

اثر تغییر اقلیم در انتقال آب بین حوضه‌ای تحت سناریوها و مدل تغییر اقلیم (حوضه تجن استان مازندران)

رحمانعلی حق شناس گتایی^۱، صدرالدین متولی^{۲*}، غلامرضا جانباز قبادی^۲، هادی رزاقیان^۳، بابک مومنی^۴

۱- دانشجوی دوره دکترای رشته آب و هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران

۲- دانشیار، گروه جغرافیای دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، نور، ایران

۳- استادیار، گروه علوم و مهندسی آبخیز دانشگاه پیام نور واحد ساری، ساری، ایران

۴- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب- سازه‌های آبی دانشگاه پیام نور واحد ساری، ساری، ایران

چکیده

انتقال آب بین حوضه‌ای (IBT) به‌طور گسترده برای کاهش کمبود آب به قیمت به‌خطر انداختن دسترسی به آب در مناطق صادرکننده آب استفاده می‌شود. با این حال، ما نمی‌دانیم که IBTها در کاهش تنش آب بین منطقه‌ای در شرایط آب و هوایی متغیر و زمینه عرضه و تقاضای آب چقدر کارآمد هستند. در این پژوهش تلاش بر آن است که با کمک سناریوهای تغییر اقلیم به میزان درستی از آن دست یابیم. برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه از داده‌های هیدرومتری و کلیماتولوژی دوره ۲۱ ساله (۱۹۹۸-۲۰۱۹) استفاده شد. این تغییرات (دما و بارش) با استفاده از داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش مورد بررسی قرار گرفت و با به کارگیری مدل LARS-WG تغییر اقلیم حوضه آبریز تجن با استفاده از مدل گردش عمومی جو CMIP5 و سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در سال‌های ۲۰۵۰-۲۰۳۰ شبیه سازی گردید. نتایج ارزیابی مدل گردش عمومی جو CMIP5 در دوره پایه، نسبت به آمار ایستگاه سینوپتیک و باران سنجی براساس مؤلفه دما و بارش به ترتیب در ایستگاه‌های ناز و داراب دارای بیشترین همبستگی و تطابق می‌باشد. در بازه زمانی ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ تحت سناریوی RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 در ایستگاه پل سفید و تجن به ترتیب افزایش ۱۰-۲۰ و ۲-۲۰ درصدی بارش در بعضی از ماه‌ها رخ داده است. اما در بیشتر ماه‌ها مقدار بارش ثابت یا گاهی بین ۲ تا ۱۰ درصد کاهش یافت که سبب کاهش رواناب به دلیل اجرای طرح‌های توسعه منابع آب شد. نتایج تحلیل رواناب در مدل اقلیمی تحت سناریوی ۵/۴، کاهش میزان رواناب در اکثر ماه‌ها بوده است که این درصد اختلاف بسیار ناچیز بوده اما در سناریوهای ۲/۶ و ۸/۵ در ماه‌ها میزان اختلاف قابل توجه می‌باشد. دمای نیز تحت دو سناریوی ۲/۶ و ۴/۵ (خوشبینانه و متوسط) کاهش پیدا کرده اما در سناریوی ۸/۵ که سناریو بدبینانه بوده، ضمن افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، این افزایش موجب بهم ریختگی در جو و افزایش دما شده براساس نتایج به دست آمده افزایش بارش درحوضه آبریز تجن منجر به افزایش میزان رواناب سطحی در سطح حوضه مورد مطالعه در دوره پیش بینی ۲۰۳۰-۲۰۵۰ خواهد شد.

کلید واژه‌ها: تنش آب، سناریو تغییر اقلیم، مدل گردش عمومی جو، حوضه آبریز، مدل LARS.

مقدمه

که قادرند پارامترهای اقلیمی را برای یک دوره طولانی مدت با استفاده از سناریوهای تاییدشده هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم مدلسازی نمایند (دیپی کوکولی بافی، ۲۰۰۵؛ کلیب سی و همکاران، ۲۰۰۷).

حفظ همبستگی متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارش در فرایند کاهش مقیاس برای ارزیابی آثار هیدرولوژیکی تغییر اقلیم ضروری است (حیدری و خزایی، ۱۳۹۶). ارزیابی پدیده تغییر اقلیم و پیامدهای احتمالی آن بر فرایندهای چرخه هیدرولوژی حوضه آبخیز کمک فراوانی به چالش‌های مدیران و برنامه ریزان منابع آب در دوره‌های آتی می‌کند (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۶). تحقیقات و فعالیت‌های زیادی برای بررسی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی به منظور تشخیص تغییر اقلیم در ایران و جهان انجام شده است. مینویل و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از ۵ مدل GCM تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه کانادا را بررسی کردند و نتایج تحقیقات آنها بیانگر افزایش ۱ تا ۱۴ درجه‌ای دما و ۹ تا ۵۵ درصدی افزایش بارش فصلی بود که مقدار رواناب حوضه را تحت تاثیر قرار خواهد داد. لی و همکارانش (۲۰۱۴)، تاثیرات تغییر اقلیم و پوشش گیاهی بر رواناب در منطقه کوهستانی حوضه رودخانه‌هایی در شمال چین در ۵ دهه گذشته را مطالعه کردند و متوجه شدند که آب و هوا و غلظت دی اکسید کربن موجود در اتمسفر در این حوضه به طور قابل توجهی تغییر کرده است. نتایج مدل CLM4 نشان دهنده روند کاهشی رواناب از سال ۱۹۶۰ به بعد بود به طوری که تغییر بارش، تابش، دمای هوا و سرعت باد به ترتیب ۵۶، ۱۴، ۱۳ و ۵ درصد و سایر پدیده‌ها در مجموع ۱۲ درصد در روند کاهشی رواناب اثر گذاشته‌اند. همچنین کاهش قابل توجهی در رواناب در بخش جنوبی و شمال شرقی منطقه به کاهش بارش نسبت داده شده و کاهش تابش و افزایش دما از عوامل عمده افزایش رواناب در بخش شمالی بوده است.

گودرزی و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از مدل LARS-WG به شبیه سازی متغیرهای اقلیمی حوضه آبخیز رودخانه هرات پرداختند و نتیجه گرفتند دما در سال‌های آتی افزایش می‌یابد و بارندگی نیز بسته به شرایط جوی افزایش و کاهش نشان می‌دهد. محمدی و همکاران (۲۰۱۸)، با بررسی ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم و آلودگی هوا روی خدمات رسانی فوریت‌های پزشکی درمانی با استفاده از مدل LARS-WG و مدل شبکه

انتقال آب بین حوضه‌ای (IBTs) نقش مهمی در تامین آب شیرین در بسیاری از مناطق کمبود آب دارد (Shiklomanov 2000, Yevjevich 2001, Liu and Zheng 2002). IBTها برای کاهش تنش آب منطقه‌ای با انحراف آب‌های سطحی از یک منطقه پر از آب به مناطق با تنش بسیار بالا طراحی شده‌اند و به طور بالقوه اثرات مضر ناشی از استفاده‌های محلی ناپایدار (مانند برداشت بیش از حد آب زیرزمینی) را کاهش می‌دهند (de Graaf et al 2019). در سراسر جهان، سالانه ۵۰۰ میلیارد از ۴۲ تریلیون متر مکعب (۱/۲ درصد) منابع آب تجدیدپذیر توسط IBTها باز توزیع می‌شوند (Shiklomanov 2000)، مانند پروژه انتقال آب از جنوب به شمال در چین و طرح کوه‌های برفی (Snowy Mountains Scheme) در استرالیا (قاسمی و وایت، ۲۰۰۷؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰). کاهش منابع آب و چالش‌های ناشی از آن به‌ویژه با در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش و تبخیر، نیاز آبی، رخداد خشکسالی‌های شدید و تغییر الگوی مصرف آب در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت از مسائل مهم در جهان به‌ویژه مناطق خشک می‌باشند.

افزایش مقادیر حدی پدیده‌هایی نظیر طوفان، سیل، تگرگ، خشکسالی، امواج گرمایی و سرمای و به‌طور کلی مخاطرات اقلیمی از رایج‌ترین تاثیرات تغییر اقلیم است (IPCC، ۲۰۰۷). بررسی رفتار این پدیده‌ها به کمک شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم از جمله اقداماتی محسوب می‌شوند که برای غلبه بر آنها به ویژه در مورد تامین منابع آب مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین طبق گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، تغییر اقلیم باعث تغییرات هیدرولوژی در چند دهه اخیر در سطح جهان شده است (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۴). در سال‌های اخیر تغییر اقلیم و گرمایش جهانی باعث وقوع پدیده‌های شدید آب و هوایی مثل خشکسالی‌های متعدد و سیلاب‌های سهمگین در ایران شده است که این امر خبری جدی برای منابع آب محسوب می‌شود (ثانی خانی و همکاران، ۱۳۹۲).

به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع مختلف در دوره‌های آتی، مدل‌های شبیه‌سازی گردش عمومی جو توسعه یافته‌اند

هستند (Vörösmarty et al 2000, Maupin et al 2014). بررسی و مطالعه روند تغییرات اقلیمی در کشور ایران که قسمت بزرگی از آن دارای اقلیم خشک و نیمه خشک است اهمیت زیادی دارد. موجولو و همکاران (۱۳۹۸) با ارزیابی اثرات پدیده تغییر اقلیم بر روی تخصیص آب حوضه آبریز تجن در دوره آبی با استفاده از پارامترهای دما و بارش در دوره آبی و مدل جوی CANESM2 تحت سناریوهای مسیر غلظت RCP 2,6 و RCP 8,5 و مدل آماری SDSM، مشخص گردید میزان دبی تحت دو سناریوی مذکور در دوره آبی نسبت به دوره پایه به ترتیب به میزان ۸/۱۹ و ۷/۲۱ درصد کاهش می‌یابد. به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی تخصیص آب از مدل WEAP استفاده شد. نتیجه پژوهش ایشان نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم، میزان مصارف آبی در دوره آینده افزایش می‌یابد که حوضه در این شرایط قادر به تامین ۱۰۰ درصد نیاز کشاورزی نمی‌باشد، حتی با فرض عدم افزایش نیازها در آینده، حوضه قابلیت تامین ۱۰۰ درصد نیاز کشاورزی را ندارد.

شیدائیان و همکاران (۱۳۹۲) با تحلیل اثر تغییر اقلیم بر منابع آبی حوضه آبریز دشت تجن در استان مازندران تحت سناری و یا اقلیمی A2 و مدل گردش عمومی HadCM3 برای دوره آماری سال‌های ۲۰۰۱-۲۱۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کوچک مقیاس سازی نشان داد که برای درصد تغییر دمای متوسط و بارش سالانه در ۹۰ سال آینده (۲۱۰۰-۲۰۱۱) برای ایستگاه سلیمان تنگه به ترتیب ۹/۳+ درصد و ۳۲/۴- درصد محاسبه شد که این تغییرات می‌تواند اثرات قابل توجهی در منابع آب منطقه داشته باشد.

در ایران سالانه صدها میلیون دلار صرف پروژه‌های IBWT می‌شود. با این حال، هیچ سطح معقولی از اطمینان وجود ندارد که این پروژه‌ها اساساً کیفیت زیست‌محیطی حوضه‌های اهدا کننده و مقصد را از بین نبرند یا تعادل مورفولوژیکی حوضه‌ها را به هم نریزند. در سال‌های اخیر تشدید خشکسالی و استفاده ناپایدار از منابع آبی (سدسازی و تخصیص بیش از حد منابع آبی به کشاورزی) باعث کاهش چشمگیر سطح آب در ایران شده است. امروزه توسعه برداشت از آبهای سطحی، رقابت بر سر آب بین بخش‌های مختلف و تاثیر آن بر سیستم‌های آبی حوضه، افزایش شوری و املاح و کاهش کیفیت آب رودخانه‌ها ضرورت جامع

عصبی مصنوعی به همراه بررسی سناریوهای RCP2.6 و RCP 8.5 در استان تهران به این نتیجه رسیدند که تحت شرایط RCP 8.5 خدمات رسانی پزشکی افزایش بسیاری پیدا کرده است. عثمان و همکاران (۲۰۱۹)، تاثیر تغییر اقلیم را بر منابع آبی زاب بزرگ در شمال عراق به کمک مدل LARS-WG بررسی کردند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی می‌شود حوضه آبریز در آینده دور، کاهش چشمگیری در جریان سالانه دارد که این جریان‌ات با افت شدیدتر در حدود 25-65 درصدی در بهار و زمستان رخ می‌دهد. بقانامو همکاران (۲۰۲۰)، در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر شمال غرب ایران با استفاده از مدل‌های LARS-WG، SDSM و مدل شبکه عصبی مصنوعی با سناریوهای RCP متوجه شدند که افزایش ۱/۳-۱/۰،۷/۱-۰/۳ و ۲/۱-۰/۵ درجه سانتیگرادی و کاهش ۳۰-۱۰ درصدی در بارندگی طبق سه مدل فوق تحت شرایط سناریوی RCP 8.5 برای سال‌های آینده رخ می‌دهد. دوان و همکاران (۲۰۲۲)، از دیدگاه اجتماعی و هیدرولوژیکی، کارایی بیش از ۲۰۰ انتقال آب بین حوضه‌ای در سراسر ایالات متحده را با یک شاخص کاهش استرس که تاثیر توزیع مجدد آب را بر سطح کلی تنش آب اندازه گیری می‌کند، کمی سازی کردند.

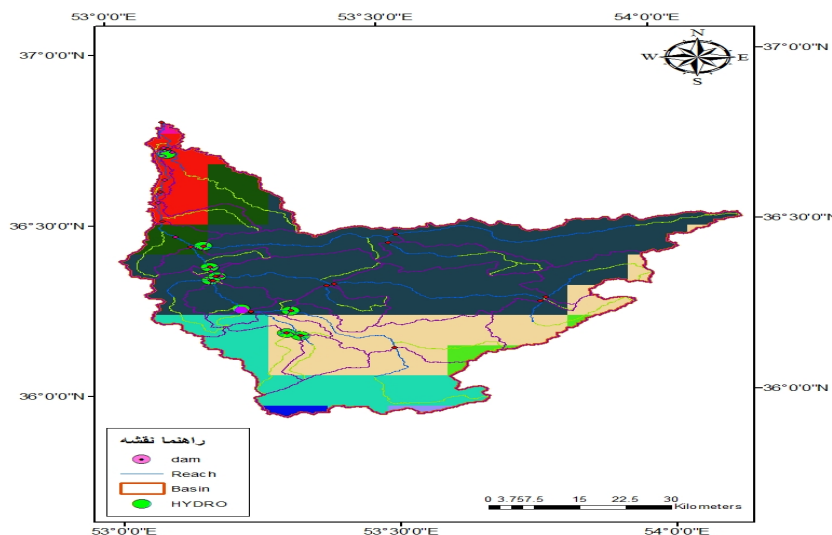
لانگ و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که آب منتقل شده از طریق پروژه انتقال آب از جنوب به شمال، ۴۰ درصد از بازایی ذخیره آب زیرزمینی در پکن را تشکیل می‌دهد. ژائو و همکاران (۲۰۱۵) استدلال کردند که انتقال آب نمی‌تواند تنش آبی را در چین کاهش دهد، اما نتایج بر اساس تنش آبی است که به طور گسترده در سطح استان (۳۰ استان) ارزیابی شد و ارتباطات هیدرولوژیکی بین مناطق در نظر گرفته نشد. امانوئل و همکاران (۲۰۱۵) اثربخشی پروژه‌های انتقال آب در ایالات متحده را با مقایسه مقادیر انتقال به جریان در مناطق صادر کننده و دریافت کننده آب بدون در نظر گرفتن تفاوت‌های مکانی و زمانی در تقاضای آب بررسی کردند. اگرچه ویژگی‌های فیزیکی حوضه‌های زهکشی (مانند توپوگرافی، ویژگی‌های خاک) مورد علاقه مدیران آب، را می‌تواند در مقیاس زمانی ثابت فرض کرد، اما در دسترس بودن آب قبل از انتقال و تنش آبی به دلیل عوامل استرس‌زای محیطی و انسانی مانند تغییرات اقلیمی، جمعیت، کارایی مصرف آب و ساختارهای اقتصادی و انرژی در حال تغییر

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه

حوضه آبخیز تجن در استان مازندران در شمال ایران قرار دارد. این حوضه حدود ۱۷۰ کیلومتر طول دارد و مساحت حدود ۴۱۴۷ کیلومتر مربع می‌باشد. این حوضه از نظر تقسیمات سیاسی جز شهرستان ساری و از نظر موقعیت جغرافیایی در طول جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۴ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۴ دقیقه قرار دارد که از شمال به دریای خزر، از شرق به حوضه رودخانه نکا، از غرب به حوضه رودخانه سیاه‌رود، و از جنوب به دامنه‌های شمالی رشته کوه البرز محدود شده است. از لحاظ خصوصیات فیزیوگرافی حوضه تجن دارای شش زیر حوضه با نام‌های شیرین رود، چهاردانگه، دودانگه سفیدرود، زارم‌رود و لاجیم می‌باشد. این منطقه عمدتاً از آبراهه‌ها و رودخانه‌ها تشکیل شده است که رودخانه تجن از مهم‌ترین آن‌هاست. شکل (۱).

نگری در مدیریت منابع آبی این حوضه رانشان می‌دهد. یکی از این پروژه‌های مهم در حال اجرا در کشور ما انتقال آب از سرشاخه‌های رودخانه تجن در منطقه‌ای موسوم به فینسک به شهرستان‌های مهدیشهر، سرخه و بطور ویژه سمنان در فلات مرکزی ایران است و این پژوهش سعی خواهد داشت در کنار وضعیت نرمال، وجود پدیده تغییر اقلیم را در این ناحیه مبدا بررسی نموده و آثار دمایی و بارشی مترتب بر آن را بر وضعیت منابع آبی که در این پروژه برای انحراف و انتقال آن برنامه‌ریزی شده است ارزیابی نماید. هدف از پژوهش حاضر شبیه‌سازی اثرات تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل LARS-WG و بررسی تاثیر سناریوهای متفاوت تغییر اقلیم بر تغییرات برخیم تغییرات اقلیمی (دما و بارش) با توجه به حساسیت اکولوژیکی و موقعیت خاص سیاسی این منطقه است.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز تجن

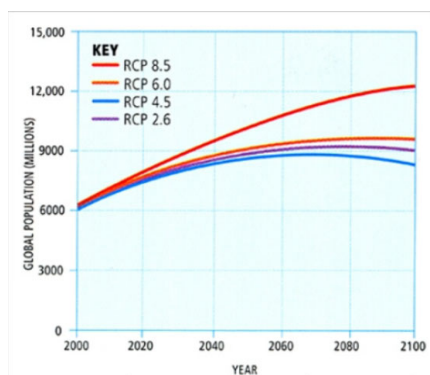
نهایت تخمین مقادیر جریان رواناب سطحی حوزه آبخیز بکار گرفته شد. در بخش شناسایی تغییر اقلیم و تعیین مناسب‌ترین مدل گردش عمومی جو، از آمار بارش، دمای حداقل و حداکثر، دما و مجموع بارش‌های روزانه ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک بابل (۶۹ سال)، هیدرومتری بابل (۶۹ سال)، کلیما تولوژی قراخیل (۶۹ سال)، تحقیقات برنج آمل (۶۹ سال) استفاده شد. پس از واسنجی و

روش کار

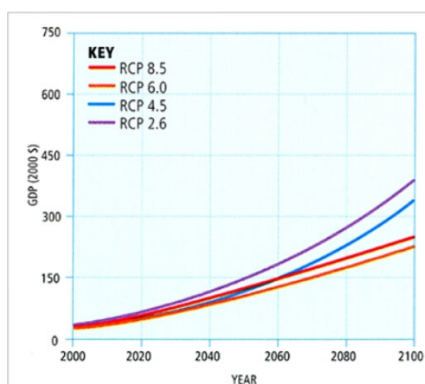
پس از جمع آوری داده‌ها و اطلاعات از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه نسبت به آزمون همگنی داده‌ها در صورت نیاز و اصلاح داده‌ها اقدام می‌شود. سپس بخش اصلی تحقیق یعنی شناسایی تغییر اقلیم در زمان گذشته تا کنون، استفاده از مدل اقلیمی جهت پیش بینی اقلیم سال‌های آینده، استفاده از تکنیک‌های کوچک مقیاس سازی و در

(بحرانی) مورد تحلیل قرار گرفتند. در سناریوی RCP 2.6 (حالت ایده‌آل)، تابش کاهش پیدا می‌کند و میزان غلظت گاز گلخانه‌ای CO₂ نیز کاهش می‌یابد. در سناریوی RCP 4.5 (حالت متوسط) نیز غلظت گاز گلخانه‌ای CO₂ کمتر می‌شود. این مدل توسط MiniCAM طراحی گردید و در آن واداشت تابشی حاصل از گاز گلخانه‌ای برای بازه زمانی قبل ۲۱۰۰ به میزان ۴/۵ وات بر متر مربع ثابت می‌ماند. در سناریوی RCP 8.5 (بحرانی) انتشار سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیمی دیده نمی‌شود و در این روند اقلیم کره زمین منجر به برداشت تابش به حد ۸/۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ می‌شود. از این رو میزان غلظت گاز گلخانه‌ای CO₂ به میزان ۱۰۰۰ ppm می‌رسد و در حال افزایش می‌باشد.

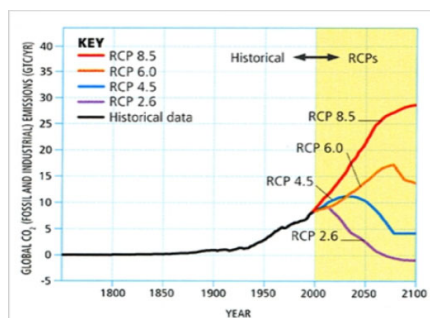
اعتبارسنجی مدل‌های اقلیمی مختلف با توجه به داده‌های زمان گذشته، مدل اقلیمی مناسب از میان مدل‌های HadCM3, ECHAM4, CGCM2 انتخاب شد. پس از انتخاب مناسب‌ترین مدل گردش عمومی جو برای محدوده مطالعاتی، لازم است که خروجی‌های این مدل که تحت سناریوهای اقلیمی برای دوره پیش بینی در مقیاس جهانی به دست آمده‌اند، کوچک مقیاس شوند و به مقیاس ایستگاهی تبدیل شوند. در این تحقیق از تکنیک‌های کوچک مقیاس سازی LARS-WG با توجه به در دسترس بودن داده و امکانات جهت تبدیل نتایج مدل جهانی به منطقه‌ای استفاده شد. در نهایت سناریوهای انتشار مورد استفاده در این پژوهش یعنی سناریوی RCP 2.6 (حالت ایده‌آل)، سناریوی RCP 4.5 (حالت متوسط) و سناریوی RCP 8.5



ب



الف



ج

۲. گسترش جمعیت جهانی (الف) تولید ناخالص داخلی (ب) انتشار گاز کربن دی‌اکسید (ج) در آینده بر مبنای سناریوهای RCP (من و کمپ،

(۲۰۱۵)

استان‌ها؛ مرزهای سیاسی به طور حتم باید در نظر گرفته شوند. بنابراین در این مطالعه برای مطالعه اثر تغییر اقلیم بر پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای، افزون بر ملاحظه‌ها و

به طور معمول برای مطالعات انتقال آب بین حوضه‌ای، اطلاعات و مشخصات حوضه در نظر گرفته می‌شود؛ اما به دلیل تداخل منافع اقتصادی، اجتماعی و نفوذ سیاسی

۴-۱ اثر تغییر اقلیم در انتقال آب بین حوضه‌ای تحت سناریوها و مدل تغییر اقلیم (حوضه تچن استان مازندران)

بارش تحت تأثیر تغییر اقلیم در حوضه مورد بررسی طی دوره‌ی ۲۰۵۰-۲۰۳۰ گردید. سپس با استفاده از متغیرهای اقلیمی آماده‌شده، با استفاده از مقادیر مصنوعی دما و بارش تولیدشده مربوط به دوره‌ی آتی، تغییرات رواناب نیز در دوره‌ی آتی (۲۰۵۰ - ۲۰۳۰) نسبت به مقادیر دوره‌ی پایه (۲۰۲۰ - ۱۹۹۸) مورد ارزیابی قرار گرفت.

- نتایج معیار ارزیابی برای انتخاب بهترین مدل تغییر اقلیم در جهت بهتر مشخص شدن اثر هر یک از مدل‌های Can ، EC-EARTH، MIROC5، HADGEM2 و Esm2 و IPSL_CM5A_MR رابطه بین دوره مشترک بین خروجی مدل GCM و داده مشاهداتی برای متغیر اقلیمی (بارش و دما)، نتایج حاصل از جذرمیانگین مربع خطا (RMSE) و همبستگی (R2) و درصد تغییرات استفاده شد (جدول ۱). سپس با بهره‌گیری از نرم افزار LARS-WG6 و داده‌های اقلیمی مشاهداتی در دوره پایه، داده خروجی مدل GCM عامل تغییرات در دوره ارزیابی نسبت به دوره پایه، داده اقلیمی تولید گردید و برای هر متغیر اقلیمی در هر ایستگاه نسبت به پیش‌بینی داده اقلیمی در دوره‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ استفاده شد. نتایج ارزیابی ۵ مدل GCM برای هر ایستگاه نسبت به بارش و دما در جداول ۱ و ۲ ارائه شود.

مطالعات حوضه‌ای مرزهای سیاسی نیز در نظر گرفته می‌شوند.

- ریزمقیاس‌نمایی داده‌های هواشناسی با استفاده از LARS-WG در پژوهش‌های تغییر اقلیم لازم است تا داده‌های دوره پایه مشخص باشند. در این راستا ابتدا داده‌های مورد نیاز شامل مقادیر روزانه بارش، دما در دوره آماری ۱۹۹۸-۲۰۱۹ مختص ایستگاه‌های منتخب حوضه که شامل ایستگاه‌های داراب، نکا، پل سفید، تچن، کیاسر و ناز بود استفاده گردید. به منظور ارزیابی تغییرات متغیرهای اقلیمی بارش و دما در دوره‌های خروجی مدل اقلیمی HADGEM2 که یک مدل گردش عمومی جو بوده که بوسیله مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیمی طراحی شده، با استفاده از مدل LARS-WG تولید داده برای بازه زمانی ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ صورت گرفت.

نتایج و بحث

پس از محاسبه پارامترهای موثر حوضه مطالعاتی، اقدام به ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های GCM با استفاده از مدل لارس، به منظور پیش‌بینی دما و بارش آینده شد. در جهت برآورد تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه، پس از صحت‌سنجی خروجی مدل LARS-WG6 و کسب از اطمینان عملکرد مدل با ارزیابی نتایج رواناب حاصل از دما و بارش برای دوره‌ی آتی، اقدام به تولید داده‌های مصنوعی دما و

جدول ۱. نتایج ارزیابی مدل گردش عمومی جو CMIP5 نسبت به آمار ایستگاه سینوپتیک و باران سنجی براساس مؤلفه دما

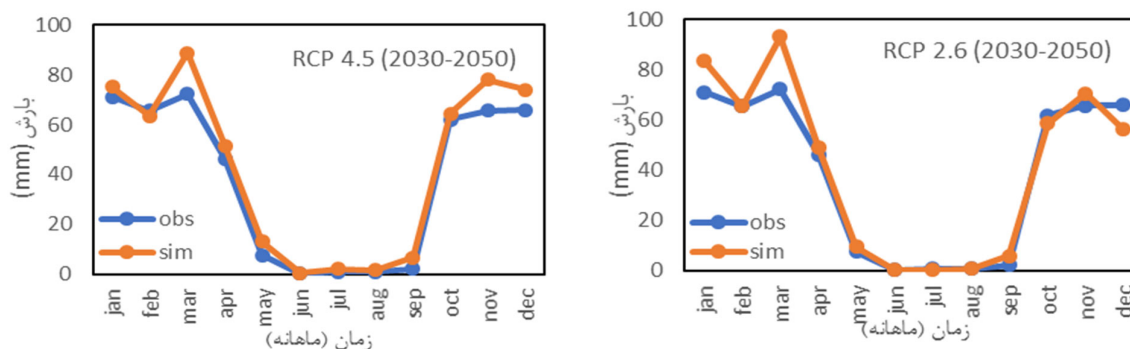
ایستگاه	معیار ارزیابی	HADGEM2	MIROC5	EC-EARTH	Can Esm2	IPSL_CM5A_MR
ناز	RMSE	۱۸۲	۱۹	۲۳۸	۳۵	۳۲
	R ²	۰۹۷	۰۹۵	۰۹۱	۰۸۷	۰۸۹
	NRMSE	۶٪	۷٫۵٪	۹٫۵٪	۱۱٫۵٪	۱۱٪
	رتبه	۱	۲	۳	۵	۴
تچن	RMSE	۱۶۲	۱۹۵	۲۵۸	۳۷	۳۵
	R ²	۰۹۵	۰۹۳	۰۹۵	۰۶۷	۰۷۹
	NRMSE	۵٪	۷٫۵٪	۹٫۵٪	۱۱٫۵٪	۱۱٪
	رتبه	۱	۲	۳	۵	۴
پل سفید	RMSE	۱۹۲	۱۹۸	۲۴۸	۳۷۵	۳۲
	R ²	۰۹۲	۰۸۵	۰۸۱	۰۷۷	۰۸۹
	NRMSE	۹٪	۹٫۵٪	۹٫۹٪	۱۱٫۵٪	۱۱٪
	رتبه	۱	۲	۳	۵	۴

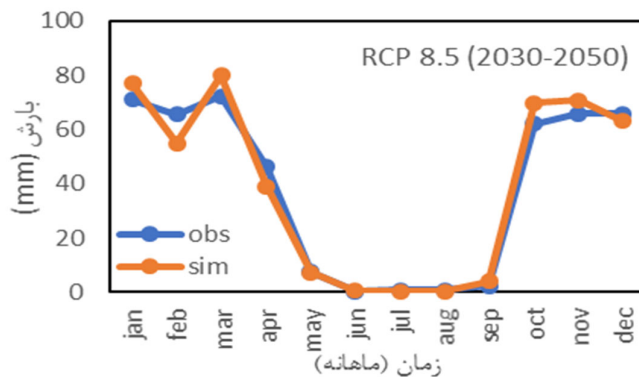
جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل گردش عمومی جو CMIP5 نسبت به آمار ایستگاه سینوپتیک و باران سنجی براساس مؤلفه بارش

ایستگاه	معیار ارزیابی	HADGEM2	MIROC5	EC-EARTH	Can Esm2	IPSL_CM5A_MR
تجن	RMSE	۲.۴۲	۲.۴۴	۲.۷۹	۲.۹۲	۲.۹۱
	R ²	۰.۹۱	۰.۸۹	۰.۸۷	۰.۸۵	۰.۸۶
	NRMSE	۷٪	۷.۱٪	۷.۶٪	۷.۹٪	۷.۸٪
	رتبه	۱	۲	۳	۵	۴
پل سفید	RMSE	۳.۴	۳.۰	۳.۵	۴.۲	۴.۰۲
	R ²	۰.۹۱	۰.۹۶	۰.۹	۰.۸۵	۰.۸۹
	NRMSE	۷.۵٪	۶٪	۹.۵٪	۱۱.۵٪	۱۱٪
	رتبه	۲	۱	۳	۴	۵
کیاسر	RMSE	۲.۴۶	۲.۴۴	۲.۶۹	۲.۶۲	۲.۸۱
	R ²	۰.۹۱	۰.۸۹	۰.۸۷	۰.۸۸	۰.۸۶
	NRMSE	۷٪	۷.۱٪	۷.۶٪	۷.۴٪	۷.۸٪
	رتبه	۲	۱	۴	۳	۵
داراب	RMSE	۲.۶۹	۳.۶۱	۴.۶	۵.۴	۶.۵
	R ²	۰.۹۶	۰.۸۹	۰.۸۱	۰.۷۹	۰.۷۳
	NRMSE	۶٪	۷.۲٪	۸.۵٪	۹.۱٪	۱۱.۵٪
	رتبه	۱	۲	۴	۳	۵
نکا	RMSE	۳.۴	۳.۰	۳.۵	۴.۲	۴.۰۲
	R ²	۰.۹۱	۰.۹۶	۰.۹	۰.۸۵	۰.۸۹
	NRMSE	۷.۵٪	۶٪	۹.۵٪	۱۱.۵٪	۱۱٪
	رتبه	۲	۱	۳	۴	۵

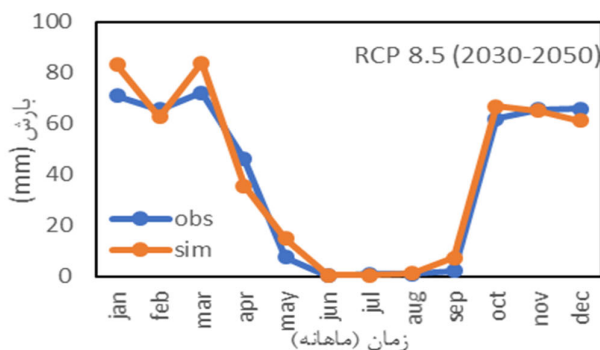
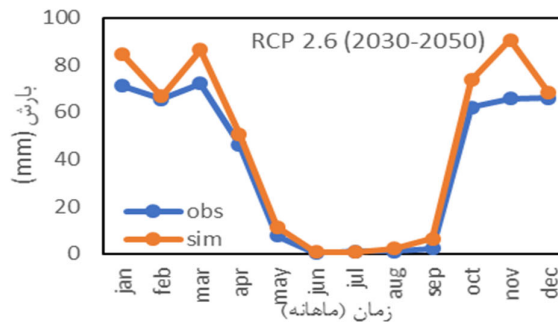
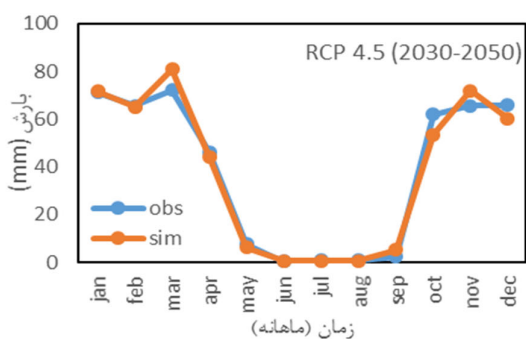
– ارزیابی شدت بارش و میزان آن تحت سناریوهای مختلف مدل تغییر اقلیم

نتایج حاصل از هر یک از سناریوهای اقلیمی منتخب به صورت مجزا در قالب نمودارها و تحلیل‌های آن ارائه گردیده است.

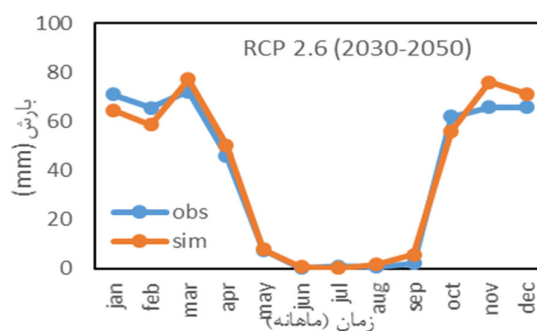
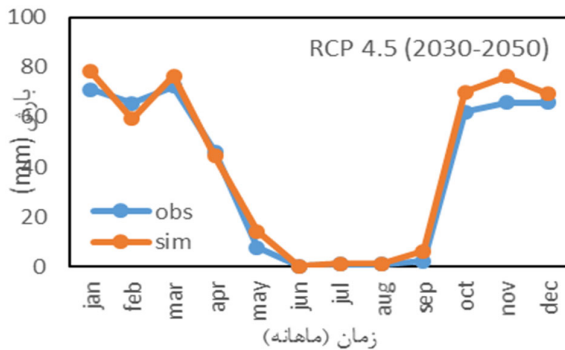


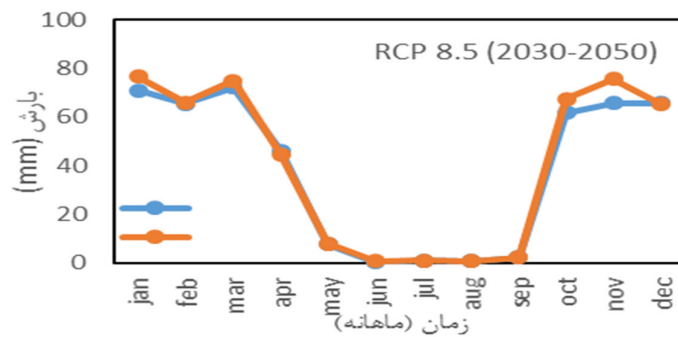


شکل ۳. ارزیابی شدت بارش و میزان آن تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه سینوپتیک تجن

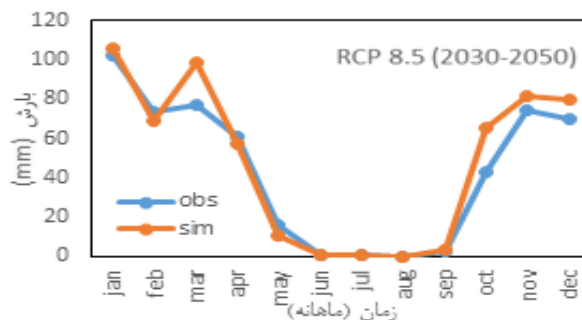
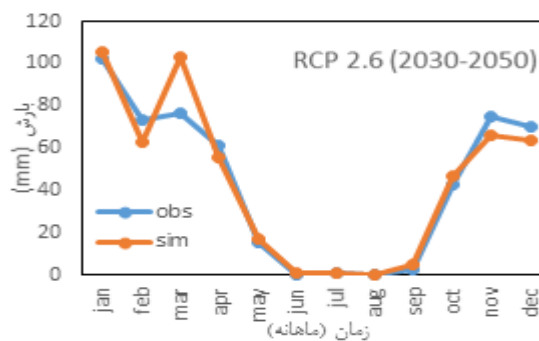
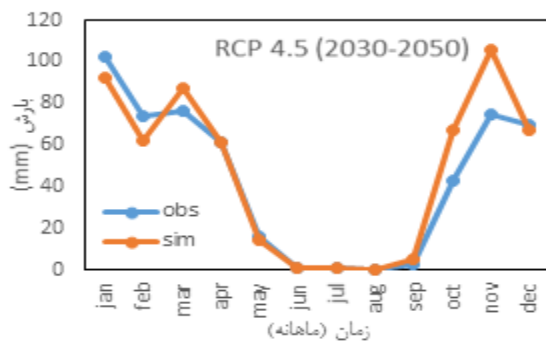


شکل ۴. ارزیابی شدت بارش و میزان آن تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه سینوپتیک پل سفید

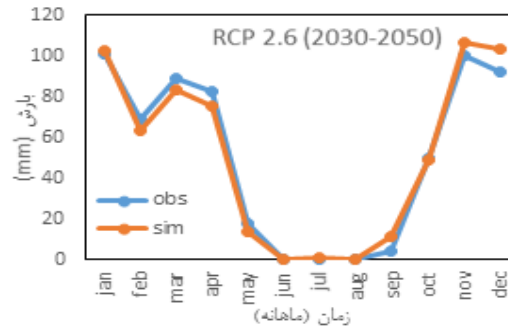
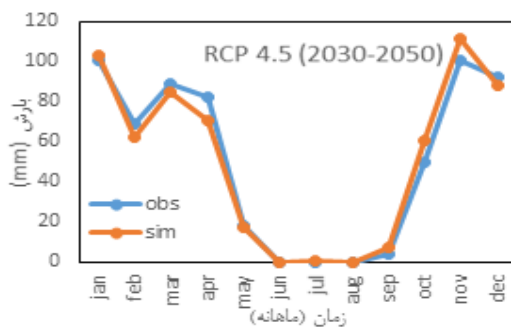


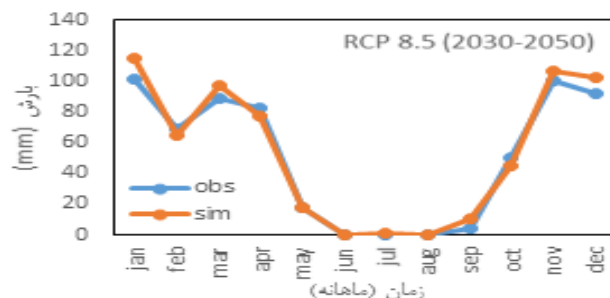


شکل ۵. ارزیابی شدت بارش و میزان آن تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه سینوپتیک ناز

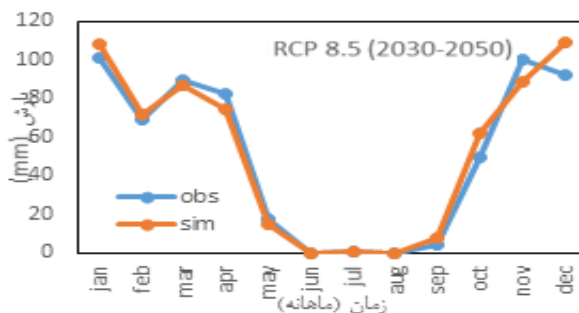
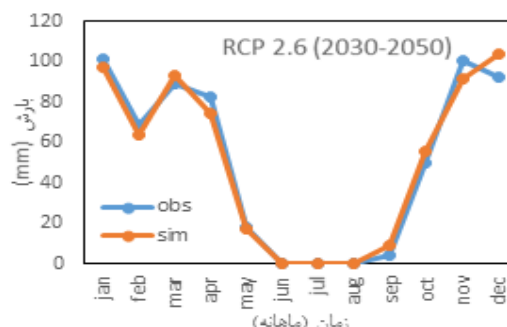
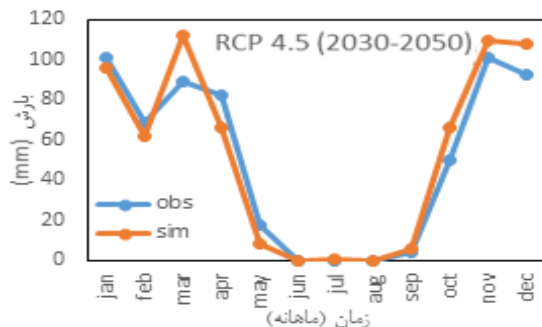


شکل ۶. ارزیابی شدت بارش و میزان آن تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه باران‌سنجی نکا





شکل ۷. ارزیابی شدت بارش و میزان آن تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه باران‌سنجی داراب



شکل ۸. ارزیابی شدت بارش و میزان آن تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه باران‌سنجی کیاسر

ایستگاه تچن، ناز، پل سفید سینوپتیک بوده همانطور که در بالا مشاهده کردیم تغییرات بارش در دوره‌های مختلف و سناریوهای مختلف مدل های اقلیمی که مورد ارزیابی قرار گرفت بیانگر افزایش یا کاهش میزان بارش وارد در منطقه می‌باشد. علاوه بر بارش عامل دیگری که بر میزان رواناب حوضه تاثیر دارد دمای منطقه است و یکی از فاکتورهای موثر بر استخراج تبخیر و تعرق و همچنین بر روی میزان رواناب است، دما (حداکثر و حداقل) می باشد. برای این منظور تغییرات دمای حداکثر و دمای حداقل تحت سناریوهای مختلف در طول دوره آماری که برآورد گردید، در برآورد تغییرات دما تحت تاثیر وضعیت اقلیمی آینده

در بازه زمانی ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ تحت سناریوی RCP 2.6، مقدار بارش در ایستگاه تچن، مقدار بارش حدود ۲ تا ۱۰ درصدی افزایش یافت، در ایستگاه پل سفید بین ۲ تا ۲۰ درصد افزایش، ایستگاه ناز نیز ۰.۷ تا ۵ درصد افزایش، در ایستگاه نکا ۱ تا ۵ درصد افزایش، داراب ۲ تا ۸ درصد افزایش و در ایستگاه پایانی یعنی کیاسر، ۰.۵ تا ۳ درصد افزایش بارش در بعضی از ماه‌ها رخ داده است. اما در بیشتر ماه‌ها مقدار بارش ثابت یا گاهی بین ۱۰ تا ۲ درصد کاهش افت که این خود سبب کاهش رواناب در منطقه نیز می‌گردد.

– ارزیابی دمای حداقل و حداکثر تحت سناریوهای مختلف مدل تغییر اقلیم

و اما برای بازه زمانی ۲۰۳۰-۲۰۵۰ تاثیر مدل اقلیمی Hadgem2 در برآورد دمای حداقل ایستگاه پل سفید مطابق جدول زیر نشان داده شده است. هر یک از سناریوهای ۲/۶ و ۴/۵ نسبت به سناریو ۸/۵ کاهش دما مواجه بوده اما از طرفی نسبت به بازه های زمانی قبل این تغییرات کمتر دیده میشود که در تطبیق با تحقیق دوان و همکاران (۲۰۲۲)، علت اصلی این امر میزان بارش در منطقه و غلظت گاز CO2 می باشد.

- برآورد مقدار رواناب برای آینده با استفاده از مدل تغییر اقلیم با استفاده از مدل اقلیم و ریز مقیاس نمایی آن، در ادامه برای هر یک از سناریوهای انتشار مدل اقلیمی صورت مجزا نمودارها و تحلیل های آن برای ایستگاه هیدرومتری ارائه گردیده است. همانطور که در اشکال ۹ الی ۱۶ مشاهده می شود، در مدل HADGEM2 تحت سناریوهای ۴.۵ در تطبیق با یافته‌های نیرومندفرد و همکاران (۱۳۹۷) شاهد کاهش میزان رواناب در اکثر ماه‌ها هستیم. اما این درصد اختلاف بسیار ناچیز بوده و در سناریوهای ۲.۶ و ۸.۵ ماه‌ها میزان اختلاف قابل توجه می باشد.

نسبت به حال دارای طول متناوب حالت ترسالی و یا خشکسالی روبرو بودیم.

تاثیر مدل اقلیمی Hadgem2 در دمای حداقل برای بازه زمانی ۲۰۳۰-۲۰۵۰ در جدول ۳ نشان داده شد. همانطور که بر اساس تعاریف سناریوها در بخش مواد و روش ها به آنها اشاره شده شد، دو سناریوی ۲/۶ و ۴/۵ که در حالت خوشبینانه و متوسط قرار داشته وضعیت غلظت گازهای گلخانه ای نسبت به یکدیگر تغییر ناچیزی داشته و از طرفی دمای هوا نیز کاهش پیدا کرد. اما در سناریوی ۸/۵ که سناریو بدبینانه بوده غلظت گازهای گلخانه ای افزایش پیده کرده که این افزایش موجب بهم ریختگی در جو و افزایش دما شده است. این نتایج در تطبیق با یافته‌های باغبانیان و همکاران (۱۴۰۰) و دوان و همکاران (۲۰۲۲) بوده است.

در بازه زمانی ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ ایستگاه ناز مطابق با جدول زیر شاهد آن هستیم که میزان تغییرات دما در ماه های مختلف تحت سناریوهای ۲/۶ و ۴/۵ و ۸/۵ نسبت به دوره قبل افزایش پیدا کرده که یکی از دلایل آن غلظت گاز گلخانه ای و تغییر در رخداد بارش در منطقه می باشد.

جدول ۳. نتایج ارزیابی تاثیر مدل اقلیمی Hadgem2 در دمای حداقل برای بازه زمانی ۲۰۳۰-۲۰۵۰

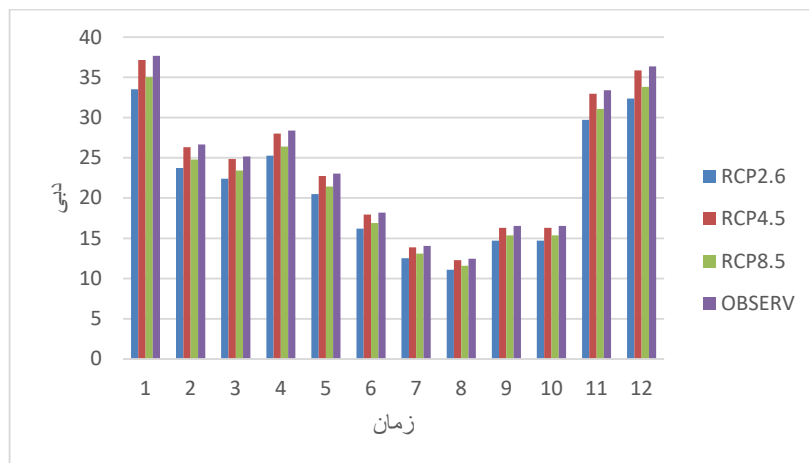
سناریو	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2.6	-0.081	-0.054	-0.061	-0.004	0.012	-0.013	0.004	-0.001	0.03	-0.031	-3.789	-0.042
4.5	-0.143	-0.096	-0.076	-0.02	0.012	-0.015	-0.01	0.002	0.031	-0.033	-2.474	-0.098
8.5	0.146	0.146	0.145	0.035	0.018	0.016	0.005	0.013	0.05	0.033	-1.053	-0.003

جدول ۴. تاثیر مدل اقلیمی Hadgem2 در دمای حداقل برای بازه زمانی ۲۰۳۰-۲۰۵۰

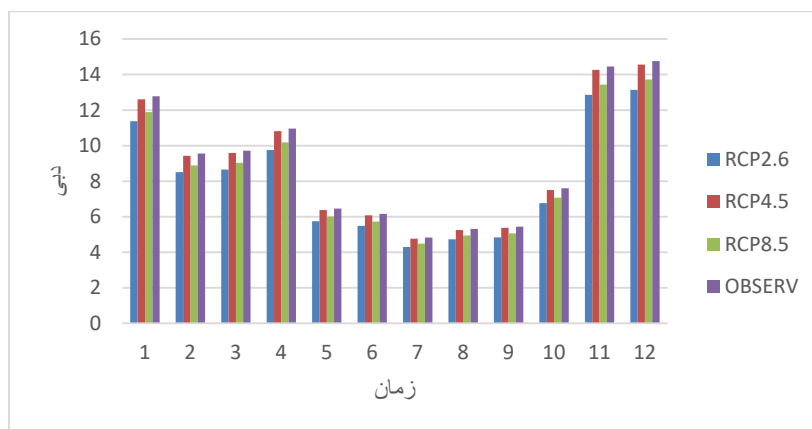
سناریو	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2.6	-0.084	0.025	0.038	0	-0.001	-0.009	0.002	-0.008	0.021	-0.098	-3.053	0.016
4.5	-0.152	-0.037	0.061	-0.022	0.002	-0.012	0.007	-0.01	0.027	-0.039	-4.526	-0.026
8.5	0.154	0.125	0.122	0.026	0.009	0.022	0.009	0.001	0.043	-0.004	-1.053	0.042

جدول ۵. تاثیر مدل اقلیمی Hadgem2 در دمای حداقل برای بازه زمانی ۲۰۳۰-۲۰۵۰

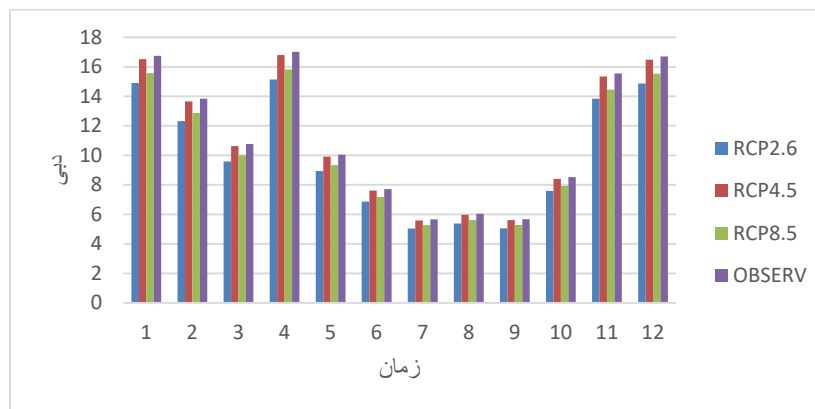
سناریو	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2.6	-0.161	0.004	-0.069	-0.036	0.003	-0.016	0.004	-0.016	0.024	-0.096	-4.158	-0.013
4.5	-0.096	0.017	-0.038	-0.027	0.009	-0.015	0.006	-0.004	0.026	-0.050	-2.526	-0.007
8.5	-0.056	0.046	0.130	0.004	0.016	-0.020	0.007	-0.004	0.031	-0.039	-1.105	0.023



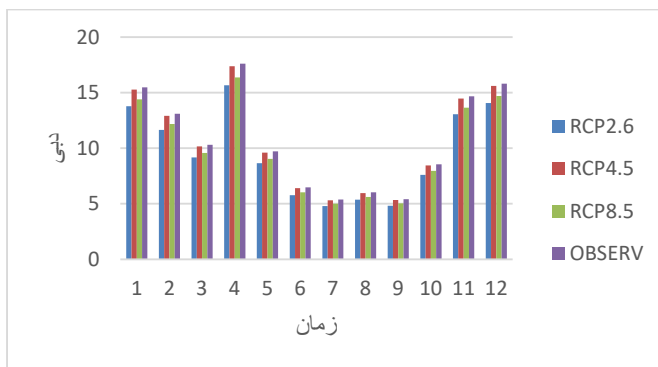
شکل ۹. ایستگاه هیدرومتری کردخیل



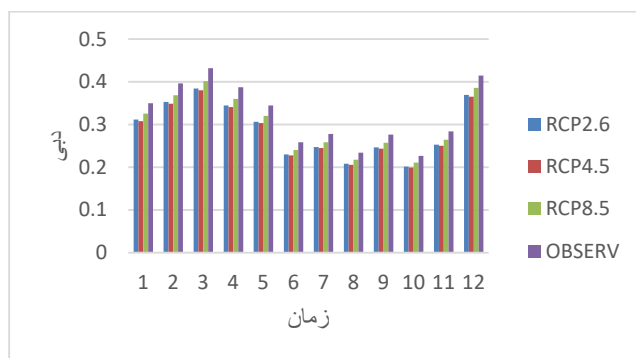
شکل ۱۰. ایستگاه هیدرومتری گرمرود



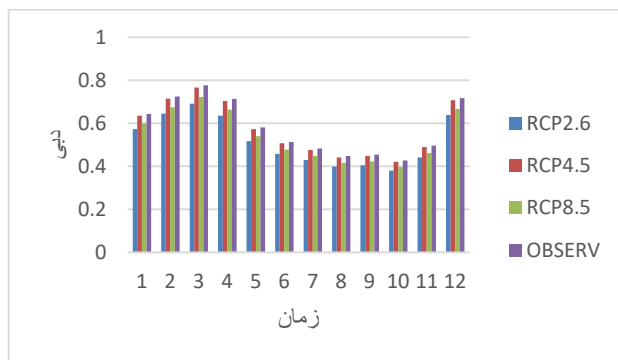
شکل ۱۱. ایستگاه هیدرومتری ریگ چشمه



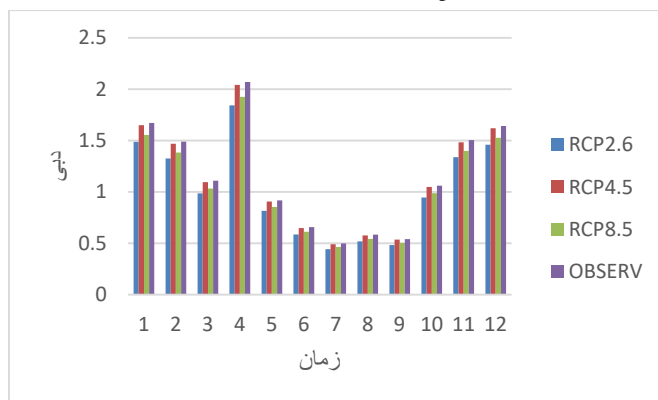
شکل ۱۲. ایستگاه هیدرومتری ورنم



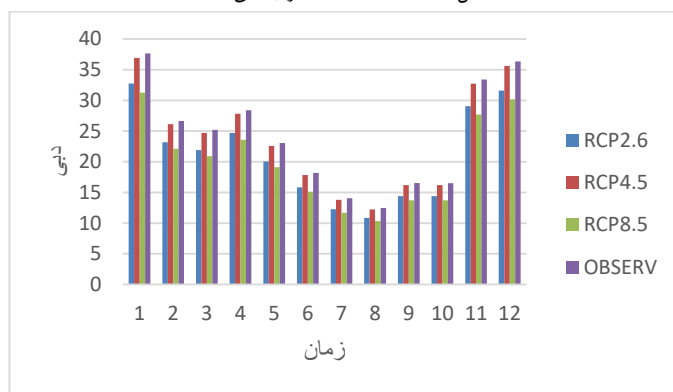
شکل ۱۳. ایستگاه هیدرومتری آستا



شکل ۱۴. ایستگاه هیدرومتری کرچا



شکل ۱۵. ایستگاه هیدرومتری علی آباد



شکل ۱۶. ایستگاه هیدرومتری کردخیل

نتیجه‌گیری

یکی از مسائل مهم که مطالعات زیادی رابه خود اختصاص داده در سال‌های اخیر تغییر اقلیم و افزایش دمای هوای زیست محیطی برای بشر و جانوران است. در اثر پدیده‌ی تغییر اقلیم که بطور کلی روی دما، بارش و رواناب رخ می دهد، علاوه بر این مسائل به صورت خود به خودی این تغییرات می‌تواند بر عوامل محیط زیستی و سایر پارامترهای دیگر در سطح حوضه نیز تأثیر بگذارد. مدل‌هایگرددشعمومی (GCM) برای بررسی پدیده‌ی تغییر اقلیم که از بهترین اطلاعات درباره تغییرات جو با توجه به افزایش گازهای گلخانه‌ای فراهم می‌کنند استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که محدودیت‌هایی که این مدل در استفاده از داده‌های اقلیمی دارد شامل دقت تفکیک مکانی و زمانی آن می باشد که متأسفانه با دقت موردنیاز برای استفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی مطابقت ندارد. روش‌های متعددی برای کوچک مقیاس کردن در زمینه استفاده از خروجی‌های GCM مدل‌های هیدرولوژیکی وجود دارد نیاز و یا تبدیل خروجی‌های GCM به متغیرهای محلی در مقیاس حوضه رودخانه توسعه یافته‌اند. این روش‌ها در دو گروه کلی کوچک مقیاس کردن آماری و دینامیکی قرار می‌گیرند. به دلیل صرفه‌جویی در زمان، هزینه و پایین بودن نیاز تکنولوژیکی و فنی، روش‌های آماری در مقایسه با روش‌های دینامیکی کاربرد بیشتری دارند. در این تحقیق از روش مدل لارس که از روش‌های آماری می باشد، استفاده شد. این روش، در جهت بررسی اثر تغییر اقلیم در داده‌های

دما و بارش که به عنوان دومتغیر اقلیمی اصلی و پایه‌ای در اکثریت مطالعات تغییر اقلیم می باشد، استفاده شده است. در این مطالعه از داده های دوره آماری ایستگاه های ناز، پل سفید، تچن، نکا، داراب، کیاسر استفاده شده است در دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۹ استفاده شد که پس از بررسی داده ها و اطمینان از صحت آن‌ها، در گام بعدی شروع به تولید داده‌های اقلیمی آینده و شبیه‌سازی داده‌های دما و بارش با استفاده از خروجی‌های GCM شده است. این خروجی بزرگ مقیاس بوده بنابراین اقدام به ریز مقیاس نمایی شده و با کسب اطمینان از صحت عملکرد مدل، داده‌های مصنوعی دما و بارش در دوره آتی ۲۰۳۰-۲۰۵۰ پیش‌بینی شده‌اند. در انتهای این مرحله با بررسی داده‌های دما و بارش در دوره آتی و مقایسه آن‌ها با داده‌های تاریخی، به بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش و دمای حوضه آبریز تچن پرداخته شده است.

در گام بعدی که هدف بررسی تغییرات رواناب در دوره آینده بوده است، در دوره آینده نیز تنها دما و بارش از پارامترهای اقلیمی تغییر کرده که حاصل از کوچک مقیاس کردن خروجی‌های GCM موجود است، برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه از مقادیر دما و بارش ماهانه استفاده شده است. در مرحله‌ی آخر نیز با استفاده از متغیرهای اقلیمی دما و بارش پیش‌بینی شده برای دوره‌ی آتی و مدل انتخاب شده حاصل از مرحله قبل اقدام به بررسی تغییرات میزان رواناب ورودی برای دوره آتی ۲۰۳۰-۲۰۵۰ استفاده شد که شاهد

منابع

کاهش رواناب بوده ایم و نیازمند است در منطقه اقدامات پیشگیرانه صورت گیرد.

- de Graaf I E M, Gleeson T, van Beek L P H, Sutanudjaja E H and Bierkens M F P. 2019. Environmental flow limits to global groundwater pumping. *Nature*, 574: 90–94.
- Dehghani, Navid. Ghasemieh, Hoda. Sadatinejad, Javad. Khalil, the victim. 2016. Evaluation of the effect of climate change on runoff using a hydrological model (case study: Fatsam Sami watershed), *Ecohydrology*, No. 1, 102-89.
- Dibike, Y.B., and Coulibaly, P. 2005. "Hydrologic Impact of Climate Change in the Saguenay Watershed: Comparison of Downscaling Methods and Hydrologic Models, *Journal of Hydrology*, 307(1–4): 145-163.
- Emanuel R E, Buckley J J, Caldwell P V, McNulty S G and Sun G. 2015. Influence of basin characteristics on the effectiveness and downstream reach of interbasin water transfers: displacing a problem *Environ. Res. Lett.* 10 124005.
- Faribani Romandfard, Mehdi Zakeri, Niobhanazi Azralo. 2017. Investigating the impact of climate change on river flow using the IHACRES rainfall model (Case study: Mohammad Abad Basin in Golestan). *Irrigation Science and Engineering - Volume 41, Number 103-117-3*.
- Ghassemi F and White I. 2007. *Inter-basin Water Transfer: Case Studies from Australia, United States, Canada, China and India* (Cambridge: Cambridge University Press).
- Goodarzi, E., Dastorani, M. T., Massah Bavani, A., and Talebi, A. 2015. Evaluation of the Change-Factor and LARS-WG Methods of Downscaling for Simulation of Climatic Variables in the Future (Case study: Herat Azam Watershed, Yazd - Iran), *ECOPERSIA*, 3(1): 833-846.
- Heydari Mojtabi and Mohammad Reza Khzaei. 2016. Evaluation of the effect of climate change on maximum daily rainfall in Kermanshah. *Journal of Water and Soil Resources Protection*, Fattam year, number 2, pp. 27-39.
- IPCC, 2007. *Climate Change, the Scientific Basis, In Contribution of Working Group I to the Third. Assessment Report of Intergovernmental Panel of Climate Change*; Editor by J.T.
- Kai Duan, Peter V Caldwell, Ge Sun, Steven G McNulty, Yue Qin, Xiaohong Chen and Ning Liu. 2022. Climate change challenges efficiency of inter-basin water transfers in alleviating water stress. *Environ. Res. Lett.* 17 (2022) 044050.
- Kilsby, C.G., Jones, P.D., Burton, A., Ford, A.C., Fowler, H.J., Harpham, C., James, P., Smith, A., and Wilby, R. L. 2007. "A Daily Weather Generator for Use in Climate Change Studies, *Environmental Modelling and Software*, 22(12): 1705-1719.
- Lei, H., Yang, D., and Huang, M. 2014. Impacts of climate change and vegetation dynamics on runoff in the mountainous region of the Haihe River basin in the past five decades, *Journal of Hydrology*, (511): 786-79.
- Liu C and Zheng H. 2002. South-to-north water transfer schemes for China. *Int. J. Water Resour. Dev*, 18: 453–471.
- Long D, Yang W, Scanlon B R, Zhao J, Liu D, Burek P, Pan Y, You Land Wada Y. 2020. South-to-North water diversion stabilizing Beijing's ground water levels *Nat. Commun.* 11 3665.
- Maupin, M. A., Kenny, J.F., Hutson, S.S., Lovelace, J. K., Barber, N. L., and Linsey, K.S. 2014. *Estimated use of water in the United States in 2010: U.S. Geological Survey Circular 1405*, 56 p.
- Minville, M., Brissette, F., and Leconte, R. 2008. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a Nordic watershed, *Journal of Hydrology*, 358 (1-2): 70– 83.

17. Mohammadi, H., Ardalan, A., MassahBavani, A., Naddafi, K., and Talebian, M.T. 2018. Simulation of climate change impact on emergency medical services client S caused by air pollution, *International Quality Journal*, 7(2): 1-9.
18. Mojerlo, F., Fazlavoli, R., and Emadi, A. 2018. Use of IHACRES model to evaluate the effects of climate change in the Tajen watershed. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(1), 129-141.
19. Osman, Y., Al-Ansari, N., and Abdellatif, M. 2019. Climate change model as a decision support tool for water resources managemet in northern Iraq: a case study of Greater Zab River, *Journal of Water and climte change*, 10(1): 197-209.
20. Perstubaghbanan, Ali Ahmadabadi and Ayat Karimi. 1400. Investigating the impact of climate change on the hydrological changes of the Hubal Harood watershed. *Journal of Climate Change Research. Scientific Quarterly of Golestan University*, 2nd year/5th serial number/27-40.
21. Shidaiyan, M., and Ziyatbarahmadi, M., Kh., and Fazlauli, R., Sha'bani, A. 2013. Investigating the effect of climate change on the water resources of the Tajen plain watershed in Mazandaran province, the 5th Iran Water Resources Management Conference, Tehran.
22. Shiklomanov I A. 2000. Appraisal and assessment of world water. *Resources Water Int*, 25: 11-32.
23. Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J and Lammers R B. 2000. Global water resources: vulnerability from climate changeand population growth. *Science*, 289: 284-288.
24. Yevjevich V. 2001. Water diversions and interbasin transfers. *WaterInt*, 26: 342-348.
25. Zhang C, DuanQ, Pan Y, Gong H, Gong W, DiZh, Lei Xi, Liao W, HuangZh, Zheng L,Guo X. 2020. The effectiveness of the south-to-north waterdiversion middle route project on water delivery andgroundwater recovery in North China Plain. *Water Resour.Res*, 56: 1-14.
26. Zhao X, Liu J, Liu Q, Tillotson M R, Guan D and Hubacek K. 2015. Physical and virtual water transfers for regional waterstress alleviation in China Proc. *Natl Acad. Sci. USA*112 1031-5.