناریوی SSP5-8.5 ماه نوامبر بیشترین افزایش دما را به مقدار ۴/۱۷ درجه سلسیوس نشان داد. تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 ماه جولای کمترین مقدار افزایش دمای کمینه را به ترتیب به مقدار ۰/۰۵ و ۱/۲۸ درجه سلسیوس نشان داد و تحت سناریوی میانه این مقدار در ماه اگوست و به مقدار ۱/۸۹ درجه سلسیوس پیش‌نمایی شد.

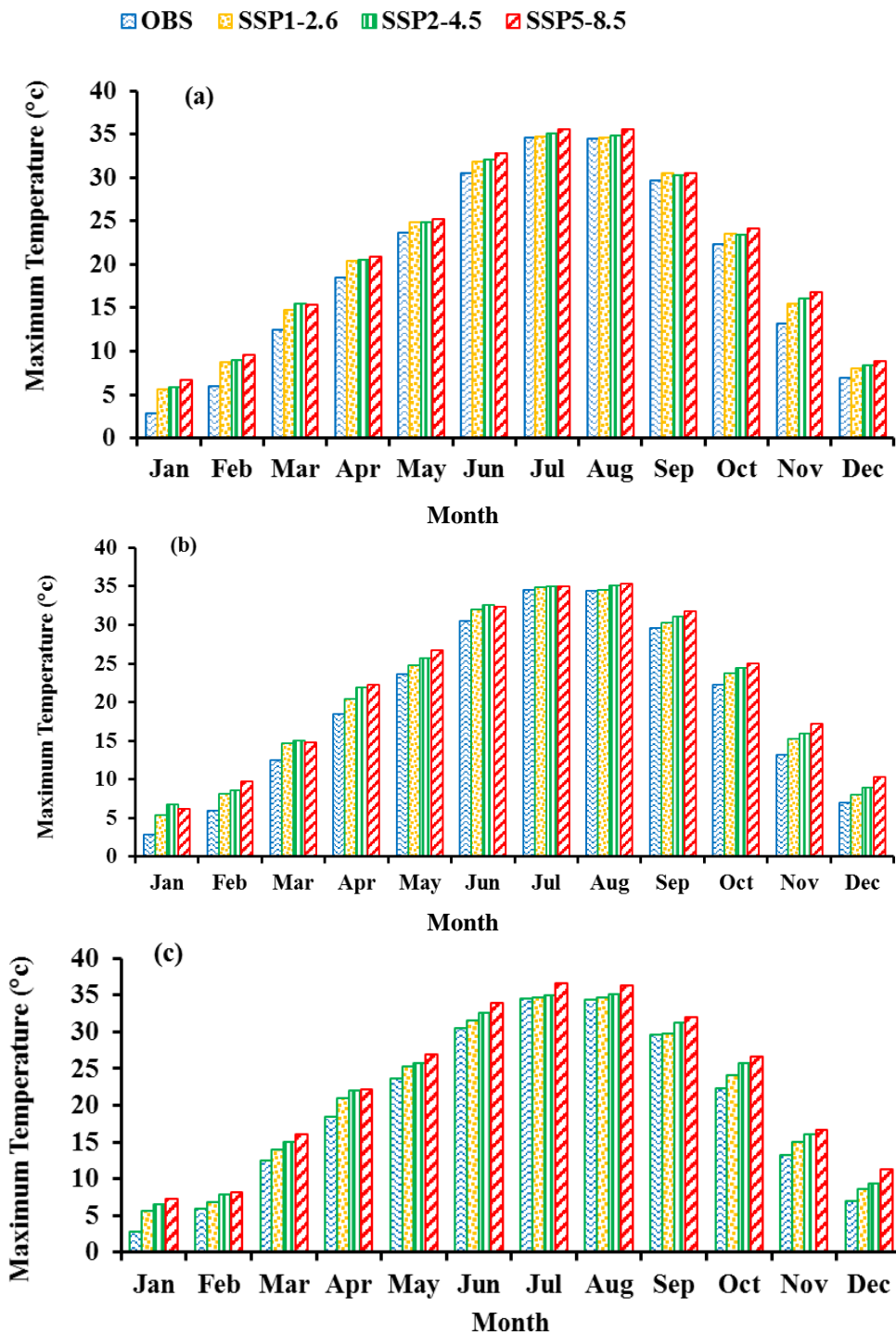


Fig. 4- Projected maximum temperature using selected models ensemble under SSP1.2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios for (a) near future (2026-2050), (b) mid future (2051-2075), and (c) far future (2076-2100) in Hamedan-Bahar plain. OBS is observed data

شکل ۴- پیش‌نگری دمای بیشینه با استفاده از مجموعه مدل‌های انتخاب شده تحت سناریوهای SSP1.2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 (الف) آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، (ب) آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵)، (ج) آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) در دشت همدان-بهار. 8.5 داده‌های مشاهده‌ای است

مقدار تغییرات میانگین سالانه دمای کمینه در این دوره تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب به اندازه ۲۸/۸ و ۳۷/۳ و ۴۶/۵ درصد افزایش داشته است. بنابر نتایج آزمون t استیودنت اثر همه سناریوها بر تغییرات دمای کمینه در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی دار است.

افزایش دمای هوا در زمستان می‌تواند باعث کاهش بارش برف شود. به طور کلی در مناطق کوهستانی ذوب تدریجی برف برای تغذیه آب زیرزمینی و تأمین جریان در بهار و تابستان اهمیت دارد؛ در نتیجه کمبود بارش برف در زمستان ممکن است بر منابع آب زیرزمینی اثر کاهشی داشته باشد. همچنین، افزایش دمای کمینه در ماه مارچ به بالای صفر می‌تواند سبب ذوب زودهنگام ذخائر برفی کوهستان‌ها شود که خود امکان بروز مشکلات کم‌آبی در تابستان را افزایش می‌دهد. از آنجاییکه دمای کمینه به‌طور میانگین در طی سه دوره مورد بررسی دو درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش نشان می‌دهد می‌توان تغییر الگوی دمای خاک و همچنین اثر آن بر زیست گیاهان را انتظار داشت (Jahanbakhsh et al., 2021). همچنین، با توجه به اینکه در فصل‌های بهار و پاییز به‌طور میانگین شاهد دو درجه افزایش دمای بیشینه می‌باشیم ممکن است الگوی دمایی منطقه تغییر کرده و تعداد روزهای گرم سال افزایش یابد.

در پژوهشی Moezzi et al. (2020) با استفاده از مدل LARS-WG اقدام به پیش‌نگری و شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در منطقه همدان-بهار تحت سناریوهای مختلف گزارش چهارم و پنجم نمودند. نتایج ایشان حاکی از کاهش بارش و افزایش دمای سالانه تحت تمامی سناریوها است. در مطالعه دیگری (Salami et al. 2015) به پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر آبخوان دشت همدان-بهار با استفاده از ۱۶ مدل اقلیمی تحت سناریوهای A2 و B1، پرداختند. بنابر نتایج ایشان دما در همه ماه‌های سال افزایش می‌یابد اما مقدار این افزایش بسیار متغیر است و مقادیر افزایش دما تحت سناریوی A2 بیش از سناریوی B1 است. همچنین، بارش دارای تغییرات مثبت و منفی در ماه‌های مختلف می‌باشد. نتایج پژوهش حاضر نیز از نظر پیش‌نگری افزایش دما و تغییرات افزایشی و کاهشی در ماه‌های مختلف با نتایج مطالعه فوق هم‌خوانی دارد. نتایج مختلف پیش‌نگری بارش تحت سناریوهای مختلف می‌تواند به دلیل تغییرپذیری زیاد فراسنجه بارش باشد.

همچنین، مطالعه‌ای توسط Zarrin and Dadashi Roudbari (2020) به منظور پیش‌نمایی دمای کل ایران با استفاده از برون‌داد سه مدل از مدل‌های گزارش ششم انجام شد که نتایج نشان داد بیشترین انتظار افزایش دما را در مناطق کوهستانی نوار غربی کشور خواهیم داشت. همچنین، ایشان گزارش کردند که بیشینه ناهنجاری دما در فصل زمستان رخ خواهد داد که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. این پژوهش‌گران ورود توده‌های مختلف هوا در فصل سرد و نیز کم ضخامت بودن هواسپهر در مناطق کوهستانی مانند همدان را دلیلی بر تغییرپذیری بیشتر دما در این مناطق خوانده‌اند.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

در این مطالعه عملکرد هشت مدل اقلیمی از مجموعه مدل‌های گزارش ششم در بازتولید داده‌های اقلیمی در زمان حال و گذشته بررسی شد. سپس، براساس نتایج بررسی عدم قطعیت، میانگین برون‌داد سه مدل CMCC-ESM2، MIROC 6 و NorESM2-MM که بهترین شبیه‌سازی‌ها را داشتند، برای پیش‌نگری فراسنجه‌های بارش و دمای کمینه و بیشینه با روش ریزمقیاس‌نمایی مقیاس‌دهی خطی برای سه دوره آبی تحت سه سناریوی خوش‌بینانه، میانه و بدبینانه در منطقه همدان-بهار در غرب ایران مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه در دوره آبی بیشترین افزایش دمای کمینه و بیشینه در ماه‌های سرد سال رخ خواهد داد، انتظار رخداد زمستان‌های گرم‌تری را در منطقه مورد مطالعه خواهیم داشت. دمای کمینه به‌طور میانگین در طی سه دوره مورد بررسی دو درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش نشان می‌دهد. همچنین، براساس نتایج به دست آمده در فصل‌های بهار و پاییز به‌طور میانگین شاهد دو درجه افزایش دمای بیشینه هستیم. در فصل بهار در هر سه دوره به‌طور میانگین انتظار افزایش ۲۷ درصدی بارش را نسبت به دوره پایه خواهیم داشت.

با توجه به اینکه بررسی‌های کنونی، اقلیمی گرم‌تر و کم‌بارش‌تر را برای منطقه مورد بررسی پیش‌بینی می‌کند انتظار می‌رود تا مدیران و برنامه‌ریزان به دنبال روش‌های عملی سازگاری با تغییرات اقلیمی و کم‌آبی در حوزه‌های انرژی و محیط زیست و به‌ویژه کشاورزی باشند. به‌طور کلی با توجه به اینکه بخش غالبی از کاربری اراضی در این منطقه مربوط به زمین‌های کشاورزی است با افزایش دما و در پی آن افزایش تبخیر تعرق، افزایش نیاز آبی محصولات کشاورزی قابل انتظار است بدین ترتیب، تغییر الگوی کشت، کشت گیاهان مقاوم به کم‌آبی، استفاده از روش‌های مدرن آبیاری و همچنین کم‌آبیاری می‌تواند تا حد زیادی خسارت‌های ناشی از تغییرات اقلیمی را جبران نماید. نظر به

اینکه برونداد مدل‌های اقلیمی گزارش ششم به تازگی انتشار یافته‌اند، پیشنهاد می‌شود به منظور بهبود دقت پیش‌نگری‌های اقلیمی عملکرد این مدل‌ها با استفاده از روش‌های مختلف تصحیح آریبی مقایسه شوند. همچنین، پیشنهاد می‌شود چنین مطالعاتی تحت سایر سناریوهای SSP نیز انجام شود تا مدیران بتوانند سناریوی مناسبی را مبنای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی خود قرار دهند.

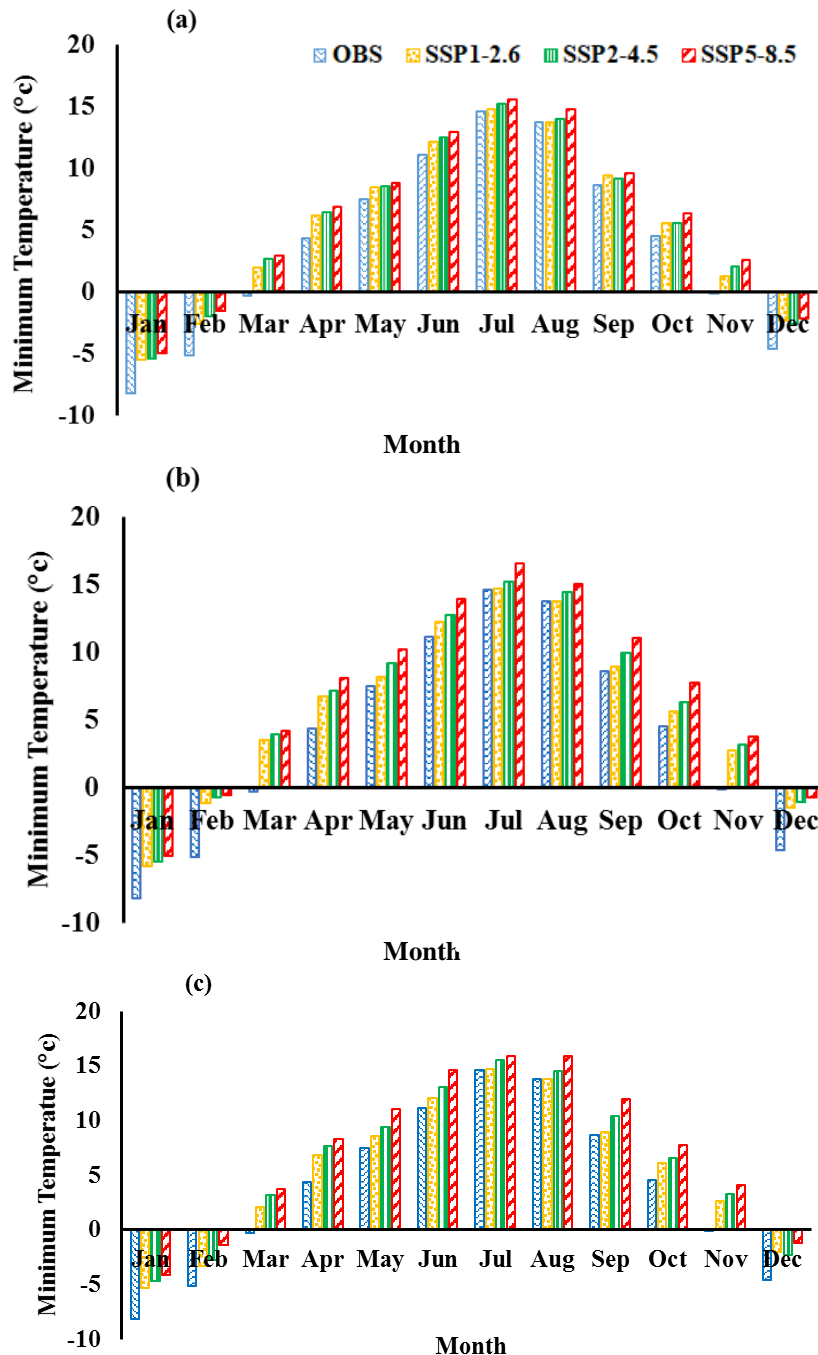


Fig. 5- Projected minimum temperature using selected models ensemble under SSP1.2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios for (a) near future (2026-2050), (b) mid future (2051-2075), and (c) far future (2076-2100) in Hamedan-Bahar plain. OBS is observed data.

شکل ۵- پیش‌نگری دمای کمینه با استفاده از مجموعه مدل‌های انتخاب شده تحت سناریوهای SSP1.2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 (الف) آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، (ب) آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵)، (ج) آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) در دشت همدان-بهار.

OBS داده‌های مشاهده‌ای است

پی نوشتها

- 1- General Circulation Models
- 2- Coupled Model Intercomparison Project
- 3- Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)
- 4- Delta Change
- 5- Linear Scaling
- 6- Distribution Mapping
- 7- Empirical Quantile Mapping
- 8- T- Student Test

۵- مراجع

- Almazroui M, Saeed F, Saeed S, Nazrul Islam M, Ismail M, Ama N, Klutse B, Siddiqui M (2020) Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment* 4:455–475
- Chen R, Li H, Wang X, Gou X, Yang M, Wan G (2022) Surface air temperature changes over the Tibetan Plateau: Historical evaluation and future projection based on CMIP6 models. *Geoscience Frontiers* 13(6):101452
- Eyring V, Cox P M, Flato G M (2019) Taking climate model evaluation to the next level. *Nature Climate Change* 9(2):102–110
- Fan X W, Miao C Y, Duan Q Y, Shen C W, Wu Y (2020) The performance of CMIP6 versus CMIP5 in simulating temperature extremes over the global land surface. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 125(18):033031
- Fang G H, Yang J, Chen Y N, Zammit C (2015) Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrology and Earth System Sciences* 19:2547–2559
- Gou J J, Miao C Y, Samaniego L, Xiao M, Wu J W, Guo X Y (2021) A high-quality natural runoff dataset for hydrological and climate studies in China. *Bulletin of the American Meteorological Society* 102(5):929–947
- Iran Meteorological Organization (IRIMO) (2019) <http://www.irimo.ir/>
- Jahanbakhsh A, Khorshidoost M A, Aali Nezhad M H (2021) Investigation of temperature and precipitation changes in Seymareh basin using CIMIP5 climatic models. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards* 8(3):17-32 (In Persian)
- Kamworapan S, Bich Thao P T, Gheewala S H, Pimonsree S, Prueksakorn K (2021) Evaluation of CMIP6 GCMs for simulations of temperature over Thailand and nearby areas in the early 21st century. *Heliyon* 7(11):e08263
- Kolachian R, Saghafian B, Moazami S (2019) Evaluation of post-processing and bias correction of monthly precipitation and temperature forecasts in Karun Basin. *Iran-Water Resources Research* 16(4):98-111 (In Persian)
- Liu X, Liu Y, Liu Z, Chen Z (2021) Impacts of climatic warming on cropping system borders of China and potential adaptation strategies for regional agriculture development. *Science of the Total Environment* 755:142415
- Moezzi F, Yavari G R, Mousavi S H, Bagheri M (2020) Assessing the effects of climate change on agriculture in the Hamadan-Bahar plain with emphasis on water productivity and food security. *Journal of Economics and Agricultural Development* 34(3):323-305 (In Persian)
- O'Neill B C, Kriegler E, Ebi K L (2017) The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change* 42:169–180
- Räty O, Räisänen J, Ylhäisi J S (2014) Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: Intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations. *Climate Dynamics* 42(9-10):2287-2303
- Roshani A, Hamidi M (2020) Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature & precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). *Water and Irrigation Management* 11(4):781-795 (In Persian)
- Salami H, Masah Bavani A, Naseri H R (2015) Probabilistic prediction of the effects of climate change on the alluvial aquifer of Hamadan-Bahar plain. *Water and Irrigation Management* 5(1):27-41 (In Persian)
- Sarabi M, Dastarani M T, Zarrin A (2020) Investigating the impact of future climate change on temperature and precipitation (Case study: Mashhad Torgh Dam watershed). *Journal of Meteorology and Atmosphere* 3(1):83-63 (In Persian)
- Shrestha S, Shrestha M, Babel M S (2016) Modelling the potential impacts of climate change on hydrology and water resources in the Indrawati River Basin, Nepal. *Environmental Earth Science* 75:280
- Su B, Huang J, Gemmer M, Jian D, Tao H, Jiang T, Zhao C (2016) Statistical downscaling of CMIP5 multi-model ensemble for projected changes of climate in the Indus River Basin. *Atmospheric Research* 178:138–149

- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A (2012) An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4):485–498
- Yao T, Xue Y, Chen D (2019) Recent third pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 100(3):423–444
- Zarrin A, Dadashi Roudbari A (2020) Projection the long-term outlook iran future temperature based on the output of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). *Journal of the Earth and Space Physics* 46(3):586-602 (In Persian)
- Zarrin A, Salehabadi N (2020) Drought projection in Tehran based on CMIP6 models. *The Sixth International Regional Conference on Climate Change*. Tehran, Iran. (In Persian)
- Zhao L, Xu J, Powell A M, Jr Jiang Z (2015) Uncertainties of the global-to-regional temperature and precipitation simulations in CMIP5 models for past and future 100 years. *Theoretical and Applied Climatology* 122:259–270
- Zheng H Y, Miao C Y, Jiao J Y, Borthwick, A G (2021) Complex relationships between water discharge and sediment concentration across the Loess Plateau China. *Journal of Hydrology* 596:126078