



## Comparison of CMIP6 climate models and quantile mapping bias correction methods in the simulation of precipitation

Nima Nemati Shishehgaran<sup>1</sup> | Fariba Babaeian<sup>2</sup> | Hojjat Mianabadi<sup>3</sup>

1. Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

E-mail: [Nima.Nemati@modares.ac.ir](mailto:Nima.Nemati@modares.ac.ir)

2. Department of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail:

[Fariba\\_babaeian@modares.ac.ir](mailto:Fariba_babaeian@modares.ac.ir)

3. Corresponding Author, Department of Water Resources Engineering and Management, Tarbiat Modares University,

Tehran, Iran. E-mail: [hmianabadi@modares.ac.ir](mailto:hmianabadi@modares.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** July. 18, 2023

**Revised:** Oct. 17, 2023

**Accepted:** Nov. 26, 2023

**Published online:** Feb. 20, 2024

**Keywords:**

Calibration,  
Climate Change,  
Projection Period,  
Rafsanjan Study Area,  
Validation.

### ABSTRACT

Due to inherent limitations of global climate models, their outputs are significantly biased in comparison to observed values which could provide unreliable climate projections. This study evaluates the performance of 10 global climate models of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) for simulating precipitation in the Rafsanjan study area over calibration (1986-2005) and validation (2006-2014) period. For correcting simulated precipitation, various quantile mapping-based bias correction methods applied in these two periods. Evaluating the performance of various climate models and quantile mapping-based bias correction methods and approaches is carried out through multiple statistical metrics including NSE, PBIAS, MAE, and KGE as well as Taylor's diagram. Finally, simulated precipitation of selected model extracted for projection period under SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP3-7.0 scenarios and corrected by suitable bias correction method. Results showed that the MPI-ESM1-2-LR model has better performance in simulating precipitation over calibration and validation periods compared to other climate models. The results of evaluating the performance of quantile mapping-based bias correction methods in both periods also showed that bernlnorm method performs better than others for the correction of simulated precipitation by climate models. In addition, the evaluation results of quantile mapping approaches including NTP, PT, and DDT in these periods demonstrated that NTP and PT have an acceptable performance compared to the DDT approach. Present study can help to improve the credibility of future climate projections using CMIP6 climate models.

Cite this article: Nemati Shishehgaran, N., Babaeian, F., & Mianabadi, H. (2024) Comparison of CMIP6 Climate Models and Quantile Mapping Bias Correction Methods in the Simulation of Precipitation, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (12), 1843-1862. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.366061.669585>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.366061.669585>



## مقایسه مدل‌های اقلیمی CMIP6 و روش‌های تصحیح اریبی نگاشت چندکی در شبیه‌سازی بارش

نیما نعمتی شیشه‌گران<sup>۱</sup> | فریبا بابائیان<sup>۲</sup> | حجت میان‌آبادی<sup>۳</sup><sup>۱</sup>. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. ایمیل: [Nima.Nemati@modares.ac.ir](mailto:Nima.Nemati@modares.ac.ir)<sup>۲</sup>. گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. ایمیل: [Fariba\\_babaeian@modares.ac.ir](mailto:Fariba_babaeian@modares.ac.ir)<sup>۳</sup>. نویسنده مسئول، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. ایمیل:[hmiyanabadi@modares.ac.ir](mailto:hmiyanabadi@modares.ac.ir)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

به دلیل محدودیت‌های ذاتی در مدل‌های اقلیمی، خروجی آن‌ها نسبت به مقادیر مشاهداتی دارای اریب قابل توجهی است که می‌تواند منجر به ارائه پیش‌نگری‌های اقلیمی غیرقابل اعتماد گردد. در مطالعه حاضر عملکرد ۱۰ مدل اقلیمی از مجموعه مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی بارش دوره‌های واسنجی (۲۰۰۵-۱۹۸۶) و صحت‌سنجی (۲۰۱۴-۲۰۰۶) برای محدوده مطالعاتی رفسنجان مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور اصلاح بارش شبیه‌سازی شده، روش‌های مختلف تصحیح اریبی نگاشت چندکی در این دو دوره اعمال شده و ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف، روش‌ها و رویکردهای تصحیح اریبی نگاشت چندکی با استفاده از معیارهای آماری NSE، PBIAS، MAE و KGE و دیاگرام تیلور انجام شد. در نهایت، بارش شبیه‌سازی شده از مدل منتخب برای دوره پیش‌نگری تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP3-7.0 استخراج و این مقادیر با استفاده از روش مناسب تصحیح اریبی اصلاح شدند. نتایج نشان داد که مدل MPI-ESM1-2-LR قابلیت بالایی در شبیه‌سازی بارش در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی نسبت به سایر مدل‌های اقلیمی دارد. نتایج ارزیابی عملکرد روش‌های تصحیح اریبی نگاشت چندکی نیز عملکرد بهتر روش bernlnorm را نسبت به سایر روش‌ها در اصلاح بارش شبیه‌سازی شده در هر دو دوره توسط مدل‌های اقلیمی نشان داد. همچنین، ماحصل ارزیابی رویکردهای نگاشت چندکی NTP، PT و DDT در این دوره‌ها حاکی از توانمندی بالای رویکردهای NTP و PT نسبت به رویکرد DDT بود. مطالعه حاضر می‌تواند به بهبود اعتبار پیش‌نگری‌های اقلیمی آینده با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP6 کمک کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۱

## واژه‌های کلیدی:

تغییر اقلیم،  
دوره پیش‌نگری،  
صحت‌سنجی،  
محدوده مطالعاتی رفسنجان و  
واسنجی.

استناد: نعمتی شیشه‌گران؛ نیما، بابائیان؛ فریبا، میان‌آبادی؛ حجت، (۱۴۰۲) مقایسه مدل‌های اقلیمی CMIP6 و روش‌های تصحیح اریبی نگاشت چندکی در شبیه‌سازی بارش، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۱۲)، ۱۸۴۳-۱۸۶۲. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.366061.669585>



© نویسنده‌گان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.366061.669585>

## مقدمه

تغییر اقلیم به دلیل اثرات نامطلوب بر بخش‌های مختلف از جمله منابع آب (Charlton & Arnell, 2011; Estrela *et al.*, 2012)، سلامت عمومی (Franchini & Mannucci, 2015; Watts *et al.*, 2015)، انرژی (van Ruijven *et al.*, 2019) و کشاورزی (Karimi *et al.*, 2018; Malhi *et al.*, 2021) یک موضوع جهانی است. با افزایش دما ظرفیت نگهداشت رطوبت اتمسفر بالا رفته و منجر به افزایش بارندگی می‌شود (Yang *et al.*, 2018). بروز تغییرات در الگوی بارش، بر سیستم‌های هیدرولوژیکی و دسترسی منابع آب اثر می‌گذارد که در نهایت به طور مستقیم بر اکوسیستم‌های طبیعی و بخش‌های مهم اجتماعی-اقتصادی مانند تأمین آب، انرژی، تولید محصولات کشاورزی، پرورش حیوانات و شیلات تاثیر خواهد گذاشت (Dore, 2005). علاوه بر این، افزایش دما همراه با تغییرات آبی در الگوهای بارش در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی بسیار متفاوت خواهد بود، به طوری که برخی از مناطق خشک‌تر شده و برخی دیگر مرطوب‌تر می‌شوند (Im *et al.*, 2015). بنابراین، مدیریت منابع آب در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای تحت شرایط تغییر اقلیم و به دلیل وجود عدم قطعیت‌های قابل توجه در سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، چالش بزرگی است که جوامع امروزی با آن مواجه هستند (Diallo *et al.*, 2012; N'Tcha M'Po, 2016).

با توجه به پیامدهای تغییر اقلیم، مطالعات متعددی در مورد پیش‌نگری‌ها<sup>۱</sup> و اثرات آن انجام شده است که در آن‌ها برای تحلیل تغییرات متغیرهای اقلیمی در دوره پایه (تاریخی) و آبی از مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس<sup>۲</sup> استفاده شده است (Hamed *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2020; Su *et al.*, 2020). شبیه‌سازی‌های حاصل از مدل‌های گردش عمومی (GCM)، منابع مناسبی برای پیش‌بینی کمی اقلیم آبی هستند که توسط پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده<sup>۳</sup> (CMIP) گردآوری شده است (Baker & Huang, 2014; Eyring *et al.*, 2016). با این حال، مدل‌های گردش عمومی بینشی نسبت به تغییرات اقلیمی گذشته و احتمالی آینده و وقوع رویدادهای حدی<sup>۴</sup> ایجاد می‌کنند (Ahmed *et al.*, 2019; Pour *et al.*, 2018). مدل‌های گردش عمومی توسط مراکز مدل‌سازی مختلفی توسعه داده می‌شوند؛ بنابراین تفاوت‌هایی در پیش‌نگری آن‌ها از متغیرهای اقلیمی در بسیاری از نقاط جهان وجود دارد. علاوه بر این، هر چند تمامی این مدل‌ها بارش و دمای کره زمین را شبیه‌سازی می‌کنند، اما دارای درجه تفکیک<sup>۵</sup> مکانی متفاوتی هستند که موجب عدم تشخیص منشاء اختلافات می‌شود (Song *et al.*, 2020). مدل‌های GCM اطلاعات قابل اعتمادی را برای متغیرهای هیدرولوژیکی با تفکیک مکانی کمتر از ۲۰۰ کیلومتر در مقیاس ماهانه یا روزانه ارائه نمی‌دهند و به این دلیل مناسب فرآیندهای هیدرولوژیکی نیستند (Fang *et al.*, 2015). لذا، به منظور غلبه بر محدودیت‌های خروجی مدل‌های GCM، پیش‌نگری بارش باید با درجه تفکیک مکانی مناسب تولید شود که نشانگر بهتر تغییرات الگوی بارش است (Mendez *et al.*, 2020).

به منظور کاهش اختلاف‌ها بین مدل‌های اقلیمی، افزایش دقت و تغییر درجه تفکیک آن‌ها به مقیاس‌های مورد نظر (مقیاس محلی)، روش‌های ریزمقیاس‌نمایی<sup>۶</sup> و تصحیح اریبی<sup>۷</sup> مختلفی توسعه یافته است (N'Tcha M'Po, 2016). به طور کلی، با توجه به محدودیت‌های ذاتی در مدل‌های اقلیمی، خروجی آن‌ها نسبت به مقادیر مشاهداتی دارای اریب قابل توجهی است که می‌تواند منجر به ارائه پیش‌نگری‌های غیرقابل اعتماد گردد (Kim *et al.*, 2015; Mendez *et al.*, 2020). اگرچه موضوع تصحیح اریبی داده، بحث برانگیز است (Ehret *et al.*, 2013; Muerth *et al.*, 2012)، اما از روش‌های مختلف آن به طور موفقیت‌آمیز و گسترده به منظور ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای اقلیمی در مطالعات تغییر اقلیم استفاده شده است (Chen *et al.*, 2019). شبیه‌سازی دما و بارش توسط مدل‌های گردش عمومی باید با دقت زیادی انجام شوند، زیرا اغلب دارای اریب قابل توجهی هستند. دلیل وجود اریب در متغیرهای اقلیمی مستخرج از مدل‌های گردش عمومی جو می‌تواند به علت خطاهای سیستماتیک ناشی از مفهوم‌سازی ناقص<sup>۸</sup>، گسسته‌سازی<sup>۹</sup> و میانگین‌گیری مکانی در سلول‌های شبکه<sup>۱۰</sup> مدل باشد (Teutschbein & Seibert, 2012). این امر استفاده از شبیه‌سازی GCM، به عنوان داده‌های ورودی برای مطالعات تحلیل

1. Projection
2. Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCM)
3. Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)
4. Extreme Events
5. Resolution
6. Downscaling
7. Bias Correction
8. Imperfect Conceptualization
9. Discretization
10. Grid Cell



اثر هیدرولوژیکی را پیچیده‌تر می‌کند. لذا، روش‌های مختلف تصحیح اریبی برای کمک به رفع مشکلات خروجی GCMها استفاده می‌شود (Chen *et al.*, 2019).

روش‌های تصحیح اریبی شامل روش‌های آماری و پویا هستند که برای حذف اریب سیستماتیک در خروجی مدل‌های اقلیمی و تبدیل متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس به متغیرهایی با مقیاس مکانی مناسب استفاده می‌شوند (Maraun *et al.*, 2010). رویکرد ریزمقیاس‌نمایی آماری یک روش نسبتاً سریع و کارآمد جهت ایجاد رابطه آماری بین متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس (مستخرج از مدل‌های اقلیمی) و داده‌های مشاهداتی به شمار می‌رود (He *et al.*, 2016). روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری مختلفی به منظور تصحیح اریبی خروجی GCMها توسعه یافته‌اند. این روش‌ها از مقیاس‌دهی ساده تا بکارگیری روش‌های پیچیده‌نگاشت احتمالاتی و مولدهای اقلیمی دسته‌بندی می‌شوند (Teutschbein & Seibert, 2012) که هر کدام تحت شرایط مختلف عملکردهای متفاوتی را به نمایش می‌گذارند (Enayati *et al.*, 2021; Gudmundsson *et al.*, 2012; Teutschbein & Seibert, 2012).

با توجه به بررسی مطالعات صورت گرفته در زمینه ارزیابی و تصحیح اریبی متغیرهای اقلیمی، تاکنون مطالعات نسبتاً اندکی در راستای دسته‌بندی روش‌ها و رویکردهای تصحیح اریبی به روش نگاشت چندکی به صورت توأمان و در کنار هم صورت گرفته است (Enayati *et al.*, 2021; Gudmundsson *et al.*, 2012; Teutschbein & Seibert, 2012). به طوری که در بسیاری از مطالعات صرفاً روش بخصوصی مورد ارزیابی قرار گرفته و به بررسی ظرفیت و توانایی روش‌ها و همچنین رویکردهای نگاشت چندکی در کنار هم پرداخته نشده است. بنابراین، این مطالعه با اهداف (۱) ارزیابی عملکرد ۱۰ مدل از مجموعه مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی بارش به منظور انتخاب مدل مناسب برای پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی و (۲) ارزیابی روش‌ها و رویکردهای تصحیح اریبی QM در اصلاح بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های اقلیمی انجام می‌شود.

محدوده مطالعاتی رفسنجان به دلیل اینکه در حاشیه کویر واقع شده و میزان بارندگی در آن کم و فاقد رودخانه دائمی است، یکی از مناطق بحرانی از نظر اضافه برداشت آب زیرزمینی در کشور ایران به شمار می‌رود. لذا، افزایش احتمالی دما همراه با تغییرات آبی در الگوهای بارش به دلیل اثرات تغییر اقلیم می‌تواند منجر به افزایش آسیب‌پذیری این محدوده نسبت به خطرات محتمل آبی در زمینه منابع آب، کشاورزی، اقتصادی-اجتماعی و محیط زیستی شود. تاکنون روش‌های تصحیح اریبی متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های اقلیمی در محدوده مطالعاتی رفسنجان مورد ارزیابی قرار نگرفته است. با توجه به این که پیش‌نگری تغییرات آبی بارش در این محدوده که تأثیر مستقیمی بر توسعه اجتماعی و اقتصادی دارد، باید از اعتبار مقبولی برخوردار باشد، لذا، انتخاب مدل و همچنین روش تصحیح اریبی مناسب جهت برآورد دقیق‌تر تغییرات بارش آبی متأثر از تغییر اقلیم طی این مطالعه می‌تواند در مطالعات اقلیمی و همچنین سیاست‌گذاری‌های آبی در این منطقه کمک‌کننده باشد.

## پیشینه پژوهش

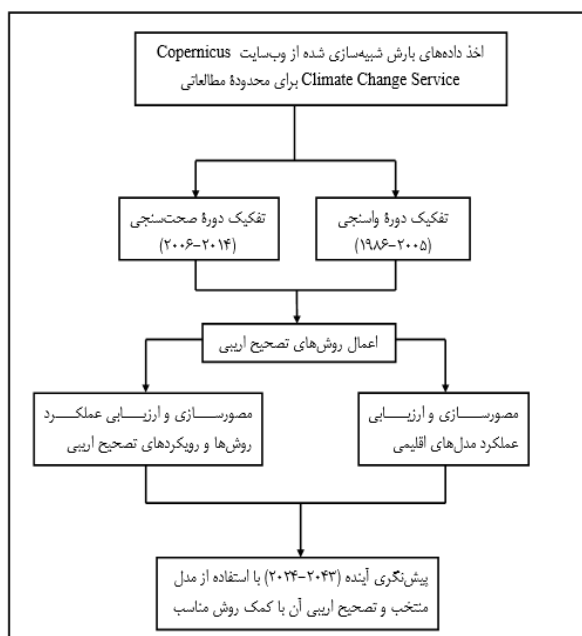
تلاش‌های فراوانی در ارائه روش‌های تصحیح اریبی و کاهش عدم قطعیت‌های اقلیمی جهت دستیابی به برآوردهای مطلوب از متغیرهای اقلیمی در دوره آبی صورت گرفته است. برای مثال، (Teutschbein and Seibert 2012) از شش روش تصحیح اریبی برای اصلاح داده‌های بارش و دمای خروجی از ۱۱ مدل اقلیمی منطقه‌ای<sup>۱</sup> در پنج حوضه آبریز در سوئد استفاده کردند. نتایج نشان داد که اکثر روش‌ها قادر به تصحیح داده‌های بارش و دما تا حد معینی هستند، اما برخی از روش‌ها مانند روش‌های نگاشت توزیع<sup>۲</sup> و تبدیل توانی<sup>۳</sup>، در رویدادهای حدی هیدرولوژیکی عملکرد خوبی دارند. (Chen *et al.* 2013) عملکرد شش روش اصلاح اریبی را برای بارش شبیه‌سازی شده توسط چهار مدل اقلیمی منطقه‌ای در ۱۰ حوضه آبریز آمریکای شمالی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که روش‌های تصحیح اریبی اعمال شده قادر به اصلاح اریب داده‌های بارش هستند و همچنین عملکرد مدل‌سازی هیدرولوژیکی بیشتر به موقعیت مکانی حوضه‌ها و انتخاب روش‌های تصحیح اریبی بستگی دارد. در مطالعه‌ای دیگر، عملکرد روش‌های مختلف تصحیح اریبی مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاصل از آن نشان‌دهنده برتری روش‌های نگاشت چندکی<sup>۴</sup> نسبت به روش‌های دیگر است (Themeßl *et al.*, 2011). در کنار مطالعات ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف تصحیح اریبی، (Enayati *et al.* 2021) به ارزیابی قابلیت روش‌های نگاشت چندکی به منظور تصحیح

1. Regional Climate Model (RCM)  
2. Distribution Mapping (DM)  
3. Power Transformation (PT)  
4. Quantile Mapping (QM)

اریبی داده‌های بارش و دما شبیه‌سازی شده توسط ترکیب مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای و جهانی در حوضه آبریز رودخانه کرخه پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشانگر وجود اختلاف در روش‌های اصلاح اریبی نگاشت چندی به دلیل پارامترها، توابع تبدیل و شرایط توپوگرافی است. بر اساس نتایج به دست آمده در پژوهش مذکور از شرایط توپوگرافی زیرحوضه‌ها، روش‌های QUANT<sup>۱</sup> و RQUANT<sup>۲</sup> جهت تصحیح اریبی مقادیر بارش و تمامی روش‌های نگاشت چندی به جز PTF (Scale)<sup>۳</sup> و SSPLIN<sup>۴</sup> جهت تصحیح اریبی مقادیر دما پیشنهاد می‌شوند. همچنین (Gudmundsson et al., 2012) در مطالعه‌ای به بررسی رویکردهای نگاشت چندی تبدیلات مشتق از توزیع<sup>۵</sup>، پارامتری<sup>۶</sup> و ناپارامتری<sup>۷</sup> در پیش‌پردازش<sup>۸</sup> خروجی مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای در مقایسه با داده‌های مشاهداتی بارش از ۸۲ ایستگاه هواشناسی در نروژ پرداختند. طبق این مطالعه، رویکرد تبدیلات ناپارامتری، بیشترین توانمندی را در کاهش اریب سیستماتیکی بارش مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای نسبت به سایر رویکردها دارد.

## مواد و روش‌ها

جهت نیل به هدف مقاله، در ابتدا مقادیر شبیه‌سازی شده بارش توسط ۱۰ مدل اقلیمی در دو دوره واسنجی (۲۰۰۵-۱۹۸۶) و صحت‌سنجی (۲۰۱۴-۲۰۰۶) از وب‌سایت Copernicus Climate Change Service<sup>۹</sup> (C3S) برای محدوده مطالعاتی رفسنجان درون‌یابی شده و اخذ گردید. سپس این مقادیر با استفاده از روش‌های تصحیح اریبی نگاشت چندی در هر دوره اصلاح شده و نتایج با مقادیر مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت مدل اقلیمی، روش و رویکرد تصحیح اریبی مناسب با استفاده از معیارهای ارزیابی انتخاب شد. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی مدل منتخب برای دوره پیش‌نگری تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP3-7.0 از وب‌سایت مذکور استخراج شده و روش مناسب تصحیح اریبی بر این نتایج اعمال گردید. نتایج تصحیح شده مدل منتخب در این سه سناریو با مقادیر مشاهداتی مطابق با دوره واسنجی مورد مقایسه قرار گرفت. روند و روش انجام کار در شکل ۱ ارائه شده و در ادامه نیز به توصیف و بررسی منطقه مطالعاتی، مدل‌های اقلیمی، روش‌های تصحیح اریبی نگاشت چندی از لحاظ نظری و معیارهای ارزیابی پرداخته می‌شود.



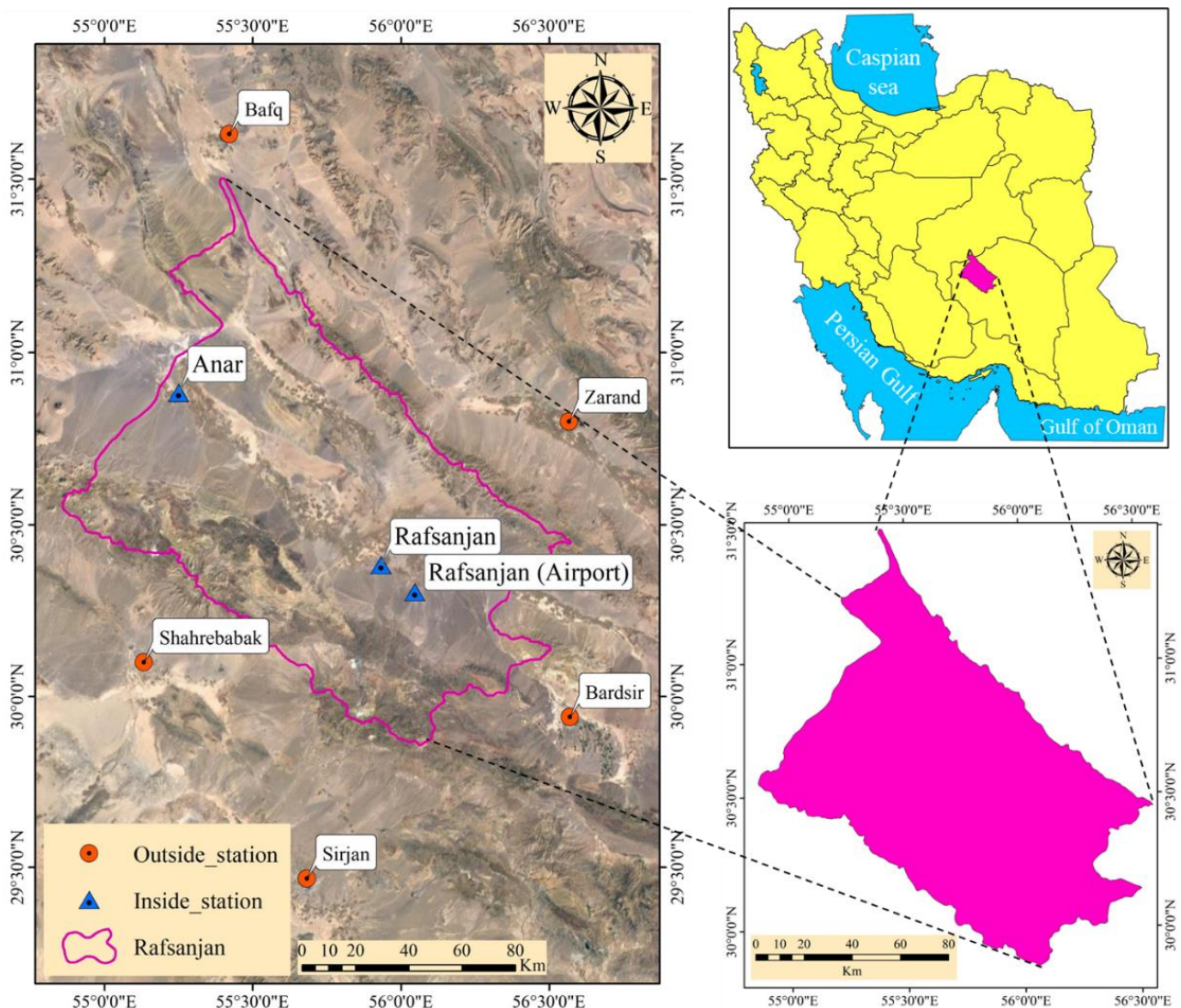
شکل ۱. فلوچارت روش‌شناسی پژوهش

1. Empirical Quantiles
2. Robust Empirical Quantiles
3. Parametric transformation functions (Scale)
4. Smoothing Splines
5. Distribution Derived Transformation (DDT)
6. Parametric Transformation (PT)
7. Non-Parametric Transformation (NPT)
8. Post-Processing
9. <https://climate.copernic.us/>

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی رفسنجان با وسعت ۱۲۴۲۱ کیلومترمربع یکی از ۱۲ محدوده مطالعاتی حوضه آبریز درانجیر و ساغند بوده و در غرب این حوضه آبریز قرار دارد. از این وسعت ۶۶۹۲/۸۴ کیلومترمربع را دشت و ۵۷۲۸/۱۶ کیلومترمربع را ارتفاعات تشکیل می‌دهند (شکل ۲). دشت رفسنجان به دلیل واقع شدن در حاشیه کویر دارای تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد و خشک است. این محدوده به دلیل واقع شدن در حاشیه کویر و میزان بارندگی کم فاقد رودخانه دائمی است و وابستگی شدیدی به آب‌های زیرزمینی به عنوان مهم‌ترین منبع آب دارد. اقتصاد این منطقه به طور شدید به کشاورزی تک محصولی پسته وابسته است، به طوری که افزایش غیراصولی سطح زیرکشت پسته در رفسنجان منجر به وارد آمدن فشار بیشتری به منابع آب منطقه و از دست رفتن منابع عظیم آب زیرزمینی گردیده است (غفوری‌فرد و همکاران، ۱۳۹۴). عدم وجود رودخانه‌های دائمی در این محدوده موجب تأمین عمده نیازهای آبی از طریق آبخوان ابرفتی شده و افزایش برداشت و روند افت سطح آب زیرزمینی باعث شده است تا این دشت قبل از سال ۱۳۵۷ ممنوعه اعلام شود. ولی با این حال همچنان برداشت از آب زیرزمینی در این محدوده روند صعودی دارد (بابائیان و همکاران، ۱۳۹۵).

برای انجام پژوهش حاضر از آمار و اطلاعات هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مطالعاتی رفسنجان استفاده شد. این محدوده شامل سه ایستگاه سینوپتیک انار، رفسنجان و رفسنجان (فرودگاه) بوده و جهت تهیه اطلاعات بارش منطقه از آمار ثبت شده در سه ایستگاه مطروحه و ایستگاه‌های مجاور از طریق سازمان هواشناسی کشور اقدام گردید. در جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های داخل و خارج محدوده مطالعاتی ارائه شده و شکل ۲ نیز پراکنندگی ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک داخل و خارج از محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. موقعیت محدوده مطالعاتی رفسنجان

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک موجود در محدوده مطالعاتی رفسنجان و مجاور آن

نام استان	نام ایستگاه به فارسی	کد ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا	تاریخ شروع کار	تاریخ پایان کار
کرمان	انار	۴۰۸۳۹	۵۵/۲۵	۳۰/۸۸	۱۴۰۹	۱۹۸۶/۰۱/۰۱	تاکنون
کرمان	رفسنجان	۹۹۵۶۲	۵۵/۹۳	۳۰/۳۸	۱۵۲۴	۲۰۱۱/۱۱/۰۱	تاکنون
کرمان	رفسنجان (فرودگاه)	۸۸۱۷۰	۵۶/۰۴	۳۰/۳	۱۶۰۵	۱۹۹۲/۰۳/۰۱	۲۰۱۱/۱۰/۳۱
کرمان	سیرجان	۴۰۸۵۱	۵۵/۶۸	۲۹/۴۶	۱۷۳۹	۱۹۸۵/۰۱/۰۱	تاکنون
کرمان	شهربابک	۴۰۸۴۹	۵۵/۱۳	۳۰/۱	۱۸۳۴	۱۹۸۷/۰۱/۰۱	تاکنون
کرمان	بردسیر	۹۹۵۷۶	۵۶/۵۷	۲۹/۹۴	۲۰۵۰	۲۰۱۹/۰۹/۳۰	تاکنون
کرمان	زرند	۹۹۵۴۹	۵۶/۵۶	۳۰/۸	۱۶۷۰	۲۰۰۳/۰۱/۰۱	تاکنون
یزد	یافقی	۴۰۸۲۰	۵۵/۴۲	۳۰/۶۲	۹۹۱,۳	۱۹۹۳/۰۱/۰۱	تاکنون

متناسب با اهداف این پژوهش، اطلاعات بارش هر سه ایستگاه داخل محدوده از تاریخ شروع کار تا آخر سال ۲۰۱۴ دریافت شد. به منظور انجام پژوهش، کامل بودن داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی و از طرفی یکسان بودن طول دوره آماری داده‌های تمامی ایستگاه‌های استفاده شده مورد نیاز است. اما با توجه به آمار دریافتی از سازمان هواشناسی کشور، ایستگاه‌های رفسنجان و رفسنجان (فرودگاه) دارای نقصان داده بودند. ایستگاه رفسنجان (فرودگاه) به دلیل بیشتر بودن طول دوره آماری (تقریباً ۲۰ سال) نسبت به ایستگاه رفسنجان، به عنوان ایستگاه مبنا انتخاب گردید و جهت تکمیل و بازسازی نقصان داده آن از اطلاعات ایستگاه انار به دلیل بالا بودن میزان همبستگی آن با ایستگاه رفسنجان (فرودگاه) استفاده شد. در این مطالعه طول دوره آماری ۲۹ سال (۲۰۱۴-۱۹۸۶) در نظر گرفته شد که ۲۰ سال (۲۰۰۵-۱۹۸۶) از این اطلاعات جهت انجام مقایسه مقادیر مشاهداتی با شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی و ۹ سال (۲۰۱۴-۲۰۰۶) آن نیز برای دوره صحت‌سنجی لحاظ گردید.

## مدل‌های CMIP6

مدل‌های اقلیمی به طور عمده برای پیش‌نگری اقلیم آینده زمین استفاده می‌شوند. اطلاعات بارش روزانه ۱۰ مدل CMIP6 برای دوره‌های واسنجی (۲۰۰۵-۱۹۸۶)، صحت‌سنجی (۲۰۱۴-۲۰۰۶) و در نهایت برای دوره پیش‌نگری (۲۰۲۳-۲۰۲۴) برای منطقه مطالعاتی رفسنجان با توجه به قابلیت وب‌سایت Copernicus Climate Change Service (C3S) میان‌یابی شده و استخراج گردید. انتخاب مدل‌ها با توجه به ادبیات پیشین صورت گرفته (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021; Yazdandoost et al., 2021; Hong et al., 2021) و هر مدل اقلیمی منتخب از یک مؤسسه در CMIP6 انتخاب شد. با توجه به این که فرمت داده‌های اخذ شده به صورت NetCDF<sup>۱</sup> است، این داده‌ها جهت استفاده در محیط نرم‌افزار ArcGIS مورد پردازش قرار گرفتند. اطلاعات هر یک از مدل‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مدل‌های اقلیمی CMIP6 استفاده شده در پژوهش حاضر

نام مدل	درجه تفکیک	مؤسسه/کشور
ACCESS-CM2	۱/۹°×۱/۳°	مرکز عالی شورای تحقیقات استرالیا برای علوم سیستم اقلیمی، استرالیا
BCC-CSM2-MR	۱/۱۳°×۱/۱۳°	مرکز اقلیم پکن، چین
CNRM-ESM2-1	۱/۴۱°×۱/۴۱°	مرکز ملی تحقیقات هواشناسی، تولوز، فرانسه
EC-EARTH3	۰/۳۵°×۰/۳۵°	کنسرسیوم EC-Earth، اروپا
GFDL-ESM4	۱/۲۵°×۱/۰۰°	آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیکی (GFDL)، ایالات متحده آمریکا
IPSL-CM6A-LR	۲/۵°×۱/۳°	مؤسسه Pierre Simon Laplace (IPSL)، پاریس، فرانسه
MIROC6	۱/۴۱°×۱/۴۱°	آژانس علوم و فناوری دریایی-زمینی ژاپن (JAMSTEC)
MPI-ESM1-2-LR	۰/۹۴°×۰/۹۴°	مؤسسه هواشناسی ماکس پلانک (MPI-M)، آلمان
MRI-ESM2-0	۱/۱۳°×۱/۱۳°	موسسه تحقیقات هواشناسی، ایباراکی، ژاپن
NorESM2-MM	۲/۵°×۱/۸۹°	مرکز اقلیم نروژ، نروژ

### روش نگاشت چندک

روش نگاشت چندک که از آن با عناوین چندک به چندک<sup>۱</sup> و تطبیق تابع توزیع تجمعی<sup>۲</sup> نیز یاد می‌شود (Li et al., 2018)، روشی مناسب در پس‌پردازش پیش‌بینی‌های GCM است که قابلیت خوبی در حذف گشتاور اول و دوم آماری (میانگین و انحراف معیار) دارد (Ajaaj et al., 2016). این روش به جای ایجاد تابع توزیع تجمعی از روزهای تر، می‌تواند تابع توزیع تجمعی روزهای تر و روزهای خشک را تولید کند. روش QM در اصل از تابع تبدیل تجربی نشأت گرفته و موفقیت اصلاح آریبی توسط آن در خروجی مدل‌های GCM و RCM اثبات شده است (قلمی و همکاران، ۱۴۰۱). روش QM شکل توزیع بارش روزانه را بر اساس تابع توزیع تجمعی تجربی<sup>۳</sup> نقطه‌ای ساخته شده توسط داده‌های مشاهداتی روزانه تصحیح می‌کند (Chen et al., 2013). به عبارتی روش QM توزیع داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های اقلیمی را جهت تطبیق با توزیع داده‌های مشاهداتی، به کمک تابع تبدیل<sup>۴</sup> اصلاح می‌کند (Block et al., 2009). تابع تبدیل شامل تبدیل تابع توزیع متغیرهای شبیه‌سازی شده به تابع توزیع مقادیر مشاهداتی با استفاده از یک تابع ریاضی است که از لحاظ ریاضی می‌توان آن را به شکل رابطه (۱) بیان کرد (Piani et al., 2010).

$$X_o = f(X_m) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه فوق،  $X_o$  مقادیر مشاهداتی،  $X_m$  مقادیر مدل شده و  $f()$  نیز نشانگر تابع تبدیل مقادیر مدل شده است.

همانطور که اشاره شد، تابع تبدیل، تابع توزیع متغیرهای شبیه‌سازی شده را توسط یک تابع ریاضی به تابع توزیع مقادیر مشاهداتی

تبدیل می‌کند و چنانچه توزیع متغیر مورد نظر (مانند بارش و دما) مشخص باشد، تبدیل به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$P_o = F_o^{-1}(F_m(P_m)) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه فوق،  $F_m$  معرف CDF متناظر با متغیر شبیه‌سازی شده مورد نظر ( $P_m$ ) و  $F_o^{-1}$  نیز معکوس CDF متناظر با مقادیر

مشاهداتی ( $P_o$ ) است (Gudmundsson et al., 2012).

برای مدل‌سازی رابطه QM، می‌توان به طور مستقیم از تبدیلات توزیع‌های نظری، تبدیلات پارامتری و تبدیلات ناپارامتری استفاده

کرد. در ادامه به بررسی هر یک از موارد مذکور پرداخته می‌شود.

### تبدیلات مشتق از توزیع

رویکرد تبدیلات مشتق از توزیع کاربرد گسترده‌ای جهت تصحیح بارش شبیه‌سازی شده داشته (Li et al., 2010; Piani et al., 2010; Teutschbein & Seibert, 2012) و در عمده مطالعات تابع  $F$  به عنوان ترکیبی از توزیع‌های برنولی و گاما در نظر گرفته شده که در آن

توزیع برنولی برای مدل‌سازی احتمال وقوع بارندگی و توزیع گاما برای مدل‌سازی شدت بارش استفاده می‌شود (Cannon, 2008). در

مطالعه حاضر،  $F$  ترکیبی از توزیع‌های برنولی-گاما، برنولی-ویبول، برنولی-لوگ‌نرمال<sup>۵</sup> و برنولی-نمایی<sup>۶</sup> در نظر گرفته شده است.

### تبدیلات پارامتری

در تصحیح آریبی نگاشت چندکی با رویکرد تبدیلات پارامتری، توابع تبدیل پارامتری جهت ایجاد رابطه چندک-چندک اعمال می‌شوند. در

زیر تعدادی از توابع تبدیل که برای ایجاد رابطه چندک-چندک پیشنهاد شده‌اند به صورت ریاضی بیان شده است.

$$P_o = bP_m \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$P_o = a + bP_m \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$P_o = bP_m^c \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$P_o = b(P_m - x_0)^c \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$P_o = (a + bP_m)(1 - e^{\frac{-P_m}{\tau}}) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$P_o = (a + bP_m)(1 - e^{\frac{-P_m - x_0}{\tau}}) \quad \text{رابطه (۸)}$$

1. Quantile-to Quantile Transform
2. Cumulative Distribution Function (CDF) Matching
3. Empirical Cumulative Distribution Function (ecdf)
4. Transfer Function (TF)
5. Bernoulli-Gamma (BG)
6. Bernoulli-Weibull (BW)
7. Bernoulli-Lognormal (BL)
8. Bernoulli-Exponential (BE)

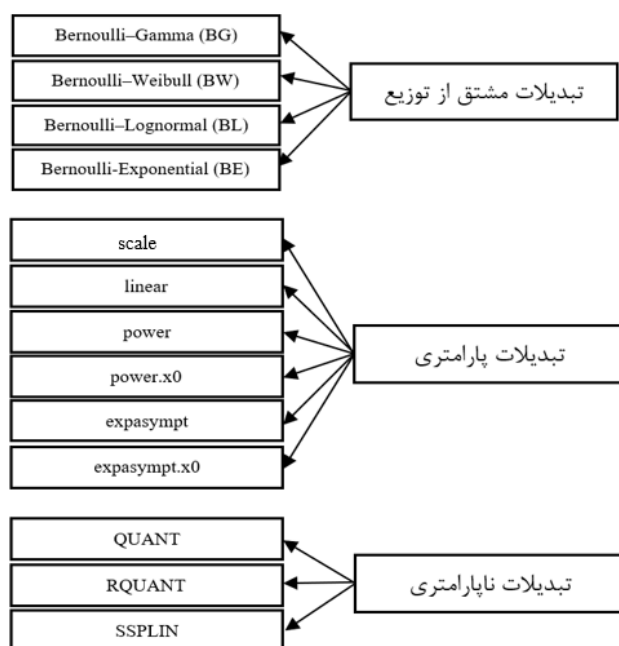


در روابط فوق،  $P_m$  و  $P_0$  به ترتیب احتمال متغیرهای مشاهداتی و مدل شده بوده و  $a$ ،  $b$ ،  $c$ ،  $\gamma$  و  $\tau$  نیز پارامترهایی هستند که جهت واسنجی اعمال می‌شوند. از روابط سه تا هشت انواع مختلف تصحیح مقادیر متغیرهای مدل شده به روش نگاشت چندکی با استفاده از توابع تبدیل پارامتری ارائه شده است. نام هر یک از روابط به ترتیب عبارت است از: (۳) PTF: Scale، (۴) PTF: linear، (۵) PTF: power، (۶) PTF: power.x0، (۷) PTF: expasympt و (۸) PFT: expasympt.x0.

### تبدیلات ناپارامتری

در روش‌های ناپارامتری، از توزیع‌های تجربی داده‌ها استفاده می‌شود و بنابراین هیچ فرض اولیه‌ای از توزیع‌های نظری خاص در مورد داده‌ها وجود ندارد (Enayati *et al.*, 2021). در این روش تابع توزیع تجمعی مقادیر شبیه‌سازی شده با تابع توزیع مقادیر مشاهداتی تطبیق داده می‌شود. از جمله روش‌های ناپارامتری تصحیح اریبی داده به روش نگاشت چندکی می‌توان به QUANT، RQUANT و SSPLIN اشاره کرد.

در این پژوهش جهت تصحیح اریبی مقادیر بارش شبیه‌سازی شده به روش نگاشت چندکی از نرم‌افزار R و پکیج qmap استفاده شد. پکیج qmap این قابلیت را به کاربر می‌دهد تا برای مدل‌سازی چندک-چندک از توابع توزیع تجمعی تجربی یا رگرسیون غیرپارامتری استفاده نماید (قلمی و همکاران، ۱۴۰۱). در شکل ۳ روش‌های تصحیح اریبی مقادیر شبیه‌سازی شده بارش به روش نگاشت چندکی در پژوهش حاضر ارائه شده است.



شکل ۳. روش‌های نگاشت چندکی استفاده شده در مطالعه حاضر

### معیارهای ارزیابی

در این مطالعه، عملکرد روش‌های مختلف نگاشت چندکی اعمال شده بر داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های GCM جهت تصحیح اریب آن‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفت. از شاخص‌های آماری جهت ارزیابی عملکرد مدل‌ها استفاده می‌شود تا تشابه بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در قالب مقادیر آماری ارائه شود (Gupta *et al.*, 2009). پنج معیار ارزیابی جهت ارائه کامل عملکرد روش‌ها از جمله، دیاگرام تیلور<sup>۱</sup>،  $NSE^2$ ،  $MAE^3$ ،  $PBIAS^4$  و  $KGE^5$  به کار گرفته شد. این پنج معیار با توجه به اینکه به طور گسترده برای ارزیابی نتایج عملکرد GCM استفاده می‌شوند، انتخاب شدند (Enayati *et al.*, 2021; Salman *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2020).

دیاگرام تیلور (Taylor, 2001) جهت نمایش بصری عملکرد هر یک از مدل‌های اقلیمی به کار گرفته شد. از این دیاگرام جهت

1. Taylor Diagram  
 2. Nash-Sutcliffe Efficiency  
 3. Mean Absolute Error  
 4. Percent Bias  
 5. Kling-Gupta Efficiency

نمایش میزان نزدیکی الگوی دو یا چند دسته داده از نظر همبستگی، خطای  $CRMSE^1$  و دامنه تغییرات داده‌ها (بر اساس انحراف معیار) استفاده می‌شود.  $CRMSE$  تفاوت بین داده‌های مدل‌های اقلیمی و مشاهداتی را نشان می‌دهد. خطوط آبی در دیاگرام نشانگر مقادیر ثابت  $CRMSED^2$  هستند و مقادیر با فاصله گرفتن از مرکز (داده‌های مشاهداتی) افزایش می‌یابند.

معیارهای ارزیابی  $NSE$ ،  $MAE$ ،  $PBIAS$  و  $KGE$  به ترتیب طبق روابط (۹)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) بیان می‌شوند. معیار ارزیابی  $NSE$  برای بررسی صحت<sup>۳</sup> بارش مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های اقلیمی در پژوهش‌های منابع آبی استفاده می‌شود (Song *et al.*, 2020). معیار ارزیابی  $MAE$  تفاوت بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را در متغیرهای مدنظر توصیف می‌کند. معیار ارزیابی  $PBIAS$  متوسط ارباب داده‌های شبیه‌سازی شده به بزرگ‌تر یا کوچک‌تر بودن نسبت به مقادیر مشاهداتی را اندازه‌گیری می‌کند (Moriasi *et al.*, 2007). مقادیر مثبت و منفی برای  $PBIAS$  به ترتیب نشانگر کم برآورد و بیش برآورد متغیرها توسط مدل‌های اقلیمی است. معیار  $KGE$ ، مشخصه‌های همبستگی پیرسون<sup>۴</sup> (t)، دامنه تغییرات مکانی و واریانس نرمال شده را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. ترکیب این سه شاخص آماری، اطلاعات ارزشمندی جهت تشخیص عملکرد مدل ارائه می‌دهد. معیار  $KGE$  کمتر در معرض مقادیر حدی بوده و توانایی بیشتری برای توصیف و کمی‌سازی عملکرد کلی مدل‌های اقلیمی دارد (Radcliffe & Mukundan, 2017).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z_m(X_i) - Z_o(X_i))^2}{\sum_{i=1}^n (Z_o(X_i) - \bar{Z}_o(X_1))^2} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$MAE(Z_m) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_m(X_i) - Z_o(X_i)| \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_o(X_i) - Z_m(X_i))}{\sum_{i=1}^n Z_o(X_i)} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

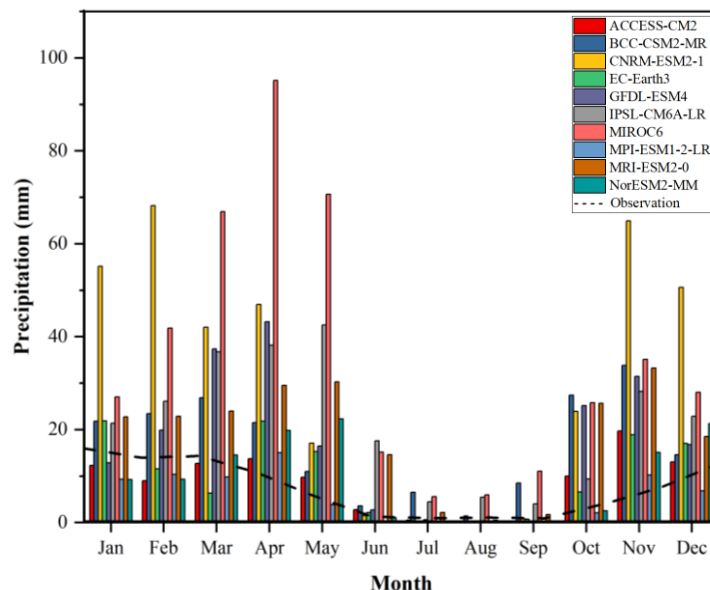
$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\mu_{GCM}}{\mu_{ref}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{GCM}/\mu_{GCM}}{\sigma_{ref}/\mu_{ref}} - 1\right)^2} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

در روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱)،  $Z_m(X_i)$  مقدار برآورد شده متغیر اقلیمی توسط مدل‌های اقلیمی (بر حسب واحد متغیر اقلیمی)،  $Z_o(X_i)$  مقدار مشاهده شده متغیر اقلیمی (بر حسب واحد متغیر اقلیمی) و  $n$  تعداد داده‌های پیش‌بینی شده است. در رابطه (۱۲) نیز  $\mu_{ref}$  و  $\mu_{GCM}$  به ترتیب میانگین داده‌های مدل‌های اقلیمی و داده‌های مشاهداتی بوده و  $\sigma_{ref}$  و  $\sigma_{GCM}$  و نیز انحراف معیار داده‌های مدل‌های اقلیمی و داده‌های مشاهداتی هستند. معیارهای ارزیابی  $KGE$  و  $NSE$  بین منفی بی‌نهایت و یک متغیر بوده و هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده بیشتر بودن دقت و صحت مدل است.  $MAE$  واحدی با بعد  $x$  دارند که کمتر شدن آن‌ها نشان از قوی بودن ارتباط میان مقادیر برآورد شده با مقادیر مشاهداتی دارد. مقدار معیار ارزیابی  $PBIAS$  نیز از منفی بی‌نهایت تا مثبت بی‌نهایت متغیر بوده و هر چه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد، نشانگر عملکرد مطلوب مدل در برآورد متغیرهای اقلیمی است.

## نتایج و بحث

### خروجی مدل‌های اقلیمی

شکل ۴ نشانگر بارش متوسط ماهانه درازمدت داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های اقلیمی در دوره (۲۰۱۴-۱۹۸۶) است. نتایج بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های اقلیمی منتخب  $CMIP6$  نشان می‌دهند که تمامی مدل‌ها مقدار بارش را در مقیاس ماهانه در ماه‌های آوریل و نوامبر بیش از مقادیر مشاهداتی برآورد کرده‌اند. همچنین در ماه‌های می و دسامبر نیز تمامی مدل‌ها، به جز یک مدل میزان بارش را بیش از بارش مشاهداتی شبیه‌سازی کرده‌اند. به طور کلی، عمده مدل‌ها مقدار بارش را در اکثر ماه‌ها به جز ماه‌های ژانویه، آگوست و سپتامبر بیش از مقادیر مشاهداتی برآورد کرده‌اند. بیشترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده متعلق به مدل  $MIROC6$  در ماه آوریل به میزان ۸۵/۱ میلی‌متر بوده و کمترین اختلاف نیز توسط مدل  $ACCESS-CM2$  در ماه آگوست به میزان ۰/۰۶ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.



شکل ۴. متوسط بارش ماهانه درازمدت شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره (۱۹۸۶-۲۰۱۴)

#### ارزیابی مدل‌های CMIP6 پس از تصحیح اریبی

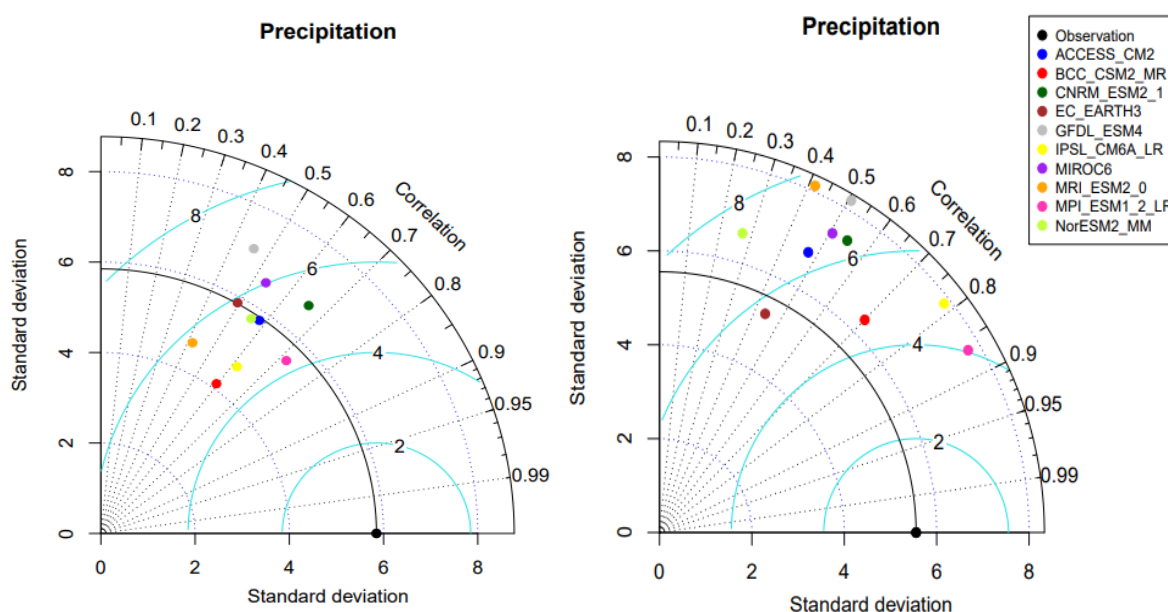
جهت ارزیابی دقت مدل‌های اقلیمی، دوره واسنجی (۱۹۸۶-۲۰۰۵) و صحت‌سنجی (۲۰۰۶-۲۰۱۴) مشترک از خروجی مدل‌های CMIP6 و داده‌های مشاهداتی برای متغیر اقلیمی بارش انتخاب گردید. مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های منتخب تحت روش‌های مختلف نگاشت چندکی مذکور تصحیح شده و خروجی هر یک از مدل‌ها تحت تمامی روش‌های تصحیح اریبی میانگین‌گیری شد. جدول ۳ و شکل ۵ عملکرد هر یک از مدل‌های منتخب CMIP6 در برآورد داده‌های اقلیمی ماهانه بارش در برابر مقادیر مشاهداتی را بر حسب معیارهای ارزیابی  $KGE$ ،  $NSE$ ،  $MAE$  و  $PBIAS$  و دیاگرام تیلور نشان می‌دهند. با توجه به جدول ۳ در دوره واسنجی بهترین عملکرد متعلق به مدل  $MPI-ESM1-2-LR$  بوده که در برابر سایر مدل‌ها مناسب‌ترین مقادیر برای معیارهای ارزیابی به دست آمده است. مقادیر  $KGE$ ،  $NSE$ ،  $MAE$  و  $PBIAS$  به ترتیب برای مدل  $MPI-ESM1-2-LR$  در این دوره برابر با  $۰/۷۱$ ،  $۰/۴۶$ ،  $۳/۱۳$  و  $۲/۰۵$  است. بر خلاف مدل  $MPI-ESM1-2-LR$  که عملکرد مناسبی در برآورد مقادیر بارش شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی دارد، مدل  $GFDL-ESM4$  نسبت به سایر مدل‌ها از عملکرد ضعیفی در این دوره برخوردار است، به طوری که کمترین مقادیر  $KGE$  و  $NSE$  و بیشترین مقدار  $MAE$  برای مدل  $GFDL-ESM4$  به دست آمده و همچنین بیشترین اختلاف  $PBIAS$  با صفر نیز برای این مدل محاسبه شده است. از طرفی در دوره صحت‌سنجی نیز، بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد طبق معیارهای ارزیابی مدنظر به ترتیب متعلق به مدل‌های  $MPI-ESM1-2-LR$  و  $MIROC6$  است.

دیاگرام تیلور ارائه شده در شکل ۵ عملکرد هر یک از مدل‌های اقلیمی را پس از تصحیح اریبی در دوره‌های واسنجی (سمت چپ) و صحت‌سنجی (سمت راست) به نمایش گذاشته است. نقاط نمایشی توسط دیاگرام تیلور متناسب با هر مدل اقلیمی در راهنمای شکل ۵ مشخص شده است. انحراف معیار و همبستگی خطی هر یک از مدل‌ها در برآورد بارش با توجه به متوسط بارش ماهانه بلند مدت در بازه انتخابی برای هر دوره محاسبه شده است. جهت ارائه دیاگرام تیلور در راستای ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی پس از تصحیح اریبی مقادیر شبیه‌سازی شده، داده‌های خام هر یک از مدل‌ها تحت روش‌های مختلف تصحیح اریبی ارائه شده در بخش روش‌شناسی اصلاح شده و از خروجی تمامی این روش‌ها برای هر مدل در دو دوره مدنظر میانگین‌گیری شده است. در شکل ۵ اختلاف خطی بین بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط جذر میانگین مربعات ( $CRMSE$ ) به صورت خطوط آبی روشن نمایان شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، میزان همبستگی مدل‌ها در برآورد بارش با مقادیر مشاهداتی در دوره واسنجی نسبت به دوره صحت‌سنجی بیشتر بوده و همچنین اختلاف جذر میانگین مربعات آن‌ها نیز در دوره واسنجی نسبت به دوره صحت‌سنجی کمتر است. دلیل پراکندگی مدل‌های نمایش داده شده در دوره صحت‌سنجی، وجود اختلاف در جذر میانگین مربعات و میزان اریبی آن‌ها در مقایسه با مقادیر مشاهداتی است. با توجه به شکل ارائه شده، مدل  $MPI-ESM1-2-LR$  نسبت به سایر مدل‌ها دارای کمترین میزان  $CRMSE$  و بیشترین همبستگی در هر دو دوره بوده که نشانگر برتری این مدل نسبت به سایر مدل‌ها است. از طرفی مدل‌های  $GFDL-ESM4$  و  $MRI-ESM2-0$  به ترتیب در دوره‌های

واسنجی و صحت‌سنجی به دلیل CRMSE بالا و همبستگی پایین نسبت به مدل‌های دیگر از عملکرد ضعیفی در برآورد بارش برخوردار هستند.

جدول ۳. مقادیر معیارهای ارزیابی KGE، NSE، MAE و PBIAS برای هر یک از مدل‌های اقلیمی پس از تصحیح اریبی در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی

Validation Period				Calibration Period				Models
PBIAS	MAE	NSE	KGE	PBIAS	MAE	NSE	KGE	
-۱۳/۴۴	۴/۹۳	-۰/۳۵	-۰/۴۶	-۱۹/۷۲	۳/۸۳	-۰/۱۳	-۰/۵۴	ACCESS-CM2
-۲۴/۰۲	۳/۹۰	۰/۲۳	-۰/۶۲	-۷/۶۹	۳/۵۶	-۰/۳۴	-۰/۵۹	BCC-CSM2-MR
-۸/۵۷	۶/۵۲	-۱/۸۴	-۰/۲۳	-۷/۷۲	۳/۴۴	-۰/۱۹	-۰/۶۵	CNRM-ESM2-1
-۵/۲۲	۴/۴۳	-۰/۱۱	-۰/۴۰	-۹/۶۹	۴/۳۱	-۰/۰۳	-۰/۴۹	EC-Earth3
-۴/۹۰	۴/۴۸	-۰/۶۹	-۰/۵۰	-۲۶/۹۶	۵/۳۸	-۰/۴۴	-۰/۳۹	GFDL-ESM4
۱۰/۰۷	۴/۵۱	-۰/۵۲	-۰/۵۳	۶/۳۹	۳/۳۹	-۰/۳۵	-۰/۶۲	IPSL-CM6A-LR
-۸/۴۴	۷/۲۷	-۴/۱۵	-۰/۱۶	-۳/۳۷	۳/۸۲	-۰/۰۶	-۰/۵۳	MIROC6
-۳/۸۲	۳/۷۷	-۰/۱۳	-۰/۶۳	۲/۰۵	۳/۱۳	-۰/۴۶	-۰/۷۱	MPI-ESM1-2-LR
-۶/۷۳	۶/۱۷	-۱/۴۲	-۰/۱۳	-۳/۵۷	۴/۶۳	-۰/۰۳	-۰/۴۲	MRI-ESM2-0
۷/۵۹	۵/۱۶	-۰/۸۵	-۰/۲۳	-۲/۷۴	۳/۷۸	-۰/۱۳	-۰/۵۶	NorESM2-MM



شکل ۵. دیاگرام تیلور عملکرد مدل‌های اقلیمی پس از تصحیح اریبی در دوره‌های واسنجی (سمت چپ) و صحت‌سنجی (سمت راست)

### ارزیابی روش‌های تصحیح اریبی نگاشت چندکی

به منظور ارزیابی عملکرد روش‌های تصحیح اریبی نگاشت چندکی، مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های منتخب تحت روش‌های مختلف نگاشت چندکی مذکور تصحیح شده و خروجی تمامی مدل‌ها تحت هر یک از روش‌های تصحیح اریبی میانگین‌گیری شد. جدول ۴ و شکل ۶ عملکرد هر یک از روش‌های تصحیح اریبی نگاشت چندکی در اصلاح داده‌های اقلیمی ماهانه بارش در برابر مقادیر مشاهداتی را بر حسب معیارهای ارزیابی NSE، MAE، PBIAS و KGE و دیاگرام تیلور در دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهند. همانطور که در جدول ۴ ارائه شده است، در دوره واسنجی به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار NSE و MAE برای روش bernlnorm به دست آمده که نشان از برتری این روش نسبت به سایر روش‌ها طبق این دو معیار ارزیابی است. از طرفی در این دوره، بیشترین مقدار KGE متعلق به روش RQUANT و کمترین اختلاف PBIAS با صفر نیز متعلق به روش power.x0 است. در دوره واسنجی، کمترین مقدار KGE و NSE و بیشترین مقدار MAE و PBIAS متعلق به روش bernexp بوده که نشانگر ضعف این روش نسبت به سایر روش‌ها

جهت تصحیح مقادیر شبیه‌سازی است. در دورهٔ صحت‌سنجی نیز، بیشترین مقادیر KGE و NSE و کمترین اختلاف PBIAS با صفر برای روش bernlnorm و کمترین مقدار MAE برای روش RQUANT برآورد شده است. معیارهای ارزیابی برای روش bernexp در دورهٔ صحت‌سنجی همانند دورهٔ واسنجی نشانگر ضعف این روش در تصحیح مقادیر شبیه‌سازی شدهٔ بارش توسط مدل‌ها هستند.

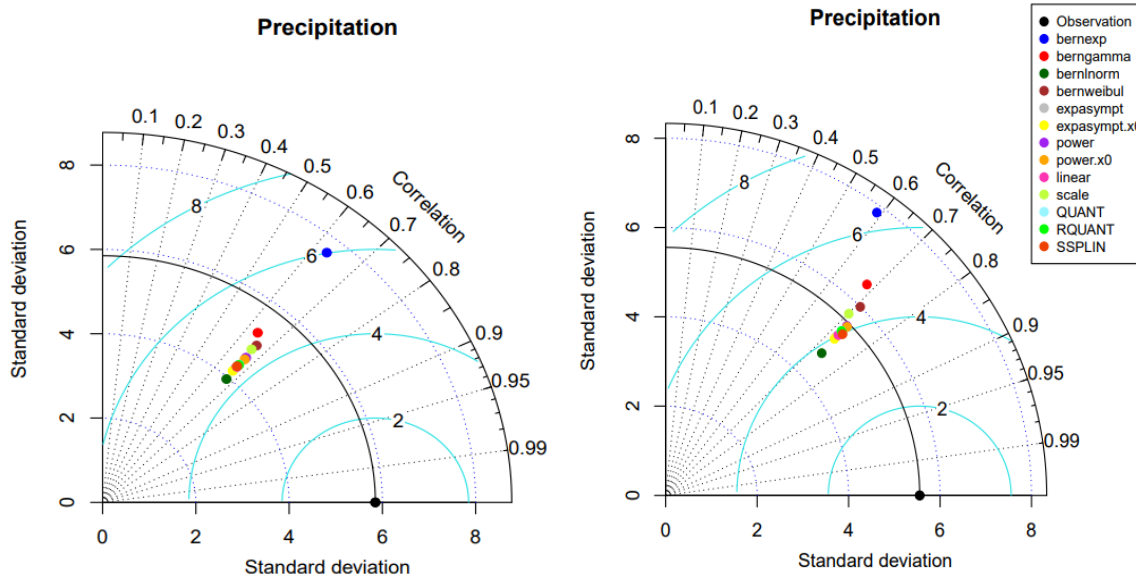
به طور کلی، غیر از روش bernexp که اختلاف زیادی طبق معیارهای ارزیابی مدنظر با سایر روش‌ها دارد، تمامی روش‌های اعمال شده از توانایی مقبولی جهت تصحیح اریب داده‌ها برخوردارند. با در نظر گرفتن اختلافات جزئی در دو دورهٔ ارزیابی، روش bernlnorm بر حسب معیارهای ارزیابی ارائه شده برای تصحیح اریب مقادیر شبیه‌سازی شده بارش توسط مدل‌های اقلیمی، برای محدودهٔ مطالعاتی رفسنجان پیشنهاد می‌شوند.

همانطور که در شکل ۶ نمایش داده شده است، در هر دو دورهٔ واسنجی و صحت‌سنجی تمامی روش‌های تصحیح اریبی اعمال شده بر داده‌های بارش مدل‌های اقلیمی به جز روش bernexp، از عملکرد قابل قبولی برخوردار هستند. علاوه بر این، میزان همبستگی روش‌ها در تصحیح بارش شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی در دورهٔ واسنجی نسبت به دورهٔ صحت‌سنجی (شکل ۶) بیشتر بوده و همچنین اختلاف جذر میانگین مربعات آن‌ها نیز در دورهٔ واسنجی نسبت به دورهٔ صحت‌سنجی کمتر است. همچنین نتایج ارائه شده در شکل ۶ نشان می‌دهند که به جز روش bernexp تمامی روش‌ها نزدیک به هم بوده و اختلاف چشمگیری با یکدیگر ندارند که این موضوع بیانگر عدم وجود تفاوت زیاد در جذر میانگین مربعات و انحراف معیار روش‌ها با یکدیگر در مقایسه با مقادیر مشاهداتی است.

همانطور که در بخش پیشینه پژوهش نیز اشاره شد، Enayati *et al.* (2021) در مطالعه‌ای به ارزیابی قابلیت روش‌های نگاشت چندکی به منظور تصحیح اریبی داده‌های بارش و دمای شبیه‌سازی شده توسط ترکیب مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای و جهانی در حوضه آبریز رودخانه کرخه پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشانگر وجود اختلاف در روش‌های اصلاح اریبی نگاشت چندکی به دلیل پارامترها، توابع تبدیل و شرایط توپوگرافی است. به طور کلی، بر اساس نتایج به دست آمده در پژوهش مذکور از شرایط توپوگرافی زیرحوضه‌ها، روش‌های QUANT و RQUANT جهت تصحیح اریبی مقادیر بارش و تمامی روش‌های نگاشت چندکی به جز PTF (Scale) و SSPLIN جهت تصحیح اریبی مقادیر دما پیشنهاد می‌شوند. برخلاف نتایج حاصل از پژوهش مذکور، نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر، حاکی از قابلیت خوب روش bernlnorm نسبت به سایر روش‌های ارزیابی شده در تصحیح اریبی مقادیر بارش در محدوده‌های مطالعاتی رفسنجان است.

جدول ۴. مقادیر معیارهای ارزیابی KGE، NSE، MAE و PBIAS برای هر یک از روش‌های تصحیح اریبی در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی

Validation Period				Calibration Period				Models
PBIAS	MAE	NSE	KGE	PBIAS	MAE	NSE	KGE	-
-۲۷/۸۰۵	۸/۵۷۹	-۲/۴۳۶	-۰/۴۳۰	-۱۸/۵۵۰	۵/۹۱۰	-۱/۱۸۸	-۰/۴۴	bernexp
-۱۴/۰۹۳	۳/۷۳۸	۰/۰۰۵	۰/۴۵۶	-۱۴/۳۲۷	۳/۶۲۴	۰/۳۱۸	-۰/۶۱۰	berngamma
-۴/۲۷۱	۲/۸۴۷	۰/۵۲۰	-۰/۷۲۸	۱۰/۱۱۶	۳/۳۷۵	۰/۴۴۰	-۰/۶۵۷	bernlnorm
-۱۵/۶۴۲	۳/۳۱۵	۰/۲۱۸	-۰/۵۴۰	-۱۱/۵۰۹	۳/۵۱۱	۰/۳۹۱	-۰/۶۴۵	bernweibull
-۱۶/۹۳۱	۲/۸۱۲	۰/۴۴۷	-۰/۶۷۶	۵/۵۹۸	۳/۴۰۷	۰/۴۳۷	-۰/۶۶۲	expasympt
-۱۵/۰۴۶	۲/۸۱۶	۰/۴۶۲	-۰/۶۸۶	۷/۴۴۲	۳/۳۸۸	۰/۴۳۶	-۰/۶۵۹	expasymptx0
-۱۸/۱۸۳	۲/۸۱۲	۰/۴۴۰	-۰/۶۷۰	۴/۰۳۶	۳/۴۱۲	۰/۴۳۹	-۰/۶۶۵	linear
-۱۸/۵۲۴	۲/۹۱۴	۰/۳۶۲	-۰/۶۰۹	-۵/۹۹۱	۳/۵۳۱	۰/۴۲۷	-۰/۶۶۲	power
-۲۴/۷۲۶	۲/۸۳۴	۰/۳۸۵	-۰/۶۳۰	-۲/۳۶۲	۳/۴۵۶	۰/۴۳۴	-۰/۶۶۵	powerx0
-۲۴/۴۵۹	۳/۱۹۰	۰/۲۴۶	-۰/۵۴۴	-۱۱/۸۶۴	۳/۶۲۵	۰/۳۹۳	-۰/۶۴۰	scale
-۱۹/۲۷۶	۲/۸۳۵	۰/۴۱۹	-۰/۶۶۱	۳/۸۰۵	۳/۳۸۰	۰/۴۳۶	-۰/۶۶۵	QUANT
-۱۹/۲۶۵	۲/۸۳۰	۰/۴۲۳	-۰/۶۶۲	۳/۹۸۲	۳/۳۸۳	۰/۴۳۷	-۰/۶۶۷	RQUANT
-۱۸/۵۹۱	۲/۷۹۰	۰/۴۴۴	-۰/۶۷۳	۴/۶۹۹	۳/۳۸۴	۰/۴۳۶	-۰/۶۶۳	SSPLIN



شکل ۶. دیاگرام تیلور عملکرد روش‌های تصحیح اریبی در دوره‌های واسنجی (سمت چپ) و صحت‌سنجی (سمت راست)

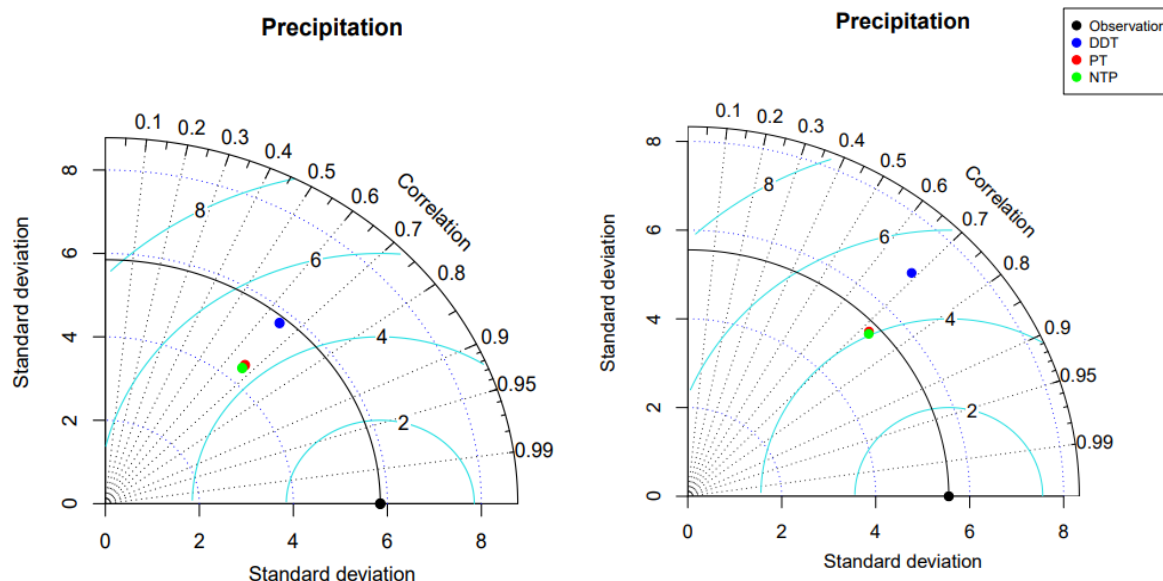
#### مقایسه رویکردهای تبدیلات مشتق از توزیع، پارامتری و ناپارامتری نگاشت چندکی

به منظور مقایسه رویکردهای تبدیلات مشتق از توزیع (DDT)، پارامتری (PT) و ناپارامتری (NPT)، از تمامی روش‌های ارائه شده در شکل ۳ برای هر رویکرد تحت کل مدل‌های منتخب در مطالعه حاضر به صورت حسابی میانگین‌گیری شده و از معیارهای ارزیابی نیز، به منظور بررسی توانمندی آن‌ها در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شد. طبق جدول ۵، در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی بیشترین مقادیر KGE و NSE و کمترین مقدار MAE برای رویکرد تصحیح اریبی ناپارامتری اندازه‌گیری شده و از طرفی کمترین اختلاف PBIAS با صفر در این دوره‌ها به ترتیب متعلق به رویکردهای پارامتری و مشتق از توزیع است. لذا، طبق مقادیر به دست آمده برای معیارهای ارزیابی اشاره شده در هر دو دوره، می‌توان اظهار کرد که NPT توانایی بالایی در تصحیح اریبی مقادیر شبیه‌سازی شده داشته و از طرفی DDT نسبت به دو رویکرد دیگر از عملکرد ضعیفی طبق معیارهای KGE، NSE و MAE برخوردار است. شکل ۷ نیز همانند جدول ۵ نشانگر برتری NPT و PT نسبت به DDT است، به طوری که میزان همبستگی و CRMSE رویکردهای NPT، PT و DDT در دوره واسنجی به ترتیب برابر با ۰/۶۷، ۰/۶۸ و ۰/۶۵ و ۴/۳۹، ۴/۴۳ و ۴/۸۴ است. نتایج حاصل در دوره واسنجی از اعتبار مقبولی در دوره صحت‌سنجی داشته، به طوری که مقادیر همبستگی و CRMSE برای NPT، PT و DDT به ترتیب برابر با ۰/۷۳، ۰/۷۲ و ۰/۶۹ و ۴/۰۶، ۴/۱۳ و ۵/۲۱ می‌باشد. لازم به ذکر است، طبق معیارهای ارزیابی ارائه شده در جدول ۵ و شکل ۷، NPT و PT اختلاف چندانی با یکدیگر نداشته و رویکردهای مناسبی جهت تصحیح اریب مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به DDT به شمار می‌روند.

نتایج حاصل از این پژوهش با یافته‌های *Gudmundsson et al. (2012)* نیز انطباق دارد. در مطالعه مذکور به بررسی رویکردهای نگاشت چندکی تبدیلات مشتق از توزیع، پارامتری و ناپارامتری در پیش‌پردازش خروجی مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای در مقایسه با داده‌های مشاهداتی بارش حاصل از ۸۲ ایستگاه هواشناسی در نروژ پرداخته شد. طبق مطالعه *Gudmundsson et al. (2012)*، رویکرد تبدیلات ناپارامتری، بیشترین توانمندی را در کاهش اریب سیستماتیک بارش مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای نسبت به سایر رویکردها دارد که مشابه با نتایج حاصل از پژوهش حاضر است.

جدول ۵. مقادیر معیارهای ارزیابی KGE، NSE، MAE و PBIAS برای رویکردهای NPT، PT و DDT جهت تصحیح اریبی مقادیر شبیه‌سازی شده بارش

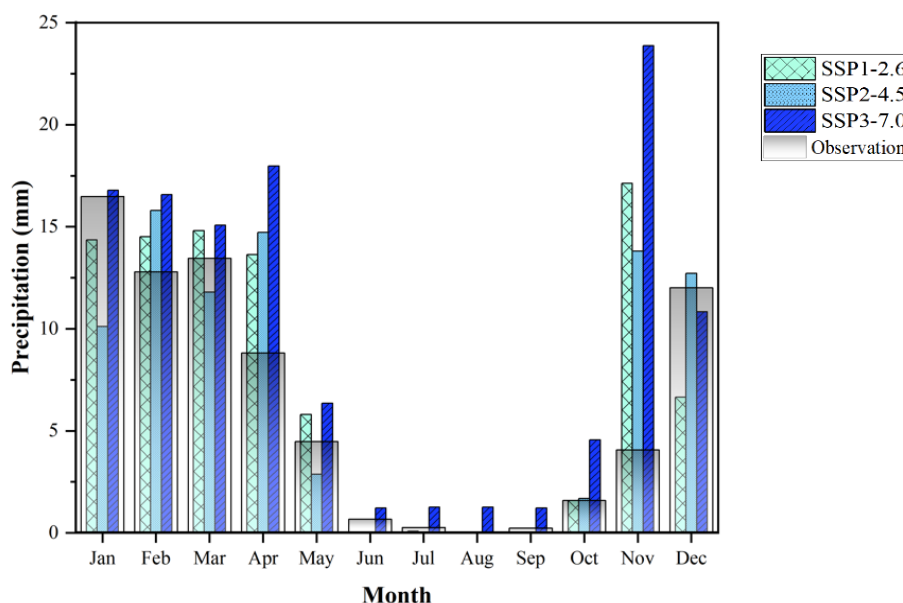
Models	Validation Period				Calibration Period			
	PBIAS	MAE	NSE	KGE	PBIAS	MAE	NSE	KGE
DDT	-۱۵/۴۵۳	۴/۶۲۰	-۰/۶۷۳	۰/۳۲۴	-۸/۵۶۷	۴/۱۰۵	-۰/۰۱۰	۰/۴۸۹
PT	-۱۹/۰۹۳	۲/۸۹۶	-۰/۳۹۰	۰/۶۳۶	-۰/۵۲۳	۳/۴۷۰	۰/۴۲۷	۰/۶۵۹
NPT	-۱۹/۰۴۴	۲/۸۱۸	۰/۴۲۹	۰/۶۶۵	۴/۱۶۲	۳/۳۸۲	۰/۴۳۶	۰/۶۶۴



شکل ۷. دیاگرام تیلور عملکرد رویکردهای NPT، PT و DDT جهت تصحیح اریبی مقادیر شبیه‌سازی شده بارش در دورل‌های واسنجی (سمت چپ) و صحت‌سنجی (سمت راست)

### پیش‌نگری دوره آتی

شکل ۸ نشانگر بارش متوسط ماهانه درازمدت داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره پیش‌نگری (۲۰۲۴-۲۰۴۳) تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP3-7.0 است. نتایج بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل اقلیمی منتخب (MPI-ESM1-2-LR) پس از اعمال روش تصحیح اریبی bernlnorm نشان می‌دهد که در مقیاس ماهانه در ماه‌های فوریه، آوریل و نوامبر مدل MPI-ESM1-2-LR تحت هر سه سناریو مقدار بارش را بیش از مقادیر مشاهداتی برآورد کرده و همچنین در ماه‌های ژانویه، ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر نیز این مدل تنها تحت سناریو SSP3-7.0 میزان بارش را بیش از بارش مشاهداتی برآورد کرده است. به طور کلی، مدل MPI-ESM1-2-LR مقدار بارش را تحت سناریو SSP3-7.0 در اکثر ماه‌ها بیش از مقادیر مشاهداتی برآورد کرده و برای دو سناریو دیگر نیز در برخی از ماه‌ها میزان بارش نسبت به مقادیر مشاهداتی کمتر و در برخی از ماه‌ها نیز بیشتر برآورد شده است. بیشترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده متعلق به سناریو SSP3-7.0 در ماه نوامبر به میزان ۱۹/۸۵ میلی‌متر بوده و کمترین اختلاف نیز مربوط به سناریو SSP2-4.5 در ماه آگوست به میزان ۰/۰۱ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۸. متوسط بارش ماهانه درازمدت شبیه‌سازی شده در دوره آتی تحت سناریوهای مختلف و مشاهداتی در دوره پیش‌نگری (۲۰۲۴-۲۰۴۳)

## نتیجه گیری

مطالعه حاضر تلاشی در جهت تعیین مدل مناسب برای پیش‌نگری تغییرات آبی اقلیمی محدوده رفسنجان بود که از طریق ارزیابی عملکرد ۱۰ مدل اقلیمی از مجموعه مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی بارش در دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی و ارزیابی روش‌های تصحیح اریبی QM در اصلاح بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های اقلیمی در این دوره‌ها انجام گردید. در این راستا، مدل‌های اقلیمی منتخب در این مطالعه از بررسی ادبیات ارائه شده در ایران برگزیده شد و خروجی آن‌ها در راستای برآورد ۲۹ ساله (دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی) بارش از وبسایت Copernicus Climate Change Service استخراج گردید. میزان اریب خروجی هر یک از مدل‌ها تحت روش‌های مختلف نگاهت چندکی تصحیح شده و جهت مقایسه آن‌ها، هر یک از مدل‌ها تحت تمامی روش‌های تصحیح اریبی میانگین‌گیری شد و با توجه به معیارهای ارزیابی NSE، PBIAS، MAE و KGE و دیگران تیلور مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور سنجش توانمندی روش‌های تصحیح اریبی نگاهت چندکی نیز هر یک از روش‌های ارائه شده در شکل ۳، تحت تمامی مدل‌های اقلیمی منتخب برای بارش ماهانه دوره پایه میانگین‌گیری و با یکدیگر مقایسه شدند.

نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌های منتخب در این پژوهش پس از تصحیح اریبی، نشانگر برتری مدل MPI-ESM1-2-LR در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی نسبت به سایر مدل‌ها بوده است. بر خلاف مدل MPI-ESM1-2-LR که عملکرد مناسبی در برآورد مقادیر بارش شبیه‌سازی شده نشان داد، مدل‌های GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0 به ترتیب در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی نسبت به سایر مدل‌ها طبق معیارهای ارزیابی ارائه شده از عملکرد ضعیفی برخوردار بودند. از طرفی با ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف تصحیح اریبی نگاهت چندکی، نتایج قابلیت بالای روش bernlnorm را نسبت به سایر روش‌های اعمال شده در هر دو دوره جهت تصحیح مقادیر شبیه‌سازی شده بارش نشان داد. همچنین بر خلاف تمامی روش‌ها که در هر دو دوره از توانمندی مقبول و مقادیر معیارهای ارزیابی نزدیک به هم برخوردار بودند، روش bernexp عملکرد ضعیفی از خود نشان داد. پس از ارزیابی هر روش تصحیح اریب نگاهت چندکی به صورت مجزا، نتایج مقایسه رویکردهای NTP، PT و DDT حاکی از توانایی بیشتر NTP و PT در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی نسبت به رویکرد DDT بوده و به طور خاص، رویکرد NTP نسبت به دو رویکرد PT و DDT عملکرد مطلوبی از خود نشان داد. در نهایت، مدل MPI-ESM1-2-LR از مجموعه مدل‌های CMIP6 و روش تصحیح اریبی bernlnorm جهت برآورد دقیق تغییرات بارش آبی (۲۰۴۳-۲۰۲۴) متأثر از تغییر اقلیم در محدوده مطالعاتی رفسنجان به کار گرفته شد.

با توجه به اینکه محدوده مطالعاتی رفسنجان یکی از بحرانی‌ترین مناطق از نظر اضافه برداشت آب زیرزمینی در کشور به شمار می‌رود، تغییرات آبی در الگوهای بارش به دلیل اثرات تغییر اقلیم می‌تواند منجر به افزایش آسیب‌پذیری این محدوده نسبت به خطرات محتمل آبی در زمینه منابع آب، کشاورزی، اقتصادی-اجتماعی و محیط زیستی شود. بنابراین، نتایج حاصل دال بر بکارگیری مدل MPI-ESM1-2-LR از مجموعه مدل‌های CMIP6 و روش تصحیح اریبی bernlnorm جهت برآورد دقیق تغییرات بارش آبی متأثر از تغییر اقلیم در مطالعات اقلیمی و سیاست‌گذاری‌های آبی آینده است که می‌تواند در مطالعات اقلیمی آبی محدوده مطالعاتی رفسنجان نیز مورد توجه قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## منابع

- بابائیان، فریبا؛ باقری، علی، رفیعیان، مجتبی (۱۳۹۵). تحلیل آسیب‌پذیری سیستم منابع آب نسبت به کم آبی با استفاده از چارچوب حسابداری آب (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی رفسنجان). *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۲(۱)، ۱-۱۷.
- غفوری‌فرد، سمیرا؛ باقری، علی؛ شجری، شاهرخ (۱۳۹۴). ارزیابی ذی‌مدخلان در بخش آب (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی رفسنجان). *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۱(۲)، ۱۶-۲۸.
- قلمی، وحید؛ ثقفیان، بهرام؛ رضیعی، طیب (۱۴۰۱). بررسی تأثیر اصلاح اریبی بر بهبود کیفی داده‌های بارش ریزمقیاس‌سازی شده NEX-GDDP. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۸(۱)، ۶۸-۸۳.

## REFERENCES

- Ahmed, K., Sachindra, D. A., Shahid, S., Demirel, M. C., & Chung, E. S. (2019). Selection of multi-model ensemble of general circulation models for the simulation of precipitation and maximum and minimum temperature based on spatial assessment metrics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11), 4803-



4824. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4803-2019>
- Ajaaj, A. A., Mishra, A. K., & Khan, A. A. (2016). Comparison of BIAS correction techniques for GPCC rainfall data in semi-arid climate. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(6), 1659–1675. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1155-9>
- Babaeian, F., Bagheri, A., & Rafieian, M. (2016). Vulnerability Analysis of Water Resources Systems to Water Scarcity Based on a Water Accounting Framework (Case Study: Rafsanjan Study Area). *Iran-Water Resources Research*, 12(1), 1–17. (In Persian)
- Baker, N. C., & Huang, H. P. (2014). A comparative study of precipitation and evaporation between CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles in semiarid regions. *Journal of Climate*, 27(10), 3731–3749. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00398.1>
- Block, P. J., Souza Filho, F. A., Sun, L., & Kwon, H. H. (2009). A streamflow forecasting framework using multiple climate and hydrological models. *Journal of the American Water Resources Association*, 45(4), 828–843. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2009.00327.x>
- Cannon, A. J. (2008). Probabilistic multisite precipitation downscaling by an expanded Bernoulli-gamma density network. *Journal of Hydrometeorology*, 9(6), 1284–1300. <https://doi.org/10.1175/2008JHM960.1>
- Charlton, M. B., & Arnell, N. W. (2011). Adapting to climate change impacts on water resources in England—An assessment of draft Water Resources Management Plans. *Global Environmental Change*, 21(1), 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.07.012>
- Chen, J., Brissette, F. P., Chaumont, D., & Braun, M. (2013). Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America. *Water Resources Research*, 49(7), 4187–4205. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20331>
- Chen, J., Brissette, F. P., Zhang, X. J., Chen, H., Guo, S., & Zhao, Y. (2019). Bias correcting climate model multi-member ensembles to assess climate change impacts on hydrology. *Climatic Change*, 153(3), 361–377. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02393-x>
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Déqué, M., Rowell, D. P., Lüthi, D., Giorgi, F., Christensen, J. H., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., De Castro, M., & Van Den Hurk, B. (2007). An intercomparison of regional climate simulations for Europe: Assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81(SUPPL. 1), 53–70. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9228-x>
- Diallo, I., Sylla, M. B., Giorgi, F., Gaye, A. T., & Camara, M. (2012). Multimodel GCM-RCM ensemble-based projections of temperature and precipitation over West Africa for the Early 21st Century. *International Journal of Geophysics*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/972896>
- Dore, M. H. I. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environment International*, 31(8), 1167–1181. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.03.004>
- Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K., & Liebert, J. (2012). HESS Opinions “should we apply bias correction to global and regional climate model data?” *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3391–3404. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3391-2012>
- Enayati, M., Bozorg-Haddad, O., Bazrafshan, J., Hejabi, S., & Chu, X. (2021). Bias correction capabilities of quantile mapping methods for rainfall and temperature variables. *Journal of Water and Climate Change*, 12(2), 401–419. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.261>
- Estrela, T., Pérez-Martin, M. A., & Vargas, E. (2012). Impacts du changement climatique sur les ressources en eau en Espagne. *Hydrological Sciences Journal*, 57(6), 1154–1167. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.702213>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- 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(6), 2547–2559. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2547-2015>
- Franchini, M., & Mannucci, P. M. (2015). Impact on human health of climate changes. *European Journal of Internal Medicine*, 26(1), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.ejim.2014.12.008>
- Ghafouri Fard, S., Bagheri, A., & Shajari, S. (2015). Stakeholders Assessment in Water Sector (Case Study: Rafsanjan Area). *Iran-Water Resources Research*, 11(2), 16–28. (In Persian)



- Ggalami, V., Saghafian, B., Razinei, T. (2022). Investigating the Effect of Bias Correction on Quality Improvement of NEX-GDDP Downscaled Precipitation Data. *Iran-Water Resources Research*, 18(1), 68-83. (In Persian)
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations &ndash; A comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3383–3390. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hamed, M. M., Nashwan, M. S., Shahid, S., Ismail, T. bin, Wang, X. jun, Dewan, A., & Asaduzzaman, M. (2022). Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: A comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia. *Atmospheric Research*, 265, 1–38. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105927>
- He, X., Chaney, N. W., Schleiss, M., & Sheffield, J. (2016). Spatial downscaling of precipitation using adaptable random forests. *Water Resources Research*, 52(10), 8217–8237. <https://doi.org/10.1002/2016WR019034>
- Hong, J., Javan, K., Shin, Y., & Park, J. S. (2021). Future projections and uncertainty assessment of precipitation extremes in iran from the cmip6 ensemble. *Atmosphere*, 12(8), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ATMOS12081052>
- Im, E. S., Ahn, J. B., & Jo, S. R. (2015). Regional climate projection over South Korea simulated by the HadGEM2-AO and WRF model chain under RCP emission scenarios. *Climate Research*, 63(3), 249–266. <https://doi.org/10.3354/cr01292>
- Jakob Themeßl, M., Gobiet, A., & Leuprecht, A. (2011). Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, 31(10), 1530–1544. <https://doi.org/10.1002/joc.2168>
- Karimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- Kim, K. B., Kwon, H. H., & Han, D. (2015). Bias correction methods for regional climate model simulations considering the distributional parametric uncertainty underlying the observations. *Journal of Hydrology*, 530, 568–579. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.015>
- Li, H., Sheffield, J., & Wood, E. F. (2010). Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(10). <https://doi.org/10.1029/2009JD012882>
- Li, Y., Jiang, Y., Lei, X., Tian, F., Duan, H., & Lu, H. (2018). Comparison of precipitation and streamflow correcting for ensemble streamflow forecasts. *Water (Switzerland)*, 10(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/w10020177>
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su13031318>
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H. W., Sauter, T., Themel, M., Venema, V. K. C., Chun, K. P., Goodess, C. M., Jones, R. G., Onof, C., Vrac, M., & Thiele-Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3), 1–34. <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>
- Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D., & Alvarado-Gamboa, L. F. (2020). Performance evaluation of bias correction methods for climate change monthly precipitation projections over Costa Rica. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020482>
- Muerth, M. J., Gauvin St-Denis, B., Ricard, S., Velázquez, J. A., Schmid, J., Minville, M., Caya, D., Chaumont, D., Ludwig, R., & Turcotte, R. (2013). On the need for bias correction in regional climate scenarios to assess climate change impacts on river runoff. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(3), 1189–1204. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1189-2013>
- N’Tcha M’Po, Y. (2016). Comparison of Daily Precipitation Bias Correction Methods Based on Four Regional Climate Model Outputs in Ouémé Basin, Benin. *Hydrology*, 4(6), 58. <https://doi.org/10.11648/j.hyd.20160406.11>
- Piani, C., Weedon, G. P., Best, M., Gomes, S. M., Viterbo, P., Hagemann, S., & Haerter, J. O. (2010).

- Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 395(3-4), 199-215. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.024>
- Pour, S. H., Shahid, S., Chung, E. S., & Wang, X. J. (2018). Model output statistics downscaling using support vector machine for the projection of spatial and temporal changes in rainfall of Bangladesh. *Atmospheric Research*, 213(June), 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.006>
- Radcliffe, D. E., & Mukundan, R. (2017). PRISM vs. CFSR Precipitation Data Effects on Calibration and Validation of SWAT Models. *Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 89-100. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12484>
- Salman, S. A., Nashwan, M. S., Ismail, T., & Shahid, S. (2020). Selection of CMIP5 general circulation model outputs of precipitation for peninsular Malaysia. *Hydrology Research*, 51(4), 781-798. <https://doi.org/10.2166/NH.2020.154>
- Song, Y. H., Chung, E. S., & Shiru, M. S. (2020). Uncertainty analysis of monthly precipitation in GCMs using multiple bias correction methods under different RCPs. *Sustainability (Switzerland)*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/su12187508>
- Su, X., Shao, W., Liu, J., & Jiang, Y. (2020). Multi-site statistical downscaling method using GCM-based monthly data for daily precipitation generation. *Water (Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/w12030904>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2010). Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: A review of recent modeling strategies. *Geography Compass*, 4(7), 834-860. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00357.x>
- 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*, 456-457, 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- van Ruijven, B. J., De Cian, E., & Sue Wing, I. (2019). Amplification of future energy demand growth due to climate change. *Nature Communications*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10399-3>
- Watts, N., Adger, W. N., & Agnolucci, P. (2015). Health and climate change: Policy responses to protect public health. In *Environnement, Risques et Sante* (Vol. 14, Issue 6, pp. 466-468). John Libbey Eurotext. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60854-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60854-6)
- Yang, X., Yu, X., Wang, Y., Liu, Y., Zhang, M., Ren, L., ... & Jiang, S. (2018). Estimating the response of hydrological regimes to future projections of precipitation and temperature over the upper Yangtze River. *Atmospheric Research*, 230, 104627.
- Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., & Aghakouchak, A. (2021). Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, 250(November), 105369. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105369>
- Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(1-2), 643-660. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03568-2>



## Comparison of CMIP6 Climate Models and Quantile Mapping Bias Correction Methods in the Simulation of Precipitation

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

Globally, rising temperature due to continuous greenhouse gas emissions (GHG) have caused climate change. Accordingly, many important sectors to human existence including water resources, agriculture, health, energy, and the environment have been affected. Due to the consequences of climate change, there have been numerous studies on climate change projections and impacts in which General Circulation Models (GCMs) have been popularly used to analyze the simulated historical and future changes in climatic variables. Due to inherent limitations of global climate models, their outputs are significantly biased in comparison to observed values which could provide unreliable climate projections. To fix different problems with GCM output, researchers use various methods to correct bias. This study evaluates the performance of 10 global climate models of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) for simulating precipitation in the Rafsanjan study area over a historical reference period. Various quantile mapping-based bias correction methods and approaches are also used and evaluated to correct simulated precipitation by climate models.

#### Methods

Rafsanjan study area has hot summers and cold and dry winters due to its location on the edge of the desert. This area is located near the desert, so it does not get much rain and does not have a river all year round. It mostly depends on underground water for its water supply. The region's geographical conditions, along with the negative impacts of climate, can put water resources at risk in this area. Evaluating the performance of various climate models and quantile mapping-based bias correction methods and approaches are carried out through multiple statistical metrics including NSE, PBIAS, MAE, and KGE as well as Taylor's diagram in calibration (1986-2005) and validation (2006-2014) periods. The procedure used in this study was as follows:

Downloading simulated precipitation data for the Rafsanjan study area from the Copernicus Climate Change Service website, Comparing selected climate models, various quantile mapping-based bias correction methods and approaches for simulated precipitation values in calibration and validation periods, Evaluating the performance of each model and bias correction methods and approaches, using selected evaluation metrics, and Projecting future precipitation by selected model and bias correction method.

#### Results and Discussion

To check how accurate climate models are, GCMs-simulated Precipitation data are calibrated against the corresponding observed data from 1986 to 2005 (calibration period) and then validated from 2006 to 2014 (validation period). According to the evaluation metrics used, MPI-ESM1-2-LR performed the best in estimating precipitation in the Rafsanjan study area. Unlike MPI-ESM1-2-LR, GFDL-ESM4 performs poorly compared to other models and is not recommended for simulating precipitation in the mentioned study area. Simply put, the bernlnorm method was found to be better at correcting simulated precipitation values compared to other methods when tested in both periods. On the other hand, the bernexp performs poorly compared to other methods in terms of correcting simulated values due to evaluating criteria. In general, with the exception of the bernexp method, all the other methods show acceptable abilities in correcting biased data according to the evaluation criteria. After evaluating each bias correction method separately, the results of comparing the NTP, PT, and DDT approaches indicate that NTP and PT demonstrate greater capability compared to the DDT approach. Specifically, the NTP approach demonstrated satisfactory performance compared to both PT and DDT approaches. Finally, MPI-ESM1-2-LR model and the bernlnorm bias correction method were used to estimate future precipitation changes (2024-2043) in the study area of Rafsanjan.

**Keywords:** Calibration, Climate Change, Projection Period, Rafsanjan Study Area, Validation.