



Simulating the Effects of Climate Change on Runoff Using the CMIP5 and CMIP6 Climate Models by SWAT Hydrological Model (Case Study: Tashk-Bakhtegan Basin)

M. Fallah Kalaki^{1*}, V. Shokri Kuchak², and H. Ramezani Etedali³

Abstract

Climate change directly affects the hydrological components and water resources and plays an important role in exacerbating potential hazards such as drought and flood. Therefore, it is necessary to study the effects of climate change on hydrological components such as runoff. In this study, the runoff in Tashk-Bakhtegan basin, as one of the most important ecological basins in the country, was investigated in terms of climate change using the SWAT model. Simulation was performed for the near future (2021-2050) by applying climate change conditions in GFDL-ESM2M and IPSL_CMA5_LR models under RCP2.6 and RCP8.5 scenarios and in GFDL-ESM4 and IPSL_CMA6_LR models under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios. The calibration and validation results of the SWAT model using R2, NSH and RMSE indices were in the ranges of (0.70-0.99), (0.51-0.98) and (0.9-14.4 m³/s), respectively which indicated the high accuracy of calibration and validation of the model. Examination of the status of climatic variables of precipitation and minimum and maximum temperature in the conditions of climate change showed an increase in temperature (1.51-2.91 °C) for all models and scenarios and a decrease in precipitation (0.05-11.15 percent) in most models and scenarios. Simulation by SWAT hydrological model in climate change conditions showed runoff decline in all 4 stations under SSP scenarios and runoff rise in 3 stations under RCP scenarios. Given that the climate data of SSP scenarios have recently been made available, the results of this study can be useful to extend the research to the effects of these scenarios on important basins of the country and as a result of policy and planning of water resources under influence climate change.

Keywords: Climate Change, Runoff, RCP and SSP Scenarios, SWAT, Tashk-Bakhtegan Basin.

Received: September 19, 2021

Accepted: November 15, 2021

شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبریز طشک - بختگان)

محمد فلاح کلاکی^{۱*}، وحید شکری کوچک^۲ و هادی رضانی
اعتدالی^۳

چکیده

تغییر اقلیم به صورت مستقیم بر روی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و منابع آبی تأثیرگذار است و نقش مهمی در تشدید خطرات احتمالی همچون خشکسالی و سیلاب دارد. لذا بررسی اثرات تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های آبی همچون رواناب امری ضروری است. از این رو در این مطالعه، وضعیت رواناب حوضه طشک - بختگان به عنوان یکی از مهم‌ترین حوضه‌های کشور از نظر زیست‌محیطی در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل SWAT مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی رواناب با اعمال شرایط تغییر اقلیم برای مدل‌های GFDL-ESM2M و IPSL_CMA5_LR تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و مدل‌های GFDL-ESM4 و IPSL_CMA6_LR تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) انجام شد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از شاخص‌های R2، NSH و RMSE به ترتیب در بازه (۰/۷۰-۰/۹۹)، (۰/۵۱-۰/۹۸) و (۰/۴-۰/۹) متر مکعب بر ثانیه قرار دارد که نشان‌دهنده دقت زیاد واسنجی و اعتبارسنجی مدل است. بررسی وضعیت متغیرهای اقلیمی بارش و دمای حداقل و حداکثر در شرایط تغییر اقلیم، افزایش دما (۱/۵۱-۲/۹۱) درجه سلسیوس برای تمامی مدل‌ها و سناریوها و کاهش بارش (۰/۰۵-۱۱/۱۵) درصد را در اغلب مدل‌ها و سناریوها نشان می‌دهد. شبیه‌سازی مدل هیدرولوژیکی SWAT در شرایط تغییر اقلیم در هر ۴ ایستگاه تحت سناریوهای SSP کاهش رواناب و در ۳ ایستگاه تحت سناریوهای RCP افزایش رواناب را نشان داد. با توجه به اینکه داده‌های اقلیمی سناریوهای SSP به تازگی در دسترس قرار گرفته است، نتایج این تحقیق می‌تواند برای ادامه تحقیق در مورد اثرات این سناریوها بر حوضه‌های مهم کشور و در نتیجه سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی منابع آب در شرایط تغییر اقلیم مفید باشد.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، رواناب، سناریوهای RCP و SSP، SWAT، حوضه آبریز طشک - بختگان.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۶/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲۴

1- Ph.D. Student, Water Resources Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Email: Mohammadfallahkalaki1373@gmail.com

2- M.Sc. Student, Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Water Resources Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.3.20.5](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.3.20.5)

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.



۱- مقدمه

از دهه ۱۹۰۰ میلادی، میانگین جهانی غلظت گازهای گلخانه‌ای به سرعت افزایش یافته است که منجر به تغییر در ویژگی‌های متغیرهای اقلیمی و وقوع بیشتر در حوادث شدید می‌شود (Almazroui et al., 2020). با توجه به این افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و روند گرمایش جهانی، پیش‌بینی می‌شود که تغییرات اقلیمی بر منابع آب و هیدرولوژی تأثیر بگذارد (Kim et al., 2021). هیدرولوژی حوضه تحت تأثیر افزایش دما و تغییر توزیع بارش قرار می‌گیرد و در نتیجه مقدار و در دسترس بودن آب تغییر می‌کند (Aryal et al., 2019). حوادث شدید اقلیمی و تغییرات آن‌ها به طور کلی می‌تواند تأثیرات شدیدی بر جامعه و اکوسیستم‌ها بگذارد و هر ساله خسارات اقتصادی زیادی را به بار آورد. در همین راستا مؤسسه بین‌المللی تغییرات اقلیمی (IPCC) در گزارش پنجم خود (AR5)^۲، به افزایش ریسک خطرات طبیعی همچون خشکسالی و سیلاب که ممکن است در نتیجه تغییرات اقلیمی ایجاد شود، اشاره کرده و هشدار داده است (Houshmand Kouchi et al., 2019). بنابراین پیش‌بینی‌های با دقت زیاد از تغییرات آینده به ویژه تغییرات در رفتار هیدرولوژیکی برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی منابع آب ضروری است تا اطلاعات دقیقی را در راستای سازگاری^۳ و تسکین^۴ ارائه دهد (Wang et al., 2020).

تاکنون، مدل‌های اقلیمی ابزارهای مؤثر بسیاری برای شبیه‌سازی‌های اقلیمی در دوره‌های گذشته و آینده توسعه داده شده است. فاز پنجم پروژه مقایسه متقابل مدل جفت‌شده (CMIP5)^۵ شامل بیش از ۴۰ مدل است و در آن‌ها از مجموعه جدیدی از سناریوهای انتشار به نام نماینده خط سیر غلظت (RCPs)^۶ استفاده شده و اطلاعات اقلیمی ارزشمندی را برای سیاست‌گذاران و جامعه علمی تولید کرده است (Chen and Sun., 2015). سناریوهای RCP بر اساس مقادیر واداشت تابشی (وات بر متر مربع) شامل ۴ سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0، RCP8.5 و RCP8.5 است که برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره آینده معرفی شده‌اند و متوسط افزایش دمای جهانی را تا سال ۲۱۰۰ نسبت به ۳۰ سال گذشته به طور میانگین ۲ درجه سلسیوس پیش‌بینی کرده‌اند (Van Vuuren et al., 2011).

فاز ششم پروژه مقایسه متقابل مدل جفت‌شده (CMIP6)^۷، الگوی تکامل و ویژگی‌های سازگاری فازهای قبلی CMIP را ادامه می‌دهد و شامل سناریوهای جدید سازماندهی شده از مدل‌سازی اقلیمی جهانی است که برای شناخت مکانیسم‌های مختلف آب و هوا طراحی شده است (Eyring et al., 2016). مدل‌های موجود در CMIP6 به طور

کلی وضوح بیشتری همراه با بهبود فرایندهای پویا دارند و سناریوهای انتشار مشترک اجتماعی و اقتصادی SSP/RCP برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی آینده اعمال شده است (O'Neill et al., 2016). خروجی مدل‌های گزارش ششم تحت سناریوهای جدید خطوط سیر بخش‌های مشترک اقتصادی-اجتماعی (SSPs)^۸ هستند و غلظت‌های مختلف گازهای گلخانه‌ای (RCP) را نیز ارائه می‌دهند. سناریوهای گزارش ششم که شامل ۵ زیرگروه اصلی هستند، به شاخص‌های کمی همچون جمعیت، شهرنشینی، توسعه اقتصادی منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای و سناریوهای تعمیم یافته (اثرات، سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری)، برنامه انرژی و تغییرات کاربری اراضی تأکید دارد. از جمله این سناریوها می‌توان به سناریوهای SSP1-1.9، SSP2-4.5، SSP3-7.0، SSP4-3.4، SSP4-6.0، SSP5-3.4 و SSP5-8.5 اشاره کرد.

به‌منظور شناسایی شرایط هیدرولوژیکی منطقه و در پی آن پیش‌بینی آن در آینده و برنامه‌ریزی منابع آب در دسترس، ضروری است که درک صحیحی از تغییرات آب وهوایی در مقیاس‌های مکانی و زمانی وجود داشته باشد (Houshmand Kouchi et al., 2019). مدل‌های گردش عمومی (GCM)^۹ به‌روزترین ابزار در دسترس برای دستیابی به پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و اثرات آن در سطح جهانی است (Sachindra et al., 2018). اما قدرت تفکیک مکانی پایین (۲۵۰ کیلومتر تا ۶۰۰ کیلومتر)، آن‌ها را برای مطالعه غیرقابل اعتماد می‌کند (Taylor et al., 2012). تکنیک مقیاس‌کاهی^{۱۰} یکی از روش‌هایی است که می‌تواند برای بهبود وضوح GCMها استفاده شود (Wilby et al., 1997; Maraun et al., 2010).

همانطور که بیان شد، به دلیل اهمیت پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیک، مطالعات بسیاری در این راستا با استفاده از مدل‌های GCM و سناریوهای RCP انجام شده است (Vetter et al., 2016; Doulabian et al., 2021; Wen et al., 2021; Goodarzi et al., 2020). به عنوان مثال، در مطالعه‌ای که روی ۱۲ حوضه بزرگ دنیا انجام شده است، تغییرات رواناب، تحت تأثیر سناریوهای RCP برای شش مدل GCM مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که عدم قطعیت به وجود آمده تا حد زیادی ناشی از مدل‌های GCM بوده است. بعد از آن نیز سناریوهای RCP موجب بروز عدم قطعیت هستند و کمترین اثر را در ایجاد عدم قطعیت، مدل‌های هیدرولوژیک دارند (Vetter et al., 2016). در مطالعه‌ای که توسط Doulabian et al. (2021) در ایران صورت گرفته است، اثرات تغییر اقلیم تحت سناریوهای RCP مدل‌های GCM مختلف بر روی بارش و دما در دوره آینده بررسی شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان‌دهنده افزایش دما در عموم مناطق کشور است. مقادیر بارش نیز

عموماً کاهش یافته است؛ اما در یزد مقدار بارش افزایش چشم‌گیری داشته است. همچنین در این مطالعه، به استفاده از مدل‌های GCM به صورت ترکیبی تأکید شده است. نتایج مطالعه‌ای که روی رودخانه یانگ تسه انجام شده است نشان می‌دهد که بر اساس سناریوهای RCP شدت حوادث طبیعی (خشکسالی و سیلاب) افزایش پیدا می‌کند (Wen et al., 2021). در مطالعه دیگری که در ایران انجام شده است، Goodarzi et al. (2020) رفتار جریان ورودی به سد سیمره را در شرایط تغییر اقلیم مورد بررسی قرار دادند. به همین منظور در این مطالعه از مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP با روش مقیاس‌کاهی آماری (مدل SDSM)^{۱۱} استفاده شده است. نتایج بدست آمده در این مطالعه حاکی از کاهش مقدار ورودی به سد سیمره بین ۵ تا ۱۳ درصد است. همچنین، در چند سال اخیر بررسی اثرات سناریوهای SSP نیز مورد توجه قرار گرفته است (Kim et al., 2020). برای مثال، در مطالعه‌ای که در حوضه رودخانه هان کره جنوبی انجام شده است از سناریوهای RCP و SSP استفاده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق، نشان می‌دهد که آسیب‌پذیری به دست آمده از سناریوهای SSP که شرایط اجتماعی-اقتصادی را در نظر می‌گیرد تفاوت زیادی را با سناریوهایی که این شرایط را در نظر می‌گیرد، دارد. لذا این موضوع حاکی از اهمیت تأثیر عوامل اجتماعی-اقتصادی در شرایط اقلیمی در آینده دارد (Kim et al., 2020).

حوضه آبریز طشک- بختگان، به واسطه وجود دریاچه‌های طشک و بختگان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و مطالعات مختلفی بر روی آن انجام شده است. خروجی‌های مدل‌های GCM تحت سناریوهای SSP اخیراً در دسترس قرار گرفته است. در صورتی که در پیشینه مطالعات انجام‌شده در کشور و به‌ویژه حوضه آبریز طشک- بختگان، مطالعه‌ای در خصوص بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب تحت سناریوهای SSP که اثر فعالیت‌های اجتماعی-اقتصادی را در نظر می‌گیرد، انجام نشده است. لذا هدف اصلی این پژوهش، بررسی تغییرات مؤلفه‌های اقلیمی و رواناب در شرایط سناریوهای انتشار (RCP) در گزارش پنجم و سناریوهای (SSP) که ترکیب مقادیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و فعالیت‌های اجتماعی-اقتصادی است، می‌باشد. نتایج این مطالعه می‌تواند برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی منابع آب در آینده مؤثر باشد. از همین رو، در این مطالعه به مقایسه اثرات تغییر اقلیم بر رواناب ۴ ایستگاه سد درودزن، سد سیوند، سد ملاصدرا و ورودی به دریاچه‌ی بختگان در حوضه طشک- بختگان تحت سناریوهای (RCP (RCP2.6, RCP8.5 و SSP (SSP1-2.6, SSP5-8.5) پرداخته می‌شود. همچنین با محاسبه همبستگی بین بارش و دما و رواناب به بررسی تأثیر هر کدام از متغیرهای اقلیمی بارش و دما بر رواناب پرداخته شده است. به همین منظور از مدل‌های GFDL-ESM2, GFDL-ESM4M, IPSL-CMA5A-) GCM (LR, IPSL-CMA6-LR برای دریافت داده‌های تغییر اقلیم و مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژیک، استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مطالعاتی

حوضه طشک- بختگان در طول جغرافیایی ۴۲° ۵۱' تا ۳۳° ۵۴' شرقی و عرض جغرافیایی ۰۲° ۲۹' تا ۱۵° ۳۱' شمالی (شکل ۱) با مساحت کل تقریباً ۲۷۵۲۰ کیلومتر مربع واقع شده است. حوضه آبریز طشک- بختگان بخش‌هایی از مناطق شمال، مرکز و جنوب شرقی

کاربرد مدل‌ها در مطالعات هیدرولوژیک تبدیل به یک ابزار ضروری برای درک فرآیندهای طبیعی در مقیاس حوضه آبریز شده است. تعداد زیادی از مدل‌های هیدرولوژیک، برای برنامه‌های کاربردی در مدل‌سازی هیدرولوژیک و مطالعات منابع آب توسعه داده شده است. این مدل‌ها به‌طور فزاینده‌ای برای تجزیه و تحلیل مقدار و کیفیت جریان، پیش‌بینی سیل، سیستم مخزن، توسعه منابع آب زیرزمینی، حفاظت از آب‌های سطحی و زیرزمینی، سیستم توزیع آب، کاربری آب، مطالعه تأثیر آب‌وهوا و زمین، محیط‌زیست و طیف وسیعی از فعالیت‌های مدیریت آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Wurbs, 1998; Singh and Woolhiser, 2002). ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT)^{۱۲}، یک مدل مفهومی و نیمه توزیعی است که توسط گروهی از وزارت کشاورزی ایالات متحده (USDA)^{۱۳} تهیه شده است (Arnold et al., 1998; Arnold and Fohrer, 2005). مدل SWAT در سالیان اخیر به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در شرایط تغییر اقلیم، مورد استفاده قرار گرفته است (Houshmand et al., 2021; Kim et al., 2021; Rabezanahary et al., 2021). به عنوان مثال، در مطالعه‌ای در حوضه آبریز مند، تغییرات جریان ورودی به سد سلمان تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی RCP2.6

ویژه برای پرندگان مهاجر عمل می‌کنند. حوضه طشک- بختگان، یک حوضه کارستی نیمه خشک با متوسط بارندگی سالانه ۳۲۰ میلی‌متر و متوسط تبخیر سالانه از ۱۷۶۳/۱ تا ۲۸۴۹/۴ میلی‌متر متغیر است (MOE, 2017).

استان فارس را تشکیل داده است. این حوضه شامل ۴ زیر حوضه و ۲۲ محدوده مطالعاتی است که توسط اداره آب منطقه‌ای فارس مشخص شده است. دریاچه‌های طشک و بختگان، مقصد تمام رودخانه‌های حوضه هستند و به عنوان زیستگاه‌های مهم طبیعی، به

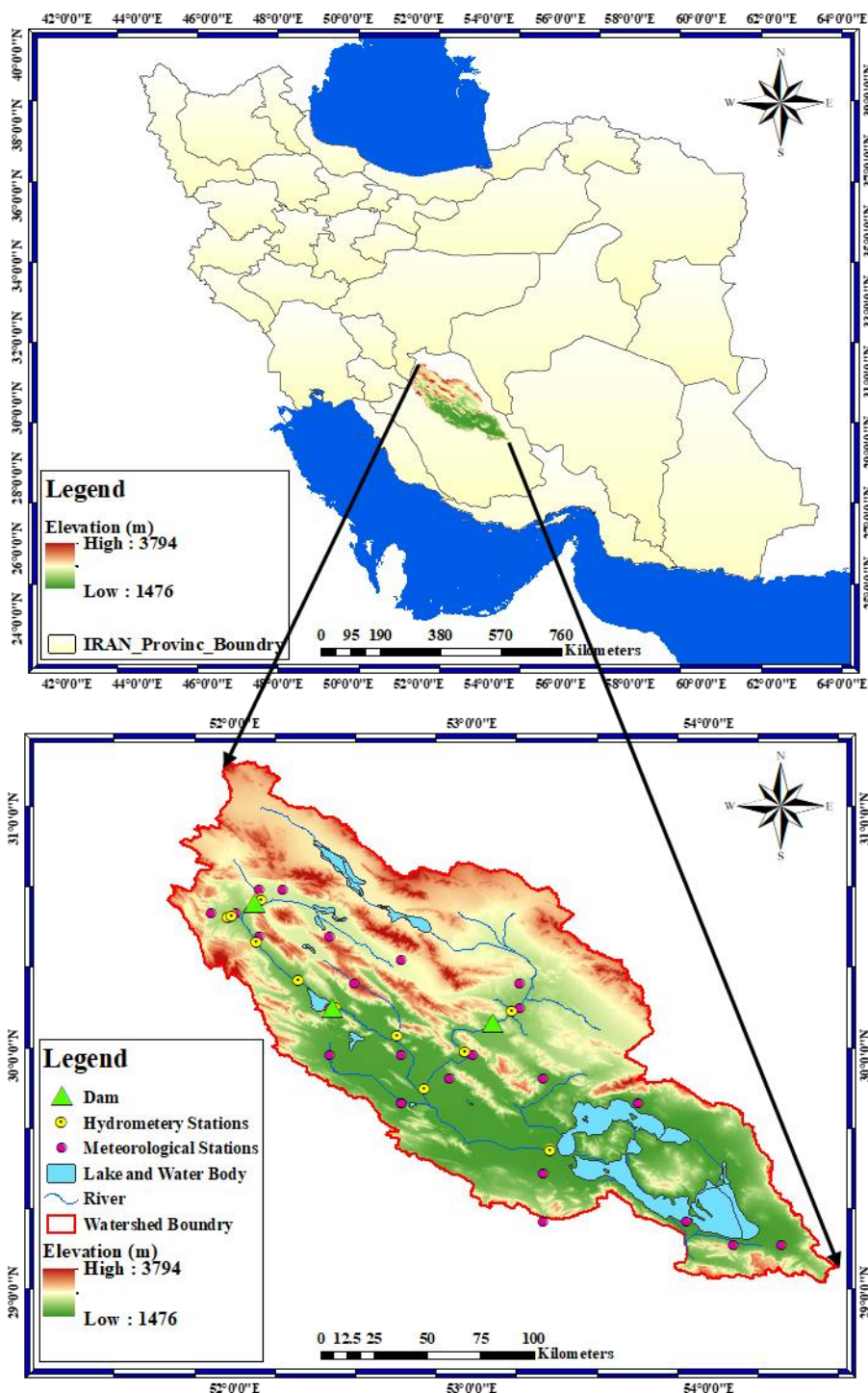


Fig. 1- The geographical location of the case study area

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

برنامه و قابلیت اصلاح فرآیندها و روابط مورد استفاده در آن، نسخه‌های متعددی از آن منتشر شده است. مدل SWAT برای شبیه‌سازی حوضه، ابتدا آن را به چند زیرحوضه تقسیم می‌کند. هر زیرحوضه نیز بسته به میزان تنوع به چند قسمت دیگر به نام واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU)^{۱۴} تقسیم می‌شوند. این واحدها قسمت‌های درون هر زیرحوضه هستند که دارای نوع خاک، کاربری اراضی و شیب یکسانی هستند (Arnold et al., 1998). بدین ترتیب از نظر مکانی، کوچک‌ترین واحد محاسباتی مدل SWAT، واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) می‌باشد. در مدل نیز چرخه هیدرولوژیکی بر اساس معادله بیلان آب برای هر HRU، طبق رابطه (۱) شبیه‌سازی می‌گردد:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

در رابطه (۱)؛ SW_t مقدار آب در خاک در زمان t ، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک و R_{day} ، Q_{surf} ، E_a ، W_{seep} و Q_{gw} نیز به ترتیب عبارت‌اند از مقدار بارندگی، رواناب سطحی، تبخیر-تعرق، آب نفوذ یافته از خاک به لایه آب غیراشباع و آب برگشتی از آب‌های زیرزمینی در زمان t .

در این مطالعه از مدل SWAT FARS که توسط Delavar et al. (2020) توسعه داده شده استفاده شده است. داده‌ها و منابع به کار گرفته شده برای توسعه مدل SWAT FARS در جدول ۱ نشان داده شده است و شامل بخش‌های سنجش از دور (مانند: نقشه DEM، خاک و کاربری زمین)، آب و هوا، مدیریت کشاورزی و داده‌های ساختار آبی است. در نهایت حوضه طشک-بختگان به ۵۶ زیرحوضه و ۲۲۴۵ HRU تقسیم‌بندی شده است.

همچنین، در این حوضه پارامترهای هواشناسی بسیار متغیر است؛ به گونه‌ای که در آن نقاط سردسیری با حداقل دمای مطلق ۲۸- درجه سلسیوس در مناطق شمال و شمال غربی تا مناطق گرمسیری با حداکثر دمای مطلق ۴۲ درجه سلسیوس در نواحی جنوب و جنوب شرقی مشاهده می‌گردد (Abbasi et al., 2020). حوضه از مناطق کشاورزی با آبیاری گسترده تشکیل شده است. بیش از ۶۰ درصد آبیاری‌ها به منابع آب زیرزمینی وابسته است. این حوضه در طول قرن‌ها، منابع مهمی را برای فعالیتهای مهم اجتماعی، اقتصادی و اکولوژیکی فراهم کرده است. با این حال، این منطقه بیش از ۵۰ سال است که از کمبود آب رنج می‌برد. برای رفع این کمبود آب، چندین مخزن در دهه‌های اخیر ساخته شده است (Delavar et al., 2020). این حوضه دارای ۳ سد مخزنی به نام‌های سد درودزن، سد سیبویید (سیوند) و سد ملاصدرا (تنگ براق) می‌باشد که سد درودزن با حجم ۹۶۰ میلیون مترمکعب و با تنظیم آب ۵۲۶ میلیون مترمکعب بزرگترین سد این حوضه بوده و سد ملاصدرا با حجم ۴۴۰ میلیون مترمکعب و با حجم تنظیم آب سالیانه ۳۲۹ میلیون مترمکعب دومین سد بزرگ این حوضه می‌باشد (Abbasi et al., 2020).

۲-۲- شبیه‌سازی هیدرولوژیکی SWAT

SWAT، مدلی مفهومی و نیمه توزیعی بوده و توانایی پیش‌بینی اثر اقدامات مدیریتی روی کمی و کیفیت آب در حوضه‌های مختلف، با شرایط متنوع خاک و پوشش گیاهی را دارا است. این مدل در مرکز تحقیقات کشاورزی آمریکا توسعه داده شده و با توجه به باز بودن کد

Table 1- Data description and sources (Delavar et al., 2020)
جدول ۱- تشریح داده‌ها و منابع (Delavar et al., 2020)

Data Type	Resolution/Characteristics	Source
DEM	30 m	Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER GDEM2), http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/
Soil	1 km	Harmonized world soil database, http://www.fao.org/nr/land/soils/digital-soil-map-of-the-world/en/
Land use	30 m for 1987, 2000 and 2015	Iran Water Research Institute
Climate	26 Stations	Iranian Meteorological Organization
River discharge	11 Stations	Ministry of Energy
Crop yield	Major cropping pattern	Iranian Ministry of Agriculture Jihad (MOJA)
Agricultural management and water resources	Planting, harvesting, fertilization-blue water use	Iranian Ministry of Agriculture Jihad (MOJA)
Population and water use rate	-	Iran National Water Document (INWD) (Alizadeh et al., 2007) Master Plan
Dam characteristic and operation	-	Iran Comprehensive Water Management Plan
		Iran Water Management Company

$$R^2 = \frac{[\sum_i(Q_{i,o} - \bar{Q}_o)(Q_{i,s} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i(Q_{i,o} - \bar{Q}_o)^2 \sum_i(Q_{i,s} - \bar{Q}_s)^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - Q_{i,s})^2} \quad (4)$$

۲-۳- مدل‌ها و سناریوهای تغییر اقلیم مورد استفاده

به منظور اجرای مدل SWAT-FARS در دوره آینده به داده‌های بارش و دمای حداقل و حداکثر روزانه نیاز است. از این رو، خروجی مدل‌های IPSL-CMA5-LR و GFDL-ESM2M تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و مدل‌های GFDL-ESM4 و IPSL-CMA6-LR تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 از پروژه ISI-MIP Fast Track¹⁵ با قدرت تفکیک مکانی $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ برای محدوده حوضه طشک- بختگان از درگاه ESGF¹⁶ به نشانی <https://esg.pik-potsdam.de/search/isimip/> دریافت شد (Hempel et al., 2013).

فایل‌های موجود در این منبع، برای مقیاس جهانی به فرمت NetCDF¹⁷ موجود است؛ اما برای دریافت داده‌ها در مقیاس محلی همچون این مطالعه، می‌توان داده‌ها را به فرمت ACSII استخراج کرد و سپس به فرمت ورودی به مدل SWAT تبدیل کرد که در این مطالعه به همین شکل انجام شده است.

تحلیل حساسیت پارامترهای مدل به منظور بررسی میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر خروجی‌های مدل و انتخاب بهینه پارامترهای واسنجی مدل از اهمیت زیادی برخوردار است. روش‌های گوناگونی به منظور تحلیل حساسیت، واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. Yang et al. (2008) پنج روش معمول در واسنجی مدل SWAT، شامل GLUE، ParaSol، SUFI-2، MCMC و BIS را مورد مقایسه قرار دادند و نتیجه‌گیری نمودند روش SUFI-2 روش بهینه‌ای برای استفاده در این زمینه می‌باشد. لذا در توسعه مدل SWAT-FARS نیز از این روش در نرم‌افزار SWAT-CUP برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT استفاده شده است. اساس کار الگوریتم SUFI-2 تولید تعداد زیادی مجموعه تصادفی از پارامترهای مورد نظر برای واسنجی مدل در دامنه تعریف شده برای هر پارامتر مبتنی بر روش نمونه‌گیری مربع لاتین می‌باشد. سپس، این مجموعه پارامترها جداگانه در مدل قرار داده شده و مقدار تابع هدف بر اساس متغیرهای مورد نظر برای هر مجموعه پارامتر استخراج می‌گردد (Yang et al., 2008). نتایج تحلیل حساسیت مدل SWAT-FARS در مطالعه Delavar et al. (2020) به تفصیل ارائه شده است که خلاصه آن در جدول ۲ نمایش داده شده است. برای ارزیابی عملکرد نتایج مدل SWAT-FARS از شاخص‌های آماری ضریب نش- ساتکلیف (NSH)، ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است. روابط این شاخص‌ها در روابط (۲) تا (۴) نشان داده شده است.

$$NSH = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - Q_{i,s})}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,o} - \bar{Q}_o)} \right] \quad (2)$$

Table 2- Summary of sensitivity analysis and t-stat and p-value on the parameters of SWAT-FARS model (Delavar et al., 2020)

جدول ۲- خلاصه تحلیل حساسیت و t-stat و p-value بر روی پارامترهای مدل (Delavar et al., 2020) SWAT-FARS

Rank	Parameter	Definition	t-Stat	p-value	Initial range	Final range
1	CN2.mgt	SCS runoff curve number	42.09	0.00	40-90	53-79
2	GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for return flow	25.21	0.00	100-2000	650-1250
3	SOL_Z(1).sol	Thickness of first soil layer	4.16	0.00	(-0.5)-0.5	(-0.32)-0.05
4	SOL_Z(2).sol	Thickness of second soil layer	2.20	0.03	(-0.5)-0.5	(-0.32)-0.05
5	ALPHA_BF.gw	Base flow alpha factor	-2.16	0.03	0.01-1	0.04-0.42
6	TLAPS.sub	Temperature gradient	1.45	0.15	(-8)-(-5)	(-7.5)-(-5.8)
7	SOL_K (..) .sol	Hydraulic conductivity of soil	-0.83	0.41	(-0.5)-0.5	(-0.11)-0.24
8	SOL_AWC (..) .sol	Available water capacity of the soil layer	-0.75	0.45	(-0.5)-0.5	(-0.22)-0.37
9	GW_DELAY.gw	Groundwater delay	-0.73	0.46	1-60	12-47
10	SFTMP.bsn	Threshold temperature of Snowfall	-0.71	0.48	(-0.5)-3	0.2
11	SMTMP.bsn	Threshold temperature of Snow melt	0.49	0.62	(-0.5)-3	0.5
12	PLAPS.sub	Annual precipitation gradient	0.45	0.65	(-0.2)-0.2	(-0.03)-0.18
13	GW_REVAP.gw	groundwater Evaporation coefficient	0.20	0.84	0-0.2	0.01-0.07
14	REVAPMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for revap to occur	0.19	0.85	100-2000	700-1300

$$P_{corrected} = P_{GCM} \times \frac{\bar{P}_{reference}}{\bar{P}_{GCM}} \quad (5)$$

$$T_{corrected} = T_{GCM} \times (T_{reference} - T_{GCM}) \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۵) و (۶)، P و T بیانگر بارش (میلی‌متر) و دما (درجه‌ی سلسیوس) است (Jones and Hulme, 1996).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

به‌منظور شبیه‌سازی رواناب در این مطالعه از مدل توسعه داده شده SWAT-FARS استفاده شده است (Delavar et al., 2020). همانطور که ذکر شد، برای واسنجی جریان در ۱۱ ایستگاه هیدرومتری در سطح حوضه از الگوریتم واسنجی SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شده است. بر اساس تحلیل حساسیت پارامترها توسط نرم‌افزار SWAT-CUP، پارامترهایی که بیشترین نقش را بر شکل‌گیری رواناب سطحی و جریان پایه در مدل ایفا می‌نمایند برای واسنجی استفاده شدند (جدول ۲). با توجه به نحوه تنظیم مدل با استفاده از نقشه‌های کاربری در دسترس و دوره دسترسی داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، دوره شبیه‌سازی مدل بین سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵ در نظر گرفته شد. پنج سال اول دوره نیز به عنوان گرم کردن مدل در نظر گرفته شد. واسنجی مدل برای دوره ۱۵ ساله اول (۱۹۹۰ الی ۲۰۰۵) صورت گرفت و ۱۰ سال انتهایی دوره (۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵) نیز برای اعتبارسنجی عملکرد مدل استفاده شد. لازم به ذکر است هر یک از این پارامترها برای HRUهای مختلف به‌طور جداگانه واسنجی شدند. بدین منظور ابتدا مقادیر پارامترها برای زیرحوضه‌های بالادست ایستگاه‌های هیدرومتری در هر حوضه واسنجی گردیده و سپس واسنجی پارامترها در زیرحوضه‌های پایین‌دست با اعمال مقادیر بهینه پارامترهای زیرحوضه‌های بالادست انجام شد. نتایج ارزیابی مدل SWAT-FARS در دوره واسنجی و اعتبارسنجی برای ایستگاه مورد نظر در این مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل، عملکرد قابل قبولی را در ایستگاه‌های مورد نظر داراست.

پروژه مقایسه بین الگوهای تأثیر بین بخشی (ISI-MIP) توسط مؤسسه بین‌المللی تحلیل سیستم‌های کاربردی (IIASA) و مؤسسه تحقیقات آب و هوایی پوتسدام (PIK) آغاز شد و اولین دوره آن با عنوان ISI-MIP Fast Track از ابتدای سال ۲۰۱۲ تا اواسط سال ۲۰۱۳ با تمرکز بر اثرات بین بخشی از سطوح مختلف گرمایش جهانی انجام شد. هدف از انجام این پروژه، کمی‌سازی عدم قطعیت در بر سناریوها و مدل‌های تغییر اقلیم بوده است که اثرات تغییر اقلیم را بر بخش‌های مختلفی همچون آب بررسی می‌کند. همچنین در این پروژه ۲۸ مدل تأثیر جهانی همچون VIC²⁰ و SWAT گرد هم آورده شده است (Warszawski et al., 2014). مدل‌های اقلیمی پروژه ISI-MIP Fast Track برای سناریوهای RCP که در سال ۲۰۱۲ انتخاب شده‌اند، عبارتند از: (-IPSL, HadGem-ES, GFDL-ESM2, CMA5-LR, MIROC-ESM-CHEM, and NorESM1-M و این مدل‌ها بر اساس تغییرات متوسط دمای جهانی (Δ GMT) و تغییرات نسبی بارندگی انتخاب شدند. اخیراً در سال ۲۰۲۱ مدل‌های اقلیمی برای سناریوهای SSP (-IPSL-CMA6, GFDL-ESM4, LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0 and UKESM1-0-LL) نیز در این پروژه انتخاب شده و در دسترس قرار گرفته است.

متغیرهایی اقلیمی که از مدل‌های GCM دریافت می‌شود، معمولاً انحرافات نسبت به دوره تاریخی مشاهداتی خواهد داشت. از این رو نیاز است قبل از استفاده از این داده‌ها، اصلاح آریبی انجام شود. در همین راستا، پروژه ISI-MIP با استفاده از متغیرهای اقلیمی پایگاه WATCH Forcing Data با قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ درجه و دوره ۴۰ ساله ۱۹۶۰-۱۹۹۹ اصلاح آریبی خروجی‌های مدل‌های GCM را انجام داده است (Hempel et al., 2013). همچنین، دیگر محدودیت مدل‌های GCM، بزرگ مقیاس بودن خروجی‌های آن است که با استفاده از روش‌های مقیاس‌کاهی به مقیاس‌های کوچکتر تبدیل می‌شوند. بدین منظور در پروژه ISI-MIP از روش مقیاس‌کاهی آماری عامل تغییر (رابطه‌های ۵ و ۶) استفاده شده است.

Table 3- Results of calibration and validation of discharge in stations in this study (Delavar et al., 2017)

جدول ۳- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی جریان در ایستگاه‌های مورد نظر در این مطالعه (Delavar et al., 2017)

Station	Calibration			Validation		
	R ²	RMSE (m ³ /s)	NSH	R ²	RMSE (m ³ /s)	NSH
Molasadra Dam	0.78	9.93	0.60	0.88	14.14	0.52
Dorudzan Dam	0.99	5.94	0.98	0.98	9.46	0.98
Sivand Dam	0.81	9.28	0.59	0.71	10.32	0.55
Hasan abad (inflow into Bakhtegan Lake)	0.73	1.04	0.58	0.70	0.90	0.51

۳-۲- بررسی وضعیت حوضه در شرایط تغییر اقلیم

۳-۲-۱- بررسی تغییرات بارش و دمای حوضه در شرایط تغییر اقلیم

نشان داد که مدل‌های GCM مورد استفاده در این مطالعه تحت سناریوی RCP با هم توافق نداشته‌اند؛ در حالی که، در نتایج سناریوهای SSP این توافق در نتایج مشاهده شده است. به طوری که مدل GFDL-ESM2M تحت سناریوی RCP2.6، افزایش ۱/۱۹ درصدی و تحت سناریوی RCP8.5، کاهش ۰/۰۵ درصدی بارش را در دوره آینده نسبت به دوره گذشته نشان می‌دهد. اما مدل IPSL-CMA5-LR تحت هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 (۹/۸۲- و ۵/۶۶- درصد) کاهش بارش را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده برای مدل‌های GFDL-ESM4 و IPSL-CMA5-LR تحت هر ۲ سناریوی SSP مورد بررسی کاهش بارش را در دوره آینده نشان می‌دهد به صورتی که این کاهش بارش بیشتر از سناریوهای RCP بوده است.

۳-۲-۲- بررسی تغییرات رواناب در شرایط تغییر اقلیم

پس از شبیه‌سازی رواناب ایستگاه‌های مورد بررسی در مدل SWAT-FARS با استفاده از داده‌های بارش و دمای دوره آینده تحت سناریوهای RCP و SSP، مقادیر متوسط رواناب ماهانه و سالانه و درصد تغییرات آن در دوره آینده نسبت به دوره گذشته در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. همانطور که در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است، مقدار رواناب در دوره آینده در شرایط تغییر اقلیم در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 افزایش و در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 کاهش یافته است. بالاترین مقدار افزایش توسط داده‌های اقلیمی مدل IPSL-CMA5_LR تحت سناریوی RCP8.5 با نرخ ۱/۶۴ در ورودی به دریاچه بختگان و کمترین مقدار آن توسط مدل IPSL-CMA5_LR تحت سناریوی RCP8.5 با نرخ ۰/۰۶ در ورودی سد ملاصدرا گزارش شده است. همچنین، بالاترین مقدار کاهش توسط داده‌های اقلیمی مدل IPSL-CMA5_LR تحت سناریوی SSP5-8.5 با نرخ ۰/۸۱- در ورودی به دریاچه‌ی بختگان و کمترین مقدار آن توسط مدل IPSL-CMA5_LR تحت سناریوی RCP2.6 با نرخ ۰/۰۳- در ورودی سد درودزن گزارش شده است (شکل ۴).

نتایج حاصل از مقیاس‌گامی و اصلاح اریبی مدل‌های GCM مورد استفاده در این مطالعه تحت سناریوهای RCP و SSP برای متغیرهای اقلیمی (دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش) در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین، مقایسه نتایج تغییرات متغیرهای اقلیمی بارش و دمای حداقل و حداکثر در شرایط تغییر اقلیم برای ۴ سناریو مورد بررسی در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج بدست‌آمده برای تمامی ۴ مدل GCM مورد بررسی، افزایش دمای حداقل و حداکثر را در دوره آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱) نسبت به دوره (۲۰۱۰-۱۹۸۱) نشان می‌دهد. با توجه به نتایج برای سناریوهای SSP دمای حداکثر و برای سناریوهای RCP دمای حداقل افزایش بیشتری داشته است. همچنین، سناریوهای بدبینانه یا حد بالا (RCP8.5 و SSP5-8.5) افزایش دمای حداقل و حداکثر بیشتری را نسبت به سناریوهای خوش‌بینانه یا حد پایین (RCP2.6 و SSP1-2.6) داشته است. به‌طور کلی بیشترین افزایش دما در سناریوهای RCP را مدل IPSL-CMA5-LR تحت سناریوی RCP8.5 برای دمای حداقل (۲/۹۱ درجه سلسیوس) و کمترین افزایش دما را در سناریوهای RCP، مدل GFDL-ESM2M تحت سناریوی RCP2.6 برای دمای حداکثر (۱/۵۱ درجه سلسیوس) نشان داده است. همچنین، بیشترین افزایش دما در سناریوهای SSP را مدل IPSL-CMA6-LR تحت سناریوی SSP5-8.5 برای دمای حداکثر (۲/۷۲ درجه سلسیوس) و کمترین افزایش دما را در سناریوهای SSP، مدل GFDL-ESM4 تحت سناریوی SSP1-2.6 برای دمای حداقل (۱/۶۲ درجه سلسیوس) نشان داده است. Houshmand Kouchi et al. (2019) نیز مدل IPSL-CMA5-LR را تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در حوضه مند که در جنوب حوضه طشک-بختگان واقع شده است، مورد بررسی قرار دادند که همانند این مطالعه افزایش دمای بیشتری برای دمای حداقل و سناریوی RCP8.5 (۲/۰۲ درجه سلسیوس) نسبت به دمای حداکثر و سناریوی RCP2.6 (۱/۲۶ درجه سلسیوس) مشاهده شد (Houshmand Kouchi et al., 2019). بررسی بارش حوضه طشک-بختگان در شرایط تغییر اقلیم،

Table 4- Changes in the long-term average of annual climatic variables of GCM models used under RCP and SSP scenarios in the future period (2050-2021) compared to the previous period (1980-2015)

جدول ۴- تغییرات میانگین بلندمدت متغیرهای اقلیمی سالانه‌ی مدل‌های GCM مورد استفاده تحت سناریوهای RCP و SSP در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) نسبت به دوره گذشته (۲۰۱۰-۱۹۸۱)

Climate Variable	GFDL-ESM2M		IPSL-CMA5-LR		GFDL-ESM4		IPSL-CMA6-LR	
	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
Minimum Temperature (°C)	2.12	2.58	2.59	2.91	1.62	2.03	2.19	2.52
Maximum Temperature (°C)	1.51	2.38	2.11	2.73	1.94	2.63	2.40	2.72
Precipitation (%)	1.19	0.05-	-5.82	-7.66	-10.76	-11.15	-8.31	-9.62

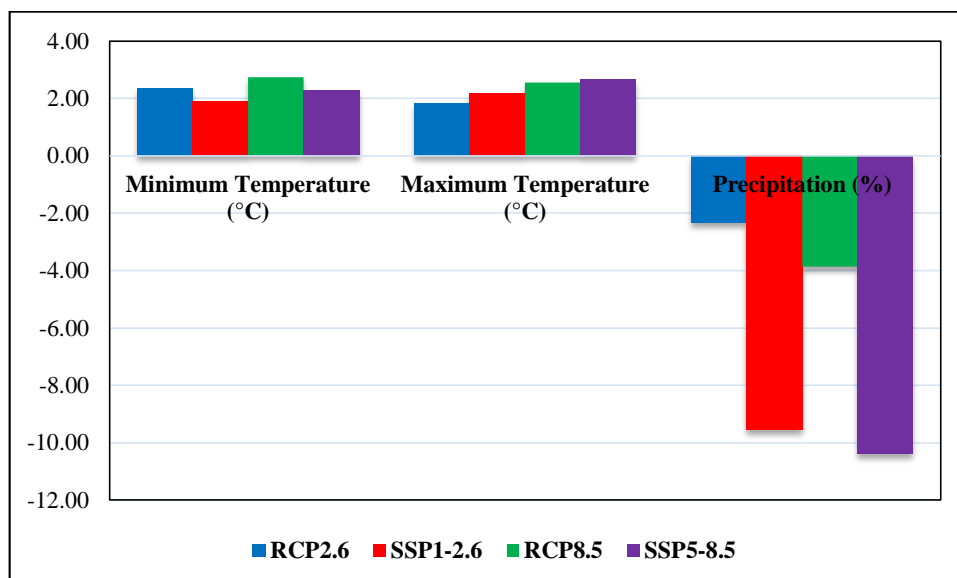


Fig. 2- Changes in the long-term average of climatic variables under RCP and SSP scenarios in the future period (2050-2021) compared to the previous period (1980-2010)

شکل ۲- تغییرات میانگین بلندمدت متغیرهای اقلیمی تحت سناریوهای RCP و SSP در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) نسبت به دوره گذشته (۲۰۱۰-۱۹۸۱)

با تاخیرهای یک و دو ماهه با تأثیر بر مقدار تبخیر، تأثیر بیشتری بر مقدار رواناب داشته است.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پیش‌بینی مؤلفه‌های آبی در دوره‌های آینده امری ضروری برای سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب است. به همین منظور در این مطالعه، اثرات تغییرات اقلیمی در حوضه طشک- بختگان در دوره گذشته (۲۰۱۰-۱۹۸۱) و آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT (مدل توسعه‌داده‌شده SWAT-FARS) بر رواناب مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی صورت‌گرفته برای مدل‌های IPSL_CMA5_LR و GFDL_ESM2M تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و مدل‌های IPSL_CMA6_LR و SSP1-2.6 و SSP5-8.5 انجام شده است. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر قابل جمع‌بندی می‌باشد:

نتایج تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT-FARS نشان داد که مدل بیشترین حساسیت را به پارامترهای کنترل‌کننده رواناب در حوضه همچون شماره منحنی (CN) دارد (Delavar et al., 2017).

با توجه به افزایش دما و کاهش بارش در عمده موارد بررسی شده، کاهش رواناب در دوره آینده مورد انتظار می‌باشد. در حالی که با وجود افزایش دما و کاهش بارش در سناریوهای RCP، رواناب در دوره آینده افزایش پیدا کرده است که می‌تواند به دلیل الگوی بارشی ارائه شده توسط مدل‌ها و سناریوهای تغییر اقلیم باشد. به طوری که با افزایش بارش‌های با شدت کمتر و کاهش بارش‌های با شدت بالا رواناب حوضه می‌تواند افزایش داشته باشد. در مطالعه Abbaspour et al. (2009) در بخش جنوب غربی ایران نیز به این موضوع اشاره شده است.

مقادیر همبستگی بین متغیرهای اقلیمی (بارش و دمای حداقل و حداکثر) و رواناب ۴ ایستگاه مورد بررسی در شرایط تغییر اقلیم در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مقادیر رواناب در دوره آینده رابطه مستقیمی با بارش و رابطه عکس با مقادیر دمای حداقل و حداکثر را داراست. همچنین، نتایج حاکی از تأثیرپذیری بیشتر رواناب از بارش نسبت به دما است. بررسی ارتباط رواناب با بارش و دما با تاخیرهای یک و دو ماهه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر رواناب شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل SWAT-FARS بیشترین ارتباط را با بارش (حداکثر ۰/۸۱) را در حالت بدون تأخیر زمانی داشته‌اند و مقادیر بارش یک و دو ماه قبل تأثیر کمتری بر آن دارد. در حالی که بر خلاف بارش مقادیر دمای حداقل و حداکثر

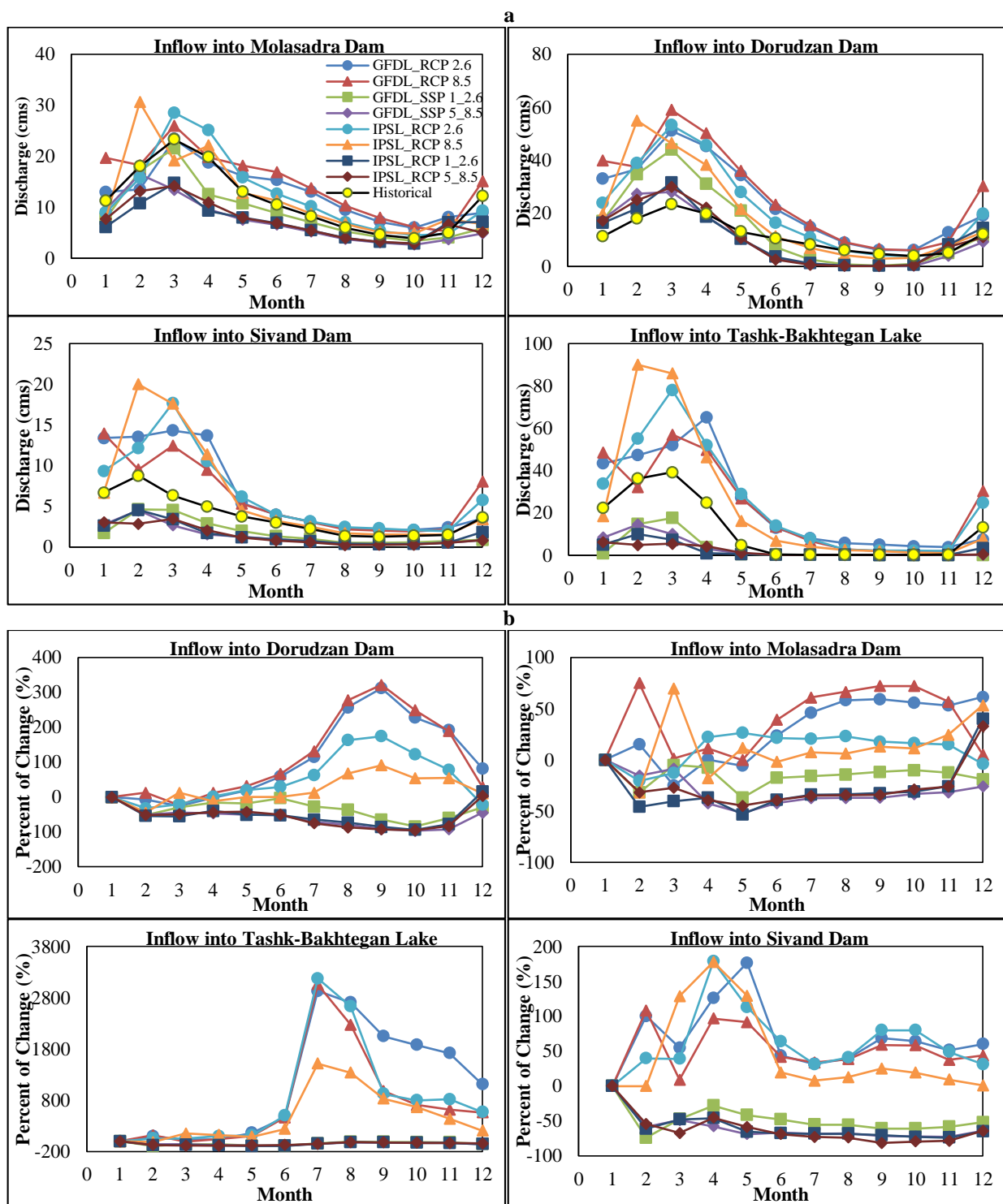
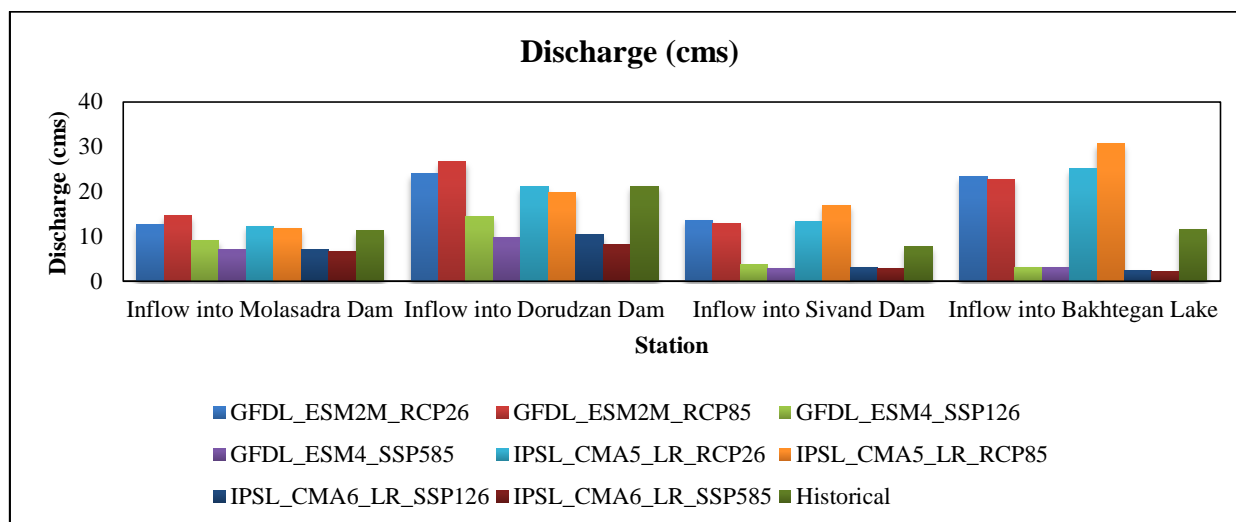
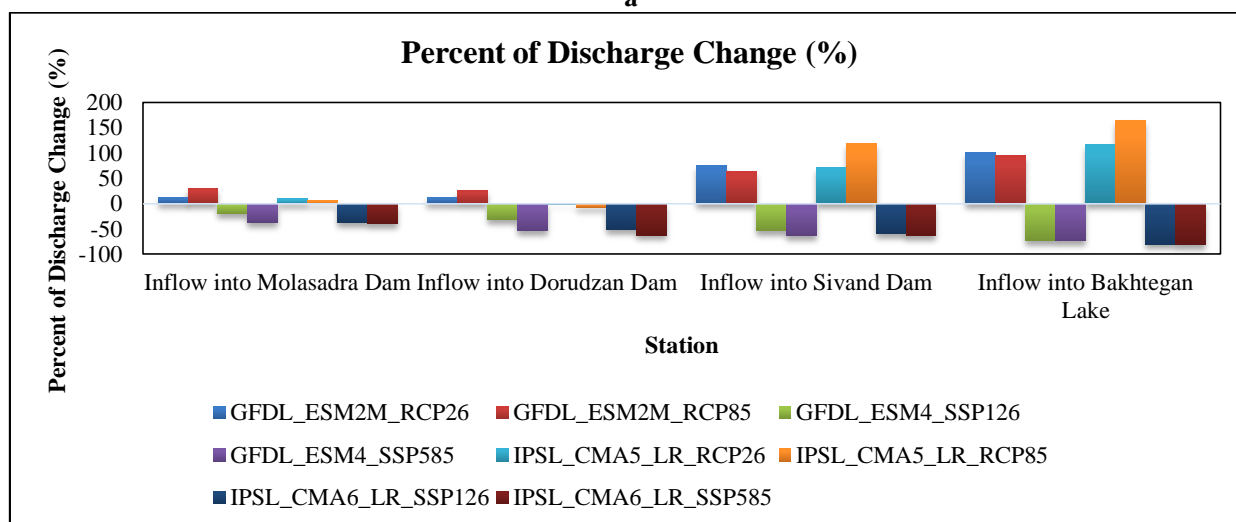


Fig. 3- Monthly mean discharge status in the context of climate change for GCM models and scenarios under consideration (a: discharge values in the past and future; b: percentage of Discharge changes in the future compared to the previous period)

شکل ۳- وضعیت میانگین رواناب ماهانه در شرایط تغییر اقلیم برای مدل‌های GCM و سناریوهای مورد بررسی (a: مقادیر رواناب در دوره گذشته و آینده؛ b: درصد تغییرات رواناب در دوره آینده نسبت به دوره گذشته)



a



b

Fig. 4- Annual mean discharge status in the context of climate change for GCM models and scenarios under consideration (a: discharge values in the past and future; b: percentage of discharge changes in the future compared to the previous period)

شکل ۴- وضعیت میانگین رواناب سالانه در شرایط تغییر اقلیم برای مدل‌های GCM و سناریوهای مورد بررسی (a: مقادیر رواناب در دوره گذشته و آینده؛ b: درصد تغییرات رواناب در دوره آینده نسبت به دوره گذشته)

درحالی‌که، سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 افزایش دمای بیشتر را برای دمای حداکثر نشان داده‌اند که سبب افزایش میزان تبخیر تعرق و در نتیجه کاهش رواناب در دوره آینده می‌شود.

- بر خلاف نتایج دمای مدل‌های GCM، نتایج مقیاس‌کاهی بارش آن‌ها با هم توافق ندارند. محدوده عدم قطعیت پیش‌بینی بارش از ۱/۱۹ درصد افزایش تا ۷/۶۶ درصد کاهش تحت سناریوهای RCP و از ۸/۳۱ تا ۱۱/۱۵ درصد کاهش تحت سناریوهای SSP متفاوت است. مدل GFDL_ESM2M تحت سناریوی RCP2.6 افزایش بارش و

همچنین، ارزیابی نتایج مدل با استفاده از شاخص‌های R^2 ، NSH و RMSE در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد که شبیه‌سازی مؤلفه‌های آبی مدل SWAT-FARS از دقت قابل‌قبولی برخوردار است.

- نتایج حاصل از مؤلفه‌های اقلیمی دمای حداقل و حداکثر روزانه مدل‌های GCM تحت هر ۴ سناریوی مورد بررسی حاکی از افزایش دمای حوضه در دوره آینده است. به‌طوری‌که سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 افزایش دمای بیشتری را برای دمای حداقل گزارش کرده‌اند.

- شبیه‌سازی رواناب با مدل SWAT-FARS با استفاده داده‌های اقلیمی (بارش و دمای حداقل و حداکثر) مدل‌های GCM تحت سناریوهای پروژه‌های CMIP5 و CMIP6، نتایج متفاوتی را داشته است. رواناب دوره آینده در شرایط تغییر اقلیم تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 برای هر دو مدل مورد بررسی در این مطالعه و همچنین ۴ ایستگاه هیدرومتری، کاهش یافته است. که می‌تواند به دلیل افزایش بیشتر دمای حداکثر نسبت به دمای حداقل و افزایش تبخیر تعرق ناشی از آن باشد. در مطالعه (Abbasi et al., 2020) افزایش میزان تبخیر- تعرق سالانه تحت سناریوهای RCP در حوضه آبریز طشک- بختگان، نشان داده شده است.

در بقیه موارد (سناریوها و مدل‌های مورد بررسی) کاهش بارش را در دوره آینده نسبت به دوره گذشته نشان داده‌اند. در مطالعه (Houshmand Kouchi et al., 2019) در حوضه‌ی آبریز سد سلمان فارسی در استان فارس، افزایش دما و بارش در شرایط تغییر اقلیم تحت سناریوهای RCP نشان داده شد. نتایج این پژوهش در بخش دما با این مطالعه مطابقت دارد ولی در بخش بارش تطابق ندارد و به‌طور کلی کاهش بارش را نشان می‌دهد. در حالی که در مطالعه (Abbasi et al., 2020) افزایش دمای حداقل و حداکثر و کاهش بارش تحت سناریوهای RCP در حوضه آبریز طشک- بختگان، گزارش شده است.

Table 5- Correlation coefficient between runoff values calculated in the studied stations and precipitation and minimum and maximum temperature values in the next period (2021-2050)

جدول ۵- ضریب همبستگی بین مقادیر رواناب محاسبه شده در ایستگاه‌های مورد بررسی و مقادیر بارش و دمای حداقل و حداکثر در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰)

Variable	GCM	Scenario	Molasadra Dam			Dorudzan Dam			Sivand Dam			Inflow into Bakhtegan Lake		
			0 Lag	1 Lag	2 Lag	0 Lag	1 Lag	2 Lag	0 Lag	1 Lag	2 Lag	0 Lag	1 Lag	2 Lag
			Precipitation	GFDL_ESM2M	RCP2.6	0.48	0.40	0.43	0.52	0.55	0.56	0.66	0.61	0.29
GFDL_ESM2M	RCP8.5	0.57		0.41	0.37	0.61	0.54	0.46	0.74	0.60	0.26	0.64	0.58	0.30
GFDL_ESM4	SSP1-2.6	0.72		0.39	0.35	0.71	0.63	0.49	0.62	0.48	0.25	0.48	0.36	0.11
GFDL_ESM4	SSP5-8.5	0.74		0.38	0.35	0.71	0.58	0.49	0.53	0.48	0.36	0.41	0.41	0.28
IPSL_CMA5_LR	RCP2.6	0.74		0.33	0.36	0.70	0.50	0.42	0.74	0.46	0.30	0.69	0.46	0.31
IPSL_CMA5_LR	RCP8.5	0.77		0.23	0.18	0.78	0.41	0.25	0.81	0.37	0.07	0.77	0.44	0.08
IPSL_CMA6_LR	SSP1-2.6	0.67		0.47	0.38	0.67	0.68	0.52	0.48	0.46	0.30	0.40	0.37	0.20
IPSL_CMA6_LR	SSP5-8.5	0.74		0.34	0.24	0.75	0.60	0.38	0.66	0.41	0.19	0.56	0.26	0.04
Maximum Temperature	GFDL_ESM2M	RCP2.6	-0.10	-0.23	-0.32	-0.28	-0.43	-0.49	-0.24	-0.30	-0.30	-0.21	-0.28	-0.30
	GFDL_ESM2M	RCP8.5	-0.19	-0.30	-0.33	-0.41	-0.51	-0.48	-0.23	-0.30	-0.28	-0.13	-0.16	-0.15
	GFDL_ESM4	SSP1-2.6	-0.19	-0.32	-0.34	-0.43	-0.55	-0.51	-0.25	-0.34	-0.31	-0.13	-0.18	-0.15
	GFDL_ESM4	SSP5-8.5	-0.21	-0.35	-0.37	-0.44	-0.58	-0.54	-0.27	-0.34	-0.34	-0.15	-0.19	-0.18
	IPSL_CMA5_LR	RCP2.6	-0.20	-0.32	-0.35	-0.43	-0.55	-0.53	-0.26	-0.33	-0.32	-0.15	-0.18	-0.18
	IPSL_CMA5_LR	RCP8.5	-0.20	-0.33	-0.36	-0.43	-0.56	-0.53	-0.24	-0.34	-0.33	-0.14	-0.20	-0.18
	IPSL_CMA6_LR	SSP1-2.6	-0.21	-0.32	-0.38	-0.43	-0.55	-0.54	-0.24	-0.33	-0.34	-0.14	-0.18	-0.20
	IPSL_CMA6_LR	SSP5-8.5	-0.21	-0.35	-0.37	-0.44	-0.58	-0.54	-0.27	-0.34	-0.34	-0.15	-0.19	-0.18
Minimum Temperature	GFDL_ESM2M	RCP2.6	-0.05	-0.19	-0.28	-0.21	-0.36	-0.44	-0.18	-0.25	-0.28	-0.15	-0.22	-0.27
	GFDL_ESM2M	RCP8.5	-0.03	-0.17	-0.27	-0.19	-0.36	-0.44	-0.18	-0.25	-0.26	-0.14	-0.23	-0.27
	GFDL_ESM4	SSP1-2.6	-0.02	-0.15	-0.24	-0.18	-0.34	-0.42	-0.17	-0.25	-0.27	-0.13	-0.22	-0.26
	GFDL_ESM4	SSP5-8.5	-0.03	-0.17	-0.27	-0.19	-0.36	-0.44	-0.18	-0.27	-0.28	-0.14	-0.24	-0.27
	IPSL_CMA5_LR	RCP2.6	-0.06	-0.18	-0.27	-0.21	-0.38	-0.45	-0.19	-0.26	-0.28	-0.15	-0.24	-0.27
	IPSL_CMA5_LR	RCP8.5	-0.02	-0.15	-0.25	-0.17	-0.33	-0.42	-0.17	-0.26	-0.26	-0.13	-0.23	-0.25
	IPSL_CMA6_LR	SSP1-2.6	-0.02	-0.17	-0.25	-0.18	-0.36	-0.43	-0.18	-0.27	-0.28	-0.14	-0.24	-0.28
	IPSL_CMA6_LR	SSP5-8.5	-0.01	-0.15	-0.24	-0.17	-0.33	-0.41	-0.15	-0.23	-0.27	-0.11	-0.20	-0.26

راهکارهای سازگار در راستای فعالیت‌های اجتماعی- اقتصادی همچون مصارف پایدار، افزایش راندمان انرژی، جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر و همکاری بیشتر جهانی راهگشا باشد. به منظور ارزیابی و بررسی دقیق‌تر اثرات تغییر اقلیم تحت سناریوهای SSP که اخیراً در دسترس قرار گرفته است، می‌بایست تغییرات سایر مؤلفه‌های آبی همچون آب آبی و آب سبز و غیره نیز مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، روش‌های دیگر اصلاح اریبی همچون روش نگاشت چندک (QM) روی این داده‌های اقلیمی که قابلیت اصلاح الگوی متغیرهای اقلیمی را نیز دارد، می‌تواند به دقیق‌تر کردن نتایج کمک کند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
- 2- IPCC Fifth Assessment Report (AR5)
- 3- Adaptation
- 4- Mitigation
- 5- Coupled Model Intercomparison Project-Phase 5 (CMIP5)
- 6- Representative Concentration Pathway (RCPs)
- 7- Coupled Model Intercomparison Project-Phase 6 (CMIP6)
- 8- Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)
- 9- General Circulation Models
- 10- Downscaling
- 11- Statistical DownScaling Model (SDSM)
- 12- Soil and Water Assessment Tool (SWAT)
- 13- United States Department of Agriculture (USDA)
- 14- Hydrologic Response Unit (HRU)
- 15- Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP) Fast Track
- 16- Earth System Grid Federation (ESGF)
- 17- Network Common Data Form (NetCDF)
- 18- International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)
- 19- Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)
- 20- Variable Infiltration Capacity (VIC)
- 21- Global Mean Temperature from Preindustrial Levels (Δ GMT)
- 22- Bias Correction
- 23- Warm Up

در حالی که، سناریوهای RCP برای تمامی ایستگاه‌ها به جز سد درودزن افزایش رواناب را در دوره آینده نشان می‌دهد. که یکی از دلایل آن می‌تواند الگوی بارش مدل‌ها و شدت‌های بارشی در دوره آینده باشد. در مطالعه (Houshmand Kouchi et al., 2019) در حوضه آبریز سد سلمان فارسی در استان فارس، مقادیر شبیه‌سازی شده رواناب در شرایط تغییر اقلیم تحت سناریوهای RCP با استفاده از مدل SWAT نسبت به دوره گذشته (۲۰۰۸-۱۹۷۸) ۳۳/۲ تا ۱۳۱/۳ درصد افزایش را نشان می‌دهد.

- بررسی مقادیر همبستگی بین رواناب و متغیرهای اقلیمی در شرایط تغییر اقلیم نشان داد که مقادیر دبی ورودی به سدها و دریاچه‌ی بختگان با بارش رابطه مستقیم و با دما رابطه عکس دارد. همچنین، این بررسی تأثیر بیشتر بارش بر رواناب را نسبت به دمای حداقل و حداکثر نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای در حوضه رودخانه مکونگ (Prathumratana et al., 2008) برای تعیین ارتباط بین رواناب با بارش، دما و تبخیر- تعرق از همبستگی پیرسون استفاده شده است. نتایج به دست آمده از این مطالعه ارتباط مستقیم رواناب با بارش و دما و ارتباط معکوس با تبخیر- تعرق را نشان می‌دهد.

همانطور که بیان شد، مطالعات بسیاری در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های آبی حوضه‌های آبریز مختلف در سناریوهای مختلف به‌ویژه سناریوهای RCP انجام شده است. در این تحقیق، تلاش شده است تا علاوه بر بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی رواناب به عنوان یکی از مؤلفه‌های آبی حوضه طشک- بختگان تحت سناریوهای RCP، سناریوهای SSP که تأثیر فعالیت‌های اجتماعی- اقتصادی را اعمال می‌کند، نیز مورد بررسی قرار گیرد.

این مطالعه، نخستین تلاش برای بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر رواناب در حوضه آبریز طشک- بختگان با استفاده از دو مدل از CMIP6 است. با توجه به اینکه مدل‌های مورد بررسی علاوه بر مورد توجه قرار دادن سناریوهای انتشار (RCP)، سناریوهای اجتماعی اقتصادی (SSP) را نیز اعمال می‌کنند، نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و همچنین، اتخاذ

- Abbasi H, Delavar M, Bigdeli Naalbandan R (2020) Evaluation of the effects of climate change on water resource sustainability in basins using water footprint scarcity indicators. *Iran-Water Resources Research* 15(4):259-272 (In Persian)
- Abbaspour KC, Faramarzi M, Ghasemi SS, Yang H (2009) Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research* 45(10)
- Alizadeh A, Kamali GA (2007) Crops water requirements. Asstane Ghodse Razavi Press (Beh Nashr), Mashhad
- Almazroui M, Saeed F, Saeed S, Islam MN, Ismail M, Klutse NAB, Siddiqui MH (2020) Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment* 4(3):455-475
- Arnold J G, Fohrer N (2005) SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes: An International Journal* 19(3):563-572
- Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, Williams J R (1998) large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *Journal of the American Water Resources Association, JAWRA* 34(1):73-89
- Aryal A, Shrestha S, Babel MS (2019) Quantifying the sources of uncertainty in an ensemble of hydrological climate-impact projections. *Theoretical and Applied Climatology* 135(1/2):193-209
- Chen HP, Sun JQ (2015) Assessing model performance of climate extremes in China: An intercomparison between CMIP5 and CMIP3. *Climatic Change* 129(1-2):197-211
- Delavar M, Morid S (2017) Simulation of water resources and agricultural systems of Tashk-Bakhtegan Basin. Technical Report, Ministry of Energy
- Delavar M, Morid S, Morid R, Farokhnia A, Babaeian F, Srinivasan R, Karimi P (2020) Basin-wide water accounting based on modified SWAT model and WA+ framework for better policy making. *Journal of Hydrology* 585:124762
- Doulabian S, Golian S, Toosi A S, Murphy C (2021) Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature for Iran using RCP scenarios. *Journal of Water and Climate Change* 12(1):166-184
- Eyring V, Bony S, Meehl GA, et al. (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development* 9:1937-58
- Goodarzi M, Vagheei H, Mousavi M (2020) The behavior of inflow to the Seimareh Dam in the face of climate change impacts. *International Journal of Environmental Science and Technology* 22(3):170-182 (In Persian)
- Hempel S, Frieler K, Warszawski L, Schewe J, Piontek F (2013) A trend-preserving bias correction—the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics* 4(2):219-236
- Houshmand Kouchi D, Esmaili K, Faridhosseini A, Sanaei Nejad SH, Khalili D (2019) Simulation of climate change impacts using fifth assessment report models under RCP scenarios on water resources in the upper basin of Salman Farsi Dam. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 2(13):243-258 (In Persian)
- Jones P, Hulme M (1996) Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International Journal of Climatology* 16(4):361-377
- Kim H J, Cho K, Kim Y, Park H, Lee J W, Kim S J, Chae Y (2020) Spatial assessment of water-use vulnerability under future climate and socioeconomic scenarios within a River Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management* 146(7):05020011
- Kim J H, Sung J H, Chung E S, Kim S U, Son M, Shiru M S (2021) Comparison of projection in meteorological and hydrological droughts in the Cheongmicheon Watershed for RCP4. 5 and SSP2-4.5. *Sustainability* 13(4):2066
- Maraun D, Wetterhall F, Ireson AM, Chandler RE, Kendon EJ, Widmann M, Brienen S, Rust HW, Sauter T, Themeßl M, et al. (2010) Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics* 48(3):3003
- MOE (Ministry of Energy) (2017) Climate change adaptation strategies and national plans in water sector, simulating water resources and agricultural systems in Tashk-Bakhtegan basin. (In Persian)
- O'Neill BC, Tebaldi C, van Vuuren DP, et al. (2016) The scenario model intercomparison project

- (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development* 9:3461–82
- Prathumratana L, Sthiannopkao S, Kim KW (2008) The relationship of climatic and hydrological parameters to surface water quality in the lower Mekong River. *Environment International* 34(6):860-866
- Rabazanahary Tantelinaiina M F, Rahaman M, Zhai J (2021) Assessment of the future impact of climate change on the hydrology of the Mangoky River, Madagascar using ANN and SWAT. *Water* 13(9):1239
- Sachindra DA, Ahmed K, Rashid M, Shahid S, Perera BJC (2018) Statistical downscaling of precipitation using machine learning techniques. *Atmospheric Research* 212:240–258
- Singh A, Gosain A K (2013) GIS based hydrological modelling for climate change impact assessment greener. *Journal of Science, Engineering and Technology* 3(7):210-219
- Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA (2012) An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(4):485–498
- Van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque JF, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith SJ, Rose SK (2011) The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change* 109(1):5-31
- Vetter T, Reinhardt J, Flörke M, Van Griensven A, Hattermann F, Huang S, Krysanova V (2017) Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. *Climatic Change* 141(3):419-433
- Wang J, Hu L, Li D, Ren M (2020) Potential impacts of projected climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Wabash River Basin. *Advances in Meteorology* 2020:9698423
- Warszawski L, Frieler K, Huber V, Piontek F, Serdeczny O, Schew J (2014) The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP): project framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(9):3228-3232
- Wen S, Su B, Wang Y, Zhai J, Sun H, Chen Z, Jiang T (2020) Comprehensive evaluation of hydrological models for climate change impact assessment in the Upper Yangtze River Basin, China. *Climatic Change* 163(3):1207-1226
- Wilby R, Wigley T (1997) Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 21(4):530–548
- Wurbs RA (1998) Dissemination of generalized water resources models in the United States. *Water International* 23(3):190-198