

## Evaluating the Impact of Climate Change on Flood Characteristics in Western Iran Under Future Climatic Conditions

Mohammad Baaghideh<sup>1</sup>

Associate Professor of Climatology, Department of Climatology and Geomorphology,  
Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar,  
Iran

*Received: 17 December 2024    Revised: 25 March 2025    Accepted: 2 May 2025*

### Abstract

Climate change, a major environmental challenge in recent decades, has significantly impacted water resources and increased the frequency of hydro-climatic events like floods. This research aims to evaluate the effects of climate change on flood indicators (return probability, intensity, and duration) in the Dez basin over the coming decades. Additionally, climate change analysis, uncertainty assessment, and the application of bias correction methods as other phased research goals intended for risk management improvement. In this paper, we analyzed temperature and precipitation data from five climate models derived from two databases, CORDEX-WAS and 2W2E. The HadGEM2-ES and MIROC5 models were selected to simulate three 20-year periods under three different scenarios. After calibrating the SWAT model for daily flow simulation, micro-flow data were incorporated to predict future flow, and flood-related indices were calculated. Overall, the results suggest declining precipitation and rising temperature compared to the observation period. Further, the 2W2E database predicted a greater drop in precipitation and a higher temperature surge for both models compared to the CORDEX-WAS database. The indicators of flood recurrence probability and intervals took a downturn in both databases. However, the flood magnitude index in CORDEX-WAS showed an upturn despite the declining precipitation, indicating the higher probability of extreme events induced by climate change. This research reveals that future climate change is likely to reduce the probability and intervals of flood events, although the magnitude of floods may increase under specific conditions. These findings

---

1. Corresponding Author, Email: m.baaghideh@hsu.ac.ir



©2024 The author(s). This is an open access article under the CC BY license:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**How to Cite This Article:** Baaghideh, M. (2025). Evaluating the Impact of Climate Change on Flood Characteristics in Western Iran Under Future Climatic Conditions. *Journal of Geography and Regional Development*, 23(1), 193-225. Doi: 10.22067/jgrd.2025.90801.1492

underscore the need for effective planning and adoption of flood risk management strategies to address the varied impacts of climate change.

**Keywords:** Climate Change, Uncertainty, Flood Indicators, Dez Basin.



## ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر مشخصه‌های سیلاب در غرب ایران تحت شرایط اقلیم آینده

محمد باعقیده (دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه آب‌وهواشناسی و ژئومرفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران)

m.baaghideh@hsu.ac.ir

### چکیده

تغییر اقلیم یکی از چالش‌های اصلی زیست‌محیطی دهه‌های اخیر است که تأثیرات قابل توجهی بر منابع آب و بروز پدیده‌های فرین هیدرواقلیمی مانند سیلاب‌ها داشته است. پژوهش پیش‌رو به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر شاخص‌های سیلاب (احتمال بازگشت، شدت و مدت) در حوضه آبخیز دز در دهه‌های آینده می‌پردازد. تحلیل تغییر اقلیم، بررسی عدم قطعیت و اعمال روش‌های تصحیح خطا از دیگر اهداف مرحله‌ای پژوهش در مسیر بهبود مدیریت ریسک هستند. برای انجام این پژوهش، داده‌های دما و بارش از پنج مدل اقلیمی متعلق به دو پایگاه داده CORDEX-WAS و 2W2E تحلیل شدند. دو مدل HadGEM2-ES و MIROC-MIROC5 برای شبیه‌سازی سه بازه زمانی ۲۰ ساله تحت سه سناریوی منتخب به کار گرفته شدند. پس از واسنجی مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان روزانه، داده‌های ریزگردانی به‌منظور پیش‌نمایی جریان در دوره‌های آبی وارد مدل شدند و شاخص‌های مرتبط با سیلاب محاسبه گردیدند. نتایج در مجموع حکایت از کاهش بارش و افزایش دما نسبت به دوره مشاهده دارد و پایگاه داده 2W2E کاهش بارش و افزایش دمای بیشتری را نسبت به پایگاه CORDEX-WAS برای هر دو مدل پیش‌نمایی می‌کند. شاخص‌های احتمال بازگشت و مدت سیلاب در هر دو پایگاه کاهش یافتند. با این حال، تنها شاخص بزرگی سیلاب در CORDEX-WAS با وجود کاهش بارش، روند افزایشی داشت که نشان از افزایش رویدادهای حدی تحت تأثیر تغییر اقلیم است. این پژوهش نشان می‌دهد که تغییر اقلیم در آینده منجر به کاهش احتمال بازگشت و مدت سیلاب خواهد شد، اما بزرگی سیلاب ممکن است تحت شرایط خاص افزایش یابد. این نتایج اهمیت برنامه‌ریزی و پیاده‌سازی راهکارهای مدیریت ریسک سیلاب را برای مقابله با تأثیرات متفاوت تغییر اقلیم برجسته می‌کند.

**واژگان کلیدی:** تغییر اقلیم، عدم قطعیت، شاخص‌های سیلاب، حوضه آبخیز دز.

## ۱. مقدمه

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی است که تأثیرات گسترده و عمیقی بر زیست‌بوم‌های طبیعی و زندگی بشر دارد (عباس<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۲: ۴۲۵۴۱). این پدیده از طریق گرمایش جهانی منجر به تغییرات قابل توجهی در چرخه هیدرولوژیکی شده و پیامدهای جدی بر الگوهای بارش، منابع آب و وقوع رویدادهای حدی همچون سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها داشته است (بولن<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۳: ۱). تحلیل کمی این تغییرات به درک عمیق‌تر آن و ارائه راهکارهای مؤثر برای مقابله با پیامدهای آن کمک می‌کند.

در دهه‌های اخیر، توجه پژوهشگران به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و ارائه راهکارهای مدیریتی و سازگاری افزایش یافته است. تغییر اقلیم سبب افزایش دما، تغییر در الگوهای بارش و افزایش فراوانی و شدت رویدادهای حدی هیدرولوژیکی، به‌ویژه سیلاب‌ها، شده است. این رویداد، با تغییرات ناگهانی در الگوی بارش و افزایش بارش‌های شدید، باعث جاری شدن سیلاب‌ها در مناطق مختلف می‌شود (فورتاک و وولینسکا<sup>۳</sup>، ۲۰۲۳: ۱). سیل‌ها به‌عنوان یکی از مرگ‌بارترین و ویران‌کننده‌ترین بلایای طبیعی، جوامع انسانی را با خطرات جدی مواجه می‌کنند (تیلیحال و شوکال<sup>۴</sup>، ۲۰۲۳: ۸۱).

پیش‌نمایی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی بر مبنای مدل‌های پیشرفته نشان می‌دهند که با ادامه روند تغییر اقلیم، احتمال وقوع سیلاب‌ها و شدت آن‌ها در آینده به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که به‌طور ذاتی حساس‌تر هستند، افزایش خواهد یافت. این یافته‌ها بر ضرورت اتخاذ رویکردهای جامع و پایدار در مدیریت منابع آب و مخاطرات طبیعی تأکید دارند. اتخاذ استراتژی‌های سازگاری، از جمله بهبود زیرساخت‌های مدیریت سیلاب و برنامه‌ریزی‌های بلندمدت، می‌تواند تا حد زیادی آسیب‌پذیری جوامع انسانی در برابر سیلاب‌ها را کاهش دهد (بندا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۲۲: ۳).

1. Abbass

2. Bolan

3. Furtak, &amp; Wolińska

4. Tillihal, &amp; Shukla

5. Banda

## ۲. پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، مطالعات بسیاری در مناطق مختلف جهان با هدف شناسایی اثرات تغییر اقلیم بر رویدادهای حادی چون سیلاب انجام شده است. برای نمونه، تأثیر تغییر اقلیم بر حجم سیلاب در ۱۴۰۳ حوضه آبریز آمریکای شمالی با استفاده از یازده مدل اقلیمی<sup>۱</sup> (GCM) تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 و با در نظر گرفتن منابع متنوع عدم قطعیت، از جمله مدل‌های آب‌وهوایی، روش‌های تصحیح خطا و مدل‌های هیدرولوژیکی، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که حجم سیلاب در نواحی کوهستانی غرب و منطقه دریاچه‌های بزرگ کاهش یافته، درحالی‌که در بیشتر مناطق شرقی آمریکای شمالی افزایش می‌یابد. همچنین، یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های اقلیمی بیشترین سهم را در واریانس عدم قطعیت حجم سیلاب دارند (آیونو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۴: ۱). در پژوهشی دیگر، اوشی<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از رویکرد «پایین به بالا»، عوامل مؤثر بر شدت سیلاب را تحت تأثیر تغییر اقلیم در دو حوضه آبریز واقع در مناطق معتدل و گرمسیری استرالیا بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش شدت بارش، به‌ویژه در حوضه‌های خشک که نسبت به تغییرات بارندگی حساس‌تر هستند، منجر به افزایش پیک‌های سیلاب می‌شود. همچنین، بیشترین میزان عدم قطعیت در پیش‌نمایی ریسک سیلاب آینده در سال‌های پایانی قرن بیست‌ویکم تحت سناریوی RCP8.5 مشاهده می‌شود. بررسی اثرات تغییر اقلیم و کاربری زمین بر سیلاب‌های آینده در حوضه گین در سریلانکا نشان داد که براساس سناریوی انتشار RCP 4.5، بارش در فصل‌های موسمی به ترتیب ۹/۷٪ و ۱۵/۷٪ افزایش خواهد یافت که منجر به افزایش ۱۰٪ در جریان‌های سیلابی می‌شود. همچنین، تبدیل زمین‌های کشاورزی به جنگل‌های حاشیه‌ای می‌تواند مساحت سیلاب را ۳/۳٪ کاهش دهد و اجرای طرح‌های مدیریت پایدار کاربری زمین به کاهش ۷٪ سیلاب در نواحی

1. General Circulation Models
2. Representative Concentration Pathways
3. Ionno
4. Oshea

پایین دست کمک خواهد کرد (جایاپادما<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۴: ۱). کی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر شش منبع مختلف عدم قطعیت از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای، ساختار مدل‌های اقلیمی (GCM)، روش‌های ریزمقیاس‌نمایی GCMها، ساختار مدل هیدرولوژیکی؛ پارامترهای مدل هیدرولوژیکی و تغییرپذیری درونی سامانه اقلیم را بر فراوانی وقوع سیل در انگلیس مورد بررسی قرار دادند؛ نتایج نشان دادند ساختار مدل‌های گردش عمومی جو GCM در مقایسه با دیگر منابع از عدم قطعیت بالاتری برخوردارند. اقبال<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر شدت و فرکانس سیلاب در حوضه رودخانه کابل برای دو دوره ۲۰۳۱-۲۰۵۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ با استفاده از چهار مدل اقلیمی RCP8.5 و RCP4.5 تحت دو سناریوی INM-CM4 و IPSL-CM5A، EC-EARTH، MIROC5 پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش دما و بارش منجر به افزایش فرکانس و شدت سیلاب‌ها و کاهش دوره بازگشت آن‌ها خواهد شد. هانگ<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی عملکرد مجموعه‌ای از سناریوهای آب‌وهوایی برای پیش‌نمایی سیل و خشکسالی در پنج حوضه رودخانه بزرگ که ۹۰٪ از خاک آلمان را پوشش می‌دهد، پرداختند. نتایج نشان داد که بیشتر رودخانه‌های آلمان در آینده شاهد سیلاب‌های شدیدتر و تکرار وقایع خشکسالی‌های ۵۰ ساله خواهند بود. در ایران نیز بررسی‌ها نشان از تغییرات محسوس در الگوی سیلاب‌ها دارد؛ ارزیابی تغییرات بلندمدت سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها در حوضه‌های جنوب شرق ایران نیز نشان داد که طی چهار دهه اخیر، حوضه بلوچستان جنوبی با سیلاب‌ها و خشکسالی‌های بزرگ‌تر، شدیدتر و طولانی‌تر روبه‌رو بوده است. براساس یافته‌های قربانی و کاشکی (۱۴۰۳)، بزرگی سیلاب‌ها در ایستگاه‌های باهوت، کهیر، پیرسهراب و کاریانی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. برای مثال، دبی سیلاب در ایستگاه کاریانی از ۲۴۴ مترمکعب بر ثانیه در دهه اول به ۵۵۴ مترمکعب بر ثانیه در دهه سوم افزایش یافته است. آرخی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT<sup>۵</sup> به پهنه‌بندی خطر سیلاب تحت تأثیر

1. Jayapadma

2. Kay

3. Iqbal

4. Huang

5. Soil and Water Assessment Tool

تغییر اقلیم در حوضه آبخیز قره‌سو پرداختند. خروجی‌ها نشان داد میانگین دمای حوضه به میزان ۰/۵۶ تا ۴ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد و بارش نیز در مقایسه با دوره پایه به میزان ۱۰ تا ۲۴ درصد کاهش خواهد داشت. همچنین براساس نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب، ۴۴ درصد از مساحت حوضه در محدوده خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارد. بررسی اثر تغییر اقلیم بر دو شاخص فراوانی<sup>۱</sup> (FFI) و منطقه منبع سیل<sup>۲</sup> (SFSAI) در حوضه تالار در شمال ایران نشان داد که شاخص FFI در قسمت‌های شرقی و شاخص SFSAI در قسمت‌های مرکزی و شمال شرقی که با کوه‌های مرتفع و مناطق شهری هم‌مرز هستند افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد (مقصود و همکاران، ۲۰۱۹: ۱). مزیدی و خوشروش (۱۳۹۵) تأثیر تغییر اقلیم را بر فراوانی سیل حوضه گرگان‌رود با استفاده از آنالیز مرتبه اول مدل هیدرولوژیک بارش رواناب بررسی کردند. مقایسه منحنی فراوانی سیلاب نشان داد که با وجود کاهش کلی بارش در آینده، بارش‌های حدی با شدت بیشتری نسبت به دوره پایه رخ خواهد داد و این مسئله افزایش سیلاب‌ها را در دوره‌های آتی نشان می‌دهد. در ایران، به دلیل تنوع اقلیمی، پراکندگی زمانی و مکانی بارش‌ها و بهره‌برداری ناپایدار از منابع طبیعی، وقوع سیلاب‌های شدید در بسیاری از حوضه‌های آبریز به‌صورت مکرر گزارش شده است. عوامل انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی، توسعه ناپایدار و برداشت بی‌رویه از منابع آب و خاک، به‌ویژه در مناطق کوهستانی و نیمه‌خشک، موجب افزایش خطر وقوع سیلاب‌ها شده‌اند. حوضه آبخیز دز، به‌عنوان یکی از زیرحوضه‌های اصلی کارون بزرگ، نقش کلیدی در تأمین آب کشاورزی، تولید انرژی و مصارف شهری دارد (موسوی و معرفی، ۱۳۹۵). از این‌رو، مدیریت پایدار منابع آب در این منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بررسی روند تغییرات سری زمانی بیشینه بارش در حوضه آبخیز دز طی شش دهه گذشته (۱۹۵۹-۲۰۱۹) نشان می‌دهد که میانگین تعداد روزهای بارش سنگین ۸۱ روز بوده و این روند افزایشی است (حسنوند و همکاران، ۱۴۰۱). افزون بر این، مطالعات آینده‌پژوهی در حوزه اقلیم نشان داده

---

1. Flood Frequency Index

2. Subbasin Flood Source Area Index

است که تغییر اقلیم منجر به افزایش شدت و فراوانی رویدادهای حدی، از جمله سیلاب‌ها، خواهد شد. نتایج پژوهش عسگری و همکاران (۱۳۹۹) تأیید می‌کند که بزرگی سیلاب‌ها در آینده افزایش خواهد یافت؛ یافته‌ای که در مطالعه بابایی‌فینی و همکاران (۱۳۹۳) نیز مورد تأیید قرار گرفته است. براساس پیش‌نمایی مدل‌های اقلیمی در این مطالعات، بارش‌های شدید در آینده روندی صعودی خواهند داشت که به تبع آن، شدت سیلاب‌ها نیز افزایش می‌یابد.

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که تاکنون اثرات تغییر اقلیم بر مشخصه‌های سیلاب در حوضه آبخیز دز، با در نظر گرفتن داده‌های هر دو پایگاه اقلیمی منطقه‌ای (RCM) و جهانی (GCM) و همچنین تلفیق آن‌ها با مدل هیدرولوژیکی SWAT و روش‌های مختلف تصحیح خطا، به صورت جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. برای نمونه، در مطالعه عسگری و همکاران (۱۳۹۹)، تنها از خروجی داده‌های پایگاه CORDEX-WAS استفاده شده و منابع عدم قطعیت در پیش‌نمایی‌های سیلاب تحلیل نشده است. این پژوهش با هدف ارائه چارچوبی جامع‌تر، تلاش دارد با بهره‌گیری از روش‌های تصحیح خطا و تحلیل منابع عدم قطعیت، دقت پیش‌نمایی‌های هیدرولوژیکی را ارتقا دهد. در این پژوهش، تأثیر تغییر اقلیم بر مشخصه‌های سیلاب (احتمال بازگشت، شدت و مدت) در حوضه آبخیز دز، با استفاده از داده‌های دو پایگاه اقلیمی RCM و GCM بررسی شده است. افزون بر این، نقش روش‌های تصحیح خطا در بهبود دقت پیش‌نمایی دما و بارش ارزیابی شده است. بر این اساس، سه پرسش کلیدی مطرح می‌شود:

۱. تغییر اقلیم چه تأثیری بر ویژگی‌های سیلاب (احتمال بازگشت، شدت و مدت) در

رودخانه دز دارد؟

۲. دقت مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای (RCM) و گردش عمومی جو (GCM)، همراه با مدل

هیدرولوژیکی SWAT، در پیش‌نمایی ویژگی‌های سیلاب چگونه ارزیابی می‌شود؟

۳. تفاوت روش‌های تصحیح خطا CCT و مقیاس‌گذاری خطی در بهبود این پیش‌نمایی‌ها

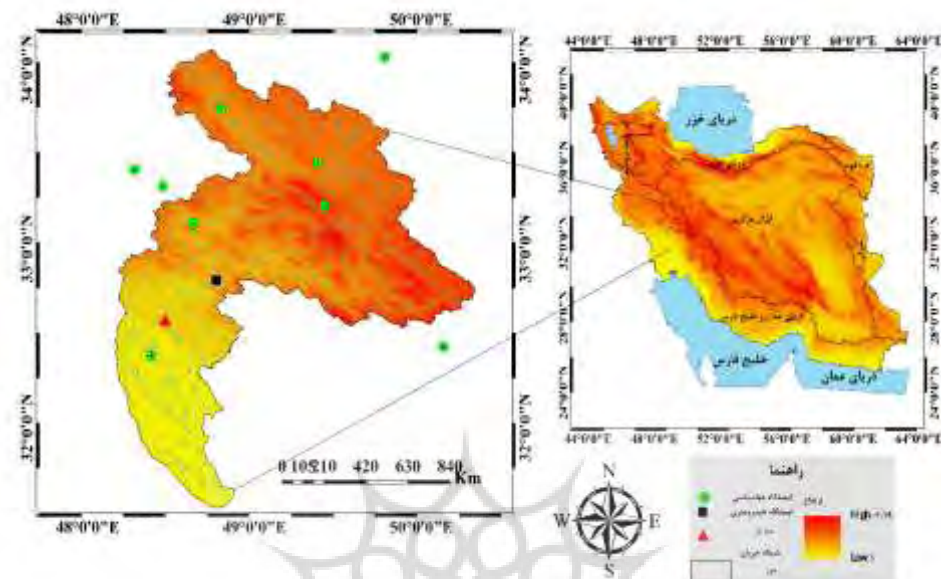
چيست؟

پاسخ به این پرسش‌ها می‌تواند بینشی جامع در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر سیلاب‌های حوضه دز ارائه داده و مبنایی برای مدیریت بهتر منابع آب و برنامه‌ریزی راهبردی در برابر سیلاب‌های آتی فراهم سازد.

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

#### ۳.۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه رودخانه دز در غرب ایران است که به لحاظ موقعیت جغرافیایی بین ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه ۲۱ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۴ درجه ۷ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. منطقه مورد مطالعه از تراکم پوشش گیاهی بالایی به‌ویژه در کوهستان برخوردار است، اما با افزایش ارتفاع از غرب به شرق این تراکم کاهش می‌یابد. براساس داده‌های اقلیمی متوسط بارش سالانه حوضه حدود ۷۶۰ میلی‌متر بارندگی است که تقریباً نیمی از آن (۴۹ درصد) را در فصل زمستان دریافت می‌کند. از آنجایی که دو سوم حوضه دارای ارتفاع بالاتر از ۱۰۰۰ متر و یک سوم دارای ارتفاع بالاتر از ۲۰۰۰ متر است، بیشتر بارندگی به‌صورت برف است. این برف از اواخر زمستان تا اواخر بهار ذوب می‌شود و بیش از ۷۰ درصد آب سالانه حوضه را تأمین می‌کند (عسگری و همکاران، ۱۴۰۱: ۳۸۷).



شکل ۱- موقعیت حوضه دز در حوضه خلیج فارس و دریای عمان

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳

### ۲.۳. داده‌های اقلیمی

داده‌های اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش شامل داده‌های دما و بارش روزانه از تعداد نه ایستگاه در بازه زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۵ است که از شرکت مدیریت منابع آب ایران و سازمان هواشناسی ایران گردآوری شده است. شایان ذکر است که یکی از اهداف این مطالعه مقایسه خروجی مدل‌های اقلیم منطقه‌ای (RCM) از پایگاه CORDEX-WAS با مدل‌های گردش کلی (GCM) از پایگاه 2W2E بوده است. با توجه به محدودیت دوره تاریخی داده‌های GCM و RCM در هر دو پایگاه تا سال ۲۰۰۵، امکان به‌روزرسانی بازه زمانی داده‌ها وجود نداشت (جدول ۱).

توجه به عدم قطعیت‌ها در پایگاه داده‌های اقلیمی و مدل‌های گردش کلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ چراکه نادیده گرفتن این عدم قطعیت‌ها می‌تواند منجر به نتایج غیرکاربردی شود

(ویلی و هریس<sup>۱</sup>، ۲۰۰۶؛ عباسیان و همکاران، ۲۰۱۹؛ حمیدیان‌پور و شجاع، ۱۴۰۱: ۳۱۳). در این راستا، داده‌ها از دو پایگاه CORDEX-WAS و 2W2E با استفاده از پنج مدل اقلیمی NorESM1- و GFDL-ESM2M، MIROC-ESM-CHEM، IPSL-CM5A-LR، HadGEM2-ES (جدول ۱) استخراج شدند. از آنجا که مدل‌های جهانی پایگاه کوردکس در برآورد پارامترهای اقلیمی به‌خصوص بارش با عدم قطعیت‌های قابل توجه همراه هستند (سالاری‌فنودی و همکاران، ۱۳۹۹) لذا تصحیح خطای شبیه‌سازی بارش و دما در دوره تاریخی و آینده برای ایستگاه‌های منتخب در پایگاه CORDEX-WAS با روش مقیاس‌گذاری خطی<sup>۲</sup> انجام شد (شرستا<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۱: ۹) و برای پایگاه 2W2E، این تصحیح با استفاده از برنامه CCT صورت گرفت (عباس‌پور و همکاران، ۲۰۱۹: ۵).

مدل‌سازی پارامترهای اقلیمی آینده تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای سه دوره ۲۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹) در قرن ۲۱ اجرا شد و در نهایت، ارزیابی عدم قطعیت شبیه‌سازی شاخص‌های سیلاب با استفاده از الگوریتم SUFI-2 انجام گرفت. در اینجا لازم به توضیح است که اگرچه امکان استفاده از داده‌های گزارش ششم وجود دارد، اما این داده‌ها در حال حاضر تنها شامل GCMها می‌شود و بارگیری داده‌های منطقه‌ای (RCM) شامل محدودیت‌های جدی است و با توجه به اینکه از اهداف مرحله‌ای پژوهش حاضر، مقایسه این دو پایگاه از داده‌ها بوده است لذا بهتر تشخیص داده شد از خروجی‌های گزارش پنجم تحت سناریوهای RCP که کماکان مورد توجه، اعتماد و استفاده پژوهشگران متعدد؛ آیونو و همکاران (۲۰۲۴)، اوشی و همکاران (۲۰۲۴)، جایپادما و همکاران (۲۰۲۴)، قرار دارد استفاده شود.

1. Wilby & Harris
2. Linear Scaling
3. Shrestha

## جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌ها، مدل‌ها و مؤسسات آماده‌سازی آن

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳

| ردیف                                             | ایستگاه  | ارتفاع (متر)    | عرض جغرافیایی | طول جغرافیایی | نوع ایستگاه |
|--------------------------------------------------|----------|-----------------|---------------|---------------|-------------|
| ۱                                                | دزفول    | ۱۴۳             | ۳۲/۴          | ۴۸/۳۸         | سینوپتیک    |
| ۲                                                | کشور     | ۷۷۰             | ۳۳/۱۴         | ۴۸/۶۳         | بارانسنجی   |
| ۳                                                | خرم آباد | ۱۱۴۸            | ۳۳/۴۴         | ۴۸/۲۸         | سینوپتیک    |
| ۴                                                | بروجرد   | ۱۴۹۰            | ۳۳/۷۸         | ۴۸/۸          | بارانسنجی   |
| ۵                                                | بروجرد   | ۱۶۱۹            | ۳۳/۳۵         | ۴۸/۴۵         | سینوپتیک    |
| ۶                                                | اراک     | ۱۷۰۸            | ۳۴/۰۷         | ۴۹/۷۸         | سینوپتیک    |
| ۷                                                | الیگودرز | ۲۰۲۲            | ۳۳/۲۴         | ۴۹/۴۲         | سینوپتیک    |
| ۸                                                | کوه‌رنگ  | ۲۳۶۵            | ۳۲/۴۵         | ۵۰/۱۳         | سینوپتیک    |
| ۹                                                | زردفهره  | ۲۴۴۱            | ۳۳/۰۱         | ۴۹/۸۱         | بارانسنجی   |
| مؤسسات تحقیقاتی تدوین کننده مدل‌ها               |          | مدل             |               |               |             |
| NOAA, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA |          | GFDL-GFDL-ESM2M |               |               |             |
| MIROC, Center for Climate System Research, Japan |          | MIROC-MIROC5    |               |               |             |
| Institutes Pierre-Simon Laplace                  |          | IPSL-CM5A-LR    |               |               |             |
| MOHC, Met Office Hadley Center, UK               |          | HadGEM2-ES      |               |               |             |
| NCC, Norwegian Climate Center, Norway            |          | NorESM1-M       |               |               |             |

## ۳.۳. واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT)، نمونه‌ای از مدل‌های فیزیکی است که با حل معادلات اساسی فیزیک به شبیه‌سازی فرایندهای سیستم آبخیز می‌پردازد (آرنولد<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۴۹۴). این مدل به لحاظ مقیاس فضایی نیمه‌توزیعی و از نظر زمانی، مدلی پیوسته است که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات متحده آمریکا بسط و توسعه داده شده است. در این مدل تعریف واحدهای همگن هیدرولوژیکی<sup>۲</sup> (HRU) جهت اجرای مدل و شبیه‌سازی متغیرهای مورد نظر

1. Arnold

2. Hydrologic Response Units

(متغیرهای هیدرولوژیکی، عملکرد و غیره) بسیار اهمیت دارد. این واحدها با ترکیب لایه‌های DEM، کاربری اراضی و نوع خاک به وجود می‌آیند؛ به‌طوری که در هر یک از این واحدها نوع خاک و کاربری اراضی یکسان می‌باشند و مدل فرض می‌کند که رفتار هیدرولوژیکی آنها یکسان خواهد بود. مدل، هیدرولوژی هر HRU را با استفاده از رابطه بیلان آبی که شامل بارش روزانه، رواناب، تبخیر و تعرق، نفوذ و جریان برگشتی بوده پیش‌بینی می‌کند (رابطه ۱). سپس مقادیر شبیه‌سازی شده در هر HRU جمع می‌شود تا مقادیر هر زیرحوضه برآورد شود. پس از آن، مقادیر اجزای هیدرولوژیکی درون شبکه جریان و تا خروجی حوضه روندیابی می‌شوند. رواناب سطحی در این مدل با دو روش شماره منحنی سرویس حفاظت منابع طبیعی آمریکا<sup>۱</sup> و روش گرین و امپت<sup>۲</sup> محاسبه می‌شود. همچنین برای محاسبه میزان تبخیر و تعرق سه روش پریستلی تیلور<sup>۳</sup> و پنمن-مانتیث<sup>۴</sup> و هارگریوز-سامانی<sup>۵</sup> در مدل ارائه شده است. روندیابی جریان در رودخانه نیز با استفاده از روش ضریب ذخیره متغیر<sup>۶</sup> و روش ماسکینگام انجام می‌شود.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$SW_t$  = مقدار آب موجود در خاک در زمان حاضر (میلی‌متر)،  $SW_0$  = مقدار اولیه آب موجود در خاک (میلی‌متر)،  $R_{day}$  = مقدار بارندگی روز  $i$  ام (میلی‌متر)،  $Q_{surf}$  = رواناب سطحی روز  $i$  ام (میلی‌متر)،  $E_a$  = تبخیر و تعرق روز  $i$  ام (میلی‌متر)،  $W_{seep}$  = مقدار آب وارد شده از پروفیل خاک به ناحیه غیر اشباع روز  $i$  ام (میلی‌متر)،  $Q_{gw}$  = مقدار جریان برگشتی روز  $i$  ام (میلی‌متر) و  $i$  = روز مشخص است. در این پژوهش مدل SWAT، با در نظر گرفتن لایه توپوگرافی، شبکه جریان و

1. SCS Curve Number Method
2. Green and Ampt Method
3. Priestley-Taylor
4. Penman-Monteith
5. Hargreaves-Samani
6. Variable Storage Coefficient

مساحت آستانه زهکشی ۹۰۰۰ هکتاری، کل حوضه را به تعداد ۹۹ زیرحوضه تقسیم و در نهایت تعداد ۳۰۰ واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRU) تولید شد. در برآورد ارتفاع جریان، تبخیر و تعرق و روندیابی کانال به ترتیب روش‌های شماره منحنی، هارگریوز-سامانی و ماسکینگام مورد استفاده قرار گرفت. در جدول زیر داده‌ها و نقشه‌های ورودی به مدل و منبع آن‌ها آورده شده است.

### ۴.۳. ارزیابی تغییرات نمایه‌های سیلاب

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، تغییر در الگوهای بارش و افزایش دما به‌طور قابل توجهی منجر به افزایش تعداد، شدت و بزرگی سیلاب‌ها در سراسر جهان شده که خسارات جانی و مالی فراوانی را به جای گذاشته است. این تغییرات در غرب و جنوب غرب ایران، به‌ویژه در حوضه‌های آبریز، منجر به تغییر در الگوی بارش‌های فصلی شده است که وقوع بارش‌های سنگین و ناگهانی و به تبع آن سیلاب‌های شدید را در این مناطق تشدید کرده است (حجازی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱: ۶). در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی خطر سیل در این مناطق، از سه شاخص کلیدی شامل احتمال بازگشت، مدت و بزرگی سیلاب، استفاده شده است. این شاخص‌ها براساس جریان روزانه شبیه‌سازی شده در ایستگاه تله‌زنگ، به کمک مدل SWAT محاسبه شدند (معادلات مرتبط و توضیحات دقیق در جدول ۲ ارائه شده است).

همانند مطالعات پیشین، در این پژوهش نیز آستانه سیل دو ساله به‌عنوان مبنای شناسایی حوادث سیل در نظر گرفته شد. شاخص احتمال بازگشت سیلاب عبارت است از تعداد روزهایی که جریان شبیه‌سازی شده بزرگتر یا مساوی با سیل ۲ ساله در یک سال آبی (اکتبر - سپتامبر) است که میانگین آن در دوره شبیه‌سازی، به‌صورت درصد بیان می‌شود. شاخص مدت زمان سیل عبارت است از تعداد روزهای متوالی جاری شدن سیل در یک رویداد است که به‌طور متوسط مدت سیلاب را در یک سال آبی محاسبه و سپس میانگین آن را برای همه سال استخراج می‌کند. شاخص بزرگی سیل بیانگر میزان نسبی وقوع سیل در مقایسه با سیل ۲ ساله است. ابتدا تخلیه روزانه برای هر سیلاب محاسبه، سپس میانگین آن در طول سال به‌دست آمده و میانگین تمامی سال‌ها استخراج می‌گردد. در نهایت،

شاخص فرکانس سیل نیز به میانگین تعداد سیلاب‌های رخ داده در یک سال آبی طی دوره شبیه‌سازی اشاره دارد (ژئو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹: ۸).

جدول ۲. معادلات مربوط به شاخص سیلاب

منبع: ژئو و همکاران، (۲۰۱۹)

| شاخص               | معادله                                                      | توضیحات                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| شاخص احتمال بازگشت | $FEPI = Di / Dy$ $FEPI = \frac{\sum_{i=1}^N FEPI}{N} * 100$ | <p>FEPI: احتمال بازگشت سیل از سال آبی</p> <p>Di: تعداد روزهایی که سیل رخ می‌دهد (تخلیه بزرگتر یا مساوی با سیل ۲ ساله) در سال i</p> <p>Dy: تعداد کل روز در یک سال آبی</p> <p>N: تعداد کل سال‌ها در دوره شبیه‌سازی</p> <p>FEPI: متوسط احتمال بازگشت برای هر زیرحوضه</p> |
| شاخص مدت سیلاب     | $FDi = Di / FFi$ $FDI = \frac{\sum_{i=1}^N FDI}{N}$         | <p>FDi: مدت سیل در هر سال آبی</p> <p>Di: تعداد روزهایی که سیل رخ می‌دهد (تخلیه بزرگتر یا مساوی با سیل ۲ ساله) در سال i</p> <p>FFi: تعداد رویداد سیل در سال آبی i</p> <p>N: تعداد کل سال‌ها در دوره شبیه‌سازی</p> <p>FDI: متوسط مدت سیل برای هر زیرحوضه</p>            |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                        |                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| <p>FMJ: متوسط تخلیه روزانه از رویداد سیل j</p> <p>Qm: تخلیه روزانه از روز m</p> <p>n: تعداد کل روز در یک رویداد سیل</p> <p>FMi: متوسط تخلیه سیل در سال آبی i</p> <p>k: تعداد کل حوادث آبی در یک سال آبی</p> <p>FM: بزرگی سیل برای یک زیرحوضه</p> <p>N: تعداد کل سال‌ها در دوره شبیه‌سازی</p> <p>Q2: سیل دو ساله</p> <p>FMI: بزرگی سیل تنظیم شده برای Q2</p> | $FMj = \frac{\sum_{m=1}^n Qm}{n}$ $FMi = \frac{\sum_{j=1}^k FMj}{k}$ $FM = \frac{\sum_{i=1}^N FMi}{N}$ $FMI = FM / Q2$ | <p>شاخص بزرگی سیلاب</p> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|

## ۳.۵. تصحیح خطا

تصحیح خطا یک تکنیک متداول پس‌پردازش برای حذف خطاهای سیستماتیک و بهبود کیفیت خروجی‌های GCM و RCM است. روش‌های متعددی برای تصحیح بایاس وجود دارد که هر کدام نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارند. اثربخشی این روش‌ها بسته به عواملی مانند انتخاب مدل‌های اقلیمی، منطقه، فصل و نوع متغیر آب و هوا متفاوت است (ایبوجی و همکاران، ۲۰۲۲: ۳). در این پژوهش جهت کاهش خطا در پیش‌نمایی‌ها از دو روش مقیاس‌گذاری خطی (برای مدل‌های اقلیم منطقه‌ای) و روش CCT (برای مدل‌های گردش عمومی جو) به‌منظور تصحیح خطای داده‌های شبیه‌سازی شده دما و بارش در دوره تاریخی و سپس دوره آینده استفاده شد. در زیر به شرح هریک پرداخته می‌شود:

## ۳.۵.۱. روش مقیاس‌گذاری خطی

یکی از پرکاربردترین روش‌های ریزمقیاس‌نمایی است که اغلب به‌منظور کاهش خطا بین خروجی‌های مدل‌های اقلیمی و داده‌های مشاهداتی استفاده می‌شود (شرستا و همکاران، ۲۰۲۱: ۹؛ حمیدیان‌پور و شجاع، ۱۴۰۱: ۳۰۴). در این روش پس از استخراج دما و بارش ماهانه برای دوره مشاهده و مدل، با محاسبه تفاوت ماهانه درازمدت دما و بارش، سناریوی اقلیمی مطابق روابط زیر برآورد و به داده‌های روزانه تاریخی حوضه برای دما و بارش اضافه می‌شود:

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

$$P_{his}(d) = P_{his}(d) * [\mu_m(P_{obs}(d) / \mu_m P_{his}(d))]$$

سری زمانی دما و بارش دوره آتی نیاز به این صورت محاسبه می‌شود:

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

$$P_{sim}(d) = P_{sim}(d) * [\mu_m(P_{obs}(d) / \mu_m P_{his}(d))]$$

در روابط فوق، که در آن،  $P$  = بارش،  $T$  = دما،  $d$  = روزانه،  $\mu_m$  = متوسط بلند مدت ماهانه،  $obs$

= داده‌های مشاهده شده / اندازه‌گیری شده،  $sim$  = داده‌های شبیه‌سازی شده است.

## ۳.۵.۲. روش تصحیح خطا (CCT) و نحوه محاسبات آن در نرم‌افزار

روش تصحیح خطا (1CCT) برای بهبود دقت مدل‌ها در نرم‌افزارهای اقلیمی و هیدرولوژیکی به کار می‌رود. محاسبات در این روش براساس اختلافات بین داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌نمایی شده انجام می‌شود. این اختلافات معمولاً به‌صورت میانگین یا میانگین مربع اختلافات (MSE) است:

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

که با استفاده از انحرافات محاسبه‌شده، یک تابع تصحیح توسعه داده می‌شود. این تابع معمولاً به‌صورت خطی یا غیرخطی مدل‌سازی بوده و می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$C = P.b + a$$

که در آن  $O_i$ : مقدار مشاهده شده،  $P_i$  مقدار پیش‌نمایی شده،  $n$  تعداد نقاط،  $C$  مقدار تصحیح شده،  $P$  مقدار پیش‌نمایی و  $a$  و  $b$  پارامترهای تعیین‌شده از طریق رگرسیون بر روی داده‌های تاریخی هستند (وافتی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۸۵).

#### ۴. یافته‌های پژوهش

##### ۴.۱. واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

در این مطالعه، تحلیل حساسیت با استفاده از روش سراسری برای شناسایی پارامترهای بحرانی که بیشترین تأثیر را بر خروجی جریان حوضه دارند، انجام شد. برای این منظور، از میان ۲۵ پارامتر ورودی اولیه، ۹ پارامتر با توجه به دو شاخص P-Value و T-Stat انتخاب گردیدند. از میان این پارامترها، شماره منحنی (CN2)، آب موجود در لایه اولیه خاک (SOL-AWC(1)) و هدایت هیدرولیکی خاک (SOL-K(1)) به ترتیب بیشترین تأثیر را در شبیه‌سازی جریان حوضه داشتند. پارامترهای انتخابی در این مرحله برای واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. سپس، این پارامترها با استفاده از الگوریتم SUFI2 در ۵۰۰ تکرار بهینه‌سازی شدند و در نهایت مقدار بهینه برای هر پارامتر مشخص گردید. نتایج نشان داد که از میان این پارامترها، CN2 حساس‌ترین پارامتر در تأثیرگذاری بر مقدار جریان رودخانه است.

جدول ۳ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت را نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۲ خروجی حاصل از اجرای مدل برای شبیه‌سازی جریان روزانه را در ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ طی دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مقادیر شاخص‌های آماری  $R^2$  و NS در ایستگاه مورد مطالعه به ترتیب ۰/۶۲ و ۰/۶۳ است که بیانگر دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رواناب منطقه است. کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان، با مطالعات مشابه در سطح جهانی مانند

پژوهش‌های ورکا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۱) در زیرحوضه جما در نیل و برمان<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۳) در حوضه پریار در هند، تأیید می‌شود. این مطالعات نشان می‌دهند که علیرغم چالش‌های موجود در داده‌های ورودی، دقت شبیه‌سازی در این پژوهش رضایت‌بخش و هم‌سو با نتایج سایر محققان بوده است.

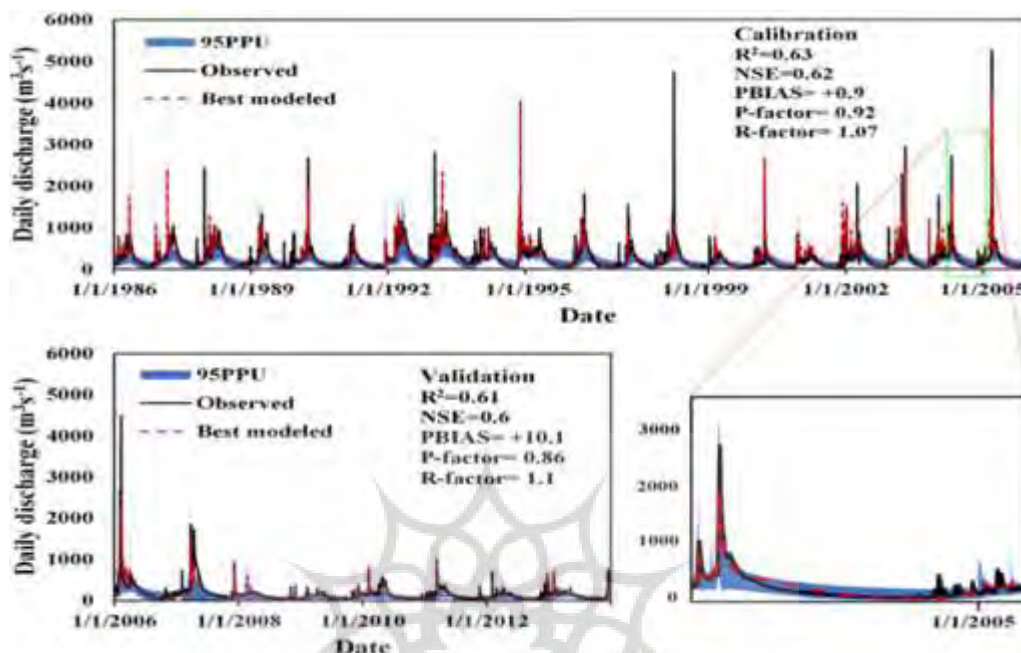
جدول ۳. مقادیر بهینه به‌دست آمده برای پارامترهای مؤثر در مرحله واسنجی

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳

| پارامتر     | توضیحات                                     | فایل | بازه نهایی |
|-------------|---------------------------------------------|------|------------|
| r_CN2       | شماره منحنی نفوذ (SCS) برای شرایط اولیه     | mgt  | ۰ - ۰/۳    |
| R_SOL_AWC   | ظرفیت ذخیره آب موجود در خاک                 | sol  | - - ۰/۱    |
| v_RCHRG_DP  | درصد تغذیه سفره عمیق از سفره کم‌عمق یا غیر  | .gw  | - ۰/۱۵     |
| v_ESCO      | ضریب تصحیح جذب گیاهی                        | .hru | ۰/۷ - ۱    |
| V_EPCO      | فاکتور جبران‌کننده تبخیر از خاک             | .hru | ۰/۷ - ۱    |
| v_CH_N2     | ضریب مانینگ رودخانه اصلی                    | .rte | - ۰/۱۷     |
| v_CH_K2     | قابلیت هدایت هیدرولیکی مؤثر (میلی‌متر بر    | .rte | ۸۰ - ۱۲۰   |
| v_SLSUBBSN  | متوسط شیب زمین                              | .gw  | ۶۰ - ۱۰۰   |
| v_ALPHA_BNK | ضریب آلفا جریان پایه برای ذخیره کناری (روز) | .rte | ۰ - ۰/۵    |

1. Worku

2. Barman



شکل ۲- مقایسه سری زمانی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳

#### ۲.۴. عدم قطعیت پایگاه داده‌های اقلیمی

در این مطالعه، عملکرد مدل‌های اقلیمی از دو پایگاه داده CORDEX-WAS و 2W2E با استفاده از شاخص‌های آماری  $R$ ،  $R^2$  و RMSE ارزیابی شد تا دقت و کارایی این مدل‌ها در شبیه‌سازی دما و بارش در منطقه مورد مطالعه بررسی شود. نتایج تحلیل‌ها (جدول ۴) نشان داد که اکثر مدل‌ها توانسته‌اند دمای منطقه را با دقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی کنند، به‌گونه‌ای که شاخص‌های آماری به‌دست‌آمده برای این پارامتر در سطح اطمینان ۰/۹۵ و ۰/۹۹ معنادار بودند. در این میان، مدل‌های HadGEM2-ES و MIROC5 MIROC- نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری داشتند.

ارزیابی مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش نشان داد که اگرچه دقت آن‌ها نسبت به دما پایین‌تر بوده و در مواردی متعدد شاخص‌های آماری به سطح معناداری نرسیده است، با این وجود مدل‌های HadGEM2-ES و MIROC-MIROC5 در بازتولید بارش عملکرد قابل‌پذیرش داشته‌اند. مقایسه دو روش تصحیح خطا نشان داد تفاوت قابل توجهی در خروجی مدل‌های RCM و GCM وجود ندارد و دو پایگاه داده مورد بررسی، دقت نسبتاً مشابهی در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی ارائه می‌دهند. در پژوهش حاضر، مدل‌های HadGEM2-ES و MIROC-MIROC5 به‌عنوان مدل‌های بهینه برای پیش‌نمایی تغییرات دما و بارش حوضه مورد مطالعه معرفی شدند.

#### جدول ۴- مدل‌های موجود در دو پایگاه CORDEX - WAS و 2W2E

منبع: نگارندگان، (۱۴۰۳)

| 2W2E |        |      | CORDEX - WAS |        |      | پارامتر    | مدل          |
|------|--------|------|--------------|--------|------|------------|--------------|
| RMSE | R      | R2   | RMSE         | R      | R2   |            |              |
| ۹/۸۲ | ۰/۳۰   | ۰/۱۴ | ۱۱/۱         | ۰/۴۴   | ۰/۲۲ | بارش       | GFDL-CM3     |
| ۳/۱۸ | ۰/۹۶** | ۰/۹۳ | ۳/۱۱         | ۰/۹۷** | ۰/۹۴ | حداکثر دما |              |
| ۲/۹  | ۰/۹۵** | ۰/۹۱ | ۳/۴۶         | ۰/۹۵** | ۰/۸۹ | حداقل دما  |              |
| ۵/۹  | ۰/۵۶   | ۰/۳۴ | ۵/۵          | ۰/۶۳*  | ۰/۴۰ | بارش       | HadGEM2-ES   |
| ۲/۷  | ۰/۹۷** | ۰/۹۵ | ۲/۸          | ۰/۹۷** | ۰/۹۵ | حداکثر دما |              |
| ۲/۶  | ۰/۹۶** | ۰/۹۳ | ۲/۱          | ۰/۹۸** | ۰/۹۲ | حداقل دما  |              |
| ۱۰/۱ | ۰/۳۲   | ۰/۱۲ | ۱۲/۳۵        | ۰/۴۷   | ۰/۲۲ | بارش       | IPSL-CM5A-LR |
| ۵    | ۰/۹۲*  | ۰/۸۴ | ۴/۴          | ۰/۹۴** | ۰/۸۸ | حداکثر دما |              |
| ۴/۹  | ۰/۸۹*  | ۰/۷۹ | ۳/۲          | ۰/۹۵** | ۰/۹۱ | حداقل دما  |              |
| ۹/۹۵ | ۰/۲۳   | ۰/۱۱ | ۱۱/۵         | ۰/۵۹*  | ۰/۳۵ | بارش       | NorESM1-M    |
| ۳/۱  | ۰/۹۷** | ۰/۹۳ | ۳/۱          | ۰/۹۷** | ۰/۹۴ | حداکثر دما |              |
| ۳/۱  | ۰/۹۴*  | ۰/۸۹ | ۳/۴          | ۰/۹۵** | ۰/۸۹ | حداقل دما  |              |
| ۴/۳  | ۰/۵۴   | ۰/۳۰ | ۴/۸          | ۰/۶۱*  | ۰/۳۸ | بارش       | MIROC-MIROC5 |
| ۲/۹  | ۰/۹۷** | ۰/۹۴ | ۲/۹۴         | ۰/۹۸** | ۰/۹۵ | حداکثر دما |              |
| ۲/۷  | ۰/۹۵** | ۰/۹۱ | ۲/۱          | ۰/۹۶*  | ۰/۹۲ | حداقل دما  |              |

\* معناداری در سطح ۰/۹۵ \*\* معناداری در سطح ۰/۹۹

### ۳.۴. پیش‌نمایی پارامترهای اقلیمی در حوضه آبخیز دز با استفاده از مدل‌های GCM و RCM

پس از ارزیابی دقت مدل‌های اقلیمی برای دوره پایه و انتخاب مدل‌های مناسب (مدل‌های HadGEM2-ES و MIROC-MIROC5) پیش‌نمایی پارامترهای دما و بارش برای سه دوره آتی ۲۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۳۹، ۲۰۵۰-۲۰۶۹ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹) در قرن ۲۱ و تحت سه سناریوی منتخب برای ایستگاه‌های حوضه آبخیز دز صورت گرفت. نتایج تغییرات بارش و دما در این حوضه نسبت به دوره پایه در جدول ۵ ارائه شده است.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که بارش در این حوضه، تحت هر دو مدل، کاهش یافته است. مطابق جدول ۵، میانگین بارش سالانه در پایگاه داده CORDEX - WAS بین ۶/۶٪ تا ۲۴/۸٪ کاهش داشته است. این مقدار در پایگاه داده 2W2E برای مدل HadGEM2-ES بین ۱۴/۸٪ تا ۳۳٪ و برای مدل MIROC-MIROC5 بین ۲۷٪ تا ۴۵٪ کاهش یافته است. این نتایج با یافته‌های عسگری و همکاران (۱۴۰۱) که به تأثیر تغییرات اقلیمی بر کاهش بارش در دوره‌های آتی در این محدوده نسبت به دوره پایه اشاره کرده‌اند، مطابقت دارند.

در مواردی محدود، بارش افزایش یافته است. برای مثال، در دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹ و تحت سناریوی RCP2.6، بارش در مدل HadGEM2-ES به میزان ۶/۸٪ و در سناریوی RCP8.5 به میزان ۳/۳٪ در پایگاه داده CORDEX - WAS افزایش داشته است. همچنین، در پایگاه داده 2W2E، بارش تحت سناریوی RCP8.5 به میزان ۷/۸٪ افزایش یافته است.

در زمینه دما، افزایش دمای حداکثر نسبت به دوره پایه در پایگاه داده CORDEX - WAS برای مدل‌های HadGEM2-ES و MIROC-MIROC5 به ترتیب بین ۵/۸ تا ۶/۷ درجه سانتی‌گراد و ۱/۱ تا ۳ درجه سانتی‌گراد بوده است. برای دمای حداقل، افزایش دما بین ۰/۸ تا ۶/۴ درجه سانتی‌گراد و ۱/۲ تا ۴/۴ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. بیشترین افزایش دما در هر دو پارامتر برای سناریوی RCP8.5 پیش‌نمایی شده است.

در پایگاه داده 2W2E، افزایش دمای حداکثر بین ۲/۹ تا ۸ درجه سانتی گراد و دمای حداقل بین ۱/۱ تا ۵/۸ درجه سانتی گراد بوده است. مشابه پایگاه داده CORDEX - WAS، بیشترین افزایش دما در سناریوی RCP8.5 رخ داده است. این تفاوت در پیش‌نمایی افزایش دما در سناریوهای مختلف به دلیل تفاوت در روند انتشار گازهای گلخانه‌ای در هر سناریو است، به طوری که سناریوی RCP8.5 تا پایان قرن ۲۱ افزایش مداوم انتشار گازهای گلخانه‌ای را نشان می‌دهد. این نتایج با مطالعات سیدکابلی (۱۳۹۵) برای حوضه دز همسو است. در نهایت، نتایج نشان می‌دهند که پایگاه داده 2W2E کاهش بارش و افزایش دمای بیشتری را نسبت به پایگاه داده CORDEX - WAS برای هر دو مدل HadGEM2-ES و MIROC-MIROC5 پیش‌نمایی می‌کند. همچنین، مدل MIROC-MIROC5 تغییرات بارش بیشتری و تغییرات دمای کمتری را نسبت به مدل HadGEM2-ES برآورد کرده است.

جدول ۵. میانگین درازمدت پارامترهای اقلیمی نسبت به دوره پایه تحت سناریو RCP4.5، RCP2.6 و

RCP8.5

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳

| CORDEX - WAS-HadGEM2-ES |         |         |         |         |         |         |         |         | پایه  | پارامتر                           |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-----------------------------------|
| RCP8.5                  |         |         | RCP4.5  |         |         | RCP2.6  |         |         |       |                                   |
| (2090s)                 | (2060s) | (2030s) | (2090s) | (2060s) | (2030s) | (2090s) | (2060s) | (2030s) |       |                                   |
| ۷۹۰                     | ۶۳۵     | ۷۰۰     | ۵۹۸     | ۶۵۲     | ۶۸۵     | ۸۱۷     | ۶۱۶     | ۷۱۴     | ۷۶۵/۳ | بارش                              |
| ۲۹/۲                    | ۲۴/۴    | ۲۴/۵    | ۲۶/۷    | ۲۵/۶    | ۲۵/۱    | ۲۴/۶    | ۲۴/۶    | ۲۴/۳    | ۲۲/۳  | بیشینه                            |
| ۱۴/۱                    | ۱۱/۲    | ۹/۸     | ۱۰/۷    | ۱۱/۷    | ۱۰/۲    | ۹/۶     | ۹/۸     | ۸/۵     | ۷/۷   | کمینه                             |
|                         |         |         |         |         |         |         |         |         |       | CORDEX - WAS<br>-<br>MIROC-MIROC5 |
| (2090s)                 | (2060s) | (2030s) | (2090s) | (2060s) | (2030s) | (2090s) | (2060s) | (2030s) | پایه  | پارامتر                           |
| ۵۷۵                     | ۶۴۴     | ۷۳۴     | ۶۴۹     | ۶۴۵     | ۶۸۴     | ۶۳۸     | ۶۹۲     | ۷۱۵     | ۷۶۵/۳ | بارش                              |
| ۲۸/۳                    | ۲۶      | ۲۵/۵    | ۲۵/۵    | ۲۴/۹    | ۲۳/۷    | ۲۳/۹    | ۲۴      | ۲۳/۶    | ۲۲/۳  | بیشینه                            |
| ۱۲/۱                    | ۱۱/۱    | ۱۰/۵    | ۱۰/۵    | ۱۰/۱    | ۹       | ۹/۱     | ۹/۵     | ۸/۹     | ۷/۷   | کمینه                             |

|         |       |             |             |             |             |             |             |             | 2W2E<br>-<br>HadGEM<br>2-ES   |
|---------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------|
| پارامتر | پایه  | (2030<br>s) | (2060<br>s) | (2090<br>s) | (2030<br>s) | (2060<br>s) | (2090<br>s) | (2030<br>s) | (2060<br>s)                   |
| بارش    | ۷۶۵/۳ | ۶۰۳         | ۵۱۲         | ۶۵۲         | ۵۵۷         | ۶۱۳         | ۵۵۸         | ۵۷۴         | ۵۴۳                           |
| پیشینه  | ۲۲/۳  | ۲۵/۴        | ۲۶/۳        | ۲۵/۸        | ۲۵/۵        | ۲۶/۵        | ۲۸/۹        | ۲۵/۷        | ۲۸/۲                          |
| کمینه   | ۷/۷   | ۹/۴         | ۹/۶         | ۹/۳         | ۸/۸         | ۹/۸         | ۱۱/۷        | ۹/۴         | ۱۱/۴                          |
|         |       |             |             |             |             |             |             |             | 2W2E<br>-<br>MIROC-<br>MIROC5 |
| پارامتر | پایه  | (2030<br>s) | (2060<br>s) | (2090<br>s) | (2030<br>s) | (2060<br>s) | (2090<br>s) | (2030<br>s) | (2060<br>s)                   |
| بارش    | ۷۶۵/۳ | ۵۲۲         | ۵۲۸/۵       | ۴۶۲         | ۵۵۷/۲       | ۴۵۷         | ۴۳۱         | ۴۶۷         | ۴۹۳                           |
| پیشینه  | ۲۲/۳  | ۲۵/۲        | ۲۵/۶        | ۲۵/۸        | ۲۵          | ۲۶/۲        | ۲۶/۸        | ۲۵/۳        | ۲۷/۶                          |
| کمینه   | ۷/۷   | ۹/۲         | ۹/۶         | ۹/۷         | ۹           | ۱۰/۱        | ۱۰/۶        | ۹/۳         | ۱۱/۷                          |

#### ۴.۴. اثر تغییر اقلیم بر نمایه‌های سیلاب

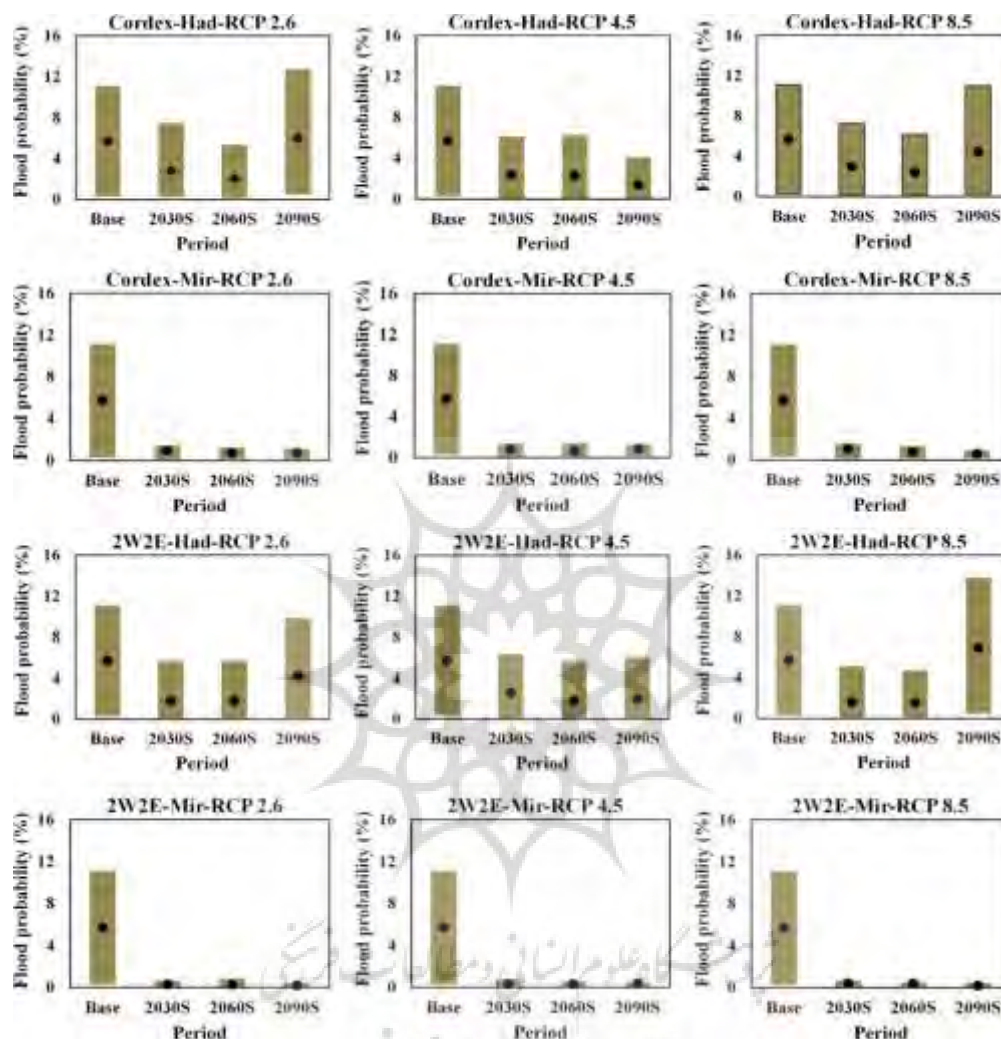
##### ۴.۴.۱. اثر تغییر اقلیم بر احتمال بازگشت سیلاب

تغییرات اقلیمی نقش مهمی در تغییر شاخص‌های هیدرولوژیکی ایفا می‌کنند و یکی از مهم‌ترین شاخص‌های تحت تأثیر، نمایه احتمال بازگشت سیلاب است. این پژوهش نشان می‌دهد که تغییر اقلیم به‌طور معناداری بر احتمال بازگشت سیلاب در حوضه مورد مطالعه تأثیر گذاشته و آن را کاهش داده است. این کاهش به‌طور مستقیم با تغییرات بارش مطابقت دارد (شکل ۳). در تحلیل‌های انجام‌شده، مشاهده شد که در دو مورد از سه دوره‌ای که بارش روند افزایشی داشته است، شاخص احتمال بازگشت سیلاب نیز افزایش یافته است. این افزایش‌ها، که مربوط به آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۹۹) است، براساس نتایج میانه باند عدم قطعیت در پایگاه داده CORDEX-WAS و مدل HadGEM2-ES به میزان ۵/۳٪ تحت سناریوی RCP2.6 و در پایگاه داده 2W2E و مدل MIROC5 به میزان ۲۱/۱٪ تحت سناریوی RCP8.5 گزارش شده است.

به‌طور کلی، پیش‌نمایی‌ها نشان می‌دهد که شاخص احتمال بازگشت سیلاب در دوره‌های آتی به‌ویژه تحت سناریوهای با انتشار بالاتر گازهای گلخانه‌ای، روند کاهشی خواهد داشت. در پایگاه داده CORDEX-WAS، این کاهش برای مدل HadGEM2-ES بین ۲۲٪ تا ۷۵/۴٪ و برای مدل MIROC-MIROC5 بین ۸۱٪ تا ۸۹/۵٪ تخمین زده شده است. در پایگاه داده 2W2E، این کاهش به‌ویژه بارزتر بوده و برای مدل HadGEM2-ES در بازه ۲۵٪ تا ۷۲/۸٪ و برای مدل-MIROC5 بین ۹۳٪ تا ۹۶/۸٪ پیش‌نمایی شده است.

بررسی عدم قطعیت نتایج (شکل ۳) نشان می‌دهد که عدم قطعیت در پیش‌نمایی شاخص احتمال بازگشت سیلاب در مدل MIROC-MIROC5 به‌طور قابل‌توجهی کمتر از مدل HadGEM2-ES است. همچنین پایگاه داده 2W2E در مقایسه با CORDEX-WAS دارای عدم قطعیت کمتری در شبیه‌سازی این شاخص است. این موضوع می‌تواند ناشی از کیفیت داده‌های ورودی و ساختار مدل‌سازی مورد استفاده در هر یک از این پایگاه‌ها باشد. نتایج این پژوهش همسو با مطالعات پیشین از جمله پژوهش‌های قدمی و همکاران (۱۳۹۷) و اسکانی‌کزازی (۱۳۹۵) است که نشان‌دهنده تأثیرات مشابهی از تغییر اقلیم بر روی هیدرولوژی حوضه‌های دیگر می‌باشند. همچنین، یافته‌های این تحقیق در کنار مطالعات بین‌المللی نظیر تحقیق ویلکوفر<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۴) تأیید می‌کند که تغییر اقلیم می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی احتمال بازگشت سیلاب را کاهش داده و موجب ایجاد تغییرات در الگوهای هیدرولوژیکی شود.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
پرتال جامع علوم انسانی



شکل ۳- درصد تغییرات شاخص احتمال بازگشت سیلاب در شرایط اقلیم آینده

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳

#### ۲.۴.۴. اثر تغییر اقلیم بر مدت سیلاب

شکل ۴ اثرات تغییر اقلیم بر شاخص مدت سیلاب در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج مدل‌سازی نشان‌دهنده کاهش قابل توجه این شاخص در دهه‌های آتی است که به احتمال زیاد ناشی

از کاهش بارش‌های سنگین، افزایش دما و افزایش تبخیر و تعرق در منطقه است. این عوامل باعث کاهش جریان رواناب و در نتیجه کاهش مدت سیلاب‌ها می‌شوند. تنها افزایش قابل توجه در این شاخص مربوط به مدل MIROC-MIROC5 در پایگاه 2W2E است که تحت سناریوی RCP8.5 به میزان ۱/۸٪ افزایش نشان می‌دهد. مطالعات پیشین نظیر واقفی و همکاران (۲۰۱۷) و فورتاک<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۳)، نشان داده‌اند که تغییر اقلیم می‌تواند به تغییر در الگوهای بارش و شدت رخداد‌های سیلابی و در نتیجه کوتاه‌تر شدن دوره سیلاب‌ها منجر شود.

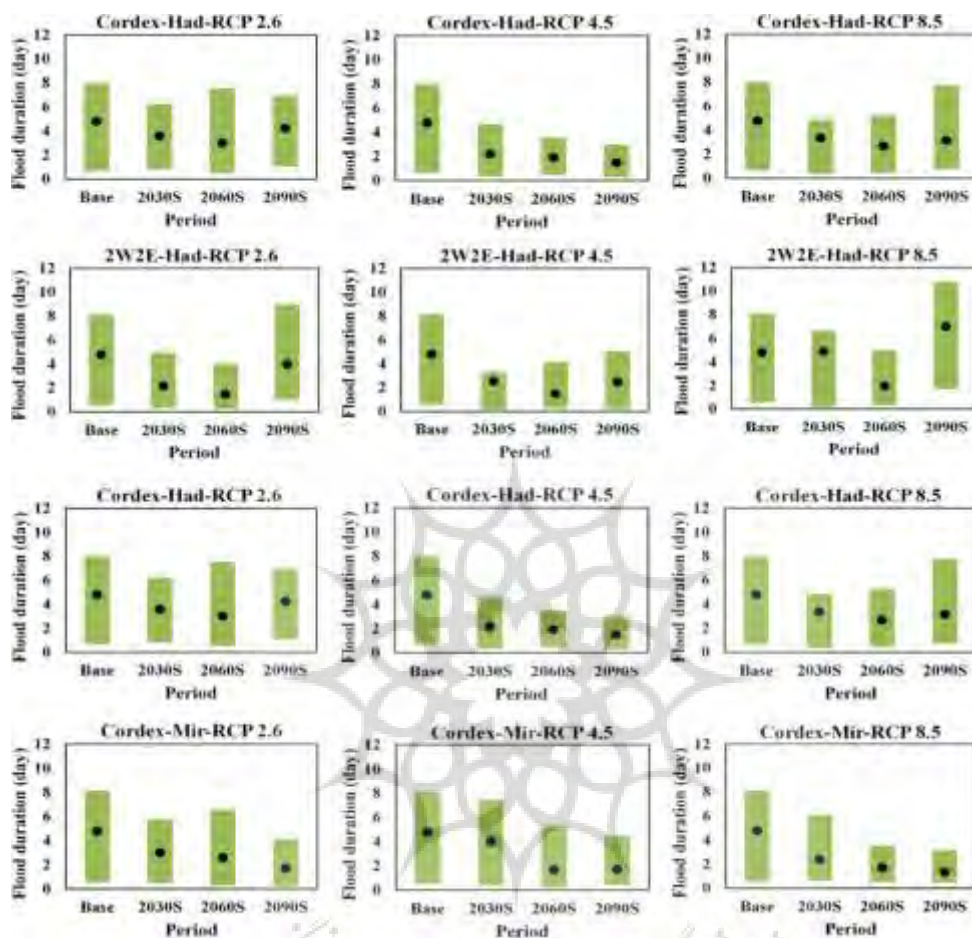
براساس نتایج میانه باند عدم قطعیت در پایگاه CORDEX-WAS، پیش‌نمایی مبتنی بر مدل HadGEM2-ES نشان می‌دهد که شاخص مدت سیلاب بین ۱۱/۷٪ تا ۶۰/۳٪ کاهش می‌یابد و در مدل MIROC-MIROC5 این کاهش بین ۷/۸٪ تا ۷۲٪ متغیر است. این مقادیر در پایگاه 2W2E قابل توجه‌تر بوده و به ترتیب بین ۱٪ تا ۶۹/۷٪ برای مدل HadGEM2-ES و ۶۱/۴٪ تا ۸۴/۶٪ برای مدل MIROC-MIROC5 کاهش دارد.

عدم قطعیت‌ها در پیش‌نمایی شاخص مدت سیلاب بین مدل‌ها و پایگاه‌ها متفاوت بوده و ناشی از تفاوت در روش‌های شبیه‌سازی، سناریوهای انتشار و داده‌های ورودی است. به‌طور کلی، مدل HadGEM2-ES عدم قطعیت کمتری نسبت به MIROC-MIROC5 نشان می‌دهد و پایگاه CORDEX-WAS نیز در مقایسه با 2W2E نتایج با دقت بالاتری ارائه می‌دهد. این نتایج با یافته‌های واسکو<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۱) مبنی بر اینکه تغییر اقلیم سبب ایجاد تغییر بر شاخص‌های سیلاب در بسیاری از نقاط جهان می‌شود، همسویی دارد.

---

1. Furtak

2. Wasko



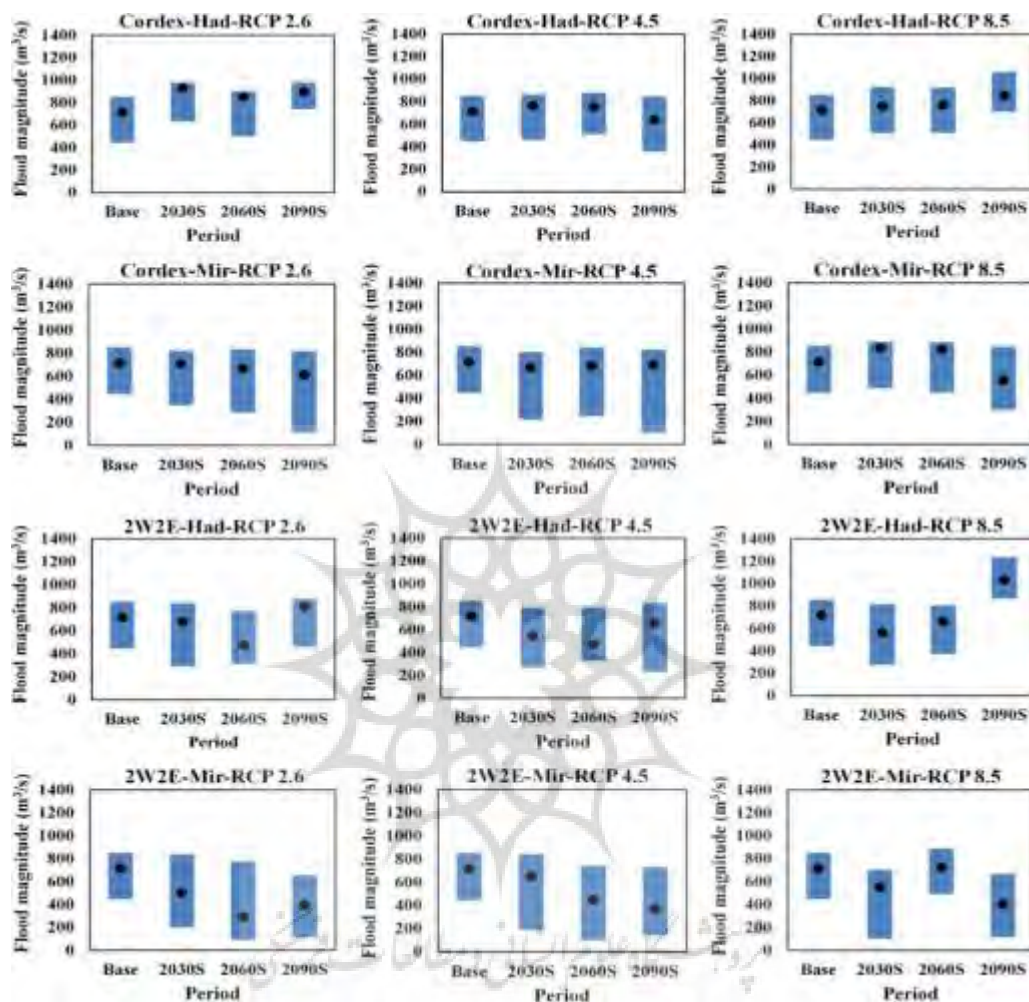
شکل ۴- درصد تغییرات شاخص مدت سیلاب در شرایط اقلیم آینده

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳

#### ۴.۳. اثر تغییر اقلیم بر بزرگی سیلاب

روند تغییر شاخص بزرگی سیلاب تحت اثر تغییر اقلیم اندکی با دو شاخص دیگر در بخش‌های قبلی متفاوت است. به عنوان مثال در برخی سناریوهای پایگاه CORDEX-WAS علیرغم کاهش بارش، روند افزایشی برای بزرگی سیلاب مشاهده می‌شود. این مسئله مؤید دیدگاه افزایش

رویدادهای حدی تحت اثر تغییر اقلیم می‌باشد (بارو<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۶؛ زرین و داداشی‌رودباری، ۱۴۰۰). بررسی بزرگی سیلاب در پایگاه داده CORDEX-WAS نشان می‌دهد که این شاخص در مدل HadGEM2-ES از ۱۰/۷ درصد کاهش تا ۳۰ درصد افزایش و تحت مدل MIROC-MIROC5 از ۲۲/۱ درصد کاهش تا ۱۶/۹ درصد افزایش را تجربه می‌کند. این بخش از یافته‌ها با نتایج پژوهش حجازی‌زاده و همکاران (۱۳۹۱) برای ایستگاه تله زنگ مطابقت دارد (شکل ۵). نتایج شاخص فوق در پایگاه 2W2E مانند سایر شاخص‌ها روند کاهشی را نشان می‌دهد. روند کاهشی این شاخص تحت پایگاه 2W2E احتمالاً به علت کاهش‌های بزرگتر در بارش و افزایش‌های بیشتر در دما نسبت به پایگاه CORDEX-WAS می‌باشد. این موضوع نیز بیانگر این است که در کل، اگرچه تغییر اقلیم می‌تواند باعث افزایش رویدادهای حدی مانند شاخص بزرگی سیلاب در این پژوهش شود، اما از سوی دیگر در مواردی که روند بارش سیر نزولی دارد و با افزایش دما، تبخیر و تعرق بالا می‌رود، وقوع سیلاب کاهش پیدا می‌کند (ژئو و همکاران، ۲۰۱۹: ۹). پیش‌نمایی شاخص بزرگی سیلاب براساس میانه باند عدم قطعیت در پایگاه داده 2W2E حکایت از کاهش ۷/۴ تا ۳۳/۷ درصد برای مدل HadGEM2-ES و ۸۹/۸ تا ۵۹/۴ درصد برای مدل MIROC-MIROC5 دارد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است عدم قطعیت در برآورد شاخص مذکور تحت مدل HadGEM2-ES کمتر از مدل MIROC-MIROC5 در هر دو پایگاه داده می‌باشد. همچنین این عدم قطعیت در شبیه‌سازی شاخص مورد مطالعه تحت پایگاه CORDEX-WAS کمتر از 2W2E بوده است.



شکل ۵. درصد تغییرات شاخص بزرگی سیلاب در شرایط اقلیم آینده

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳

##### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این مطالعه به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب‌های حوضه آبخیز دز، با تمرکز بر سه شاخص کلیدی سیلاب شامل احتمال بازگشت، مدت و بزرگی، پرداخته است. تحلیل‌های انجام‌شده

با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مرتبط با داده‌های اقلیمی از دو پایگاه داده CORDEX-WAS و 2W2E و استفاده از مدل‌های HadGEM2-ES و MIROC-MIROC5، نتایج حائز اهمیت را در خصوص تأثیرات تغییر اقلیم بر سیلاب‌ها در دهه‌های آتی ارائه کرده است. این مدل‌ها تحت دو روش تصحیح خطا CCT و مقیاس‌گذاری خطی مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج نشان داد که روش‌های تصحیح خطا در هر دو پایگاه تفاوت چندانی نداشته است.

دمای حداقل و حداکثر در آینده نسبت به دوره پایه افزایش قابل توجهی خواهد داشت؛ در عین حال، پیش‌نمایی‌ها نشان می‌دهند که میانگین بارش سالانه در این حوضه کاهش چشمگیری را تجربه خواهد کرد که این کاهش در پایگاه 2W2E بیش از CORDEX-WAS برآورد شده است. کاهش بارش، به‌ویژه بارش‌های سنگین، از جمله دلایل کلیدی کاهش احتمال بازگشت و مدت سیلاب است. این یافته‌ها با مطالعات پیشین همخوانی دارد که نشان می‌دهند تغییر اقلیم منجر به کاهش مدت سیلاب‌ها می‌شوند (ویلکوفر و همکاران، ۲۰۲۴).

با این حال، برخلاف روند کاهشی در بارش، در برخی از موارد، شاخص بزرگی سیلاب در پایگاه CORDEX-WAS افزایش یافته است. این افزایش با وجود کاهش بارش‌ها، احتمالاً ناشی از تغییر الگوی بارش‌ها و افزایش شدت و فراوانی رویدادهای حادی است. این نتیجه با مطالعات بین‌المللی همسو است که نشان می‌دهند در شرایط تغییر اقلیم، بارش‌های سنگین‌تر و متمرکزتر، علی‌رغم کاهش کلی در میانگین بارش سالانه، می‌توانند منجر به تشدید سیلاب‌ها شوند (IPCC, 2021).

مقایسه نتایج بین دو پایگاه داده CORDEX-WAS و 2W2E نشان می‌دهد که در پایگاه 2W2E کاهش بارش و افزایش دما نسبت به CORDEX-WAS شدیدتر بوده است. این امر احتمالاً به دلیل تفاوت در داده‌های اقلیمی و نحوه مدل‌سازی آن‌ها است. به همین ترتیب، کاهش احتمال بازگشت و مدت سیلاب نیز در این پایگاه داده، مشهودتر است.

از نظر کاربردی، نتایج این تحقیق ارزش مهمی برای مدیریت منابع آب و کشاورزی در حوضه دز داشته و با توجه به اینکه فعالیت‌های کشاورزی و تأمین معیشت ساکنان این منطقه به شدت به منابع آب وابسته است، کاهش احتمالی شاخص‌های فراوانی و مدت سیلاب‌ها می‌تواند باعث تشدید

مشکلات تأمین آب، به‌ویژه در دوره‌های خشک‌تر آینده شود. علاوه بر این، افزایش شاخص شدت سیلاب‌ها می‌تواند تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های محلی و امنیت زیستی جامعه ایجاد کند. لذا، بازنگری در استراتژی‌های مدیریت منابع آب و توسعه سیاست‌های پایدار در این حوضه کاملاً ضروری است، ضمن اینکه به منظور افزایش دقت پیش‌نمایی‌ها و کاهش عدم قطعیت‌ها، استفاده از مدل‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی متنوع‌تر به‌عنوان پیشنهادی سازنده مورد تأکید است.

### کتابنامه

۱. آرخی، ص؛ کرکز، س؛ و عمادالدین، س. (۱۴۰۲). پهنه‌بندی خطر سیلاب تحت تأثیر تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قره‌سو، استان گلستان). پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۴(۱۴)، ۱-۲۶.
۲. اسکانی‌کزازی، غ. (۱۳۹۵). شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب حوضه آبریز کارون بزرگ و مدیریت بحران (مورد شهر اهواز). فصلنامه علمی-پژوهشی جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، ۱(۷)، ۲۳۵-۲۴۲.
۳. بابایی‌فینی، ا؛ قاسمی، ا؛ و فتاحی، ا. (۱۳۹۳). بررسی اثر تغییر اقلیم بر روند نمایه‌های حدی بارش ایران زمین. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱(۳)، ۸۵-۱۰۳.
۴. حجازی‌زاده، ز؛ فتاحی، ا؛ مساح‌بوانی، ع؛ و ناصرزاده، م. (۱۳۹۱). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر هیدروگراف سیلاب در دوره‌های آتی مطالعه موردی: حوضه آبریز بختیاری. جغرافیا، ۳۴(۱۰)، ۲۴-۵.
۵. حسنوند، ز؛ یاراحمدی، د؛ و میرهاشمی، ح. (۱۴۰۱). تحلیل روند تغییرات سری زمانی بیشینه بارش روزانه و سالانه حوضه آبریز کرخه و دز. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۲)، ۱۴۹-۱۶۸.
۶. حمیدیان‌پور، م؛ و شجاع، ف. (۱۴۰۱). مقدمه‌ای بر روش‌ها و شگردهای مدل‌سازی اقلیم و تغییر اقلیم. انتشارات دانشگاه سیستان و بلوچستان.
۷. زرین، آ؛ و داداشی‌رودباری، ع. (۱۴۰۰). تأثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین ایران با به‌کارگیری مدل همادی CMIP6. نشریه آب و توسعه پایدار، ۴(۸)، ۱۱۹-۱۲۴.

۸. سالاری فنودی، م؛ خسروی، م؛ طاوسی، ت؛ و حمیدیان پور، م. (۱۳۹۹) مقایسه و ارزیابی دقت داده‌های شبکه‌ای بارش تابستانه پایگاه CORDEX با داده‌های ایستگاهی (موردکاوی: بارش تابستانه جنوب شرق ایران). *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، شماره ۴۰، ۱۱، (۴۳)، ۱۵-۳۲.
۹. سیدکابلی، ح. (۱۳۹۵). تصویرسازی دمای هوا و تبخیر از مخازن آب، در شرایط تغییر اقلیم آبی (مطالعه موردی: سد دز). *مجله پژوهش آب ایران*، شماره ۴، پیاپی ۲۳، ۱۱۰-۱۰۱.
۱۰. عسگری، ا؛ باعقیده، م؛ انتظاری، ع؛ حسینی، م؛ و کامیار، ا. (۱۴۰۱). تحلیل تغییرات حجم مخزن و جریان ورودی به سد دز تحت شرایط تغییر اقلیم. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۳(۵۴)، ۳۶۵-۳۸۴.
۱۱. عسگری، ا؛ شوریان، م؛ و لطفی، س. (۱۳۹۹). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر شاخص‌های سیلاب (مطالعه موردی: حوضه آبریز دز). *هشتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران*، مشهد.
۱۲. قدمی، م؛ سلطانی، س؛ گودرزی، م؛ نادری، س؛ و تیموری، ح. (۱۳۹۷). اثر تغییر اقلیم بر جریان روزانه در حوضه رودخانه سزار. *علوم و مهندسی آب‌بخیزداری ایران*، شماره ۴۱، ۸۵-۹۵.
۱۳. کاشکی، ع؛ و قربانی، ح. (۱۴۰۳). ارزیابی تغییرات بلندمدت مشخصه‌های مخاطرات خشکسالی و سیل در حوضه‌های آبریز جنوب شرق ایران. *پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی*، ۱۹(۵)، ۷۴-۵۵.
۱۴. مزیدی، م؛ و خوش‌روش، م. (۱۳۹۵). تأثیر تغییر اقلیم بر فراوانی سیل حوضه گرگانرود با استفاده از آنالیز مرتبه اول مدل هیدرولوژیک بارش-رواناب. *پژوهش‌های کاربردی علوم آب*، ۲(۲)، ۳۵-۴۴.
۱۵. موسوی، ر؛ و معروفی، ص. (۱۳۹۵). بررسی پاسخ هیدرولوژیک جریان رودخانه به تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد دز). *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۳(۶)، ۳۳۳-۳۴۸.
16. Abbasian, M., Moghim, S., & Abrishamchi, A. (2019). Performance of the general circulation models in simulating temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(3-4), 1465-1483.
17. Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., Yang, H., & Srinivasan, R. (2019). Global soil, landuse, evapotranspiration, historical and future weather databases for SWAT Applications. *Scientific data*, 6(1), 1-11.
18. 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.

19. Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use calibration and validation. *American Society of Agriculture and Biological Engineer*, 55(4), 1491-1508.
20. Banda, V. D., Dzwauro, R. B., Singh, S. K., & Kanyerere, T. (2022). Hydrological modelling and climate adaptation under changing climate: a review with a focus in Sub-Saharan Africa. *Water*, 14(24), 4031.
21. Barman, L., Prasad, R. K., & Sivakumar, B. (2023). Streamflow simulation using soil and water assessment tool (SWAT): application to Periyar River basin in India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 29(sup1), 332-345.
22. Barrow, E., Hulme, M., & Semenov, M. (1996). Effect of using different methods in the construction of climate change scenarios: examples from Europe. *Climate Research*, 7, 195-211.
23. Bolan, S., Padhye, L. P., Jasemizad, T., Govarthan, M., Karmegam, N., Wijesekara, H., & Bolan, N. (2023). Impacts of climate change on the fate of contaminants through extreme weather events. *Science of the Total Environment*, 168388.
24. Furtak, K., & Wolińska, A. (2023). The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture—A review. *Catena*, 231, 107378.
25. Huang, S., Krysanova, V., & Hattermann, F. (2015). Projections of climate change impacts on floods and droughts in Germany using an ensemble of climate change scenarios. *Regional Environmental Change*, 15(3), 461-473.
26. Ibeuchi, C. C., Schonbein, D., Adakudlu, M., Xoplaki, E., & Paeth, H. (2022). Comparison of three techniques to adjust daily precipitation biases from regional climate models over Germany. *Water*, 14(4), 1-17.
27. Ionno, A., Arsenault, R., Troin, M., Martel, J. L., & Brissette, F. (2024). Impacts of climate change on flood volumes over North American catchments. *Journal of Hydrology*, 630, 130688.
28. Iqbal, M. S., Dahri, Z. H., Querner, E. P., Khan, A., & Hofstra, N. (2018). Impact of climate change on flood frequency and intensity in the Kabul River Basin. *Geosciences*, 8(4), 114.
29. Jayapadma, J. M. M. U., Souma, K., Magome, J., Wickramaarachchi, T. N., & Ishidaira, H. (2024). Integrated assessment of the impacts of climate and land-use changes on future flooding and effective adaptation in the Gin River Basin, Sri Lanka. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 55, 101919.
30. Kay, A. L., Davies, H. N., Bell, V. A., & Jones, R. G. (2009). Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Climatic change*, 92(1-2), 41-63.

31. Maghsood, F. F., Moradi, H., Massah Bavani, A. R., Panahi, M., Berndtsson, R., & Hashemi, H. (2019). Climate change impact on flood frequency and source area in northern Iran under CMIP5 scenarios. *Water*, 11(2), 273.
32. O'Shea, D., Nathan, R., Wasko, C., Ho, M., & Sharma, A. (2024). Evaluation of key flood risk drivers under climate change using a bottom-up approach. *Journal of Hydrology*, 640, 131694.
33. Shrestha, A., Shrestha, S., Tingsanchali, T., Budhathoki, A., & Ninsawat, S. (2021). Adapting hydropower production to climate change: A case study of Kulekhani Hydropower Project in Nepal. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123483.
34. Tillihal, S. B., & Shukla, A. K. (2023). Flood disaster hazards: a state-of-the-art review of causes, impacts, and monitoring. *Advances in Water Resource Planning and Sustainability*, 77-95.
35. Vaghefi, S.A., Abbaspour, N., Kamali, B., & Abbaspour, K.C. (2017). A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions - Case study: California-Baja California Peninsula. *Environmental Modelling and Software*, 96, 181-198.
36. Wasko, C., Nathan, R., Stein, L., & O'Shea, D. (2021). Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change. *Journal of Hydrology*, 603, 126994.
37. Wilby, R. L., & Harris, I. (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water resources research*, 42(2).  
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2005WR004065>.
38. Willkofer, F., Wood, R. R., & Ludwig, R. (2024). Assessing the impact of climate change on high return levels of peak flows in Bavaria applying the CRCM5 large ensemble. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(13), 2969-2989.
39. Worku, G., Teferi, E., Bantider, A., & Dile, Y. T. (2021). Modelling hydrological processes under climate change scenarios in the Jemma sub-basin of upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Climate Risk Management*, 31, 100272.
40. Xu, X., Wang, Y. C., Kalcic, M., Muenich, R. L., Yang, Y. E., & Scavia, D. (2019). Evaluating the impact of climate change on fluvial flood risk in a mixed-use watershed. *Environmental modelling & software*, 122, 104031.