



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۳ | خرداد ۱۴۰۱ (ص ۵۱۱-۵۰۱)

[DOI:https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.330498.669074](https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.330498.669074)

(مقاله علمی - پژوهشی)

Assessing the Future Climatic Effects on the Hydrology of Qarahu Watershed

FATEMEH RAJAEI^{1*}, SAJAD GHASEMZADEH²

1. Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Department of Water Engineering, College of Abureihan, University of Tehran, Tehran, Iran.

(Received: Sep. 11, 2021- Revised: Feb. 12, 2022- Accepted: March. 13, 2022)

ABSTRACT

Attention to the phenomenon of climate change and its impact on water resources is of great importance. The aim of this study is to evaluate the effect of different methods of weighting the output of AOGCM models and its effect on runoff in Qarahu Basin during the period 2041-2021. The best climatic models (HADGEM2-ES, MICRO IPSL-CM5A-LR, NOERESM1-M, ESM2M-GFDEL) were selected from 14 general circulation models and weighed with three weighting methods including the same method, Bayesian averaging method and REA method. The results showed that the highest increase of maximum temperature in summer was 1.58 °C by the same weighting method and the lowest increase of minimum temperature in winter with REA method was 0.96 °C. The highest percentage of precipitation changes was in August with the same method and the lowest percentage of precipitation changes was in February with REA method. Evaluation of SWAT model simulation results for calibration period using R2 and NS statistical indices in calibration stage is equal to 0.74 and 0.79 and in validation stage is 0.68 and 0.72, respectively, which indicates the accuracy of the model in a runoff simulation. Prediction of runoff changes with the approach of ensemble the output of climate models, shows reduction in runoff in the future period. The lowest and highest percentages of runoff changes will be corresponded to Bayesian method which is -13 and -34.4%, respectively. Overall, the results indicate a change in the temporal distribution of flow in the Qarahu Basin in the coming period, which will cause significant changes in the quality and quantity of water resources.

Keywords: Climate Change, Qarasu Watershed, Runoff, Humidification Methods, SWAT Model.

ارزیابی اقلیم آینده بر هیدرولوژی حوزه آبخیز قره‌سو

فاطمه رجائی^{۱*}، سجاد قاسم‌زاده^۲

۱. گروه علوم محیط‌زیست، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده‌گان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۳ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲)

چکیده

توجه به پدیده تغییر اقلیم و تأثیر آن بر منابع آب از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف پژوهش حاضر ارزیابی روش‌های مختلف وزن‌دهی خروجی مدل‌های AOGCM و تأثیر آن بر رواناب حوزه قره‌سو در دوره ۲۰۴۱-۲۰۲۱ است. از ۱۴ مدل گردش عمومی جو بهترین مدل‌های اقلیمی (ESM2M-NOERESM1-M, MICRO IPSL-CM5A-LR, HADGEM2-ES, GFDEL) انتخاب و با سه روش وزن‌دهی شامل روش یکسان، روش میانگین‌گیری بیزین (BMA) و روش REA وزن‌دهی شدند. سپس با ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های اقلیمی و معرفی به مدل SWAT، محدوده تغییرات رواناب حوزه در دوره آتی مشخص گردید. نتایج نشان داد بیش‌ترین افزایش دمای حداکثر در فصل تابستان به میزان 1/58 درجه سانتی‌گراد در روش وزن‌دهی یکسان و کمترین افزایش دمای حداقل در فصل زمستان با روش REA به مقدار ۰/۹۶ درجه‌سانتی‌گراد است. بیش‌ترین درصد تغییرات بارندگی در ماه آگوست با روش یکسان و کمترین درصد تغییرات در ماه فوریه با روش REA است. ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل SWAT برای دوره واسنجی با استفاده از نمایه‌های آماری R^2 و NS در مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۰/۷۴ و ۰/۷۹ و در مرحله اعتبار سنجی ۰/۶۸ و ۰/۷۲ است که بیانگر دقت مدل در شبیه‌سازی رواناب می‌باشد. پیش‌بینی تغییرات رواناب با رویکرد همادی نمودن خروجی مدل‌های اقلیمی، کاهش رواناب در دوره آتی را نشان می‌دهد. بیش‌ترین درصد تغییرات رواناب در روش بیزین ۳۴/۴ - درصد خواهد بود. در کل، نتایج حاکی از تغییر در توزیع زمانی جریان در حوزه قره‌سو در دوره آتی است که این تغییرات باعث ایجاد تغییرات مهمی در کیفیت و کمیت منابع آب خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، حوزه آبخیز قره‌سو، رواناب، روش‌های همادی نمودن، مدل SWAT.

مقدمه

است. محدودیت اصلی استفاده از نتایج اقلیمی مدل‌های گردش عمومی جو، عدم قطعیت‌های مدل‌های اقلیمی برای استفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی است. با توجه به پیچیدگی‌های مدل‌های اقلیم از نظر تخمین مقادیر پارامترها و ساختار، عدم قطعیت‌های زیادی در فرآیندهای شبیه‌سازی اقلیمی منطقه‌ای وجود دارد. به طور کلی سه منبع برای عدم قطعیت‌های پیش‌نگری‌های اقلیمی تعریف شده است: مدل، سناریوها و تغییرپذیری ذاتی سیستم. عدم قطعیت مدل نشان‌دهنده اختلاف پاسخ‌های اقلیمی مدل‌های مختلف است. این تفاوت در خروجی‌های مدل‌های AOGCM، از ساختار مدل و تخمین مقادیر پارامترها یا هر محدودیت دیگری می‌تواند ناشی شود. عدم قطعیت سناریو ناشی از درک محدود شرایط خارجی است که بر سیستم آب و هوایی تأثیر می‌گذارد، مانند مسیرهای آینده غیرقابل پیش‌بینی گازهای گلخانه‌ای، تغییرات کاربری و غلظت ازن استراتوسفر. تنوع ذاتی (یا به اصطلاح نویز اقلیمی)، تغییرپذیری طبیعی در

امروزه تغییر اقلیم یکی از الویت‌های برجسته سیاسی در سراسر جهان و یکی از چالش‌های پیش‌روی بشر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این پدیده می‌تواند الگوهای فصلی دما را تغییر داده و به تبع آن سبب تغییر در مدت، شدت، الگو، زمان و مدت بارش و به تبع آن، تغییر در چرخه هیدرولوژیکی شود. تغییر اقلیم می‌تواند باعث افزایش رواناب در مناطق با عرض‌های جغرافیایی بالا، به دلیل افزایش در میزان بارندگی و ذوب برف شود. اما در عرض‌های جغرافیایی پایین انتظار می‌رود که رواناب کاهش یابد. طبق گزارش‌های هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در دوره‌های آتی، متوسط رواناب سالانه در عرض‌های جغرافیایی بالا، ۱۰ الی ۴۰ درصد افزایش و در عرض‌های جغرافیایی پایین، ۱۰-۳۰ درصد کاهش می‌یابد (IPCC, 2007).

معمول‌ترین روش شبیه‌سازی تغییرات بارش و دما در دوره‌های آتی، استفاده از داده‌های خروجی مدل‌های گردش عمومی جو

برای سه بازه زمانی مختلف (دهه‌های ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۸۰) بر اساس گزارش CMIP5 و چهار مدل اقلیمی منطقه‌ای (RCMs) تحت سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 توسعه داده شد و سپس در مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان‌های آبی حوضه مورد استفاده قرار گرفت. تحت سناریوهای RCP8.5 افزایش حداکثر متوسط دمای سالانه چهار درجه سانتیگراد و حداقل درجه حرارت ۵ درجه سانتی‌گراد، کاهش بارش ۵۴ درصد و کاهش دبی رودخانه بیش از ۸/۵ درصد تا پایان قرن بیست و یکم تحت سناریوهای RCP8.5 پیش‌بینی شد. در مطالعه دیگر، Li and Fang (2021) تأثیرات تغییرات اقلیمی بر دبی رودخانه مون در جنوب شرقی آسیا و با استفاده از مدل SWAT ارزیابی نمودند. حداقل دمای ماهانه آینده به ترتیب در سالهای ۲۰۳۰، ۲۰۶۰ و ۲۰۸۰ به ترتیب ۱/۵، ۲/۱ و ۲۳/۲ درصد در دوره ۲۰۲۰-۲۰۹۳ افزایش خواهد یافت. از طرف دیگر، Heidari et al., (2020) اثر تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب حوضه دهبار در خراسان رضوی برای ۳۰ سال آینده و با کمک مدل آماری WG-LARS و ابزار ارزیابی آب و خاک SWAT و مدل پیش‌بینی فرسایش آبی WEPP مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مدل اقلیمی LARS-WG حاکی از کاهش بارندگی و افزایش دما در افق ۲۰۵۰ می‌باشد. نتایج مدل SWAT نیز تغییرات رواناب را برای سناریوهای RCP8.5، RCP4.5 و RCP2.5 به ترتیب ۲۲/۱۶-، ۱۷/۹۳- و ۱۷/۳۴- درصد و تغییرات رسوب را به ترتیب ۴/۴، ۴/۹ و ۳/۲ درصد نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. در مطالعه از طرف دیگر، نتایج تحقیق Bab al-Hakami et al., (2020) در زمینه ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی و پیش‌بینی رواناب حوضه رودخانه نکا طی دوره‌های آبی 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 یافت. براساس یافته‌ها، طی دوره‌های آبی میانگین سالانه رودخانه نکا تحت سناریوهای RCP4.5، RCP2.5 و RCP8.5 بین ۱۵ تا ۴۳ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین، میانگین آورد سالانه رودخانه نکا در سد گلورد از ۹۵ میلیون مترمکعب طی سال‌های ۱۹۹۲- تا ۲۰۱۴، به ۵۴ تا ۸۱ میلیون مترمکعب کاهش خواهد یافت. هم‌چنین، Jalali et al., (2020) تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب و بیلان آب حوضه آبریز سد لتیان را با استفاده از مدل

سیستم آب و هوایی است که در غیاب نیروی تابشی رخ می‌دهد و ناشی از فرآیندهای غیرخطی دینامیکی و تصادفی مربوط به جو، اقیانوس، و استراتوسفر-تروپوسفر است. در این راستا روش‌های متعددی از جمله همادی نمودن مدل‌های اقلیمی، برای کاهش عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی توسعه یافته‌اند. هنگام استفاده از یک مدل اقلیمی نمی‌توان تأثیرات عدم قطعیت‌ها را نادیده گرفت، در حالی که چندین مدل می‌توانند پیش‌بینی آب و هوایی قابل اعتمادتری ارائه دهند و خطای بین سناریوهای شبیه‌سازی و شرایط واقعی را کاهش دهند. مطالعات متعددی برای اثبات اینکه مدل‌های اقلیمی متعدد می‌توانند به طور موثر دقت شبیه‌سازی اقلیمی را بهبود بخشند انجام شده است (Zhuang et al., 2016; Zhang et al., 2016; Tegegne et al., 2019). می‌دهد که میانگین‌گیری ساده مجموعه‌های مدهای GCM، پیش‌نگری‌های اقلیمی را نسبت به یک مدل واحد از نظر قابلیت اطمینان و سازگاری بهبود می‌بخشد. به همین ترتیب، استراتژی‌های گروه وزنی، که در آن وزن‌های متفاوتی به هر یک از مدل اختصاص داده می‌شود، می‌تواند برای کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌کننده با کم‌اهمیت جلوه‌کردن پیش‌بینی‌های حاصل از مدل‌های با عملکرد ضعیف استفاده شود (Dong et al., 2021). از طرف دیگر، غالب مطالعات اقلیم بر مبنای استفاده از مدل‌های تکی (یکی از مدل‌های AOGCM) و یا از چند مدل به صورت جداگانه صورت پذیرفته است. با توجه به وجود عدم قطعیت بالای استفاده از مدل‌های تکی، معمولاً همادی نمودن مدل‌های چندگانه^۱ پیشنهاد شده است (Tegegne et al., 2020). تاکنون روش‌های مختلفی برای همادی نمودن مدل‌های AOGCM استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های بیزین، هوش مصنوعی و غیره اشاره کرد (IPCC, 2014). Morphy et al., (2004) با مقایسه احتمال بازتولید مجموعه‌ای از متغیرهای جوی، شاخص پیش‌بینی اقلیمی (CPI) را برای وزن دادن به مدل‌های گردش‌عمومی معرفی نمودند. هم‌چنین، Tabaldi et al., (2006) رویکرد وزن‌دهی بیزین را برای تعیین توزیع احتمال تغییر اقلیمی در آینده گسترش دادند. از طرف دیگر مطالعه Ratna et al. (2018) در زمینه بررسی تغییر اقلیم بر وضعیت هیدرولوژیکی حوضه کالیگانداکی^۲ با استفاده از مدل SWAT، نشان داد دما تا ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش و رواناب کاهش خواهد یافت. در تحقیق Bhatta et al., (2019) از مدل SWAT برای ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر هیدرولوژی حوضه رودخانه تامور در شرق نپال پرداختند. سناریوهای اقلیمی آینده

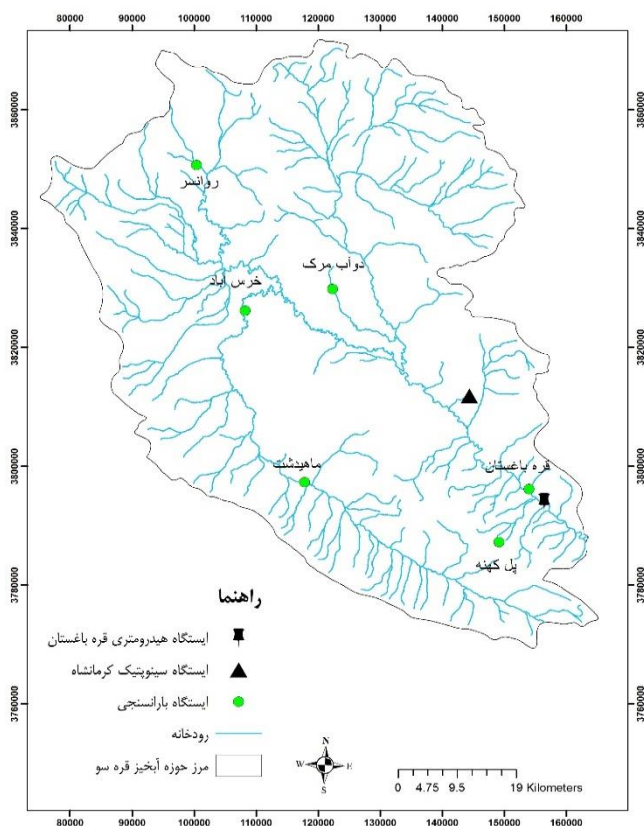
^۱ Kaligandaki^۲ Multimodel Ensemble

روش‌های وزن‌دهی یکسان، میانگین‌گیری بیزین و REA را برای کاهش عدم قطعیت‌های مدل‌های GCM بررسی شد که این امر می‌تواند نتایج معتبرتری از پاسخ هیدرولوژیکی حوزه آبخیز قره-سو به تغییرات اقلیمی آینده در اختیار برنامه ریزان و مدیران قرار دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده در این تحقیق زیرحوضه قره‌سو در استان کرمانشاه و در شمال غربی حوضه کرخه قرار گرفته است (شکل ۱). وسعت حوضه مورد نظر ۵۳۵۴ کیلومترمربع بوده و همچنین متوسط بارش در کل حوضه بین ۳۰۰-۸۰۰ میلی‌متر متغییر است. این حوضه یکی از حوضه‌های بالا دست کرخه است. رودخانه قره‌سو مهم‌ترین رودخانه حوضه است و آب‌ها را از استان‌های کرمانشاه و کردستان جمع‌آوری و به رودخانه سیمره هدایت می‌نماید. سرچشمه اصلی رودخانه در بخش روانسر کرمانشاه قرار دارد. دو رودخانه کوچک گلاب و کوتاب در روستایی به نام الیاسی به هم تلاقی نموده و پس از طی مسافتی کوتاه با رودخانه روانسر اتصال نموده و به نام قره‌سو نامیده می‌شود. آبدهی متوسط ۲۳ ساله قره‌سو ۲۸۹ میلیون‌متر مکعب در سال بوده است.

SWAT بررسی نمودند. با توجه به دقت زیاد مدل‌های سری خروجی‌های مدل‌ها تحت دو سناریو RCP2.5 و RCP8.5 برای آینده نزدیک با استفاده از مدل اقلیمی LARS-WG به مدل وارد شد. نتایج شبیه‌سازی اقلیمی برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نشان داد میانگین دما در سناریو خوش‌بینانه RCP2.5، به طور متوسط 0.75°C و در سناریو بدبینانه RCP8.5، درجه سانتی‌گراد $1/45$ افزایش خواهد یافت. همچنین، کاهش ۲ درصد بارش در سناریو RCP8.5 مشاهده شد. نتایج رواناب نیز بیانگر تغییرات رواناب طی دوره آینده، در ماه می با $2/4$ مترمکعب بر ثانیه کاهش و در ماه آوریل با $1/49$ مترمکعب بر ثانیه افزایش در سناریو خوش‌بینانه است. همان‌طور که بیان شد، کمتر تلاشی برای ترکیب پیش‌بینی‌های GCM برای پیش‌بینی پاسخ‌های هیدرولوژیکی به تغییرات اقلیمی وجود دارد. از طرف دیگر، علم هیدرولوژی به علت عدم قطعیت‌های مختلف در چرخه آب و به علت نیاز به افزایش بازه زمانی پیش‌بینی درازمدت، نیازمند توسعه و افزایش سطح اطمینان‌پذیری و دقت پیش‌بینی‌ها است. بنابراین، کاهش عدم قطعیت‌های پیش‌نگری‌های اقلیمی و نیز هیدرولوژیکی با استفاده از رویکرد همادی نمودن مدل‌های اقلیمی در آینده ضروری است. از این رو در این مطالعه، روش‌های مختلف وزن‌دهی و همادی نمودن مدل‌های اقلیمی از جمله،



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در این تحقیق

روش انجام مطالعه

شبیه‌سازی اقلیم آینده و ریزمقیاس‌نمایی

از آمار داده‌های اقلیمی هفت ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۰۰۵-۱۹۸۵ میلادی استفاده شده است. در این تحقیق، از خروجی ۱۴ مدل AOGCM (مدل‌های GIAOM، BCM2، CGMR، CNCM3، CSMK3، FGOALS، GFCM21، HA، INCM3، IPCM4، MIHR، MPEH5، NCCCSM، NCPCM، HADCM3، DGEM) مربوط به پنجمین گزارش ارزیابی در دو بازه زمانی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) به‌عنوان دوره آینده و ۱۹۸۵-۲۰۰۵ به‌عنوان دوره پایه تحت سناریوی انتشار RCP4.5 استخراج شد. سپس برای بررسی عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی دما و بارش منطقه، میانگین ماهانه دوره پایه از خروجی مدل‌ها با مقادیر مشاهداتی و دوره آینده مقایسه و بهترین مدل‌ها انتخاب شد. اساس انتخاب مدل‌ها را با توجه به میزان اختلاف داده‌های مشاهداتی و مدل‌های اقلیمی (تفاوت مقادیر مشاهداتی و پایه و نیز تفاوت مقادیر داده‌های پایه و آینده) پایه‌گذاری نمودیم و مدل‌هایی با اختلاف زیاد از بررسی‌ها حذف گردید.

جهت ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی مدل LARSWG استفاده گردید. مدل قادر به تولید یک سری داده‌های هواشناسی با مشخصه‌های آماری مشابه دوره اقلیمی می‌باشد که از سه بخش اصلی واسنجی، ارزیابی و ایجاد داده‌های هواشناسی تشکیل شده است ابتدا داده‌های دوره پایه مرتب شد و فایل ورودی مدل تهیه گردید. پس از پردازش و مرتب‌سازی داده‌ها و تهیه فایل‌های ورودی، مدل برای دوره پایه اجرا شد. بدین ترتیب مرحله واسنجی به پایان رسید. پس از بررسی نتایج واسنجی و مقادیر بالای ضریب تعیین و مقادیر پایین شاخص‌های خطای-سنجی محاسبه‌شده، از قابلیت مدل در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی اطمینان حاصل شد. سپس این مدل جهت ریزمقیاس-نمایی آماری مدل گردش‌عمومی جو و تولید داده مصنوعی برای دوره آتی با استفاده از سناریوی RCP4.5 اجرا شد. بدین ترتیب مقادیر روزانه پارامترهای مذکور برای دوره ۲-۴۰-۲۰۲۱ تولید گردید.

شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل ارزیابی آب و خاک (SWAT)

به منظور شبیه‌سازی تغییرات رواناب تحت کاربری‌های مختلف از مدل SWAT به دلایل قابل قبول بودن نتایج مدل‌سازی در دیگر حوضه‌های ایران، عدم پیچیدگی داده‌های ورودی به مدل، قابل

اعمال بودن پیچیدگی‌های موجود در حوضه از لحاظ کاربری اراضی، توپوگرافی و غیره در مدل و بررسی تأثیر منابع نقطه‌ای و غیره انتخاب گردید. ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) شبیه‌ساز پیوسته با گام زمانی روزانه می‌باشد که دارای چند زیر مجموعه برای ارزیابی اثرات رویکردهای مدیریتی روی آب، رسوبات، رشد گیاهان و مواد شیمیایی در حوزه‌های آبخیز پیچیده توسعه یافته است (Abbaspour *et al.*, 2007).

داده‌های مورد استفاده در مدل SWAT

لایه‌های رقومی مورد استفاده: نقشه‌های اصلی مورد نیاز به‌منظور پیکربندی حوزه آبخیز قره سو در مدل SWAT شامل نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و مدل رقومی ارتفاعی است. برای لایه رقومی کاربری اراضی، نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۰ با استفاده از تفسیر تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و استفاده از اطلاعات میدانی در سطح حوزه آبخیز اصلاح و مورد استفاده قرار گرفت. نقشه خاک تهیه شده توسط سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی ملل متحد (FAO) استفاده گردید. برای معرفی شرایط اقلیمی حوضه به مدل نیاز است که با معرفی ایستگاه‌های حوضه متغیرهای بارندگی، دمای کمینه و دمای بیشینه در مقیاس روزانه به مدل معرفی گردد. اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی و سینوپتیک از سازمان هواشناسی کشور و باران‌سنجی و تبخیرسنجی از شرکت آب منطقه‌ای اخذ گردید. داده‌های مربوط به دبی ایستگاه هیدرومتری باغستان از شرکت آب منطقه‌ای استان گردآوری شد.

پیکره‌بندی، واسنجی و اعتبارسنجی مدل

پس از جمع‌آوری اطلاعات و مشخصات حوضه و تهیه فایل‌های ورودی، کار اولیه برای اجرای مدل شروع شد. شبکه آبراهه، مرز حوضه و زیر حوضه‌ها بر اساس نقشه رقومی ارتفاعی تهیه گردید. برای معرفی نقشه خاک نیاز است تا اطلاعات توصیفی هر واحد به بانک داده مدل معرفی شود. از تلفیق نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و نقشه رقومی ارتفاعی، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی حوضه ایجاد گردید. سپس در بخش ورود داده‌های اقلیمی با توجه به اینکه مدل SWAT در مقیاس زمانی روزانه شبیه‌سازی انجام می‌دهد، داده‌های روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی به مدل معرفی گردید. هم‌چنین در ادامه داده‌های مدیریت کشاورزی نیز برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفت. واسنجی مدل در ایستگاه هیدرومتری باغستان در نرم‌افزار SWAT-CUP^۱ الگوریتم SUFI2^۲ صورت پذیرفت. آنالیز

دشوار است. با استفاده از این قضیه و مشروط کردن پیشامد مورد نظر نسبت به پیشامد دیگر، می‌توان احتمال مورد نظر را محاسبه کرد:

فرض می‌کنیم B_1, \dots, B_k یک افراز برای فضای نمونه ای S تشکیل دهند. طوری که به ازای هر $k, j=1, \dots, k$ داشته باشیم $P(B_j) > 0$ و فرض کنید A پیشامدی با فرض $P(A) > 0$ باشد، در اینصورت به ازای $i=1, \dots, k$ داریم:

$$P(B_i | A) = \frac{P(B_i)P(A|B_i)}{\sum_{j=1}^k P(B_j)P(A|B_j)} \quad (\text{رابطه ۲})$$

این رابطه بیان می‌دارد که چگونه می‌توان $P(A)$ را با مشروط کردن به یکی از پیشامدهای داده شده B_1, B_2, \dots, B_n محاسبه نمود. به طور کلی این رابطه بیان می‌دارد که $P(A)$ برابر است با میانگین وزنی $P(A|B_i)$ به نحوی که هر وزن هر جمله برابر با احتمالی است که به آن مشروط گردیده است. حال فرض کنید که پیشامد A اتفاق افتاده و می‌خواهیم احتمال این که یکی از پیشامدهای B_i اتفاق افتاده باشد را حساب کنیم.

نتایج و بحث

انتخاب مدل و روش‌های وزن‌دهی

در این تحقیق، آمار دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش ماهانه مدل‌های سری CMIP5 از مجموعه مدل‌های AOGCM شامل مدل‌های MICRO, HADGEM2-ES, ESM2M-GFDEL, NOERESM1-M, IPSL-CM5A-LR انتخاب شد. نتایج وزن-دهی با استفاده از روش REA و BMA در شکل ۲ آورده شده است.

ریزمقیاس کردن و تولید داده برای دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۰)

پس از تعیین سناریو RCP4.5 و مدل‌های اقلیمی موردنظر، تولید داده برای دوره (۲۰۲۰-۲۰۴۰) انجام شد و پس از آن خروجی‌های مدل وزن‌دهی برای هر متغیر اقلیمی به صورت ماهانه میانگین-گیری و در مرحله بعد با داده‌های مشاهداتی مقایسه شد. شکل ۳ تغییرات دمای حداکثر در دوره آتی نسبت به دوره پایه را نشان می‌دهد. طبق شکل دما در تمامی ماه‌ها افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش دما در مدل بیزین در ماه می و کم‌ترین افزایش در مدل REA در ماه نوامبر مشاهده شد. هم‌چنین دمای حداقل در تمامی ماه‌ها افزایش می‌یابد که بیش‌ترین افزایش دمای مورد برر سی، در روش وزن‌دهی بیزین، ماه ژوئن و کم‌ترین افزایش

حساسیت مدل برای انتخاب پارامترهای حساس در واسنجی نیز با استفاده از روش One-At-A-Time انجام گرفت. به‌منظور واسنجی مدل، ۱۴ پارامتر اصلی مؤثر بر رواناب بعد از حساسیت سنجی انتخاب گردید. برای ارزیابی نکویی برازش مدل از دو تابع هدف ضریب تعیین (R^2) و نش سائکلوف (NS) استفاده گردید (Rajaei et al., 2021).

وزن‌دهی مدل‌های AOGCM

روش وزن‌دهی REA: گام اول در روش REA^۳، محاسبه تغییرات بلندمدت متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارندگی برای هر مدل AOGCM است. برای این منظور میانگین بلندمدت متغیر اقلیمی در دوره شبیه‌سازی شده آینده محاسبه شده و تفاوت آن با میانگین بلندمدت شبیه‌سازی شده کنونی، به دست آورده می‌شود. در این روش میانگین تغییرات متغیرهای اقلیمی حاصل از مدل‌های گردش‌عمومی اقیانوس اتمسفر (AOGCM) در دوره-های آتی به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta v = A(\Delta V) = \frac{\sum_{i=1}^N (R_i \cdot \Delta V)}{2 \sum_{i=1}^N R_i} \quad (\text{رابطه ۱})$$

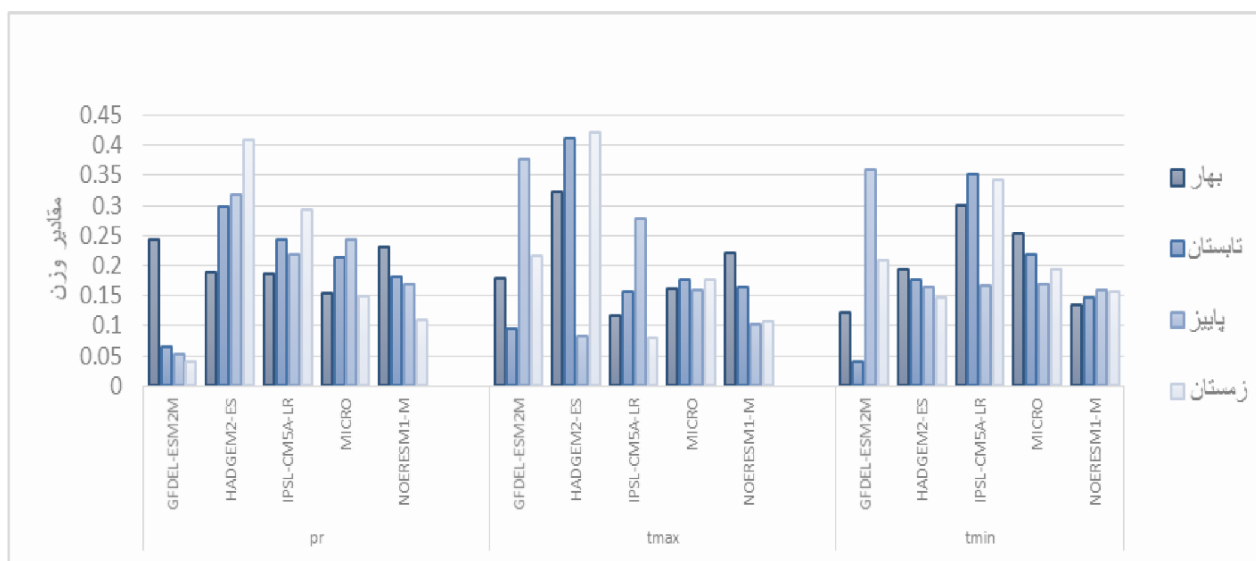
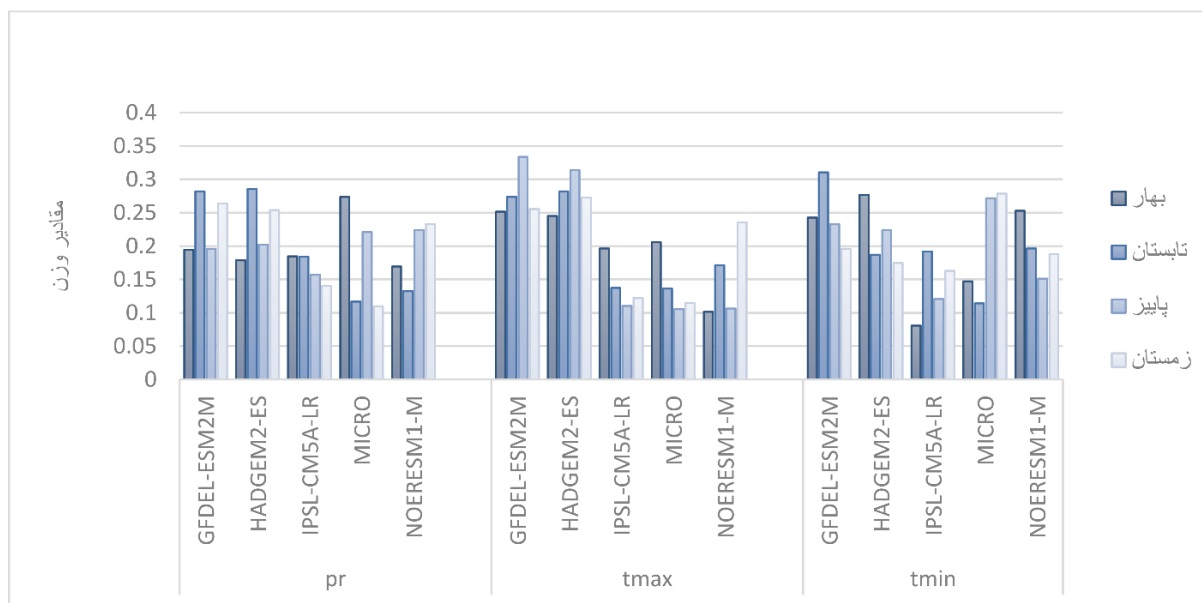
N تعداد مدل‌های AOGCM موجود، ΔV میانگین تغییرات بلندمدت متغیر اقلیمی دما و بارندگی حاصل از مدل‌های AOGCM، ΔV تغییرات بلندمدت متغیر اقلیمی حاصل از هر مدل AOGCM در دوره‌های آتی، R فاکتور اطمینان‌پذیری هر مدل AOGCM. (Räisänen et al., 2010).

روش وزن‌دهی یکسان: ساده‌ترین شیوه برای ترکیب مدل‌ها است. در این روش پس از یکسان‌سازی مقیاس‌ها برای مدل‌های بزرگ مقیاس یا کوچک‌مقیاس سازی در موقعیت ایستگاه یا حوضه، به هر مدل وزن یکسانی داده می‌شود و مدل‌های چندگانه از روی آنها ساخته می‌شود.

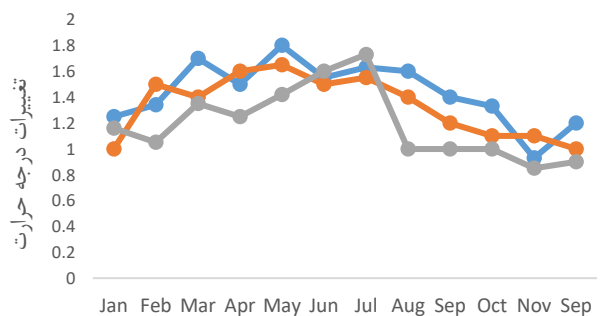
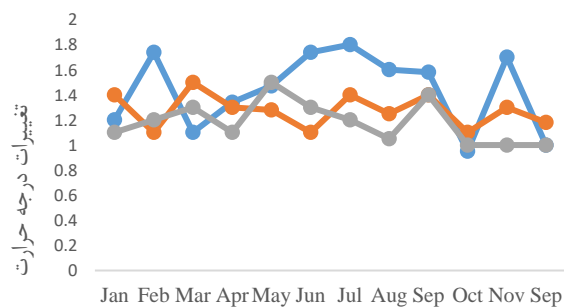
روش وزن‌دهی بیزین: در نهایت محاسبات میانگین‌گیری مدل بیزین (BMA^۱) با استفاده از پکیج بیزین در نرم افزار R انجام شد. قضیه بیز روشی برای دسته‌بندی پدیده‌ها، بر پایه احتمال وقوع یا عدم وقوع یک پدیده‌است و در نظریه احتمالات با اهمیت و پرکاربرد است. اگر برای فضای نمونه‌ای مفروضی بتوانیم چنان افرازی انتخاب کنیم که با دانستن اینکه کدامیک از پیشامدهای افراز شده رخ داده‌است، بخش مهمی از عدم قطعیت تقلیل می‌یابد. این قضیه از آن جهت مفید است که می‌توان از طریق آن، احتمال یک پیشامد را با مشروط کردن نسبت به وقوع یا عدم وقوع یک پیشامد دیگر محاسبه کرد. در بسیاری از حالت‌ها، محاسبه احتمال یک پیشامد به صورت مستقیم کاری

بارزی در بیلان آبی منطقه به دلیل اثر افزایش دما و افزایش تبخیر به وجود آمده و همچنین پتانسیلی برای تغییر در وقایع جوی و هیدرولوژی حوضه به وجود آید.

دما، دررود و وزن‌دهی REA، ماه اکتبر است (شکل ۴). بارش در اکثر ماه‌ها کاهش پیدا کرده است. در کل میزان بارندگی منطقه کاهش می‌یابد و درصد کاهش بارش در ماه‌های خشکسالی معنی‌دار نیست (شکل ۵). بنابراین طبق نتایج انتظار می‌رود بازخورد

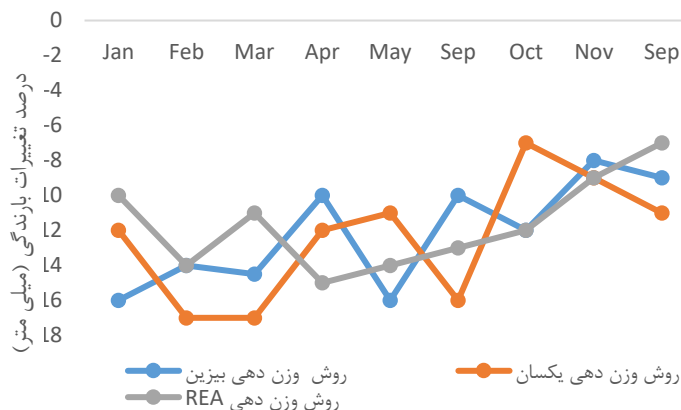


شکل ۲- نتایج وزن‌دهی با استفاده از روش بیزی (شکل بالا) و REA (شکل پایین)



روش وزن‌دهی REA روش وزن‌دهی یکسان روش وزن‌دهی بیزی

شکل ۳- تغییرات دما حداکثر در دوره آبی نسبت به دوره پایه
شکل ۴- تغییرات درجه حرارت حداقل در دوره آبی نسبت به دوره پایه



شکل ۵- میزان تغییرات دما حداقل در دوره آبی (۲۰۲۰-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۹-۲۰۰۹)

دمای حداقل در دوره آبی نسبت به دوره پایه در فصول مختلف نشان می دهد. بیشترین افزایش دما مربوط به فصل پاییز است. همچنین کمترین میزان افزایش دما، مربوط به فصل زمستان است.

جدول ۱ میزان تغییرات دمای حداکثر نسبت به دوره پایه در فصول مختلف را نشان می دهد. طبق جدول بیشترین افزایش دمای حداکثر مربوط به فصل تابستان است. همچنین کمترین میزان افزایش دما، مربوط به فصل زمستان است. میزان تغییرات

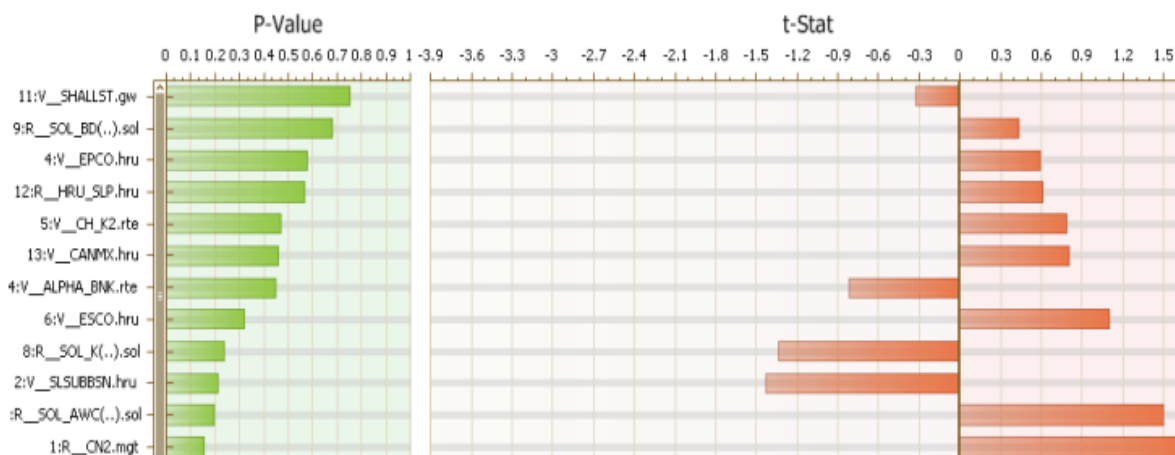
جدول ۱- میزان تغییرات دمای حداکثر و دمای حداقل دوره آبی نسبت به دوره پایه (راست به چپ)

دمای حداقل (سانتی گراد)				دمای حداکثر (سانتی گراد)			
روش بیزین	روش یکسان	REA	فصل/مدل	روش بیزین	روش یکسان	REA	فصل/مدل
۱/۳۴	۱/۳۴	۱/۲	بهار	۱/۴۱	۱/۲۹	۱/۱۸	بهار
۱/۵۱	۱/۲۳	۱/۳	تابستان	۱/۵۷	۱/۵۸	۱/۵۲	تابستان
۱/۶۱	۱/۳۳	۱/۲۲	پاییز	۱/۴۴	۱/۴۳	۱/۳۲	پاییز
۱/۰۱	۱/۲	۰/۹۱	زمستان	۱/۱	۱/۰۹	۱/۰۵	زمستان

مقدار t-state زیاد است که این مورد در مطالعات Jeirani et al., (2011) و Schuol et al., (2008) مشاهده شده است. این پارامتر تابعی از کاربری اراضی، پوشش گیاهی و خصوصیات خاک است و به همین دلیل مدل نسبت به این پارامتر حساسیت زیادی دارد.

مدل هیدرولوژیکی ارزیابی آب و خاک

محدوده اولیه پارامترهای به کاررفته در مدل بارش و رواناب مدل SWAT در جدول ۲ ذکر گردیده است. طبق شکل ۶ فاکتور شماره منحنی حساس ترین پارامتر است چون مقدار p-value کم است و



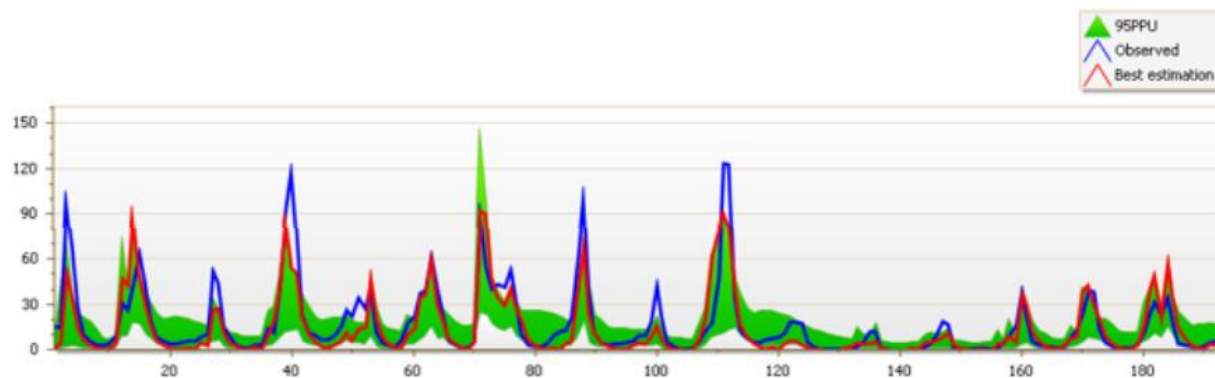
شکل ۶- پارامترهای آنالیز حساسیت شده در مدل ارزیابی آب و خاک

جدول ۲- محدوده اولیه پارامترهای مدل

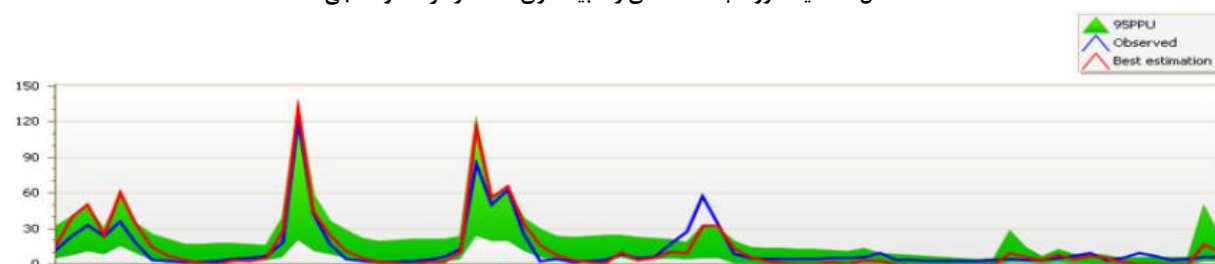
پارامترهای مدل	مفهوم	حد بالا	حد پایین	پارامتر	مفهوم	حد بالا	حد پایین
r_CN2.mgt	شماره منحنی برای شرایط رطوبتی	۰/۵	-۰/۰۵	r_SOL_BD.sol	جرم مخصوص ظاهری خاک	۰/۳	-۰/۳
v_SLSUBBSN.hru	شیب طول متوسط	۱۵۰	۱۰	v_RCHRG_DP.gw	ضریب نفوذ آبخوان	۱	۰
v_GW_DELAY.gw	زمان تأخیر برای آبخوان تغذیه	۱۲۰۰	۲۰	gw.SHALLST_v	عمق اولیه آب در آبخوان آزاد	۱۰۰۰	۰
v_EPCO.hru	فاکتور جبران گیاهی جذب	۱	۰/۰۱	r_HRU_SLP.hru	متوسط شیب تند	۰/۶	۰
v_CH_K2.rte	هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی	۱/۵	۰/۰۲۵	v_CANMX.hru	حداکثر نکه داشت تاج پوشش	۱۰۰	۰
v_ESCO.hru	فاکتور جبران تیخیر از خاک	۱	۰/۰۱	v_ALPHA_BNK.rte	ثابت تخلیه کانال	۱	۰
r_SOL_AWC.sol	متوسط آب قابل استفاده (میلیمتر بر میلیمتر)	۰/۳	-۰/۳	r_SOL_K.sol	هدایت هیدرولیکی خاک اشباع	۰/۸	-۰/۸

با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده دبی متوسط ماهانه سال‌های ۲۰۰۴-۱۹۹۰ برای دوره واسنجی و مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب در سالهای ۲۰۰۹-۲۰۰۵ برای اعتبارسنجی مدل استفاده گردید. در این مرحله در هر دو مرحله کالیبره کردن و صحت‌سنجی مدل، نتایج رضایت بخشی حاصل شد (دوره واسنجی: شاخص‌های ضریب تبیین ۰/۷۹ و ضریب نش‌ساتکلیف ۰/۷۴ و دوره صحت‌سنجی: نش‌ساتکلیف: ۰/۶۷ و ضریب تبیین: ۰/۷۲). نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل (شکل ۷ و ۸) برای

ایستگاه قورباغستان حاکی از این است که همبستگی مناسبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده جریان رودخانه، در حوضه مورد مطالعه وجود دارد. (Schuol et al., 2008) با بررسی جامع تعداد بسیار زیادی از مطالعات انجام گرفته با استفاده از مدل SWAT اظهار می‌دارند که برای مقیاس زمانی ماهانه، بهتر است مقادیر نش‌ساتکلیف از ۵۰ درصد بیشتر باشد، که نتایج این تحقیق را تایید می‌نماید.



شکل ۷ مقایسه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی



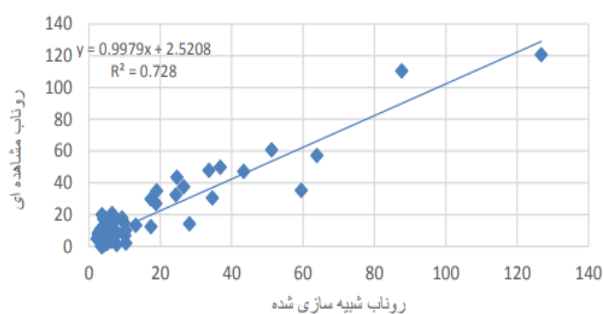
شکل ۸- مقایسه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی

(پاییز) و آوریل (بهار) انطباق چندانی ندارد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه شرح داد که مدل توانایی شبیه‌سازی دقیق دبی‌های اوج را ندارد (شکل ۷ و ۸). برای این ضعف دلیلی نیز ذکر شده که

در اکثر ماه‌های سال نتایج مدل با مقادیر مشاهده‌ای انطباق نسبتاً خوبی نشان می‌دهند ولی در بین ماه‌های اکتبر و نوامبر

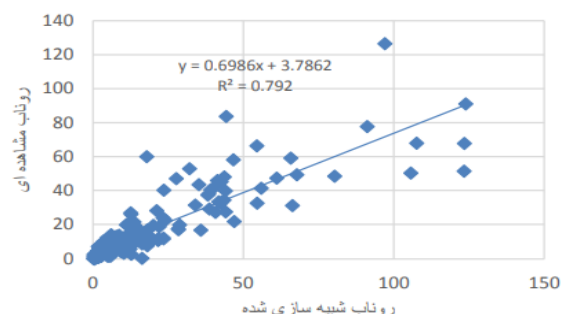
کوهستانی نبوده و مقدار حداکثر رواناب را خوب شبیه‌سازی نمی‌کند.

شکل ۹ و ۱۰ ضریب تعیین نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده تا چه میزان به بیشترین مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و از صفر تا ۱ تغییر می‌کند. نتایج واسنجی مدل در ایستگاه، همبستگی مناسب بین داده‌های شبیه‌سازی شده مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده جریان رودخانه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- مقایسه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی

از مهم‌ترین این دلیل، می‌توان به ضعف مدل در شبیه‌سازی فرایند ذوب برف اشاره کرد. این موضوع به‌خصوص در مناطق کوهستانی از اهمیت بیشتری برخوردار است. (Chen et al., 2011) نیز گزارش دادند که اکثر جریان‌هایی که مدل قادر به شبیه‌سازی آنها نبوده، در فصل بهار اتفاق می‌افتد. مدل SWAT، بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه به‌صورت باران یا برف تقسیم‌بندی می‌کند. مدل قادر به شبیه‌سازی کامل ذوب برف در مناطق

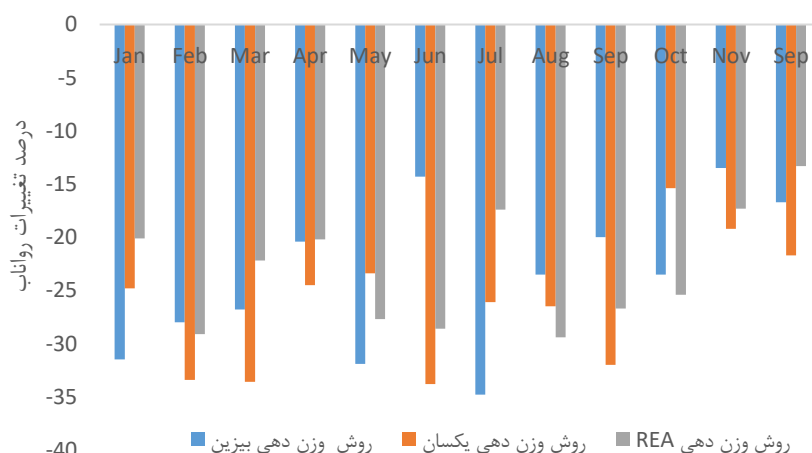


شکل ۹- مقایسه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی

دانست. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه نشان می‌دهد که حوضه به سمت خشکسالی پیش می‌رود. بیش‌ترین کاهش در روش بیزین، ماه ژولای و کمترین کاهش در روش REA و ماه سپتامبر اتفاق می‌افتد. با توجه به افزایش دما در نزدیکی بهار، مقدار ذوب برف بلافاصله پس از بارش برف صورت می‌گیرد. به همین دلیل در اواخر زمستان بیشترین مقدار دبی مشاهده می‌شود و با توجه به اینکه اوایل زمستان کاهش بارندگی رخ داده است این افزایش دبی به افزایش دما و ذوب سریع برف مربوط می‌شود.

نتایج اثر تغییر اقلیم بر رواناب

در این مرحله مدل SWAT تحت رویکردهای مختلف همادی نمودن خروجی مدل‌های اقلیمی اجرا شد. هرکدام از این خروجی‌ها به‌طور جداگانه در برنامه SWAT-CUP وارد و با اعمال پارامترهای بهینه‌شده مدل اجرا شد و در نهایت مقدار برای رواناب در دوره آتی شبیه‌سازی گردید. شکل ۱۱ نشان می‌دهد رواناب کاهش می‌یابد. همچنین طبق نمودار اوج جریان کاهش یافته است. کاهش رواناب را می‌توان به علت کاهش بارندگی



شکل ۱۱- درصد تغییرات رواناب ماهانه دوره پایه و آتی

سیاست‌گذاران عرصه‌های بین‌المللی قرار گرفته است زیرا هر تغییری در اقلیم عدم قطعیت مربوط به پیش‌بینی و برنامه‌ریزی

نتیجه‌گیری

امروزه موضوع تغییر اقلیم جهانی بسیار مورد توجه دانشمندان و

کمتری را متوجه بخش آب در این حوزه بسیار مهم کشورمان باشد. این حوزه کشور یکی از بخش‌هایی است که باید خود را با شرایط آینده تطبیق دهد و تغییراتی را در این جهت در پیش بگیرد. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد دمای حداقل و حداکثر در آینده افزایش و بارش کاهش خواهد یافت و در روش وزن دهی بیزین بیشترین تغییرات در رواناب با میزان کاهش ۳۴ درصد در حوزه آبخیز قره سو را نشان می‌دهد. در انتها پیشنهاد می‌شود در دیگر مطالعات از دیگر سناریوهای مدل‌های گردش عمومی‌جو و سایر روش‌های وزن‌دهی نیز بررسی گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Bab Al-Hakami, A., Emadi A., Gholami Sefidkuhi, A. (2020). Evaluation of the effect of climate change on drought and runoff forecast of Neka river basin during future periods. *Echo Hydrology*, 2: .291-302.
- Bhatta, B and Shrestha S. (2019). Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan River Basin CATENA, 181 : 104082.
- Chen, J., Brissette, F.P., Leconte, R. (2011). Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Hydrology*, 401 (3-4):190-202.
- Dong F., aJaved A., Saber A. (2021). A flow-weighted ensemble strategy to assess the impacts of climate change on watershed hydrology. *Journal of Hydrology* , 594: 125898
- IPCC. 2007. Summary for policy markers, in: climate change
- Jalali, M., Tabrizi, M., Babazadeh H. (2020). Investigation of the effect of climate change on runoff and water balance of Latian dam catchment using SWAT model. *Echo Hydrology*, 7: 17-28.
- Jeirani, F., Murid, S., Muridi A. (2009). Effect of spatial accuracy of digital elevation map on calibration and estimation of runoff and sediment using SWAT-CUP. *Water and Soil Conservation Research (Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 18 (4): 81 - 101.
- Heidari, H., Golkarian, A., Ismaili, K. (2020). The effect of climate change on runoff and sediment in the basin using SWAT models and (WEPP case study: Dehbar basin). *Iran Water and Soil Research*, 51 (4): 1027-1040
- IPCC. Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth. 2014.
- Li C and Fang H. (2021). Assesment of climate change impact on the streamflow for the Mun River in the Mekong Basin, southeast Asia: Using SWAT model. *CATENA*, 201: 105199.
- Rajaei, F., Dahmardeh Behrooz, R., Ahmadisharaf., E., Galalizadeh, S., Dudic, B., Spalevic, V., Novicevic, R. (2021). Application of Integrated Watershed Management Measures to Minimize the Land Use Change Impacts. *Water*, 13, 2039.
- Ratna, A., Shrestha, A., Maharjan, S. (2018). Climate change impact assessment on the hydrological regime of the Kaligandaki Basin. *Nepal. Science of the Total Environment.*, 625 837-848.
- Murphy J., Sexton, D., Barnett, D., Gareth, S. (2004). Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature*. 430: 768-772 .
- Räisänen, J., Ruokolainen, L., Ylhäisi, J. (2010). Weighting of model results for improving best estimates of climate change. *Climate Dynamics* , 35: 407-422 .
- School, J., Abbaspour, K.C., Srinivasan, R., Yang, H. (2008). Estimation of freshwater availability in the west african sub-continent using the swat hydrologic model. *Hydrology*, 352(1-2): 30-49.
- Tegegnea, G., Melesse, A., Worqlul, A. (2020). Development of multi-model ensemble approach for enhanced assessment of impacts of climate change on climate extremes. *Science of The Total Environment*, 704: 135357.
- Zhuang, X., Huang, G. H., Liu, J. (2016). Assessment of climate change impacts on watershed in cold-arid region: an integrated multi-GCM-based stochastic weather generator and stepwise cluster analysis method. *Climate Dynamics* , 47: 191-209 .
- Tegegnea, G., Melesse, A., Worqlul, A. (2020). Development of multi-model ensemble approach for enhanced assessment of impacts of climate change on climate extremes. *Science of The Total Environment*, 704: 135357.