نشریه علمی- پژوهشی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management Science & Engineering

سال دوازدهم- شماره ۴۳- زمستان ۱۳۹۷

Vol. 12, No. 43, Winter 2019

کاربرد مدل نیمه‌توزیعی SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه حبله‌رود

علیرضا حبیبی[۱] و مسعود گودرزی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۳

چکیده

رواناب ناشی از ریزش نزولات جوی در اقلیم‌های نیمه‌خشک سیلاب‌های خطرناکی ایجاد می‌نماید. امروزه از روش‌های متعددی برای پیش‌بینی جریان آب ناشی از سیل برای مدیریت بحران استفاده می‌شود. جامع‌ترین مدل پیوسته و نیمه‌توزیعی در سطح حوزه آبخیز استفاده از مدل ارزیابی خاک و آب (SWAT) می‌باشد. این مدل توانایی شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در مقیاس‌های زمانی مختلف روزانه، ماهانه و سالانه با استفاده از طیف وسیعی از اطلاعات فیزیکی حوضه‌ها (خاک، کاربری اراضی و شیب) و هم‌چنین اطلاعات هواشناسی (بارندگی، درجه حرارت، باد، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی) با قابلیت اتصال به سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) را دارد. در این پژوهش با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT اقدام به شبیه‌سازی رواناب در مقیاس زمانی ماهانه در حوضه حبله‌رود استان سمنان با مساحت ۳۲۰۰ کیلومتر مربع شد. برای شبیه‌سازی رواناب پس از بازدید میدانی و تهیه اطلاعات پایه اقدام به شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل SWAT برای یک دوره سی ساله (۲۰۱۱-۱۹۸۱) شد. سپس در محیط SWAT-CUP اقدام به واسنجی مدل برای یک دوره هفت ساله و صحت‌سنجی چهار ساله (۲۰۱۱-۱۹۹۸) شد. برای ارزیابی مدل نیز از معیارهای آماری ضریب تعیین، ضریب کارایی ناش ساتکلیف استفاده شد. شاخص ناش ساتکلیف برای تخمین دبی رواناب در مرحله واسنجی ۰/۷۴ و صحت‌سنجی ۰/۶۳ بوده که نشان از دقّت قابل پذیرش مدل بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی است. رتبه‌بندی پارامترهای حساس از بین ۳۲ پارامتر با انجام تحلیل حساسیت در محیط برنامه SWAT-CUP با روش T-Stat و P-Value مشخص شد. نتایج نشان داد که پارامترهای SFTMP،SMTMP، GW_DELAY، ESCO بیشترین حساسیت را در سطح حوضه حبله‌رود دارند.

کلید واژه‌ها: *رواناب ماهانه، حساسیت‌سنجی، صحت‌سنجی، حبله‌رود*

مقدمه

مدل‌های هیدرولوژی قادر به شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی سطح زمین به‌منظور بهبود مدیریت منابع آب هستند [۴]. مدل‌های بارش-رواناب یکی از روشهای تخمین رواناب و همچنین ابزاری مناسب برای مطالعه فرآیندهای هیدرولوژیکی و ارزیابی منابع آب میباشند. دو کاربرد مهم مدلهای بارش-رواناب عبارتند از پیشبینی سیلاب و شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز [۵]. در مدل‌سازی حوزه‌های آبخیز با توجه به زیاد و گسترده بودن داده‌های مکانی و توصیفی، انجام هرگونه عملیات مدیریتی مانند طرح‌های توسعه منابع آب و عملیات حفاظتی بسیار مشکل و زمان‌بر است، چون که جمع‌آوری این داده‌ها که اغلب با فرمت‌های گوناگونی هستند بسیار مشکل می‌باشد. بنابراین با وجود این مشکلات و با توجه به ویژگی‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) که می‌توان به ضرورت استفاده از مدل‌هایی مانند مدل SWAT که قابلیت اتصال به نرم‌افزارهای GIS را دارند پی برد. امروزه به‌جز مدل‌سازی راه‌حل دیگری برای درک فرآیندهای بهم پیوسته و چندگانه در یک حوزه آبخیز وجود ندارد. جهت بررسی فرآیندهای هیدرولوژیک در حوزه آبخیز مدل‌های متعددی وجود دارند که فقط برخی از آنها قابلیت اتصال به نرم‌افزارهای GIS را دارند. مدل سوات (SWAT) از پر کاربردترین این مدل‌ها می‌باشد. مدل SWAT یک مدل جامع در زمینه مطالعات آب و خاک است که می تواند در برنامه‌ریزی های کلان برای اراضی وسیعی مورد استفاده قرار گیرد. توانایی این مدل در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی پیچیده حوزه‌های آبخیز در محیط GIS این مدل را نسبت به مدل های یکپارچه که در آنها واحدهای کاری بزرگتر مبنای عمل هستند، متمایز ساخته است[۲]. این مدل در مقیاسهای زمانی روزانه و ساعتی قابل اجرا بوده و از قابلیت شبیه‌سازی تمام مؤلفه‌های بیلان آب برخوردار می‌باشد[۳] . امروزه در دنیا مطالعات بسیاری با استفاده از مدل SWAT صورت

۱- نویسنده مسئول و محقق، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، پست الکترونیک:
habibi1354@yahoo.com

۲- استادیار پژوهشکده حفاظت خاک وآبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

Archive of SID

www.SID.ir

گرفته است. لی و همکاران [۶] در تحقیق خود درحوزه‌ای در غرب آفریقا با استفاده از مدل SWAT نشان دادند که تغییر مناطق با کاربری جنگل، مرتع و بوته‌زار به اراضی کشاورزی و یا مناطق شهری باعث تغییر شرایط هیدرولوژی طبیعی در یک حوزه آبخیز می‌شود و نتیجه این تغییر به صورت افزایش در حجم رواناب سطحی، کاهش تغذیه منابع آب زیرزمینی و آب پایه رودخانه‌ها می‌باشد. عباسپور [۱] با استفاده از مدل SWAT اقدام به شبیه‌سازی تمام پروسه‌های مؤثر بر کمیت آب، رسوب و بارهای مواد مغذی در حوضه تور با مساحتی حدود ۱۷۰۰ کیلومترمربع واقع در شمال شرق کشور سوئیس نمودند. میشرا و همکاران[۱۲] با استفاده از مدل SWAT اقدام به شبیه‌سازی رواناب و روسوب در مقیاس زمانی روزانه و ماهانه در یک حوضه کوچک در کشور هند نمودند. مقادیر ضریب R^2 و ضریب ناش ساتکلیف برای رواناب روزانه در دوره واسنجی مدل به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۷۰ تعیین شد و برای رواناب ماهانه در دوره واسنجی مدل، مقادیر این دو ضریب ۰/۹۹ تعیین شد. در دوره اعتبارسنجی مقادیر ضریب R^2 وضریب ناش ساتکلیف برای رواناب روزانه به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۶۰ و برای رواناب ماهانه ۰/۹۲ و ۰/۸۸ تعیین شد. آنها از این مطالعه نتیجه گرفتند که مدل در دوره اعتبارسنجی مقادیر شبیه‌سازی شده را بیشتر از مقادیر مشاهداتی برآورد میکند و در روندیابی حجم رواناب سطحی به خصوص در مقیاس روزانه دارای دقت کمتری نسبت به دوره واسنجی میباشد. رستمیان [۱۵] از مدل SWAT برای تخمین رواناب و رسوب در حوزه بهشت آباد در کارون شمالی استفاده نمودند. نتایج مدل برای متوسط رواناب ماهیانه در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی بسیار رضایتبخش بود به طوری که مشخص شد مدل در شبیه‌سازی رواناب خیلی بهتر از رسوب عمل کرده است. شول و همکاران[۱۶] به منظور تخمین مؤلفه‌های منابع آب در سطح زیرحوضه‌ای در آفریقا و در مقیاس زمانی ماهیانه از مدل SWAT استفاده کردند که بطور کلی نتایج مدل خوب و در تعدادی از شبیه‌سازی‌ها عدم قطعیت زیاد بود. خیااوبو [۱۷]طی مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWAT در یک حوضه واقع در ایالت ایندیانای آمریکا به این نتیجه رسید که نوع پوشش زمین و تغییرات آن تأثیر مستقیمی بر میزان رواناب و رسوب خرجی از حوضه دارد. فرامرزی و همکاران [۷] با استفاده از مدل SWAT مؤلفه‌های منابع آب قابل دسترس شامل آب آبی و آب سبز در مقیاس کشوری و استانی را برای کل ایران بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که عملیات آبیاری تأثیر چشم‌گیری در دقت محاسبه بیلان آب دارد، به طوری که بدون در نظر گرفتن آبیاری مقدار تبخیر و تعرق خیلی کمتر از میزان واقعی آن محاسبه میشود. جی یونگ [۱۱] برای گسترش و آزمایش یک مدل بارش رواناب زیرساعتی از مدل SWAT استفاده نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که نسخه زیر ساعتی مدل SWAT یک ابزار مناسب برای مطالعات ارزیابی آلودگی منبع غیرنقطه‌ای می‌باشد. حسینی [۱۰] در طی یک پژوهش مدل SWAT را از بین ۱۵ مدل هیدروکلیماتولوژیکی بعنوان مدل مناسب برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه انتخاب کرد. ائرینگ و همکاران [۱۴] با استفاده از مدل SWAT در یک حوضه وسیع با مساحت ۱۱۱۰ کیلومتر مربع واقع در جنوب غربی فرانسه به شبیه‌سازی رواناب و رسوب در این حوضه پرداختند که نتایج مطالعه آنها نشان داد مدل SWAT توانایی شبیه‌سازی مناسب رواناب و رسوب را در حوضه های بزرگ داراست. سامرلوت و همکاران[۱۷] با استفاده از یک مطالعه مقایسه‌ای دقت سه مدل هیدرولوژیکی SWAT، HIT[1] و RUSLE2[2] را در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه‌ای با شاخصهای آماری P-factor و R-factor با هم مقایسه نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل SWAT با P-factor برابر ۰/۵۱ و R-factor برابر ۰/۳۱ از بیشترین دقت در بین ۳ مدل برخوردار است. مورتی و همکاران [۱۳] با استفاده از مدل SWAT به شبیه‌سازی بیلان آبی حوضه کن[3] در کشور هند پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشانگر مناسب بودن مدل SWAT در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در این حوضه می‌باشد. حسینی [۹] شبیه‌سازی بیلان آبی حوزه آبخیز قره‌سو استان کرمانشاه را با استفاده از مدل ارزیابی آب و خاک SWAT بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از این حوضه، به صورت ماهیانه انجام داد. نتایج حاصل از پژوهش وی کارآیی مناسب مدل SWAT در شبیه‌سازی بیلان آبی و بررسی اثرات اقدامات مختلف مدیریتی و یا تغییرات اقلیمی بر دبی جریان در حوزه آبخیز قره‌سو را نشان داد. حسینی و اشرف [۱۰] در تحقیقی در منطقه طالقان ایران نشان دادند که مدل SWAT برای دوره‌های سالانه و ماهانه کارایی مناسبی در شبیه‌سازی رواناب دارد اما برای دوره‌های روزانه از مطلوبیت خوبی برخوردار نیست. هدف از انجام این پژوهش شبیه‌سازی رواناب در حوضه حبله‌رود توسط مدل SWAT در مقیاس زمانی ماهانه و بررسی و ارزیابی نتایج مدل با استفاده از شاخص‌های آماری منتخب در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی تعیین شده در مطالعه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

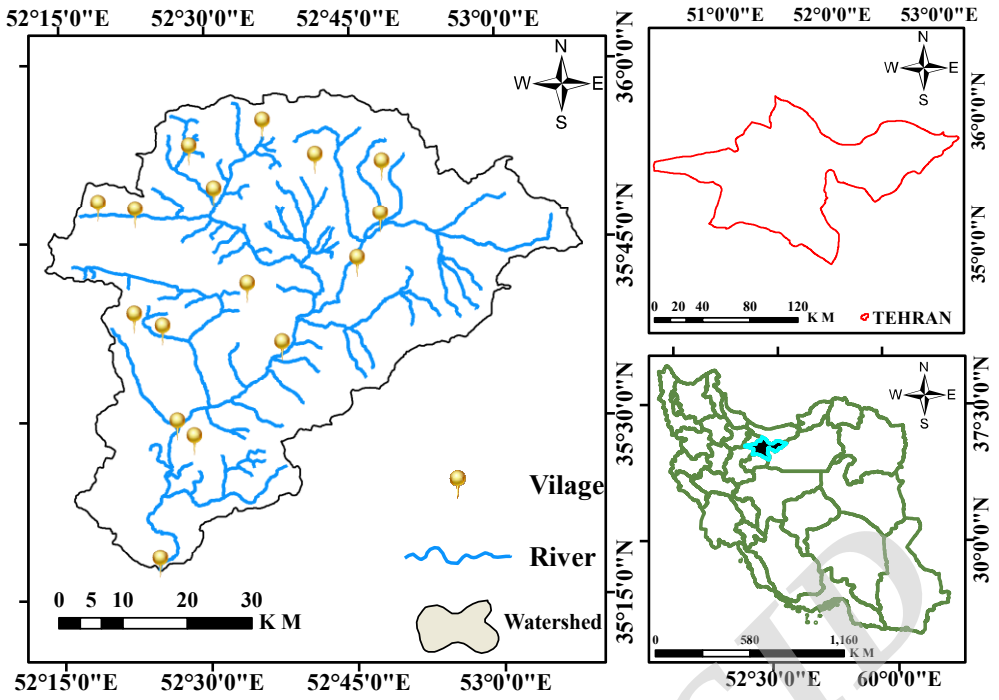
منطقه مورد مطالعه

حوضه حبله‌رود در حاشیه جنوبی البرز مرکزی بین ۵۲ درجه۱۲دقیقه تا ۵۳ درجه و ۹ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. از نظر تقسیمات کشوری در استان تهران و شهرستانهای فیروزکوه و نمرود قرار گرفته است (شکل ۱). مساحت حوضه مورد مطالعه بیش از ۳۲۰۰ کیلومتر مربع است. بلندترین نقطه ارتفاعی این حوضه ۴۰۰۳ متر و حداقل ارتفاع آن کمتر از ۱۰۰۰ متر از سطح دریا است.

حوزه آبخیز حبله‌رود شمالی در محدوده مورد مطالعه قرار گرفته است. از نظر فرسایش آبراهه‌ای دارای فرسایش با شدت زیاد و

1- High Impact Targeting
2- Revised Universal Soil Loss Equation
3- Ken

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱- موقعیت حوضه مورد مطالعه در ایران

Figure 1. Location of the study Watershed in Iran

خیلی زیاد است. حوضه حبله‌رود دارای چهار ایستگاه رسوب‌سنجی مهم شامل دلیچای، سیمین‌دشت، فیروزکوه و نمرود است. مهم‌ترین ایستگاه رسوب‌سنجی در خروجی حوضه با دوره آماری بلند مدت دبی (۱۳۹۰-۱۳۲۷)، ایستگاه بنکوه می‌باشد. حداکثر دمای میانگین ۲۴/۷ درجه و حداقل مطلق دما ۹/۶- در ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه ثبت شده است. واحدهای زمین‌شناسی این حوزه در محدوده زمانی پرکامبرین تا کواترنری قرار دارند و مربوط به سازندهای کهر، بایندر، زایگون، لالون، مبارک، الیکا، شمشک، دلیچای، لار، تیزکوه، کند، کرج، فاجان، زیارت، قرمز تحتانی، قم، قرمز فوقانی، کهریزک، آبرفت تهران و سنگ‌های ولکانیکی دوره چهارم می‌باشند. سنگ‌شناسی غالب عبارت از آهک، مارن، شیل و ماسه‌سنگ، توف و آبرفت است.

حبله‌رود پرآب‌ترین رودخانه جنوب البرز در استان سمنان و از رودخانه‌های دائمی استان به طول ۲۴۰ کیلومتر می‌باشد که از دامنه کوه‌های سایو و شاه محمد قله و هما در ۳۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان فیروزکوه در استان تهران سرچشمه می‌گیرد و به نام رودخانه گورسفید به‌سوی دامنه شمالی کوه ماراب جاری می‌شود بنابراین حوضه آبریز اصلی آن در خارج از استان سمنان واقع شده است. این رود منبع اصلی آب کشاورزی شهرستان گرمسار بوده و تأثیر مهمی در اقتصاد و آبادانی منطقه دارد. حبله‌رود پس از آبیاری گرمسار، به دشت کویر منتهی می‌شود. این رود دارای شاخه‌های شور و شیرین متعددی است. از شعبات مهم این رود نمرود و رشید سلطان است که اولی دارای آب شیرین و دومی دارای آب شور است. بیش از نیمی از آب حبله‌رود توسط نمرود تأمین می‌شود. در این مطالعه به‌منظور شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل SWAT در مقیاس زمانی ماهانه از یک دوره آماری ۳۰ ساله استفاده شد. این آمار شامل داده‌های رواناب ماهیانه ایستگاه هیدرومتری و داده‌های بارندگی، درجه حرارت و سایر اطلاعات هواشناسی روزانه ایستگاه‌های هواشناسی و سینوپتیک انتخابی در حوضه مورد بررسی، می‌باشد. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.

نتایج

در این مطالعه از سه نقشه شیب، کاربری اراضی و خاک برای تعریف واحد پاسخ هیدرولوژیکی استفاده شد. به‌همین‌منظور، ابتدا در حوضه حبله‌رود نقشه‌های شیب، کاربری اراضی و خاک تهیه شد. سپس پایگاه اطلاعاتی نقشه‌های تولیدی برای شناسایی توسط مدل ارائه شدند. علاوه بر آن، از داده‌های بارش و دما برای شبیه‌سازی استفاده شد. مرتفع‌ترین ناحیه در این محدوده با ارتفاع ۴۰۲۲ متر از سطح دریا در حد شمالی منطقه و در قله کوه میشینه مرگ واقع در شمال منطقه لزور قرار گرفته است. کم‌ارتفاع‌ترین ناحیه واقع در اطراف گرمسار با ارتفاع ۸۳۰ متر از سطح دریا می‌باشد. حوزه آبخیز حبله‌رود در محدوده دو نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ از سری نقشه‌های سازمان جغرافیایی ارتش تحت عنوان نقشه تهران و سمنان به‌ترتیب N۱۳۹-۳ و N۱۳۹-۴ قرار گرفته است. از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه‌های وکتوری دیجیتال ۱:۲۵۰۰۰ سازمان

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری حوضه حبله‌رود

Table 1. Specifications of meteorological and hydrometric stations in Hablehrood Basin

Elevation ارتفاع	Long. عرض جغرافیایی	Lat. طول جغرافیایی	Station ایستگاه
2250	52/79	35/63	پیرده pirdeh
1495	42/49	35/52	سیمین دشت Simindasht
2150	52/51	35/77	علی آباد Aliabad
2165	52/75	35/83	جلیزجند Jlizjand
1975	52/52	35/55	فیروزکوه Firouzkoh
1995	52/79	35/79	امیریه Amiriyeh
1665	52/63	35/59	انزها Anzaha
2330	53/02	35/71	چنداب Chandab
2420	52/37	35/78	نجفدر Najafdar
2100	52/37	35/64	سیدآباد Saidabad
1040	52/43	35/30	بنکوه Bonkouh
2465	51/53	35/45	آبعلی Abali

نقشه‌برداری کشور به‌منظور تهیه لایه مدل رقومی ارتفاع (DEM[1]) با دقّت ۵۰×۵۰ متر با روش درون‌یابی در محیط برنامه ARCGIS10.2 استفاده شد.

براساس اطلاعات محاسبه شده توسط نگارندگان، حوضه مورد مطالعه کوهستانی با شیب‌های تند می‌باشد. بیش از ۴۳ درصد از سطح حوضه در طبقه ارتفاعی ۲۵۰۰-۲۰۰۰ متر قرار گرفته است. بیش‌ترین شیب بالای ۴۰ درصد است که ۷۴۵ کیلومترمربع از سطح حوضه می‌باشد. کمترین طبقه ارتفاعی ۹۷۰-۱۵۰۰ متر با مساحت ۱۱,۲۶۳ کیلومتر مربع می‌باشد. شیب کم‌تر از ۱۰ درصد حدود ۳۴ درصد از حوضه برابر با ۱۱۱۰ کیلومتر مربع را شامل می‌شود و طبقات ارتفاعی حداکثر حوضه در ستیغ‌ها بیش از ۳۵۰۰ متر برابر با ۵۳ کیلومتر مربع می‌باشد. شیب‌های ۱۰ تا ۲۰ درصد که برای کشاورزی مناسب بوده ۵۵۸ کیلومتر مربع از کل حوضه تقریباً ۳۲۰۰ کیلومتر مربعی را اشغال کرده است. بیش‌ترین سطح حوضه را مراتع تشکیل داده که پتانسیل مناسبی برای تکثیر گیاهان دارویی و دام‌پروری می‌باشند.

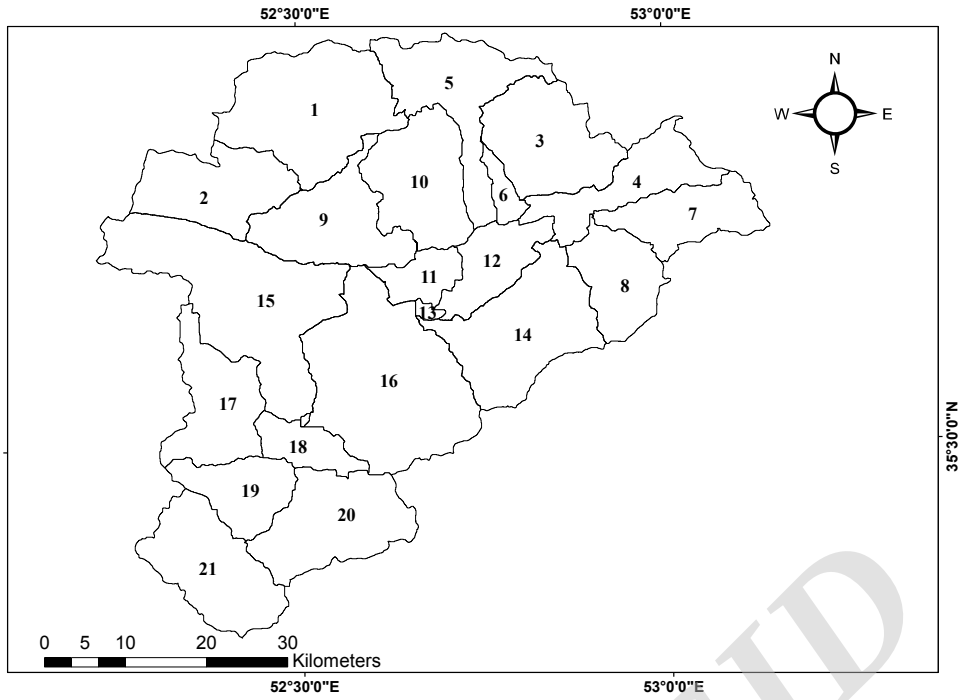
در این تحقیق از نقشه کاربری اراضی تهیه شده توسط پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری برای کل کشور استفاده با استفاده از تصویر ETM+ سال ۲۰۰۲ پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به‌منظور تهیه نقشه کاربری اراضی برای کل کشور استفاده شد. پس از زمین مرجع نمودن تصاویر ماهواره‌ای ۲۰۰۲ و انطباق آن با تصاویر ماهواره‌ای لندست ۲۰۱۳ با کد گذر ۳۵-۱۶۳ و ۳۵-۱۶۴ از پایگاه داده‌ای سازمان جغرافیایی ایالت متحده[2] دانلود و در محیط نرم‌افزارENVI[3] موزائیک نموده و اصلاحات هندسی تصاویربا روش گره‌ای (Tie Point) همراه با کنترل زمینی (G C P) با میزان خطای کمتر از یک پیکسل انجام شد. سپس تصاویر نهایی وارد محیط ARCGIS10.2 شد. ابتدا روی تصویر یک طبقه‌بندی نظارت نشده اعمال شد و با نقشه‌های کاربری تعیین شده در پژوهشکده آبخیزداری به‌دقّت مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه، با استفاده از الگوریتم آماری تصادفی به کمک بازدید صحرایی و GPS مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. نوع کاربری در هر نقطه تعیین شد و با

1- Digital Elevation Model

2- Earthexplorer.usgs.gov/http://earthexplorer.usgs

3- Environment for Visualizing Images (ENVI)

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲- نقشه زیرحوضه‌های ترسیم شده در مدل SWAT

Figure 7. The map of the sub-basins drawn in the SWAT model

انتقال به محیط GIS نقشه کاربری‌های حوضه حبله‌رود با تصویر ماهواره ای ۲۰۱۳به‌روز شده ارائه شد. بازدید میدانی هم نشان داد که قسمت عمده اراضی آبی و باغات در طرفین رودخانه و سرشاخه‌ها وجود دارد. ترکیب گیاهی زراعت‌ها و باغات در مناطق مختلف حوضه متفاوت بوده و ترکیبات گیاهی باغات در نوار رودخانه‌های بسیار محدود و عموماً شامل غلات، علوفه، سیب زمینی، قلمستان‌های بید و تبریزی و باغات سیب و باغات گردو است. در جنوب حوضه که هوا معتدل‌تر بوده، کشت پنبه همراه با باغات انار و زنجبر وجود دارد. دشت‌های وسیع و حاصلخیز مساحت زیادی ندارد. در دشت فیروزکوه زراعت غلات، علوفه، دانه‌های روغنی، سیب‌زمینی و باغات سیب توام با قلمستان‌های بید و تبریزی موجود است.

برای تحلیل وضعیت خاک از داده‌های جمع‌آوری شده، توسط موسسه تحقیقات خاک و آب استفاده شد. نقشه خاک بر اساس نقشه خاک ایران تهیه شده است که به‌صورت فایل از رده‌های خاک وجود دارد. با توجه به وسعت زیاد منطقه از اطلاعات جهانی همگن شده خاک (HWSD) و نقشه‌های سازمان خواربار و کشاورزی جهانی (FAO[1]) که دربرگیرنده اطلاعات تعداد زیادی از پارامترهای خاک برای ۵۰۰۰ نوع خاک در سطح جهان بوده استفاده شد. از گزارش خاکشناسی مهندسین مشاور رویان (گزارش حبله‌رود سازمان جنگل‌ها) که دارای پروفیل نمونه‌برداری خاک در سطح حوضه حبله‌رود بوده، نیزاستفاده گردید. اطلاعات خاک در قسمت پایگاه اطلاعاتی به مدل SWAT معرفی شد.

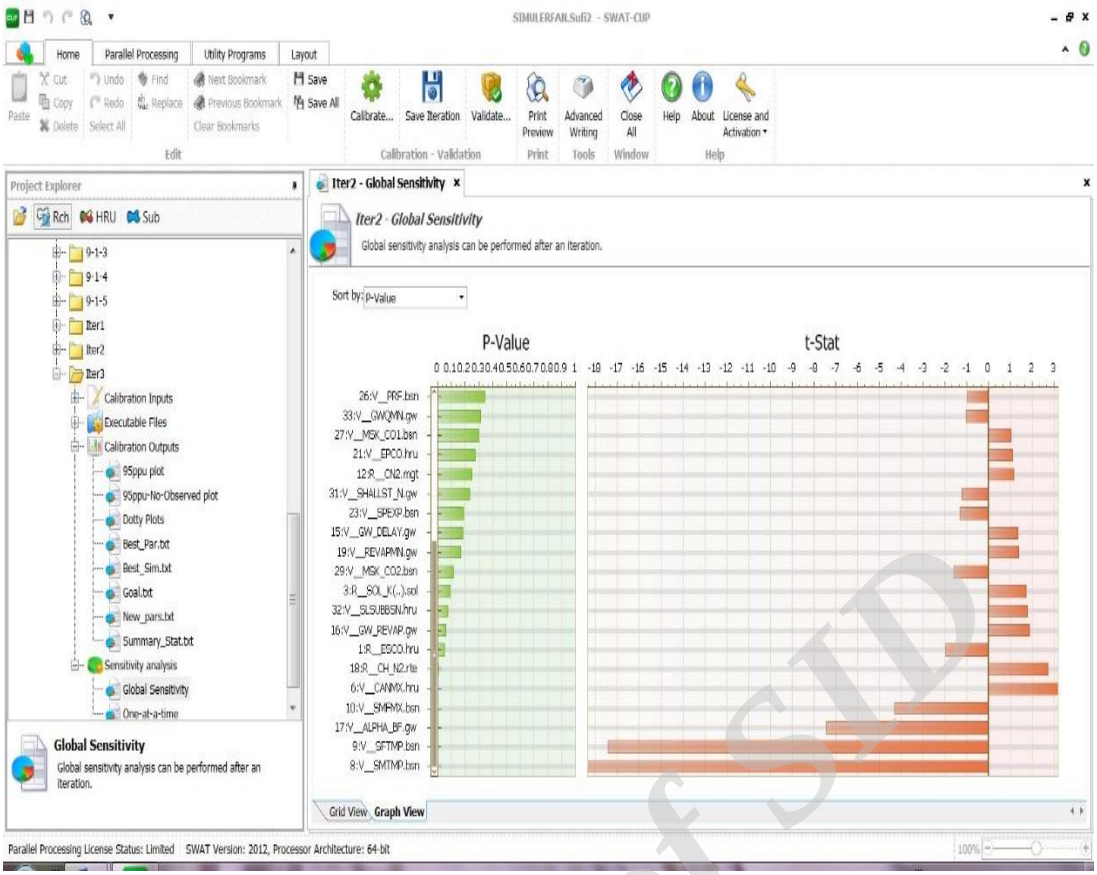
در مدل SWAT برای معرفی مرز حوزه آبخیز و شبکه آبراهه‌ای از دو روش می‌توان استفاده کرد. یا باید موارد گفته شده توسط خود مدل و با استفاده از مدل ارتفاع رقومی منطقه ترسیم شود، و یا این‌که به‌صورت دستی آماده شده و به مدل ارائه شود. در این تحقیق این نقشه با استفاده از خود مدل تهیه شد. برای این‌منظور پس از تعریف پروژه در محیط ARC_SWAT که به‌صورت یک اکستنشن به محیط ARC_GIS به شکل الحاقیه اضافه شده است. با دستورWATERSHED_ DELINEATION و معرفی DEM به مدل و تعریف خروجی حوضه می‌باشد. در این تحقیق ایستگاه بنکوه خروجی حوضه بوده با توجه به وسعت حوزه آبخیز مورد مطالعه تعداد ۲۱ زیرحوضه برای آن ترسیم شد. تصویر زیرحوضه‌های ایجاد شده در شکل ۲ قابل مشاهده است.نسخه‌های مختلفی از مدل SWAT ارائه شده که تفاوت چندانی در کارایی آن‌ها وجود ندارد.

در این تحقیق نسخهArc SWAT 2012.10_2.15 که به‌صورت نرم‌افزار قابل نصب روی Arc GIS 10.2 می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت. برای شروع کار با مدل ابتدا نقشه DEM و نقشه‌های زیرحوضه‌ها و شبکه آبراهه‌ای که قبلاً آماده شده بودند، به محیط نرم‌افزار مدل فراخوانده شدند. در این مرحله محدوده آبخیز و زیرحوضه‌ها و خصوصیات فیزیکی آبخیز توسط مدل محاسبه شد.

در مرحله بعد با استفاده از نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و طبقات شیب، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تعریف شدند. برای این‌کار دو نقشه اول از قبل آماده شده بودند و نقشه طبقات شیب نیز در منوی HRU_Analysis با استفاده از نقشه DEM در

1- Food Agriculture Organization

Archive of SID
www.SID.ir



شکل۳- بررسی حساسیت پارامترها با دو روش t-stat و p_value در مدلSWAT-CUP

Figure 10. Sensitivity analysis of parameters with two methods t-stat and p_value

چهار طبقه شیب ۵-۰، ۱۰-۵، ۲۰-۱۰، ۴۰-۲۰ و بالاتر از ۴۰ درصد تهیه شدند. سپس هر سه نقشه با هم در محیط نرم‌افزار مدل ترکیب شدند. در فرآیند ترکیب در هر سه نقشه پلی‌گون‌هایی که سطحی کمتر از ۱۰ هکتار داشتند در پلی‌گون‌های اطراف خود ادغام شدند. حاصل کار این مرحله، تشکیل ۲۱ واحد پاسخ هیدرولوژیکی بود. لازم به ذکر است هر سه نقشه پایه اشاره شده در فرمت رستری و با اندازه سلول‌های ۵۰ در ۵۰ متر تهیه و در مدل استفاده شده‌اند. پس از تهیه نقشه واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی، داده‌های هواشناسی وارد مدل شدند. در این مرحله در منوی Write Input Tables مشخصات ۳ ایستگاه مرجع یعنی ایستگاه‌های سینوپتیک گرمسار، فیروزکوه و آبعلی به همراه مشخصات و داده‌های ۲۱ ایستگاه باران‌سنجی (۱۴ ایستگاه قابل قبول) و ۸ ایستگاه مربوط به دما به‌عنوان Weather Station مدل معرفی شدند. سایر اطلاعات مورد نیاز به‌صورت دستی و در جدول‌های نرم‌افزار وارد شدند. پس از این مرحله با دستور RUN SWAT در منوی SWAT Simulation مدل اجرا شد. مدل برای سال‌های ۲۰۱۱-۱۹۹۸ به مدت ۱۴ سال اجرا شد که سه سال اول آن برای گرم شدن[1] مدل استفاده شد که نتایج از Read SWAT Output استخراج شد.

مدل‌های پیچیده هیدرولوژیک مانند SWAT نیازمند پارامترهای زیادی برای ارائه توزیع مکانی خصوصیات حوضه می‌باشند. زیرا واسنجی تمامی پارامترها امکان‌پذیر و قابل توجیه نیست. تحلیل حساسیت در تشخیص بهتر پارامترهای با تاثیرگذاری بیش‌تر بر خروجی مدل کمک می‌کند. بدین‌صورت که تحلیل حساسیت با بررسی شدت تغییرات در خروجی مدل با توجه به ورودی مدل، تشخیص می‌دهد که در کجا تغییرات بزرگ‌تری رخ می‌دهد که نشان‌دهنده حساسیت مدل می‌باشد (شکل ۳).

پارامترهایی که حساسیت بیشتری دارند، باید برای واسنجی استفاده شوند، و تا جایی‌که معیارهای عملکرد اجازه دهند، تصحیح شوند. سودمندی و مورد اعتماد بودن یک مدل حوضه بستگی به این دارد که چگونه واسنجی و سپس اعتبارسنجی شود. واسنجی شامل انتخاب و تصحیح پارامترهای تأثیرگذار مدل است تا زمانی‌که خروجی‌های شبیه‌سازی بر مشاهدات واقعی منطبق شود. اعتبارسنجی شبیه واسنجی است که در آن داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای مقایسه می‌شوند، هر چند که تصحیح هیچ پارامتری انجام نمی‌شود و مقایسه داده‌ها در سری‌های زمانی متفاوتی می‌باشد

2- warm up

Archive of SID
www.SID.ir

یا شرایط محیطی است که متفاوت از دوره واسنجی است. نهایتاً اعتبارسنجی اعتمادپذیر بودن مدل واسنجی شده را برای استفاده در داده‌های مستقل تعیین می‌کند. در SWAT - Arc امکانات مستقلی برای تحلیل حساسیت و عملیات واسنجی در نظر گرفته شده است. اما به‌منظور صرفه جویی در وقت و بهبود کیفیت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت در نتایج مدل از برنامه SUFI2، در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP استفاده شده است [۱] .

فرایند ارزیابی کارایی مدل نه تنها در جریان توسعه مدل و فرایند واسنجی، بلکه در زمان ارائه نتایج به سایر محققین نیز از اهمیت اساسی برخوردار است. شاخص‌های مختلفی برای این منظور ارائه شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.برای ارزیابی کمی عملکرد مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی از شاخص‌های آماری ضریب تبیین R^2 و نش- ساتکلیف (NS) استفاده شد.

ضریب تبیین (R^2):

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (۱)$$

که در آن، n تعداد مشاهدات، O_i و P_i مقادیر متناظر مشاهده شده و پیش‌بینی شده، $\bar{O}$ و $\bar{P}$ نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده می‌باشند. ضریب همبستگی نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده تا چه میزان به حداکثر مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و از صفر تا یک تغییر می‌کند.

ضریب نش-ساتکلیف (NS): توابع هدف مختلفی برای بهینه‌سازی مدل در این نرم‌افزار وجود دارد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \overline{Q_m})^2} \quad (۲)$$

رابطه فوق که در آن، O مقدار دبی اندازه‌گیری شده و P مقدار دبی شبیه‌سازی شده می‌باشد.

تابع هدف نش- ساتکلیف (NS) از مهم‌ترین توابع بوده که توسط بسیاری از هیدرولوژیست‌هادر مدل‌سازی حوزه‌های آبخیز استفاده می‌گردد. کاربرد آن برای مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای (به‌ویژه در مقیاس ماهانه و سالانه) نسبت به سایر توابع هدف بیش‌تر توصیه شده است. مقدار NS از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است و نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب یک (خط با شیب ۱:۱) هماهنگی دارد.

تاکنون هیچ معیار خاصی به‌طور دقیق در مورد مقادیر مناسب برای این پارامتر ارائه نشده است. اما به‌طور کلی اگر شاخص نش- ساتکلیف بیش‌تر از ۰/۷۵ باشد، مدل عالی و کامل، و اگر بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ باشد، رضایت‌بخش و اگر کم‌تر از ۰/۳۶ باشد، غیرقابل قبول فرض می‌شود [۱].

میانگین مربعات خطا:

معیار بسیار معمول برای بدست آوردن بهترین برآوردگر، که در بین آماردانان از مطلوبیت خاصی برخوردار است، میانگین توان دوم خطا یا به اختصار MSE است. استفاده از MSE برای اولین بار، را به گاوس ریاضیدان آلمانی نسبت می دهند.با استفاده از این معیار، برآوردگری که دارای کمترین MSE باشد انتخاب می شود. واضح است که اگر تعداد برآوردگرها متناهی باشد، انتخاب بین آنها کار نسبتاً ساده‌ای است. در صورتی‌که امکان یافتن یک برآوردگر که در یک رده نامتناهی از برآوردگرها، به طور یکنواخت دارای کمترین MSE باشد، غالباً غیر ممکن است. مناسبات عملی، عقاید سنتی و راحتی محاسبات ریاضی باعث شده اند تا از MSE معیاری بسیار معمول ومتداول ساخته شود .

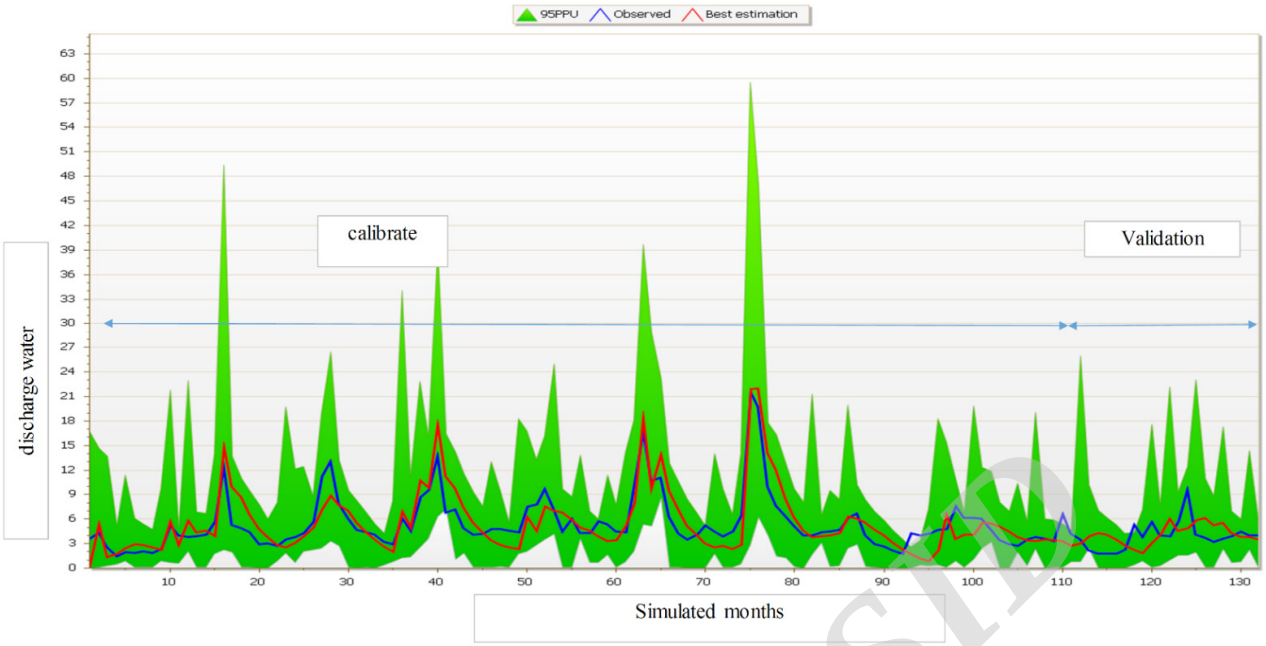
$$MSE = \frac{\sum_{i=1} e_i^2}{n} \quad (۳)$$

در این روابط ، n ، تعداد پیش‌بینی‌ها و e_i خطای پیش بینی است که از تفاوت مقادیر پیش بینی شده و مقادیر واقعی به دست می‌آید. در برنامه SUFI2 حساسیت پارامترها با استفاده از دو معیار T-Stat و P-Value تعیین می‌شود. معیار P-Value نشان‌دهنده اهمیت حساسیت پارامتر است که هرچه معیار به صفر نزدیکتر باشد، پارامتر برای مدل مهم‌تر است. و معیار T-Stat اندازه حساسیت را نشان می‌دهد که هرچه بزرگتر باشد، حساسیت پارامتر بیشتر می‌باشد. در برنامه، SUFI2 در ابتدا با پیش فرض یک محدوده بازه بزرگ برای پارامترها (حد بالا و پایین این دامنه را بر اساس تجربیات، آزمایش‌ها و یا اندازه‌گیری‌های انجام شده در مطالعات قبلی و منابع علمی انتخاب می‌شود) و یک محدوده عدم قطعیت زیاد برای پارامترها شروع به کار می‌کند. عدم قطعیت خروجی مدل به وسیله عدم قطعیت تخمین ۹۵ درصد که در سطح ۲/۵ و ۹۷/۵ درصد تابع توزیع متغیرخروجی که با روش نمونه‌برداری لاتین هایپرکیوب از دامنه مذکور نمونه‌برداری می‌شود، محاسبه می‌شود. به همین‌ترتیب، در گام‌های بعدی با اصلاح محدوده پارامترهای ورودی و کوچک‌تر کردن این محدوده به سمت کوچک نمودن محدوده PPU ۹۵و جواب یکتا پیش می‌رود. در این برنامه، دامنه پارامترهای گام قبل با توجه به محاسبات ماتریس تحلیل حساسیت (براساس معادله ژاکوبین) و معادله ماتریس حسیان تصحیح میشود .محدوده پارامترها به گونه‌ای تصحیح می‌شوند که محدوده مجاز پارامترهای جدید همیشه کوچکتر از محدوده قبلی است، به‌طوری‌که این روند به سمت بهترین شبیه سازی پیش می‌رود [۱].

در پژوهش حاضر، واسنجی مدل در مقیاس ماهانه بر اساس مقادیر مشاهده‌ای دبی جریان به‌ترتیب ۱۰۸ ماه طی دوره آماری ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۸ و صحت‌سنجی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ با استفاده از نرم‌افزار SWATCUPانجام شد. در شکل ۴ نتایج واسنجی و اعتبارسنجی دبی رواناب برای ایستگاه بنکوه در خروجی حوضه حبله‌رود و در جدول ۲نتایج معیارهای ارزیابی مدل آورده شده است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۴- رواناب شبیه‌سازی شده در ایستگاه بنکوه در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 4. Simulated runoff at Bonkouh Station in results of calibration and verification steps

جدول ۲- ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

Table 4. Performance evaluation of the model in the calibration and verification steps

Calibration واسنجی			Verification صحت‌سنجی		
معیار ارزیابی Evaluation criterion	مشخصه Characteristic	مقدار رواناب Runoff value	معیار ارزیابی Evaluation criterion	مشخصه Characteristic	مقدار رواناب Runoff value
ضریب نش- ساتکلیف Nash Sutcliffe coefficient	NS	0/74	ضریب نش- ساتکلیف Nash Sutcliffe coefficient	NS	0/63
ضریب تعیین Coefficient of determination	R2	0/83	ضریب تعیین Coefficient of determination	R2	0/72
میانگین مربعات خطا Mean Square Error	MSE	3/12	میانگین مربعات خطا Mean Square Error	MSE	3/9

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳-مقادیر بهینه پارامترهای حساس حاصل از اجرای مدل SWAT

Table 5 - Optimal values of sensitive parameters resulting from the implementation of SWAT model

Optimal parameter value (Runoff) مقدار بهینه پارامتر (رواناب)	Parameter description توصیف پارامتر	Parameter نام پارامتر
19/22	دمای هوا برای بارش برف (درجه سلسیوس) Snowfall temperature	SFTMP
13/24	درجه حرارت ذوب برف Snow melt base temperature	SMTMP
243/34	زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل خاک به سطح آب زیرزمینی (روز) Groundwater delay (days)	GW_DELAY
0/059	ضریب تبخیر خاک Soil evaporation compensation factor	ESCO
0/124	ظرفیت آب قابل‌دسترس در لایه خاک Available water capacity of the soil layer	SOL_AWC
797/13	هدایت هیدرولیکی خاک (mm/hr) Saturated hydraulic conductivity	SOL_K
0/61	ضریب تأخیر زمانی برای دمای توده برف Snow pack temperature lag factor	TIMP
0/29	ضریب مانینگ رودخانه اصلی Manning's "n" value for the main channel	CH_N2
96/36	هدایت هیدرولیکی موثر بستر رودخانه اصلی (mm/hr) Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	CH_K2
13/9	ضریب تأخیر رواناب (روز) Surface runoff lag time	SURLAG
80/97	شماره منحنی SCS runoff curve number	CN2
0/59	ضریب زبری دامنه Manning's "n" value for overland flow	OV_N
1/57	شیب متوسط هر HRU Average slope steepness	HRU_SLP

بحث و نتیجه‌گیری

ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی رواناب تشان داد ضریب کارایی ناش_سا تکلیف و ضریب همبستگی ۰/۷۴ و۰/۸۳ دارای دقت قابل قبولی می‌باشند.در مرحله صحت‌سنجی با یک تکرار نشان می‌دهد که مدل به‌خوبی توانسته برای سال‌های صحت‌سنجی با ضریب ۰/۶۳و ۰/۷۲ نتایج خوبی ارائه نماید. این نتایج رضایت‌بخش بوده و روند کاهش ضرایب قابل‌قبول هست. در این تحقیق مقادیر بهینه پارامترهای حساس بعد از واسنجی از بین ۳۲ پارامتر با انجام تحلیل حساسیت در محیط برنامه SWAT-CUP[1] با روش t-stat وp-value حساس‌ترین پارامترهای مدل مشخص‌شده است در جدول ۳ مقادیر پارامترهای حساس در بهترین حالت واسنجی آورده شده است. بعد از واسنجی مدل SWAT، مقدار بهینه پارامترهای مورداستفاده استخراج شد و در پایگاه اطلاعاتی مدل وارد و مدل در مرحله اعتبارسنجی اجرا شد. سپس، مقادیر رواناب ۲۱ زیر حوزه آبخیز حبله‌رود از روی جداول خروجی برنامه SWAT محاسبه شد. در این مطالعه اقدام به شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل SWAT برای یک دوره سی‌ساله (۲۰۱۱-۱۹۸۱) شد. سپس در محیط SWAT-CUP اقدام به واسنجی مدل برای یک دوره هفت‌ساله و صحت‌سنجی چهارساله (۲۰۱۱-۱۹۹۸) شد. برای ارزیابی مدل از معیارهای آماری ضریب کارایی نش سا تکلیف و ضریب تعیین شد. شاخص نش سا تکلیف برای تخمین دبی رواناب در مرحله واسنجی ۰/۷۴ و صحت‌سنجی ۰/۶۳ بوده که نشان از دقّت قابل‌پذیرش مدل بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی است. رتبه‌بندی پارامترهای حساس از بین ۳۲ پارامتر با انجام تحلیل حساسیت در محیط برنامه SWAT-CUP با روش T-Stat و P-Value مشخص‌شده است. بررسی حساسیت پارامترها با دو روش ذکرشده در مدل SWAT-CUPنشان داد که SMTMP، SFTMP بیشترین حساسیت را در سطح حوضه حبله‌رود دارند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش می‌توان

1- SWAT _CUP

Archive of SID
www.SID.ir

از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب در مقیاس زمانی ماهانه در حوضه حبله‌رود، برای برنامه‌ریزی‌های منابع آبی و اقدامات مدیریتی لازم در این حوضه به‌خوبی استفاده نمود. هم‌چنین بررسی و ارزیابی کاربرد این مدل در شبیه‌سازی سایر مؤلفه‌های بیلان آبی مؤثر در حوضه در پایه‌های زمانی مختلف دیگر (روزانه و یا سالانه) می‌تواند ازجمله موضوعات مطالعات پیشنهادی آتی باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و همکارانی که در این تحقیق تحت عنوان "بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر کمیت و کیفیت رودخانه حبله‌رود با استفاده از مدل SWAT" با کد مصوب ۹۶۰۱۰۵-۰۰۱-۲۹-۲۹-۲ مشارکت داشته‌اند اعلام می‌دارند.

منابع

1. Abbas pour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/ alpine Thur watershed using SWAT Journal of Hydrology, 333: 413-430.

2. Akbari, H. 2011. Daily Runoff Simulation in Chehel Chai River in Golestan Province using SWAT Model. Master of Science thesis, 120 pages. (In Persian).

3. Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. and Williams, J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. Journal of the American Water Resource Association. 34: 73–89.

4. Dovonec, E. 2000. A physically based distributed hydrologic model, Master of Science Thesis, the Pennsylvania State University.185 p.

5. Emerson, C.H., Welty, C. and Traver, R.G. 2003. Application of HEC- HMS to model the additive effects of multiple detention basins over a range of measured storm volumes, Civil Engineering Database, Part of world water & Environmental Resources Congress 2003 and Related Symposia. 228pp.

6. Li, K.Y., M.T. Coe, N. Ramankutty and R. De Jong. 2007. Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. Journal of Hydrology, 337: 258-268.

7. Faramarzi, M., Abbas pour, K.C., Schulin, R. and Yang, H. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. Hydrological processes, 23: 486–501.

8. Hosseini, M. 2010. Effect of Land use Changes on Surface runoff and Suspended Sediment Yield of Taleghan Catchment, Iran. PhD Thesis. Putra University, Malaysia.

9. Hosseini, M., 2014, Water balance simulation of Garahsou basin of Kermanshah province by using SWAT model. Journal of Watershed Engineering and Management, 6: 63–73. (In Persian).

10. Hosseini, M. and Ashraf, M.A. 2015. Application of the SWAT Model for Water Components Separation in Iran. Springer, 97-98.

11. Jeong, J., Kannan, N., Arnold, J., Glick, R., Gosselink, L. and Srinivasan, R. 2010. Development and integration of the rain and assessment sub-hourly rainfall-runoff.

12. Mishra, A., Froebrich,j, and Gassman, P.W. 2007. Evaluation of the SWAT Model for Assessing Sediment Control Structures in a Small Watershed in India. Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 50: 469−477.

13. Marti, P.S., Pandey, A. and Suryavanshi, S. 2014. Application of semi-distributed hydrological model for basin level water balance of the Ken basin of Central India. Hydrological Processes, 28: 4119-4129.

14. Oeurng, C., Sauvage, S. and Sanchez-Perez, J.M. 2011. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. Journal of Hydrology, 401: 145-153.

15. Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S.F., Heidarpour, M., Jalalian, A. and Abbas pour, K.C. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. Journal of Hydrology, 53: 977-988. (In Persian).

16. Schuol J., Abbas pour, K.C, Yang, H., Srinivasan, R. and Zehnder. A.J.B. 2008. Modelling blue and green water availability in Africa. Water Resources Research, 44: 1-18.

17. Sommerlot, A., Nejadhashemi, A., Woznicki, S., Giri, S. and Prohaska, M. 2013. Evaluating the capabilities of watershed-scale models in estimating sediment yield at field-scale. Journal of Environmental Management, 127: 227-236.

18. Xiaobo, J. 2008. Impacts of land cover changes on runoff and sediment in the Cedar Creek Watershed, Joseph River Indiana, United States. Journal of Mountain Science, 5: 113-121

Archive of SID
www.SID.ir