



شبیه‌سازی سری زمانی جریان در محل خروجی سد شهید رجایی با استفاده از مدل SWAT

صدیقه نیکخو امیری^۱، مجتبی خوش روش^۲، رضا نوروز ولاشدی^۳

تاریخ ارسال: ۱۹۳۷/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۲

مقاله پژوهشی

مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد می‌باشد.

چکیده

افزایش دمای کره‌ی زمین و اثرات آن بر چرخه آب و همچنین افزایش رشد جمعیت از مسائلی است که امروزه توجه را بر مصرف بهینه منابع و مدیریت بهتر جهت برنامه‌ریزی دقیق برای تامین نیازهای آبی بیشتر نموده است. برای حل این مساله از مدل‌های هیدرولوژی گوناگونی از جمله مدل ارزیابی آب و خاک (SWAT) استفاده می‌شود. در این پژوهش تغییرات جریان خروجی حوضه تجن طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شد. سپس نتایج با استفاده از اندازه‌گیری‌های دبی در ایستگاه سلیمان‌تنگه و الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP مورد واسنجی، صحت‌سنجی و تحلیل عدم قطعیت قرار گرفت. دقت مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان خروجی به کمک پارامترهای R-factor، P-factor، ضریب نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تبیین (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار NS و R^2 برای مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۵۷ و ۰/۵۸ و در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۷۰ و ۰/۷۱ به دست آمد که نشان‌دهنده وجود همبستگی مناسبی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی است. نتایج عدم قطعیت نشان داد که منحنی شبیه‌سازی به خوبی در محدوده‌های عدم قطعیت قرار گرفته و فاصله بین نقاط اوج، حداقل می‌باشد به عبارتی دبی‌های بیشینه با دقت بالایی (ضریب توافق برابر ۰/۸) شبیه‌سازی شدند. بنابراین مدل SWAT ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی شدت جریان در حوضه تجن ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، تغییرات جریان، دبی شبیه‌سازی، صحت‌سنجی، SWAT-CUP.

^۱- کارشناس مهندسی آب، دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، nikkhoo.s@yahoo.com، ۰۹۱۱۲۱۷۷۰۸۲

^۲- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، ۰۹۱۱۳۵۲۱۶۵۴، khoshhravesh_m24@yahoo.com (نویسنده مسئول)

^۳- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، ۰۹۱۱۵۷۰۴۷۶۵، rezanorooz@yahoo.com

مقدمه

افزایش رشد جمعیت جهان، پیشرفت صنعت و ارتقای سطح بهداشت موجب افزایش روز افزون مصرف آب شده است. با توجه به این که منابع آب تجدید شونده نسبتاً ثابت می‌باشد، نیاز است بررسی دقیق کمی و کیفی آن‌ها برای کارایی بیشتر مصرف مشخص شود. جریان آورده شده از رودخانه بالادست از لحاظ مسایل زیست‌محیطی نیز حائز اهمیت می‌باشد و تغییر در شدت جریان و مقدار آن می‌تواند اکوسیستم بسیاری از گونه‌های جانوری ارزشمند در پایین‌دست را نیز به خطر بیندازد (Kalumba and Nyirenda, 2017). تغییر در شدت جریان بر میزان و موجودیت املاح مفید و یا سمی در منابع آبی پایین دست، موجب به خطر افتادن بهداشت و مسایل زیست‌محیطی گونه‌های مختلف گیاهی و جانوری می‌گردد (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۵). از خطرات تغییر جریان آب می‌توان به آسیب جبران‌ناپذیر سیلاب بر سازه‌های طراحی شده جهت ذخیره منابع آبی اشاره نمود. در اثر تغییرات آب و هوایی و نتیجه تغییر در شدت جریان آورده شده از بالادست سازه آبی، موجب اختلال در برنامه‌ریزی جهت تامین نیازهای آبی پایین دست می‌شود (رزاقیان و همکاران، ۱۳۹۵). چنانچه مرفومتری حوضه‌ها بسیار پیچیده می‌باشد و نیز به علت تغییرات زمانی و مکانی عوامل موثر در چرخه آب حوضه‌های آبخیز طبیعی، بررسی همه اجزای چرخه منابع آبی از طریق تحلیل یا تئوری، وقت‌گیر و غیرممکن می‌باشد. بنابراین استفاده از مدلی با جامعیت لازم در شبیه‌سازی حوضه از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل‌های هیدرولوژیکی که برای شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز گوناگون به کار می‌رود عموماً به دو گروه یکپارچه و توزیعی تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های یکپارچه قادر به بررسی تغییرات مکانی پارامترها نمی‌باشند و اجرای آن‌ها نیاز به صرف وقت و هزینه زیادی ندارد. در مقابل، مدل‌های توزیعی اغلب به دلیل قابلیت اتصال به GIS قادرند تمامی تغییرات مکانی را لحاظ کرده اما اجرای آن‌ها مخصوصاً در

حوضه‌های وسیع بسیار زمان‌بر خواهد بود. اخیراً مدل‌هایی با ماهیت نیمه‌توزیعی ارائه شده‌اند که در شبیه‌سازی حوضه‌های وسیع موفق عمل کرده‌اند. یکی از این مدل‌های نیمه‌توزیعی که در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته، مدل ارزیابی آب و خاک^۱ SWAT می‌باشد (Jayakrishnan et al., 2005).

همت‌جو و ایوبی (۱۳۹۱) در تحقیقی از مدل SWAT2005 و روش ارزیابی اراضی برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب اراضی زیرحوضه شاخه اصلی زاینده‌رود با هدف نیل به کاهش هدررفت خاک استفاده نمودند. آن‌ها واسنجی، اعتبارسنجی و آنالیز عدم قطعیت مدل را با استفاده از برنامه SUFI-2 انجام دادند. نتایج نشان داد که مدل در شبیه‌سازی رواناب بهتر از رسوب عمل کرد. نتایج موید این مطلب است که استفاده از اراضی برحسب پتانسیل و استعداد آن‌ها باعث کاهش معنی دار حداکثر بار رسوب و حداکثر رواناب می‌شود. زلکی بدیلی و همکاران (۱۳۹۱) در حوضه آبخیز سد مارون به‌وسیله مدل SWAT برای سال‌های ۲۰۰۶-۱۹۹۴ در ایستگاه ایدنک نشان دادند، در مراحل واسنجی رواناب ماهیانه، ضرایب R^2 ، NS، p-factor و r-factor در خروجی حوضه به ترتیب برابر ۰/۷۳، ۰/۵۹ و ۰/۷۳ و در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۷۰، ۰/۷۵، ۰/۶۷ و ۱/۰۵ به دست آمد. دولت‌آبادی و زمردیان (۱۳۹۲) به شبیه‌سازی حوضه فیروزآباد واقع در استان فارس با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج واسنجی مدل نشان داد که همبستگی خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده وجود دارد و این مدل در محیط GIS و روش SUFI2 موفقیت‌آمیز بود. ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۳) به مقایسه دو مدل بارش-رواناب برای شبیه‌سازی جریان حوضه آبریز رودخانه دویرج در استان ایلام پرداختند و نشان دادند که مدل SWAT توانایی بیشتری در شبیه‌سازی رواناب حوضه‌هایی با داده‌های محدود و شرایط طبیعی مشابه دارد. قدوسی و همکاران (۱۳۹۳) مدل SWAT را برای سال‌های

¹ Soil and Water Assessment Tool

بررسی تاثیرات متقابل ویژگی‌های خاک روی جریان و بهبود کیفیت آن هم کارایی دارد. در تحقیقی که Patil and Ramsankaran (2017) به شبیه‌سازی جریان با توجه به رطوبت‌سنجی خاک در حوضه رودخانه‌های مونتور و کریشا در هند انجام دادند، نتایج حاصل نشان‌دهنده توانایی مناسب SWAT و عملکرد مناسب آن در این پژوهش می‌باشد. به‌طور کلی در پژوهش حاضر سعی شده با استفاده از مدل ارزیابی آب و خاک، شدت جریان خروجی حوضه شبیه‌سازی و با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و نیز روش SUFI2 واسنجی و صحت‌سنجی انجام پذیرد و قابلیت مدل در حوضه سد شهید رجایی مازندران مورد ارزیابی قرار گیرد.

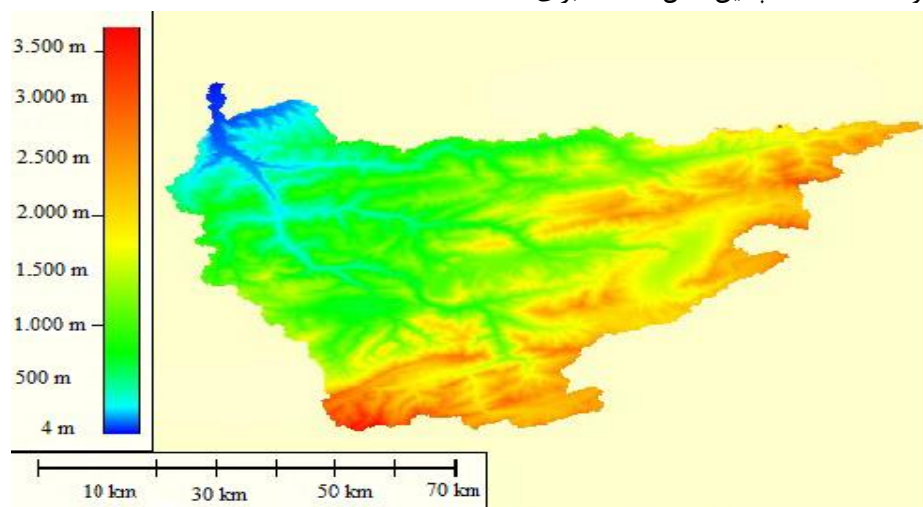
مواد و روش‌ها

مشخصات حوضه مورد مطالعه

این پژوهش بر روی حوضه آبریز سد شهید رجایی واقع در ۴۵ کیلومتری جنوب غربی شهر ساری و روی رودخانه تجن، در طول جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۴ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۴ دقیقه شمالی، انجام شد (شکل ۱).

۱۹۷۶ تا ۲۰۰۸ به‌صورت ماهیانه اجرا کردند. نتایج خروجی مدل با چهار نقشه کاربری اراضی حاکی از کاهش قابل توجه حجم آب خروجی از حوضه به میزان ۵۱ درصد و افزایش تبخیر و تعرق واقعی به میزان ۱۳ درصد طی این سال‌ها بود. به‌طور کلی نتایج آن‌ها نشان داد که تغییر کاربری اراضی در سه دهه گذشته بر کاهش تراز آب دریاچه ارومیه نقشی مهم داشته است. کارایی مدل SWAT در حوضه آبخیز تالار استان مازندران نیز توسط غلامی و همکاران (۱۳۹۵) مورد ارزیابی قرار گرفت. آن‌ها به‌منظور ارزیابی کارایی و بررسی پارامترهای موثر بارش-رواناب مدل SWAT را با استفاده از ۲۱ پارامتر مورد واسنجی قرار دادند و بعد از مشخص شدن پارامترهای حساس در مرحله صحت-سنجی در سطح اعتماد ۹۵٪ تطابق بالایی بین دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به‌وجود آمد.

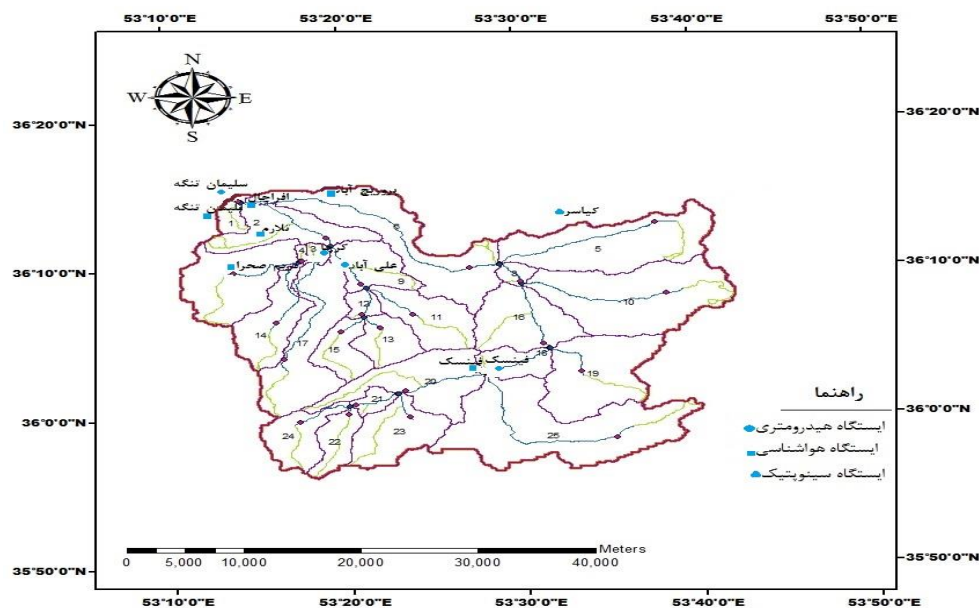
Cheng et al. (2017) اثر تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز چارلز بوستون ایالات متحده آمریکا با هدف برنامه‌ریزی برای کاهش سیل را بررسی نمودند. نتایج تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که برنامه‌ریزی برای اثرات تغییر اقلیم بر کاهش سیلاب بسیار کارآمد است و استفاده از مدل هیدرولوژی SWAT نتیجه دقیق‌تری را خواهد داشت. همچنین مدل SWAT برای



شکل (۱): حوضه آبریز رودخانه تجن

همچنین طبق نتایج ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش در دوره زمانی موردنظر، این حوضه دارای متوسط بارندگی سالانه ۶۱۵/۳ میلی‌متر و دمای ۱۴/۴۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. شکل ۲ موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری حوضه را نشان می‌دهد (براساس اطلاعات اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای مازندران).

منطقه مورد مطالعاتی دارای وسعت ۲۳۷۲/۲۲۵ هکتار می‌باشد. این حوضه در محدوده بالادست سد شهید رجایی دارای پنج ایستگاه هیدرومتری شامل ایستگاه‌های پرویج‌آباد، کرچا، فینسک، علی‌آباد و سلیمان‌تنگه است. ایستگاه هیدرومتری سلیمان‌تنگه که در محل خروجی حوضه به سد قرار دارد برای شبیه‌سازی شدت جریان مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل (۲): ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری حوضه

برای اهداف شبیه‌سازی در این مدل، یک حوضه به تعدادی زیرحوضه و زیر حوضه‌ها نیز به تعدادی واحدهای کوچک‌تر (واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی) تقسیم می‌شوند که از ترکیب نقشه‌های طبقات شیب، کاربری اراضی و خاک حاصل می‌شود. HRU، اراضی یکپارچه‌ای می‌باشند که دارای ترکیبات یکسانی از پوشش، خاک و مدیریت هستند. همچنین براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از سناریوهای مناسب، کارهای مدیریتی مربوط به حوضه توسط مدل صورت خواهد گرفت. مدل SWAT یک مدل نیمه توزیعی می‌باشد که می‌تواند فرایندهای مختلف بیان‌شده را در مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و یا سالانه

معرفی مدل SWAT

مدل SWAT مدلی است که به‌جای ضمیمه کردن روابط رگرسیونی برای تشریح روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی، نیازمند اطلاعاتی در مورد آب و هوا، مشخصات خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و روش‌های مدیریت و کاربری اراضی در سطح حوضه - است. این مدل قادر به پیش‌بینی تاثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب، مواد شیمیایی و کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در درازمدت طراحی شده است.

داده‌های موردنیاز مدل

اطلاعات ورودی موردنیاز مدل شامل نقشه رقومی حوضه، نقشه کاربری اراضی با مقیاس $\frac{1}{25000}$ که از شرکت آب منطقه‌ای مازندران تهیه شده است، نقشه خاک حوضه با مقیاس $\frac{1}{50000}$ (داده‌های موردنیاز خاک بر اساس نقشه جهانی خاک طبق استاندارد مدل آماده شده است) داده‌های هواشناسی حوضه و داده‌های حداقل یک ایستگاه سینوپتیک است که نزدیک به منطقه مورد مطالعه بوده و از سازمان هواشناسی استان تهیه شده است. در پژوهش حاضر از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک کیاسر و اطلاعات دبی اندازه‌گیری شده ایستگاه‌های هیدرومتری محدوده مورد مطالعه استفاده شده است. از بین پنج ایستگاه هیدرومتری موجود در محدوده مورد مطالعه، ایستگاه هیدرومتری سلیمان‌تنگه که آخرین ایستگاه در محل خروجی حوضه به سد می‌باشد، برای مطالعه حاضر به مدل معرفی شده است.

با ورود نقشه رقومی حوضه بر اساس مسیر جریان و نقطه خروجی، مرز مورد مطالعه توسط مدل مشخص و سپس بر اساس مساحت موردنظر، حوضه به ۲۵ زیر حوضه تبدیل شد (شکل ۳). اراضی و خاک با ۹۹/۹۷ درصد هم‌پوشانی وارد مدل شده‌است (شکل‌های ۴ و ۵). برای معرفی شیب حوضه از کلاسه‌بندی پیشنهادی در روش SCS استفاده شد (جدول ۱) و نقشه شیب مطابق شکل ۶ به مدل معرفی شد. اطلاعات هواشناسی نیز بر اساس ایستگاه سینوپتیک معرفی شده به مدل و نیز داده‌های روزانه ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه، وارد مدل شد. در نهایت بر اساس شدت جریان خروجی از حوضه، مدل اجرا شد.

شبیه‌سازی کند. هر پدیده‌ای که توسط مدل SWAT مورد مطالعه قرار می‌گیرد، بر پایه معادله بیلان آب می‌باشد (رابطه ۱).

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

که در آن SW_t : مقدار نهایی آب خاک، SW_0 : مقدار اولیه آب خاک، R_{day} : مقدار بارندگی در روز t ، Q_{surf} : مقدار رواناب در روز t ، E_a : مقدار تبخیر و تعرق در روز t ، W_{seep} : مقدار آب نفوذی به لایه فوقانی خاک در روز t و Q_{gw} : مقدار جریان برگشتی در روز t است.

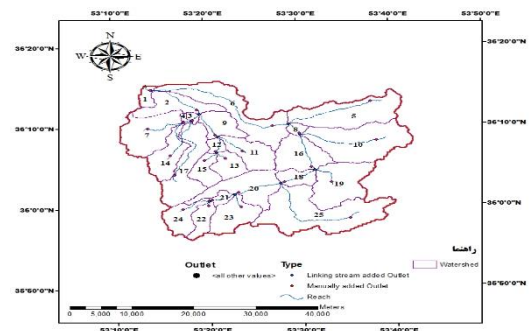
روندبایی جریان نیز به دو روش ذخیره متغیر و ماسکینگهام و رواناب سطحی با روش شماره منحنی اصلاح‌شده محاسبه می‌شود (رابطه ۲).

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

که در آن Q_{surf} : مقدار رواناب در روز t بر حسب میلی‌متر، R_{day} : مقدار بارندگی در روز t بر حسب میلی‌متر و S : پارامتر نگهداشت آب در داخل حوضه است که به صورت معادله ۳ محاسبه می‌شود:

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

که در آن CN : پارامتر خصوصیات حوضه از نظر نفوذپذیری می‌باشد.



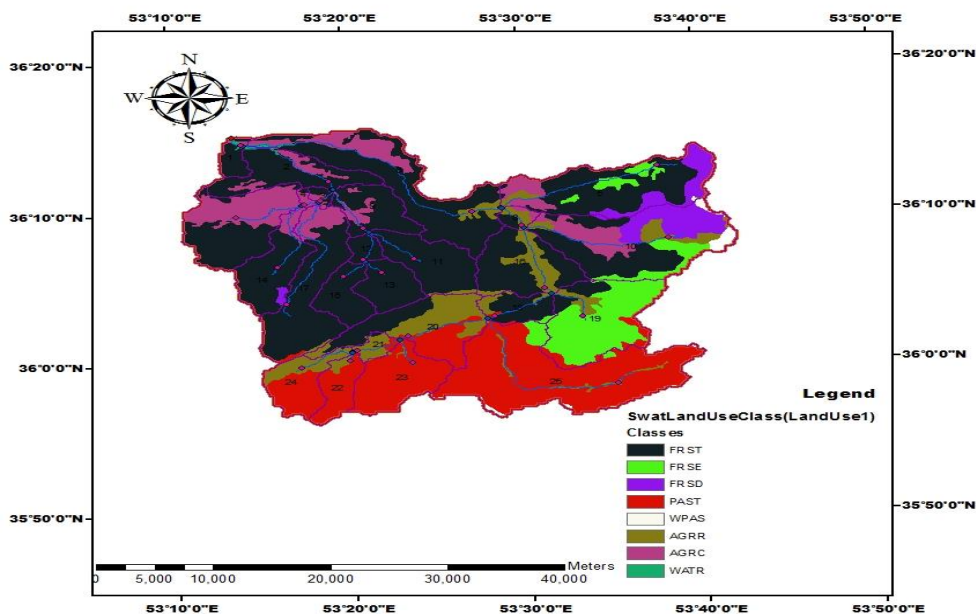
شکل (۳): تقسیم‌بندی حوضه تجن به زیرحوضه و واحدهای هیدرولوژی

سپس هر زیرحوضه به تعدادی واحدهای هیدرولوژی کوچک‌تر تقسیم شدند. نقشه‌های کاربری

آنالیز حساسیت

پارامترهای ورودی مدلی بر اساس خروجی آن از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد و به‌طور معمول با استفاده از آنالیز حساسیت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. یکی از موارد مهم مدل‌سازی حوضه آبخیز، شناختن میزان تاثیر پارامترهای مورد استفاده در مدل است که چه پارامترها و ورودی‌هایی به مقدار قابل توجهی بر سیستم خروجی مربوط به آن موثر می‌باشد. پارامترهای بسیاری در مدل SWAT برای شبیه‌سازی بارش- رواناب نقش دارند. قبل از صحت‌سنجی بر اساس حدس، با توجه به داده‌های در دسترس، داشتن

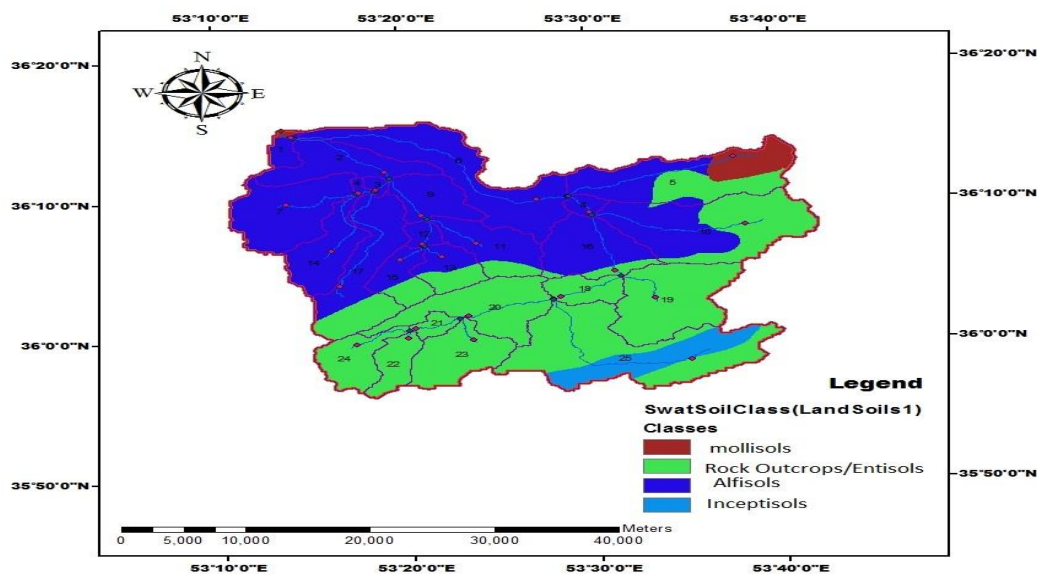
شناخت کافی از مشخصات حوضه آبریز و فرایندهای هیدرولوژی موردنظر، حائز اهمیت می‌باشد (Rouhani et al., 2007). بر اساس نتایج آنالیز حساسیت، پارامترهای انتخابی جهت شبیه‌سازی شدت جریان به مدل SWAT-CUP معرفی شد. از ۲۰ پارامتر در مرحله واسنجی استفاده شده است که با استفاده از ضرایب t-state و p-state مورد بررسی قرار گرفتند. دامنه حساسیت پارامترهای منتخب براساس t-Stat نشان می‌دهد که هر چه به عدد یک نزدیک‌تر و در p-Value، هر چه به عدد صفر نزدیک‌تر باشد دارای تاثیر بیشتری در خروجی مدل است.



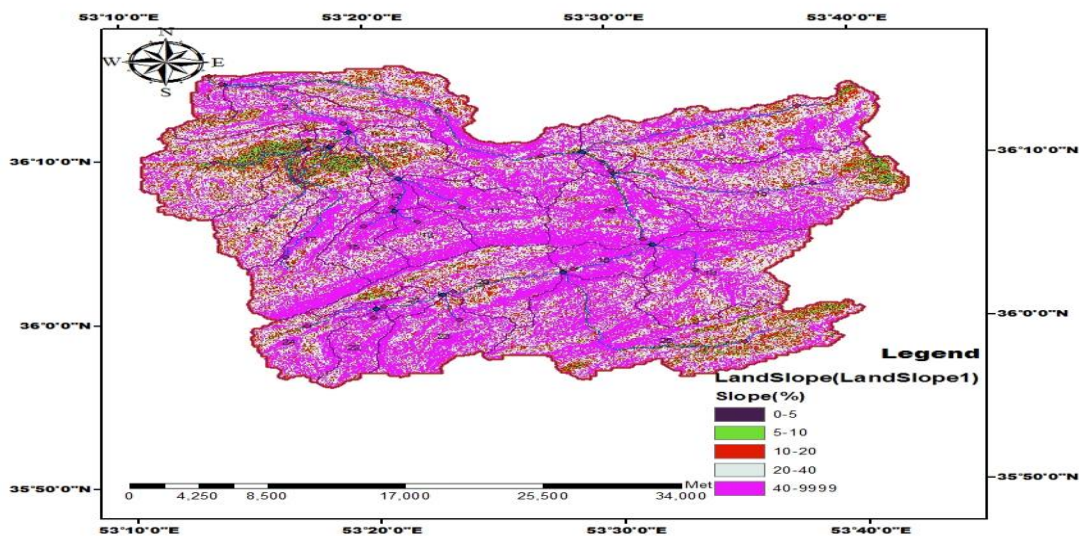
شکل (۴): نقشه کاربری اراضی حوضه تجن

جدول (۱): کلاس‌بندی شیب حوضه تجن به روش پیشنهادی SCS

| کلاس شیب | شیب (درصد) |
|----------|------------|
| ۱ | ۰-۵ |
| ۲ | ۵-۱۰ |
| ۳ | ۱۰-۲۰ |
| ۴ | ۲۰-۴۰ |
| ۵ | ۴۰< |



شکل (۵): نقشه خاک حوضه تجن



شکل (۶): نقشه شیب حوضه تجن

مدل و شبیه‌سازی جریان رودخانه، اقدام به مقایسه با جریان مشاهداتی جریان رودخانه گردید. در این مرحله مقادیر پارامترهای ورودی مدل به روش مشخص شده و هدفمند آن قدر تغییر داده شد که جریان شبیه‌سازی شده تا حد مطلوب به جریان مشاهداتی نزدیک شود. اجرای مدل هنگامی موفقیت‌آمیز تلقی می‌شود که مقدار

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

واسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و روش SUFI2 انجام گرفت. برای واسنجی مدل هفتاد درصد از داده‌های دبی مشاهداتی ایستگاه سلیمان‌تنگه برای سال‌های ۲۰۰۶-۲۰۱۲ مورد استفاده قرار گرفت. به این ترتیب پس از ورود داده‌ها به

(RMSE) و نمایه توافق (d) استفاده شد. مقدار نمایه توافق هرچه به یک نزدیکتر باشد، نشان از دقت بیشتر مقادیر شبیه‌سازی شده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (۸)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (S - O)^2}{\sum (|S - \bar{O}| + |O - \bar{S}|)^2} \right], \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (۹)$$

نتایج و بحث

بر اساس نتایج آنالیز حساسیت در جدول ۲ مشخص است که حساس‌ترین پارامترها شامل حداقل میزان ذوب برف در ۲۱ ژوئن، ظرفیت آب قابل دسترس در خاک، حداقل مقدار آب برف که مربوط به پوشش (۱۰۰٪ برف است) و متوسط دمای هوا برای بارش برف (درجه سلسیوس) می‌باشند. همچنین پارامترهای شماره منحنی در شرایط رطوبتی ۲ و چگالی خاک در حالت مرطوب دارای حساسیت کمتری می‌باشند. همان‌طور که در منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی در مقایسه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی در ماه‌های مختلف سال نشان داده شده است، اثر ذوب برف در دقت مدل به‌خوبی مشخص شده است. گلشن و همکاران (۱۳۹۳) در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز هراز با مدل SWAT در مرحله آنالیز حساسیت پارامتر V_{SMFMX} و r_{CN2} را به‌ترتیب حساس‌ترین و غیرحساس‌ترین پارامترها معین نموده‌اند. این مقایسه نشان داده است که پارامتر CN2 در این حوضه بر خلاف حوضه هراز در شبیه‌سازی از حساسیت کمتری برخوردار است.

تابع هدف به عنوان معیار اندازه‌گیری کارایی مدل، بهینه شود. پس از واسنجی، اعتبار مدل با پارامترهای به‌دست آمده در مرحله واسنجی، با استفاده از داده‌های دبی اندازه‌گیری شده که در قسمت واسنجی مورد استفاده قرار نگرفت، برای سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۵ سنجیده شد. در صورت شبیه‌سازی قابل قبول، مدل برای کاربرد قابل استفاده است (Reynard, 2003).

شاخص‌های آماری ارزیابی مدل شامل ضریب تبیین R^2 و ضریب نش-ساتکلیف می‌باشد. ضریب تبیین که مقدار آن بین ۰ تا ۱ متغیر و مقدار بهینه آن ۱ می‌باشد، طبق رابطه ۴ محاسبه می‌شود که در آن Q_0 میانگین مقادیر مشاهداتی و Q_s میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده می‌باشد.

$$R^2 = \frac{[\sum(Q_{oi} - Q_o)(Q_{si} - Q_s)]^2}{\sum i(Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2 \sum i(Q_{si} - \bar{Q}_s)^2} \quad (۴)$$

ضریب نش-ساتکلیف که مقدار آن بین ۱ تا منفی بی‌نهایت متغیر می‌باشد و کمتر از صفر غیرقابل قبول خواهد بود. اگر مقدار آن در شبیه‌سازی از ۰/۵ بیشتر شود شبیه‌سازی خوب انجام شده است و در صورت منفی شدن بهتر می‌باشد که از متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده استفاده شود (Moriasi et al., 2007). در صورتی که مقدار این ضریب از ۷۵ درصد بیشتر شود گویای نتیجه عالی شبیه‌سازی و مقادیر بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ بیانگر رضایت‌بخش بودن شبیه‌سازی می‌باشد (Geza and McCray, 2008).

$$NS = 1 - \frac{\sum i(Q_o - Q_s)^2}{\sum i(Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (۵)$$

معیار این ضریب برای جریان‌های پایین (رابطه ۶) و بالا (رابطه ۷) در یک شبیه‌سازی کامل برابر یک می‌باشد.

$$NSL = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Ln(Q_{si}) - Ln(Q_{oi})]^2}{\sum_{i=1}^n [Ln(Q_{oi}) - Ln(Q_{o1})]^2} \quad (۶)$$

$$NSH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} + Q_o)(Q_{si} + Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} + Q_o)(Q_{oi} + Q_o)^2} \quad (۷)$$

برای ارزیابی نتایج خروجی در مقایسه با مقادیر مشاهده شده از نمایه‌های ریشه میانگین مربعات خطا

جدول (۲): نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی

مدل SWAT

| Parameter Name | t-Stat | P-Value |
|----------------|--------|---------|
|----------------|--------|---------|

ثانیه و کمترین دبی برابر ۰/۴۳ مترمکعب بر ثانیه و بیشترین و کمترین دبی شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر ۱۹/۳۲ و ۰/۸۳ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. مدل SWAT-CUP دبی‌های اوج و پایه را در اکثر ماه‌ها به خوبی شبیه‌سازی نموده است. مدل دبی خروجی همه سال‌ها در ماه‌های مه و ژوئن را با دقت کمتری شبیه‌سازی نمود. رستمیان و همکاران (۱۳۷۸) نیز به بررسی رواناب و رسوب در حوضه بهشت‌آباد پرداختند و به نتایج مشابهی دست یافتند. مدل، بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه به صورت باران یا برف تقسیم‌بندی می‌کند. با توجه به ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب ماهانه ماه‌های اول سال، می‌توان نتیجه گرفت که مدل تهیه شده قادر به شبیه‌سازی کامل ذوب برف در این منطقه نبوده است و مقادیر حداکثر رواناب (که عمدتاً در اوایل بهار رخ می‌دهند) را برای این حوضه کوهستانی خوب شبیه‌سازی نکرده است. در پژوهش حاضر نیز اثر ذوب برف در این ماه‌ها بیشتر به چشم می‌خورد و با توجه به تاخیر ذوب برف نسبت به زمان و دقت پایین مدل در این مورد، نتایج حاصل از واسنجی در این ماه‌های سال با دقت کمتری صورت گرفت.

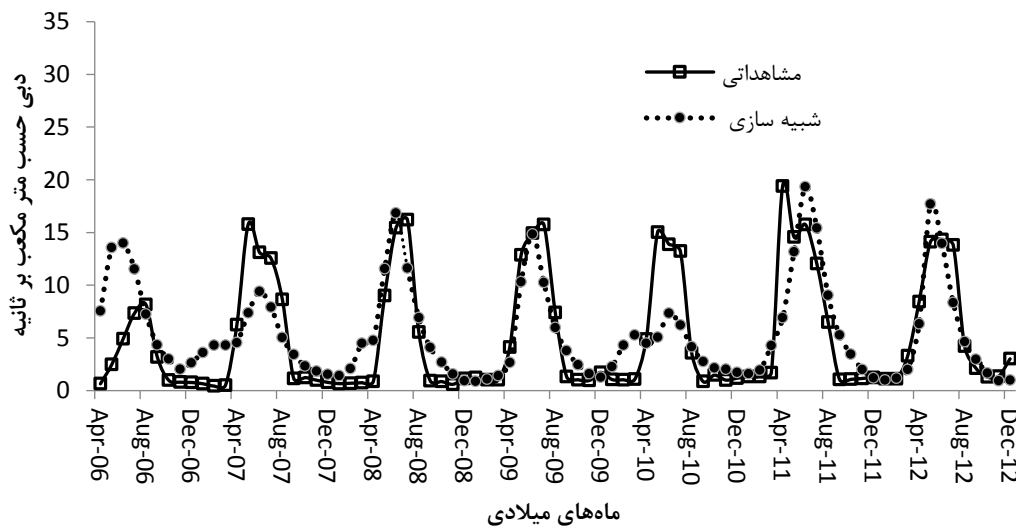
| | | |
|---------------------|-------|------|
| 11:A__ESCO.hru | -۰/۰۱ | ۰/۹۹ |
| 2:V__ALPHA_BF.gw | -۰/۰۴ | ۰/۹۶ |
| 10:R__OV_N.hru | -۰/۲۲ | ۰/۸۳ |
| 9:V__CH_K2.rte | -۰/۲۲ | ۰/۸۳ |
| 13:V__SFTMP.bsn | -۰/۴۴ | ۰/۶۶ |
| 8:V__CH_N2.rte | -۰/۴۶ | ۰/۶۵ |
| 12:R__SLSUBBSN.hru | ۰/۵۳ | ۰/۶۰ |
| 20:V__SNOCOV MX.bsn | ۰/۵۸ | ۰/۵۶ |
| 15:V__MSK_CO2.bsn | -۰/۵۹ | ۰/۵۶ |
| 4:V__GWQMN.gw | -۰/۶۳ | ۰/۵۳ |
| 5:R__SOL_AWC(1).sol | ۰/۸۳ | ۰/۴۱ |
| 19:V__SMFMN.bsn | -۱/۱۴ | ۰/۲۶ |
| 14:V__MSK_CO1.bsn | -۱/۵۱ | ۰/۱۳ |
| 18:V__SMFMX.bsn | -۱/۵۷ | ۰/۱۲ |
| 17:V__SMTMP.bsn | -۱/۹۸ | ۰/۰۵ |
| 3:V__GW_DELAY.gw | ۲/۲۹ | ۰/۰۲ |
| 6:R__SOL_K(1).sol | -۴/۶۴ | ۰/۰۰ |
| 16:V__ALPHA_BNK.rte | -۵/۵۴ | ۰/۰۰ |
| 7:R__SOL_BD(1).sol | -۷/۲۸ | ۰/۰۰ |
| 1:R__CN2.mgt | -۸/۳۶ | ۰/۰۰ |

در این پژوهش تغییرات جریان در حوضه تجن براساس ایستگاه هیدرومتری سلیمان‌تنگه توسط مدل SWAT شبیه‌سازی شده است. واسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و روش SUFI2 انجام شد. بازه زمانی هفت سال با استفاده از ۲۰ پارامتر انتخاب شده براساس حدسیات و با توجه به تحقیقات و تجربیات مطالعات مشابه دیگر و نیز مشخصات منطقه مطالعاتی مطابق جدول ۳ انتخاب شده‌اند. ۱۸ پارامتر موثر در شبیه‌سازی مطابق جدول ۴ که در آن مقادیر بیشینه و کمینه آن‌ها برای شبیه‌سازی بهتر مدل و ایجاد همبستگی بهتر بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است طی چند مرحله تغییر کرده و برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل انتخاب شده‌اند. مقدار بهینه شده این ضرایب مشخص شده و برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

شکل ۷ نتیجه ارزیابی حاصل از واسنجی مدل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که این ارزیابی برای ۸۱ داده مشاهداتی به صورت ماهانه و برای سال‌های ۲۰۱۲-۲۰۰۶ جهت شبیه‌سازی به مدل معرفی شد. بیشترین دبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری سلیمان‌تنگه برابر ۱۹/۴۱ مترمکعب بر

جدول (۳): جدول پارامترهای استفاده شده در واسنجی

| رتبه حساسیت | علامت اختصاری پارامتر در مدل | پارامتر | بیشینه | کمینه | مقدار بهینه برآزش یافته |
|-------------|------------------------------|--|--------|--------|-------------------------|
| ۱ | v__ALPHA_BF.gw | ضریب α آب پایه | ۰/۰۵ | -۰/۱۳ | -۰/۰۱ |
| ۲ | v__GW_DELAY.gw | زمان تاخیر انتقال آب از آخرین پروفیل خاک به سطح آب زیرزمین (روز) | ۲۵۴/۶۸ | ۱۱۷/۱۸ | ۲۱۴/۱۲ |
| ۳ | v__GWQMN.gw | حداقل میزان ذوب برف در ۲۱ ژوئن (mmH ₂ O/C-day) | ۱/۴۵ | -۰/۹۹ | ۱/۰۳ |
| ۴ | r__SOL_AWC(1).sol | ظرفیت آب قابل دسترس | ۰/۷۶ | ۰/۵۵ | -۰/۵۵ |
| ۵ | r__SOL_K(1).sol | هدایت هیدرولیک، خاک (mm/hr) | ۰/۴۸ | -۰/۰۱ | -۰/۲۸ |
| ۶ | v__CH_N2.rte | ضریب مانینگ رودخانه اصلی | ۰/۳۴ | ۰/۲۶ | -۰/۳۱ |
| ۷ | v__CH_K2.rte | هدایت هیدرولیکی موثر بستر رودخانه اصلی (mm/hr) | ۱۴۰/۴۳ | ۸۹/۶۱ | ۱۰۲/۰۶ |
| ۸ | r__OV_N.hru | ضریب مانینگ برای جریان سطحی | -۰/۲۲ | -۰/۳۳ | -۰/۲۶ |
| ۹ | a__ESCO.hru | ضریب تاخیر خاک | ۰/۱۹ | ۰/۱۲ | -۰/۱۶ |
| ۱۰ | r__SLSUBBSN.hru | متوسط طول (شیب) | ۰/۱۰ | ۰/۰۷ | -۰/۰۹ |
| ۱۱ | v__SFTMP.bsn | متوسط دمای هوا برای بارش برف (درجه سلسیوس) | ۳/۲۲ | ۰/۶۹ | ۱/۹۹ |
| ۱۲ | v__MSK_CO1.bsn | زمان ذخیره سازی برای جریان طبیعی | ۵/۸۶ | ۴/۰۲ | ۴/۶۶ |
| ۱۳ | v__MSK_CO2.bsn | زمان ذخیره سازی برای جریان کم | ۷/۰۰ | ۴/۶۶ | ۵/۵۴ |
| ۱۴ | v__ALPHA_BNK.rte | ضریب α آب پایه برای ذخیره ساحلی کانال | ۰/۱۳ | -۰/۰۱ | -۰/۰۷ |
| ۱۵ | v__SMTMP.bsn | دمای ذوب توده برف (درجه سلسیوس) | -۱۳/۹۷ | -۲۷/۵۸ | -۱۵/۹۴ |
| ۱۶ | v__SMFMX.bsn | حداکثر میزان ذوب برف در ۲۱ ژوئن (mmH ₂ O/C-day) | ۹/۰۴ | ۷/۷۰ | ۷/۸۹ |
| ۱۷ | r__SOL_BD(1).SOL | چگالی خاک در حالت مرطوب | ۰/۶۰ | -۰/۵۰ | -۲۶/۳۵ |
| ۱۸ | r__CN2.mgt | شماره منحنی در شرایط رطوبتی ۲ | ۰/۲۰ | -۰/۲۰ | -۰/۰۰ |
| ۱۹ | v__SMFMN.bsn | حداقل میزان ذوب برف در ۲۱ ژوئن (mmH ₂ O/C-day) | ۱۹/۶۲ | ۱۶/۱۷ | ۱۶/۹۱ |
| ۲۰ | v__SNOCOVMX.bsn | حداقل مقدار آب برف که مربوط به پوشش ۰/۱۰۰٪ برف است | ۹۷/۰۹ | ۳۷/۱۱ | ۴۷/۶۰ |



شکل (۷): منحنی دبی های مشاهداتی و شبیه سازی شده نسبت به زمان در مرحله واسنجی

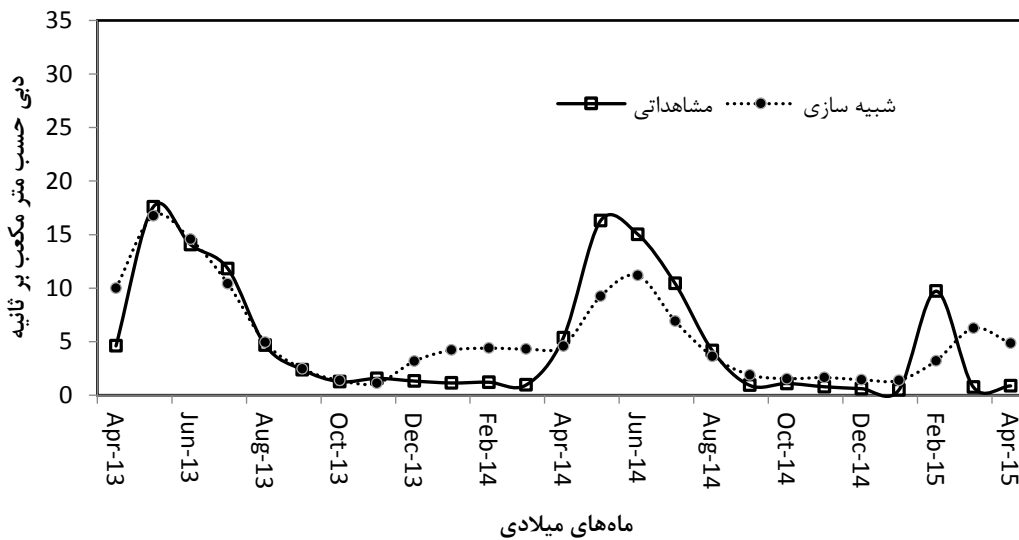
جدول (۴): پارامترهای منتخب نهایی در مرحله واسنجی به ترتیب میزان حساسیت

| مقدار بهینه برازش یافته | کمینه | بیشینه | پارامتر | علامت اختصاری پارامتر در مدل | رتبه حساسیت |
|----------------------------|--------|--------|--|---------------------------------|----------------|
| ۰/۰۱ | -۰/۱۳ | ۰/۰۵ | ضریب α آب پایه | v__ALPHA_BF.gw | ۱ |
| ۲۱۴/۱۲ | ۱۱۷/۱۸ | ۲۵۴/۶۸ | زمان تاخیر انتقال آب از آخرین پروفیل خاک به سطح آب زیرزمین (روز) | v__GW_DELAY.gw | ۲ |
| ۱/۰۳ | ۰/۹۹ | ۱/۴۵ | حداقل میزان ذوب برف در ۲۱ ژوئن (mmH ₂ O/C-day) | v__GWQMN.gw | ۳ |
| ۰/۵۵ | ۰/۵۵ | ۰/۷۶ | ظرفیت آب قابل دسترس | r__SOL_AWC(1).sol | ۴ |
| ۰/۲۸ | -۰/۰۱ | ۰/۴۸ | هدایت هیدرولیکی خاک (mm/hr) | r__SOL_K(1).sol | ۵ |
| ۰/۳۱ | ۰/۲۶ | ۰/۳۴ | ضریب مانینگ رودخانه اصلی | v__CH_N2.rte | ۶ |
| ۱۰۲/۰۶ | ۸۹/۶۱ | ۱۴۰/۴۳ | هدایت هیدرولیکی موثر بستر رودخانه اصلی (mm/hr) | v__CH_K2.rte | ۷ |
| -۰/۲۶ | -۰/۳۳ | -۰/۲۲ | ضریب مانینگ برای جریان سطحی | r__OV_N.hru | ۸ |
| ۰/۱۶ | ۰/۱۲ | ۰/۱۹ | ضریب تبخیر خاک | a__ESCO.hru | ۹ |
| ۰/۰۹ | ۰/۰۷ | ۰/۱۰ | متوسط طول (شیب) | r__SLSUBBSN.hru | ۱۰ |
| ۱/۹۹ | ۰/۶۹ | ۳/۲۲ | متوسط دمای هوا برای بارش برف (درجه سلسیوس) | v__SFTMP.bsn | ۱۱ |
| ۴/۶۶ | ۴/۰۲ | ۵/۸۶ | زمان ذخیره‌سازی برای جریان طبیعی | v__MSK_CO1.bsn | ۱۲ |
| ۵/۵۴ | ۴/۶۶ | ۷/۰۰ | زمان ذخیره‌سازی برای جریان کم | v__MSK_CO2.bsn | ۱۳ |
| ۰/۰۷ | -۰/۰۱ | ۰/۱۳ | ضریب α آب پایه برای ذخیره ساحلی کانال | v__ALPHA_BNK.rte | ۱۴ |
| -۱۵/۹۴ | -۲۷/۵۸ | -۱۳/۹۷ | دمای ذوب برف (درجه سلسیوس) | v__SMTMP.bsn | ۱۵ |
| ۷/۸۹ | ۷/۷۰ | ۹/۰۴ | حداکثر میزان ذوب برف در ۲۱ ژوئن (mmH ₂ O/C-day) | v__SMFMX.bsn | ۱۶ |
| -۲۶/۳۵ | -۰/۵۰ | ۰/۶۰ | چگالی خاک در حالت مرطوب | r__SOL_BD(1).SOL | ۱۷ |
| ۰/۰۰ | -۰/۲۰ | ۰/۲۰ | شماره منحنی در شرایط رطوبتی ۲ | r__CN2.mgt | ۱۸ |

r و v به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات نسبی (ضرب در مقادیر پارامتر به صورت درصد) و مطلق (جابجایی مقادیر پارامتر) می‌باشند.

دست آمدند (جدول ۵). با توجه به محدوده‌های مناسب معین شده برای هر کدام از معیارهای ارزیابی، این ضرایب نشان‌دهنده دقت خوب مدل SWAT در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به‌خصوص در مرحله صحت‌سنجی می‌باشد. نتایج این پژوهش با یافته‌های مرید و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد. آن‌ها در مطالعه‌ی حوضه آبریز رودخانه کردان ضرایب R^2 و N برای دوره واسنجی را به ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۷۱ و برای دوره صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۶۹ و ۰/۷ به دست آوردند. ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۳) نیز در مطالعه‌ی حوضه آبریز رودخانه دویرج در استان ایلام نشان دادند که مقادیر ضرایب NS و R^2 برای دوره واسنجی به ترتیب برابر ۰/۴۱ و ۰/۱۲ و برای دوره صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۵۶ و ۰/۶۸ می‌باشد.

در مرحله صحت‌سنجی نیز همان‌طور که در منحنی دبی نسبت به زمان (شکل ۸) نشان داده شده، شبیه‌سازی شدت جریان در ماه‌های اول سال در مقایسه با ماه‌های دیگر میلادی با دقت کمتری انجام شده است و این موضوع تاثیر اثر ذوب برف در این ماه‌ها را تایید می‌کند. با توجه به این‌که مدل در اکثر ماه‌ها شدت جریان را با دقت خوبی شبیه‌سازی کرده است می‌توان نتیجه گرفت که مدل SWAT از توانایی خوبی در شبیه‌سازی شدت جریان خروجی حوضه تجن برخوردار می‌باشد. شاخص‌های ارزیابی مدل SWAT نشان داد که در مرحله واسنجی ضریب نش-ساتکلیف برابر ۰/۵۷، ضریب تبیین ۰/۵۸، ریشه میانگین مربعات خطا ۳/۶۵ و نمایه توافق (d) برابر ۰/۸۵ در مرحله صحت‌سنجی این ضرایب به ترتیب برابر ۰/۷۰، ۰/۷۱، ۰/۰۷ و ۳/۰۹ به-



شکل (۸): منحنی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نسبت به زمان در مرحله صحت‌سنجی

جدول (۵): نمایه‌های آماری شبیه‌سازی مدل در محل خروجی حوضه آبریز بالادست سد شهید رجایی

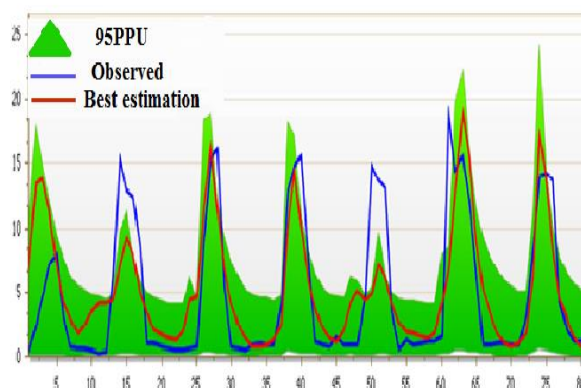
| StdDev_sim (StdDev_obs) | Mean_sim (Mean_obs) | RMSE | bR2 | NS | R ² | d | r-factor | p-factor | Variable |
|----------------------------|------------------------|------|------|------|----------------|------|----------|----------|----------|
| ۴/۵۱ (۵/۵۶) | ۵/۴۳ (۵/۰۷) | ۳/۶۵ | ۰/۳۵ | ۰/۵۷ | ۰/۵۸ | ۰/۸۵ | ۱/۴۱ | ۰/۸۵ | واسنجی |
| ۴/۲۱ (۵/۶۰) | ۵/۴۲ (۵/۱۶) | ۳/۰۷ | ۰/۴۵ | ۰/۷۰ | ۰/۷۱ | ۰/۹ | ۰/۶۹ | ۰/۴۰ | صحت‌سنجی |

شبیه‌سازی ذوب برف مناطق کوهستانی در ماه‌های اوایل سال است. همچنین دلیل دیگر بیشتر شدن باند عدم قطعیت در منحنی می‌تواند مربوط به پارامترهای موثر زیادی که برای حوضه مشخص شده است باشد. با این حال ضرایب شاخص ارزیابی محاسبه شده نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب داده‌های اندازه‌گیری ایستگاه هیدرومتری توسط مدل SWAT-CUP و وجود همبستگی مناسب بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده می‌باشد. در نتیجه مدل SWAT در حوضه تجن نیز از دقت بالایی (نمایه توافق ۰/۹) برخوردار است.

طبق شکل ۹ که در آن محور عمودی بیان‌گر مقدار جریان و همانطوری که در محور افقی شکل نشان داده شده است داده‌ها مشاهداتی بصورت ماهانه به مدل معرفی شده‌اند و تعداد آنها هشتاد عدد می‌باشد که در دوره واسنجی (سال‌های ۲۰۱۲-۲۰۰۶) مورد استفاده قرار گرفته است. این شکل نشان‌دهنده نتایج عدم قطعیت، داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده است و مشخص شده که منحنی شبیه‌سازی به خوبی در محدوده‌های عدم قطعیت قرار گرفته و فاصله بین نقاط اوج، حداقل می‌باشند. همان‌طور که در شکل مشخص شده طیف منحنی عدم قطعیت در بعضی از نقاط بیشتر نمایش داده شده است. با توجه به مطالعه اخوان و همکاران (۱۳۸۸) یکی از علل بیشتر شدن محدوده عدم قطعیت مربوط به عدم توانایی مدل در

داده‌های مشاهداتی بکار رفته در مرحله واسنجی

دبی
(m³/s)



شکل (۹): نمودار عدم قطعیت، داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT-CUP

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تغییرات جریان حوضه تجن، بالادست سد شهید رجایی در استان مازندران با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT برای دوره ۱۱ ساله شبیه‌سازی شد. جهت شبیه‌سازی جریان، نقشه‌های رقومی حوضه، نقشه خاک، کاربری اراضی و نقشه شیب به مدل معرفی شد. همچنین برای برآورد اثر پارامترهای هواشناسی، داده‌های ایستگاه سینوپتیک

کیاسر برای مدل تعریف شد. نتایج حاصل از مقایسه داده‌های دبی اندازه‌گیری شده ایستگاه سلیمان‌تنگه و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT-CUP و همچنین بر اساس معیارهای ارزیابی مشخص شده، نشان‌دهنده همبستگی مناسب بین آن‌ها در اکثر ماه‌های سال می‌باشد. در نتیجه ارزیابی مدل نشان داد که مدل SWAT برای برآورد شدت جریان در حوضه تجن ابزار مناسبی می‌باشد و از دقت قابل توجهی برخوردار است که می‌توان از آن برای برآورد جریان ورودی به سد شهید رجایی و نیز برنامه‌ریزی بهینه برای تامین نیازهای آبی استفاده نمود.

منابع

- ابراهیمی، ح.، ع. مقدم نیا، و ح. کریمی. ۱۳۹۳. مقایسه دو مدل بارش-رواناب برای شبیه‌سازی جریان (مطالعه موردی: حوزه آبریز رودخانه دویرج در استان ایلام)، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۶۹، شماره ۳، ص ۵۴۱-۵۲۹.
- اخوان، س.، ج. عابدی کویایی. س. ف. موسوی. و س. اسلامیان. ۱۳۸۸. تخمین آب آبی و آب سبز با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز همدان- بهار، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال ۱۴، شماره ۵۰، ص ۲۳-۹.
- بذرافشان، ا.، ف. رحیمی و ح. محمدی کنگرانی. ۱۳۹۵. مدیریت بهینه آب در شرایط خشکسالی، مطالعه موردی دشت سرخون، استان هرمزگان. فصلنامه مهندسی آبیاری و آب ایران، سال ششم، شماره ۲۳، ص ۱۱۷-۱۰۳.
- دولت آبادی، س. و س. م. زمردیان. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه فیروزآباد با استفاده از مدل SWAT. فصلنامه مهندسی آبیاری و آب ایران، سال چهارم، شماره ۱۴، ص ۴۸-۳۸.
- رزاقیان، ه.، ک. شاهدی و م. حبیب‌نژاد روشن. ۱۳۹۵. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوزه آبخیز بابلرود با استفاده از مدل IHACRES. فصلنامه مهندسی آبیاری و آب ایران، سال ششم، شماره ۲۶، ص ۱۷۲-۱۵۹.
- رستمیان، ر.، س. ف. موسوی. م. حیدرپور. م. افیونی. و ک. عباسپور. ۱۳۷۸. کاربرد مدل SWAT 2000 در تخمین رواناب و رسوب حوضه بهشت‌آباد از زیرحوضه‌های کارون شمالی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، شماره ۴۶، ص ۵۳۱-۵۱۷.
- زلکی بدیلی، ن.، غ. صیاد. ک. حمادی. س. اخوان و ع. عبدی. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز سد مارون (ایدنک) با استفاده از مدل SWAT، مجله علمی کشاورزی، جلد ۳۵، شماره دوم، ص ۳۶-۲۵.
- غلامی، ع.، ک. شاهدی. م. حبیب‌نژاد روشن. م. وفاخواه. و ک. سلیمانی. ۱۳۹۵. ارزیابی کارایی مدل نیمه توزیعی SWAT در شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای (مطالعه موردی حوضه آبخیز تالار استان مازندران)، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۸، شماره سوم، ص ۴۷۶-۴۶۳.

قدوسی، م.، م. دلاور و س. مرید. ۱۳۹۳. اثر تغییرات کاربری اراضی بر هیدرولوژی حوضه آبریز آجی‌چای و ورودی آن به دریاچه ارومیه. تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۵، شماره دوم، ص ۱۳۳-۱۲۳.

گلشن، م.، ع. کاویان، ح. روحانی، و ا. اسمعیلی عوری. ۱۳۹۳. واسنجی چند ایستگاهی رواناب حوضه آبخیز هراز با مدل SWAT، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۶، شماره ۲، ص ۳۰۳-۲۹۳.

مرید، ر.، م. دلاور، و س. ایگدری. ۱۳۹۴. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان محیط زیستی رودخانه با استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی - مطالعه موردی رودخانه کردان، محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران، دوره ۶۹، شماره چهارم، ص ۱۱۲۷-۱۱۰۹.

همت‌جو، م. و ش. ایوبی. ۱۳۹۱. بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی حوضه آبخیز شاخه اصلی زاینده رود به کاربری مطلوب از نظر تولید رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT2005. تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۳، شماره چهارم، ص ۳۵۱-۳۴۳.

Cheng, C. H., Y. C. Yang, R. Ryan, Q. Yu and E. Brabec. 2017. Assessing climate change-induced flooding mitigation for adaptation in Boston's Charles River watershed, USA. *Landscape and Urban Planning*, 167: 25-36.

Geza, M. and J. E. McCray. 2008. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. *Journal of Environmental Management*, 88: 393-406.

Jayakrishnan, R., R. Srinivasan, C. Santhi and J. G. Arnold. 2005. Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrological Processes*, 19: 749-762.

Kalumba, M and E. Nyirenda. 2017. River flow availability for environmental flow allocation downstream of hydropower facilities in the Kafue basin of Zambia. *Physics and Chemistry of the Earth*, S1474-7065(16): 30021-3.

Moriassi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van lieuw, R. L. Bingener, R. D. Harmel and T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900.

Patil, A. and R. Ramsankaran. 2017. Improving streamflow simulations and forecasting performance of SWAT model by assimilating remotely sensed soil moisture observations. *Journal of Hydrology*, S0022-1694(17): 30735-7.

Reynard, N. S. 2003. Impact of climate change on flood flows in river catchments – interim report.

Rouhani, H., P. Willems and J. Feyen. 2007. Analysis of parameter sensitivity and uncertainty of the SWAT hydrological model. *Hydrological Science and Technology*, 23: 191-2002.



Simulation of Outflow Time Series at Shahid Rajaei Dam using SWAT model

Sedighe Nikkhoo Amiri¹, Mojtaba Khoshnavesh², Reza Norooz Valashedi³

Abstract

Increasing global temperature and its impacts on the water cycle as well as increasing population growth are problems that nowadays focus on better resource consumption and better management for accurate planning to meet future needs. Various hydrological models such as the water and soil assessment (SWAT) model are used to solve this problem. In this study, changes in the outflow of Tajan basin from 2005 to 2015 were simulated using the SWAT model. Then, the results were calibrated, verified and uncertain analysis using SWAT-CUP software using flood measurements at Solomon Strait station and SUI2 algorithm. Then, the results were calibrated, verified and uncertain analysis using SWAT-CUP software using outflow measurements at Soleymantange station and SUFI2 algorithm. The accuracy of the SWAT model was evaluated in the simulation of the outflow using the parameters of P-factor, R-factor, Nash-Sutcliffe coefficient (NS) and correlation coefficient (R2). The values of NS and R2 for the calibration stage were 0.57 and 0.58, respectively, and in the validation stage were 0.7 and 0.71, respectively, that indicating a good correlation between the observational and the simulation data. The uncertainty results showed that the simulation curve was well arranged in the uncertainty range, and the distance between the peak points was minimum, in other words, the maximum discharge was simulated with high accuracy (the coefficient of agreement equal to 0.8). Therefore, the SWAT model is a suitable tool for simulation of flow rate in the Tajan basin.

Keywords: Flow Changes, Sensitivity Analysis, Simulation of Flow, SWAT-CUP, Validation.

¹ MSc student of Irrigation and Drainage, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, Email: nikkhoo.s@yahoo.com

² Associate professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, Email: khoshnavesh_m24@yahoo.com (Corresponding author)

³ Assistant Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, Email: rezanorooz@yahoo.com