

## ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان ورودی به سد زاینده‌رود

سودابه خلیلیان، مهدی سرائی تبریزی\*، حسین بابازاده و علی صارمی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۱۱)

### چکیده

در پژوهش حاضر، توسعه مدل هیدرولوژیکی SWAT در بالادست سد زاینده‌رود برای ارزیابی جریان ورودی به این سد شده است. بر این اساس پس از وارد کردن اطلاعات هواشناسی و هیدرومتری منطقه، شبیه‌سازی رواناب انجام گرفت. ایستگاه‌های هیدرومتری قلعه‌شاهرخ با توجه به حجم بالای ورودی به سد زاینده‌رود به‌عنوان ایستگاه مبنا برای واسنجی و اعتبارسنجی در طول دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵ انتخاب شد. پس از شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و صحت‌تنایج، پیش‌بینی وضعیت اقلیمی با استفاده از مدل پنجم تغییر اقلیم برای سناریوهای RCP انجام گرفت. طبق پیش‌بینی انجام گرفته با استفاده از مدل‌های تغییر اقلیم، در همه مدل‌ها میزان دما افزایش داشته و بیشترین میزان افزایش تحت سناریوی اقلیمی RCP 8.5 اتفاق خواهد افتاد. پس از ارزیابی تغییر اقلیم در سناریوهای مختلف انتشار، شبیه‌سازی میزان رواناب حوضه در مدل SWAT انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی میزان رواناب در حوضه آبریز نشان داد که اگر چه میزان بارش در منطقه افزایش داشته اما افزایش میزان دما اثر بیشتری داشته و باعث کاهش میزان رواناب در حوزه شده است. بر این اساس با استفاده از نتایج تغییر اقلیم شبیه‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از مدل SWAT انجام گرفت. نتایج تغییر اقلیم نشان داد که اثر سناریوهای انتشار در منطقه متفاوت بوده و باعث افزایش دما و بارش می‌شوند. بیشترین میزان افزایش در سناریوی RCP8.5 مشاهده شد که با ذات این سناریوی انتشار که بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و دی‌اکسیدکربن است نیز مطابقت داشت. سپس ارزیابی مدل هیدرولوژیکی انجام و نتایج نشان داد که اگر چه میزان بارش در منطقه افزایش داشته است اما افزایش دما در این حوضه اثر و کارایی بیشتری در کاهش میزان رواناب داشته است.

واژه‌های کلیدی: بیلان آب، زاینده رود، SWAT، LARS-WG

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.sarai@srbiau.ac.ir

## مقدمه

تغییرات اقلیمی که بیشتر ناشی از فعالیت‌های انسانی در نتیجه مصرف سوخت‌های فسیلی و مداخله‌های ناروا در جنگل‌ها و منابع طبیعی است، می‌تواند علاوه بر تأثیر منفی در عملکرد حوزه آبخیز از نقطه نظر اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی؛ اثرات مخرب شدیدی بر ساختار اکوسیستم‌های طبیعی داشته باشد، به عبارتی می‌توان گفت یکی از مهم‌ترین محرک‌های از دست رفتن تنوع زیستی و تهدیدی جدی برای سلامت انسان در دهه‌های آتی، تغییرات اقلیمی است (۱۸).

طبق گزارش پنجم مجمع بین‌الدول تغییر اقلیم، دمای سطح زمین در قرن ۲۱ احتمالاً بیش از ۱/۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره ۲۰۰۵-۱۸۵۰ افزایش خواهد یافت (۸). هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC) مجموعه‌ای از سناریوهای RCP (Representative Concentration Pathway) را برای طرح آبی شرایط آب و هوایی بر اساس پروژه همسان‌سازی مدل CMIP5 (Coupled model intercomparison project 5) تعریف کرده است، مدل‌های گزارش پنجم ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم بیشتر به جنبه‌های اقتصادی-اجتماعی تغییر اقلیم و نقش آن در توسعه پایدار اکوسیستم‌ها تمرکز دارد، از همین رو در کشور ایران اقلیم شکننده سبب شده تا پیش‌بینی درازمدت تغییرات اقلیمی از اهمیتی ویژه‌ای در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب برخوردار باشد (۷).

آگاهی دقیق از رفتار هیدرولوژیک حوضه‌های آبریز می‌تواند به شبیه‌سازی بهتر این محیط به منظور کنترل مؤلفه‌های اصلی بیلان آب کمک زیادی کند. با توجه به اینکه فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه با تغییرات آب و هوا تغییر می‌کنند، نشان دادن تعاملات بین فرایندهای هیدرولوژیکی مختلف از طریق مدل‌سازی هیدرولوژیکی رابطه بین آب، خاک، کاربری اراضی و آب و هوا بسیار کاربردی است (۱۲ و ۱۴). مدل‌سازی هیدرولوژیکی یک ابزار بسیار مفید برای مطالعه پاسخ‌های هیدرولوژیکی به تغییرات اقلیمی است. از همین رو

مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی مفهومی شاخصی همچون مدل توزیعی سیستم هیدرولوژیکی اروپا (SHE) (System Hydrologique Europeen) (۳) و مدل‌های نیمه‌توزیعی شامل: مدل هیدرولوژیکی مبتنی بر توپوگرافی (TOPMODEL: Topography-based hydrological model) (۶)؛ شبیه‌سازی رواناب مبتنی بر استفاده از زمین (SLURP) (Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes) (۹) و ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) (Soil and Water Assessment Tool) (۴) در طی سال‌های اخیر معرفی و توسعه داده شده‌اند. SWAT یک مدل در مقیاس حوضه‌ای مبتنی بر محاسبات تجربی و نیمه‌توزیعی است که می‌تواند شبیه‌سازی فرایندهای حوضه، فعالیت‌های مدیریت بر آب و خاک و کمی‌سازی خدمات اکوسیستمی هیدرولوژیکی مختلف را انجام دهد (۳، ۴، ۶، ۹ و ۱۵)

نرسمیا و همکاران (۱۳) در هند تحقیقاتی در مورد تغییرات اقلیمی آینده بر منابع آب حوضه رودخانه‌ای با استفاده از SWAT انجام دادند، این مطالعه نشان داد که در اواسط قرن (۲۰۷۰-۲۰۵۰) میانگین جریان سالانه می‌تواند ۴/۱۶ درصد افزایش یابد و تا قرن پایانی (۲۰۹۸-۲۰۷۱) به ۵/۹۳ درصد افزایش نیز برسد. راتا و همکاران (۱۶) اثر تغییر اقلیم بر تعادل هیدرولوژیکی حوضه کالیندگی را با استفاده از مدل‌های CMIP5 تحت سناریوهای RCP4.5, RCP8.5 را با مدل SWAT شبیه‌سازی کردند، نتایج حاکی از آن بود که تا پایان قرن حاضر دما برای سناریو بدبینانه تا ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. مهریزی و همکاران (۱۱) طی تحقیقی اثر تغییر اقلیم بر جریان آینده حوضه آبریز رودخانه گاماسیاب را به وسیله خروجی‌های چهار مدل سری CMIP5 در دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 برای آینده نزدیک و آینده دور مورد ارزیابی قرار دادند، نتایج نشان داد مقدار بارندگی سالانه حوضه در پنج ایستگاه بررسی شده با توجه به سناریوهای مدنظر و دوره‌های زمانی مختلف بین ۳۱/۶- تا ۵۲/۸ درصد تغییر خواهد کرد و همچنین میانگین کمترین و بیشترین دمای ماهانه در این منطقه، در ایستگاه

رودخانه زاینده‌رود سرچشمه و در جهت شمال غرب به سمت جنوب شرق جریان دارد. منبع اصلی تأمین آب این رودخانه جریان آن چشمه‌سارها و جریان‌های ناشی از ذوب برف است. پس از طی مسافتی حدود ۵۰ کیلومتر، رودخانه پلاسجان از سمت چپ به آن اضافه شده و دبی ورودی به مخزن سد زاینده‌رود را تشکیل می‌دهند. همچنین جریان انتقالی از تونل‌ها از حوضه آبریز کارون نیز به مخزن این سد برای تأمین آب اضافه می‌شود. این رودخانه پس از عبور از سد زاینده‌رود با الحاق رودخانه‌های دیگری به نام‌های شور دهاقان، مرغاب و دستکن وارد شهر اصفهان می‌شود و در انتها به باتلاق گاوخونی وارد می‌شود. سد مخزنی زاینده‌رود بر روی رودخانه زاینده‌رود در استان اصفهان در سال ۱۳۴۹ با حجم کل ۱۴۶۰ میلیون متر مکعب مورد بهره‌برداری قرار گرفت. حداکثر حجم این سد MCM ۱۴۷۰ در تراز ۲۰۶۳، حجم مفید آن MCM ۱۰۹۰ و سطح مخزن ۳۵ کیلومتر مربع است. این سد چندمنظوره بوده و از اهداف اصلی آن تولید انرژی برق آبی، کنترل سیلاب‌های فصلی، تنظیم آب کشاورزی مورد نیاز برای اراضی پایین‌دست و تأمین آب مورد نیاز صنایع مستقر در اصفهان شرب شهرهای مختلف بوده است. متوسط جریان ورودی به سد زاینده‌رود در بازه سال‌های ۵۱-۱۳۵۰ تا ۹۴-۱۳۹۳ بر اساس آمار ثبت شده حدود ۱۳۹۴ میلیون متر مکعب است. شکل (۱) موقعیت حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

#### مدل هیدرولوژیکی SWAT

مدل نیمه‌توزیعی SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، کاربری اراضی و خاک، حوضه آبریز را به زیرحوضه‌ها (HRU) تقسیم می‌کند. در این پژوهش، از نقشه DEM با دقت ۳۰ متر به‌همراه نقشه کاربری اراضی برای سال ۲۰۱۴ (GLCC) و نقشه خاک FAO با ابعاد ۱۰ کیلومتری برای ساخت مدل هیدرولوژیکی SWAT استفاده شده است. در

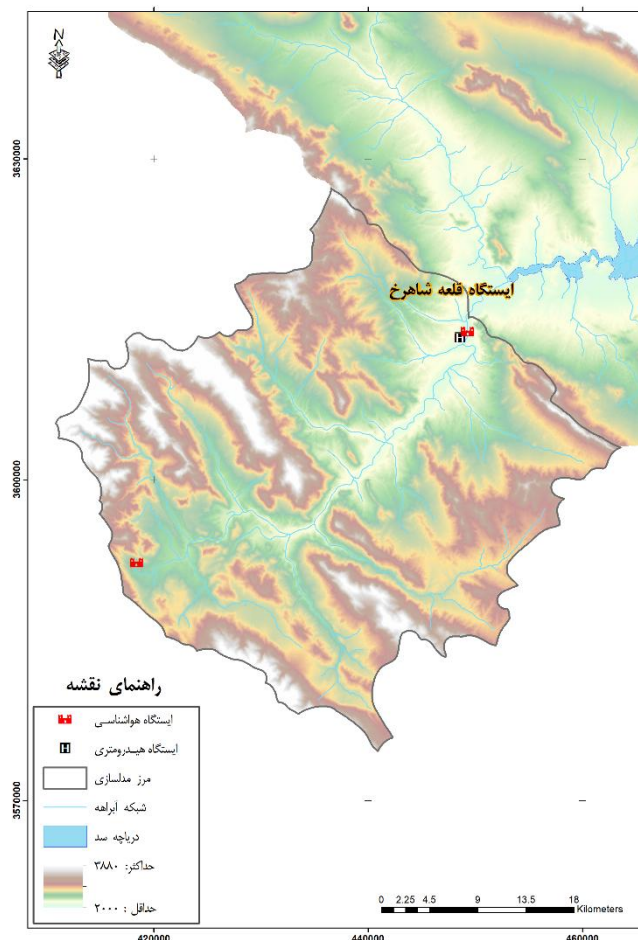
کرمانشاه به ترتیب حداکثر ۲/۷۵ و ۲/۱۵ در ایستگاه همدان به ترتیب حداکثر تا ۳/۴۳ و ۴/۲۶ سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. باب الحکمی و همکاران در سال ۱۳۹۹ ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر وضعیت رواناب و خشکسالی رودخانه نکارود را با استفاده از سناریوهای انتشار گزارش پنجم با مدل IHACRES مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد وقایع خشکسالی طی دوره‌های آبی در هر سه سناریوی اقلیمی نسبت به دوره پایه افزایش یافته و دوره‌های مرطوب و نرمال نسبت به دوره پایه کاهش خواهد داشت (۵).

بررسی اجمالی مطالعات نشان داده که اثر تغییر اقلیم بر حوضه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته، اما تأثیر تغییر اقلیم بر میزان جریان ورودی به سد تحت اثر تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های گزارش پنجم مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین از طرف دیگر با توجه به عدم قطعیت بالای مدل‌ها، استفاده از چندین مدل برای در نظر گرفتن این موضوع نیز باعث کاهش خطا می‌شود. بر این اساس با توجه به نقش تغییر اقلیم در چرخه هیدرولوژی و تغییرات در روند میزان بارش و دما در سطح حوضه‌ها ارزیابی این موضوع بسیار حائز اهمیت است. این تغییرات بارش و دما با توجه به تأثیر آن بر رواناب یک حوضه بسیار حائز اهمیت است. این مطالعه به ارزیابی میزان جریان ورودی به سد زاینده‌رود در حوضه آبریز گاوخونی پرداخته است. از آنجا که این سد حجم قابل توجهی از تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت بخش مرکزی کشور را تأمین کرده و از طرفی جنبه‌های زیست‌محیطی آن بسیار حائز اهمیت است لذا تأثیر تغییر اقلیم بر جریان ورودی به سد زاینده‌رود مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش می‌تواند میزان تأثیرگذاری تغییر اقلیم بر این حوضه را ارزیابی و برای سازگاری با این شرایط راهکارهای مربوطه را با توجه به حجم قابل توجه بهره‌برداری توسط مدیران اتخاذ کند.

#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه

رودخانه زاینده‌رود از بخش شرقی ارتفاعات زاگرس میانی



شکل ۱. موقعیت حوضه بالادست سد زاینده رود

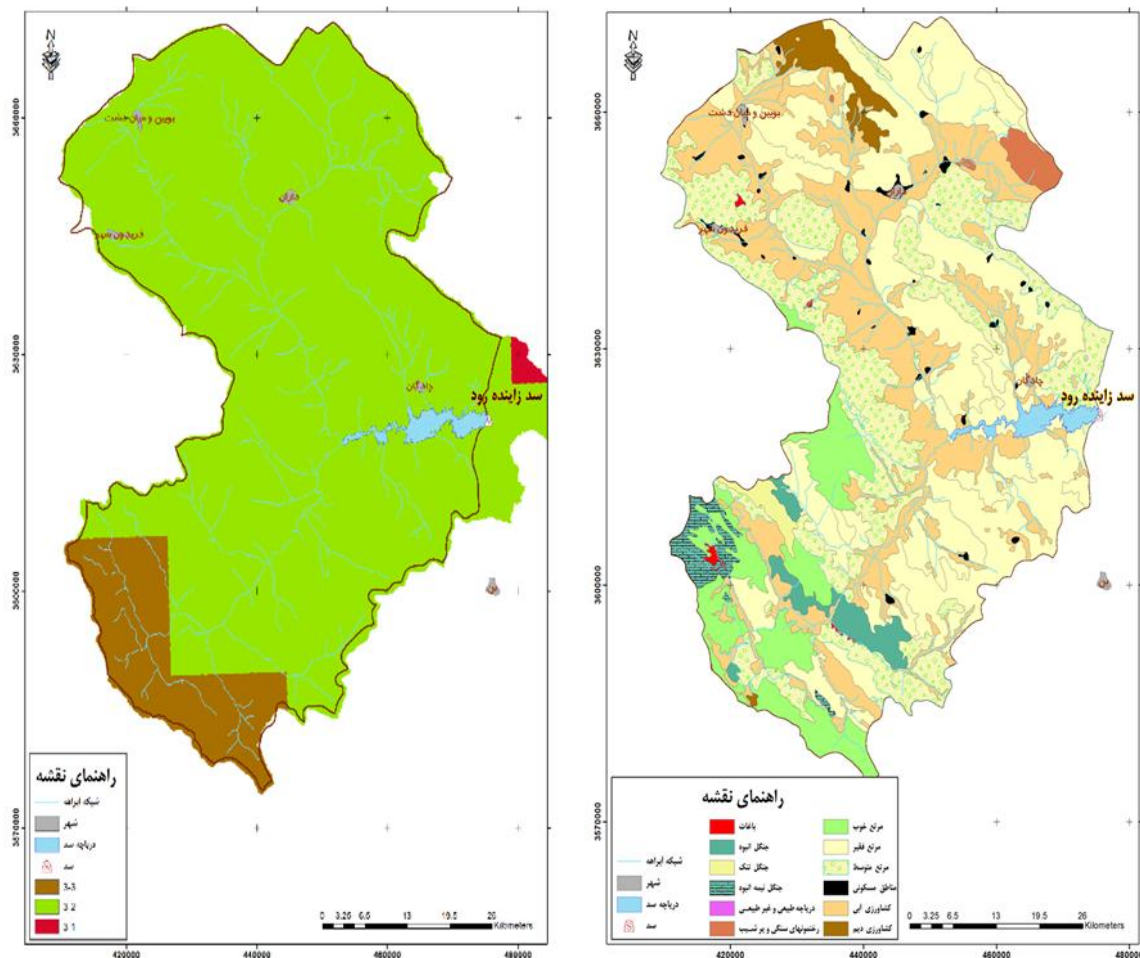
که در آن،  $Sw_t$ : میزان آب باقی مانده در خاک،  $Sw_0$ : میزان اولیه رطوبت خاک،  $t$ : زمان برحسب روز،  $R_{day}$ : بارش روزانه برای روز  $i$ ،  $Q_{surf}$ : مجموع رواناب روزانه برای روز  $i$ ،  $W_{seep}$ : نفوذ آب از پروفیل زیرین خاک،  $E_a$ : تبخیر تعرق حاصل از روش پنمن - مانتیسث و  $Q_{gw}$ : جریان آب بازگشتی برای روز  $t$ ام است.

#### واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی

پس از جمع آوری اطلاعات مورد نیاز و معرفی آنها به مدل SWAT نیاز است که مدل مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گیرد. مرحله واسنجی مدل SWAT از اهمیت بالایی برخوردار بوده و فرایند بسیار زمان بر و طولانی است. به دلیل زیاد بودن

شکل (۲) اطلاعات نقشه های خاک و کاربری اراضی نشان داده شده است. ایستگاه هیدرومتری قلعه شاهرخ با کد ۰۳-۴۲ با طول ۳۲ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی و عرض ۵۰ درجه و ۲۷ دقیقه در بخش شمالی حوضه مورد مطالعه به عنوان ایستگاه معرف هیدرولوژیکی است. دو ایستگاه هواشناسی چلگرد و قلعه شاهرخ نیز به عنوان ایستگاه های سنجش پارامترهای هوا انتخاب شد. در شکل (۱) موقعیت ایستگاه های در نظر گرفته شده ارائه شده است. همچنین در این پژوهش برای تخمین حجم رواناب سطحی حوضه از روش SCS استفاده شده است. این مدل بر اساس معادله بیلان منابع آب سطحی (رابطه ۱) شبیه سازی را انجام می دهد (۱۵)

$$Sw_t = Sw_0 + R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw} \quad (1)$$



شکل ۲. نقشه‌های خاک و کاربری اراضی

شده است، اختصاص داده می‌شود، با در نظر گرفتن این شرط که متوسط بین باندهای بالا و پایین این محدوده مقدار کوچکی باشد، تغییر پیدا می‌کند (۱). برای ارزیابی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی از شاخص‌های ضریب تبیین، ضریب نش‌ساتکلیف، P-factor و R-factor استفاده می‌شود. در این پژوهش شبیه‌سازی رواناب با استفاده از ایستگاه قلعه‌شاهرخ به عنوان ایستگاه مبنا برای واسنجی مدل در برآورد رواناب آمار سال‌های ۲۰۱۰-۱۹۸۶ (۱۶ سال) و برای مرحله صحت‌سنجی از آمار سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۱۱ (۴ سال) استفاده شده است. واسنجی، تحلیل حساسیت و تحلیل عدم قطعیت مدل، با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP 2012 که شامل الگوریتم SUFI2 (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۷) است، انجام گرفت.

پارامترهای مدل SWAT و همچنین شبیه‌سازی همزمان بسیاری از متغیرهای هیدرولوژیکی و کشاورزی در این مدل، از نرم‌افزار SWAT-CUP برای آنالیز حساسیت و واسنجی آن استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر است با روش‌های SUFI2، PSO، GLUE، MCMC و PARASOL عملیات واسنجی را انجام دهد. در این تحقیق، بهینه‌سازی پارامترها و آنالیز عدم قطعیت مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI2 انجام شده است. روش کار الگوریتم SUFI2 به این صورت است که ابتدا با تعریف یک تابع هدف که می‌تواند یک متغیره و یا چندمتغیره باشد، مرحله واسنجی شروع می‌شود. سپس در مرحله بعدی برای هر پارامتر یک محدوده مجاز، که در SWAT-CUP در بخش absolute-SWAT-Values این محدوده مجاز مشخص

است. با انجام آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در مدل SWAT مشخص شد که پارامتر شماره منحنی (CN2) و ظرفیت آب در دسترس در لایه خاک مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر رواناب در حوضه مورد مطالعه هستند. پارامترهای ورودی به اکثر مدل‌ها با قطعیت کامل معلوم نیستند. به دلیل این عدم قطعیت مدل‌ها قادر به توصیف دقیق فرایندهای هیدرولوژیکی تحت شرایط طبیعی نیستند. با وجود توسعه و کاربرد فراوان این مدل‌ها توجه به مسئله عدم قطعیت که تغییرپذیری در مقادیر پارامترهای ورودی را پیش‌بینی می‌کند، ضروری است. نتایج این مرحله از محاسبات توسط نرم‌افزار SWAT-CUP انجام می‌گیرد. بر این اساس هر مقدار قدر مطلق t-state بیشتر و p-value آن نزدیک به صفر باشد، آن پارامتر تأثیر بیشتری دارد.

#### مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی

در مطالعات تغییر اقلیم یکی از معتبرترین ابزارهای تولید سناریوی اقلیمی، مدل‌های سه‌بعدی جفت شده گردش عمومی اتمسفر-اقیانوس هستند. در این پژوهش، برای پیش‌بینی دو پارامتر دما و بارش از مدل‌های گردش عمومی جو که از جدیدترین گزارش IPCC تحت عنوان گزارش پنجم CMIP5 استخراج شده، استفاده شده است. برای دریافت خروجی این مدل‌ها نیاز به انتخاب سناریوهای انتشار است که گزارش پنجم تحت ۴ سناریوی انتشار ارائه شده که در این بین، سناریوی RCP2.6 سناریو خوش‌بینانه و RCP 8.5 سناریوی بدبینانه هستند. مطالعات نشان می‌دهد که بهترین طول دوره آماری برای محاسبه سیگنال‌های تغییر اقلیم ۳۰ سال است (۱۰) و در این تحقیق نیز دوره ۳۰ ساله آینده نزدیک ۲۰۲۱-۲۰۵۰ برای پیش‌بینی در نظر گرفته شده است. در جدول (۱) مشخصات مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش آورده شده (IPCC.Ch). شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی توسط مدل‌های GCM در دوره‌های گذشته با محاسبه تغییرات این متغیرها در دوره‌های آینده نسبت به گذشته، این امکان را

SUF2، واسنجی، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت را همزمان انجام داده و سعی می‌کند که اکثر داده‌های اندازه‌گیری شده در ناحیه عدم قطعیت تعیین شده قرار گیرند. در عین حال، سعی می‌کند کوچک‌ترین طیف عدم قطعیت ممکن را ایجاد کند. در این نرم‌افزار، یک دامنه بزرگ اولیه عدم قطعیت برای هر پارامتر فرض می‌شود. بنابراین در ابتدا، داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح ۹۵ ppu (95 Percent Prediction Uncertainty) قرار می‌گیرند و سپس این عدم قطعیت در گام‌های متوالی، کاهش می‌یابد تا دو شرط برقرار شود:

- ۱) اکثر داده‌های مشاهده‌ای در سطح ۹۵ ppu واقع شوند (p-Factor) و
- ۲) فاصله متوسط بین حد بالا و پایین در طیف ۹۵ درصد عدم قطعیت تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده تا حد ممکن کوچک شود (d-Factor).

با توجه به مطالعات پیشین بر مدل SWAT، برای پارامتر  $R^2$  در دوره واسنجی و اعتبارسنجی مقدار متوسط ۷۵ درصد (۶۲ تا ۹۰ درصد در واسنجی و ۶۰ تا ۸۸ درصد در اعتبارسنجی)، و برای پارامتر NS در دوره واسنجی مقدار متوسط ۷۵ درصد (۴۵ تا ۹۰ درصد) و در دوره اعتبارسنجی مقدار متوسط ۶۵ درصد (۳۰ تا ۸۵ درصد) و برای پارامتر ضریب راندمان مقدار ۷۰ درصد به‌عنوان مقادیر مطلوب تعیین می‌شوند. آنالیز حساسیت در واقع مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل است که به عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل آماری به صورت سازمان یافته (سیستماتیک) است که بتوان تأثیرهای این تغییرها را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد. اهمیت نسبی پارامترهای ورودی به مدل SWAT با توجه به خروجی آن با استفاده از آنالیز حساسیت ارزیابی می‌شود. یکی از چالش‌های مدل‌سازی حوضه، شناخت پارامترهای ورودی مؤثر بر خروجی مدل است. بیش از ۲۰ پارامتر در مدل SWAT روی شبیه‌سازی بارش-رواناب نقش دارند. بنابراین کاهش تعداد پارامترها با حذف پارامترهای کم تأثیر ضروری

جدول ۱. مشخصات عمومی مدل‌های منتخب CMIP5 در این تحقیق

مرجع	سناریوهای انتشار	قدرت تفکیک	نام مدل
واتانابه و همکاران (۲۰۱۰)	RCP2.6 - RCP4.5 RCP6 - RCP8.5	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$	MIROC-ESM
اسکمیدت و همکاران (۲۰۱۴)	RCP2.6 - RCP4.5 RCP6 - RCP8.5	$2/5^{\circ} \times 2^{\circ}$	-R2GISS-E
کارش و همکاران (۲۰۱۳)	RCP2.6 - RCP4.5 RCP6 - RCP8.5	$2/5^{\circ} \times 2^{\circ}$	(WACCM)\CESM
کولیر و همکاران (۲۰۱۱)	RCP2.6 - RCP4.5 RCP6 - RCP8.5	$1/9^{\circ} \times 1/9^{\circ}$	3,6,0 CSIRO-Mk
واتانابه و همکاران (۲۰۱۰)	RCP2.6 - RCP4.5 RCP6 - RCP8.5	$2/8^{\circ} \times 2/8^{\circ}$	MIROC-ESM-CHEM
جیورگنا و همکاران (۲۰۱۳)	RCP2.6 - RCP4.5 RCP8.5	$1/9^{\circ} \times 1/9^{\circ}$	MPI-ESM-LR
جیورگنا و همکاران (۲۰۱۳)	RCP2.6 - RCP4.5 RCP8.5	$1/9^{\circ} \times 1/9^{\circ}$	MPI-ESM-MR
اسکمیدت و همکاران (۲۰۱۴)	RCP2.6 - RCP4.5 RCP6 - RCP8.5	$2/5^{\circ} \times 2^{\circ}$	-H2GISS-E
هازلگر و همکاران (۲۰۱۰)	RCP2.6 - RCP4.5 RCP8.5	$1/1^{\circ} \times 1/1^{\circ}$	EC-EARTH

سری‌های زمانی متغیرهای هواشناسی ساختگی با طول دلخواه از طریق انتخاب تصادفی مقادیر از توزیع‌های مناسب استفاده شده است. از طریق دخالت پارامترهای توزیع‌ها برای یک ایستگاه به‌همراه تغییرات پیش‌بینی شده اقلیمی که از مدل‌های اقلیم جهانی یا منطقه‌ای نتیجه شده، سناریوی اقلیم روزانه برای این ایستگاه می‌تواند تولید شود و در اتصال به مدل‌های شبیه‌سازی سامانه‌های مختلف از جمله منابع آب و کشاورزی برای ارزیابی اثرات استفاده شود. LARS-WG در اقلیم‌های مختلف امتحان شده است و نتایج خوبی را در تولید آمارهای آب و هوای گوناگون شامل حوادث شدید آب و هوایی نشان داده است (۱۰). پس از شبیه‌سازی سری زمانی داده‌های تاریخی منطقه و ارزیابی دقت مدل، تولید سری زمانی برای دوره‌های آتی تحت سناریوهای مختلف انتشار انجام می‌گیرد.

#### شاخص‌های آماری برای ارزیابی

به‌منظور ارزیابی نتایج حاصل از صحت‌سنجی نتایج تغییر اقلیم از سه شاخص ضریب تبیین ( $R^2$ )، میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) و شاخص نش-ساتکلیف (NASH) استفاده

فراهم می‌کند که سناریوهای تغییر اقلیم را مناسب‌تر برای پارامترهای مورد نظر محاسبه کرد. در این روش برای دما از اختلاف بین دو متغیر و برای بارش از نسبت بین آنها استفاده می‌شود. مقادیر به‌دست آمده همان سناریوهای تغییر اقلیم هستند. درنهایت برای به‌دست آوردن سری زمانی مورد نظر سناریوی اقلیمی برای یک پارامتر، مقادیر به‌دست آمده بر داده‌های مشاهداتی اعمال می‌شوند. به‌منظور برآورد سری‌های زمانی آینده پس از برآورد سناریوها از مدل اقلیمی LARS-WG استفاده شده است.

LARS-WG یک مولد آب و هوای تصادفی است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های جوی در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم کنونی و آینده استفاده شود. سپس در سال ۱۹۹۸ توسط سمونوف بازنگری و بارو تعدیل شد. این مدل سری‌های زمانی روزانه از دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تابش خورشید را تولید می‌کند. یک مولد آب و هوای تصادفی از آب و هوای روزانه مشاهده شده در یک ایستگاه برای محاسبه یک مجموعه از پارامترها برای توزیع‌های احتمال متغیرهای هواشناسی، به‌علاوه ارتباط بین آنها استفاده می‌کند. این مجموعه از پارامترها برای تولید

جدول ۲. نتایج تحلیل حساسیت مدل و مقادیر p-value و t-stat مربوط به هر کدام از پارامترها

رتبه	پارامتر	تشریح	p-value	t-stat
۱	SOL-BD	چگالی ظاهری خاک	۰	۷/۹۴
۲	CN2	شماره منحنی رواناب	۰	۶/۷
۳	SOL_K	هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع	۰/۰۰۴	۶/۰۷
۴	GWQMN	حداقل عمق مورد نیاز سطح ایستابی در سفره‌های کم عمق	۰/۰۰۱	۳/۲۹
۵	ALPHA_BNK	پارامتر $\alpha$ در جریان پایه	۰/۰۱	۳/۱۲
۶	SOL_AWC	ظرفیت آب در دسترس در لایه خاک	۰/۰۲	۳/۰۶
۷	GW_REVAP	هدررفت در موئینگی	۰/۲۳	۲/۲۸
۸	SMTMP	درجه حرارت ذوب برف	۰/۲۴	۲/۲
۹	ESCO	فاکتور جبران تبخیر از خاک	۰/۲۵۹	۲/۱۷
۱۰	Surlag	ضریب تأخیر جریان سطحی	۰/۳۱	۲/۱۵
۱۱	SMFMN	ضریب حداقل ذوب برف	۰/۳۶۲	۲/۰۶
۱۲	SMFMX	ضریب حداکثر ذوب برف	۰/۴	۲/۰۱
۱۳	Alpha-BF	فاکتور ضریب جریان پایه	۰/۴۱	۲/۰۱
۱۴	Ch-K2	هدایت هیدرولیکی رودخانه	۰/۴۲	۲/۰۱
۱۵	SFTMP	درجه حرارت ریزش برف	۰/۵	۲
۱۶	GW-DELAY	زمان تأخیر جریان آب زیرزمینی	۰/۵۲	۱/۹۸

### نتایج و بحث

شد.

با استفاده از مدل SWAT-CUP، تحلیل حساسیت پارامترهای مدل مطابق جدول (۲) انجام گرفت. در این جدول، ترتیب میزان تأثیرگذاری پارامترها از بالا به پایین به صورت نزولی است که رتبه‌بندی آنها توسط دو مقدار p-value و t-state مشخص می‌شود.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که چگالی مطلق خاک (SOL\_BD) و شماره منحنی (CN2) بیشترین تأثیر را روی دبی خروجی داشته است. مراحل واسنجی با تغییر هر پارامتر و به حداقل رساندن خطای بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده انجام می‌گیرد. بدین منظور در هر مرحله از اجرای آنالیز

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

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

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

در این روابط  $S_i$  و  $O_i$  به ترتیب آمین داده شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقدار واقعی (مشاهده شده)،  $\bar{S}$  و  $\bar{O}$  به ترتیب میانگین کل داده‌های  $S_i$  و  $O_i$  در جامعه آماری،  $n$  تعداد نمونه‌ها است.



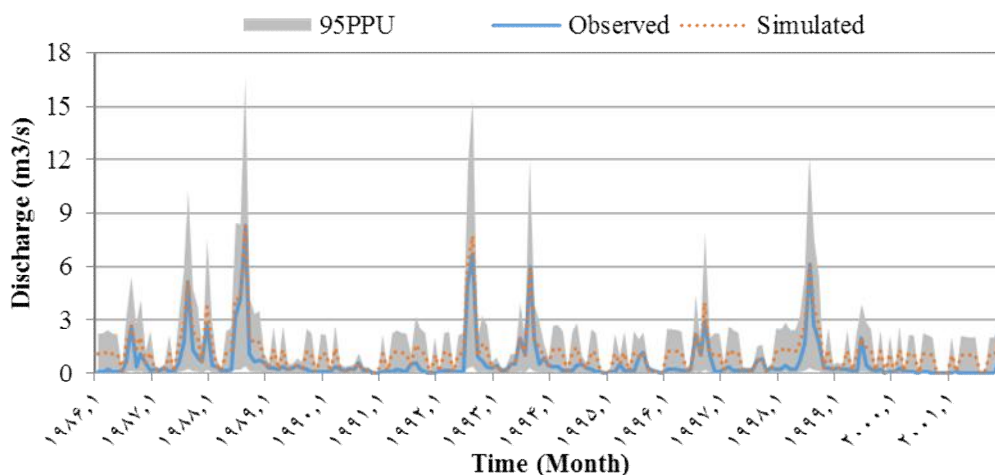
جدول ۳. پارامترهای منتخب برای مراحل آنالیز حساسیت و واسنجی در مدل SWAT-CUP

طبقه‌بندی	ردیف	پارامتر	شرح پارامتر	حد پایین	حد بالا
آب زیرزمینی (gw.)	۱	GW_DELAY	زمان تأخیر جریان آب زیرزمینی (روز)	۰	۵۰۰
	۲	ALPHA_BF	فاکتور آلفا در جریان پایه (روز)	۰	۱
	۳	GWQMN	حداقل عمق مورد نیاز سطح ایستابی در سفره‌های کم عمق	۲	۵
	۴	GW_REVAP	هدررفت در موئینگی	۱	۵
مدیریتی (mgt.)	۵	ALPHA_BNK	پارامتر $\alpha$ در جریان پایه	۰/۱	۰/۵
	۶	CN2	شماره منحنی رواناب SCS	۳۵	۹۸
خاک (sol.)	۷	SOL_K	هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع	۰	۲۰۰۰
	۸	SOL_BD	وزن مخصوص ظاهری خاک	۰/۹	۲/۵
	۹	SOL_AWC	ظرفیت آب در دسترس در لایه خاک	۰	۱
آبراهه (rte.)	۱۰	CH_K2	هدایت هیدرولیکی در آبراهه اصلی	۰/۰۰۱	۰/۳
	۱۱	ESCO	فاکتور جبران تبخیر از خاک	۰	۱
حوضه (bsn.)	۱۲	SFTMP	درجه حرارت ریزش برف	-۲۰	۲۰
	۱۳	SMTMP	درجه حرارت ذوب برف	-۲۰	۲۰
	۱۴	SMFMX	ضریب حداکثر ذوب برف	۰	۲۰
	۱۵	SMFMN	ضریب حداقل ذوب برف	۰	۲۰
	۱۶	SURLAG	زمان تأخیر جریان سطحی	۰/۰۵	۲۴

نتایج شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه قلعه‌شاهرخ نشان داد که شبیه‌سازی انجام گرفته دارای دقت به نسبت مناسبی بوده و این مدل قابلیت شبیه‌سازی تحت سناریوهای تغییر اقلیم را دارد. پس از شبیه‌سازی جریان ورودی به مخزن سد، اثر تغییر اقلیم بر جریان ورودی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس، چهار مدل اقلیمی CCGM4 و GFDL-ESM2G، CNRM-CM5، HadGEMS-A0 برای ارزیابی سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در ایستگاه قلعه‌شاهرخ برای یک دوره ۱۶ سال مطابق شکل (۳) انجام گرفت. همچنین پس از آن برای یک دوره ۴ ساله تا انتهای سال ۲۰۰۵ نیز صحت‌سنجی مدل انجام گرفت.

حساسیت‌تغییری در هر یک از پارامترهای مدل با توجه به کران تعریف شده (۳۰٪ تا -۳۰٪ درصد) اعمال و پس از آن دبی شبیه‌سازی می‌شود. تکرار هر مرحله و رسیدن به جواب مناسب با توجه به افزایش دقت مدل با توجه به شاخص‌های آماری به دست می‌آید. جدول (۳) پارامترهای منتخب حساس را برای واسنجی در مدل را نشان می‌دهد.

پس از آنالیز حساسیت و واسنجی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی SWAT، شبیه‌سازی رواناب ورودی در ایستگاه قلعه‌شاهرخ برای یک دوره ۱۶ سال مطابق شکل (۳) انجام گرفت. همچنین پس از آن برای یک دوره ۴ ساله تا انتهای سال ۲۰۰۵ نیز صحت‌سنجی مدل انجام گرفت.



شکل ۳. نتایج مرحله واسنجی مدل SWAT-CUP در ایستگاه قلعه شاهرخ (۱۹۸۶-۲۰۰۱)

جدول ۴. تحلیل آماری داده‌های شبیه‌سازی دما در ایستگاه قلعه شاهرخ و چلگرد

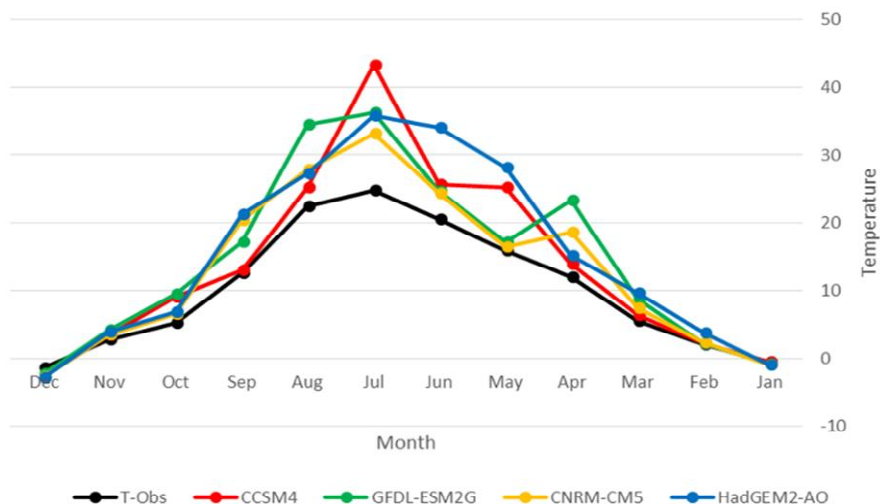
مدل	ایستگاه قلعه شاهرخ				ایستگاه چلگرد			
	CCSM4	GFDL-ESM2G	CNRM-CM5	HadGEM2-AO	CCSM4	GFDL-ESM2G	CNRM-CM5	HadGEM2-AO
R <sup>2</sup>	۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۹	۰/۷۸	۰/۷۷	۰/۶۵	۰/۸۸	۰/۹۱
RMSE	۱	۰/۹۸	۱/۰۷	۱/۱۵	۰/۹۶	۱/۷	۱/۱	۰/۸۸
NS	-۰/۶۶	۰/۲۱	۰/۹۲	-۰/۶۱	۰/۷۲	-۰/۴۳	۰/۵۵	۰/۷۸

جدول ۵. تحلیل آماری داده‌های شبیه‌سازی بارش در ایستگاه قلعه شاهرخ و چلگرد

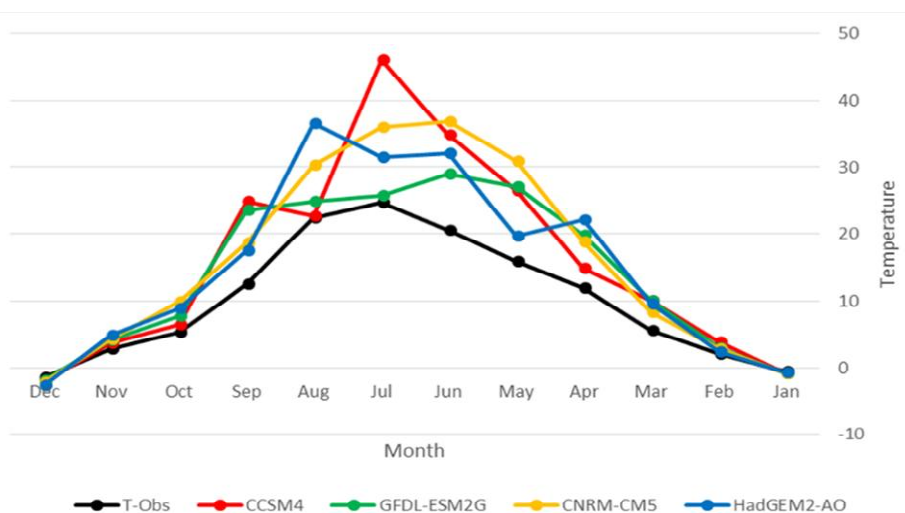
مدل	ایستگاه قلعه شاهرخ				ایستگاه چلگرد			
	CCSM4	GFDL-ESM2G	CNRM-CM5	HadGEM2-AO	CCSM4	GFDL-ESM2G	CNRM-CM5	HadGEM2-AO
R <sup>2</sup>	۰/۷۹	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۹۴	۰/۹	۰/۸۴	۰/۸۸	۰/۸۷
RMSE	۴۷/۷	۷۳/۲	۶۱/۴	۲۴/۲	۳۱/۷	۹۲/۶	۴۴/۴	۵۱/۳
NS	۰/۵۵	۰/۶۷	۰/۹	-۰/۹۱	۰/۱۷	۰/۵۶	-۰/۷۲	۰/۸۷

مدل‌ها بین ۰/۷۹ تا ۰/۹۴ در تغییر بوده و میانگین مجذور خطا حداکثر ۹۲/۶ است. پس از شبیه‌سازی اقلیمی به منظور ارزیابی مدل‌های برتر در شبیه‌سازی بارش و دما در دوره تاریخی میانگین درازمدت بارش و دما به صورت ماهانه مورد

ضریب تبیین بالای ۶۵ درصد بوده و میانگین مجذور خطا در این مدل‌ها بین ۰/۸۸ تا ۱/۷ میلی‌متر در تغییر است. نتایج تحلیل آماری دما نیز در دو ایستگاه نشان داد که دقت نتایج شبیه‌سازی نسبت به بارش مناسب‌تر و ضریب تبیین در کلیه



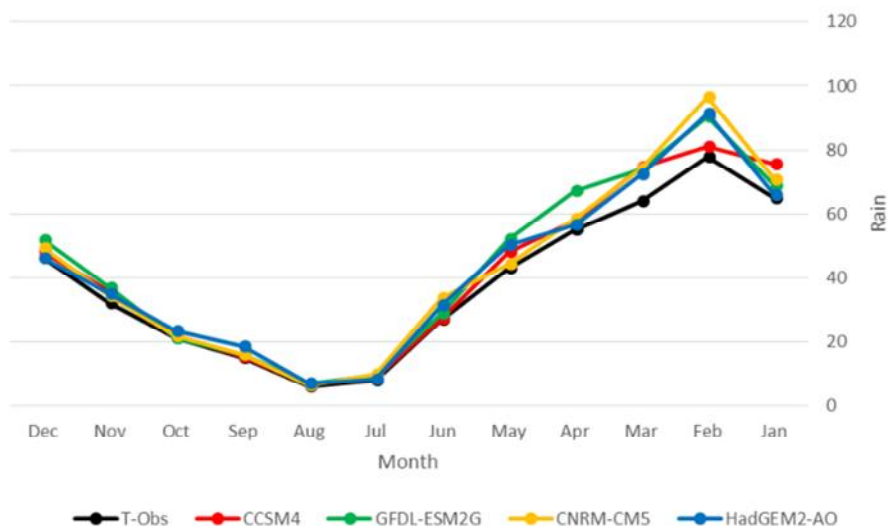
شکل ۴. مقادیر دما شبیه‌سازی شده در چهار مدل برای ایستگاه قلعه شاهرخ



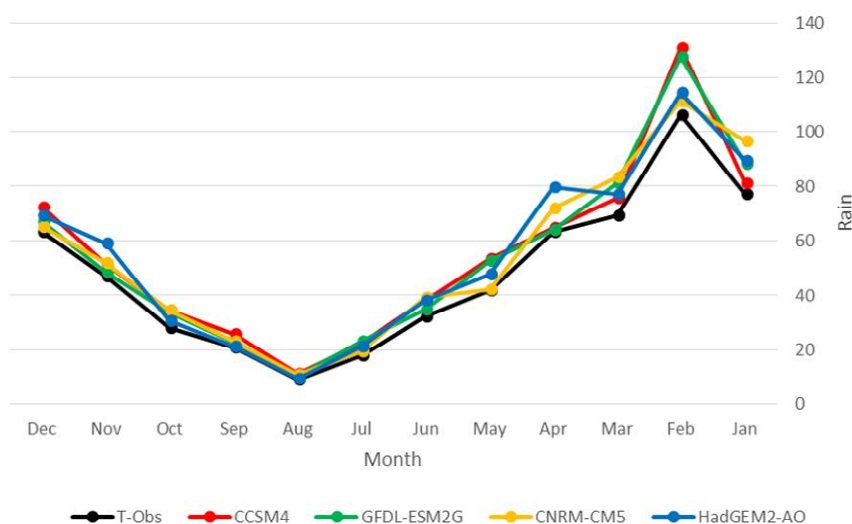
شکل ۵. مقادیر دما شبیه‌سازی شده در چهار مدل برای ایستگاه چلگرد

در کلیه ماه‌های سال افزایش دما شاهد هستیم و بیشترین نوسانات دما در ماه جولای ثبت شده است. به منظور ارزیابی وضعیت بارش شبیه‌سازی شده چهار مدل نسبت ایستگاه‌های قلعه شاهرخ و چلگرد به صورت شکل‌های (۶) و (۷) ارائه شده است. بررسی تغییرات بارش شبیه‌سازی شده برای چهار مدل نشان می‌دهد که بیشترین نوسان و تغییرات در ماه فوریه ثبت شده که این ماه بیشترین تغییرات را در بین چهار مدل شاهد هستیم. بررسی اجمالی نتایج نشان می‌دهد در ماه‌هایی که مقادیر حداقلی ثبت شده است دقت بالاتر و در

تحلیل قرار گرفت. بر این اساس مقادیر دما برای ایستگاه قلعه شاهرخ و چلگرد شبیه‌سازی شد. بررسی‌ها برای این دو ایستگاه نشان می‌دهد که تفاوت در ماه‌های سرد سال نسبت به ماه‌های گرم سال کمتر به چشم می‌خورد. همچنین ارزیابی سری زمانی داده‌های شبیه‌سازی شده دما نسبت به داده‌های مشاهداتی در این ایستگاه نیز به صورت شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده است که نتایج آن نشان می‌دهد که مدل GFDL-ESM2G نسبت به سایر مدل‌ها در ماه‌های سرد جواب بهتری را ثبت کرده است. همچنین نتایج به دست آمده از هر چهار مدل نشان می‌دهد که



شکل ۶. تحلیل بارش شبیه‌سازی شده برای چهار مدل در ایستگاه قلعه‌شاهرخ



شکل ۷. تحلیل بارش شبیه‌سازی شده برای چهار مدل در ایستگاه چلگرد

شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) تغییرات دما برای ایستگاه چلگرد را نشان می‌دهد.

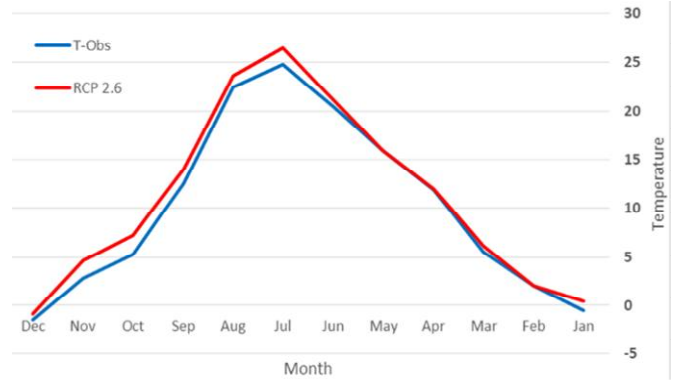
بررسی‌ها نشان می‌دهد اختلاف بین سناریوی RCP 8.5 نسبت به سناریوی RCP 2.6 با داده‌های مشاهداتی برای پارامتر دما بیشتر است. پس از شبیه‌سازی دما در منطقه تحت سه سناریو، شبیه‌سازی بارش برای دو ایستگاه تحت سه سناریو انجام گرفت که نتایج برای دو ایستگاه در شکل‌های (۱۴) تا (۱۹) ارائه شده است.

ماه‌هایی که مقادیر بارش افزایش داشته است دقت کاهش یافته است. در مجموع میزان بارش و دمای شبیه‌سازی شده در چهار مدل نتایج مناسبی را داشته است.

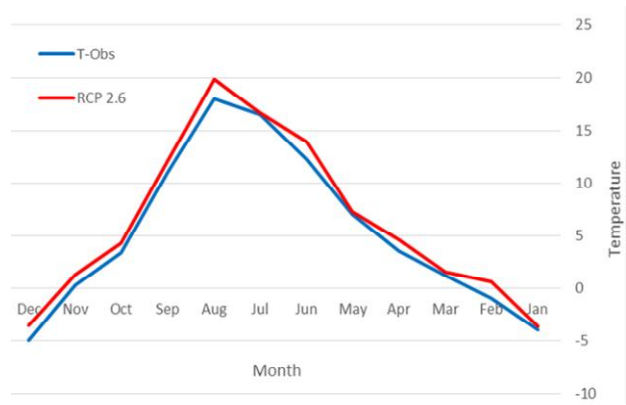
پس از ارزیابی نتایج شبیه‌سازی بارش و دما برای منطقه مورد مطالعه در سطح دو ایستگاه قلعه‌شاهرخ و چلگرد، تغییرات این دو پارامتر اقلیمی برای آینده برای سناریوهای انتشار RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 ارائه شده است. شکل‌های (۸) تا (۱۰) تغییرات دما برای ایستگاه قلعه‌شاهرخ و



شکل ۹. تغییرات دمای میانگین ماهانه ایستگاه قلعه شاهرخ تحت سناریوی RCP 4.5



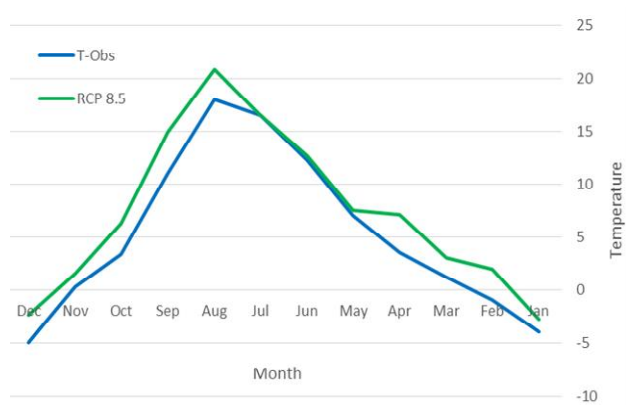
شکل ۸. تغییرات دمای میانگین ماهانه ایستگاه قلعه شاهرخ تحت سناریوی RCP 2.6



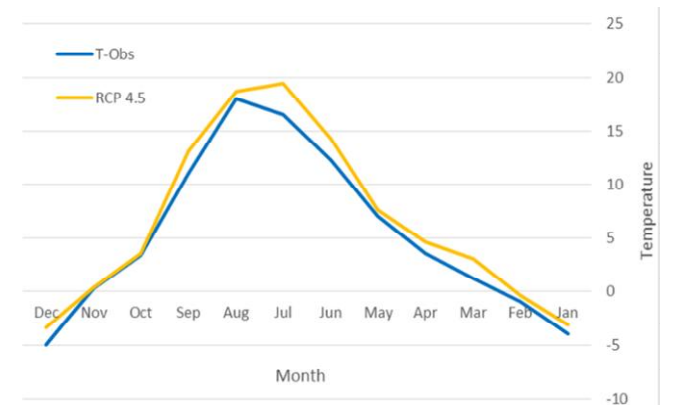
شکل ۱۱. تغییرات دمای میانگین ماهانه ایستگاه چلگرد تحت سناریوی RCP 2.6



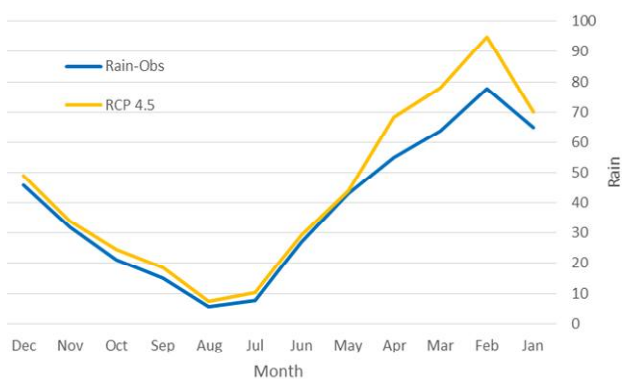
شکل ۱۰. تغییرات دمای میانگین ماهانه ایستگاه قلعه شاهرخ تحت سناریوی RCP 8.5



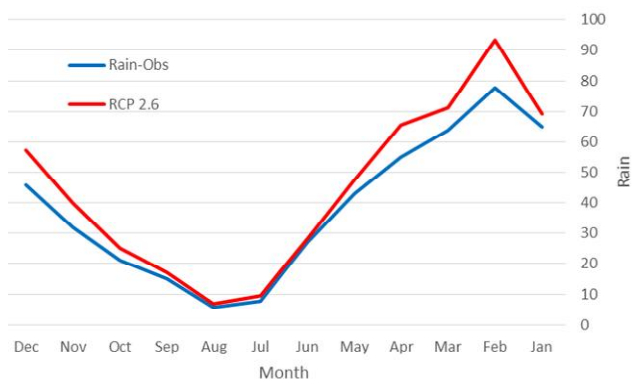
شکل ۱۳. تغییرات دمای میانگین ماهانه ایستگاه چلگرد تحت سناریوی RCP 8.5



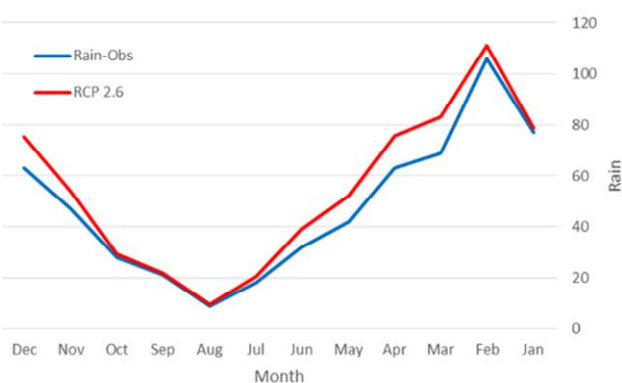
شکل ۱۲. تغییرات دمای میانگین ماهانه ایستگاه چلگرد تحت سناریوی RCP 4.5



شکل ۱۵. تغییرات بارش ماهانه ایستگاه قلعه‌شاهرخ تحت سناریوی RCP 4.5



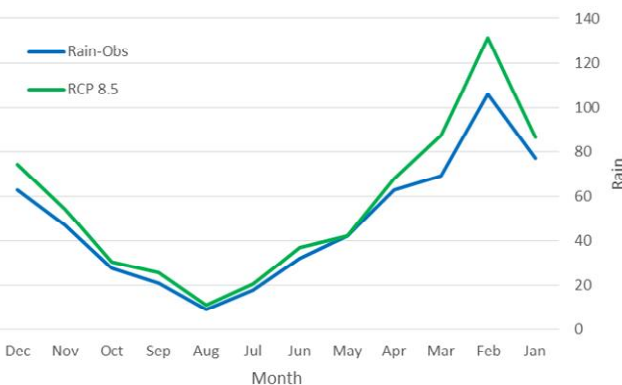
شکل ۱۴. تغییرات بارش ماهانه ایستگاه قلعه‌شاهرخ تحت سناریوی RCP 2.6



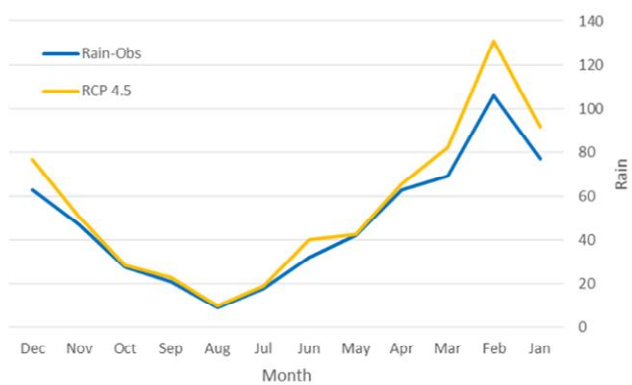
شکل ۱۷. تغییرات بارش ماهانه ایستگاه چلگرد تحت سناریوی RCP 2.6



شکل ۱۶. تغییرات بارش ماهانه ایستگاه قلعه‌شاهرخ تحت سناریوی RCP 8.5



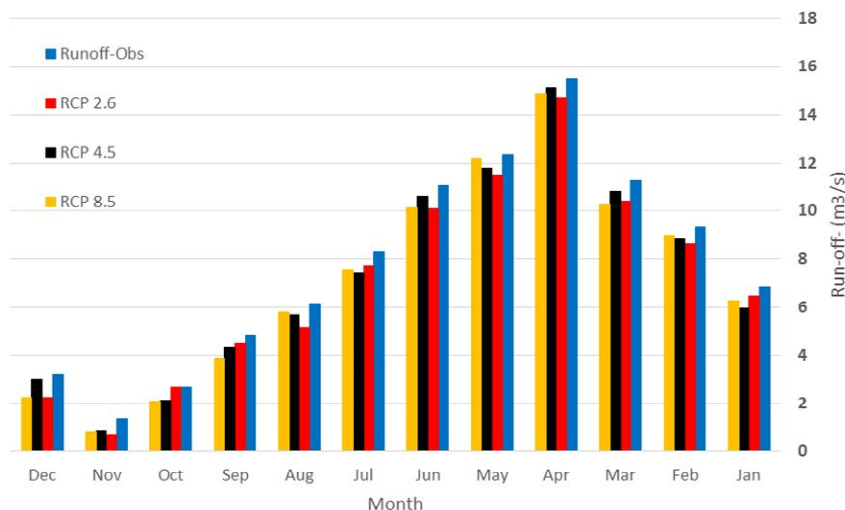
شکل ۱۹. تغییرات بارش ماهانه ایستگاه چلگرد تحت سناریوی RCP 8.5



شکل ۱۸. تغییرات بارش ماهانه ایستگاه چلگرد تحت سناریوی RCP 4.5

نتایج به دست آمده، به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم در این حوزه و تأثیر آن بر میزان جریان ورودی به سد زاینده‌رود در محل ایستگاه قلعه‌شاهرخ، شبیه‌سازی مدل هیدرولوژیکی مجدد انجام گرفت. در این حالت به منظور اعمال نتایج مدل‌های مختلف

بررسی تغییرات بارش و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میانگین بارش ماهانه در فصل سرد با مقادیر بارش مشاهداتی اختلاف داشته و در سایر فصول دقت نتایج بالا است. پس از ارزیابی مدل هیدرولوژیکی SWAT و ارزیابی دقت



شکل ۲۰. شبیه‌سازی میزان رواناب در ایستگاه قلعه شاهرخ تحت سناریوهای تغییر اقلیم

تعداد زیاد و حداکثری این مدل‌ها نیز باعث افزایش حجم محاسبات می‌شود. این مطالعه با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر اساس گزارشات پنجم IPCC بر میزان رواناب حوضه زاینده‌رود انجام گرفت. بر این اساس با استفاده از مدل نیمه‌توزیعی SWAT شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه با در نظر گرفتن ایستگاه قلعه‌شاهرخ به‌عنوان خروجی منطقه انجام گرفت. پس از ارزیابی مدل و واسنجی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی، صحت‌سنجی مدل در این ایستگاه انجام گرفت. چهار مدل اقلیمی GFDL-ESM2G, CNRM-CM5, HadGEM2-AO و CCSM4 برای شبیه‌سازی دو پارامتر بارش و دما در منطقه انتخاب و پس از شبیه‌سازی دوره تاریخی و ارزیابی دقت نتایج، شبیه‌سازی وضعیت تغییر اقلیم برای سه سناریوی انتشار اقلیم از مدل استخراج و در مدل هیدرولوژیکی SWAT شبیه‌سازی شد. نتایج تغییر اقلیم نشان داد که اثر سناریوهای انتشار در منطقه متفاوت بوده و باعث افزایش دما و بارش می‌شوند. بیشترین میزان افزایش در سناریوی RCP8.5 مشاهده شد که با ذات این سناریوی انتشار که بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و دی‌اکسیدکربن است نیز مطابقت داشت. سپس ارزیابی مدل هیدرولوژیکی انجام و نتایج نشان داد که اگر

تغییر اقلیم، برای سه سناریوی انتشار از میانگین نتایج به‌دست آمده از مدل‌های اقلیمی استفاده شد. این شبیه‌سازی برای سه سناریوی انتشار RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 انجام گرفت. بر این اساس میزان رواناب در ایستگاه قلعه‌شاهرخ مطابق شکل (۲۰) شبیه‌سازی شد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که اگر چه میزان بارش در منطقه تحت سناریوهای انتشار اغلب افزایش داشته است اما با توجه به افزایش دما میزان رواناب و میزان آب ورودی به سد زاینده‌رود کاهش داشته است. نتایج نشان می‌دهد که کمتر از ۱۰ درصد میزان رواناب ورودی به ایستگاه قلعه‌شاهرخ کاهش داشته است و بیشترین میزان کاهش در سناریوی انتشار RCP 4.5 ثبت شده است.

### نتیجه‌گیری

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، نتایج تحقیقات انجام شده نشان داد ارزیابی اثرات تغییر اقلیم توسط منابع مختلف عدم قطعیت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در مجموع اکثر مطالعات نشان از تأثیر بالای عدم قطعیت مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژی دارد. لذا می‌بایست از مدل‌های مختلف برای ارزیابی استفاده کرد. البته استفاده از

چه میزان بارش در منطقه افزایش داشته است اما افزایش دما در این حوضه اثر و کارایی بیشتری را در کاهش میزان رواناب داشته است. نتایج این مدل نشان می‌دهد که استفاده از رویکردهای مدیریتی می‌بایست برای مواجهه با تغییر اقلیم و سناریوهای انتشار به کار برده شود.

### منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K. C. 2015. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs –A User Manual. Department of Systems Analysis. Integrated Assessment and Modelling. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
2. Abbaspour, K. C., E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang and B. A. Kløve. 2015. Continental-scale hydrology and water quality model for Europe calibration and uncertainty of a high-resolution largescale SWAT model. *Journal of Hydrology* 524: 733-752.
3. Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. Connell and J. Rasmussen. 1968. An introduction to the European hydrological system-systeme hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87(1-2): 45-59.
4. Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah and J. R. Williams. 1998. Large area hydrologic modelling and assessment part model development. *Journal Water Resources* 34(1): 73-89.
5. Babolhakami, A., M. Gholami, A. Sefidkouhi and A. Emadi. 2020. Assessing the impact of climate change on drought and forecasting Neka river basin runoff in future periods. *Eco-Hydrology Journal* 7(2): 291-302. (In Farsi).
6. Beven, K., R. Lamb, P. Quinn, R. Romanowicz and J. Freer. 1995. TOPMODEL. PP. 627-668. In: Singh, V. P., (Eds.), Computer models of watershed hydrology. 1<sup>th</sup> ed. Colorado Usa: Water Resource Publications.
7. Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Astrandrea and T. E. Bilir. 2014. Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 5th ed. United Kingdom and NewYork USA: Cambridge University Press.
8. Kelanki, M. and F. Karandish. 2015. Forecasting the long-term effects of climate change on climatic components in the region wet. *Journal of Water and Irrigation Engineering* 20(5): 131-148. (In Farsi).
9. Kite, G. W. 1995. The SLURP model. PP. 521-562. In: Singh, V. P., (Eds.), Computer Models of Watershed Hydrology. 1<sup>th</sup> ed. Colorado Usa: Water resource publications.
10. Massah Bavani, A. and S. Morid. 2006. Study effects of climate change on zayande rood discharge. *Journal of Water and Soil Science* 4:17-27. (In Farsi).
11. Mehrizi, S. H., A. Khorani, J. Bazrafshan and O. Bazrafshan. 2018. Assessment of future runoff trends under multiple climate change scenarios in the Gamasiab river basin. *Journal of Ecohydrology* 5(3): 777-789. (In Farsi).
12. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel and T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Journal of American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(3): 885-900.
13. Nasiri, A., M. Koocheki, A. Kamali and H. Shahandeh. 2006. Potential impacts of climate change on agroclimatic indicators in Iran. *Journal of Arid Land Research and Management* 33(8): 626-632.
14. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry and J. R., Williams. J. R. 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute. Report 406, 230 pp.
15. Narsimlu B, Gosain, A. K., Chahar, B. R. 2013. Assessment of future climate change impacts on water resources of upper sind river basin, India using SWAT model. *Journal of Water Resource Management*, 27 (10): 3647-3662.
16. Ratna, A., Ratna, S. Shrestha, A., Maharjan. S. 2018. Climate change impact assessment on the hydrological regime of the Kaligandaki Basin. *Nepal Science of the Total Environment Journal*, 625: 837-848.
17. Sayahi, S., A. Shahbazi and K. H. Khademi. 2016. Prediction of the effect of climate change on the monthly runoff of the basin Dez using IHACRES. *Journal of Water Science Engineering* 15(7): 7-18.
18. Thomas, C. D., E. J. Bodsworth, R. J. Wilson, A. D. Simmons, Z. G. Davies, M. Musche and D. James. 2004. Extinction risk from climate change. *Journal of Nature* 427(8): 145-148.



## Assessing the Impact of Climate Change on the Inflow on Zayandehrood Dam

S. Khalilian, M. Sarai Tabrizi\*, H. Babazadeh and A. Saremi<sup>1</sup>

(Received: March 31-2020 ; Accepted: August 08-2020)

### Abstract

In the present study, the SWAT hydrological model was developed for the upstream of the Zayandehrood dam to evaluate the inflow to this dam. Accordingly, after entering the meteorological and hydrometric information of the region, the runoff simulation was performed. Due to the high volume of entrances to the Zayandehrood Dam, Shahrokh Castle hydrometric stations were selected as the base station for calibration and validation during the statistical period of 1990-2015. After hydrological simulation and accuracy of results, climate prediction was performed using the fifth model of the climate change for the RCP scenarios. According to the forecast, by using climate change models, the temperature could be assumed to increase in all models and the highest rate of increase would occur under the RCP 8.5 climate scenario. After evaluating climate change in different diffusion scenarios, the runoff of the basin was simulated in the SWAT model. The simulation results of runoff in the catchment area showed that although the amount of rainfall was increased in the region, increasing the temperature had a greater effect, reducing the amount of runoff in the basin. Based on the results of climate change, hydrological simulation was performed using the SWAT model. The results showed that the effect of diffusion scenarios in the region was different, causing an increase in temperature and precipitation. The highest increase was observed in the RCP8.5 scenario, which was consistent with the nature of this emission scenario, with the highest emission of greenhouse gases and carbon dioxide. Then, the evaluation of the hydrological model was done; the results showed that although the amount of rainfall in the region had been increased, the increase in temperature of this basin had a greater effect and efficiency in reducing the amount of runoff.

**Keywords:** LARS-WG, Zayandeh Rood, SWAT, Water Balance.

1. Department of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

\*: Corresponding author, Email: m.sarai@srbiau.ac.ir