Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال پانزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸
Volume 15, No. 4, Winter 2020 (IR-WRR)
۲۵۹-۲۷۲

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر پایداری منابع آب حوضه‌های آبریز با استفاده از شاخص‌های کمبود ردپای آب

حمید عباسی[۱]، مجید دلاور[۲*] و رویا بیگدلی نعلبندان[۳]

چکیده

توسعه ناپایدار و عدم توازن بین عرضه و تقاضای آب و تشدید آن در شرایط تغییر اقلیم از جمله مسائل مهم در مدیریت منابع آب کشور محسوب می‌گردد. این موضوع لزوم توجه به اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب تجدیدپذیر و مصارف آبی را آشکار می‌سازد. بدین منظور ارزیابی وضعیت فعلی و تغییر اقلیم حوضه با استفاده از تلفیق رویکرد شبیه‌سازی جامع حوضه با استفاده از مدل SWAT و چارچوب ارزیابی رد پای آب به منظور بررسی پایداری حوضه و اثرات بالقوه آن‌ها بر منابع آب، کشاورزی و محیط زیست انجام گرفته است. بدین جهت ارزیابی وضعیت حوضه در شرایط پایه و تغییر اقلیم با استفاده از محاسبه شاخص‌های پایداری کمبود آب سبز، آب آبی، آب زیرزمینی و محیط زیست انجام گرفت. شبیه‌سازی و تحلیل شرایط سیستم منابع آب و کشاورزی حوضه تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره (۲۰۴۶-۲۰۱۷) و با اعمال متغیرهای دما و بارش ریزمقیاس شده حاصل از ترکیب سه مدل جفت‌شده گردش عمومی جو تحت سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در مدل واسنجی و اعتبارسنجی شده SWAT انجام گرفت. بررسی شاخص‌های پایداری در وضعیت فعلی حاکی از ناپایداری آب زیرزمینی و تأمین نیاز زیست‌محیطی دریاچه طشک بختگان می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم حوضه شرایط وخیم‌تری را تجربه خواهد شد. این مساله عمدتاً ناشی از تشدید بارگذاری بر منابع آب حوضه به واسطه افزایش رد پای آب (۶ تا ۱۶ درصد) ناشی از تغییرات نیاز آبی محصولات کشاورزی در حوضه، ایجاد گردیده است. این مهم در کنار کاهش ۸ تا ۱۸ درصدی آب آبی در دسترس حوضه در شرایط تغییر اقلیم حاکی از تشدید تنش‌های آبی در حوضه و به نوبه آن تخریب سیستم‌های وابسته می‌باشد. در این شرایط مهمترین راهکار کاهش رد پای آب به واسطه کاهش مصارف و متوازن با پتانسیل‌های منابع آبی حوضه می‌باشد.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، رد پای آب، پایداری، مدل SWAT، حوضه آبریز طشک-بختگان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۳/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۸/۲۱

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
۲- استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

Evaluation of the Effects of Climate Change on Water Resource Sustainability in Basins Using Water Footprint Scarcity Indicators

H. Abbasi[1], M. Delavar[2], and R. Bigdeli Naalbandan[3]*

Abstract

The unsustainable development and imbalance between supply and demand of water and its intensification in climate change are the most important issues in water resource management in Iran. This reveals the need to consider climate change on renewable water sources and water use. Therefore the current status and climate change of the basin have been assessed by integrating a comprehensive basin simulation approach using the SWAT model and the water footprint assessment framework. This framework used for assessing the stability of the basin and its potential impacts on water resources, agriculture and the environment. Therefore, assessment of basin status and climate change was carried out by calculating green water, blue water, groundwater and environmental sustainability indices. Simulation and analysis of the water resources system and agricultural sector under the climate change condition were done during the period (2017-2046) coupled results of three general circulation models under the three emission scenarios of RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5. Evaluation of the sustainability indicators in the current situation indicates the instability of groundwater and the environmental requirement of Lake Tashk-Bakhtegan. The results also showed that under climate change conditions, the hydrological basin status will be more critical. This is mainly due to the increasing burden on the water resources of the basin due to the increase in water footprint (6 to 16%) caused by changes in the water requirement of agricultural crops in the basin. This, coupled with the 8 to 18 percent reduction in available water in the basin under climate change, indicates a worsening of the water stresses in the basin. In these conditions, the most important measures are to reduce the water footprint by reducing the consumption considering the potential of water resources.

Keywords: Climate Change, Water Footprint, Sustainability, SWAT Model, Tashk-Bakhtegan Basin.

Received: May 25, 2019

Accepted: November 12, 2019

1- M.Sc. Graduate of Water Recourses Engineering, Department of Water Recourses Engineering, College of Agriculture, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.
2- Associate Professor, Department of Water Recourses Engineering, College of Agriculture, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran. Email: m.delavar@modares.ac.ir
3- M.Sc. Graduate of Water Recourses Engineering, Department of Water Recourses Engineering, College of Agriculture, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

رشد روز افزون جمعیت، خشکسالی، تغییر اقلیم و سیاست‌های نادرست مدیریتی، منابع آبی موجود را به شدت تحت تأثیر قرار داده و آن‌ها را در برخی از مناطق جهان با بیلان منفی مواجه کرده است که این امر مغایر با بهره‌برداری پایدار از منابع آب می‌باشد. پدیده تغییر اقلیم بر بخش‌های مختلفی تأثیر خواهد گذاشت که بخش کشاورزی و منابع آب از اصلی‌ترین آن‌ها می‌باشد. در این راستا، پیش‌بینی این اثرات به منظور کاهش آسیب‌پذیری و سازگاری با آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. افزایش تابش خورشیدی، دما و تغییر در الگوهای بارش، موجب افزایش نیاز آبی گیاهان، تبخیر-تعرق و تغییر در حجم و زمان رواناب‌ها و رطوبت خاک می‌گردد که این تغییرات خود میزان تقاضا و عرضه آب را در بخش کشاورزی دستخوش تغییرات خواهد نمود. مجموعه این موارد، آگاهی از آثار تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی و منابع آب را ضروری می‌سازد.

به این منظور در مطالعات مختلفی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی و منابع آب پرداخته شده است. در مطالعات صورت گرفته در این زمینه، مدل‌سازی توأمان سیستم‌های منابع آب و کشاورزی به دلیل لحاظ برهم‌کنش مؤلفه‌های بیلان بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا از مدل‌های شبیه‌ساز جامع هیدرولوژیکی و بیلان آبی حوضه مختلفی استفاده می‌گردد که مدل SWAT به عنوان یکی از پرکاربردترین آن‌ها، با قابلیت شبیه‌سازی جامع و توام مزرعه و حوضه آبریز، دسترسی رایگان، متن باز بودن و امکان استفاده در مقیاس‌های مختلف مورد توجه محققین قرار گرفته و بدین جهت در این مطالعه نیز مورد استفاده قرار گرفت. در زمینه استفاده از مدل SWAT می‌توان به مطالعه Santhi et al. (2015) جهت شبیه‌سازی حوضه آبریز Rio Grande در ایالت تگزاس آمریکا با اراضی کشاورزی به منظور تعیین بهترین روش برای صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری اشاره کرد. در این مطالعه سناریوهای گوناگون مدیریتی شامل تغییر الگوی کشت از نیشکر به ذرت و افزایش راندمان در حوضه اعمال و مورد بررسی قرار گردید. در مطالعه‌ای نیز Dietrich and Maier (2016) به شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم با استفاده از این مدل پرداختند. در این مطالعه به بررسی کاربرد مدل SWAT برای توسعه راهبردهای کنترل آب آبیاری در یک حوضه آبریز مرطوب در شمال آلمان پرداخته شد. به این منظور سناریوهای مختلفی با کنترل کمبود رطوبت خاک و نیاز آبی گیاه توسعه داده شد. نتایج نشان داد که تغییرات قابل توجهی در میزان آبیاری از طریق کنترل کمبود رطوبت خاک وجود دارد و تنها با کاهش متوسط عملکرد محصول موجب کاهش مصرف آب می‌گردد. در مطالعه دیگری نیز Shrestha et al. (2017) با استفاده از مدل SWAT به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب شیرین حوضه‌ی آبریز آتاباسکا[1] در کانادا پرداختند. در این مطالعه از داده‌های اقلیمی دو سناریوی انتشار RCP 4.5 و RCP 8.5 استفاده شد. همچنین، مطالعه‌ای توسط Aparicio et al. (2017) با هدف ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت منابع آب حوضه‌ی آبریز سگورا با استفاده از مدل SWAT انجام گرفت. در این مطالعه از داده‌های بارش و دمای اصلاح شده حاصل از مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای[2] تحت دو سناریوی انتشار RCP 4.5 و RCP 8.5 برای دو دوره‌ی میان‌مدت (۲۰۷۰-۲۰۴۱) و بلند مدت (۲۱۰۰-۲۰۷۱) استفاده گردید. در مطالعه‌ای Tan et al. (2017) پتانسیل اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه کلانتان[3] در شمال شرقی مالزی را ارزیابی نمودند. داده‌های اقلیمی ریزمقیاس‌شده از پنج مدل گردش عمومی جو تحت سناریوهای انتشار RCP 4.5، RCP 2.6 و RCP 8.5 در دو دوره‌ی ۲۰۴۴-۲۰۱۵ و ۲۰۷۴- ۲۰۴۵ استخراج و به مدل SWAT معرفی گردید. در مطالعه‌ای دیگر Brouziyne et al. (2017) به بررسی تأثیرات اقلیمی با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز مدیترانه در شمال غربی مراکش پرداختند. در این مطالعه از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی مدل گردش عمومی CNRM CM5 تحت سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 در دوره ۲۰۵۰-۲۰۳۱ استفاده گردید که نتایج حاکی از کاهش بارش و افزایش دما بود.

بهره‌برداری پایدار از منابع آب به عنوان یکی از چالش‌های اصلی مدیریت آب در شرایط تغییر اقلیم به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد. در زمینه ارزیابی پایداری منابع آب در مطالعات مختلف از رویکردهای مختلفی استفاده می‌گردد از آن جمله می‌توان به LCA، PC&I، EIA و چارچوب حسابداری رد پای آب اشاره کرد. در این روش‌ها ممکن است از شاخص‌های مشابه استفاده گردد اما روش و زمینه کاربرد آن‌ها کاملا متفاوت است (Muys, 1998 Baelemans and). چارچوب حسابداری رد پای آب از جمله رویکردهایی می‌باشد که به دلیل بررسی مصارف به تفکیک نوع منبع آبی امکان تحلیل پایداری حوضه از جنبه‌های مختلف آب سبز، آبی و خاکستری را فراهم می‌کند. از طرفی رد پای آب به عنوان یک شاخص چند بعدی (بعد زمان و مکان) است که برای مقیاس‌های مختلف جغرافیایی و همچنین غیر جغرافیایی (نظیر فرد، اجتماع و غیره) و به صورت رد پای آب داخلی و خارجی قابل محاسبه است. حسابداری رد پای آب، در مطالعات مختلف مورد توجه قرار گرفته شده است. Chico et al. (2013) به ارزیابی پایداری سه رودخانه نیمه‌خشک در جنوب اسپانیا با استفاده از چارچوب ردپای آب پرداختند. در این مطالعه ارزیابی پایداری مجموع رد پای آب پنبه با شاخص کمبود آب مطابق با Hoekstra et al. (2011) انجام شد. این مطالعه نشان داد، وضعیت حوضه و تأثیر سیاست در تولید پنبه در اسپانیا، بیشتر از اینکه به

www.SID.ir

Archive of SID

وضعیت منابع آب حوضه وابسته باشد به رد پای آب تولید پنبه وابسته است. در مطالعه‌ای دیگر Ercin et al. (2012) چگونگی اختصاص منابع آب داخلی به نیازهای مختلف و اثرات تولیدات بر منابع آب داخلی را در کشور فرانسه با استفاده از این چارچوب مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه نشان داد که تجزیه و تحلیل رد پای آب خارجی یک ملت لازم است تا یک تصویر کامل از رابطه بین مصرف ملی و استفاده منابع آب به دست آید. در مطالعه‌ای دیگر Francisco et al. (2016) پایداری را در حوضه رودخانه سگورا در جنوب شرقی اسپانیا بررسی کردند. در این مطالعه از شاخص رد پای آب برای ارزیابی پایداری محیط زیست در مدیریت منابع آب استفاده گردید. نتایج نشان داد که استفاده از آب آبی در نتیجه بهره‌برداری بیشتر از سفره‌های آب، پایدار نیست، ارزیابی سناریوهای آینده نیز نشان داد که اگر اقدامات سازگاری انجام نشود وضعیت حوضه بدتر خواهد شد. در مطالعه Roux et al. (2017) نیز برای اطلاع از نحوه مدیریت منابع آب در مقیاس حوضه، در آبخوان Steenkoppies در آفریقای جنوبی، از مفهوم رد پای آب استفاده گردید. در این مطالعه بارش و تبخیر–تعرق پوشش گیاهی و استفاده‌های دیگر از آب آبی در محاسبه رد پای آب کشاورزی و آب در دسترس، جهت ارزیابی پایداری مورد استفاده قرار گرفت.

با توجه به آنچه اشاره شد، هدف اصلی در این مطالعه در جهت پاسخگویی به مسائل مطرح شده، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و کشاورزی از دیدگاه رد پای آب می‌باشد. ارزیابی‌های انجام شده با استفاده از تلفیق شبیه‌سازی جامع حوضه آبریز با استفاده از مدل SWAT و شاخص‌های پایداری رد پای آب در یک حوضه آبریز پایلوت در کشور (حوضه طشک–بختگان) انجام می‌گیرد. ارزیابی چند وجهی و پایداری سیستم‌های آبی در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از تلفیق شاخص‌های رد پای داخلی آب و مدل‌سازی جامع حوضه از جمله مهم‌ترین نوآوری‌های این مطالعه محسوب می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز دریاچه طشک–بختگان در میانه جنوبی ایران و در شمال حوضه ساحلی مند گسترده است. این حوضه به وسعت ۲۷۵۲۳ کیلومتر مربع می‌باشد که بلندترین نقطه آن در غرب حوضه به ارتفاع حدود ۳۹۰۰ متر از سطح دریای آزاد و کمترین ارتفاع در حاشیه دریاچه طشک–بختگان به ارتفاع حدود ۱۶۲۰ متر می‌باشد (شکل ۱) (Delavar et al., 2017).

حوضه آبریز دریاچه طشک- بختگان بخش‌هایی از مناطق شمال، مرکز و جنوب شرقی استان فارس را تشکیل داده است. در این حوضه پارامترهای هواشناسی بسیار متغیر است؛ به گونه‌ای که در آن، نقاط سردسیری با حداقل دمای مطلق ۲۸- درجه سانتی‌گراد در مناطق شمال و شمال غربی تا مناطق گرمسیری با حداکثر دمای مطلق ۴۵ درجه سانتی‌گراد در نواحی جنوب و جنوب شرقی مشاهده می‌گردد. این حوضه دارای ۳ سد مخزنی به نام‌های سد درودزن، سد سیبوید (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.

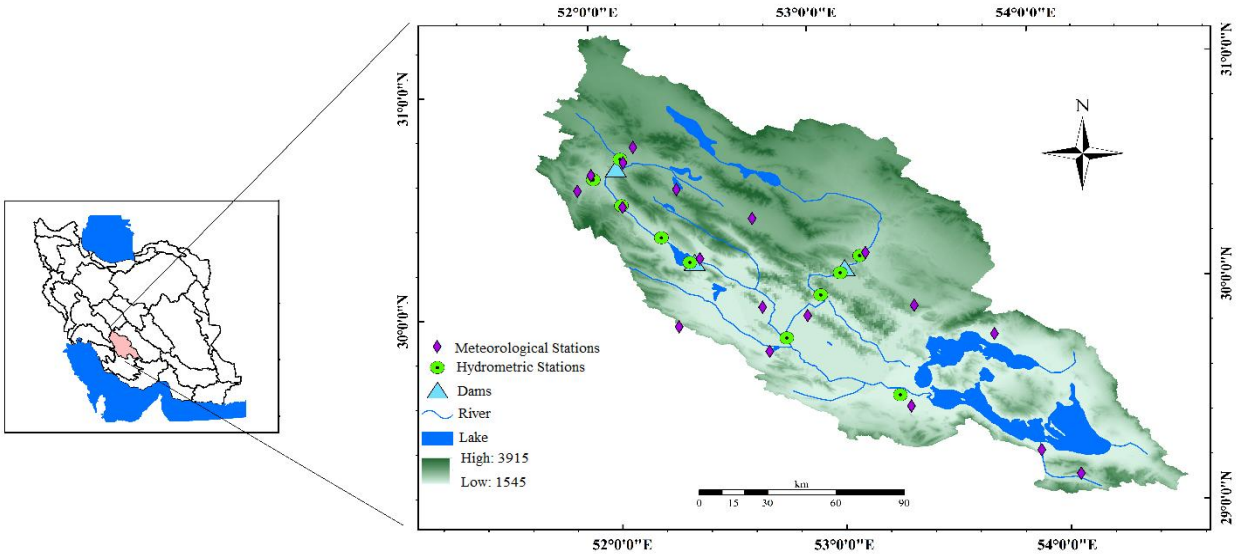


Fig. 1- Map of the study area

شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۲- روش‌شناسی

ارزیابی وضعیت حوضه آبریز در شرایط پایه و تغییر اقلیم با استفاده از یک رویکرد شبیه‌سازی جامع انجام گرفته است. بدین منظور روش‌شناسی مطالعه با توجه به شکل ۲ به دو زیر بخش شامل ۱) فرایندهای منابع آب و کشاورزی و ۲) تحلیل پایداری آن‌ها تعریف شده است. در بخش اول مدل‌سازی‌های حوضه آبریز با استفاده از مدل مفهومی SWAT انجام می‌گردد و شرایط تغییر اقلیم نیز در مدل اعمال و شبیه‌سازی می‌گردد. در ادامه نیز خروجی‌های آن براساس رد پای آب سبز و آبی محاسبه و تحلیل می‌گردد. در بخش دوم به منظور ارزیابی پایداری منابع آب، شاخص‌های کمبود آب سبز و آبی محاسبه و پایداری سیستم در شرایط پایه و تغییر اقلیم ارزیابی می‌شوند.

۲-۳- مدل‌سازی سیستم‌های منابع آب

در این مطالعه شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب با استفاده از نسخه اصلاح شده مدل SWAT، تحت عنوان SWAT-PARS (Delavar et al., 2017) انجام گرفت. مدل SWAT-PARS برای شبیه‌سازی جامع مؤلفه‌های بیلان آبی و شرایط خاص حوضه طشک-بختگان، همچون گستردگی و تنوع کاربری اراضی، بسته بودن حوضه، نقش پر رنگ آب‌های زیرزمینی در منطقه و تغییرات قابل توجه در آن، وجود مناطق کارستی و دینامیک کاربری اراضی در حوضه توسعه یافته است.

در این راستا آماده‌سازی مدل با استفاده از طیف گسترده‌ای از داده‌ها و اطلاعات حوضه از جمله: نقشه تراز ارتفاعی، خاک و تغییرات کاربری اراضی حوضه، سری زمانی دما و بارش روزانه، مدیریت کشاورزی و آبیاری مناطق مختلف حوضه، مشخصات فیزیکی و بهره‌برداری از آبخوان‌ها، مصارف شرب و صنعت، مشخصات سدها و دریاچه‌های حوضه و نحوه بهره‌برداری از آن‌ها انجام گرفت.

برای این مطالعه لایه DEM با اندازه سلولی ۳۰ متری ASTER جهت تولید اطلاعات فیزیوگرافی، رودخانه‌ها، حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها استفاده گردید. لایه کاربری اراضی تهیه شده توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور در ۱۳۸۳ با ۹ کلاس کاربری به عنوان لایه پایه کاربری اراضی در نظر گرفته شد. نقشه خاک FAO نیز مبنا قرار گرفته شد. در ادامه علاوه بر نقشه کاربری اراضی پایه سازمان جنگل‌ها و مراتع، از دو نقشه کاربری اراضی مستخرج شده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat در سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۹۴ هم به منظور بهنگام‌سازی تغییرات کاربری اراضی استفاده به عمل آمد. نهایتاً حوضه به ۵۶ زیرحوضه و ۲۲۴۵ HRU تقسیم‌بندی شد و اطلاعات مدیریت بهره‌برداری از زمین شامل مدیریت اراضی دیم و آبی و پیکره‌های آبی (سدها) به مدل معرفی گردید. اطلاعات مدیریت بهره‌برداری از زمین شامل مدیریت اراضی دیم و آبی نوع محصولات، نیازهای آبی هر یک و دوره آبیاری در مدل به صورت دستی اعمال گردید. این اطلاعات، بر اساس طرح جامع آب کشور (۱۳۹۲)، جهاد کشاورزی استان شیراز و بازدیدهای میدانی جمع‌آوری شده است.

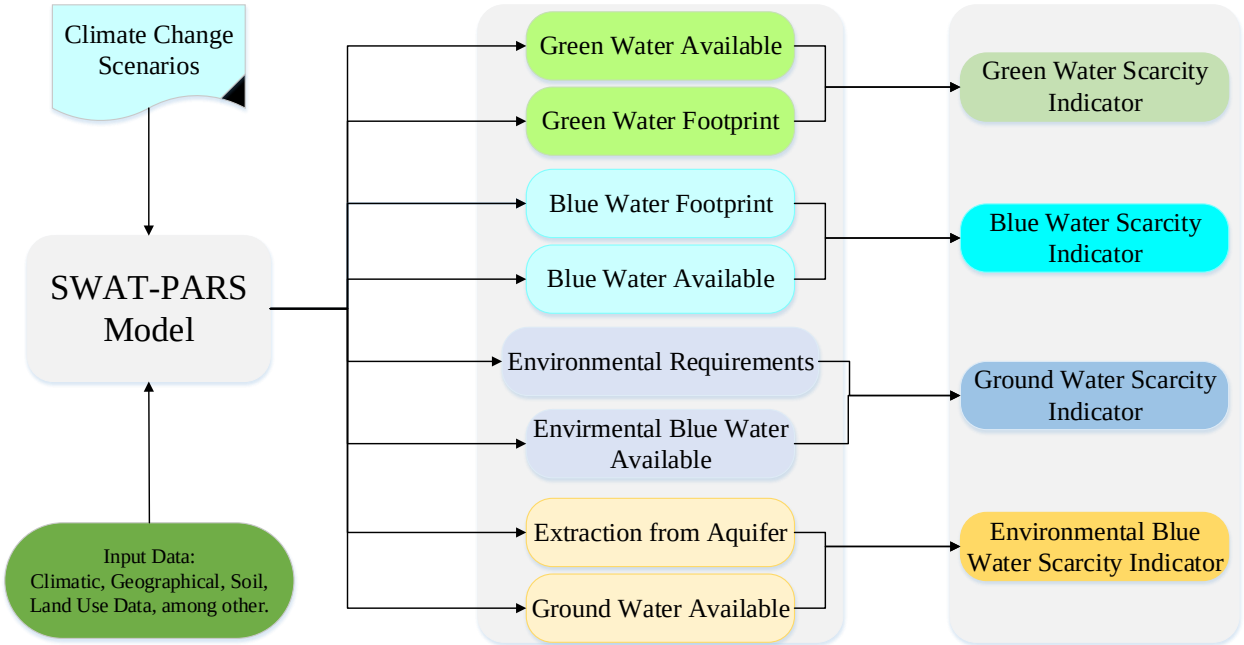


Fig. 2- The modeling framework of this study

شکل ۲- چارچوب مدل‌سازی تحقیق

www.SID.ir

Archive of SID

به منظور انجام شبیه‌سازی‌های لازم آمار و اطلاعات روزانه مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک، کلیماتولوژی متعلق به سازمان هواشناسی کشور و همچنین اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی وزارت نیرو طی دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۸۰ جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفت. واسنجی و اعتبارسنجی مدل به صورت جامع و با استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری، تراز آب زیرزمینی، عملکرد و تبخیر و تعرق محصولات به ترتیب در دوره ۲۰۰۶-۱۹۸۰ و ۲۰۱۴-۲۰۰۶ انجام گرفت. جهت بررسی پایداری حوضه آبریز طشک بختگان نیز نتایج حاصل از مدل طی دوره ۳۰ ساله ۲۰۱۴-۱۹۸۵ استفاده گردید. شرح کامل مراحل آماده‌سازی و واسنجی مدل در مرجع Delavar et al. (2017) در دسترس می‌باشد.

۲-۳-۱- تحلیل پایداری سیستم‌های منابع آب و کشاورزی با استفاده از چارچوب ردپای آب

در این مطالعه به منظور تحلیل پایداری سیستم‌های منابع آب و کشاورزی از چهارچوب ردپای داخلی آب که حجم آب استفاده شده از منابع آب داخلی می‌باشد، استفاده گردید که شامل چهار مرحله مجزا می‌باشد (شکل ۳). در مرحله اول اهداف و دامنه‌ی مطالعه تعیین می‌گردد. سپس به منظور حسابداری رد پای داخلی آب، داده‌های مورد نیاز جمع‌آوری شده و محاسبات انجام می‌شوند که ردپای آب و آب در دسترس محاسبه می‌شود به طوری که دامنه و سطح جزییات آن بستگی به تصمیمات اتخاذ شده در مرحله اول دارد. سپس در مرحله سوم با شناسایی معیارهای پایداری زیست‌محیطی و کشاورزی ردپای آب حوضه، پایداری مناطق مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت استراتژی‌ها یا سیاست‌های پیشنهادی جهت حصول پایداری ارزیابی می‌گردند (Hoekstra et al., 2011). در تحقیق حاضر ارزیابی زیست‌محیطی، کشاورزی و منابع آب برای پایداری در حوضه آبریز طشک-بختگان در شرایط پایه و تغییر اقلیم انجام می‌شود.

با توجه به مطالب ذکر شده رد پای آب در سه دسته سبز و آبی و خاکستری قابل دسته‌بندی است که با توجه به اهداف این تحقیق به بررسی پایداری کمی حوضه براساس آنها پرداخته می‌شود و از آب سبز و آبی استفاده گردید به این منظور روابط حاکم بر پایداری آب سبز و آبی در ادامه آورده شده است.

- تجزیه و تحلیل پایداری آب سبز

پایداری آب سبز توسط شاخص کمبود آب سبز ($\sum WS_{Green}$) مطابق با معادله (۱) محاسبه می‌شود که اگر WS_{Green} بیشتر از ۱ باشد، استفاده از آب سبز در حوضه ناپایدار است و اگر کمتر از ۱ باشد، آب سبز در دسترس برای نیازهای کشاورزی (عمدتاً دیم) پایدار است، بدون اینکه برای مناطق حفاظت‌شده طبیعی مضر باشد (Hoekstra et al., 2011).

$$WS_{Green}[X,t]=\frac{\sum WF_{Green}[X,t]}{WA_{Green}[X,t]} \quad (۱)$$

که در آن، $\sum WF_{Green}$ رد پای آب سبز، $\sum WA_{Green}$ آب سبز در دسترس، X شمارش‌گر زیرحوضه و t دوره زمانی می‌باشد. مقدار $\sum WF_{Green}$ با معادله (۲) و مقدار $\sum WA_{Green}$ با معادله (۳) محاسبه می‌شود که هر دو رابطه (۲) و (۳) از سناریوی بدون آبیاری (اجرای مدل بدون در نظر گرفتن آبیاری) از فایل خروجی output.hru مدل SWAT استخراج می‌گردند.

$$WF_{Green}[X,t]=\sum (ET_{Green}\times Area\times 1000) \quad (۲)$$

$$WA_{Green}[X,t]=(ET_{Green}[X,t]+SW_{Green}[X,t])\times Area \quad (۳)$$

در روابط بالا، Area = مساحت و ET_{Green} = تبخیر و تعرق حاصل از بارش و SW_{Green} = رطوبت خاک حاصل از بارش می‌باشد. X در مطالعه حاضر که برای کل حوضه نتایج ارائه می‌گردد، ۱ در نظر گرفته می‌شود.

- تجزیه و تحلیل پایداری آب آبی

به منظور ارزیابی پایداری آب آبی حوضه از شاخص کمبود آب آبی ($\sum WS_{Blue}$) استفاده می‌گردد که از مقایسه رد پای آب آبی $\sum WF_{Blue}$ و آب آبی در دسترس $\sum WA_{Blue}$ مطابق معادله (۴) محاسبه می‌شود. اگر این شاخص بیشتر از ۱ باشد، استفاده از آب آبی بالای حجم در دسترس است و مقدار کمتر از ۱ نشان‌دهنده پایداری آب آبی است.

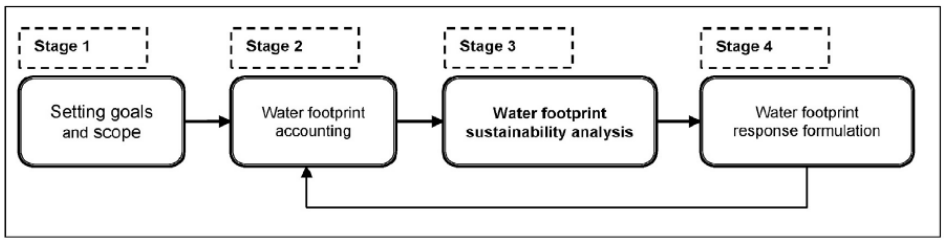


Fig. 3- Four distinct phases in water footprint assessment (Hoekstra et al., 2011)

شکل ۳- چهار گام ارزیابی رد پای آب (Hoekstra et al., 2011)

www.SID.ir

Archive of SID

برای محاسبه رد پای آب آبی از رد پای آب آبی مستقیم شرب و صنعت و کشاورزی استفاده می‌گردد که در این مطالعه از گزارش‌های موجود استفاده گردید (Delavar et al., 2017) و برای محاسبه رد پای آب مستقیم حوضه از رابطه زیر استفاده شد:

$$WS_{Blue}[X,t]=\frac{\sum WF_{Blue}[X,t]}{\sum WA_{Blue}[X,t]} \quad (۴)$$

$$WF_{Blue}[X,t]=\sum \begin{matrix}((ET_{irr}\times Area\times 1000)_WF_{Green} \\ +EFR+EFR[R,t]+ \\ \text{Industrial and drinking water))}\end{matrix} \quad (۵)$$

مقدار $\sum WA_{Blue}$ در معادله (۶) محاسبه می‌شود:

$$\sum WA_{Blue}[X,t]=(PCP[X,t]\times Area \times 1000)\text{-}WA_{Green}[X,t] \quad (۶)$$

در این روابط ET_{irr} تبخیر و تعرق حاصل از آبیاری و بارش، PCP مقدار بارش است که هر دو از فایل خروجی output.hru محاسبه گردید، EFR[6] نیاز زیست محیطی دریاچه طشک -بختگان کـــه بـــه طور میانگین بـــرابـــر ۵۲۵ میلیون متر مکعب است[۳]، strial and drinking water مقدار آب شرب و صنعت می‌باشد و EFR[R,t] نیاز زیست محیطی رودخانه R در دوره زمانی t می‌باشد که با استفاده از روش مونتانا به دست آمد [۵] (shukuhi and Hung, 2011) که از فایل output.rch مدل SWAT استفاده گردید.

روش مونتانا یا تنانت (۱۹۷۶) جهت برآورد حداقل نیاز زیست‌محیطی رودخانه‌ها، بر پایه مطالعات صحرایی در ایالات مرکزی-غربی آمریکا با برقراری رابطه بین جریان رودخانه و حفظ طبیعت اطراف رودخانه توسعه داده شده است (Tenant, 1976). هدف اصلی این روش حفظ شرایط زیستی ماهیان رودخانه بوده است. در این روش حداقل میزان رهاسازی به صورت درصد مشخصی از میانگین سالانه دبی رودخانه محاسبه می‌گردد (Abdi and Yasi., 2015) بدین ترتیب در سال‌های خشک و تر به ترتیب ۱۵ و ۳۰ درصد از میانگین سالانه دبی به عنوان حداقل نیاز زیست‌محیطی درنظر گرفته شد.

به دلیل انتقال بین حوضه‌ای و همچنین اثرات بالادست بر پایین‌دست، ممکن است در زیرحوضه‌های بالادست، مقدار بسیار کم شاخص کمبود آب آبی ($WS_{Blue}(<1)$) را کاهش دهد، و در جریان پایین‌دست رودخانه، مقدار بسیار بالای شاخص کمبود آب آبی (WS_{Blue} (>۱)) را افزایش دهد، بنابراین تعیین پایداری حـــوضه غیر ممکن خـــواهـــد بـــود و لازم بـــه تعمیم رابطه (۴) بـــرای کل حـوضه است (Pellicer-Martínez et al., 2015). بنابراین، WS_{Blue} برای M زیرحوضه و N دوره زمانی بررسی می‌گردد (معادله ۷):

$$WS_{Blue}=\frac{\sum_{t=1}^{N}\sum_{X=1}^{M}WF_{Blue}[X,t]}{\sum_{t=1}^{N}\sum_{X=1}^{M}WA_{Blue}[X,t]} \quad (۷)$$

اگر مقدار WS_{Blue} برای حوضه بیشتر از ۱ باشد، استفاده از آب آبی ناپایدار است و کمتر از آن نمی‌تواند گویای پایداری باشد، زیرا در فرایند تجمعی ممکن است نواحی و دوره‌های ناپایدار را پنهان کند. بنابراین باید چنین دوره‌ها و مناطق، شناسایی و تجزیه و تحلیل شود که معیارهای جریان زیست‌محیطی، نیاز زیست‌محیطی و پایداری آب زیرزمینی بررسی می‌گردد.

تجزیه و تحلیل نیازها با شاخص کمبود آب آبی زیست‌محیطی انجام می‌شود ($WS_{Blue\text{-}Env}$) که حداکثر مقدار به دست آمده در مقایسه با حجم مورد نیاز تقاضای زیست‌محیطی P ($Q_{Env}[p,t]$) و حجم واقعی ارائه شده ($WA_{Blue\text{-}Env}[p,t]$) تعریف شده است که حجم واقعی ارائه شده از فایل خروجی output.rch مدل SWAT به دست آمد (معادله ۸). هنگامی که $WS_{Blue\text{-}Env}[P] \leq 1$، تقاضای زیست‌محیطی P پایدار است در صورتی که بیشتر از یک باشد تقاضای زیست‌محیطی ناپایدار است:

$$WS_{Blue\text{-}Env}[P]=Max[j]\left[\frac{Q_{Env}[p,t]}{WA_{Blue\text{-}Env}[p,t]}\right] \quad (۸)$$

شاخص کمبود آب سیاه (WS_{black}) برای پایداری آب‌های زیرزمینی است. این شاخص درجه بهره‌برداری از سفره‌های آب حوضه را شناسایی و ارزیابی می‌کند (معادله ۹) که با مقایسه مجموع آب استخراج شـــده (EX_{Ground}) با مجموع تغذیه ($WA_{Blue\text{-}Ground}$) (تغذیه طبیعی بـــه علاوه دیگر تغذیه‌های ممکن، مـــانند جـــریـــان بـــرگشتی آبیاری و غیره) در هـــر آبخوان r محاسبه می‌شـــود (Pellicer-Martínez et al., 2015). EX_{Ground} از فایل output.hru مدل SWAT استخراج گردید که برداشت از Shallow Aquifer و Deep Aquifer برای آبیاری (SA-IRR و DA-IRR) می‌باشد و $WA_{Blue\text{-}Ground}$ نیز از فایل خروجی output.hru با اجرای سناریوی بدون آبیاری مدل محاسبه گردید:

$$WS_{Black}[r]=\frac{\sum_{t=1}^{N}EX_{Ground}[r,t]}{\sum_{t=1}^{N}WA_{Blue\text{-}Ground}[r,t]} \quad (۹)$$

اگر WS_{Black} کمتر از ۱ باشد، مدیریت آبخوان پایدار است و اگر بیشتر از ۱ باشد، بهره‌برداری بیشتر از آبخوان و درجه بالای بهره‌برداری را نشان می‌دهد، به طوری‌که اگر مقدار به دست آمده ۲ باشد، دو برابر تغذیه طبیعی، استخراج آب صورت می‌گیرد.

۲-۳-۲- سناریوهای تغییر اقلیم مورد بررسی

اعمال سناریوهای اقلیمی در مدل SWAT با تغییرات در داده‌های ورودی مدل (بارندگی، دما و سطح دی اکسید کربن) شبیه‌سازی می‌شود. بدین منظور جهت بررسی تغییر اقلیم نیاز به تولید سری زمانی روزانه سناریوی اقلیمی می‌باشد. به این صورت که با ریزمقیاس نمایی داده‌های اقلیمی تولید شده توسط مدل‌های گردش عمومی جو تحت

www.SID.ir

Archive of SID

سناریوهای انتشار مختلف، داده‌های اقلیمی تولید شده و وارد مدل می‌گردد. در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های سه بعدی جفت شده اقیانوس–اتمسفر گردش عمومی جو (AOGCM)[۷] می‌باشد (Wilby and Harris, 2005; Mitchell, 2003; Lane et al., 1999). با شروع دهه ۲۰۱۰، CMIP5[۸] سناریوهای جدید RCP[۹] را پیشنهاد داد سناریوهای پیشنهادی در چهار حالت ۲/۶ ، ۴/۵ ، ۶ و ۸/۵ هستند. RCPها سناریوهایی هستند که مسیرهای متناوبی برای انتشار دی اکسید کربن و غلظت اتمسفری از سال ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ را شرح می‌دهند. آن‌ها طیف وسیعی از نتایج سیاست‌های اقلیمی را در قرن ۲۱ ارائه می‌دهند. RCP چهار سناریوی متفاوت را براساس فرض‌های مختلف درباره جمعیت، رشد اقتصادی، مصرف انرژی و منابع و کاربری اراضی را در طول قرن ۲۱ معرفی کرده است (Vuuren et al., 2011). هر RCP یک مسیر انتشار خاص و متعاقب با آن محرکه‌ی تابشی تعریف می‌کند (محرکه‌ی تابشی تأثیر یک عامل در تغییر تعادل انرژی ورودی و خروجی در سیستم جو زمین را اندازه‌گیری می‌کند که بر حسب وات بر مترمربع است).

در این مطالعه جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم در منطقه مطالعاتی، از ۲۷ سناریوی تغییر اقلیم استفاده شده است. این سناریوها از خروجی‌های دما و بارش سه مدل سری CMIP5 شامل CanESM2، GFDL-ESM2G و MPI-ESM-LR تحت سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و با استفاده از سه روش ریزمقیاس‌نمایی، SDSM، XDS و Knn حاصل شده‌اند (Massah et al., 2016).

در تحقیق حاضر نتایج خروجی دما و بارش ماهانه مدل‌های CMIP5، تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در بازه زمانی (۲۰۴۹–۲۰۲۰) برای منطقه استخراج گردید و در مدل SWAT-PARS اعمال گردید قابل ذکر است که برای الگوی کشت در شرایط تغییر اقلیم از الگوی کشت سال ۲۰۱۵ وضعیت موجود استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

همانطور که اشاره شد، انجام شبیه‌سازی‌های لازم در این مطالعه با استفاده از مدل SWAT-PARS صورت گرفت. به منظور آماده‌سازی این مدل نیز مطابق با شرح مندرج در بخش (بخش طیف متنوعی از اطلاعات شامل نقشه‌های پایه، متغیرهای هواشناسی، هیدرولوژیکی و گیاهی و اطلاعات سازه‌ای و مدیریتی استفاده شده است. تحلیل حساسیت و واسنجی مدل با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP [۸] انجام گرفت و پارامترهایی که تاثیر بیشتری بر خروجی‌های مدل از جمله جریان رودخانه و دبی پایه داشتند مشخص گردیدند. واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT به صورت جامع و حتی‌الامکان با توجه به داده‌های مشاهداتی دبی ایستگاه‌های هیدرومتری، تراز آب زیرزمینی، دبی پایه، تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی و عملکرد محصولات در منطقه مطالعاتی انجام می‌گیرد. بدین منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل طی یک فرایند چند مرحله‌ای در شرایط اعمال آبیاری انجام می‌گیرد. در گام اول به منظور اطمینان از عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریانات سطحی و آب زیرزمینی و اندرکنش آن‌ها، واسنجی مدل صرفاً با استفاده از داده‌های دبی، دبی پایه و تراز آب زیرزمینی، انجام می‌گیرد. پس از اطمینان از عملکرد مدل در بخش اول در گام دوم، واسنجی مدل در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی و عملکرد محصولات با استفاده از پارامترهای مؤثر انجام می‌پذیرد. ارزیابی میزان تطابق نتایج در هر مرحله از واسنجی نیز با استفاده از شاخص‌های آماری R^2، NS، Pfactor و Rfactor انجام گرفت. محدوده این پارامترها برای ۱۱ ایستگاه هیدرومتری منطقه به ترتیب عبارت بودند از ۰/۶۵ تا ۰/۹۹، ۰/۵۲ تا ۰/۹۶، ۰/۵۶ تا ۰/۸۹ و ۰/۲۴ تا ۰/۴۵، که همگی در محدوده قابل قبولی هستند (شکل ۴). تغییرات مکانی شاخص‌های R^2 و NS بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی تغییرات حجم آبخوان‌های محدوده در دوره آماربرداری موجود در شکل ۵ ارائه شده است. مقدار شاخص‌های R^2 و NS برای واسنجی مدل بر اساس حجم دریاچه به ترتیب در ۰/۸۳ و ۰/۸۷ آبخوان‌ها بالای ۵۰ درصد می‌باشد و حداکثر انحراف بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی در حدود ۲۶ درصد است. نتایج حاصل بیانگر عملکرد مطلوب مدل در شبیه‌سازی تغییرات حجم آبخوان‌ها در غالب محدوده‌های مطالعاتی می‌باشد (Delavar et al., 2017; Delavar and Mord, 2017b).

۳-۲- بررسی وضعیت حوضه در شرایط تغییر اقلیم

۳-۲-۱- بررسی مؤلفه‌های اصلی بیلان آبی حوضه در شرایط تغییر اقلیم

نتایج مندرج در شکل ۶ نشان می‌دهد که مقدار متوسط سالانه بارش در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره ۳۰ ساله پایه آن کاهش خواهد یافت. بیشترین کاهش در حجم بارش در سناریو RCP2.6 به میزان ۷ درصد نسبت به دوره پایه می‌باشد. این در حالی است که سناریوهای RCP 4.5 و RCP8.5 کاهش حجم بارش کمتری را خواهند داشت. مقدار متوسط تبخیر–تعرق سالانه (از مراتع و اراضی کشاورزی) که بزرگ‌ترین مؤلفه خروجی آب از حوضه می‌باشد نیز در دوره پایه بالغ بر ۸ میلیارد مترمکعب می‌باشد که حدود ۷۶ درصد بارش را شامل

www.SID.ir

Archive of SID

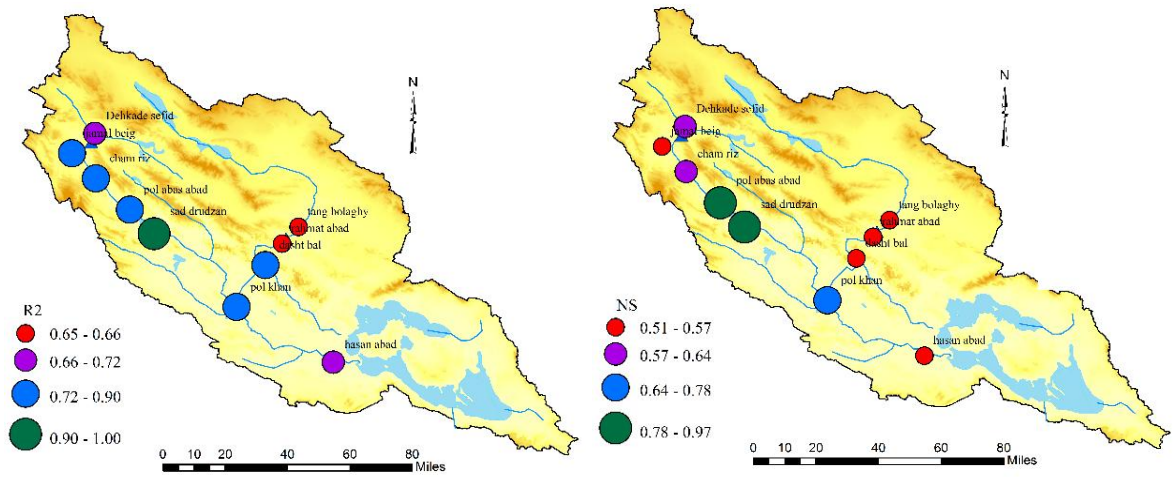


Fig. 4- Calibration and validation out flow in Available stations of basin(Delavar et al., 2017)

شکل ۴- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی دبی در ایستگاه‌های موجود در حوضه (Delavar et al., 2017)

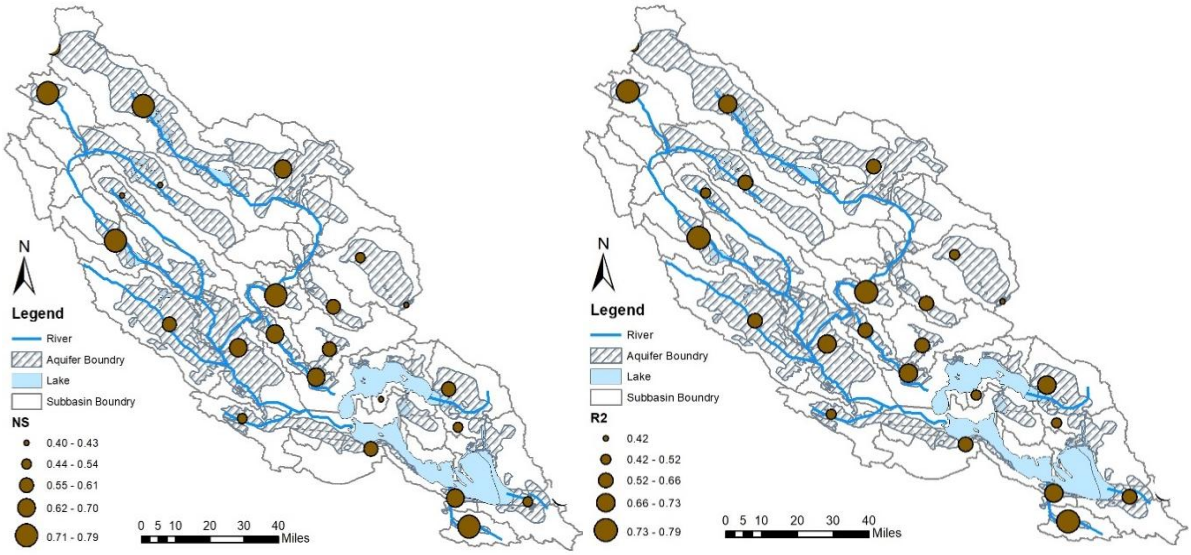


Fig. 5- Spatial representation of R^2 and NS index values between observed and simulated values of aquifer level changes in study area. (Delavar et al., 2017)

شکل ۵- نمایش مکانی مقادیر شاخص R^2 و NS بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تغییرات تراز آبخوان‌های منطقه مطالعاتی (Delavar et al., 2017)

می‌شود. این مقدار به ترتیب تحت تأثیر سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و تحت تأثیر تغییرات بارش و دما در حوضه آبریز به میزان ۸/۰۸، ۸/۲۶ و ۸/۲۷ میلیارد مترمکعب می‌رسد. بر این اساس خروجی متوسط سالانه از رودخانه‌های حوضه در دوره پایه ۰/۸۶ میلیارد مترمکعب می‌باشد که تحت تأثیر تغییر اقلیم به طور متوسط تا حدود ۰/۶۸ میلیارد مترمکعب حوضه کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه آن است که علی‌رغم کاهش بارندگی‌ها در منطقه، میزان تبخیر–تعرق اراضی در سناریوها افزایش یافته است. در کنار افزایش تبخیر–تعرق، کاهش قابل توجه حجم ذخایر آب سطحی و زیرزمینی مؤید افزایش مصارف آب آبی در منطقه مطالعاتی به دلیل افزایش نیاز آبی در حوضه می‌باشد.

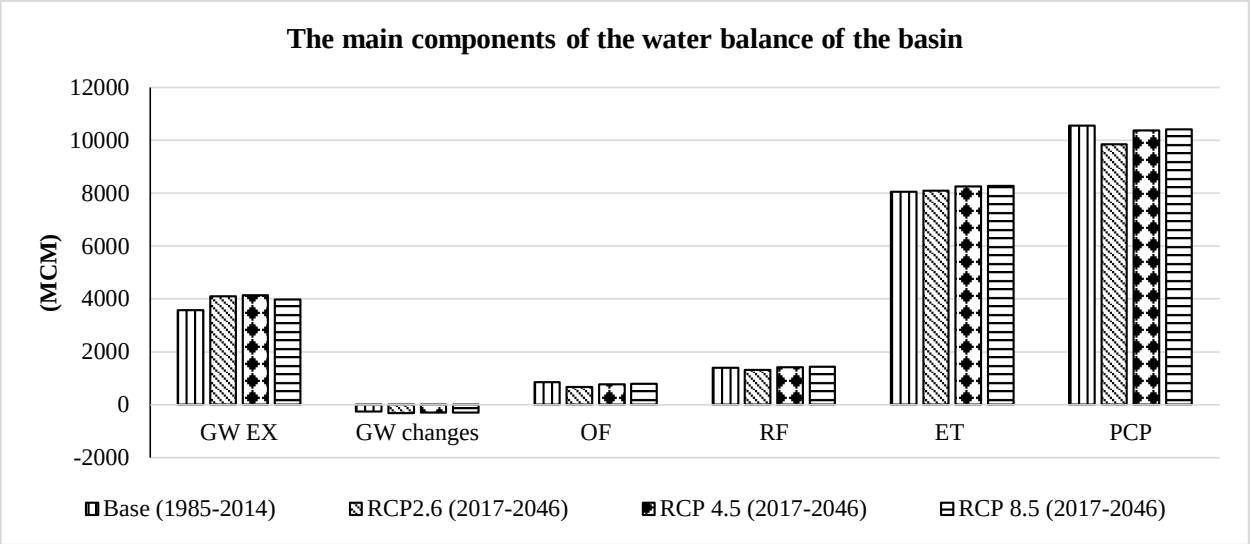
همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است میزان کاهش ذخایر آب زیرزمینی در سطح حوضه‌ای با توجه به کاهش ۶ تا ۹ درصدی بارش در شرایط تغییر اقلیم و افزایش نسبی دما و مصارف واقعی آب در سطح حوضه کاهش ذخایر آب زیرزمینی به میزان حدود ۲۹۶ تا ۳۱۲ میلیون مترمکعب نسبت به شرایط اخیر حوضه دور از انتظار نیست.

۳-۲-۲- تحلیل حسابداری رد پای آب حوضه در شرایط تغییر اقلیم

با توجه به جدول ۱ مقدار رد پای آب آبی حوضه در شرایط تغییر اقلیم حدود ۱۱ درصد افزایش یافته است. که این تغییرات می‌تواند به دلیل

www.SID.ir

Archive of SID



GW EX: Groundwater Extraction, GW changes: Groundwater Changes, OF: Out Flow, RF:Return Flow, ET: Evapotranspiration, PCP: Precipitation.

Fig. 6- The main componant of the water balance of the basin in Baseline and climate change (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5) Periods (MCM)

شکل ۶- مؤلفه‌های اصلی بیلان آبی حوضه در شرایط پایه و تغییر اقلیم (RCP2.6، RCP 4.5، RCP8.5) (MCM).

افزایش برداشت و به نوبه آن مصارف ناشی از تغییرات شرایط اقلیمی باشد به این ترتیب که برخلاف کاهش بارش، مقدار برداشت به واسطه تغییرات مصارف آبی حدود ۸ تا ۹ درصد افزایش داشته است.

این در حالی است که مقدار آب آبی در دسترس حوضه در هر سه سناریوی اقلیمی کاهش یافته است. این کاهش در RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب ۱۸، ۸ و ۷ درصد می‌باشد. بنابراین RCP 2.6 با توجه کاهش بیشتر بارش نسبت به سایر سناریوها موجب کاهش آب آبی در دسترس نیز شده است و مقدار آن به ۲۰۵۷ میلیون مترمکعب رسیده است.

در کنار افزایش رد پای آب آبی کشاورزی، مقدار رد پای آب سبز کشاورزی حوضه نیز با تغییر اقلیم افزایش خواهد یافت. این افزایش در RCP 2.6 ۶ درصد، RCP 4.5 ۹/۴۶ درصد، RCP 8.5 ۹/۷ درصد نسبت به دوره پایه می‌باشد که دلیل اصلی آن افزایش نسبی دما می‌باشد این در حالی است که مقدار آب سبز در دسترس کشاورزی حوضه نیز با اعمال سناریوهای تغییر اقلیم افزایش ۶ درصدی با RCP 2.6 و ۹/۵۸ درصدی با RCP 4.5 و ۹/۸ درصدی با RCP 8.5 یافته است.

در شکل ۷ اختلاف حسابداری ردپای آب در شرایط پایه نسبت به شرایط تغییر اقلیم به صورت مکانی و بر اساس تقسیم‌بندی حوضه به چهار محدوده بر مبنای ویژگی‌های هیدرولوژیکی آن‌ها (Delavar et al., 2017) آورده شده است. با توجه به شکل (۷- الف) آب آبی در دسترس بخش کشاورزی، در مناطق دو، سه و چهار با اعمال سناریوهای اقلیمی به طور متوسط به ترتیب حدود ۲۱، ۲۴ و ۳ درصد کاهش یافته است این کاهش در آب آبی در دسترس در شرایط تغییر اقلیم به دلیل کاهش بارندگی، افزایش نسبی دما و به نوبه آن کاهش منابع آب تجدیدپذیر می‌باشد.

Table 1- Water Footprint accounting of the basin in Baseline and climate change (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5) Periods (MCM)

جدول ۱- حسابداری رد پای آب کشاورزی حوضه در شرایط پایه و تغییر اقلیم (RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 8.5)

Water Footprint Accounting	Base (1985-2014)	RCP 2.6 (2017-2046)	RCP 4.5 (2017-2046)	RCP 8.5 (2017-2046)
Blue Water footprint	2066.3	2297.7	2299.8	2300.3
Blue Water Available	2512.9	2057	2311.5	2328.1
Green Water footprint	1948.5	2062.7	2132.8	2137.1
Green Water Available	1952.7	2068.2	2139.8	2144.3

www.SID.ir

Archive of SID

اما در ناحیه یک به واسطه شرایط متفاوت و کوهستانی آن و اثرات تغییر اقلیم بر الگو و رواناب ناشی از ذوب برف در این منطقه افزایش حدود ۱۴ درصدی آب آبی در دسترس در شرایط تغییر اقلیم مشاهده می‌گردد. همچنین با توجه به شکل (۷- ب) مقدار رد پای آب آبی کشاورزی در شرایط متوسط تغییر اقلیم در هر چهار منطقه به ترتیب حدود ۴۲، ۱۴، ۱۱ و ۲ درصد افزایش یافته است.

این در حالی است که مقدار آب سبز در دسترس کشاورزی با توجه به شکل (۷- ج) در ناحیه یک، دو و سه با تغییر اقلیم به ترتیب ۴۲، ۱۰ و ۴ درصد افزایش یافت و اما در ناحیه چهار این عامل موجب کاهش آب سبز در دسترس کشاورزی به مقدار ۱۰ درصد شده است. تغییرات رد پای آب سبز حوضه با آب سبز در دسترس حوضه تطابق دارد. مقدار رد پای آب سبز کشاورزی حوضه با توجه به شکل (۷- د) در مناطق یک، دو و سه به ترتیب افزایش ۴۲، ۱۰ و ۴ درصدی داشته‌اند. این در حالی است که تغییر اقلیم در ناحیه چهار موجب کاهش رد پای آب سبز شده و ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت.

۳-۲-۳- بررسی پایداری حوضه در شرایط تغییر اقلیم

با توجه به شکل ۸، در حوضه آبریز طشک- بختگان شاخص کمبود آب سبز نشان‌دهنده قرار گرفتن در آستانه پایداری آب سبز در شرایط پایه می‌باشد (مقدار شاخص کمبود آب سبز در حوضه در حدود یک). بنابراین هرگونه برنامه‌ریزی به منظور توسعه مصرف آب سبز می‌تواند منجر به ناپایداری استفاده از این منبع آبی و به نوبه آن کاهش ذخایر آب سبز و همچنین تأثیرات منفی بر آب آبی گردد.

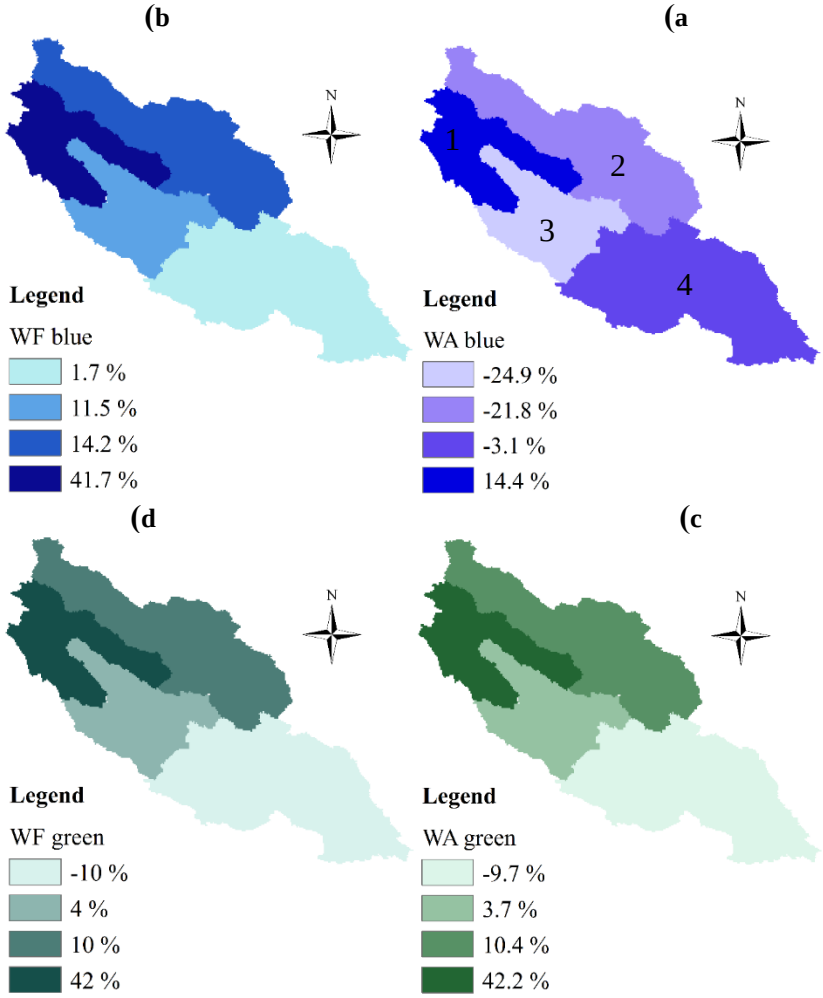


Fig. 7- Percentages of changes water footprint accounting between Baseline (1985-2014) and climate change (2017-2046) (a) Blue Water Available (b) Blue Water footprint (c) Green Water Available (d) Green Water footprint

شکل ۷- درصد اختلاف حسابداری ردپای آب کشاورزی در شرایط پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) نسبت به میانگین شرایط تغییر اقلیم (۲۰۴۶-۲۰۱۷) a) آب آبی در دسترس b) رد پای آب آبی c) آب سبز در دسترس d) ردپای آب سبز

www.SID.ir

Archive of SID

از این رو سیاست‌های متکی بر توسعه مصرف از آب سبز نظیر اقدام موکد برنامه ششم توسعه کشور در زمینه توسعه باغات دیم در اراضی شیب‌دار عملاً در این حوضه در جهت پایداری منابع آبی حوضه نه تنها کارائی لازم را نخواهد داشت بلکه می‌تواند منجر به تشدید و یا مشکلات جدیدی در این حوضه گردد. این در حالی است که مقدار شاخص کمبود آب آبی در حوضه در شرایط پایه کم‌تر از یک می‌باشد. در این شرایط به دلیل تجمع ردپای آب آبی و آب آبی در دسترس برای حوضه و همچنین اثرات بالادستی و ارتباط حوضه‌ها ممکن است تجمع آب آبی در دسترس و ردپای آب آبی در منطقه، ناپایداری را در منطقه نشان ندهد و پایداری در یک سری مناطق بالادست که آب در دسترس بیشتری در اختیار دارند، ناپایداری در مناطق پایین‌دست را پنهان کنند.

در ادامه دو معیار پایداری کمبود آب آبی زیرزمینی و کمبود نیاز زیست‌محیطی دریاچه طشک بختگان مورد بررسی قرار می‌گیرد. شاخص کمبود آب زیرزمینی در شرایط پایه بیشتر از یک و برابر ۲/۲ می‌باشد که نشان‌دهنده ناپایداری آب زیرزمینی حوضه و برداشت بیشتر از آب زیرزمینی نسبت به نفوذ به آن می‌باشد. شاخص کمبود نیاز زیست محیطی دریاچه طشک- بختگان در دوره پایه برابر ۱/۲۴ می‌باشد که نشان می‌دهد نیاز زیست محیطی دریاچه (۵۲۵ میلیون متر مکعب) تامین نشده است.

طبق شکل ۸ مقدار شاخص کمبود آب سبز حوضه در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه تغییر چندانی نکرده که شرایط پایدار حوضه را نشان می‌دهد البته این پایداری به منزله عدم تغییر در منابع آب سبز تلقی نمی‌گردد و صرفاً تناسب رد پای آب سبز و آب سبز در دسترس بخش کشاورزی را بیان می‌کند. مقدار شاخص کمبود آب آبی در تغییر اقلیم در هر سه سناریوی اقلیمی RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 نسبت به دوره پایه ۳۵، ۲۱ و ۲۰ درصد افزایش یافته است که آستانه پایداری حوضه را رد می‌کند در این شرایط سناریوی RCP 2.6 با شاخص کمبود آب آبی ۱/۱۲ بیشترین اثرات منفی در ناپایداری آب آبی حوضه را ایجاد می‌کند.

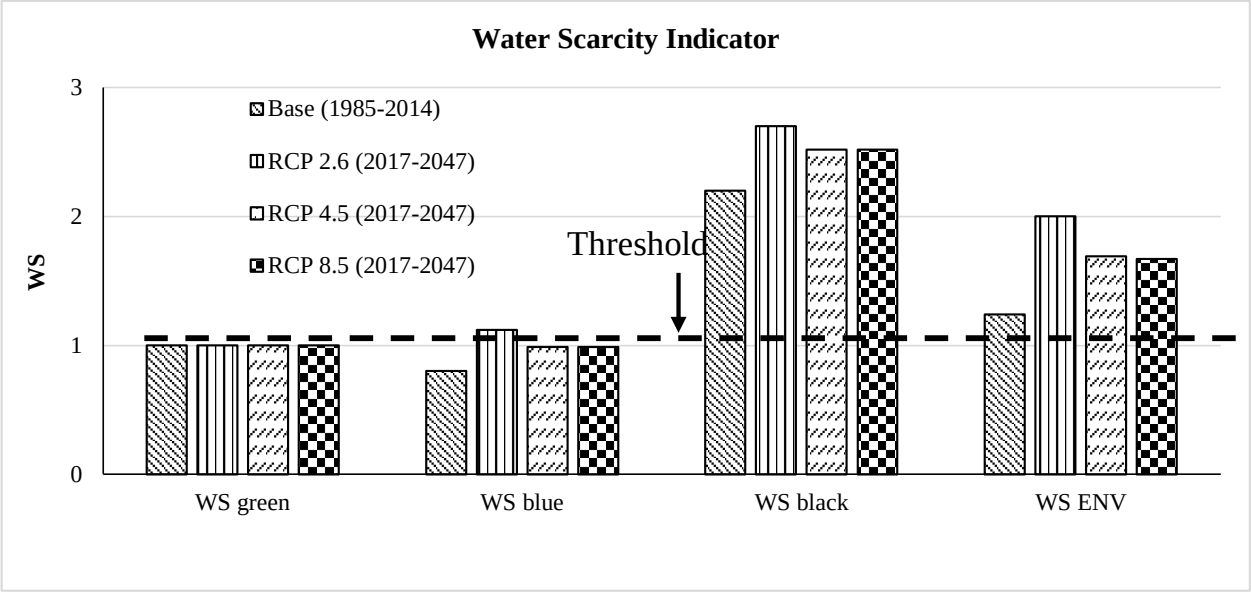
از طرفی با توجه به شکل ۸ مقدار شاخص کمبود آب زیرزمینی در هر سه سناریوی تغییر اقلیم در سناریوی RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب حدود ۲۷، ۱۶/۵ و ۱۵/۹ درصد افزایش یافته و بیشتر از آستانه پایداری می‌باشد. بیشترین افزایش در شاخص کمبود آب زیرزمینی در سناریوی RCP 2.6 با مقدار ۲/۸ می‌باشد. همچنین شاخص کمبود نیاز زیست‌محیطی دریاچه طشک بختگان نیز در شرایط تغییر اقلیم (RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5) به ترتیب ۹۸، ۷۱ و ۹۶ درصد افزایش یافته است که بیشترین افزایش مربوط به RCP 2.6 می‌باشد که به مقدار ۱/۹۵ افزایش یافته است. بنابراین با توجه به بررسی شاخص‌های پایداری آب زیرزمینی و زیست‌محیطی به عنوان مؤلفه‌های آب آبی حوضه، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که شرایط تغییر اقلیم منجر به تشدید ناپایداری آب آبی در حوضه شده است. این مسأله عمدتاً ناشی از تشدید بارگذاری بر منابع آب حوضه به واسطه افزایش مصارف آبی (رد پای آب) که ناشی از تغییرات نیاز آبی محصولات کشاورزی در حوضه می‌باشد، ایجاد گردیده است. این مهم در کنار کاهش آب آبی در دسترس در حوضه در شرایط تغییر اقلیم حاکی از تشدید تنش‌های آبی در حوضه و به نوبه آن تخریب سیستم‌های وابسته می‌باشد. در این شرایط مهم‌ترین راهکار کاهش مصارف واقعی و متوازن با پتانسیل‌های منابع آبی حوضه می‌باشد. در این زمینه استفاده از راهکارهایی که منجر به کاهش رد پای آب در حوضه می‌گردد نظیر کاهش سطح زیر کشت، کم‌آبیاری، تغییر الگوی کشت و تغییر تقویم زراعی می‌تواند به عنوان راهکارهای مؤثر در بخش کشاورزی مطرح گردند. نکته دیگری که در بکارگیری راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم می‌بایست در نظر گرفته شود توجه به اصل بهم پیوستگی آب سبز و آبی می‌باشد. اصولا راهکارهای منجر به افزایش رد پای آب سبز می‌تواند کاهش آب آبی در دسترس و ایجاد و یا تشدید ناپایداری آب آبی را به دنبال داشته باشد. لذا پیشنهاد اقدامات تأثیرگذار بر آب سبز نظیر اقدامات آبخیزداری و توسعه اراضی دیم می‌بایست با توجه به اثرات جانبی این راهکارها بر پایداری منابع آب آبی مورد توجه قرار گیرند. به عنوان مثال مطالعاتی که توسط بانک جهانی (Scheierling et al., 2013)، مؤسسه بین‌المللی آب استکهلم (Karlberg et al., 2009) و دانشگاه تگزاس (Scanlon et al., 2007) در خصوص بررسی تأثیرات توسعه کشاورزی دیم از جمله باغات انجام گرفته است حاکی از تأثیرات منفی چنین توسعه‌هایی بر منابع آب آبی حوضه‌های آبریز می‌باشد. بنابراین هر چند چنین راهکارهایی برای افزایش تولید محصولات و ارتقاء بهره‌وری بخش کشاورزی می‌تواند مناسب تلقی گردد، ولی اثرات جانبی آن می‌تواند متناقض با اهداف پایداری آب آبی باشد.

۴- جمع‌بندی

هدف اصلی در این تحقیق، بررسی و کمی‌سازی اثرات تغییر اقلیم از دیدگاه رد دپای آب می‌باشد. در این راستا مطالعات انجام شده در حوضه آبریز طشک بختگان به عنوان حوضه پایلوت و با استفاده از نتایج مدل شبیه‌سازی جامع SWAT، انجام گرفت و جهت بررسی وضعیت فعلی حوضه در شرایط پایه و تغییر اقلیم از چارچوب ارزیابی پایداری رد پای آب استفاده گردید. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر قابل بیان می‌باشد:

www.SID.ir

Archive of SID



WS_{green}=Green Water Scarcity, WS_{blue}=Blue Water Scarcity, WS_{black}=Ground Water Scarcity, WS_{ENV}= Environmental Blue Water Scarcity

Fig. 8- Sustainable indicators of agricultural water footprint in baseline and climate change (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5) Periods

شکل ۸- شاخص‌های پایداری رد پای آب کشاورزی حوضه در شرایط پایه و تغییر اقلیم (RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 8.5)

- بررسی شاخص‌های پایداری در وضعیت فعلی حوضه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) حاکی از ناپایداری آب زیرزمینی و نشان‌دهنده تشدید بهره‌برداری ناپایدار در این دوره به واسطه افزایش رد پای آب آبی است. شاخص‌های کمبود نیاز زیست‌محیطی حوضه (ازجمله تأمین آب دریاچه‌ها) نیز بیانگر ناپایداری آن در دوره پایه و توسعه نامتوازن بارگذاری‌های آبی است که نهایتاً خشکی دریاچه‌های طشک-بختگان را منجر گردیده است.
- به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت منابع آب و کشاورزی حوضه آبریز طشک بختگان از ترکیب خروجی‌های دما و بارش سه مدل AOGCM سری CMIP5 تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد و چشم‌انداز شرایط آبی و کشاورزی حوضه با استفاده نتایج مدل SWAT در دوره ۲۰۴۶-۲۰۱۷ تبیین شد. نتایج حاصل نشان داد که با اعمال شرایط تغییر اقلیم مقدار بارش در هر سه سناریو کاهش یافت، که بیشترین کاهش مربوط به سناریوی RCP2.6 به میزان ۷ درصد نسبت به دوره پایه و سپس RCP4.5 و بعد RCP8.5 می‌باشد. مقدار متوسط تبخیر-تعرق سالانه نیز به ترتیب تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و تحت تأثیر تغییرات بارش و دما در حوضه آبریز افزایش یافته و از مقدار ۸ میلیارد مترمکعب به میزان ۸/۰۸، ۸/۲۶ و ۸/۲۷ میلیارد مترمکعب می‌رسد. از طرفی تحت تأثیر تغییر اقلیم خروجی متوسط سالانه از رودخانه‌های حوضه از ۰/۸۶ میلیارد مترمکعب در دوره پایه به طور متوسط تا حدود ۰/۶۸ میلیارد مترمکعب کاهش یافت.
- بررسی شاخص‌های پایداری مبتنی بر رد پای آب نیز در شرایط تغییر اقلیم نشان داد مقدار شاخص کمبود آب آبی در حوضه در هر سه سناریوی اقلیمی RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 نسبت به دوره پایه ۳۵، ۲۱ و ۲۰ درصد افزایش یافته است، در این شرایط بیشترین افزایش مربوط به سناریوی RCP 2.6 با شاخص کمبود آب آبی ۱/۱ می‌باشد که بیشترین اثرات منفی در ناپایداری آب آبی حوضه را ایجاد می‌کند. همچنین مقدار شاخص‌های کمبود آب زیرزمینی و کمبود نیاز زیست‌محیطی در هر سه سناریوی تغییر اقلیم افزایش یافته و بیشتر از آستانه پایداری می‌باشد، بیشترین افزایش در این شاخص‌ها نیز در سناریوی RCP 2.6 به ترتیب برابر با مقدار ۲/۸ و ۱/۹ می‌باشد که بدترین حالت را داشته است. به عبارتی تحت تأثیر تغییر اقلیم، روند کاهشی آب در دسترس حوضه ادامه می‌یابد و به حدود ۲/۱ میلیارد مترمکعب می‌رسد. متعاقباً، ارقام شاخص‌های ناپایداری حوضه متأثر از کاهش منابع و افزایش رد پای آب تا ۳۵ درصد بیشتر می‌شود. این نتایج حاکی از کاهش منابع آب در دسترس حوضه و از طرفی تشدید بارگذاری آبی بر حوضه در صورت ادامه مدیریت فعلی حوضه (BAU) در شرایط تغییر اقلیم می‌باشد.
- تشدید وضعیت ناپایداری منابع آبی حوضه به واسطه اثر متقابل کاهش آب در دسترس و افزایش رد پای آب آبی مؤید لزوم بازنگری در الگوی مصارف آبی در حوضه و بکارگیری راهکارهای سازگاری مؤثر در کاهش رد پای آب می‌باشد. در این زمینه استفاده از راهکارهایی که منجر به کاهش رد پای آب در

www.SID.ir

Archive of SID

حوضه می‌گردد نظیر کاهش سطح زیر کشت، کم‌آبیاری، تغییر الگوی کشت و تغییر تقویم زراعی می‌تواند به عنوان راهکارهای مؤثر در بخش کشاورزی مطرح گردند. اما آنچه در بکارگیری راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم می‌بایست در نظر گرفته شود توجه به اصل بهم پیوستگی آب سبز و آبی می‌باشد. اصولا راهکارهای منجر به افزایش رد پای آب سبز می‌تواند کاهش آب آبی در دسترس و ایجاد و یا تشدید ناپایداری آب آبی را به دنبال داشته باشد. لذا پیشنهاد اقدامات تأثیرگذار بر آب سبز نظیر اقدامات آبخیزداری و توسعه اراضی دیم می‌بایست با توجه به اثرات جانبی این راهکار ها بر پایداری منابع آب آبی انجام گردد و ظرفیت صرفه‌جویی اقدامات و سرمایه‌گذاری سنگین برای آن‌ها باید به‌طور واقع‌بینانه و در بستری نظام‌مند مورد ارزیابی قرار گیرند.

پی‌نوشت‌ها

1- Athabasca
2- Regional Climate Models
3- Kelantan
4- Water Footprint
5- Savannah River Basin
6- Environmental Flow Requirement
7- Atmosphere_Ocean General Circulation Model
8- Coupled Model Inter Comparison Project5
9- Representative Concentration Pathways (RCPs)

۵- مراجع

Abbaspour K C, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, and Srinivasan R (2007) Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. Journal of Hydrology 333(2-4):413-430

Ayala L M, van Eupen M, Zhang G, Pérez-Soba M, Martorano L G, Lisboa L S, and Beltrao N E (2016) Impact of agricultural expansion on water footprint in the Amazon under climate change scenarios. Science of the Total Environment 569:1159-1173

Baelemans A, Muys B (1998) A critical evaluation of environmental assessment tools for sustainable forest management. In: Ceuterick, D. (Ed.), Proceedings of the International Conference on Life Cycle Assessment in Agriculture, Agro-Industry and Forestry, Brussels, December 3-4:65-75

Brouziyne Y, Abouabdillah A, Hirich A, Bouabid R, Zaaboul R and Benaabidate L (2018) Modeling sustainable adaptation strategies toward a climate-smart agriculture in a Mediterranean watershed under projected climate change scenarios. Agricultural Systems 162:154-163

Chico D, Aldaya M M, and Garrido A (2013) A water footprint assessment of a pair of jeans: the influence of agricultural policies on the sustainability of consumer products. Journal of Cleaner Production 57:238-248

Delavar M, Morid S, and Morid R (2017) Basin-wide water accounting based on modified SWAT model (SWAT-PARS): an application on the Tashk-BakhteganBasin, Iran. 2017 International SWAT Conference in Warsaw, Poland

Delavar M and Mord S (2017b) Simulation of water resources and agricultural systems of Tashk-Bakhtegan Basin. Technical report, Ministry of Energy

Dietrich J and Maier N (2016) Using SWAT for strategic planning of basin scale irrigation control policies: a case study from a humid region in northern Germany. Water Resources Management 30(9):3285-3298

Ercin A E, Aldaya M M, and Hoekstra A Y (2012) The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products. Ecological Indicators 18:392-402

Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, and Mekonnen M M (2011) The water footprint assessment manual. Setting the Global Standard. Earthscan, London

Karlberg L, Rockström J, and Falkenmark M (2009) Water resource implications of upgrading rainfed agriculture–focus on green and blue water trade-offs. Rainfed Agriculture: Unlocking the Potential, 7, 44

Lane M E, Kirshen P H, and Vogel R M (1999) Indicators of impacts of global climate change on US water resources. Journal of Water Resources Planning and Management 125(4):194-204

Le Roux B, van der Laan M, Vahrmeijer T, Bristow K L and Annandale J G (2017) Establishing and testing a catchment water footprint framework to inform sustainable irrigation water use for an aquifer under stress. Science of the Total Environment 599:1119-1129

Massah A, Morid M, Delavar M (2016) Assessment of climate change ipmacts on hydrological condition of Tashk-Bakhtegan Basin. Technical Report, Ministry of Rnergy, Iran (In Persian)

Mitchell T D (2003) Pattern scaling: an examination of the accuracy of the technique for describing future climates. Climatic Change 60(3):217-242

Pellicer-Martínez F and Martínez-Paz J M (2016) The water footprint as an indicator of environmental

www.SID.ir

Archive of SID

the Athabasca River Basin Canada. Science of the Total Environment 601:425-440

Shukuhi A and Hung Y (2011) Use of morphological characteristics in permanent rivers to determine the minimum water requirement of ecological environment. Journal of Environmental Studies 58:117-128

Tan M L, Yusop Z, Chua V P and Chan N W (2017) Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin Malaysia. Atmospheric Research 189:1-10

Van Vuuren D P, Stehfest E, den Elzen M G, Kram T, van Vliet J, Deetman S, ... and Oostenrijk R (2011) RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 C. Climatic Change 109(1-2):95

Veettil A V and Mishra A K (2016) Water security assessment using blue and green water footprint concepts. Journal of Hydrology 542:589-602

Wilby R L and Harris I (2006) A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. Water Resources Research 42(2)

Yang J, Reichert P, Abbaspour K C, Xia J, and Yang H (2008) Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. Journal of Hydrology 358(1):1-23

sustainability in water use at the river basin level. Science of the Total Environment 571:561-574

Pellicer-Martínez F, González-Soto I, and Martínez-Paz J M (2015) Analysis of incorporating groundwater exchanges in hydrological models. Hydrological Processes 29(19):4361-4366

Santhi C, Muttiah R S, Arnold J G, and Srinivasan R (2005) A GIS-based regional planning tool for irrigation demand assessment and savings using SWAT. Transactions of the ASAE 48(1):137-147

Scanlon B R, Jolly I, Sophocleous M, and Zhang L (2007) Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. Water Resources Research 43(3)

Scheierling S M, Critchley W R S, Wunder S, and Hansen J W (2013) Improving water management in rainfed agriculture: Issues and options in water-constrained production systems. Water Paper, Water Anchor, TWIWA, World Bank

Senent-Aparicio J, Pérez-Sánchez J, Carrillo-García J, and Soto J (2017) Using SWAT and Fuzzy TOPSIS to assess the impact of climate change in the headwaters of the Segura River Basin (SE Spain). Water 9(2):149

Shrestha N K, Du X, and Wang J (2017) Assessing climate change impacts on fresh water resources of

www.SID.ir