

The Impact of Climate Change on Temperature and Precipitation in Afghanistan with Emphasis on the Helmand and Hariroud Basins

S. Parsa¹, A. Zarrin^{2*}, A. Mofidi², A.A. Dadashi-Roudbari³

1, 2, 3- MSc, Associate Professor and Postdoctoral Researcher of Climatology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*(Corresponding Author Email: zarrin@um.ac.ir)

Received: 22-12-2023

Revised: 17-04-2024

Accepted: 20-04-2024

Available Online: 02-06-2024

پیامدهای تغییر اقلیم بر دما و بارش کشور افغانستان با تأکید بر حوضه‌های هیرمند و هریرود

سمیه پارسا^۱، آذر زرین^{۲*}، عباس مفیدی^۲، عباسعلی داداشی رودباری^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیار و پژوهشگر پس‌دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: zarrin@um.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

Abstract

One of the most challenging issues in water resource management is the impact of climate change on the water supply. It is necessary to examine the effects of climate change on Afghanistan, which is vital to Iran's water resources. To investigate the temperature and precipitation and their variability in Afghanistan and the two basins of Helmand and Hariroud, MSWX data was used from 1981 to 2020. To project the future climate, the output of five CMIP6 models was used for the near future (2026-2050). To reduce the uncertainty of individual models, a multi-model ensemble was generated. The area-averaged precipitation trend showed that the precipitation in Afghanistan, Helmand, and Hariroud basins has decreased by 11.2, 12.2, and 12.3 mm/decade, respectively. The area-averaged temperature has increased by 0.43, 0.45, and 0.57 oC/decade over Afghanistan, Helmand, and Hariroud basins, respectively. The results showed that the temperature in all three investigated regions will have a positive anomaly in the near future under SP2-4.5 and SSP5-8.5. On the other hand, the precipitation anomaly will be negative under SSP2-4.5 in the northern regions of Afghanistan and the two studied basins. The entire area of Afghanistan and two basins will experience a negative anomaly of precipitation under SSP5-8.5.

Keywords: CMIP6-MME, Precipitation Changes, Multi-Model Ensemble, Afghanistan.

چکیده

یکی از مسائل پرچالش در مدیریت منابع آب، پیامدهای تغییر اقلیم بر پیکره آبی هر سرزمین است. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر افغانستان که سرچشمه‌ای مهم برای منابع آب ایران است، ضروری است. به منظور بررسی ویژگی‌های دما و بارش و روند تغییرات آن‌ها در افغانستان و دو حوضه هیرمند و هریرود از داده‌های شبکه‌ای MSWX در یک دوره ۴۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۲۰) استفاده شد. جهت بررسی پیش‌نگری‌های آینده از برون‌داد پنج مدل CMIP6 در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) استفاده و به منظور کاهش عدم قطعیت مدل‌های منفرد، یک چندمدلی همادی تولید شد. بررسی متوسط پهنه‌ای بارش نشان داد که به ترتیب ۱۱/۲، ۱۲/۲ و ۱۲/۳ میلی‌متر/دهه از بارش افغانستان، حوضه‌های هیرمند و هریرود در چهار دهه اخیر کاسته شده است. در مقابل، متوسط پهنه‌ای دما ۰/۴۳، ۰/۴۵ و ۰/۵۷ درجه سلسیوس/دهه به ترتیب در افغانستان، هیرمند و هریرود افزایش یافته است. نتایج نشان داد دما در هر سه منطقه مورد بررسی طی دوره آینده نزدیک تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 دارای بی‌هنجاری مثبت خواهد بود. در مقابل، بارش تحت سناریو SSP2-4.5 در مناطق شمالی افغانستان و دو حوضه مورد بررسی و تحت سناریو SSP5-8.5 در کل پهنه افغانستان و دو حوضه، بی‌هنجاری منفی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: CMIP6-MME، تغییرات بارش، چند مدلی همادی، کشور افغانستان.

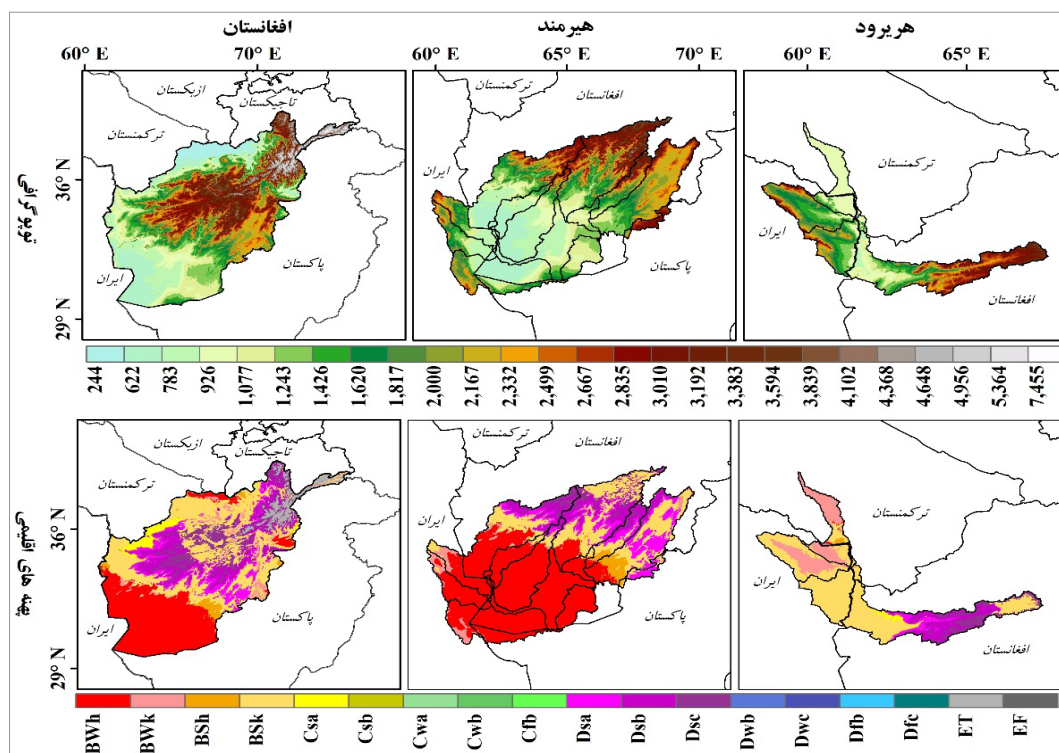
متغیرهای دما و بارش از جمله متغیرهای اصلی اقلیم هستند که در مطالعات مرتبط با تغییر اقلیم به شکل گسترده‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. پژوهش‌های انجام شده بر روی تغییرات دما و بارش را در یک دسته‌بندی کلی و اولیه می‌توان در سه گروه بررسی تغییرات زمانی-مکانی (Kumar و همکاران، ۲۰۲۰؛ Men و همکاران، ۲۰۲۰)، تحلیل روند (Dai و Bloecker، ۲۰۱۹؛ Bevacqua و همکاران، ۲۰۲۲) و ارائه پیش‌نگری (Zarrin و Asadi-Dadashi-Roudbari، ۲۰۲۱؛ Politi و همکاران، ۲۰۲۳؛ RahimBeygi و همکاران، ۲۰۲۳) تقسیم‌بندی کرد. بررسی نتایج این مطالعات نشان داده است که دما در بیشتر مناطق جهان روند افزایشی داشته و بارش‌ها نیز تحت گرمایش جهانی فرین‌تر شده‌اند و در بسیاری از مناطق کره زمین روند کاهشی را نشان دادند. بررسی مطالعات مربوط به پیش‌نگری نشان داده است که مدل همادی نسبت به مدل‌های منفرد CMIP6 کارایی بالاتری دارند. افزایش دما و بارش‌های فرین در مناطق مختلفی همانند ایران (Zarrin و Asadi-Dadashi-Roudbari، ۲۰۲۱؛ Asadi-RahimBeygi و همکاران، ۲۰۲۳) گزارش شده است. به رغم پژوهش‌های زیادی که در سطح جهانی انجام شده، پژوهش محدودی در افغانستان انجام شده است که می‌توان به پژوهش Babar و همکاران (۲۰۱۶)، Aliyar و همکاران (۲۰۲۲)، Sediqi و همکاران (۲۰۲۲) و Farhat و همکاران (۲۰۲۲) و Suryavanshi و همکاران (۲۰۲۲) اشاره کرد. نتایج این تحقیقات نشان داده است که بارش در کشور افغانستان بخصوص در فصول بهار و زمستان روند کاهشی و دما روند افزایشی خواهد داشت. جمع‌بندی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که به رغم مطالعات بسیاری که از اقلیم مناطق مختلف جهان انجام شده است اما به دلایل گفته شده اقلیم افغانستان و به‌ویژه دو حوضه مرزی مشترک هیرمند و هریرود چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند و لازم است تا تحقیقی مستقل در این حوزه انجام شود. از سوی دیگر اقلیم افغانستان و تغییرات آن، از آن جهت برای ایران بسیار مهم است که هر گونه تغییرات در متغیرهای اصلی اقلیم همانند دما و بارش می‌تواند پیامدهای مستقیمی را بر منابع آبی دو حوضه هیرمند و هریرود داشته باشد. هدف از این پژوهش، پیش‌نگری متغیرهای دما و بارش در کشور افغانستان با تأکید بر حوضه آبریز هریرود و هیرمند تحت سناریوهای SSP به کار رفته در فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP6) است. برای نیل به این هدف پژوهش حاضر به شکل زیر سازماندهی شده است. ابتدا منطقه مورد مطالعه در سه سطح کشور افغانستان، حوضه‌های هریرود و هیرمند معرفی می‌شود. سپس داده‌ها و روش‌های به کار رفته در پژوهش معرفی می‌شوند. در بخش نتایج، تغییرات پهنه‌ای و روند دهه‌ای متغیرهای دما و بارش بررسی و پیش‌نگری آن‌ها تا افق ۲۰۵۰ ارائه خواهد شد.

دسترسی به منابع آب برای مصارف انسانی و اکوسیستم‌ها تا حد زیادی به توزیع زمانی-مکانی بارش و دما بستگی دارد (Mishra و همکاران، ۲۰۱۱). در نتیجه، تغییرات ویژگی‌های بارش و دما منجر به تغییراتی در دسترسی به آب شود که پیامدهایی، هم برای انسان و هم برای زیست‌کره دارد. مطالعات مختلفی نشان داده‌اند که تغییر اقلیم یک تهدید جهانی است که بر بخش‌های مختلف سامانه زمین تأثیر گذاشته و پایداری بخش‌های مختلف در سراسر جهان را دستخوش تغییر کرده است (Abbass و همکاران، ۲۰۲۲). افزایش دما و نوسانات بارش بر دسترسی به آب و تولید محصول در آینده تأثیر می‌گذارد (Kang و همکاران، ۲۰۰۹). بنابراین، آگاهی از شرایط کنونی و پیش‌نگری اقلیمی برای تعیین آسیب‌پذیری‌ها و توسعه راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم بسیار ضروری است. جنگ‌های داخلی طولانی مدت، اقلیم متنوع، توپوگرافی پیچیده و کمبود ایستگاه‌های هواشناسی از جمله عواملی هستند که سبب شده است کشور افغانستان داده‌های مشاهداتی اقلیمی مناسبی نداشته و هرگونه بررسی اقلیمی با استفاده از داده‌های ایستگاهی بر روی این پهنه را با مشکل اساسی مواجه کرده است. برای غلبه بر نقص داده‌های ایستگاهی و فراهم نمودن داده‌های شبکه‌ای با کیفیت بالا، در سال‌های اخیر مجموعه داده‌های همادی-وزنی چندمنبعی همانند MSWEP^۱ و MSWX^۲ با هدف تصحیح اربیی داده‌های بازتحلیل و ماهواره‌ای در دسترس قرار گرفته‌اند. این داده‌ها قابلیت بکارگیری مناسبی را در سطح حوضه‌های آبخیز و کشورهای با اقلیم متنوع (Beck و همکاران، ۲۰۲۲) همانند افغانستان دارند که در این تحقیق نیز از داده‌های MSWX برای بررسی وضعیت فعلی دما و بارش بر روی کشور افغانستان استفاده شده است. مدل‌های گردش کلی (GCMs)^۳ قابل اعتمادترین ابزار برای بررسی وردایی تاریخی و پیش‌نگری آینده متغیرهای اقلیمی هستند (Sachindra و همکاران، ۲۰۱۴). GCMها براساس اصول فیزیکی بنیان نهاده شده‌اند که به زبان ریاضی سامانه اقلیم را توصیف کرده و می‌توانند ویژگی‌های مشاهده شده اقلیم فعلی را بازتولید و تغییرات آن را در آینده پیش‌نگری کنند (Scafetta، ۲۰۲۳). مدل‌های گردش کلی تحت پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP)^۴ ارائه می‌شوند که هم‌اکنون این پروژه در فاز ششم (موسوم به CMIP6) با بکارگیری سناریوهای اجتماعی-اقتصادی (SSPs)^۵ به بررسی متغیرهای اقلیمی در آینده می‌پردازد (Eyring و همکاران، ۲۰۱۹). در این تحقیق از برونداد مدل‌های مشارکت یافته در پروژه CMIP6 برای بررسی وضعیت آینده اقلیمی دما و بارش در کشور افغانستان استفاده شده است.

• منطقه مورد مطالعه

افغانستان کشوری محصور در خشکی در جنوب غرب آسیاست که جغرافیای پیچیده و در عین حال متنوعی دارد. از رشته کوه‌های مرتفع هندوکش در شمال شرقی این کشور با قله نوشاخ که ارتفاعی برابر با ۷۴۵۵ متر دارد تا جلگه‌های شمالی آن در امتداد رودخانه آمودریا با ارتفاع ۲۴۴ متر و دشت خشک سیستان در جنوب غربی آن، پهنه‌های اقلیمی متنوعی را برای این کشور در همسایگی ایران رقم زده‌اند (شکل ۱). حدود ۶۳ درصد از

این کشور کوهستانی است. با توجه به توپوگرافی پیچیده این کشور، اقلیم آن بسیار متنوع است؛ بطوریکه ۱۸ پهنه اقلیمی کوپن-گایگر را در بر می‌گیرد (شکل ۱) توضیحات مربوط به هر یک از پهنه‌های اقلیمی در جدول (۱) ارائه شده است. توپوگرافی و پهنه‌های اقلیمی حوضه‌های مرزی مشترک با ایران نیز بسیار متنوع است. افغانستان دارای چهار حوضه آبریز اصلی شامل هریرود-مرغاب، هلمند (هیرمند)، کابل و آمودریا است. در این میان، دو حوضه هریرود و هیرمند، از حوضه‌های هستند که با کشور ایران مشترک بوده و آب مورد نیاز مناطق شرقی و شمال شرقی کشور ایران را تأمین می‌کنند.



شکل ۱- توپوگرافی و پهنه‌های اقلیمی کوپن-گایگر افغانستان و حوضه‌های هیرمند و هریرود

جدول ۱- توصیف پهنه‌های اقلیمی کوپن-گایگر موجود در کشور افغانستان و حوضه‌های هیرمند و هریرود

ردیف	نام پهنه	توصیف	ردیف	نام پهنه	توصیف
۱	BWh	خشک، بیابانی، بسیار گرم	۱۰	Dsa	اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم
۲	BWk	خشک، بیابانی، سرد	۱۱	Dsb	اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و گرم
۳	BSh	خشک، استپی، بسیار گرم	۱۲	Dsc	اقلیم برفی با تابستان‌های سرد
۴	BSk	خشک، استپی، سرد	۱۳	Dwb	سرد با زمستان‌های خشک و تابستان گرم
۵	Csa	معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم	۱۴	Dwc	سرد با زمستان‌های خشک و تابستان سرد
۶	Csb	معتدل با تابستان‌های خشک و گرم	۱۵	Dfb	سرد با بدون فصل خشک و تابستان گرم
۷	Cwa	معتدل با زمستان‌های خشک و تابستان‌های بسیار گرم	۱۶	Dfc	سرد با بدون فصل خشک و تابستان سرد
۸	Cwb	معتدل با زمستان‌های خشک و تابستان‌های گرم	۱۷	ET	قطبی، تندرا
۹	Cfb	معتدل با بدون فصل خشک و تابستان‌های گرم	۱۸	EF	قطبی، یخبندان

• داده‌های مورد استفاده

- داده‌های همادی-وزنی چند منبعی (MSWX):

بکارگیری داده‌های چند منبعی بخصوص در کشورهایی با توپوگرافی پیچیده همانند افغانستان که داده‌های مشاهداتی چندانی نیز در دسترس ندارد یک منبع قابل اطمینان با عدم قطعیت پایین محسوب می‌شود. در این تحقیق برای بررسی وضعیت دما و بارش در کشور افغانستان از داده‌های اقلیمی تصحیح شده اریبی با تفکیک افقی بالا (GloH2O) مبتنی بر برونداد مجموعه داده همادی-وزنی چند منبعی (Beck) (MSWX و همکاران، ۲۰۲۲) (قابل دسترس از <https://www.glob2o.org/mswx>) با تفکیک افقی ۱/۱ درجه قوسی طی یک دوره اقلیمی ۴۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۲۰) استفاده شد. ابعاد این ماتریس برای کشور افغانستان ۶۲۴۲×۴۰، حوضه هیرمند ۳۲۹۷×۴۰ و برای حوضه هریرود ۸۴۱×۴۰ به دست آمده است (۴۰، تعداد گام‌های زمانی است و ۳۲۹۷، ۶۲۴۲ و ۸۴۱ تعداد نقطه شبکه‌ها است).

- پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6):

در این تحقیق پنج مدل CMIP6 از اولین اجرا (r1i1p1f1) شامل GFDL-ESM4، IPSL-CM6A-LR، MPI-ESM1-2-HR، MRI-ESM2-0 و UKESM1-0-LL با تفکیک افقی ۱/۵ درجه قوسی برای دو متغیر دما و بارش تحت دو سناریوی حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) بررسی شد. این پنج مدل از سوی پروژه تحقیقات هماهنگ در سامانه زمین و اقلیم: آزمایش‌ها، دانش، انتشار و گسترش (CRESCENDO)^{۱۱} به عنوان مدل‌هایی که فرآیندهای اقلیمی را به خوبی نمایش می‌دهند، معرفی شدند. از نظر حساسیت اقلیمی، این مدل‌ها نمایندگان خوبی برای مدل‌های مشارکت یافته در پروژه CMIP6 هستند (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۱). به طوریکه سه مدل ارائه شده توسط موسسه‌های GFDL، MPI و MRI مدل‌هایی با حساسیت اقلیمی کم و دو مدل ارائه شده توسط موسسه‌های IPSL و MOHC (مدل UKESM) مدل‌هایی با حساسیت اقلیمی بالا هستند. برای بررسی تغییرات متغیرهای دما و بارش در کشور افغانستان و حوضه‌های مرزی مشترک هیرمند و هریرود در آینده، یک دوره ۲۵ ساله در آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) استفاده شده و نتایج آن با دوره تاریخی در یک دوره ۲۵ ساله (۱۹۹۰-۲۰۱۴) برای بررسی بی‌هنجاری استفاده شد.

• روش‌های مورد استفاده

- سنج‌های آماری درستی‌سنجی:

برای درستی‌سنجی مجموعه داده MSWX (به عنوان داده مشاهداتی در این تحقیق)، چهار سنج آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^{۱۲} (رابطه ۱)، درصد اریبی (PBIAS)^{۱۳} (رابطه ۲)، ضریب توافق (d) (رابطه ۳) و اریبی

(Bias) (رابطه ۴) استفاده شد. سنج اریبی و درصد اریبی مقدار بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی داده‌های MSWX را در برابر داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهند. سنج RMSE اختلاف بین مقادیر مجموعه داده MSWX و مشاهداتی را نشان می‌دهد و به بررسی دقت برآورد مجموعه داده در برابر داده‌های مشاهداتی می‌پردازد. در نهایت سنج ضریب توافق بیانگر تطابق بین مقادیر برآورد شده توسط مجموعه داده MSWX و مقادیر مشاهداتی است. این سنج بین صفر و یک در تغییر است و هر چه به مقدار یک نزدیک‌تر باشد بیانگر توافق بیشتر بین دو سری داده است.

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

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \times 100 \quad (2)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \right] \quad (3)$$

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (4)$$

در روابط ارائه شده، P_i مقدار برآورد شده توسط مجموعه داده MSWX، O_i مقدار مشاهداتی و n تعداد کل داده‌ها است. همچنین obs و sim به ترتیب بیانگر مقادیر مشاهداتی و مجموعه داده MSWX هستند.

- تصحیح اریبی و تولید چند مدلی همادی (MME)^{۱۴} از مدل‌های منفرد CMIP6:

جهت تصحیح اریبی برونداد مستقیم متغیرهای دما و بارش از روش تصحیح مرتبه متوالی (SEC)^{۱۵} (Weedon و همکاران، ۲۰۱۱) استفاده شد. این روش یک روش نگاشت چندک پارامتری است که برای تصحیح اریبی‌ها در تمام صدک‌های توزیع و حفظ روند آن در این صدک‌ها طراحی شده است. روش نگاشت چندک (QM)^{۱۶} یک رویکرد تصحیح اریبی است که اخیراً در مطالعات جوّی محبوبیت زیادی پیدا کرده است (Thrasher و همکاران، ۲۰۱۲). مطالعات مختلفی نشان داده‌اند که QM از سایر روش‌های ساده‌تر (همانند روش‌های نسبت‌گیری) برای دما و بارش و ویژگی‌های آماری مختلف آن‌ها (مانند انحراف معیار و صدک‌ها) بهتر عمل می‌کند (Worku و همکاران، ۲۰۲۰). Lange (۲۰۱۹) این روش را به همراه روابط آماری آن شرح داده است. برای تولید چند مدلی همادی (CMIP6-MME) از مدل‌های منفرد CMIP6 ذکر شده در بخش داده‌ها از روش میانگین وزنی مستقل (IWM)^{۱۷} استفاده شد (Bai و همکاران، ۲۰۲۱؛ Zarrin و همکاران، ۲۰۲۱) (برای توضیحات بیشتر به منابع نامبرده رجوع شود).

- محاسبه روند با استفاده از آزمون‌های من-کندال تصحیح شده (MMK)^{۱۸} و شیب خط سن (SSE)^{۱۹}:

به منظور تشخیص روند متغیرهای اقلیمی (بارش و دما) از آزمون من-کندال تصحیح شده (MMK) و آزمون شیب خط سن استفاده شد. آزمون من-کندال (MK) یک روش ناپارامتریک برای بررسی روند است که توسط Mann (۱۹۴۵) و Kendall (۱۹۴۸) توسعه یافته است. سازمان هواشناسی جهانی (WMO)^{۲۰} استفاده از این آزمون را در مطالعات اقلیمی توصیه نموده است (Zhai و همکاران، ۲۰۲۰). Rao و Hamed (۱۹۹۸) آزمون MMK را پیشنهاد دادند. این آزمون یک ضریب تصحیح را به محاسبات واریانس بر اساس اندازه نمونه مؤثر (ESS)^{۲۱} اضافه می‌کند تا از تأثیر خودهمبستگی سری زمانی داده‌ها بر مقدار روند جلوگیری شود. ثابت شده است که آزمون MMK نسبت به آزمون MK برای محاسبه روند داده‌های اقلیمی قابل اعتمادتر و بهتر است (Daufresne و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین آزمون MMK حساسیت کمی را نسبت به داده‌های پرت نشان می‌دهد و هیچ الزامی برای داشتن یک توزیع مشخص آماری (همانند توزیع نرمال) ندارد. مقدار مثبت آزمون به معنای روند افزایشی داده‌ها است، در حالی که مقدار منفی نشان‌دهنده روند کاهشی در طول زمان است. معنی‌دار بودن روند را می‌توان در سطوح معنی‌داری مختلف (۰/۰۵ و ۰/۰۱) بررسی کرد تا فرضیه صفر مبنی بر اینکه هیچ روندی در سری زمانی وجود ندارد رد شود (Rao و Hamed، ۱۹۹۸). همانطور که گفته شد برای تشخیص روند در سری‌های زمانی دما و بارش بر روی کشور افغانستان و حوضه‌های مرزی مشترک با ایران از آزمون ناپارامتریک Sen's استفاده شد. آزمون شیب سن (Sen's)، بزرگی روند یا شیب روند را محاسبه می‌کند (Sen، ۱۹۶۸). مقادیر مثبت در خروجی این آزمون روند افزایشی و مقادیر منفی نشان‌دهنده روند کاهشی در سری زمانی دما و بارش است.

نتایج و بحث

• تغییرات دما و بارش و روند آن‌ها در افغانستان و حوضه‌های مرزی مشترک با ایران

به دلیل در دسترس نبودن داده‌های بلندمدت ایستگاهی از کشور افغانستان، برای درستی سنجی دما و بارش مجموعه داده MSWX از داده‌های ایستگاه هواشناسی همدید سرخس استفاده شد. نتایج نشان داد که به طور کلی این مجموعه داده دما را بهتر از بارش برآورد می‌کند. بطوریکه ضریب توافق بین داده‌های دمای مجموعه داده MSWX با داده ایستگاه سرخس ۰/۹۱ و برای بارش ۰/۸۷ به دست آمده است. همچنین بررسی درصد اریبی نشان داد که این مجموعه داده در برآورد بارش ۲/۸ درصد و برای دما ۱/۴۰

درصد نسبت به داده‌های ایستگاهی بیش‌برآوردی دارد. مقدار سنج RMSE نیز برای بارش ۳۱/۵۱ میلی‌متر و برای دما ۱/۰۴ درجه سلسیوس محاسبه شده است. در نهایت سنج اریبی نیز نشان می‌دهد که این مجموعه داده دارای بیش‌برآوردی برای هر دو متغیر دما و بارش است. بطوریکه مقدار اریبی دما ۰/۶۴ درجه سلسیوس و بارش ۵/۴۹ میلی‌متر به دست آمده است (جدول ۲). این مقادیر نشان می‌دهند که مجموعه داده MSWX کارایی مناسبی را در برآورد دما و بارش دارد و از این مجموعه داده می‌توان به عنوان جایگزین داده‌های مشاهداتی در مناطق فاقد داده همانند کشور افغانستان استفاده کرد.

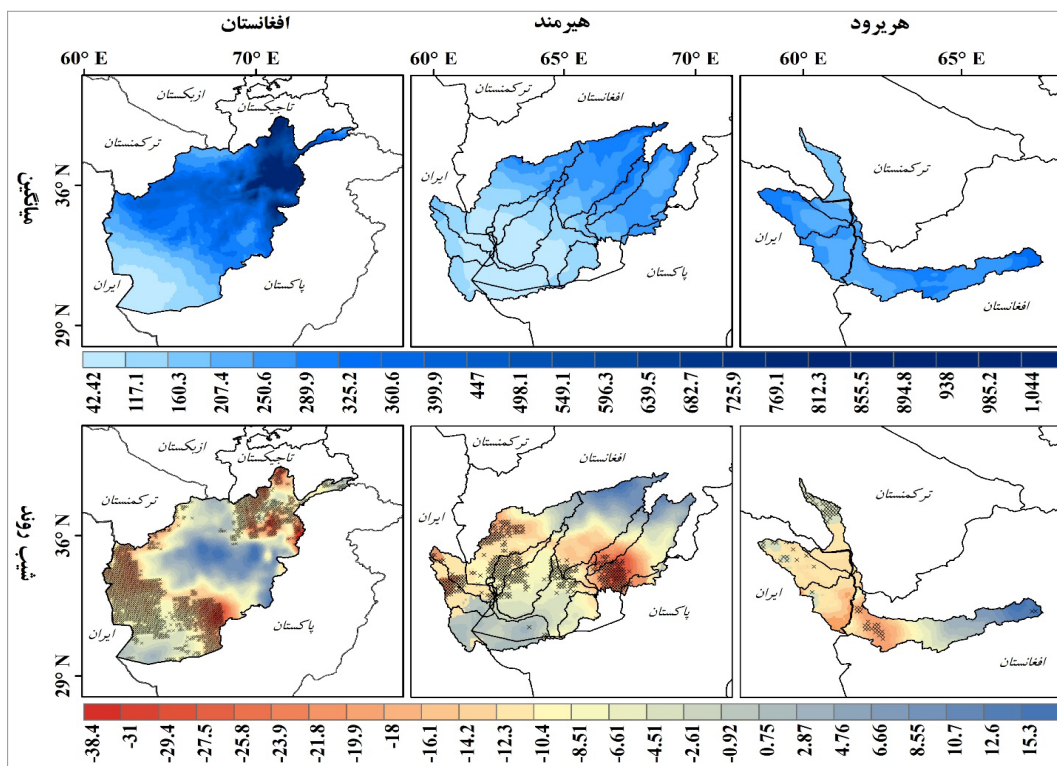
جدول ۲- درستی سنجی داده‌های بارش و دمای مجموعه داده MSWX در برابر داده‌های مشاهداتی (ایستگاه منتخب سرخس)

نام سنج	Bias	PBIAS	RMSE	d
بارش	۵/۴۹	۲/۸۰	۳۱/۵۱	۰/۸۷
دما	۰/۶۴	۱/۴۰	۱/۰۴	۰/۹۱

بررسی پراکنش فضایی بارش سالانه در افغانستان نشان می‌دهد که مجموع بارش سالانه در این کشور طی یک دوره اقلیمی ۴۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۲۰) بر اساس مجموعه داده MSWX بین حداقل ۴۲/۴ میلی‌متر در جنوب غربی این کشور در مرز با ایران و حداکثر ۱۰۴۴ میلی‌متر در گوشه شمال غربی این کشور در مرز با کشور تاجیکستان است. الگوی بارش در افغانستان به طور کلی منطق بر ارتفاعات است بطوریکه بارش در این کشور از آرایش توپوگرافی پیروی می‌کند و از جنوب غرب به شمال شرق شیب افزایشی دارد. دو حوضه مرزی مشترک هیرمند و هریرو که از کشور افغانستان سرچشمه می‌گیرند بارش سالانه زیادی را ندارند. بطوریکه بیشینه بارش در مناطق بالادست حوزه هیرمند حداکثر تا ۳۰۰ میلی‌متر و در حوضه هریرو حداکثر تا ۳۵۰ میلی‌متر است. شیب کاهشی بارش از سمت افغانستان به ایران برای هر دو حوضه قابل مشاهده است. روند بارش نیز طی چهار دهه گذشته در بیشتر مناطق افغانستان کاهش یافته است که این مقدار کاهشی نیز در بیشتر مناطق دارای روند معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ بوده است (مناطق با هاشور در شکل ۲ روند معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ دارند). بطوریکه در مناطق بالادست این کشور که جزو مناطق پربارش آن محسوب می‌شوند بارش با شیب قابل توجهی با مقدار ۳۸/۴ میلی‌متر/دهه کاهش یافته است. در مقابل بارش در بخش‌های میانی افغانستان و بخصوص در مجاورت با مرز پاکستان روند افزایشی دارد. این روند افزایشی بارش می‌تواند در نتیجه فعالیت‌های بیشتر سامانه موسمی تابستانه آسیایی باشد. در توافق با نتیجه به دست آمده Xue و همکاران (۲۰۲۳) روند افزایشی بارش‌های موسمی را در دوره مشاهداتی و همچنین در دوره‌های آبی گزارش کرده‌اند. روند

بارش برای حوزه هریرود الگوی جالبی را نشان می‌دهد. بطوریکه در بالادست این حوزه در کشور افغانستان روند افزایشی نزدیک به ۱۰ میلی‌متر/دهه قابل مشاهده است اما این مقدار روند در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نبوده است. این در حالی است که بارش در

مناطق مرزی مشترک با ایران و بخش‌های واقع در داخل کشور ایران روند کاهشی را نشان می‌دهد. روند بارش در بخش‌های شمالی این حوزه افزایشی و در بخش‌های پایین‌دست آن کاهشی است (شکل ۲).



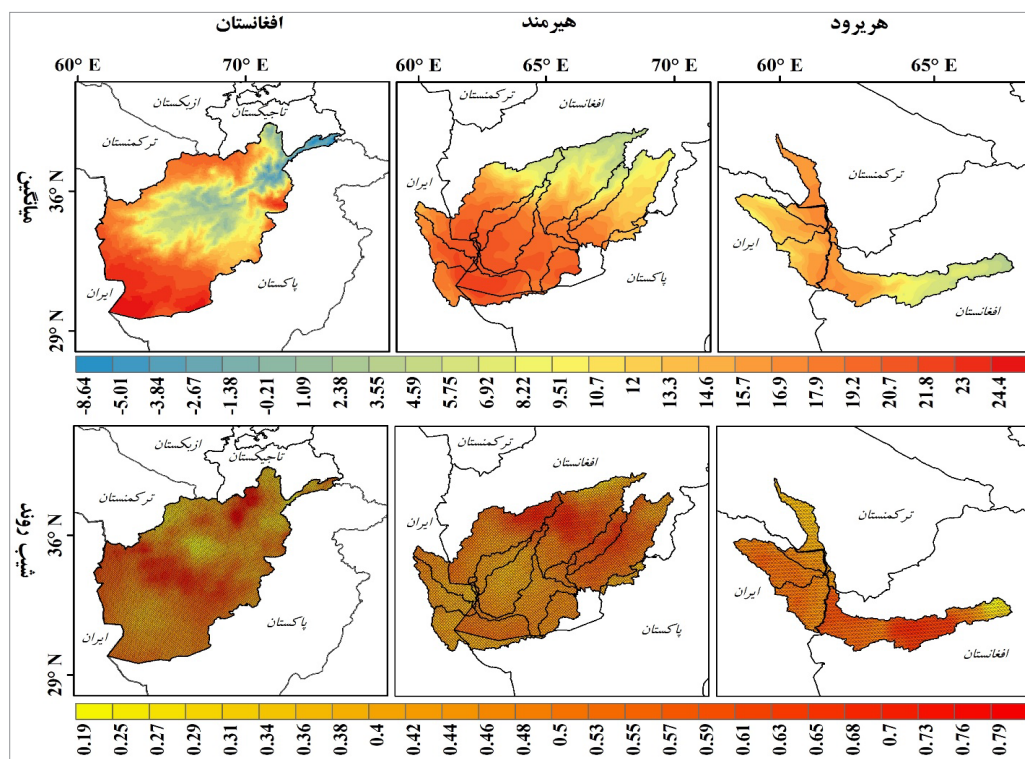
شکل ۲- بارش سالانه کشور افغانستان و حوزه‌های هیرمند و هریرود با داده‌های MSWX طی دوره ۱۹۸۱-۲۰۲۰؛ ردیف بالا مجموع بارش سالانه (واحد: میلی‌متر) و ردیف پایین شیب روند بارش سالانه (میلی‌متر/دهه) است. مناطق مشخص شده با هاشور خاکستری دارای روند معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ درصد بر اساس آزمون من-کندل تصحیح شده است.

پراکنش فضایی دمای سالانه در کشور افغانستان نشان داده است که کمینه دما منطبق بر ارتفاعات شمالی با مقدار ۸/۶۴- درجه سلسیوس و بیشینه دما با مقدار ۲۴/۴ درجه سلسیوس در دشت سیستان در مرز با ایران دیده می‌شود. دما در افغانستان از آرایش توپوگرافی پیروی می‌کند. بطوریکه کمینه‌ها در تمامی مناطق کشور افغانستان و حتی دو حوزه مرزی شرق ایران منطبق بر توپوگرافی است. روند دما بر عکس بارش که دارای روند همزمان افزایشی و کاهشی بوده است، روندی سراسر افزایشی را در افغانستان دارد. کمینه روند افزایشی با ۰/۱۹- درجه سلسیوس/دهه در مناطق جنوب شرقی و بخش‌های میانی و بیشینه آن در مناطق مرتفع شمالی در مرز با کشور تاجیکستان با مقدار ۰/۷۹+ درجه سلسیوس/دهه دیده می‌شود. الگوی سراسر افزایشی روند دما در کشور افغانستان به عنوان بالادست حوزه‌های مرزی که به سمت کشورهای ایران، ترکمنستان و ازبکستان و حتی پاکستان در جریان است باعث

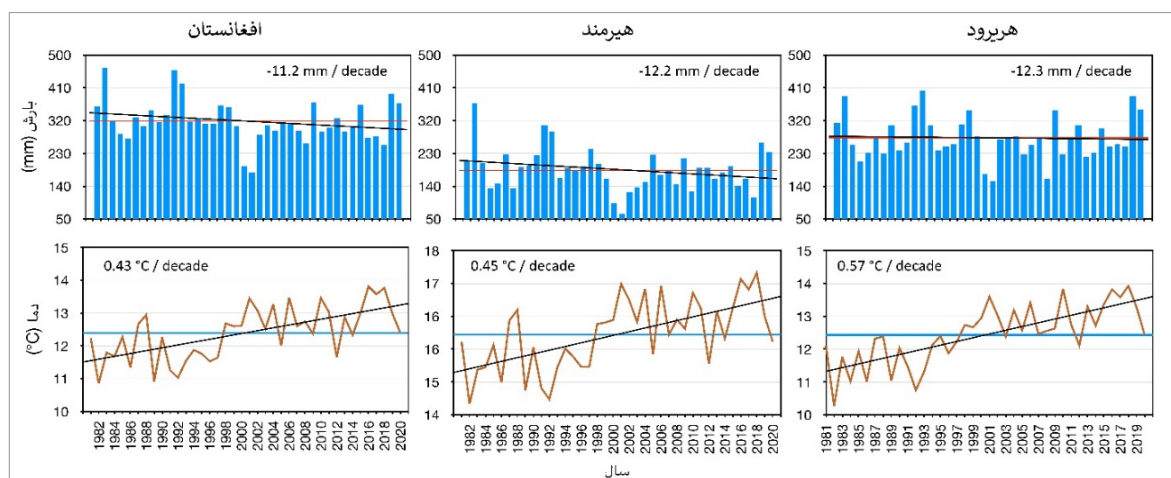
ذوب سریع‌تر ذخایر برفی و در نتیجه کاهش جریان آب در دوره گرم سال خواهد شد که مشکلات بسیاری را برای ساکنین و حتی محیط‌زیست این مناطق بوجود می‌آورد. بررسی متوسط پهنه‌ای دما و بارش در کشور افغانستان و دو حوزه مرزی شرقی هیرمند و هریرود نشان‌دهنده افزایش دما و کاهش بارش در هر سه منطقه مورد بررسی در دهه‌های اخیر بوده است. روند معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ به شکل هاشور در شکل‌های (۲ و ۳) نشان داده شده است. بارش در متوسط پهنه‌ای کشور افغانستان به ازای هر دهه ۱۱/۲ میلی‌متر کاهش داشته است. این در حالی است که هیرمند و هریرود کاهش بارش بیشتری داشته‌اند. به ازای هر دهه، هیرمند ۱۲/۲ میلی‌متر و هریرود ۱۲/۳ میلی‌متر کاهش بارش را تجربه کرده‌اند. برعکس متغیر بارش، دما روند افزایشی قابل توجهی طی چهار دهه گذشته در متوسط کشور افغانستان و همچنین هیرمند و هریرود داشته است. بالاترین روند افزایشی دما در حوزه هریرود با مقدار

سال در کنار سدسازی‌ها (همانند سدهای کمال خان و کجکی بر روی هیرمند و سد سلما بر روی هریرود) و انحراف مسیر رودها (همانند انحراف هیرمند به گود زره) توسط دولت‌های حاکم بر کشور افغانستان، باعث تشدید بی‌آبی در دشت سیستان و همچنین پایین‌دست حوضه هریرود در ایران خواهد شد.

۰/۵۷ درجه سلسیوس/دهه به‌دست آمده است. پس از هریرود به‌ترتیب هیرمند و افغانستان افزایش دمایی برابر با ۰/۴۵ و ۰/۴۳ درجه سلسیوس/دهه در طی چهار دهه گذشته نشان داده‌اند. این افزایش دما و کاهش بارش یک تهدید جدی برای منابع آب ایران تلقی می‌شود؛ چراکه کاهش انباشت برف در دوره سرد



شکل ۳- دمای سالانه کشور افغانستان و حوضه‌های هیرمند و هریرود با داده‌های MSWX طی دوره ۱۹۸۱-۲۰۲۰؛ ردیف اول مجموع دمای سالانه (واحد: درجه سلسیوس) و ردیف دوم شیب روند دمای سالانه (درجه سلسیوس/دهه) است. مناطق مشخص شده با هاشور خاکستری دارای روند معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ درصد بر اساس آزمون من-کندال تصحیح شده است.

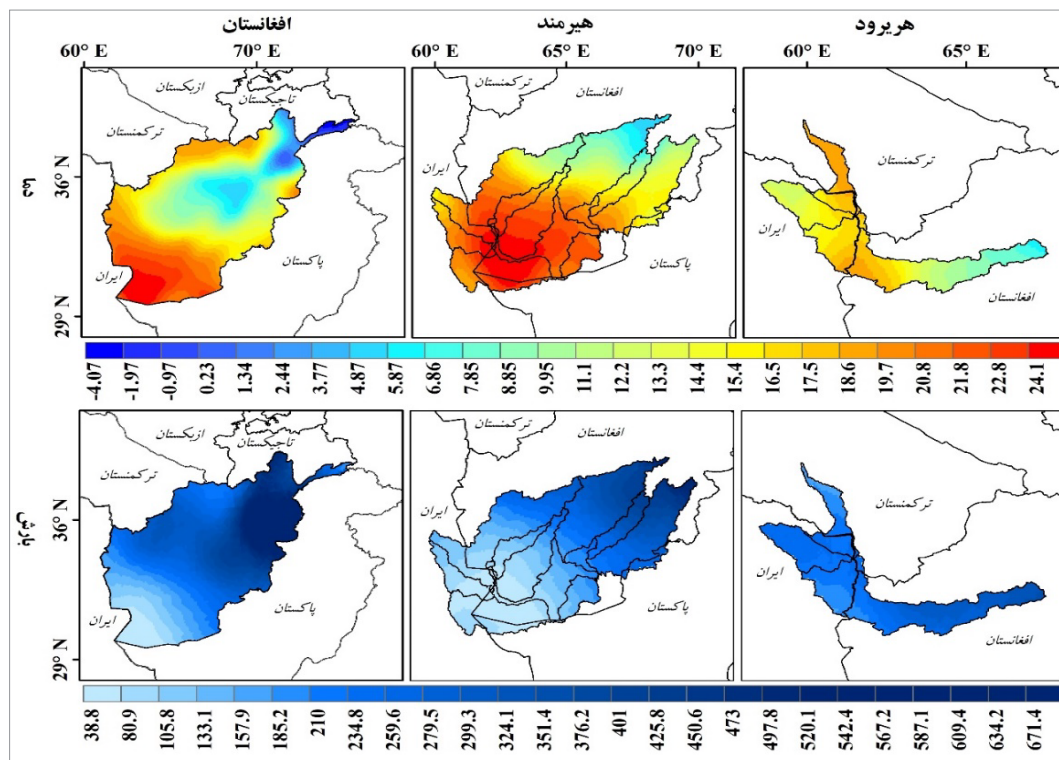


شکل ۴- متوسط پهنه‌ای دما و بارش کشور افغانستان و حوضه‌های هیرمند و هریرود با داده‌های MSWX طی دوره ۱۹۸۱-۲۰۲۰؛ ردیف بالا مجموع بارش سالانه (واحد: میلی‌متر) و پایین دوم میانگین دمای سالانه (درجه سلسیوس/دهه) است. در ردیف اول خطوط قرمز و سیاه به‌ترتیب میانگین و شیب روند بارش و در ردیف دوم خطوط آبی و سیاه به‌ترتیب میانگین و شیب روند دما را در طی سری زمانی نشان می‌دهد.

• بررسی پیش‌نگری‌های آینده دما و بارش

بررسی تغییرات تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) دما و بارش سالانه در کشور افغانستان و دو حوضه هریرود و هیرمند براساس برون‌داد CMIP6-MME نشان می‌دهد که کمینه دما با $4/07^{\circ}\text{C}$ درجه سلسیوس در مناطق شمالی افغانستان در منطقه نوشاخ در مرز با کشور ترکمنستان و چین دیده می‌شود. دما در افغانستان دارای شیب افزایشی شمال شرقی به جنوب غربی است بطوریکه هر چه به سمت دشت سیستان پیش برویم بر بیشینه دمای افغانستان افزوده می‌شود. بیشینه دما در دشت سیستان در مرز با کشور ایران به مقدار $24/1^{\circ}\text{C}$ درجه سلسیوس است (شکل ۵). از آنجاییکه بخش‌های قابل توجهی از حوضه‌های هریرود و هیرمند در کشور افغانستان قرار دارد، این حوضه‌ها پراکنش فضایی مشابهی با همین کشور را ارائه داده‌اند. بطوریکه کمینه دما در هر دو حوضه، در بالادست در کشور افغانستان و بیشینه آن در پایین‌دست در کشورهای ایران و ترکمنستان دیده می‌شود. پراکنش فضایی بارش نیز الگویی مشابه اما برعکس مقادیر بیشینه و کمینه دما دارد. بیشینه بارش سالانه ($671/4$ میلی‌متر) در افغانستان در مناطق شمالی این کشور و کمینه آن ($38/8$ میلی‌متر) در غرب و جنوب غربی آن بر اساس برون‌داد CMIP6-MME طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) به‌دست آمده است (شکل ۵). در حوضه هیرمند و هریرود نیز الگویی مشابه دیده می‌شود. پراکنش فضایی کمینه‌ها و بیشینه‌های دما و بارش در کشور

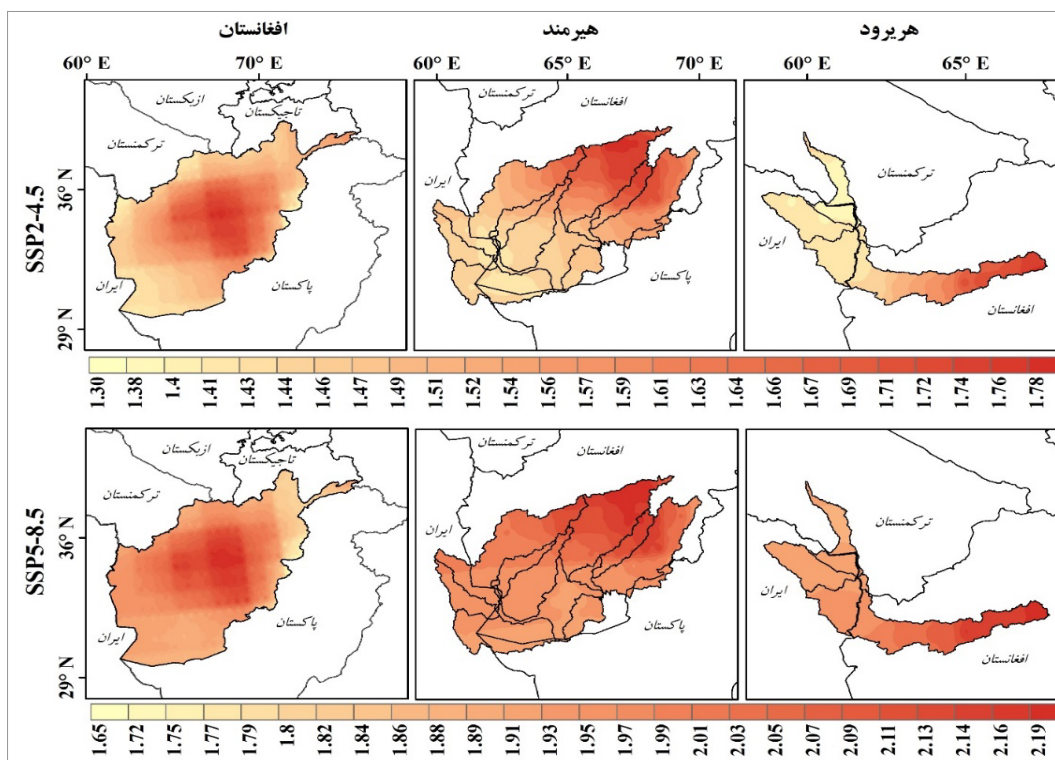
افغانستان بر اساس برون‌دادهای CMIP6-MME و MSWX در هر سه منطقه مورد بررسی تقریباً یکسان است اما در مقادیر دارای اختلاف هستند. اولین عامل در این اختلاف می‌تواند به دلیل تفکیک افقی ریزتر MSWX (حدود ۱۰ کیلومتر) نسبت به CMIP6-MME (حدود ۵۰ کیلومتر) باشد. تفاوت در شبیه‌سازی مقادیر و الگوهای داده‌های همادی-وزنی چند منبعی (MSWX) و برون‌داد چند مدلی CMIP6-MME همچنین می‌تواند به دلیل جغرافیا و اقلیم‌شناسی پیچیده و متنوع کشور افغانستان باشد. بطوریکه مدل‌های CMIP6 در سراسر افغانستان به دلیل تفاوت‌هایی همانند تفکیک افقی و حساسیت اقلیمی مدل‌ها، بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی قابل توجهی دارند که همین امر منجر به افزایش عدم قطعیت در برآوردهای اقلیمی گذشته و آینده می‌شود. دلیل احتمالی برآورد کمتر بارش CMIP6-MME نسبت به داده‌های MSWX در شمال و شمال‌شرق افغانستان می‌تواند به فقدان ایستگاه‌های هواشناسی به عنوان داده مشاهداتی مربوط باشد که مدل نتوانسته است مقدار و الگوی دقیق بارش در مناطق مرتفع را نشان دهد. دلیل احتمالی دوم می‌تواند اثر توپوگرافی پیچیده در فرآیندهای اقلیم منطقه‌ای باشد که نمی‌توان از برون‌داد مدل گردش کلی با تفکیک افقی پایین انتظار برآورد دقیقی را داشت. بنابراین، کاربری مدل‌هایی با تفکیک افقی ریزتر می‌تواند به طور موثری دقت برآورد بارش را به‌ویژه در مناطقی با توپوگرافی پیچیده در کشور افغانستان بهبود بخشد.



شکل ۵- وردایی تاریخی دما و بارش میانگین سالانه در کشور افغانستان و دو حوضه مرزی هیرمند و هریرود بر اساس برون‌داد CMIP6-MME (۲۰۱۴-۱۹۹۰)

این متغیر نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود، افزایش بیش‌تر در دمای میانگین سالانه پیش‌نگری شده در افغانستان تحت سناریوی انتشار بالا (SSP5-8.5) رخ می‌دهد (شکل ۶). این نتیجه با یافته‌های قبلی بر اساس مدل‌های CMIP5 در آسیای جنوبی مطابقت دارد (Rehman و همکاران، ۲۰۱۸). افغانستان دارای رشته کوه‌های مرتفعی همچون هندوکش است. این منطقه در برابر تغییر اقلیم آسیب‌پذیر است و افزایش زیاد دما باعث تسریع بیشتر ذوب یخچال‌های طبیعی در این منطقه می‌شود. میانگین سالانه دمای پیش‌نگری شده نشان می‌دهد که دما به طور مداوم در آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) افزایش خواهد یافت. افزایش مداوم دمای هوا منجر به افزایش دمای سطحی خاک، افزایش ذوب برف و یخچال‌های دائمی در فصل گرم سال می‌شود. از دست رفتن سطوح برف و یخ و افزایش تبخیر آب از خاک منجر به کاهش رطوبت خاک و رواناب سطحی شده که در نتیجه منجر به تخریب پوشش گیاهی و بیابان‌زایی می‌شود.

پراکنش فضایی تغییرات پیش‌نگری شده در میانگین سالانه دما در افغانستان تحت دو سناریو SSP مختلف در شکل (۶) نشان داده شده است. برای دوره آینده نزدیک، میانگین دمای سالانه در افغانستان ۱/۵۲ و ۱/۹۵ درجه سلسیوس به ترتیب تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 افزایش می‌یابد. دما در متوسط پهنه‌ای حوضه هریرود نیز ۱/۴۶ و ۱/۹۴ درجه سلسیوس به ترتیب تحت سناریوهای حد واسط و خیلی بدبینانه نسبت به دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) افزایش داشته است. بی‌هنجاری سراسر افزایشی در حوضه هیرمند نیز دیده می‌شود. بطوریکه دما تحت سناریو حد واسط، ۱/۵۲ درجه سلسیوس و تحت سناریو خیلی بدبینانه، ۱/۹۶ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. تغییرات دمایی پیش‌نگری شده در بخش‌های مرتفع مرکزی و شمال غربی افغانستان، بیش‌تر از سایر مناطق این کشور است. دمای میانگین سالانه پیش‌نگری شده در افغانستان هر چند که سراسر افزایشی است اما تنوع فضایی زیادی را در توزیع جغرافیایی



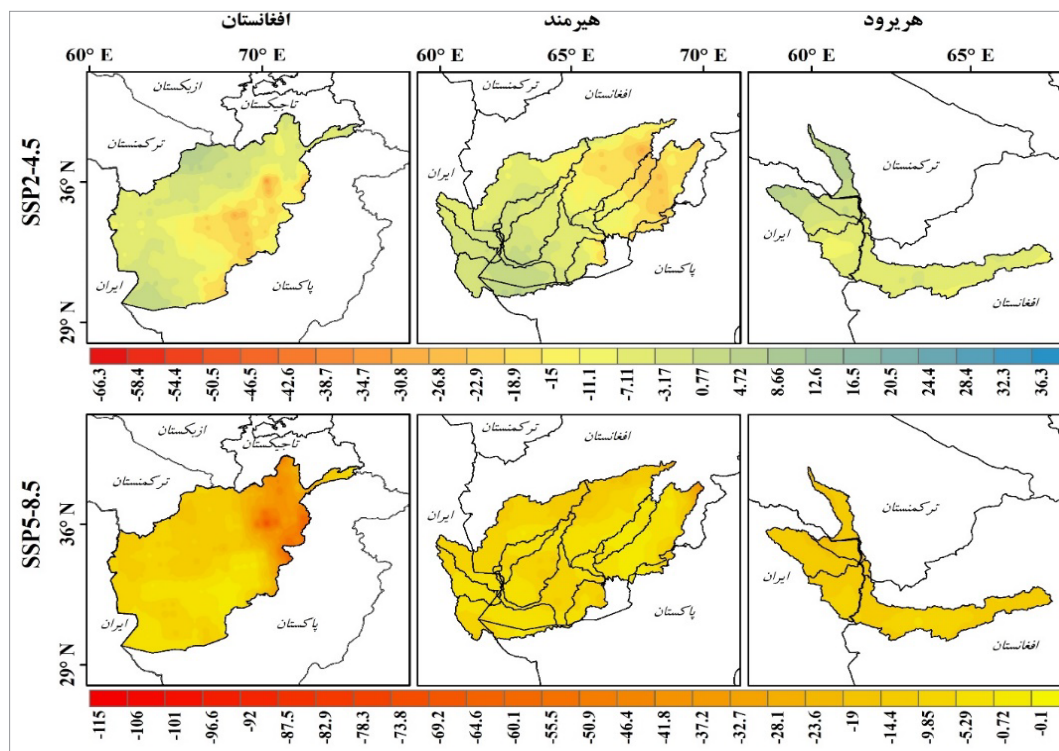
شکل ۶- بی‌هنجاری دمای سالانه در کشور افغانستان و حوضه‌های هیرمند و هریرود طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) تحت دو سناریو حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) با استفاده از CMIP6-MME (واحد: درجه سلسیوس)

هریرود در خارج از کشور افغانستان دارای بی‌هنجاری مثبت است. تحت سناریوی SSP5-8.5، کل کشور افغانستان و همچنین دو حوضه مرزی کاهش قابل توجهی در مجموع بارش سالانه نسبت به دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) را نشان می‌دهند. از نظر پراکنش فضایی پیش‌نگری بارش در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) نشان‌دهنده کاهش قابل توجه مجموع بارش سالانه در

پراکنش فضایی تغییرات پیش‌نگری شده در مجموع بارش سالانه برای دوره آینده نزدیک تحت دو سناریوی SSP نشان می‌دهد که بارش در بیش‌تر مناطق کشور افغانستان و بخصوص حوضه‌های مرزی هیرمند و هریرود کاهش خواهد داشت. با این حال مجموع بارش سالانه تحت سناریو SSP2-4.5 در برخی از مناطق کشور افغانستان و همین‌طور بخش‌هایی از حوضه

بخش‌های شمالی و شمال شرقی کشور افغانستان بخصوص در مرز با کشور پاکستان است. در مقابل در پایین‌دست حوضه هیرمند و بخش‌های مرزی با کشور ایران بارش کاهش چندان زیادی را تحت سناریو SSP5-8.5 نشان نمی‌دهد. بطوریکه بی‌هنجاری منفی نسبت به دوره تاریخی، حداکثر تا ۵ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۷). همانطور که پیش‌تر گفته شد عدم قطعیت برونداد CMIP6-MME بسیار کمتر از مدل‌های منفرد CMIP6 است که این امر نتایج به‌دست آمده از تغییرات بارش و دما را

قابل اطمینان‌تر می‌نماید. به همین ترتیب عدم قطعیت سناریوی SSP با انتشار کمتر (SSP2-4.5) نسبتاً کمتر از سناریوی با انتشار بالا (SSP5-8.5) خواهد بود. به طور کلی به دلیل توپوگرافی پیچیده مناطق شمالی، دامنه عدم قطعیت نوسانات بارش در شمال افغانستان بیشتر از مناطق جنوبی آن است. این یافته‌ها از پیش‌نگری بارش و دما برای درک بهتر آینده وضعیت منابع آب حوضه‌های مرزی مشترک در مقیاس منطقه‌ای و حتی سایر مناطق جهان مفید خواهد بود.



شکل ۷- بی‌هنجاری بارش سالانه در کشور افغانستان و حوضه‌های هیرمند و هریرود طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) تحت دو سناریو حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) با استفاده از CMIP6-MME (واحد میلی‌متر)

بررسی وضعیت بارش و دما در متوسط پهنه‌ای کشور افغانستان و دو حوضه مرزی هیرمند و هریرود برای دوره ۱۹۸۱-۲۰۲۰ براساس داده‌های MSWX نشان داد که بارش در متوسط پهنه‌ای هر سه منطقه مورد بررسی روند کاهشی داشته است. بیشینه کاهش بارش با مقدار ۱۲/۳ میلی‌متر/دهه در حوضه هریرود دیده می‌شود. در مقابل دما در متوسط پهنه‌ای کشور افغانستان و دو حوضه هیرمند و هریرود روند افزایشی نشان می‌دهد. آهنگ افزایشی دما برای کشور افغانستان و حوضه هیرمند ۰/۴ درجه سلسیوس/دهه محاسبه شده است. این در حالی است که در حوضه هریرود دما نسبت به دو منطقه پیشین آهنگ بیشتری را با مقدار ۰/۵۷ درجه سلسیوس/دهه تجربه کرده است. افزایش بیشتر دما در مناطق مرتفع کوهستانی در سایر مناطق جهان

نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم به دلیل ارتباط مستقیم بین واداشت‌های اقلیمی و تغییرات در فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه، منابع آب را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این مطالعه، برای بررسی وضعیت بارش و دمای کشور افغانستان و حوضه‌های مرزی مشترک با ایران (هیرمند و هریرود)، از دو گروه داده‌های همادی-وزنی چند منبعی (MSWX) و برونداد مدل‌های CMIP6 استفاده شد. یک چند مدلی همادی از مدل‌های منفرد CMIP6 تولید (CMIP6-MME) و پیش‌نگری‌های اقلیمی دما و بارش آینده کشور افغانستان و دو حوضه مرزی هیرمند و هریرود با استفاده از آن ارائه شده است.

همانند فلات تبت (Yan و همکاران، ۲۰۲۰) و شمال غربی ایران (Zarrin و همکاران، ۲۰۲۱) نیز گزارش شده است.

نتایج پیش‌نگری‌های دما و بارش نشان داد که بر اساس سناریوی خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) دما به شکلی قابل توجه افزایش خواهد داشت و به همین ترتیب بارش نیز در دوره آینده نزدیک کاهش خواهد داشت. تحت سناریوی حد واسط (SSP2-4.5) الگوهای فضایی دما و بارش مشابه با الگوی فضایی تحت سناریو SSP5-8.5 است با این تفاوت که افزایش دما و کاهش بارش تحت این سناریو کمتر است.

آهنگ گرمایش بیشتر در مناطق شمالی، شمال غربی و بخش‌های مرتفع مرکزی افغانستان شناسایی شده است. آهنگ بیش‌تر گرمایش کره زمین در مناطق مرتفع به دلیل پدیده گرمایش وابسته به ارتفاع از طریق تغییر در سازوکارهایی همانند برف-سپیدایی، بازخوردهای سطح زمین، تغییرات بخار آب، گرمای نهان و تغییرات شار تابشی است. Rangwala و همکاران (۲۰۱۰) در فلات تبت، بازخورد برف-سپیدایی را به عنوان عامل اصلی برای گرم شدن بیشتر و ذوب برف و یخ شناسایی کردند. در همین ارتباط Fatima و همکاران (۲۰۲۰) به این نتیجه رسیدند که ذوب شدن سریع یخچال‌های طبیعی هندوکش-کاراکوروم-هیمالیا منجر به سیلاب‌ها و طغیان رودها می‌شود که در نتیجه آن آب شیرین بخصوص در دوره گرم سال کاهش می‌یابد. از سوی دیگر کشور افغانستان در سال‌های گذشته تحت تأثیر جنگ‌های داخلی بسیاری بوده است که همین امر باعث شده تا در این کشور مدیریت منابع آب به شکل جدی مورد توجه قرار نگیرد.

افزایش دمای هوا و کاهش بارش در حوضه‌های مرزی مشترک با کشور ایران به همراه عوامل انسانی همانند تغییر کاربری زمین، سدسازی‌های بسیار در بالادست حوضه‌های مشترک، فشار جمعیت و از دست رفتن پوشش گیاهی در نتیجه کاهش دسترسی به منابع آب و چرای بیش از حد دام‌ها شرایط را برای رخداد خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و اجتماعی-اقتصادی فراهم کرده است که در نتیجه آن مشکلات بسیاری را در زمینه تأمین آب شرب شهری و کشاورزی و همچنین رخداد گردوخاک ایجاد کرده است.

افغانستان در فهرست کشورهایی که بیشتر در مواجهه با بحران هستند، رتبه چهارم را دارد (INFORM Risk Index 2023) و از کشورهای آسیب‌پذیر و با آمادگی پایین برای انطباق با تغییرات اقلیم است که در شاخص سازگاری جهانی نوتردام در رتبه هشتم قرار دارد. حداقل ۶۰ درصد از جمعیت افغانستان به کشاورزی دیم وابسته هستند، اما تغییرات در الگوی بارش و برف به شدت شیوه‌های معیشتی را تهدید می‌کند و ناامنی غذایی، سوء تغذیه و انواع بیماری را افزایش می‌دهد. خشکسالی شایع‌ترین مخاطره گزارش شده برای خانوارها در افغانستان است که رخداد آن از ۳۹ درصد در سال ۲۰۲۱ به ۶۴ درصد در سال ۲۰۲۲ افزایش یافته

است. امروزه از هر ۳۴ ولایت، ۲۵ ولایت شرایط خشکسالی شدید یا فاجعه بار را تجربه می‌کنند که بیش از ۵۰ درصد از مناطق از هر ولایت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش دما به سرعت الگوهای بارش را در سراسر افغانستان تغییر می‌دهد و دسترسی مردم به آب را کاهش می‌دهد. بیشتر رودخانه‌های اصلی این کشور از ارتفاعات مرکزی (ولایات بامیان و دایکندی) سرچشمه می‌گیرند، اما منابع اصلی آب برای بسیاری از مناطق به دلیل بارش‌های نامنظم و تغییرات سریع در مقدار و زمان بارش برف در ارتفاعات به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. سد دوستی با همکاری مشترک ایران و ترکمنستان ساخته شده و عملیات اجرایی ساخت آن در سال ۱۳۷۹ آغاز و در سال ۱۳۸۴ افتتاح شد. این سد بزرگ‌ترین سد مخزنی شرق کشور است که بر روی رودخانه هریروند احداث شده است. خشکسالی‌های افغانستان و سدسازی در بالادست باعث شده است تا آورده این سد به شکل قابل توجهی در سال‌های اخیر کاهش یافته و این کاهش آب ورودی سد باعث کاهش قابل توجه ذخیره آبی این سد شده که بر این اساس مشکلات جدی را برای تأمین آب شهر مشهد و مناطق پایین دست آن ایجاد کرده است.

پی‌نوشت‌ها

- 1-Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation
- 2-Multi-Source Weather
- 3-General circulation models
- 4-Coupled Model Intercomparison Project
- 5-Shared Socio-economic Pathways
- 6-Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
- 7-Institut Pierre-Simon Laplace
- 8-Max Planck Institute
- 9-The Meteorological Research Institute
- 10-The UK Earth System Modelling
- 11-Coordinated Research in Earth Systems and Climate: Experiments, knowledge, Dissemination and Outreach
- 12-Root Mean Squared Error
- 13-Percent bias
- 14-Multi-model endpoints
- 15-Sequential Elevation Correction
- 16-Quantile mapping
- 17-Independent weighted mean
- 18-Modified Mann-Kendall test
- 19-Sen's slope estimator
- 20-World Meteorological Organization
- 21-Effective Sample Size

- Bevacqua, E., Zappa, G., Lehner, F., & Zscheischler, J. (2022). Precipitation trends determine future occurrences of compound hot-dry events. *Nature Climate Change*, 12(4), 350-355. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01309-5>
- Dai, A., & Bloecker, C. E. (2019). Impacts of internal variability on temperature and precipitation trends in large ensemble simulations by two climate models. *Climate dynamics*, 52(1-2), 289-306. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4132-4>
- Daufresne, M., Lengfellner, K., & Sommer, U. (2009). Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(31), 12788-12793. <https://doi.org/10.1073/pnas.0902080106>
- Eyring, V., Cox, P. M., Flato, G. M., Gleckler, P. J., Abramowitz, G., Caldwell, P., ... & Williamson, M. S. (2019). Taking climate model evaluation to the next level. *Nature Climate Change*, 9(2), 102-110. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0355-y>
- Farhat, F., Kashifi, M. T., Jamal, A., & Saba, I. (2022). Spatiotemporal projections of precipitation and temperature over Afghanistan based on CMIP6 global climate models. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 4229-4242. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01361-2>
- Fatima, E., Hassan, M., Hasson, S. U., Ahmad, B., & Ali, S. S. F. (2020). Future water availability from the western Karakoram under representative concentration pathways as simulated by CORDEX South Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 1093-1108. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03261-w>
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Kang, Y., Khan, S., & Ma, X. (2009). Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security-A review. *Progress in natural Science*, 19(12), 1665-1674. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2009.08.001>
- Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods, Griffin, No. 98. Harvard Book List (edited) 1955. <https://psycnet.apa.org/record/1948-15040-000>
- زرین، آذر، و داداشی رودباری، عباسعلی. (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. <https://doi.org/10.30499/ijg.2022.344862.1430>
- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539-42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Aliyar, Q., Dhungana, S., & Shrestha, S. (2022). Spatio-temporal trend mapping of precipitation and its extremes across Afghanistan (1951-2010). *Theoretical and Applied Climatology*, 147, 605-626. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03851-2>
- Asadi-RahimBeygi, N., Zarrin, A., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2024). Near-term temperature extremes in Iran using the decadal climate prediction project (DCPP). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38, 447-466. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02579-x>
- Babar, Z. A., Zhi, X., Ge, F., Riaz, M., Mahmood, A., Sultan, S., Shad, M.A., Aslam, C. M., & Ahmad, M. F. (2016). Assessment of Southwest Asia surface temperature changes: CMIP5 20th and 21st century simulations. *Pakistan Journal of Meteorology*, 13(25): 1-15. <https://www.prdb.pk/article/assessment-of-southwest-asia-surface-temperature-changes-cm-190>
- Bai, H., Xiao, D., Wang, B., Liu, D. L., Feng, P., & Tang, J. (2021). Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China Plain. *International Journal of Climatology*, 41, E171-E186. <https://doi.org/10.1002/joc.6674>
- Beck, H. E., Van Dijk, A. I., Larraondo, P. R., McVicar, T. R., Pan, M., Dutra, E., & Miralles, D. G. (2022). MSWX: Global 3-hourly 0.1 bias-corrected meteorological data including near-real-time updates and forecast ensembles. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(3), E710-E732. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0145.1>

- and future projections. *International Journal of Climatology*, 34(11), 3282-3303. <https://doi.org/10.1002/joc.3915>
- Scafetta, N. (2023). CMIP6 GCM ensemble members versus global surface temperatures. *Climate Dynamics*, 60(9-10), 3091-3120. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06493-w>
- Sedighi, M. N., Hendrawan, V. S. A., & Komori, D. (2022). Climate projections over different climatic regions of Afghanistan under shared socioeconomic scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1-2), 511-524. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04063-y>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Suryavanshi, S., Joshi, N., Maurya, H. K., Gupta, D., & Sharma, K. K. (2022). Understanding precipitation characteristics of Afghanistan at provincial scale. *Theoretical and Applied Climatology*, 150(3-4), 1775-1791. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04257-4>
- Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., & Duffy, P. B. (2012). Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3309-3314. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3309-2012>
- Weedon, G. P., Gomes, S., Viterbo, P., Shuttleworth, W. J., Blyth, E., Österle, H., ... & Best, M. (2011). Creation of the WATCH forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5), 823-848. <https://doi.org/10.1175/2011JHM1369.1>
- Worku, G., Teferi, E., Bantider, A., & Dile, Y. T. (2020). Statistical bias correction of regional climate model simulations for climate change projection in the Jemma sub-basin, upper Blue Nile Basin of Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 139, 1569-1588. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03053-x>
- Xue, D., Lu, J., Leung, L. R., Teng, H., Song, F., Zhou, T., & Zhang, Y. (2023). Robust projection of East Asian summer monsoon rainfall based on dynamical modes of variability. *Nature Communications*, 14(1), 3856. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39460-y>
- Kumar, S., Chanda, K., & Pasupuleti, S. (2020). Spatiotemporal analysis of extreme indices derived from daily precipitation and temperature for climate change detection over India. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 343-357. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03088-5>
- Lange, S. (2019). Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1. 0). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3055-3070. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3055-2019>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Men, B., Wu, Z., Liu, H., Tian, W., & Zhao, Y. (2020). Spatio-temporal analysis of precipitation and temperature: A case study over the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 3527-3541. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02400-3>
- Mishra, A. K., Özger, M., & Singh, V. P. (2011). Association between uncertainties in meteorological variables and water-resources planning for the state of Texas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(12), 984-999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000150](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000150)
- Politi, N., Vlachogiannis, D., Sfetsos, A., & Nastos, P. T. (2023). High resolution projections for extreme temperatures and precipitation over Greece. *Climate Dynamics*, 61(1-2), 633-667. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06590-w>
- Rangwala, I., Miller, J. R., Russell, G. L., & Xu, M. (2010). Using a global climate model to evaluate the influences of water vapor, snow cover and atmospheric aerosol on warming in the Tibetan Plateau during the twenty-first century. *Climate Dynamics*, 34, 859-872. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0564-1>
- Rehman, N., Adnan, M., & Ali, S. (2018). Assessment of CMIP5 climate models over South Asia and climate change projections over Pakistan under representative concentration pathways. *International Journal of Global Warming*, 16(4), 381-415. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2018.095994>
- Sachindra, D. A., Huang, F., Barton, A., & Perera, B. J. C. (2014). Statistical downscaling of general circulation model outputs to precipitation—part 2: bias-correction

- Yan, Y., You, Q., Wu, F., Pepin, N., & Kang, S. (2020). Surface mean temperature from the observational stations and multiple reanalyses over the Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 55, 2405-2419. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05386-0>
- Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 144, 643-660. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03568-2>
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Hassani, S. (2021). Historical variability and future changes in seasonal extreme temperature over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 146, 1227-1248. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03795-7>
- Zhai, J., Mondal, S. K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., ... & Uddin, M. J. (2020). Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. *Atmospheric Research*, 246, 105111. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105111>