

Evaluation of bias correction methods in improving the direct model output of temperature in CMIP over Iran

Yazdani, D.¹  | Zarrin, A.¹  | Dadashi-Roudbari, A. A.¹ 

1. Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Corresponding Author E-mail: zarrin@um.ac.ir

(Received: 12 Aug 2023, Revised: 30 Aug 2023, Accepted: 9 Jan 2024, Published online: 6 July 2024)

Summary

The general circulation models (GCMs) are state-of-art tools available to investigate the response of climate system to external and internal forcing. They are used to predict/project climate in seasonal to decadal time scales. The general circulation models (GCMs) have more or less biases, and bias correction methods are the techniques used to correct their biases. The Coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) has been widely used to simulate the historical period and project the future climate. However, due to the uncertainty of the models and their coarse resolution, GCMs are not directly used to assess the impacts of climate change. Therefore, to reduce the uncertainty in CMIP6 models, bias correction is necessary in the first step. This study evaluates three methods of bias correction including, Linear Scaling, Variance Scaling of Temperature, Empirical Quantile Mapping, Quantile mapping using a smoothing spline and Empirical Robust Quantile Mapping for two variables of minimum and maximum temperature against 46 synoptic stations in Iran during 1980-2014 using the EC-Earth3-CC. To evaluate direct model output (DMO) and bias correction methods, we used three metrics including root-mean-square error (RMSE), percent bias (PBIAS), index of agreement (d), and interannual variability skill score (IVS). The results showed that the direct model output of the EC-Earth3-CC model has a cold bias (underestimation) for both minimum and maximum temperature in all climate zones of Iran, as well as the area-averaged values of the country. The bias correction methods examined in this research have significantly reduced the bias in Iran. It is found that the bias decreased to 51.8 percent for the minimum temperature in the highlands of Azerbaijan, northeastern Iran, as well as parts of the Alborz and Zagros mountains. In general, the results of the three methods are close and they are not much different from each other. Based on the analysis of RMSE values, bias correction methods significantly reduced RMSE in comparison with DMO. So that the value of this metric in DMO has been more than 2 °C in most of Iran's climate zones, while the use of bias correction methods has reduced the error value to less than 1 °C. Also, bias correction methods have increased the index of agreement (d) by more than two times in average climate zones. Since the EC-Earth3-CC DMO has a good performance in depicting interannual climate variability (IVS) and is close to the observations, this has caused the DMO not to differ greatly from the results of using bias correction methods such as linear scaling. Finally, the bias correction methods used in this research estimate the maximum temperature with higher accuracy than that for the minimum temperature. There is no single bias correction method that provides the best performance in all regions. Therefore, each of these methods has its own advantages and limitations, which are caused by spatiotemporal differences and local geographical features.

Keywords: Bias Correction, Scaling methods, Quantile Mapping methods, CMIP6, Iran.

Cite this article: Yazdani, D., Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2024). Evaluation of bias correction methods in improving the direct model output of temperature in CMIP over Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(2), 429-450. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.363498.1007547>

E-mail: (1) dina.yazdany@gmail.com | a-dadashi@um.ac.ir



بررسی کارایی روش‌های تصحیح اریبی در بهبود برون‌داد مستقیم دمای مدل‌های CMIP بر روی ایران

دینا یزدانی^۱ | آذر زرین^۱ | عباسعلی داداشی رودباری^۱

۱. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: zarrin@um.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۲/۵/۲۱، بازنگری: ۱۴۰۲/۶/۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۴/۱۶)

چکیده

مدل‌های گردش کلی (GCMs) کم و بیش دارای اریبی هستند و یکی از تکنیک‌های مورد استفاده برای کاهش اریبی مدل‌ها در بررسی پیامدهای تغییر اقلیم به کارگیری روش‌های تصحیح اریبی است. این مطالعه کارایی پنج روش تصحیح اریبی شامل دو روش نسبت‌گیری و سه روش نگاهت چندک را برای دو متغیر دمای کمینه و بیشینه در ۴۶ ایستگاه همدید ایران طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۴ با استفاده از مدل EC-Earth3-CC از سری مدل‌های CMIP6 مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج نشان داد برون‌داد مستقیم مدل EC-Earth3-CC برای هر دو متغیر دمای کمینه و بیشینه در تمامی پهنه‌های اقلیمی ایران و همچنین متوسط اقلیمی کشور دارای اریبی سرد (کم‌برآوردی) است. به‌طور کلی، پس از تصحیح اریبی، مقدار اریبی دو متغیر دمای کمینه و بیشینه به‌شکل قابل‌توجهی کاهش یافت. روش‌های نسبت‌گیری نسبت به روش‌های نگاهت چندک بهبود بیشتری را در برون‌داد مستقیم مدل نشان دادند. بر اساس تحلیل مقدار RMSE، روش‌های تصحیح اریبی در مقایسه با برون‌داد مستقیم به‌طور قابل‌توجهی خطا را کاهش می‌دهند. به‌طوری‌که پس از تصحیح اریبی، مقدار خطای متغیر دمای کمینه برای روش‌های نگاهت چندک تا ۴۲ درصد و برای روش‌های نسبت‌گیری خطی و واریانس به‌ترتیب ۷۰/۳۸ و ۶۷/۹۳ درصد کاهش داشته است. مقدار خطای دمای بیشینه نیز پس از تصحیح اریبی به‌ترتیب ۶۵/۹ و ۶۷/۹ درصد کاهش داشته است. تصحیح اریبی سبب افزایش ضریب توافق (d) تا بیش از دو برابر در متوسط پهنه‌های اقلیمی شده است. به‌طور کلی روش‌های تصحیح اریبی به کار گرفته شده در این پژوهش دمای بیشینه را با دقت بالاتری نسبت به دمای کمینه برآورد می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: تصحیح اریبی، روش‌های نسبت‌گیری، روش‌های نگاهت چندک، CMIP6، ایران.

۱. مقدمه

میانگین دمای جهان در سال ۲۰۲۲ حدود ۱/۱۵ (۱/۲۸) تا ۱/۰۲ (درجه سلسیوس) بالاتر از میانگین دمای ماقبل از صنعتی شدن جوامع در ۱۹۰۰-۱۸۵۰ بود (سازمان هواشناسی جهانی، ۲۰۲۳). افزایش دما سبب تغییر در شدت، مدت و فراوانی بارش (سینگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ سلطانی و همکاران، ۲۰۲۰؛ مارتل و همکاران، ۲۰۲۱)، کاهش کیفیت منابع آب (وایتهد و همکاران، ۲۰۰۹؛ دملو و همکاران، ۲۰۲۰)، کاهش محصولات کشاورزی (مسترز و همکاران، ۲۰۱۰؛ ناستیس و همکاران، ۲۰۱۲)، ذوب شدن یخچال‌ها (هاک و هاس، ۲۰۲۱؛ هیوگونت و همکاران، ۲۰۲۱؛ رامشو و همکاران، ۲۰۲۲) و بالا رفتن سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها (میمورا،

در دهه‌های اخیر، اقلیم به‌دلیل فعالیت‌های انسانی و عوامل طبیعی دچار تغییر شده و این تغییر، به‌شکل فزاینده‌ای بر فعالیت‌های اجتماعی-اقتصادی و کشاورزی در سراسر جهان تأثیر گذاشته است. آنچه که امروزه از آن به‌عنوان تغییر اقلیم یاد می‌شود بیشتر ناشی از فعالیت‌های انسانی از جمله صنعتی شدن جوامع، مصرف سوخت‌های فسیلی (ویوبلز و جین، ۲۰۰۱)، تغییر کاربری اراضی (استولگرن و همکاران ۱۹۹۷؛ پیلکه، ۲۰۰۵؛ روانسوال و ری، ۲۰۰۹) و جنگل‌زدایی (مالی و همکاران، ۲۰۰۸) است که در سال‌های اخیر به‌عنوان یک تهدید جدی مطرح شده است.

بر اساس گزارش سازمان هواشناسی جهانی (WMO)،

استناد: یزدانی، دینا؛ زرین، آذر و داداشی رودباری، عباسعلی (۱۴۰۳). بررسی کارایی روش‌های تصحیح اریبی در بهبود برون‌داد مستقیم دمای مدل‌های CMIP بر روی ایران.

مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۰ (۲)، ۴۲۹-۴۵۰. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.363498.1007547>

رایانامه: (۱) dina.yazdany@gmail.com | a-dadashi@um.ac.ir



جفت‌شده (CMIP) از سال ۱۹۹۵، تحت آزمایش‌های مدل‌های اقلیمی، توسط چندین تیم مدل‌سازی بین‌المللی آغاز به کار کرده است. در پروژه CMIP بسیاری از دانشمندان و مدلسازان اقلیمی از سراسر جهان، به شبیه‌سازی‌های پیشرفته فرایندهای اقلیمی پرداختند تا ضمن تحلیل و مقایسه کارایی هر یک از مدل‌ها، به بینشی عمیق در مورد فرایندها، سازوکارها و پیامدهای وردایی اقلیم و تغییر اقلیم دست یابند (میهل و همکاران، ۲۰۱۴).

پروژه CMIP تحت نظارت برنامه تحقیقات جهانی اقلیم (WCRP) توسط کارگروه مدل‌سازی جفت‌شده (WGCM) سازماندهی شد. هنگامی که شبیه‌سازی‌های اولیه در قیاس با داده‌های مشاهداتی قرار گرفتند، طیف وسیعی از خطاها را در مقیاس‌های زمانی-مکانی نشان دادند (فلاتو و همکاران، ۲۰۱۴). برخی از این خطاها برای چندین دهه مشهود بوده‌اند (قبل از اولین ارزیابی IPCC در سال ۱۹۹۰) و تحت‌عنوان خطاهای سامانمند بیان شدند. خطاهای سامانمند بزرگ در مدل‌های جفت‌شده به این معنی است که ۱. حالت میانگین مدل جفت‌شده با حالت میانگین مشاهده‌شده به‌قدر کفایت توافق ندارند و ۲. تکوین زمانی-مکانی بی‌هنجاری اقلیمی شبیه‌سازی‌شده به‌اندازه کافی واقع بینانه نیست (هارل و همکاران، ۲۰۰۹). چنین خطاهایی بیانگر این هستند که مدل‌ها در کجا و تحت‌تأثیر چه روش‌هایی در بازتولید وضعیت جو، اقیانوس، یخ دریا و سطح زمین، تحت شرایط اقلیم فعلی، موفق یا ناموفق بوده‌اند (میهل و همکاران، ۱۹۹۷). اگرچه تلاش‌های مداومی برای کاهش و حذف این اریبی‌ها انجام شده است، اما همچنان خطاهای سامانمند مدل‌ها به‌عنوان یک چالش اصلی در مدل‌سازی اقلیمی مطرح می‌شود. از آن زمان تاکنون، CMIP در پنج فاز توسعه یافت، که نه تنها به‌عنوان فصل جدیدی برای تحقیقات علم اقلیم معرفی شد، بلکه به‌عنوان اساس ارزیابی‌های ملی و بین‌المللی در تغییر اقلیم شناخته شد (آیرینگ و همکاران، ۲۰۱۶).

پروژه CMIP هم‌اکنون در فاز ششم (CMIP6) خود است. وجود شکاف‌ها و خطاهای سامانمند در فازهای

۲۰۱۳؛ گریگز و ریگنرو، ۲۰۲۱) شده است. از سوی دیگر تشدید رخداد‌های فرین جوی/اقلیمی مانند امواج گرمایی، خشکسالی، طوفان‌های سهمگین، بارش‌های سیل‌آسا و ده‌ها مخاطره دیگر پیامدهای عمده‌ای برای جوامع و اکوسامانه‌های انسانی و طبیعی به‌همراه داشته است (دان و همکاران، ۲۰۲۰). شدت و فراوانی رخداد‌های فرین اقلیمی در سال‌های اخیر در بسیاری از نقاط جهان تغییر کرده است (سنویرتی و همکاران، ۲۰۱۴). به‌طوری‌که انتظار می‌رود شدت این تغییرات تا پایان قرن بیست‌ویکم آشکارتر باشد (سیلمن و همکاران، ۲۰۱۳).

در سال‌های اخیر درک بشر از محرک‌های اقلیمی، گردش‌های بزرگ مقیاس جوی، برهم‌کنش بین اجزای سامانه اقلیم، دینامیک اقلیم، پاسخ سامانه انسانی و طبیعی به تغییر اقلیم و راهبردهایی که ممکن است از این سامانه‌ها در جهان در حال تغییر حفاظت کند، پیشرفت چشم‌گیری داشته است (رانه و همکاران، ۲۰۱۶). از طرفی بهبود شبیه‌سازی سامانه اقلیم و کاهش عدم قطعیت‌ها در پیش‌نگری تغییرات آینده باید اولویت اصلی در مطالعات تغییر اقلیم باشد؛ چرا که این امر وابسته به اطلاعات به‌دست آمده از نظریه‌ها، مشاهدات و همچنین شبیه‌سازی مدل سامانه زمین (ESM) است (آیرینگ و همکاران، ۲۰۱۹).

مدل‌های گردش کلی (GCMs) برای بررسی پاسخ سامانه اقلیمی به واداشت‌های متنوع برای پیش‌بینی/پیش‌نگری اقلیم در مقیاس‌های زمانی فصلی تا دهه‌ای توسعه داده شدند (فلاتو و همکاران، ۲۰۱۴). مدل‌های گردش کلی ضمن این که فرمول‌بندی‌های عددی و طرحواره‌های فیزیکی پیچیده‌ای از جو، اقیانوس، یخ‌سپهر و زمین را در حالت جفت‌شده با یکدیگر ارائه می‌دهند، جهت شبیه‌سازی توزیع سه بعدی اقلیم در سراسر جهان استفاده می‌شوند (رندال و همکاران، ۲۰۰۷). وظیفه اصلی این مدل‌ها کمک به درک پویایی اجزای فیزیکی سامانه اقلیمی (جو، اقیانوس، خشکی و یخ دریا) و پیش‌نگری بر اساس واداشت‌های مختلف مانند هواویزها و گازهای گلخانه‌ای در آینده است. پروژه مقایسه مدل‌های

قبلی سبب توسعه فازهای بعدی آن شد. برای مثال خطای سامانمند مدل‌ها در شبیه‌سازی کمربند همگرایی بین حاره‌ای به صورت دو کمربند (double-Intertropical) (Convergence Zone (ITCZ) bias) و مشکلات بعدی آن نظیر وجود خطا در شبیه‌سازی گردش واکر (Walker Circulation) و اریبی خشک آمازون متعاقب آن، یکی از بارزترین خطاها در تمامی نسل‌های CMIP است که قابلیت اطمینان به پیش‌بینی‌ها و پیش‌نگری‌های مدل‌های اقلیمی را کاهش می‌داد. این خطاها به تدریج از فاز سوم به پنجم و ششم کاهش یافت (تیان و دونگ، ۲۰۲۰). همچنین شبیه‌سازی ضعیف ابرهای کم‌ارتفاع حاره‌ای و جنب حاره‌ای و تأثیر آن بر حساسیت اقلیمی (Climate Sensitivity) و پاسخ اقلیم گذرا (Transient Climate Response)، شبیه‌سازی عمیق‌تر ترموکلاين (Thermocline) در آب‌های مناطق حاره و تأثیر آن بر شبیه‌سازی انسو (El Niño–Southern Oscillation (ENSO))، پیش‌بینی گرم‌تر و خشک‌تر سطوح خشکی‌ها در تابستان و در نهایت شبیه‌سازی نادرست موقعیت جت استریم نیمکره جنوبی در ۵-۱۰ درجه شمالی‌تر نسبت به موقعیت مشاهداتی آن که منجر به شبیه‌سازی ضعیف بادهای سطح اقیانوس‌های آن مناطق می‌شد از اصلی‌ترین اشکالات فازهای اولیه CMIP بوده‌اند که سبب توسعه فازهای بعدی آن شد (استوفر و همکاران، ۲۰۱۷). تصمیم‌گیری دقیق برای اقلیم آینده و پیامدهای آن مستقیماً با خروجی مدل‌ها در ارتباط است. با وجود آن که مدل‌های گردش کلی منبع اصلی برای ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم محسوب می‌شوند و همچنین ابزاری قدرتمند برای ارائه اطلاعات اقلیمی در مقیاس محلی و جهانی هستند (ناواروراسینز و تاراپوزمونتته‌نگرو، ۲۰۱۵)، اما به دلیل وجود خطاهای سامانمند بزرگ در شبیه‌سازی و نیز داشتن تفکیک افقی پایین به ندرت می‌توان از برونداد مستقیم آنها استفاده کرد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۴).

مطالعه اریبی‌ها و خطاهای سامانمند مدل‌ها به دلیل رفتار غیرخطی سامانه‌ی اقلیم بسیار دشوار است. لذا برای کاستن از اریبی مدل‌ها و غلبه بر شکاف‌های ناشی از فاصله زیاد

بین شبکه‌ای مدل‌ها، برونداد مدل‌های اقلیمی معمولاً با روش‌های تصحیح اریبی پس پردازش می‌شوند (مارون و همکاران، ۲۰۱۷). مدل‌های اقلیمی غالباً گویای ساده‌سازی ذاتی یک سامانه واقعی هستند. آنها مبتنی بر قوانین فیزیکی مانند بقای انرژی، جرم، تکانه، قوانین ترمودینامیکی و تابش هستند، تفکیک افقی پایین دارند و از ناهموازی هموار شده استفاده می‌کنند. به همین دلیل مدل‌ها نه تنها محدودیت‌هایی در نمایش فرایندهای مربوط به امواج سیاره‌ای و تلاطم دارند، بلکه پدیده‌های کوچک مقیاس را نیز نمی‌توانند در قالب یک شبکه نمایش دهند. لذا این پدیده‌ها به اجبار یا نادیده انگاشته می‌شوند و یا پارامترسازی می‌شوند. در نتیجه بسیاری از فرایندهای جوی، اقیانوسی و فرایندهای جفت‌شده به‌طور واقع‌بینانه‌ای نمایش داده نمی‌شوند (وانگ و کوتامارتی، ۲۰۱۵).

جهت تصحیح یا حذف اریبی برونداد مدل‌های اقلیمی، روش‌های تصحیح اریبی متعددی وجود دارند که برخی از آنها دارای محدودیت‌های قابل ملاحظه‌ای هستند. بعضی از این محدودیت‌ها عبارتند از: ۱- با توجه به این که تصحیح اریبی معمولاً برای دوره‌های آینده به کار برده می‌شود، ایستایی (Stationarity) در اریبی داده‌های دوره تاریخی سبب بالا رفتن عدم قطعیت در داده‌های آینده می‌شود (ریسنن و راتی، ۲۰۱۳). ۲- ایجاد محدودیت در کیفیت داده‌های تصحیح اریبی شده، که به واسطه محدودیت‌های داده‌های مشاهداتی و همچنین لحاظ‌نکردن فرایندهای فیزیکی جو، متغیرهای مختلف اقلیمی را دستخوش تغییر می‌کنند. به‌عنوان مثال پس از اعمال تصحیح اریبی، دما ممکن است به زیر صفر برود، در حالی که بارش به برف تبدیل نمی‌شود (همپل و همکاران، ۲۰۱۳). بسیاری از مطالعات اخیر نشان دادند که برای آن که حساسیت مدل‌های اقلیمی تحت تأثیر روش‌های تصحیح اریبی قرار نگیرد، باید روند در داده‌های پیش‌نگری حفظ شود (کنون و همکاران، ۲۰۱۵). ۳- برخی از این روش‌ها مانند نسبت‌گیری خطی (Linear Scaling) تنها میانگین مدل‌های اقلیمی را بازتولید می‌کند. درحالی که روش‌های دیگر مانند نگاهت

بزرگ‌تری در قیاس با حالت تصحیح‌نشده است. لذا ضرورت دارد روش مناسب برای تصحیح اریبی اتخاذ شود تا از ایجاد خطاهای جدید جلوگیری شود.

دسته دوم مطالعات به مقایسه روش‌های تصحیح اریبی پرداختند. برای نمونه گودمندسون و همکاران (۲۰۱۲) به مقایسه روش‌های مختلف تصحیح اریبی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که این روش‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای دارای کارایی و مفروضات اساسی متفاوتی هستند. گروهی از این مطالعات یک روش خاص (همانند نگاشت چندک) را یک روش کارآمد در افزایش کارایی متغیرهای اقلیمی همانند دما و بارش دانسته‌اند (فنگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ عظمت و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعات بسیاری نیز (شرستا و همکاران، ۲۰۱۷؛ اسمیتا و همکاران، ۲۰۱۸؛ مودبتکال و مهاشا، ۲۰۱۸؛ مندز و همکاران، ۲۰۲۰) کارایی روش‌های تصحیح اریبی را در ارتباط با منطقه مورد مطالعه، متغیرهای اقلیمی و داده‌های مورد استفاده متفاوت دانسته‌اند.

در ایران نیز مطالعات مختلفی از روش‌های تصحیح اریبی برای بهبود برون‌داد مستقیم مدل‌ها استفاده کرده‌اند. غالب این مطالعات افزایش کارایی مدل پس از تصحیح اریبی برای متغیرهای دما (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۰) و بارش (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰) را گزارش کرده‌اند. منابع فوق صرفاً با استفاده از یک روش تصحیح اریبی انجام شده‌اند و مطالعه‌ای که به بررسی روش‌های مختلف تصحیح اریبی برای یک متغیر همانند دما در ایران پرداخته باشد، انجام نشده است. چنین سطحی از مطالعات می‌تواند درک بهتری از روش‌های مختلف تصحیح اریبی و انتخاب کاراترین روش در اختیار پژوهشگران قرار دهند. در این پژوهش، برای این که نتایج این تحقیق قابلیت تحلیلی فراتر از یک ایستگاه داشته باشد و بتوان بهتر به مقایسه روش‌ها پرداخت، نتایج مربوط به روش‌های تصحیح اریبی در پهنه‌های اقلیمی مورد بررسی قرار گرفته است.

چندک (Distribution Mapping) و روش پارامتری تبدیل توانی (Power Transformation)، میانگین و فراوانی مقادیر مدل‌ها را با مقادیر آماری مشاهداتی تصحیح می‌کنند (تویچبان و سایبرت، ۲۰۱۲). ۴- از دیگر محدودیت‌های تصحیح اریبی، می‌توان به وابستگی شدید این روش‌ها به داده‌های مشاهداتی اشاره کرد (آدور و همکاران، ۲۰۱۴). معمولاً در بیشتر روش‌های تصحیح اریبی، الگوریتم در طول زمان ثابت است (پسانی و همکاران، ۲۰۱۰). این محدودیت‌ها مانع از به‌کاربردن روش‌های تصحیح اریبی نمی‌شوند، زیرا با وجود محدودیت‌های روش‌های تصحیح اریبی، برون‌داد مستقیم GCMها بهبود می‌یابند، گرچه سطح کارایی آنها متفاوت است (لئو و همکاران، ۲۰۱۸؛ یه و همکاران، ۲۰۲۰).

از روش‌های تصحیح اریبی در مطالعات مختلفی با اهداف گوناگون استفاده شده است. دسته اول مطالعات شامل بررسی‌هایی هستند که از روش‌های مختلف تصحیح اریبی جهت بهبود برون‌داد مدل‌ها استفاده کرده‌اند. بررسی این مطالعات نشان داد که روش‌های تصحیح اریبی الزاماً همیشه نتایج را بهبود نمی‌بخشند. در حالی که برخی بررسی‌ها بر بهبود برون‌داد مدل‌ها پس از اعمال روش‌های تصحیح اریبی تأکید کرده‌اند، برخی دیگر کارایی این روش‌ها در بهبود برون‌داد مستقیم مدل‌ها در منطقه مورد مطالعه‌شان را تأیید نکرده‌اند. برای مثال نتایج تصحیح اریبی مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی بارش و دما در پاراگوئه ضمن کاهش خطاهای سامانمند مدل‌ها، میانگین متغیرها را بهبود بخشید (لویسو و همکاران، ۲۰۲۱). به‌همین ترتیب سانگ و همکاران (۲۰۲۱) نیز در ارزیابی دما و بارش در کره جنوبی نشان دادند که استفاده از روش‌های تصحیح اریبی سبب بهبود قابلیت نسبی مدل‌ها می‌شود. در مقابل، مطالعاتی وجود دارند که نایستایی روش‌های تصحیح اریبی را نشان داده‌اند (مارون، ۲۰۱۲). یا مطالعاتی همچون وانگ و کوتامارتی (۲۰۱۵) نشان دادند که برون‌داد مدل WRF بر روی کانادا و آمریکای شمالی در حالت تصحیح‌شده دارای اریبی مرطوب

۲. داده و روش تحقیق

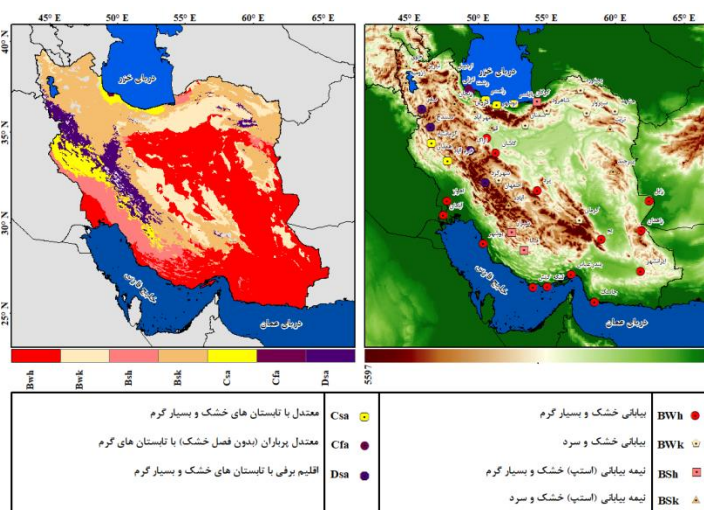
۲-۱. منطقه مورد مطالعه

محدوده پژوهش حاضر، کشور ایران واقع در غرب آسیا است (شکل ۱). ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی منحصر به فردی که دارد، دارای زمستان‌های بسیار سرد و بارانی و اقلیم قاره‌ای با تابستان‌های گرم و خشک است. روش‌های مختلفی برای طبقه‌بندی اقلیمی وجود دارد. از معروف‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش طبقه‌بندی دمارتن (de Martonne) و کوپن (Köppen) اشاره کرد. سیستم طبقه‌بندی دمارتن به دلیل ضعف در شناسایی اقلیم‌های سرد برای کشور ایران چندان کاربردی ندارد. اخیراً در پژوهشی خلیلی و همکاران (۱۴۰۱) به منظور افزایش کارایی این طبقه‌بندی دو گسترش شامل باز تعریف طبقه خشک به دو زیر-اقلیم مجزا و گسترش طبقات اقلیمی بر پایه میانگین دمای کمینه روزانه در سردترین ماه سال به آن افزوده‌اند که باعث افزایش کارایی آن شده است. همچنین بک و همکاران (۲۰۲۳) با به کارگیری داده‌های با تفکیک افقی بسیار بالا (۱ کیلومتر) طبقه‌بندی کوپن-گایگر با این داده‌ها در سطح جهانی به روزرسانی کردند و سبب افزایش قابل توجه دقت این طبقه‌بندی در سطح جهانی شده‌اند. در این پژوهش از روش طبقه‌بندی کوپن-گایگر ارائه شده توسط بک و همکاران (۲۰۲۳) استفاده شده است. بر اساس دسته‌بندی

کوپن-گایگر، طبقات BSk، Csa، BSh و BWh و BWk بیش از ۹۸ درصد اقلیم ایران را تشکیل می‌دهند (شکل ۱-ب).

۲-۲. داده‌های مشاهداتی

در پژوهش حاضر به جهت ارزیابی برونداد مستقیم (DMO) و تصحیح شده اریبی مدل از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید استفاده شد. ایستگاه‌های هواشناسی همدید اندازه‌گیری‌های متناوبی را در طی زمان ارائه می‌دهند که این امر سبب تولید داده‌هایی با دقت بالا می‌شود (گیلوسکی و ناوالانی، ۲۰۱۸). در حال حاضر بیش از ۴۰۰ ایستگاه هواشناسی همدید در ایران وجود دارد که به سبب نداشتن آمار طولانی، عدم همگنی و عدم کفایت داده‌ها، نمی‌توان از بسیاری از این ایستگاه‌ها برای پژوهش در یک دوره زمانی طولانی بهره برد. انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس دوره آماری مشترک با دوره تاریخی مدل مورد بررسی از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ در نظر گرفته شد. بر این اساس داده‌های ۴۶ ایستگاه هواشناسی همدید با دوره آماری مشترک استفاده شد. غالب این ۴۶ ایستگاه در طبقات اقلیمی BWh (۱۴ ایستگاه)، BSk (۱۱ ایستگاه) و BWk (۷ ایستگاه) قرار گرفته‌اند. سایر ایستگاه‌ها به ترتیب با تعداد ۵، ۴، ۳ و ۲ ایستگاه در طبقات اقلیمی Csa، Dsa، BSh و Cfa جای گرفتند (شکل ۱).



(ب)

(الف)

شکل ۱. الف) مدل رقمی ارتفاعی (DEM) ایران برحسب متر با توزیع فضایی ایستگاه‌های همدید و ب) طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر

۲-۴. مدل EC-Earth3-CC

مدل EC-Earth یک مدل سامانه زمین ماژولاری (MESM Modular Earth System Model) است که به‌طور مشترک توسط کنسرسیوم اروپایی با همین نام توسعه یافت. مدل EC-Earth3-CC به‌همراه بسیاری از مدل‌های EC-Earth3 توسعه یافت تا ابزاری یکپارچه برای مطالعات سامانه زمین جامعه تحقیقاتی اروپا ارائه دهد. پیکربندی مدل، توصیفی از چرخه کربن دارد که در پروژه مقایسه‌ای مدل (The Coupled Climate-Carbon Cycle Model) (Intercomparison Project (C4MIP) استفاده می‌شود. این مدل برخلاف سایر مدل‌های CMIP6 که در پروژه ScenarioMIP شرکت داشته‌اند و بر اساس سناریوهای از پیش تعیین شده، غلظت معینی را شبیه‌سازی می‌کنند، امکان ۳۶۰ شبیه‌سازی بیشتر به‌همراه واداشت‌های انتشار مختلف را فراهم می‌آورد. تنوع در پیکربندی‌های مدل و اجرای مدل‌های فرعی ضمن مهیا کردن اجراهای کارآمدتر، زمینه را برای شناسایی واداشت‌های مختلف فراهم می‌آورد (دوشور و همکاران، ۲۰۲۱). مدل EC-Earth3-CC ضمن اجرا با مدل جو و سطح زمین، اقیانوس و یخ دریا و دینامیک پوشش گیاهی با مدل ترکیب جو تنها با در نظر گرفتن CO₂ و بیوژنوشیمی دریا تنها با لحاظ کردن نسبت اختلاط و شار CO₂ اجرا می‌شود. مدل EC-Earth3-CC دارای تفکیک افقی ۰/۷ درجه قوسی است. هر چند که مطالعات پیشین بر به‌کارگیری چند مدلی همادی (MME) تأکید می‌کنند، اما در این تحقیق هدف صرفاً بررسی تأثیر به‌کارگیری روش‌های مختلف تصحیح اریبی بر کارایی و وردایی درون‌سالی دما بوده است. لذا در این پژوهش با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد مدل EC-Earth3-CC و همچنین تفکیک افقی مناسب آن، از این مدل برای مقایسه روش‌های مختلف تصحیح اریبی برای متغیرهای دمای کمینه و بیشینه استفاده شده است.

۲-۵. روش‌های تصحیح اریبی

مدل‌های گردش کلی (GCM) دارای خطاهای سامانمند

۲-۳. فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6)

طیف گسترده‌ای از مدل‌ها در علوم زمین و به‌طور مشخص اقلیم‌شناسی برای مطالعه سامانه اقلیم و وضعیت آن توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها ابزارهای اصلی در دسترس برای بررسی اقلیم آینده، تحت طیف گسترده‌ای از سناریوها هستند (کاب و همکاران، ۲۰۲۱). از اواسط دهه ۱۹۹۰ کمیته برنامه جهانی تحقیقات اقلیم (WCRP) اولین فعالیت در زمینه پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده اقلیمی جهانی را سازماندهی کرد (میهل و همکاران، ۲۰۰۷). پروژه مقایسه مدل جفت‌شده اقلیمی (CMIP) با هدف درک علمی از سامانه زمین و تبدیل شدن به یک منبع ارزشمند برای ارزیابی‌های اقلیم ملی و بین‌المللی توسعه یافت (استوفر و همکاران، ۲۰۱۷). فازهای اولیه CMIP همانند CMIP1 و CMIP2 به ارزیابی اثرات تعدیل شار بر شبیه‌سازی‌های اقلیمی، ارزیابی کارایی مدل‌های جفت‌شده موجود در فازهای اولیه بر شبیه‌سازی وردایی دمای هوا و مقایسه شبیه‌سازی مدل‌های تغییر اقلیم در طی تغییر واداشت ایده‌آل (افزایش غلظت دی‌اکسید کربن جو (CO₂) با نرخ ۱ درصد در سال) پرداختند (میهل و همکاران، ۲۰۰۰). فازهای بعدی CMIP همانند CMIP3 و CMIP5 ضمن در برگرفتن مدل‌های جامع‌تر و مجموعه آزمایش‌های وسیع‌تر، در پاسخ به طیف وسیعی از سؤالات علمی برجسته در فازهای قبلی توسعه یافتند. CMIP در تمام فازها توسعه یافت اما شکاف‌های علمی گسترده نظیر برآورد ضعیف واداشت تابشی به‌همراه خطای سامانمند مدل‌ها و مطرح شدن سؤالات علمی مهم در فازهای قبلی، سبب آماده‌سازی فاز ششم شد (میهل و همکاران، ۲۰۱۴). در مقایسه با نسل قبلی، فاز ششم پیشرفت‌های قابل توجهی در تفکیک افقی، پارامترسازی فیزیکی (برای مثال در ارائه ابرها)، لحاظ کردن فرایندهای بیشتری از سامانه زمین (برای مثال محدودیت‌های ماده غذایی در چرخه کربن زمینی) و مولفه‌های آن (صفحات یخی) نشان داد (فان و همکاران، ۲۰۲۰).

روش، منطبق کردن کامل میانگین ماهانه مقادیر تصحیح شده با مقادیر مشاهداتی است (لندریک و همکاران، ۲۰۰۷). این روش با مقادیر تصحیح ماهانه بر اساس تفاوت بین داده مشاهداتی و برونداد مستقیم مدل (DMO) عمل می کند که معمولاً دما با یک مقدار افزایشی اصلاح می شود. روش نسبت گیری خطی را می توان بر اساس روابط ۱ و ۲ تعریف کرد.

$$T_{his}(d)^* = T_{his}(d) + [\mu_m\{T_{obs}(d)\} - \mu_m\{T_{his}(d)\}] \quad (1)$$

$$T_{sim}(d)^* = T_{sim}(d) + [\mu_m\{T_{obs}(d)\} - \mu_m\{T_{his}(d)\}] \quad (2)$$

در روابط ارائه شده T دما، d مخفف روزانه، μ_m میانگین بلندمدت ماهانه، علامت ستاره (*) بیانگر اریبی تصحیح شده است که به برونداد مستقیم مدل طی دوره تاریخی اشاره دارد. Obs بیانگر داده های مشاهداتی و sim و raw بیانگر برونداد مستقیم GCM یا DMO است.

۲-۵-۲. روش نسبت گیری واریانس

روش نسبت گیری واریانس یک رویکرد متناظر برای تصحیح میانگین و واریانس سری های زمانی به صورت گام به گام است که توسط چن و همکاران (۲۰۱۱) ارائه شد. از آنجا که متغیر دما دارای توزیع نرمال است، برای تصحیح میانگین و واریانس متغیرهایی با توزیع نرمال مانند دما، از روش نسبت گیری واریانس برای تصحیح اریبی استفاده می شود (ترینک و همکاران، ۲۰۱۰؛ تویچجان و سایرت، ۲۰۱۲). روش نسبت گیری واریانس را می توان همانند رابطه (۳) نوشت.

$$T_{cor,m,d} = [T_{raw,m,d} - \mu(T_{raw,m})] \times \frac{\sigma(T_{obs,m})}{\sigma(T_{raw,m})} + \mu(T_{obs,m}) \quad (3)$$

۲-۵-۳. روش های نگاهت چندک

نگاشت چندک (QM) مجموعه ای از چندک ها را برای مجموعه داده های مشاهداتی برآورد می کند و سپس به واسطه درونیابی بین مقادیر کمیت متناظر داده های مشاهداتی و مدل، یک تابع انتقال را تشکیل می دهد (لاکشمنا و همکاران، ۲۰۱۵). در روش نگاهت چندک

متعددی هستند. این خطاها می تواند به دلایل مختلفی از جمله تفکیک افقی پایین مدل ها، فیزیک مدل ها، ارائه ناقص سامانه اقلیم جهانی و فرایندهای ترمودینامیکی اتفاق افتد. اگرچه این مدل ها در بزرگ مقیاس نتایج خوبی را در مقایسه با داده های مشاهداتی نشان می دهند اما همچنان برای بررسی های مقیاس منطقه ای دارای اریبی و خطا هستند (شرستا و همکاران، ۲۰۱۶). لذا استفاده از برونداد تصحیح نشده ممکن است اختلاف بسیار زیادی را با مقدار مشاهداتی نشان دهد که منجر به نتایج نادرست شود. استفاده از روش های تصحیح اریبی، ضمن تصحیح میانگین، واریانس و چندک، سبب تصحیح سری زمانی متغیر با استفاده از ضریب تصحیح معین جهت تطبیق سری زمانی متغیر اصلاح شده مدل با متغیر مشاهداتی می شود (شرستا و همکاران، ۲۰۱۷).

روش های تصحیح اریبی مختلفی وجود دارند که بنابر ماهیت متغیرهای مورد بررسی، متفاوت عمل می کنند. معمولاً تصحیح افزودنی (Additive) جهت حفظ تغییرات مطلق برای متغیر دما و تصحیح ضربی (Multiplicative) جهت حفظ تغییرات نسبی برای متغیرهایی نظیر بارش، فشار بخار و تابش خورشیدی کاربرد دارد (همپل و همکاران، ۲۰۱۳). در پژوهش حاضر از پنج روش تصحیح اریبی نسبت گیری خطی (LS) (Linear Scaling)، نسبت گیری واریانس (VST) (Variance Scaling Of Temperature)، نگاهت چندک تجربی (EQM) (Empirical Quantile Mapping)، نگاهت چندک اسپلاین هموار (Quantile mapping using a smoothing spline) و نگاهت چندک تجربی استوار (Empirical Robust Quantile Mapping) جهت تصحیح اریبی دمای کمینه و بیشینه مدل EC-Earth3-CC استفاده شده است.

۲-۵-۱. روش نسبت گیری خطی

روش نسبت گیری خطی یکی از ساده ترین روش های تصحیح اریبی قلمداد می شود که جهت تصحیح مقدار میانگین در برونداد GCM استفاده می شود. هدف از این

و مشاهدات مورد ارزیابی قرار می‌دهد. برای هر سطح چندک $\tau = 0, 0.01, 0.02, \dots, 0.99, 1.00$ ، NLS برای برآورد تابع نگاشت چندک انعطاف پذیر $g(\tau)$ ، به کار می‌رود. به طوری که $[F_{m,h}^{-1}(\tau) = g[F_{m,h}^{-1}(\tau)]$ با استفاده از ۱۰ نزدیک‌ترین نقطه در سری داده‌ها در نمودار چندک مشخص می‌شود (کیان و چنگ، ۲۰۲۱).

۳-۵-۲. نگاشت چندک اسپیلاین هموار
روش اسپیلاین هموار مانند روش‌های نگاشت چندک تجربی و نگاشت چندک تجربی استوار، یکی از روش‌های نگاشت چندک ناپارامتریک است. در این روش یک اسپیلاین هموارسازی شده به نمودار چندک سری زمانی مشاهداتی و مدل‌سازی شده برازش داده می‌شود. روش اسپیلاین هموار از تابع اسپیلاین جهت تنظیم توزیع داده مدل برای مطابقت با توزیع آماری داده‌های مشاهداتی استفاده می‌کند (گودموندسون و همکاران، ۲۰۱۲).

۶-۲. درستی سنجی روش‌های مختلف تصحیح اریبی

برای مدل EC-Earth3-CC

جهت درستی سنجی برون‌داد مستقیم مدل (DMO) و روش‌های مختلف تصحیح اریبی مدل EC-Earth3-CC در ایران از سه سنجه آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۶)، درصد اریبی (PBIAS) (رابطه ۷) و شاخص توافق (d) (رابطه ۸) استفاده شد. سنجه RMSE ضمن پرداختن به اختلاف بین مقادیر مدل و مشاهداتی، به بررسی دقت برآورد مدل در برابر داده‌های مشاهداتی می‌پردازد (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷). مقدار PBIAS تفاوت بین مقادیر میانگین مشاهداتی و مدل است. مقدار این سنجه ممکن است مثبت یا منفی باشد. مقادیر مثبت بیانگر بیش‌برآوردی و مقادیر منفی بیانگر کم‌برآوردی مدل است (گوپتا و همکاران، ۱۹۹۹). سنجه ضریب توافق (d) توسط ویلموت و همکاران (۱۹۸۵) به عنوان یک معیار استاندارد شده برای بررسی درجه خطای پیش‌بینی مدل معرفی شد. این سنجه بیانگر تطابق

تابع تبدیل $T_0 = h(T_m)$ را از یک متغیر مدل‌سازی شده T_m به دست می‌آورد. به طوری که توزیع جدید آن با توزیع متغیر مشاهده شده T_0 برابر باشد. در این رابطه T_m و T_0 به ترتیب دمای مشاهداتی و مدل است. روش چندک را به طور کلی می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$T_0 = F_0^{-1}(F_m(T_m)) \quad (۴)$$

که در آن F_m ، تابع توزیع تجمعی (CDF) از T_m است و F_0^{-1} معکوس تابع چندک مربوط به T_0 است. هدف اصلی QM اصلاح چندک‌های GCM برای مطابقت با چندک‌های مقادیر مشاهداتی به واسطه ایجاد یک تابع انتقال برای تغییر چندک‌های بارش و دما است. نگاشت چندک دارای رویکردهای مختلفی است. در پژوهش حاضر از روش نگاشت چندک با رویکرد تبدیل ناپارامتریک استفاده شده است (گودموندسون و همکاران، ۲۰۱۲).

۱-۳-۵-۲. روش نگاشت چندک تجربی

روش نگاشت چندک تجربی یک روش ناپارامتریک است که به طور خاص تابع‌های توزیع تجمعی (CDF) مشاهدات و برون‌داد مدل را بر روی مجموعه‌ای از سطوح چندکی (Quantile Levels) با فاصله منظم، $\tau = 0, 0.01, 0.02, \dots, 0.99, 1.00$ برآورد می‌کند. سپس درون‌یابی خطی جهت به دست آوردن مقادیر چندکی برای سطوحی که در لیست بالا نیستند اعمال می‌شود (کیان و چنگ، ۲۰۲۱). هدف نگاشت چندک تجربی، تنظیم تابع توزیع تجمعی تجربی شبیه‌سازی شده CDF نسبت به داده مشاهداتی است. تغییرات در CDF بسته به نوع تابع CDF در طول دوره واسنجی یا تاریخی مقیاس - بندی می‌شود (عثمان و همکاران، ۲۰۲۲).

$$tm_{gcm,M}^{CRC} = CDF_{obs}^{-1}(CDF_{gcm}(tm_{gcm,M}^{raw})), \quad \text{for } M = \{1, 2, \dots, 12\} \quad (۵)$$

۲-۳-۵-۲. روش نگاشت چندک تجربی استوار

روش نگاشت چندک تجربی استوار، نگاشت چندک تجربی را با استفاده از رگرسیون حداقل مربعات غیرخطی (NLS) برای برآورد رابطه سری‌های زمانی مدل‌سازی شده

سلسیوس به ترتیب در پهنه‌های اقلیمی BSk، Csa و BWh متغیر است. اعمال روش‌های تصحیح اریبی مقدار RMSE را بین ۰/۳۵ تا ۲/۱۱ درجه سلسیوس کاهش داده است. ارزیابی نتایج حاصل پس از تصحیح اریبی در مقایسه با برون‌داد مستقیم مدل نشان از کاهش قابل توجه خطا دارد. مقایسه دو به دوی سنجه RMSE پیش و پس از تصحیح اریبی بین برون‌داد مستقیم مدل با روش‌های LS، VST، QMAPQUANT و QMAPRQUANT، نشان از کاهش خطا به مقدار ۴/۶۷، ۴/۳۳، ۴/۳۲ و ۴/۳۶ درجه سلسیوس دارد.

بررسی نتایج سنجه RMSE برای دمای بیشینه نیز نتایج به دست آمده برای دمای کمینه را تأیید می‌کند. سنجه RMSE برای برون‌داد مستقیم مدل بین ۰/۹۶ تا ۶/۷۲ درجه سلسیوس در نوسان است. به طوری که پس از تصحیح اریبی، دامنه خطا بین ۰/۵۵ تا ۱/۸۸ درجه سلسیوس در تغییر است که مبین کاهش قابل توجه خطا پس از اعمال روش‌های تصحیح اریبی است. مقدار بالای خطا برای دمای بیشینه در پهنه اقلیمی برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (Dsa) و همچنین پهنه بیابانی خشک و بسیار گرم (BWh) مشاهده می‌شود. روش‌های تصحیح اریبی LS، VST، QMAPQUANT، QMAPRQUANT و QMAPSSPLIN در قیاس با برون‌داد مستقیم مدل به ترتیب کاهش خطایی حدود ۵/۰۴، ۴/۹۳، ۴/۸۵، ۴/۸۴ و ۴/۸۵ درجه سلسیوس را برای دمای بیشینه در کشور نشان داده‌اند که همانند دمای کمینه نشان‌دهنده کاهش قابل توجه خطا است (شکل ۲).

روش‌های تصحیح اریبی همیشه و در همه پهنه‌های اقلیمی باعث کاهش خطا نمی‌شوند. برای مثال برای متغیر دمای کمینه از ۴۶ ایستگاه همدید مورد بررسی، مقدار خطا پس از تصحیح اریبی بر اساس سه روش LS، VST و QMAP در ایستگاه سقز به عنوان نماینده اقلیمی پهنه برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (Dsa) به ترتیب نزدیک به ۰/۰۱، ۰/۳۸ و ۰/۱۲ درجه سلسیوس نسبت به DMO افزایش پیدا کرده است (شکل ۲). هر چند که این نتیجه نیز می‌تواند به شکلی دیگر از منظر عدم قطعیت

بین مقادیر مدل و مقادیر مشاهداتی است. مقدار این سنجه بین صفر و یک متغیر است و مقادیر نزدیک به یک، بیانگر توافق کامل بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است (اندرزیان و همکاران، ۲۰۱۱).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \times 100 \quad (7)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \right] \quad (8)$$

در روابط ارائه شده، P_i مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل (مقدار برون‌داد مستقیم مدل و مقدار تصحیح شده اریبی مدل)، O_i مقدار مشاهداتی و n تعداد کل داده‌ها است. همچنین obs و sim به ترتیب بیانگر مقادیر مشاهداتی و برون‌داد مستقیم و تصحیح شده اریبی مدل هستند.

۲-۷. بررسی وردایی درون‌سالی دمای کمینه و بیشینه در ایران

وردایی درون‌سالی (IVS) شبیه‌سازی‌ها نسبت به مشاهدات، به واسطه نمره مهارت وردایی درون‌سالی (IVS) ارزیابی می‌شود. وردایی درون‌سالی را می‌توان با استفاده از رابطه $IVS = \left(\frac{STD_m}{STD_o} - \frac{STD_o}{STD_m} \right)^2$ محاسبه کرد. نمره مهارت وردایی درون‌سالی (IVS) یک سنجه وردایی متقارن است. این سنجه جهت اندازه‌گیری شباهت وردایی درون‌سالی، بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی استفاده می‌شود. مقدار کوچک‌تر IVS، بیانگر شبیه‌سازی بهتر وردایی درون‌سالی است (یانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

۳. نتایج و بحث

۳-۱. درستی‌سنجی برون‌داد مستقیم و روش‌های تصحیح

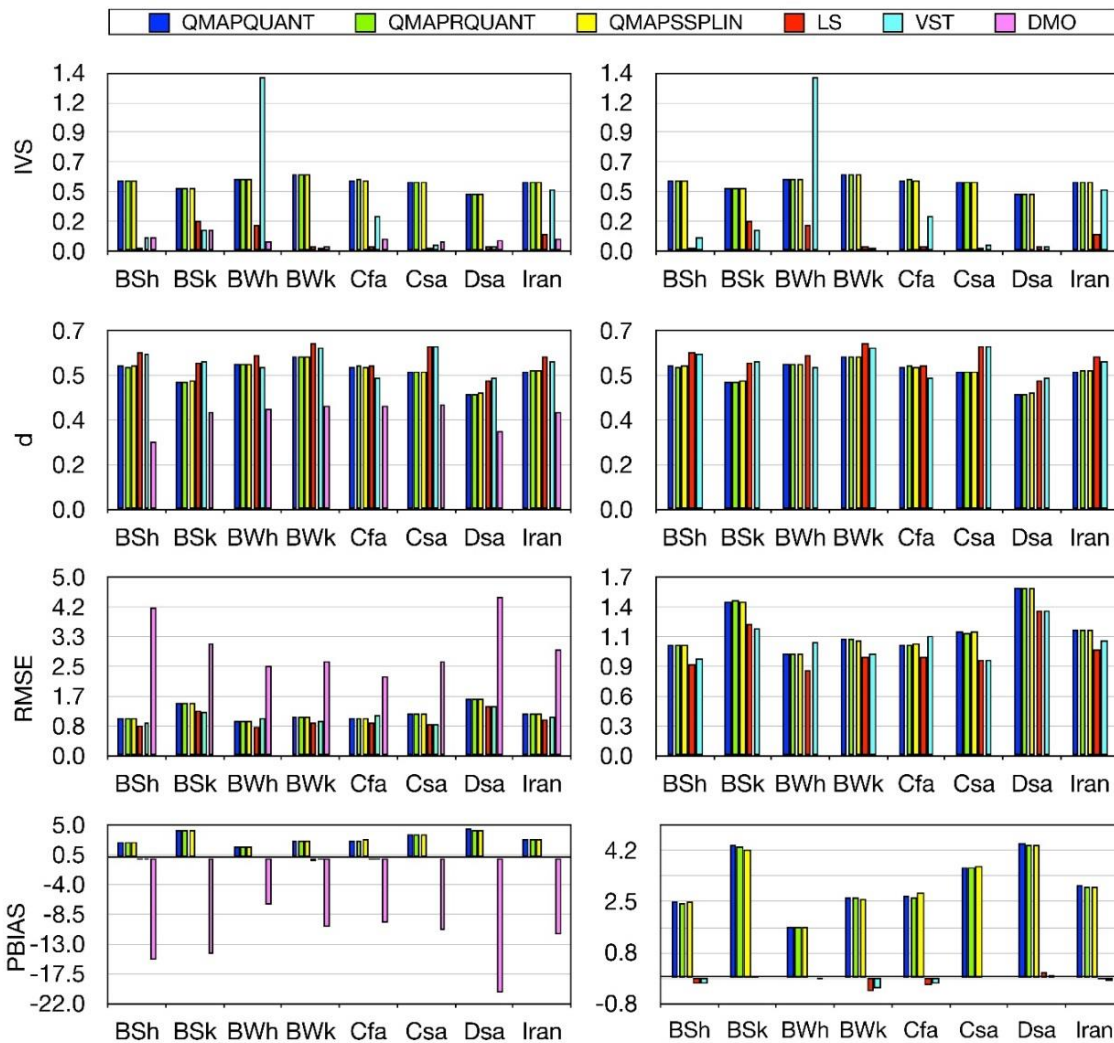
ارایی برای دمای کمینه و بیشینه در ایران

از سنجه RMSE برای نشان دادن بزرگی خطای روش‌های تصحیح اریبی با برون‌داد مستقیم مدل EC-Earth3-CC در دوره تاریخی استفاده شد. نتایج مربوط به این سنجه برای دمای کمینه نشان داد که مقدار خطای حاصل از برون‌داد مستقیم مدل EC-Earth3-CC بین ۰/۳۵ تا ۶/۴۳ درجه

اساس نتیجه این پژوهش، یافته‌های پیشین در خصوص دامنه تغییرات خطای مدل‌های CMIP6 برای دمای ایران را تأیید می‌کند.

مقدار خطا در متوسط پهنه‌های اقلیمی برای متغیر دمای کمینه در پهنه اقلیمی Cfa نسبت به سایر پهنه‌های اقلیمی بسیار بالا است. کمترین مقدار خطا را می‌توان در دو پهنه اقلیمی Dsa و Csa ملاحظه کرد. ارزیابی مقدار خطا برای دمای بیشینه نتایج مشابهی همانند دمای کمینه را به دنبال دارد با این تفاوت که در سه پهنه اقلیمی Bsk، Bsh و Dsa خطا بیش از ۳ درجه سلسیوس است. کمترین مقدار خطا را می‌توان در دو پهنه اقلیمی BWh و Cfa مشاهده کرد (شکل ۲).

(عدم قطعیت ناشی از روش‌های تصحیح اریبی، عدم قطعیت ناشی از به‌کارگیری سنجه RMSE و یا عدم قطعیت ناشی از مدل) مورد بررسی قرار گیرد، این پژوهش عدم قطعیت‌ها را بحث نمی‌کند و لذا می‌توان نتیجه گرفت که با قطعیت نمی‌توان از کاهش مقدار خطا در همه اقلیم‌ها پس از تصحیح اریبی بحث کرد. به‌طور کلی مقدار RMSE در حالت DMO و تصحیح اریبی به‌طور متوسط برای پهنه‌های اقلیمی گرم و خشک ایران کمتر از پهنه‌های برف گیر ایران یا پهنه اقلیمی Dsa است که این موضوع می‌تواند به دلیل تغییرات بیشتر دامنه شبانه روزی دما در پهنه‌هایی با اقلیم برفی باشد که پیش‌تر توسط زرین و همکاران (۱۴۰۰) نیز اشاره شده است که بر



شکل ۲. مقایسه برون‌داد مستقیم مدل (DMO) با روش‌های تصحیح اریبی (BC) برای دمای بیشینه در پهنه‌های اقلیمی و متوسط کشور. ستون سمت چپ مقایسه DMO با BC و سمت راست مقایسه روش‌های مختلف تصحیح اریبی است.

۳/۵ درصد نسبت به DMO در این مناطق کاهش پیدا کرده است. به طور کلی ارزیابی زیاد دما در حالت DMO در مدل های GCM می تواند با خطا در شبیه سازی فرایندهایی نظیر فرارفت گرما، برهم کنش های سطحی و پارامترسازی در ارتباط باشد (فیروپو و همکاران، ۲۰۲۲).

کارایی سنجه PBIAS بر اساس روش های تصحیح ارزیابی برای دمای کمینه نشان داد که درصد ارزیابی در قیاس با برونداد مستقیم مدل در بیش تر پهنه های اقلیمی به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. اگرچه دو روش LS و VST نشان دادند در دو پهنه اقلیمی Csa و BWh مقدار درصد ارزیابی به شکل قابل ملاحظه ای افزایش می یابد، اما بر اساس سه روش تصحیح ارزیابی QMAPQUANT، QMAPRQUANT و QMAPSSPLIN، مقدار درصد ارزیابی، در بیش تر پهنه های اقلیمی به ویژه در سه پهنه اقلیمی Bsk، BwK و Dsa افزایش قابل توجهی را دارا است. به طوری که ارزیابی در این پهنه ها درصد ارزیابی مثبت می شود که نشان دهنده بیش برآوردی است. کارایی این سنجه برای دمای بیشینه همانند دمای کمینه است. به طوری که DMO در تمام پهنه های اقلیمی ایران دارای کم برآوردی است، اما پس از تصحیح ارزیابی در بیش تر پهنه های اقلیمی درصد ارزیابی مدل مثبت می شود که نشان دهنده بیش برآوردی است.

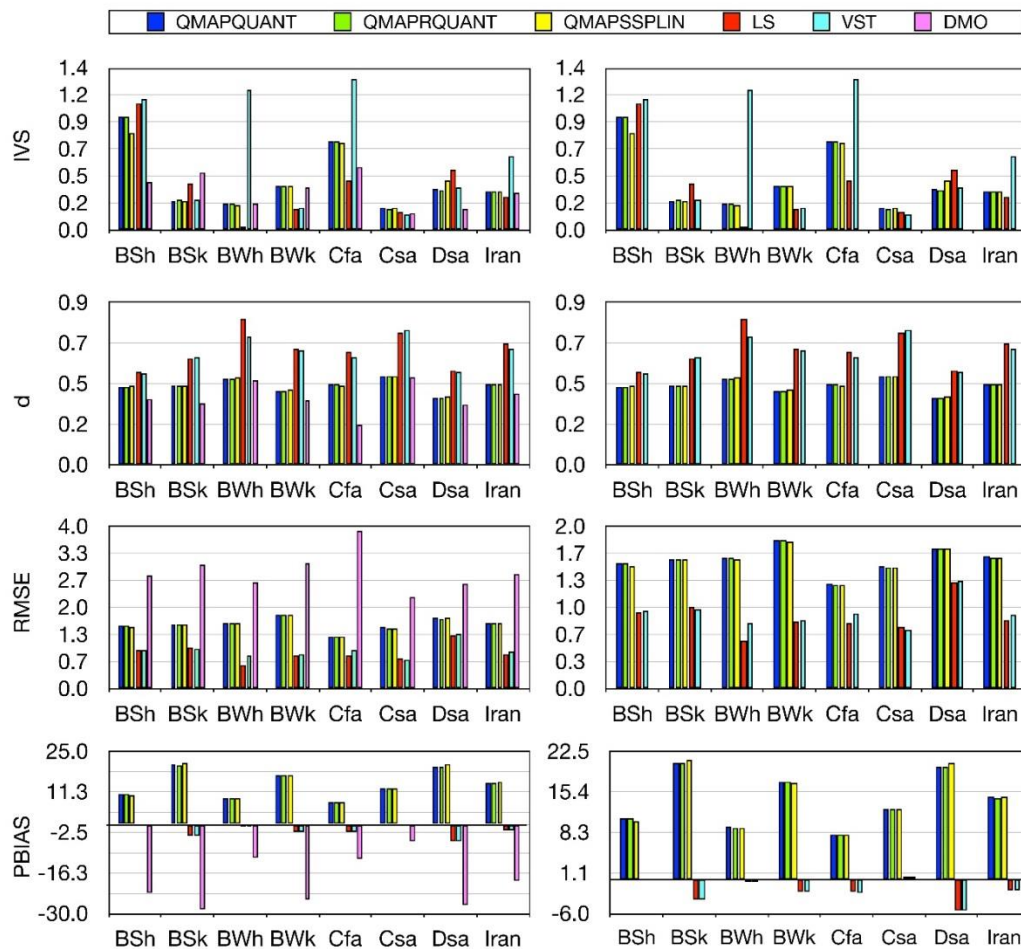
بیش تر مدل های CMIP6 می توانند الگوی فضایی کلی دما را در مقیاس سالانه و فصلی شبیه سازی کنند (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۱). با این حال، به طور کلی همان طور که زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۱) نشان دادند مدل های CMIP6 دارای ارزیابی سرد (Cold Bias) هستند. همان طور که در شکل های (۲ و ۳) نشان داده شد، مدل EC-Earth3-CC برای هر دو متغیر دمای کمینه و بیشینه در تمامی پهنه های اقلیمی دارای کم برآوردی است. ارزیابی سرد یک خطای رایج برای بیش تر مدل ها در نسل قبلی CMIP به ویژه در مناطقی با توپوگرافی پیچیده و یخ دائمی (IPCC، ۲۰۱۳) است. به طور کلی بین سپیدایی و ارزیابی سرد ارتباط وجود دارد (چن و همکاران، ۲۰۱۷). پوشش برف و یخ منجر به افزایش سپیدایی می شود.

ارزیابی سنجه PBIAS برای دمای کمینه نشان داد، درصد ارزیابی در حالت برونداد مستقیم برای دمای کمینه بین ۷۵/۸۰- تا ۹۱/۵۰ درصد متغیر است. به طوری که کمینه درصد ارزیابی در پهنه های اقلیمی خشک و سرد (BwK) و BSk دیده می شود، این مسئله می تواند به دلیل عدم کفایت ایستگاه ها با آمار مناسب در این پهنه های اقلیمی باشد. ارزیابی نتایج این سنجه در حالت تصحیح ارزیابی بر اساس پنجه روش LS، VST، QMAPQUANT، QMAPRQUANT و QMAPSSPLIN بیانگر کاهش قابل توجه درصد ارزیابی نزدیک به ۶۵/۴ درصد در این مناطق است. بیشینه درصد ارزیابی برای DMO تا ۹۱/۵۰ درصد به ترتیب در پهنه های معتدل تا تابستان های خشک و بسیار گرم، بیابانی خشک و بسیار گرم و در نهایت بخشی از پهنه اقلیم برفی تا تابستان های خشک و بسیار گرم در زاگرس قابل مشاهده است. مقدار بیشینه درصد ارزیابی پس از اعمال روش های تصحیح ارزیابی به ۲۹/۶ درصد می رسد. بر این اساس نتایج نشان داده است که روش های تصحیح ارزیابی، بیشینه درصد ارزیابی را تا ۶۱/۰۹ درصد در این مناطق کاهش می دهند. نتایج سنجه PBIAS برای دمای بیشینه در حالت DMO نشان داد که درصد ارزیابی بین ۲۹/۶- تا ۲/۸ درصد در نوسان است (شکل ۳). کمینه درصد ارزیابی در پهنه اقلیمی برفی کوپن-گایگر (Dsa) و بیشینه آن در پهنه اقلیمی خشک و بسیار گرم (BWh) دیده می شود. همانطور که در شکل ۱-ب نشان داده شد بخش های بزرگی از ایران در مناطق داخلی، جنوبی، شرقی و جنوب غربی دارای پهنه اقلیمی از نوع BWh هستند. لذا مناطقی که گفته شد دارای بیشینه درصد ارزیابی در پهنه BWh هستند غالباً در غرب استان خوزستان، سواحل مکران و همچنین شرق استان سیستان و بلوچستان دیده می شود. ارزیابی این سنجه نشان می دهد که پس از تصحیح ارزیابی مقدار درصد ارزیابی همانند دمای کمینه به شکل قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. به طوری که بر اساس پنجه روش LS، VST، QMAPQUANT، QMAPRQUANT و QMAPSSPLIN مقدار کمینه و بیشینه PBIAS برای این متغیر، به ترتیب نزدیک به ۲۸/۶ و

از ایستگاه‌ها است. درحالی‌که نزدیک به ۸۲/۶۱ درصد ایستگاه‌ها دارای توافق بسیار پایین هستند. لذا نتایج این سنجه در حالت تصحیح اریبی، بر اساس پنج روش LS، VST، QMAPQUANT، QMAPRQUANT و QMAPSSPLIN، به ترتیب نشانگر توافق بالا در ۹۳/۴۸، ۸۴/۷۸ و ۷۳/۹۱ درصد از ایستگاه‌ها برای سه روش نگاشت چندک است (شکل ۳). ارزیابی سنجه ضریب توافق برای دو متغیر دمای کمینه و بیشینه در تمام پهنه‌های اقلیمی حاکی از بهبود نتایج این سنجه پس از تصحیح اریبی است. به طوری که در قیاس با DMO، پس از تصحیح اریبی، تمام پهنه‌ها از توافق بالایی برخوردار هستند. بالاترین مقدار ضریب توافق را با مقایسه روش‌های تصحیح اریبی در پهنه اقلیمی BWk برای دمای بیشینه و پهنه اقلیمی Csa و BWh برای دمای کمینه می‌توان ملاحظه کرد (شکل ۳).

بنابراین، اریبی سرد حاکی از آن است که مدل‌ها توانسته‌اند بازخوردهای برف-سپیدایی را در مناطقی با توپوگرافی پیچیده نشان دهند.

ارزیابی سنجه توافق (d) برای دمای کمینه در غالب ایستگاه‌ها برای مدل EC-Earth3-CC در حالت DMO نشان داد که نزدیک به ۳۰/۴۳ درصد از ایستگاه‌ها دارای توافق بالا و ۶۹/۵۷ درصد از ایستگاه‌ها دارای توافق بسیار پایین با داده‌های مشاهداتی هستند. پس از تصحیح اریبی نتایج نشان داد که در غالب پهنه‌های اقلیمی مقدار این سنجه به شکل چشم‌گیری بهبود پیدا می‌کند. بر اساس پنج روش LS، VST، QMAPQUANT، QMAPRQUANT و QMAPSSPLIN مقدار ضریب توافق، به ترتیب به ۸۲/۶۱، ۷۸/۲۶، ۳۶/۹۶، ۳۴/۷۸ و ۳۴/۷۸ درصد می‌رسد. همچنین ارزیابی این سنجه برای دمای بیشینه در حالت DMO، حاکی از توافق بالای ۱۷/۳۹ درصد



شکل ۳. مقایسه برون‌داد مستقیم مدل (DMO) با روش‌های تصحیح اریبی (BC) برای دمای کمینه در پهنه‌های اقلیمی و متوسط کشور. ستون سمت چپ مقایسه DMO با BC و سمت راست مقایسه روش‌های مختلف تصحیح اریبی است.

۲-۳. بررسی وردایی درون‌سالی (IVS) دمای کمینه و بیشینه

وردایی درون‌سالی، منعکس‌کننده تغییرات زمانی در سامانه اقلیمی و یک سنجه مهم برای ارزیابی کارایی مدل است (سانگ و همکاران، ۲۰۲۳). نتایج ارزیابی این سنجه برای دمای کمینه و بیشینه در پهنه‌های اقلیمی مختلف نشان داد که مقدار IVS بر اساس پنج روش تصحیح اریبی در قیاس با DMO از یک الگوی ثابت و مشخص پیروی نمی‌کند، چرا که هر یک از روش‌های تصحیح اریبی در هر یک از پهنه‌های اقلیمی دارای کارایی متفاوتی هستند.

به‌طور مثال بررسی وردایی درون‌سالی برای دمای کمینه (شکل ۳) بر اساس پنج روش تصحیح اریبی LS، VST، QMAPQUANT، QMAPRQUANT و QMAPSSPLIN، در قیاس با DMO نشان داد که وردایی درون‌سالی به ترتیب، حدود ۰/۴۱، ۰/۲۷، ۰/۲۶ و ۰/۲۶ و ۰/۲۵ در پهنه‌ی BSk کاهش یافته‌است. درحالی که مقایسه روش‌های تصحیح اریبی با DMO در برخی از پهنه‌ها مانند BSh و Csa نشان داد که مقدار IVS در حالت تصحیح اریبی بهبود قابل ملاحظه‌ای نسبت به DMO نداشته‌است. ارزیابی IVS برای دمای بیشینه (شکل ۲) نیز تقریباً الگوی مشابهی را همانند دمای کمینه به‌همراه دارد. به‌طوری که وردایی درون‌سالی برای دمای بیشینه بر اساس پنج روش تصحیح اریبی در قیاس با برون‌داد مستقیم مدل نشان داد که مقدار IVS در دو پهنه‌ی اقلیمی BSk و Dsa کاهش یافته‌است. این درحالی است که مقایسه روش‌های تصحیح اریبی با DMO در سایر پهنه‌ها نشان داد که مقدار IVS در حالت تصحیح اریبی بهبود قابل ملاحظه‌ای نسبت به DMO نداشته‌است.

به‌طور کلی ارزیابی IVS نشان داد که اگرچه مقدار این سنجه در بیش تر پهنه‌ها برای دو متغیر دمای کمینه و بیشینه، پس از تصحیح اریبی، کاهش قابل ملاحظه‌ای را نسبت به DMO دارد، با قطعیت و اطمینان بالا نمی‌توان از بهبود همه این روش‌ها نسبت به DMO بحث کرد. برای

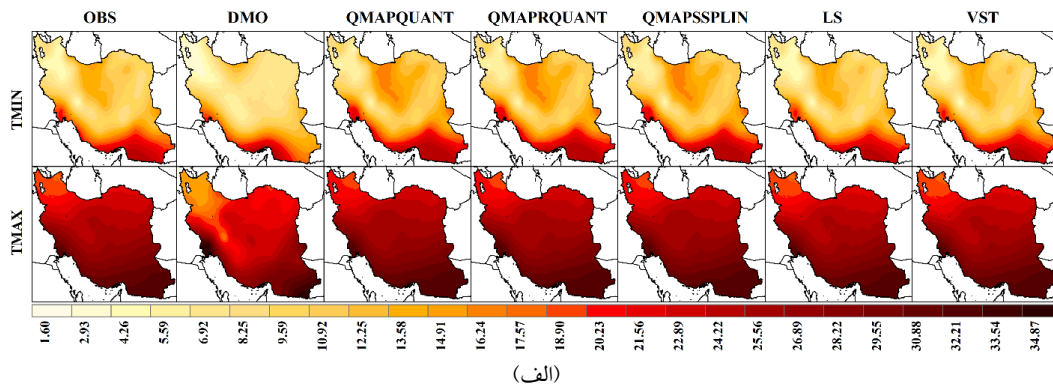
مثال، بر اساس روش VST در قیاس با DMO در بیش تر پهنه‌های اقلیمی، وردایی درون‌سالی برای هر دو متغیر اقلیمی افزایش قابل توجهی یافته‌است. این امر در درجه نخست حاکی از کارایی بالای برون‌داد مستقیم مدل EC-Earth3-CC در نمایش IVS برای دمای کمینه و بیشینه است. به‌طوری که روش تصحیح اریبی نسبت‌گیری واریانس (VST) نسبت به DMO قادر به بهبود IVS در غالب پهنه‌های اقلیمی نیست (شکل ۲ و ۳).

۳-۳. تحلیل الگوی فضایی دمای کمینه و بیشینه

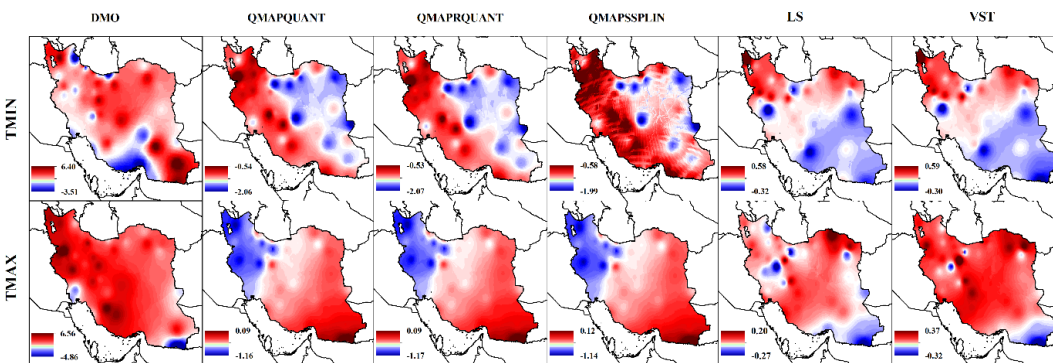
برای بررسی پراکنش فضایی دمای کمینه و بیشینه طی دوره‌ی آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴، برون‌داد مستقیم مدل EC-Earth3-CC در مقیاس سالانه در مقایسه با داده‌های مشاهداتی و نتایج حاصل از پنج روش تصحیح اریبی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی پراکنش فضایی دمای کمینه و بیشینه بین داده‌های ایستگاهی، برون‌داد مستقیم مدل و روش‌های تصحیح اریبی نشان داده‌است که مدل EC-Earth3-CC حتی در حالت برون‌داد مستقیم نیز الگوی فضایی دمای کمینه و بیشینه را در ایران به درستی برآورد می‌کند. به‌طوری که بیشینه دما در پهنه اقلیمی BWh و کمینه آن در پهنه‌های اقلیمی Dsa و BSk دیده می‌شود. در هر پنج روش تصحیح اریبی و برون‌داد مستقیم مدل‌ها، دمای کمینه و بیشینه در ایران از آرایش توپوگرافی پیروی می‌کند که این نتیجه با نتایج به‌دست آمده از داده‌های ایستگاهی همخوانی بالایی دارد. نتایج نشان داد DMO برای دمای کمینه و بیشینه در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در بیش تر پهنه‌هایی با اقلیم برفی، خشک و بسیار گرم و همچنین پهنه اقلیمی معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم به‌لحاظ الگوی فضایی دارای تفاوت‌های قابل توجهی است. به‌طوری که نتایج گویای آن است که مدل نتوانسته‌است در پهنه‌های اقلیم برفی با تابستان‌های خشک، بیابانی خشک و بسیار گرم (در مناطق داخلی و جنوب شرقی ایران) و معتدل پرباران

داده‌های مشاهداتی در ایران بین ۳/۵۱- تا ۶/۴۰ درجه سلسیوس به دست آمده است. این در حالی است که روش‌های تصحیح اریبی مقدار اختلاف برون‌داد مستقیم مدل را به شکل قابل توجهی کاهش داده‌اند. برعکس دمای بیشینه، برای متغیر دمای کمینه روش‌های نداشت چندک در کل پهنه‌های اقلیمی کشور پس از تصحیح اریبی دما را کمتر از داده‌های مشاهداتی برآورد کرده‌اند. به طوری که اختلاف این روش‌ها با داده‌های مشاهداتی در ایران منفی شده است. روش‌های نسبت گیری خطی نیز همانند دمای بیشینه باعث بهبود قابل توجه نتایج برون‌داد مستقیم مدل‌ها شده‌اند. به طوری که اختلاف بین روش LS با داده‌های مشاهداتی در ایران بین ۰/۳۲- تا ۰/۵۸ درجه سلسیوس و برای روش VST بین ۰/۳۰- تا ۰/۵۹ درجه سلسیوس به دست آمده است. نتایج به روشنی نشان‌دهنده این است که روش‌های تصحیح اریبی دمای بیشینه را نسبت به دمای کمینه بیش تر بهبود می‌بخشد.

با تابستان‌های گرم نسبت به داده‌های مشاهداتی از کارایی مناسبی برخوردار باشد. این اختلاف برای دمای بیشینه تا ۶/۵۶ درجه سلسیوس و برای دمای کمینه نیز تا ۶/۴۰ درجه سلسیوس به دست آمده است (شکل ۴-ب). بررسی نتایج پس از تصحیح اریبی نشان داد که روش‌های تصحیح اریبی دارای کارایی بسیار بالا در بهبود نتایج DMO هستند و ضمن این که می‌توانند نتایج را تا حد قابل توجهی به مشاهدات نزدیک کنند، قادر به بهبود نتایج در این مناطق هستند. دامنه تغییرات اختلاف پس از تصحیح اریبی در روش‌های QMAPQUANT و QMAPRQUANT تا ۰/۳۷ درجه سلسیوس در تغییر است. همچنین در حالت کم‌برآوردی نیز دامنه تغییرات اختلاف محاسبه شده با داده‌های ایستگاهی پیش و پس از تصحیح اریبی ۱/۱۷- درجه سلسیوس برای روش QMAPRQUANT تا ۰/۲۷- درجه سلسیوس برای روش LS محاسبه شده است. اختلاف بین برون‌داد مستقیم مدل با



(الف)



(ب)

شکل ۴. الف) پراکنش فضایی سالانه دمای کمینه و دمای بیشینه با استفاده از داده‌های ۴۶ ایستگاه هواشناسی همدید (مشاهداتی)، برون‌داد مستقیم مدل (DMO) از سری مدل‌های EC-Earth3-CC و پنج روش تصحیح اریبی شامل نسبت‌گیری خطی، نسبت‌گیری واریانس، نداشت چندک تجربی، نداشت چندک اسپیلاین هموار و نداشت چندک تجربی استوار طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۰) و ب) اختلاف بین برون‌داد مستقیم (DMO) مدل EC-Earth3-CC و روش‌های تصحیح اریبی به‌کاربرده شده با داده‌های ایستگاهی.

۳-۴. بررسی تفاوت روش‌های تصحیح اریبی در اقلیم‌های مختلف ایران

ارزیابی کارایی روش‌های تصحیح اریبی برای دمای کمینه نشان داد، بر اساس پنج روش تصحیح اریبی، اگرچه در غالب پهنه‌های اقلیمی این روش‌ها از کارایی مناسبی برخوردار هستند، اما در دو پهنه BWh و Csa، این روش‌ها بهتر از سایر پهنه‌ها عمل کرده‌اند. همچنین مقایسه روش‌های نگاشت چندک با یکدیگر و روش‌های نسبت‌گیری خطی با یکدیگر در میانگین تمام پهنه‌های اقلیمی ایران برای دمای کمینه نشان داد، از بین تمام روش‌های به‌کاربرده‌شده در پژوهش مذکور برای ضریب توافق، دو روش QMAPSSPLIN و LS در تمام پهنه‌های اقلیمی ایران از کارایی بالایی برخوردار هستند.

همچنین مقایسه روش‌های تصحیح اریبی برای دمای بیشینه نشان داد، روش‌های نسبت‌گیری خطی LS و VST اگرچه در غالب پهنه‌های اقلیمی از کارایی بسیار بالایی برخوردار هستند، اما در سه پهنه BSh، BWh و Csa این روش‌ها بهتر از سایر پهنه‌ها عمل کرده‌اند. از سوی دیگر کارایی روش‌های مختلف نگاشت چندک در قیاس با یکدیگر در تمام پهنه‌های اقلیمی نشان داد، این روش‌ها در پهنه‌های BSh، BWh، BSk و Cfa نسبت به سایر پهنه‌ها کارایی بالاتری را نشان داده‌اند. همچنین مقایسه روش‌های نگاشت چندک با یکدیگر و روش‌های نسبت‌گیری خطی با یکدیگر در میانگین پهنه‌های اقلیمی ایران برای دمای کمینه و بیشینه نشان داد که از بین تمام روش‌های به‌کاربرده‌شده در پژوهش حاضر برای ضریب توافق، دو روش QMAPSSPLIN و LS در تمام پهنه‌های اقلیمی ایران از کارایی بالایی برخوردار هستند.

مقایسه روش‌های تصحیح اریبی نسبت‌گیری خطی برای دمای کمینه نشان داد، این روش‌ها در غالب پهنه‌های اقلیمی دارای درصد اریبی پایین هستند و زمانیکه در قیاس با برون‌داد مستقیم مدل (DMO) قرار می‌گیرند، کماکان اریبی سرد را نشان می‌دهند. این نتیجه نشان می‌دهد همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد مدل‌های CMIP6 و

به‌طور مشخص مدل EC-Earth3-CC که دارای اریبی سرد سیستماتیک برای دما هستند، کماکان پس از تصحیح اریبی با روش‌های نسبت‌گیری خطی نیز اریبی سرد مدل را حفظ می‌کنند. این در حالی است که روش‌های نگاشت چندک اریبی سرد را از بین برده و اریبی گرم را پس از تصحیح اریبی نشان می‌دهند. مقایسه روش‌های نسبت‌گیری خطی در تمام پهنه‌های اقلیمی نشان داد، پهنه Csa از مقدار درصد اریبی بالایی بر اساس دو روش LS و VST نسبت به سایر پهنه‌ها برخوردار است. روش‌های نگاشت چندک همانطور که گفته شد دارای درصد اریبی گرم در غالب پهنه‌ها نسبت به برون‌داد مستقیم مدل (DMO) هستند. مقایسه روش‌های مختلف نگاشت چندک با یکدیگر نشان می‌دهد که این روش‌ها در پهنه‌های BSh، BWh و Cfa نسبت به سایر پهنه‌ها درصد اریبی پایینی را نشان می‌دهند. به عبارت ساده‌تر روش‌های نگاشت چندک در پهنه‌های اقلیمی BSh، BWh و Cfa بهبود بیش‌تری را نسبت به سایر پهنه‌های اقلیمی دارند. بیشترین مقدار درصد اریبی بر اساس سه روش نگاشت چندک QMAPQUANT، QMAPRQUANT و QMAPSSPLIN در پهنه BSk به‌ترتیب با مقدار ۲۰/۵۰، ۲۰/۴۱ و ۲۰/۹۳ درصد قابل مشاهده است. کارایی پنج روش استفاده‌شده در پژوهش حاضر نشان داد از میان روش‌های نسبت‌گیری خطی و از میان روش‌های نگاشت چندک برای دمای کمینه و دمای بیشینه بر اساس سنجه درصد اریبی همانطور که برای ضریب توافق نیز نشان داده شد به‌ترتیب دو روش LS و QMAPSSPLIN در میانگین تمام پهنه‌های اقلیمی ایران روشی کاراتر هستند.

ارزیابی کارایی پنج روش تصحیح اریبی در هفت پهنه اقلیمی ایران در قیاس با برون‌داد مستقیم مدل (DMO) برای دمای بیشینه نتایج نزدیک و مشابه با دمای کمینه را نشان داده است. بررسی درصد اریبی دمای بیشینه در پهنه‌های اقلیمی نشان داد که دمای بیشینه در یک پهنه نسبت به دمای کمینه نتیجه متفاوتی را نشان می‌دهد. همانطور که برای دمای کمینه گفته شد پس از تصحیح

نشده در سامانه اقلیم می‌شود که آسیب‌های زیان‌بار زیادی به کشور وارد می‌کند. نتایج تصحیح اریبی برون‌داد مستقیم مدل (DMO) برای دو متغیر دمای کمینه و بیشینه با پنج روش تصحیح اریبی شامل نسبت‌گیری خطی، نسبت‌گیری واریانس، نگاشت چندک تجربی، نگاشت چندک اسپیلاین هموار و نگاشت چندک تجربی استوار در ایران نشان داد که روش‌های نسبت‌گیری خطی، خطا را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهند. به عبارتی می‌توان گفت روش‌های نسبت‌گیری خطی در برابر روش‌های نگاشت چندک بهتر توانسته‌اند برون‌داد مستقیم مدل را برای متغیرهای دمای کمینه و بیشینه بهبود بخشند.

نتایج نشان داد که به کارگیری روش‌های مختلف تصحیح اریبی برای دو متغیر دمای کمینه و بیشینه، مقدار خطا را به شکل قابل توجهی کاهش می‌دهد. مقدار خطای متغیر دمای کمینه پس از اعمال روش‌های تصحیح اریبی برای روش‌های نگاشت چندک تجربی، نگاشت چندک تجربی استوار و نگاشت چندک اسپیلاین هموار به ترتیب ۴۲/۵۲ درصد، ۴۲/۶۲ درصد و ۴۲/۷۷ درصد کاهش یافته است. به همین ترتیب برای روش‌های نسبت‌گیری خطی و نسبت‌گیری واریانس نیز مقدار خطا پس از تصحیح اریبی به ترتیب ۷۰/۳۸ و ۶۷/۹۳ درصد کاهش یافته است. برای دمای بیشینه نیز در روش‌های نگاشت چندک، خطا ۵۹/۵۱، ۵۹/۵۴ و ۵۹/۵۷ درصد کاهش یافته است. از سوی دیگر روش نسبت‌گیری خطی، مقدار خطا را به مقدار قابل توجهی برای دمای بیشینه کاهش داده و برای دمای کمینه نیز همین نتیجه به دست آمده است. به طوری که پس از اعمال روش‌های تصحیح اریبی در روش نسبت‌گیری خطی، خطا به مقدار ۶۵/۹۵ درصد و در روش نسبت‌گیری واریانس، خطا به مقدار ۶۳/۰۷ درصد در متوسط پهنه‌های اقلیمی کشور کاهش داشته است. با این حال، ارزیابی نتایج حاصل از بررسی سنججه RMSE برای دمای کمینه و بیشینه نشان داد که باید به هنگام استفاده از این روش‌ها احتیاط بیشتری کرد. زیرا از آنجایی که بررسی‌ها با تعداد محدودی از ایستگاه‌ها همراه است، کارایی این روش‌ها به شدت تحت تأثیر کیفیت

اریبی برون‌داد مستقیم مدل (DMO) روش‌های نسبت‌گیری خطی در تمامی پهنه‌های اقلیمی اریبی را هر چند که به مقدار قابل توجهی کاهش دادند اما کماکان اریبی سرد مدل را پس از تصحیح اریبی نیز حفظ کرده‌اند. با این حال برای دمای بیشینه روش‌های نسبت‌گیری خطی پس از تصحیح اریبی در تمام پهنه‌ها به جز پهنه Dsa اریبی سرد را حفظ کرده‌اند. پهنه اقلیمی Dsa تنها پهنه اقلیمی در کشور است که پس از تصحیح اریبی برای دمای بیشینه در تمامی پنج روش تصحیح اریبی دارای درصد اریبی گرم است. به طور کلی کارایی روش‌های نسبت‌گیری خطی برای دمای کمینه و بیشینه همانند یکدیگر است. به طوری که در هر دو متغیر روش LS نسبت به VST مقدار درصد اریبی را در میانگین پهنه‌های اقلیمی ایران بیشتر برآورد می‌کند.

بررسی خطای روش‌های تصحیح اریبی پیش و پس از تصحیح اریبی با پنج روش مورد بررسی با سنججه RMSE نشان می‌دهد که در هفت پهنه اقلیمی ایران مقدار خطا برای دمای کمینه و بیشینه در پهنه اقلیمی Dsa بیش‌تر از سایر پهنه‌ها است. بررسی دو به دو روش‌ها نیز نشان می‌دهد در سری روش‌های نسبت‌گیری خطی، روش VST نسبت به روش LS خطای بیش‌تری را نشان می‌دهد. این نتیجه برای هر دو متغیر دمای کمینه و بیشینه صادق است. بررسی مقدار خطای پنج روش استفاده‌شده در پژوهش حاضر نشان داد از میان روش‌های نسبت‌گیری خطی و از میان روش‌های نگاشت چندک برای دمای کمینه و بیشینه به ترتیب روش VST و QMAPQUANT در تمام پهنه‌های اقلیمی دارای خطای بالایی نسبت به روش‌های دیگر هستند.

۴. نتیجه‌گیری

اولین گام حیاتی در بررسی پیامدهای تغییر اقلیم انتخاب مدل‌های گردش کلی (GCM) با کارایی بالا برای بازتولید شرایط اقلیم گذشته و پیش‌نگری اقلیم آینده است. علی‌رغم پتانسیل فوق‌العاده ایران در بخش‌های مختلف، تداوم گرمایش جهانی منجر به تغییرات پیش‌بینی

این پژوهش درصد اریبی را به شکل قابل توجهی در ایران کاهش داده‌اند به طوری که برای متغیر دمای کمینه در پهنه‌های اقلیمی نیمه بیابانی خشک و سرد و اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم درصد اریبی تا ۵۱/۸ درصد نیز کاهش یافته‌است. البته همان‌طور که در مورد سنجه RMSE نیز گفته شد، روش‌های تصحیح اریبی ضمن افزایش کارایی نسبی مدل‌ها و بهبود اریبی، می‌توانند سبب تصحیح خطاهای سامانمند شبیه‌سازی‌های دوره تاریخی و کاهش خطای متغیرهای شبیه‌سازی شده برای دوره آینده نیز شوند (لوینو و همکاران، ۲۰۲۱؛ سانگ و همکاران، ۲۰۲۱). از آنجایی که هر روش با وجود مزیت‌های بسیار می‌تواند محدودیت‌هایی نیز به همراه داشته باشد باید توجه داشت که روش‌های تصحیح اریبی فرایندهای فیزیکی جو را لحاظ نمی‌کنند لذا نمی‌توان از کارایی این روش‌ها با قطعیت سخن گفت (همپل و همکاران، ۲۰۱۳).

نتایج بررسی ضریب توافق برای دو متغیر دمای کمینه و بیشینه برای مدل EC-Earth3-CC نشان داد که توافق در حالت تصحیح اریبی در قیاس با DMO، در بیش‌تر پهنه‌های اقلیمی کشور به مقدار قابل توجهی بهبود می‌یابد. نتایج مربوط به IVS نشان داد از آنجایی که DMO مدل EC-Earth3-CC در به تصویر کشیدن ورودی درون‌سالی اقلیم کارایی مناسبی دارد و به مشاهدات نزدیک است لذا این امر سبب شده است که DMO تفاوت چندانی با نتایج حاصل از به کارگیری روش‌های تصحیح اریبی همانند LS نداشته باشد. در همین راستا کوئر و کوئر (۲۰۲۳) نشان دادند که هیچ روش تصحیح اریبی منفردی وجود ندارد که بهترین کارایی را در همه مناطق به همراه داشته باشد. لذا هر یک از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند که ناشی از تفاوت‌های زمانی-مکانی و ویژگی‌های جغرافیایی محلی است.

نتایج حاصل از این پژوهش در تحقیقات بعدی برای انتخاب مدل‌های اقلیمی و روش کارا برای تصحیح اریبی آنها و در نهایت بررسی پیامدهای تغییر اقلیم می‌تواند استفاده شود. علاوه بر این، برنامه‌ریزان می‌توانند از برونداد

داده‌های مشاهداتی است (آدور و همکاران، ۲۰۱۴؛ مارون و همکاران، ۲۰۱۷)، بدین جهت باید دانست که این روش‌ها ضمن این که می‌توانند نقش مؤثری در کاهش خطا داشته باشند، همان‌طور که برای ایستگاه سقز در غرب ایران دیده شد، گاهی اوقات سبب افزایش خطا نیز می‌شوند. لذا نمی‌توان با قطعیت بالا از کارایی این روش‌ها سخن گفت، زیرا کارایی این روش‌ها با یکدیگر متفاوت است و بسته به منطقه مورد مطالعه، نوع متغیر اقلیمی و کیفیت داده مورد استفاده نتایج می‌تواند متفاوت باشد (شرستا و همکاران، ۲۰۱۷؛ اسمیتا و همکاران، ۲۰۱۸؛ مودبتکال و مهاشا، ۲۰۱۸؛ مندز و همکاران، ۲۰۲۰).

بررسی نتایج ضریب توافق پیش و پس از تصحیح اریبی نشان داده است که اعمال روش‌های نگاشت چندک تجربی، نگاشت چندک تجربی استوار و نگاشت چندک اسپیلین هموار به ترتیب برای دمای کمینه ضریب توافق را نسبت به برونداد مستقیم مدل (DMO) ۱۳/۴۵ درصد، ۱۳/۶۷ درصد و ۱۳/۷۸ درصد افزایش می‌دهد. این در حالی است که برای دمای بیشینه ضریب توافق در متوسط پهنه‌ای ایران پس از اعمال روش‌های مختلف تصحیح اریبی نگاشت چندک به ترتیب آنچه که برای دمای کمینه گفته شد افزایش ۴۲/۷۰، ۴۳/۰۴ و ۴۳/۰۴ درصدی را نشان داده‌اند. روش‌های نسبت‌گیری خطی و نسبت‌گیری واریانس نیز ضریب توافق دمای کمینه را پس از تصحیح اریبی نسبت به برونداد مستقیم مدل به ترتیب ۷۰/۳۹ درصد و ۶۲/۸۴ درصد افزایش داده‌اند. این مقادیر برای دمای بیشینه ۵۷/۴۶ درصد و ۵۳/۲۴ درصد به دست آمده است.

بررسی نتایج نشان داد مدل EC-Earth3-CC از سری مدل‌های مشارکت یافته در CMIP6 در تمامی پهنه‌های اقلیمی ایران و متوسط اقلیمی کشور دارای کم‌برآوردی است. کم‌برآوردی این مدل یا اریبی سرد مدل‌های CMIP6 توسط پژوهش‌های مختلفی همانند چن و همکاران (۲۰۱۷) و زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۱) نیز تأیید شده است. روش‌های تصحیح اریبی مورد بررسی در

مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۶(۳)، ۶۰۲-۵۸۳.

زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. (۱۴۰۰). پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران مبتنی بر برون‌داد همادی مدل‌های تصحیح‌شده اریبی CMIP6. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۷(۳)، ۵۷۸-۵۶۱.

زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. (۱۴۰۱). بررسی مدل‌های CMIP6 در برآورد دمای ایران با تأکید بر حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) و پاسخ اقلیم گذرا (TCR). *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۷(۱)، ۳۹-۵۶.

زرین، آ.؛ صالح‌آبادی، ن. و داداشی رودباری، ع. (۱۴۰۰). بررسی بی‌هنجاری و روند دمای ایران در پهنه‌های مختلف اقلیمی با استفاده از مدل‌های جفت‌شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP6). *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۵(۱)، ۵۴-۳۵.

تصحیح‌شده اریبی و یا مقیاس‌گاهی شده مدل‌های تغییر اقلیم جهت تدوین برنامه‌های تعدیل و سازگاری برای مدیریت صحیح و توسعه پایدار منابع آب استفاده کنند.

مراجع

- خلیلی، ع.؛ بذرافشان، ج. و چراغعلی‌زاده، م. (۱۴۰۱). بررسی تطبیقی نقشه‌های اقلیمی ایران در طبقه‌بندی دمارتن گسترش داده‌شده و کاربرد روش برای پهنه‌بندی اقلیم جهان. *مواشناسی کشاورزی*، ۱۰(۱)، ۳-۱۶.
- زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. (۱۳۹۹). پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6). *Understanding the surface temperature cold bias in CMIP5 AGCMs over the Tibetan Plateau. Advances in Atmospheric Sciences*, 34, 1447-1460.
- Cobb, K., Rojas, M., Chen, D., Samset, B., Diongue-Niang, A., Edwards, P., Emori, S., Hawkins, E., Faria, S., & Hope, P. (2021). Framing, context, and methods. AGU Fall Meeting Abstracts, 2021, U13B-01.
- De Mello, K., Taniwaki, R. H., de Paula, F. R., Valente, R. A., Randhir, T. O., Macedo, D. R., Leal, C. G., Rodrigues, C. B., & Hughes, R. M. (2020). Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 270, 110879.
- Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., Anthoni, P., Arneth, A., Arsouze, T., Bergmann, T., Bernadello, R., Bousetta, S., & Caron, L.-P. (2021). The EC-earth3 Earth system model for the climate model intercomparison project 6. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2021, 1-90.
- Dunn, R. J. H., Alexander, L. V., Donat, M. G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., Lippmann, T., Allan, R., Aguilar, E., & Barry, A. A. (2020). Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(16), e2019JD032263.
- 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). *Addor, N., Rössler, O., Köplin, N., Huss, M., Weingartner, R., & Seibert, J. (2014). Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments. Water Resources Research*, 50(10), 7541-7562.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A., & Rahnema, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1-8.
- Azmat, M., Qamar, M. U., Huggel, C., & Hussain, E. (2018). Future climate and cryosphere impacts on the hydrology of a scarcely gauged catchment on the Jhelum river basin, Northern Pakistan. *Science of the Total Environment*, 639, 961-976.
- Beck, H. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., Lutsko, N. J., Dufour, A., ... & Miralles, D. G. (2023). High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901-2099 based on constrained CMIP6 projections. *Scientific data*, 10(1), 724.
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.
- Chen, J., Brissette, F. P., Poulin, A., & Leconte, R. (2011). Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed. *Water Resources Research*, 47(12).
- Chen, X., Liu, Y., & Wu, G. (2017).

- experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958.
- Eyring, V., Cox, P. M., Flato, G. M., Gleckler, P. J., Abramowitz, G., Caldwell, P., Collins, W. D., Gier, B. K., Hall, A. D., & Hoffman, F. M. (2019). Taking climate model evaluation to the next level. *Nature Climate Change*, 9(2), 102–110.
- Fan, X., Duan, Q., Shen, C., Wu, Y., & Xing, C. (2020). Global surface air temperatures in CMIP6: historical performance and future changes. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104056.
- 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. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19(6), 2547–2559.
- Firpo, M. A. F., Guimarães, B. dos S., Dantas, L. G., Silva, M. G. B. da, Alves, L. M., Chadwick, R., Llopart, M. P., & Oliveira, G. S. de. (2022). Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present day climate in Brazil. *Frontiers in Climate*, 170.
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., & Eyring, V. (2014). Evaluation of climate models. In *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 741–866). Cambridge University Press.
- Gilewski, P., & Nawalany, M. (2018). Inter-comparison of rain-gauge, radar, and satellite (IMERG GPM) precipitation estimates performance for rainfall-runoff modeling in a mountainous catchment in Poland. *Water*, 10(11), 1665.
- Griggs, G., & Reguero, B. G. (2021). Coastal adaptation to climate change and sea-level rise. *Water*, 13(16), 2151.
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3383–3390.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135–143.
- Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J., & Piontek, F. (2013). A trend-preserving bias correction—the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, 4(2), 219–236.
- Hock, R., & Huss, M. (2021). Glaciers and climate change. In *Climate Change*, (pp. 157–176). Elsevier.
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., & Brun, F. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726–731.
- Hurrell, J., Meehl, G. A., Bader, D., Delworth, T. L., Kirtman, B., & Wielicki, B. (2009). A unified modeling approach to climate system prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(12), 1819–1832.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, and New York.
- Kaur, K., & Kaur, N. (2023). Comparison of bias correction methods for climate change projections in the lower Shivaliks of Punjab. *Journal of Water and Climate Change*.
- Lakshmanan, V., Gilleland, E., McGovern, A., & Tingley, M. (2015). Machine learning and data mining approaches to climate science. *Proceedings of the 4th International Workshop on Climate Informatics*, 3–246.
- Lenderink, G., Buishand, A., & Van Deursen, W. (2007). Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3), 1145–1159.
- Lovino, M. A., Pierrestegui, M. J., Müller, O. V., Berbery, E. H., Müller, G. V., & Pasten, M. (2021). Evaluation of historical CMIP6 model simulations and future projections of temperature and precipitation in Paraguay. *Climatic Change*, 164, 1–24.
- Luo, M., Liu, T., Meng, F., Duan, Y., Frankl, A., Bao, A., & De Maeyer, P. (2018). Comparing bias correction methods used in downscaling precipitation and temperature from regional climate models: a case study from the Kaidu River Basin in Western China. *Water*, 10(8), 1046.
- Malhi, Y., Roberts, J. T., Betts, R. A., Killeen, T. J., Li, W., & Nobre, C. A. (2008). Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, 319(5860), 169–172.
- Maraun, D. (2012). Nonstationarities of regional climate model biases in European seasonal mean temperature and precipitation sums. *Geophysical Research Letters*, 39(6).
- Maraun, D., Shepherd, T. G., Widmann, M., Zappa, G., Walton, D., Gutiérrez, J. M., Hagemann, S., Richter, I., Soares, P. M. M., & Hall, A. (2017). Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Climate Change*, 7(11), 764–773.

- Martel, J.-L., Brissette, F. P., Lucas-Picher, P., Troin, M., & Arsenault, R. (2021). Climate change and rainfall intensity–duration–frequency curves: Overview of science and guidelines for adaptation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(10), 03121001.
- Masters, G., Baker, P., & Flood, J. (2010). Climate change and agricultural commodities. *CABI Work Pap*, 2, 1–38.
- Meehl, G. A., Boer, G. J., Covey, C., Latif, M., & Stouffer, R. J. (2000). The coupled model intercomparison project (CMIP). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(2), 313–318.
- Meehl, G. A., Boer, G. J., Covey, C., Latif, M., & Stouffer, R. J. (1997). Intercomparison makes for a better climate model. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 78(41), 445–451.
- Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J. F. B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9), 1383–1394.
- Meehl, G. A., Moss, R., Taylor, K. E., Eyring, V., Stouffer, R. J., Bony, S., & Stevens, B. (2014). Climate model intercomparisons: Preparing for the next phase. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 95(9), 77–78.
- 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*, 12(2), 482.
- Mimura, N. (2013). Sea-level rise caused by climate change and its implications for society. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 89(7), 281–301.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Mudbhatkal, A., & Mahesha, A. (2018). Bias correction methods for hydrologic impact studies over India's Western Ghat Basins. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(2), 05017030.
- Nastis, S. A., Michailidis, A., & Chatzitheodoridis, F. (2012). Climate change and agricultural productivity. *Afr. J. Agric. Res*, 7(35), 4885–4893.
- Navarro-Racines, C. E., & Tarapues Montenegro, J. E. (2015). Bias-correction in the CCAFS-Climate Portal: A description of methodologies.
- 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.
- Pielke Sr, R. A. (2005). Land use and climate change. *Science*, 310(5754), 1625–1626.
- Qian, W., & Chang, H. H. (2021). Projecting health impacts of future temperature: a comparison of quantile-mapping bias-correction methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1992.
- Räisänen, J., & Räty, O. (2013). Projections of daily mean temperature variability in the future: cross-validation tests with ENSEMBLES regional climate simulations. *Climate Dynamics*, 41, 1553–1568.
- Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fife, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., & Srinivasan, J. (2007). Climate models and their evaluation. In *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC (FAR)* (pp. 589–662). Cambridge University Press.
- Romshoo, S. A., Murtaza, K. O., Shah, W., Ramzan, T., Ameen, U., & Bhat, M. H. (2022). Anthropogenic climate change drives melting of glaciers in the Himalaya. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(35), 52732–52751.
- Rounsevell, M. D. A., & Reay, D. S. (2009). Land use and climate change in the UK. *Land Use Policy*, 26, S160–S169.
- Ruane, A. C., Teichmann, C., Arnell, N. W., Carter, T. R., Ebi, K. L., Frieler, K., Goodess, C. M., Hewitson, B., Horton, R., & Kovats, R. S. (2016). The vulnerability, impacts, adaptation and climate services advisory board (VIACS AB v1. 0) contribution to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3493–3515.
- Seneviratne, S. I., Donat, M. G., Mueller, B., & Alexander, L. V. (2014). No pause in the increase of hot temperature extremes. *Nature Climate Change*, 4(3), 161–163.
- Shrestha, M., Acharya, S. C., & Shrestha, P. K. (2017). Bias correction of climate models for hydrological modelling—are simple methods still useful? *Meteorological Applications*, 24(3), 531–539.
- Shrestha, S., Shrestha, M., & Babel, M. S. (2016). Modelling the potential impacts of climate change on hydrology and water resources in the Indrawati River Basin, Nepal. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1–13.
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble:

- Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(6), 2473–2493.
- Singh, R., Arya, D. S., Taxak, A. K., & Vojinovic, Z. (2016). Potential impact of climate change on rainfall intensity-duration-frequency curves in Roorkee, India. *Water Resources Management*, 30, 4603–4616.
- Smitha, P. S., Narasimhan, B., Sudheer, K. P., & Annamalai, H. (2018). An improved bias correction method of daily rainfall data using a sliding window technique for climate change impact assessment. *Journal of Hydrology*, 556, 100–118.
- Soltani, S., Almasi, P., Helfi, R., Modarres, R., Mohit Esfahani, P., & Ghadami Dehno, M. (2020). A new approach to explore climate change impact on rainfall intensity–duration–frequency curves. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 911–928.
- Song, X., Xu, M., Kang, S., Wang, R., & Wu, H. (2023). Evaluation and Projection Of Changes in Temperature and Precipitation Over Northwest China Based on Cmp6 Models. Available at SSRN 4460460.
- Song, Y. H., Chung, E., & Shahid, S. (2021). Spatiotemporal differences and uncertainties in projections of precipitation and temperature in South Korea from CMIP6 and CMIP5 general circulation model s. *International Journal of Climatology*, 41(13), 5899–5919.
- Stohlgren, T. J., Chong, G. W., Kalkhan, M. A., & Schell, L. D. (1997). Multiscale sampling of plant diversity: effects of minimum mapping unit size. *Ecological Applications*, 7(3), 1064–1074.
- Stouffer, R. J., Eyring, V., Meehl, G. A., Bony, S., Senior, C., Stevens, B., & Taylor, K. E. (2017). CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 95–105.
- Terink, W., Hurkmans, R., Torfs, P., & Uijlenhoet, R. (2010). Evaluation of a bias correction method applied to downscaled precipitation and temperature reanalysis data for the Rhine basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(4), 687–703.
- 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.
- Tian, B., & Dong, X. (2020). The double-ITCZ bias in CMIP3, CMIP5, and CMIP6 models based on annual mean precipitation. *Geophysical Research Letters*, 47(8), e2020GL087232.
- Usman, M., Manzanar, R., Ndehedehe, C. E., Ahmad, B., Adeyeri, O. E., & Dudzai, C. (2022). On the Benefits of Bias Correction Techniques for Streamflow Simulation in Complex Terrain Catchments: A Case-Study for the Chitral River Basin in Pakistan. *Hydrology*, 9(11), 188.
- Wang, C., Zhang, L., Lee, S.-K., Wu, L., & Mechoso, C. R. (2014). A global perspective on CMIP5 climate model biases. *Nature Climate Change*, 4(3), 201–205.
- Wang, J., & Kotamarthi, V. R. (2015). High-resolution dynamically downscaled projections of precipitation in the mid and late 21st century over North America. *Earth's Future*, 3(7), 268–288.
- Whitehead, P. G., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., Kernan, M., & Wade, A. J. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal*, 54(1), 101–123.
- Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., O'donnell, J., & Rowe, C. M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C5), 8995–9005.
- World Meteorological Organization (WMO). (2023). State of the Global Climate 2022 (WMO-No. 1316)
- Wuebbles, D. J., & Jain, A. K. (2001). Concerns about climate change and the role of fossil fuel use. *Fuel Processing Technology*, 71(1–3), 99–119.
- Yang, X., Zhou, B., Xu, Y., & Han, Z. (2021). CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38, 817–830.
- Yeh, N.-C., Chuang, Y.-C., Peng, H.-S., & Hsu, K.-L. (2020). Bias adjustment of satellite precipitation estimation using ground-based observation: Mei-Yu front case studies in Taiwan. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56(3), 485–492.