



Temperature and Precipitation Projections in the Khazar (Caspian) Sea Basin by Evaluating the Effect of Bias Correction Methods and Using Ensemble of CMIP6 Climate Models

N. Azad¹ and A. Ahmadi^{2*}

Abstract

General Circulation Models (GCMs) are indispensable tools for understanding future climate change. However, these models introduce several sources of uncertainty into the environmental and hydrological models with regards to climate variables and assessing the effects of climate change. Moreover, the utilization of GCM output data requires an evaluation of its accuracy in comparison to observational data. The aim of this study is to compare the outputs of 13 CMIP6 models with observations using two bias correction methods called Quantile Mapping and Linear Scaling, along with a Bayesian model averaging approach. To explore the future changes in temperature and precipitation variables in the Khazar (Caspian) Sea basin, climate model simulations in two scenarios, SSP245 and SSP585, were chosen. The results showed that the quantile mapping method, despite its better performance in modifying climate models, is inefficient in stations where the bias is unstable over time and the correction is not done properly. Also, using the Multi Models Ensemble (MME) provides a higher level of accuracy than individual models. Although model averaging after bias correction reduces the extreme fluctuations of the time series, it has a better accuracy and performance than the second method (model averaging before correction and then applying bias correction). The findings showed that the average precipitation on Khazar basin for the two scenarios, SSP585 and SSP245, is not statistically different from the observational periods and ranges from 0% to 6% for both the near-future period (2021–2050) and the far-future period (2051–2080). The average temperature under the SSP245 (SSP585) scenario will rise 1.67 and 3.14 (1.8 and 3.65) °C more than it did during the observational periods for the near-future and the far-future, respectively.

Keywords: Precipitation, Temperature, Climate Change, Bias Correction, Ensemble, Bayesian Model Averaging.

Received: July 26, 2023

Accepted: September 24, 2023

پیش‌نگری متغیرهای دما و بارش حوضه آبریز خزر با ارزیابی تأثیر روش‌های تصحیح اریبی و بکارگیری همادی مدل‌های اقلیمی CMIP6

نرگس آزاد^۱ و آزاده احمدی^{۲*}

چکیده

مدل‌های گردش عمومی (GCMs) ابزارهای بسیار مهمی برای درک تغییر اقلیمی آینده هستند. با این حال، این مدل‌ها منابع متعددی از عدم قطعیت را به فرآیند پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی و ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر مدل‌های زیست‌محیطی و هیدرولوژی وارد می‌کنند. علاوه بر این، استفاده از داده‌های خروجی GCM نیازمند ارزیابی دقت آن در مقایسه با داده‌های مشاهداتی است. هدف این مطالعه مقایسه خروجی‌های ۱۳ مدل CMIP6 با مشاهدات، با استفاده از دو تکنیک اصلاح خطا به نام نگاشت چندکی و مقیاس‌گذاری خطی، به همراه یک رویکرد میانگین‌گیری بی‌زی است. برای بررسی تغییرات آینده متغیرهای دما و بارش در حوضه آبریز خزر، پیش‌نگری‌های شبیه‌سازی شده مدل‌های اقلیمی، در دو سناریوی SSP245 و SSP585 انتخاب شدند. نتایج نشان می‌دهد روش نگاشت چندکی با وجود عملکرد بهتر آن در اصلاح مدل‌های اقلیمی، اما در ایستگاه‌هایی که اریبی در طول زمان ناپیوسته است کارایی پایین داشته و تصحیح به‌درستی صورت نمی‌گیرد. همچنین، استفاده از همادی مدل‌ها میزان دقت بالاتری نسبت به مدل‌های فردی فراهم می‌کند. با وجود اینکه، میانگین‌گیری از مدل‌ها پس از اصلاح خطا، نوسانات حدی سری زمانی را کاهش می‌دهد، اما دارای دقت و عملکردی بهتر از میانگین‌گیری از مدل‌های قبل از اصلاح و سپس اصلاح اریبی آن، است. نتایج نشان داد که میانگین بارش حوضه آبریز خزر طبق دو سناریوی SSP585 و SSP245 در هر دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و دور (۲۰۵۱-۲۰۸۰) نسبت به دوره‌های مشاهداتی قابل توجه نبوده و بین صفر تا ۶ درصد قرار دارد؛ این در حالی است که افزایش میانگین دمای حوضه طبق سناریوی SSP245 (SSP585) در دو دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) و آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۵۱) نسبت به دوره‌های مشاهداتی به ترتیب ۱/۶۷ و ۳/۱۴ (۱/۸ و ۳/۶۵) درجه سلسیوس خواهد بود.

کلمات کلیدی: بارش، دما، تغییر اقلیم، تصحیح اریبی، همادی، مدل میانگین‌گیری بی‌زی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۵/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۷/۲

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shadid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: narges.azad1991@gmail.com
2- Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shadid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: az_ahmadi@sbu.ac.ir

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2023.180043](https://doi.org/10.22034/IWRR.2023.180043)

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۲ امکان‌پذیر است.



مدل‌ها علاقه‌مند شده‌اند. روش BMA یک روش آماری است که پیش‌بینی تجمیع شده را با وزن‌دهی به پیش‌بینی‌های فردی بر اساس معیارهای احتمالی آن‌ها بدست می‌آورد، به طوری که به پیش‌بینی‌ها با عملکرد بهتر وزن‌های بالاتری نسبت به پیش‌بینی‌های ضعیف اختصاص می‌دهد. علاوه بر این، BMA توصیف قابل اعتمادتری از عدم قطعیت پیش‌بینی کل، نسبت به مجموعه اصلی ارائه می‌کند (Duan et al., 2007).

با این حال، وضوح فضایی که در GCMها اجرا می‌شوند، اغلب برای به دست آوردن پیش‌نگری‌های قابل اعتماد در مقیاس منطقه‌ای و محلی بیش از حد درشت است (Christensen et al., 2008). پیش‌نگری‌های بارش و دما با وضوح فضایی بالاتر برای ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم، مورد نیاز است (Maurer et al., 2010). علاوه بر این، بارش و دما بدست آمده از GCMها به دلیل وضوح درشت آن‌ها دارای اریبی هستند (Mishra et al., 2020). بنابراین، برای ارزیابی تغییر اقلیم و تأثیرات آن بر بخش‌های مختلف (به عنوان مثال، منابع آب، کشاورزی)، در کنار انتخاب مجموعه‌ای از مدل‌های مناسب، مدل‌های انتخابی نیازمند اصلاح اریبی هستند (Christensen et al., 2008; Pierce et al., 2015).

روش‌های تصحیح اریبی از تصحیح خطی ساده تا نگاشت توزیع پیچیده؛ با استخراج یک تابع تصحیح برای حذف اریبی، در یک دوره تاریخی پیشنهاد شده‌اند. سپس این تابع مشتق شده برای تصحیح شبیه‌سازی‌های اقلیمی آینده بر اساس یک فرض رایج اریبی غیرقابل تغییر در طول زمان استفاده می‌شود (Maraun et al., 2010; Teutschbein and Seibert, 2012; Wang et al., 2016). این فرض به طور ضمنی در اکثر مطالعات تأثیر تغییر اقلیم پذیرفته شده است و مطالعات راستی‌آزمایی کمی تاکنون انجام شده است. ایستایی اریبی خروجی‌های مدل اقلیمی معمولاً بر اساس نتایج اصلاح‌شده اریبی ارزیابی می‌شود. اگر عملکرد یک روش تصحیح اریبی در دوره صحت‌سنجی به خوبی دوره واسنجی باشد، اریبی خروجی‌های مدل اقلیم را می‌توان در طول دوره صحت‌سنجی، ایستا در نظر گرفت (Chen et al., 2015). در واقع بررسی عملکرد روش تصحیح اریبی در شرایط فعلی و آینده و اهمیت توانایی مدل‌های اقلیمی در ارائه ورودی قابل قبولی برای تصحیح اریبی موضوعی است که باید بحث و بررسی شود. بدین منظور (Maraun, 2016) مروری کوتاه بر متداول‌ترین روش‌های تصحیح سوگیری ارائه کرد که ایشان از داده‌های تحلیل مجدد یا RCMهای مبتنی بر تحلیل مجدد برای

پدیده تغییر اقلیم به یک نگرانی مهم در دنیا تبدیل شده است و به منظور سازگاری با پیامدهای آن ابتدا نیاز است که درک درستی از تغییرات مورد انتظار به دست آید. این مسئله دولت‌ها را بر آن داشته است تا هیئت بین‌دولتی برای پدیده تغییر اقلیم تأسیس کنند. نتایج پژوهش‌های مؤسسات مختلف در نقاط مختلف دنیا در قالب گزارش‌های ارزیابی این هیئت منتشر می‌شود که اخیراً سری ششم این گزارشات منتشر شده است. پیش‌نگری‌های مدل‌های گردش عمومی (GCM) نقشی حیاتی در درک تغییرات آتی در اقلیم دارند اما منابع مختلفی از عدم قطعیت در فرآیند پیش‌نگری و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر مدل‌های زیست‌محیطی و هیدرولوژی شناسایی شده است (Wilby and Harris, 2006; Chen et al., 2011). از جمله آن‌ها می‌توان به سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHGs) (Maurer, 2007; Nobrega et al., 2011; Fang et al., 2015; Ficklin et al., 2016)، مدل اقلیم جهانی (GCM) (به عنوان مثال Rowell, 2006; Teng et al., 2012; Chen et al., 2012) و روش‌های ریزمقیاس‌نمایی (Wilby et al., 1998; Fowler et al., 2007; Etemadi et al., 2014; Li et al., 2015) اشاره کرد.

مدل‌های اقلیم جهانی (GCM) مهم‌ترین منبع عدم قطعیت شناخته شده است. این عدم قطعیت‌ها را می‌توان با انتخاب دقیق یک مجموعه مدل برای پیش‌نگری‌های اقلیمی، کمینه کرد (Knutti et al., 2013). همچنین، به دلیل محدودیت در منابع انسانی و محاسباتی، عملاً استفاده از تمام GCMها برای پیش‌نگری تغییر اقلیم و ارزیابی تأثیرات آن‌ها امکان‌پذیر نیست (McSweeney et al., 2013). بنابراین برای استفاده از اطلاعات مدل‌های اقلیمی مختلف، همادی از مجموعه مدل‌های مناسب GCM، برای منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شوند، تا گسترش عدم قطعیت‌های مرتبط با GCM را کاهش دهند (Lutz et al., 2016). رویکرد همادی چند مدل جهت بهره‌برداری بهتر، از تنوع پیش‌نگری‌های ماهرانه از مدل‌های مختلف است. روش‌های میانگین‌گیری وزن‌دار، ابزاری برای در نظر گرفتن همادی مدل‌ها است. برای مثال Hamidianpour et al. (2016) که بر روی تغییرات دما و بارش جنوب شرق ایران با استفاده از خروجی‌های گزارش پنجم مدل‌های اقلیمی و روش ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG کار کرده‌اند؛ به بررسی عدم قطعیت‌های ناشی از به کارگیری مدل‌های GCM مختلف با روش میانگین‌گیری وزنی ساده پرداختند. روش‌های مختلفی برای میانگین‌گیری وزن‌دار وجود دارد که روش میانگین‌گیری بیزین^۳ (BMA) یکی دیگر از این روش‌ها است که اخیراً محققان زیادی به استفاده از آن در تحلیل عدم قطعیت‌ها و استفاده از همادی

تعیین کمیت عملکرد روش‌های تصحیح اریبی معین در شرایط اقلیمی آن زمان استفاده کردند.

مطالعات اخیر صورت گرفته در ایران با استفاده از مدل‌های گزارش ششم^۴ CMIP6 نشان می‌دهند که اگرچه خروجی‌های این مدل‌ها نسبت به گزارشات قبلی بسیار دقیق‌تر هستند، اما هنوز در پیش‌نگری متغیرهایی مانند دما و بارش، دقت‌های متفاوتی دارند (Amiri et al., 2022; Zareian et al., 2022). این دقت در مناطق مختلف و حتی در فصول مختلف متفاوت است. برای مثال، Zareian et al. (2022) اثرات تغییر اقلیم را بر روی دما و بارش در ۴ ایستگاه همدیدی مهم استان یزد بررسی کردند و نتیجه گرفتند که دما افزایش و بارش کاهش خواهد یافت و این افزایش دما و کاهش بارش در فصول پاییز و بهار بیشتر خواهد بود. همچنین، خروجی‌های مدل‌های اقلیمی مختلف در مناطق مختلف ممکن است متفاوت باشد. Zareian et al. (2022) برای ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 در برآورد دما و بارش، از داده‌های بازتحلیل ERA5 استفاده کردند و به نتیجه رسیدند که مدل‌های مختلف در ماه‌های مختلف سال، دقت یکسانی در برآورد دما و بارش کشور ندارند. علاوه بر این، مطالعاتی به بررسی‌های تأثیر تغییر اقلیم بر روی دما و بارش در مناطق مختلف ایران پرداختند. به عنوان مثال Abdolalizadeh et al. (2022) دقت ۴ مدل اقلیمی CMIP6 را در شبیه‌سازی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه بررسی کردند و دریافتند که این مدل‌ها در بعضی ایستگاه‌ها دقت پایینی دارند. همچنین، Amiri et al. (2022) دقت مدل‌های اقلیمی CMIP6 را در دو ایستگاه همدیدی سواحل مکران بررسی کردند. به دلیل اهمیت روش‌های تصحیح اریبی در بهبود کیفیت پیش‌نگری‌ها؛ Ershadifath et al. (2022) با استفاده از روش مقیاس‌گذاری خطی، به تصحیح اریبی ۸ مدل اقلیمی از مجموعه مدل‌های گزارش ششم در حوضه همدان-بهار پرداختند. در نهایت، Ghalami et al. (2022) تأثیر تغییر اقلیم بر توزیع فضایی دما و بارش را بررسی کردند و به بررسی تأثیر اصلاح اریبی نگاهت چندکی با توابع مختلف بر بهبود کیفی داده‌های بارش ریز مقیاس‌سازی شده NEX-GDDP پرداختند.

بنابراین، هرچند استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP6 بهبود قابل توجهی در دقت پیش‌نگری‌های دما و بارش در ایران داشته است، اما هنوز نیاز به بررسی و ارزیابی دقیق‌تر این مدل‌ها در مناطق مختلف و در فصول مختلف وجود دارد. همچنین، نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که تغییر اقلیم می‌تواند تأثیرات مختلفی در مناطق مختلف ایران داشته باشد. بنابراین انتخاب مدل‌های مناسب، شناسایی دقت و تحلیل درست مدل‌ها در دوره‌ی تاریخی می‌تواند در تحلیل درست

نتایج پیش‌نگری آینده کمک کننده باشد؛ اینکه چه میزان این نتایج قابل اعتماد و قابل بهره‌گیری هستند و روی چه پارامترهایی پاسخ‌های مناسب‌تری ارائه می‌کنند، قابل بحث هستند. ارزیابی دقیق‌تر و بررسی میزان کیفیت متغیرهای شبیه‌سازی شده مدل‌های اقلیمی در دوره‌ی تاریخی، در درک مناسب از پیش‌نگری رفتار یک متغیر در یک منطقه حائز اهمیت است. همچنین، مطالعه‌ای که بر روی حوضه آبریز خزر، در خصوص ارزیابی مدل‌های اقلیمی گزارش ششم باشد، صورت نگرفته است. از طرفی تفاوت بازر بخش شرقی، غربی و میانی این حوضه از نظر اقلیمی و میزان بارندگی موجب شد تا مورد توجه این پژوهش باشد و خروجی مدل‌های اقلیمی مختلف در این حوضه بحث و بررسی شود.

هدف این مطالعه، ارزیابی شبیه‌سازی‌های دما و بارش ۱۳ مدل اقلیمی CMIP6 تحت دو سناریو SSP245 و SSP585، در حوضه آبریز خزر در دوره تاریخی و بررسی تأثیر روش‌های تصحیح اریبی و در نهایت پیش‌نگری برای دوره آتی است. بدین منظور، همادی از مدل‌های مناسب در تحلیل و پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی بهره گرفته شد. در واقع در این مطالعه ابتدا با استفاده از معیارهای مختلف ارزیابی، دقت مدل‌های اقلیمی گزارش ششم، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته تا مدل‌های مناسب برای منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های مطالعاتی انتخاب شود. سپس با استفاده از روش‌های تصحیح اریبی، خروجی‌های خام مدل‌های اقلیمی، اصلاح شدند. در نهایت نتایج تصحیح اریبی مدل‌های اقلیمی با روش میانگین‌گیری وزن‌دار بیزین، میانگین‌گیری شدند تا نتایجی از همادی مدل‌های اقلیمی گزارش شود. برای این منظور خروجی‌های خام مدل‌های اقلیمی با روش میانگین‌گیری تجمیع شد و سری‌های زمانی بدست‌آمده، اصلاح اریبی شدند. بار دیگر در ابتدا، مدل‌های اقلیمی اصلاح اریبی شده و سپس با روش میانگین‌گیری تجمیع شدند و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. در واقع در این مطالعه ضمن معرفی مدل‌های اقلیمی مناسب از سری مدل‌های اقلیمی گزارش ششم برای نقاط ایستگاهی در محدوده مورد مطالعه و ارائه روش تصحیح اریبی مناسب، به بررسی تأثیر استفاده از روش‌های میانگین‌گیری وزن‌دار در همادی مدل‌های اقلیمی نیز پرداخته شده است.

۲- داده‌ها و مطالعه موردی

این مطالعه بر روی حوضه آبریز خزر در ایران انجام شد. حوضه آبریز خزر مشرف به دریای خزر، به مساحت حدود ۱۷۵۰۶۰ کیلومتر مربع است که ۱۰،۷۹ درصد از مساحت ایران را به خود اختصاص داده است و سومین حوضه بزرگ ایران از نظر وسعت و اولین حوضه از نظر

ماهانه محاسبه شدند و در نهایت برای ارائه نتایج، میانگین ماه‌های سال به عنوان نماینده آن سال برای دما و مجموع مقادیر ماهانه به عنوان بارش سالانه گزارش شد. تا تغییرات در شکل‌های ترسیمی قابل نمایش باشد. لازم به ذکر است دمای میانگین با میانگین‌گیری از Tmax و Tmin برای همه GCM‌های انتخابی به دست آمد.

۳- روش تحقیق

در این مطالعه ابتدا با استفاده از معیارهای مختلف ارزیابی، مدل‌های اقلیمی گزارش ششم مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته تا مدل‌های مناسب برای منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های مطالعاتی انتخاب شود. پس از ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های اقلیمی، خروجی مدل‌ها با استفاده از روش تصحیح آریبی اصلاح شدند. جهت تعیین بهترین مدل، خروجی مدل‌های اقلیمی قبل از تصحیح آریبی و پس از تصحیح آریبی، با استفاده از شاخص‌های ارزیابی، رتبه‌بندی شدند تا مدل‌های مناسب انتخاب شوند.

بیشترین میزان بارندگی است. این حوضه دارای ۷ زیر حوضه است که شماتیک حوضه و موقعیت آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.

این مطالعه از بارش^۵ (Pr) و دمای بیشینه و کمینه^۶ (Tmin و Tmax) شبیه‌سازی شده از ۱۳ مدل اقلیمی ارائه شده در جدول ۲ استفاده کرد. شبیه‌سازی‌های GCM از پایگاه داده فاز ۶ پروژه مقایسه مدل جفت شده CMIP6 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) استخراج شده و در مقیاس ایستگاهی، مقیاس‌گامی شدند. همچنین داده‌های مشاهداتی ایستگاهی بارش و دما کمینه و بیشینه روزانه از اطلاعات سازمان هواشناسی کشور با بیشترین طول گزارش‌های ثبت شده مشترک برای تمامی ایستگاه‌ها از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۴ به دست آمدند. شکل ۱ پراکندگی ایستگاه‌های همدیدی در محدوده حوضه را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات مربوط به ایستگاه‌های حوضه و میانگین دما و بارش در آن‌ها، در جدول ۱ ارائه شده است.

از آنجایی که در مطالعه حاضر، تحلیل‌ها بر روی داده‌های ماهانه صورت گرفت، لذا بارش تجمعی و میانگین دمای روزانه در مقیاس‌های

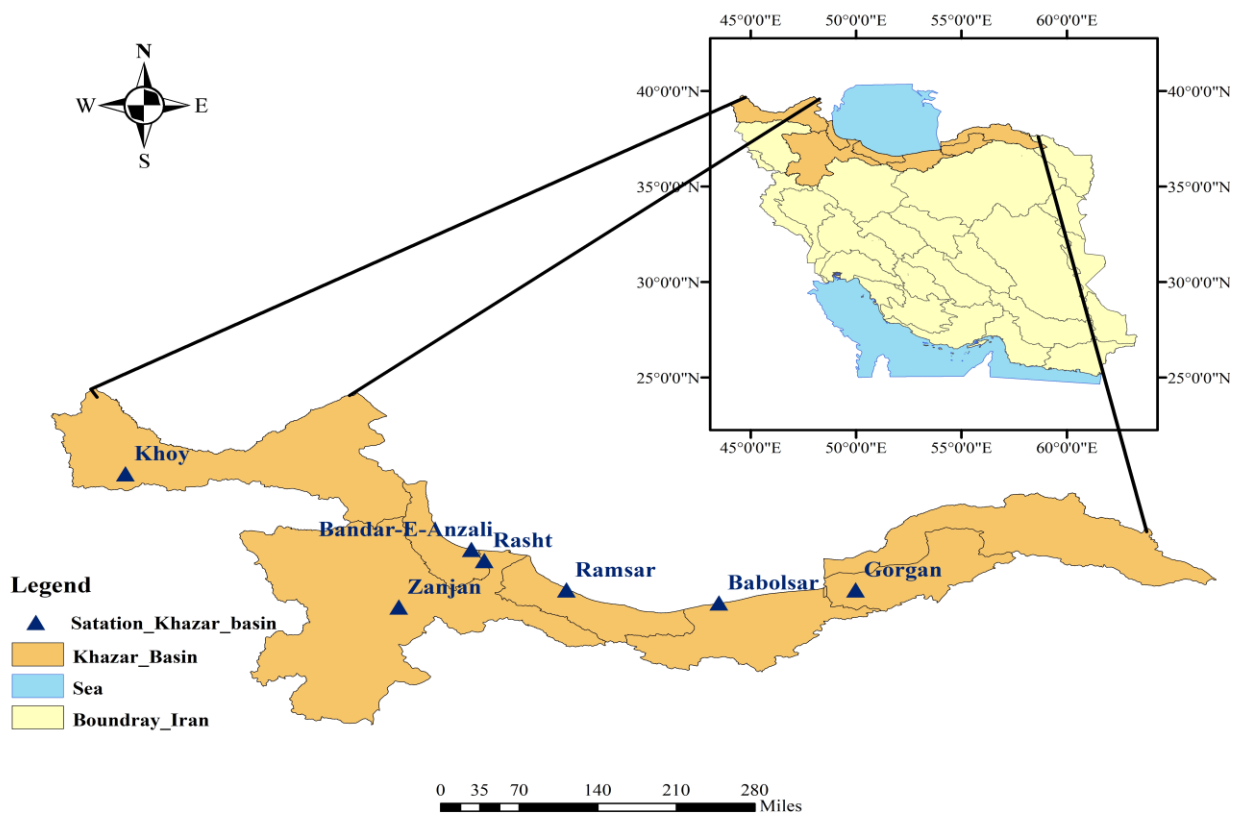


Fig. 1- Spatial distribution of the studied synoptic stations in Iran's Khazar (Caspian) Sea Basin
 شکل ۱- توزیع مکانی ایستگاه‌های همدیدی حوضه آبریز دریای خزر ایران

Table 1- Information of studied synoptic stations

جدول ۱- اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

Province Name	Station Name	Station Code	Longitude	Latitude	Altitude (m)	length of period	Mean precipitation (mm)	Mean temperature (°C)
Azərbayjan-e-Gharbi	Khoy	40703	45.00	38.56	1103.4	1961-2014	292.5	12.61
Gilan	Bandar-E-Anzali	40718	49.46	37.48	-23.6	1961-2014	1775	16.26
Gilan	Rasht	40719	49.62	37.32	-8.6	1961-2014	1337.5	16.20
Zanjan	Zanjan	40729	48.52	36.66	1640.7	1961-2014	307.5	11.42
Mazandaran	Ramsar	40732	50.68	36.90	-20	1961-2014	1217.5	16.10
Mazandaran	Babolsar	40736	52.65	36.72	-21	1961-2014	903	16.90
Golestan	Gorgan	40738	54.41	36.91	0.0	1961-2014	574.50	17.71

Table 2- Information on the AR6 climate models used in this study

جدول ۲- اطلاعات مدل‌های اقلیمی AR6 مورد استفاده در این مطالعه

ID	Model Name	Institute	Resolution (Lon. × Lat.)
1	ACCESS-CM2	Australian Community Climate and Earth System Simulator (ACCESS)	1.875×1.25
2	CMCC-ESM2	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	1.25×1.875
3	CanESM5	Canadian Earth System Model	2.81×2.81
4	EC-Earth3-Veg-LR	The EC-Earth-Consortium team of European institutions and organizations https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/12b1a22e184e4fba8b7ce6f25ff9e58d	0.7×0.7
5	FGOALS-g3	Chinese Academy of Sciences (CAS) Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System	2×2.25
6	GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)	1.25×1.00
7	INM-CM4-8	Institute for numerical mathematics, Russian Academy of Science/Russia	2×1.5
8	INM-CM5-0	Institute for numerical mathematics, Russian Academy of Science/Russia	2×1.5
9	MIROC-ES2L	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, RIKEN Center for Computational Science	2.8×2.8
10	MIROC6	Institute for Environmental Studies, RIKEN Center for Computational Science	1.4×1.4
11	MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology/Germany	1.875×1.875
12	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute (MRI)	1.13×1.13
13	NorESM2-MM	Norwegian Earth System Model	2.5×1.875

۳-۱- معیارهای ارزیابی

سپس همادی از خروجی‌های اصلاح شده مدل‌های اقلیمی با روش بیزین، به صورت وزن دار میانگین‌گیری شده و بار دیگر همادی از خروجی‌های خام با روش بیزین میانگین‌گیری شده و نتایج حاصل از آن اصلاح آریبی شد. در نهایت نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. در نمودار شکل ۲ روند کلی کار ارائه شده است که جزئیات روش‌ها در بخش بعد توضیح داده شده است.

معیارهای مختلفی برای ارزیابی مدل‌های اقلیمی وجود دارد که در اینجا به هفت معیار متفاوت که هر کدام جنبه خاصی از عملکرد مدل‌های اقلیمی را می‌سنجد، ارائه شده است. بر اساس هر معیار به مدل‌ها رتبه داده می‌شود، به طوری که رتبه یک نشان‌دهنده بهترین عملکرد در بین بقیه مدل‌ها باشد. از آنجایی که این معیارها در هیدرولوژی و اقلیم‌شناسی حائز اهمیت هستند، انتظار می‌رود که استفاده از شش معیار متفاوت این امکان را بدهد که نتایج تحقیق در گسترده‌ای از کاربردهای مدل‌های اقلیمی قابل استفاده باشد.

سپس همادی از خروجی‌های اصلاح شده مدل‌های اقلیمی با روش بیزین، به صورت وزن دار میانگین‌گیری شده و بار دیگر همادی از خروجی‌های خام با روش بیزین میانگین‌گیری شده و نتایج حاصل از آن اصلاح آریبی شد. در نهایت نتایج با یکدیگر مقایسه شده است. در نمودار شکل ۲ روند کلی کار ارائه شده است که جزئیات روش‌ها در بخش بعد توضیح داده شده است.

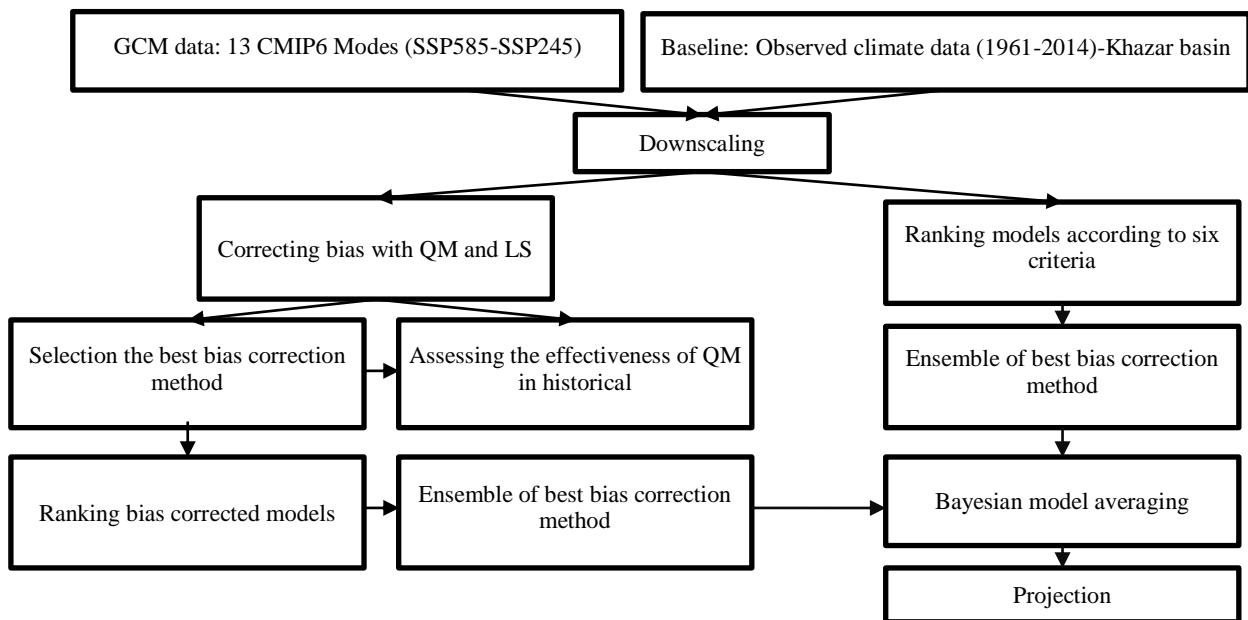


Fig. 2- The overall workflow process in this study

شکل ۲- روند کلی گردش کار در این مطالعه

جمله "نگاشت احتمال"، "نگاشت چندکی"، "کاهش مقیاس آماری" و "یکسان‌سازی هیستوگرام"، در ادبیات شناخته شده است. برای بارش، این روش برحسب تابع توزیع تجمعی گاما و معکوس آن و برای دما برحسب تابع توزیع تجمعی گاوسی و معکوس آن انجام می‌شود. فرض کنید F و G به ترتیب توابع توزیع تجمعی (CDF) خروجی مدل و مشاهدات باشند و x مقداری از خروجی مدل باشد. هدف از نگاشت، کمیت یافتن تابع انتقال $t(x)$ است که:

$$G(t(x)) = F(x) \quad (1)$$

به عبارت دیگر، تابع انتقال، چندک‌های CDF مدل را به کمیت‌های متناظر CDF مشاهده شده، نگاشت می‌کند، به طوری که دو CDF مطابقت داشته باشند. جهت اطلاع بیشتر از جزئیات روش‌های مذکور می‌توان به (Maraun 2016) مراجعه کرد.

۳-۳- همادی مدل‌ها و روش‌های میانگین‌گیری

۳-۳-۱- روش میانگین‌گیری وزنی ساده

یکی از روش‌های کمی‌سازی میزان عدم قطعیت ناشی از بکارگیری مدل‌های GCM مختلف، استفاده از روش وزن‌دهی میانگین‌های مشاهداتی متغیر مورد بررسی مانند بارش یا دما است. وزن مدل‌های GCM مورد بررسی در مورد شبیه‌سازی دما و بارش در نقاط مورد نظر مطابق معادله زیر است.

$$W_{i,j} = \frac{1/\Delta T_{i,j}}{\sum_{j=1}^n (1/\Delta T_{i,j})} \quad (2)$$

معیارهای مورد استفاده در این پژوهش شامل، اریبی میانگین^۷، ریشه میانگین مربع خطا^۸ (RMSE)، راندمان نش- ساتکلیف^۹ (NSE)، ضریب همبستگی خطی^{۱۰}، برآوردگر شیب شن^{۱۱}، معیار S من-کندال^{۱۲} و میانگین خطای مطلق^{۱۳} (MAE) است که در پژوهش‌های اقلیمی مختلف جهت سنجش دقت مدل‌های اقلیمی استفاده شده‌اند. (Nouri et al., 2021; Rezaei and Ghasemieh, 2019; Amini et al., 2020).

۳-۲- تصحیح اریبی

در این پژوهش از دو روش مقیاس‌گذاری خطی^{۱۴} (LS) و نگاشت چندکی^{۱۵} (QM) برای اصلاح اریبی مدل‌های اقلیمی بهره گرفته شده است. رویکرد مقیاس‌گذاری خطی یکی از روش‌های پرکاربرد برای کاهش خطا بین خروجی‌های مدل‌های اقلیمی و داده‌های مشاهداتی است. این روش با تفاوت میان مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده فعلی، مقادیر تصحیح ماهانه را محاسبه می‌کند و با محاسبه تفاوت ماهانه درازمدت دما و درصد تغییرات بارش، به سناریوی اقلیمی و داده‌های تاریخی حوضه افزوده (برای دما) و ضرب (برای بارش) می‌شود. در این روش فرض می‌شود که ضرایب و افزوده‌های اصلاحی اعمال شده برای شرایط آبی نیز، بدون تغییر باقی می‌مانند.

روش دوم (روش نگاشت چندکی) شامل ایجاد یک تابع انتقال برای تغییر توزیع وقوع بارش و دما است. این روش با چند نام مختلف از

W_{ij} وزن داده شده به هر یک از مدل‌ها در ماه مورد نظر، $T_{i,j}$ متغیر هواشناسی مورد بررسی، $\Delta T_{i,j}$ اختلاف میانگین دما (بارش) شبیه‌سازی شده تحت سناریوهای مختلف با مقدار مشاهداتی در دوره پایه است (Hamidianpour et al., 2016).

۴- نتایج و تحلیل نتایج

۴-۱- ارزیابی مدل‌های اقلیمی

با توجه به اینکه عملکرد مدل‌های اقلیمی نسبت به یکدیگر در یک منطقه اقلیمی و همچنین در مناطق مختلف اقلیمی، متفاوت هستند، لذا استفاده از یک مدل بدون ارزیابی دقت آن مدل، ممکن است موجب خطاهای زیاد در نتیجه‌گیری و ارائه نتایج نامناسب شود. لذا برای کم کردن عدم قطعیت ناشی از انتخاب مدل‌های اقلیمی و بهره‌گیری از اطلاعات مدل‌های اقلیمی مختلف، ۱۳ مدل اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از معیارهای ارزیابی مختلف با داده‌های مشاهداتی ایستگاهی مقایسه شدند. معیارهای ارزیابی مختلف شامل: ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، اریبی میانگین (MB)، برآوردگر شیب شن، راندمان نش ساتکلیف (NSE)، برآوردگر آماره S من-کندال، ضریب همبستگی خطی (CC) است. مقادیر بدست آمده از این آماره‌ها در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب برای بارش و دما ارائه شده است. عنوان هر شکل در بالای آن، اشاره به معیار متناظر دارد. همچنین، جهت درک بهتر تغییرات در معیارهای هر مدل، رتبه هر مدل در هر ایستگاه با یک رنگ خاص از طیف رنگی انتخاب شده، مشخص شده است. برای مثال رنگ متناظر با عدد ۱، بیانگر رتبه اول آن مدل، در آن معیار ارزیابی است. همچنین در داخل کادرها، مقادیر محاسبه شده برای معیارهای مختلف در هر ایستگاه و مدل، درج شده است. در نهایت جهت جمع‌بندی، از رتبه‌های بدست آمده از همه معیارها میانگین‌گیری شد تا رتبه نهایی به هر مدل در هر ایستگاه اختصاص داده شود و نتایج رتبه‌بندی در شکل ۵ برای هر مدل در هر یک از ایستگاه، ارائه شده است. (a) مربوط به بارش و (b) مربوط به دما است. ترتیب مدل‌ها و ایستگاه‌های به کار رفته با همان ترتیب ارائه شده در جدول‌های مربوطه (جدول ۱ و ۲) است. برای مثال، شماره ۱ در ایستگاه‌ها مربوط به کد ایستگاه خوی و شماره ۷ مربوط به ایستگاه گرگان است. با بررسی نتایج ارائه شده در شکل‌ها، مدل‌های برتر را در هر ایستگاه قابل تشخیص است. به عنوان مثال در ایستگاه اول برای بارش، مدل سوم (CanESM5) دارای پایین‌ترین میانگین رتبه (یعنی بهترین مدل) و مدل‌های CMCC-ESM2، MIROC-ES2L و NorESM2-MM دارای سطح دوم در دقت پیش‌نگری (دومین رتبه) هستند. در واقع عددهای یکسان گزارش شده برای مدل‌های مختلف نشان‌گر، هم سطح بودن آن مدل‌ها در توانایی پیش‌نگری متغیر مورد نظر، براساس معیارهای ارزیابی به کار گرفته در این پژوهش است.

۳-۲- روش میانگین‌گیری وزنی مدل بیزین (BMA)

میانگین‌گیری مدل بیزین (BMA) یک رویکرد استنتاج آماری برای به دست آوردن پیش‌بینی‌های احتمالی از شبیه‌سازی‌های همادی چند مدل مبتنی بر نظریه بیز است. BMA برای توسعه پیش‌بینی‌های احتمالی برای مجموعه‌ای از مدل‌های پیش‌بینی آب‌وهوا، مدل‌های اقلیمی یا پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی استفاده شده است (Duan et al., 2007; Min et al., 2007; Raftery et al., 2005).

y به عنوان متغیری که باید پیش‌نگری شود، $D = [y_1^0, y_2^0, \dots, y_T^0]$ به عنوان سری مشاهده شده با طول T و $f = [f_1, f_2, \dots, f_N]$ به عنوان همادی از سری شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های اقلیمی اشاره می‌کند. بر اساس قانون احتمال کل، تابع چگالی احتمال پیش‌بینی $p(y | D)$ را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد.

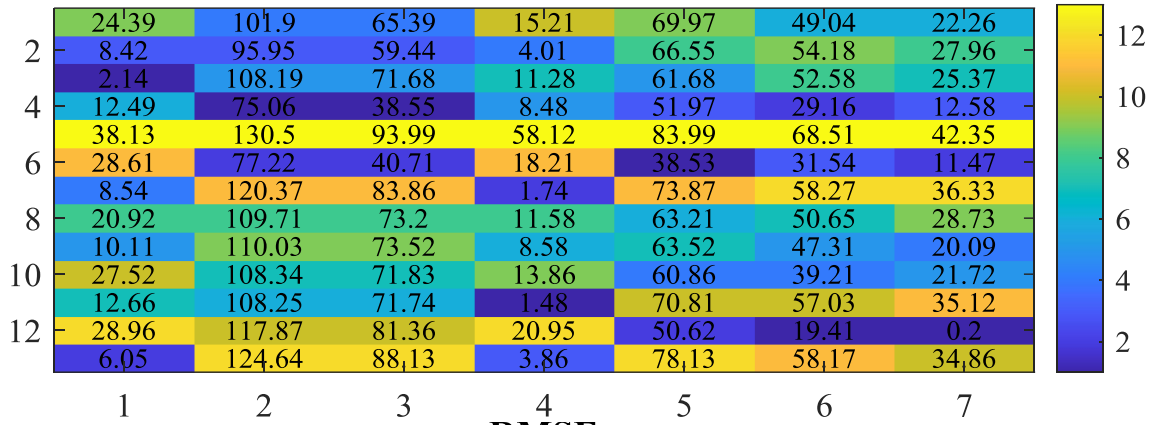
$$p(y | D) = \sum_{i=1}^N p(f_i | D) \cdot p_i(y | f_i, D) \quad (3)$$

که در آن هر شبیه‌سازی f_i با یک تابع چگالی احتمال شرطی، $p_i(y | f_i, D)$ همراه است، که توزیع شرطی y را در f_i نشان می‌دهد، با توجه به اینکه f_i به عنوان بهترین شبیه‌سازی برای D در نظر گرفته می‌شود. احتمال پیشین $p(f_i | D)$ احتمال اینکه یک شبیه‌سازی درست باشد را نشان می‌دهد. همچنین می‌توان آن را به عنوان وزن، $w_i = p_i(y | f_i, D)$ مشاهده کرد که توانایی یک شبیه‌سازی را برای بازتولید مشاهدات منعکس می‌کند. سپس، میانگین خلفی به شرح زیر است.

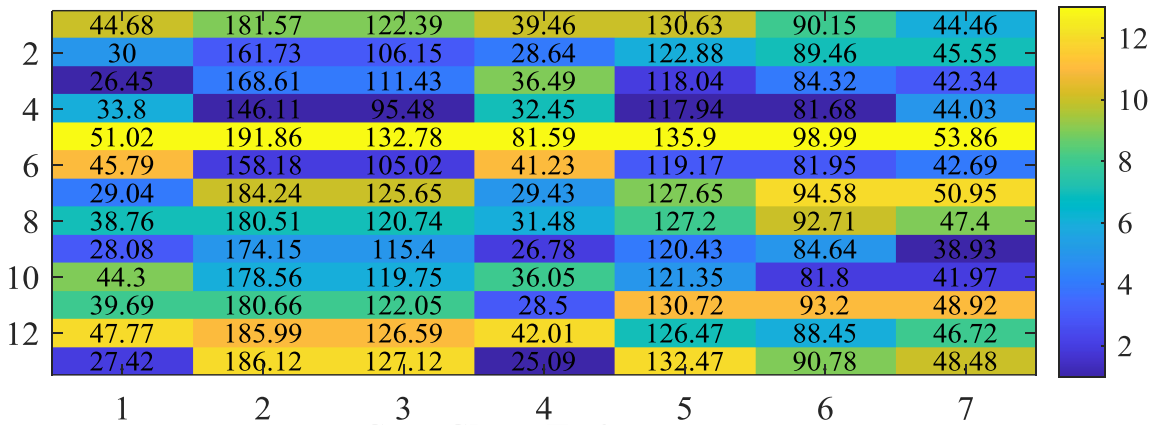
$$E[y | D] = \sum_{i=1}^N p(f_i | D) \cdot E[p_i(y | f_i, D)] = \sum_{i=1}^N w_i f_i \quad (4)$$

این مطالعه فرض کرد که $p_i(y | f_i, D)$ از توزیع گاوسی تشکیل شده است. سپس سری داده‌های ماهانه به عنوان سری شبیه‌سازی شده مدل f_i به کار گرفته شد. برای متغیرهایی که از توزیع گاوسی پیروی نمی‌کنند (مثل بارش و جریان)، از تبدیل Box-Cox برای تبدیل متغیرها قبل از الگوریتم BMA می‌تواند استفاده شود. جزئیات بیشتر این الگوریتم را می‌توان در (Duan et al., 2007) یافت که در آن این الگوریتم به صورت بازگشتی توسعه داده شده است و تکرار مراحل آن

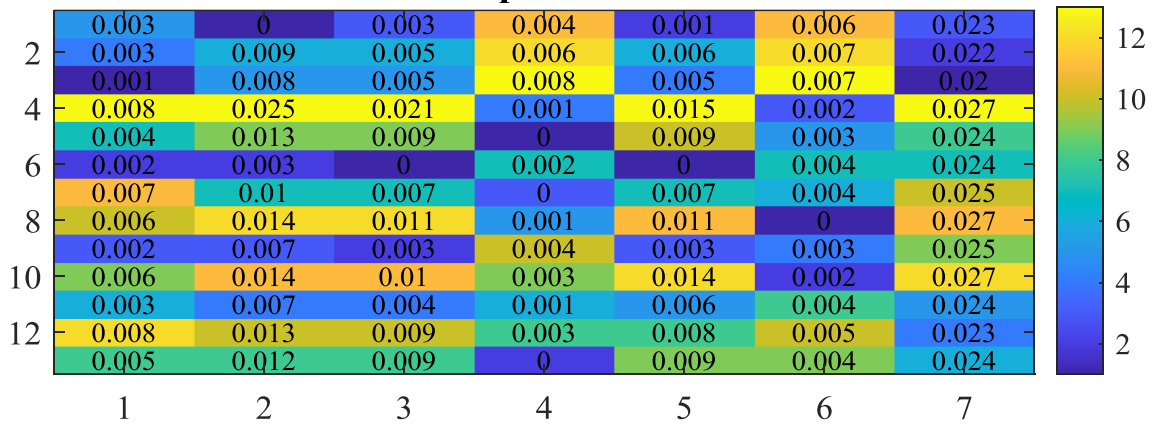
Mean bias



RMSE



Sens Slope Estimators



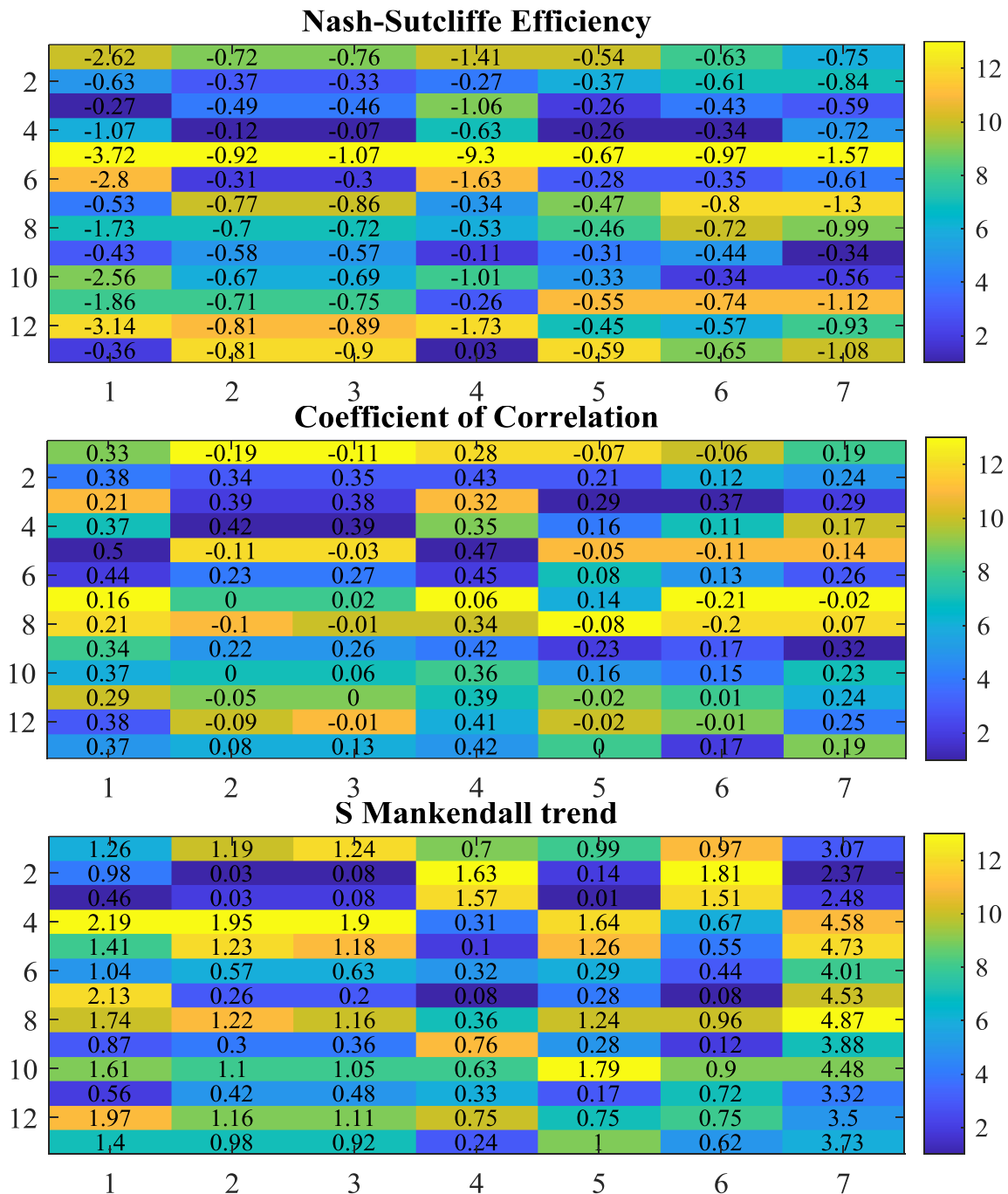
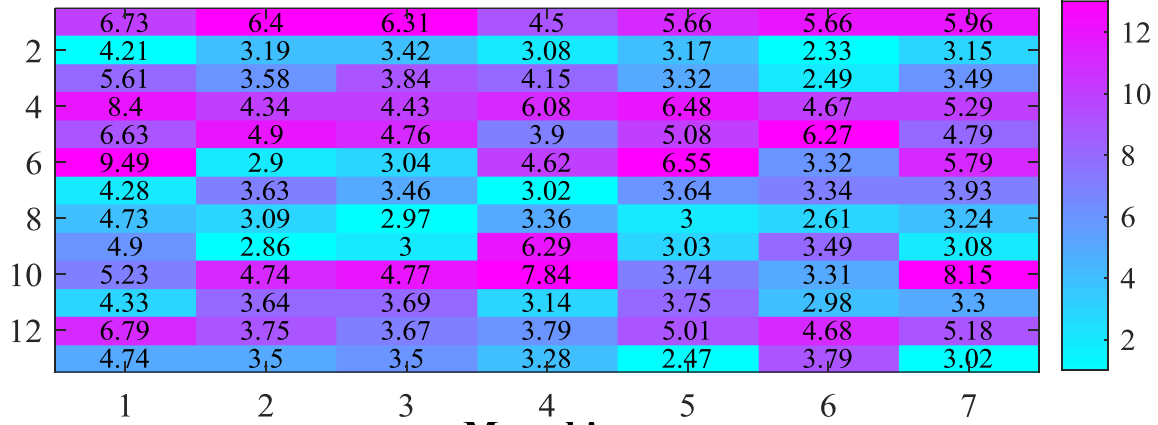


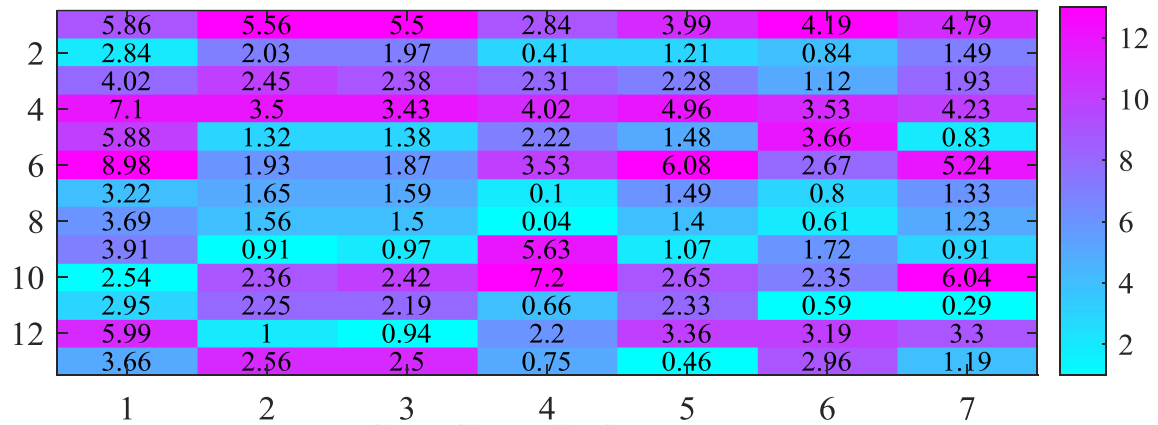
Fig. 3- Ranking of 13 uncorrected precipitation climate model outputs at station gages according to various criteria

شکل ۳- رتبه‌بندی خروجی‌های بارش ۱۳ مدل‌های اقلیمی اصلاح‌نشده در نقاط ایستگاهی براساس معیارهای ارزیابی

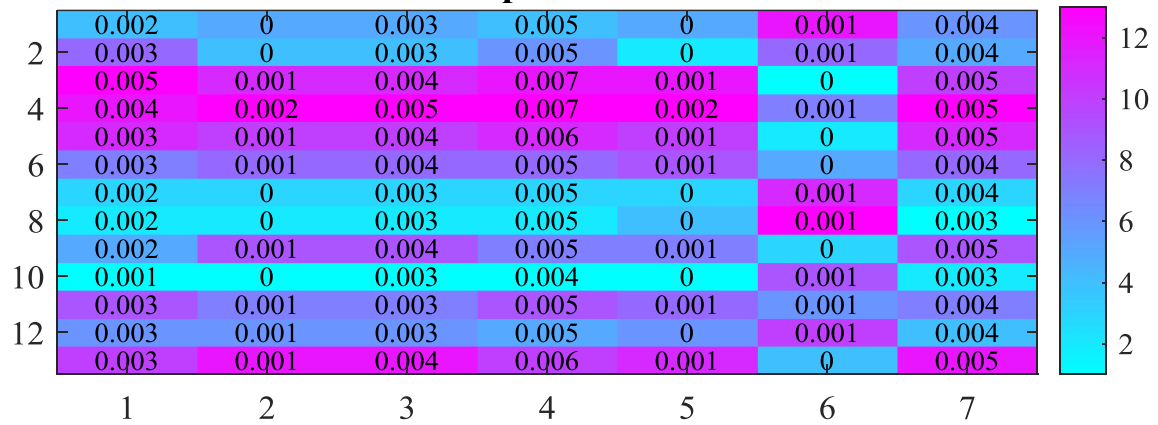
RMSE



Mean bias



Sens Slope Estimators



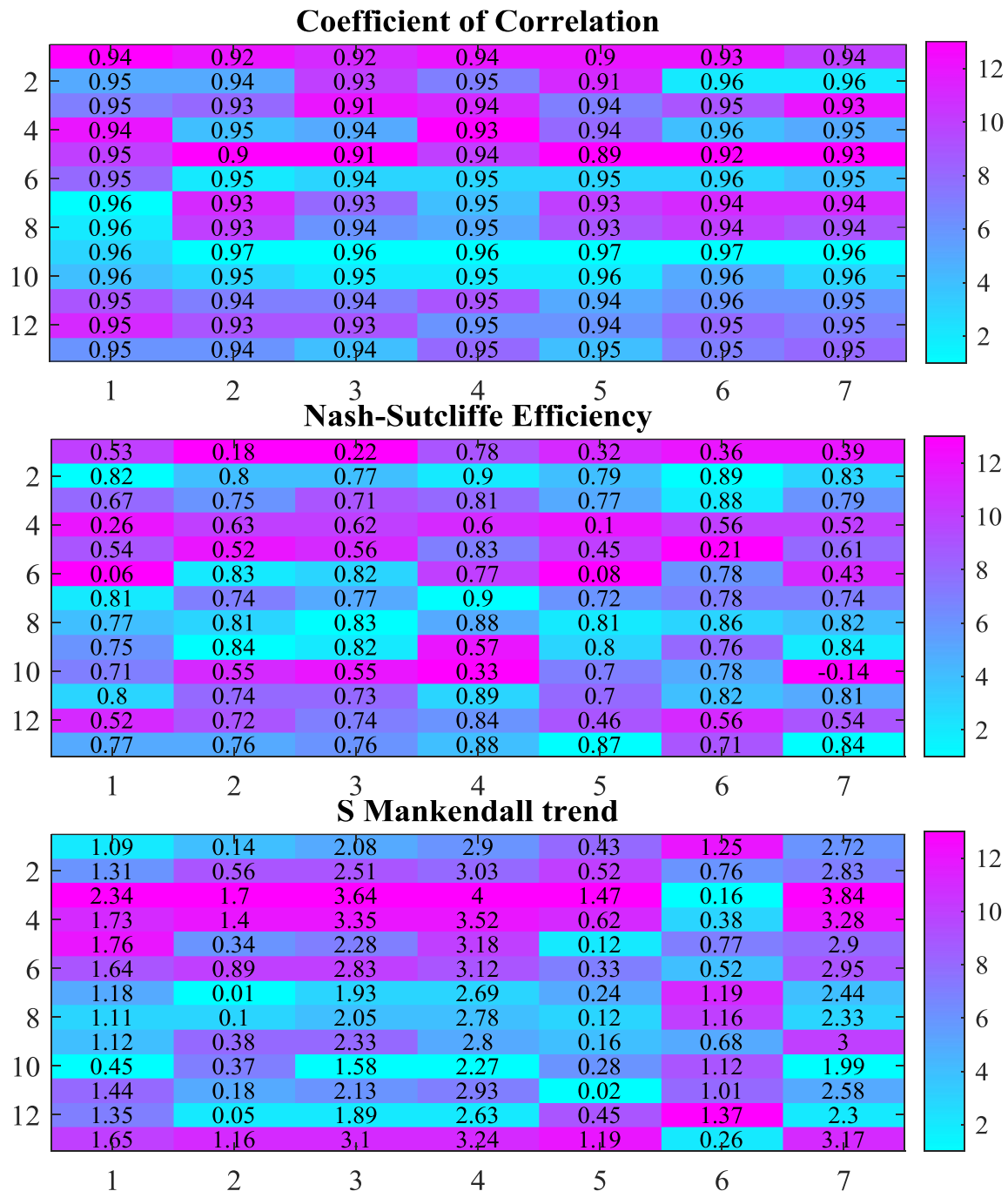


Fig. 4- Ranking of 13 uncorrected temperature climate model outputs at station gages according to various criteria

شکل ۴- رتبه‌بندی خروجی‌های دمای ۱۳ مدل‌های اقلیمی اصلاح‌نشده در نقاط ایستگاهی براساس معیارهای ارزیابی

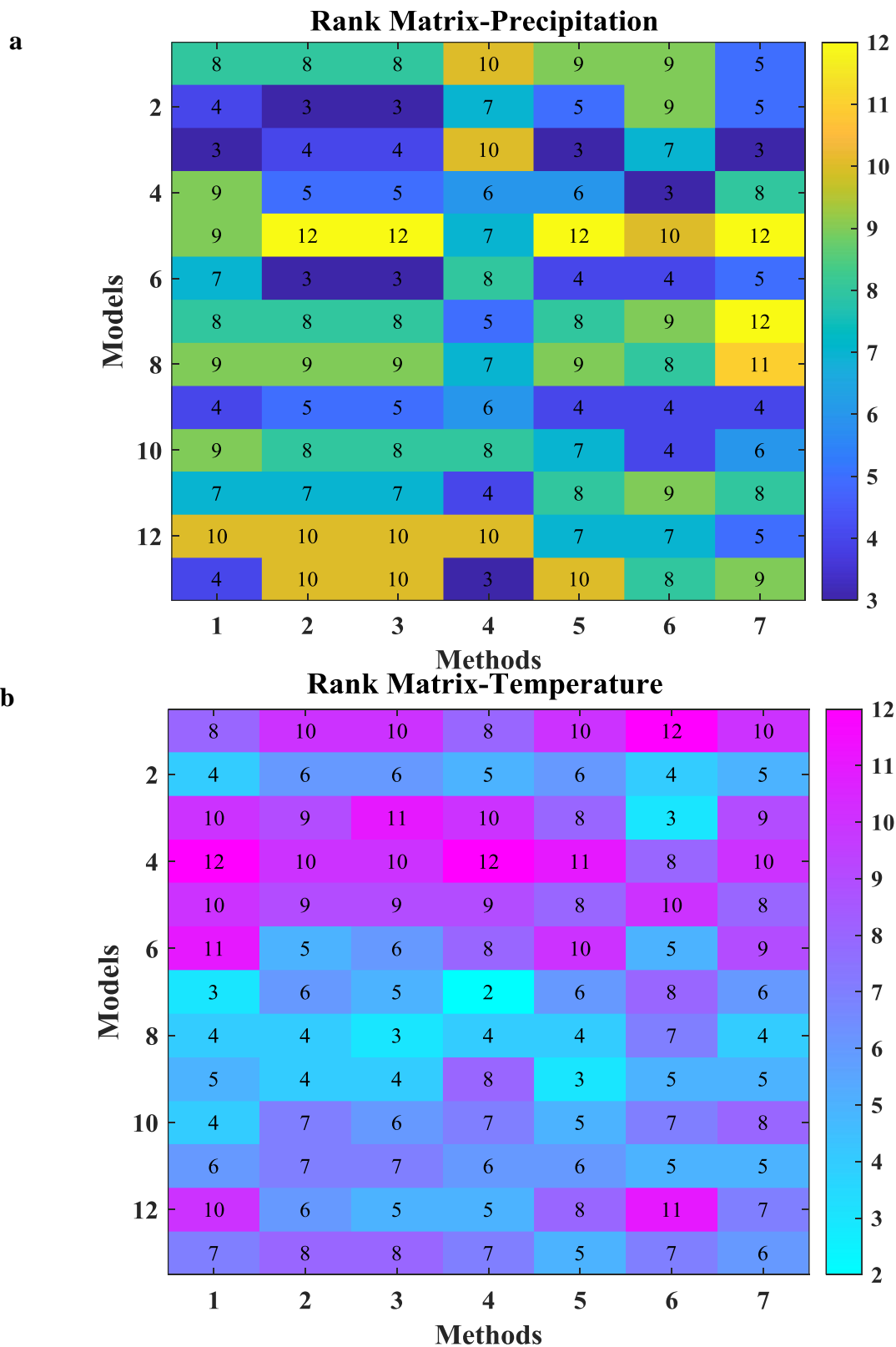


Fig. 5- Mean ranking of evaluation criteria at station sites based on 13 climate model outputs on precipitation (a) and temperature (b)

شکل ۵- میانگین گیری از رتبه بندی معیارها در نقاط ایستگاهی از خروجی های بارش (a) و دما (b) ۱۳ مدل های اقلیمی

۲-۴- تصحیح اریبی

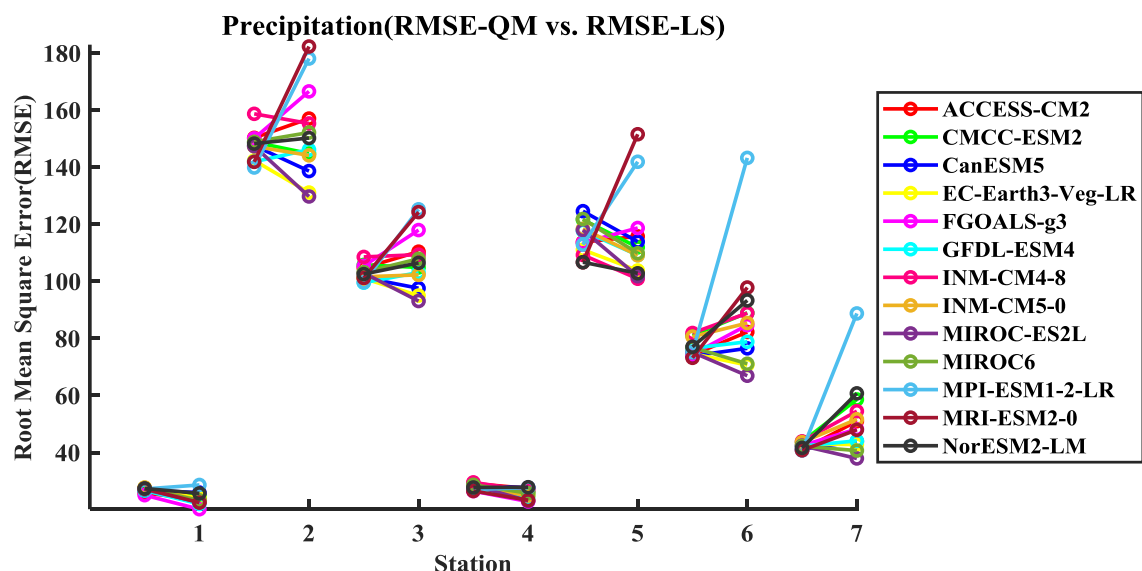
به پایین ارائه شده است. همان طور که در راهنمای شکل‌ها قابل نمایش است مقدار معیارهای ارزیابی برای هر مدل با رنگ خاصی نشان داده شده است به طوری که برای هر ۷ ایستگاه، دو مجموعه داده متناظر نمایش داده شده است که سمت چپ، نشانگر مقادیر معیارها براساس روش نگاهت چندکی و سمت راست براساس روش مقیاس‌گذاری خطی است. به عبارتی مقادیر معیارهای RMSE، MAE و CC هر مدل اصلاح شده در هر ایستگاه (که توسط دایره‌های کوچک رنگی نشان داده شده است) با روش نگاهت چندکی به مقادیر معیارهای RMSE، MAE و CC متناظر با روش مقیاس‌گذاری خطی وصل شده است.

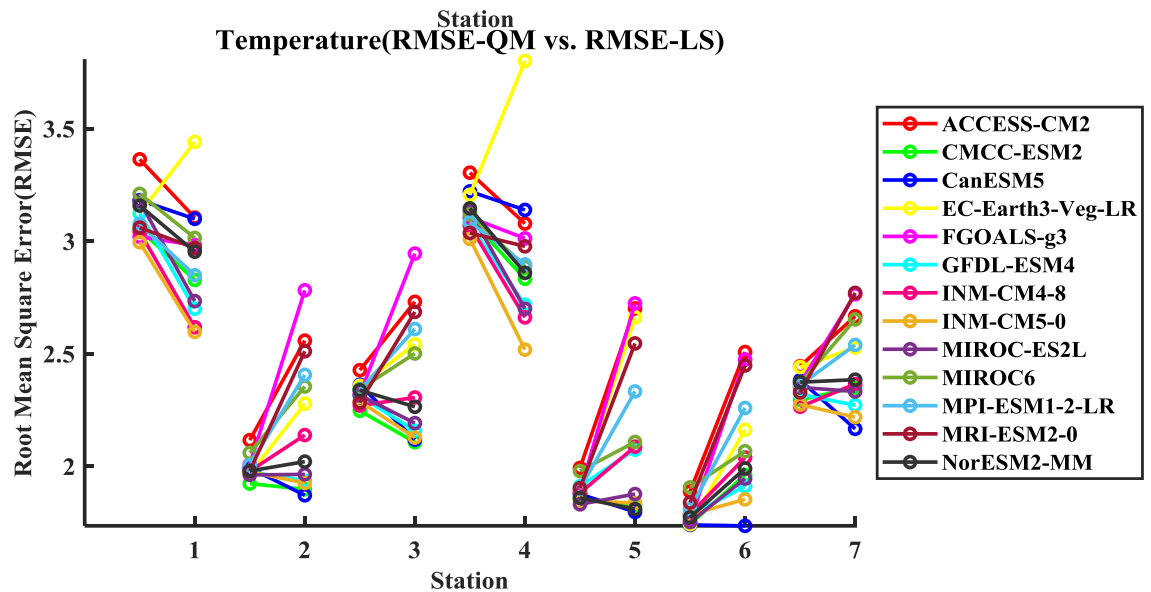
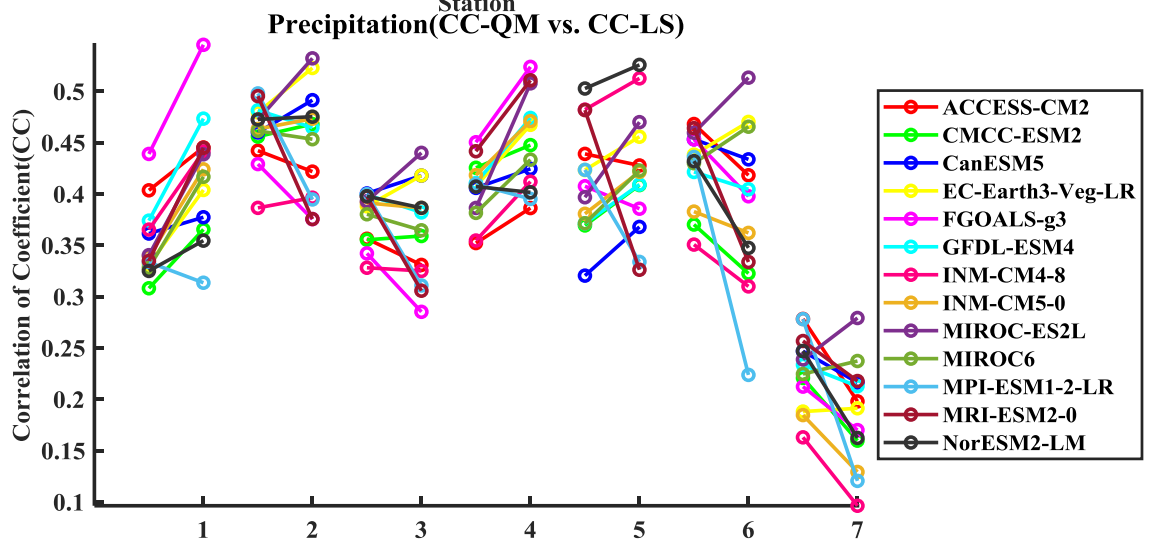
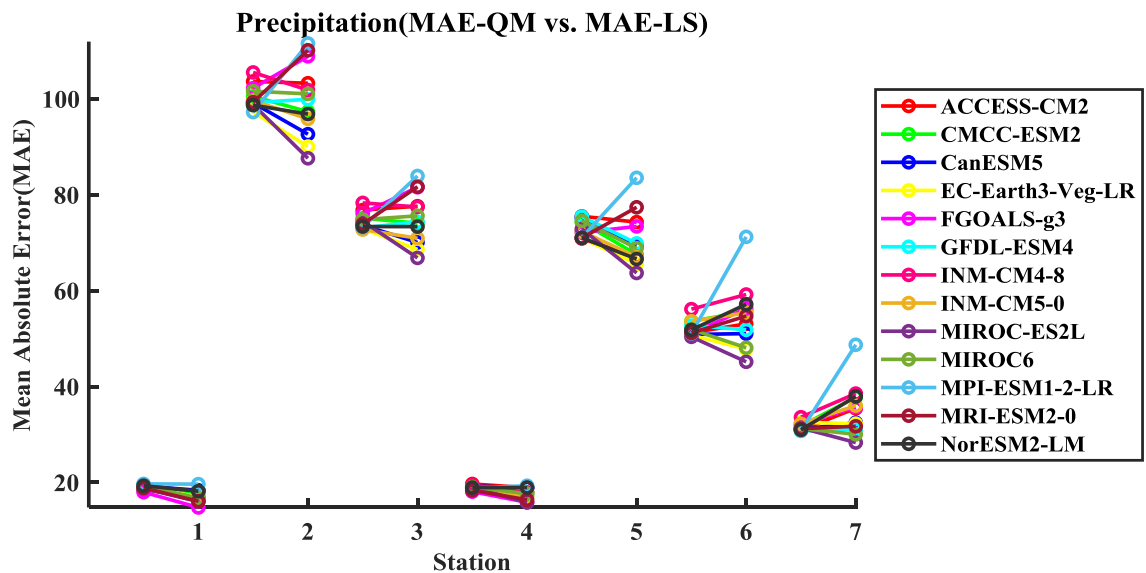
در این مقاله خروجی ۱۳ مدل اقلیمی تحت سناریوهای SSP-245 و SSP-585 برای ۷ ایستگاه مشاهداتی با دو روش تصحیح اریبی مقیاس‌گذاری خطی و نگاهت چندکی اصلاح شدند. در بخش بعد به مقایسه نتایج خروجی دو روش تصحیح اریبی پرداخته شده است و سپس سری‌های زمانی خروجی‌های مدل‌های اقلیمی اصلاح شده و اصلاح نشده در مقابل داده‌های مشاهداتی مورد تحلیل قرار گرفت. لازم به ذکر است به دلیل شباهت تحلیل خروجی‌های دو سناریو و جلوگیری از طولانی شدن مقاله، نتایج سناریو SSP585 ارائه شده است.

۱-۲-۴- مقایسه نتایج روش‌های تصحیح اریبی

همانطور که ملاحظه می‌شود پراکندگی نتایج روش مقیاس‌گذاری خطی نسبت به نگاهت چندکی بیشتر است و مدل‌های مختلف اصلاح شده با روش مقیاس‌گذاری خطی، خروجی‌های نسبتاً متفاوتی ارائه می‌کند. این در حالی است که نتایج تصحیح اریبی به روش نگاهت چندکی عدم قطعیت ناشی از انتخاب مدل را کاهش می‌دهد، به دلیل اینکه پراکندگی دقت نتایج ارائه شده از مدل‌های مختلف اقلیمی نسبت به روش مقیاس‌گذاری خطی کمتر است. به طور کلی می‌توان گفت مقیاس‌گذاری خطی مدلهایی با دقت بالاتر را بهتر و مدلهایی با دقت پایین‌تر را کمتر، بهبود داده است.

روش نگاهت چندکی و مقیاس‌گذاری خطی برای اصلاح اریبی سری‌های زمانی شبیه‌سازی شده مدل‌های اقلیمی در دوره‌ی تاریخی ۵۴ ساله (۱۹۶۱ تا ۲۰۱۴)، به کار گرفته شد. برای ارزیابی کارایی مدل‌ها، نتایج مربوط به هر ایستگاه با داده‌های مشاهداتی ایستگاه مربوطه با معیارهای RMSE، MAE و CC مورد ارزیابی قرار گرفت. تفاوت در مقدار معیارهای مذکور بدست آمده از دو روش تصحیح اریبی در شکل ۶ ستون a برای دمای و ستون b برای بارش به ترتیب از بالا





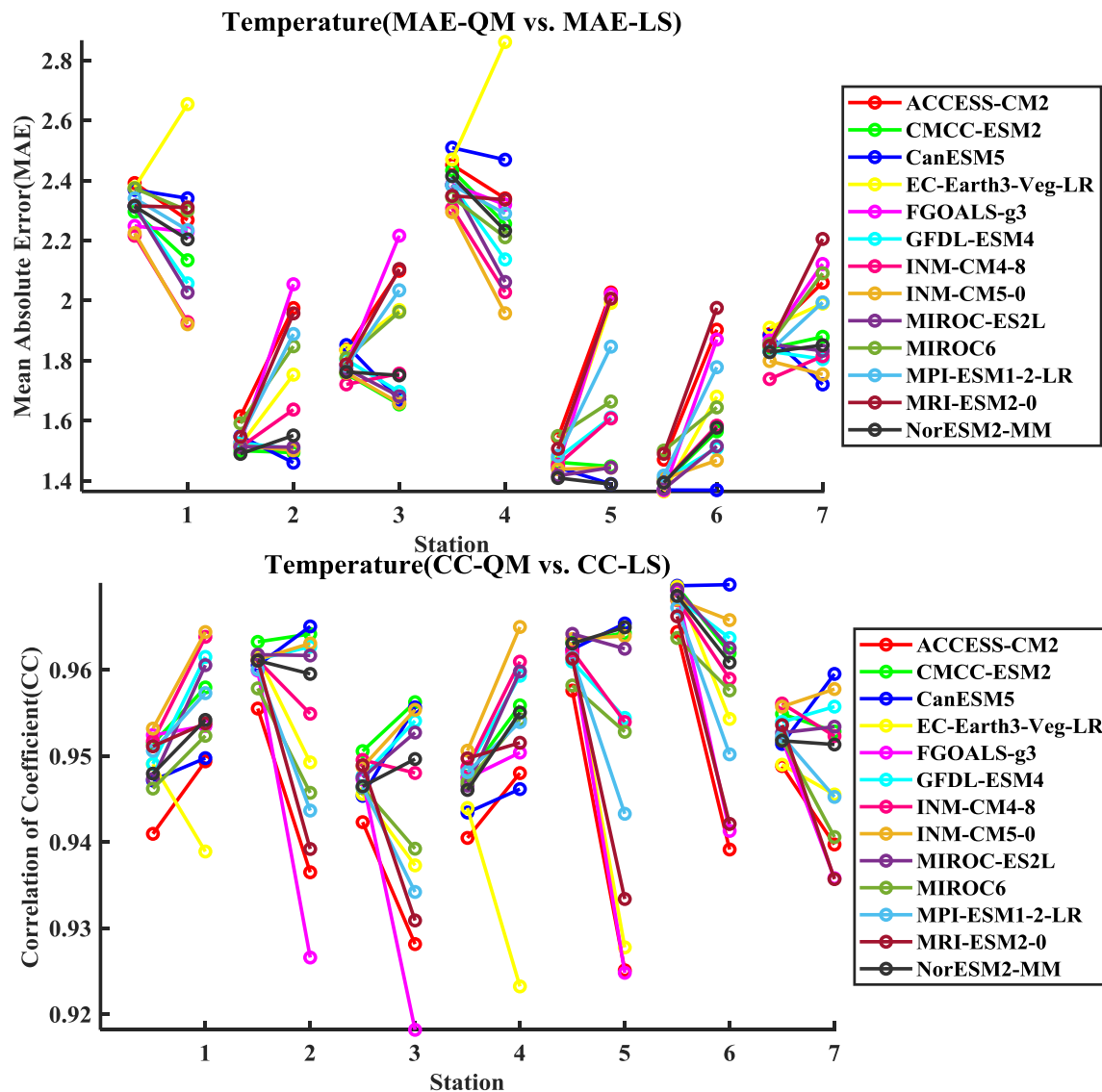


Fig. 6- Changes in RMSE, MAE, and CC of the corrected outputs using quantile mapping and linear scaling
 شکل ۶- نمودار تغییرات RMSE، MAE، و CC خروجی‌های اصلاح شده با دو روش نگاشت چندکی و مقیاس گذاری خطی

داده‌های بارش و دما مشاهداتی (رنگ مشکی)، شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی اصلاح نشده (رنگ آبی) و شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی اصلاح شده با روش نگاشت چندکی (رنگ قرمز) برای یک مدل خاص، برای دو بازه ۲۷ ساله در امتداد هم، در هر ایستگاه ترسیم شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود خروجی مدل‌های اقلیمی برای متغیرهای بارش و دما و در نقاط ایستگاهی مختلف رفتار متفاوتی دارد به عنوان مثال در شکل ۷، ایستگاه رامسر، روند کلی دو سری زمانی مشاهداتی و شبیه‌سازی در طول زمان ثابت است و برای سری زمانی مشاهداتی میانگین مقدار در حدود ۱۲۰۰ میلی‌متر و برای شبیه‌سازی شده در حدود ۶۰۰ میلی‌متر است.

۲-۲-۴- نتایج تصحیح اریبی نگاشت چندکی

با توجه به اینکه از بین دو روش تصحیح اریبی به کار گرفته شده در این پژوهش، روش نگاشت چندکی عملکرد بهتری دارد، در ادامه به بررسی بیشتر نتایج حاصل با استفاده از این روش، پرداخته شده است. با توجه به توانایی روش نگاشت چندکی در تصحیح اریبی مدل‌ها که در ادبیات به آن اشاره شد و در این پژوهش هم بررسی شد، جهت ارزیابی بهتر عملکرد آن، طول گزارش ثبت شده ۵۴ سال داده‌های مشاهداتی دما و بارش در ۷ ایستگاه، به دو دوره ۲۷ ساله تقسیم شد. دوره اول از سال ۱۹۶۱ تا ۱۹۸۷، به عنوان دوره تاریخی جهت واسنجی و دوره دوم از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۴، به عنوان دوره سناریو جهت صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. در شکل‌های ۷ و ۸ سری‌های زمانی

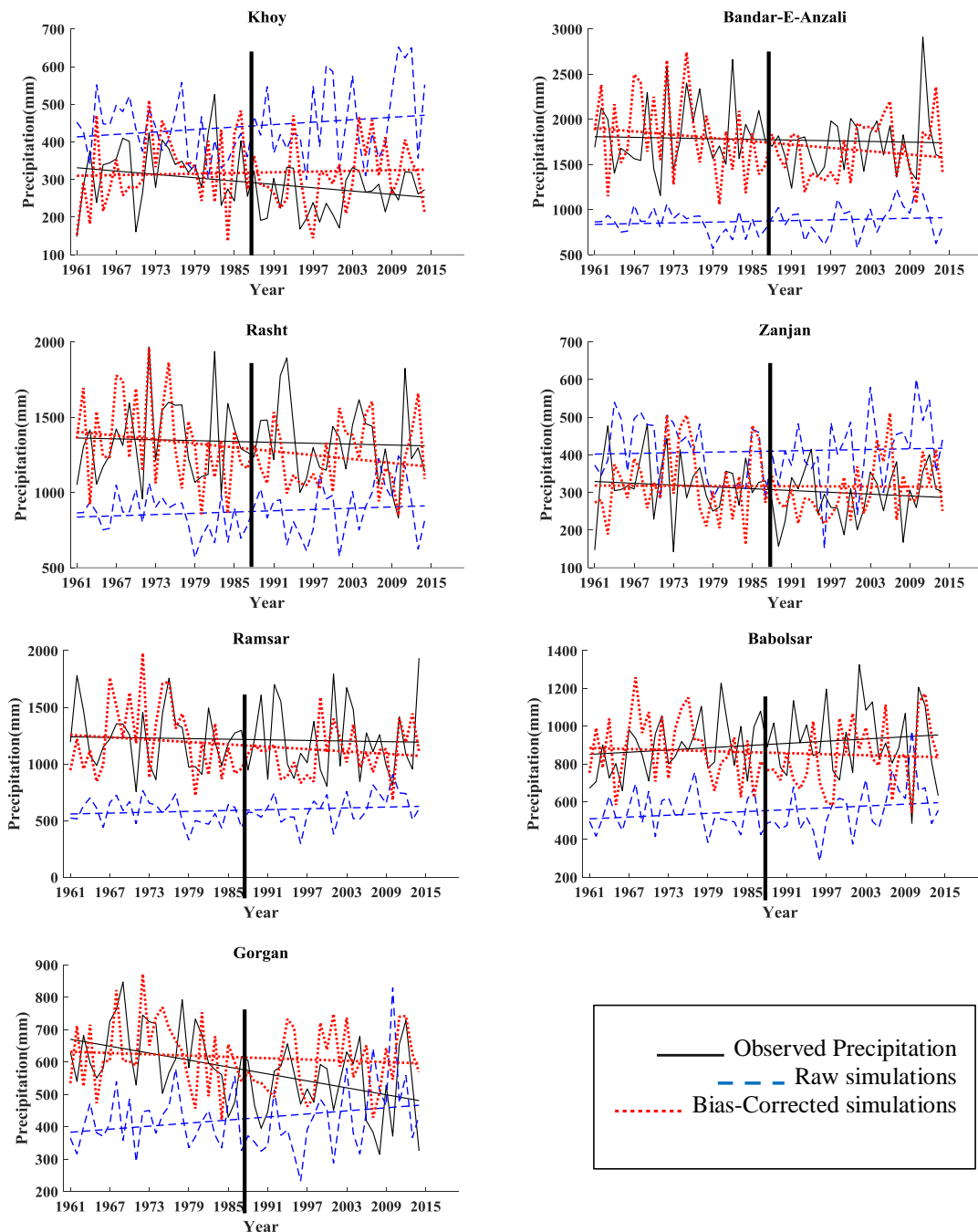


Fig. 7- Observed precipitation, raw and bias-corrected outputs of EC-Earth3-Veg-LR at station locations
شکل ۷- سری زمانی بارش مشاهداتی و خروجی خام و تصحیح اریبی شده مدل EC-Earth3-Veg-LR در نقاط ایستگاهی

است این در حالی است که، مابقی ایستگاه‌های حوضه، اریبی منفی دارند. همچنین، در دو ایستگاه مذکور روند سری زمانی بارش شبیه‌سازی شده در طول دوره ۶۰ ساله، نسبت به مشاهدات روند افزایشی دارد و روند دو سری زمانی نسبت به هم واگرا می‌شود. این

در واقع مقدار میانگین سری زمانی شبیه‌سازی در طول دوره، حدود ۶۰۰ میلی‌متر کمتر از مقدار میانگین مشاهدات است (اریبی منفی دارد). در ایستگاه‌های خوی و زنجان، داده‌ها شبیه‌سازی شده نسبت به مشاهدات اریبی مثبت دارند و بالاتراز داده‌های مشاهداتی قرار گرفته

اهمیت است همانطور که در پژوهش‌های پیشین نیز مطرح شده و از جنبه‌های دیگری بررسی و نتیجه‌گیری شده است؛ برای مثال Shabanpour et al. (2020) که پنج روش تصحیح اریبی بر مهارت پیش‌بینی بارش (فصل پاییز) یک مدل اقلیمی را در ۱۲ ایستگاه واقع در حوضه آبریز گرگانرود مورد ارزیابی قرار دادند؛ به این نتیجه رسیدند تاثیر استفاده از روش‌های مختلف تصحیح اریبی بر مهارت پیش‌بینی‌های احتمالی وابسته به محل و زمان متفاوت است و پیشنهاد کردند ارزیابی روش‌های تصحیح اریبی و شناسایی مناسب‌ترین روش بسته به هدف مطالعه باید صورت گیرد.

۴-۳- همادی مدل‌ها

باتوجه به اینکه استفاده از اطلاعات یک مدل اقلیمی عدم قطعیت پیش‌نگری را زیاد می‌کند از طرفی هیچ کدام از مدل‌های اقلیمی در حالت کلی ارجحیتی بر مدل اقلیمی دیگر ندارد و بسته به موقعیت اقلیمی، نوع متغیر و هدف استفاده، می‌تواند نسبت به هم در رده‌بندی متفاوتی قرار بگیرد. بنابراین برای بهره‌مندی هر چه بهتر و دقیق‌تر از مدل‌های اقلیمی در هر ایستگاه، همادی از ۵ مدل برتر، انتخاب شده بر اساس معیارهای ارزیابی در بخش ۴-۱، در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از روش میانگین‌گیری وزن‌دار بیزین مدل‌ها تجمیع شدند. باتوجه به اینکه دوره هستوریکال سناریوهای مختلف یک مدل، یکسان است پس در این بخش سناریو مطرح نمی‌شود.

۴-۳-۱- میانگین‌گیری مدل‌ها به روش بیزین

جهت تجمیع خروجی مدل‌های اقلیمی مختلف، همادی از مدل‌ها در نظر گرفته شد و وزن هر مدل با رویکرد وزن‌دهی بیزین محاسبه شد. برای این منظور دو فرآیند در نظر گرفته شد. در حالت اول؛ پس از استخراج مدل‌های اقلیمی برای نقاط ایستگاهی جهت استفاده از اطلاعات شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی یک بار در این مرحله همادی از مدل‌ها در نظر گرفته شد و میانگین وزن‌دار از همه مدل‌ها به روش بیزین برای نقاط ایستگاهی محاسبه شد. سری زمانی بدست آمده برای هر نقاط ایستگاهی ((BMA(Raw))، با روش نگاشت چندکی، اصلاح اریبی شدند ((QM(BMA(Raw))). در حالت دوم در ابتدا خروجی اصلاح نشده مدل‌های اقلیمی تک تک به روش QM اصلاح اریبی شده‌اند و سپس با روش میانگین‌گیری وزنی بیزین تجمیع شدند ((BMA(QM(Raw))). نمودار تغییرات سری‌های زمانی مربوطه در شکل ۹ برای بارش و شکل ۱۰ برای دما نشان داده شده است.

در حالی است که در ایستگاه گرگان، روند داده‌های بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، در دو جهت مخالف یکدیگر در حال تغییر است. در بقیه ایستگاه‌های مطالعاتی حوضه، شیب روند داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بسیار کم و داده‌های بارش شبیه‌سازی شده در طول دوره آماری اریبی نسبتاً ثابتی نسبت به مشاهدات دارند. با تحلیل نتایج حاصل از این بخش و دقت در خروجی سایر مدل‌های اقلیمی، می‌توان دریافت، در ایستگاه‌هایی که سری زمانی شبیه‌سازی‌های خام، اریبی نسبتاً ثابتی از مشاهدات دارند، نتایج حاصل از تصحیح اریبی (سری زمانی تصحیح اریبی شده که به رنگ قرمز در شکل مشخص شده است)، به مشاهداتی نزدیک شده و در چنین شرایط روش نگاشت چندکی، توانایی بالایی در اصلاح اریبی از خود نشان داده است. در شکل ۸ نیز، مشابه شکل ۷، تحلیل داده‌های شبیه‌سازی شده دما بیانگر تفاوت خروجی یک مدل اقلیمی در نقاط مختلف است. همچنین نتایج حاصل از تحلیل‌ها، نشان داد؛ در یک ایستگاه، خروجی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های مختلف اقلیمی نیز، متفاوت است (به دلیل نتایج و تحلیل مشابه، از ارائه شکل صرف نظر شد).

همانطور که در شکل ۸، قابل مشاهده است برخلاف بارش، در اکثر ایستگاه‌ها، روند سری‌های زمانی مشاهداتی و خروجی‌های شبیه‌سازی خام، دارای شیب‌های متفاوتی بوده و اریبی در طول زمان ایستا نیست. این تفاوت در ایستگاه‌های رشت، زنجان و گرگان، بیشتر مشهود است. همین مسئله منجر به عملکرد ضعیف روش تصحیح اریبی، در اصلاح شبیه‌سازی می‌شود.

به طور کلی آنچه از تحلیل این بخش از نتایج حاصل می‌شود بیانگر این است که در هر دو پارامتر دما و به ویژه بارش، خروجی مدل‌های اقلیمی در نواحی دریای خزر یعنی ایستگاه‌های بندر انزلی، رشت، رامسر و بابلسر خروجی‌های اصلاح نشده نسبت به سایر ایستگاه‌ها در فاصله نسبتاً ثابتی در طول زمان با داده‌های مشاهداتی قرار گرفته است و به تبع آن نتایج تصحیح اریبی نیز به مشاهدات نزدیک‌تر شده است. این در حالی است در ایستگاه‌هایی با اقلیم خشک‌تر، در نواحی شرقی و غربی حوضه (ایستگاه خوی و گرگان)، خروجی مدل‌های اقلیمی نسبت به مشاهدات روند متفاوتی را ارائه کرده است و همین امر موجب دریافت نتایج اشتباه از تصحیح اریبی می‌شود.

نتایج منتج از این پژوهش تا این بخش که به بررسی عملکرد دو روش تصحیح اریبی و عملکرد روش نگاشت چندکی از جنبه ویژه‌تر نایستایی پرداخته است؛ بیانگر این است که انتخاب روش مناسب تصحیح اریبی و شناخت نقاط قوت و ضعف آن بسته به هدف مختلف پژوهش، حائز

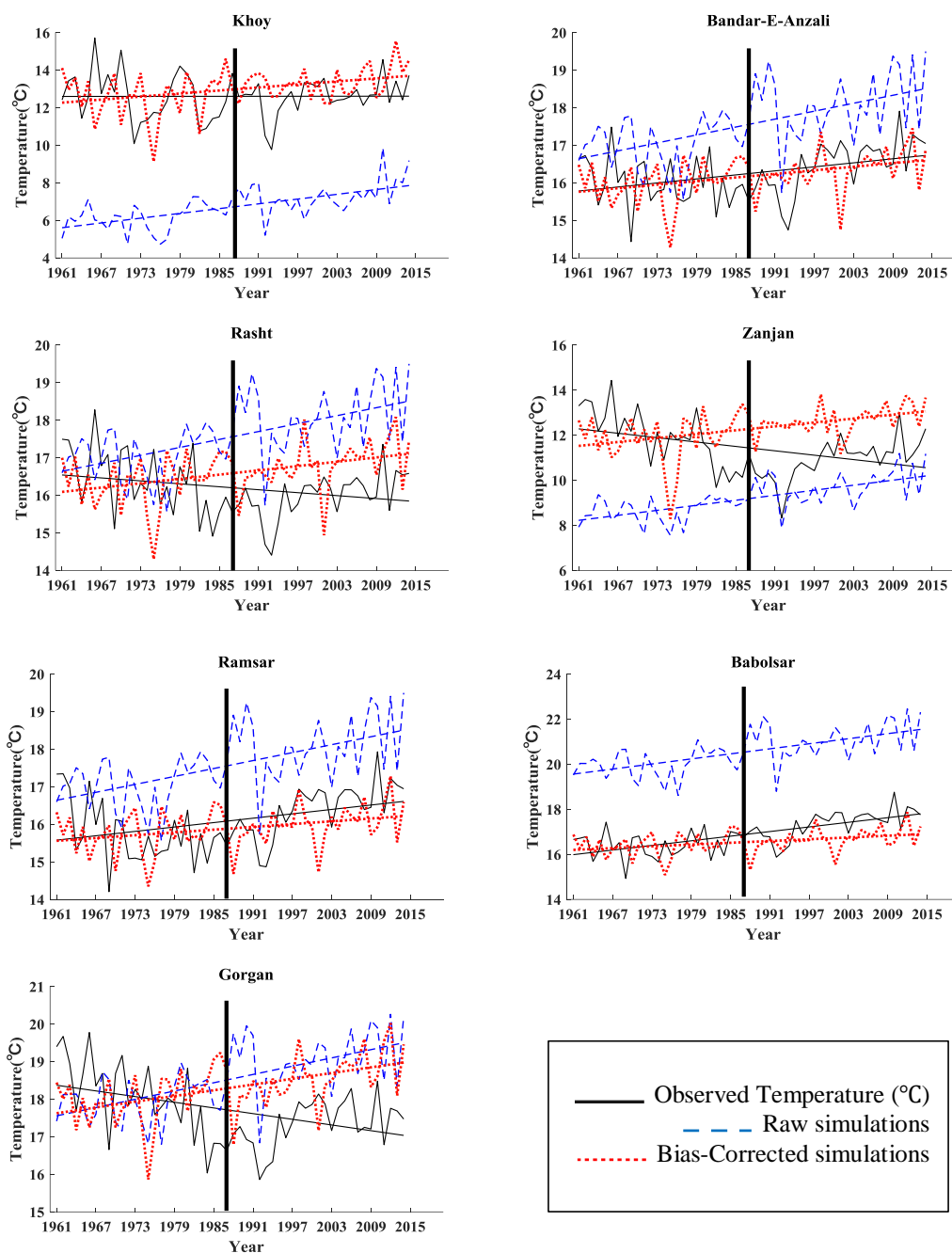


Fig. 8- Observed temperatures, raw and bias-corrected outputs of FGOALS-g3 at station locations
 شکل ۸- سری زمانی دمای مشاهداتی و خروجی مدل FGOALS-g3 اصلاح‌اریبی نشده و اصلاح‌اریبی شده در نقاط ایستگاهی

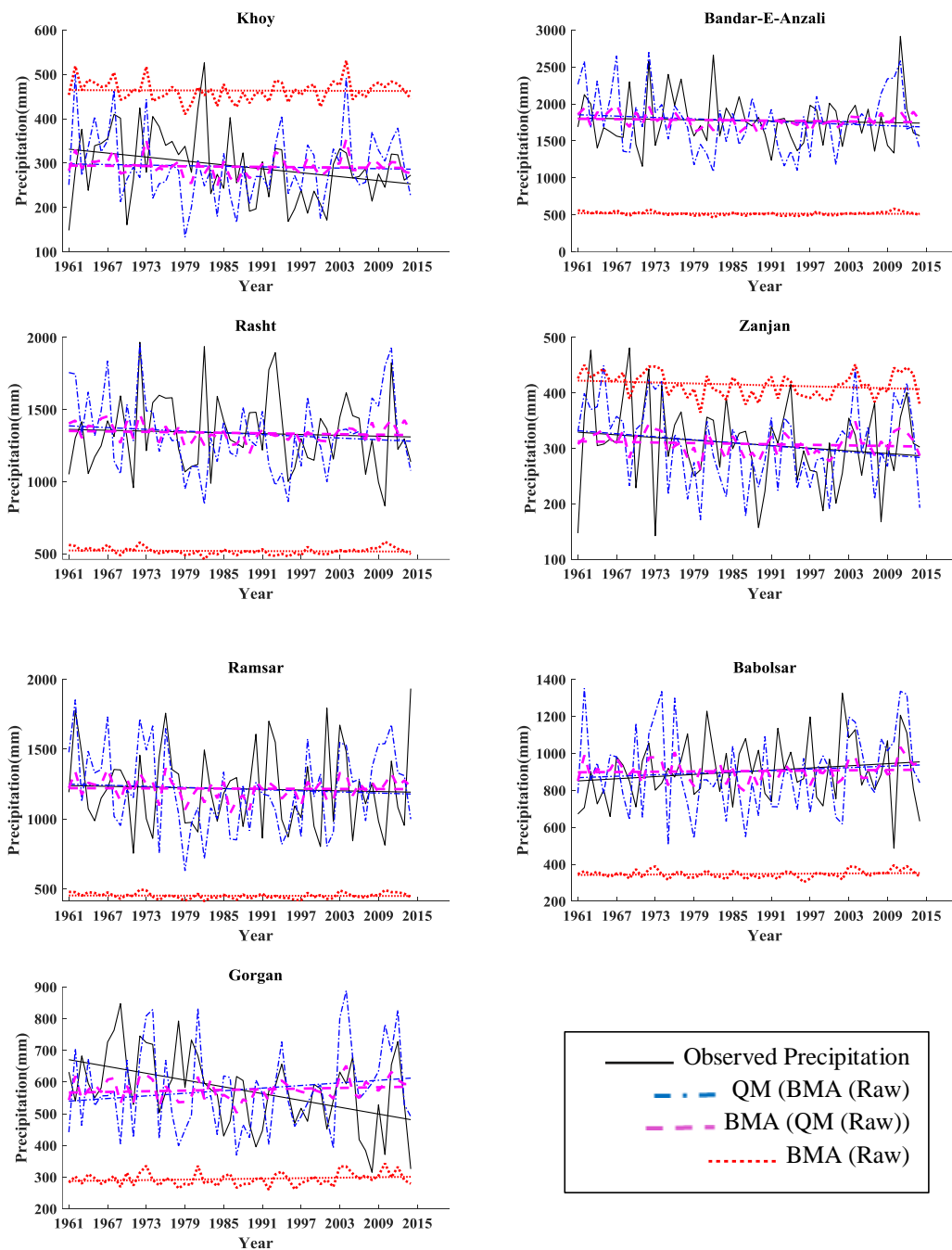


Fig. 9- Time series of BMA(Raw), QM(BMA(Raw)), and BMA(QM(Raw)) versus observed precipitation

شکل ۹- نمایش سری‌های زمانی $BMA(Raw)$ ، $QM(BMA(Raw))$ و $BMA(QM(Raw))$ در مقابل بارش مشاهده‌ای

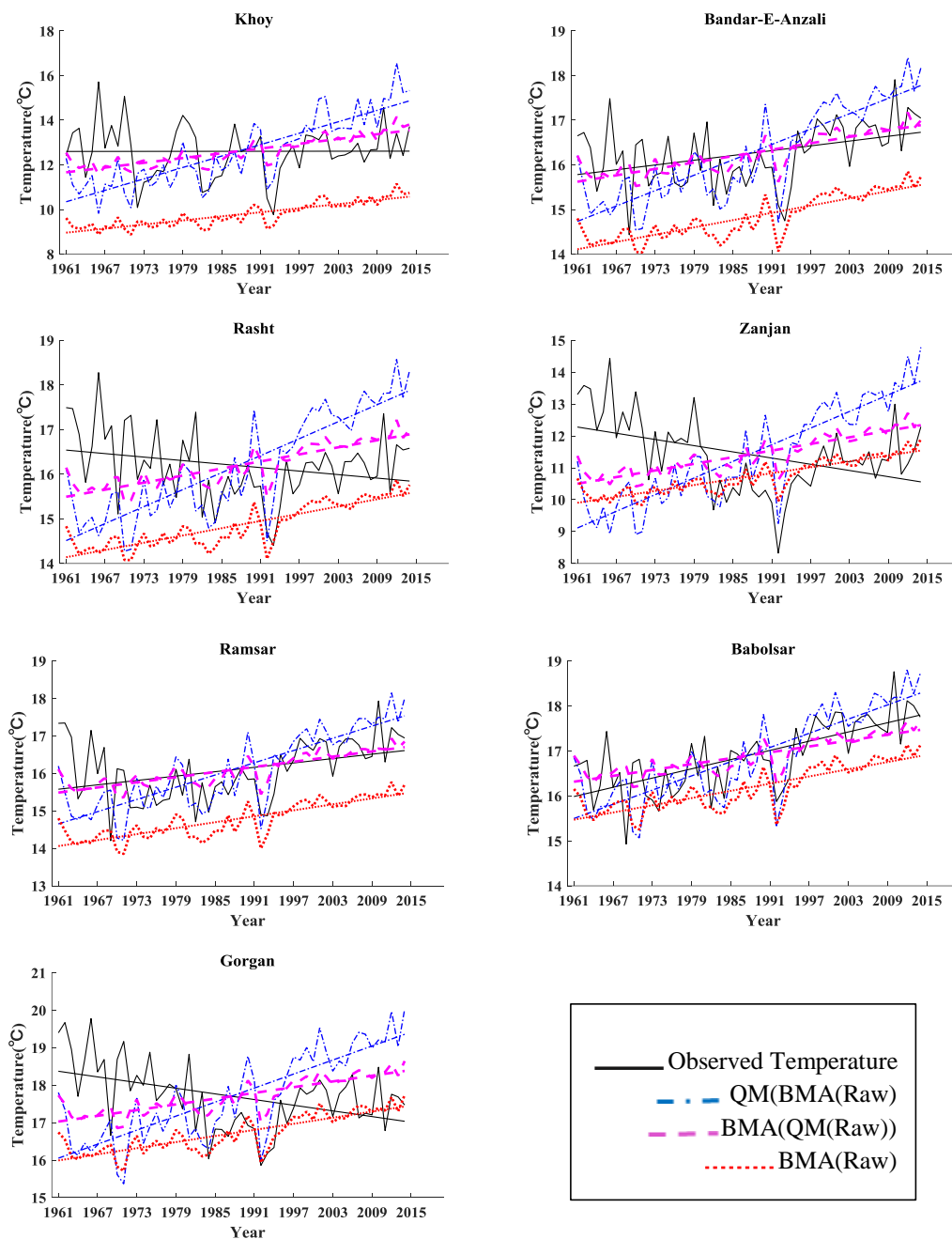


Fig. 10- Time series of BMA(Raw), QM(BMA(Raw)), and BMA(QM(Raw)) versus observed temperature
شکل ۱۰- نمایش سری‌های زمانی BMA(Raw)، QM(BMA(Raw)) و BMA(QM(Raw)) در مقابل دمای مشاهداتی

رنگ مشکی مربوط به سری زمانی مشاهداتی و رنگ آبی و قرمز به ترتیب مربوط به سری زمانی QM(BMA(Raw)) و BMA(QM(Raw)) است. همانطور که ملاحظه می‌شود با در نظر گرفتن همادی از مدل‌های اصلاح شده نوسانات سری زمانی تعدیل شده است؛ زیرا معدل وزن‌دار از مدل‌ها در نظر می‌گیرد و همین مسئله موجب می‌شود مقادیر بالا و پایین (حدی) تعدیل شود. در حالی که

رنگ مشکی مربوط به سری زمانی مشاهداتی و رنگ آبی و قرمز به ترتیب مربوط به سری زمانی QM(BMA(Raw)) و BMA(QM(Raw)) است. همانطور که ملاحظه می‌شود با در نظر گرفتن همادی از مدل‌های اصلاح شده نوسانات سری زمانی تعدیل شده است؛ زیرا معدل وزن‌دار از مدل‌ها در نظر می‌گیرد و همین مسئله موجب می‌شود مقادیر بالا و پایین (حدی) تعدیل شود. در حالی که

بیشینه ارائه شده است. بر طبق نتایج جدول ۲، همادی چندین مدل^{۱۷} (MME) معیارهای خطا را کاهش و درصد همبستگی را افزایش داده است همچنین فاصله بین مقادیر کمینه و بیشینه را نیز محدودتر کرده است. بنابراین درنظر گرفتن همادی از مدل‌های اصلاح شده باعث ارتقا نتیجه نهایی، نسبت به تک تک مدل‌های اصلاح شده و همچنین محدود کردن عدم قطعیت ناشی از انتخاب مدل می‌شود.

(RMSE و MAE) و ضریب همبستگی (CC) برای حالتی که در ابتدا مدل‌ها اصلاح اریبی شده و سپس میانگین‌گیری شود (QM (BMA (Raw)) در وضعیت بهتری نسبت به حالت (BMA (Raw)) قرار می‌گیرد. برای بررسی مقایسه نتایج تجمیع مدل‌ها (همادی) با نتایج ارائه شده توسط تک تک مدل‌ها، در جدول ۲ مقادیر کمینه و بیشینه برای ۳ معیار ارزیابی و همچنین فاصله این مقادیر کمینه و

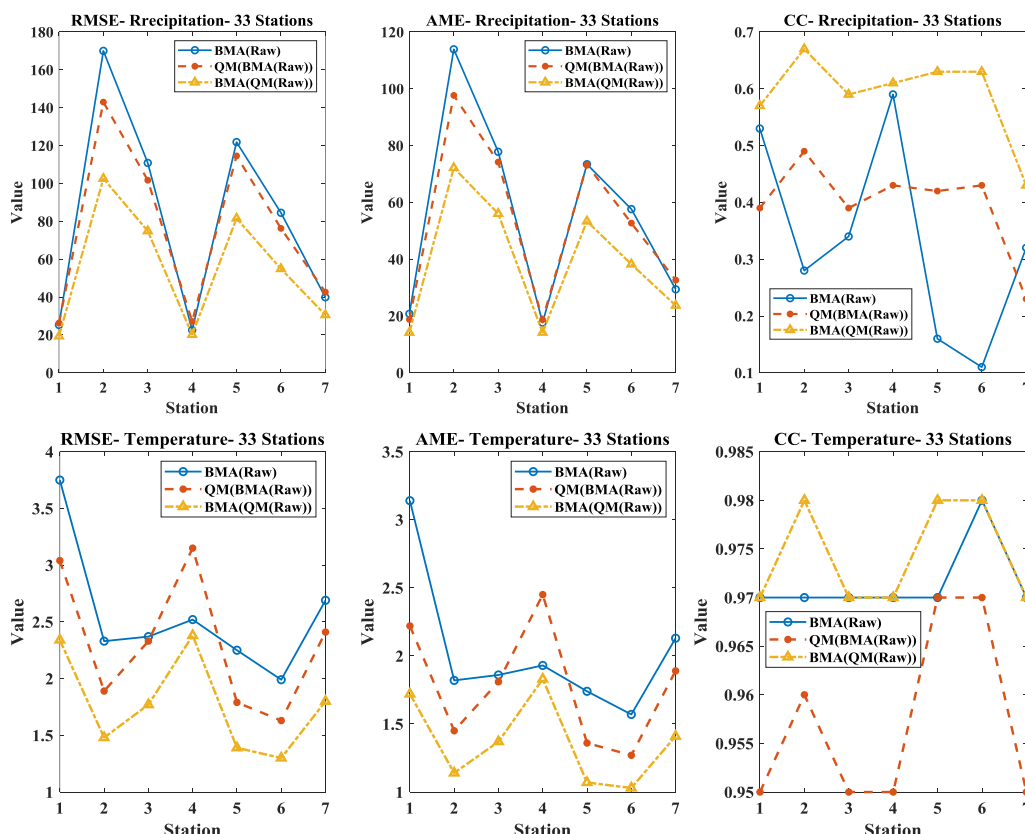


Fig. 11- Variations in RMSE and CC for BMA (Raw), QM (BMA (Raw)) and BMA (QM (Raw)) for precipitation (a) and temperature (b) variables

شکل ۱۱- تغییرات RMSE و CC، BMA(Raw)، QM(BMA(Raw)) و BMA(QM(Raw)) برای متغیر بارش (a) و دما (b)

Table 2- Minimum and maximum values of RMSE, MAE, and CC for all models and their ensembles
جدول ۲- کمترین و بیشترین مقادیر RMSE، MAE و CC برای همه مدل‌ها و همادی آن‌ها

		RMSE		MAE		CC	
		Models	MME	Models	MME	Models	MME
Precipitation	Min	25.04	19.32	17.97	14.17	0.16	0.43
	Max	158.70	102.57	105.53	72.19	0.50	0.67
	Max-Min	133.66	83.25	87.55	58.02	0.34	0.24
Temperature	Min	1.74	1.30	1.36	1.03	0.94	0.97
	Max	3.36	2.38	2.51	1.83	0.97	0.98
	Max-Min	1.62	1.08	1.15	0.80	0.03	0.01

۴-۴- پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی

در این پژوهش براساس تحلیل‌های انجام شده روی ۱۳ مدل اقلیمی از سری گزارشات ششم CMIP6، ضمن انتخاب مدل‌های برتر برای هر ایستگاه روی حوضه مطالعاتی، نتیجه گرفته شد استفاده از روش نگاشت چندکی نسبت به مقیاس‌گذاری خطی، ابزاری مناسب برای تصحیح اریبی مدل‌ها است. همچنین نتایج نشان داد استفاده از همادی مدل‌های اقلیمی با استفاده از روش میانگین‌گیری بیزین (پس از اصلاح اریبی مدل‌ها)، درصد همبستگی سری زمانی بدست آمده در دوره‌ی تاریخی را افزایش و معیارهای خطا را کاهش می‌دهد. در این بخش با بهره‌گیری از تحلیل‌های انجام شده به بررسی میانگین تغییرات بارش و دما در دو بازه‌ی ۲۷ ساله گذشته و دو بازه ۳۰ ساله آینده پرداخته شده است. نتایج در جدول ۳ و ۴ به ترتیب برای بارش و دما ارائه شده است. همچنین میانگین تغییرات بارش و دما در ایستگاه‌های مختلف روی حوضه مورد مطالعه به روش IDW محاسبه شده است. بر طبق جدول ۳ و ۴ ملاحظه می‌شود در دوره اول تاریخی، میانگین مشاهداتی از شبیه‌سازی‌های اصلاح شده بیشتر و در دوره دوم تاریخی، شبیه‌سازی از مشاهداتی بیشتر است. در دوره آینده، میانگین بارش نسبت به مشاهدات در دوره تاریخی اول کاهش و نسبت به مشاهدات و شبیه‌سازی در دوره تاریخی دوم افزایش یافته است. این در صورتی است که در آینده اول، بارش تحت سناریو SSP585 نسبت به SSP245 افزایش بیشتری داشته است. متغیر دما، طی دوره‌های مختلف از گذشته تا به آینده و در هر دو سناریو، روند افزایشی دارد و این افزایش تحت سناریو SSP585 نسبت به SSP245 بیشتر است. جهت نمایش بهتر نتایج پیش‌نگری، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب تغییرات بارش و دما تحت دو سناریو SSP245 و SSP585 همراه با بارش/دما شبیه‌سازی شده تاریخی و مشاهداتی ترسیم شده است. پیش‌نگری برای دوره آینده با میانگین‌گیری بیزین از مدل‌های تصحیح اریبی شده مدل‌های اقلیمی انجام شده است. برای هر کدام از سری‌های زمانی، روند مربوطه ترسیم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج پیش‌نگری برای بارش تحت دو سناریو تفاوت چشم‌گیری ندارد. از طرفی همان‌طور که قبلاً نیز بحث شد روش میانگین‌گیری پس از تصحیح اریبی منتخب شد که از نظر معیارهای مختلف، دقت نتایج را بهبود می‌بخشد؛ اما باعث تعدیل قسمت‌ها حدی سری زمانی می‌شود لذا در مقایسه با بارش مشاهداتی، مقادیر اصلاح شده پیش‌نگری و تاریخی تغییرات حدی زیادی نشان نمی‌دهد. با این حال تحت سناریو SSP245 در سال ۲۰۵۹ یک افزایش حدی را در

تمام ایستگاه‌ها، نشان می‌دهد. در رابطه با دما، تحت هر دو سناریو، روند افزایشی در دما مشاهده می‌شود که در سناریو SSP585 این روند شدیدتر است. در ایستگاه‌ها خوی، زنجان و گرگان روند افزایش دما در داده‌های شبیه‌سازی شده با روند کاهش دما در این ۳ ایستگاه، جهت‌گیری معکوس را نشان می‌دهد. همین جهت‌گیری معکوس در ایستگاه رشت نیز تا حدودی مشهود است.

با دقت به نتایج حاصل از این مطالعه می‌توان دریافت که نتایج خروجی مدل‌های اقلیمی در ایستگاه‌های مختلف یک حوضه باتوجه به اقلیم متفاوت آن و همچنین تفاوت در مهارت مدل‌های اقلیمی به عنوان ورودی روش‌های تصحیح اریبی، می‌تواند متفاوت باشد. بنابراین در مقیاس بزرگ حوضه‌ای و برای مناطق مختلف ایران، مطالعات صورت گرفته می‌تواند نتایج متفاوتی از افزایش و کاهش بارش و دما و حتی میزان تغییرات آن‌ها را ارائه کند. در ادامه به نتایج محققانی که با استفاده از مدل‌ها اقلیمی گزارش ششم روی مناطق مختلف ایران به بررسی بارش و دما پرداختن اشاره شده است.

یافته‌های پیش‌نگری‌های اقلیمی (ErshadFath et al. (2022) که بر روی حوضه همدان-بهار کار کرده‌اند نشان داد در همه دوره‌های آتی عمدتاً بارش در فصل‌های پاییز و به ویژه تابستان کاهش و در فصل بهار افزایش می‌یابد. همچنین، دمای کمینه و بیشینه در هر سه دوره و تحت سه سناریو انتخابی آن‌ها، افزایش خواهد یافت و در مجموع اقلیمی گرم‌تر و کم بارش‌تر را برای منطقه مورد بررسی پیش‌نگری کردند. از طرفی براساس مطالعه Zareian (2022)، دمای سالانه استان یزد در ایستگاه‌های مختلف بین ۰/۲ تا ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارش نیز بین ۲/۹ تا ۱۳/۷ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین بیشترین میزان افزایش دما و کاهش بارندگی در این منطقه، به ترتیب در فصول بهار و فصل پاییز رخ خواهند داد. Zarrin & Dadashi (2022) تغییرات در شدت و فراوانی بارش را در شش حوضه آبریز بزرگ ایران بررسی کردند، به این نتیجه رسیدند که در همه حوضه‌ها به ویژه در سه حوضه آبریز دریای خزر، ارومیه و قره قوم، بیشینه افزایش روزهای همراه با بارش سنگین پیش‌نگری می‌شود. این افزایش در تعداد روز و حجم بارش در واقع می‌تواند در بارش کل سالانه اثرگذار بوده و منتج به افزایش بارش سالانه شود که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. همچنین، در رابطه با متغیر دما، مطالعات مختلف افزایش دما در آینده تحت سناریوهای مختلف پیش‌نگری کردند.

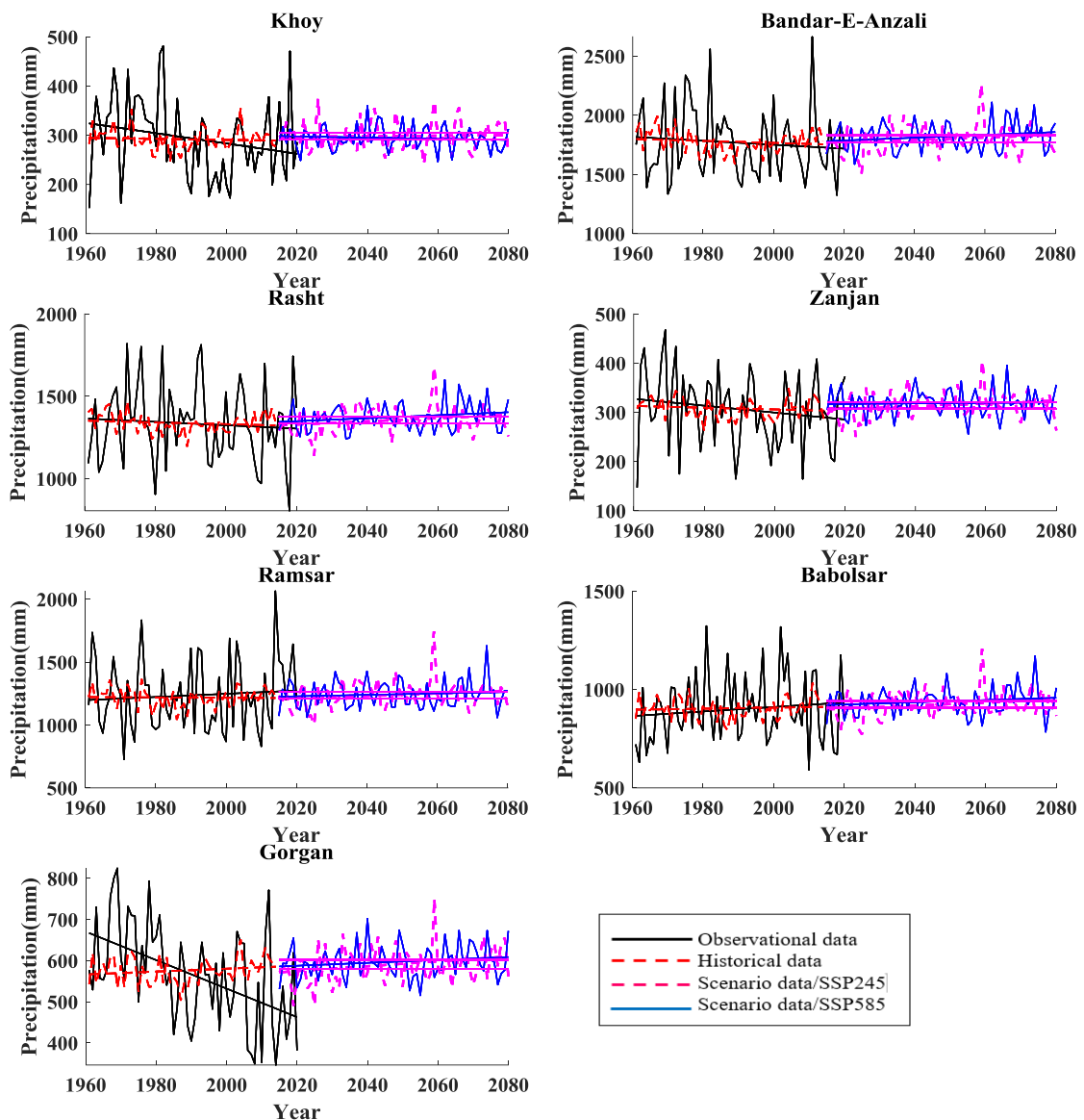


Fig. 12- Changes in precipitation in the historical and future periods under the SSP585 and SSP245 scenarios using Bayesian averaging method

شکل ۱۲- تغییرات بارش در دوره تاریخی و آینده تحت سناریوهای SSP245 و SSP585 با استفاده از روش میانگین‌گیری بیزین

۵- خلاصه و جمع‌بندی

اقليمی در نقاط مختلف يك حوضه آبريز پاسخ‌های متفاوتی ارائه کرده است. چنانچه روند سری‌های زمانی یا به عبارتی خروجی خام مدل‌های اقلیمی نسبت به زمانی مشاهداتی، اریبی ثابتی داشته باشند، روند سری‌های زمانی تصحیح اریبی شده مطابقت بیشتری با مشاهدات نشان می‌دهد. اما چنانچه خروجی‌های ریز مقیاس‌نمایی (خام) مدل اقلیمی نسبت داده‌های مشاهداتی در طول زمان، اریبی متفاوتی داشته‌اند؛ نتایج تصحیح اریبی نیز از داده‌های مشاهدات واقعی دور شده و تصحیح مناسبی انجام نمی‌گیرد. لذا همین امر می‌تواند برای داده‌های سناریو آینده نیز قابل تعمیم باشد؛

در این مطالعه هدف اصلی ارزیابی شبیه‌سازی‌های دما و بارش ۱۳ مدل اقلیمی CMIP6 در حوضه آبریز دریای خزر با بررسی تأثیر روش‌های تصحیح اریبی در دوره تاریخی و بهره‌گیری از همادی مناسب مدل‌ها در تحلیل و پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی برای دوره آینده است. برای این منظور یکبار همادی از خروجی‌های خام، اصلاح اریبی شد و بار دیگر همادی از خروجی‌های اصلاح شده در نظر گرفته شد. خلاصه نتایج بدست آمده از این پژوهش به صورت زیر است:

- با بررسی نتایج تحلیل سری‌های زمانی شبیه‌سازی اصلاح شده و اصلاح نشده با داده‌های مشاهداتی، ملاحظه شد خروجی یک مدل

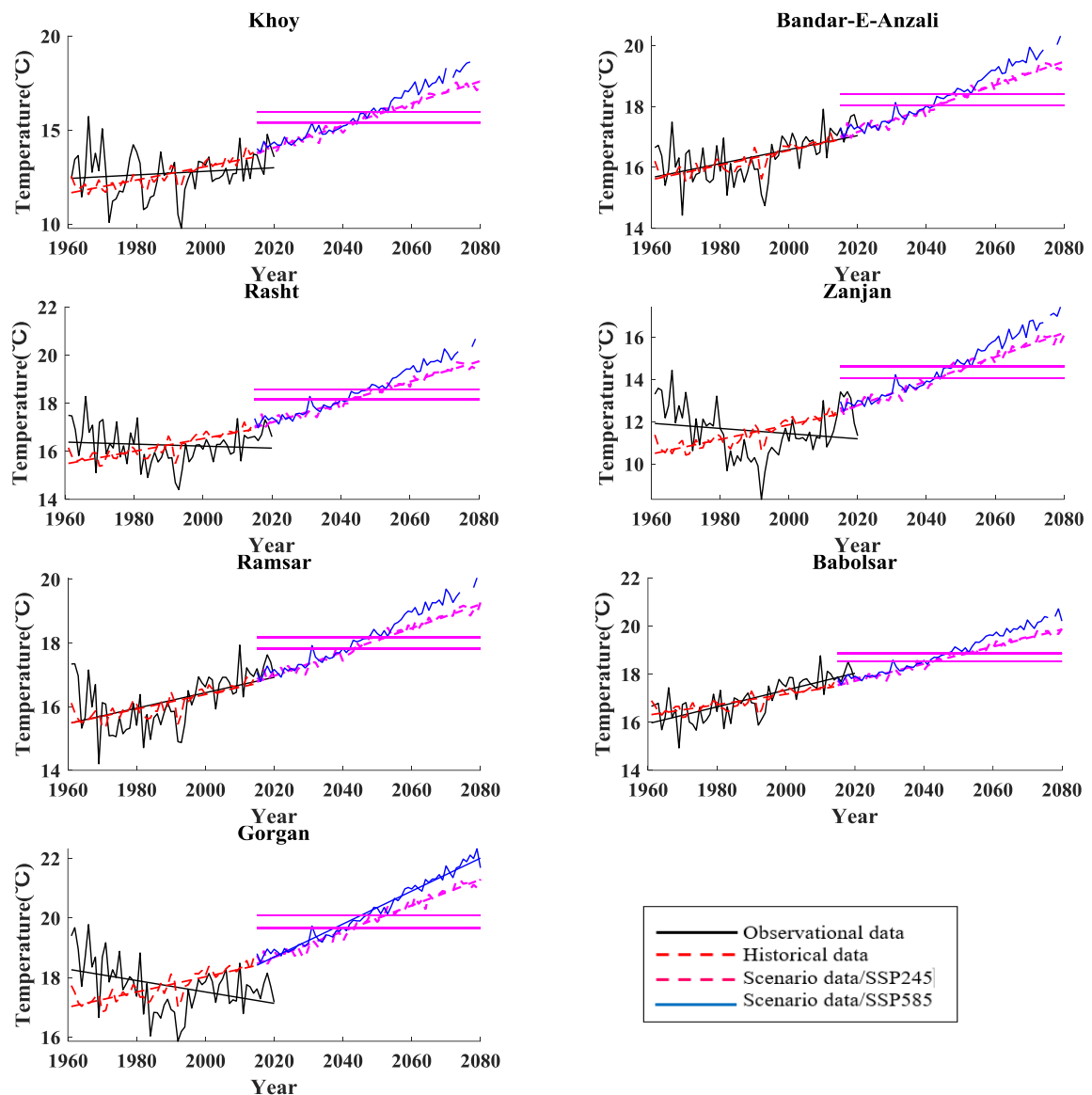


Fig. 13- Changes in temperature in the historical and future periods under the SSP585 and SSP245 scenarios using Bayesian averaging method

شکل ۱۳- تغییرات دما در دوره تاریخی و آینده تحت سناریوهای SSP245 و SSP585 با استفاده از روش میانگین گیری بیزی

Table 3- Cumulative annually precipitation (mm) changes for 2 historical periods and 2 future periods

جدول ۳- تغییرات بارش سالانه (میلی متر) تجمعی برای ۲ دوره تاریخی و ۲ دوره آینده

PR (mm)	1961-1987		1988-2014		2021-2050		2051-2080	
	Observation	Historical	Observation	Historical	SSP245	SSP585	SSP245	SSP585
Khoy	327	291	258	293	297	297	299	291
Bandar-E-Anzali	1832	1786	1718	1768	1804	1817	1816	1827
Rasht	1349	1343	1326	1331	1355	1372	1372	1380
Zanjan	326	310	289	306	315	318	319	317
Ramsar	1223	1217	1212	1219	1239	1247	1253	1241
Babolsar	885	901	921	908	921	943	935	940
Gorgan	629	570	520	581	590	598	599	598
Weighted Mean	843	819	792	818	833	842	842	842

Table 4- Average temperature (°C) changes for 2 historical periods and 2 future periods
جدول ۴- تغییرات میانگین دما (درجه سانتی‌گراد) برای ۲ دوره تاریخی و ۲ دوره آینده

Tem (°C)	1961-1987		1988-2014		2021-2050		2051-2080	
	Observation	Historical	Observation	Historical	SSP245	SSP585	SSP245	SSP585
Khoy	12.61	12.12	12.61	13.10	14.91	15.02	16.76	17.35
Bandar-E-Anzali	16.01	15.92	16.50	16.59	17.71	17.81	18.93	19.30
Rasht	16.39	15.83	16.00	16.56	17.80	17.91	19.14	19.55
Zanjan	11.91	10.95	10.93	11.89	13.58	13.70	15.40	16.01
Ramsar	15.77	15.78	16.42	16.41	17.49	17.60	18.69	19.07
Babolsar	16.42	16.59	17.37	17.20	18.21	18.34	19.35	19.78
Gorgan	18.04	17.35	17.37	18.06	19.29	19.45	20.68	21.24
Weighted Mean	15.09	14.64	14.96	15.41	16.76	16.89	18.23	18.74

۶- تشکر و قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران (WRM) از قرارداد شماره س/۱۶/۰۰۱۴۰۱ انجام گرفته است.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Global Climate Model (GCM)
- 2- LARS_WG
- 3- Bayesian Model Averaging (BMA)
- 4- The sixth phase of Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6)
- 5- Precipitation (Pr)
- 6- Maximum and Minimum Temperature (Tmax and Tmin)
- 7- Mean Bias
- 8- Root Mean Square Error (RMSE)
- 9- Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)
- 10- Coefficient of Correlation
- 11- Sen's Slope Estimators
- 12- Mann-Kendall Statistic
- 13- Mean Absolute Error (MAE)
- 14- Linear Scaling (LS)
- 15- Quantile Mapping (QM)
- 16- Posterior Probability
- 17- Multiple Model Ensemble (MME)

● مقایسه نتایج دو روش تصحیح اریبی نشان داد؛ در روش مقیاس‌گذاری خطی، به جز در چند ایستگاه نتایج همه مدل‌ها دست پایین یا دست بالا تخمین زده شده‌اند در واقع مقیاس‌گذاری خطی مدل‌هایی با دقت بالاتر را بهتر و مدل‌هایی با دقت پایین‌تر را کمتر بهبود داده است. در حالی که روش نگاشت چندکی نسبت به روش مقیاس‌گذاری خطی، تغییرات نتایج داده‌های اصلاح شده از مدل‌های مختلف را به هم نزدیک کرده است؛

● نتایج حاصل از لحاظ همادی چند مدلی از مدل‌های اصلاح شده، نشان داد که خروجی همادی چند مدلی نسبت به تک تک مدل‌های اصلاح شده بهتر است زیرا، معیارهای خطا کاهش و درصد همبستگی افزایش داده است. همادی مدل‌ها نوسانات مدل را کاهش می‌دهد و مقادیر کمینه و بیشینه را تعدیل می‌کند. در صورتی که هدف مطالعه در مقیاس‌های روزانه و ماهانه و مطالعه روی وقایع حدی باشد؛ باید راهکار مناسب‌تر جهت استفاده از همادی مدل‌ها در نظر گرفته شود.

● نتایج پیش‌نگری بارش طبق دو سناریوی SSP245 و SSP585 نشان داد که افزایش میانگین حوضه‌ای بارش در هر دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و دور (۲۰۵۱-۲۰۸۰) نسبت به دوره‌های مشاهداتی ۱۹۶۱-۱۹۸۷ و ۱۹۸۸-۲۰۱۴ قابل توجه نبوده و بین صفر تا ۶ درصد قرار دارد؛

● نتایج پیش‌نگری دما طبق سناریوی SSP245 نشان داد که افزایش میانگین حوضه‌ای دما در دو دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و آینده دور (۲۰۵۱-۲۰۸۰) نسبت به دوره‌های مشاهداتی ۱۹۶۱-۱۹۸۷ (نزدیک‌ترین دوره به دوره مرجع استاندارد ۱۹۶۱-۱۹۹۰ برای ارزیابی تغییر اقلیم تعیین شده از سوی سازمان جهانی هواشناسی) به ترتیب ۱/۶۷ و ۳/۱۴ درجه سلسیوس خواهد بود. مقادیر فوق برای سناریوی SSP585 به ترتیب ۱/۸ و ۳/۶۵ درجه سلسیوس است.

۶- مراجع

- Abdolzadeh F, Mohammad Khorshiddoust A, & Jahanbakhsh S (2022) Assessment of the performance of CMIP6 model for analysis of temperature and precipitation in Urmia Lake basin. *Journal Climate Change Research* 3(11):17-30 (In Persian)
- Amiri Khaledi Ch Kh, Khosravi M, Tavousi T, Hamidianpour M, & Kiani Moghadam M (2022) Validation of CMIP6 Climate model output performance with observation data of Makran banks. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences* 5(1):22-41 (In Persian)
- Amini S, Azizian A, & Arasteh P D (2020) Improving the performance of global rainfall forecasting systems in different climate areas of Iran using quantile mapping method. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 51(9):2275-2291 (In Persian)
- Barbero R, Westra S, Lenderink G, & Fowler H J, (2018) Temperature-extreme precipitation scaling: A two-way causality? *International Journal of Climatology* 38:e1274-e1279
- Chen H, Xu C-Y, & Guo S L (2012) Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology* 434:36-45
- Chen J, Brissette F P, & Lucas-Picher P (2015) Assessing the limits of bias-correcting climate model outputs for climate change impact studies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 12(3):1123-1136
- Chen J, Brissette F P, & Leconte R (2011) Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology* 401(3-4):190-202
- Christensen J H, Boberg F, Christensen O B, & Lucas-Picher P (2008) On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophysical Research Letters* 35(20)
- Duan Q, Ajami N K, Gao X, & Sorooshian S (2007) Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging. *Advances in Water Resources* 3(5):1371-1386
- Ershadfath F, Raeini Sarjaz M, Shahnazari A, & Eivind Olesen J (2022) Application of linear scaling post-processing method for bias correction of climate models outputs retrieved from CMIP6. *Iran-Water Resources Research* 18(3):131-144 (In Persian)
- Etemadi H, Samadi S, & Sharifikia M (2014) Uncertainty analysis of statistical downscaling models using general circulation model over an international wetland. *Climate Dynamics* 42(11-12):2899-2920
- Fang G H, Yang J, Chen Y N, Zhang S H, Deng H J, Liu H M, & De Maeyer P (2015) Climate change impact on the hydrology of a typical watershed in the Tianshan Mountains. *Advances in Meteorology* 2015:1-10
- Ficklin D L, Letsinger S L, Stewart I T, & Maurer E P (2016) Assessing differences in snowmelt-dependent hydrologic projections using CMIP3 and CMIP5 climate forcing data for the western United States. *Hydrology Research* 47(2):483-500
- Fowler H J, Blenkinsop S, & Tebaldi C (2007) Linking climate change modelling to impacts studies: 30 recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology* 27(12):1547-1578
- Ghalami V, Saghafian B, & Raziei T (2022) Investigating the effect of bias correction on quality improvement of NEX-GDDP downscaled precipitation data. *Iran-Water Resources Research* 16(1):68-83 (In Persian)
- Hamidianpour M, Baaghideh M, & Abbasnia M (2016) Evaluation of temperature and precipitation changes in southeastern Iran using downscaled outputs of various general circulation models for the period 2011-2099. *Physical Geography Research Quarterly* 48(1):107-124 (In Persian)
- Knutti R, Masson D, & Gettelman A (2013) Climate model genealogy: Generation CMIP5 and how we got there. *Geophysical Research Letters* 40(6):1194-1199
- Li L, Diallo I, Xu C-Y, & Stordal F (2015) Hydrological projections under climate change in the near future by RegCM4 in Southern Africa using a large-scale hydrological model. *Journal of Hydrology* 528:1-16
- Lutz A F, Ter Maat H W, Biemans H, Shrestha A B, Wester P, & Immerzeel W W (2016) Selecting representative climate models for climate change impact studies: An advanced envelope-based selection approach. *International Journal of Climatology* 36(12):3988-4005
- Maraun D (2016) Bias correcting climate change simulations-a critical review. *Current Climate Change Reports* 2:211-220
- Maraun D, Wetterhall F, Ireson A M, Chandler R E, Kendon E J, Widmann M, Brienen S, Rust H W, Sauter T, Themeßl M, & Venema V K C (2010)

- Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics* 48(3)
- Maurer EP (2007) Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios. *Climatic Change* 82(3-4):309-325
- Min S K & Hense A (2007) Hierarchical evaluation of IPCC AR4 coupled climate models with systematic consideration of model uncertainties. *Climate Dynamics* 29:853-868
- McSweeney C F, Jones R G, Lee R W, & Rowell D P (2015) Selecting CMIP5 GCMs for downscaling over multiple regions. *Climate Dynamics* 44:3237-3260
- Mishra V, Bhatia U, & Tiwari A D (2020) Bias-corrected climate projections for South Asia from coupled model intercomparison project-6. *Scientific Data* 7(1):1-13
- Nobrega M T, Collischonn W, Tucci C E M, & Paz A R (2011) Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. *Hydrology and Earth System Sciences* 15(2):585-595
- Nouri M, Morid S, Karimi N, & Gholami H (2021) Spatial and temporal variation of temperature and precipitation trends of Aras transboundary river basin. *Iran-Water Resources Research* 17(3):104-117 (In Persian)
- Pierce D W, Cayan D R, Maurer E P, Abatzoglou J T, & Hegewisch K C (2015) Improved bias correction techniques for hydrological simulations of climate change. *Journal of Hydrometeorology* 16(6):2421-2442
- Raftery A E, Painter I S, & Volinsky C T (2005) BMA: An R package for Bayesian model averaging. *The Newsletter of the R Project* 5(2)
- Rezaei M & Ghasemieh H (2019) Assessing the impact of climate change on rainfall and temperature variability (Case Study: Kashan and Khur and Biabank stations). *Arid Biome Scientific Journal* 9(1):81-98 (In Persian)
- Rowell D P (2006) A demonstration of the uncertainty in projections of UK climate change resulting from regional model formulation. *Climatic Change* 79:243-257
- Teutschbein C & Seibert J (2012) Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology* 456:12-29
- Shabanpour F, Bazarafshan J, & Arakinjad Sh (2020) Evaluation of the effect of bias correction methods on the skill of seasonal precipitation forecasts of CFSv2 climate model. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 51(12):3017-3032 (In Persian)
- Wang L, Ranasinghe R, Maskey S, van Gelder P H A J M, & Vrijling J K (2016) Comparison of empirical statistical methods for downscaling daily climate projections from CMIP5 GCMs: A case study of the Huai River Basin, China. *International Journal of Climatology* 36(1):145-164
- Wilby R L, Harris I (2006) A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research* 42(2)
- Wilby R L, Wigley T M L, Conway D, Jones P D, Hewitson B C, Main J, & Wilks D S (1998) Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. *Water Resources Research* 34(11):2995-3008
- Zareian M J (2022) Effects of climate change on temperature and precipitation in Yazd province based on combined output of CMIP6 models. *Journal of Water and Soil Science* 26(2):91-105 (In Persian)
- Zareian M J, Dehban H, & Gohari R A (2022) Evaluation of the accuracy of CMIP6 models in estimating the temperature and precipitation of Iran based on a network analysis. *Journal of Water and Irrigation Management* 12(4):783-797 (In Persian)
- Zarrin A & Dadashi Roudbari A (2022) Analytical Note: The impact of climate change on heavy precipitation in Iran using the ensemble model of CMIP6. *Water and Sustainable Development* 8(4):119-124 (In Persian)