

## مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز رودخانه تلوار تحت تأثیر تغییرات اقلیمی

فواد ناصرآبادی<sup>۱\*</sup>، رضا قضاوی<sup>۲</sup> و مهدی ذاکری‌نیا<sup>۳</sup>

### چکیده

شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ها، پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز و داشتن درک صحیح از مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی برای برنامه‌ریزی و حفاظت از منابع آب اهمیت بسیار دارد. مدل‌سازی از ابزارهای قابل استفاده برای مدیریت منابع آب است. مدل‌سازی کامپیوتری، در چند دهه گذشته به طور فزاینده‌ای توسعه داده شد. در پژوهش حاضر بر اساس داده‌های وضع موجود ایستگاه سینوپتیک قروه، با کمک مدل SDSM دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۴۹ پیش‌بینی و در نهایت آثار تغییر اقلیم بر وضعیت هیدرولوژیک حوضه آبخیز رودخانه تلوار با مساحت ۲۴۹۰ کیلومتر مربع واقع در استان کردستان با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شد. از داده‌های روزانه دبی ایستگاه هیدرومتری تلوار-حسن‌خان در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ میلادی برای شبیه‌سازی استفاده و آمار سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ (۲۲ سپتامبر ۲۰۰۰ تا ۲۲ سپتامبر ۲۰۱۱) و ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۷ (۲۳ سپتامبر ۲۰۱۱ تا ۲۲ سپتامبر ۲۰۱۷) به ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. ضرایب  $R^2$  و  $E_{NS}$  برای ارزیابی کارایی مدل SWAT استفاده شد. مقدار ضرایب  $R^2$  و  $E_{NS}$  در دوره واسنجی رواناب ماهانه به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۴۴ و در دوره اعتبارسنجی ۰/۷۷ و ۰/۵۹ به دست آمد. نتایج مطالعه، ضمن تأکید بر کارایی هر دو مدل SDSM در پیش‌بینی اقلیمی و SWAT در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، نشان داد که در وضعیت اقلیمی آینده، برای دوره زمانی ۲۰۴۹-۲۰۲۰ متوسط ماهانه درجه حرارت کمینه و بیشینه به غیر از ماه‌های سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر، افزایش و متوسط بارندگی ماهانه در فصول زمستان و بهار کاهش خواهد یافت؛ در حالی که به مقدار آن در فصول تابستان و پاییز افزوده خواهد شد. مقایسه میانگین ماهانه رواناب در دوره مشاهداتی با دوره آتی نشان‌دهنده افزایش رواناب در ماه‌های ژانویه، فوریه و دسامبر و کاهش آن در دیگر ماه‌هاست.

**واژه‌های کلیدی:** اعتبارسنجی، رواناب، SDSM، SWAT، واسنجی.

**ارجاع:** ناصرآبادی ف.، رضا قضاوی ر. و ذاکری‌نیا م. ۱۳۹۹. مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز رودخانه تلوار تحت تأثیر تغییرات اقلیمی. مجله پژوهش آب ایران. ۳۷: ۳۷-۴۹.

۱- دانشجوی دکتری گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان.

۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

\* نویسنده مسئول: [ghazavi@kashanu.ac.ir](mailto:ghazavi@kashanu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۸

## مقدمه

نش- ساتکلیف<sup>۲</sup> و ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup> برای ارزیابی کارایی مدل استفاده شد. ضرایب  $E_{NS}$  و  $RMSE$  در دوره واسنجی به ترتیب  $0/72$  و  $0/545$  و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب  $0/88$  و  $0/661$  به دست آمد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که در حدود ۶۰ درصد بارش در این حوضه آبخیز به رواناب تبدیل می‌شود.

سوانا و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبخیز رودخانه لاهو در آفریقای جنوبی، از مدل SWAT استفاده کردند. این مدل از طریق QSWAT اجرا شد که رابط بین SWAT و QGIS است. از داده‌های چهار ایستگاه هواشناسی و چهار ایستگاه هیدرومتری با پراکنش یکنواخت در سطح حوضه آبخیز مورد مطالعه استفاده شد. مدل برای یک دوره ۳۳ ساله از سال ۱۹۸۳ تا سال ۲۰۱۵ اجرا شد. آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI-2<sup>۴</sup> انجام شد. مقدار ضرایب تبیین<sup>۵</sup>، نش- ساتکلیف، نسبت انحراف استاندارد مشاهدات<sup>۶</sup>، درصد اریبی<sup>۷</sup>، فاکتور احتمال<sup>۸</sup> و ضریب همبستگی<sup>۹</sup> در دوره واسنجی به ترتیب  $0/63$ ،  $0/66$ ،  $0/56$ ،  $16/3$ ،  $0/67$  و  $0/68$  و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب  $0/52$ ،  $0/48$ ،  $0/72$ ،  $19/90$ ،  $0/69$  و  $0/53$  به دست آمد. نتایج نشان داد که ضرایب ارزیابی مدل، عملکرد مدل در شبیه‌سازی رواناب را قابل قبول می‌دانند و مدل SWAT می‌تواند یک ابزار مفید برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در حوضه آبخیز مورد مطالعه باشد.

سو و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای تأثیر تغییرات آب و هوایی شامل بارندگی و دما را بر منابع آبی شهر خینگتای در جنوب استان هیبی در کشور چین با مساحت ۱۲۵۰۰ کیلومتر مربع با استفاده از مدل SDSM بررسی کردند. نتایج نشان داد که (۱) در مقایسه با سایر روش‌های آماری، SDSM می‌تواند به سادگی استفاده شود و نتایج آن بسیار بهتر خواهد بود؛ (۲) عملکرد مدل واسنجی شده SDSM اساساً قابل قبول است؛ (۳) SDSM می‌تواند روند بارش و دما را شبیه‌سازی کند و (۴) ضریب تبیین مقادیر

مدل‌سازی از جمله چندین مجموعه ابزار قابل استفاده برای مدیریت منابع آب است. مدل‌سازی کامپیوتری در چهار دهه گذشته، به طور فزاینده‌ای توسعه داده شده است. دلایل اصلی افزایش توسعه مدل‌سازی کامپیوتری عبارتند از: الف) توسعه مدل‌های جدید توسط مؤسسات تحقیقاتی برای مدیریت منابع آب؛ ب) افزایش تقاضا برای ابزار توسعه یافته در مدیریت منابع آب و ج) افزایش فشار بر منابع آب (رفسگارد، ۲۰۰۷).

افزایش دمای هوا، ذوب شدن یخ‌ها، بالا آمدن سطح آب دریاها و تعدادی عوامل دیگر، نشان از گرم شدن هوا در آینده می‌دهند (IPCC، ۲۰۰۷). این پیش‌بینی‌ها شواهدی فراهم می‌کند که منابع آب، دسترسی به آب و میزان تقاضای آن تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار می‌گیرند (IPCC، ۲۰۰۸). ترکیب افزایش تقاضای آب و کاهش دسترسی به منابع آب می‌تواند موجب کاهش ذخایر آب شود (تاوس و آلن، ۲۰۰۹). تغییرات ۱۰ درصدی میزان نزولات جوی عمدتاً سبب تغییرات ۱۰ تا ۲۵ درصدی جریان رودخانه‌ها می‌شود و این در حالی است که افزایش دو درجه سانتی‌گراد دما معمولاً منجر به کاهش پنج تا ۱۲ درصدی جریان‌ها می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ لورنا و همکاران، ۲۰۱۰). برای پیش‌بینی تأثیر متغیرهای اقلیمی، داده‌های خروجی مدل‌های اقلیمی به‌عنوان ورودی مدل‌های هیدرولوژیک در نظر گرفته می‌شود.

احمدآبادی و صدیقی‌فر (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای بر اساس داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک کرج، مهرآباد و دوشان تپه با کمک مدل SDSM به پیش‌بینی دوره آماری ۲۰۱۶-۲۰۴۵ پرداختند و در نهایت آثار تغییر اقلیم بر وضعیت هیدرولوژیک حوضه آبریز کن با استفاده از مدل SWAT<sup>۱</sup> شبیه‌سازی شد. نتایج مطالعه، نشان داد که میزان رواناب سطحی در سطح حوضه آبریز مورد مطالعه در دوره مشاهداتی موجود، برابر با  $10/59$  میلی‌متر بوده؛ در حالی که این میزان در دوره پیش‌بینی شده با توجه به افزایش روند شهرسازی و تغییرات کاربری اراضی برابر با  $27/21$  میلی‌متر است.

سانترا و داز (۲۰۱۳) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب در مقیاس ماهانه در حوضه آبخیز رودخانه چیلیکا در کشور هند استفاده کردند. در این پژوهش از ضرایب

2- Nash-Sutcliffe coefficient (ENS)

3- Root Mean Squared Error (RMSE)

4- Sequential Uncertainty Fitting

5- Coefficient of Determination (R2)

6- Observations Standard Deviation Ratio (RSR)

7- Percent Bias (PBIAS)

8- Probability Factor (P)

9- Correlation Coefficient (R)

1- Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

## مواد و روش‌ها

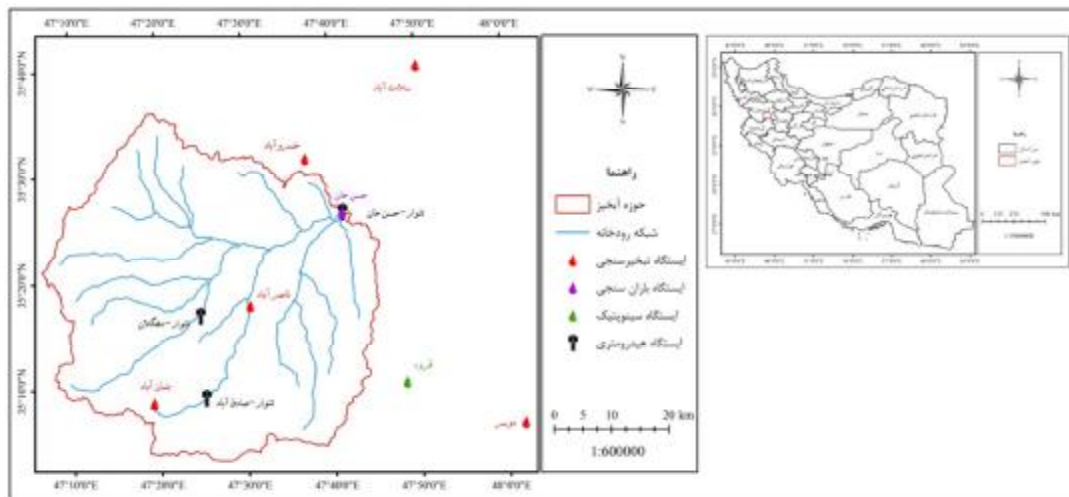
### معرفی حوضه آبخیز مورد مطالعه

حوضه آبخیز رودخانه تلوار واقع در استان کردستان با مساحت ۲۴۹۰ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی  $35^{\circ} 06'$  و  $47^{\circ} 45' 58''$  طول شرقی و  $35^{\circ} 26' 03''$  و  $35^{\circ} 26' 35''$  عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). حداقل ارتفاع آن ۱۲۸۰ متر از سطح دریاست که در خروجی حوضه آبخیز در ایستگاه هیدرومتری تلوار-حسن‌خان واقع شده است. حداکثر ارتفاع ۲۸۸۰ متر و میانگین ارتفاع ۱۹۲۷ متر و کاربری اراضی در این منطقه بیشتر شامل زراعت آبی و دیم، مرتع، مناطق مسکونی و سطوح آبی است. در بین انواع کاربری‌های موجود در حوضه آبخیز مورد مطالعه، کاربری زراعت دیم بیشترین سطح حوضه آبخیز را به خود اختصاص داده است. عمده‌ترین رودخانه‌های حوضه آبخیز مورد مطالعه که از ارتفاعات مشرف سرچشمه می‌گیرند، رودخانه‌های تلوار و سنگ سیاه هستند. رودخانه تلوار از ارتفاعات شاخ چرمو در جنوب محدوده مورد مطالعه سرچشمه می‌گیرد و پس از دریافت آب چشمه‌های فصلی در جهت شمال جریان می‌یابد. رودخانه سنگ سیاه از ارتفاعات کوه پیرقیس در جنوب محدوده مورد مطالعه سرچشمه می‌گیرد و در امتداد شمالی از محدوده خارج می‌شود. منطقه مورد مطالعه به لحاظ زمین‌ساختی در زون سنندج-سیرجان قرار می‌گیرد.

اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در مورد کمینه دما، بیشینه دما، دمای متوسط و بارش در دوره اعتبارسنجی می‌تواند به ترتیب بالاتر از ۹۵، ۹۴، ۹۳ و ۶۴ درصد باشد.

استفاده روزافزون از مدل SWAT در وضعیت‌های مختلف محیطی و ارائه اطلاعات قابل توجه درباره بخش‌هایی مانند دبی جریان، رسوب، نیتروژن، فسفر، باکتری، بیان‌کننده این مطلب است که مدل SWAT یک ابزار توانمند در زمینه مطالعات مرتبط با آب و خاک است. همچنین مطالعات فوق، نشان می‌دهند که مدل SDSM دقت قابل قبولی در ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی دارد.

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر وضعیت هیدرولوژی حوضه آبخیز رودخانه تلوار در استان کردستان انجام می‌شود. برای این منظور، در مرحله اول با به‌کارگیری مدل SDSM و استفاده از خروجی CanESM2 که یکی از مدل‌های تغییر اقلیم جفت شده CMIP5 و بر اساس رویکردهای گزارش پنجم IPCC است، متغیرهای اقلیمی دما، بارش و رطوبت نسبی در طول سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۹ شبیه‌سازی و بررسی می‌شود. در مرحله دوم، شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل SWAT و بر اساس آمار سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ انجام می‌شود. پس از واسنجی مدل SWAT، این مدل واسنجی شده برای شبیه‌سازی رواناب در طول سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۹ و با استفاده از متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده، استفاده می‌شود.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز مورد مطالعه در استان کردستان

### معرفی مدل SWAT

مدل SWAT را در سال ۱۹۹۰ آرنولد برای اداره خدمات تحقیقات کشاورزی آمریکا<sup>۱</sup> ارائه داد. SWAT یک مدل نیمه‌توزیعی مکانی و زمان پیوسته<sup>۲</sup> است که از مجموعه‌ای از معادلات ریاضی و فرمول‌های تجربی متعدد تشکیل شده است (نیچ و همکاران، ۲۰۰۲). در مدل SWAT دو روش برای تخمین رواناب سطحی وجود دارد: الف) روش شماره منحنی SCS (سرویس حفاظت خاک آمریکا<sup>۳</sup>، ۱۹۷۲) و ب) فرمول نفوذ گرین-آمپت (گرین و آمپت، ۱۹۱۱). در مدل SWAT از سه روش پنمن-مانتیس (مانتیس، ۱۹۶۵)، پریستلی-تیلور (پریستلی و تیلور، ۱۹۷۲) و هارگریوز-سامانی (هارگریوز و همکاران، ۱۹۸۵) برای محاسبه تبخیر و تعرق استفاده می‌شود. در این پژوهش، با توجه به مشکل وجود داده‌های روزانه تشعشع خورشیدی و سرعت باد از روش هارگریوز-سامانی برای محاسبه پتانسیل تبخیر و تعرق استفاده شد (نیچ و همکاران، ۲۰۰۲a، نیچ و همکاران، ۲۰۰۲b)

### معرفی مدل SDSM

تاکنون دو رویکرد برای روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری ارائه شده است. رویکرد اول که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از مدل‌های رگرسیونی یا تابع انتقال است که در آن با استفاده از رابطه بین پارامترهای مختلف جوی و سینوپتیکی (متغیرهای پیش‌بینی‌کننده) و پارامتر اقلیمی که لازم است دورنمایی از آن در آینده داشته باشیم، (متغیر پیش‌بینی‌شونده) یک تابع انتقال ارائه می‌شود. رویکرد دوم استفاده از مولدهای تصادفی آب و هوایی است که بر اساس مدل‌های سری زمانی، زنجیره‌های مارکف و سری‌های فوریه ارائه می‌شود (راسکو و همکاران، ۱۹۹۱). نرم‌افزار SDSM بر اساس ترکیبی از این دو رویکرد پایه‌ریزی شده است.

هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی<sup>۴</sup> خود، از رویکردهای جدید RCP به‌عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. رویکرد جدید انتشار چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و

RCP8.5 دارد که بر اساس میزان واداشت تابشی آن‌ها، در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند (چامونت، ۲۰۱۴).

### داده‌های مورد نیاز

متغیرهای مورد نیاز مدل SWAT شامل متغیرهای مکانی و متغیرهای هیدروکلیماتولوژی است (جدول ۱). متغیرهای مکانی شامل مدل رقومی ارتفاع<sup>۵</sup>، شبکه جریان، کاربری اراضی و خاک است. نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه مورد مطالعه به‌صورت رقومی شده از دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای کردستان تهیه و نقشه DEM مورد نیاز مدل با اندازه سلول ۱۰ در ۱۰ متر در نرم‌افزار ArcGIS از آن استخراج شد. در مدل SWAT برای معرفی مرز حوضه آبخیز و شبکه آبراهه از دو روش می‌توان استفاده کرد: یا باید موارد گفته شده توسط خود مدل و با استفاده از نقشه DEM ترسیم و یا این که به‌صورت دستی آماده شده و به مدل ارائه شود. در روش اول ممکن است با توجه به نواقص نقشه DEM، در ترسیم زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها اشتباهاتی وجود داشته و یا به دلخواه کاربر نباشد؛ ولی در روش دوم که زمان‌بر است و باید با دقت کافی انجام شود، کاربر می‌تواند نظر خود را در ترسیم زیرحوضه‌ها و شبکه آبراهه اعمال کند. در این پژوهش، نقشه‌های شبکه جریان و زیرحوضه‌ها به‌صورت دستی با استفاده از نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. حوضه آبخیز رودخانه تلوار با مساحت ۲۴۹۰ کیلومتر مربع، بر اساس نقشه توپوگرافی در قالب ۵۰ زیرحوضه تقسیم‌بندی شد. نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه راسازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری تهیه کرده است. در تشخیص کلاس‌های مختلف کاربری اراضی برای تهیه نقشه دقیق و قابل اطمینان، اقدام به برداشت نمونه‌های زمینی از کلاس‌های مختلف کاربری اراضی با استفاده از GPS<sup>۶</sup> شد. گفتنی است که نقشه کاربری اراضی در طول دوره شبیه‌سازی، یعنی هم دوره واسنجی و هم دوره اعتبارسنجی، ثابت در نظر گرفته شد. در شکل ۲ نقشه زیرحوضه‌ها، شبکه جریان و کاربری اراضی نشان داده شده است. نقشه خاک نیز از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان تهیه شد. متغیرهای

1- USDA Agricultural Research Service (ARS)

2- Continuous time

3- USDA Soil Conservation Service

4- AR5

5- Digital Elevation Model (DEM)

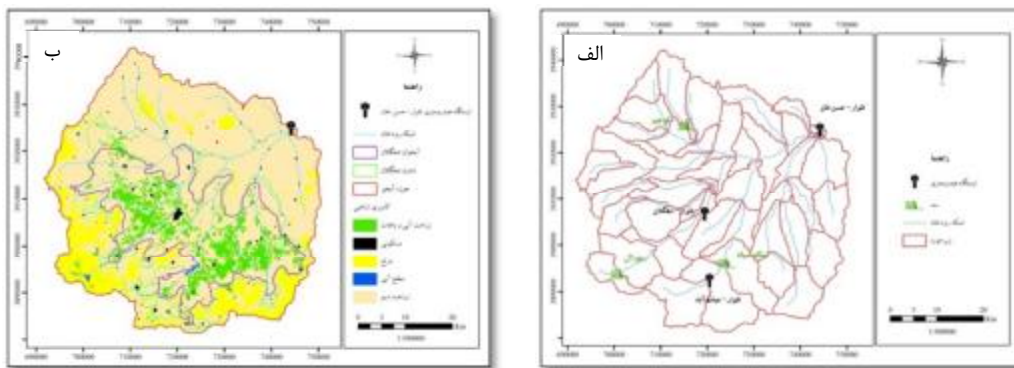
6- Global Positioning System (GPS)

منطقه‌های کردستان و سازمان هواشناسی اخذ شد. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در جدول ۲ نشان داده شده است.

هیدرولوژی‌ماتولوژی شامل داده‌های روزانه بارش، کمینه و بیشینه دمای هوا و رطوبت نسبی است که از بانک اطلاعاتی دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب

جدول ۱- داده‌های مورد نیاز مدل SWAT

مقیاس	داده		
	منبع	فرمت	نوع
۱:۲۵۰۰۰	نقشه توپوگرافی، شرکت آب منطقه‌ای کردستان	Grid (cell size ۱۰ × ۱۰ m)	مدل رقومی ارتفاع
۱:۱۰۰۰۰۰	اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان	Grid (cell size ۱۰ × ۱۰ m)	نقشه خاک
۱:۱۰۰۰۰۰	اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان	Grid (cell size ۱۰ × ۱۰ m)	نقشه کاربری اراضی
۱:۲۵۰۰۰	نقشه توپوگرافی، شرکت آب منطقه‌ای کردستان	Vector map (line)	نقشه شبکه جریان
-	اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان	Table (.dbf)	ویژگی‌های فیزیکی خاک
-	شرکت آب منطقه‌ای کردستان، سازمان هواشناسی	Table (.dbf)	هواشناسی



شکل ۲- الف) زیرحوضه‌ها و شبکه جریان حوضه آبخیز و ب) کاربری اراضی حوضه آبخیز

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در داخل و اطراف حوضه آبخیز رودخانه تلوار

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول دوره آماری		مختصات جغرافیایی		
		شروع	خاتمه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)
حسن‌خان	باران‌سنجی	۱۳۷۰/۰۷/۰۱	۱۳۹۶/۰۶/۳۱	۴۷° ۴۱' ۲۰"	۳۵° ۲۶' ۱۶"	۱۶۳۱
ناصرآباد	تبخیرسنجی	۱۳۷۰/۰۷/۰۱	۱۳۹۶/۰۶/۳۱	۴۷° ۳۰' ۳۰"	۳۵° ۱۷' ۳۸"	۱۷۹۶
بلبان‌آباد	تبخیرسنجی	۱۳۷۰/۰۷/۰۱	۱۳۹۶/۰۶/۳۱	۴۷° ۱۹' ۱۵"	۳۵° ۰۸' ۳۹"	۲۰۳۲
دوسر	تبخیرسنجی	۱۳۷۰/۰۷/۰۱	۱۳۹۶/۰۶/۳۱	۴۸° ۰۱' ۵۲"	۳۵° ۰۶' ۰۴"	۱۸۲۵
سلامت‌آباد	تبخیرسنجی	۱۳۷۰/۰۷/۰۱	۱۳۹۶/۰۶/۳۱	۴۷° ۵۰' ۱۵"	۳۵° ۳۹' ۵۹"	۱۶۶۴
خسروآباد	تبخیرسنجی	۱۳۷۰/۰۷/۰۱	۱۳۹۶/۰۶/۳۱	۴۷° ۳۷' ۱۲"	۳۵° ۳۱' ۲۳"	۱۸۶۷
قروه	سینوپتیک	۱۳۷۰/۰۷/۰۱	۱۳۹۶/۰۶/۳۱	۴۷° ۴۷' ۱۱"	۳۵° ۱۰' ۴۸"	۱۹۰۶

اولیه برای اجرای مدل شروع شد. برای شروع کار با مدل، ابتدا نقشه‌های DEM، زیرحوضه‌ها و شبکه آبراهه که قبلاً آماده شده بودند در محیط نرم‌افزار مدل فراخوانده شدند. از ترکیب نقشه‌های شیب، کاربری اراضی و خاک در محیط نرم‌افزار مدل SWAT، ۱۱۵۱ واحد پاسخ هیدرولوژیک<sup>۱</sup> تشکیل شد.

آنالیز حساسیت، واسنجی، اعتبارسنجی

همه داده‌های مربوط به سدهای موجود در محدوده مورد مطالعه و همچنین برداشت از رودخانه و منابع آب‌های زیرزمینی در مدل وارد شد. در مدل SWAT می‌توان میانگین روزانه برداشت آب از رودخانه‌ها، میانگین روزانه برداشت آب از منابع آب‌های زیرزمینی عمیق و کم عمق را وارد مدل کرد. در این مورد از داده‌های آماربرداری سال ۱۳۸۸ که شرکت آب منطقه‌ای کردستان در سطح استان انجام داده بود، استفاده شد. پس از جمع‌آوری اطلاعات و مشخصات حوضه آبخیز و تهیه پرونده‌های ورودی، کار

1- Hydrologic Response Unit (HRU)

سه شاخص ضریب همبستگی کلی، ضریب همبستگی جزئی و درصد کاهش همبستگی جزئی انجام می‌شود و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌ای که بالاترین همبستگی و کمترین درصد کاهش همبستگی جزئی را داشتند، انتخاب می‌شوند. درصد کاهش همبستگی جزئی از معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$PR = \frac{P_r - R}{R} \quad (2)$$

در معادله فوق، PR درصد کاهش همبستگی جزئی،  $P_r$  همبستگی جزئی و R همبستگی کلی یا همبستگی مطلق است.

با معرفی متغیرهای انتخابی به مدل SDSM، بارش، دما و رطوبت نسبی تحت سه رویکرد RCP26، RCP45 و RCP85 برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ و برای ایستگاه سینوپتیک قروه تولید و تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده در رویکردهای مختلف نسبت به دوره پایه یعنی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۵ بررسی شد.

### ارزیابی کارایی مدل

برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی از ضرایب تبیین، نش-ساتکلیف، میانگین خطای مطلق<sup>۳</sup> و درصد اریبی استفاده شد. ضریب تبیین بین صفر تا یک تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن یک است. ضریب نش-ساتکلیف بین یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند و مقدار بهینه این ضریب نیز یک است. اگر ضریب نش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد مدل عالی و کامل، اگر بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ باشد، رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد، غیرقابل قبول فرض می‌شود (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰). هر چه مقدار خطای مطلق و درصد اریبی به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بالای مدل و مقدار صفر نشان‌دهنده نبود خطا در برآورد مدل است. ضرایب تبیین و نش-ساتکلیف، میانگین خطای مطلق و درصد اریبی به ترتیب در معادلات (۳) تا (۶) ارائه شده‌اند.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (S_i - S_{avg})(M_i - M_{avg})]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - S_{avg})^2 \sum_{i=1}^n (M_i - M_{avg})^2} \quad (3)$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n [M_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i]^2} \quad (4)$$

شبیه‌سازی رواناب ماهانه، بر اساس آمار سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ انجام شد. آمار سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ (۲۲ سپتامبر ۲۰۰۰ تا ۲۲ سپتامبر ۲۰۱۱) برای واسنجی و آمار سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۷ (۲۳ سپتامبر ۲۰۱۱ تا ۲۲ سپتامبر ۲۰۱۷) برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. مدل بر اساس داده‌های ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری تلوار-حسن‌خان واسنجی شد.

برای انجام آنالیز حساسیت از روش یک پارامتر در هر بار<sup>۱</sup> (OAT) استفاده شد. در روش OAT در هر بار اجرای مدل، یک پارامتر تغییر می‌کند و بقیه ثابت می‌مانند و اثر آن تغییر بر تابع هدف، حساسیت پارامتر را مشخص می‌کند (رمجیو و کنفسور، ۲۰۰۷). حساسیت پارامترهای ورودی بر اجزای بیلان آب شامل رواناب سطحی، جریان جانبی، آب زیرزمینی و تبخیر و تعرق آنالیز شد. برای این کار از رابطه حساسیت نسبی بیان شده در معادله (۱) استفاده شد. برای تعیین مقادیر ورودی هر پارامتر، دامنه تغییر آن مشخص و در این دامنه چند عدد، با فاصله گام‌های مختلف به صورت تصادفی انتخاب و پس از ارائه آن‌ها به مدل، شبیه‌سازی انجام شد. شاخص حساسیت نسبی ( $S_r$ )، بیان‌کننده نسبت تغییر تابع خروجی در قبال تغییر در پارامترهای ورودی است (فیریسن و همکاران، ۲۰۰۷).

$$S_r \cong \frac{[(O_{p+\Delta p}) - (O_{p-\Delta p})] / O_p}{2\Delta P / P} \quad (1)$$

در معادله فوق  $S_r$  بیان‌کننده حساسیت نسبی، P مقدار پارامتر و O مقدار تابع هدف استخراج شده از نتیجه مدل است.

برای واسنجی مدل SDSM، از داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک قروه و داده‌های مرکز ملی پیش‌بینی متغیرهای محیطی<sup>۲</sup> استفاده شد. داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک قروه به دو دوره ۹ ساله (۱ ژانویه ۱۹۹۰ تا ۳۱ دسامبر ۱۹۹۹) و ۶ ساله (۱ ژانویه ۲۰۰۰ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۰۵) تقسیم شد که از ۹ سال اول برای واسنجی استفاده شد. متغیرهای NCEP شامل ۲۶ متغیر اتمسفری است و از میان آن‌ها متغیر یا متغیرهایی انتخاب می‌شوند که بالاترین میزان همبستگی را با پارامترهای هواشناسی و کمترین خطا را دارند. این کار با محاسبه

1- One factor at a time (OAT)

2- National centers for environmental prediction (NCEP)

3- Mean Absolute Error (MAE)

می‌گیرد؛ در حالی که بارندگی یک پارامتر گسسته است و تحت تأثیر عوامل مختلف قرار می‌گیرد.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n (M_i)} \times 100 \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |M_i - S_i|}{n} \quad (6)$$

در معادلات فوق  $S_i$  مقادیر شبیه‌سازی شده،  $M_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده،  $S_{avg}$  متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده،  $M_{avg}$  متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد داده‌هاست.

## نتایج و بحث

### آنالیز حساسیت پارامترها

مقادیر بهینه پارامترها که در مرحله واسنجی بر اساس آن‌ها بهترین دقت شبیه‌سازی حاصل شد، در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار حساسیت هر یک از پارامترهای منتخب مدل SWAT بر اجزای بیلان آب شامل رواناب سطحی، جریان جانبی، آب زیرزمینی و تبخیر و تعرق در جدول ۴ ارائه شده است.

از بین ۲۶ پارامتر NCEP، پارامترهایی که همبستگی بیشتری با متغیرهای اقلیمی دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و رطوبت نسبی دارند، در جدول ۵ ارائه شده است. جدول ۵ نشان می‌دهد که داده‌های دما همبستگی بهتری با داده‌های مشاهداتی دارند. این بدان علت است که تغییرپذیری دما نسبت به بارندگی کمتر و دما یک متغیر پیوسته است که کمتر تحت تأثیر ناهنجاری‌های زمانی قرار

## هیدروگراف شبیه‌سازی شده در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی

هیدروگراف شبیه‌سازی شده در مقایسه با هیدروگراف مشاهده‌ای در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در شکل ۳ نشان داده شده است. اسکتر پلات میانگین ماهانه رواناب در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در شکل ۴ قابل مشاهده و نتایج ضرایب ارزیابی مدل نیز در جدول ۶ ارائه شده است.

مقدار ضریب تبیین در مرحله واسنجی رواناب ماهانه ۰/۶۵ به دست آمد که با توجه به تعداد داده‌های رواناب استفاده شده برای ایستگاه هیدرومتری (تعداد ۱۳۳ داده) در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار است. مقدار ضریب نش-ساتکلیف ۰/۴۴ به دست آمد و نشان‌دهنده این است که مدل به‌صورت رضایت‌بخشی رواناب ماهانه ایستگاه هیدرومتری را شبیه‌سازی کرده است. در مجموع بر اساس نتایج ضرایب ارزیابی، شبیه‌سازی رواناب ماهانه در مرحله واسنجی برای ایستگاه هیدرومتری تلوار-حسن‌خان قابل قبول است. نتایج ضرایب تبیین و نش-ساتکلیف در مرحله اعتبارسنجی رواناب ماهانه، قابل قبول بودن شبیه‌سازی رواناب را نیز در این مرحله تأیید می‌کنند.

جدول ۳- مقادیر بهینه‌شده پارامترها در مرحله واسنجی رواناب ماهانه

نام پارامتر	شرح پارامتر	محدوده تغییرات	مقدار بهینه
CN2	شماره منحنی SCS برای وضعیت رطوبتی II	35- 98	70 - 80
SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	0- 1	0.35 - 0.7
SOL_BD	چگالی توده خاک	0.9- 2.5	1.25 - 1.8
SOL_K	هدایت هیدرولیکی اشباع	0- 2000	200 - 800
ESCO	عامل جبران تبخیر از خاک	0- 1	0.4 - 0.8
EPCO	عامل جبران برداشت آب گیاه	0- 1	0.7 - 0.9
CANMX	حداکثر نگاه‌داشت تاج پوشش (برگاب)	0- 100	60 - 100
BIOMIX	عامل اختلاط بیولوژیکی	0- 1	0.7 - 1
RCHRG_DP	درصد نفوذ به سفره عمیق	0- 1	0.01 - 0.1
ALPHA_BF	ثابت تخلیه آب زیرزمینی	0- 1	0.01 - 0.05
SMFMN	حداقل میزان ذوب برف در طول سال	0- 10	0.1 - 2
SMFMX	حداکثر میزان ذوب برف در طول سال	0- 10	0.1 - 2
SFTMP	دمای بارش برف	+5- -5	-3 - -1
SMTMP	دمای ذوب برف	+5- -5	-2 - 0.5

جدول ۴- ترتیب و نسبت حساسیت هر یک از پارامترهای منتخب مدل SWAT بر اجزای بیلان آب

نسبت حساسیت					نام پارامتر
Evapotranspiration	Groundwater (deep aquifer)	Groundwater (shallow aquifer)	Lateral soil	Surface runoff	
0.586	0.047	0.753	0.256	1.822	CN2
1.738	0.066	1.162	0.216	0.244	SOL_AWC
0.198	0.01	0.145	0.187	0.063	SOL_BD
1.243	0.035	0.494	0.906	0.121	SOL_K
6.039	0.142	1.976	0.282	2.484	ESCO
1.964	0.044	0.654	0.048	0.947	EPCO
0.037	0	0.008	0.011	0.014	CANMX
0.002	0	0.001	0	0	BIOMIX
0	0.299	0.212	0	0	RCHRG_DP
0	0	2.134	0	0	ALPHA_BF
0.766	0.07	1.096	0.266	0.924	SMFMN
0.032	0.009	0.115	0.029	0.157	SMFMX
0.034	0.002	0.035	0.009	0.074	SFTMP
0.144	0.003	0.058	0.016	0.107	SMTMP

جدول ۵- پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب برای ریز مقیاس‌نمایی آماری دما، بارش و رطوبت نسبی

PR	P value	P <sub>r</sub>	R	متغیر NCEP		متغیر اقلیمی
				شرح	عنوان	
-0.0025	0	0.784	0.786	500 hPa geopotential height	ncepp500gl.dat	دمای کمینه
-0.097	0	0.661	0.732	Specific humidity at 850 hPa	nceps850gl.dat	
-0.7276	0	0.213	0.782	Surface specific humidity	ncepshumgl.dat	
-0.3738	0	0.526	0.84	Mean temperature at 2m	nceptempgl.dat	
0.0037	0	0.82	0.817	500 hPa geopotential height	ncepp500gl.dat	دمای بیشینه
-0.0758	0	0.707	0.765	Specific humidity at 850 hPa	nceps850gl.dat	
-0.7246	0	0.225	0.817	Surface specific humidity	ncepshumgl.dat	
-0.3216	0	0.597	0.88	Mean temperature at 2m	nceptempgl.dat	
-0.4211	0.4061	0.022	0.038	500 hPa wind direction	ncepp5thgl.dat	بارش
-0.2857	0.1484	0.045	0.063	850 hPa zonal velocity	ncepp8_ugl.dat	
-0.2769	0.1278	0.047	0.065	850 hPa meridional velocity	ncepp8_vgl.dat	
-0.2903	0.1573	0.044	0.062	850 hPa wind direction	ncepp8thgl.dat	
-0.0652	0.1684	-0.043	-0.046	500 hPa geopotential height	ncepp500gl.dat	
-0.0152	0	-0.65	-0.66	500 hPa geopotential height	ncepp500gl.dat	رطوبت نسبی
-0.1669	0	-0.509	-0.611	Specific humidity at 850 hPa	nceps850gl.dat	
-0.8247	0	-0.115	-0.656	Surface specific humidity	ncepshumgl.dat	
-0.4746	0	-0.373	-0.71	Mean temperature at 2m	nceptempgl.dat	

افزایش خواهد داشت. نتایج ضرایب ارزیابی مدل SDSM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی نیز در جدول ۷ قابل مشاهده است.

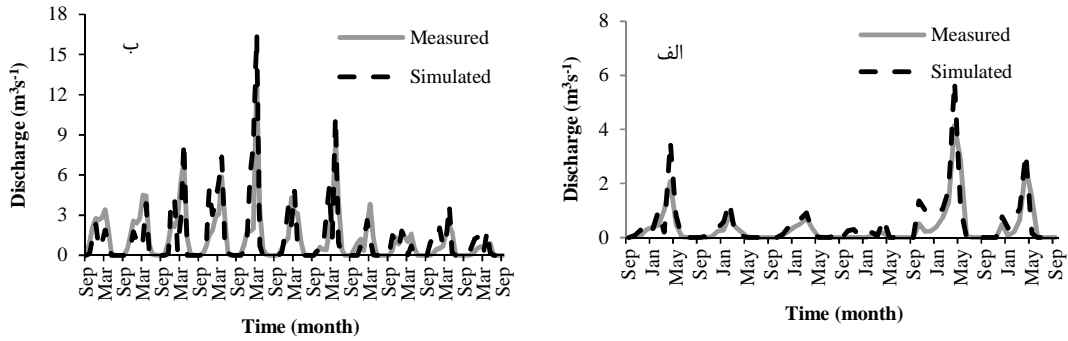
با توجه به نتایج جدول ۷ و شکل‌های ۵ و ۶ مشخص می‌شود که پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب از کارایی مناسب و قابل قبولی برای ریز مقیاس‌نمایی آماری متغیرهای اقلیمی دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و رطوبت نسبی برخوردار هستند. همچنین تطابق دمای بیشینه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده بیشتر از متغیرهای اقلیمی دمای کمینه، بارش و رطوبت نسبی است و با نتایج عساکره و اکبرزاده (۱۳۹۶) مطابقت دارد.

### تغییرات میانگین ماهانه متغیرهای اقلیمی در دوره

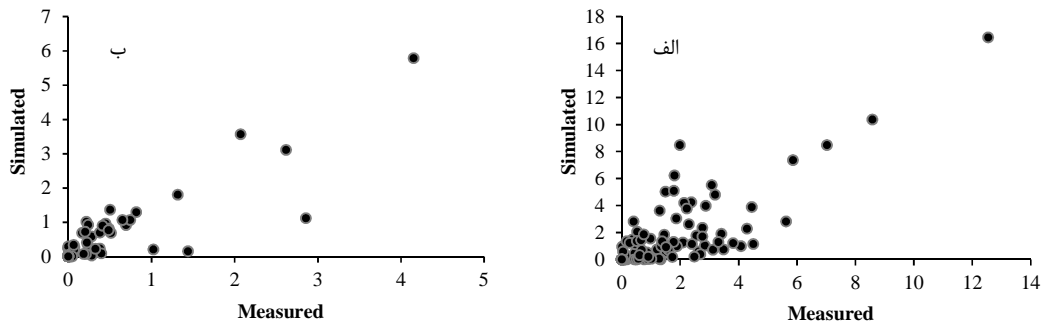
۲۰۲۰-۲۰۴۹

در شکل ۵ تغییرات میانگین بارش و رطوبت نسبی تحت رویکردهای RCP برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ نسبت به دوره پایه نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، بارش به طور کلی در فصول زمستان و بهار کاهش و در فصول تابستان و پاییز افزایش پیدا خواهد کرد. تغییر اقلیم به دو شکل می‌تواند بر روی بارش نقش داشته باشد: الف) تغییر در مقدار بارش و ب) تغییر زمانی الگوی بارش. مطابق شکل ۶، میانگین کمینه و بیشینه دمای ایستگاه سینوپتیک قروه در همه ماه‌ها به غیر از ماه‌های سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر در دوره آینده





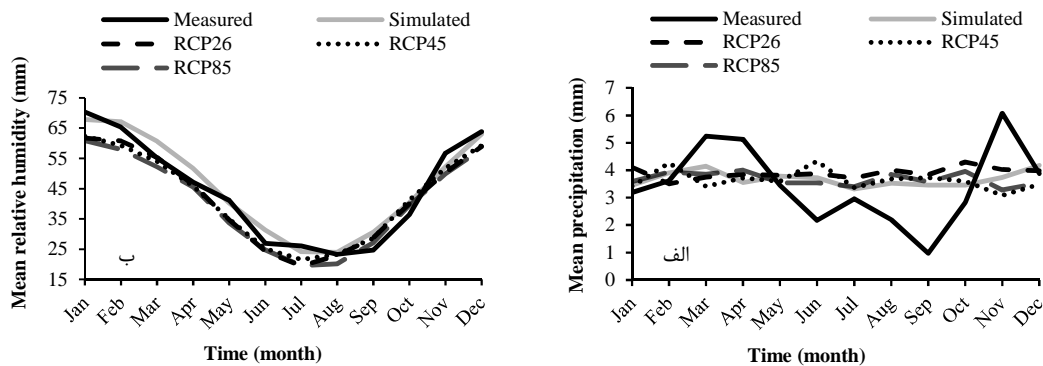
شکل ۳- هیدروگراف مشاهده شده و شبیه‌سازی شده به صورت ماهانه الف) مرحله واسنجی؛ ب) مرحله اعتبارسنجی



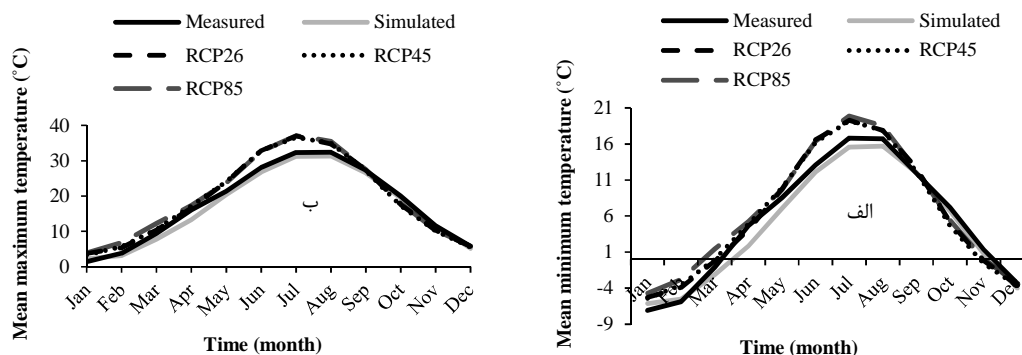
شکل ۴- اسکتر پلات میانگین ماهانه رواناب الف) مرحله واسنجی و ب) مرحله اعتبارسنجی

جدول ۶- نتایج ضرایب ارزیابی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب ماهانه

ضرایب ارزیابی		تعداد داده	مرحله
ENS	R <sup>2</sup>		
0.44	0.65	۱۳۳	واسنجی
0.59	0.77	۷۳	اعتبارسنجی



شکل ۵- الف) میانگین بارش و ب) میانگین رطوبت نسبی در مقیاس ماهانه در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ در مقایسه با دوره پایه



شکل ۶- الف) میانگین دمای کمینه و ب) میانگین دمای بیشینه در مقیاس ماهانه در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ در مقایسه با دوره پایه

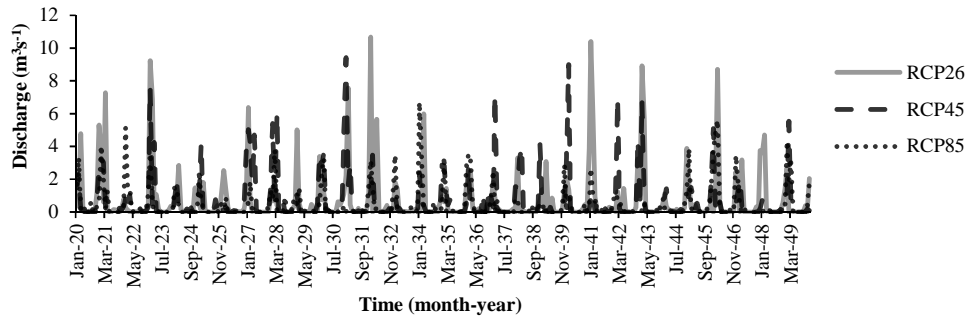
جدول ۷- نتایج ضرایب ارزیابی مدل SDSM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی

ضرایب ارزیابی				دوره	متغیر اقلیمی
MAE	PBIAS	$E_{NS}$	$R^2$		
0.97	14.07	0.98	0.99	دوره پایه (1990-2005)	دمای کمینه
1.51	-14.82	0.95	0.97	RCP26 (2020-2049)	
1.54	-14.02	0.95	0.96	RCP45 (2020-2049)	
1.79	-24.22	0.93	0.96	RCP85 (2020-2049)	
1.02	5.07	0.99	0.99	دوره پایه (1990-2005)	دمای بیشینه
1.97	-7.72	0.95	0.97	RCP26 (2020-2049)	
2.08	-7.47	0.95	0.97	RCP45 (2020-2049)	
2.34	-10.18	0.93	0.97	RCP85 (2020-2049)	
1.05	-6.08	0.12	0.22	دوره پایه (1990-2005)	بارش
1.24	-12.11	-0.13	0	RCP26 (2020-2049)	
1.27	-4.72	-0.31	0.22	RCP45 (2020-2049)	
1.14	-5.67	-0.04	0	RCP85 (2020-2049)	
3.12	-3.04	0.95	0.96	دوره پایه (1990-2005)	رطوبت نسبی
4.1	6.28	0.91	0.95	RCP26 (2020-2049)	
3.96	5.54	0.92	0.96	RCP45 (2020-2049)	
4.89	8.87	0.89	0.96	RCP85 (2020-2049)	

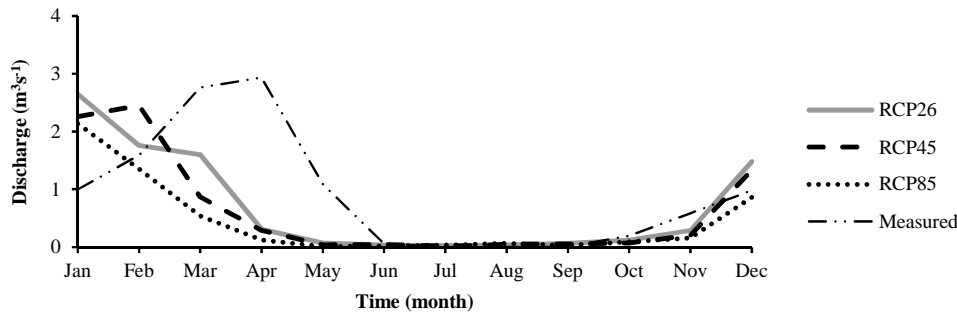
در دیگر ماه‌ها است. متوسط رواناب سالانه بلندمدت در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ تحت رویکردهای RCP256، RCP45 و RCP85 به ترتیب ۰/۷۰، ۰/۶۴ و ۰/۴۵ و در دوره پایه ۰/۹۳ است. بررسی این اعداد حاکی از کاهش متوسط رواناب سالانه بلندمدت در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ نسبت به دوره پایه است. از دلایل این امر، می‌توان به افزایش متوسط دمای سالانه بلندمدت و کاهش متوسط بارندگی سالانه بلندمدت در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ نسبت به دوره پایه اشاره کرد. این موضوع در کارهای پژوهشگران دیگر چون سادات آشفته و بزرگ حداد (۱۳۹۲) دیده می‌شود.

#### هیدروگراف شبیه‌سازی شده در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹

با معرفی میانگین سری‌های زمانی روزانه بارش، رطوبت نسبی، دمای کمینه و بیشینه ریز مقیاس شده توسط مدل SDSM، به مدل SWAT، سری‌های زمانی ماهانه رواناب در ایستگاه هیدرومتری تلوار- حسن‌خان در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ شبیه‌سازی شد. هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده تحت رویکردهای RCP در شکل ۷ نشان داده شده است. در نمودار ارائه شده در شکل ۸ میانگین رواناب ماهانه در دوره آینده با دوره مشاهداتی مقایسه شد. این نمودار نشان‌دهنده افزایش رواناب در ماه‌های ژانویه، فوریه و دسامبر (معادل با ماه‌های دی و بهمن و آذر) و کاهش آن



شکل ۷- هیدروگراف شبیه‌سازی شده به صورت ماهانه در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹



شکل ۸- میانگین رواناب ماهانه در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ در مقایسه با دوره مشاهداتی

نامطلوب‌ترین اثر تغییر اقلیم را که افزایش خشکی در منطقه است، به همراه خواهد داشت. همچنین افزایش دما از طریق افزایش تبخیر، هم از نظر کمی و هم از نظر کیفی بر منابع آب تأثیر خواهد گذاشت؛ از طرف دیگر، افزایش دما می‌تواند سبب تغییر شکل بارش زمستانی از برف به باران شود. این موضوع در کارهای محققان دیگر چون منصوری و همکاران (۱۳۹۳) دیده می‌شود.

توجه به هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده در شکل ۳ نشان می‌دهد که در برخی از ماه‌ها (مارس و آوریل و می) دبی اوج به خوبی شبیه‌سازی نشده است. مدل SWAT توانایی شبیه‌سازی دقیق دبی‌های اوج رودخانه را ندارد. این موضوع در کارهای پژوهشگران دیگر نیز چون تولسون و شومیکر (۲۰۰۴) و چو و شیرمحمدی (۲۰۰۴) دیده می‌شود. برای این ضعف نیز دلایلی گفته شده است که از مهم‌ترین این دلایل می‌توان به ضعف مدل در شبیه‌سازی فرآیند ذوب برف اشاره کرد (رستمیان و همکاران، ۲۰۰۸؛ وانگ و میلیس، ۲۰۰۵). اکثر جریان‌هایی که مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی آن‌ها نبوده است، در اواخر فصل زمستان و در طول فصل بهار و به خصوص در ماه

### نتیجه‌گیری

روش‌های مختلفی برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی شبیه‌های گردش عمومی جو وجود دارد که هر کدام از منطق خاصی پیروی می‌کند؛ از این رو می‌توان انتظار داشت که استفاده از روش‌های مختلف نتایج متفاوتی به دنبال داشته باشد که یکی از مهم‌ترین دلایل آن، نبود قطعیت‌هاست که بر نتایج نهایی تأثیر می‌گذارند. از منابع نداشتن قطعیت می‌توان نداشتن قطعیت مرتبط به نمایشنامه‌های تغییر اقلیم، نداشتن قطعیت مربوط به شبیه‌های GCM، نداشتن قطعیت روش‌های ریزمقیاس‌نمایی و نداشتن قطعیت شبیه‌های شبیه‌سازی را نام برد.

مطابق شکل ۵ الف، نتایج کوچک مقیاس‌شده پارامتر بارندگی در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ کاهش بارندگی‌های زمستان و بهار را نشان می‌دهد. همچنین میزان بارندگی فصول تابستان و پاییز افزایش خواهد یافت.

مطابق شکل ۶، میانگین نتایج کوچک مقیاس شده متغیر دما در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ افزایش متوسط این متغیر نسبت به دوره پایه را نشان می‌دهد. افزایش دما

مقیاس‌نمایی آماری (SDSM) و خروجی مدل CanESM2. جغرافیا و مخاطرات طبیعی. ۲۱: ۱۷۴-۱۵۳.

۴. منصوری ب. احمدزاده ح. مسیح بوانی ع. مرید س. دلاور م. و لطفی س. ۱۳۹۳. بررسی آثار تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه زربنه‌رود با استفاده از مدل SWAT. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۸(۶): ۱۱۹۱-۱۲۰۳.

5. Chaumont D. 2014. A guidebook on climate scenarios: Using climate information to guide adaptation research and decisions. 127 P.
6. Chu T. W. and Shirmohammadi A. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). 47(4): 1057-1073.
7. Feyereisen G. W. Strickland T. C. Bosch D. D. and Sullivan D. G. 2007. Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the little river watershed. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 50: 843-855.
8. Green W. H. and Ampt G. A. 1911. The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Science. 4: 11-24.
9. Hargreaves G. L. Hargreaves G. H. and Riley J. P. 1985. Agricultural benefits for Senegal River basin. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 111(2): 113-124.
10. IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis / Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, New York, USA, pp. 24-57.
11. IPCC. 2008. Climate change and water. Cambridge University Press.
12. Lorena L. Leonardo V. Enrique R. and Goffredi L. 2010. Basin-scale water resources assessment in Oklahoma under systematic climate change scenarios using a fully distributed hydrologic model. Journal of Hydrologic Engineering. 15: 107-118.
13. Monteith J. L. 1965. Evaporation and the environment. In The State and Movement of Water in Living Organisms, 19th Symposium, Swansea, Society of Experimental Biology, Cambridge University Press. 1965 p.
14. Nash J. E. and Sutcliffe J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles. Journal of Hydrology. 10(3): 282-290.

آوریل اتفاق افتاده است. مدل SWAT بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه به صورت باران یا برف تقسیم‌بندی می‌کند. با توجه به ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب در ماه‌های پس از فصل سرما که طی آن‌ها با گرم شدن هوا، برف باریده شده در فصل سرما ذوب می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که مدل قادر به شبیه‌سازی خوب ذوب برف در این منطقه نبوده است و جریان‌های حداکثر را خوب شبیه‌سازی نکرده است. در مدل SWAT هنگامی که رطوبت موجود در هر لایه خاک از گنجایش زراعی بیشتر باشد، مقداری از این آب باعث ایجاد جریان جانبی می‌شود و قسمتی هم به لایه بعدی نفوذ می‌کند. آب اضافه بر ظرفیت زراعی در عمقی‌ترین لایه خاک به جریان زیرزمینی می‌پیوندد. هنگامی که لایه‌ای از خاک یخ زده باشد، در این صورت مدل فرض می‌کند که هیچ جریان جانبی اتفاق نمی‌افتد و لایه خاک می‌تواند آب اضافه بر ظرفیت زراعی را تا زمانی که اشباع شود، در خود نگه دارد. سپس فرض می‌کند که رطوبت بالغ بر گنجایش زراعی می‌تواند از لایه اشباع یخ‌زده به لایه بعدی نفوذ کند. این جریان در عمقی‌ترین لایه به آب‌های زیرزمینی می‌رسد و پس از یک تأخیر خیلی زیاد به جریان سطحی می‌پیوندد. این فرضیات باعث انتقال زیادی از بارش زمستان به جریان سطحی در اوایل تابستان می‌شود؛ بنابراین از جمله دلایل شبیه‌سازی جریان بیش از مقدار مشاهده شده توسط مدل در اوایل تابستان، می‌تواند فرضیاتی باشد که مدل در انتقال جریان در لایه‌های یخ‌زده و اشباع در نظر می‌گیرد.

## منابع

۱. احمدآبادی ع. و صدیقی فر ز. ۱۳۹۷. پیش‌بینی آثار تغییر اقلیم بر خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز کن بر اساس مدل ریز مقیاس‌نمایی آماری. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی ۱۸(۵۱): ۱۰۳-۱۱۴.
۲. سادات آشفته پ. و بزرگ حداد ا. ۱۳۹۲. ارائه رویکرد احتمالاتی ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر منابع آب. مجله مهندسی منابع آب. ۶(۱۹): ۵۱-۶۶.
۳. عساکره ح. و اکبرزاده ی. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش ایستگاه سینوپتیک تبریز طی دوره (۲۰۱۰-۲۰۱۰) با استفاده از ریز

- Environmental Research Letters 4, 19 p. doi:10.1088/1748-9326/4/3/035003.
26. Tolson B. A. and Shoemaker C. A. 2004. Watershed modeling of the Cannonsville Basin using SWAT2000: Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannonsville Reservoir. School of Civil and Environmental Engineering. 159 p.
  27. USDA Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook. Hydrology Section 4, Chapters 4-10.
  28. Wang X. and Melesse A. M. 2005. Evaluation of the SWAT model's snowmelt hydrology in a northwestern Minnesota watershed. American Society of Agricultural Engineers (ASAE). 48(4): 1-18.
  29. Zhange J. Y. Wang G. Q. He R. M. and Liu C. S. 2009. Variation trends of runoffs in the Middle Yellow River Basin and its response to climate change. Advances in Water Sciences. 20: 153-158.
  15. Neitsch S. L. Arnold J. G. Kiniry J. R. Williams J. R. and King K. W. 2002a. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. 458 p.
  16. Neitsch S. L. Arnold J. G. Kiniry J. R. Williams J. R. and King K. W. 2002b. Soil and water assessment tool: User's Manual. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. 412 p.
  17. Priestly C. H.B. and Taylor R. J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Monthly Weather Review. 100(2): 81-92.
  18. Rasco P. Szeidl L. and Semenov M. A. 1991. A serial approach to local stochastic models. Journal of Ecological Modeling. 57: 27-41.
  19. Refsgaard J. C. 2007. Hydrological Modelling and River Basin Management. PhD Thesis, Geological Survey of Denmark and Greenland Danish Ministry of the Environment. 90 p.
  20. Remegio B. and Confesor Jr. 2007. Sensitivity analysis and interdependence of the SWAT model parameters. Written for presentation at the 2007 ASABE Annual International Meeting Sponsored by American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) Minneapolis Convention Center Minneapolis, Minnesota.
  21. Rostamian R. Jaleh A. Afyun M. Mousavi S. F. Heidarpour M. and Abbaspour K. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. Journal of Hydrological science. 53: 977-988.
  22. Santra P. and Das B. S. 2013. Modeling runoff from an agricultural watershed of western catchment of Chilika Lake through ArcSWAT. Journal of Hydro- environment Research. 7: 261-269.
  23. Suo M. Q. Zhang J. Zhou Q and Li Y. P. 2019. Applicability analysis of SDSM technology to climate simulation in Xingtai city, China. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 223 (2019) 012053 doi:10.1088/1755-1315/223/1/012053.
  24. Thavhana M. P. Savage M. J. and Moeletsi M. E. 2018. SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu river catchment, South Africa. Physics and Chemistry of the Earth (2018), doi: 10.1016/j.pce.2018.03.012.
  25. Toews M. W. and Allen D. M. 2009. Simulated response of groundwater to predicted recharge in a semi-arid region using a scenario of modelled climate change.

