

Research Paper

Simulation of Zayandehroud dam reservoir input using IHACRES model with considering the fifth climate change report

Aliakbar Solgi¹, Ali Khoshfetrat^{2*}, Parisa Pourpashang³

1. MSc Student, Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2. Assistant Prof., Department of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

3. Graduated student, Civil Engineering-Water and Hydraulic Structures, Faculty of Engineering University of Qom, Qom, Iran

Received:

Revised:

Accepted:

Use your device to scan and read the article online



DOI:

Abstract

Introduction: With the increase in population, urbanization, industrialization, and the impact of climate change, water scarcity and related challenges in water resources have emerged. Predicting variables such as temperature, precipitation, and runoff in the future has become essential, and there is a widespread focus on proper water resource management

Methods: This research addresses the effects of climate change on water resources by generating a climate scenario for future years. Changes in the inflow to the Zayandehroud reservoir were examined, considering the baseline period (1981-2010) and the climate change period (2040-2069) using the outputs of the IPCC fifth model under *RCP 2.6* and *RCP 8.5* considered as the most optimistic and pessimistic emission scenarios. The runoff during this period was simulated using a *IHACRES* approach

Findings: The research findings indicated Among the various models of the fifth report, the model *EC-EARTH* simulating precipitation and the model *bcc-csm1-1-m* simulating temperature demonstrated the best performance for the Zayandehroud basin compared to the observational period. Precipitation in the *RCP 2.6* scenario (2040-2069) showed a fluctuation between -42.73% to 40% and in the *RCP 8.5* scenario changed from -74.83% to 15.31% compared to the baseline period. Results demonstrated a 19.72% reduction in precipitation in the *RCP 8.5* scenario compared to the *RCP 2.6* scenario in the period (2069-2040). Additionally, temperature in the *RCP 2.6* scenario (2040-2069) experienced changes between a -5.24°C to 9.61°C and in the *RCP 8.5* changed from -2.51°C to 11.92°C compared to the baseline period. The long-term average temperature during the period (2069-2040) showed an increase of 12.78°C in the *RCP 8.5* scenario compared to the *RCP 2.6* scenario. The impacts of these changes on the inflow into the reservoir were simulated using a *IHACRES* precipitation-

runoff model. The results indicated a 10.74% decrease in runoff in the RCP 2.6 scenario compared to the baseline period and a 37.43% decrease in the RCP 8.5 scenario in the climate change period. Additionally, runoff decreased by 29.9% in the RCP 8.5 scenario compared to the RCP 2.6 scenario in the change period.

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی رواناب ورودی به مخزن سد زاینده‌رود با استفاده از گزارش پنجم تغییر اقلیم

علی اکبر سلگی¹، علی خوش فطرت^{2*}، پریسا پورپشنگ³

1. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

2. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

3. دانش آموخته کارشناسی ارشد، رشته آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

چکیده

مقدمه:

با افزایش جمعیت، رشد شهرنشینی و صنعتی شدن و با توجه به تغییر اقلیم به‌وجودآمده و به‌تبع آن کمبود آب و مشکلات به‌وجودآمده در منابع آب، پیش‌بینی متغیرهایی مانند دما، بارندگی و رواناب در آینده امری ضروری محسوب و توجه همگان به مدیریت صحیح منابع آب معطوف شده است.

روش:

در این پژوهش اثرات تغییر اقلیم بر جریان ورودی به مخزن سد زاینده‌رود با در نظر گرفتن بازه پایه (1981-2010) و بازه تغییر اقلیم (2040-2069) با استفاده از خروجی‌های مدل گزارش پنجم IPCC تحت سناریوهای انتشار RCP 2.6 و RCP 8.5 به عنوان خوش‌بینانه‌ترین و بدبینانه‌ترین سناریوها بررسی گردید. میزان رواناب در این بازه با استفاده از مدل IHACRES شبیه‌سازی شده است.

یافته‌ها

یافته‌های پژوهش نشان داده از بین مدل‌های مختلف گزارش پنجم برای حوضه زاینده‌رود مدل EC-EARTH در پیش‌بینی بارندگی و مدل bcc-csm1-1-m برای دما بهترین عملکرد را نسبت به دوره مشاهداتی داشت. بارندگی در سناریوی RCP 2.6 در بازه زمانی

تاریخ

دریافت:

تاریخ داوری:

تاریخ

پذیرش:

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

واژه‌های کلیدی:

تغییر اقلیم، شبیه‌سازی رواناب، مخزن سد زاینده‌رود، مدل IHACRES. (2040-2069) نسبت به بازه پایه بین 42/73- تا 40 درصد و در سناریوی RCP 8.5 بین 74/83- تا 15/31 درصد تغییر داشته است. همچنین نتایج نشان دهنده کاهش 19/72 درصدی بارندگی در سناریوی RCP 8.5 نسبت به سناریوی RCP 2.6 در بازه زمانی (2040-2069) است. همچنین دما در سناریوی RCP 2.6 در بازه زمانی (2040-2069) نسبت به بازه پایه بین 5/24- تا 9/61 درجه سانتی‌گراد و در سناریوی RCP 8.5 بین 2/56- تا 11/92 درجه سانتی‌گراد تغییر داشته است. میانگین بلند مدت دما در بازه زمانی (2040-2069)، نشان دهنده افزایش 12/78 درجه سانتی‌گرادی دما در سناریوی RCP 8.5 نسبت به سناریوی RCP 2.6 است. تأثیرات این تغییرات بر رواناب ورودی به مخزن با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان داده رواناب در بازه تغییر اقلیم در سناریوی RCP 2.6، 10/74 درصد نسبت به بازه پایه کاهش و در سناریوی RCP 8.5، 37/43 درصد نسبت به بازه پایه کاهش خواهد داشت. رواناب در سناریوی RCP 8.5 نسبت به سناریوی RCP 2.6، 29/9 درصد کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری:

نتایج این تحقیق نشان داده که گزارش پنجم IPCC به همراه مدل بارش-رواناب IHACRES میتواند به عنوان ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی رواناب تحت شرایط تغییر اقلیم بکار رود.

ویدئو آپلود نشده

می‌گذارد (1). گرم شدن زمین، افزایش دما و کاهش بارندگی از جمله تغییرات اقلیمی مهم ناشی از تغییر اقلیم است که حیات بشر و موجودات طبیعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. اگرچه تغییر اقلیم ناشی از عوامل مختلف طبیعی و غیرطبیعی است، اما مطالعات مختلف ثابت نموده است که تغییرات ناشی از عوامل غیرطبیعی که در نتیجه دخالت انسان ایجاد شده‌اند، بیشترین نقش را در تغییر اقلیم جهانی طی سال‌های اخیر ایفا کرده‌اند (2).

پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با توجه به وجود عدم قطعیت‌ها و ابهامات نسبی چه در فیزیک حاکم بر اقلیم و چه در شرایط و الگوهای توسعه بشری در آینده دارای عدم قطعیت بالایی می‌باشد، از این رو شاید نتوان پیش‌بینی دقیقی از متغیرهای اقلیمی در آینده ارائه داد. در این شرایط تغییرات اقلیمی محتمل و در عین حال منطقی در آینده در قالب سناریو بیان می‌گردند. یک سناریو تغییر اقلیم برآوردی فرضی و محتمل و از نظر داخلی سازگار با شرایط اقلیم است.

در تحقیقات اقلیمی از سناریوهای انتشار برای مشخص کردن میزان تأثیر انسان‌ها بر آینده آب و هوای کره زمین، با توجه به فاکتورهای عدم قطعیتی چون رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و توسعه تکنولوژی‌های روز استفاده شده است.

هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC¹) در گزارش ارزیابی پنجم خود از RCP ها به عنوان سناریوهای جدید بهره گرفته است. سناریوهای جدید انتشار دارای چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 6.0 و RCP 8.5 می‌باشند که بر اساس میزان واداشت تابشی آن‌ها در سال 2100 نام‌گذاری شده‌اند. (3) و (4).

افزایش دما، ذوب یخچال‌ها، بالا آمدن سطح آب دریاها و تغییر در الگوی زمانی بارش از تأثیرات تغییر اقلیم بوده که زندگی بشر را تحت تأثیر قرار داده و از این رو پیش‌بینی تغییرات اقلیمی حائز اهمیت است.

نتایج یک تحقیق در رابطه با تأثیرات تغییر اقلیم بر تقاضا و بهره‌وری آب کشاورزی در شبکه آبیاری زاینده‌رود با استفاده از مدل‌های AOGCM، از گزارش سوم IPCC، سناریوی انتشار A2 اثرات ناشی از سناریوی اقلیمی نشان داد که در دوره‌های آینده، دما به ترتیب 3 تا 8/1 درجه سانتی‌گراد، 3/1 تا 8/2 درجه سانتی‌گراد، 3 تا 6/9 درجه سانتی‌گراد و 2/3 تا 6/5 درجه سانتی‌گراد در چهار فصل (بهار، تابستان، پاییز و زمستان) در مقایسه با بازه پایه (1971 تا 2000) به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (5).

مقدمه

امروزه با توجه به مشکلات ناشی از کمبود آب و کاهش کمی و کیفی آن، بهره‌برداری از منابع آب به یکی از نگرانی‌های اصلی مردم جهان تبدیل شده است. با افزایش جمعیت، رشد شهرنشینی و صنعتی شدن، مدیریت منابع آب در دسترس، اهمیت بیش‌تری یافته است. از سوی دیگر، پدیده تغییر اقلیم که در واقع تغییر در میانگین متغیرهای اقلیمی و همچنین مقادیر حدی آن نسبت به مقادیر متناظر گذشته بر اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای بوده، مدام در حال افزایش است. این پدیده بر منابع آب تأثیرات بسیاری خواهد داشت و از آنجا که کشور ما در عرض‌های جغرافیایی پایین قرار دارد به شدت تحت تأثیر این پدیده می‌باشد.

تغییر اقلیم پدیده‌ای است که در نتیجه عامل‌هایی هم‌چون فرآیندهای دینامیکی زمین یا عامل‌های بیرونی هم‌چون تغییرات در شدت تابش آفتاب یا فعالیت‌های انسانی رخ می‌دهد. به‌طور کلی تغییر اقلیم بر الگوهای زمانی و مکانی دما و بارندگی، تأثیر گذاشته و پیامدهای مهمی در پدیده‌های هیدرولوژیکی برجای

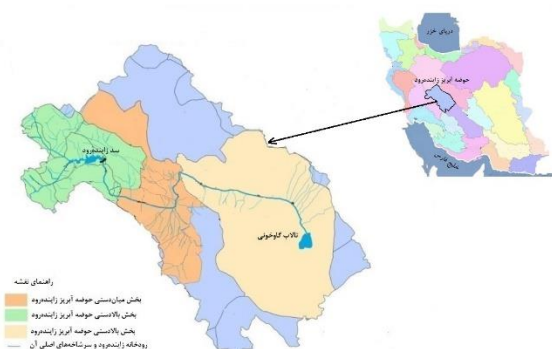
¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

در ثانیه (33/34 درصد) تحت سناریوی RCP 2.6، 1/17 مترمکعب در ثانیه (33/67 درصد) تحت سناریوی RCP 4.5 و 1/37 متر مکعب در ثانیه (39/42 درصد) تحت سناریوی RCP 8.5 نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت (9).

از آنجایی که عمده خشک‌سالی‌های چند سال اخیر به دلیل تغییر اقلیم بوده است، بررسی پدیده تغییر اقلیم می‌تواند در برنامه‌ریزی‌ها و پیش‌بینی‌های لازم در مدیریت منابع آب کارآمد باشد، زیرا این پدیده بر برخی از متغیرهای بهره‌برداری تأثیر گذاشته که این امر بر پیچیدگی تصمیم‌گیری‌ها می‌افزاید. از سوی دیگر به دلیل ذات پیچیده تغییر اقلیم و ایجاد توازن بین اهداف مختلف که می‌تواند تحت شرایط تغییر اقلیم تغییر کنند، برنامه‌ریزان و مدیران منابع آب برای بهره‌برداری از سامانه‌های منابع آب دچار چالش خواهند شد. بنابراین در نظر گرفتن سناریوهای تغییر اقلیم، ضروری است.

مواد و روش‌ها

حوضه آبریز زاینده‌رود به‌عنوان اولین حوضه در فلات مرکزی تعریف شده است. این حوضه در بخش میانی فلات مرکزی ایران واقع شده و قلمرو وسیعی را شامل می‌شود. 40 درصد از این حوضه کوهستانی و مرتفع و 60 درصد آن کوهپایه و دشت می‌باشد. حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود و استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری که در این حوضه قرار دارند در بخش‌های مختلف، بیش از حد توان حوضه مورد بهره‌برداری قرار گرفته است که با توجه به محدودیت منابع آب این حوضه، متناسب با پتانسیل موجود نمی‌باشد. شکل 1 حوضه آبریز زاینده‌رود را نشان می‌دهد.



شکل 1- حوضه آبریز زاینده‌رود

رودخانه زاینده‌رود از بخش شرقی ارتفاعات زاگرس میانی سرچشمه و در جهت شمال غرب به سمت جنوب شرق جریان دارد و به باتلاق گاوخونی در شرق ختم می‌شود که مهم‌ترین رودخانه فلات مرکزی ایران بوده و حوضه آبریز زاینده‌رود را

در تحقیق دیگر روند تغییرات بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه ایستگاه سینوپتیک بیرجند در طی دوره‌های زمانی مختلف از سال 2010 تا سال 2100 میلادی با استفاده از داده‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم و با سناریوهای انتشار RCP 2.6, RCP 6.0, RCP 8.5 ارزیابی تغییرات اقلیمی انجام شد. از مقایسه سناریوها در همه مدل‌ها مشخص شد که دما در سناریو RCP 2.6 و RCP 8.5 به ترتیب بیشترین و کمترین افزایش را در طی دوره‌های آتی خواهد داشت. هم‌چنین مدل‌های مختلف GCM و سناریوهای انتشار برآورد متفاوتی از متغیرهای هواشناسی خواهند داشت و باید در انتخاب مدل و سناریو برای هر منطقه دقت بیشتری انجام داد (6).

نتایج پژوهشی با هدف بررسی گزینه‌های اصلی جهت سازگاری با تغییر اقلیم در حوضه زاینده‌رود براساس رویکرد پدافند غیرعامل در افق 20 سال آتی (2021-2040) با استفاده از ترکیب وزن‌دهی شده مدل‌های GCM گزارش پنجم IPCC و ایستگاه هواشناسی اصفهان نشان داد که به طور متوسط، دمای حوضه در طی 20 سال آینده حدود 0/9 درجه سانتی‌گراد افزایش و بارندگی حوضه نیز حدود 13/3 درصد کاهش پیدا خواهد کرد (7).

در پژوهشی دیگر در حوضه رودخانه زاینده‌رود پارامترهای اقلیمی دما و بارندگی دوره (2006-2040) با استفاده از مدل HadCM3 و بر اساس الگوهای انتشار RCP 2.6, RCP 4.5 و RCP 8.5 بدست آمده است. در این تحقیق برای شبیه‌سازی حداکثر جریان تحت تأثیر تغییر اقلیمی، از مدل بارش-رواناب HEC-HMS و از مدل رواناب ذوب برف (SRM) برای مدل‌سازی ذوب برف استفاده شده است. نتایج نشان داده حداکثر بارش احتمالی در حوضه برای دوره زمانی (2006-2040) تحت سناریوی RCP 2.6، می‌تواند 5 درصد افزایش یابد و با سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 می‌تواند به ترتیب به میزان 5 درصد و 10 درصد کاهش یابد (8).

پژوهش دیگر به بررسی اثر پدیده تغییر اقلیم بر دبی رودخانه زولاچای استان آذربایجان غربی پرداختند. مقادیر بارش و دما تحت سناریوهای مختلف گزارش پنجم IPCC از سال 2021 تا سال 2080 بررسی شد. داده‌ها با استفاده از مدل LARS-WG ریزمقیاس و به کمک مدل بارش رواناب IHACRES واستحی، صحت‌سنجی و حجم رواناب خروجی حوضه آبخیز در دوره‌های آتی شبیه‌سازی شد. نتایج پیش‌بینی رواناب طی دوره‌های اقلیمی آتی نشان داد متوسط تغییرات رواناب سالانه درازمدت طی دوره 2080-2021 به میزان 1/12 مترمکعب

بارندگی و رواناب وجود دارد ولی از آن جا که در حوضه‌های آبخیز امکان اندازه‌گیری تمام کمیت‌ها مورد نیاز برای بررسی عکس‌العمل حوضه میسر نمی‌باشد، انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار و با استفاده از حداقل اطلاعات ورودی مورد نیاز، پیش‌بینی با دقت قابل قبولی را ارائه کند امری ضروری به نظر می‌رسد (14).

امروزه شبیه‌سازی با مدل‌های بارش-رواناب از محورهای اصلی هیدرولوژی است که به‌طور گسترده در مقاصد مختلف از جمله پیش‌بینی رواناب آینده، ارزیابی پاسخ حوضه به نوسانات اقلیمی و تحقیقات کیفیت آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های یک‌پارچه مفهومی به‌دلیل داده‌های ورودی کم و پاسخ دقیق بر انواع دیگر مدل‌ها ترجیح داده می‌شوند (15). از میان مدل‌های یک‌پارچه مفهومی، مدل IHACRES¹ به‌دلیل داده‌های مورد نیاز اندک و سهولت در شبیه‌سازی مورد توجه قرار گرفته است.

نتایج

به‌منظور استخراج سناریوهای اقلیمی بازه پایه از گزارش AR5 تحت سناریوهای انتشار RCP 2.6 و RCP 8.5 از مدل‌های اقلیمی MIROC5، CISRO-MK3، bcc-csm1-1-، GISS-E2-، EC-EARTH، NORESM1-M، و R-CC برای بارندگی استفاده شده است. داده‌ها استخراج و ریزمقیاس‌نمایی شده و نتایج ارزیابی مدل‌های مختلف در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1- عملکرد مدل‌های مختلف بارندگی گزارش پنجم

IPCC				
مدل بارش	R	RMS E	MA E	NSE
MIROC5	7/05 9	18/52	1/72 4	0/55
CISRO-MK3	5/21 3	35/53	2/61 7	0/66 -
bcc-csm1-1-m	4/22 9	30/04	2/16 4	0/18 -
NORES M1-M	6/81 0	22/94	1/48 9	0/31

زهکش نموده و به تالاب گاوخونی ختم می‌شود. منبع اصلی تأمین آب این رودخانه چشمه‌سارها و جریان‌های ناشی از ذوب برف است. پس از طی مسافتی حدود 50 کیلومتر، رودخانه پلاسجان از سمت چپ به آن اضافه شده و دبی ورودی به مخزن سد زاینده‌رود را تشکیل می‌دهند. همچنین برای تأمین آب، جریان تونل‌ها از حوضه آبریز کارون نیز به مخزن این سد اضافه می‌شود. سد مخزنی زاینده‌رود بر روی رودخانه زاینده‌رود در استان اصفهان در سال 1349 با حجم کل 1460 میلیون مترمکعب مورد بهره‌برداری قرار گرفت. حداکثر حجم این مخزن، 1470 میلیون مترمکعب در تراز 2063، حجم مفید آن 1090 میلیون مترمکعب است.

تغییر اقلیم با اثرات فیزیکی و بیولوژیکی همراه است و آب در دسترس انسان‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (10). ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آب شامل تغییرات در دما، بارش و متغیرهای دیگر هیدرولوژیکی مانند تبخیر و تعرق و همچنین تغییرات در رواناب که با استفاده از خروجی‌های مرحله قبل حاصل می‌شود، است (11). این تغییرات منجر به دگرگونی در وضع آب و هوا، تغییر توزیع مکانی و زمانی بارش، جریان‌ات سطحی، تبخیر، تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و کیفیت آب شده و به‌طور کلی روند جدیدی را در اقلیم جهانی موجب می‌شود (12).

با داشتن مختصات مکانی ایستگاه هواشناسی مورد مطالعه، سری زمانی متغیرهای اقلیمی دما و بارندگی به‌دست می‌آید. به‌منظور ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای اقلیمی با استفاده از خروجی‌های مدل AOGCM، تغییرات دما و بارندگی در بازه‌های آتی نسبت به بازه پایه محاسبه و بر روی داده‌های مشاهداتی اعمال می‌شود. با اضافه کردن سناریوی اقلیمی دما به دمای مشاهداتی حوضه و ضرب کردن سناریوی اقلیمی بارندگی به بارندگی مشاهداتی حوضه، متغیرهای اقلیمی در بازه‌های زمانی آتی با استفاده از روابط 1 و 2 محاسبه می‌شوند (13):

$$\Delta P \times P_o = P_{fut}$$

$$\Delta T + T_o = T_{fut}$$

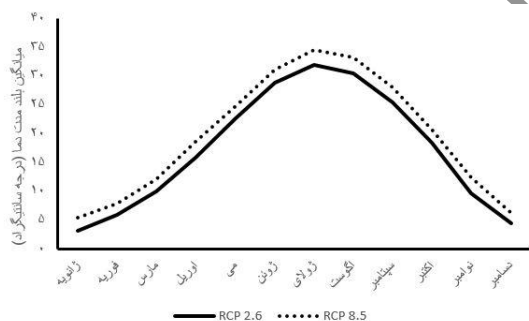
که در آن، ΔP و ΔT به ترتیب بیان‌گر سناریوهای اقلیمی بلندمدت بارندگی و دما؛ P_o و T_o به ترتیب بیان‌گر بارندگی و دمای مشاهداتی؛ P_{fut} و T_{fut} به ترتیب بیان‌گر بارندگی و دما آینده هستند.

یکی از مهم‌ترین محاسبه‌های هیدرولوژیکی برای یک حوضه، تعیین نحوه ارتباط بارش با رواناب تولید شده و شبیه‌سازی آن می‌باشد. روش‌های مختلف برای تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی

¹ Identification of unit Hydrographs And Component flows from Rainfall

NSE	MAE	RMSE	R	مدل دما
0/63	4/83	5/60	91/81	MIROC5
0/52	5/49	6/36	85/14	CISRO-MK3
0/72	4/31	4/89	87/62	bcc-csm1-1-m
0/64	4/41	5/51	94/62	bcc-csm1-1
-0/93	12/78	12/81	99/54	GISS-E2-R-CC
-1/0	13/06	13/09	99/66	GISS-E2-H-CC

با توجه به جدول 2 مدل bcc-csm1-1-m شبیه‌ترین عملکرد را نسبت به داده‌های مشاهداتی دما دارد هرچند مدل‌های دیگر دارای مقدار ضریب همبستگی (R) بیشتر نسبت به این مدل هستند ولی این مدل دارای کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) است و شاخص نش-سانکلیف (NSE) بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها است که در مجموع بهترین عملکرد را دارد. پس از تعیین بهترین مدل برای دما، داده‌های مربوط به بازه تغییر اقلیم (2040-2069) از سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 استخراج، ریز مقیاس نمایی شده و در شکل 3 نمایش داده شده است.



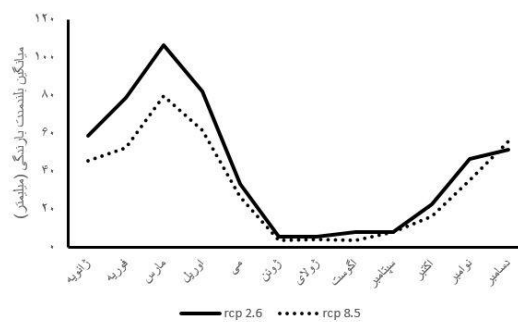
شکل 3- مقایسه سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 برای دما بازه آینده شکل 3 نشان میدهد پیش‌بینی دما در آینده توسط سناریوی RCP 2.6 بهتر و خوش‌بینانه‌تر نسبت به سناریوی RCP 8.5 است.

اختلاف بارندگی و دما در دو سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 در ماه‌های مختلف به ترتیب در جدول 3 و 4 آورده شده است.

0/61	1/00	17/35	8/20	EC-EARTH
	4		6	
0/02	2/66	27/38	8/91	GISS-E2-R-CC
	0		1	

نتایج جدول نشان می‌دهد مدل EC-EARTH دارای بیشترین ضریب همبستگی (R)، کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) است و شبیه‌ترین و بهترین عملکرد را نسبت به داده‌های مشاهداتی بارندگی دارد.

پس از تعیین بهترین مدل برای بارندگی، داده‌های مربوط به بازه تغییر اقلیم (2040-2069) از سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 استخراج، ریز مقیاس نمایی شده و در شکل 2 نمایش داده شده است.



شکل 2- مقایسه سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 برای بارندگی بازه آینده

همان‌طور که در شکل 2 مشخص است پیش‌بینی بارندگی در آینده توسط سناریوی RCP 2.6 بهتر و خوش‌بینانه‌تر نسبت به سناریوی RCP 8.5 است که بر اساس میزان واداشت تابشی آن‌ها صورت گرفته است.

به‌منظور استخراج سناریوهای اقلیمی دما، مدل‌های اقلیمی bcc-csm1-1-m، CISRO-MK3، MIROC5، bcc-csm1-1، GISS-E2-R-CC، GISS-E2-، H-CC استفاده شده که به منظور دستیابی به بهترین مدل برای حوضه مورد نظر، نتایج آن را با داده‌های مشاهداتی مقایسه کرده که نتایج در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2- عملکرد مدل‌های مختلف دما گزارش پنجم IPCC

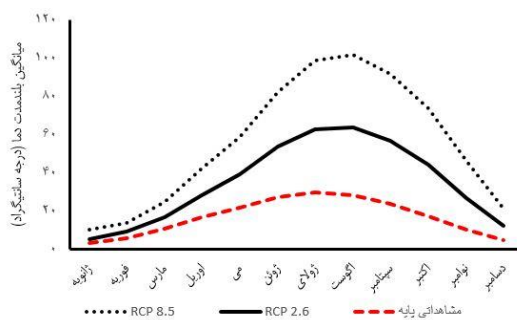
جدول 3- اختلاف بارندگی بازه تغییر اقلیم و بازه پایه در سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 (درصد)

ΔP ژانویه فوریه مارس آوریل می ژوئن ژولای اگوست سپتامبر اکتبر نوامبر دسامبر

1/11	1/95	1/17	0/72	0/61	1/40	0/57	1/01	1/00	0/98	1/07	1/20	RCP 2.6
1/15	1/13	0/85	0/72	0/25	1/04	0/37	0/80	0/75	0/73	0/72	0/93	RCP 8.5

جدول 4- اختلاف دما بازه تغییر اقلیم و بازه پایه در سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 (درجه سانتیگراد)

ΔT	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
RCP 2.6	-0/81	-3/03	-4/59	-5/24	-4/50	-1/04	3/25	7/11	8/56	9/61	6/56	2/64
RCP 8.5	1/43	-1/19	-2/56	-2/52	-2/34	1/22	5/96	9/77	11/22	11/92	9/25	4/37



شکل 5- میانگین بلند مدت دما در بازه تغییر اقلیم و پایه

شکل 5، نشان دهنده افزایش 9/25 درصدی دما در سناریوی RCP 2.6 نسبت به پایه و افزایش 23/24 درصدی دما در سناریوی RCP 8.5 نسبت به پایه است.

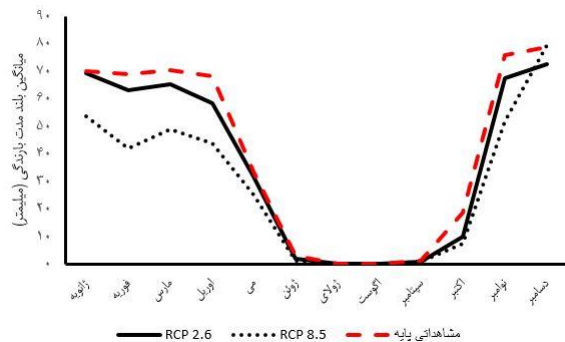
در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی جریان ورودی به مخزن از مدل IHACRES استفاده شده است. داده‌های ورودی شامل بارندگی (میلی‌متر)، دما (درجه سانتی‌گراد) و دبی (مترمکعب بر ثانیه) بوده که همگی به صورت ماهانه از ایستگاه‌های هیدرومتری استخراج و برای سنسجس دقت مدل استفاده شد. برای واسنجی مدل، 12 دوره متفاوت شامل 5، 10، 12، 15، 17، 20 سال اول و آخر بازه پایه بررسی شده است که هر یک با صحیح و خطا چندین بار اجرا شده و در نهایت بهترین مدل انتخاب گردید.

معیارهای عمل‌کرد IHACRES در بازه پایه برای دو سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 به ترتیب در جداول 5 و 6 نشان داده شده است.

جدول 3 نشان می‌دهد که بیشترین اختلاف بارندگی در سناریوی RCP 2.6 مربوط به ماه نوامبر و در سناریوی RCP 8.5 مربوط به ماه دسامبر است. در جدول 4 بیشترین اختلاف دما در سناریوی RCP 2.6 و سناریوی RCP 8.5 مربوط به ماه اکتبر مشخص است.

بارندگی و دما در بازه تغییر اقلیم (2069-2040)

به منظور تعیین بارندگی و دما در آینده به عنوان ورودی مدل IHACRES دما در بازه آینده از مجموع ΔT و دمای مشاهداتی و بارندگی از حاصل ضرب ΔP و بارندگی مشاهداتی بدست می‌آید. مقایسه مقادیر بارندگی و دما در دو سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 به ترتیب در شکل 4 و 5 آمده است.



شکل 4- میانگین بلند مدت بارندگی در بازه تغییر اقلیم

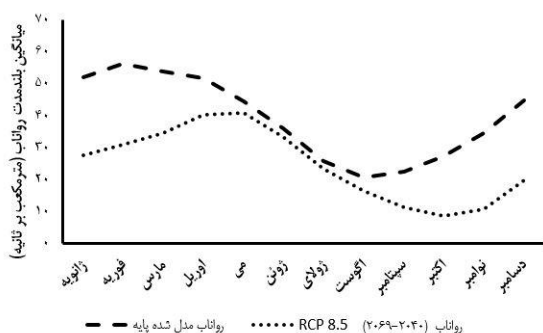
نتایج شکل 4 نشان دهنده کاهش 9/68 درصدی بارندگی در سناریوی سناریوی RCP 2.6 نسبت به بازه پایه و کاهش 27/49 درصدی RCP 8.5 نسبت به بازه پایه است.

جدول 5- معیارهای عمل کرد IHACRES در بازه پایه سناریوی RCP 2.6.

بازه	R (%)	RMSE (m ³ /s)	MAE (m ³ /s)	NSE (بدون بعد)
بازه واسنجی (1996-2010)	80/62	22/27	15/43	-1/82
بازه صحت‌سنجی (1981-1995)	79/01	27/03	19/78	-0/91

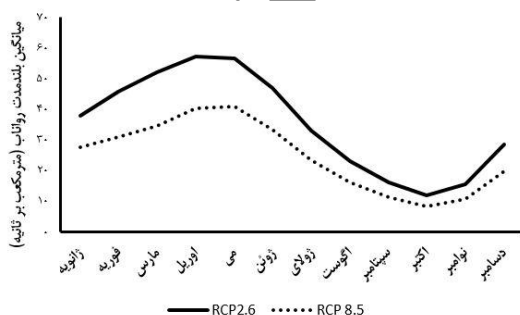
جدول 6- معیارهای عمل کرد IHACRES در بازه پایه سناریوی RCP 8.5.

بازه	R (%)	RMSE (m ³ /s)	MAE (m ³ /s)	NSE (بدون بعد)
بازه واسنجی (1996-2010)	74/28	25/06	16/61	-1/22
بازه صحت‌سنجی (1981-1995)	66/73	32/64	23/19	-0/31



شکل 6- مقایسه میانگین بلند مدت رواناب پایه و سناریوی RCP 8.5

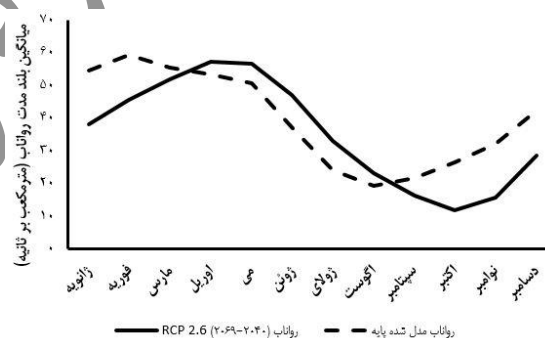
میانگین بلند مدت رواناب مدل شده پایه و تغییر اقلیم شکل 5 نشان می‌دهد، رواناب در سناریوی RCP 8.5 بازه تغییر اقلیم 37/43 درصد نسبت به بازه پایه کاهش خواهد داشت. میانگین بلند مدت رواناب مدل شده در بازه تغییر اقلیم در دو سناریوی مورد بررسی در شکل 7 آورده شده است.



شکل 7- میانگین بلند مدت رواناب آینده با سناریوی RCP 2.6 و سناریوی RCP 8.5

سناریوی RCP 2.6 سناریویی بسیار خوش‌بینانه بوده، نمودار نیز نشان می‌دهد رواناب نسبت به سناریوی RCP 8.5 وضعیت بهتری را نشان می‌دهد. به طوری که رواناب در سناریوی RCP

نتایج فوق نشان می‌دهد که عمل کرد IHACRES در هر دو سناریو قابل قبول بوده و از این رو برای شبیه‌سازی جریان آینده از نتایج آن می‌توان استفاده کرد. میانگین بلند مدت رواناب شبیه‌سازی شده بازه (2069-2040) توسط مدل IHACRES با سناریوی RCP 2.6 در شکل 5 آمده است.



شکل 5- مقایسه میانگین بلند مدت رواناب پایه و سناریوی RCP 2.6

شکل 5 در ماه‌های مارس تا سپتامبر بازه (2069-2040) رواناب کمی نسبت به بازه پایه افزایش و در مابقی ماه‌ها کاهش یافته است. به طور کلی در سناریوی RCP 2.6 رواناب در بازه تغییر اقلیم 10/74 درصد نسبت به بازه پایه کاهش خواهد داشت.

برای سناریوی RCP 8.5 میانگین بلند مدت رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل IHACRES با در شکل 6 آمده است.

8.5 نسبت به سناریوی RCP 2.6 29/9 درصد کاهش خواهد داشت.

بحث و نتیجه‌گیری

در فصل‌های بهار و تابستان به دلیل ذوب برف در بالادست حوضه مطالعاتی و انتقال رواناب ناشی از آن از طریق تونل‌های یک و دو کوه‌رنگ به حوضه آبریز زاینده‌رود، رواناب افزایش یافته، به طوری که بیشینه رواناب در ماه‌های آوریل و می اتفاق می‌افتد ولی در بازه‌های آتی، بیشینه رواناب در ماه‌های مارس و آوریل پیش‌بینی شده و تأثیر رواناب انتقالی حاصل از ذوب برف به این حوضه در رواناب آینده کم‌تر به چشم می‌آید.

(1) از بین مدل‌های مختلف گزارش پنجم برای حوضه زاینده‌رود مدل EC-EARTH بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی بارندگی و مدل bcc-csm1-1-m برای دما نسبت به دوره مشاهداتی داشته است.

(2) بارندگی در سناریوی RCP 2.6 در بازه زمانی (2040-2069) نسبت به بازه پایه 9/68 درصد و در سناریوی RCP 8.5، 26/49 درصد کاهش خواهد داشت.

(3) در بازه زمانی (2040-2069) نتایج نشان دهنده کاهش 19/72 درصدی بارندگی در سناریوی RCP 8.5 نسبت به سناریوی RCP 2.6 است.

(4) دما در سناریوی RCP 2.6 در بازه زمانی (2040-2069) نسبت به بازه پایه 9/29 درصد (1/55) درجه سانتیگراد) و در سناریوی RCP 8.5، 23/26 درصد (3/88) درجه سانتیگراد) افزایش خواهد داشت.

(5) در بازه زمانی (2040-2069)، دما 12/78 درجه سانتیگراد) در سناریوی RCP 8.5 نسبت به سناریوی RCP 2.6 افزایش می‌یابد.

(6) رواناب در سناریوی RCP 2.6 بازه تغییر اقلیم 10/74 درصد و در سناریوی RCP 8.5 بازه تغییر اقلیم 37/43 درصد نسبت به بازه پایه کاهش خواهد داشت.

(7) رواناب در سناریوی RCP 8.5 نسبت به سناریوی RCP 2.6، 29/9 درصد کاهش خواهد داشت.

نتایج پژوهش جوادی نژاد و همکاران (2021) نشان داده حداکثر بارش احتمالی در حوضه زاینده‌رود برای دوره زمانی (2040-2006) تحت سناریوی RCP 2.6، 5 درصد افزایش و با سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5، به ترتیب به میزان 5 درصد و 10 درصد کاهش می‌یابد.

همچنین پژوهش زارعیان (1400) در حوضه زاینده‌رود برای افق 20 سال آتی (2021-2040) با استفاده از ترکیب وزن‌دهی شده مدل‌های GCM گزارش پنجم IPCC نشان داده که به طور متوسط، دمای حوضه در طی 20 سال آینده حدود 0/9 درجه سانتیگراد افزایش و بارندگی حوضه نیز حدود 13/3 درصد کاهش پیدا خواهد کرد. نتایج پژوهش حاضر نشان داده در بازه زمانی (2069-2040) بارندگی در سناریوی RCP 2.6 نسبت به بازه پایه 9/68 درصد و در سناریوی RCP 8.5، 26/49 درصد کاهش می‌یابد و دما در سناریوی RCP 2.6، 9/29 درصد (1/55) درجه سانتیگراد) و در سناریوی RCP 8.5، 26/23 درصد (3/88) درجه سانتیگراد) افزایش خواهد داشت. این نشان دهنده ادامه یافتن روند کاهشی بارش و افزایش دما در افق‌های زمانی دورتر مورد بررسی در این تحقیق است.

پیشنهادها

با توجه کاهش منابع آب در سال‌های آتی در این حوضه پیشنهاد می‌شود:

1- در این پژوهش تنها آب سطحی در نظر گرفته شده است، در نظر گرفتن بهینه‌سازی توأم‌ان آب سطحی و آب زیرزمینی می‌تواند نتایج دقیق‌تری را ارائه دهد.

2- برای این حوضه نتایج شبیه‌سازی با مدل IHACRES بررسی شد، مقایسه نتایج حاصل با مدل‌های شبیه‌سازی دیگر می‌تواند کارساز و مفید باشد.

3- این پژوهش با گزارش پنجم IPCC انجام شد، با تکمیل گزارش هفتم می‌توان نتایج را با آن مقایسه نمود.

ملاحظات اخلاقی پیرویی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری نویسندگان پژوهش حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

تشکر و قدردانی

از تمام کسانی که در تهیه پژوهش حاضر یاری نمودند، قدردانی و تشکر می‌شود.

تعارض منافع

با تعهد نویسندگان مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Woodward G, Perkins DM, Brown LE. Climate change in freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2010; 365(1), 2093–2106.
2. Mavi HS and Tooper GJ. *Agrometeorology, Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture*. Food Products Press, An Imprint of The Haworth Press, Inc. New York London, Oxford. 2004.
3. Moss RH, Edmonds JA, Hibbard, KA., Manning MR., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P. Carter, TR., Emori S., Kainuma M., Kram T. and Meehl G.A. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 2010; Vol.463, PP.747-456.
4. Bjørnæs, C., A guide to representative concentration pathways. Center for International Climate and Environmental Research, 2013.
5. Elmahdi, A., Shahkarami, N., Morid, S. and Massah Bavani A.R. Assessing the impact of AOGCMs uncertainty on the risk of agricultural water demand caused by climate change. 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia, 2009; 13-17 July.
6. یعقوب زاده م و رمضان‌ئی. ارزیابی مدل‌ها و سناریوهای گزارش پنجم تغییر اقلیم در برآورد دما و بارش ایستگاه بیرجند. نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، 1398; 37، ش.ص. 100-87.
7. زارعیان، م. ج. شناسایی اولویت‌های بخش آب جهت سازگاری با تغییر اقلیم در حوضه زاینده‌رود با رویکرد پدافند غیرعامل نشریه مدیریت آب و آبیاری، 1400، 11(2)، 300-291.
8. Javadinejad, S., Dara, R., & Jafary, F. Climate change simulation and impacts on extreme events of rainfall and storm water in the Zayandeh Rud Catchment. *Resources Environment and Information Engineering*, 2021; 3(1), 100-110.
9. اسدی، قربانی دایلاری م، دربندی ص و صمدیان م. شبیه سازی پارامترهای مؤثر بر روند دبی جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش رواناب IHACRES در دوره های آتی (مطالعه موردی: رودخانه زولاچای)، اکوهیدرولوژی، 1400، 1(1); 193-177، 8.
10. Kundzewicz ZW., Mata L.J., Arnell NW., Döll P., Jimenez B., Miller K., Oki T., Sen Z. and Shiklomanov I. The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Sciences Journal*, 2008; 53(1), 3–10.
11. فتاحی ع، آذریان ف و آرا ه. اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و ارائه راهکارهای مدیریتی (مطالعه موردی: جنوب سمنان). دومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، 1394
12. منتظری م. و فهمی ه. اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب کشور. سومین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، اصفهان سازمان هوا شناسی کشور، دانشگاه اصفهان، 1382.
13. Ashofteh PS, Bozorg-Haddad O, Miguel A, Mariño MA. Climate change impact on reservoir performance indexes in agricultural water Supply. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2013; 139 (2), 85-97.
14. Sharifi, F, Safarpour Sh and Ayoubzadeh SA. Evaluation of a computer AWBM2002 model to simulate hydrological processes in number of Iran basins. *J. Res. Cons. Resour.* 2004; 63: 35-42.
15. Cooper V, Nguyen A and Nicell VTV. Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimization methods with hydrologic process-based parameter constraints, *Journal of Hydrology*, 2007; 334 (3), 455-466.