

شبیه‌سازی رواناب سطحی بر اساس روش تحلیل حساسیت SWATCUP (مورد مطالعه: رودخانه قره‌چای)

پدرام محمودی^۱، محمود ذاکری نیری^{۲*}، عطااله نجفی جیلانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اسلامشهر

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

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

(تاریخ دریافت: ۹۹/۹۵/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۷)

چکیده

هدف پژوهش حاضر، شبیه‌سازی رواناب سطحی رودخانه قره‌چای بود که با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT اقدام به مدل‌سازی شد. در این راستا ابتدا با استفاده از نرم‌افزار GIS نسخه ۱۰٫۴، DEM و آبراهه‌ها و مشخصات شبکه رودخانه‌ای حوزه استخراج گشت. آمار مورد استفاده از ایستگاه‌های پل دو آب خنداب، جوشیروان و ساروق، مربوط به سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ حوضه قره‌چای در نظر گرفته شد. برای محاسبه روش تلفات حوضه از روش شماره منحنی خاک (CN) استفاده شد. واسنجی و اعتبارسنجی مدل با نرم‌افزار SWAT-CUP با الگوریتم SUFI-2 انجام گرفت. برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی دبی رواناب از شاخص‌های با شاخص‌های نش ساتکلیف، R-factor و p-factor استفاده شد. از آمار ۸ ساله اندازه‌گیری شده (۲۰۰۴-۲۰۱۱)، بارندگی، دما و دبی روزانه برای واسنجی مدل استفاده شد و اعتبارسنجی مدل با باقی مانده داده‌ها (۲۰۱۲-۲۰۱۶) انجام شد. نتیجه اعتبارسنجی مدل با شاخص‌های نش ساتکلیف، R-factor و p-factor برای ایستگاه خنداب به ترتیب عبارت بود از ۰٫۶۵، ۰٫۶۶، ۰٫۳۵ و ۰٫۰۷ و برای ایستگاه پل دو آب نیز نتایج شاخص‌ها به ترتیب ۰٫۵۷، ۰٫۷۲، ۰٫۰۷ و ۰٫۰۵ بود. ارزیابی مدل توانایی مدل SWAT را در شبیه‌سازی رواناب سطحی رودخانه قره‌چای تایید می‌کند. در نهایت مقایسه ظاهری هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی ماهانه نشان داد که مدل، زمان وقوع مقادیر دبی اوج و دبی‌های پایه را به خوبی مدل سازی نموده است اما مقادیر دبی اوج را بیشتر از مقادیر واقعی برآورد نموده است.

واژگان کلیدی: رواناب سطحی، مدل SWAT، رودخانه قره‌چای، SWATCUP.

مقدمه

شدت آن در طی رگبار متفاوت بوده و ممکن است در هر زمانی از وقوع کاهش یابد یا متوقف شود (نجفی، ۱۳۸۷). بارش یکی از پیچیده‌ترین عناصر چرخه آب شناختی همراه با تغییرات زیاد در زمان و مکان است. پیش‌بینی بارش کار ساده‌ای نیست و عدم قطعیت‌های زیادی در آن وجود دارد (زند و سماعی، ۱۳۹۶)؛ برآورد رواناب حاصل از بارش‌های جوی، پایه و مبنای مطالعات بسیاری از طرح‌های مختلف توسعه و بهره‌برداری از منابع آب را تشکیل می‌دهد و برای درک بهتر مسائل هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب، مهندسی رودخانه، سازه‌های کنترل سیل و ذخیره سیلاب اهمیت بسزایی دارد، لذا مساله برآورد رواناب سطحی در حوضه آبریز رودخانه‌ها، موضوعی مهم و پیچیده است که نیاز به بررسی و مدل‌سازی رژیم رودخانه دارد. برای این منظور مدل‌های بسیاری برای شبیه‌سازی فرایندهای حوزه آبخیز وجود دارد (یعقوبی و بهره مند، ۱۳۹۰).

آب سطحی که نتیجه پاسخ‌های بارش-رواناب در یک حوضه می‌باشد، منبع بالقوه‌ای است که اگر به طور صحیح مدیریت شود، می‌تواند برای تامین تقاضا مفید واقع گردد. اراضی ایران کشوری پهناور، با اقلیمی خشک و کم باران است که همواره کمبود آب در آن به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده توسعه مورد توجه بوده است. این سرزمین، هر ساله شاهد خسارات جبران ناپذیر ناشی از عدم کنترل آب‌های سطحی در بخش‌های نسبتاً وسیعی می‌باشد. رواناب ناشی از بارندگی در حوضه‌های آبخیز علاوه بر خسارت‌های جانی و مالی ناشی از سیل، باعث فرسایش و از بین رفتن خاک حاصلخیز سطحی شده و رسوب‌گذاری در مسیل‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها را به دنبال دارد. رواناب سطحی زمانی رخ می‌دهد که شدت بارندگی بیشتر از نیاز اولیه برگاب، نفوذ و چالاب باشد و

SWAT مدلی بزرگ مقیاس است که برای شبیه‌سازی تاثیر روش های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی-کشاورزی در سطح حوضه های با خاک و کاربری اراضی مختلف در دراز مدت طراحی شده است که براساس بیلان آبی استوار است. فرایندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، حرکت رسوبات، رشد گیاه، چرخه موادمغذی و غیره در این مدل مستقیم از روی پارامترهای ورودی شبیه سازی می‌شوند. از مزایای مدل SWAT این است که حوضه هایی که فاقد داده‌های برداشت شده هستند نیز قابل شبیه سازی اند.

نظر به اینکه یکی از مهم ترین محاسبات هیدرولوژیکی برای یک حوضه تعیین ارتباط بین رواناب در بالادست و سیل به وقوع پیوسته در پایین دست می‌باشد، در این راستا با توجه به اهمیت موضوع و به منظور کنترل آن، تحقیقاتی به روش SWAT صورت گرفته که در این پژوهش به بررسی پاره‌ای از مطالعات داخلی و خارجی پرداخته شده است.

شفیع‌نژاد (۱۳۹۸)، در مطالعه‌ی خود به "شبیه‌سازی آورد رواناب و رسوب در رودخانه با استفاده از نرم‌افزار SWAT رودخانه اهرچای" پرداخت؛ در این تحقیق از مدل هیدرولوژیکی SWAT استفاده شد و واسنجی و اعتبارسنجی مدل با نرم‌افزار SWAT-CUP توسط الگوریتم SUFI-2 انجام گرفت. دوره‌ی آماری (۱۹۹۷-۲۰۱۵) برای شبیه‌سازی مدل انتخاب گردید، و از شاخص‌های R^2 ، R -factor، P -factor و NS برای ارزیابی مدل استفاده شد. نتایج نشان دهنده مناسب بودن مدل SWAT جهت شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوضه آبخیز مورد مطالعه بود؛ رئوف، عزیزی مبصر و سلحشور (۱۳۹۵)، در مطالعه‌ای به تخمین پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی حوضه آبخیز با استفاده از مدل SWAT در حوضه بالخلوچای پرداختند؛ برای واسنجی مدل از داده‌های آماری ثبت شده برای سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۵ و برای اعتبارسنجی از آمار سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۸ استفاده شد. دقت شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از شاخص‌های ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و خطای نسبی

ارزیابی شد. نتایج تحقیق نشان داد که مدل SWAT جریان رودخانه را در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده، به خوبی و با دقت بالا شبیه‌سازی می‌کند؛ انصاری و همکاران (۱۳۹۴)، در پژوهشی به شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز رود زرد با استفاده از مدل SWAT پرداختند؛ در این تحقیق از مدل سوات برای شبیه‌سازی رواناب حوضه رود زرد استفاده شد. آمار رواناب دو ایستگاه هیدرومتری (ماشین و پل منجنیق) برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل به کار برده شد. مدل با استفاده از داده‌های دما و بارش روزانه هفت ایستگاه باران سنجی و سینوپتیک حوضه برای مدت ۱۵ سال (۱۹۹۵-۲۰۰۹) اجرا شد. از شاخص‌های عدم قطعیت p -factor و d -factor، ضریب تعیین (R) و ناش ساتکلیف (NS) به منظور ارزیابی توانایی مدل سوات در شبیه‌سازی رواناب هردو ایستگاه استفاده گردید. در مجموع نتایج مطالعه نشان داد که مدل SWAT رواناب را برای هر دو ایستگاه به خوبی شبیه سازی نموده است؛ کاویان و همکاران (۱۳۹۴)، رواناب و بار رسوب حوضه آبخیز رودخانه هراز مازندران را با بهره‌گیری از الگوی SWAT شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان دهنده زیاد بودن دقت شبیه‌سازی دبی جریان در هر چهار ایستگاه مورد بررسی بود.

از مطالعات خارجی انجام گرفته در این زمینه، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: تاوهانا و همکاران (۲۰۱۸)، در مطالعه‌ای به "تجزیه و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT، کالیبراسیون و اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه رودخانه لوووو، آفریقای جنوبی" پرداختند؛ در این مطالعه، به منظور شبیه‌سازی رواناب، از مدل (SWAT) برای حوضه رودخانه لوووو، آفریقای جنوبی استفاده شد. داده های آماری مورد استفاده برای شبیه سازی رواناب، مربوط به سال های (۱۹۸۶-۲۰۰۵) بود. و برای اعتبارسنجی مدل، داده سال های ۲۰۰۶-۲۰۱۵ مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از R^2 ، NSE، $PBIAS$ ، RSR ، P -factor و R -factor صورت گرفت. همچنین نتایج شبیه‌سازی مناسب بودن شاخص‌های R^2 و NSE را نشان داد. مدل SWAT با توجه به این شرایط، شبیه‌سازی

رواناب نشانه رخدادهای ناهنجاری‌هایی در مدیریت حوضه آبخیز است و ادامه این روند سبب کاهش توان تولیدی سرزمین و مشکلات زیست محیطی می‌شود، در نتیجه اهمیت مطالعه رواناب و عوامل محیطی تأثیرگذار روی آن یکی از نیازهای اساسی در طراحی پروژه‌های آبیاری و زهکشی و مدیریت منابع آب سطحی است.

اگرچه کارایی مطلوب مدل SWAT در ارتباط با بررسی شرایط هیدرولوژیکی بعضی از حوضه‌های داخل و خارج کشور به اثبات رسیده است اما این موضوع به طور صددرصد قابل تعمیم به تمام حوضه‌ها با شرایط اقلیمی و خصوصیات فیزیکی مختلف نبوده و ممکن است شرایط منطقه به گونه‌ای باشد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل SWAT چندان رضایت بخش نباشد. بنابراین اجرای این مدل در حوضه‌های مختلف، نتایج متفاوت از یکدیگر را خواهد داشت (نوری، طالبی و اسدی، ۱۳۹۸). حوضه مورد مطالعه این پژوهش در اقلیم نیمه خشک قرار دارد از جانی بر اساس آمار و اطلاعات ثبت شده مقادیر پارامترهای بارندگی در ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی، تغییرات بارندگی در حوضه این رودخانه خیلی محسوس نیست که حاکی از عدم نظارت و مدیریت صحیح و بهره برداری بی‌رویه از این رودخانه است. لذا به منظور مدیریت آب حوضه مورد مطالعه و جلوگیری از رواناب و استفاده بهینه در جمع‌آوری و ذخیره احیای رودخانه، شبیه‌سازی رواناب سطحی روزانه حوضه رودخانه قره‌چای با مدل SWAT موضوع و هدف این پژوهش است.

مواد و روش تحقیق

محدوده مورد مطالعه

حوضه مورد مطالعه این پژوهش، رودخانه قره‌چای است؛ حوضه آبخیز قره‌چای یکی از زیرحوضه‌های دریاچه نمک می‌باشد که بین عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی و طول ۴۸ درجه و ۷ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی قرار دارد. وسعت این حوضه در محدوده استان مرکزی برابر ۲۰۱۱۷ کیلومتر مربع است.

رضایت بخشی برای حوضه داشت؛ کلین و همکاران (۲۰۱۳) در زیرحوضه‌ی کراالی هندوستان، توانمندی مدل SWAT را در شبیه‌سازی رواناب بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مدل در شرایط آب و هوایی و تغییر کاربری اراضی توانایی بالایی در شبیه‌سازی و برآورد رواناب دارد؛ جاو و همکاران (۲۰۱۰)، به منظور اثبات سازگاری شبیه‌سازی رواناب در سه منطقه دره‌ای در گام زمانی روزانه بررسی انجام دادند. با استفاده از نقشه خاک، نقشه کاربری اراضی در کیاکسین و داده‌های هواشناسی در ایستگاه وانزو، شبیه‌سازی صورت گرفت. نتایج توسط ضریب نش-ساتکلیف و ضریب همبستگی ارزیابی گردید. با استفاده از داده‌های جریان در ایستگاه ونگان، مدل با شاخص‌های آماری نش-ساتکلیف و R واسنجی و اعتبارسنجی شد که ضریب بالای ۰/۹۰ نشان دهنده شبیه‌سازی قابل قبول است و اثبات می‌کند که مدل SWAT شبیه‌سازی خوبی در گام روزانه به خوبی ماهانه تحت برخی شرایط انجام داده است. تامپی و همکاران (۲۰۱۰)، رواناب حوضه رودخانه چالیار هندوستان را با استفاده از مدل سوات تخمین زدند، به طوری که پارامترهایی از قبیل نوع خاک، کاربری اراضی، توپوگرافی و فعالیت‌های مدیریتی در این مقیاس‌ها مشابه بودند. نتایج نشان داد که مدل SWAT می‌تواند رواناب را در هر دو مقیاس به طور معقول و با اختلاف خیلی کمی بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه شده برآورد کند و با افزایش اندازه حوضه عدم قطعیت مدل افزایش می‌یابد. ژو و همکاران (۲۰۰۹)، تحقیقی را با هدف اعتبارسنجی مدل و بررسی امکان استفاده از این مدل به عنوان شبیه‌ساز فرآیند انتقال رواناب و رسوب در مقیاس آبخیز در نواحی خشک و نیمه خشک در شمال چین با مساحت ۱۵۸۰۰ کیلومتر مربع انجام دادند. بررسی‌ها با استفاده از داده‌های دوره آماری ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۱ انجام شد. در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی دقت شبیه‌سازی‌های روزانه و ماهانه در ارزیابی با شاخص نش-ساتکلیف و R بالا بود. و دقت مدل در شبیه‌سازی حوضه تایید شد. مرور مطالعات نشان از دقت مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب را دارد. نظر به اینکه روند فزاینده

در حوضه‌های زراعی با خاک و کاربری اراضی متغیر برای بازه‌های زمانی طولانی توسعه یافته است (ایمانی امیرآباد، دلاور و نیک‌سخن، ۱۳۹۶). در این راستا با استفاده از نرم‌افزار GIS نسخه ۱۰٫۴، DEM و آبراه‌ها 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 (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 (نیچ و همکاران، ۲۰۱۱).

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

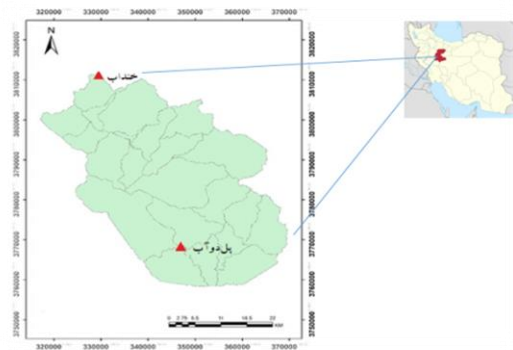
$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

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 آمپت. روش شماره منحنی، تجربی است و به وسیله 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 (CN) بهره گرفته شده است. رابطه SCS رابطه اصلی روش شماره منحنی می‌باشد و به صورت معادله زیر بیان می‌گردد:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)}{(R_{day} - 0.85)} \quad (2)$$

رودخانه قره‌چای اصلی‌ترین رودخانه این حوضه آبخیز می‌باشد و طول آبراهه اصلی در این حوضه برابر ۷۱ کیلومتر بوده و تغییرات ارتفاع در محدوده این حوضه از ۹۳۹ تا ۳۵۴۴ متر متغیر است. رودخانه قره‌چای با نام رودخانه شراه پس از خروج از محدوده استان مرکزی «در پایین دست ایستگاه هیدرومتری جوشیروان» و به نام رودخانه قره‌چای در راستای جنوب به شمال طی مسیر نموده و در استان همدان پس از اتصال شاخه دیگر به این رودخانه در مسیر غرب به شرق حرکت می‌نماید و پس از عبور از ایستگاه هیدرومتری خماجین با دیگر در بخش شمالی استان مرکزی وارد استان می‌گردد. بر اساس اطلاعات نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز قره‌چای، بیشترین مساحت آن، کشاورزی و منطقه نظامی است. همچنین با توجه به نقشه خاک محدوده مورد مطالعه، بیشترین مساحت حوضه به اینسپتی سول و انتی سول اختصاص دارد. این خاک‌ها جوانند و یا در ابتدای مراحل به وجود آمدن قرار دارند و جذب آب پایینی دارند. لذا با توجه به نوع خاک و جذب ضعیف آن و کاربری منطقه که غالب بیابان و کشاورزی است، می‌توان احتمال رواناب را در محدوده پیش‌بینی کرد.



شکل ۱: نقشه حوضه قره‌چای

روش تحقیق

در این پژوهش از نسخه ۲۰۱۲ نرم‌افزار 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

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_RCHRG_DP)، طول متوسط شیب ($V_SLSUBBSN$)، ضریب تأخیر رواناب سطحی (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 نرم افزاری به نام SWAT-CUP توسعه یافت که به وسیله آن امکان واسنجی مدل با استفاده از روش‌های واسنجی خودکار شامل MCMC, PSO, GLUE, SUFI2 و Parasol فراهم می‌آید. این بسته نرم‌افزاری امروزه توسط بسیاری از کاربران برای واسنجی به کار می‌رود (بیات، عزیزاده و مجردی، 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 رضایت‌بخش 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، 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

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 شماره 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 (مهرپور، اصغری و گل محمدی، 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 که متعارف‌ترین روش برای این کار می‌باشد. 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. 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 تأخیر آب

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) در این پژوهش در رابطه ذیل آمده است:

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

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

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

در این پژوهش، آمار مورد استفاده از ایستگاه‌های پل دوآب خنداب، جوشیروان، و ساروق، مربوط به سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ حوضه قره‌چای در نظر گرفته شد.

بر اساس روش ذکر شده، فلوجارت پژوهش حاضر در شکل ۲ آورده شده است.

اندازه‌گیری شده را در نظر می‌گیرد. سنجش میزان عدم قطعیت که دربرگیرنده تمام موارد اشاره شده می‌باشد، توسط معیار به نام **P-Factor** که بیانگر درصد داده‌های مشاهداتی که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد (95 PPU) 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، ۲۰۰۷).

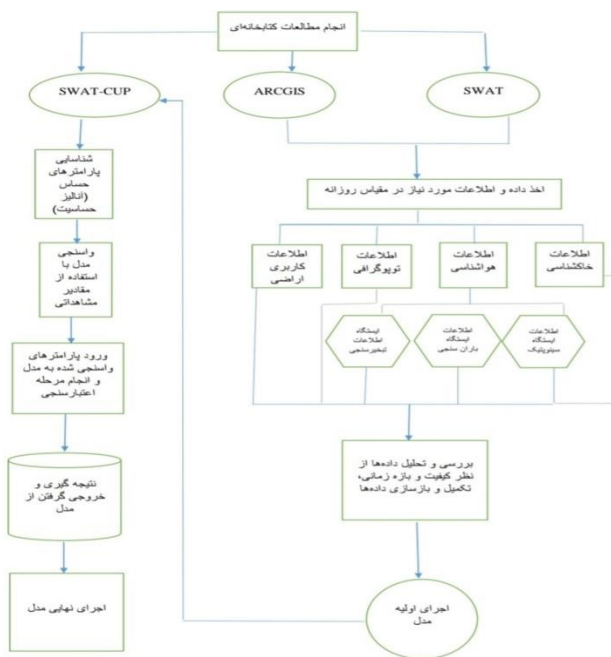
نظر به اینکه روش **SUFI2** روش استوکاستیکی است، از باندهای عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد و همچنین از فاکتوری به نام **R-Factor** که به نوعی بیانگر متوسط فاصله بین باند بالا و پایین می‌باشد، برای برآورد کیفیت نتایج حاصل از مدل‌سازی استفاده می‌شود و به عبارت دیگر معیاری برای برآورد نزدیکی فاصله بین باندهای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



شکل ۲: فلوچارت پژوهش

در حوضه قره‌چای گردید. براساس ایستگاه هیدرومتری خنداب که در خروجی حوزه قرار داشت داده‌های شبیه‌سازی شده براساس مدل، واسنجی و صحت‌سنجی گردید. واسنجی مدل: واسنجی مدل به صورت ماهانه و با استفاده از برنامه SUFI2 انجام گردید. پارامترهای موثر در تولید رواناب حوزه آبخیز شناسایی شد و به همراه محدوده مجاز تغییرات آن‌ها به مدل وارد گردید. از آمار ۸ ساله اندازه‌گیری شده (۲۰۰۴-۲۰۱۱)، بارندگی، دما و دبی روزانه برای واسنجی مدل استفاده شد.

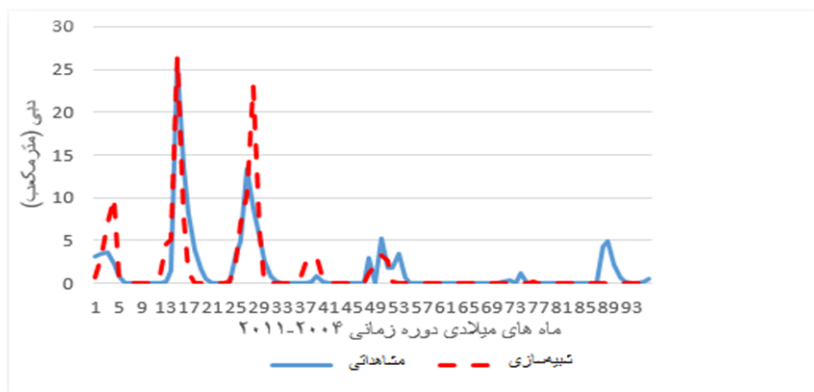
در شکل ۳ و ۴ هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی ماهیانه در دوره واسنجی (۲۰۰۴-۲۰۱۱)، هردو ایستگاه مطالعاتی، نشان داده شده است.

نتایج و تحلیل نتایج

در این بخش، نتایج اجرای مدل SWAT، واسنجی و اعتبارسنجی آن در قالب نمودارها و جداولی نمایش داده شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

نتایج حاصل از اجرای مدل SWAT: نتایج حاصل از اولین اجرای SWAT و بررسی شاخص‌های ارزیابی دقت شبیه‌سازی این مدل نشان داد که پایین بودن شاخص‌های ارزیابی و برآورد غیر قابل قبول نسبت به مقادیر واقعی دارای دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی دبی رواناب حوزه آبخیز قره‌چای نبود و واسنجی مدل می‌تواند نتایج را بهبود دهد و باعث افزایش دقت شبیه‌سازی شود. که بعد از آنالیز حساسیت مدل با پارامترهای پیش فرض SWAT، اقدام به واسنجی مدل برای بهبود و دقت در شبیه‌سازی دبی رواناب

شبیه‌سازی رواناب سطحی بر اساس روش تحلیل حساسیت **SWATCUP** (مورد مطالعه: رودخانه قره‌چای)



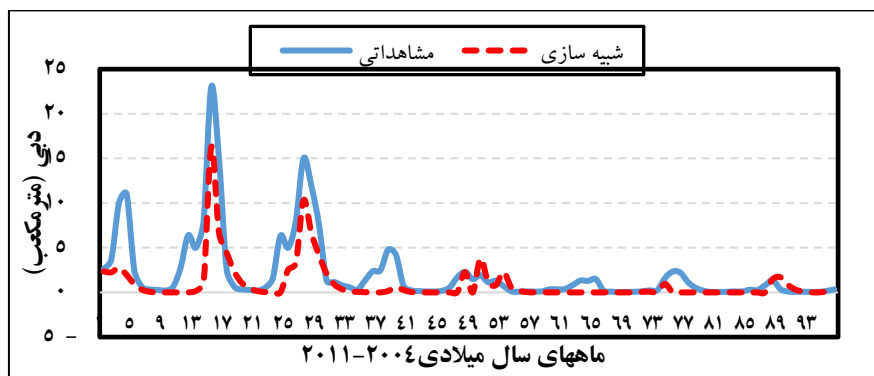
شکل ۳: مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره واسنجی ایستگاه خنداب

همانطور که در هیدروگراف ایستگاه و شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل مشاهده می‌شود، مدل SWAT در شبیه‌سازی داده‌های ایستگاه خنداب موفق عمل کرده است.

نتایج ارزیابی کارایی مدل برای ایستگاه هیدرومتری خنداب، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی ایستگاه هیدرومتری خنداب

شاخص	مقدار
NS	۰/۶۵
R	۰/۶۶
p-factor	۰/۳۵
r-factor	۰/۰۷



شکل ۴: مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره واسنجی ایستگاه پل دوآب

همانطور که در هیدروگراف ایستگاه و شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل مشاهده می‌شود، مدل SWAT در شبیه‌سازی داده‌های ایستگاه پل دوآب موفق عمل کرده است.

نتایج ارزیابی کارایی مدل برای ایستگاه هیدرومتری پل دوآب، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی ایستگاه هیدرومتری پل دوآب

شاخص	مقدار
NS	۰/۵۷
R	۰/۷۲
p-factor	۰/۰۷
r-factor	۰/۰۵

تعیین مقادیر بهینه پارامترهای حساس بعد از واسنجی: همانطور که قبلاً اشاره شد، در این تحقیق به منظور واسنجی مدل از برنامه **SUF12** استفاده شد. در جدول ۳ مقادیر پارامترهای حساس در بهترین حالت واسنجی آورده شده است.

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

ردیف	نام پارامتر	حدود بهینه	حداقل	حداکثر
۱	شماره منحنی SCS (CN)	-۰,۲	۰,۵	۰,۵
۲	ثابت تخلیه آب زیرزمینی (V_ALPHA_BF)	۱,۱۹	۰	۱
۳	زمان تأخیر آب زیرزمینی (V_GW_DELAY)	۴۳,۷	۰	۵۰۰
۴	حداقل مقدار ذخیره آب لازم برای رویداد جریان پایه (V_GWQMN)	۰,۸۱	۰	۵۰۰۰
۵	ظرفیت ذخیره آب قابل دسترس (r_SOL_AWC)	۰,۳۶	۰	۱
۶	ضریب نفوذ آبخوان (V_RCHRG_DP)	۰,۰۵	۰	۱
۷	طول متوسط شیب (V_SLSUBBSN)	۱۴,۵۲	۱۰	۱۵۰
۸	ضریب تأخیر رواناب سطحی (r_SURLAG)	۱۴,۵۲	۰,۰۵	۲۴
۹	فاکتور جبران تبخیر از سطح خاک (V_EPCO)	۱/۷۹	۰	۱
۱۰	فاکتور تأخیر دمای بارش برف (V_TIMP)	۰,۳۷	۰	۱
۱۱	دمای ذوب توده برف (V_SMTMP)	۲,۰۶	-۱۰	۱۰
۱۲	متوسط دمای هوا برای بارش برف (V_SFTMP)	۲۰	-۲۰	۲۰
۱۳	حداکثر میزان ذوب برف (V_SMFMN)	-۹,۳۳	۰	۲۰
۱۴	ضریب مانینگ کانال (r_CH_N2)	۰,۲۱	-۰,۰۱	۰,۳
۱۵	فاکتور جبران تبخیر از سطح خاک (V_ESCO)	۰,۸۹	۰	۱
۱۶	هدایت هیدرولیکی کانال (r_CH_K2)	۳۲۸,۷	۰,۰۱	۵۰۰

اعتبارسنجی مدل: بعد از مرحله واسنجی مدل، اعتبارسنجی مدل انجام شد. در این مرحله با توجه به پارامترهای کالیبراسیون بهینه شده برای منطقه مطالعاتی، با استفاده از باقی مانده آمار (۲۰۱۲-۲۰۱۶) اقدام به شبیه‌سازی جریان رودخانه شده و این نتایج به عنوان نتایج نهایی اعتبارسنجی مدل در جدول ۴ و ۵ ارائه شده است.

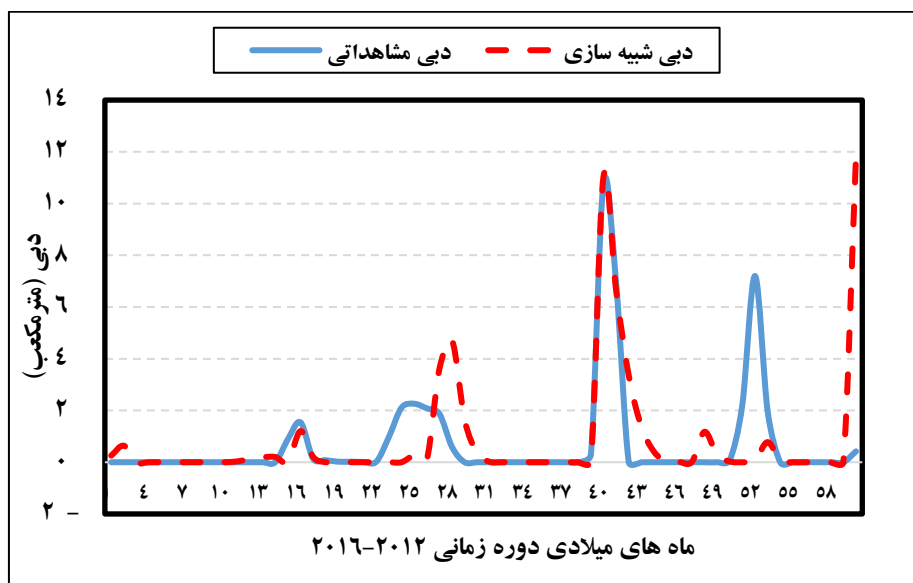
جدول ۵: ارزیابی کارایی مدل در مرحله اعتبارسنجی ایستگاه هیدرومتری پل دوآب

شاخص	مقدار
NS	۰/۴۷
R	۰/۵۹
p-factor	۰/۰۸
r-factor	۰/۰۵

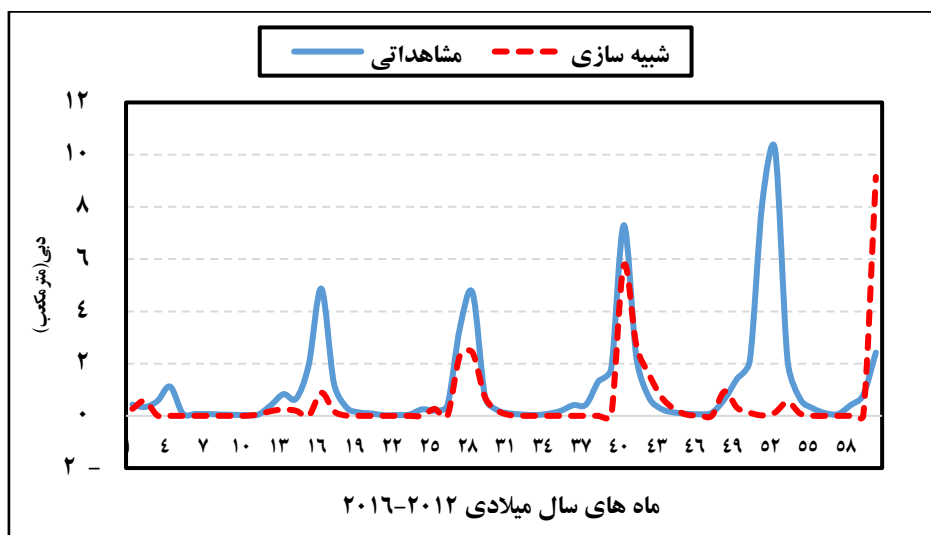
همانطور که مشاهده می‌شود، داده‌های جدول ارزیابی مدل نیز نتایج قابل قبولی را برای هر دو ایستگاه در پی داشت. نتایج ارزیابی ایستگاه خنداب حاکی از شبیه‌سازی موفق‌تر این حوضه است. در شکل ۵ و ۶، هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۲-۲۰۱۶)، نشان داده شده است.

جدول ۴: ارزیابی کارایی مدل در مرحله اعتبارسنجی ایستگاه هیدرومتری خنداب

شاخص	مقدار
NS	۰/۵۸
R	۰/۶۰
p-factor	۰/۳۶
r-factor	۰/۷



شکل ۵: مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی ایستگاه خنداب



شکل ۶: مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی ایستگاه پل دوآب

سطحی برای حوضه قره‌چای با مدل SWAT به منظور بررسی و مطالعه بر روی پارامترهای موثر بر رفتار رودخانه جهت مهار و استحصال آب، انجام شده است. نتایج حاصل از اولین اجرای SWAT و بررسی شاخص‌های ارزیابی دقت شبیه‌سازی این مدل نشان داد که پایین بودن شاخص‌های ارزیابی و برآورد غیر قابل قبول نسبت به مقادیر واقعی، دارای دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی دبی رواناب حوزه آبخیز قره‌چای نبود؛ بعد از انجام مراحل واسنجی و اعتبارسنجی برای ایستگاه هیدرومتری خنداب، ضریب نش ساتکلیف به ترتیب برابر ۰/۶۵ و ۰/۵۸ به دست آمد و برای ایستگاه هیدرومتری پل- دوآب ضریب نش ساتکلیف به

بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که مدل زمان وقوع مقادیر دبی اوج و دبی‌های پایه را به خوبی مدل سازی 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 اعتبارسنجی نیز موید این مطلب است.

جمع‌بندی

شبیه‌سازی رواناب سطحی در حوضه آبخیز برای درک بهتر مسائل هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب، مهندسی رودخانه، سازه‌های کنترل سیل و ذخیره سیلاب اهمیت بسزایی دارد؛ لذا پژوهش حاضر با هدف مدل‌سازی رواناب

چه بیشتر معرف فرایندهای حوضه باشد بهتر است و اسنچی پارامترهای مدل بر اساس کاربری اراضی صورت گیرد و نتایج شبیه‌سازی را با داده‌ها و مطالعات قبلی در منطقه مقایسه شود.

منابع

۱. انصاری، م؛ گرجی، م؛ صیاد، غ؛ شرفا، م. و حمادی، کاظم. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز رود زرد با استفاده از مدل Arc SWAT. فصلنامه علوم و مهندسی آبیاری، ۳۸ (۴): ۱۰۷-۹۷.
۲. ایمانی امیرآباد، س؛ دلاور، م. و نیک‌سخن، 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.
۳. بیات، م؛ علیزاده، ح. و مجردی، ب. ۱۳۹۷. جذب داده برای واسنچی-پیش‌بینی با استفاده از مدل SWAT. فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴ (۱): ۱-۱۲.
۴. رئوف، م؛ عزیزی مبصر، ج. و سلحشور، آیت. ۱۳۹۵. تخمین پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی حوضه آبخیز با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه بالخلوچای). نشریه دانش آب و خاک، ۲۶ (۲): ۱۷۳-۱۸۵.
۵. زند، م. و سمعی، ر. ۱۳۹۶. بررسی مقدار و شدت بارش‌های مولد سیل در حوضه آبریز خرم‌آباد. دو فصلنامه نیوار، ۴۱ (۹۷): ۸-۱.
۶. شفیق‌نژاد، ا. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی آورد رواناب و رسوب در رودخانه با استفاده از نرم‌افزار SWAT (مطالعه موردی: رودخانه اهرچای). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.
۷. کاویان، ع؛ گلشن، م؛ روحانی، ح. و اسمعیلی عوری، ا. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب حوضه آبخیز رودخانه هراز مازندران با بهره‌گیری از SWAT. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۷ (۲): ۲۱۱-۱۹۷.

ترتیب برابر ۰,۵۷ و ۰,۴۷ به دست آمده که این ضرایب نشان دهنده نتیجه قابل قبول مدل SWAT در شبیه‌سازی بیلان آبی می‌باشد. همچنین بررسی شاخص‌ها و نمودارهای به دست آمده در مرحله واسنچی و اعتبار واسنچی مدل برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه نشان می‌دهد که مدل در مرحله واسنچی موفق‌تر عمل کرده است.

همچنین حوضه قره‌چای با وجود کمبود داده (حدود ۱۲ سال)، با اجرای مدل SWAT در حوضه قره‌چای امکان شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در این حوزه فراهم گردید و مشخص شد مدل SWAT جهت شبیه‌سازی میزان رواناب حتی در شرایط کمبود داده کارایی مناسبی دارد. پس از انجام مراحل واسنچی و صحت‌سنجی و مقایسه ظاهری هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی ماهانه و همچنین شاخص‌های عددی ارزیابی کارایی مدل، نشان داد که مدل SWAT کارایی خوبی برای شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه قره‌چای با شرایط محدود داده را دارد.

و به طور کلی نتایج نشان دهنده توانایی و دقت قابل قبول مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی رواناب ماهانه حوضه آبخیز قره‌چای می‌باشد. لذا یافته‌های پژوهش مطالعات شفیق‌نژاد (۱۳۹۸)، رئوف، و همکاران (۱۳۹۵)، انصاری و همکاران (۱۳۹۴)، کاویان و همکاران (۱۳۹۴)، همچنین با یافته‌های تاوهانا و همکاران (۲۰۱۸)، کلین و همکاران (۲۰۱۳)، جاو و همکاران (۲۰۱۰)، تامپی و همکاران (۲۰۱۰)، ژو و همکاران (۲۰۰۹)، که به طور کلی توانایی مدل SWAT را در شبیه‌سازی رواناب سطحی رضایت بخش اعلام کردند، تایید می‌کند.

با تلاش‌های زیادی که برای واسنچی هر چه دقیق‌تر مدل صورت گرفت و زمان زیادی برای این کار صرف گردید، تجارب زیر به دست آمد: رویکرد بهینه برای واسنچی و اعتبارسنجی مدل، روش نیمه‌خودکار است. کاربر باید دانش کارشناسی و شناختی که از مدل و حوضه دارد را در واسنچی به کار گیرد سپس برای تدقیق نتایج، از ابزار واسنچی خودکار استفاده کند، در غیر این صورت نتایجی غیرواقعی به دست خواهد آمد. برای اینکه مدل هر

- Engineering and Technology (SJET). Sch. J. Eng. Tech: 1(2):68-77.
14. Guo, N. J., X. Lin-Lin., SH. Qing-Kai., and L. Hong-Bin. 2010. Runoff simulation in Donghe basin using SWAT model. Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT),. Journal of International Conference on 17-18 July 2010. 468 – 471.
15. Neitch SL, Arnold JG, Kiniry JR and Williams JR. 2011. Soil and water assessment tool documentation, (SWAT user's manual) 494 P.
16. Thampi, S., Raneesh, K., Surya, T.V. 2010. Influence of scale on SWAT model calibration for stream flow in a river basin in the humid tropics. Journal of Water Resources Management, 24(15): 4567-4578.
17. Thavhana, M.P., Savage, M.J., Moeletsi, M.E. 2018. SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu river catchment, South Africa. Journal of Physics and Chemistry of the Earth, JPCE 2673.
18. Xu, Z. X., Pang, J. P., Liu, C. M., and Li, J. Y. 2009. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model. Journal of Hydrol. Process, DOI: 10.1002/hyp. P:12.
19. Surface Runoff Simulation Based on SWATCUP Sensitivity Analysis Method (Case study: Ghareh-Chay River
۸. مهرپور، م؛ اصغری، ک. و گل محمدی، م. ۱۳۹۷. کاهش خطای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب با بکارگیری تکنیک داده‌گواری در مدل هیدرولوژیکی SWAT. فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴ (۵): ۸۴-۹۶.
۹. نجفی، م. ۱۳۸۷. سیستم‌های هیدرولوژیکی (شبیه‌سازی بارندگی- رواناب). جلد ۱. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
۱۰. نوری، ز؛ طالبی، ع. و اسدی، م. ۱۳۹۸. بررسی کارایی مدل SWAT در تعیین مولفه‌های بیلان آب حوضه (مطالعه موردی: حوضه آبخیز مهرگرد سمیرم). فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۵ (۳): ۱۴۳-۱۳۳.
۱۱. یعقوبی، ف. و بهره‌مند، ع. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی- توزیعی WetSpa در حوضه آبخیز چهل‌چای در استان گلستان. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۸ (۳): ۲۰۵-۱۸۵.
12. Abbaspour, KC., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. & Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-Alpine/Alpine Thur watershed using SWAT. Journal of Hydrology., 333: 413-430.
13. Celine, G., James, E.J. 2013. Simulation of streamflow using soil and water assessment tool (SWAT) in Meenachil river basin of Kerala, India. Scholars Journal of