

## مدلسازی هیدرولوژیکی اثرات تغییر اقلیمی بر نوسانات دبی جریان در حوزه‌های آبخیز سیمینه‌رود و زرینه‌رود

پروانه محمودی<sup>۱</sup>، بهارک معتمدوزیری<sup>۲\*</sup>، مجید حسینی<sup>۳</sup>، حسن احمدی<sup>۴</sup> و عطا امینی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، <sup>۲</sup> استادیار، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، <sup>۳</sup> دانشیار ژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، <sup>۴</sup> استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران و <sup>۵</sup> دانشیار بخش تحقیقات آبخیزداری، مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۸

### چکیده

این پژوهش، بر شبیه‌سازی و مدیریت پاسخ‌های مختلف هیدرولوژیکی به تغییرات آب و هوایی تمرکز دارد. از مدل هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی SWAT (ابزار ارزیابی خاک و آب) برای ارزیابی رواناب و بیلان آبی در اثر تغییرات اقلیمی در حوزه آبخیز سیمینه و زرینه‌رود استفاده شد. دوره شبیه‌سازی بین سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۹۰ انتخاب شد. نتایج ارزیابی مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از مقادیر NS و  $R^2$  به‌طور متوسط ۰/۷۵ به‌دست آمد. با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری به‌وسیله مدل‌های اقلیمی MIROC-ESM-CHEM، GFDL-ESM2M و NorESM1-M در مدل Lars-WG اطلاعات اقلیمی آینده تحت دو سناریوی خوش‌بینانه RCP 2.6 و بدبینانه RCP8.5 به‌مدل وارد شدند. نتایج شبیه‌سازی اقلیمی نشان داد که میانگین دما در سناریوی خوش‌بینانه، به‌طور متوسط  $0.75^\circ\text{C}$  و در سناریوی بدبینانه به‌طور متوسط  $1.45^\circ\text{C}$  افزایش خواهد یافت. بیشترین تغییرات رواناب در دوره آینده، مربوط به ماه می با  $2/4\text{ m}^3\text{s}^{-1}$  کاهش و ماه آوریل با  $1/94\text{ m}^3\text{s}^{-1}$  افزایش در سناریو خوش‌بینانه است. همچنین، در سناریوی بدبینانه، RCP8.5 در ماه‌های می و ژوئن بیشترین کاهش رواناب اتفاق افتاد. میزان تبخیر تعرق واقعی ماهانه در سناریو خوش‌بینانه با ۳ mm افزایش و در سناریو بدبینانه با ۸ mm افزایش تأثیر منفی بر منابع آب در دسترس در حوزه آبخیز خواهد گذاشت. با برآورد تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر روی دبی جریان می‌توان مدیریت مناسب‌تری را بر روی حوزه آبخیز سیمینه و زرینه‌رود اعمال کرد.

واژه‌های کلیدی: بیلان آبی، دریاچه ارومیه، مدل‌سازی عددی، SUFI2، Lars-WG

### مقدمه

(۲۰۰۱). انتظار می‌رود فرایندهای هیدرولوژیکی در یک حوضه با تغییرات آب و هوا تغییر کند که برآورد این تغییرات برای مدیریت حوزه آبخیز بسیار حائز اهمیت است. تغییرات اقلیمی می‌تواند رخداد‌های سیلابی شدید و طوفان را افزایش دهد و در نتیجه کشاورهای

پدیده‌های هیدرولوژیکی مانند بارندگی، تبخیر و تعرق، نفوذ، رواناب سطحی و جریان زیرسطحی، جریان‌های پایه و سیل، همگی برای بقای نوع بشر حیاتی و ضروری هستند (Middelkoop و همکاران،

Beven<sup>۳</sup> (۱۹۹۵) مبتنی بر استفاده از زمین<sup>۴</sup> Kite (۱۹۹۵) و ابزار ارزیابی خاک و آب<sup>۵</sup> Arnold (۱۹۹۸) از ابزارهای مهم برای مدیریت فرایندهای هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبخیز هستند. تلفیق مدل هیدرولوژیکی مانند SWAT با مدل‌های آب و هوایی جهانی (GCM) امکان‌سنجی تأثیر تغییرات اقلیمی را در منابع آب را ارزیابی می‌کند. مدل SWAT در حوضه‌های مختلف در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است. در ایالات متحده آمریکا، استفاده از آن برای تأثیرات تغییرات اقلیمی در تأمین منابع آب و مدیریت مخزن سد مورد استفاده قرار گرفته است که شامل مطالعات: ۱- تأثیر تغییرات اقلیمی منطقه بر آبخوان اوگالالا (Rosenberg و همکاران، ۱۹۹۹). ۲- تغییرات آب و هوایی تأثیر در مخزن رودخانه میسوری (Hotchkiss و همکاران، ۲۰۰۰). ۳- تأثیر تغییرات آب و هوایی بر عملکرد آب در حوضه کوهستانی (Fontaine و Hotchkiss، ۲۰۰۰). در پژوهشی Devkota و Gyawali (۲۰۱۵) اثرات تغییرات آب و هوایی را در حوضه رودخانه خوی در نپال تخمین زده‌اند. نتایج پژوهش Narsimlu و همکاران (۲۰۱۵) در هند نشان داد که در اواسط قرن ۲۰۵۰ میانگین جریان سالانه می‌تواند ۴/۱۶ درصد افزایش یابد و تا قرن پایانی (۲۰۹۸-۲۰۷۱) می‌تواند تا ۵/۹۳ درصد افزایش یابد. مدل SWAT همچنین برای تعادل آب حوضه رود کن در هند Murty و همکاران (۲۰۱۴) و پیش‌بینی جریان در حوضه رودخانه مادهیا پرادیش Narsimlu و همکاران (۲۰۱۳) مورد استفاده قرار گرفته است که نتایج نشان‌دهنده قابلیت این مدل در بررسی فرایندهای هیدرولوژیکی است. در داخل کشور نیز Hajimohammadi و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل SWAT و مدل ریزمقیاس گردانی SDSM اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه کن در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) را بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده افزایش رواناب برای فصل زمستان و کاهش رواناب برای سایر فصول است. به‌طور کلی نتایج کاهش هفت درصدی رواناب را برای دوره آتی نشان می‌دهد.

در حال توسعه، در برابر آسیب‌های اقتصادی بسیار آسیب‌پذیرتر خواهند بود (Mirza، ۲۰۰۳). پاسخ‌های هیدرولوژیکی به تغییرات بارش و میانگین دما در انواع مختلف کاربری‌ها می‌تواند متفاوت باشد. سامانه اقلیم در طول زمان تحت تأثیر محرک‌ها و بازخوردهای زیادی بین مؤلفه‌های سامانه اقلیم و عوامل خارجی شامل فوران‌های آتشفشانی، مدیریت منطقه و همچنین تغییرات حاصل از تابش خورشید است (Mohammadian، ۲۰۱۵). تغییر اقلیم باعث تغییر در میزان، زمان و نوع بارش، افزایش خشکسالی، افزایش تقاضا برای آب، تغییر در نوع مدیریت منابع آب و همچنین افزایش سطح آب دریاها و مشکلات ناشی از آن می‌شود. پژوهشگران و اقلیم‌شناسان در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش کلی زمین و به‌دنبال آن وضع اقلیم دهه‌های آتی کره زمین را مهمترین نگرانی موجود می‌شمارند (Maafi-Madani و همکاران، ۲۰۱۲). پیش‌بینی تغییرات اقلیم یکی از راه‌کارهای مدیریتی است که به برنامه‌ریزی صحیح برای استفاده از منابع محدود آب کمک شایانی می‌کند (Maafi-Madani و همکاران، ۲۰۱۲؛ Barrow و Yu، ۲۰۰۵).

مدلسازی هیدرولوژیکی به‌وسیله یک مدل ریاضی برای نشان‌دادن تعاملات بین فرایندهای هیدرولوژیکی مختلف از طریق رابطه بین آب، ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی و آب و هوا به‌کار می‌رود (Gosain و همکاران، ۲۰۰۹). بنابراین، مدلسازی یک ابزار بسیار مفید برای مطالعه پاسخ‌های هیدرولوژیکی به تغییرات اقلیمی و مدیریت منطقه است. پیشرفت‌های صورت گرفته در گذشته، حال و آینده مدل‌های هیدرولوژیکی به‌وسیله Todini (۲۰۰۷) مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی مفهومی در طول سال‌ها توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به‌عنوان مثال، مدل‌های توزیعی شامل: سامانه هیدرولوژیکی اروپا<sup>۱</sup> Abbott (۱۹۸۶) و مدل توزیعی هیدرولوژی<sup>۲</sup> Beven (۱۹۸۷) و مدل‌های نیمه‌توزیعی شامل: مدل هیدرولوژیکی مبتنی بر توپوگرافی

<sup>۳</sup> TOPMODEL<sup>۴</sup> SLURP<sup>۵</sup> Soil and Water Analysis Tool<sup>۱</sup> European Hydrologic System<sup>۲</sup> Institute of Hydrology distributed model

آذربایجان غربی واقع شده و طولی در حدود ۳۰۰ کیلومتر دارد. شاخه‌های اولیه این رودخانه از کوه‌های چهل چشمه کردستان و از مجاورت شاخه‌های اولیه قزل اوزن سرچشمه می‌گیرند و تقریباً موازی سیمینه‌رود در جهت شمال وارد دریاچه ارومیه می‌شود. در این پژوهش از اطلاعات نه ایستگاه هواشناسی در منطقه طی سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۸۸ استفاده شده است. همچنین از اطلاعات چهار ایستگاه هیدرومتری در مقیاس ماهانه برای واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شده است. اطلاعات مدیریتی حوضه نظیر آبیاری، الگوی کشت و عملکرد محصولات کشاورزی نیز در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

**مدل SWAT:** SWAT یک مدل هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه‌ای، مبتنی بر محاسبات تجربی است که به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد و می‌تواند شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی حوزه آبخیز و فعالیت‌های مدیریتی بر روی کیفیت آب و خاک را انجام دهد (Neitsch, ۲۰۱۱). در مدل SWAT، هر حوضه را می‌توان به چندین زیرحوضه تقسیم کرد و سپس هر زیرحوضه به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی یا HRU تقسیم می‌شود. در این پژوهش به‌دلیل جامع بودن مدل SWAT و توانایی شبیه‌سازی رواناب و رشد گیاهی به‌صورت پیوسته این مدل انتخاب شده است.

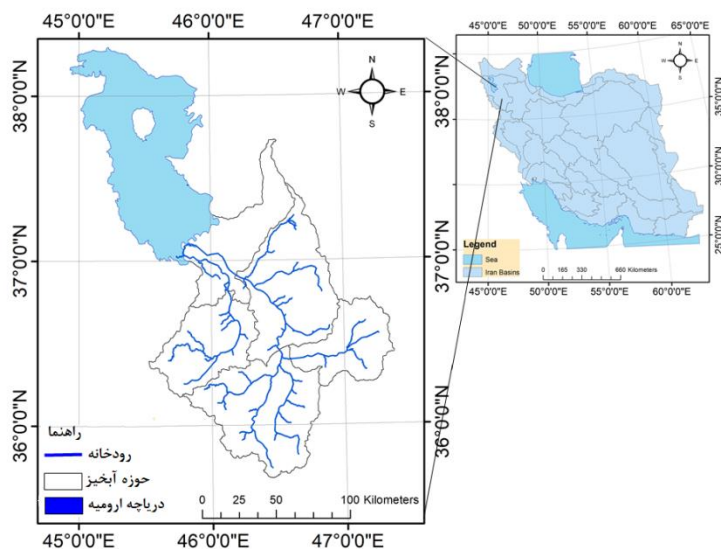
Goodarzi و Fatehifar (۱۳۹۸) با استفاده از مدل SWAT و مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP، تغییرات اقلیمی و رواناب منطقه را برای دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۵۹) بررسی کردند. نتایج کاهش دبی متوسط و افزایش فراوانی و شدت دبی‌های اوج در منطقه را نشان می‌دهند.

ایران یکی از مناطق کم‌آب در جهان است و به‌دلیل وابستگی شدید به کشاورزی حساس به تغییرات اقلیمی است (Nassiri و همکاران، ۲۰۰۶). برطبق بررسی‌های انجام‌گرفته تعداد کمی از مقالات از سناریوهای RCP در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی استفاده کرده‌اند. هدف از این پژوهش بررسی و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب ورودی به دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران است. در این پژوهش از سناریوهای RCP و مدل هیدرولوژیکی SWAT به‌منظور شبیه‌سازی اقلیمی و هیدرولوژیکی استفاده شده است.

## مواد و روش‌ها

### محدوده مطالعاتی و اطلاعات مورد استفاده:

زیرحوضه سیمینه و زرينه‌رود با وسعتی بیش از ۱۲۰۰۰ کیلومتر مربع، بزرگ‌ترین زیرحوضه‌های درجه چهار از حوضه بزرگ درجه دو دریاچه ارومیه است. این حوضه در موقعیت  $45^{\circ} 47' 47''$  تا  $47^{\circ} 20' 47''$  طول جغرافیایی و  $37^{\circ} 27' 27''$  تا  $41^{\circ} 41' 41''$  عرض جغرافیایی قرار گرفته است. رودخانه زرينه‌رود، در جنوب شرقی



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی و شبکه آبراهه

## اطلاعات ورودی مدل SWAT

## نقشه‌های رقومی

نقشه‌های رقومی: مدل SWAT با استفاده از نقشه‌های رقومی DEM، کاربری اراضی، خاک و شیب، به همراه اطلاعات اقلیمی روزانه، دمای بیشینه و کمینه، بارش، سرعت باد و رطوبت نسبی اجرا شد. اطلاعات مدیریتی حوزه آبخیز نظیر الگوی کشت، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به وسیله کشاورزی، اطلاعات سدهای موجود در منطقه نیز به صورت اختیاری به مدل ارائه شد. در این پژوهش از لایه DEM ۳۰ متری به همراه نقشه کاربری اراضی برای سال ۲۰۱۰ و نقشه خاک FAO استفاده شد.

اطلاعات کشاورزی و آبیاری: به منظور بهره‌گیری از پتانسیل داده‌های موجود در منطقه برای شبیه‌سازی دقیق‌تر و کسب نتایج قابل اطمینان اطلاعات کشاورزی موجود در منطقه بر اساس الگوی کشت گیاهان وارد مدل شد. بدین منظور از گیاهان گندم، جو، سیب زمینی، گوجه، چغندر قند، یونجه و سیب که به عنوان محصولات کشاورزی عمده در این حوضه

شناخته می‌شوند برای بالاتر بردن دقت مدل به مدل اضافه شدند. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به سطح زیرکشت و همچنین برنامه کشت این محصولات به همراه میزان کودهای مصرف شده از گزارش‌های مطالعات بیلان وزرات نیرو استخراج شده است (Ahmadzadeh و همکاران، ۲۰۱۶).

مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی: در این پژوهش از مدل‌های گردش عمومی جو که از جدیدترین گزارش IPCC تحت عنوان گزارش پنجم AR5 استخراج شده است، استفاده شد. از این مدل‌ها برای پیش‌بینی دو پارامتر دما و بارش استفاده شده است. داده‌های گزارش پنجم در پایگاه اینترنتی [www.cccsn.ec.gc.ca](http://www.cccsn.ec.gc.ca) قابل دسترس است. برای دریافت خروجی این مدل‌ها نیاز به انتخاب سناریوهای انتشار است که گزارش پنجم تحت چهار سناریوی انتشار ارائه شده است. در این بین سناریوی RCP2.6 سناریو خوش‌بینانه و RCP8.5 سناریوی بدبینانه یا بحرانی هستند. در این پژوهش نیز دوره ۳۰ ساله آینده نزدیک ۲۰۵۰-۲۰۲۱ در نظر گرفته شد.

جدول ۱- اطلاعات عمومی و الگوی کشت محصولات عمده کشاورزی در منطقه

مشخصات نوع محصول	سطح زیرکشت در محدوده مورد مطالعه (ha)			تاریخ کشت	تاریخ برداشت	کود (kg ha <sup>-1</sup> )	
	شاهین‌دژ	تکاب	سقز			ازته	فسفاته
گندم	۷۷۴۳	۳۳۶	۵۰۴	۱۵ مهر	۱۰ تیر	۱۲۰	۱۴۰
جو	۲۳۱۰	۲۱۰	۳۴۹	۱۵ مهر	۱۰ تیر	۱۲۰	۱۴۰
سیب‌زمینی	۳۵۴	۱۰۹	۱۵۶	۱۵ اردیبهشت	۱۵ مهر	۲۲۵	۲۶۰
گوجه‌فرنگی	۶۲۳	-	۲۴۸	۱۰ خرداد	۱۰ مهر	۳۹۰	۴۵۵
چغندر قند	۳۵۹	-	۸۸/۵	۱۰ فروردین	۳۰ مهر	۳۰۰	۳۴۰
یونجه	۴۷۹۳	۳۳۶۷	۳۲۱۱	۱۰ فروردین	۱۰ مهر	۲۲۰	۲۷۰
سیب	۲۸۵۰	۲۱۰	-	۱ اردیبهشت	۳۰ مهر	۳۵۰	۳۸۰

استفاده شد. در نرم‌افزار LARS-WG6 مدل‌های اقلیمی HADGEM2-ES، MIROC-ESM-CHEM، GFDL-ESM2M و NorESM1-M تحت دو سناریو اجرا شدند. سپس برای هر سناریو از این مدل‌ها میانگین‌گیری انجام شد و در نهایت تحت هر سناریو به مدل SWAT وارد شده است.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل: پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز و معرفی آن‌ها به مدل SWAT نیاز است که مدل مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار

روش ریزمقیاس‌نمایی آماری: مدل‌های GCM قادر به تولید متغیرهای هواشناسی در مقیاس‌های کوچک‌تر از اندازه شبکه‌ای خود نیستند، بنابراین برای بهبود کیفیت پیش‌بینی‌ها، نیاز است که نتایج این مدل‌ها ریزمقیاس‌نمایی شود. برای استخراج اطلاعات اقلیمی آینده تحت سناریوهای اقلیمی، از نرم‌افزار LARS-WG6 استفاده شده است. بدین منظور از اطلاعات اقلیمی ایستگاه سینوپتیک ارومیه برای سال‌های ۲۰۱۴ تا ۱۹۸۸ برای ریزمقیاس‌نمایی

(۲۰۱۶).

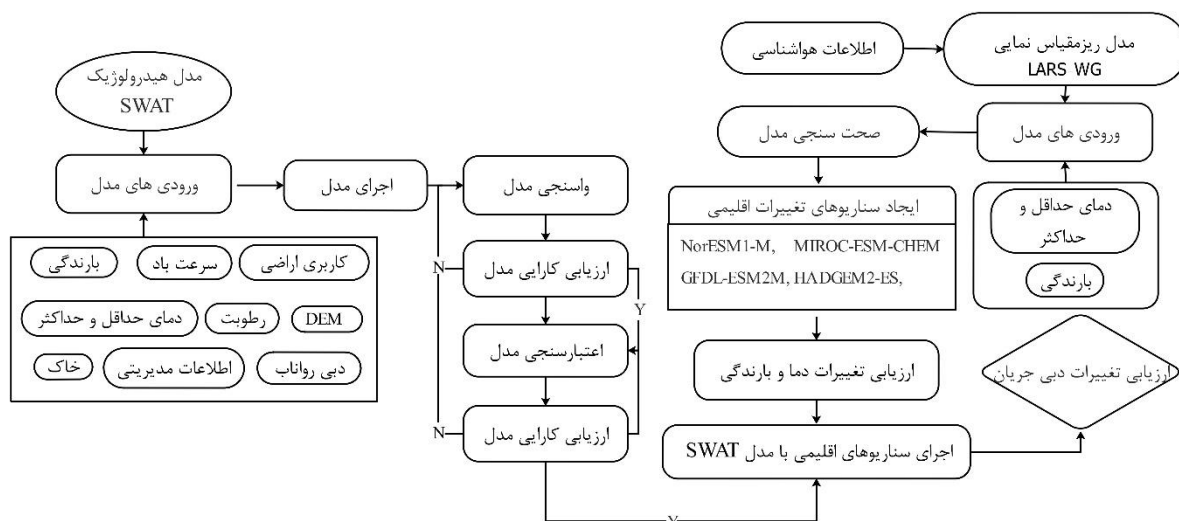
$$R^2 = \left[ \frac{\sum_1^N (O_i - O_{avg})(M_i - M_{avg})}{\sqrt{\sum_1^N (O_i - O_{avg})^2} \sqrt{\sum_1^N (M_i - M_{avg})^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_1^N (O_i - M_i)^2}{\sum_1^N (O_i - O_{avg})^2} \right] \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $O_i$  داده‌های مشاهداتی،  $M_i$  داده‌های خروجی از مدل،  $O_{avg}$  متوسط داده‌های مشاهداتی و  $M_{avg}$  متوسط داده‌های خروجی از مدل است. فلوجارت مربوط به روش انجام پژوهش با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT و مدل ریزمقیاس‌نمایی تغییرات اقلیمی LARS-WG برای پیش‌بینی تغییرات دبی جریان در منطقه مطالعاتی در شکل ۲ آورده شده است.

گیرد. باتوجه به داده‌های هواشناسی و هیدرومتری موجود برای واسنجی مدل در ایستگاه‌های پل‌آنیان و سننه دوره زمانی ۲۰۰۸-۱۹۹۳ و در ایستگاه‌های صفاخانه و ورودی به سد به‌ترتیب دوره‌های زمانی ۲۰۰۸-۲۰۰۱ و ۱۹۹۰-۲۰۰۸. همچنین اعتبارسنجی مدل در همه ایستگاه‌ها برای دوره زمانی ۲۰۱۴-۲۰۰۹ انجام شد. در این پژوهش بهینه‌سازی پارامترها و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI2 انجام شده است.

به‌منظور بررسی و ارزیابی دقت و صحت مدل SWAT در مقایسه با داده‌های مشاهداتی از شاخص‌های ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد (Duan و همکاران،



شکل ۲- فلوجارت روش کار برای پیش‌بینی تغییرات دبی جریان

آب پایه و آب زیرزمینی بیشترین تأثیر را در شبیه‌سازی دارند. حساس بودن این پارامترها نشان می‌دهد که در مدیریت منطقه باید توجه بیشتری به ذخایر آب زیرزمینی شود (Pirnia و همکاران، ۲۰۱۸). در جدول ۳ پارامترهای حساس و بازه تغییرات پارامترها آمده است.

**نتایج شبیه‌سازی رواناب:** در شکل ۳ سری زمانی شبیه‌سازی شده در کنار داده‌های مشاهداتی آورده شده است که باند سبز رنگ در این شکل نشان‌دهنده عدم قطعیت ۹۵ درصد است. نتایج شبیه‌سازی رواناب در مقیاس ماهانه به‌وسیله شاخص‌های آماری نش-

## نتایج و بحث

### آنالیز حساسیت پارامترهای مورد استفاده در

#### مدل SWAT

### تحلیل حساسیت پارامترهای مورد استفاده در

**مدل SWAT:** در این پژوهش، پس از واردکردن اطلاعات منطقه نسبت به شبیه‌سازی رواناب (۲۰۱۴ تا ۱۹۸۸) و بیان منطقه اقدام شد. در جدول ۲ پارامترها، میزان حساسیت و همچنین اثرگذاری آن‌ها بر روی مؤلفه‌های مختلف بیان آمده است. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، پارامترهای مربوط به

Pirnia و همکاران، ۲۰۱۸). در جدول ۴ نتایج واسنجی و اعتبارسنجی سری‌های زمانی رواناب آمده است. نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی در این حوزه آبخیز با دقت خوبی انجام پذیرفته است.

ساتکلیف (NSE) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) سنجیده می‌شوند، مقادیر بالاتر از ۰/۵ برای این دو شاخص بیانگر عملکرد مطلوب مدل و بالاتر از ۰/۶ بیانگر عملکرد خوب مدل است (Jahanshahi و همکاران، ۲۰۱۷؛

جدول ۲- آنالیز حساسیت پارامترهای مدل

رتبه	پارامتر	تأثیرگذاری	حساسیت	نوع داده	توضیحات
۱	r_Cn2	رواناب	بالا	.mgt	شماره منحنی در روش SCS
۲	v_Alpha_Bf	آب زیرزمینی	بالا	.gw	عامل آلفا برای جریان پایه
۳	v_Esco	تبخیر	متوسط	.hru	عامل تبخیر از سطح خاک
۴	v_Blai	محصول	متوسط	Crop.dat	شاخص بیشینه سطح برگ
۵	r_Sol_Awc	خاک	متوسط	.sol	ظرفیت آب در دسترس در لایه سطحی (mm)
۶	v_Canmx	رواناب	متوسط	.hru	بیشینه نگهداشت تاج پوشش (mm)
۷	r_Sol_Z	خاک	متوسط	.sol	عمق خاک (mm)
۸	v_Gw_Delay	آب زیرزمینی	متوسط	.gw	تأخیر آب زیرزمینی (روز)
۹	v_Gw_Revap	آب زیرزمینی	کم	.gw	ضریب برگشت آب زیرزمینی
۱۰	r_Slope	رواناب	کم	.hru	شیب متوسط ( $mm^{-1}$ )

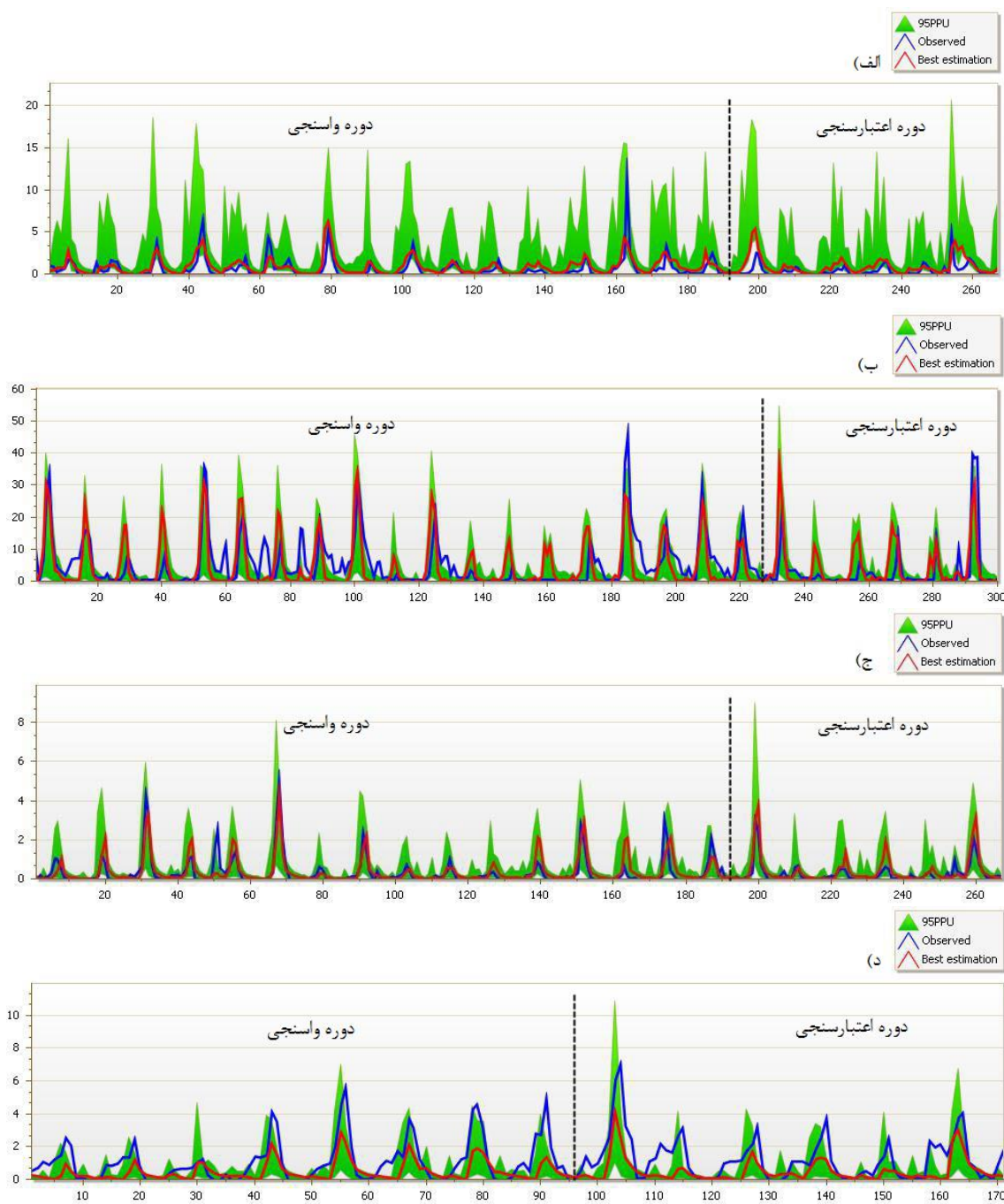
جدول ۳- پارامترهای واسنجی شده به همراه بازه تغییرات

ردیف	پارامتر	کمینه	بیشینه	بهینه
۱	r_CN2	-۰/۲۱	۰/۱۷	۰/۱۳
۲	v_ALPHA_BF	۰/۰۱	۰/۳۳	۰/۲۸
۳	v_ESCO	۰/۳۷	۱	۰/۵۲
۴	v_Blai	۰/۲۴	۰/۵۸	۰/۳۱
۵	r_SOL_AWC	-۰/۳۵	۰/۲۲	۰/۱۹
۶	v_Canmx	۰/۲۸	۳/۷۶	۱/۲۶
۷	r_Sol_Z	۰/۱۱	۰/۷۴	۰/۶۳
۸	v_GW_DELAY	۱۲/۳۴	۳۷/۴۷	۱۵/۰۹
۹	v_REVAPMN	۳۲/۷۰	۳۴۴/۲۹	۱۴۶
۱۰	v_HRU_SLP	۰/۵۹	۰/۶۳	۰/۶۱

r=relative change, v=absolute change

جدول ۴- نتایج شبیه‌سازی رواناب در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی

ردیف	ایستگاه هیدرومتری	دوره زمانی	واسنجی		اعتبارسنجی	
			NSE	$R^2$	NSE	$R^2$
۱	پل‌آنیان	۱۹۹۳-۲۰۰۸	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۷	۲۰۰۹-۲۰۱۴
۲	سنته	۱۹۹۰-۲۰۰۸	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۵۹	۲۰۰۹-۲۰۱۴
۳	صفاخانه	۱۹۹۳-۲۰۰۸	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۶۹	۲۰۰۹-۲۰۱۴
۴	ورودی به سد	۲۰۰۱-۲۰۰۸	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۲	۲۰۰۹-۲۰۱۴



شکل ۳- سری زمانی مشاهداتی و شبیه‌سازی رواناب در الف) ایستگاه پل‌آنیان ب) سنه ج) صفاخانه و د) ورودی به سد

مراجع مختلف تعریف و اصلاح شوند. در جدول ۵، مقادیر متوسط عملکرد محصولات عمده منطقه مطالعاتی بنا به آمار وزارت نیرو (مطالعات به‌هنگام‌سازی طرح جامع آب کشور، شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو) نشان داده شده است (Ahmadzadeh و همکاران، ۲۰۱۶).

سناریوهای اقلیمی و پیش‌بینی‌های آینده: در این پژوهش از دو سناریو RCP2.6 و سناریو RCP8.5 به‌منظور شبیه‌سازی دما و بارش در دوره ۳۰ سال

شبیه‌سازی عملکرد محصولات کشاورزی: پس از شبیه‌سازی رواناب به‌منظور برآورد عملکرد محصولات کشاورزی، مدل SWAT مورد واسنجی قرار گرفته است. در بین پارامترهای گیاهی تعریف‌شده در مدل SWAT، بعضی از پارامترها مانند BLAI، HVSTI، FRGRW1، FRGRW2، LAIMX1، LAIMX2 و DLAI از تغییرپذیری بیشتری برخوردار هستند و باید مقادیر آن‌ها در هر پژوهشی متناسب با منطقه مطالعاتی، نوع محصول و همچنین مشاهدات محلی و

تغییرات دمایی تحت سناریوهای آینده نشان داد دمای کمینه در ماه جولای با  $0.94^{\circ}\text{C}$  افزایش در سناریو RCP8.5 بیشترین افزایش دما و بیشینه در ماه نوامبر با  $2.52^{\circ}\text{C}$  افزایش بیشترین تغییرات را در آینده خواهد داشت. در مطالعات Ghermezcheshmeh و همکاران (۱۳۹۳؛ ۱۳۹۴) تغییرات شدید دمایی در فصل تابستان بیان شده است. برای منطقه ارومیه تغییرات دمایی بیشینه برای فصل تابستان با  $1.42$  درجه سانتیگراد افزایش پیش‌بینی شده است (Ghermezcheshmeh و همکاران، ۱۳۹۳) که با نتایج این پژوهش، با افزایش دما در ماه‌های تابستان مطابقت دارد.

آینده استفاده شده است. مدل‌های اقلیمی مورد استفاده پس از ایجاد سناریوها به صورت متوسط (Ensemble) به مدل معرفی شدند. در جداول ۶ و ۷ تغییرات پیش‌بینی شده به وسیله این مدل‌ها برای پارامترهای بارش و دمای کمینه و بیشینه برای ایستگاه سینوپتیک ارومیه آمده است. طبق پیش‌بینی‌های مدل‌ها، بیشترین افزایش بارش در ماه آگوست با ۲۳ درصد افزایش و بیشترین کاهش بارش در ماه ژوئن با ۱۰ درصد برای سناریو بدبینانه RCP8.5 خواهد بود. همچنین افزایش بارش ۲۷ درصدی برای ماه سپتامبر و کاهش ۱۴ درصدی برای ماه ژولای توسط سناریو خوش‌بینانه RCP2.6 انجام پذیرفته است.

جدول ۵- متوسط عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهداتی محصولات کشاورزی در سال ۱۳۹۱ ( $\text{tonha}^{-1}$ )

دوره	گندم زمستانه	جو	سیب‌زمینی	گوجه‌فرنگی	چغندر قند	یونجه	سیب
مشاهداتی	۳/۴۹	۲/۲	۲۲	۴۰/۵	۴۰	۹	۲۵
شبیه‌سازی	۳/۵	۲/۷۵	۲۳/۵	۳۵/۱	۴۴	۱۰	۲۰

جدول ۶- سناریوهای بارش برای دوره آینده در ایستگاه سینوپتیک ارومیه (درصد تغییرات)

تغییرات بارش	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
RCP 8.5	۲۰۲۱-۲۰۵۱	۱/۰۱	۰/۹۷	۰/۹۹	۱/۱۱	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۹۱	۱/۲۳	۱/۱۴	۱/۰۲	۱/۱۳	۰/۹۵
RCP 2.6	۲۰۲۱-۲۰۵۰	۱/۰۸	۰/۹۴	۰/۹۹	۱/۱۴	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۸۶	۱/۱۵	۱/۲۷	۱/۰۶	۱/۲۰	۱/۰۵

جدول ۷- تغییرات دمای کمینه و بیشینه در ایستگاه سینوپتیک ارومیه ( $^{\circ}\text{C}$ )

دمای کمینه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
RCP 8.5	۲۰۲۱-۲۰۵۰	۰/۳۴	۰/۲۹	۰/۷۴	۰/۵۷	۰/۷۲	۰/۶۳	۰/۹۴	۰/۴	۰/۵۸	۰/۳۵	۰/۹	۰/۶۹
RCP 2.6	۲۰۲۱-۲۰۵۰	۰/۲۱	۰/۱۶	۰/۶۹	۰/۵۲	۰/۵۹	۰/۴۷	۰/۹۲	۰/۵۷	۰/۶۴	۰/۲۵	۰/۶۵	۰/۵۱
دمای بیشینه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
RCP 8.5	۲۰۲۱-۲۰۵۰	۰/۲۹	۱/۷۱	۱/۷۳	۰/۹۳	۱/۲۳	۰/۳۸	۰/۸۸	۰/۲۷	۰/۱۸	۰/۸۳	۲/۵۲	۱/۷۳
RCP 2.6	۲۰۲۱-۲۰۵۰	۱/۴۹	۱/۸۸	۰/۶۷	۰/۱۹	۰/۸۳	۰/۴۷	۰/۲۱	۱	۰/۹۴	۳/۸۲	۲/۰۲	۱/۷۵

سایر پارامترهای هیدرولوژیکی نظیر تبخیر-تعرق، نفوذ و رشد گیاهی هم تأثیرگذار است.

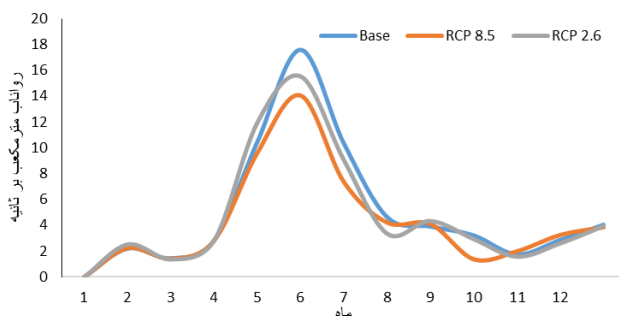
با توجه به تغییر اقلیم بیشترین تغییرات رواناب در ماه می با  $2/4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  کاهش دبی و در ماه آوریل با  $1/49 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  افزایش دبی در سناریوی خوش‌بینانه است. همچنین در سناریو بدبینانه RCP8.5 در ماه‌های می و ژوئن بیشترین کاهش رواناب وجود دارد که می‌تواند اثرات بسیار بدی بر روی مقادیر آب ذخیره شده در مخزن سد تا شروع بارندگی‌های مجدد داشته

پیش‌بینی رواناب تحت سناریوهای اقلیمی: پس از دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل و با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای واسنجی شده، سناریوهای پیش‌بینی دما و بارش آینده به منظور برآورد رواناب به مدل SWAT وارد شدند. این تغییرات به صورت ماهانه بر روی دما و بارش دوره پایه اعمال شدند. در شکل‌های ۴ و ۵، تغییرات ماهانه رواناب آمده است. به منظور برآورد رواناب آینده از اطلاعات ایستگاه ورودی سد استفاده شده است. تغییر اقلیم علاوه بر تأثیر بر روی رواناب بر

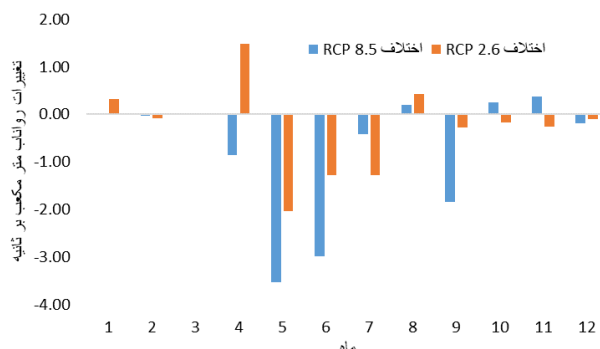


می‌دهند. باتوجه به این‌که این مناطق مانند حوزه آبخیز سمینه‌رود دارای بارش برف زمستانه هستند، می‌توان بیان کرد که تغییرات اقلیمی باعث کاهش ذخیره رواناب حاصل از ذوب برف شده است. همچنین افزایش رواناب برای شکل‌های ۴ و ۵ نشان‌دهنده کاهش رواناب در ماه‌های فصل بهار و تابستان است.

باشد. در مطالعات Aghabeighi و همکاران (۱۳۹۷) در منطقه اردبیل Goodarzi و Fatehifar (۱۳۹۸) در منطقه ارومیه و Kavian و همکاران (۱۳۹۵) در حوزه آبخیز هراز به افزایش دبی در ماه آوریل و کاهش دبی متوسط سالانه اشاره شده است. همچنین مطالعات Goodarzi و Fatehifar (۱۳۹۸) و Kavian و همکاران (۱۳۹۵) کاهش دبی در ماه می را نشان



شکل ۴- سری زمانی ماهانه رواناب در ورودی سد



شکل ۵- تغییرات ماهانه رواناب در ورودی سد

که پارامترهای CN2 و Alpha\_Bf از بیشترین حساسیت برخوردار هستند. پارامترهای حساس، مشابه با پارامترهای حساس انتخابی در پژوهش‌های (Arnold و همکاران، ۲۰۰۵؛ Waikar و Nilawar، ۲۰۱۹؛ Pirnia و همکاران، ۲۰۱۸) برای شبیه‌سازی رواناب می‌باشند. واسنجی پارامترهای حساس انتخابی با ضرایب آماری  $R^2$  و NSE بین ۰/۶۲ تا ۰/۹۱ به‌خوبی توانستند تغییرات دبی جریان را در طی زمان محاسبه کنند.

اثر تغییر اقلیم بر روی رواناب به‌وسیله مدل SWAT در حوضه رودخانه پورنا در هند تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 از ۷٪ تا ۱۷٪ افزایش رواناب را نشان داده است که این تغییرات مشابه نتایج

**تغییرات بیلان آبی حوضه:** اثر تغییر اقلیم بر روی بیلان کلی حوضه به‌صورت جدول ۸ است. مؤلفه‌های بیلان از داخل مدل SWAT برای پارامترهای بارش، مقدار بارش برف، ذوب برف، نفوذ به آبخوان عمیق و زیرسطحی، آب برگشتی، تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل محاسبه شدند. میزان تبخیر و تعرق واقعی ماهانه در سناریو خوش‌بینانه با سه میلی‌متر افزایش و در سناریو بدبینانه با هشت میلی‌متر افزایش، تأثیر بدی بر روی منابع آب در دسترس در حوزه آبخیز خواهد گذاشت.

برای بررسی تأثیر این تغییرات بر روی دبی جریان مدل SWAT برای منطقه مطالعاتی واسنجی شد. برای واسنجی مدل پارامترهای حساس تعیین شدند

پژوهش‌های صورت‌گرفته در سایر مناطق کشور (Nassiri و همکاران، ۲۰۰۶؛ Abbaspour و همکاران، ۲۰۱۵؛ Ahmadzadeh و همکاران، ۲۰۱۶؛ Jahanshahi و همکاران، ۲۰۱۷؛ Pirnia و همکاران، ۲۰۱۸) است که همگی کاهش رواناب را پیش‌بینی کرده‌اند.

پژوهش حاضر است (Waikar و Nilawar، ۲۰۱۹). همچنین Tan و همکاران (۲۰۱۷) برآورد کردند که رواناب سطحی تحت همه سناریوهای RCP در دوره‌های آینده بین ۱۴ تا ۲۷ درصد در منطقه‌ای گرمسیری در مالزی افزایش پیدا کند. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش تأییدکننده

جدول ۸- تغییرات رواناب در دوره آینده تحت دو سناریو خوش بینانه و بدبینانه

RCP 2.6	RCP 8.5	پایه (mm)	مؤلفه‌های بیلان
۳۸۱/۵۴	۳۷۰/۴۳	۳۸۸/۱۹	بارندگی
۱۱۴/۳	۱۱۹/۲۱	۱۱۰/۴۴	بارش برف
۱۰۶/۷۴	۱۰۲/۱۹	۱۰۷/۰۳	ذوب برف
۱۴/۵۱	۱۳/۳۲	۱۵/۵۶	نفوذ سطحی
۱/۱۷	۱/۱۵	۱/۸۲	نفوذ عمقی
۲۱/۴۲	۲۱/۵۱	۲۲/۰۷	برگشت آب
۱/۶۶	۱/۵۱	۱/۸۲	تغذیه آب‌خون عمیق
۲۶۱/۴۱	۲۶۶/۲۱	۲۵۸/۸۷	تبخیر و تعرق واقعی
۲۰۴۵/۰۳	۲۰۴۹/۲۱	۲۰۴۳/۳۳	تبخیر و تعرق پتانسیل

سناریوی بدبینانه RCP8.5،  $1/45$  °C افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج بررسی تغییرات اقلیمی نشان از کاهش دو درصدی بارش در سناریوی RCP8.5 و پنج درصدی بارش در سناریوی RCP2.6 دارد. با توجه به تغییرات اقلیمی بیشترین تغییرات رواناب در دوره آینده، ماه می با  $2/4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  کاهش و ماه آوریل با  $1/49 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  افزایش در سناریو خوش‌بینانه می‌باشد. همچنین در سناریو بدبینانه RCP8.5 در ماه‌های می و ژوئن بیشترین کاهش رواناب اتفاق خواهد افتاد. نتایج بیلان آبی تحت تغییر اقلیم نشان داد که تبخیر و تعرق افزایش و نفوذ کاهش خواهد یافت. برای مدیریت و برنامه‌ریزی مطابق با تغییرات اقلیمی انجام عملیات آبخیزداری و افزایش مقدار نفوذ رواناب در سطح حوزه آبخیز می‌تواند منابع آب حوضه را بهبود بخشد و به‌عنوان راه‌کاری مناسب برای مقابله با بحران‌های آبی مورد استفاده قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ارزیابی کارایی مدل SWAT در برآورد دبی ماهانه و بیلان و برآورد اثر تغییر اقلیم بر روی رواناب و بیلان حوضه آبی انجام پذیرفت. برآورد دبی در پایه زمانی ماهانه می‌تواند برای پیش‌بینی مقادیر متوسط دبی در دوره‌های زمانی آینده مورد استفاده قرار گیرد که اگر برآورد خوب و دقیقی انجام گیرد می‌توان بیلان آبی در حوضه در دوره‌های زمانی آینده را پیش‌بینی کرده، از بروز خسارت‌های ناشی از کاهش منابع آبی با اجرای برنامه‌های مدیریتی مناسب جلوگیری کرد. با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری به‌وسیله مدل اقلیمی Lars-WG اطلاعات اقلیمی آینده تحت دو سناریو خوش‌بینانه و بدبینانه به مدل وارد شدند. نتایج شبیه‌سازی اقلیمی نشان داد که میانگین دما با در نظر گرفتن سناریوی خوش‌بینانه RCP2.6، به‌طور متوسط  $0/75$  °C و با در نظر گرفتن

### منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K.C., E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang and B. Kløve. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524: 733-752.
2. Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell and J. Rasmussen. 1986. An introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: history and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Hydrology*, 87(1-2): 45-59.

3. Aghabeighi, N., A. Esmali Ouri, R. Mostafazadeh and M. Golshan. 2018. The effects of climate change on runoff using IHACRES hydrologic model in some of watersheds, Ardabil Province. *Iranian Irrigation and Water Engineering*, 10(38): 176-187.
4. Ahmadzadeh, H., S. Morid, M. Delavar and R. Srinivasan. 2016. Using the SWAT model to assess the impacts of changing irrigation from surface to pressurized systems on water productivity and water. *Agricultural Water Management*, 175: 15-28 (in Persian).
5. Arnold, J.G. and N. Fohrer. 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological Processes*, 19(3): 563-572.
6. Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modelling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1): 73-89.
7. Barrow, E. and G. Yu. 2005. Climate scenario for Alberta. A Report Prepared for the Prairie Adaptation Research, 110 pages.
8. Devkota, L.P. and D.R. Gyawali. 2015. Impacts of climate change on hydrological regime and water resources management of the Koshi River Basin. *Journal of Hydrology*, 4: 502-515.
9. Duan, Z., J. Liu, Y. Tuo, G. Chiogna and M. Disse. 2016. Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin, Italy at multiple temporal and spatial scales. *Science of the Total Environment*, 573: 1536-1553.
10. Fontaine, T.A. and R.H. Hotchkiss. 2000. Impacts of climate change on water yield in the Upper Wind River Basin. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(2): 321-336.
11. Ghermezcheshmeh, B., A. Rasuli, B. Rezaei, M. Massah Bovani and A. Khorshiddust. 2014. Impact assessment of morpho-climatic parameters in accuracy of SDSM. *Watershed Engineering and Management*, 6(2): 155-164 (in Persian).
12. Ghermezcheshmeh, B., A. Rasuli, B. Rezaei, M. Massah Bovani and A. Khorshiddust. 2015. Uncertainty analyzing of neural network in downscaling of HadCM3 data with bootstrap confidence interval method. *Engineering and Management*, 7(3): 306-316 (in Persian).
13. Goodarzi, M.R. and A. Fatehifar. 2019. Analysis of statistical distributions in estimating the effects of climate change on future floods. *Hydrogeomorphology*, 5(20): 57-78.
14. Gosain, A.K., A. Main and C. Dwivedi. 2009. Hydrological modeling-literature review. *Advances in Fluid Mechanics*, 339, 63-70.
15. Hajimohammadi, M., A. Azizian and B. Ghermezcheshmeh. 2018. Evaluation of the impact of climate change on runoff in Kan Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 10(2): 144-156 (in Persian).
16. Hotchkiss, R.H., S.F. Jorgensen, M.C. Stone and T.A. Fontaine. 2000. Regulated river modeling for climate change impact assessment: the Missouri River. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(2): 375-386.
17. Jahanshahi, A., M. Golshan and A. Afzali. 2017. Simulation of the catchments hydrological processes in arid, semi-arid and semi-humid areas. *Desert*, 22(1): 1-10.
18. Kavian, A., M. Namdar, M. Golshan and M. Bahri. 2017. Hydrological modeling of climate changes impact on flow discharge in Haraz River Basin. *Natural Environmental Hazard*, 6(12): 89-104 (in Persian).
19. Maafi-Madani, F., S. MosavBaygi and H. Ansair. 2012. Prediction the drought situation during 2011-2030 period using of under scaling the output of LARS-WG in Khorasan Razavi Province. *Journal of Natural Environmental Hazard*, 3: 21-37.
20. Middelkoop, H., K. Daamen, D. Gellens, W. Grabs, J.C. Kwadijk, H. Lang, B.W. Parmet, B. Schadler, J. Schulla and K. Wilke. 2001. Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine Basin. *Climatic Change*, 49(1): 105-128.
21. Mirza, M.M.Q. 2003. Climate change and extreme weather events: can developing countries adapt? *Climate Policy*, 3(3): 233-248.
22. Murty, P.S., A. Pandey and S. Suryavanshi. 2014. Application of semi-distributed hydrological model for basin level water balance of the Ken Basin of Central India. *Hydrology Process*, 28(13): 4119-4129.
23. Narsimlu, B., A.K. Gosain, B.R. Chahar, SK. Singh and P.K. Srivastava. 2015. SWAT model calibration and uncertainty analysis for streamflow prediction in the Kunwari River Basin, India, using sequential uncertainty fitting. *Environmental Processes*, 2(1): 79-95.
24. Narsimlu, B., A.K. Gosain and B.R. Chahar. 2013. Assessment of future climate change impacts on water resources of upper Sind River Basin, India using SWAT model. *Water Resources Management*, 27(10): 3647-3662.
25. Nassiri, M., A. Koocheki, G. Kamali and H. Shahandeh. 2006. Potential impact of climate change on rainfed wheat production in Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 52: 113-124 (in Persian).

26. Rosenberg, N.J., D.J. Epstein, D. Wang, L. Vail, R. Srinivasan and J.G. Arnold. 1999. Possible impacts of global warming on the hydrology of the Ogallala Aquifer region. *Climatic Change*, 42(4): 677-692.
27. Tan, M.L., A.L. Ibrahim, Z. Yusop, V.P. Chua and N.W. Chan. 2017. Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research*, 189: 1-10.
28. Todini, E. 2007. Hydrological catchment modelling: past, present and future. *Hydrology and Earth System Sciences*, 321: 468-482.