

اثر تغییر اقلیم بر روان آب حوضه دز با استفاده از مدل IHACRES

زینب مخیری^۱، ابراهیم فتاحی^{۲*}، رضا برنا^۳

^۱ دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ دانشیار اقلیم شناسی، پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

^۳ دانشیار گروه جغرافیا، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲

چکیده

با توجه به کاهش شدید منابع آبی در ایران، مطالعات تغییر اقلیم در زمینه اثرات و وقوع بحران های آبی در چرخه آب شناسی ضروری است. بنابراین پیش نگرى ها با دقت زیاد از تغییرات آینده به ویژه تغییرات در رفتار آب شناختی برای سیاست گذاری و برنامه ریزی منابع آب ضروری است. در پژوهش حاضر، ابتدا مجموعه داده مشاهده ای بارش و دمای ماهانه ایستگاه های همدید از سازمان هواشناسی کشور و دبی ماهانه ایستگاه های آب سنجی از وزارت نیرو طی دوره ۳۰ ساله (۱۹۷۶-۲۰۰۵) اخذ شد. برای بررسی تغییرات آتی داده شبیه سازی شده اقلیمی دوره (۲۰۵۰-۲۰۲۱) مدل CSIRO-Mk3 از سری پروژه متقابل مدل های جفت شده - فاز پنجم (CMIP5 و طبق ۴ سناریوی RCP8.5، RCP4.5، RCP6، RCP2.6) استخراج شد. سپس با استفاده از روش آماری عامل تغییر، مقیاس کاهی صورت گرفت. برای بررسی تأثیر این تغییرات بر جریان رودخانه از مدل مفهومی بارش-روان آب IHACRES استفاده شده است. نتایج نشان داد، بارش در ماه های دسامبر (۸-۱۳)، ژانویه (۱۶-۳۲)، مارس (۱۸-۲۰)، آوریل (۷-۲۲) و اکتبر (۵-۸) میلی متر در همه سناریوها کاهش خواهد داشت. در فصول پاییز و زمستان در همه سناریوها کاهش بارش دیده می شود. بیشترین کاهش به میزان ۱۴/۵٪ درصد در سناریو RCP4.5 است. افزایش دما در ماه های مختلف در آینده بین ۰/۴ درجه سلسیوس تا ۲/۷ درجه سلسیوس قابل پیش نگرى است. بررسی ها نشان داد، تغییر اقلیم باعث کاهش روان آب در دوره آتی می شود؛ طوری که، در حوضه دز روان آب بین (۴،۵) تا (۷،۲) درصد کاهش می یابد. بیشترین کاهش روان آب با ۷/۲ درصد (۲۰ مترمکعب بر ثانیه) مربوط به سناریوی RCP4.5 در دوره آتی پیش نگرى می شود.

کلمات کلیدی: روان آب، تغییر اقلیم، سناریوی RCP، IHACRES

از دهه ۱۹۰۰ میلادی، میانگین جهانی تمرکز گازهای گلخانه‌ای به سرعت افزایش یافته است، که منجر به تغییر در ویژگی‌های متغیرهای اقلیمی و وقوع بیشتر در حوادث فرین می‌شود (المزروعی^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به افزایش تمرکز گازهای گلخانه‌ای و افزایش روند گرمایش جهانی، پیش‌بینی می‌شود، که تغییر اقلیم بر منابع آب آب‌شناسی تأثیر بگذارد (کیم و همکاران^۲، ۲۰۲۱). در دهه‌های اخیر در برخی مناطق جهان، میزان روان‌آب به طور معنی‌داری کاهش یافته است. فعالیت‌های بشری و تغییرات آب‌وهوایی دو عامل اصلی در تغییر میزان روان‌آب هستند (عباسی، ح، ۱۴۰۲). بحث روان‌آب و رابطه (بارش-روان‌آب) از مهم‌ترین و اساسی‌ترین موضوعات در آب‌شناسی آب‌های سطحی است. زیرا که برآورد روان‌آب حاصل از بارش‌های جوی پایه و مبنای مطالعات بسیاری از طرح‌های مختلف توسعه و بهره‌برداری از منابع آب را تشکیل می‌دهد (مهدی نسب و همکاران، ۱۳۹۴). آب‌شناسی حوضه طبق تأثیر افزایش دما و تغییر توزیع بارش قرار می‌گیرد و در نتیجه مقدار و در دسترس بودن آب تغییر می‌کند (آریال^۳ و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب بر اساس پیش‌بینی روان‌آب و برنامه‌های تغییرات آب‌وهوایی باید به درستی و در یک بازه زمانی مشخص انجام شود (احمدی و همکاران، ۲۰۱۹). مدل‌های بارش-روان‌آب عمدتاً برای درک سامانه‌های آب‌شناختی و پیش‌بینی روان‌آب استفاده می‌شوند (گوا^۴ و همکاران، ۲۰۱۸). از بین مدل‌های موجود برای ارزیابی بارش-روان‌آب مدل IHACRES یک مدل یکپارچه و مفهومی است، که توسط (جکمن و کروک^۵، ۲۰۰۸) توسعه داده شد. محققان بسیاری مدل IHACRES را برای ارزیابی

بارش-روان‌آب مورد استفاده قرار دادند و کارآمدی آن را برای شبیه‌سازی بارش-روان‌آب تأیید کردند (خواجه و همکاران، ۲۰۱۷). تاکنون، مدل‌های اقلیمی ابزارهای مؤثر بسیاری برای شبیه‌سازی‌های اقلیمی در دوره‌های گذشته و آینده توسعه داده شده است. فاز پنجم پروژه مقایسه متقابل مدل جفت‌شده، شامل بیش از ۴۰ مدل است و در آنها از مجموعه‌ای از سناریوهای انتشار به نام نماینده خط سیر تمرکز (RCP) استفاده شده و اطلاعات اقلیمی ارزشمندی را برای سیاست‌گذاران و جامعه علمی تولید کرده است (چن و سان^۶، ۲۰۱۵). سناریوهای RCP بر اساس مقادیر واداشت تابشی (وات بر متر مربع) شامل ۴ سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای (RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5) است، که برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره آینده معرفی شده‌اند و متوسط افزایش دمای جهانی را تا سال ۲۱۰۰ نسبت به ۳۰ سال گذشته به‌طور میانگین ۲ درجه سلسیوس پیش‌نگری کرده‌اند (ون و ورن و همکاران^۷، ۲۰۱۱). به دلیل ارتباط نزدیک بین گرمایش جهانی و چرخه آب‌شناسی، در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر دبی رودخانه و منابع آب در سراسر جهان صورت گرفته است. آیچ^۸ و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل اکوآب‌شناختی SWIM، اثرات تغییر اقلیم بر روان‌آب را در چهار حوضه آبریز بزرگ در قاره آفریقا مقایسه کردند. آن‌ها با استفاده از خروجی‌های اصلاح شده پنج مدل CMIP5 برای دو مسیر تمرکز RCP8.5 و RCP2.6، برای دو دوره‌دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ مدل را اجرا کردند. نتایج تحقیق حاکی از افزایش دما در تمام قاره آفریقا است. بیشترین افزایش حدود ۶ الی ۷ درجه سلسیوس و در برخی مناطق تا ۸ درجه سلسیوس

⁵ Jakeman & Croke

⁶ Chen & Sun

⁷ Van Vuuren et al

⁸ Aich

¹ Almazroui

² Kim et al

³ Aryal

⁴ Guo

نیز پیش‌بینی می‌شود. بررسی بارش در ۵ مدل مورد مطالعه نشان می‌دهد، که بارش در ابتدای فصل بارانی کاهش می‌یابد. نتایج بررسی تغییرات جریان ماهانه، که توسط مدل SWIM پیش‌بینی شد، نشان می‌دهد، که جریان در چهار مدل برای دو دوره مورد بررسی و دو مسیر تمرکز RCP از ۵۰٪ افزایش تا ۵۰٪ کاهش تغییر می‌کند. ما و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر دبی حوضه رودخانه چو در آسیای مرکزی پرداختند. آنها ابتدا با استفاده از مجموعه داده ایستگاهی دبی و بارش شبکه‌ای APHRODITE، مدل SWAT را برای حوضه مطالعاتی کالیبره و صحت سنجی کردند. سپس با استفاده از مجموعه داده مقیاس‌گامی شده پنج مدل گردش کلی (GCM)، طبق سه سناریوی واداشت تابشی RCP 2.6، 4.5، 8.5، مدل را برای دو دوره آینده نزدیک و آینده دور اجرا کردند. در نهایت نتایج شبیه‌سازی نشان داد، که آب‌وهوا در آینده در همه سناریوها خشک‌تر و گرم‌تر می‌شود و روند کاهش روان آب متوسط سالانه بین ۱ تا ۲۶/۶ درصد است. اویانگ^۱ و همکاران (۲۰۱۵) به منظور ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر دبی رودخانه حوضه آبریز هانگ نیژانگ^۲ در ژاپن، از شش مدل GCM از مدل‌های جفت‌شده پروژه فاز پنجم، طبق سه سناریوی RCP 2.6، 4.5، 8.5، استفاده کردند. آنها از روش عامل تغییر برای اصلاح اریبی، بین خروجی‌های GCM و مجموعه داده مشاهداتی و از مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرایندهای آب‌شناختی استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد، که بارش در اواسط و اواخر قرن ۲۱ افزایش می‌یابد. با این حال، به دلیل افزایش تبخیر و تعرق، روان آب به میزان ۰/۸ تا ۶/۹ درصد کاهش می‌یابد. دمای هوا نیز به‌طور پیوسته برای همه مدل‌های GCM و برای همه سناریوهای RCP افزایش پیدا می‌کند. باتا^۳ و همکاران (۲۰۱۹)، از مدل SWAT برای بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی تحت

سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در وضعیت آب‌شناسی حوضه رودخانه هیمالیا استفاده کردند. نتایج پیش‌بینی آنها نشان داد، که حداکثر و حداقل دمای متوسط سالانه افزایش و بارش کاهش خواهد یافت، که در اثر این تغییرات اقلیمی، جریان کل حوضه مورد مطالعه ۱۵ درصد کاهش و متوسط دبی سالانه تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب بیش از ۸ درصد و بیش از ۸/۵ درصد کاهش خواهد یافت. گودرزی و همکاران (۱۳۹۶)، به ارزیابی عملکرد مدل IHACRES برای شبیه‌سازی روان آب سطحی در شرایط تغییر اقلیم در حوضه آبخیز کن پرداختند. نتایج نشان داد، که مدل مذکور توانایی شبیه‌سازی مجموعه داده جریان روزانه و ماهانه را با دقت قابل قبولی دارد. مقدار روان آب طبق هر سه سناریوی مورد بررسی طی سه دوره آینده نزدیک، میانه و دور، در مقایسه با دوره پایه تا ۱۸/۶۵- درصد تغییر خواهد یافت. پورخیراله و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهش خود تأثیر ناشی از تغییر اقلیم بر روان آب شهرستان دهلران را طبق سناریوی RCP8.5 و برای دوره ۲۰۱۶-۲۰۴۴ مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از روش عامل تغییر^۴، دما و بارش خروجی مدل Csirok3-5-0 را مقیاس‌گامی کردند و به‌منظور شبیه‌سازی روان آب حوضه، آنها را به مدل IHACRES معرفی کردند. نتایج نشان داد، متوسط روان آب در دوره پایه ۶/۲۷ مترمکعب بر ثانیه و در دوره آتی ۵/۷۸ مترمکعب بر ثانیه است. هم‌چنین، شبیه‌سازی روان آب ماهانه حوضه در دوره آتی و مقایسه مقادیر آن با دوره مشاهداتی بیانگر کاهش متوسط روان آب سالانه درازمدت در دوره آتی است. رحیم پور و همکاران (۱۳۹۶) به‌منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم در حوضه زشک-برده در دوره‌های آتی و به‌منظور مطالعات در مقیاس منطقه‌ای، از چهار سناریوی جدید انتشار گزارش

³ Bahтта⁴ Change factor¹ Ouyang² Hong Nezhang

پنجم (RCP2.6, RCP4.5, RCP6, RCP8.5) طبق سه بازه زمانی آینده نزدیک (۲۰۱۴-۲۰۴۲)، آینده میانی (۲۰۷۱-۲۰۴۲) و آینده دور (۲۰۲-۲۱۰۰) استفاده کردند. داده خروجی مدل MIROC-ESM به کمک روش BCSD مقیاس‌گامی شدند. به منظور بررسی روند تغییرات مؤلفه‌های اقلیمی از آزمون آماری من-کندال استفاده شد. نتایج نشان داد، که مؤلفه بارش از تغییرات کاهشی، که از نظر آماری معنی‌دار نمی‌باشد، پیروی می‌کند و دما روند افزایشی معنی‌داری از خود نشان داد. تغییرات روان‌آب در سناریوهای انتشار RCP4.5 برای آینده میانی و دور و در سناریوی انتشار RCP8.5 برای آینده دور از روند معنی‌دار کاهشی تبعیت می‌کند. روان‌آب در بازه زمانی آینده نزدیک در سناریوی انتشار RCP4.5 و در آینده‌های نزدیک و میانی در سناریوی انتشار RCP8.5 دارای تغییرات کاهشی است. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد، که مقادیر دما، بارش و روان‌آب تا انتهای قرن ۲۱ در حوضه زشک-آبرده به ترتیب افزایشی، کاهشی و کاهشی خواهد بود. در پژوهش حاضر، با توجه به کاهش شدید منابع آبی در ایران، مطالعات تغییر اقلیم در زمینه اثرات و وقوع بحران‌های آبی در چرخه آب‌شناسی ضروری است. بنابراین پیش‌نگری‌ها با دقت زیاد از تغییرات آینده به‌ویژه تغییرات در رفتار آب‌شناختی برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی منابع آب ضروری است؛ برای اینکه، مطالعات دقیقی را در راستای سازگاری و تسکین ارائه دهد (ونگ و همکاران، ۲۰۲۰).

هدف از انجام این تحقیق بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد سامانه منابع آب حوضه دز و بررسی تغییرات

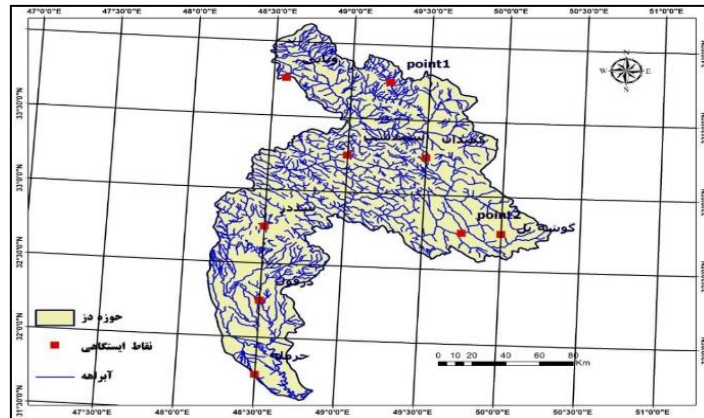
آب‌دهی در دوره‌های آتی با استفاده از مدل بارش-روان‌آب IHACRES است. با انجام این تحقیق، تغییرات صورت گرفته در منابع آب محدوده مورد مطالعه در اثر تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفته و این امکان را فراهم می‌سازد، که با آمادگی و اطلاع از تأثیرات و کمبودهای احتمالی به‌وجود آمده در آینده، برای تأمین نیازهای آتی، برنامه‌ریزی مناسب صورت گیرد و اثر این پدیده به حداقل برسد.

مواد و روش‌ها

روش پژوهش

موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه

حوضه آبریز دز در ارتفاعات زاگرس میانی قرار دارد. رودخانه دز، یک حوضه درجه سه، زیر مجموعه‌ای از حوضه کارون بزرگ محسوب می‌شود. در تقسیم‌بندی بزرگ‌تر زیر مجموعه خلیج فارس و دریای عمان قرار می‌گیرد. این زیر حوضه محدود به مختصات جغرافیایی ۱۰' ۴۸" تا ۲۰' ۵۰" طول شرقی و ۳۶' ۳۱" تا ۰۵' ۳۴" عرض شمالی قرار گرفته است. متوسط ارتفاع آن حدود ۱۶۰۰ متر و مساحت این حوضه ۱۷۳۶۵ کیلومتر مربع است. از نظر تقسیمات اداری، همه یا بخش‌هایی از ۳ استان کشور (لرستان، خوزستان، چهارمحال و بختیاری) را در خود جای داده است. (سالنامه آماری استان خوزستان، ۱۳۹۶). شکل (۱) شبکه آبراه‌ای و موقعیت حوضه آبریز دز را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

داده و روش کار

ابتدا مجموعه داده مشاهده‌ای ایستگاه‌های هم‌دید بارش و دمای ماهانه دوره ۳۰ ساله (۱۹۷۶-۲۰۰۵) از سازمان هواشناسی کشور و مجموعه داده مشاهده‌ای آب‌سنجی دبی ماهانه دوره (۱۹۷۶-۲۰۰۵) از وزارت نیرو اخذ شد. در انتخاب ایستگاه‌ها، از ایستگاه‌هایی که آمار کاملی داشتند یا نهایتاً ده درصد مفقودی داشتند در این تحقیق استفاده شد. برای بررسی چشم انداز تغییرات بارش و دما در آینده، مجموعه داده تاریخی دوره (۱۹۷۶-۲۰۰۵) و مجموعه داده شبیه‌سازی شده اقلیمی دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) با استفاده از مدل CSIRO-Mk3.6 از سری مدل‌های CMIP5 و طبق ۴ سناریوی RCP8.5، RCP2.6، RCP4.5، RCP6، مکانی 0.5×0.5 با روش BCSD^۱ در دسترس می‌باشند استفاده شده است. کمبود ایستگاه‌های هواشناسی با دوره آماری بلندمدت همواره از بزرگ‌ترین مشکلات مدل‌سازی‌ها در ایران است. این مشکل زمانی نمود آشکارتری دارد، ریال که منطقه مورد مطالعه کوهستانی و پربارش باشد. در نتیجه اطلاعات بارندگی با کیفیت بالا نقش مهمی در مدل‌سازی‌های بارش-روان آب دارد

(چن^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). به دلیل فقدان آمار واحد در این حوضه، برای شبیه‌سازی بارش و دمای آینده از دو ایستگاه کمکی (point1-point2) مجموعه داده بازتحلیل (شبه دیدبانی) ERA-Interim به کار گرفته شده است. مجموعه داده ERA-Interim نسل چهارم مجموعه داده بازتحلیل است، که توسط مرکز پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوای اروپا (ECMWF) با دقت مکانی 0.75×0.75 ، 0.5×0.5 ، 0.25×0.25 و 0.125×0.125 تولید شده است، که هرچند ماه یکبار به روز می‌شود. به‌طور کلی، تحلیل دوباره یک سامانه برای تولید مجموعه‌ای از مجموعه داده اقلیمی، بازتحلیل نامیده می‌شود. مجموعه داده بازتحلیل از ترکیب نتایج پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا با مجموعه داده مشاهداتی به‌دست می‌آید. این داده از سال ۱۹۷۹ تاکنون در دسترس هستند؛ ولی، به دلیل اینکه پیش‌بینی‌های گذشته‌نگر مدل‌های CMIP5 تا سال ۲۰۰۵ اجرا شده‌اند، بنابراین، دوره بررسی توانمندی مدل‌های گردش کلی، دوره ۱۹۷۹-۲۰۰۵ انتخاب شد.^۳ در جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه و جدول (۲) مشخصات مدل استفاده شده آورده شده است.

³ <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>

¹ http://gdodcp.ucllnl.org/pub/dcp/archive/cmip5/global_mon/BCSD

² Chen

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	نوع ایستگاه
کمدان	۴۹٫۵	۳۳/۲۵	۲۰۵۰	آب‌سنجی
گوشه پل	۵۰	۳۲/۷۵	۲۵۴۵	آب‌سنجی
حرمله	۴۸٫۵	۳۱/۷۵	۶۸	آب‌سنجی
سپیدشت	۴۹	۳۳/۲۵	۹۷۰	آب‌سنجی
ونایی	۴۸٫۵	۳۳/۷۵	۱۹۷۰	آب‌سنجی
تله زنگ	۴۹	۳۲/۷۵	۶۳۹	آب‌سنجی
دزفول-فروودگاه	۴۸٫۵	۳۲/۲۵	۱۴۳	همدید
point1	۴۹٫۲۵	۳۳/۷۵	۲۲۰۹	نقاط کمکی
point2	۴۹٫۷۵	۳۲/۷۵	۲۵۳۵	نقاط کمکی

جدول ۲: مشخصات مدل مورد استفاده

ردیف	نام مدل	تفکیک افقی (lon*lat)	نام مرکز (گروه مدلسازی)	کشور
1	CSIRO-Mk3-6-0	1.875×1.875	Commonwealth Scientific and Industrial Research	استرالیا

ارزیابی عملکرد مدل CSIRO-Mk3-6-0 در شبیه‌سازی بارش و دما

برون داد مدل‌های GCM نیاز به یک پردازش اولیه (تصحیح اریبی و مقیاس‌گامی مقیاس‌گامی) برای قابل استفاده شدن در مطالعات تغییر اقلیم دارند. در هنگام مقیاس‌گامی، اریبی یا بایاس تا حد امکان حذف می‌شود. اریبی وقتی رخ می‌دهد، که یک مدل همیشه یک مقدار بیشتر یا کمتر از مشاهدات برآورد می‌کند. این ضعف با کم کردن یا اضافه کردن مقدار اریبی به داده قابل اصلاح است. یکی از اصول اولیه مقیاس‌گامی حذف اریبی است و وقتی مقیاس‌گامی به‌خوبی انجام شود، اریبی هم حذف می‌شود. در پژوهش حاضر، برای تصحیح اریبی، مقادیر میانگین‌گیری‌شده ماهانه چهار گوشه سلول مدل گردش کلی (GCM) در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۷۶) با سری‌زمانی مجموعه داده دیدبانی شده شبکه‌ای در مقیاس مکانی و دوره زمانی مشابه مقایسه می‌شوند و نسبت آن‌ها به‌دست می‌آید. میانگین مجموعه داده شبیه‌سازی بارش و دما مدل GCM با مجموعه داده مشاهداتی و متعاقباً حذف میانگین اریبی

موجود در شبیه‌سازی مدل‌های GCM با استفاده از راهبرد Mean-based (MB)، تصحیح شده‌اند. این روش ساده‌ترین روش تبدیل آماری است، که برای مطابقت میانگین مجموعه داده شبیه‌سازی مدل‌های GCM با مجموعه داده مشاهداتی و متعاقباً حذف میانگین اریبی به‌کار می‌رود. رابطه (۱) برای بارش و رابطه (۲) برای دما استفاده شده است.

$$X'_O = X'_M \times \mu_O / \mu_M \quad (1)$$

$$\mu_M - \mu_O + X'_O = X'_M \quad (2)$$

پس از تصحیح مجموعه داده شبیه‌سازی مدل‌های GCM از معیارهای عملکرد ضریب هم بستگی (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط خطای مطلق (MAE) مقادیر کاهنده و افزایشده اصلاحی به‌ترتیب، به سری‌زمانی شبیه‌سازی‌های مدل GCM اعمال می‌شود (اسجملی و همکاران، ۲۰۰۶ و لندرنیک و همکاران^۲، ۲۰۰۷).

² Lenderink et al

¹ Schmidli et al

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{obs})_i - (Q_{sim})_i]^2}{\sum_{i=1}^n [(Q_{obs})_i - \bar{Q}_{obs}]^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(Q_{obs})_i - (Q_{sim})_i]^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{obs} - Q_{sim,i}| \quad (5)$$

$$NASH = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right] \quad (6)$$

جدول ۳: میزان اریبی شبیه‌سازی بارش و مدل AOGCM نسبت مجموعه داده مشاهده‌ای در دوره پایه

مدل	CSIRO-MK3.6							
	فرانسج	RMSE	MAE	R ²	فرانسج	RMSE	MAE	R ²
دزفول	۱۳/۵	۸/۶	۰/۹۷	ونایی	۳۰	۲۲/۲	۰/۹۶	
حرمله	۵/۹	۴/۲	۰/۹۸	تله زنگ	۶۸/۷	۴۶	۰/۹۵	
سپیدشت	۳۹/۹	۲۹/۲	۰/۹۵	کمدان	۳۵/۱	۲۷/۵	۰/۹۳	
گوشه پل	۱۳/۷	۹۳/۳	۰/۹۲	Point	۱۰/۸	۸/۳	۰/۹۳	
Point2	۸۰/۶	۵۴/۹	۰/۹۲	Mean	۳۳/۱۳	۳۲/۶۸	۰/۹۴	

دوره‌های آتی استفاده کرد.

سناریوهای تغییر اقلیم

به منظور حذف اغتشاش در شبیه‌سازی نوسانات اقلیمی ناشی از بزرگ بودن سلول‌های محاسباتی مدل‌های AOGCM معمولاً به جای استفاده مستقیم از داده مدل در محاسبات تغییر اقلیم از میانگین دوره‌ای ۳۰ ساله این داده استفاده می‌شود (Jones and Hulme, 1996). برای ایجاد سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل AOGCM مقادیر اختلاف برای دما رابطه (۷) و نسبت برای بارندگی (رابطه (۸) بین میانگین ۳۰ ساله در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و دوره شبیه‌سازی شده پایه به کمک

جدول (۳) عملکرد مدل انتخابی گردش عمومی جو را در شبیه‌سازی مقادیر بارش ماهانه برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد، که در همه ایستگاه‌ها هم‌بستگی بالای ۰/۹۲ وجود دارد و میزان خطای ایستگاه‌ها پایین است. از نظر ایستگاهی، به ترتیب ایستگاه‌های حرمله و دزفول، کمترین خطا و بیشترین هم‌بستگی را دارند. پس از تصحیحات انجام شده در مجموع می‌توان نتیجه گرفت، مدل انتخابی در شبیه‌سازی بارش و دمای ماهانه توانا است. بنابراین، با توجه به اصل عدم قطعیت و در نظر گرفتن مقادیر هم‌بستگی بارش شبیه‌سازی توسط مدل مذکور و مجموعه داده مشاهداتی می‌توان از مدل فوق الذکر در پیش آگاهی مقادیر بارش منطقه مطالعاتی در

در روابط (۸) و (۷)، ΔT_i و ΔP_i به ترتیب بیانگر سناریوی اقلیمی مربوط به دما و بارندگی برای متوسط درازمدت برای هر ماه i ($1 \leq i \leq 12$)، $\bar{T}_{AOGCM, fut, i}$ و $\bar{P}_{AOGCM, fut, i}$ به ترتیب بیانگر متوسط درازمدت دما و بارندگی شبیه‌سازی شده به کمک مدل در دوره آتی برای هر ماه i ، $\bar{T}_{AOGCM, base i}$ و $\bar{P}_{AOGCM, base i}$ به ترتیب بیانگر متوسط درازمدت دما و بارندگی شبیه‌سازی شده به کمک مدل در دوره مشابه با دوره مشاهداتی برای هر ماه i می‌باشند.

$$P = P_{obs} \times \Delta P \quad (9)$$

$$T = T_{obs} + \Delta T \quad (10)$$

شبیه‌سازی بارش - روان آب

به منظور شبیه‌سازی روان آب حوضه دز تحت تاثیر تغییر اقلیم، از مدل مفهومی بارش - روان آب IHACRES استفاده گردید. این مدل توسط جکمن و هورنبرگ^۱ (۱۹۹۳) ارائه شده است. مدل IHACRES یک مدل یکپارچه است، که در آن متغیرها و فراسنجهای ورودی برای تمام سطح حوضه به‌طور یکسان در نظر گرفته شده و تغییرات مکانی آنها در نظر گرفته نمی‌شود (لیو^۲ و همکاران، ۲۰۰۶). اساس مدل IHACRES از دو مدل غیرخطی تلفات و مدل خطی هیدروگراف تشکیل می‌شود؛ بدین شکل که، در ابتدا بارندگی (T_k) و دما (t_k) در هر گام زمانی k توسط مدل غیرخطی، به بارندگی مؤثر (u_k) تبدیل شده و سپس به کمک مدل خطی هیدروگراف واحد به روان آب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود. شکل (۲) چگونگی تبدیل بارش - روان آب مدل IHACRES را نشان می‌دهد.

همان مدل (۱۹۷۶-۲۰۰۵) برای هر سلول از شبکه محاسباتی، محاسبه می‌شود. از آنجا که، مقیاس محاسباتی مدل‌های AOGCM با مدل‌های آب‌شناسی مطابقت ندارد و ارزیابی و تعیین اثرات تغییر اقلیم نیازمند سناریوهایی با وضوح مکانی بالا می‌باشد، بنابراین به منظور انجام مطالعه اثرات تغییر اقلیم در یک منطقه نیاز به مقیاس‌گامی خروجی این مدل‌ها می‌باشد.

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{GCM, fut, i} - \bar{T}_{GCM, base i}) \quad (7)$$

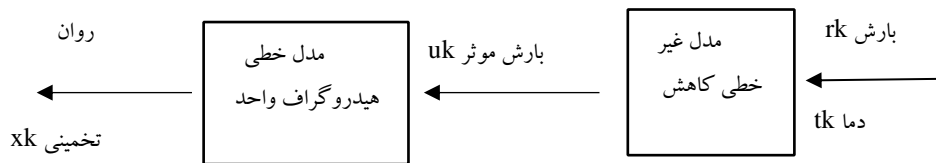
$$\Delta P_i = (\bar{P}_{GCM, fut, i} / \bar{P}_{GCM, base i}) \quad (8)$$

مقیاس‌گامی

در این تحقیق، برای مقیاس‌گامی مجموعه داده طرح به لحاظ زمانی از روش عامل تغییر استفاده می‌شود. در روش عامل تغییر برای به دست آوردن سری زمانی سناریوی اقلیمی در آینده، سناریوهای تغییر اقلیم به مقادیر مشاهداتی (۲۰۰۵-۱۹۷۶) افزوده می‌شود (رابطه ۹ و ۱۰)؛ که، در آن T_{obs} بیانگر سری زمانی دمای مشاهداتی (ماهانه) در دوره پایه و T سری زمانی دما حاصل از پدیده تغییر اقلیم در دوره آتی و ΔT سناریوی تغییر اقلیم بر مقیاس‌گامی شده است. در مطالعات اثرات تغییر اقلیم بر سامانه‌های مختلف، پس از تولید سناریوهای اقلیمی برای دوره آتی به استفاده از مدل تحلیلی سامانه به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم است. در مطالعات اثرات آب‌شناختی تغییر اقلیم، از مدل‌های بارش - روان آب به این منظور استفاده می‌شود. بنابراین، ابتدا، ارزیابی مدل بارش - روان آب به منظور توانایی مدل در شبیه‌سازی مجموعه داده هواشناسی صورت گرفت. برای این منظور از مدل بارش - روان آب IHACRES، که یک مدل مفهومی و یکپارچه است، استفاده شد.

² Liu

¹ Jakeman and Hornberger



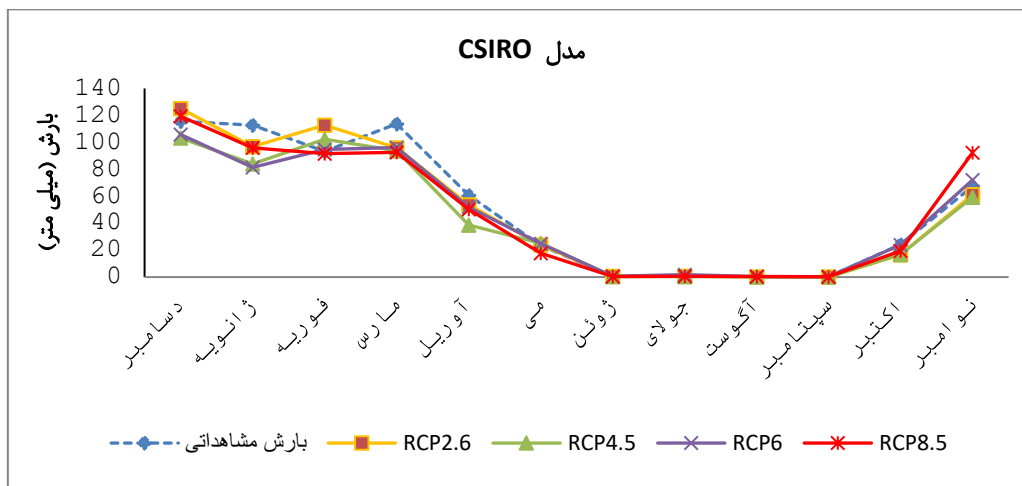
شکل ۲: شبیه‌سازی بارش-روان آب به روش (Jakeman and Hornberger ۱۹۹۳)

بحث و نتایج

سناریوهای اقلیمی بارش و دما در دوره آتی

برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم حوضه، ابتدا میانگین دما و بارش ماهانه حاصل از مدل CSIRO-Mk3.6 طبق چهار سناریوی RCP2.6، RCP4.5، RCP6، RCP8.5 دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) با استفاده از روش مقیاس‌گهی تناسبی CF (عامل تغییر) مقیاس‌گهی شدند. سپس، با استفاده از روابط ۹ و ۱۰ سناریوی تغییر اقلیم دما و بارش منطقه محاسبه گردید. نتایج در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است. به‌منظور بررسی عملکرد مدل از معیارهای کارایی ضریب همبستگی (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا

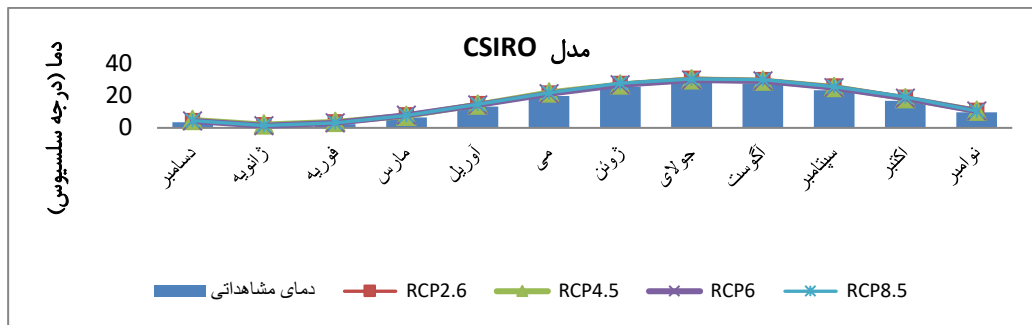
(RMSE)، متوسط خطای مطلق^۱ (MAE) و نش-ساتکلیف^۲ (NS) استفاده شد (آشفته، ۲۰۱۳). نحوه محاسبه این شاخص‌ها به ترتیب در روابط (۳-۶) ارائه شده است. معیار کارایی نش-ساتکلیف برای ارزیابی توان مدل در شبیه‌سازی بکار می‌رود که اهمیت نسبی واریانس مقادیر شبیه‌سازی شده را در مقایسه با واریانس مجموعه داده اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که در آن $Q_{sim,i}$ و $Q_{obs,i}$ به ترتیب دبی‌های مشاهده‌ای و دبی شبیه‌سازی شده و $\bar{Q}_{obs,i}$ دبی میانگین مشاهده‌ای بر حسب مترمکعب بر ثانیه و n تعداد داده‌ها هستند.



شکل ۳: تغییرات بارش ماهانه شبیه‌سازی حوضه دز در دوره آتی طبق چهار سناریوی RCP مدل CSIRO نسبت به دوره مشاهده‌ای

² Nash- Sutcliffe

¹ Mean Absolute Error



شکل ۴: تغییرات دمای ماهانه شبیه‌سازی شده حوضه دز در دوره آتی طبق چهار سناریوی RCP مدل CSIRO نسبت به دوره مشاهداتی

ضریب نش-ساتکلیف (NS) بین روان آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده صورت گرفته است. برای شبیه‌سازی روان آب ماهانه حوضه بالادست سد دز، ابتدا مدل IHACRES در دوره (۱۹۷۶-۱۹۹۵) مورد واسنجی و برای دوره (۱۹۹۵-۲۰۰۵) مورد صحت سنجی قرار گرفت. پس از بررسی‌های متعدد و در نظر گرفتن دوره‌های مختلف برای انجام عمل واسنجی و صحت‌سنجی نشان داد؛ که، بهترین دوره واسنجی برای حوضه دز، دوره ۱۹۷۶-۱۹۹۵ است. به‌منظور واسنجی و صحت سنجی مدل IHACRES، اطلاعات بارش، دمای ایستگاه‌های آب‌سنجی و دبی ماهانه ایستگاه تله‌زنگ برای حوضه دز (سد دز) برای انجام این بررسی استفاده شده است. نتایج عملکرد مدل در دوره‌های واسنجی و صحت سنجی، به‌وسیله مقایسه روان آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و استفاده از معیارهای عملکرد جداول ۵ و ۶ محاسبه و نتیجه نهایی در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است.

انتظار می‌رود، گرمایش جهانی، که در سال‌های اخیر در اغلب نقاط کره زمین مشاهده شده، طی سال‌های آتی نیز ادامه یابد. هم‌چنین محدوده تغییرات بارش در این دوره ماه‌های دسامبر، ژانویه، مارس، آوریل و اکتبر در همه سناریوها کاهش بارش (۱/۵ تا ۳۶/۵ درصد) را نشان می‌دهد. ماه‌های فوریه و می در سه سناریوی RCP2.6, RCP4.5, RCP6 به ترتیب (۱,۶ تا ۲,۸) و (۲,۲ تا ۷,۷) درصد افزایش بارش را نشان می‌دهند.

درجه سلسیوس تا ۲/۷ درجه سلسیوس قابل پیش‌نگری است. بیشترین افزایش دما به ترتیب مربوط به فصول، تابستان، پائیز، بهار و زمستان است. شش ماه خشک (از ژوئن تا نوامبر برابر با تیر تا آذر) افزایش دمای بیشتری را نسبت به شش ماه تر دارا است. سناریوی RCP4.5 به میزان (۱,۱-۲,۷) درجه سلسیوس بیشترین افزایش دما را خواهد داشت. به‌طور کلی، با توجه به تغییرات دما در آینده انتظار با توجه به شکل‌های (۳ و ۴) حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد، که مدل CSIRO-Mk3.6 دمای شبیه‌سازی شده طبق سناریوهای مختلف به‌طور کامل از تغییرات دمای مشاهداتی تبعیت می‌کنند. همه ماه‌ها طبق چهار سناریوی ارائه شده در دوره آتی با افزایش دما روبه‌رو خواهد شد. میانگین نتایج این مدل برای شبیه‌سازی دما در دوره آتی نشان می‌دهد، که افزایش دما در ماه‌های مختلف بین ۰/۴ فراسنج‌هایی است، که حداقل تابع هدف را مشخص می‌کند. در واسنجی IHACRES مقادیر ثابت زمانی خشک شدن حوضه آبریز T_w و عامل تعدیل دما f در بخش غیرخطی شبیه‌سازی، به‌صورت دستی به وسیله کاربر انتخاب می‌گردند، و مقادیر فراسنج ضریب تعادل حجم بارش C و فراسنج‌های بخش روندیابی خطی آن به‌وسیله خود نرم‌افزار محاسبه می‌شوند. در این مرحله بهترین شبیه‌سازی براساس مقادیر معیارهای ارزیابی انتخاب می‌گردد. این انتخاب براساس بالاترین مقدار ضریب تعیین (R^2)، کمترین مقدار شاخص‌های خطا (RMSE) و

نمی‌کنند. بدین ترتیب، بعضی سناریوها ممکن است، افزایش و برخی دیگر کاهش مقدار بارش را در آینده برای ماه مورد نظر پیش‌نگری کنند.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل بارش - روان آب IHACRES

به‌منظور برآورد جریان رودخانه حوضه دز در دوره آتی، در ابتدا باید عملیات واسنجی و صحت‌سنجی مدل بارش - روان آب IHACRES در ایستگاه‌های آب‌سنجی مورد مطالعه انجام گیرد.

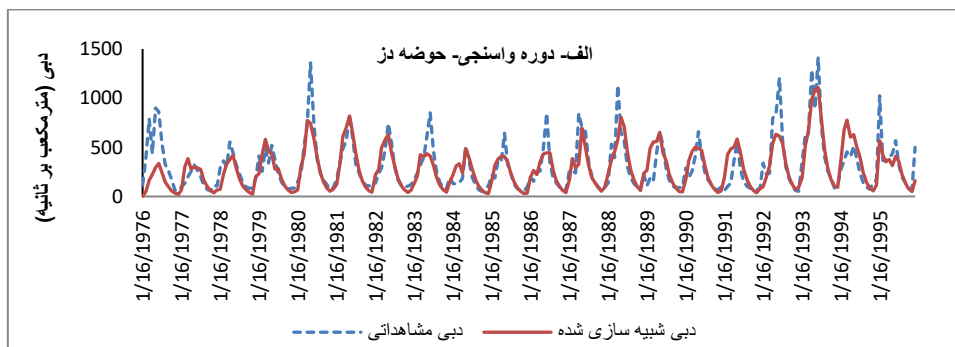
فصول پاییز، زمستان و بهار در همه سناریوها با کاهش بارش دیده می‌شود. بیشترین کاهش بارش به ترتیب مربوط به دو سناریوی RCP4.5 به میزان (۱۴/۵) درصد و RCP6 به مقدار (۹/۶) درصد است. با توجه به اینکه بارش از متغیرترین عناصر آب‌وهوایی به‌شمار می‌رود (مسعودیان و کاویانی، ۱۳۸۷). تشابه بین نتایج خروجی‌های GCM طبق سناریوهای مختلف برای دما بیشتر از بارش است. نتایج مربوط به بارش در ماه‌های مختلف نیز این مطلب را تایید می‌کند؛ که، سناریوهای مختلف نتایج خیلی مشابهی برای یک ماه معین تولید

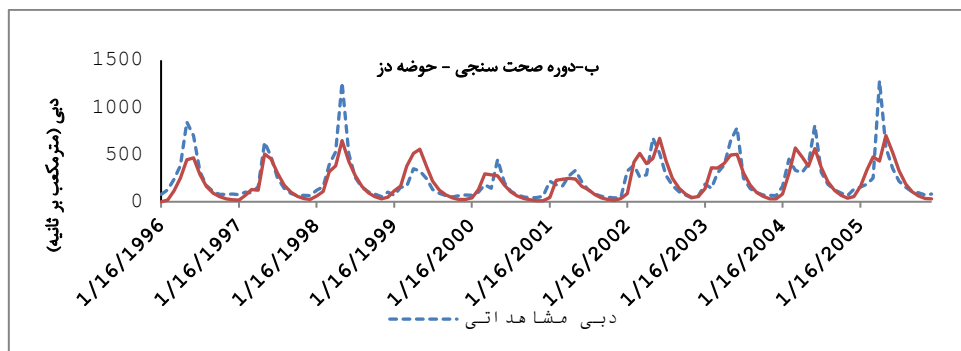
جدول ۴: نتایج ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی دبی (مترمکعب بر ثانیه)

دوره مطالعاتی	R ²	RMSE (m ³ /s)	NS
واسنجی ۱۹۹۵-۱۹۷۶	۰/۷۰	۱۵۷/۰۹	۰/۶۲
صحت‌سنجی ۲۰۰۵-۱۹۹۶	۰/۵۹	۱۴۲/۷۷	۰/۵۹

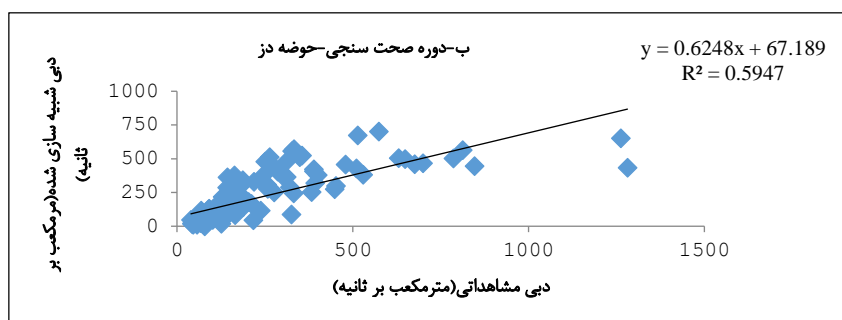
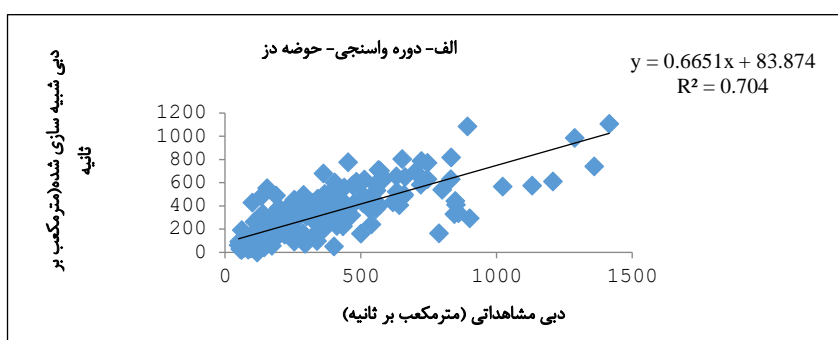
جدول ۵: مقادیر فراسنج‌های به‌دست‌آمده از فرایند واسنجی مدل IHACRES اجرا شده بر حوضه دز

مقادیر	فراسنج‌ها
۲۷	میزان خشک شدن در دمای مرجع (τ_w)
۰	وابستگی دمای میزان خشک شدن (f)
۲۳	دمای مرجع (tref)
۰	آستانه رطوبت برای ایجاد کردن جریان I
۱	توان روی رطوبت خاک (p)
۰,۰۰۰۵۲	ضریب تعادل حجم بارش (c)





شکل ۵: مقایسه مقادیر دبی مشاهداتی با دبی ماهانه شبیه‌سازی شده در مدل IHACRES- حوضه دز الف) در دوره واسنجی ب) در دوره صحت سنجی



شکل ۶: پراکندگی مقادیر دبی مشاهداتی مقابل دبی شبیه‌سازی شده در مدل IHACRES - حوضه دز الف) در دوره واسنجی ب) در دوره صحت‌سنجی

که با توجه به کاهش قابل توجه بارش در دو ماه قبل از آن و افزایش دما در این ماه، نتایج به‌دست‌آمده از روان‌آب منطقی است.

سناریوهای RCP6 و RCP8.5: بیشترین افزایش روان‌آب به‌ترتیب در ماه‌های ژانویه و فوریه و کمترین کاهش روان‌آب در ماه آوریل رخ می‌دهد، که این کاهش روان‌آب نیز به همان دلیل گفته شده برای

فصول پاییز و زمستان در این سناریو با کاهش بارش دیده می‌شود.

سناریوی RCP4.5: همانند سناریوی قبلی،

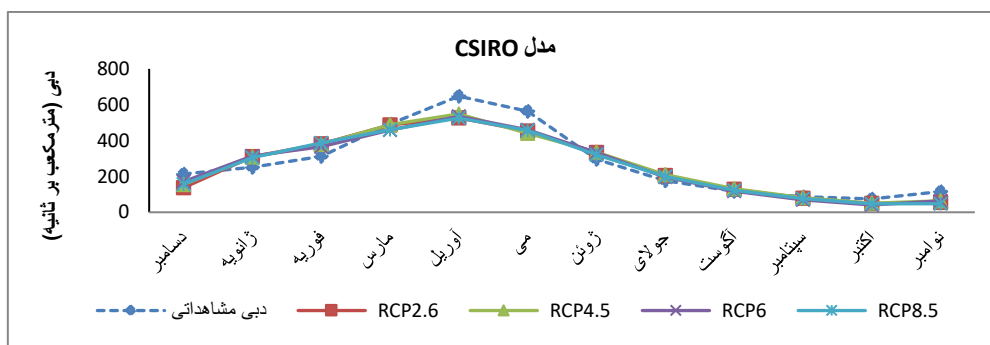
بیشترین افزایش روان‌آب در ماه فوریه تخمین زده می‌شود، که با افزایش محسوس بارش در این ماه این نتیجه قابل قبول است. در صورتی که، بیشترین کاهش روان‌آب با ۱۲۳ مترمکعب بر ثانیه در ماه می رخ می‌دهد،

سناریوی تغییر اقلیم به مدل IHACRES، جریان رودخانه برای دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ شبیه سازی گردید. با توجه به شکل (۷) به طور کلی روان آب حوضه دز در همه سناریوهای مورد مطالعه، کاهش خواهد یافت.

سناریوی RCP2.6: بیشترین افزایش روان آب با ۶۹ مترمکعب بر ثانیه مربوط به ماه فوریه است، که با توجه به افزایش شدید بارش (۱۹ میلی متر) در این ماه نتایج قابل توجهی است. بیشترین کاهش روان آب در این سناریو با ۱۲۱ مترمکعب بر ثانیه مربوط به ماه آوریل است که با کاهش چشمگیر بارش (۱۸ میلی متر) و همچنین افزایش ۲ درجه ای دما در این ماه است. ماه مارس با کاهش ۷ میلی متری بارش پیش نگر می شود.

سناریوهای قبلی است. شکل ۷ نشان می دهد، پیک روان آب در هر چهار سناریو ماه آوریل رخ می دهد اما مقدار این پیک به میزان ۱۷/۶ درصد کاهش می یابد. بررسی ها حاصل از مطالعه حوضه دز، نشان می دهد، که حوضه به سمت خشکسالی پیش می رود.

با اجرای شبیه سازی و انجام واسنجی با کاربرد روش دستی آزمون و خطا با استفاده از مجموعه داده مشاهداتی ایستگاه های آب سنجی، فراسنج های به دست آمده از فرایند واسنجی در جدول (۴) نشان می دهد؛ که، این مدل توانایی قابل قبولی در مدل سازی جریان رودخانه در حوضه آبریز مورد مطالعه دارد. با معرفی بارش و دمای شبیه سازی شده توسط مدل های GCM طبق چهار



شکل ۷: تغییرات میانگین ماهانه روان آب حوضه دز در دوره آتی طبق چهار سناریوی RCP مدل CSIRO نسبت به دوره پایه

نتیجه گیری و جمع بندی

تغییر اقلیم باعث کاهش روان آب حوضه دز در دوره آتی می شود؛ طوری که، بیشترین کاهش روان آب با ۷/۲ درصد (۲۰ مترمکعب بر ثانیه) مربوط به سناریوی RCP4.5 و کمترین کاهش روان آب با ۴/۷ درصد (۱۳ مترمکعب بر ثانیه) مربوط به سناریوی RCP2.6 در دوره آتی پیش نگر می شده است.

نتایج تحقیق حاضر با مطالعه بابائیان و همکاران (۱۳۹۸) پیش نگر می تغییر اقلیم کشور در دهه های آینده با استفاده

قابل پیش نگر می است. بیشترین افزایش دما در مدل ارائه شده به میزان ۱/۱- ۲/۷ درجه سلسیوس مربوط به سناریوی RCP4.5 است. در کل می توان گفت ۶ ماه خشک (از ژوئن تا نوامبر برابر با تیر تا آذر) افزایش دمای بیشتری را نسبت به ۶ ماه تر دارا است. به طور کلی، با توجه به تغییرات دما در آینده، انتظار می رود، گرمایش جهانی، که در سال های اخیر در اغلب نقاط کره زمین مشاهده شده است، طی سال های آتی نیز ادامه یابد.

از مدل‌های CMIP5 مبنی بر کاهش بارش و افزایش دما در مناطق غرب، زاگرس و جنوب غرب مطابقت دارد. پیش‌نگری روان‌آب برای بهره‌برداری مطلوب از یک سامانه آب‌شناختی نقش مهمی دارد و می‌تواند در زمینه‌های مدیریتی حوضه‌های آبخیز، راه‌گشای مشکل سیلاب، فرسایش خاک، کم‌آبی و خشکسالی، تأمین آب مصرفی و طراحی کلیه پروژه‌های آب‌شناختی باشد، که معمولاً انجام این مهم با توسل به مدل‌های مختلف آب‌شناختی که با بهره‌مندی از روش‌های مختلف نظری میزان روان‌آب را برآورد می‌کنند، صورت می‌گیرد. نتایج بارش ماه‌های دسامبر (۸-۱۳)، ژانویه (۱۶-۳۲)، مارس (۱۸-۲۰)، آوریل (۷-۲۲) و اکتبر به ترتیب (۵-۸) میلی‌متر کاهش بارش را در همه سناریوها نشان می‌دهد. فصول پاییز و زمستان در همه سناریوها با کاهش بارش دیده می‌شود، که بیشترین کاهش به میزان ۱۴/۵٪ درصد در سناریو RCP4.5 است. نتایج دمای شبیه‌سازی شده در حوضه دز طبق سناریوهای مختلف نشان می‌دهد، که تغییرات دمای دوره آتی از تغییرات دمای مشاهداتی تبعیت می‌کنند. طوری که، در همه ماه‌های سال، دمای متوسط ماهانه نسبت به دوره مشاهداتی افزایش یافته است. افزایش دما در ماه‌های مختلف در آینده بین ۰/۴ درجه سلسیوس تا ۲/۷ درجه سلسیوس می‌باشد.

منابع

۱. بابائیان، ا.، کریمیان، م.، مدیریان، ر.، و میرزایی، ا. (۱۳۹۸). پیش‌نگری فراسنج‌های اقلیمی کشور با بکارگیری مدل‌های گردش کلی سری CMIP5 دوره ۲۰۲۰-۲۱۰۰، نیوار، ۴۳(۱۰۵-۱۰۴)، ۶۲-۷۱. doi:10.30467/nivar.2019.142745.1103
۲. حافظ پرست، م.، و پورخیراله، ز. (۱۳۹۷). اثر سناریوهای واداشت تابشی بر شاخص‌های آب‌شناختی، مطالعه موردی: حوزه آبخیز سد دوبرج. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۰(۲)، ۲۳۱-۲۴۸. doi:SID. https://sid.ir/paper/234575/fa
۳. رحیم پور، م.، تاجبخش، س. م.، معماریان، ه.، و آقاخانی افشار، ا. ح. (۱۳۹۶). ارزیابی تولید روان‌آب حوضه‌های آبخیز مناطق خشک تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی، حوضه زشک-ابرد)، دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، شهرکرد، سازمان مدیریت و برنامه ریزی، سالنامه آماری استان خوزستان. ۴. (۱۳۹۶). بخش آب و هوا و منابع طبیعی. doi:https://www.amar.org.ir/salnameh-amari/agentType/ViewType/PropertyTypeID/2091/currentpag/6
۵. عباسی، ح. (۱۴۰۲). بررسی عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در تغییرات روان‌آب حوضه قزل اوزن، مجله پژوهش آب ایران. ۵۰: ۱-۱۰. https://doi.org/10.22034/iwrj.2023.14148.2470
۶. گودرزی، م.، معتمدوزیری، ب. و میرحسینی، م. ر. (۱۳۹۶). ارزیابی کاربست مدل IHACRES برای شبیه‌سازی روان‌آب سطحی در شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه آبخیزکن، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۱(۳۸): ۸۳-۹۴. doi: http://jwmsei.ir/article-1-565-fa.html
۷. مسعودیان، س. ا.، و کاویانی، م. ر. (۱۳۸۷). کتاب اقلیم‌شناسی ایران، ناشر: دانشگاه اصفهان.
۸. مهدی نسب، م.، طاوسی، ت. و نگارش، ح. (۱۳۹۴). مدل‌سازی بارش-روان‌آب حوضه آبریز کشکان براساس مدل‌های آماری، جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۶(۲): ۶۷-۸۴. doi: https://gep.ui.ac.ir/article_18723.html
9. Almazroui, M., Saeed, F., Saeed, S., Islam, MN., Ismail, M., Klutse, NAB. & Siddiqui MH. (2020). Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. Earth Systems and Environment. doi:https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ESE.....4.455A/abstract
10. Aryal, A., Shrestha, S., Babel, MS. (2019). Quantifying the sources of uncertainty in an ensemble of hydrological climate-impact projections Theoretical and Applied Climatology. doi:https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ThApC...135..193A/abstract
11. Ahmadi, M., Moeini, A., Ahmadi, H., Motamedvaziri, B., & Zehtabiyani, G. R. (2019). Comparison of the performance of SWAT, IHACRES and artificial neural networks models in rainfall-runoff simulation (case study: Kan watershed, Iran). Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. doi:10.1007/s00704-017-2359-3
12. Aich, V., Liersch, S., Vetter, T., Huang, S., Tecklenburg, J., Hoffmann, P., Koch, H., Fournet, S., Krysanova, V., Müller, E. N. & Hattermann, F. F. (2014). Comparing impacts of climate change on streamflow in four large African river basins. Hydrology and Earth System Sciences, 18(4), 1305-1321. doi:10.5194/hess-18-1305-2014
13. Bahtta; Shrestha, S., Shrestha, P.K. & Talchabhadel, R. (2019). Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan

23. Khajeh, S., Paimozd, S., & Moghaddasi, M. (2017). Assessing the impact of climate changes on hydrological drought based on reservoir performance indices (case study: ZayandehRud River basin, Iran). *Water Resources Management*, 31(9), 2595-2610. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-017-1642-5>
24. Kim, J.H., Sung, J.H., Chung, E.S., Kim, S.U., Son, M., & Shiru, M.S. (2021). Comparison of projection in 23- meteorological and hydrological droughts in the Cheongmicheon Watershed for RCP4.5 and SSP2. doi: <https://ideas.repec.org/a/gam/jsusta/v13y2021i4p2066-d499540>
25. Kim, K. B., Kwon, H. H., & Han, D. (2018). Exploration of warm-up period in conceptual hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 556, 194-210. doi: <https://www.researchgate.net/profile/Hyun-Han-Kwon/publication/321021955>
26. Liu, Y.B., Corluy, J., Bahremand, A., Smedt, F.D., Poorova, J. & Velcická, L. (2013). Simulation of Runoff and Phosphorus Transport in a Carpathian Catchment, Slovakia, River, Research and Applications Journal, 22, 1009-1022. doi: <https://researchportal.vub.be/en/publications>
27. Nesab, M., Negaresh, M. & Tavousi, H. (2014). Modeling of Kashkan watershed runoff precipitation based on statistical models. doi: 20.1001.1.20085362.1394.26.2.5.6 https://gep.ui.ac.ir/article_18723.html?lang=en
28. Ma, C., Sun, L., Liu, S., Shao, M. A., & Luo, Y. (2015). Impact of climate change on the streamflow in the glacierized chu river basin, central asia. *Journal of Arid Land*, 7(4), 501-513. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40333-015-0041-0>
29. Ouyang, F., Zhu, Y., Fu, G., Lü, H., Zhang, A., Yu, Z. & Chen, X. (2015). Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Huangnizhuang catchment Stochastic environmental research and risk. doi:10.1007/s00477-014-1018-9 <https://www.researchgate.net/publication/27264031329>
30. Van Vuuren, DP., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt GC., Kram, T., Krey, V., Lamarque, JF., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, SJ, & Rose, SK. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change* 109(1):5-33assessment, 29(7), 1781-179 doi:10.1007/s10584-011-0148-z <https://www.researchgate.net/publication/227583841>
31. Wilby, R.L. & Harris, I. (2006). "A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK", J. Water Resources Research (in press). doi:10.1029/2005WR004065 <https://www.researchgate.net/publication/248808784>
- River Bassin Catena. 181: Article 104082. Doi:<http://dx.org/10.1016/j.catena.2019.104082>
14. Croke, B.F. & Jakeman, A.J. (2008). Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semiarid regions. *Hydrological modelling in arid and semi-arid areas*, 41-48. Croke, B.F., & Jakeman, A.J doi: 10.1017/CBO9780511535734.005
15. Chen, C., Chen, Q., Duan, Z., Zhang, J., Mo, K., Li, Z., & Tang, G. (2018). Multiscale comparative evaluation of the GPM IMERG v5 and TRMM 3B42 v7 precipitation v5 products from 2015 to 2017 over a climate transition area of China. *Remote Sensing*, 10(6), 944- doi: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/6/944>
16. Chen HP, Sun JQ. (2015). Assessing model performance of climate extremes in China: An intercomparison between CMIP5 and CMIP3. *Climatic Change*129(1-2):197-211doi:[https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-1319-5](https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-014-1319-5)
17. Fu, G., Charles, S. P. and Chiew, F. H. S. (2007a). A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow. *Water Resources Research*, 43(11):W11419 doi: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007WR005890>
18. Fu, G., Charles, S. P., Viney, N. R., Chen, S. and Wu, J. Q. (2007b). Impacts of climate variability on stream-flow in the Yellow River. *Hydrology Process*, 21(25):3431-3439. doi:10.1002/hyp.6574 <https://www.researchgate.net/publication/230048678>
19. Guo, B., Zhang, J., Xu, T., Croke, B., Jakeman, A., Song, Y. & Liao, W. (2018). Applicability Assessment and Uncertainty Analysis of MultiPrecipitation Datasets for the Simulation of Hydrologic Models. *Water*, 10(11), 1611. doi:10.3390/w10111611 <https://.researchgate.net/publication/328905428>
20. IPCC. 2007. Climate Change (2007): Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Exit EPA Disclaimer Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (ed.) by ML. Parry et al. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 365pp. doi: https://www.rainforest-alliance.org/issues/climate/?gad_source
21. Jakeman A. J. & Hornberger, G.M. (1993). How much complexity Is warranted in a rainfall-runoff model?. *Water resources research*, 29(8): 2637-2649. doi: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/93WR00877>
22. Jones P.D. & Hulme M., (1996). Calculating Regional Climatic Time Series for Temperature and Precipitation: Methods and Illustrations. *International Journal of Climatology*, 16, 361-377droughts in the Cheongmicheon Watershed for RCP4.5 and SSP2. *Sustainability* 13(4):2066 doi:<https://ui.ractadsabs.harvard.edu/abs/1996IJCli..16..361J/a-bst>

Effect of change on runoff in the Dez Basin using the model IHACRES

Zeinab Mokhayeri¹, Ebrahim Fatahi^{2*}, Reza Borna³

¹ Ph.D student of Climatology, Oloum Tahghighat Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Associate Professor of Climatology, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Sciences, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Department of Geography, Ahvaz, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

*Corresponding Author Email: ebfat2002@yahoo.com

Received: 09 December 2023, Accepted: 13 October 2024

ABSTRACT

Given Iran's acute decline in water resources, investigating the impacts of climate change on hydrological cycles and water scarcity dynamics is critical for adaptive management. This study evaluates future hydrological changes in Iran under climate scenarios to inform sustainable water resource planning.

Historical monthly precipitation, temperature, and river flow data (1976–2005) were obtained from Iran's Meteorological Organization and Ministry of Energy. Future climate projections (2021–2050) were derived using the CSIRO-Mk3-6-0 model from the CMIP5 ensemble under four RCP scenarios (2.6, 4.5, 6.0, 8.5). A statistical change factor method was applied for downscaling.

Results indicate consistent precipitation declines across all scenarios, particularly in December (8–13 mm), January (16–32 mm), March (18–20 mm), April (7–22 mm), and October (5–8 mm). Seasonal reductions are pronounced in fall (7–22%) and winter (8–32%), with the maximum annual decrease (14.5%) under RCP4.5. Concurrently, temperatures are projected to rise by 0.4–2.7°C, exacerbating hydrological stress. Runoff in the Dez River Basin is expected to decline by 4.0–7.2%, peaking at 7.2% under RCP4.5 by mid-century (2041–2050).

These findings underscore the urgency of adaptive strategies to mitigate climate-driven water shortages. The integration of observational data and hydrological modeling (e.g., IHACRES) provides a robust framework for assessing future scenarios, offering critical insights for policymakers in arid regions facing similar challenges.

Keywords: runoff, climate change, IHACRES

HOW TO CITE THIS ARTICLE

mokhayeri, Z., Fatahi, E. and borna, R. (2024). Effect of change on runoff in the Dez Basin using the model IHACRES. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science.*, 6(2): 183-198. Doi: 10.22034/2645-7261.2024.429678.1220

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

