

مدلسازی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه آبریز رودخانه جاجرود با استفاده از مدل SWAT

حمیدرضا فردانش^۱

سیده هدی رحمتی^{۲*}

rahmati@srbiau.ac.ir

حسین بابازاده^۳

باقر قرمز چشمه^۴

امیر هومن حمصی^۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۷/۹

چکیده

زمینه و هدف: بررسی عملکرد منابع آب سطحی از جمله مخازن سدها در مواجهه با اثرات تغییر اقلیم در مناطق مختلف ضروری به نظر می‌رسد و اهمیت این مسئله در مناطق خشک و نیمه‌خشک دو چندان است به همین دلیل تحقیق پیش‌رو بر روی طرح‌های واقع در حوضه آبریز رودخانه جاجرود و هراز واقع در شمال‌شرق تهران متمرکز گردیده است. طرح‌های این حوضه آبریز شامل سدهای لتیان، ماملو و لار بوده که با هدف تامین نیاز شرب و بهداشت، کنترل و تنظیم جریان‌های سطحی (سیلاب‌های فصلی)، تامین آب مورد نیاز برای کشاورزی، صنعت، بالا رفتن سطح زندگی، رفاه اجتماعی، امنیت توازن و خود کفایی اقتصادی احداث گردیده اند. با توجه به افزایش روزافزون جمعیت، تقاضا برای منابع آب بطور مداوم در حال افزایش است. این در شرایطی است که محدود بودن منابع آب و در کنار آن تداوم گرمایش جهانی، به بحران‌های موجود دامن می‌زند. طبق موارد ذکر شده، در این پژوهش سعی بر آن است تا از یک سو اثرات تغییر اقلیم بر تامین اهداف این سدها مورد مطالعه قرار گیرد و از سوی دیگر با مدل‌سازی و پیش‌بینی بلند مدت جریان، برآوردی مطمئن از وضعیت ذخیره آب مخازن و همچنین تامین نیازها ارائه دهد تا راهگشای اقدامات مسئولان در جهت کاهش بحران تقاضای نیازهای رو به افزایش در سال‌های آتی قرار گیرد.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. * (مسئول مکاتبات)

۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۴- هیات علمی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

۵- استاد گروه مهندسی صنعت و انرژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

روش بررسی: تحقیق حاضر آثار ناشی از تغییر اقلیم را بر دما، بارندگی و رواناب در دوره‌های آتی با کمک مدل آماری LARS-WG و مدل مفهومی SWAT نشان می‌دهد. برای مطالعه موردی حوزه جاجرود، یکی از زیرحوضه‌های دریاچه نمک، انتخاب شد. برای این منظور ابتدا داده‌های دما و بارش ۵ مدل از برنامه مدل LARS-WG برای حوزه مذکور ارزیابی شد. سپس شبیه‌سازی این پارامترها برای سه دوره ۲۰ ساله (۲۱۰۰ - ۲۰۸۱، ۲۰۴۰ - ۲۰۲۱ و ۲۰۷۰ - ۲۰۵۱) و تحت دو سناریو SSP۲۴۵ و SSP۵۸۵ برای ایستگاه‌های منتخب انجام شد.

یافته‌ها: نتایج در مجموع حکایت از کاهش-افزایش بارش و افزایش دما نسبت به دوره مشاهده ای دارد. در ادامه مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان روزانه حوزه واسنجی گردید. با معرفی مقادیر دما و بارندگی ریزمقیاس شده، جریان برای دوره‌های آتی شبیه‌سازی بدین منظور ابتدا مدل SWAT برای شرایط موجود حوزه با استفاده از ۴ ایستگاه هیدرومتری واسنجی و اعتبارسنجی شد که مقادیر ضریب تعیین (R^2) برای ایستگاه‌های هیدرومتری به ترتیب بین ۰/۶۵ تا ۰/۸۵ و ۰/۵۱ تا ۰/۶۰ بدست آمد. نتایج مدلسازی در دوره‌های زمانی آتی منجر به سال ۲۱۰۰ نشان داد که در دو سناریو SSP۲۴۵ و SSP۵۸۵ مقادیر دمای حداکثر و حداقل به ترتیب ۵/۴ و ۴/۸ درجه سانتی‌گراد خواهد شد. لذا با در نظر گرفتن این نتایج می‌توان پی‌برد که در زمان‌های پیشرو نه فقط در میزان بارش بلکه در الگوی بارش هم تغییرات خواهد بود. نهایتاً نتایج کلی نشان از جابجایی زمان وقوع پیک رواناب در مقیاس زمانی ماهانه در دوره‌های آتی نسبت به دوره‌ی پایه دارد.

بحث و نتیجه‌گیری: به دلیل رسیدن به این نتایج می‌توان گفت که در دوره آینده هم در میزان بارش و نیز در الگوی بارش تغییرات خواهیم داشت. نهایتاً نتایج کلی نشان از جابجایی زمان وقوع پیک رواناب در مقیاس زمانی ماهانه در دوره‌های آتی نسبت به دوره‌ی پایه دارد. شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در حوضه‌ها نشان داد که میزان آورد رودخانه بسیار تحت تاثیر میزان بارندگی بوده و این موضوع بخوبی بر جریان ورودی تاثیرگذار است، همچنین نتایج سناریو‌های اقلیمی افزایش دما را به اثبات رساند.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، حوزه جاجرود، مدل LARS-WG، مدل‌های AOGCM، رواناب، SWAT.

Modeling the effects of climate change on the water resources of Jajroud river basin using SWAT model

Hamidreza Fardanesh¹

Seyedeh Hoda Rahmati^{2 *}

rahmati@srbiau.ac.ir

Hossein Babazadeh³

Bagher Ghermezcheshmeh⁴

Amir hooman Hemmasi⁵

Date of Acceptance: October 30, 2024

Date of Submission: September 30, 2024

Abstract

Background and Objective: Examining the performance of surface water resources including dams reservoirs in facing the effects of climate change in different regions seems necessary and the importance of this issue is double in arid and semi-arid regions, that is why the upcoming research on the projects located in the catchment area of Jajroud and Haraz rivers. Located in the northeast of Tehran, it is concentrated. The projects of this watershed include Latiyan, Mamloo and Lar dams, which aim to provide drinking and sanitation needs, control and regulate surface flows (seasonal floods), supply water needed for agriculture, industry, raising the standard of living, social welfare, and balance security. and economic self-sufficiency have been established. Due to the ever-increasing population, the demand for water resources is continuously increasing. This is in a situation where limited water resources and the continuation of global warming fuel the existing crises. According to the mentioned cases, in this research, it is tried to study the effects of climate change on meeting the goals of these dams on the one hand, and on the other hand, with modeling and long-term forecasting of the flow, a reliable estimate of the water storage status of the reservoirs as well as meeting the needs. to be presented in order to pave the way for the actions of the officials to reduce the demand crisis of the increasing needs in the coming years.

Material and Methodology: The current research shows the effects of climate change on temperature, rainfall and runoff in future periods with the help of LARS-WG statistical model and SWAT conceptual model. Jajroud basin, one of the sub-basins of Salt Lake, was chosen for the case study. For this purpose, first the temperature and precipitation data of 5 models from the LARS-WG

1- Ph.D. Candidate, Department of Natural Resources and Environment, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Natural Resources and Environment, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. **(Corresponding Author)*

3- Professor, Department of Natural Resources and Environment, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

4- Research Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization, Tehran, Iran.

5- Professor, Department of Natural Resources and Environment, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

model program were evaluated for the mentioned basin. Then the simulation of these parameters was done for three 20-year periods (2081-2100, 2040-2021 and 2051-2070) and under two scenarios SSP 245 and SSP 585 for the selected stations.

Findings: Overall, the results indicate a decrease-increase in precipitation and an increase in temperature compared to the observation period. Next, the SWAT model was recalibrated to simulate the daily flow of the basin. With the introduction of micro-scaled temperature and rainfall values, the flow of future simulation periods for this purpose, SWAT model has been recalibrated and validated for the existing conditions of the basin using 4 hydrometric stations, which has a coefficient of determination (R^2) for the hydrometric stations, respectively, between 65. 0.0 to 0.85 and 0.51 to 0.60 were obtained. The modeling results in the future time periods leading to the year 2100 showed that in the two scenarios SSP245 and SSP 585, the maximum and minimum temperature values will be 5.4 and 4.8 degrees Celsius, respectively. Therefore, considering these results, we can understand that in the future, there will be changes not only in the amount of precipitation, but also in the pattern of precipitation. Finally, the general results show the displacement of the peak runoff occurrence time in the monthly time scale in the future periods compared to the base period.

Discussion and Conclusion: Due to these results, it can be said that in the future, we will have changes in both the amount of precipitation and the pattern of precipitation. Finally, the general results show the displacement of the peak runoff occurrence time in the monthly time scale in the future periods compared to the base period. The hydrological simulation in the basins showed that the amount of river flow is greatly affected by the amount of rainfall and this has a good effect on the inflow, and the results of the climatic scenarios proved the increase in temperature.

Keywords: Climate change, Jajroud basin, LARS-WG model, AOGCM models, runoff, SWAT.

مقدمه

به جای گذاشته و انتظار می‌رود که در دوره های آینده، تاثیر این تغییرات باعث نا ایمن شدن شرایط منابع آب در بخش های خشک و نیمه خشک جهان گردد (۲) و (۳). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب از دهه ۱۹۹۰ مورد توجه بسیاری از محققان در نواحی مختلف دنیا قرار گرفته و در ایران نیز طی سال‌های اخیر این مساله اهمیت خاصی پیدا کرده است. نیک اختر و همکاران (۴) در مطالعه حوضه رودخانه ارداک با استفاده از داده های اقلیمی و مقدار رواناب توسط نرم افزار SWAT به این جواب رسیدند که هرچه دوره پیش بینی به جلو می رود و آینده دور مد نظر باشد میزان تاثیرات اقلیمی بر کاهش رواناب بیشتر خواهد بود.

همچنین این پژوهشگر پیشتر به دلیل اهمیت کیفیت آب رودخانه ارداک که بخشی از آب شرب شهر مشهد را نیز تامین می کند مورد بررسی کیفی قرار داده بود که اهمیت موضوع را

با توجه به آن‌که موضوع آب و موارد وابسته به آن یکی از مهم ترین مسائل انسان در آینده خواهد بود، به همین دلیل برای کنترل شرایط، لازم است وقوع تغییرات اقلیمی و میزان تأثیر آن بر منابع آب مورد ارزیابی قرار گیرد. این پدیده می‌تواند خسارات بسیار قابل ملاحظه‌ای را در مناطقی که آسیب‌پذیری بخش آب آن‌ها در وضع موجود قابل توجه است ایجاد کند. موضوع مدیریت منابع آب در کشورهای در حال توسعه پدیده‌ای پیچیده است که ناشی از عوامل مختلف اقتصادی - اجتماعی، فرهنگی و سیاسی می‌باشد. عواملی چون رشد فزاینده جمعیت، تقاضای سایر بخش‌های توسعه و محدودیت منابع آب شیرین، مدیریت بهینه منابع آب را در این کشورها با تنگناها و مشکلات جدی روبرو ساخته و علاوه بر آن گرمایش جهانی بر پیچیدگی و حساسیت موضوع افزوده است (۱). در سال‌های اخیر، تغییر اقلیم در بسیاری از نقاط جهان آثار خود را

مدت متناظر، بر دسترسی و کیفیت منابع آب در مخازن سد تأثیر بسزایی داشته باشد. لذا مدل‌های هیدرولوژیکی که توسط پیش‌بینی‌های اقلیمی هدایت می‌شوند (کاهش مقیاس به مقیاس حوضه و تعصب اصلاح شده برای حذف خطاهای سیستماتیک) ابزارهای مؤثری برای ارزیابی این تأثیر بالقوه می‌باشند.

لمپی و همکاران (۱۱) نقش پررنگ تغییر اقلیم در وقایع حدی و بروز سیلاب در حوزه آبریز سد‌ها را برای مدیریت در شرایط آبی و ایمنی سد آنالیز کردند و نتایج در این راستا لزوم اجرای قوانین برای شرایط نامطمئن را بیان داشتند که منجر به دستاوردهای ارزشمندی برای این تحقیق شد. برگزیدن یک مدل از میان مدل‌های هیدرولوژیکی گوناگون که توانایی شبیه‌سازی روی سامانه منابع آب یک منطقه را با بهره‌گیری از تأثیرات تغییر اقلیم و منظور کردن وضعیت گوناگون مدیریت کشاورزی دارا باشد. که تأثیر قابل ملاحظه‌ای در بررسی تأثیرات آن و تصمیم‌گیری منطقی تر نهاد‌های مربوطه خواهد داشت. ارزیابی مطالعات صورت گرفته حاکی از آن است که مدل SWAT می‌تواند انتخاب خوبی باشد زیرا خصوصياتی چون رایگان بودن و شبیه‌سازی توانان برای متغیرهایی مثل تبخیر، رواناب و تفرق آبهای زیر زمینی را دارا می‌باشد. همچنین این مدل علاوه بر این امکانات، قابلیت تحلیل‌های مناسب را در محیط GIS به شیوه مکانی دارد.

با توجه به اثرات مختلف تغییر اقلیم در دیگر مکان‌های جهان، ایران هم بی‌نصیب از این تغییرات عظیم نبوده که اثرات آن در بیشتر حوضه‌های آبریز کشور مشاهده می‌شود. در این میان حوضه دریاچه آبریز دریاچه نمک و زیرحوضه درجه ۳ رودخانه جاجرود (یکی از متراکم‌ترین نقاط جمعیتی ایران)، حداقل در دهه گذشته با خشکسالی‌ها و کاهش نزولات جوی پیاپی روبرو شده همچنین این حوضه تحت تأثیر توسعه کشاورزی و افزایش جمعیت بواسطه بنای شهرهای جدید و مهاجرت به کلانشهر تهران می‌باشد. این گزاره‌ها منجر به تشدید بحران تامین نیازهای مترتب بر این حوضه شده است. به دلیل حساسیت قابل توجه حوضه آبریز رودخانه جاجرود به خشکسالی‌ها، این

نشان می‌دهد. (۵) هاسن و همکاران (۶) در تحقیقی با عنوان "مدیریت بهم پیوسته منابع آب در سناریوهای تغییر اقلیم در زیرحوضه Abaya-Chamo در کشور اتیوپی" اثرات تغییر اقلیم را بر منابع آب موجود و تخصیص آب را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از افزایش دماهای بیشینه و کمینه در همه سناریوهای انتخابی بوده است. در خصوص بارندگی یک افزایش و کاهش در مقیاس‌های زمانی مختلف در سناریوها رخ داده است. مدل بارش - رواناب SWAT با توجه به مقادیر ضرایب ناش - ساتکلیف و ضریب تعیین در بازه‌های کالیبراسیون و اعتبار سنجی جواب مقبولی را داشت. نتایج پژوهش حکایت از این دارد که مقدار جریان سطحی در دو سناریو RCP ۵.۴ و RCP ۵.۸ به ترتیب برابر با ۱۲.۱ و ۱۶.۲۱ کاهش خواهد بود. وو و همکاران (۷) به مطالعه اثر هیدرولوژیکی افزایش CO₂ و تغییر اقلیم در حوضه رودخانه می‌سی‌سی‌پی پرداختند. آنان در این پژوهش از مدل اصلاح شده SWAT برای دوره ۲۰۷۱ - ۲۱۰۰ استفاده کردند. شبیه‌سازی‌ها انجام شده نشان داد که رواناب در فصل بهار افزایش یافته و در تابستان به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد که این توزیع نامناسب آب در مقایسه با دوره پایه باعث افزایش خطر سیل و خشکسالی در حوضه می‌شود. مقایسه‌ی عملکرد سه مدل هیدرولوژی SIMHYD و IHACRES, SWAT در شبیه‌سازی رواناب در حوضه قره‌سو نشان داد مدل SWAT بهترین عملکرد را برای شبیه‌سازی رواناب در دوره صحت‌سنجی داشته است (۸). حکمی کرمانی و همکاران (۹) در تحقیقی با عنوان "ارزیابی عدم قطعیت شاخص‌های عملکرد سیستم مخزن در شرایط تغییر اقلیم" نتیجه گرفتند که در سناریوهای RCP ۵.۴ و RCP ۵.۸ میزان جریان ورودی به سد نمرود در استان تهران به ترتیب برابر با ۸.۳۶ و ۱۲.۶۴ درصد کاهش خواهد یافت. این کاهش آبدی منجر به کاهش شاخص‌های عملکرد نیز خواهد شد.

ساوینو و همکاران (۱۰) با بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که تغییرات آب و هوایی ممکن است با تغییر بالقوه رژیم هیدرولوژیکی سرشاخه‌های دریاچه و منحنی‌های جریان-

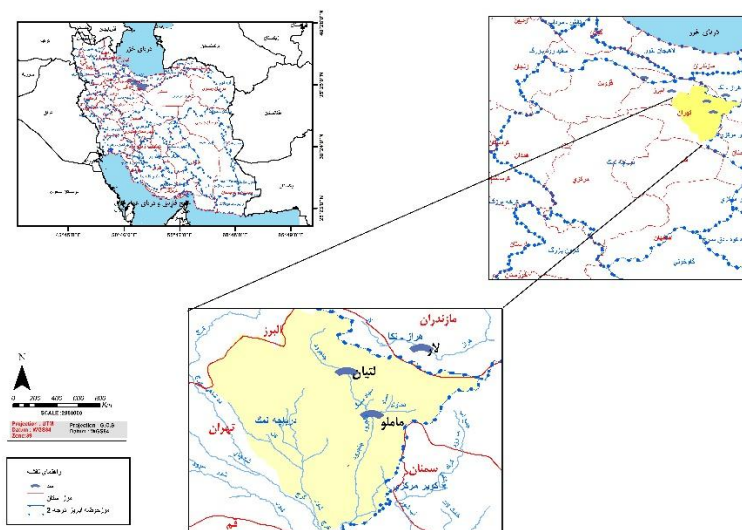
شده و تا جنوب شرقی امتداد دارد و از ارتفاعات البرز و دامنه های شمالی آن سرچشمه می گیرد که در فصول سرد شاهد بارش های خوبی است. روی رودخانه جاجرود سد لتیان برای رفع نیاز شرب تهران احداث شده که پس از آن در ادامه مسیر خود از شرق به رودخانه دماوند نیز می رسد و سپس وارد سد ماملو می شود. با استفاده از سد انحرافی ورامین نیز بخشی از نیاز کشاورزی دشت ورامین رفع می کند. در آخر نیز به رودخانه شور و دریاچه نمک می ریزد.

در شکل ۱ شمایی از حوضه و مکان سدهای لتیان و ماملو و شبکه رودخانه های جاری در آن نشان داده شده است. با توجه به انتقال آب از حوضه آبریز سد لار به رودخانه جاجرود، در یک مدل سیستمی تاثیرات متقابل سدهای لتیان، ماملو و لار مورد بررسی قرار خواهد گرفت. لذا اطلاعات پایه سدهای فوق در این تحقیق مورد نیاز است.

حوضه می تواند به شدت نسبت به تغییرات آب و هوایی محتمل ناشی از پدیده تغییر اقلیم در آینده آسیب پذیر باشد. از طرف دیگر با توجه به وابستگی شرب شهر تهران به بخش عظیمی از منابع آب حوضه آبریز رودخانه جاجرود، در این مطالعه به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه مذکور با استفاده از نتایج ۵ مدل گردش عمومی و سناریوهای انتشار مربوط به گزارش ششم IPCC (multi-model ensembles) و مدل گزارش SWAT (Soil and Water Assessment Tool) می پردازیم.

تشریح منطقه مطالعاتی و داده ها

حوضه آبریز رودخانه جاجرود یکی از زیرحوضه های درجه ۳ از حوضه آبریز درجه ۲ دریاچه نمک است. وسعت این حوضه بالغ بر ۱۷۴۳ کیلومتر مربع بوده و رودخانه اصلی آن دارای طول ۵۲ کیلومتر می باشد. این رودخانه از شمال شرقی تهران آغاز



شکل ۱- موقعیت جغرافیائی حوضه آبریز رودخانه جاجرود و سدهای لار، لتیان و ماملو

Figure 1. Geographical location of Jajroud River watershed and Lar, Latiyan and Mamloo dams

هیدرولوژیکی یکسان حوضه (HRU^۱) استفاده گردید. همچنین از داده های ایستگاه های هواشناسی سینوپتیک که نزدیکترین

با توجه به اطلاعات مورد نیاز مدل SWAT، در این تحقیق جهت تولید شبکه آبراهه ها و زیرحوضه ها از لایه رقومی ارتفاع (DEM) (Digital Elevation Model) با اندازه سلول ۸۰ متری استفاده گردید. همچنین از نقشه های کاربری اراضی (شکل ۳) (۱۲) و خاک FAO برای تعیین واحدهای

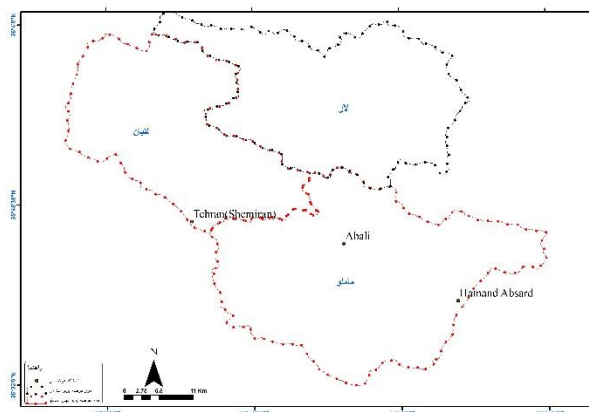
جدول ۱ ارائه شده است. همچنین از آمار ماهانه دبی ۴ ایستگاه هیدرومتری جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT استفاده گردید.

فاصله را با منطقه مورد مطالعه داشتند، جهت شبیه سازی فرآیندهای مورد نظر طی دوره ۱۹۹۱ لغایت ۲۰۱۰ استفاده گردید. مشخصات این ایستگاه ها همراه با طول دوره آماری در

جدول ۱- نام و مشخصات ایستگاه های هواشناسی مورد استفاده در تحقیق

Table 1. Names and characteristics of meteorological stations used in the research

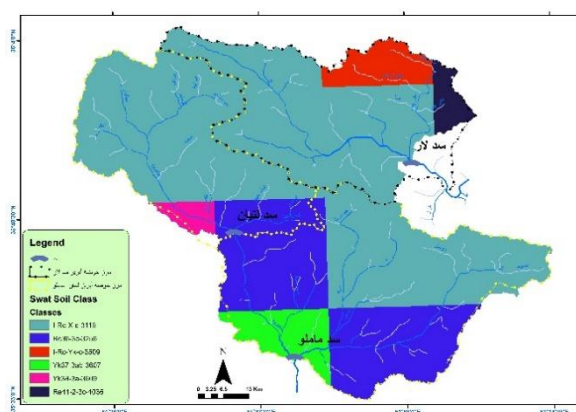
ردیف	۱	۲	۳
نام ایستگاه	شمال تهران	آبعلی	همند آبسرد
نوع ایستگاه	سینوپتیک	سینوپتیک	کلیماتولوژی
طول جغرافیایی - درجه	۵۱/۶۲	۵۱/۸۸	۵۲/۰۸
عرض جغرافیایی - درجه	۳۵/۷۸	۳۵/۷۵	۳۵/۶۷
ارتفاع - متر	۱۵۴۸/۲	۲۴۶۵/۲	۱۸۰۰
دوره آماری	۱۹۹۱-۲۰۱۰	۱۹۹۱-۲۰۱۰	۱۹۹۱-۲۰۱۰
متوسط بارندگی سالانه - میلیمتر	۴۲۶/۷	۵۳۸/۱	۳۲۵/۵
متوسط دمای سالانه - درجه سانتی گراد	۱۵/۷	۸/۷	۱۱/۳
متوسط دمای حداقل سالانه - درجه سانتی گراد	۱۰/۶	۴/۲	۵/۳
متوسط دمای حداکثر سالانه - درجه سانتی گراد	۲۰/۸	۱۳/۲	۱۷/۲



شکل ۳- موقعیت ایستگاه های هواشناسی مورد استفاده در

مدل SWAT

Figure 3. Location of meteorological stations used in SWAT model



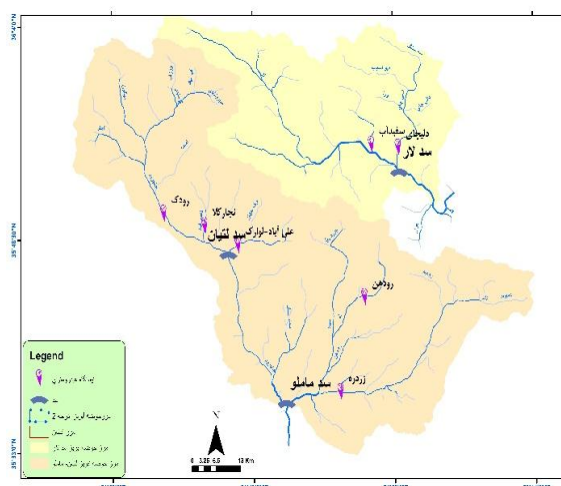
شکل ۲- نقشه خاک حوضه جاجرود

Figure 2. Soil map of Jajrood basin

جدول ۲- نام و مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد استفاده در تحقیق

Table 2. Names and specifications of the hydrometric stations used in the research

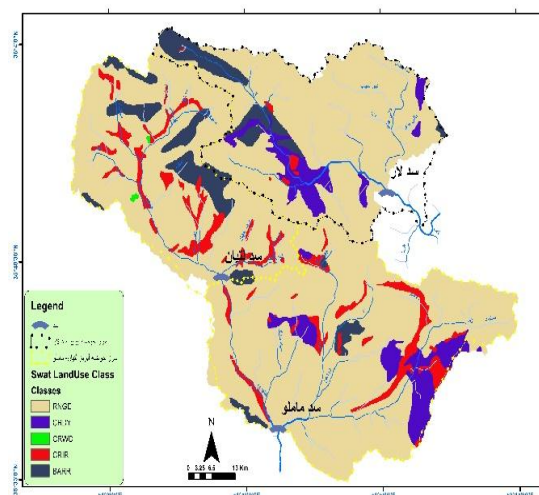
ردیف	نام ایستگاه	نام رودخانه	طول جغرافیایی - درجه	عرض جغرافیایی - درجه	مساحت حوضه - کیلومتر مربع	ارتفاع از سطح دریا - متر	سال تاسیس
۱	دلیچای	دلیچای	۵۱/۹۹	۳۵/۹۲	۲۰۶	۲۵۳۹	۱۳۵۳
۲	رودک	جاجرود	۵۱/۵۶	۳۵/۸۴	۴۱۶	۱۷۱۴	۱۳۳۵
۳	علی آباد-لوارک	لوارک	۵۱/۷۰	۳۵/۸۰	۱۰۳	۱۶۵۷	۱۳۵۲
۴	نچار کلا	کندرود-گلندوک	۵۱/۶۴	۳۵/۸۳	۵۹	۱۶۷۸	۱۳۵۱
۵	سفیدآب	سفیدآب	۵۱/۹۴	۳۵/۹۲	۵۴	۲۵۰۸	۱۳۶۴
۶	زردره	دماوند	۵۱/۸۸	۳۵/۶۲	۴۰۴	۱۴۱۵	۱۳۷۷
۷	رودهن	آه	۵۱/۹۳	۳۵/۷۴	۵۷	۱۸۴۴	۱۳۶۸
۸	لتیان	جاجرود	۵۱/۶۹	۳۵/۷۸	۷۱۰	۱۵۳۴	۱۳۲۵



شکل ۵- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مورد استفاده در

مدل SWAT

Figure 5. Location of hydrometric stations used in SWAT



شکل ۴- نقشه کاربری اراضی حوضه جاجرود

Figure 4. Land use map of Jajroud basin

روش بررسی

۱- تولید سناریوهای اقلیمی ماهانه با استفاده از مدل‌های

AOGCM

سناریوهای جدید گزارش ششم AR6، با همان طیف RCP ها توسعه داده شده‌اند ولی شکاف‌های اساسی برای سطوح واداشت میانی (متوسط) را پر می‌کنند. این سناریوها ترکیبی از سناریو-های RCP و خط سیرهای اقتصادی - اجتماعی را ارائه می-

دهند و به‌عنوان یک رابط میان دو مبحث تلاش جامعه و توضیح پیشرفت‌های جهانی می‌باشند که ترکیب این دو مبحث منجر به چالش‌های متفاوت برای کاهش و سازگاری با تغییر اقلیم می‌گردد. ردیف ۱، طیف وسیعی از عدم قطعیت‌ها در خطوط سیر واداشت آبی را در برمی‌گیرد که در مطالعات

ساعات آفتابی است، که یک دوره را به عنوان شاهد از یک ایستگاه گرفته تا توزیع های احتمال متغیر های هواشناسی را ایجاد و رابطه میان آن ها را مورد استفاده قرار دهد. این گروه از پارامترها جهت ایجاد سری های زمانی متغیرهای هواشناسی ساختگی با طول دلخواه به شیوه تعیین تصادفی مقادیر از توزیع های مناسب می باشد. از شیوه مداخله پارامترهای توزیع-ها برای یک ایستگاه و تغییرات پیش بینی شده اقلیمی که با استناد به گزارشات و داده های اقلیمی جهانی و منطقه ای بوده، که برای ارزیابی سناریوی اقلیمی روزانه این ایستگاه توانایی ساخت داده داشته و در الحاق به مدل های شبیه سازی سیستم های مختلفی چون منابع آب و کشاورزی استفاده شود. در این مطالعه ۵ مدل GCM و سناریوهای انتشار مربوط (استفاده شده در مدل لارس) در تأثیر بر دمای بیشینه و کمینه، بارش و رواناب حوضه جاجرود در دوره ۲۰۲۱-۲۱۰۰ در قیاس با دوره پایه ۲۰۱۰-۱۹۹۱ مورد بررسی قرار داده ایم. به دلیل واسنجی و صحت سنجی مدل لارس از اطلاعات بارش روزانه و بیشینه و کمینه درجه حرارت روزانه سه ایستگاه سینوپتیک شمال تهران، آبدلی و کلیماتولوژی همدان آبرد استفاده گردید. مدل برای مقایسه داده های تولیدی و تاریخی از معیارهای توزیع احتمال و میانگین ها به ترتیب از آزمون های (χ^2) و t استفاده می کند.

اقلیمی، ارزیابی یکپارچه مدل ها (IAM^۱) و اثرات، سازگاری و آسیب پذیری (IAV^۲) از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. این دسته، شامل سناریوهای جدید پایه SSP به عنوان ادامه سطوح واداشت RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 می باشد و به این سناریوها، سناریوی واداشت غیر کاهشی (SSP3-7.0) با انتشار بالای ذرات معلق و تغییر کاربری اراضی را اضافه می نماید. سناریوهای این ردیف تحت عناوین SSP 2-4,5، SSP، SSP 1-2,6 و SSP 5-8,5، 3-7,0 می باشند.

۲- ریز مقیاس نمایی

مدل های GCM نشان دهنده مهارت های متفاوت در شبیه سازی الگوهای چرخش و تغییر و تنوع فصلی و درون فصلی هستند (۱۳). با این حال، قدرت تفکیک فضایی کم نتایج GCM منجر به اشتباهات عمده و عدم قطعیت زیاد در خروجی آنها در مقیاس محلی، خصوصا برای بارش می شود. ریشه خطاها به این خاطر است که شماری از فرآیندهای کوچک مقیاس را نمی توان به روشنی در مدل های آب و هوا نشان داد، و باید تقریب زد. این امر به دلیل محدودیت در قدرت محاسباتی، محدودیت درک ما از فرآیندهای کوچک مقیاس و عدم مشاهدات دقیق مورد نیاز برای اعتبارسنجی است. به همین دلیل خروجی مدل های GCM نیاز به تکنیک های مختلف ریز مقیاس نمایی دارند. در این مطالعه از مولد آب و هوای تصادفی LARS-WG استفاده شده است.

۲-۱ توصیف مدل LARS-WG

LARS-WG یک مولد مصنوعی داده های آب و هوایی است که می تواند برای شبیه سازی داده های هواشناسی در یک مکان واحد تحت شرایط اقلیم حال و آینده بکار رود. نخستین نسخه LARS-WG در کشور مجارستان در سال ۱۹۹۰ جهت بررسی خطرپذیری کشاورزی بسط یافت (۱۴). بعد از آن در سال ۱۹۹۸ بواسطه تحقیقات سمونوف (۱۵) بروز گردید. در این نرم افزار که مولد آب و هوایی رندمی برای ساخت و ایجاد گروه های زمانی روزانه دمای بیشینه و کمینه، بارندگی و

1- Integrated assessment modeling

2- Impacts, adaptation, and vulnerability

جدول ۳- مشخصات مدل‌های GCM مورد استفاده

Table 3. Specifications of GCM models used

ردیف	مدل GCM	متولی - موسسه	دقت مکانی
۱	MIROC6	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	$1/40^\circ \times 0/40^\circ$
۲	EC EARTH	European Community Earth-System, consortium, Europe	$1/125^\circ \times 1/125^\circ$
۳	GFDL-CM3	National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)	$2/0^\circ \times 2/5^\circ$
۴	MPI-ESM-MR	Meteorological Research Institute	$1/12^\circ \times 1/12^\circ$
۵	HadGEM2-ES	Met Office Hadley Center, United Kingdom	$1/2^\circ \times 1/8^\circ$

۳- شبیه‌سازی رواناب ماهانه توسط مدل بارش-رواناب

برای شبیه‌سازی رواناب در این گام از خروجی سناریوهای اقلیمی در گام قبل و به کمک مدل SWAT که پیشتر مورد بررسی واقع شده بودند، استفاده می‌گردد.

۳-۱ ساختار مدل SWAT

SWAT یک مدل هیدرولوژیکی، نیمه توزیعی فیزیکی است که توسط USDA-ARS توسعه یافته است (۱۶). در این مدل ابتدا از روی نقشه مدل رقومی ارتفاع، حوزه ی آبخیز اصلی به تعدادی زیرحوزه تقسیم می شود. سپس بر مبنای نقشه های خاک، کاربری اراضی و توپوگرافی، زیر حوزه ها نیز به واحدهای کوچکتری تقسیم می شوند که به هرکدام از این واحدها یک HRU می گویند. این واحد ها با ترکیب لایه‌های کاربری اراضی، و نوع خاک (DEM) بدست می‌آیند بگونه ای که در هر یک از این یکه ها نوع خاک و کاربری اراضی همسان می‌باشند و فرض مدل رفتار هیدرولوژیکی یکسان برای آنها می‌باشد. مدل SWAT مؤلفه‌های اقلیمی، هیدرولوژی، روندیابی مخازن و رودخانه‌ها، مدل رشد گیاه، درجه حرارت، خصوصیات خاک، مدیریت کشاورزی، فرسایش و مواردی از قبیل کیفیت آب سطحی و زیرزمینی را شامل می‌شود (۱۷). این مدل دارای یک پایگاه داده‌ای (database) جامع و قوی برای مؤلفه‌های مختلف مذکور می‌باشد. در این پایگاه داده‌ای تعاریف و محدوده مقادیر پارامترهای مربوط به بخش‌های مختلف مذکور، معرفی موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و

هواشناسی و داده‌های آنها و همچنین مدیریت‌های مختلف منابع آب و کشاورزی جاری در منطقه مورد مطالعه به مدل صورت می‌گیرد. داده‌های ورودی به این مدل را می‌توان به دو دسته کلی نقطه‌ای و لایه‌ای (مکانی) تقسیم‌بندی کرد. داده‌های نقطه‌ای شامل آمار و اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی، نقطه‌ای ورود آلاینده‌ها به رودخانه‌ها و یا آب‌های زیرزمینی و غیره و اطلاعات مکانی شامل لایه‌های رقومی ارتفاع (DEM)، لایه کاربری اراضی و لایه نوع خاک می‌باشند. این لایه‌ها در واقع توزیع و پراکندگی مکانی مقادیر متغیرهای مورد نظر در حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهند. بعد از تشکیل HRU ها در این روند اجزای اصلی مدل مانند پارامترهای مدیریتی (Mgt)، رودخانه (Rte)، گیاهی (Dat)، خاکشناسی (Sol)، آب زیرزمینی (Gw)، بر اساس آمار و داده‌های موجود به مدل داده می شوند.

۳-۲ آنالیز حساسیت و واسنجی مدل SWAT

برای پوشش و برطرف کردن نقصان در مدل SWAT و به جهت همزمانی شبیه سازی تعداد زیادی از داده های کشاورزی و هیدرولوژیکی از مدل تکمیلی به نام SWAT-CUP بهره برده شد (۱۸). که برای بررسی حساسیت دو روش محلی و سراسری را پیش رو می گذارد، که در این پژوهش روش اول انتخاب گردید که بر اساس این شیوه پارامترها ثابت شده و فقط یکی از آن ها که بازه ای برای آن مشخص کرده بودیم را تغییر داده و مقدار تغییرات خروجی آن را مورد بررسی قرار می دهیم.

جداول ۴ و ۵ خروجی های واسنجی و صحت سنجی مدل را با استفاده از شاخص های آماری R^2 ، MBE و ریشه دوم میانگین مربعات خطا RMSE برای مقادیر حداقل، حداکثر دما و بارندگی در ایستگاههای منتخب مورد مطالعه را نشان می دهد. در منتخب همه شاخص های آماری یک همبستگی قوی بین داده های مشاهداتی و تخمین زده شده توسط مدل را نشان داد. مقادیر ضریب تشخیص R^2 دامنه مقادیر ۰,۹۴۰ تا ۰,۹۹۹ برای متغیرهای اقلیمی بود این در حالی است که دامنه مقادیر RMSE بین ۰,۱۶ تا ۶,۹۵۷ و مقادیر شاخص MBE بین ۲,۴۳۳- تا ۱,۳ را در بر می گیرد. با توجه به مقادیر شاخص های فوق می توان نتیجه گرفت که یک همبستگی قوی و قابل قبول بین داده های مشاهداتی و داده های تولید شده توسط مدل برای پارامترهای هواشناسی در ایستگاههای هواشناسی منتخب وجود دارد.

پارامتری که میزان قدرمطلق t-stat زیاد تری داشته باشد و نیز مقدار p-value آن به صفر میل کند، بر متغیر مورد نظر تاثیر بیشتری خواهد داشت. همچنین باید خاطر نشان کرد که از شیوه sufi-2 برای واسنجی مدل استفاده شد که برای ارزیابی آن از سه شاخص ضریب تبیین R^2 ، ضریب نش- ساتکلیف (NS) و RMSE استفاده گردید.

یافته ها

۱- تولید سناریوهای اقلیم روزانه توسط مدل LARS-WG
گام های ایجاد سناریوهای اقلیمی روزانه با مدل LARS-WG در سه صورت گرفت. نخست مدل LARS-WG بواسطه داده های مشاهداتی دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ۳ ایستگاه سینوپتیک آبدلی، شمال تهران و همدان آبرسد برای دوره (۱۹۹۱-۲۰۱۰) مورد واسنجی و صحت سنجی قرار گرفت.

جدول ۴- نتایج آماری برای واسنجی مدل در دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۰

Table 4. Statistical results for model recalibration in the base period of 1991-2010

نام ایستگاه	Climate variable	R^2	RMSE	MBE
آبدلی	Tmax	۰/۹۹۹	۰/۲۵	-۰/۰۰۲
	Tmin	۰/۹۹۹	۰/۲۴	۰/۱۲
	Precipitation	۰/۹۸	۵/۴۵	-۱/۳۸
تهران شمال	Tmax	۰/۹۹۹۴	۰/۲۹	۰/۱۵۱
	Tmin	۱/۰۰	۰/۲۷	۰/۱۲
	Precipitation	۰/۹۶	۵/۷۹	۱/۳۶
همند آبرسد	Tmax	۰/۹۹۹۴	۰/۲۵	۰/۰۲۲
	Tmin	۰/۹۹۹۶	۰/۱۶	۰/۰۳
	Precipitation	۰/۹۷	۳/۷۵	-۱/۴۳

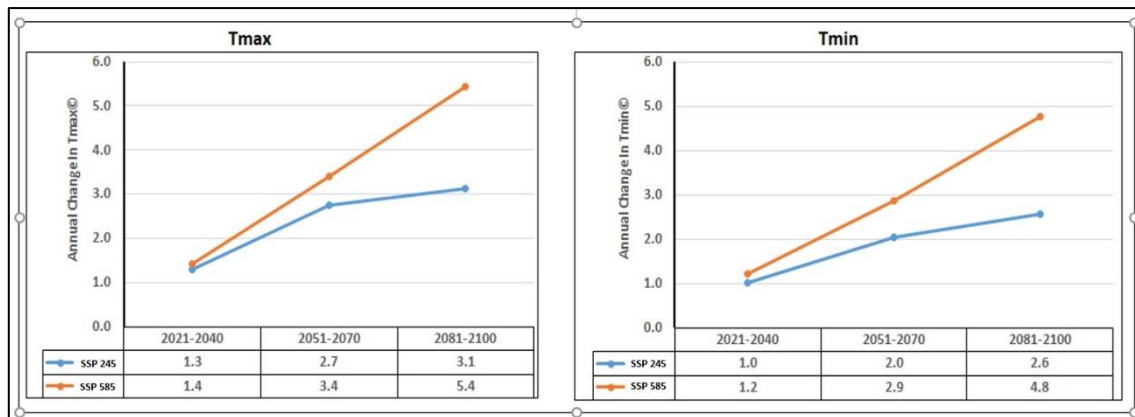
جدول ۵- نتایج آماری برای صحت سنجی مدل در دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۱۰

Table 5. Statistical results for validation of the model in the basic period of 1991-2010

MBE	RMSE	R^2	Climate variable	نام ایستگاه
۰/۰۸۱	۰/۴۶۶	۰/۹۹۸	Tmax	آبعلی
-۰/۱۲	۰/۴۱	۰/۹۹۸	Tmin	
-۰/۲۲	۶/۹۶	۰/۹۵	Precipitation	
۰/۰۶۷	۰/۴۹	۰/۹۹۷۵	Tmax	تهران شمال
۰/۰۱	۰/۴۳	۰/۹۹۷	Tmin	
۱/۳۱	۳/۶۸	۰/۹۹	Precipitation	
-۱/۵۷۳	۲/۶۰	۰/۹۵۶۶	Tmax	همند آپسرد
-۱/۳۴	۲/۳۱	۰/۹۴۵	Tmin	
-۲/۴۳	۵/۵۶	۰/۹۵	Precipitation	

انتظار تا پایان قرن ۲۱ برای دو سناریوی SSP رخ داده است. در شکل ۶ افزایش سالانه دمای حداقل و حداکثر تحت سناریوهای SSP۲۴۵ و SSP۵۸۵ را در سرجمع ایستگاههای مورد مطالعه نشان می دهد. بیشترین تفاوت در دمای حداقل سالانه در سناریوی فوق در حدود ۴,۸ درجه سانتی گراد برای دوره دراز مدت می باشد. در حالیکه بزرگترین تفاوت در دمای حداکثر در سناریوی SSP ۵۸۵ در حدود ۵,۴ درجه سانتی گراد در دوره درازمدت منتهی به سال ۲۱۰۰ بوده است. کمترین میزان تغییر در افزایش دمای حداقل و حداکثر سالانه به ترتیب برابر با ۱,۰ و ۱,۳ درجه سانتی گراد بوده که تحت سناریوی SSP ۲۴۵ برای دوره کوتاه مدت (۲۰۲۱-۲۰۴۰) رخ داده است.

پس از واسنجی و صحت سنجی مدل LARS-WG، سری های زمانی روزانه دما و بارش در دوره های زمانی کوتاه مدت (۲۰۲۱-۲۰۴۰) میان مدت (۲۰۵۱-۲۰۷۰) و دراز مدت (۲۰۸۱-۲۱۰۰) به گونه مستقیم با بهره مندی از پیش بینی های مدل AOGCM جای داده شده در مدل LARS-WG ذیل سناریوهای انتشار گزارش ششم برای هر یک کدام از ۳ ایستگاه منتخب ایجاد گردید که نتیجه این فرآیند ۹۰ اجرا از مدل های منتخب و سناریوهای انتشار بود. با بررسی نتایج مدل LARS-WG می توان نتیجه گرفت که که بیشترین افزایش دما در ماههای تابستان (تیر، مرداد و شهریور) رخ داده در حالیکه ماههای فصل زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه) کمترین میزان افزایش دما را تجربه نموده اند. افزایش مداوم دما در دوره زمانی پایه از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰ و مقادیر مورد



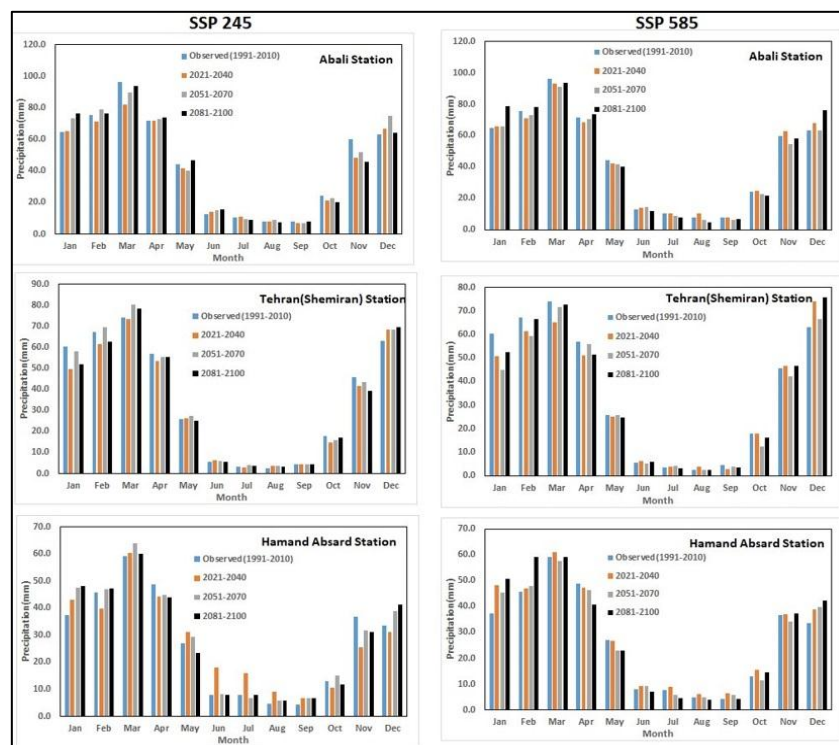
شکل ۶- مقایسه تغییرات سالانه حداقل ها و حداکثرهای روزانه دما پیش بینی شده برای دوره های زمانی (۲۰۱۰-۲۰۴۰)،

(۲۰۵۰-۲۰۷۰) و (۲۰۸۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۹۱-۲۰۱۰)

Figure 6. Comparison of annual minimum and maximum daily temperature changes for the time periods (2040-2010), (2050-2070) and (2100-2081) compared to the base period (1991-2010)

ها در خصوص پیش بینی بارش با بکارگیری یک مدل مجزا GCM می باشد چون هر مدل GCM ممکن است پیش بینی متفاوتی را بدست دهد. نتایج نشان می دهد در حالی که مدل های EC EARTH و HadGEM2-ES دارای تخمین افزایش بارش در همه ایستگاهها در فصول مختلف می باشد سایر مدل ها از قبیل GFDL-CM3 ، MPI-ESM-MR و MIROC6 نشانه های کاهش، افزایش و یا حتی هیچ گونه تغییر معنی دار در دوره های زمانی آتی را بدست می دهند.

در خصوص بارندگی (شکل ۷) که نشان دهنده پیش بینی های بارش برای دو سناریوی انتشار SSP می باشد، تفاوت در مقادیر مورد انتظار بارش در ایستگاههای هواشناسی مورد تحقیق در مقایسه با پارامترهای دمایی بیشتر به چشم می خورد. چون بارندگی بصورت پیوسته در تمام طول سال رخ نمی دهد و در نتیجه پیش بینی های آتی بارش را دچار چالش خواهد نمود. نتایج نشان می دهد که تمایل های پیش بینی مختلفی برای هر یک از مدل های گردش عمومی جو در دوره های مختلف آتی وجود دارد. تغییرات نشان دهنده عدم قطعیت



شکل ۷- مقایسه متوسط ماهانه بارندگی در دوره پایه (۱۹۹۱-۲۰۱۰) و مقادیر پیش بینی شده در سناریوهای ssp ۵۸۵ و ssp

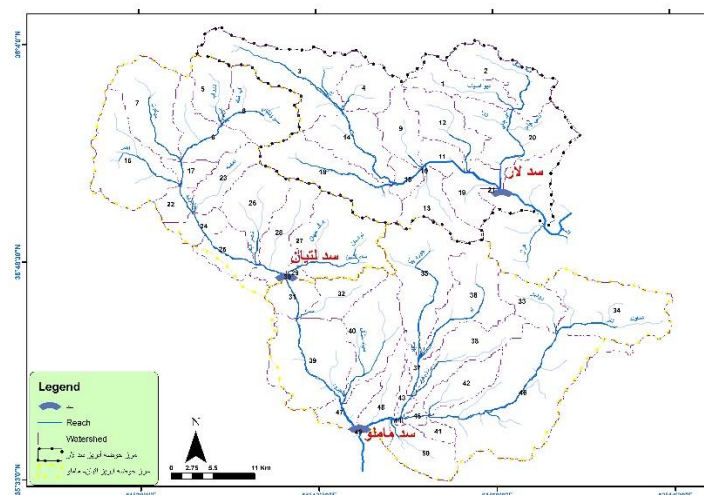
۲۴۵ با استفاده از ۵ مدل گردش عمومی جو برای دوره های زمانی (۲۰۴۰-۲۰۱۰)، (۲۰۷۰-۲۰۵۰) و (۲۱۰۰-۲۰۸۱)

Figure 7. Comparison of the average monthly rainfall in the base period (1991-2010) and the predicted values in the ssp 585 and ssp 245 scenarios using 5 atmospheric general circulation models for the time periods (201-2040), (2050-2070) and (2100-2081)

جایگاه نسبت به شبیه سازی رواناب (۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰) اقدام شده است. ایستگاه های هیدرومتری رودک، سفید آب، دلیچای، نجار کلا، علی آباد لوارک، رودهن و زردره و همچنین ورودی ثبتی در محل سدهای لار، لتیان و ماملو در این پژوهش به عنوان نقطه کنترل مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفتند. دو شاخص آماری ضریب کارایی نش ساتکلیف و ضریب تبیین به منظور برآورد دقت و خطای شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲- واسنجی و اعتبار سنجی مدل SWAT

در این پژوهش با استفاده از لایه DEM ۸۰ متری، لایه کاربری اراضی مربوط به سال ۲۰۱۰ و همچنین لایه خاک FAO با ابعاد ۱۰ کیلومتری اقدام به ساخت مدل هیدرولوژیکی SWAT شده است. پس از انجام مراحل ساخت مدل حوضه به ۵۰ زیر حوضه و HRU تقسیم شده است (شکل ۸). پس از وارد کردن اطلاعات بارش و دمای روزانه اطلاعات ایستگاه های سینوپتیک حوضه های آبریز لار و



شکل ۸- حوضه بندی محدوده مطالعاتی در مدل SWAT

Figure 8. Study area zoning in SWAT model

مقدار پارامترهای مؤثر در رواناب بدست آمد. این تکرارها در بازه های ماکزیمم و مینیمم پارامترها از اعداد تصادفی تولید شده توسط روش SUFI2 استفاده می کنند و در هر بار اجرا شدن مدل مقایسه بین سری زمانی مشاهداتی و شبیه سازی شده انجام می پذیرد و در نهایت پس از اجرای کامل تمامی تکرارهای انتخابی بهترین سری پارامترهای تصادفی انتخاب می شود. در جدول ۶ بازه پارامترهای انتخابی (Max value, Min value) و بهترین مقدار پارامترهای انتخابی (Fitted Value) آمده است.

پیش از کالیبره و صحت سنجی مدل SWAT، اول با انجام بررسی حساسیت (با نرم افزار SWAT-CUP) پارامترهای دارای تاثیر زیاد بر دبی خروجی از حوضه، معلوم گردیدند. درجه تاثیر برخی از پارامترهای مؤثر در شبیه سازی دبی خروجی از زیرحوضه ها با مرتبه و نیز میزان p-value و t-stat آنها مشخص شد. هر پارامتری که میزان قدرمطلق t-stat زیاد تری داشته و نیز میزان p-value آن به صفر میل کند، تاثیر بیشتری بر روی دبی داشته است. بعد از تحلیل حساسیت مدل، واسنجی آن توسط نرم افزار SWAT-CUP با الگوریتم SUFI2 با تعداد تکرارهای ۵۰۰ تایی انجام گرفت و در نهایت

جدول ۶- محدوده نهایی مقادیر پارامترهای هیدرولوژیکی مؤثر در رواناب خروجی از حوضه

Table 6. The final range of values of effective hydrological parameters in the runoff from the basin

Parameter_Name	Fitted_Value	Min_value	Max_value
R_CN2.mgt	-۰/۱۸	-۰/۴۹	-۰/۰۲
V_ALPHA_BF.gw	۰/۳۳	۰/۲۸	۰/۹۵
V_GW_DELAY.gw	۲۵/۲۸	۲۰/۱۴	۲۸/۲۴
V_GWQMN.gw	۲/۳۸	۱/۴۷	۲/۷۲
V_SLSUBBSN.hru	۲۷/۱۴	۱۷/۷۰	۹۵/۳۱
V_HRU_SLP.hru	۰/۹۱	۰/۶۷	۰/۹۸
V_LAT_TTIME.hru	۳۹/۸۰	۳۵/۱۰	۵۴/۵۶
V_SURLAG.bsn	۳۱/۳۴	۲۵/۲۶	۳۸/۹۳
R_ESCO.bsn	۰/۶۵	۰/۴۰	۱/۰۲

R_EPCO.bsn	-۰/۲۹	-۰/۳۱	۰/۲۷
V_PLAPS.sub	۸۳۴/۱۷	۱۶۷/۶۵	۸۹۳/۴۴
V_TLAPS.sub	-۲/۲۵	-۵/۵۸	۰/۹۲
V_RCHRG_DP.gw	-۰/۱۵	-۰/۱۶	۰/۴۰
V_ALPHA_BF.gw	۰/۴۷	۰/۲۳	۰/۵۰
R_SOL_AWC(..).sol	۰/۸۴	۰/۴۲	۱/۳۴
R_SOL_AWC(..).sol	۰/۶۰	۰/۱۶	۰/۷۲
R_SOL_K(..).sol	-۰/۲۷	-۰/۲۷	۰/۲۹
R_SOL_BD(..).sol	-۰/۴۵	-۰/۹۶	-۰/۲۲
R_SOL_K(..).sol	۰/۴۱	۰/۰۰۳	۰/۵۲
R_SOL_BD(..).sol	۰/۵۶	-۰/۴۳	۰/۵۹
V_CANMX.hru	۴۹/۷۸	۳۹/۵۸	۵۳/۵۲
V_GW_REVAP.gw	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۲۲

عملکرد خوب مدل می‌باشد. (۱۹) و (۲۰) در جدول ۷ نتایج واسنجی و اعتبارسنجی سری‌های زمانی رواناب آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی در این حوضه آبریز با دقت خوبی انجام پذیرفته است. دوره واسنجی از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۷ و تا سال ۲۰۱۰ نیز برای دوره اعتبارسنجی مدل به کار گرفته شده است.

پس از انجام مرحله تحلیل حساسیت، مدل با استفاده آمار ماهانه ۴ ایستگاه هیدرومتری واسنجی و اعتبارسنجی گردید. در این تحقیق جهت ارزیابی مدل از سه شاخص ضریب تبیین R^2 ، ضریب نش-ساتکلیف (NS) و RMSE استفاده گردید. مقایر بالاتر از ۰/۵ برای این دو شاخص آماری نش-ساتکلیف و ضریب تبیین بیانگر عملکرد مطلوب مدل و بالاتر از ۰/۶ بیانگر

جدول ۷- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای هر یک از ایستگاه‌ها در دوره آماری مربوط

Table 7. The results of calibration and validation of the model for each of the stations in the relevant statistical period

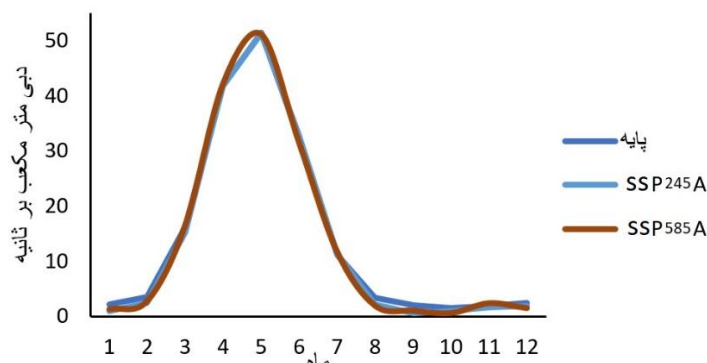
شماره ایستگاه	رودخانه	ایستگاه	واسنجی				اعتبارسنجی			
			دوره آماری	R^2	NS	RMSE	دوره آماری	R^2	NS	RMSE
۱	کندرود-	نچار کلا	۲۰۰۷-۱۹۹۱	۰/۷۴	۰/۶۷	۱/۲۴	۲۰۱۰-۲۰۰۸	۰/۵۲	۰/۵۴	۱/۸۹
۲	جاجرود	ورودی	۲۰۰۷-۱۹۹۱	۰/۶۵	۰/۶۱	۰/۷۷	۲۰۱۰-۲۰۰۸	۰/۵۱	۰/۵۲	۱/۶۷
۳	آه	رودهن	۲۰۰۷-۱۹۹۱	۰/۶۸	۰/۶۱	۱/۵۴۸	۲۰۱۰-۲۰۰۸	۰/۵۵	۰/۵۱	۱/۷۸
۴	دماوند	زر دره	۲۰۰۷-۱۹۹۱	۰/۸۵	۰/۶۶	۰/۹۷	۲۰۱۰-۲۰۰۸	۰/۶	۰/۵۸	۱/۵۰۱

۳- شبیه سازی رواناب منطقه در دوره‌های آتی

شده در شکل (۹ تا ۱۱)، در ایستگاه سد لتیان که مهمترین ایستگاه این حوضه می‌باشد، تغییرات دبی به صورت جابجایی زمانی خواهد بود و تقریباً در همه سناریوها پیک رواناب حدود یک ماه به عقب جابجا خواهد شد و از ماه ۵ به ماه ۴ میلادی خواهد رسید و این امر نشان دهنده تغییرات در ذوب برف

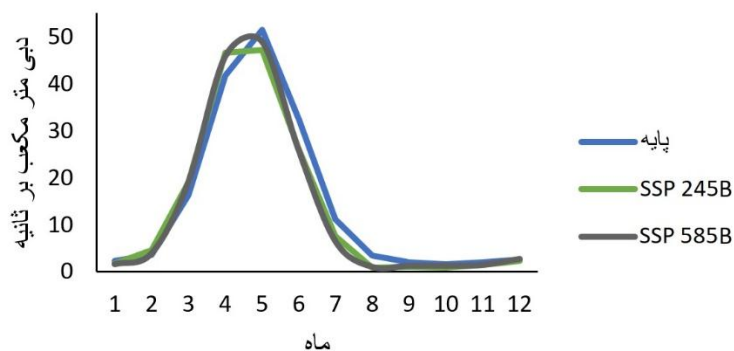
در این مرحله با مشخص کردن معدل دوره های زمانی دما و بارش کوچک مقیاس شده از مدل‌های AOGCM با مدل LARS-WG، به مدل SWAT، دوره‌های زمانی ماهیانه رواناب حوضه جاجرود در ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب در دوره های زمانی آتی بدست می آید. بر اساس نمودارهای ارائه

حوضه خواهد بود. کاهش رواناب در این ایستگاه محسوس نخواهد بود.



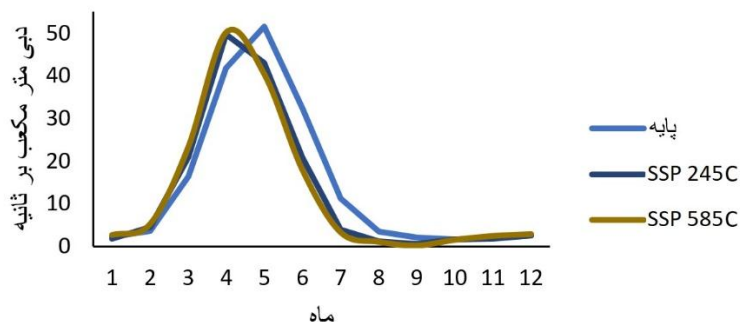
شکل ۹- میانگین رواناب ماهانه دوره مشاهداتی و دوره آتی در ورودی سد لتیان (دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰)

Figure 9. The average monthly runoff of the observation period and the future period at the entrance of the Latiyan dam (period 2021-2040)



شکل ۱۰- میانگین رواناب ماهانه دوره مشاهداتی و دوره آتی در ورودی سد لتیان (دوره زمانی ۲۰۵۱-۲۰۷۰)

Figure 10. The average monthly runoff of the observation period and the future period at the entrance of the Latiyan dam (period 2070-2051)



شکل ۱۱- میانگین رواناب ماهانه دوره مشاهداتی و دوره آتی در ورودی سد لتیان (دوره زمانی ۲۰۸۱-۲۱۰۰)

Figure 11. The average monthly runoff of the observation period and the future period at the entrance of the Latiyan dam (period 2100-2081)

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوزه جاجرود در دوره ۲۰۲۱-۲۱۰۰ با بهره مندی از نتایج حاصل ۵ مدل AOGCM که در مدل LARS-WG وارد شده را در سه دوره پیش بینی ۲۰ ساله ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۰-۲۰۷۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ با استفاده از دو سناریو جدید گزارش ششم یعنی SSP245 و SSP585 و تغییرات بارش و دما همچون متغیر اقلیمی بررسی شد. متغیر درجه حرارت حاصل از شبیه سازی مدل های AOGCM در دوره پایه در قیاس با بازه ۲۱۰۰-۲۰۲۱ روند افزایش را نمایان می کند. نتایج مدلسازی در دوره های زمانی آتی نشان داد که در دو سناریو SSP245 و SSP585 مقادیر دمای حداکثر و حداقل به ترتیب ۵/۴ و ۴/۸ درجه سانتی گراد برای دوره زمانی بلند مدت منتهی به سال ۲۱۰۰ افزایش را تجربه خواهند نمود. این روند مخرب اقلیمی و روبه بالا برای دما تبعات نامطلوبی چون گسترش مناطق خشک و کاهش منابع آبی و به دنبال آن کاهش کیفیت آب را به همراه خواهد داشت. از سوی دیگر با تداوم این الگوی مخرب شاهد تغییر در الگوی بارش منطقه خواهیم بود، به گونه ای که بیشتر بارش های برفی به باران تبدیل خواهند شد. همچنین بارش ها در فصل بهار برای دوره ۲۰۲۱-۲۱۰۰ نیز دچار کاهش محسوسی می گردد. باید اضافه کرد که در فصل تابستان و پاییز بارش ها سیر صعودی پیدا کرده ولی نباید فراموش کرد که میزان تبخیر از سد لتیان نیز متاسفانه بالا خواهد رفت. این موضوع سبب روند کاهشی در یکی از مهم ترین منابع تأمین آب شرب شهر تهران خواهد شد. لذا پیامد های منفی دیگری چون، عدم تأمین به موقع آب شرب و کشاورزی برای مردم و از بین رفتن ثبات محصولات کشاورزی را بدنبال خواهد داشت. بدیهی است هنگامی این مشکلات خود را بیشتر نشان خواهند داد که با پدیده خشکسالی همزمان شود، که در نهایت سبب کاهش آبدی رودخانه ها خواهد شد. با عنایت به این نتایج می شود گفت که در دوره های آینده نه فقط در میزان بارندگی بلکه در الگوی بارندگی نیز تغییرات انجام شده است. از آنجا می شود به

این موضوع پی برد که شاهد جابجایی های زیاد در پیک های رواناب در دوره آینده نسبت به دوره مشاهداتی بودیم.

References

1. Mehrizi M, Morid S, Selvitabar A, Madani K. Evaluating the Impacts of Climate Change and New Developments on Water Scarcity in Iran's Qezelozan-Sefidrood River Basin. Iranian Journal of Irrigation & Drainage, Volume:6 Issue: 2, 2012
2. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for Policymakers. Climate Change the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK. Crossref. 2007.
3. IPCC. Climate Change. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>. 2007
4. Nikakhtar, M., Rahmati, S.H., Massah Bavani, A.R. *et al.* Correction to Mitigating the adverse impacts of climate change on river water quality through adaptation strategies: A Case Study of the Ardak Catchment, Northeast Iran. *Theor Appl Climatol* 155, 9149 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05140-0>
5. Nikakhtar, M., Rahmati, S.H., Massah Bavani, A.R., Babaeian. Surface Water Quality Modeling Using SWAT for Ardak Basin of Mashhad. *J. Env. Sci. Tech.*, Vol 26, Nom 2, May, 2024

- Reservoir System Performance Indicators Under Climate Change (Case Study: Namroud Dam). Scientific Journal of [Ecohydrology](#), University of Tehran. Volume 8, Number 2, Summer 2011, pp. 465-480
12. Ministry of Agricultural Jihad, Statistics and Information Center, 2012
 13. Palmer T.N, Doblas-Reyes F.J, Hagedorn R. Weisheimer A.. Probabilistic prediction of climate using multimodel ensembles. from basics to applications. Philos Trans R Soc B 360:1991–1998. 2005
 14. Racsco P., Szeidl L. & Semenov M.: A serial approach to local stochastic weather models. Ecological Modelling 57, 27-41 .1991
 15. Semenov M.A., Brooks R.J., Barrow E.M. & Richardson C.W.. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. Climate Research 10 , 95-107. 1998
 16. Arnold, J.G., Srinivasan, P., Muttiah, R.S. and Williams J.R. 1998. Large area hydrologic modelling and assessment. Part I. Model development. Journal of the American Water Resources Association, 34: 73–89.
 17. Arnold, J. G., and N. Fohrer.. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. Hydrol. Process. 19(3): 563- 572. 2005
 18. Abbaspour, K.C. SWAT Calibration and Uncertainty Programs. Department. 2008
 19. Morias D.N, Van lew, M.W, Bingner, R.L, Harmer, I.D, Veith, T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic
 6. Hussen ,Behailu, Ayalkebet Mekonnen, Santosh Murlidhar Pingale, Integrated water resources management under climate change scenarios in the sub-basin of Abaya-Chamo, Ethiopia, Modeling Earth Systems and Environment, (2018) <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0438-9>
 7. Wu Y, Liu S, Abdul-Aziz I.M, Hydrological effects of the increased CO2 and climate change in the Upper Mississippi River Basin using a modified SWAT, Climatic Change, Volume 110, pp: 977–1003. (2012)
 8. Savino, M. Todaro, V. Maranzoni, A. D’Oria, M. Combining Hydrological Modeling and Regional Climate Projections to Assess the Climate Change Impact on the Water Resources of Dam Reservoirs. *Water* 2023, 15, 4243. <https://doi.org/10.3390/w15244243>
 9. Lompi, M., Mediero, L., Soriano, E., & Caporali, E. Climate change and hydrological dam safety: a stochastic methodology based on climate projections. *Hydrological Sciences Journal*, 68(6), 745–763. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2192873>, (2023).
 10. Goodarzi M.R, Zahabiyou B, Massah Bavani A.R, Kamal A.R. Performance comparison of three hydrological models SWAT, IHACRES and SIMHYD for the runoff simulation of Gharesou basin. *Water and Irrigation Management*, Vol. 2, No. 1, / <https://doi.org/10.22059/jwim.2012.25090>, Spring 2012.
 11. Kermani A, Babazadeh H, Porhemmat J, Saraei M. Uncertainty Evaluation of

20. Merritt W.S. Alila Y. Barton M. Taylor B. Cohen S. Neilsen D. 2006. Hydrologic response to scenarios of climate change in subwatersheds of the Okanagan basin, British Columbia. Journal of Hydrology 326, 79-108.

Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan www.asabe.org/ (doi: 10.13031/2013.23153) 2007