

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب سطحی با مدل SWAT (مورد مطالعه: رودخانه مزلقان)

شهاب حاجی قاسمی^۱، محمود ذاکری نیری^{۲*}، عطاالله نجفی جیلانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۱

چکیده

هدف پژوهش حاضر بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی حوضه مزلقان بود. به این منظور مدل SWAT برای شبیه‌سازی رژیم هیدرولوژیکی حوضه و الگوریتم SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل استفاده شد. داده‌های آماری مورد استفاده برای شبیه‌سازی رواناب، مربوط به سال‌های (۱۹۹۷-۲۰۱۵) بود. برای ارزیابی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی رواناب از شاخص‌های نش-ساتکلیف، R^2 ، p-factor و r-factor استفاده شد و با استفاده از مدل تغییر اقلیم LARS-WG در منطقه مورد مطالعه با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه رازین که دارای آمار بلندمدت اقلیمی است، ریزمقیاس نموده و با در نظر گرفتن سناریوهای تغییر اقلیم RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره آینده ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تغییر اقلیم منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اطمینان از درستی واسنجی مدل LARS-WG از شاخص‌های خطاسنجی میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب بهره‌وری نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد؛ نتایج مطالعه ضمن تایید کارایی مدل، نشان داد برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰، افزایش در متوسط دمای سالانه براساس سه سناریوی نامبرده رخ خواهد داد. همچنین میانگین ماهانه بارش تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، کاهش را پیش‌بینی می‌کند. در نهایت با توجه به داده‌های پیش‌بینی شده اقلیمی در شبیه‌سازی رواناب، در حوضه مزلقان، افزایش رواناب پیش‌بینی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، رواناب سطحی، رودخانه مزلقان، مدل SWAT، LARS-WG

مقدمه

اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که بشر در عصر حاضر با آن روبرو است، لذا سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌ها باید توان ظرفیت‌سازی و انعطاف‌پذیری برای رویارویی با وقوع پدیده‌هایی نظیر تغییر اقلیم که ابعاد و اثرات زیان‌بار آن‌ها گسترده و همراه با عدم قطعیت‌های فراوان است را داشته باشند (حیدری تاشه کبود و حسینی، ۱۳۹۸).

محدودیت منابع آب و توزیع نامتجانس آن در مناطق مختلف ایران سبب شده است که در مقایسه با بسیاری از کشورها، نسبت به پدیده تغییر اقلیم آسیب‌پذیرتر باشد؛ زیرا ارتباط تنگاتنگی بین چرخه هیدرولوژی و سیستم اقلیمی وجود دارد و هر تغییری در اقلیم، روی پارامترهای هیدرولوژیکی اثر می‌گذارد. تغییر اقلیم عبارت است از تغییرات رفتار آب و هوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که در طول یک افق زمانی بلند مدت از اطلاعات مشاهده یا ثبت شده در آن منطقه مورد انتظار است. در سال‌های اخیر با تدوین سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، مدل‌های گردش عمومی با فرضیات مختلف انتشار اجرا شده‌اند تا وضعیت اقلیمی دهه‌های آتی را پیش‌بینی کنند. طبق رویکرد جدید در گزارش پنجم

رواناب، آبدهی رودخانه‌ها، آب‌های زیرزمینی، شدت سیلاب و خشکی، همگی متاثر از بارش و دما که از مهم‌ترین عناصر اقلیمی هستند، می‌باشند. آگاهی از میزان حجم و شدت رواناب ناشی از نزولات جوی و تغییرات کمی و کیفی آن در زمان و مناطق مختلف از نیازهای اساسی برنامه‌ریزان و مدیران منابع آب است، به طوری که در مسائل مربوط به مدیریت منابع آب، کنترل آلودگی، طرح‌های مهندسی آب، مصارف کشاورزی، خسارات ناشی از سیل و حفظ و بهره‌وری مناسب از منابع طبیعی ضروری است. نظر به اینکه تغییر

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی و مدیریت منابع آب، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران

(* نویسنده مسئول: Email:Lzakeriiau@gmail.com)

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.11.1

مکانی انجام دهد. از سال ۱۹۹۰ مطالعات متعدد تلاش کرده‌اند عدم قطعیت ناشی از منابع مختلف را در پژوهش‌های هیدرولوژیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار دهند. همچنین مدل LARS-WG^۳ یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های آب و هوایی است که برای شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در یک مکان واحد تحت شرایط اقلیم حال و آینده به کار می‌رود. در این راستا با توجه به اهمیت موضوع و به منظور کنترل آن، تحقیقاتی با مدل SWAT صورت گرفته که در این پژوهش به بررسی پاره‌ای از مطالعات داخلی و خارجی پرداخته شده است.

پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۶)، در بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوزه آبریز تویسرکان همدان با مدل LARS-WG به این نتیجه رسیدند که در اثر کاهش بارش ناشی از تغییرات اقلیمی حجم رواناب خروجی هر یک از زیرحوزه‌های حوزه آبریز تویسرکان کاهش خواهد یافت. نادری و همکاران (۱۳۹۶)، در پژوهشی با عنوان "بررسی تاثیر تغییر کاربری اراضی و اقلیم بر رواناب حوضه آبخیز با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه گرین)" گزارش کردند که کاهش میزان رواناب در دوره ۲۰۴۲ تا ۲۰۵۰ نسبت به دوره‌ی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ در اثر تغییر اقلیم (بارش و دما) بیشتر از میزان کاهش است که در اثر تغییر کاربری اراضی ایجاد می‌شود. بحری و زاهدی (۱۳۹۵)، در مطالعه‌ای به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی جریان سطحی رودخانه حوضه آبخیز ارازکوسه^۴ پرداختند؛ نرم افزار مورد استفاده، LARS-WG و SWAT بود. نتایج نشان دهنده افزایش متوسط دمای سالانه در دوره‌های نامبرده بود. همچنین بارش در سال‌های ابتدایی و میانی قرن با افزایش و در سال‌های انتهایی قرن با کاهش روبرو خواهد بود. ساراف و رگولوار، در بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی در تولید رواناب در حوضه رودخانه گوداواری، هند گزارش کردند که کاهش رواناب در طی سال‌های ۲۰۲۰ ممکن است. به علت افزایش زیاد حداقل درجه حرارت صورت پذیرد (Saraf and Regulwar, 2018). واگش و همکاران، در مطالعه‌ای به "تاثیر تغییرات اقلیمی در تولید رواناب: حوضه رودخانه ریفت دره اتیوپی" با مدل SWAT پرداختند؛ در نهایت پیش‌بینی بارش رواناب برای حوضه حاکی از این بود که حوضه افزایش شدید بارش و دما را پیش‌رو خواهد داشت (Wagesh et al., 2013). مرور مطالعات نشان می‌دهد بررسی نتایج تغییر اقلیم حاکی از آن است که بر تبخیر و تعرق افزایش یافته است. و بر رواناب اثر خواهد داشت. اکثر مطالعات داخلی و خارجی، مدل LARS-WG برای بررسی تغییر اقلیم انتخاب کرده بودند که نتایج رضایت‌بخش بود.

بررسی تاثیر پدیده‌ی تغییر اقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و رواناب سطحی حوضه‌ی آبخیز می‌تواند به مدیریت چالش‌های منابع

هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC AR5)^۱ که تحت چهار سناریو ارائه شده است، میانگین دمای مناطق مختلف کره زمین تحت هر چهار سناریو RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 و RCP8.5 بسته به منطقه جغرافیایی با شدت‌های متفاوت افزایش خواهد یافت (چراغلی زاده و همکاران، ۱۳۹۹). از آنجا که میزان درجه حرارت مؤلفه‌های اقلیمی در اندرکنش متقابل قرار دارد، انتظار می‌رود که تغییرات قابل ملاحظه‌ای در آب و هوای جهانی رخ دهد (IPCC, 2007). گرم شدن کره زمین منجر به تغییر بیلان تابش از سطح زمین، گردش اتمسفر، تغییر توزیع مکانی و زمانی و شدت بارش شده و به چرخش بخار آب سرعت می‌بخشد، همچنین ویژگی‌های هیدرولوژیکی از قبیل تبخیر، رواناب، آب و خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Kundzewicz et al., 2007; Merritt et al., 2006). سازگاری با تغییر اقلیم یکی از اجزای برنامه‌ریزی در توسعه‌ی زیربنایی و پذیرفته شده در تمام نهادهای بین‌المللی است. این سازگاری شامل پیش‌بینی دقیق از وضعیت آینده نیز خواهد بود. منابع آب کشور از جمله بخش‌هایی است که به‌طور جدی از تغییرات اقلیمی متأثر خواهد شد و حوزه‌های وسیعی از آن شامل منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، شبکه‌های آب و فاضلاب، شبکه‌های آبرسانی شهری و سازه‌های مرتبط با بخش آب با پیامدهای قابل ملاحظه‌ای روبه‌رو خواهند شد (شهواری و همکاران، ۱۳۹۸). نظر به تأثیر تغییرات فوق بر برنامه‌ریزی‌های منابع آب، شبیه‌سازی جریان رودخانه برای آگاهی از آورد رودخانه در دوره‌های زمانی آینده از مسائل مهم و کاربردی در مدیریت منابع آب است و می‌تواند در زمینه‌های مدیریتی راهگشای مشکل سیلاب، فرسایش خاک و طراحی کلیه پروژه‌های هیدرولوژیکی باشد که معمولاً با توسل به مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی که با بهره‌مندی از روش‌های مختلف نظری میزان جریان را برآورد می‌کنند صورت می‌گیرد (درواری و سلیمانی، ۱۳۸۶). انتخاب یک مدل از بین مدل‌های هیدرولوژیکی مختلف که بتواند تأثیرات تغییر اقلیم را با توجه به شرایط مختلف مدیریت کشاورزی و منابع آبی بر روی سیستم منابع آب یک منطقه شبیه‌سازی کند، تأثیر بسزایی در ارزیابی اثرات این پدیده و تصمیم‌گیری بهتر سازمان‌ها و ذینفعان مربوط دارد. بررسی تحقیقات انجام شده نشان داده است که مدل SWAT^۲ به دلایلی مانند بدون هزینه بودن و قابلیت شبیه‌سازی همزمان اثرات متقابل متغیرهای هیدرولوژیکی و مدیریت کشاورزی مانند رواناب، تبخیر و تعرق و آب‌های زیرزمینی و متغیرهای گیاهی مانند عملکرد در حوضه‌های پیچیده با شرایط کاربری اراضی و نوع خاک متنوع گزینه مناسبی می‌باشد (Neitsch et al., 2011). این مدل ضمن دارا بودن این امکانات، می‌تواند تحلیل‌های لازم را در محیط GIS به طور

۱- Fifth Assessment Report IPCC (AR5,2014)

۲- Soil and Water Assessment Tool

۳- Long Ashton Research Station-Weather Generator

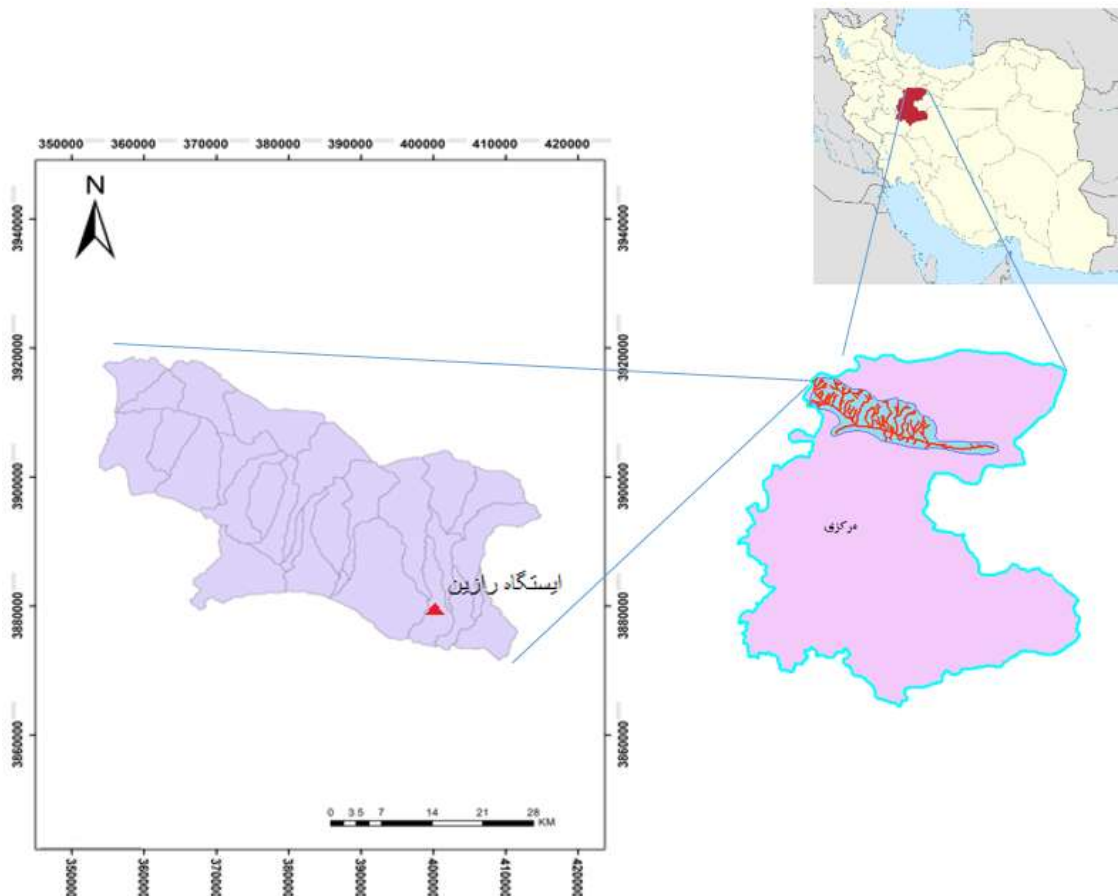
آبخیز مزلقان با اقلیم نیمه خشک در محدوده جغرافیایی ۱۷' تا ۵۰° طول شرقی و ۵۶' تا ۳۳° عرض شمالی و ۱۰' تا ۵۰° طول شرقی و ۲۵' و ۳۵° عرض شمالی با مساحت ۱۴۲۹ کیلومتر مربع در شمال شرق استان مرکزی واقع شده است. متوسط بارندگی سالانه این حوزه ۲۷۱/۱ میلیمتر و متوسط آبردهی سالانه آن ۱/۳۱ مترمکعب بر ثانیه است. رودخانه مزلقان از کوه‌های قاراغان سرچشمه گرفته و در بخش نوبران شهرستان ساوه جریان دارد. این رودخانه یکی از ریزابه‌های رودخانه قره‌چای است و در ۱۷ کیلومتری پایین دست سد ساوه، رودخانه مزلقان به رودخانه قره‌چای می‌پیوندد. این رودخانه از غرب به شرق جریان دارد. بر اساس اطلاعات نقشه کاربری اراضی، بیشترین کاربری حوزه، مسکونی، بیابان، محدوده نظامی و زمین‌های حاصلخیز است، و در مرتبه‌ی بعد به کشاورزی تعلق دارد است. با توجه به نقشه خاک محدوده مورد مطالعه، بیشترین مساحت حوزه به به اینسپتی سول و اریدسول اختصاص دارد.

آب و برنامه‌ریزی صحیح و مدیریت حوزه‌ی آبخیز کمک نماید. مطالعات منطقه‌ای تاثیرات تغییرات اقلیمی با توجه به نوسان پارامترهای اقلیمی از یک منطقه به منطقه دیگر کاملاً ضروری است و از طرفی سامانه‌های اقلیمی مختلف نسبت به تغییرات یکسان، واکنش‌های متفاوتی را نشان می‌دهند (شریفی و همکاران، ۱۳۹۷). مرور مطالعات حاکی رضایت بخش بودن نتایج مدل LARS-WG در بررسی تغییر اقلیم است و برای بررسی این پدیده، مناسب است؛ همچنین بررسی مطالعات تغییر اقلیم نشان دهنده ائدرگذاری آن بر بارش، دما و رواناب است. نظر به اهمیت این مساله، بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب سطحی حوزه رودخانه مزلقان با مدل SWAT، هدف و موضوع پژوهش حاضر است.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

حوزه مورد مطالعه این پژوهش، رودخانه مزلقان است؛ حوزه



شکل ۱- نقشه موقعیت مکانی رودخانه مزلقان

سناریو و مدل اقلیمی

از آنجا که پیش‌بینی وضعیت اقلیم آینده تحت پدیده تغییر اقلیم به طور قطعی ممکن نمی‌باشد، راه‌حل جایگزین استفاده از سناریوهای اقلیمی می‌باشد. گام نخست در مطالعات تغییر اقلیم، انتخاب مدل‌های اقلیمی مناسب منطقه از میان مجموعه مدل‌های پیشنهادی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، جهت اخذ داده‌های اقلیمی تحت سناریوهای انتخابی است (قهرمان و همکاران، ۲۰۱۵).

در حال حاضر از روش‌های مختلفی برای تولید سناریوی اقلیمی در دوره‌های آتی استفاده می‌شود. این روش‌ها عبارتند از تولید سناریوی مصنوعی، استفاده از داده‌های گذشته متغیر اقلیمی منطقه و استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو^۱. که در این پژوهش، مدل گردش عمومی جو (AOGCM)، مدنظر است. در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید این سناریوها مدل‌های AOGCM می‌باشد. این مدل‌ها بر پایه قوانین فیزیکی بوده که به وسیله روابط ریاضی در یک شبکه سه بعدی در سطح کره زمین حل می‌شوند. در تمام این مدل‌ها هشت متغیر سطحی اقلیمی شامل میزان بارندگی، میانگین فشار سطح دریا، تابش خورشیدی، دمای میانگین، دمای نقطه شبنم، دمای هوای حداقل، دمای هوای حداکثر و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوهای مختلف انتشار شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین متغیرهای دیگری شامل محدوده تغییرات دمای روزانه، فشار بخار، واریانس دمای روزانه و بارندگی نیز تحت بعضی از مدل‌ها اجرا شده‌اند. و از خروجی مدل CanESM2 که از چهارمین نسل از مدل‌های آب و هوایی است، استفاده شده است. که توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل آب و هوای کانادا زیر نظر سازمان محیط زیست این کشور توسعه یافته است. در این مدل کل سطح زمین به صورت ۶۴*۱۲۸ سلول، شبکه‌بندی شده است که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

هیات بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود (AR5) از سناریوهای جدید RCP به عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. سناریوی جدید انتشار دارای چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 می‌باشد که بر اساس میزان واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند.

– **سناریوی انتشار RCP2.6:** این سناریو توسط تیم مدل‌سازی IMAGE از موسسه ارزیابی‌های محیطی هلند طراحی شده است. این سناریو دربرگیرنده کمترین نرخ افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی ناشی از آن است. مطابق این سناریو واداشت تابشی

خاک اینسپتی سول جوان است. خاک اریدسول خاک مناطق خشک و بیابانی با تجمع آهک و لایه‌های نمک می‌باشد. این خاک به مقدار کافی باران دریافت نمی‌کند که بتوان به صورت عادی در آن کشاورزی انجام داد. لذا باتوجه به نوع خاک و جذب ضعیف آن و کاربری منطقه که غالب مسکونی و بیابان و کشاورزی است، می‌توان احتمال افزایش در تبخیر و تعرق، دما و رواناب را در محدوده پیش‌بینی کرد.

روش تحقیق

در این پژوهش به منظور ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه آبخیز مزلقان، پس از واسنجی مدل هیدرولوژیکی ارزیابی آب و خاک SWAT و مدل اقلیمی LARS-WG با شرایط منطقه مطالعاتی، کارایی آن‌ها در بازتولید داده‌های گذشته و پیش‌بینی دوره آبی و شبیه‌سازی حوضه آبخیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در پژوهش حاضر برای بررسی تغییرات اقلیمی ایستگاه رازین ورودی‌های مدل لارس شامل: دمای حداقل و حداکثر، بارندگی و تابش یا ساعت آفتابی برای دوره ۲۰۱۵-۱۹۹۷ بودند که به صورت روزانه برای یک ایستگاه هواشناسی منطقه طبق فرمت مدل تهیه شده و به مدل معرفی گردیدند. همچنین فایل دیگری شامل مشخصات جغرافیایی هر ایستگاه تهیه شد که شامل طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه مورد مطالعه بود.

ارزیابی مدل با شاخص‌های خطاسنجی میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب بهره‌وری نسو-ساتکلیف (NSE) صورت گرفت.

پس از اطمینان از قابلیت مدل LARS-WG در تولید داده‌های اقلیمی ایستگاه مطالعاتی، این مدل جهت ریزمقیاس‌نمایی CanESM2 تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 اجرا شد. پس از اجرای مدل و تولید مقادیر روزانه پارامترهای بارش، دمای کمینه و بیشینه برای ایستگاه رازین، پارامترهای مذکور مورد تجربه و تحلیل قرار گرفته و شرایط اقلیمی دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) پیش‌بینی گردید.

باتوجه به هدف مقاله جهت بررسی اثر تغییر اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه آبخیز مزلقان، پس از تولید مقادیر روزانه پارامترهای اقلیمی، این مقادیر به مدل SWAT که در مرحله قبل واسنجی و اعتبارسنجی شده بود، وارد شده و وضعیت آینده منطقه مطالعاتی پیش‌بینی شد. با مقایسه مقادیر دبی در دوره مشاهداتی و آینده، تغییرات هیدرولوژیکی حوضه مزلقان، مورد مطالعه قرار گرفت. که در ذیل به تشریح به آن پرداخته شده است.

۱- Atmosphere- Ocean General Circulation Model (AOGCM)

به این سطح واداشت تابشی، بایستی گازهای گلخانه‌ای به میزان قابل توجهی کاهش یابد.

در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ وات بر مربع رسیده و سپس کاهش یافته و به ۲/۶ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد. برای رسیدن

جدول ۱- مشخصات مدل CanESM2 (مختصات ایرادی ندارد)

مدل	دقت مکانی داده‌های اتمسفری		دقت مکانی داده‌های اقیانوسی	
	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)
CanESM2	۲/۲۹۰۶	۲/۸۱۲۵	۱/۱۴۰۷ و ۰/۹۳۰۳	۱/۴۰۶۲۵

دمای حداکثر و حداقل، تابش خورشیدی و ساعات آفتابی توزیع نیمه تجربی جداگانه‌ای در نظر می‌گیرد. در مدل فرض بر این است که دما دارای توزیع نرمال بوده و متوسط و انحراف معیار دمای روزانه مطابق با سای فوریه محدود تغییر می‌کند. برای دماهای حداکثر و حداقل، فرض می‌شود که خودهمبستگی زمانی در طول سال برای یک ایستگاه معین به صورت ثابت باشد. برای تابش خورشیدی نیاز، توزیع‌های نیمه تجربی با بازه‌های زمانی مساوی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شاهین رخسار و همکاران، ۱۳۹۸).

مدل هیدرولوژی

در این پژوهش از نسخه ۲۰۱۲ نرم افزار SWAT استفاده شد. مدل SWAT یک مدل نیمه توزیعی بوده که برای شبیه‌سازی حوضه آبریز به صورت پیوسته عمل می‌کند که توسط آرنولد و همکارانش در سال ۱۹۹۸ توسعه یافته است و برای پیش‌بینی اثر روش‌های مدیریتی متفاوت زمین بر روی جریان، رسوب، عناصر غذایی و بیلان مواد شیمیایی در حوضه‌های زراعی با خاک و کاربری اراضی متغیر برای بازه‌های زمانی طولانی توسعه یافته است (ایمانی امیرآباد و همکاران، ۱۳۹۶). در این راستا با استفاده از نرم‌افزار GIS نسخه ۱۰.۴، DEM و آبراهه‌ها و مشخصات شبکه رودخانه‌ای حوزه استخراج گشت. سپس از روی نقشه رقومی ارتفاع، حوضه آبخیز به تعدادی زیرحوضه تقسیم شد. و بر مبنای نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و شیب، زیرحوضه‌ها نیز به واحدهای کوچکتری تقسیم می‌شوند که به هر کدام از این واحدها یک HRU^۱ (واحد هیدرولوژیک) می‌گویند. این واحدها بایستی تا حد امکان از نظر هیدرولوژیکی مشابه باشند. در واقع باید در هر واحد هیدرولوژیکی، ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، پوشش و کاربری اراضی تغییرات چشمگیری نداشته باشند (Neitch et al. 2011).

چرخه هیدرولوژی که به وسیله مدل SWAT شبیه‌سازی می‌شود، بر پایه رابطه بیلان آبی است:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (۱)$$

- سناریوی RCP4.5: سناریوی RCP4.5 توسط گروه مدلسازی MiniCAM طراحی شده است و در آن واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر متر مربع ثابت می‌ماند.

- سناریوی انتشار RCP6: سناریوی انتشار RCP6 توسط گروه مدلسازی AIM در موسسه ملی مطالعات ژاپن طراحی گردید. در این سناریو واداشت تابشی بعد از سال ۲۱۰۰ به دلیل استفاده از فناوری‌های جدید و سیاست‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای ثابت می‌ماند.

- سناریوی RCP8.5: بدون اتخاذ هیچگونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب و هوای کره زمین در خط سیر سناریوی انتشار RCP8.5 پیش خواهد رفت. به طوری که ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌گردد. در این هنگام غلظت دی اکسید کربن به ۱۰۰۰ ppm رسیده است و همچنان روند افزایشی خواهد داشت. این سناریو توسط تیم مدلسازی MESSAGE و موسسه IIASA به سرپرستی پروفسور کیوان ریاحی در موسسه بین‌المللی آنالیز سیستم‌های کاربردی IIASA اتریش توسعه و طراحی شد که وجه مشخصه آن روند افزایش گازهای گلخانه‌ای است.

ریز مقیاس نمایی

در این تحقیق برای کوچک مقیاس کردن داده‌های مدل CanESM2 از مدل ریز مقیاس LARS-WG استفاده شده است که از جمله روش‌های آماری ریزمقیاس نمایی است. LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های آب و هوایی است که برای شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در یک مکان واحد تحت شرایط اقلیم حال و آینده به کار می‌رود. در این مدل داده‌های بارش روزانه در هرماه با استفاده از زنجیره مارکوف مرتبه اول مورد بررسی و از داده‌های تحلیل شده به منظور تعیین مشخصات آماری نظیر تعداد روزهای خشک و تر، میانگین و توزیع بارش‌های روزانه در هرماه از سال استفاده می‌شوند. مدل LARS-WG برای هر یک از متغیرهای

^۱ Hydrologic Response Unit

که متعارف‌ترین روش برای این کار می‌باشد. در روش OAT در هر بار اجرای مدل یک پارامتر تغییر می‌کند و بقیه ثابت می‌ماند و اثر آن تغییر بر تابع هدف، حساسیت پارامتر را مشخص می‌کند. پارامترهایی که برای آنالیز حساسیت در منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد عبارت بودند از: شماره منحنی SCS (CN2)، ثابت تخلیه آب زیرزمینی (V_ALPHA_BF)، زمان تاخیر آب زیرزمینی (V_GW_DELAY)، حداقل مقدار ذخیره آب لازم برای رویداد جریان پایه (V_GWQMN)، ظرفیت ذخیره آب قابل دسترس (r_SOL_AWC)، ضریب نفوذ آبخوان (V_SLSUBBSN)، طول متوسط شیب (V_RCHRGP_DP)، ضریب تأخیر رواناب سطح (r_SURLAG)، فاکتور جبران تبخیر از سطح خاک (V_EPCO)، فاکتور تأخیر دمای بارش برف (V_TIMP)، دمای ذوب توده برف (V_SMTMP)، متوسط دمای هوا برای بارش برف (V_SFTMP)، حداکثر میزان ذوب برف (V_SMFMN)، ضریب مانینگ کانال (r_CH_N2)، فاکتور جبران تبخیر از سطح خاک (V_ESCO) و هدایت هیدرولیکی کانال (r_CH_K2).

در سال‌های اخیر بسته نرم‌افزاری به نام SWAT-CUP توسعه یافت که به‌وسیله آن امکان واسنجی مدل با استفاده از روش‌های واسنجی خودکار شامل PSO، MCMC، GLUE، SUFI2 و Parasol فراهم می‌آید. این بسته نرم‌افزاری امروزه توسط بسیاری از کاربران برای واسنجی به کار می‌رود (بیات و همکاران، ۱۳۹۷). لذا در این پژوهش، واسنجی و اعتبارسنجی مدل با نرم‌افزار SWAT-CUP با الگوریتم SUFI-2 انجام گرفت. در این مرحله بایستی به دفعات مختلف اقدام به اجرای مدل نموده و هر بار با توجه به شاخص‌ها و معیارهای آماری، نتایج را مورد ارزیابی قرار داد. در صورت رضایت بخش نبودن نتایج شبیه‌سازی، بایستی پارامترهای موجود در مدل بهینه شده و مجدداً مدل را اجرا نمود تا جریان شبیه‌سازی شده از لحاظ آماری دارای دقت مناسب باشد. در تحقیق حاضر نیز بعد از اجرای مدل در دفعات متعدد، هر بار پارامترهای حساس تغییر داده شد. و در نهایت بعد از بهینه شدن پارامترها، برنامه SUFI2 اجرا و برای منطقه مطالعاتی کالیبره شد.

برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی دبی رواناب از شاخص‌های نش-ساتکلیف، R^2 ، p-factor و r-factor استفاده شد. روش SUFI-2 تمام عدم قطعیت‌ها را در مدل‌سازی شامل عدم قطعیت ورودی‌ها، مدل مفهومی، پارامترها و داده‌های اندازه‌گیری شده را در نظر می‌گیرد. سنجش میزان عدم قطعیت که دربرگیرنده تمام موارد اشاره شده می‌باشد، توسط معیاری به نام P-Factor که بیانگر درصد داده‌های مشاهداتی که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد

که در آن SW_t مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW_0 مقدار اولیه خاک (میلی‌متر)، R_{day} مقدار بارندگی در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز i ام (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار آبی که از پروفیل خاک به ناحیه غیراشباع در روز i ام وارد می‌شود (میلی‌متر)، و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز i ام (میلی‌متر)، است.

در مدل SWAT دو روش برای تخمین رواناب سطحی وجود دارد: الف) روش شماره منحنی و ب) رابطه نفوذ گرین و آمیت. روش شماره منحنی، تجربی است و به‌وسیله سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) برای تخمین رواناب در حوضه با کاربری اراضی و خاک‌های مختلف توسعه پیدا کرده است. در این پژوهش برای محاسبه روش نفوذپذیری شماره منحنی (CN¹) بهره گرفته شده است. رابطه SCS رابطه اصلی روش شماره منحنی می‌باشد و به صورت معادله زیر بیان می‌گردد:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} - 0.8S)} \quad (2)$$

که در این رابطه، Q_{surf} رواناب سطحی (میلی‌متر)، R_{day} عمق بارش روزانه (میلی‌متر)، S پارامتر نگهداشت رطوبت (میلی‌متر)، پارامتر S به صورت مکانی و زمانی تغییر پیدا می‌کند. به صورت مکانی با تغییرات خاک، کاربری اراضی، نحوه مدیریت و شیب منطقه و به صورت زمانی با تغییرات آب موجود در خاک تغییر می‌یابد پارامتر S به صورت زیر بیان می‌شود:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

که در آن: CN ماره منحنی مربوط به حوضه می‌باشد که برای هر بارندگی فرق می‌کند و به ویژگی‌های فیزیکی حوضه بستگی دارد و S پارامتر نگهداشت رطوبت (میلی‌متر) می‌باشد.

بهبود پردازش شبیه‌سازی مدل‌ها لازم است به سمتی سوق داده شود که کلیه منابع تولید خطا و همچنین منشاء آن در روند مدل‌سازی و یا پیش‌بینی پوشش داده شوند. پارامترهای مدل یکی از منابع تولید خطا است که عدم اطلاع از صحت مقادیر آن‌ها سبب بروز خطا در نتایج شبیه‌سازی می‌شود (مهرپرور و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به زیاد بودن پارامترهای ورودی، برای شناخت بهتر مدل و انجام موفق واسنجی، لازم است برای پارامترهای مدل آنالیز حساسیت انجام شود. هدف اصلی از آنالیز حساسیت تعیین ورودی‌هایی است که مشارکت بیشتری در تغییر خروجی دارند و اینکه کدام پارامتر همبستگی بیشتری با خروجی دارد. با انجام آنالیز حساسیت می‌توان پارامترهای مهم و حساس را شناخته و با تمرکز بر روی آن‌ها واسنجی مدل را سریع‌تر انجام داد. برای انجام آنالیز حساسیت روش "یک پارامتر در هر بار" (OAT) مورد استفاده قرار گرفت

خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای بوده که مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است.

اعداد محاسبه شده برای خطای RMS بیانگر این است که بین دو مجموعه داده چه میزان خطا وجود دارد. به عبارت دیگر، خطای جذر میانگین مربعات عدد پیش‌بینی شده و عددی که به صورت تجربی به دست آمده را با هم مقایسه می‌کند. هر چه خطای جذر میانگین مربعات کمتر باشد، بهتر است. نحوه محاسبه خطای ریشه میانگین مربعات، در رابطه ذیل آورده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NQ} (q_o(t) - q_s(t))^2}{NQ}} \quad (8)$$

هر چه مقادیر ضریب تاثیر (NAS) و ضریب تعیین (R^2) به یک نزدیکتر باشند، دبی‌های شبیه‌سازی شده از دقت مطلوب‌تری برخوردار خواهند بود.

میانگین خطای مطلق، متوسط مقدار مطلق خطاها را نشان می‌دهد. این معیار آماری از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_i^{sim} - Q_i^{obs}| \quad (9)$$

بر اساس روش ذکر شده، مراحل انجام تحقیق در شکل ۲ آورده شده است.

نتایج و بحث

اجرای اولیه مدل SWAT: با اجرای مدل SWAT نقشه زیر حوزه‌ها براساس وضعیت آبراهه‌های حوزه، تولید شد. به طور کلی نتایج حاصل از اولین اجرای مدل SWAT و شاخص‌های ارزیابی دقت شبیه‌سازی این مدل را نشان داد که مدل SWAT در اولین اجرا با مقادیر اولیه پارامترها دارای دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی دبی رواناب حوزه آبخیز مزلقان نمی‌باشد و واسنجی مدل می‌تواند به بهبود نتایج و افزایش دقت شبیه‌سازی آن کمک کند.

واسنجی مدل: واسنجی مدل به صورت ماهانه و با استفاده از برنامه SUFI2 انجام شد. پارامترهای مؤثر در تولید رواناب حوزه آبخیز شناسایی شد و به همراه محدوده مجاز تغییرات آن‌ها به مدل وارد شد. از آمار ۱۳ ساله اندازه‌گیری شده (2010-1998) دبی روزانه برای واسنجی مدل استفاده شد نتایج ارزیابی به صورت جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۳ هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی ماهیانه در دوره واسنجی (2010-1998) نشان داده شده است.

تعیین مقادیر بهینه پارامترهای حساس بعد از واسنجی: همانطور که قبلاً اشاره شد، در این تحقیق به منظور واسنجی مدل از برنامه SUFI2 استفاده شد. در جدول ۳ مقادیر

(95PPU) قرار می‌گیرند، است. از آنجایی که اثر تمام عوامل عدم قطعیت در متغیر اندازه‌گیری شده منعکس می‌شوند، P-Factor معیار مناسبی برای سنجش قدرت آنالیز عدم قطعیت انجام شده می‌باشد (عباسپور و همکاران، ۱۳۸۶).

نظر به اینکه روش SUFI2 روش استوکاستیکی است، از باندهای عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد و همچنین از فاکتوری به نام R-Factor که به نوعی بیانگر متوسط فاصله بین باند بالا و پایین می‌باشد، برای برآورد کیفیت نتایج حاصل از مدلسازی استفاده می‌شود و به عبارت دیگر معیاری برای برآورد نزدیکی فاصله بین باندهای بالا و پایین می‌باشد:

$$\bar{R}_x = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k (X_U - X_L)_i \quad (4)$$

طبیعتاً شرایط ایده‌آل زمانی است که فاصله بین باند بالا (X_U) و پایین (X_L) تا حد امکان به هم نزدیک و \bar{R}_x به صفر نزدیک شود. اگرچه به علت وجود خطا در اندازه‌گیری و وجود خطا در اندازه‌گیری و وجود عدم قطعیت‌های زیاد در مدل مقادیر ایده‌آل برای \bar{R}_x به دست نخواهد آمد. مقدار معقول برای \bar{R}_x با پارامتری به نام R-factor محاسبه می‌شود که برابر است با:

$$R - \text{factor} = \frac{\bar{R}_x}{\sigma_x} \quad (5)$$

که در آن σ_x انحراف معیار مربوط به متغیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. در صورت امکان بهتر است که مقدار R-factor از یک کمتر باشد.

مقدار ضریب ناش-ساتکلیف بین یک تا منفی بینهایت تغییر می‌کند. مقدار بهینه این شاخص یک است. اگر میزان آن از ۰/۵ بیشتر باشد، مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است و در صورت منفی شدن آن بهتر است که به نتایج مدل بسنده نشود و از متوسط مقادیر مشاهده‌ای استفاده شود. در این پژوهش از رابطه ۶ بهره گرفته شده است.

$$NES = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NQ} (q_o(t) - q_s(t))^2}{\sum_{i=1}^{NQ} (q_o(t) - q_o(\text{mean}))^2} \quad (6)$$

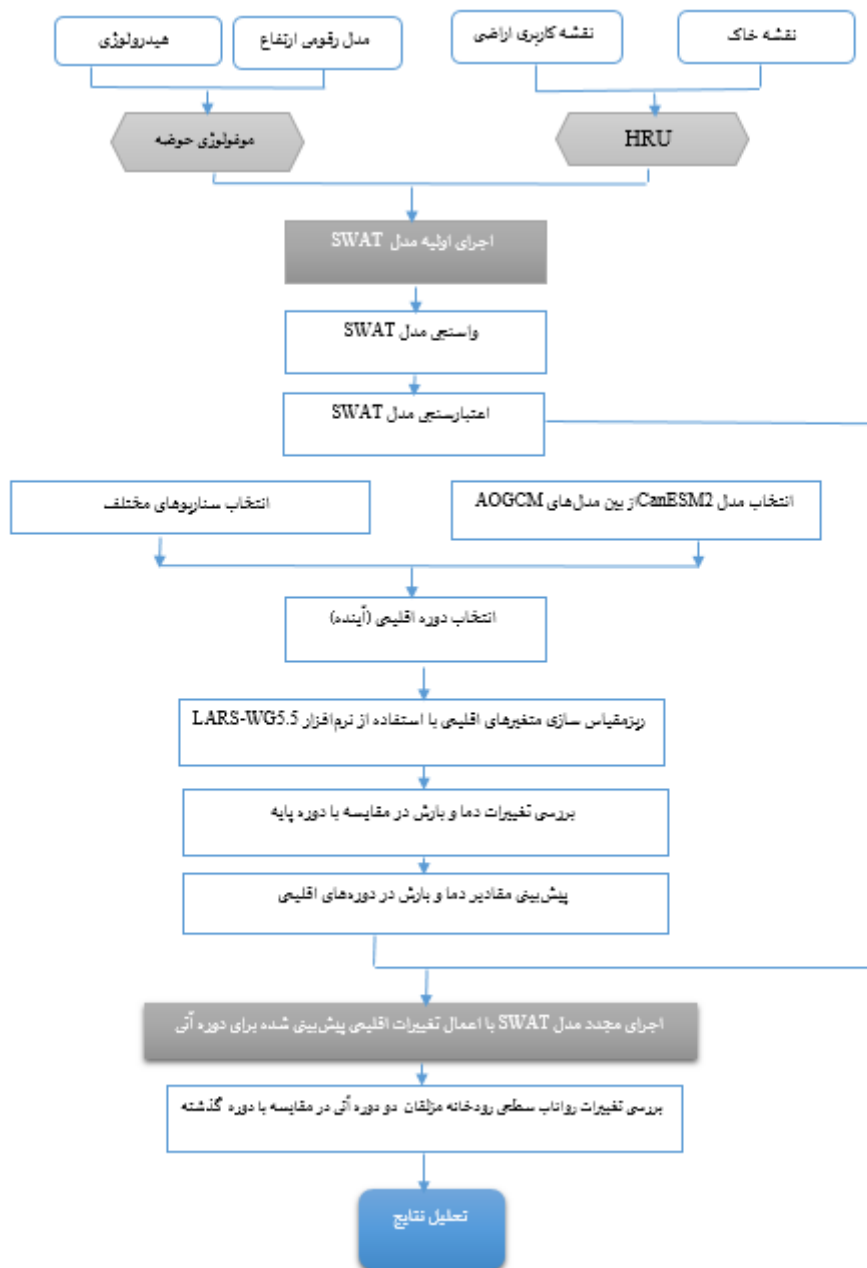
که $q_o(t)$ دبی مشاهده شده $q_s(t)$ دبی شبیه‌سازی شده $q_o(\text{mean})$: میانگین مقدار مشاهده شده، $q_s(\text{mean})$: میانگین مقدار شبیه‌سازی شده NQ : تعداد عرض‌های هیدروگراف.

نحوه محاسبه ضریب تعیین (R^2) در این پژوهش در رابطه ذیل آمده است:

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})}{Q_{obs} \times Q_{sim}} \right] \quad (7)$$

در این رابطه، Q داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و n برابر تعداد داده‌هاست. اندیس sim بیانگر داده‌های شبیه‌سازی شده و اندیس obs بیانگر داده‌های مشاهده‌ای است. مقدار R^2 بیانگر ارتباط

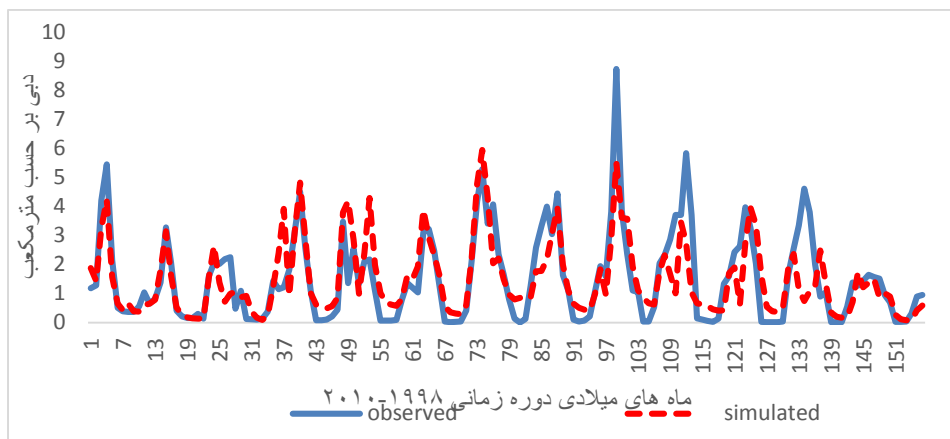
پارامترهای حساس در بهترین حالت واسنجی آورده شده است.



شکل ۲- روندنمای پژوهش

جدول ۲- ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی

شاخص	شبیه‌سازی دوره واسنجی
NS	۰/۶۰
R^2	۰/۶۱
p-factor	۰/۲۴
r-factor	۰/۰۹



شکل ۳- مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و محاسباتی در دوره واسنجی با پایه زمانی ماهانه ایستگاه رازین

جدول ۳- مقادیر بهینه پارامترهای حساس بعد از واسنجی برای منطقه مطالعاتی

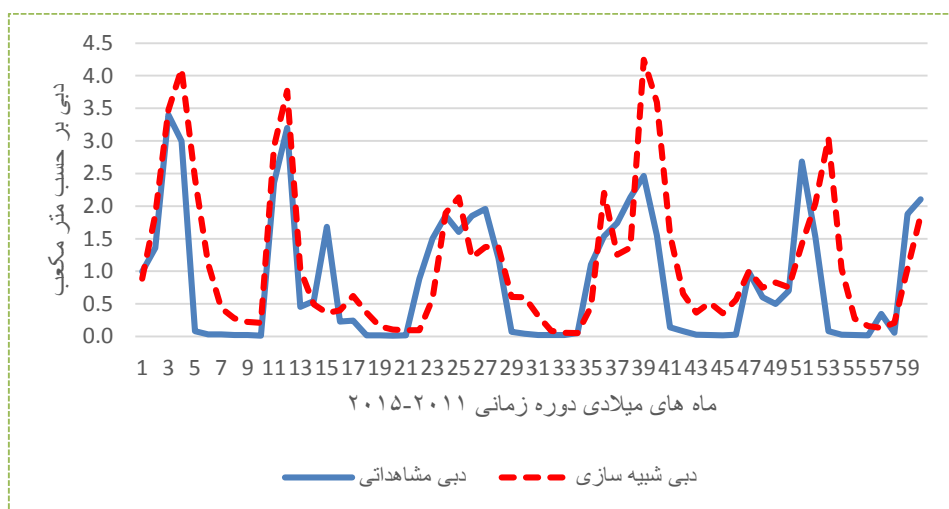
ردیف	نام پارامتر	واحد	حدود بهینه	حداقل	حداکثر
۱	V_GW_REVAP (ضریب تعیین نفوذ به سفره عمیق از سفره کم عمق)	-	۰/۰۱۱۵۹۲	۰/۰۲	۰/۲
۲	V_ALPHA_BF (ثابت تخلیه آب زیرزمینی)	روز	۰/۲۷۷۲۹۷	۰	۱
۳	CN2 (شماره منحنی SCS)	-	۰/۱۰۹۶۶۹	-۰/۲	۰/۲
۴	V_CH_N2 (ضریب مانینگ کانال)	-	۰/۰۰۶۵۴۰	-۰/۰۱	۰/۳
۵	V_CH_K2 (هدایت هیدرولیکی کانال)	میلی متر در ساعت	۶۶۱/۰۱۱۶۵۸	۰/۰۱	۵۰۰
۶	r_SOL_K (هدایت هیدرولیکی کانال)	میلی متر در ساعت	۰/۲۰۰۵۸۷	۲۰۰۰	۰
۷	r_SOL_BD (ضریب آلودگی خاک مرطوب)	-	۰/۷۱۷۲۹۱	۰/۹	۲/۵
۸	V_SMTMP (دمای ذوب توده برف)	درجه سلسیوس	۰۹/۰۴۷۶۶۸	-۲۰	۲۰
۹	V_GWQMN (حداقل مقدار ذخیره آب لازم برای رویداد جریان پایه)	mmH2o	۴۱۲/۷۳۷۲۱۳	۰	۵۰۰۰
۱۰	V_ALPHA_BNK (ضریب α آب پایه برای ذخیره ساحلی کانال)	-	۰/۲۷۷۲۹۷	۰	۱
۱۱	V_GW_DELAY (زمان تاخیر آب زیرزمینی)	روز	۴۹۷ /۵۴۸۵۲۳	۰	۵۰۰

شده و این نتایج به عنوان نتایج نهایی اعتبار سنجی مدل در جدول ۴ ارائه شده است.

در شکل ۴ هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی (2011-2015)، نشان داده شده است. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که مدل زمان وقوع مقادیر دبی اوج و دبی‌های پایه را به خوبی مدل‌سازی نموده است اما مقادیر دبی اوج را بیشتر از مقادیر واقعی برآورد نموده است، که متوسط دبی ماهانه شبیه‌سازی شده در طول دوره‌های واسنجی و اعتبار سنجی نیز موید این مطلب است.

در جدول فوق V نشان‌دهنده روش Replace و r نشان‌دهنده روش Multiple می‌باشد. در روش Multiple، مقدار پارامتر در یک ارزش داده شده ضرب می‌گردد تا مقدار بهینه محاسبه شود اما در روش Replace، پارامتر موردنظر با ارزش داده شده جایگزین می‌گردد.

اعتبارسنجی مدل: بعد از مرحله واسنجی مدل، ارزیابی مدل نیز نتایج قابل قبولی را در پی داشت. در این مرحله با توجه به پارامترهای واسنجی بهینه شده برای منطقه مطالعاتی، با استفاده از باقیمانده آمار (2011-2015) اقدام به شبیه‌سازی جریان رودخانه



شکل ۴- مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در دوره اعتبارسنجی با پایه زمانی ماهانه

جدول ۴- ارزیابی کارایی مدل در مرحله اعتبارسنجی

شاخص	شبیه‌سازی دوره واسنجی
NS	۰/۵۸
R ²	۰/۵۸
p-factor	۰/۲۴
r-factor	۰/۰۹

میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب بهره‌وری نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد، با توجه به بالا بودن مقادیر نش-ساتکلیف و نزدیک بودن این مقادیر به یک و همچنین پایین بودن مقادیر میانگین خطای مطلق میانگین دمای حداکثر ماهیانه و میانگین دمای حداقل ماهیانه دقت بالای مدل‌سازی را برای پارامترهای دمای می‌رساند. مقدار آماره میانگین مجذور مربعات خطا و میانگین خطای مطلق برای دمای کمینه و بیشینه کمتر از مقدار برای بارش است این مسئله بیانگر قدرت بالای مدل WG-LARS در مدل کردن داده‌های دیدبانی شده دما نسبت به بارش است که این امر به علت ماهیت پارامتر دما می‌باشد که عنصری پیوسته است.

بر اساس در هیدروگراف‌ها و جداول بعد از انجام مراحل واسنجی و اعتبارسنجی ضریب نش-ساتکلیف به ترتیب برابر ۰/۶ و ۰/۵۸ به دست آمد که این ضرایب نشان دهنده نتیجه قابل قبول مدل SWAT در شبیه‌سازی بیلان آبی می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی داده‌های تغییر اقلیم با مدل LARS-WG

نتایج بیان شده در جدول ۵ بیانگر این مطلب می‌باشند که داده‌های ایستگاه رازین میانگین بارش ماهیانه، میانگین دمای حداکثر ماهیانه و میانگین دمای حداقل ماهیانه مشاهده شده و تولید شده دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۱۵) از همبستگی معنی‌داری برخوردار می‌باشد. برای اطمینان از درستی واسنجی مدل از شاخص‌های خطاسنجی

جدول ۵- نتایج آماری‌های خطاشناسی متغیرهای هواشناسی مشاهداتی و مدل‌سازی ایستگاه رازین (۱۹۹۷-۲۰۱۵)

دمای حداقل			دمای حداکثر			بارش		
NASH	MAE	RMSE	NASH	MAE	RMSE	NASH	MAE	RMSE
۰/۸۹	۰/۲	۰/۲۳	۰/۹۹	۰/۲۱	۰/۳	۰/۹۴	۳	۳/۹

سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 نشان می‌دهد، که برای ایستگاه رازین برای ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر افزایش دما را پیش‌بینی می‌-

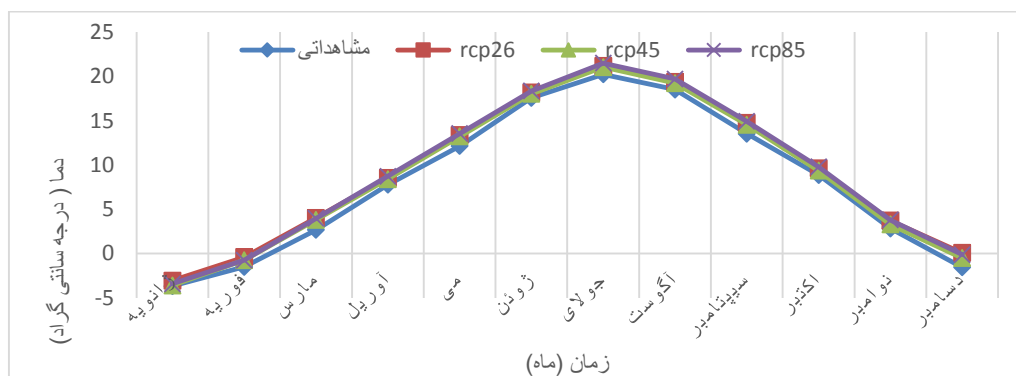
تغییرات اقلیم حوضه رودخانه مزلقان

دمای حداقل: مقایسه میانگین دمای حداقل ماهانه دوره مشاهداتی (۱۹۹۸-۲۰۱۷) و دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) حداقل تحت

کنند. میانگین سالانه دمای حداقل تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۰۹ و ۰/۱۳ درصد نسبت به دوره مشاهداتی افزایش یافته است (جدول ۶ و شکل ۵).

جدول ۶- مقایسه میانگین دمای حداقل ماهانه دوره مشاهداتی و دوره آتی (سناریو واحد ندارد)

ماه	سناریوها			
	مشاهداتی	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
ژانویه	-۳/۶۷	-۳/۰۶	-۳/۵۹	-۳/۴۲
فوریه	-۱/۵	-۰/۳۹	-۰/۷۵	-۰/۷۴
مارس	۲/۶۷	۴/۰۲	۳/۸	۳/۹۷
آوریل	۷/۷۶	۸/۵۴	۸/۳۸	۸/۷۲
می	۱۲/۱۳	۱۳/۳۶	۱۳/۲۱	۱۳/۵۳
ژوئن	۱۷/۵۷	۱۸/۱۸	۱۸/۰۳	۱۸/۳۵
جولای	۲۰/۲۲	۲۱/۱۹	۲۱/۰۴	۲۱/۴۹
اگوست	۱۸/۵۱	۱۹/۳۸	۱۹/۲۳	۱۹/۷
سپتامبر	۱۳/۵۲	۱۴/۷۲	۱۴/۵۲	۱۴/۹
اکتبر	۸/۸۶	۹/۶۱	۹/۳۵	۹/۷۹
نوامبر	۲/۸۲	۳/۷۱	۳/۲۸	۳/۳۸
دسامبر	-۱/۵۵	-۰/۰۶	-۰/۵۱	-۰/۱۲



شکل ۵- نمودار دمای حداقل ماهانه مشاهداتی و دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ ایستگاه رازین

رازین را تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 نشان می‌دهد. ماه ژوئن، جولای، اکتبر و دسامبر برای سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و ماه ژانویه، مارس و آوریل برای سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 افزایش یافته و می، اگوست و نوامبر برای سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 کاهش یافته است. به طوری که میانگین ماهانه بارش تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 به ترتیب ۶ و ۱/۵ درصد افزایش و RCP8.5 ۴ درصد کاهش را پیش‌بینی می‌کند.

دمای حداکثر: شکل ۶ و جدول ۷ مقایسه میانگین دمای

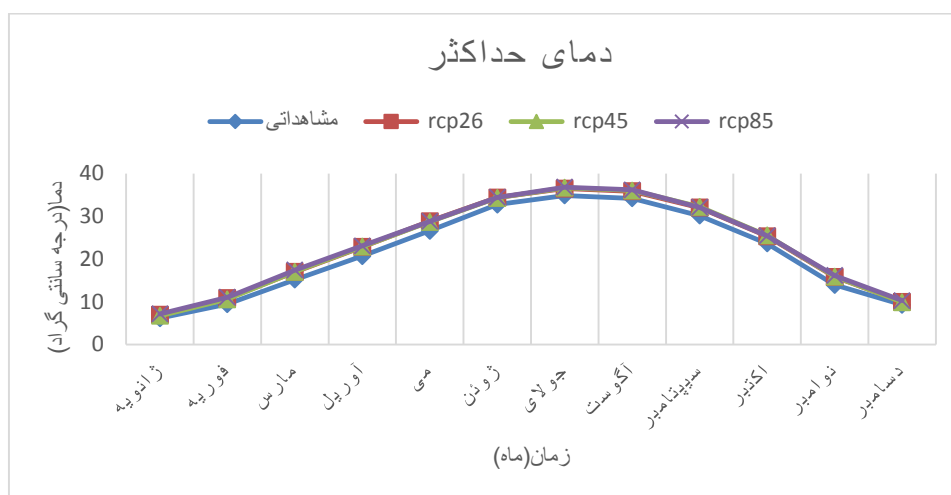
حداکثر ماهانه دوره مشاهداتی (۱۹۹۷-۲۰۱۵) و دوره آتی (۲۰۱۵-۲۰۴۰) را تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در ایستگاه رازین نشان می‌دهد. که برای ایستگاه رازین برای ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای، اگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر افزایش دما را پیش‌بینی می‌کنند. میانگین سالانه دمای حداکثر تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۰۷، ۰/۰۸ و ۰/۰۹ درصد نسبت به دوره مشاهداتی افزایش یافته است.

تغییرات بارش: جدول ۸ و شکل ۷ مقایسه میانگین بارش

ماهانه دوره مشاهداتی و دوره شبیه‌سازی شده ۲۰۲۱-۲۰۴۰ ایستگاه

جدول ۷- مقایسه میانگین دمای حداکثر ماهانه دوره مشاهداتی و دوره آتی ایستگاه رازین

ماه	سناریوها			مشاهداتی
	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6	
ژانویه	۷/۱	۶/۷	۶/۹	۶/۱
فوریه	۱۱/۰۵	۱۰/۵۷	۱۰/۸	۹/۴
مارس	۱۷/۴	۱۷/۰۱	۱۶/۹	۱۵/۲
آوریل	۲۳/۰۸	۲۲/۸۷	۲۲/۸	۲۰/۶۵
می	۲۸/۷۷	۲۸/۶۸	۲۸/۸	۲۶/۵۷
ژوئن	۳۴/۳۹	۳۴/۳۱	۳۴/۳۶	۳۲/۷۲
جولای	۳۶/۸	۳۶/۶۶	۳۶/۴۸	۳۴/۸۶
آگوست	۳۶/۱۷	۳۶/۰۲	۳۵/۸۳	۳۴/۱۸
سپتامبر	۳۲/۰۸	۳۲/۱۸	۳۲/۰۲	۳۰/۱۳
اکتبر	۲۵/۴۳	۲۵/۴۹	۲۵/۳۲	۲۳/۶۳
نوامبر	۱۶/۱۳	۱۵/۸۷	۱۵/۸۱	۱۳/۹۴
دسامبر	۱۰/۲۵	۹/۸۹	۹/۹	۹/۲



شکل ۶- نمودار دمای حداکثر ماهانه مشاهداتی و دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ ایستگاه رازین

مدل سازی سناریوهای مختلف اقلیمی

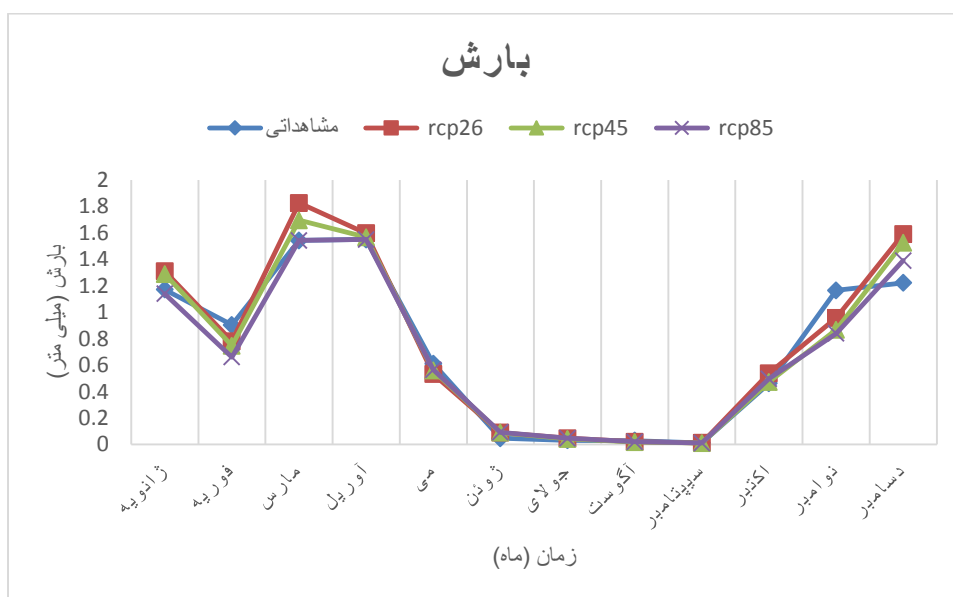
بعد از اجرای اولیه مدل با وارد کردن نقشه کاربری اراضی، بافت خاک، مدل رقمی ارتفاع به علاوه آمار هیدرومتری، هیدروگراف جریان خروجی حوزه شبیه سازی شد. در مرحله بعد برای شبیه سازی اثر سناریوها، با ثابت نگه داشتن اطلاعات ورودی و پارامترهای کلی واسنجی شده مدل به استثنای داده های اقلیمی مربوط به سناریوها، مدل به ازای هر سناریو دوباره اجرا گردید.

در نهایت مدل SWAT هیدروگراف خروجی متناسب با شرایط

اقلیم را شبیه سازی می کند که با مشاهده اختلاف بین هیدروگراف خروجی حوزه در شرایط اقلیم های مختلف، تغییرات ناشی از این تغییرات قابل مشاهده می باشد. در ادامه با اعمال شرایط اقلیمی آینده در فرمولاسیون مدل که فرایند هیدرولوژیکی حضور دارند، در نهایت سبب تغییر مقادیر فرایندهای هیدرولوژیکی و دبی شبیه سازی خواهند شد.

جدول ۸- مقایسه میانگین دمای حداقل ماهانه دوره مشاهداتی و دوره آتی ایستگاه رازین

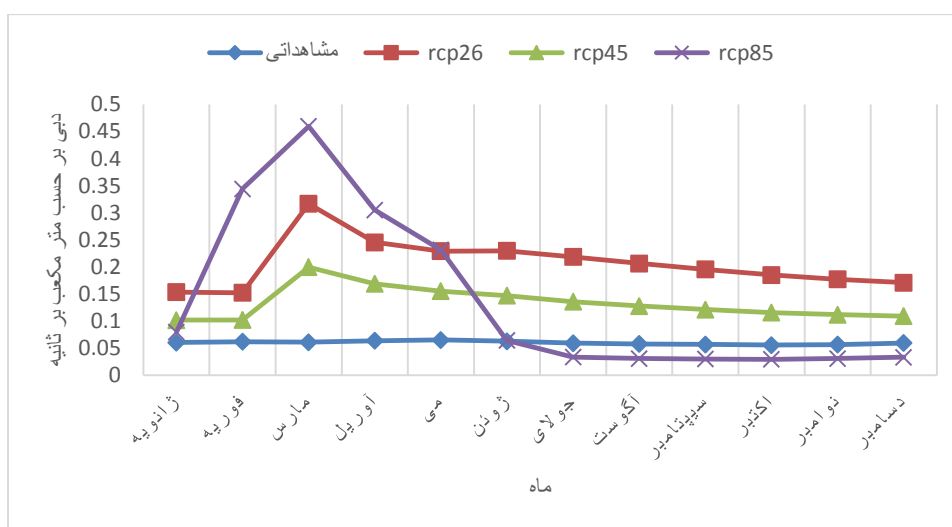
ماه	سناریوها			
	مشاهداتی	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
ژانویه	۱/۱۷	۱/۳۱	۱/۳	۱/۱۴
فوریه	۰/۹	۰/۸	۰/۷۴	۰/۶۶
مارس	۱/۵۴	۱/۸	۱/۷	۱/۵۴
آوریل	۱/۵۵	۱/۶	۱/۵۶	۱/۵۵
می	۰/۶۱	۰/۵۳	۰/۵۶	۰/۵۶
ژوئن	۰/۰۴	۰/۱	۰/۰۹	۰/۱
جولای	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴
اگوست	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
سپتامبر	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
اکتبر	۰/۴۶	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۵
نوامبر	۱/۱۶	۰/۹۵	۰/۸۶	۰/۸۳
دسامبر	۱/۲۲	۱/۶	۱/۵۲	۱/۴



شکل ۷- نمودار بارش ماهانه مشاهداتی و دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ ایستگاه رازین

RCP4.5 و ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل و می افزایش و در ماه‌های ژوئن، جولای، اگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر کاهش رواناب در سناریو RCP8.5 داشته است. بیشترین میزان افزایش رواناب در هر سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 مربوط به ماه مارس می‌باشد.

مدل‌سازی جهت بررسی اثر تغییر اقلیم: برای بررسی و مقایسه اثر تغییر اقلیم روی میزان رواناب، از داده‌های خروج مدل LARS-WG به عنوان ورودی برای مدل SWAT بعد از کالیبره شدن برای منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفت، که نتایج آن به صورت میانگین ماهانه در شکل ۸ آورده شده است. باتوجه به داده‌های پیش‌بینی شده اقلیمی در شبیه‌سازی رواناب، افزایش رواناب در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای، اگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر، دسامبر برای سناریوهای RCP2.6 و



شکل ۸- مقایسه رواناب مشاهده‌ای و دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریو rcp8.5، rcp2.6، rcp2.6

بحث و نتیجه‌گیری

عواقب تغییر اقلیم و بالطبع گرم شدن زمین بر جنبه‌های مختلف کشاورزی، جنگل و کاربری زمین، بهداشت، نفوذ آب شور به آب‌های سطحی و زیرزمینی در اثر افزایش سطح آب دریا، کاهش دبی آب رودخانه‌ها، افزایش در شدت و فراوانی بلایای طبیعی از جمله طوفان و سیلاب قابل تامل است و ضرورت پرداختن به این مهم را بیش از پیش نمایان می‌سازد؛ لذا شناخت دگرگونی‌های اقلیمی و رفتار آن‌ها در دوره‌های آتی و اثرات آن‌ها در حوزه‌های مختلف به خصوص در منابع آب در برنامه‌ریزی‌های کلان و استراتژیک از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین در این پژوهش به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی رودخانه مزلقان پرداخته شد.

براساس داده‌های شبیه‌سازی شده ایستگاه هیدرومتری رازین، نتایج نشان داد، میانگین سالانه دمای حداقل ایستگاه رازین، سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۱ و ۰/۱۳ افزایش یافته است.

میانگین سالانه دمای حداکثر ایستگاه رازین تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۰۷، ۰/۰۷ و ۰/۰۸ افزایش یافته است.

میانگین بارش ماهانه ایستگاه رازین تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 به ترتیب ۶ و ۱/۵ درصد افزایش و در سناریو RCP8.5 ۴ درصد کاهش را پیش‌بینی کرده است.

در ادامه به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان رواناب ناشی از سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ توسط نرم‌افزار LARS-WG در حوضه مزلقان پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان دهنده شبیه‌سازی قابل قبولی برای پیش‌بینی تغییرات اقلیم بر متوسط رواناب می‌باشد. که

برای سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 برای دوازده ماه افزایش یافته است. و برای سناریو RCP8.5 برای ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل و می افزایش یافته است و برای ماه‌های دسامبر، نوامبر، اکتبر، سپتامبر، اگوست و جولای کاهش یافته است.

نتایج این پژوهش نشان داد مدل‌های پیش‌بینی کننده اقلیم می‌توانند ورودی‌های مناسبی را جهت شبیه‌سازی میزان رواناب حوزه با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی (SWAT) فراهم کنند. براساس نتایج به دست آمده از به کارگیری مدل LARS-WG تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 با توجه به دقت خوب مدل در شبیه‌سازی داده‌های مشاهده شده، توانایی خوب این مدل در پیش‌بینی داده اقلیمی آینده مشخص شد. با توجه به توانایی این مدل در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی، می‌توان با اطمینان بالایی از این مدل برای ارزیابی تغییر اقلیم در این ناحیه و نواحی با اقلیم مشابه استفاده کرد.

لذا یافته‌های پژوهش با مطالعات پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۶)، کاویان و همکاران (۱۳۹۶)، نادری و همکاران (۱۳۹۶)، حاجی محمدی و همکاران (۱۳۹۵)، بحری و زاهدی (۱۳۹۵)، همچنین با یافته‌های ساراف و رگولوار (۲۰۱۸)، واگش و همکاران (۲۰۱۳)، لیرونگ (۲۰۱۲) و ژانگ و همکاران (۲۰۰۶)، مینی بر نتایج رضایت‌بخش مدل LARS-WG برای بررسی تغییر اقلیم را تایید می‌کند. همچنین یافته‌های مطالعه با نتایج تحقیقات ذکر شده که پدیده تغییر اقلیم با افزایش دما و تبخیر و تعرق و کاهش بارش همراه است، هماهنگ و همسو است.

نتایج به دست آمده صرف نظر از جهت تغییرات هر یک از مولفه‌های هیدرولوژیکی، دلالت بر اهمیت الگوی زمانی تغییرات در طول

بر دماهای حدی بیشینه ایران تحت سناریوهای RCP طی قرن بیست و یکم. دوفصلنامه نیوار، ۴۴ (۱۰۹): ۸۵-۹۶.

حیدری تاشه کبود، ش. و حسینی، ا. ۱۳۹۸. ارائه برنامه راهبردی بهره‌وری مصرف آب در کشور به منظور سازگاری با تغییر اقلیم. دوفصلنامه نیوار، ۴۳ (۱۰۷): ۱۳-۲۶.

درواری، ز. و سلیمانی، ک. ۱۳۸۶. شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوضه معرف کسلیان). نهمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان: دانشگاه شهید باهنر. انجمن مهندسی آبیاری و آب.

شاهین رخسار، پ.، علیزاده، ا.، انصاری، ح. و قربانی، م. ۱۳۹۸. بررسی عدم قطعیت گروهی مدل‌های گردش عمومی جو در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی (مطالعه موردی ایستگاه سینوپتیک رشت). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳ (۶): ۱۸۹۷-۱۹۰۹.

شریفی، پ.، ثروتی، م. و محمدخانی، ن. ۱۳۹۷. تاثیر تغییر اقلیم بر ارزیابی تناسب اراضی برخی از محصولات دیم در منطقه میان‌دوآب. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) // الف، ۳۲ (۲): ۲۵۴-۲۴۳.

شهوری، ن.، خلیلیان، ص.، موسوی، س. و مرتضوی، س. ۱۳۹۸. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع حوضه دشت ورامین با استفاده از مدل SWAT. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۲، ۱۳ (۲): ۳۵۴-۳۶۶.

مهرپرور، م.، اصغری، ک. و گل محمدی، م. ۱۳۹۷. کاهش خطای شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب با بکارگیری تکنیک داده‌گوازی در مدل هیدرولوژیکی SWAT. فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴ (۵): ۸۴-۹۶.

نادری، م.، ایلدرمی، عل.، نوری، ح.، آقامین، س. و زینیوند، ح. ۱۳۹۶. بررسی تاثیر تغییر کاربری اراضی و اقلیم بر رواناب حوضه‌ی آبخیز با استفاده از مدل SWAT. (مطالعه موردی: حوضه‌ی گرین). فصلنامه هیدروژئومورفولوژی، ۱۴ (۱): ۶۱-۷۹.

IPCC. 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers.

Kundzewicz Z.W., Mata L.J., Arnell N.W., D'oll P., Kabat P., Jim'enez B., Miller K.A., Oki T., Sen Z. and Shiklomanov, I.A. 2007. Freshwater resources and their management. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Parry, M. L. Canziani O. F. Palutikof J. P. van der Linden P. J. and Hanson C. E.

سال دارد که نقش موثری در مدیریت منابع آب حوزه دارا می‌باشد. پژوهش حاضر ضمن بیان اهمیت اثرات بالقوه تغییر اقلیم در وضعیت هیدرولوژی حوزه لزوم توجه به بحث تغییر اقلیم و پیامدهای آن را در مدیریت منابع آب را متذکر می‌گردد.

در نهایت نتایج این مطالعه نشان می‌دهد در حوضه مزلقان تغییر اقلیم محسوس‌ی شروع گردیده است. به طوری که اقلیم به سمت گرم شدن پیش می‌رود. همچنین به دلیل کاهش بارندگی‌ها و افزایش بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی سطحی، جریان آب رودخانه نسبت به آمار درازمدت کاهش بسیار شدیدی داشته است. لذا به منظور جلوگیری از آثار تغییر اقلیم بر حوضه مزلقان، موارد ذیل پیشنهاد می‌شود:

کاشت گیاهان مقاوم به خشکی و کم مصرف؛
توسعه جنگل‌ها و پوشش‌های گیاهی برای ترسیب کربن؛
استفاده از روش باروری ابرها به منظور افزایش میزان جریان رودخانه و تغذیه سفره‌های زیرزمینی؛
به توجه به اینکه کاربری پایین دست حوضه، زراعت آبی و باغ است و نیاز به آب دارد، تمهیدات آبیاری تحت کم فشار برای حوضه اندیشیده شود.
اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها براساس نسبت‌های تلفات خاک به منظور انجام اقدامات حفاظتی.

منابع

ایمانی امیرآباد، س.، دلاور، م. و نیک سخن، م. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی و ارزیابی راهکارهای مدیریتی برای کاهش مواد مغذی ورودی به دریاچه زریبار با استفاده از مدل SWAT. فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳ (۱): ۸۷-۶۹.

بحری، م. و زاهدی، ا. ۱۳۹۵. بررسی تغییرات اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی جریان سطحی رودخانه حوضه آبخیز آراز کوسه. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۱۶، ۴۲ (۳): ۱۳۱-۱۰۹.

بیات، م.، علیزاده، ح. و مجردی، ب. ۱۳۹۷. جذب داده برای واسنجی- پیش‌بینی با استفاده از مدل SWAT. فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴ (۱): ۱۲-۱.

پورمحمدی، س.، دستورانی، م.، مساحبوانی، ع.، گودرزی، م.، جعفری، ه. و رحیمیان، م. ۱۳۹۶. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه و ارائه راهکارهای سازگاری با اثرات آن (مطالعه موردی: حوضه آبریز تویسرکان همدان). فصلنامه علوم مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱۱، ۳۷ (۲): ۱۲-۱.

چراغعلی‌زاده، م.، همتی، ر. و عسگری، س. ۱۳۹۹. اثرات تغییر اقلیم

institute technical report.

Saraf, V. R. Regulwar, D. G. 2018. Impact of Climate Change on Runoff Generation in the Upper Godavari River Basin, India. *The Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. 22(4): 04018021.

Wagesh, N; Jain, M.K; Goel, N. K. 2013. Effect of Climate Change on Runoff Generation: Application to Rift Valley Lakes Basin of Ethiopia. *Journal of Hydrologic Engineering*. 18:1048- 1063.

Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210.

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

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R. 2011. Soil and water assessment tool theoretical document (version 2009), Texas water resource

Investigating of Climate Change Effects on the Surface Runoff with SWAT Model (Case study: Mazlaghan River)

Sh. HajiGhasemi¹, M. Zakeri Niri^{2*}, A. Najafi Jilani³

Recived: Oct.25, 2020

Accepted: Dec.01, 2020

Abstract

The purpose of the present study was Investigating of Climate Change Effects on the Surface Runoff of the Mazlaghan area. For this purpose, SWAT model was used to simulate basin hydrological regime and SUFI-2 algorithm in SWAT-CUP software to optimize model parameters. Statistical data used for runoff simulation were years (1997-2015). To evaluate the ability of SWAT model to simulate runoff discharge, Nash Sutcliffe, R2, p-factor and r-factor indices were used. Using the LARS-WG climate change model in the study area, map the observational data of Razin Station with long-term climate data, taking into account RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 climate change scenarios for the coming period 2021- 2040 Climate change in the region was evaluated.. LARS-WG model to ensure the correct calibration errors indices of average root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE) and the coefficient of productivity Nash Sutcliffe (NSE) was used; The results of the study, while confirming the efficiency of the model, showed for the period 2021-2040, an increase in the mean annual temperature will occur based on the three scenarios mentioned. Also, the average monthly rainfall under the scenarios of RCP2.6, RCP4.5 increases and RCP8.5 predicts a decrease. Finally, according to the predicted climatic data in runoff simulation, an increase in runoff is predicted in the Alluvial Basin.

Keywords: Climate change, LARS-WG, Mazlaghan river, Surface runoff, SWAT model

1- M.Sc. Graduates, Water Resources Management and Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Islamshahr Branch, Islamic Azad University, Islamshahr, Iran
(*- Corresponding Author Email: Zakeriiau@gmail.com)