

## ارزیابی تغییرات جریان آینده تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر حوضه آبریز رودخانه گاماسیاب

شهاب‌الدین زارعه‌زاده مهریزی<sup>۱</sup>، اسداله خورانی<sup>۲\*</sup>، جواد بذرافشان<sup>۳</sup>، ام‌البنین بذرافشان<sup>۴</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری آبخیزداری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان،

بندرعباس، ایران

۲. دانشیار، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۳. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴. استادیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۷/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۱۱/۱۲)

### چکیده

تغییر اقلیم با توجه به ظرفیت محدود اکوسیستم‌ها می‌تواند موجب بروز مشکلاتی در تأمین آب قابل دسترس برای رفع نیاز بشر شود و بر توانایی منطقه‌ای در مواجهه با بلایای طبیعی مرتبط با آب تأثیر بگذارد. یکی از مشخصه‌های طبیعی رودخانه گاماسیاب احتمال وقوع سیلاب و خطرات ناشی از آن است. بنابراین مطالعات هیدرولوژیکی تحت شرایط تغییر اقلیم برای ساماندهی و مدیریت آن ضروری است. لزوم استفاده از مدل‌های سری CMIP5 در پژوهش‌های جدید با توجه به دقت زیاد آنها و کمبود کارهای پژوهشی به وسیله این مدل‌ها در کشور ما، سبب شد در پژوهش حاضر از خروجی‌های چهار مدل سری CMIP5 و دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 برای آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۴۹ میلادی) و آینده دور (۲۰۷۰-۲۰۹۹ میلادی) استفاده شود. نتایج نشان می‌دهد مقدار بارندگی سالانه حوضه در پنج ایستگاه بررسی شده با توجه به سناریوهای مد نظر و دوره‌های زمانی مختلف بین ۳۱/۶- تا ۵۲/۸ درصد تغییر خواهد کرد. میانگین کمترین و بیشترین دمای ماهانه در ایستگاه کرمانشاه به ترتیب حداکثر تا ۲/۷۵C° و ۲/۱۵C° و در ایستگاه همدان به ترتیب حداکثر تا ۳/۴۳C° و ۴/۲۶C° با توجه به سناریوهای مختلف افزایش می‌یابد. در این پژوهش از مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی جریان استفاده شد. نتایج ضمن تأیید کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی حوضه، نشان داد میزان تغییرات رواناب حاصل از خروجی مدل CSIRO-Mk تحت سناریوهای مختلف نسبت به دوره مشاهداتی از ۴۲/۳- تا ۱۷/۸ درصد متغیر خواهد بود. نتایج تحقیق ضرورت به‌کارگیری تدابیر لازم به‌منظور سازگاری با تغییر اقلیم در سیاست‌های آبی مدیریت حوضه گاماسیاب تأکید می‌کند.

کلیدواژگان: تغییر اقلیم، حوضه گاماسیاب، شبیه‌سازی.

## مقدمه

تغییر اقلیم بر طیف وسیعی از پدیده‌های اقلیمی، چرخه هیدرولوژیکی، کشاورزی، اکوسیستم گیاهی و جانوری و مسائل اجتماعی اثر می‌گذارد. پدیده تغییر اقلیم و آثار آن، به عنوان یکی از چالش‌های مهم پیش رو در مدیریت منابع آب شناخته شده است. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (۲۰۰۷) گزارش داده است که فرکانس و شدت وقایع حادی مانند خشک‌سالی‌ها و سیلاب‌ها با افزایش آثار پدیده تغییر اقلیم، رو به افزایش است [۱]. ساده‌ترین راه برای آشکارسازی تغییر اقلیم، نشان‌دادن تغییرات دما و بارش است. در این زمینه نتایج مطالعه هیرتیک و جاکوبیت در ناحیه مدیترانه، افزایش چهار درجه سانتی‌گرادی دما را گزارش می‌دهد [۲]. همچنین، پژوهش از کول در حوضه رودخانه اژه در ترکیه، افزایش دما و کاهش بارش را در آینده نشان می‌دهد [۳]. مطالعه هارمسن و همکارانش در سه منطقه پورتوریکو<sup>۱</sup> نشان داد در آینده بارش در فصل پرباران سال، افزایش و در فصل خشک سال، کاهش می‌یابد [۴]. در پژوهش مشابهی بابائیان و همکارانش نشان دادند طی دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ میلادی بارش کشور در دو منطقه زاگرس غربی و سواحل جنوب شرقی خزر به شدت کاهش خواهد یافت و در سایر نقاط کشور، بارش‌ها افزایش می‌یابد یا بدون تغییر خواهد ماند. بیشترین افزایش در میزان بارش در سواحل جنوب غربی خزر و جنوب سیستان و بلوچستان رخ خواهد داد [۵].

مطالعات پیشین تغییر اقلیم بر اساس سناریوهای فرضیه‌ای انجام می‌شد [۶]، اما امروزه تحقیقات تغییر اقلیم با استفاده از ریزگردانی<sup>۲</sup> مدل‌های گردش عمومی جو انجام می‌شود [۷]. علاوه بر عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی جو [۸ و ۹]، روش‌های مختلف ریزگردانی نیز همراه با عدم قطعیت‌اند [۱۰]. بنابراین، مطالعاتی در زمینه توسعه و مقایسه روش‌های ریزگردانی انجام شده است. در این زمینه در پژوهشی الشامی و همکارانش برای بررسی آثار هیدرولوژی تغییر اقلیم در جنوب انگلستان، نشان دادند روش ریزگردانی، مولدهای هواشناسی داده‌های روزانه را بهتر از داده‌های فصلی ریزگردانی می‌کند [۱۱]. اسچمیدل و همکارانش در پژوهشی دو روش ریزگردانی دینامیکی و

آماری بر میزان بارش فصلی ناحیه آلپ اروپا را مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد این دو روش ریزگردانی در نمایش افزایش میانگین بارش یکسان عمل می‌کنند، ولی در افزایش فراوانی روزهای مرطوب و شدت بارش با یکدیگر متفاوت اند [۱۲]. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود (AR5<sup>۳</sup>) (۲۰۱۳)، بر اساس میزان میزان واداشت تابشی در سال ۲۱۰۰ میلادی، سناریوهای جدید با نام RCP<sup>۴</sup> را به‌عنوان نماینده خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای معرفی کرد [۱۳]. مدل‌های سری پنجم (CMIP5<sup>۵</sup>) قدرت تفکیک مکانی بیشتری نسبت به سری‌های قبل دارند. بنابراین، محققان پژوهش‌های جدیدی در زمینه تغییر اقلیم را با استفاده از مدل‌های CMIP5 انجام می‌دهند. به علت به‌روزرسانی نشدن مدل‌های دینامیکی مانند RegCM و همچنین مدل‌های آماری نظیر LARS-WG و SDSM برای ریزگردانی سناریوهای جدید، نمی‌توان از این مدل‌ها برای ریزگردانی استفاده کرد. بنابراین، محققان بیشتر از روش‌های آماری تجربی نظیر CF<sup>۶</sup> و BC<sup>۷</sup> برای ریزگردانی استفاده می‌کنند. در این زمینه بشیر و همکارانش آثار تغییر اقلیم بر میزان رواناب رودخانه دیندر<sup>۸</sup> در سودان را بررسی کردند. از مدل SWAT<sup>۹</sup> برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، چهار مدل گردش عمومی جو سری پنجم با دو سناریو (RCP4.5 و RCP8.5) و دو روش ریزگردانی CF<sup>۶</sup> و QM<sup>۱۰</sup> استفاده کردند. مقایسه رواناب آتی با دوره خشک ۱۹۷۷-۱۹۸۸ میلادی نشان‌دهنده آثار مثبت تغییر اقلیم بر اکوسیستم پارک ملی دیندر دارد [۱۴]. نتایج پژوهش پاپادیمیترو و همکارانش روی دبی میانگین در پنج حوضه آبخیز مهم در اروپا با استفاده از سناریوی RCP8.5 و روش ریزگردانی BC نشان داد چرخه آب تحت این سناریو به مرز هشدار می‌رسد. حتی در حوضه‌هایی که میانگین دبی تغییر زیادی نداشته باشد مقدار دبی حداقل کاهش می‌یابد و سبب افزایش روزهای خشک می‌شود [۱۵]. هانگ و همکارانش با استفاده از سناریوهای مدل‌های سری CMIP5

3. Fifth Assessment Report  
4. Representative Concentration Pathways  
5. Coupled Model Intercomparison Project  
6. Change Factor  
7. Bias Correction  
8. Dinder  
9. Soil and Water Assessment Tool  
10. Quantile Correcting

1. Puerto Rico  
2. Downscaling

بررسی شود. با توجه به اینکه رودخانه گاماسیاب یکی از سرشاخه‌های مهم رودخانه کرخه است، دانستن شرایط هیدرولوژیکی آن در آینده، برای مدیریت و ساماندهی مناسب این حوضه، لازم است. نظر به اینکه در پژوهش‌های جدید استفاده از مدل‌های سری CMIP5، با توجه به دقت زیاد آنها و کمبود کارهای پژوهشی به وسیله این مدل‌ها در کشور ما، ضروری است. بنابراین، در پژوهش حاضر از چهار مدل سری پنجم شامل BCC-CSM1.1, BNU-ESM, CCSM4 و CSIRO-k3.6.0 استفاده شد. برای آگاهی از خوش‌بینانه‌ترین وضعیت اقلیمی در آینده از حد پایین انتشار گازهای گلخانه‌ای (RCP2.6) و برای بدبینانه‌ترین حالت، از حد بالای انتشار گازهای گلخانه‌ای (RCP8.5) استفاده شد. سناریوی RCP2.6 دربرگیرنده کمترین میزان افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی ناشی از آن است. مطابق این سناریو واداشت تابشی به ۲/۶ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ میلادی می‌رسد. بدون به کارگیری هیچ‌گونه سیاست کاهش آثار و مقابله با پیامدهای تغییر اقلیم، آب و هوای کره زمین در خط سیر سناریوی انتشار RCP8.5 پیش خواهد رفت به طوری که ادامه این روند به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ میلادی منجر می‌شود [۲۰]. سناریوهای انتخابی در طول زمان، تغییرات اقلیمی و تأثیرات هیدرولوژیکی متفاوتی را در پی دارند، بنابراین برای بررسی این تغییرات دو دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۹ میلادی و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ میلادی در نظر گرفته شد. از مدل توزیعی ارزیابی آب و خاک (SWAT) نیز برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی استفاده شد.

#### منطقه مطالعه شده

حوضه آبریز گاماسیاب در غرب کشور بین طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۸۵ دقیقه شمالی، در محدوده استان‌های همدان، کرمانشاه و لرستان واقع شده است. مساحت حوضه حدود ۱۱۶۹۰ کیلومترمربع است که ۵۱۵۸۱۶ هکتار آن اراضی کشاورزی، ۶۱۹۵۸۳ هکتار مرتع، ۴۹۳۸ هکتار شهر و ۲۸۶۶۳ هکتار اراضی متفرقه است. رودخانه گاماسیاب از ۲۰ کیلومتری جنوب غربی شهر نهاوند سرچشمه می‌گیرد. در مسیر این رودخانه در بیستون، شاخه فرعی دینور آب

و روش ریزگردانی BC آثار تغییر اقلیم بر میزان و فراوانی دبی حداقل و حداکثر را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد افزایش دبی حداقل موجب افزایش آب قابل دسترس در دوره‌های خشک و همچنین نمک‌زدایی اراضی پایین‌دست رودخانه می‌شود، ولی از طرفی افزایش دبی حداکثر خطر سیل‌ها را بیشتر می‌کند [۱۶].

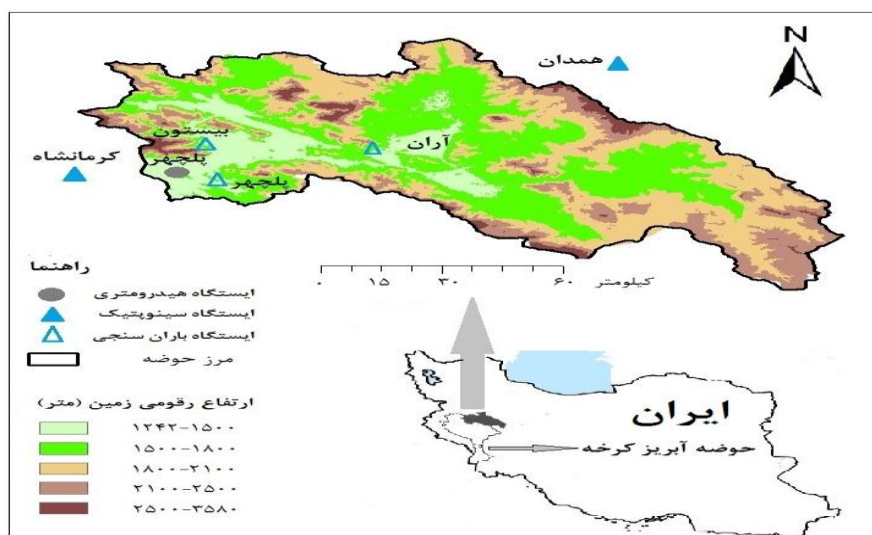
انتخاب یک مدل مناسب برای شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی یک حوضه سبب کاهش عدم قطعیت در نتایج می‌شود. کارایی خوب مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب در حوضه‌های آبخیز بزرگ و پیچیده با کاربری‌های اراضی، خاک و شرایط مدیریتی مختلف، سبب شده است پژوهش‌های زیادی به وسیله آن در زمینه تغییر اقلیم انجام شود. به طور نمونه، آریس و همکارانش از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب حوضه‌ای در اسپانیا استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تغییر اقلیم موجب کاهش ۱۶- درصد جریان در آینده خواهد شد [۱۷]. همچنین، ساها و همکارانش در مطالعه‌ای آثار احتمالی تغییرات آب‌وهوا بر جریان حوضه رودخانه کیمبا<sup>۱</sup> در جنوب شرقی استرالیا را پیش بینی کردند. آنها مدل SWAT را برای دو دوره روزانه و ماهانه واسنجی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد جریان متوسط سالانه بین ۱۶+ درصد تا ۴۴- درصد متغیر خواهد بود [۱۸]. خوا و همکارانش آثار زمانی و مکانی تغییر اقلیم روی سیلاب‌های متوسط و بزرگ در حوضه رودخانه هانگ فوجان<sup>۲</sup> و حوضه رودخانه جیانگ جی<sup>۳</sup> چین را بررسی کردند. آنها از مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها بیان‌کننده گرم‌تر و مرطوب‌تر شدن هوا در هر دو حوضه است. همچنین، در هر دو حوضه بیشترین افزایش دما در فصل بهار و بیشترین افزایش بارش در فصل زمستان رخ می‌دهد و میزان دبی نیز در سیلاب‌های بزرگ افزایش می‌یابد [۱۹].

دانستن میزان دبی و تغییرات آن تحت شرایط تغییر اقلیم یک نیاز حیاتی برای مدیریت رودخانه اعم از ساماندهی، بازسازی و احداث سازه‌های آبی است. آثار منفی تغییر اقلیم بر منابع آب از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است. بنابراین، این تأثیرات باید در حوضه‌های آبریز به صورت جداگانه

1. KImba  
2. Huangfuchuan  
3. Xiangxi

دریا در این حوضه بین ۱۲۴۲ تا ۳۵۸۰ متر است. متوسط بارندگی سالیانه حوضه، ۴۸۹ میلی‌متر است که بیشتر بارندگی‌ها در ماه‌های سرد سال صورت می‌گیرد. میانگین بیشترین دمای بلندمدت، حداقل و متوسط دما به ترتیب برابر با ۱۹، ۳ و ۱۰/۹ درجه سانتی‌گراد است [۲۱]. شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز گاماسیاب را نشان می‌دهد.

به آن پیوسته و به نام گاماسیاب ادامه مسیر می‌دهد. سپس، در نزدیکی فرامان به رودخانه قره‌سو متصل شده و پس از آن با نام سیمره وارد خاک لرستان می‌شود و در نهایت پس از دریافت شاخه‌ای به نام کشکان در استان خوزستان، کرخه نامیده می‌شود. شهرهای ملایر، نهاوند، صحنه، بیستون در این حوضه واقع شده‌اند. ارتفاع از سطح



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز گاماسیاب در غرب کشور، ارتفاع رقومی زمین و ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری

در تحقیق حاضر از نقشه DEM با دقت سلولی ۵۰ متر در ۵۰ متر سازمان نقشه‌برداری کشور و از لایه‌های اطلاعاتی نقشه کاربری اراضی با دقت مکانی ۱۰۰۰ متر در ۱۰۰۰ متر تهیه شده توسط USGS<sup>۴</sup> استفاده شد (نقشه DEM در شکل ۱ آمده است). همچنین، در پژوهش حاضر از نقشه خاک با دقت مکانی ۱۰ هزار متر در ۱۰ هزار متر تهیه شده توسط سازمان خواروبار جهانی (FAO<sup>۵</sup>) استفاده شد. مدل SWAT به داده‌های بارش، بیشترین و کمترین دما با گام زمانی روزانه نیاز دارد. داده‌های بارش روزانه از سه ایستگاه باران‌سنجی آران، پل‌چهر، بیستون و دو ایستگاه سینوپتیک همدان و کرمانشاه برای دوره زمانی ۱۹۷۷ تا ۲۰۰۵ میلادی تهیه شد. برای همین دوره زمانی داده‌های دمایی شامل بیشترین و کمترین دمای روزانه، از دو ایستگاه سینوپتیک همدان و کرمانشاه به دست آمد. برای واسنجی<sup>۶</sup> مدل و همچنین مقایسه تغییرات دبی تحت

## مواد و روش‌ها

SWAT یک مدل فیزیکی، نیمه‌توزیعی است که برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه ارائه شده است. SWAT2012 به‌عنوان یک افزونه<sup>۱</sup> در محیط ArcMap کار می‌کند [۲۲]. در این پژوهش از SWAT2012 برای شبیه‌سازی دبی جریان استفاده شد. مدل SWAT با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع (DEM<sup>۲</sup>)، مرز حوضه، زیرحوضه‌ها و مسیر جریان در حوضه را مشخص می‌کند. در مرحله بعد مدل با استفاده از نقشه رقومی خاک، کاربری اراضی و کلاسه‌بندی شیب، زیرحوضه‌ها را به تعدادی واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU<sup>۳</sup>) تقسیم می‌کند. هر HRU واحد اصلی شبیه‌سازی در مدل SWAT است که یک منطقه همگن کاربری اراضی، خاک و شیب است. فرایند هیدرولوژی در هر HRU با استفاده از رابطه بیلان آبی شامل بارش روزانه، رواناب، تبخیر و تعرق، نفوذ و جریان برگشتی شبیه‌سازی می‌شود [۲۳].

4. <http://edcns17.cr.usgs.gov/glcc/glcc.html>

5. Food and Agriculture Organization of the United Nations

6. Calibration

1. Extension

2. Digital Elevation Model

3. Hydrologic Response Unit (HRU)

مشاهداتی را نشان می‌دهد. مقدار  $R^2$  بین صفر تا یک متغیر است. مقدار  $R^2$  بزرگ‌تر از  $0/5$  بیان‌کننده قابل قبول بودن نتایج است [۲۶]. در این مطالعه دوره زمانی ۱۹۷۷-۱۹۹۵ میلادی برای واسنجی و ۱۹۹۶-۲۰۰۵ میلادی برای اعتبارسنجی<sup>۴</sup> مدل در نظر گرفته شد. دو سال اول نیز برای گرم‌کردن<sup>۵</sup> مدل اختصاص یافت. گرم‌کردن به مدل SWAT اجازه می‌دهد با شرایط اولیه رطوبت خاک، آبخوان‌ها، مخازن و تالاب‌ها به تعادل برسد. بدون گرم‌کردن مدل، مقادیر شبیه‌سازی شده در چند سال نخست به مراتب کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد می‌شود (underestimation).

مشکل اصلی در استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو<sup>۶</sup> در پژوهش‌های منطقه‌ای بزرگ مقیاس بودن آنهاست. روش‌های مختلفی برای تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از سناریوهای مدل‌های گردش عمومی جو وجود دارد که به آن ریزمقیاس‌کردن<sup>۷</sup> یا ریزگردانی می‌گویند [۷]. مدل‌های آماری و دینامیکی متنوعی برای ریزگردانی وجود دارد، ولی به علت به‌روزرسانی نشدن مدل‌های CMIP5، نمی‌توان از آنها در ریزگردانی استفاده کرد. امروزه، استفاده از روش‌های آماری تجربی<sup>۸</sup> برای ریزگردانی مدل‌های CMIP5 رو به افزایش است [۲۷]. بسته به چگونگی عمل روش‌های آماری تجربی به دو دسته<sup>۹</sup> CF (change factor) یا تغییر عامل و BC (Bias Correction) تقسیم می‌شوند [۲۸]. با توجه به نتایج رضایت‌بخش روش تغییر عامل بر پایه میانگین<sup>۱۰</sup> [۲۷]، در تحقیق حاضر از روش یادشده برای ریزگردانی مدل‌های CMIP5 استفاده شد. در روش تغییر عامل ابتدا سناریوهای تغییر دما و بارش بر اساس میانگین بلندمدت محاسبه می‌شوند. این سناریوها برای دما «اختلاف» و برای بارش «نسبت» است [۲۹]. سناریوهای تغییر دما و بارش برای هر ماه مطابق با رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌شود [۳۰].

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{GCM, fut, i} - \bar{T}_{GCM, bas, i}) \quad (1)$$

$$\Delta P_i = \left( \frac{\bar{P}_{GCM, fut, i}}{\bar{P}_{GCM, bas, i}} \right) \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲  $\Delta T_i$  و  $\Delta P_i$  به ترتیب بیان‌کننده

تحت شرایط تغییر اقلیم از داده‌های دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری پل چهر طی سال‌های ۱۹۷۷ تا ۲۰۰۵ میلادی استفاده شد. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی استفاده‌شده در شکل ۱ آمده است.

واسنجی مدل SWAT و آنالیز عدم قطعیت برای رسیدن به نتیجه قابل قبول، احتیاج به تغییر مکرر مقدار پارامترها و اجرای مجدد برنامه دارد. به همین دلیل استفاده از یک برنامه واسطه برای انجام خودکار این مراحل ضروری است. به این منظور، از الگوریتم<sup>۱</sup> SUFI2 در برنامه SWAT-CUP استفاده شد. در الگوریتم SUFI2 یک دامنه عدم قطعیت برای هر پارامتر در نظر گرفته می‌شود. هنگام واسنجی سعی می‌شود پارامترها در این محدوده قرار گیرند که به آن دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصد ( $95PPU$ ) می‌گویند. برای کمی‌کردن میزان دقت واسنجی یا عدم قطعیت دو شاخص R و P استفاده می‌شود. R-factor برابر است با ضخامت باند  $95PPU$  تقسیم بر انحراف معیار داده‌های مشاهداتی، که هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده شبیه‌سازی مناسب‌تر است. مقادیر R کوچک‌تر از  $1/5$  بسته به شرایط قابل قبول است [۲۳]. P-factor نشان می‌دهد چه مقدار از داده‌های شبیه‌سازی شده در محدوده عدم قطعیت ( $95PPU$ ) قرار گرفته‌اند. مقدار P نزدیک به یک، نشان‌دهنده نتیجه بهتر است. مقادیر P بزرگ‌تر از  $0/70$  یا  $0/75$  قابل قبول است [۲۴]. هر دو شاخص R و P باید با هم در نظر گرفته شوند به طوری که مقادیر P-factor و R-factor هر دو در محدوده قابل قبول قرار گیرند [۲۴].

ارزیابی کارایی مدل SWAT برای شبیه‌سازی دبی با معیارهای مختلفی قابل سنجش است. در پژوهش حاضر از ضریب کارایی نش-سانکلیف ( $NS^2$ ) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شد. ضریب NS، ضریبی است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. مقدار این ضریب بین یک تا منفی بی‌نهایت متغیر بوده که بهترین مقدار آن، یک است [۲۵]. مقدار  $NS > 0/75$  نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب و مقدار NS بین  $0/36$ - $0/75$  به معنای رضایت‌بخش بودن شبیه‌سازی است [۲۶]. ضریب تعیین ( $R^2$ )، همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های

4. Validation  
5. Warm up  
6. Downscaling  
7. Empirical statistical downscaling  
8. Change Factor Mean-based method

1. Sequential uncertainty fitting ver. 2  
2. 95% Prediction Uncertainty (95PPU)  
3. Nash Sutcliff coefficient

## نتایج

مدل SWAT بر اساس مقادیر دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری پل چهر برای کل حوضه واسنجی شد. برای انجام آنالیز حساسیت و ارزیابی مدل نیز از الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. طول دوره آماری داده‌ها از سال ۱۹۷۷ تا ۲۰۰۵ میلادی بود. دو سال نخست برای گرم‌کردن مدل، از سال ۱۹۷۹ تا ۱۹۹۵ میلادی برای واسنجی و از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ میلادی برای اعتبارسنجی استفاده شد.

نتایج تحلیل‌های آماری انجام‌شده در خصوص میزان انطباق بین مقادیر دبی روزانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده و ارزیابی کارایی مدل در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج دلالت بر توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی حوضه دارد. بنابراین، کارایی مدل برای ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر اساس شاخص کیفی ارائه‌شده در تحقیقات پیشین خوب است [۲۲ و ۲۳].

سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دما و بارندگی برای میانگین بلندمدت برای هر ماه ( $1 \leq i \leq 12$ )،  $\bar{P}_{GCM,fut,i}$  و  $\bar{T}_{GCM,fut,i}$  به ترتیب میانگین بلندمدت دما و بارش شبیه‌سازی‌شده توسط مدل‌های CMIP5 در دوره آتی برای هر ماه،  $\bar{P}_{GCM,bas,i}$  و  $\bar{T}_{GCM,bas,i}$  به ترتیب میانگین بلندمدت دما و بارش شبیه‌سازی‌شده توسط مدل‌های CMIP5 در دوره مشاهداتی برای هر ماه است. بعد از محاسبه  $\Delta P_i$  و  $\Delta T_i$  از روش عامل تغییر برای تولید سری زمانی سناریوهای اقلیمی استفاده می‌شود. در این روش، سناریوهای تغییر اقلیم توسط رابطه‌های ۳ و ۴ به مقادیر مشاهداتی اضافه می‌شود [۲۸].

$$T = \Delta T + T_{obs} \quad (3)$$

$$P = \Delta P \times P_{obs} \quad (4)$$

در روابط ۳ و ۴  $T_{obs}$  و  $P_{obs}$  به ترتیب بیان‌کننده سری زمانی دما و بارش مشاهداتی در دوره پایه،  $T$  و  $P$  سری زمانی به‌دست‌آمده از سناریوی اقلیمی دما و بارش در دوره آتی،  $\Delta T$  و  $\Delta P$  سناریوی تغییر اقلیم ریزگردانی شده است.

جدول ۱. نتایج شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه پل چهر

محدوده قابل قبول	صحت‌سنجی	واسنجی	معیار
$R^2 > 0.5$	۰/۶۱	۰/۷۳	$R^2$
$NS > 0.5$	۰/۵۷	۰/۷۱	نش - ساتکلیف
$P > 0.7$	۰/۷۱	۰/۷۹	P-factor
$R < 1/5$	۱/۳۴	۱/۳۶	R-factor

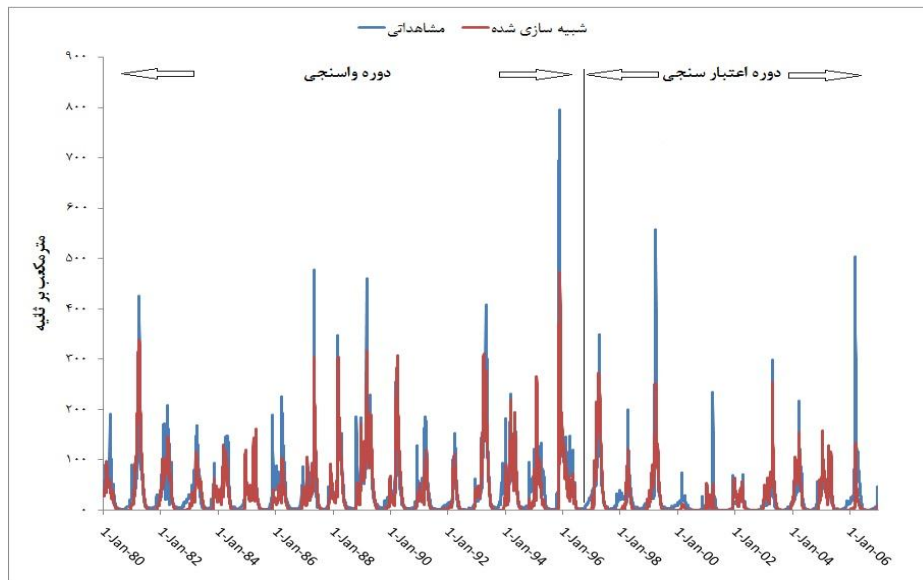
درصد مربوط به ایستگاه آران تحت RCP8.5 مدل BCC-CSM1.1 در دوره زمانی ۲۰۷۰-۲۰۹۹ میلادی است (که از این به بعد در تحقیق حاضر به آن آینده دور می‌گوییم). نتایج نشان می‌دهد مدل BNU-ESM در همه پنج ایستگاه و تقریباً در همه سناریوها افزایش میانگین بارش را در دوره‌های آتی نشان می‌دهد و به عکس مدل BCC-CSM1.1 تقریباً در همه سناریوها کاهش میزان میانگین بارش را در همه ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. مدل‌های CCSM4 و CSIRO-K3.6.0 بسته به سناریوهای مختلف کاهش و یا افزایش میانگین بارش را پیش‌بینی می‌کند. به طور نمونه، نتایج آثار تغییر اقلیمی سناریوهای انتخابی بر میانگین بارش سالانه مربوط به ایستگاه‌های آران و کرمانشاه در شکل‌های ۳ و ۴ آمده است. نتایج تغییرات

شکل ۲ مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده توسط مدل را برای دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی به صورت گرافیکی در ایستگاه پل چهر نشان می‌دهد.

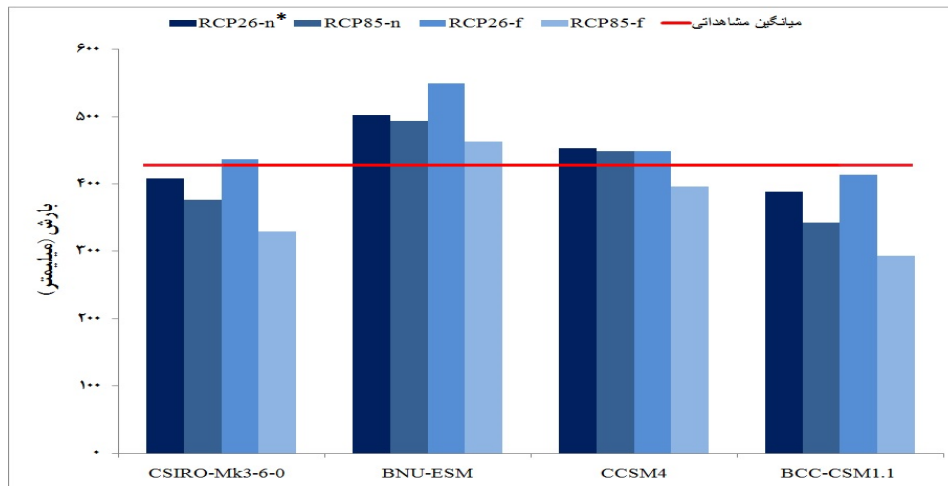
مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از خروجی چهار مدل گردش عمومی جو نشان می‌دهد تغییرات آتی بارش با توجه به مدل‌های گردش عمومی جو و سناریوهای انتخابی بسیار متفاوت است. نتایج مقایسه تغییرات میانگین بارش سالانه دوره پایه و سناریوهای مختلف نشان می‌دهد بیشترین افزایش بارش به میزان ۵۲/۸ درصد مربوط به ایستگاه بیستون تحت سناریوی RCP8.5 مدل BNU-ESM در دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۰۴۹ میلادی است (که از این به بعد در تحقیق حاضر به آن آینده نزدیک می‌گوییم). بیشترین کاهش بارش نیز به میزان ۳۱/۶-

ترتیب بیان‌کننده کاهش ۷/۲ و ۱۷/۵ درصد میانگین بارش سالانه است که نسبت به بقیه ایستگاه‌ها کاهش کمتری دارد بقیه ایستگاه‌ها تقریباً کاهش یکسانی را نشان می‌دهد (در آینده نزدیک حدود ۱۱ درصد و در آینده دور حدود ۲۳/۵ درصد). بیشترین بارش سالانه در همه ایستگاه‌ها به جز پل‌چهر تحت سناریوی RCP2.6 و برای آینده نزدیک و دور با کمی کاهش مواجه می‌شود، ولی تحت سناریوی RCP8.5 در همه ایستگاه‌ها بیشترین بارش برای آینده نزدیک با افزایش درخور توجهی مواجه خواهد شد و برای آینده دور در همه ایستگاه‌ها به شدت کاهش پیدا خواهد کرد.

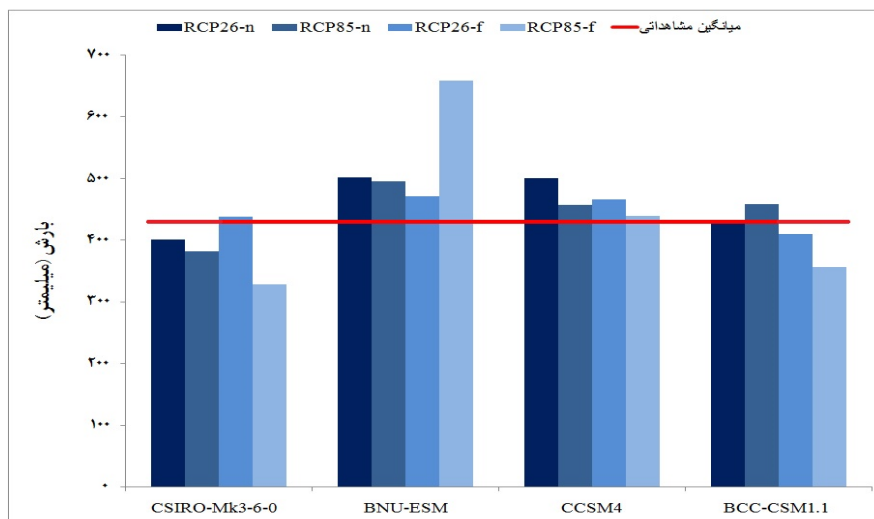
میانگین بارش و بیشترین بارش سالانه سناریوهای انتخابی نسبت به دوره پایه به دست آمده از خروجی مدل CSIRO-K3.6.0 در جدول ۲ آمده است. جدول ۲ نشان می‌دهد میانگین بارش سالانه تحت تأثیر سناریوی RCP2.6 در آینده نزدیک بین ۴/۸ درصد تا ۱۱/۴ درصد کاهش می‌یابد. کمترین کاهش مربوط به ایستگاه آران و بیشترین کاهش مربوط به همدان است. ادامه سناریوی RCP2.6 در آینده دور نشان می‌دهد میانگین بارش در ایستگاه همدان ۵/۷ درصد کاهش می‌یابد و در بقیه ایستگاه‌ها میانگین بارش حدود ۲ درصد افزایش می‌یابد. نتایج سناریوی RCP8.6 در آینده نزدیک و دور در ایستگاه همدان به



شکل ۲. مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده دبی روزانه در ایستگاه پل‌چهر



شکل ۳. تغییرات آبی میانگین بارش سالانه نسبت به میانگین مشاهده‌ای بر اساس مدل‌های CMIP5 و سناریوهای انتخابی (ایستگاه آران) \*منظور از n آینده نزدیک و f آینده دور است.



شکل ۴. تغییرات آبی میانگین بارش نسبت به میانگین مشاهداتی براساس مدل های CMIP5 و سناریوهای انتخابی (ایستگاه کرمانشاه)

در دمای حداقل و حداکثر فصلی در فصل تابستان و به ترتیب به میزان ۲/۱۹ و ۲/۳۶ درجه سانتی‌گراد تحت RCP8.5 در آینده دور رخ خواهد داد.

با توجه به اینکه خروجی بارش مدل CSIRO-K3.6.0 روند تقریباً یکسانی را برای همه ایستگاه‌ها نشان می‌دهد، از خروجی‌های این مدل برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در مدل SWAT استفاده شد. میانگین دبی سالانه ایستگاه پل‌چهر در دوره پایه ۳۳/۱ مترمکعب بر ثانیه است. همچنین، میانگین دبی فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز در دوره پایه به ترتیب ۵۸/۱، ۴۹/۹، ۲/۹ و ۲۱/۶ مترمکعب بر ثانیه است. با استفاده از خروجی‌های مدل CSIRO-K3.6.0 میانگین دبی سالانه تحت RCP2.6 برای آینده نزدیک و دور به ترتیب ۳۳/۶ و ۴۰/۴ مترمکعب بر ثانیه و میانگین دبی سالانه تحت RCP8.5 برای آینده نزدیک و دور به ترتیب ۳۰/۶ و ۱۹/۱ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد. شکل ۵ درصد تغییرات دبی میانگین تحت شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه را در فصول مختلف با استفاده از خروجی‌های مدل CSIRO-K3.6.0 نشان می‌دهد. نتایج سناریو RCP2.6 برای آینده نزدیک بیان‌کننده کاهش ۱۶/۵ درصد رواناب در فصل زمستان، کاهش ۱/۷ درصد در پاییز، افزایش ۱۵/۱ درصد فصل بهار و افزایش ۱۴۴ درصد در فصل تابستان است. اگر سناریوی RCP2.6 تا پایان قرن حاضر ادامه یابد، نتایج دچار تغییرات درخور توجه می‌شود. میزان رواناب در فصل زمستان ۲/۱، در بهار ۳۴/۶، در تابستان ۱۹۹ و در پاییز

اثر تغییر اقلیم بر دما در دو ایستگاه سینوپتیک همدان و کرمانشاه برای کمترین و بیشترین دمای روزانه بررسی شد. در ایستگاه کرمانشاه خروجی مدل CSIRO-Mk3-6-0 بیشترین افزایش را در میانگین کمترین دمای ماهانه به میزان ۲/۷۵ درجه سانتی‌گراد در ماه آذر تحت سناریوی RCP8.5 و برای آینده دور نشان می‌دهد. همچنین، مدل BNU-ESM بیشترین افزایش را در میانگین دمای حداکثر ماهانه به میزان ۲/۱۵ درجه سانتی‌گراد در ماه تیر تحت سناریوی RCP8.5 و برای آینده دور نشان می‌دهد. در ایستگاه همدان نیز خروجی مدل CSIRO-Mk3-6-0 بیشترین افزایش را در میانگین کمترین دمای ماهانه به میزان ۳/۴۳ درجه سانتی‌گراد در ماه تیر تحت سناریوی RCP8.5 و برای آینده دور نشان می‌دهد. همچنین، خروجی مدل BNU-ESM بیشترین افزایش را در میانگین دمای حداکثر ماهانه ایستگاه همدان به میزان ۴/۲۶ درجه سانتی‌گراد در ماه شهریور تحت سناریوی RCP8.5 و برای آینده دور نشان می‌دهد. به طور مثال، جدول‌های ۳ و ۴ بیشترین افزایش در میانگین دمای حداقل و حداکثر ماهانه و فصلی نسبت به دوره پایه را برای خروجی مدل CSIRO-Mk3-6-0 برای دو ایستگاه همدان و کرمانشاه نشان می‌دهند. بنا به نتایج جدول ۳ در ایستگاه کرمانشاه مشاهده می‌شود بیشترین افزایش در دمای حداقل و حداکثر فصلی در فصل زمستان و به ترتیب به میزان ۲/۱۲ و ۱/۳۸ درجه سانتی‌گراد تحت RCP8.5 در آینده دور اتفاق خواهد افتاد. در ایستگاه همدان نیز بیشترین افزایش



مساح این منابع عدم قطعیت را شامل عدم قطعیت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، عدم قطعیت در تبدیل میزان گازهای گلخانه‌ای به غلظت اتمسفریک و نیروی تابشی، عدم قطعیت مربوط به حساسیت مدل‌های CMIP5 مختلف به نیروی تابشی یکسان، عدم قطعیت مربوط به شبیه‌سازی مدل‌های CMIP5 در سطوح منطقه‌ای یاد می‌کنند [۸ و ۹]. نتایج آثار تغییر اقلیم بر تغییرات فصلی میزان جریان نشان می‌دهد بیشترین میزان تغییرات در فصل تابستان اتفاق می‌افتد، ولی با توجه به این نکته که میانگین دبی در فصل تابستان کم است (۲/۹ مترمکعب بر ثانیه) با کوچک‌ترین تغییر در میزان دبی درصد تغییرات زیاد می‌شود، ولی از نظر کمیت قابل توجه نیست.

۲۳/۲ درصد افزایش می‌یابد. نتایج سناریوی RCP8.5 در آینده نزدیک نشان می‌دهد میزان رواناب در فصل زمستان و بهار به ترتیب ۲۴ و ۱۳/۸ درصد کاهش می‌یابد و در فصل تابستان و پاییز به ترتیب ۷۴/۱ و ۳۸/۵ درصد افزایش می‌یابد. با ادامه سناریوی RCP8.5 در پایان این قرن، میزان رواناب در فصل زمستان ۵۴، در بهار ۴۷/۵، در تابستان ۵/۵ و در پاییز ۴/۲ درصد کاهش می‌یابد.

### بحث

ریزگردانی مدل‌های CMIP5 نشان می‌دهد نتایج هر یک از مدل‌ها در پیش‌بینی دما و بارش آینده با هم اختلاف زیادی دارند. علت آن وجود منابع مختلف عدم قطعیت در مدل‌های CMIP5 است. جهانبخش و همکارانش و کمال و

جدول ۲. میانگین بارش سالانه و بیشترین بارش سالانه برای سناریوهای مختلف مدل CSIRO-K3.6.0

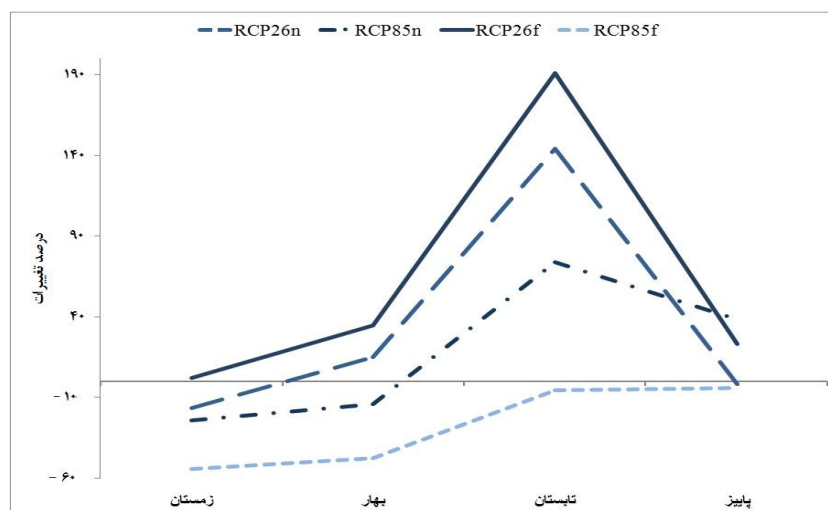
نام ایستگاه	میانگین سالانه	RCP8.5		RCP2.6		بیشترین بارش سالانه	میانگین بارش سالانه	بیشترین بارش سالانه	میانگین بارش سالانه
		۲۰۴۹-۲۰۷۰	۲۰۹۹-۲۰۷۰	۲۰۴۹-۲۰۷۰	۲۰۹۹-۲۰۷۰				
آران	۴۲۸/۷	۳۲۹	۷۳/۲	۳۷۶/۶	۵۸/۸	۴۳۷/۳	۵۹/۴	۴۰۸	۶۰
بیستون	۵۵۱/۶	۴۱۷/۲	۱۱۰/۹	۴۹۱/۷	۸۷/۸	۵۶۲/۹	۸۷/۲	۵۱۸/۶	۹۱
پل چهر	۳۸۸/۲	۲۹۸/۴	۷۶/۸	۳۴۶/۸	۷۶/۱	۳۹۶/۵	۷۵/۶	۳۶۷/۴	۶۳
کرمانشاه	۴۳۰/۴	۳۲۸/۶	۱۳۱/۷	۳۸۱/۹	۱۰۴	۴۳۸/۶	۸۹/۹	۴۰۰/۹	۱۰۸
همدان	۳۰۸/۸	۲۵۴/۷	۵۹/۴	۲۸۶/۵	۵۹/۷	۲۹۲/۸	۴۷/۹	۲۷۳/۷	۵۶

جدول ۳. بیشترین افزایش در میانگین دمای ماهانه و فصلی نسبت به دوره پایه برای خروجی مدل CSIRO-Mk3-6-0

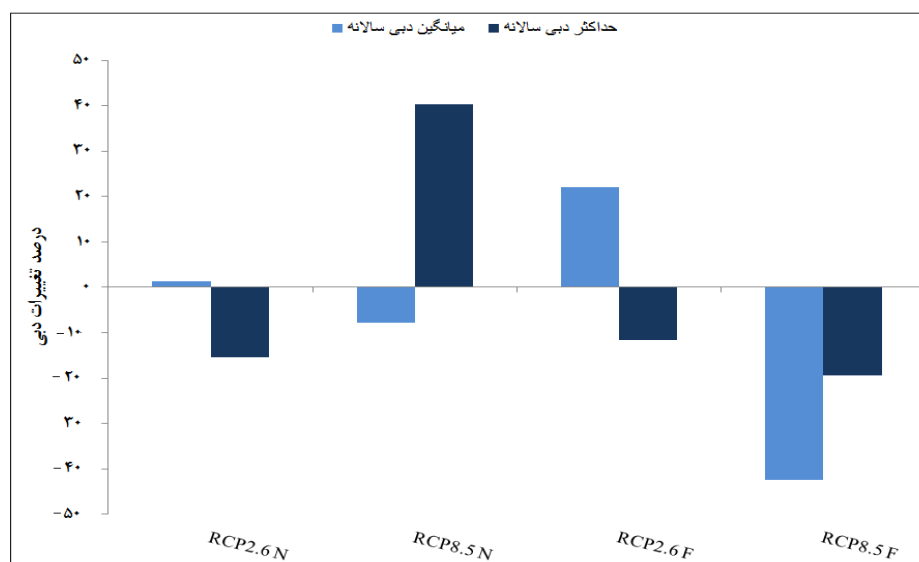
نام ایستگاه	سناریو	ماه	فصل	ماه	فصل
N-RCP2.6	۰/۶۶ تیر	۰/۱۹ زمستان	۰/۹ آبان	۰/۶۳ زمستان	کمترین دما (سانتی‌گراد)
F-RCP2.6	۰/۴۹ تیر	۰/۲۱ - بهار	۰/۸۱ بهمن	۰/۵۴ زمستان	
N-RCP8.5	۱/۴۱ تیر	۰/۷۵ زمستان	۱/۴۸ مرداد	۰/۷۶ تابستان	
F-RCP8.5	۲/۳۵ آذر	۲/۱۲ زمستان	۲/۷ تیر	۲/۱۹ تابستان	

جدول ۴. بیشترین افزایش در میانگین دمای حداکثر ماهانه و فصلی نسبت به دوره پایه برای خروجی مدل CSIRO-Mk3-6-0

نام ایستگاه	سناریو	ماه	فصل	ماه	فصل
N-RCP2.6	۰/۷۶ تیر	۰/۶۲ بهار	۱/۶۸ اسفند	۰/۸۴ زمستان	دمای حداکثر (سانتی‌گراد)
F-RCP2.6	۰/۶۵ فروردین	۰/۳۸ بهار	۱/۲۵ اسفند	۰/۵۷ زمستان	
N-RCP8.5	۱/۰۶ فروردین	۰/۹۵ بهار	۱/۷۷ اسفند	۱/۰۹ زمستان	
F-RCP8.5	۲ بهمن	۱/۳۸ زمستان	۳/۴۵ شهریور	۲/۳۶ تابستان	



شکل ۵. درصد تغییرات دبی میانگین در فصول مختلف تحت سناریوهای انتخابی نسبت به دوره پایه



شکل ۶. تغییرات دبی میانگین و بیشترین دبی سالانه تحت سناریوهای انتخابی نسبت به دوره پایه

می‌دهد که اتفاق مثبتی است، زیرا همراه با افزایش دبی‌های حداقل و افزایش آب قابل دسترس خطرات سیلاب‌های بزرگ کاهش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های بشیر مطابقت دارد [۱۴]. میانگین دبی تحت سناریوی RCP8.5 در آینده نزدیک با کاهش جزئی به ۳۰/۶ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد، اما دبی حداکثر در فصل پاییز به شدت افزایش می‌یابد (نزدیک به ۴۰ درصد افزایش) که با نتایج مطالعه هانگ و همکارانش و خوا، که دلالت بر افزایش خطر سیلاب‌های بزرگ در شرایط افزایش گازهای گلخانه‌ای دارد، همسوست [۱۶ و ۱۹]. در بقیه فصول میزان دبی کاهش می‌یابد و ادامه سناریوی RCP8.5

شکل ۶ تغییرات دبی میانگین و بیشترین دبی سالانه تحت سناریوهای انتخابی را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. میانگین دبی تحت سناریوی RCP2.6 در آینده نزدیک ۳۳/۶ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود که اندکی بیش از دبی دوره مشاهداتی (۳۳/۱ مترمکعب بر ثانیه) است. تحت سناریوی RCP2.6 در آینده نزدیک بیشترین دبی سالانه ۱۵/۵ درصد کاهش می‌یابد. ادامه این سناریو تا آینده دور سبب افزایش ۱۷/۸ درصدی میانگین دبی و رسیدن به دبی ۴۰/۴ مترمکعب بر ثانیه می‌شود. با توجه به شکل ۶ مشخص می‌شود که این افزایش در میانگین دبی همراه با کاهش ۱۱/۵ درصدی دبی‌های حداکثر رخ

همچنین، این بررسی نشان می‌دهد اثر تغییر اقلیم بر میزان رواناب در فصول مختلف با توجه به سناریوها و بازه‌های زمانی انتخابی بسیار متغیر است. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و رسیدن به سناریوی RCP2.6 در آینده نزدیک تغییرات درخور توجهی در میزان دبی و آب قابل در دسترس ندارد، ولی ادامه این روند در آینده دور سبب افزایش میانگین دبی همراه با کاهش خطر سیلاب‌های بزرگ است که وضعیت مطلوب آینده در صورت استمرار این روند را نشان می‌دهد. افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و رفتن به سوی سناریوی RCP8.5 در آینده نزدیک علاوه بر کاهش دبی میانگین، خطر وقوع سیلاب‌های بزرگ را افزایش می‌دهد و ادامه افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده دور سبب کاهش بسیار شدید میانگین دبی و در نتیجه کاهش آب در دسترس می‌شود.

پژوهش حاضر ضمن بیان اهمیت آثار بالقوه تغییر اقلیم در وضعیت هیدرولوژی حوضه، لزوم توجه به بحث تغییر اقلیم و پیامدهای آن را در مدیریت منابع آب حوضه گاماسیاب یادآور می‌شود. با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌های مختلف CMIP5 برای به‌دست‌آوردن نتایجی با دقت بیشتر و مدیریت بهتر منابع عدم قطعیت، در مجالی دیگر باید مدل‌های بیشتری از سری CMIP5 همراه با روش‌های مختلف ریزگردانی بررسی شود.

#### منابع

- [1]. IPCC expert meeting report. towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. 19–21 September, 2007 Noordwijkerhout, The Netherlands
- [2]. Herting, E. and J. Jacobeit., 2008, "Downscaling Future Climate change: Temperature scenarios for the Mediterranean Area", Global and Planetary change 63. 127- 131.
- [3]. Ozkul, S., 2009, "Assessment of climate change effects in Aegean River Basins: The case Of Gediz Buyuk Mendere Basins", J. climate change
- [4]. Harmsen, E. W., Miller, N. L., Schelgel, N. J. and Gonzalez, J.E. 2009, "Seasonal climate change Impacts on Evapotranspiration, Precipitation deficit and crop Yield in Puer Rico", J. Of Agricultural Water Management, 96. 1085- 1095.

آینده دور سبب کاهش بسیار شدید میانگین دبی و دبی حداکثر می‌شود و حاصل آن کاهش ۴۲/۳ درصدی میانگین دبی و رسیدن به ۱۹/۱ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود که با یافته‌های پادامیمتریو، که کاهش میزان آب در دسترس در صورت ادامه یافتن حد بالای انتشار گازهای گلخانه‌ای را پیش‌بینی می‌کند، مطابقت دارد [۱۵]. این مطالعه نشان می‌دهد آثار تغییر اقلیم در آینده نزدیک شدت کمتری دارد، ولی در آینده دور شدت تأثیرات آن بسیار زیاد است. بنا به گزارش IPCC (۲۰۰۷)، در آینده نزدیک هنوز تغییرات در انتشار گازهای گلخانه‌ای زیاد نیست، و در نتیجه آثار تغییر اقلیم هنوز شدید نیست، ولی در آینده دور تغییرات در انتشار گازهای گلخانه‌ای به بیشترین حد خود رسیده، در نتیجه در پایان قرن حاضر آثار مثبت و منفی تغییر اقلیم بسیار شدید است [۱].

#### نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر درصدد بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی آینده و آثار این تغییرات بر دبی جریان حوضه آبخیز گاماسیاب با استفاده از سری جدید مدل‌های گردش عمومی جو (CMIP5) بود. نتایج ریزگردانی چهار مدل CMIP5 نشان می‌دهد مقدار بارندگی سالانه حوضه در پنج ایستگاه بررسی شده با توجه به سناریوهای مد نظر و دوره‌های زمانی مختلف بین ۵۲/۸ تا ۳۱/۶ درصد تغییر خواهد کرد. میانگین کمترین و بیشترین دمای ماهانه در ایستگاه کرمانشاه به ترتیب حداکثر تا ۲/۷۵C° و ۲/۱۵C° و در ایستگاه همدان به ترتیب حداکثر تا ۳/۴۳C° و ۴/۲۶ با توجه به سناریوهای مختلف افزایش می‌یابد. از آنجا که دما و بارش بیشترین تأثیر را بر تغییرات هیدرولوژی حوضه دارند، شبیه‌سازی رواناب به‌دست‌آمده از خروجی مدل CSIRO-Mk تحت سناریوهای مختلف، نشان دهنده تغییرات ۱۷/۸ تا ۴۲/۳ درصدی مقدار رواناب است. این امر در نهایت سبب تغییرات زیادی در مقدار میانگین دبی، حداکثر دبی و بزرگی سیلاب‌ها می‌شود. براساس نتایج پژوهش حاضر مشخص شد انتخاب مدل‌های گوناگون گردش عمومی جو، سناریوهای مختلف و دوره‌های زمانی متفاوت، نتایج یکسانی از میزان تغییرات دما و بارش نشان نمی‌دهند که علت آن را می‌توان عدم قطعیت‌های یادشده برای مدل‌های CMIP5 دانست.

- [5]. Babaeian A, Najafinik Z, Abbasi F, Nohandan M, Adab H. 2009. "Assessment of the country's climate change during the period 2010-2039 using the general circulation model of ECHO-G. *Geography and Development*, 2009; 16: 152-135.
- [6]. Revelle R. R, Waggoner P. E. 1983. Effects of carbon dioxide induced climate change on water supplies in western of United States. *Climate changing Nat. Acad. Washangton D. C.* 1983.
- [7]. Wilby R, Harris I. A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*. 2006; 42
- [8]. Jahanbakhsh S, Khorshid Dust A.M, Alinejed M.H, Purasghar F. The Impact of Climate Change on Temperature and Precipitation Considering the Uncertainty of Climate Models and Scenarios (Case study of Urmia Shahr-e Chah Basin). *Hydrogeomorphology Journal*. 2016; 7: 107-122. [Persian]
- [9]. Kamal A.R, Massah Bavani A.R. Evaluation of uncertainty of AR4-AOGCM models and hydrologic models in estimating temperature, precipitation and the runoff of Qaraosso basin under climate change. *Journal of Water Research of Iran*. 2011; 5(9): 39-50. [Persian]
- [10]. Eghdamirad S, Johnson F, Woldemeskel F, Sharma A. Quantifying the sources of uncertainty in upper air climate variables. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016; 27;121(8):3859-74.
- [11]. Elashamy M. E., Wheeler, H. S., Huntingford, C. Evaluation of the rainfall Component of Weather generator for climate change Studies. *Journal of Hydrology*. 2005; 326: 1-24.
- [12]. Schimidli, H, Goodess C. M., Frei C, Haylouk M. R., Schmith S. Statistical and dynamical downscaling Precipitation: An Evaluation and Comparision of scenario for the European Alps. *Journal of Geophysical Research*, 2007; 112: 1-20.
- [13]. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T.F, Qin G, Plattner M, Tignor S.K, Allen J, Boschung A, et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [14]. Basheer A, Lu H, Omer A, Ali A, Abdelgader A. Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on the stream flow in the Dinder River and ecosystem habitats in Dinder National Park, Sudan. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2016; 20: 1331–1353.
- [15]. Papadimitriou L, Koutroulis L, Grillakis M, Tsanis I. High-end climate change impact on European runoff and low flows – exploring the effects of forcing biases. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2016; 20: 1785–1808.
- [16]. Hoang L, Lauri H, Kumm M, Koponen J, Michelle T, Vliet H, et al. Mekong River flow and hydrological extremes under climate change. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2016; 20: 3027–3041.
- [17]. Arias R, Blanco M, Taboada-Castro M, Nunes J, Keizer J. Water Resources Response to Changes in Temperature, Rainfall and CO2 Concentration: A First Approach in NW Spain. *Water*. 2014; 6(10), 3049-3067; doi:10.3390/w6103049
- [18]. Saha P. P., Zeleke K, Hafeez M. Streamflow modeling in a fluctuant climate using SWAT: Yass River catchment in south eastern Australia. *Environmental Earth Sciences*. 2014; 71(12): 5241–5254
- [19]. Xu H, Luo Y. Climate change and its impacts on river discharge in two climate regions in China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2015; 19, 4609–4618.
- [20]. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [21]. Ministry of Agriculture. Comprehensive Plan for the Recovery and Development of Agriculture and Natural Resources in the Karkheh and Dez River Basin. 1996; Volume 1, Surface Water, Planning and Support Deputy, Tehran.
- [22]. Abbaspour K. 2007. User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Eawag: Swiss Fed. Inst. Of Aquat. Sci. and Technol. Du'bendorf, Switzerland.
- [23]. Neitsch S, Arnold L, Kiniry G, Williams J. Soil and Water Assessment Tool, User's Manual, Version 2000-2002
- [24]. Abbaspour K, Rouholahnejad E, Vaghefi S, Srinivasan R, Yang H, Klove B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*. 2015; 524:733–752

- [25]. Donizete R, Pereira A, Martinez F, Pruskib D. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2016; 7: 14–37
- [26]. Kepner W, Hernandez M, Semmens D, Goodrich D. The Use of Scenario Analysis to Assess Future Landscape Change on Watershed Condition in the Pacific Northwest (USA). *Use of Landscape Sciences for the Assessment of Environmental Security*. 2008; 237-261.
- [27]. Wang L, Ranasinghe S, M van P, Gelder J, Vrijling K. Comparison of empirical statistical methods for downscaling daily climate projections from CMIP5 GCMs: a case study of the Huai River Basin, China. *International journal of climatology Int. J. Climatol*. 2016; 36: 145–164
- [28]. Ho C, Stephenson D, Collins M, Ferro CAT, Brown S. Calibration strategies: a source of additional uncertainty in climate change projections. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2012; 93(1): 21–26.
- [29]. Zahabiyun B, Goodarzi M, Massah A. Application of SWAT model in estimating basin runoff in future periods affected by climate change. *Journal of Climatology Research*. 2010; 3and4. [Persian]
- [30]. Jones P, Hulme M, alculating regional climatic times series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International journal of climatology*. 1996; 16: 361-377