



Journal of Hydraulics and Water Science

Online ISSN: 3092-6114
Journal homepage: <https://hws.tabrizu.ac.ir/?lang=en>



Research Article

Application of the CMIP6 Approach for Determination of Climate Change Effects on Inflow to Sattarkhan Reservoir, Ahar, using the IHACRES Model

Pouya Allahverdipour¹, MohammadTaghi Sattari^{2*}

1- Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Professor, Department of Water engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Accepted: September 8, 2025

Received: April 5, 2025

Revised: September 6, 2025

Published online: September 21, 2025

*Corresponding Author's Email: mtsattar@gmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Climate Change,
CMIP6, Dam,
Rainfall-Runoff,
SSP scenarios.

Background and Objectives

Climate change is one of the most important challenges of the present century. This phenomenon has numerous effects on water resources, ecosystems, and human societies. Reservoir dams, which play a crucial role in providing drinking water, flood control, hydropower generation, and irrigation, are among the systems most susceptible to climate change effects. The inflow into reservoir dams is highly sensitive to changes in climatic variables, making it essential to assess how future climate changes will impact this inflow. By predicting river flows and the runoff entering reservoirs, it is possible not only to manage the utilization of water resources but also to estimate and mitigate natural disasters such as floods and droughts. Examining and identifying the impacts of climate change is vital for planning adaptation strategies and ensuring the sustainability and resilience of reservoirs amidst a changing climate. This research was conducted to assess the impact of future climate change on the inflow to the reservoir of the Sattarkhan Dam in the Ahar Chai River basin, located in East Azerbaijan Province.

Methodology

The Ahar Chai basin is a sub-basin of the Aras basin, located in the northwest of Iran, specifically in East Azerbaijan Province. The Sattarkhan Dam is constructed within this basin on the Ahar Chai River. The total annual precipitation and the average minimum and maximum temperatures in this basin are 276 mm, 1.53 °C, and 11.68 °C, respectively. According to the De Martonne classification, the region has a semi-arid climate. This study investigated the impact of future climate change on the inflow into the reservoir of the Sattarkhan Dam in the Ahar Chai basin. Climatic and hydrometric data from the period of 2008-2022 and the IHACRES rainfall-runoff model were used to estimate runoff. The output of the HadGEM3-GC31-LL model under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios from the CMIP6 was used to predict future climate.

How to cite:

Allahverdipour, P. Sattari, M.T. *Application of the CMIP6 Approach for Determination of Climate Change Effects on Inflow to Sattarkhan Reservoir, Ahar, using the IHACRES Model.* Journal of Hydraulics and Water Science, 35 (2):47-64.

<https://doi.org/10.22034/hws.2025.66652.1021>



This is an open-access article under the CC BY NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)



Findings

The results indicated that precipitation amounts are expected to increase in most months under both SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios. Conversely, there will be an increase in both minimum and maximum temperatures during most months. Specifically, in July, the warmest month of the year, the maximum temperature is projected to rise by 1.45 °C, increasing from 15.84 °C in the base period (2008-2022) to 17.28 and 17.29 °C in the future (2025-2039) under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios, respectively. The highest maximum temperature recorded in the base period, which was 29.06 °C in August, is expected to reach 30.30 °C in July. The evaluation of the IHACRES model's performance revealed that, despite some errors in estimating minimum and maximum runoff, the model generally performed acceptably, with R^2 , RMSE, and MAE values of 0.83, 1.17 m³/s, and 0.41 m³/s, respectively, during the calibration period, and R^2 , RMSE, and MAE values of 0.51, 1.35 m³/s, and 0.90 m³/s during the validation period. A comparison of the runoff time series between the 14-year base period (2008-2021) and the future period (2025-2039) under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios indicated a significant decline in the inflow to the Sattarkhan Dam during the future period compared to the base period. Statistical and quantitative comparisons of observed runoff during the base period and predicted runoff for the future period showed that the average inflow to the Sattarkhan Dam reservoir was 1.39 m³/s in the base period, but is expected to decrease by 7% and 19% to 1.30 and 1.13 m³/s under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios, respectively. The maximum inflow is also projected to decrease significantly, dropping from 26.43 m³/s in the base period to 12.28 m³/s (54% reduction) and 10.75 m³/s (59% reduction) under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios, respectively. On a monthly timescale, the most significant reduction is expected in April, where the average inflow is projected to decrease from 4.52 m³/s in the base period to 3.13 and 2.82 m³/s under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios, respectively. In June, July, August, and September, an increase in runoff is anticipated under both scenarios, while in February, an increase is expected only under the SSP1-2.6 scenario.

Conclusion

The results showed that, despite an increase in precipitation in most months, minimum and maximum temperatures will also rise. The IHACRES model performed well, with R^2 , RMSE, and MAE values during the calibration period and the validation period. A comparison of runoff between the base period and the future period revealed a significant decrease in inflow to the Sattarkhan Dam. The reduction in inflow to the dam reservoir will affect its performance, posing challenges for drinking water supply, agriculture, and industry. This situation indicates concerning challenges regarding water resources in the region and the ability to meet water needs across various sectors. Addressing these challenges requires proactive management strategies and informed decision-making to mitigate future risks.



نشریه دانش آب و هیدرولیک

شاپا الکترونیکی: 2717-4107
درگاه نشریه: hws.tabrizu.ac.ir



مقاله پژوهشی

کاربرد سناریوهای CMIP6 برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به سد ستارخان اهر با

استفاده از مدل IHACRES

پویا اللهویردی پور^۱، محمد تقی ستاری^{۲*}

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mtsattar@gmail.com

چکیده

کلمات کلیدی

هدف سیاست‌گذاری صحیح برای برنامه‌ریزی عملیات بهره‌برداری از مخزن، مستلزم برآورد جریان ورودی به مخزن سدها است. این تحقیق، به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به مخزن سد ستارخان اهر در حوضه آبریز اهرچای برای دوره‌های زمانی آتی می‌پردازد. بدین منظور از داده‌های اقلیمی و هیدرومتری دوره زمانی ۱۴۰۱-۱۳۸۷ و مدل بارش-رواناب IHACRES برای برآورد رواناب استفاده شد. در این پژوهش، خروجی مدل HadGEM3-GC31-LL سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 از خروجی CMIP6 برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی آینده به کار رفت. نتایج نشان داد با افزایش بارش در اکثر ماه‌ها، دمای کمینه و بیشینه نیز افزایش خواهد یافت. مدل IHACRES با $RMSE=1.17 \text{ m}^3/\text{s}$ ، $R^2=0.83$ و $MAE=0.41 \text{ m}^3/\text{s}$ در دوره واسنجی و $RMSE=1.35 \text{ m}^3/\text{s}$ ، $R^2=0.51$ و $MAE=0.90 \text{ m}^3/\text{s}$ در دوره رواناب دوره پایه و آینده نشان داد که رواناب ورودی به سد ستارخان کاهش قابل‌توجهی خواهد داشت. به‌طوری‌که متوسط رواناب از $1/39 \text{ m}^3/\text{s}$ به $1/30 \text{ m}^3/\text{s}$ و $1/13 \text{ m}^3/\text{s}$ و بیشینه رواناب از $26/43 \text{ m}^3/\text{s}$ به $12/28 \text{ m}^3/\text{s}$ و $10/75$ به ترتیب تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 کاهش خواهد یافت. برآوردها نشان داد که بیشترین کاهش در ماه April رخ خواهد داد، به‌طوری‌که متوسط رواناب از $4/52 \text{ m}^3/\text{s}$ به $3/13 \text{ m}^3/\text{s}$ و $2/82 \text{ m}^3/\text{s}$ به ترتیب تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 کاهش خواهد یافت. طبیعتاً کاهش رواناب ورودی به مخزن سد، عملکرد آن را تحت تأثیر قرار داده و چالش‌هایی برای تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت ایجاد خواهد نمود. پیشگیری از عواقب احتمالی تغییر اقلیم و کاهش جریان، نیازمند پیش‌بینی‌های مدیریتی و تصمیمات مناسب برای مقابله با چالش‌های آتی است.

بارش-رواناب،

تغییر اقلیم،

سد،

سناریوهای SSP

مقدمه

پدیده تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر است. این پدیده پیامدهای زیادی بر منابع آب، اکوسیستم‌ها و جوامع انسانی دارد (اللهویردی پور و ستاری ۱۴۰۳). از جمله آسیب‌پذیرترین سیستم‌ها در برابر تغییرات اقلیمی، مخازن سدها هستند که نقش مهمی در تامین آب شرب، کنترل سیل، تولید نیروی برقآبی و آبیاری دارند. جریان ورودی به مخازن سدها نسبت به تغییرات متغیرهای اقلیمی بسیار حساس است و ارزیابی اینکه چگونه تغییرات اقلیمی آینده بر جریان ورودی مخازن تأثیر می‌گذارد، ضروری است. با پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها و رواناب ورودی به مخازن سدها، علاوه بر مدیریت بهره‌برداری از منابع آب، می‌توان حوادث طبیعی نظیر سیل و خشکسالی را نیز برآورد و مهار کرد (محمدی و اللهویردی پور ۱۴۰۳). بررسی و شناسایی تأثیرات تغییر اقلیم برای برنامه‌ریزی سازگاری و تضمین پایداری و انعطاف‌پذیری مخزن در مواجهه با آب و هوای در حال تغییر، حیاتی است (مامون و همکاران ۲۰۲۴، نیکوفر و نورانی ۱۴۰۴).

مدل بارش-رواناب IHACRES^۱ به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و ارزیابی جریان در شرایط آب و هوایی مختلف ارائه شده است. مدل IHACRES یک مدل مفهومی بارش-رواناب است که به حداقل داده‌های ورودی نیاز دارد و بنابراین برای شرایط با داده‌های هیدرولوژیکی محدود مناسب است (کراک و جیکمن ۲۰۰۸). توانایی مدل IHACRES در ایجاد ارتباط و تشخیص روابط بین بارندگی، دما و جریان، این مدل را به یک مدل پرکاربرد برای مطالعه و ارزیابی اثرات تغییرات آب و هوایی بر منابع آب تبدیل کرده است. آشفته و همکاران (۲۰۱۳) از مدل بارش-رواناب IHACRES و مدل HadCM3 تحت سناریو A2 برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به مخزن سد آیدوغموش در استان آذربایجان شرقی استفاده کردند. نتایج حاکی از کاهش ۰/۷ درصدی میانگین حجم رواناب سالانه در دوره ۲۰۳۹-۲۰۲۶ نسبت به دوره پایه (۱۹۸۷-۲۰۰۰) بود. اوایانگ و

همکاران (۲۰۱۵) اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه هانگ نیژانگ در ژاپن را با استفاده از سناریوهای CMIP5^۲ بررسی کردند. نتایج نشان از کاهش رواناب تحت سناریوهای مختلف به میزان ۰/۸ تا ۶/۹ درصد بود. حافظ‌پرست و مرابی (۲۰۲۱) با استفاده از مدل IHACRES و سناریوهای CMIP5 اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه رودخانه خرم رود در استان کرمانشاه را بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده کاهش ۸/۱۸ و ۹/۷۵ درصدی بارش، افزایش ۱/۸۵ و ۴/۲۲ درجه سانتی‌گرادی دما و کاهش ۱۲/۷۲ و ۲۰/۳ درصدی رواناب به‌ترتیب در دوره اول (۲۰۲۰-۲۰۵۲) و دوم (۲۰۵۳-۲۰۸۵) آینده بود. غلامی (۲۰۲۳) از مدل IHACRES و سناریوهای CMIP5 و داده‌های دوره ۱۹۸۱-۲۰۰۵ برای برآورد رواناب آینده در زیرحوضه قره‌سو در حوضه کرخه استفاده کردند. پیش‌بینی رواناب سالانه تحت سناریو RCP4.5 حاکی از افزایش حدود ۱ درصدی در دوره ۲۰۳۰-۲۰۰۶، کاهش ۲/۴ درصدی در دوره ۲۰۵۵-۲۰۳۱ و کاهش ۱۰ درصدی در دوره ۲۰۸۰-۲۰۵۶ نسبت به دوره پایه بود. تحت سناریوی RCP8.5 نیز در دوره‌های اول تا سوم آینده، کاهش رواناب به‌ترتیب به میزان ۷/۸، ۶/۹ و ۱/۹ درصد برآورد شد. در تحقیق گودرزی و همکاران (۲۰۲۴) در حوضه دز که با استفاده از مدل IHACRES و سناریوهای SSP5-8.5 و SSP2-4.5 انجام شد، افزایش ۱۶-۱۵ درصدی دبی این رودخانه نسبت به دوره پایه برآورد شد. نتایج تحقیق لسانی و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از سناریوهای RCP^۳ در حوضه رودخانه کاسای که حدود یک چهارم منابع آب شیرین کشور کنگو را دارد، حاکی از تغییرات میانگین دبی سالانه از ۱۸- تا ۳+ درصد تا سال ۲۱۰۰ بود. یسوبابو و همکاران (۲۰۲۴) تأثیر تغییرات اقلیمی بر جریان ورودی به مخزن سد ملامپوزا در هند را با استفاده از سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و مدل IHACRES بررسی کردند. تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌ترتیب کاهش ۲/۶ و ۹/۳ درصدی جریان ورودی به مخزن برای دوره آینده (۲۰۲۳-۲۰۴۲) برآورد شد.

^۲ Coupled Model Intercomparison Project Phase 5^۳ Representative Concentration Pathway^۱ Identification of unit Hydrographs and Component flows from Rainfall, Evaporation, and Streamflow data

رودخانه مهاباد در دوره آماری ۲۰۱۹-۲۰۰۴ استفاده کردند. نتایج حاکی از عملکرد قابل قبول این مدل در دوره واسنجی با ضریب همبستگی و خطای اریبی به ترتیب ۷۲ درصد و ۰/۰۸ و در دوره صحت‌سنجی به ترتیب با ۶۹ درصد و ۰/۵۹ بود.

به‌طورکلی، این مطالعات بر اهمیت ادغام مدل‌های هیدرولوژیکی مانند IHACRES با پیش‌بینی‌های اقلیمی برای ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم آینده، در دسترس بودن آب در دوره‌های آتی و آگاهی درمورد استراتژی‌های مدیریت تطبیقی تأکید می‌کنند. علی‌رغم حجم فزاینده تحقیقات در مورد تأثیرات تغییرات اقلیمی، نیاز اساسی به مطالعات محلی برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی آینده بر مخازن سدها در مناطق مختلف وجود دارد. چنین مطالعاتی برای درک شرایط هیدرولوژیکی منحصر به فرد مخازن و توسعه اقدامات سازگاری با تغییرات اقلیمی ضروری است. تحقیق حاضر با استفاده از مدل IHACRES برای ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر تغییرات جریان ورودی به مخزن سد ستارخان اهر، به این شکاف می‌پردازد. با استفاده از پیش‌بینی‌های اقلیمی حاصل از مدل‌های اقلیمی و تحت سناریوهای انتشار مختلف، جریان آینده شبیه‌سازی و اثرات بالقوه تغییرات اقلیمی بر جریان ورودی به مخزن سد ستارخان اهر تحلیل می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

حوضه اهرچای از زیرحوضه‌های رودخانه ارس در شمال غربی ایران و در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. سد ستارخان در این حوضه و بر روی رودخانه اهرچای احداث شده است. این سد از نوع خاکی با هسته رسی بوده و هدف از ساخت این سد و تاسیسات وابسته، تامین آب شرب شهرستان اهر، تامین آب مورد نیاز مصارف صنعتی و تامین آب مورد نیاز بخشی از اراضی کشاورزی است. مجموع بارش و متوسط دماهای کمینه و بیشینه سالانه این حوضه به ترتیب ۲۷۶ میلی‌متر، ۱/۵۳ و

نتایج تحقیق مطبوعی و همکاران (۱۳۹۹) که با استفاده از مدل IHACRES و با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم آینده بر رواناب در حوضه آبخیز کرخه انجام شد، نشان‌دهنده کاهش رواناب این حوضه در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ به میزان ۱۲/۹۶ و ۲۴/۱۲ درصد تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 بود. قربانی دایلاری و همکاران (۱۴۰۰) با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر دبی رودخانه زولاچای واقع در استان آذربایجان غربی، از مدل بارش-رواناب IHACRES و سناریوهای مختلف اقلیمی برای دوره آینده ۲۰۸۰-۲۰۲۱ پرداختند. کاهش متوسط رواناب سالانه طی دوره ۲۰۸۰-۲۰۲۱ تحت سناریو RCP2.6 به میزان ۱/۱۲ مترمکعب بر ثانیه (۳۳/۳۴ درصد)، تحت سناریو RCP4.5 به میزان ۱/۱۷ مترمکعب بر ثانیه (۳۳/۶۷ درصد) و تحت سناریو RCP8.5 به میزان ۱/۳۷ مترمکعب بر ثانیه (۳۹/۴۲ درصد) نسبت به دوره پایه برآورد شد.

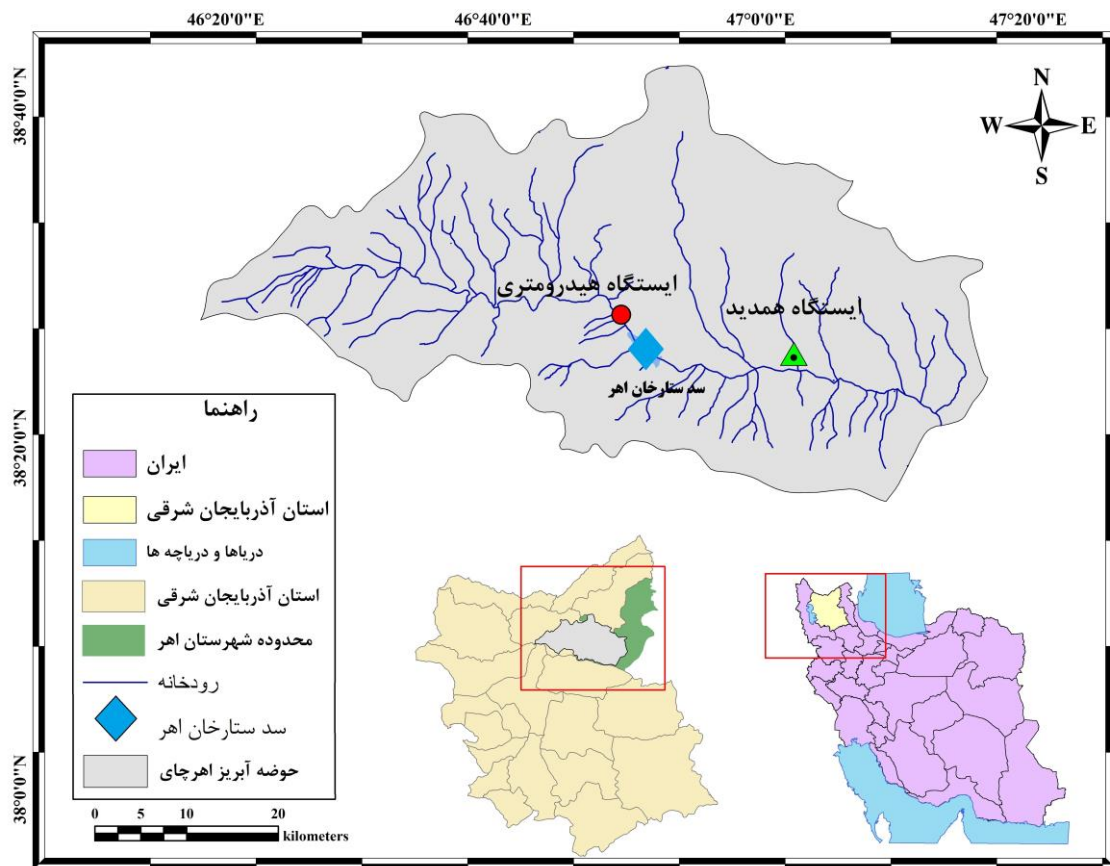
رحیمی و حافظ‌پرست مودت (۱۴۰۱) در تحقیقی که برای ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر تقاضاهای آبی در حوضه سد جامیشان استان کرمانشاه انجام شد، از مدل‌های CMIP5 تحت سناریو RCP8.5 استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده افزایش دما به میزان ۰/۵ تا ۱/۵ درجه سلسیوس و افزایش ۵ درصدی میانگین بارش ماهیانه در مدل HADGEM2_ES و کاهش ۶ درصدی در مدل MIROC5 بود. در نتیجه این تغییرات، کاهش رواناب در دوره آتی در هر دو مدل اقلیمی پیش‌بینی شد. در تحقیق شاهی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۲) رواناب ورودی به سد مخزنی مخمل‌کوه واقع در استان لرستان تحت سناریوهای SSP^۱ بررسی شد. نتایج نشان داد که رواناب ورودی به این سد در هر سه دوره آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۰-۲۰۵۱ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰) و تحت همه سناریوهای اقلیمی، کاهش خواهد یافت که بیش‌ترین کاهش رواناب به میزان ۹۹٪ تحت سناریو SSP5-8.5 و کمترین کاهش به میزان ۲۲/۱۵٪ تحت سناریو SSP3-7.0 برآورد شد. علی‌اوغلی و ستاری (۱۴۰۳) با هدف ارزیابی سناریوهای تخصیص منابع آب حوضه مهاباد، از مدل IHACRES برای شبیه‌سازی بارش-رواناب

¹ Shared Socioeconomic Pathways

هیدرولوژی انجام می‌شود، صحت‌سنجی داده‌ها ضروری است و بدون اطمینان از صحت و کیفیت داده‌ها، نمی‌توان آن‌ها را برای استخراج نتایج به‌کار برد. بنابراین، داده‌های مورد استفاده در این تحقیق ابتدا مورد بررسی آماری و صحت‌سنجی قرار گرفت (الله‌پوری پور و ستاری ۱۴۰۲). در جدول ۱ خلاصه مشخصات آماری داده‌های مورد استفاده ارائه شده است.

درجه سانتی‌گراد است و برحسب طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم نیمه‌خشک دارد. موقعیت حوضه اهرچای و سد ستارخان در شکل ۱ نشان داده شده است.

در این تحقیق از داده‌های اقلیمی روزانه ایستگاه همدید اهر و داده‌های رواناب روزانه ایستگاه هیدرومتری واقع در ورودی سد ستارخان در دوره آماری مشترک از سال آبی ۱۳۸۷/۱۳۸۸ تا سال آبی ۱۴۰۰/۱۴۰۱ استفاده شد. در هر مطالعه علمی که با استفاده از داده‌های هواشناسی و



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه، سد ستارخان، حوضه اهرچای، استان آذربایجان شرقی، ایران.

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های روزانه مورد استفاده در دوره پایه (۱۴۰۱-۱۳۸۷).

Statistic	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Precipitation (mm)	Sunshine (hours)	Inflow (m ³ /s)
Minimum	-8.60	-20.60	0	0	0
Maximum	39.40	22.00	36	13.60	26.43
Median	18.60	6.50	0	8.40	1.08
Mean	17.99	6.11	0.77	7.29	1.39
Variance	98.18	61.40	6.80	15.25	3.54
Standard deviation	9.91	7.84	2.61	3.91	1.88
Skewness	-0.17	-0.32	5.70	-0.55	3.85
Kurtosis	-0.99	-0.55	42.91	-0.87	25.21

مدل IHACRES در حوضه موردنظر، از داده‌های مشاهداتی دما، بارش و رواناب در دوره درنظرگرفته شده برای این بخش استفاده می‌شود. در گام بعدی و پس از واسنجی مدل، شبیه‌سازی رواناب حوضه مطالعاتی در دوره آتی با معرفی داده‌های دما و بارش پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های اقلیمی انجام می‌شود (جیکمن و هارنبرگه ۱۹۹۳).

پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی آینده

در این پژوهش، از مدل‌های گردش عمومی جو^۱ (GCM) و سناریوهای مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) از CMIP6 استفاده شد. خروجی این مدل‌ها و سناریوها که توسط IPCC^۲ منتشر شده‌اند، به‌عنوان محور اصلی تحقیقات جهانی در زمینه تغییرات اقلیمی شناخته می‌شوند (فریم و همکاران ۲۰۱۸). مدل‌های GCM ابزارهای پیشرفته و مؤثری هستند که شرایط اقلیمی مناطق مختلف جهان را در مقیاس‌های جهانی و قاره‌ای شبیه‌سازی می‌کنند (ویلی و هریس ۲۰۰۶). این مدل‌ها با هدف بررسی و ارزیابی تغییرات متغیرهای اقلیمی در دوره‌های زمانی گذشته، حال و آینده و با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف تغییرات غلظت گازهای گلخانه‌ای در آینده توسعه یافته‌اند. IPCC از سال ۱۹۹۰ پروژه استانداردسازی استفاده از خروجی مدل‌های GCM را آغاز کرده و هر چند سال یکبار گزارش‌های ارزیابی تغییرات اقلیمی را بر اساس تحقیقات محققان سراسر جهان منتشر می‌کند. آخرین گزارش این هیئت، که در قالب گزارش ششم ارائه شده و در این مطالعه نیز مورد استفاده قرار گرفته است، شامل مدل‌ها و سناریوهای مختلفی برای انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده است. به‌عنوان مثال، در سناریوی SSP1-2.6 که به‌عنوان سناریوی خوش‌بینانه شناخته می‌شود، افزایش دمای جهانی تا حدود ۲ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. برای تحقق این سناریو، غلظت گازهای گلخانه‌ای باید از سال ۲۰۲۰ به تدریج کاهش یافته و تا سال ۲۱۰۰ به حدود صفر برسد. IPCC در گزارش اخیر خود، علاوه بر تأثیر غلظت گازهای گلخانه‌ای، تأثیر عوامل دیگری مانند تحولات

شبیه‌سازی بارش-رواناب با استفاده از مدل IHACRES

بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب، نیازمند استفاده از مدل‌های بارش-رواناب است. مدل IHACRES یک ابزار قدرتمند و انعطاف‌پذیر برای شبیه‌سازی رواناب و جریان رودخانه‌ها است. با وجود سادگی و نیاز به داده‌های کم، این مدل قابلیت تطبیق‌پذیری بالایی دارد و می‌تواند در شرایط مختلف اقلیمی و هیدرولوژیکی استفاده شود. با این حال، دقت مدل به شدت به کیفیت داده‌های واسنجی وابسته است (کراک و جیکمن ۲۰۰۸). از کاربردهای مدل IHACRES می‌توان به شبیه‌سازی رواناب، پیش‌بینی سیل و برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب اشاره کرد. دلیل اصلی انتخاب این مدل در پژوهش حاضر، سهولت کاربرد، نیاز به پارامترهای کمتر نسبت به سایر مدل‌ها و سرعت بالای آن در مدل‌سازی است. این مدل به دلیل وابستگی به داده‌های کمتر و قابلیت بالای خود در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در حوضه‌های متنوع با شرایط گوناگون، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از این‌رو، در این مطالعه نیز از این مدل استفاده شده است. مدل بارش-رواناب IHACRES از دو بخش شامل مدول غیرخطی کاهش (تلفات) و مدول خطی هیدروگراف واحد تشکیل می‌شود (جیکمن و هارنبرگه ۱۹۹۳):

۱- بخش غیرخطی: این بخش رابطه بین بارش و رطوبت خاک را مدل‌سازی می‌کند. در این بخش، بارش مؤثر محاسبه می‌شود که به‌عنوان ورودی به بخش خطی وارد می‌شود.

۲- بخش خطی: این بخش رابطه بین بارش مؤثر و رواناب را با استفاده از یک هیدروگراف واحد مدل‌سازی می‌کند.

بدین منظور، ابتدا بارش و دما در هر گام زمانی توسط مدول غیرخطی به بارش مؤثر تبدیل می‌شود. سپس هیدروگراف واحد با استفاده از مدول خطی، به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود. برای واسنجی

² Intergovernmental Panel on Climate Change

¹ General Circulation Models

همکاران ۱۹۹۸). در پژوهش حاضر به منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی از مدل Lars-WG استفاده شد.

معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی رواناب، از معیارهای آماری ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد (به ترتیب روابط ۱ تا ۳).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \quad (1)$$

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

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P(i) - O(i)| \quad (3)$$

در روابط ۱ تا ۳، پارامتر $O(i)$ مقادیر مشاهداتی (واقعی)، $P(i)$ مقادیر شبیه‌سازی شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهداتی، $\bar{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و N تعداد مشاهدات است. مقدار R^2 بیشتر و RMSE و MAE کمتر، نشان‌دهنده عملکرد بهتر و دقت بیشتر مدل است (ستاری و همکاران ۱۴۰۳).

نتایج و بحث

ارزیابی مدل Lars-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی
شبیه‌سازی مدل Lars-WG با توجه به مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده (شکل‌های ۲ و ۳) و معیارهای آماری (جدول ۲) برای هر دو متغیر بارش و دما دقت بالایی دارد، هرچند که برای بارش کمی خطا بیشتر است. در کل، عملکرد مدل Lars-WG برای هر دو متغیر بارش و دما قابل قبول است و بنابراین این مدل کارایی مناسبی برای تولید داده‌های اقلیمی آینده دارد.

پیش‌بینی بارش و دمای آینده

پس از صحت‌سنجی مدل Lars-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی حوضه اهرچای در دوره ۱۴ ساله پایه (۱۳۸۷-۱۴۰۱)، متغیرهای اقلیمی برای دوره ۱۴ ساله آینده (۱۴۰۴-۱۴۱۸) تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 پیش‌بینی شد. میزان بارش در اکثر ماه‌ها افزایشی خواهد

اقتصادی و اجتماعی را نیز در نظر گرفته است. بر این اساس، سناریوهای ارائه‌شده در این گزارش تحت عنوان SSPs (مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک) نام‌گذاری شده‌اند. مدل‌های گردش عمومی ارائه‌شده در CMIP6 نسخه‌های بهبودیافته‌ای نسبت به گزارش قبلی هستند. از جمله مزایای این مدل‌ها و سناریوها نسبت به نسخه‌های پیشین، می‌توان به افزایش تعداد لایه‌های عمودی برای شبیه‌سازی دقیق‌تر شرایط لایه استراتوسفر اشاره کرد (اللهویردی پور و همکاران ۱۴۰۳).

در این پژوهش، برای مد نظر قرار دادن عدم قطعیت که در تحقیقات حوزه تغییرات اقلیمی وجود دارد، رویکرد چند سناریویی (سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5، به ترتیب سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه از گزارش CMIP6) به کار گرفته شد. بدین ترتیب، بجای یک مقدار ثابت برای متغیرهای اقلیمی (بارش و دما)، حدود بالا و پایین تغییرات آنها برآورد می‌شود. همچنین صحت و دقت بالایی مدل و همپوشانی خروجی آن در پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در منطقه مطالعاتی با معیارهای مختلف ارزیابی می‌شود.

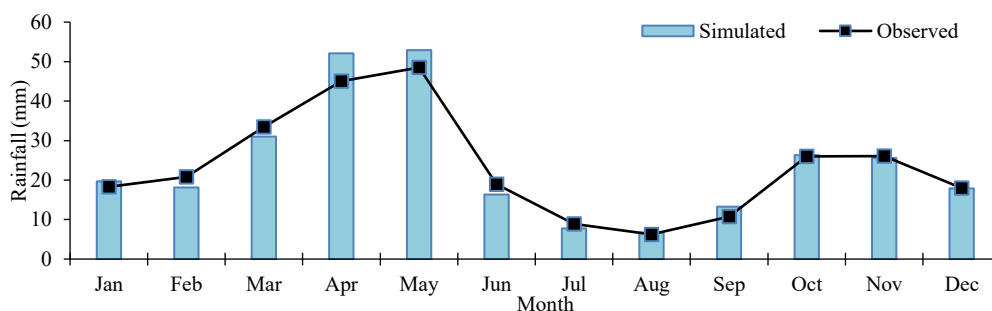
مدل ریزمقیاس‌نمای لارس

یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از خروجی مدل‌های GCM، بزرگ‌مقیاس بودن سلول‌های محاسباتی آنها نسبت به منطقه مورد مطالعه است (اولسن و همکاران ۲۰۱۷). برای رفع این مشکل، روش‌های مختلفی برای ریزمقیاس‌نمایی سناریوهای اقلیمی جهانی به سناریوهای منطقه‌ای وجود دارد. یکی از مشهورترین و پرکاربردترین مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی، مدل Lars-WG است که توسط راسکو و همکاران (۱۹۹۱) به عنوان بخشی از پروژه ارزیابی ریسک کشاورزی در بوداپست مجارستان معرفی شد و سپس توسط سمونوف و همکاران (۱۹۹۸) بازنگری شد. مدل Lars-WG در سه مرحله اصلی شامل واسنجی، ارزیابی و تولید داده‌های هواشناسی، داده‌های اقلیمی را تولید می‌کند. این مدل با دریافت فایلی که شامل رفتار آب‌وهوایی گذشته ایستگاه و سناریوی تغییر اقلیم است، مقادیر روزانه دمای کمینه و بیشینه و بارش ایستگاه مورد نظر را برای شرایط آینده شبیه‌سازی می‌کند (سمن اوف و

سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب به ۱۷/۲۸ و ۱۷/۲۹ درجه سانتی‌گراد در آینده (۱۴۰۴-۱۴۱۸) خواهد رسید (شکل ۴-ب). دمای بیشینه نیز در همه ماه‌ها و تحت هر دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان دمای بیشینه که در دوره پایه برابر با ۲۹/۰۶ درجه سانتی‌گراد (در ماه August) بود، به ۳۰/۳۰ درجه سانتی‌گراد (در ماه July) خواهد رسید (شکل ۴-ج). دین پژوه و اللهویدی پور (۱۴۰۴) نشان دادند که دمای کمینه و بیشینه دشت مغان تحت همه سناریوهای SSP از گزارش CMIP6 در آینده افزایش خواهد یافت و محدوده افزایش دمای کمینه و بیشینه دشت مغان را تحت سناریو SSP1-2.6 به ترتیب ۱/۲۸ و ۱/۲۲ °C، تحت سناریو SSP2-4.5 به ترتیب ۲/۴۶ و ۳/۱۶ °C و تحت سناریو SSP5-8.5 به ترتیب ۴/۸۵ و ۵/۱۴ °C گزارش کردند. بر اساس نتایج ناطقی و همکاران (۱۴۰۰) در حوضه هلیل‌رود در جنوب شرقی استان کرمان، تحت همه سناریوهای RCP^۱ در آینده افزایش دمای این منطقه برآورد شد. در نتیجه، افزایش میزان تبخیر و تعرق در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه به میزان ۳/۴، ۶/۸ و ۸/۵ درصد، به ترتیب تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 پیش‌بینی شد.

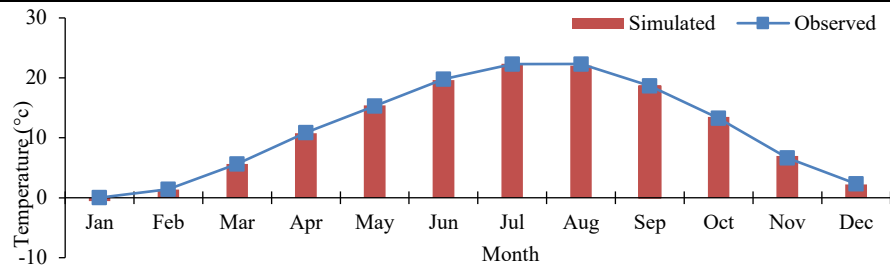
بود و بیشترین افزایش بارش، در ماه‌های پربارش سال (April و May) خواهد بود (شکل ۴-الف). تحقیقات مشابه نیز افزایش میزان بارش در برخی از مناطق ایران را گزارش کرده‌اند. نتایج تحقیق دین پژوه و اللهویدی پور (۱۴۰۴) حاکی از افزایش مجموع بارش سالانه دشت مغان در شمال استان اردبیل، تحت همه سناریوهای SSP بود. در تحقیق اللهویدی پور و همکاران (۱۴۰۳) نیز تحت هر دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 افزایش مجموع بارش سالانه ایران در آینده پیش‌بینی شد. البته در برخی از تحقیقات نیز کاهش بارش در دوره‌های آتی پیش‌بینی شده است. باب‌الحکمی و همکاران (۱۳۹۹) کاهش بارش بین ۲۹-۸٪ در استان مازندران را پیش‌بینی کردند. علت تفاوت در نتایج تحقیقات انجام‌یافته، می‌تواند به موقعیت جغرافیایی و اقلیم مناطق و همچنین مدل و سناریوهای انتشار ارائه شده در گزارش‌های مختلف IPCC مربوط باشد.

در اکثر ماه‌ها افزایش دمای کمینه رخ خواهد داد (به جز کاهش ناچیز در دو ماه January و February با حدود ۰/۰۵ درجه سانتی‌گراد کاهش). در ماه July که گرم‌ترین ماه سال است، بیشینه دما با ۱/۴۵ درجه سانتی‌گراد افزایش، از ۱۵/۸۴ درجه سانتی‌گراد در دوره پایه (۱۴۰۱-۱۳۸۷)، تحت



شکل ۲- مقایسه بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل لارس.

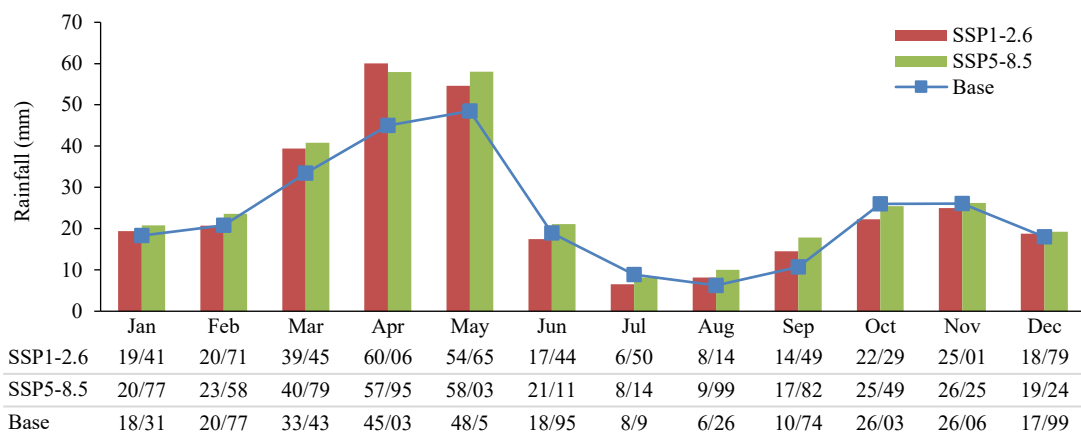
¹ Representative Concentration Pathways



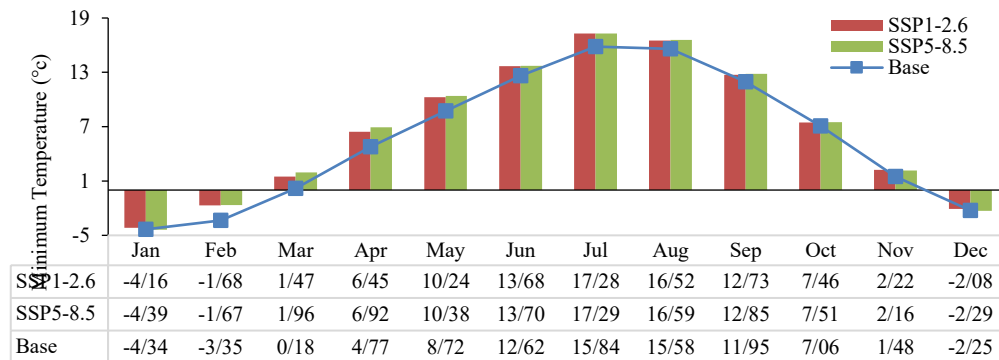
شکل ۳- مقایسه دمای میانگین مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل لارس.

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل Lars-WG در شبیه‌سازی بارش و دمای حوضه اهرچای در دوره پایه (۱۴۰۱-۱۳۸۷).

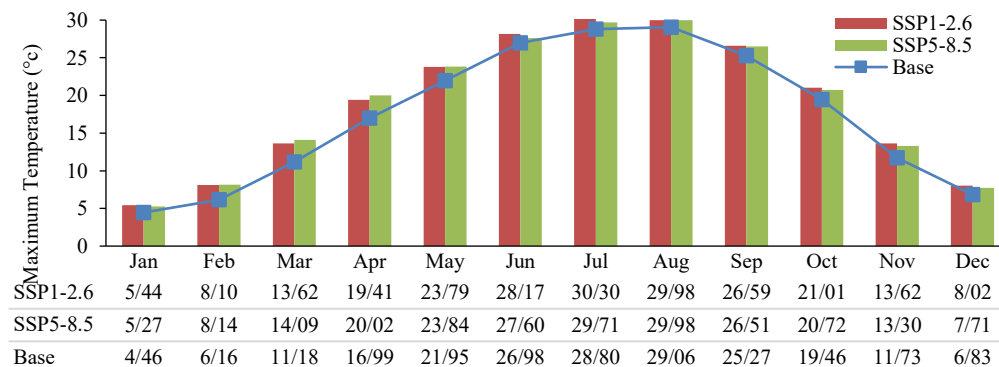
Variable	R ²	RMSE	MAE
Rainfall (mm)	0.97	2.88	2.13
T _{mean} (°C)	0.99	0.22	0.16



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- متغیرهای اقلیمی دوره پایه (۱۳۸۷-۱۴۰۱) و آینده (۱۴۰۴-۱۴۱۸) الف- بارش ب- دمای کمینه ج- دمای بیشینه.

مترمکعب بر ثانیه و ۰/۴۱ مترمکعب بر ثانیه و در دوره صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۵۱، ۱/۳۵ مترمکعب بر ثانیه و ۰/۹۰ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است (جدول ۳). به‌طور کلی، با استفاده از نتایج به دست آمده می‌توان چنین نتیجه گرفت که مدل عملکرد قابل قبولی را در این منطقه از خود نشان داده است. بنابراین، می‌توان برای برآورد رواناب در آینده از این مدل استفاده کرد. در تحقیق یسوبابو و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر جریان ورودی به مخزن سد ملامپوزا در کشور هند، عملکرد مناسب مدل IHACRES در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب با R^2 برابر با ۰/۹۰ و ۰/۹۱ و RMSE برابر با ۲/۶۳ و ۴/۵۳ مترمکعب بر ثانیه گزارش شد.

شبیه‌سازی بارش-رواناب آینده

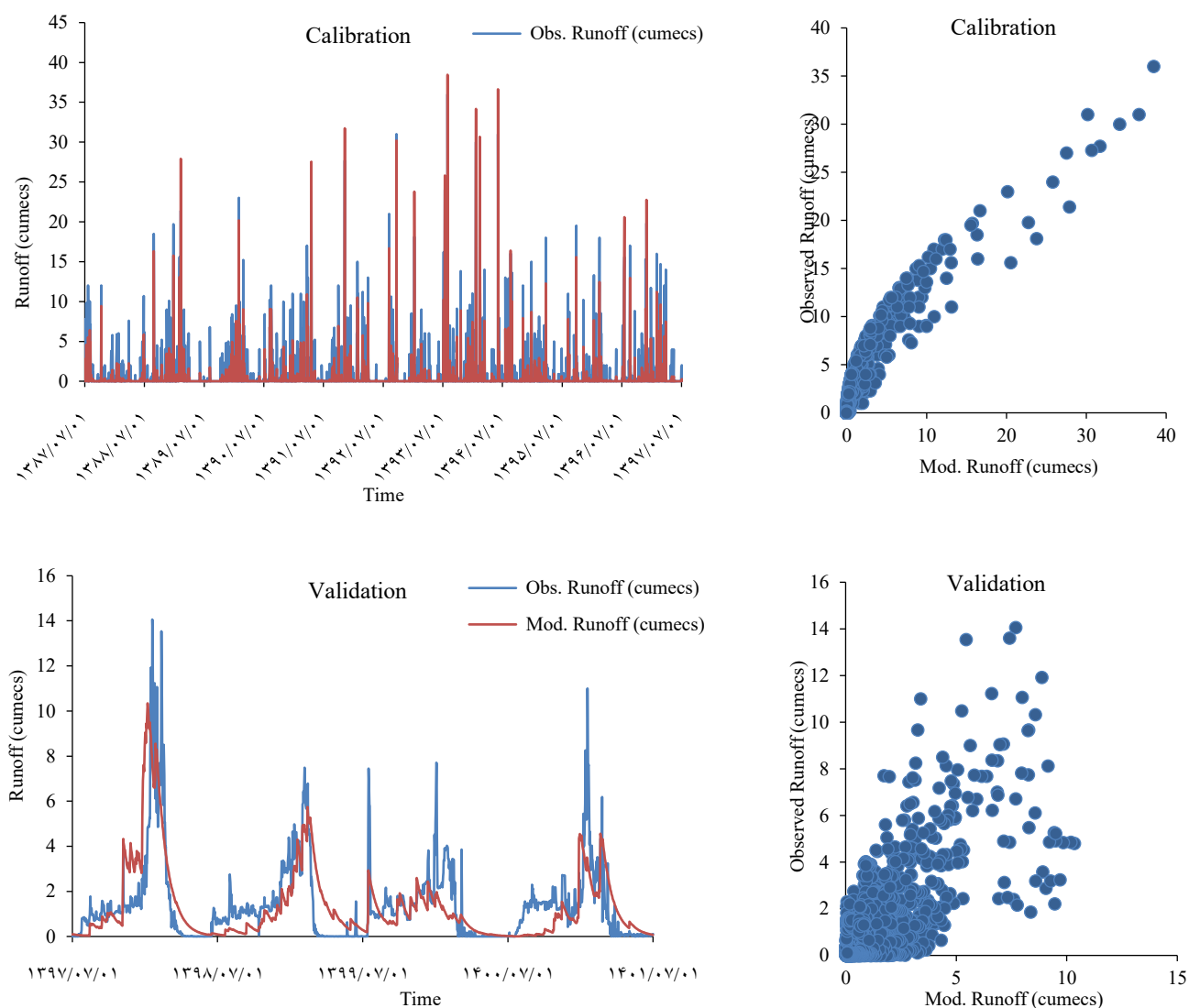
پس از ارزیابی کارایی مدل IHACRES در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، سری‌های زمانی دما و بارش حاصل از خروجی مدل HadGEM3-GC31-LL تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 برای دوره آینده (۱۴۰۴-۱۴۱۸) به مدل IHACRES معرفی شد تا رواناب دوره آتی تولید شود. در اثر تغییرات اقلیمی، رواناب ورودی به سد ستارخان در دوره آتی نسبت به دوره پایه افت قابل‌ملاحظه‌ای خواهد داشت. در تحقیق مشابهی، غلامی و همکاران (۲۰۲۳) در حوضه قره‌سو، افزایش حدود ۱ درصدی تا کاهش ۱۰ درصدی تحت سناریو RCP4.5 و کاهش ۷/۸ تا ۱/۹ درصدی تحت سناریو RCP8.5 در رواناب سالانه این حوضه را پیش‌بینی کردند. نتایج تحقیق شاهی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۲) نیز حاکی از کاهش رواناب ورودی به سد مخمل‌کوه واقع در استان لرستان در آینده تحت همه سناریوهای اقلیمی بود که بیش‌ترین و کمترین کاهش رواناب به میزان ۹۹٪ و ۲۲/۱۵٪ به‌ترتیب تحت سناریوهای SSP5-8.5 و SSP3-7.0 برآورد شد. کاهش رواناب ورودی به مخازن سدها می‌تواند عملکرد مخزن را به‌شدت تحت تاثیر قرار دهد و بخش‌های مختلف از شرب تا کشاورزی و صنعت منطقه را دچار مشکل کند. مقابله با چنین رویدادهایی نیازمند پیش‌بینی‌های مدیریتی و اتخاذ تصمیمات مناسب در این زمینه است.

افزایش دمای پیش‌بینی شده برای آینده می‌تواند بر منابع آبی منطقه تاثیر بسیار ناگواری داشته باشد و این حوضه را از لحاظ تامین آب بخش‌های مختلف شامل شرب، صنعت و کشاورزی به‌شدت دچار مشکل کند. افزایش دما می‌تواند موجب افزایش نیاز شرب و افزایش نیاز آبی در گیاهان و محصولات کشاورزی شده و در نتیجه، باعث کاهش عملکرد محصولات کشاورزی به دلیل تنش گرمایی و کمبود آب شود. از طرفی، افزایش دما می‌تواند باعث گسترش آفات و بیماری‌های گیاهی شود که به نوبه خود بر تولید محصولات کشاورزی تاثیر منفی می‌گذارد. افزایش دما می‌تواند منجر به افزایش موارد گرم‌زدگی، کم‌آبی و سایر بیماری‌های مرتبط با گرما شود که این امر می‌تواند هزینه‌های بهداشتی را افزایش دهد. افزایش دما با تغییر در الگوی جریان رودخانه‌ها، از طریق ذوب سریع‌تر برف‌ها می‌تواند باعث تغییر در الگوی جریان رودخانه‌ها و کاهش آب قابل دسترس در فصل‌های خشک شود.

ارزیابی مدل IHACRES در شبیه‌سازی بارش-رواناب

در تحقیق حاضر از کل دوره آماری پایه (۱۴۰۱-۱۳۸۷)، دوره ۱۰ ساله اول (دوره ۱۳۹۷-۱۳۸۷) در مقیاس روزانه به‌عنوان دوره واسنجی و دوره ۴ ساله انتهایی (دوره ۱۳۹۷-۱۴۰۱) به‌عنوان دوره صحت‌سنجی مدل IHACRES در نظر گرفته شد. پراکنش رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل IHACRES در دوره واسنجی نسبتاً مناسب است و نشان از کارایی قابل‌قبول این مدل دارد، هر چند که در برخی از مواقع، رواناب مشاهداتی را بیشتر یا کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد کرده است. مدل IHACRES در دوره صحت‌سنجی نیز در برآورد رواناب در برخی از رویدادهای کمینه و بیشینه همانند دوره واسنجی دچار خطا شده، ولی در کل عملکرد قابل‌قبولی از خود نشان داده است (شکل ۵).

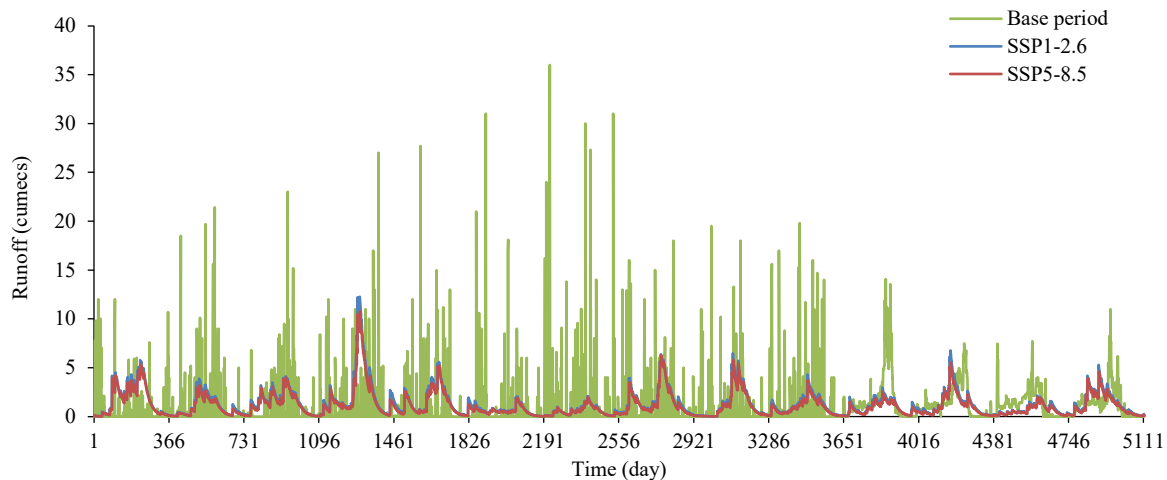
برای ارزیابی آماری و کمی نتایج مدل IHACRES در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی، از معیارهای آماری استفاده شد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که مقادیر R^2 ، RMSE و MAE برای مدل IHACRES در دوره واسنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۸۳، ۱/۱۷



شکل ۵- سری زمانی و پراکنش رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل IHACRES در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی.

جدول ۳- نتایج ارزیابی عملکرد مدل IHACRES در شبیه‌سازی رواناب در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی.

Time Period	R ²	RMSE (cumeecs)	MAE (cumeecs)
Calibration	0.83	1.17	0.41
Validation	0.51	1.35	0.90



شکل ۶- سری زمانی رواناب مشاهداتی دوره پایه (۱۴۰۱-۱۳۸۷) و پیش‌بینی‌شده برای دوره آتی (۱۴۱۸-۱۴۰۴).

اقلیمی، ممکن است بارش‌ها به صورت پراکنده‌تر یا با شدت کمتر اما در دفعات بیشتر رخ دهند. بارش‌های کوتاه‌مدت و شدید معمولاً رواناب بیشتری تولید می‌کنند، اما بارش‌های طولانی‌تر با شدت کمتر، ممکن است بیشتر به نفوذ در خاک یا تبخیر منجر شوند، که باعث کاهش بیشینه رواناب می‌شود. زیرا با افزایش دما، نرخ تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد. کم‌برآوردی مقادیر بیشینه یکی از نقاط ضعف مدل IHACRES است که در تحقیقات دیگر نیز به آن اشاره شده است (گودرزی و همکاران ۲۰۲۴). این مساله نشان از چالش‌های نگران‌کننده در زمینه منابع آبی منطقه و تامین نیازهای آبی در حوزه‌های مختلف از جمله شرب و کشاورزی است.

متوسط رواناب ورودی به مخزن سد ستارخان در دوره پایه ۱/۳۹ مترمکعب بر ثانیه بوده که در دوره آتی با ۷ و ۱۹ درصد کاهش به ترتیب تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ۱/۳۰ و ۱/۱۳ مترمکعب بر ثانیه افت خواهد کرد. نکته بسیار مهم، کاهش قابل‌ملاحظه در بیشینه رواناب ورودی به مخزن سد ستارخان است. بیشینه رواناب ورودی از ۲۶/۴۳ مترمکعب بر ثانیه در دوره پایه، با کاهش بیش از ۵۰ درصدی، تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب به ۱۲/۲۸ مترمکعب بر ثانیه (۵۴٪ درصد) و ۱۰/۷۵ مترمکعب بر ثانیه (۵۹٪ درصد) کاهش خواهد یافت (جدول ۴). کاهش بیشینه رواناب با وجود افزایش بارش در یک حوضه ممکن است به دلیل تعامل پیچیده عوامل اقلیمی، هیدرولوژیکی و ویژگی‌های حوضه رخ دهد. با تغییرات

جدول ۴- مشخصات آماری رواناب سالانه در دوره پایه (۱۴۰۱-۱۳۸۷) و پیش‌بینی‌شده برای دوره آتی (۱۴۱۸-۱۴۰۴).

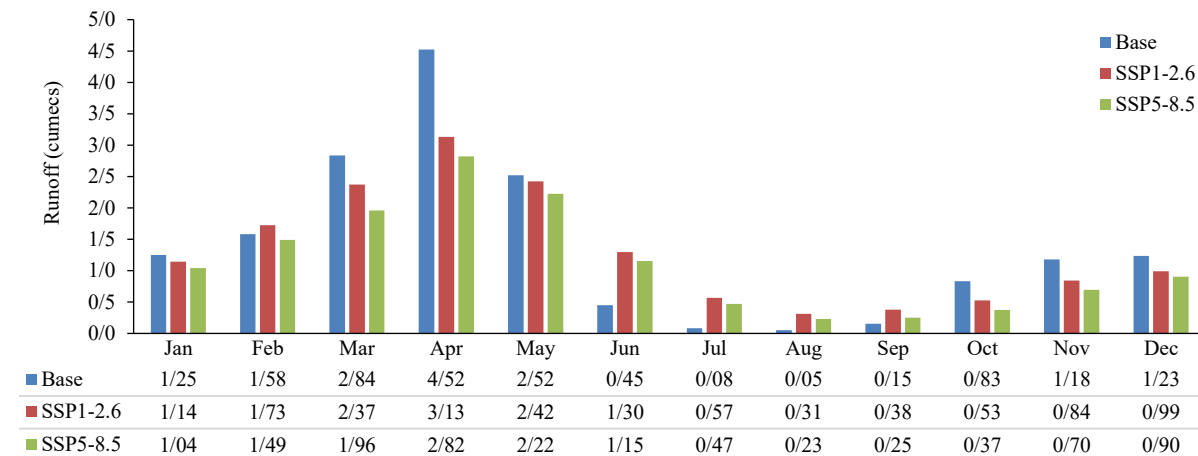
Statistic	Base	SSP1-2.6	SSP5-8.5
Mean (cumees)	1.39	1.30	1.13
Minimum (cumees)	0	0	0
Maximum (cumees)	26.43	12.28	10.75

April خواهد بود، به طوری که متوسط رواناب ورودی در این ماه از ۴/۵۲ مترمکعب بر ثانیه در دوره پایه، به ۳/۱۳

در بیشتر ماه‌ها، رواناب ورودی در آینده نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. بیشترین میزان کاهش در ماه

دیگر نکات قابل اشاره، بیشترین کاهش رواناب تحت سناریو SSP5-8.5 در مقایسه با سناریو SSP1-2.6 است. در ماه‌هایی که تحت هر دو سناریو افزایش رواناب پیش‌بینی شده نیز این افزایش تحت سناریو SSP5-8.5 کمتر از سناریو SSP1-2.6 خواهد بود (شکل ۷). بنابراین توجه به این امر و پیش‌برد اقداماتی که در زمینه اجرای سیاست‌های سناریو SSP1-2.6 باشد، مطلوب‌تر از سناریو SSP5-8.5 به‌نظر می‌رسد. مطابق نتایج شاهی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۲) نیز بیشترین کاهش رواناب ورودی به سد مخزنی مخمل‌کوه در استان لرستان تحت سناریو SSP5-8.5 برآورد شد.

و ۲/۸۲ مترمکعب بر ثانیه به‌ترتیب تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 افت خواهد کرد. افزایش رواناب در ماه‌های June، July، August و September تحت هر دو سناریو و در ماه February فقط تحت سناریو SSP1-2.6 اتفاق خواهد افتاد. البته با توجه به شرایط اقلیمی منطقه و توزیع بارش‌ها در ماه‌های مختلف (شکل ۲)، این ماه‌ها کمترین میزان بارش و بیشترین میزان دما را دارند و در نتیجه، کمترین رواناب در این ماه‌ها جریان دارد. بنابراین، افزایش رواناب در این ماه‌ها نمی‌تواند تاثیر آنچنان زیادی بر بهبود منابع آب‌های سطحی منطقه داشته باشد و کاهش رواناب شدید در ماه‌های پرآب مثل March، April و May را جبران کند. از



شکل ۷- مقایسه تغییرات رواناب ماهانه مشاهداتی دوره پایه (۱۴۰۱-۱۳۸۷) و پیش‌بینی‌شده برای دوره آتی (۱۴۱۸-۱۴۰۴).

عدم قطعیت در سناریوهای تغییر اقلیم

بررسی عدم قطعیت در سناریوهای تغییر اقلیم موضوعی کلیدی در مطالعات اقلیمی است، زیرا پیش‌بینی‌های اقلیمی به دلیل پیچیدگی سیستم‌های اقلیمی و تنوع در عوامل انسانی و طبیعی با عدم قطعیت‌های زیادی همراه هستند. در تحقیق حاضر، از رویکرد تحلیل چندسناریویی (سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5) برای در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها استفاده شد. این دو سناریو از چارچوب‌های استاندارد IPCC (گزارش‌های ارزیابی تغییر اقلیم) هستند که به‌ترتیب نشان‌دهنده آینده‌ای با

انتشار کم گازهای گلخانه‌ای (پایداری و اقدامات کاهشی قوی) و آینده‌ای با انتشار بالا (عدم کنترل انتشار) هستند. مقایسه خروجی سناریوها با هدف ارزیابی عدم قطعیت آنها، حاکی از افزایش بارش و دما در هر دو سناریو است، اما کاهش رواناب به دلیل افزایش تبخیر و تغییرات الگوی بارش، به‌ویژه در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5)، قابل توجه است (جدول ۵). افزایش بارش در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه (به‌ترتیب افزایش ۸/۹٪ و ۱۶/۷٪ تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5) نشان‌دهنده تأثیر گرمایش جهانی بر چرخه هیدرولوژیکی است. افزایش

می‌شود. بدین ترتیب با آگاهی از عدم قطعیت موجود در سناریوهای اقلیمی و بازه تاثیرات آنها، می‌توان رویکرد بهتری جهت پیش‌برد سناریوی مناسب‌تر در نظر گرفت.

جدول ۵- مقایسه مجموع بارش، دماهای کمینه و بیشینه و متوسط رواناب تحت سناریوهای مختلف در مقیاس سالانه.

Variable	Base	SSP1-2.6	SSP5-8.5
Rainfall (mm)	282	307	329
Minimum Temperature (°C)	5.69	6.68	6.75
Maximum Temperature (°C)	17.41	19	18.91
Runoff (cumecs)	1.39	1.30	1.13

نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر جریان ورودی به مخزن سد ستارخان اهر در حوضه آبریز اهرچای در استان آذربایجان شرقی انجام شد. بدین منظور از داده‌های اقلیمی ایستگاه همدیدی اهر و داده‌های رواناب ایستگاه هیدرومتری واقع در ورودی سد ستارخان در دوره زمانی ۱۴۰۱-۱۳۸۷ استفاده شد. مدل بارش-رواناب IHACRES برای برآورد رواناب در دوره پایه و آینده و خروجی مدل HadGEM3-GC31-LL تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 از گزارش CMIP6 برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی آینده به‌کار گرفته شد.

نتایج حاکی از آن بود که میزان بارش در اکثر ماه‌ها و تحت هر دو سناریو افزایش خواهد یافت. هم‌زمان افزایش دمای کمینه و بیشینه در اکثر ماه‌ها رخ خواهد داد. بررسی کارایی مدل IHACRES نشان داد که این مدل با وجود اینکه در برآورد برخی از رواناب‌های کمینه و بیشینه خطا دارد، ولی به‌طور کلی عملکرد آن نسبتاً قابل قبول است. تفاوت در برآورد مقادیر رواناب در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی می‌تواند به تفاوت در الگوی رواناب در این دوره‌ها یا تغییرات الگوی بارش و دما با گذشت زمان مرتبط باشد. مقایسه سری زمانی رواناب در دوره پایه و آتی تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 نشان داد که

بیشتر در SSP5-8.5 می‌تواند به دلیل شدت بالاتر رویدادهای بارشی و تغییرات در الگوهای جوی در سناریوی بدبینانه باشد. این تفاوت نشان‌دهنده عدم قطعیت در پیش‌بینی بارش است که به شدت به سناریوی انتشار بستگی دارد. افزایش دمای کمینه در هر دو سناریو نشان‌دهنده گرمایش جهانی است، اما تفاوت اندک بین دو سناریو (0.07°C) حاکی از آن است که حتی در سناریوی خوش‌بینانه، گرمایش قابل‌توجهی رخ خواهد داد. نکته جالب، افزایش بیشتر دمای بیشینه در SSP1-2.6 نسبت به SSP5-8.5 است. این نتیجه غیرمنتظره می‌تواند به دلیل ویژگی‌های خاص منطقه‌ای یا اثرات سایر متغیرها مانند (افزایش بارش) باشد. البته همانند دمای کمینه، تفاوت اندک بین دو سناریو (0.09°C) نشان‌دهنده آن است که حتی در سناریوی خوش‌بینانه، گرمایش قابل‌توجهی رخ خواهد داد. تفاوت اندک در افزایش دماهای کمینه و بیشینه تحت سناریوهای مختلف، حاکی از حساسیت کمتر دما به سناریوهای مختلف در مقایسه با بارش است و عدم قطعیت کمتر این سناریوها در پیش‌بینی دما را نشان می‌دهد. برخلاف افزایش بارش، رواناب در هر دو سناریو کاهش خواهد یافت. این کاهش می‌تواند به دلیل افزایش تبخیر ناشی از گرمایش (به‌ویژه در دماهای بالاتر) و تغییرات در الگوهای بارش (مثلاً بارش‌های شدیدتر اما کوتاه‌تر) باشد. کاهش بیشتر رواناب تحت سناریو SSP5-8.5 نشان‌دهنده تأثیر شدیدتر گرمایش در این سناریو بر چرخه هیدرولوژیکی است. انتخاب این دو سناریو به‌خوبی طیف وسیعی از احتمالات آینده را پوشش می‌دهد و امکان مقایسه اثرات متغیرهای اقلیمی (بارش، دما) و هیدرولوژیکی (رواناب) را فراهم می‌کند.

تفاوت در ساختار سناریوها و فرضیات آن‌ها، شامل تفاوت در فرضیات اقتصادی، اجتماعی و تکنولوژیکی در SSPها، عامل وجود عدم قطعیت در خروجی آن‌ها می‌شود و استفاده از رویکرد تحلیل چندسناریویی، موجب پیش‌بینی بازه‌ای از مقادیر به‌جای یک مقدار ثابت برای متغیرها

داده‌های اقلیمی شامل بارش، دما و ساعات آفتابی نیاز بود، اما به دلیل نقص در ثبت برخی پارامترها در ایستگاه هیدرومتری، از داده‌های ایستگاه همدیدی اهر استفاده شد. دقت نتایج به کیفیت داده‌ها بستگی دارد و هرگونه نادرستی می‌تواند بر قابلیت اطمینان نتایج تأثیر بگذارد. همچنین، مدل IHACRES با وجود نتایج قابل قبول، به دلیل محدودیت‌های ذاتی در شبیه‌سازی دقیق برخی از فرآیندهای هیدرولوژیکی، ممکن است نتواند پیچیدگی‌های هیدرولوژی حوضه را به‌طور کامل شبیه‌سازی کند. فرضیات سناریوهای اقلیمی نیز ممکن است شرایط واقعی را به‌دقت منعکس نکنند. این پژوهش داده‌های تاریخی ۱۳۸۷-۱۴۰۱ را با پیش‌بینی‌های ۱۴۰۴-۱۴۱۸ مقایسه می‌کند که این بازه زمانی نسبتاً کوتاه برای پیش‌بینی‌های آینده ممکن است نتواند تغییرات اقلیمی بلندمدت را به تصویر بکشد. همچنین، تأثیر تغییرات انسانی بر رواناب در این پژوهش بررسی نشده است.

کاهش رواناب ورودی به مخازن سدها می‌تواند عملکرد مخزن را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد و بخش‌های مختلف منطقه شامل شرب، کشاورزی و صنعت با چالش‌های نگران‌کننده همراه شود. در کل، مقابله با چنین چالش‌های احتمالی، نیازمند پیش‌بینی‌های مدیریتی و اتخاذ تصمیمات مناسب در این زمینه است.

منابع مورد استفاده

- Alioghli S, and Sattari MT, 2024. Evaluation of water resources allocation scenarios of Mahabad basin under the influence of climate change using the WEAP model. *Water and Soil Science*, 34(3), 39-50. <https://doi.org/10.22034/ws.2024.58215.2533> [In Persian].
- Allahverdipour P, and Sattari MT, 2023. Comparing the performance of the multiple linear regression classic method and modern data mining methods in annual rainfall modeling (Case study: Ahvaz city). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 125-142. <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11337.1120> [In Persian].
- Allahverdipour P, Ghorbani MA, and Asadi, E, 2024. Evaluating the effects of climate change on the climatic classification in Iran. *Water and Soil*

رواناب ورودی به سد ستارخان در دوره آتی نسبت به دوره پایه افت قابل‌ملاحظه‌ای خواهد داشت. کاهش رواناب ورودی هم در مقادیر متوسط رواناب و هم در مقادیر بیشینه رواناب ورودی به مخزن این سد اتفاق خواهد افتاد، که این مساله نشان از چالش‌های نگران‌کننده در زمینه منابع آبی منطقه و تامین نیازهای آبی در دوره‌های زمانی مختلف آینده است.

نتایج این تحقیق از جنبه کاربردی در مدیریت منابع آب و کشاورزی کاربردهای کلیدی دارد. در مدیریت آب، این پیش‌بینی‌ها تخصیص بهینه آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت را تسهیل می‌کنند، به‌ویژه در ایران که با چالش کم‌آبی مواجه است. تنظیم رهاسازی سدها، ذخیره‌سازی اضطراری آب و کاهش ریسک کمبود آب از طریق پیش‌بینی تغییرات رواناب (مثلاً کاهش بیشینه که در این تحقیق برآورد شد) امکان‌پذیر است. در کشاورزی، این پیش‌بینی‌ها زمان‌بندی کشت، انتخاب محصولات و ارقام گیاهی کم‌آبر یا مقاوم به خشکسالی و توسعه آبیاری هوشمند را بهبود می‌بخشند. در مناطق با افزایش بارش، کشت دیم تقویت شده و در مناطق با کاهش رواناب، تغییر الگوی کشت به محصولات کم‌آبر ترویج می‌شود.

از محدودیت‌های قابل‌اشاره در این پژوهش، صحت و کیفیت داده‌های مورد استفاده است. برای این تحقیق به

Management and Modeling, 4(3), 95-112. <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12755.1271> [In Persian].

Allahverdipour P, and Sattari MT, 2024. Investigating the maximum wind speed and wind direction of synoptic stations in the east of Lake Urmia. *Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 197-221. <https://doi.org/10.22067/geoch.2024.86654.1464> [In Persian].

Ashofteh PS, Haddad OB, and Mariño, MA, 2013. Climate change impact on reservoir performance indexes in agricultural water supply. *Irrigation and Drainage Engineering*, 139(2), 85-97. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000496](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000496)

Babolhekami A, Gholami Sefidkouhi MA, and Emadi A,

2020. The impact of climate change on reference evapotranspiration in Mazandaran province. *Soil and Water Research*, 51(2), 387-401. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.285571.668266> [In Persian].
- Croke B, and Jakeman A, 2008. Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semi-arid regions. In: *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*. Cambridge University Press, pp. 41-48. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511535734.005>
- Dinpashoh Y, and Allahverdi-pour P, 2025. Monitoring and predicting changes in reference evapotranspiration in the Moghan Plain according to CMIP6 of IPCC. *Environment and Water Engineering*, 11(1), 47-56. <https://doi.org/10.22034/ewe.2024.466037.1947>
- Frame B, Lawrence J, Ausseil AG, Reisinger A, and Daigneault A, 2018. Adapting global shared socio-economic pathways for national and local scenarios. *Climate Risk Management*, 21, 39-51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crm.2018.05.001>
- Gholami H, Lotfifard M, Ashrafi SM, Biazar SM, and Singh VP, 2023. Multi-GCM ensemble model for reduction of uncertainty in runoff projections. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(3), 953-964. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02311-1>
- Ghorbani Dailari M, Darbandi S, Asadi E, and Samadian M, 2021. Simulation of parameters affecting the river flow trend using the IHACRES rainfall-runoff model in future periods (case study: Zolachai River). *Ecologyhydrology*, 8(1), 177-193. <https://doi.org/10.22059/ije.2021.311773.1394> [In Persian].
- Goodarzi MR, Abedi MJ, and Niazkar M, 2024. Effects of climate change on streamflow in the Dez Basin of Iran using the IHACRES model based on the CMIP6 model. *Water and Climate Change*, 15(6), 2595-2611. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.571>
- Hafezparast M, and Marabi S, 2021. Prediction of discharge using artificial neural network and IHACRES models due to climate change. *Renewable Energy and Environment*, 8(3), 75-85. <https://doi.org/10.30501/jree.2021.257941.1162>
- Jakeman AJ, and Hornberger GM, 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model?. *Water Resources Research*, 29(8), 2637-2649. <http://dx.doi.org/10.1029/93WR00877>
- Lesani S, Zahera SS, Hassanzadeh E, Fuamba M, and Sharifinejad A, 2024. Multi-model assessment of climate change impacts on the streamflow conditions in the Kasai River Basin, Central Africa. *Hydrology*, 11(12), 207. <https://doi.org/10.3390/hydrology11120207>
- Mamoon WB, Jahan N, Abdullah F, and Rahman A, 2024. Modeling the impact of climate change on streamflow in the Meghna River Basin: An analysis using SWAT and CMIP6 scenarios. *Water*, 16(8), 1117. <https://doi.org/10.3390/w16081117>
- Mohammadi M, and Allahverdi-pour P, 2024. Uncertainty analysis of artificial neural network (ANN) and support vector machine (SVM) models in predicting monthly river flow (Case study: Ghezeloan River). *Water and Soil Management and Modeling*, 4(2), 311-326. <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12702.1267> [In Persian].
- Motiee H, Shirkhodae F, and Motiee A, 2020. Prediction of prediction of climate change impacts on Kharkeh Dam reservoir inflows with using of CMIP5-RCP scenarios. *Journal of Dam and Hydroelectric Powerplant*, 7(25), 51-38. <http://dori.net/dor/20.1001.1.23225882.1399.7.25.5.5> [In Persian].
- Nateghi S, Rafiiei sardooi E, Azareh A, and Soleimani Sardoo F, 2022. Predicting future changes in potential evapotranspiration based on RCP scenarios in Halilrood Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 13(4), 769-780. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.353294.1874> [In Persian].
- Nikoufar B and Nourani V, 2025. Determining the optimal operation parameters of Alavian dam using the combination of genetic and particle swarm algorithms. *Hydraulics and Water Science*, 34(4), 89-110. <https://doi.org/10.22034/hws.2024.18918> [In Persian].
- Olsson T, Kämäräinen M, Santos D, Seitola T, Tuomenvirta H, Haavisto R, and Lavado-Casimiro W, 2017. Downscaling climate projections for the Peruvian coastal Chancay-Huaral Basin to support river discharge modeling with WEAP. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, 26-42. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.05.011>
- Ouyang F, Zhu Y, Fu G, Lü H, Zhang A, Yu Z, and Chen X, 2015. Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Huangnizhuang catchment. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29, 1781-1795. <https://doi.org/10.1007/s00477-014-1018-9>
- Rahimi B, and Hafezparast M, 2022. Runoff forecast with SVR model in climate scenarios and estimation of water demands due to changes in WEAP model. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 1(1), 75-90. <https://doi.org/10.22034/nawee.2022.154268> [In Persian].
- Racsko P, Szeidl L, and Semenov M, 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling*, 57(1-2), 27-41.

- [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(91\)90053-4](https://doi.org/10.1016/0304-3800(91)90053-4)
Sattari MT, Bagheri R, Shirini K, and Allahverdipour P, 2024. Modeling daily and monthly rainfall in Tabriz using ensemble learning models and decision tree regression. *Climate Change Research*, 5(18), 31-48. <https://doi.org/10.30488/ccr.2024.433394.1192> [In Persian].
- Semenov MA, Brooks RJ, Barrow EM, and Richardson CW, 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, 10(2), 95-107. <https://doi.org/10.3354/cr010095>
- Shahinejad B, Yonesi H, Kakavand A, and Yousefi Sohzabi H, 2023. Evaluation of climate change effects on the entering runoff the Makhmalkoh Dam using the IHACRES model. *Water and Irrigation Management*, 13(3), 735-754. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22516298.1402.13.3.9.5> [In Persian].
- Wilby RL, and 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), W02419. <https://doi.org/10.1029/2005WR004065>.
- Yesubabu V, Varughese A, and Aravind P, 2024. Application of the CMIP6 approach for determination of climate change impact on inflow to Malampuzha Reservoir, India. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(12), 314-24. <https://doi.org/10.9734/ijec/2024/v14i124627>.