Archive of

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی ،معماری،عمران ومحیط زیست

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در شبیه سازی رواناب مطالعه موردی: حوضه آبخیز الشتر

سمانه فردی[۱]

۱- کارمند شهرداری، منطقه ۵، تهران

F.engineer63@gmail.com

چکیده

مدل SWAT، مدلی در مقیاس حوضه آبریز می‌باشد. این مدل برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی- کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در دراز مدت طراحی‌شده است. هدف اصلی در این پژوهش، آزمون کارایی مدل ارزیابی SWAT و قابلیت استفاده از آن به عنوان شبیه‌ساز جریان و استفاده از نرم افزارهای SWAT-CUP و الگوریتم SUFI2 برای واسنجی و اعتبارسنجی حوزه آبخیز الشتر لرستان می باشد. حوضه الشتر از شاخه‌های فرعی رود کشکان از زیر حوضه‌های کرخه در غرب کشور است. میزان بارندگی سالانه نیز در این حوضه حدود ۴۵۰ میلی‌متر است. در این پژوهش از شاخص‌های عامل P، عاملR، NS، R^2 ، MSE و SSQR به منظور ارزیابی مدل SWAT استفاده شد. از آمار رواناب ایستگاه هیدرومتری الشتر در سال های ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۱ ، با استفاده از ۷ پارامتر مهم و تأثیرگذار بر نتایج مدل‌سازی به منظور واسنجی و از سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵ برای صحت‌سنجی این حوضه به کار برده شده است. ضرایب واسنجی برای ایستگاه الشتر برای شاخص‌های عامل P، عاملR، NS، R^2 ، MSE و SSQR به ترتیب ۰,۱۳، ۰,۳۹، ۰,۶۴، ۰,۸۷، ۰,۵۱۶ و ۱۱۵ و مقادیر صحت سنجی نیز برای این حوضه به ترتیب ۰,۲۷، ۰,۵۴، ۰,۷۶، ۰,۷۶، ۰,۰۷۵، ۱۸,۰۱ به دست آمد. نتایج کلی واسنجی و صحت سنجی مدل نشان می‌دهد، مدل SWAT می تواند ابزار مناسبی در رابطه با شبیه سازی رواناب در حوضه الشتر باشد.

کلمات کلیدی: حوضه آبخیز الشتر، مدل SWAT ، واحد های هیدرولوژیک، رواناب، واسنجی و صحت سنجی

۱- مقدمه

نمایشی ریاضی از جریان آب و اجزاء آن روی بعضی بخش‌های سطح زمین یا محیط زیرسطحی" یا "یک سری فرایندهای بیولوژیک، فیزیکی یا شیمیایی که بر یک سری از پارامترهای ورودی برای تبدیل به یکسری از پارامترهای خروجی عمل می‌کنند. در طول انقلاب کمی/ رایانه‌ای در سال ۱۹۶۰، مدل‌سازی هیدرولوژیک روی رواناب سطحی، رسوب و انتقال مواد شیمیایی متمرکز شد. در دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ تمرکز به کیفیت آب سطحی، جریان زیرزمینی و انتقال آب زیرزمینی توسعه داده شد. در دهه‌های بعدی، رشد شدیدی در مدل‌سازی هیدرولوژیک مشاهده می‌شود. بعلاوه افزایش در مشکلات محیطی همچنین نقشی کلیدی در توسعه دیدگاه‌ها در مدل‌سازی هیدرولوژیک برای در برگرفتن شبیه‌سازی فرسایش خاک، انتقال رسوب، انتقال مواد شیمیایی و تأثیرات تغییر کاربری اراضی بازی کرد. دیگر قابلیت‌ها مانند پردازش داده، آنالیز آماری و تجسم

www.SID.ir

Archive of

همچنین برای توسعه ادامه دارد. سیستم اطلاعات جغرافیایی توسعه مدیریت داده و قابلیت‌های تجسمی مدل‌های هیدرولوژیک را توسعه داده است. از طرف دیگر مدل‌های هیدرولوژی به بهبود قابلیت‌های تحلیلی سیستم اطلاعات جغرافیایی کمک کرده است (نارامانگام، ۲۰۰۸).

سید قاسمی و همکاران (۱۳۸۶)، در جریان تحقیق خود با هدف ارزیابی تغییرات جریان رودخانه زاینده‌رود در اثر تغییر اقلیم، به واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT پرداختند. ایشان از نرم‌افزار SWAT که در محیط Arc View اجرا می‌شود استفاده کرده و به‌منظور برآورد و شبیه‌سازی جریان توسط مدل از داده‌های مشاهداتی روزانه در بازه زمانی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۶ برای واسنجی مدل استفاده کردند. ضریب همبستگی میانگین دبی ماهانه شبیه‌سازی‌شده توسط مدل به میانگین دبی واقعی در مرحله واسنجی با شاخص R^2 مقدار ۰/۸۳ به دست آمد. داده‌های سال‌های ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۸ برای اعتبار سنجی مدل به کار گرفته شدند و در این مرحله ضریب همبستگی داده‌های مشاهداتی با شبیه‌سازی‌شده با همان شاخص عدد ۰/۸۹ را نشان داد (سید قاسمی و همکاران، ۱۳۸۶).

اخوان و همکاران (۱۳۸۹)، به‌طور موفقیت‌آمیزی از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب و تخمین مؤلفه‌های منابع آبی(آب آبی، جریان آب سبز و ذخیره آب سبز) حوضه آبریز همدان-بهار استفاده نمودند.مدل در تخمین حداکثر جریان رواناب ضعیف بوده که نظر نویسندگان به علت استفاده مدل از فرمول SCS در محاسبه رواناب است زیرا مدل SCS نمی‌تواند به‌خوبی رواناب حاصل از ذوب برف را شبیه‌سازی کند (اخوان و همکاران ۱۳۸۹).

محمد نوقابی (۱۳۹۰)، در تحقیق خود به بررسی دبی جریان و غلظت رسوب با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز سد طرق واقع در غرب خراسان پرداخته و بیان نمود که این مدل با توجه به نتایج شبیه‌سازی رواناب و رسوب که مقادیر R^2 و NS را به ترتیب برابر ۰/۷۲ و ۰/۷۵برای رواناب و ۰/۶۰ و ۰/۵۴ برای رسوب به‌دست‌آمده بود کارایی مناسبی دارد (محمد نوقابی ۱۳۹۰).

کاویان و همکاران (۱۳۹۴)، در حوضه آبریز رودخانه هراز مازندران با استفاده از مدل SWAT رواناب و بار رسوب را در ایستگاه‌های مختلف حوضه شبیه‌سازی کردند.نتایج آن‌ها نشان‌دهنده دقت زیاد شبیه‌سازی جریان و دقت مناسب در شبیه‌سازی بار رسوب بود (کاویان و همکاران، ۱۳۹۴).

بیرهانو و همکاران (۲۰۰۷) ، از مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای در شمال تانزانیا استفاده کردند. آن‌ها برای تکمیل سری آمار هیدرولوژیکی ۱۰ ساله خود از یک مدل آماری برای تولید داده استفاده کردند. در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی نتایج کارایی مدل با ضریب R^2 به ترتیب ۸۲٪ و ۵۹٪ به دست آمدند (بیرهانو و همکاران، ۲۰۰۷)

دوان و همکاران (۲۰۰۹) از مدل SWAT برای تخمین رواناب و بار رسوبی حوضه چاوها (تأمین‌کننده عمده آب مخزن مایون به‌عنوان بزرگ‌ترین مخزن در شمال چین) استفاده نمودند. درنهایت مقادیر R^2 و NS برای رواناب و رسوب به ترتیب ۰/۸۰،۰/۹۳ و ۰/۸۱، ۰/۷۶ به دست آمد. در کل نتایج شبیه‌سازی رواناب و بار رسوبی رضایت‌بخش بودند (دوان و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین در پژوهش دیگر که این حوضه صورت گرفت اکس یو و همکاران(۲۰۰۹) از این مدل برای شبیه‌سازی مقادیر رواناب و رسوب استفاده نمودند. به‌طورکلی مدل SWAT هر دو مقدار رسوب و رواناب روزانه و ماهانه را به‌درستی شبیه‌سازی نمود و در دو ایستگاه خروجی حوضه در طول دوره واسنجی تطابق خوبی بین رواناب روزانه و ماهانه شبیه‌سازی‌شده و مقادیر مشاهده‌ای با ضریب ناش- ساتکلیف ۰/۰،۹/۶ و ضریب تعیین ۰/۷۵، ۰/۹ وجود داشت. این مقادیر برای دوره اعتبار سنجی ۰/۶، ۰/۸۵ و ۰/۶، ۰/۹بودند. راندمان شبیه‌سازی رسوب نسبت به مقدار آن برای رواناب کمتر بود.

www.SID.ir

Archive of

همچنین ضریب ناش- ساتکلیف و ضریب تعیین برای رسوب ماهانه بزرگ‌تر از ۰/۸۴ و ۰/۶ در طول دوره واسنجی و بزرگ‌تر از ۰/۸۴ و ۰/۹۵ در طول دوره اعتبار سنجی بودند(اکس یو و همکاران، ۲۰۰۹).

نتایج مطالعات گرین و وان گرینسون (۲۰۰۸) در مدل‌سازی حوضه‌های کوچک مقیاس (۴ تا ۴/۸ هکتاری) در مرکز تگزاس با استفاده از مدل SWAT2005 نشان داد که با افزایش طول دوره واسنجی مقادیر بهتری از NS و R^2 به دست می‌آید و شبیه‌سازی از دقت بالاتری برخوردار خواهد شد. به‌طورکلی SWAT2005 به‌طور مناسب شرایط هیدرولیکی و کیفیت آب را در مقیاس هر یک از حوضه‌ها با استفاده از هر دو روش واسنجی اتوماتیک و روش دستی شبیه‌سازی نمود (گرین و وان گرینسون، ۲۰۰۸).

نتایج تحقیقات سانجی کومار و وینکاتش مرواد (۲۰۰۹) در آنالیز عدم قطعیت و واسنجی مدل SWAT در ۲۴ سناریو، روی ۱۴ پارامتر و در طی هفت سال شبیه‌سازی رواناب در شمال هندوستان نشان داد که پارامترهای واسنجی شده در مقایسه با پارامترهای غیر واسنجی عدم قطعیت کمتری را نشان می‌دهند (سانجی کومار و وینکاتش مرواد، ۲۰۰۹).

هیونگ کیونگ و همکاران (۲۰۱۱) در تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی رواناب و کیفیت آب حوضه سد چانگ جو در کره جنوبی از برنامه‌های SUFI2، PARASOL و GLUE استفاده نمودند. در آنالیز حساسیت با استفاده از شاخص‌های p-value و t-stat حساس‌ترین پارامترها شماره منحنی رواناب، هدایت هیدرولیکی مؤثر بستر رودخانه اصلی و زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایه خاک به سطح آب زیرزمینی شناخته شدند(هیونگ کیونگ و همکاران، ۲۰۱۱).

فاتحی و شاهویی در سال ۱۳۹۹ به بررسی کاربرد مدل SWAT در شبیه سازی رواناب ماهانه، در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در استان کردستان پرداختند. انها به این نتیجه رسیدند که هیدروگراف شبیه سازی شده و مشاهداتی رواناب ماهانه، شاخصهای آماری محاسبه شده مدل SWAT در دوره واسنجی و هم در دوره اعتبارسنجی در مقیاس زمانی ماهانه دارای نتایج قابل قبولی در شبیهسازی رواناب می باشد(فاتحی و شاهویی، ۱۳۹۹).

منگیستا و همکاران ۲۰۱۹ در حوضه ساتلوپ، کیپ شمالی در کشور آفریقای جنوبی با مساحت ۶۷۷۰ کیلومتر مربع و اقلیم خشک و نیمه خشک اقدام به ارزیابی مدل SWAT نمودند .در این پژوهش واسنجی و اعتبارسنجی اصلی خارج از حوضه مورد نظر انجام شد .فرض بر این بود که هردو حوضه مبنا و شاهد دارای مشخصات مشابهی هستند با این حال ارزیابی عملکرد مدل از مطلوبیت قابل قبولی برخوردار بود (منگیستا و همکاران، ۲۰۱۹).

هدف از این پژوهش شبیه سازی رواناب در محدوده بالادست ایستگاه هیدرومتری الشتر در حوزه آبخیز الشتر در استان لرستان با استفاده از مدل SWATو همچنین ارزیابی و بررسی نتایج هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص های آماری منتخب در دوره های واسنجی و اعتبارسنجی تعیین شده در مطالعه می باشد.

۲-مواد و روشها

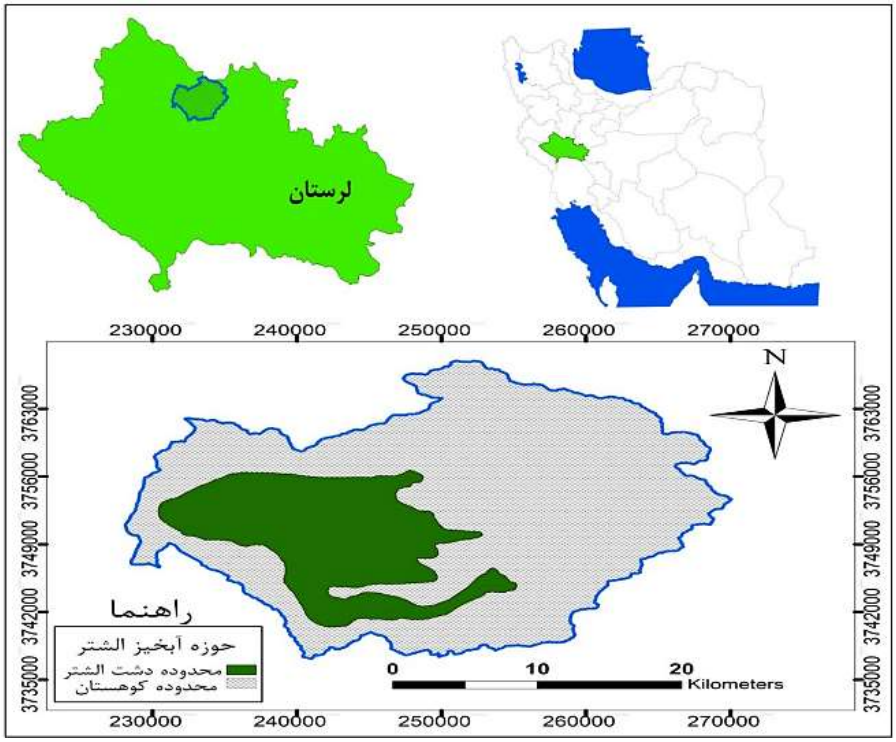
۲-۱-منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز الشتر با مساحت ۷۹۵ کیلومتر مربع در شمال استان لرستان، در غرب کشور ایران واقع شده است. از نظر ژئومورفولوژی این حوضه به دو واحد کوه و دشت تقسیم میشود. شکل (۱). دامنه تغییرات ارتفاعی آن حدود ۲۱۸۰ متر یعنی از ۱۴۵۰ متر در خروجی تا ۳۶۳۳ متر در بلندترین نقطه آن میباشد و ارتفاع متوسط دشت از سطح دریا ۱۵۸۰ متر و دارای

www.SID.ir

Archive of

اقلیم مدیترانه ای است. حوضه الشتر از شاخه‌های فرعی رود کشکان از زیر حوضه‌های کرخه در غرب کشور است. موقعیت جغرافیایی آن بین ۳۳ درجه و ۳۹ دقیقه و ۷ ثانیه تا ۳۴ درجه و دقیقه و ۵۵ ثانیه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۳۱ دقیقه و ۱ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۳۱ دقیقه و ۹ ثانیه طول جغرافیایی شرقی هست. میزان بارندگی سالانه نیز حدود ۴۵۰ میلی‌متر است. در این شهرستان، تعداد ۴۱۷ حلقه چاه برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی وجود دارد که سالانه ۷۹,۳۵ میلیون مترمکعب از منابع آب زیرزمینی دشت الشتر را مصرف میکنند. کل میزان مصرف از چشمه‌ها در این محدوده مطالعاتی حدود ۱۱,۵ میلیون مترمکعب در سال است. لازم به ذکر است که در محدوده مورد مطالعه هیچگونه چاه غیرمجازی وجود ندارد.



شکل شماره (۱). موقعیت حوضه الشتر

۲-۲-مشخصات فیزیکی حوضه

ویژگی‌های فیزیکی حوضه، بر روی ضریب رواناب، شدت و ضعف دبی سیلاب و بیلان آبی یک حوضه آبریز تأثیر فراوانی دارند. ازاین‌رو مشخصات فیزیکی حوضه الشتر در استان لرستان در جدول شماره ۱ ارائه‌شده است.

جدول شماره(۱) . مشخصات فیزیکی حوضه الشتر در استان لرستان

مساحت (km2)	محیط (km)	حداکثر ارتفاع (km)	ارتفاع متوسط (km)	حداقل ارتفاع(km)	شیب متوسط (درصد)	طول آبراهه (km)
۷۹۹/۶	۱۵۲/۷۰	۳۶۱۱	۲۱۰۴/۶	۱۵۲۶	۲۶/۱۱	۵۱/۱۴

۲-۳-وضعیت آب و هوایی و اقلیمی

استان لرستان به لحاظ اقلیم و هواشناسی یک استان چهارفصل است و دارای آب‌وهوای متنوعی است، این تنوع از شمال به

www.SID.ir

Archive of

جنوب و از شرق به غرب کاملاً محسوس است.زمستان هنگامی‌که در شمال لرستان برف و کولاک ادامه دارد قسمت‌های جنوبی آن دارای هوایی مطبوع و بارانی است. اختلاف ثبت‌شده در شهرهای استان لرستان بین حداکثر و حداقل مطلق دما بیش از ۸۰ درجه سانتی‌گراد است. حداکثر دمای ثبت‌شده ۴/۴۷ حداقل دمای مطلق ثبت‌شده ۳۵- است. میزان بارش سالانه در استان لرستان به‌طور متوسط بین ۴۰۰ تا ۴۵۰ میلی‌متر در نوسان است.

۲-۴-شبکه ایستگاه‌های سازمان هواشناسی

ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کشور شامل ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی، و ایستگاه‌های هواشناسی تابعه وزارت نیرو شامل ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی است. در حوضه الشتر یک ایستگاه سینوپتیک و یک ایستگاه تبخیرسنجی وجود دارد. جدول شماره ۲ مشخصات این ایستگاه‌ها ارائه شده است.

جدول شماره (۲). مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در حوضه آبریز الشتر

ایستگاه	کد	نوع ایستگاه	سال تأسیس	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	طول دوره آماری (سال)	نام رودخانه
دره تنگ-کهمان	۲۱-۹۵۴	تبخیرسنجی	۱۳۷۲	۱۷۲۰	۴۸°۱۵´ ۰۴"	۳۳° ۵۴' ۳۶"	۲۳	کهمان
الشتر	۴۰۷۷۶	سینوپتیک	۱۳۷۶	۱۵۶۷/۱	۴۸°۱۲´ ۲۳"	۳۳° ۴۶' ۴۲"	۲۰	دوآب الشتر

۲-۵-ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه

به‌منظور وضعیت سیلاب، رسوب و کیفیت منابع آب سطحی ایستگاه‌های هیدرومتری مورداستفاده قرار می‌گیرد. در حوضه الشتر یک ایستگاه هیدرومتری قرار دارد که مشخصات آن به‌صورت جدول شماره ۳ ارائه‌شده است.

جدول شماره ۳. مشخصات ایستگاه هیدرومتری در حوضه آبریز الشتر

ایستگاه	کد	نوع ایستگاه	سال تأسیس	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام رودخانه
الشتر	۲۱-۱۷۱	هیدرومتری	۱۳۳۳	۱۵۲۰	۴۸°۱۲´ ۰۰"	۳۳° ۴۶' ۴۸"	دوآب الشتر

۲-۶-مدل شبیه سازی SWAT

مدل SWAT، مدلی در مقیاس حوضه آبریز می‌باشد. این مدل برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی- کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در دراز مدت طراحی‌شده است. مدل SWAT، مدلی فیزیکی می‌باشد. به‌جای ضمیمه کردن روابط رگرسیونی برای تشریح روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی، این مدل نیازمند اطلاعاتی در مورد آب‌وهوا، مشخصات خاک،

www.SID.ir

Archive of

توپوگرافی، پوشش گیاهی و روش‌های مدیریت و کاربری اراضی در سطح حوضه هست. فرایندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، رسوبات، رشد گیاه، چرخه مواد مغذی و... در این مدل به‌طور مستقیم از روی پارامترهای ورودی شبیه‌سازی می‌شوند. مزایای این روش عبارت‌اند از:

الف) حوضه‌های که فاقد داده‌های برداشت‌شده می‌باشند، نیز قابل شبیه‌سازی‌اند.

ب) تأثیر نسبی اطلاعات ورودی (تغییر در روش‌های مدیریتی، آب‌وهوا و.....) بر روی کیفیت آب و متغیرهای ورودی قابل کمی کردن هستند.

مدل ازنظر محاسباتی بسیار کارآمد است. شبیه‌سازی حوضه‌های بزرگ و پیچیده را با استراتژی‌های مختلف مدیریتی بدون صرف زمان زیادی قابل‌اجرا است و کاربر را قادر به مطالعه اثر بلند مدت برخی از عوامل مانند آلودگی، فرسایش و .. می‌کند. به‌طورکلی این نکته را نیز باید مدنظر داشت که این مدل برای شبیه‌سازی‌های فرایندهای مختلف در طولانی مدت می‌باشد و برای شبیه‌سازی‌های یک واقعه (مانند سیلاب) مناسب نیست.

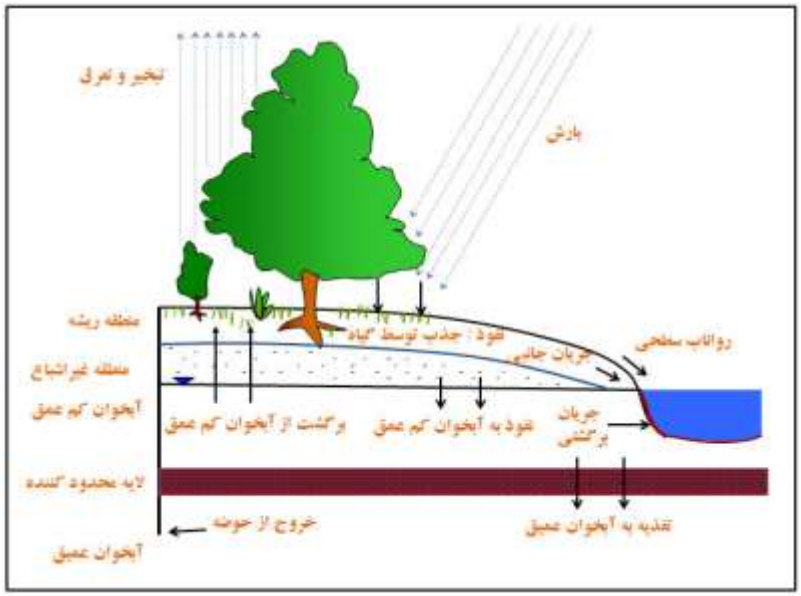
مدل SWAT یک مدل با کدباز می‌باشد. که مرتب در حال توسعه و بهبود است. این مدل دارای رابط گرافیکی قدرتمند در نرم افزارهای GIS است به‌طوری‌که اغلب داده‌ها را از این طریق دریافت می‌کند و در حال حاضر امکان استفاده از آن در نرم‌افزار ArcGis وجود دارد. مدل SWAT در شبیه‌سازی چرخه‌ی هیدرولوژیک از معادله بیلان آب (۱)، استفاده می‌کند. فرایندهای هیدرو لوژیکی که شبیه‌سازی می‌شوند شامل تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، ذوب برف، نفوذ سطحی، نفوذ عمقی و جریان آب زیرزمینی و جریان‌های زیرسطحی می‌باشد.(شکل شماره ۲). اساس مدل نیمه توزیعی SWAT بر اساس معادله بیلان آبی استوار است که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{sur} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \qquad (۱)$$

که در آن: SW_t: مقدار نهایی رطوبت خاک (برحسب میلی‌متر آب)، SW_0: مقدار اولیه رطوبت خاک (برحسب میلی‌متر آب)، t: زمان (برحسب روز)، R_{day}: مقدار بارش در روزi ام (برحسب میلی‌متر آب)، Q_{sur}: مقدار رواناب سطحی در روز i ام (برحسب میلی‌متر آب)، E_a: مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (برحسب میلی‌متر آب)، W_{seep}: مقدار نشست که در روز i ام از نیم‌رخ خاک وارد منطقه غیراشباع می‌شود(برحسب میلی‌متر آب)، Q_{gw}:مقدار آب برگشتی در روز iام (برحسب میلی‌متر آب) می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of



شکل شماره (۲). نمایش چرخه هیدرولوژیک در SWAT

۲-۷-روش تحقیق

رواناب در حوضه آبریز تحت تأثیر عوامل و پارامترهای مختلف حوضه قرار دارد. یکی از این پارامترها، کاربری اراضی است. ازجمله ، جنگل، مرتع، زراعت، مناطق مسکونی و یا تلفیقی از این کاربری‌ها هست. مدل ریاضی SWAT یکی از ابزارهای شبیه‌سازی چندمنظوره برای مدیریت حوضه‌های آبریز است. یکی از توانایی‌های مهم این مدل، شبیه‌سازی متغیرهای مختلف با توجه به تغییر کاربری‌های اراضی است (غلامی، ۱۳۸۲) . متغیرهای موردنیاز برای اجرای SWAT، بارش، دمای هوا، تشعشع خورشیدی سرعت باد و رطوبت نسبی است اگر بارش، دمای حداکثر و حداقل روزانه مشاهده موجود باشند، آن‌ها می‌توانند، به‌عنوان ورودی‌های مستقیم برای SWAT استفاده شوند. اگر پارامترهای مذکور اقلیم برای مدل موجود نباشد، مدل می‌تواند دما و بارش روزانه را شبیه‌سازی کند. تشعشع خورشیدی، سرعت باد و رطوبت نسبی روزانه همیشه شبیه‌سازی می‌شوند (آرنولد و همکاران، ۱۹۹۶).

در این پژوهش با استفاده از مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی SWAT به شبیه‌سازی بارش حوضه پرداخته می شود. برای اجرای مدل SWAT نقشه‌های کاربری اراضی، مدل رقومی ارتفاع DEM، نقشه خاک و آمار ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری لازم است. SWAT از DEM برای طراحی حوضه، مرزهای حوضه استفاده می‌کند برای این کار، قبل از انجام هر کاری نیاز به یک پایگاه اطلاعاتی قوی از خصوصیات مختلف حوضه آبریز موردمطالعه (حوضه آبریز الشتر) است.

اطلاعات موردنیاز مدل، داده‌های مدل رقومی ارتفاع، نقشه شبکه زهکشی، داده‌های خاکشناسی، کاربری اراضی و اطلاعات اقلیمی بر پایه زمانی روزانه است. متغیرهای اقلیمی موردنیاز مدل شامل بارش روزانه، حداقل و حداکثر دما، تشعشع خورشید، رطوبت نسبی و سرعت باد پایه زمانی روزانه است. این اطلاعات به‌عنوان ورودی‌هایی از فایل مقادیر مشاهده‌ای خوانده می‌شوند یا این‌که به‌وسیله مدل SWAT با استفاده از مقادیر متوسط ماهانه خلاصه‌شده در فایل ورودی مولد آب و هوایی

www.SID.ir

Archive of

(userwgn.dbf) ایجاد می‌شوند. فایل ورودی مولد آب و هوایی شامل اطلاعات آماری مورداحتیاج برای تولید داده‌های اقلیمی معرف زیر حوضه‌هاست استفاده می گردد. لذا در این تحقیق به شبیه سازی میزان بارش-رواناب در حوضه الشتر با استفاده از مدل SWAT پرداخته می شود. برای شبیه‌سازی مدل بارش-رواناب با استفاده از مدل SWAT با توجه به محدودیت‌های موجود از قبیل نقص در داده‌ها و عدم تطابق زمانی داده‌های روزانه درجه حرارت، بارندگی و هیدرومتری، یک دوره ۲۰ ساله انتخاب شد. اجرای مدل براساس گام زمانی روزانه از ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۵ صورت گرفته است. در سال اول شبیه-سازی به مدل اجازه داده شد تا با شرایط محیطی متعادل شود. واسنجی براساس سال‌های ۱۹۸۶ الی ۲۰۰۱، و صحت سنجی در طول ۴ سال بعدی انجام‌گرفته است.

۲-۸- واحدهای هیدرولوژیک (HRU)

در بیشتر حالات شبیه‌سازی‌ها در هر نوع مزرعه یا اراضی در حوضه آبریز یا حوضه رودخانه مقدور یا آسان نیست. اغلب داده‌ها ممکن است برای قسمتی از ناحیه یا خاک‌های خاص داخل زیر حوضه روی محل‌های خاصشان، موجود باشند. در این حالات تعیین محل ویژه عرصه‌های خاص و نقشه‌های خاک موجود هست، ولی مقتضی پروژه‌های اضطراری، هر عرصه نمی‌تواند تک‌تک شبیه‌سازی گردد و بایستی باهم حساب گردند. برای بررسی فرآیندهای حوضه در SWAT نیاز به تقسیم حوضه به زیر حوضه‌هایی است که این کار با تعیین حد آستانه‌ای از مساحت در واسط مدل در نرم‌افزار GIS امکان‌پذیر است. زیر حوضه‌ها به واحدهایی تقسیم می‌شوند که دارای خصوصیات مشترکی از خاک و پوشش می‌باشند. یک زیر حوضه می‌تواند به چندین واحد واکنش هیدرولوژیک (HRUs) تقسیم شود. علت استفاده از واحدهای واکنش هیدرولوژیک این است که آن‌ها از طریق یکجا کردن (lumping) تمام خاک‌ها و کاربری اراضی‌های مشابه در یک واحد مجزا، به اجزای ساده‌تر و راحت‌تر مدل به‌خصوص در حوضه‌های بزرگ کمک می‌کند (نیتسچ و همکاران، ۲۰۰۵) . لازم به ذکر است که در مفهوم واحد واکنش هیدرولوژیک این فرض وجود دارد که هیچ ارتباطی بین واحدهای هیدرولوژیک در یک زیر حوضه وجود ندارد. رواناب و هر آنچه با رواناب حمل و جابجا می‌شود، در هر واحد هیدرولوژیک به‌طور جداگانه محاسبه می‌شود و سپس مجموع آن‌ها برای زیر حوضه لحاظ می‌شود. اگر ارتباط (اندرکنش) یک مساحت کاربری اراضی در منطقه با دیگری مهم باشد، ترجیحاً آن کاربری اراضی که واحدهای هیدرولوژیک هستند را می‌بایست به‌صورت زیر حوضه تعریف کرد. چون فقط در سطح یک زیر حوضه روابط مکانی قابل‌تعیین است. این حالات می‌تواند در SWAT با استفاده از مفهومی به نام واحدهای اثر هیدرولوژیکی HRUs شبیه‌سازی در زیر حوضه‌های شامل توپوگرافی تعریف‌شده، و همین‌طور در زیر حوضه‌ها تعریف می‌شوند، HRUs متعدد داخل این زیر حوضه‌ها می‌توانند تعریف شوند. ورودی‌های مدل شامل اقلیم، خاک‌ها ، آب زیرزمینی و مدیریت و غیره برای هر HRU شبیه‌سازی می‌شود. ترکیبات چرخه آب شامل بازدهی آب برای زیر حوضه‌ها به‌صورت وزنی هستند.

۲-۹-آنالیزحساسیت و عدم قطعیت ، واسنجی و صحت سنجی مدل SWAT

واسنجی، تحلیل حساسیت و تحلیل عدم قطعیت مدل، با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP 2012 که شامل الگوریتم SUFI2 می‌باشد، انجام می‌پذیرد. SUFI2، واسنجی، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت را همزمان انجام داده و سعی می‌کند که اکثر داده‌های اندازه‌گیری شده در ناحیه عدم قطعیتِ تعیین‌شده قرار گیرند. درعین‌حال، سعی می‌کند کوچک‌ترین طیف

www.SID.ir

Archive of

عدم قطعیت ممکن را ایجاد نماید. هر نوع اطلاعات اندازه‌گیری شده در سطح زیر حوضه، امکان واسنجی مدل (در سطوح مختلف) را فراهم می‌سازد. این اطلاعات می‌توانند شامل شدت‌جریان و رسوب رودخانه، ارزیابی و سطح زیر کشت محصولات کشاورزی و شدت‌جریان رودخانه در بالادست و یا در ایستگاه‌های مشابه باشند.

در این نرم‌افزار، یک دامنه بزرگِ اولیهٔ عدم قطعیت برای هر پارامتر فرض می‌شود. بنابراین در ابتدا، داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح ppu ۹۵[1] قرار می‌گیرند و سپس این عدم قطعیت در گام‌های متوالی، کاهش می‌یابد تا دو شرط زیر برقرار شود:

۱) اکثر داده‌های مشاهده‌ای در سطح ppu ۹۵ واقع شوند (p-Factor)

۲) فاصله متوسط بین حد بالا و پایین در طیفِ ۹۵ درصد عدمِ قطعیت تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده تا حد ممکن کوچک شود (d-Factor).

یانگ و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که مدل SUFI2 به تعداد اجراهای کمتری برای واسنجی مدل نیاز دارد تا به جواب‌های با دقت مشابه با چهار روش واسنجی دیگر برسد. این ویژگی، به‌ویژه در زمان کار با مدل‌های پیچیده و بزرگ مقیاس مانند مدل SWAT از اهمیت زیادی برخوردار است. نتایج مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، با استفاده از سه پارامتر آماری مجذور قدر مطلق خطا (MSE)، ضریب تبیین (R^2) و راندمان نش مقایسه می‌شوند (یانگ و همکاران، ۲۰۰۸). تاکنون هیچ معیار خاصی در مورد مقادیر مناسب برای این پارامترها ارائه نگردیده است. اما موریاسی و همکاران (۲۰۰۷) پیشنهاد می‌کند که مقادیر NSE باید از ۰/۵ (۵۰٪) بزرگ‌تر باشد تا بتوانیم در مقیاس ماهیانه، نتایج مدل برای مطالعات هیدرولوژیک و همچنین شبیه‌سازی فرآیندهای مرتبط با انتقال آلاینده‌ها قابل‌قبول قلمداد گردند که معمولاً همین معیار برای مقدار پارامتر R^2 نیز مورداستفاده قرار می‌گیرد. اما با توجه به مطالعات پیشین بر روی مدل SWAT، برای پارامتر R^2 در دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی مقدار متوسطِ ۷۵٪ (۶۲٪ تا ۹۰٪ در واسنجی و ۶۰٪ تا ۸۸٪ در اعتبارسنجی)، و برای پارامتر NS در دورهٔ واسنجی مقدار متوسطِ ۷۵٪ (۴۵٪ تا ۹۰٪) و در دورهٔ اعتبارسنجی مقدار متوسطِ ۶۵٪ (۳۰٪ تا ۸۵٪) و برای پارامتر ضریب راندمان مقدار ۷۰٪ به‌عنوان مقادیر مطلوب تعیین می‌گردند (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷).

آنالیز حساسیت درواقع مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل است که به‌عبارت‌دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل آماری به‌صورت سازمان‌یافته (سیستماتیک) است که بتوان تأثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد. اهمیت نسبی پارامترهای ورودی به مدل SWAT با توجه به خروجی آن با استفاده از آنالیز حساسیت ارزیابی می‌شود. یکی از چالش‌های مدل‌سازی حوضه، شناخت پارامترهای ورودی مؤثر بر خروجی مدل است. بیش از ۲۰ پارامتر در مدل SWAT روی شبیه‌سازی بارش- رواناب نقش دارند. بنابراین کاهش تعداد پارامترها با حذف پارامترهای کم تأثیر ضروری است. با انجام آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در مدل SWAT مشخص شد که پارامتر وزن مخصوص ظاهری خاک، ظرفیت آب در دسترس در لایه خاک و شماره منحنی (CN_2) مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر رواناب در حوضه موردمطالعه می‌باشند. پارامترهای ورودی به اکثر مدل‌ها با قطعیت کامل معلوم نیستند. به دلیل این عدم قطعیت مدل‌ها قادر به توصیف دقیق فرآیندهای هیدرولوژیکی تحت شرایط طبیعی نمی‌باشند. علیرغم توسعه و کاربرد فراوان این مدل‌ها توجه به مسئله عدم قطعیت که تغییرپذیری در مقادیر پارامترهای ورودی را پیش‌بینی می‌کند، ضروری است.

در روش SUFI-2 پارامترهای عدم قطعیت به نحوی پیدا می‌شود که اکثر داده‌های اندازه‌گیری شده در ناحیه عدم قطعیت تخمین قرار گیرند، درحالی‌که کوچک‌ترین طیف عدم قطعیت تخمین ممکن را ایجاد کنند. عدم قطعیت خروجی مدل

[1] 95 Percent Prediction Uncertainity

www.SID.ir

Archive of

به‌وسیله عدم قطعیت تخمین ۹۵ درصد که در سطح ۲/۵ و ۹۷/۵ درصد تابع توزیع متغیر خروجی که به روش لاتین هایپرکیوب از دامنه مذکور نمونه‌برداری می‌شود، محاسبه می‌شود. در برنامه SUFI-2 یک دامنه بزرگ عدم قطعیت برای هر پارامتر فرض می‌شود. بنابراین در ابتدا داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار می‌گیرند و سپس این عدم قطعیت در گام‌های متوالی کاهش می‌یابد تا دو شرط ۱- اکثر داده‌های مشاهداتی در سطح عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گیرند (P-factor) و ۲- فاصله متوسط بین حد بالا و پایین ۹۵ درصد تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده تا حد ممکن کوچک شود (D-factor)، برقرار شود.

۲-۱۰-معیارهای ارزیابی مدل

برای ارزیابی کمی ارزیابی مدل نتایج مدل در مراحل واسنجی و اعتبار سنجی، با استفاده از دو پارامتر آماری زیر، با مقادیر اندازه‌گیری شده شدت‌جریان متوسط ماهانه مقایسه می‌شود.

الف) ضریب تبیین (R^2)

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(Pi-P)(Oi-O)]^2}{[\sum_{i=1}^{n}(Pi-P)^2][\sum_{i=1}^{n}(Oi-O)^2]} \qquad (۲)$$

که n تعداد مشاهدات ، O_i , P_i مقادیر متناظر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده می‌باشند، O, P نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده می‌باشند. ضریب همبستگی نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده تا چه میزان به حداکثر مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و از ۰ تا ۱ تغیر می‌کند.

ب) ضریب ناش- ساتکلیف[۲] (NS)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Pi-Oi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Oi-O)^2} \qquad (۳)$$

مقدار آن از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است و نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب ۱(خط با شیب ۱:۱) هماهنگی دارد.

تاکنون هیچ معیار خاصی در مورد مقادیر مناسب برای این پارامتر ارائه نگردیده است. اما موریاس و همکاران ۲۰۰۷ پیشنهاد می‌کنند که مقادیر NS باید بزرگ‌تر از ۰/۵ باشد تا بتوانیم در مقیاس ماهانه، نتایج مدل برای مطالعات هیدرولوژیک و همچنین شبیه‌سازی فرآیندهای مرتبط با انتقال آلاینده‌ها قابل‌قبول قلمداد گردند که معمولاً همین معیار برای مقدار پارامتر R^2 نیز مورداستفاده قرار می‌گیرد (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷).

۲-۱۱-معیارهای ارزیابی در روش SUFI2

معیارهای سنجش عدم قطعیت درروش SUFI2 ازآنجایی‌که روشی بر مبنای تصادفی است، استفاده از برخی پارامترهای آماری مانند ضریب تعیین و یا ضریب ناش-ساتکلیف که برای مقایسه دو سیگنال کاربرد دارند، عملی نیست. در عوض در این روش باند عدم قطعیت

[۲] - Nash–Sutcliffe

www.SID.ir

Archive of

۹۵ درصد برای متغیرها محاسبه می‌شود. همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، این امر با محاسبه مقادیر متناظر احتمال ۲/۵ درصد به‌عنوان حد پایین و ۹۷/۵ درصد به‌عنوان حد بالا در توزیع احتمال تجربی مربوط به مقادیر شبیه‌سازی برای هر نقطه انجام می‌گیرد.کیفیت برازش با تعیین درصد مربوط به متغیرهای مشاهده‌شده که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار می-گیرد(P-factor) و همچنین متوسط فاصله بین باندهای بالا و پایین (d- factor) تعیین می‌شود. بهترین نتیجه زمانی حاصل می‌شود که تمام داده‌ها درون باند عدم قطعیت قرار گیرند و متوسط فاصله بین باندهای بالا و پایین به صفر نزدیک باشد. در حقیقت مقادیر P-factor، d-factor همانند R^2 و NS قدرت واسنجی مدل را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی معکوس معمولاً برداری از پارامترهای ناشناخته را با به حداقل رساندن تابع هدف تخمین می‌زند و به‌این‌ترتیب مشکلات بهینه‌سازی را کاهش می‌دهد. برای واسنجی جریان در SUFI2 پیشنهادشده که از تابع هدف NS یا br^2 استفاده شود. تابع هدف br^2 یا (φ) جهت مقایسه بین جریان اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده ماهانه است. این معیار راندمان توسط کراس و همکاران، ارائه‌شده است.

$$\varphi = \begin{cases} |b|\, R^2 \; for \; |b| \le 1 \\ |b|^{-1} R^2 \; for \; |b| > 1 \end{cases} \qquad (۴)$$

که R^2 ضریب تعیین بین دو سیگنال انداز گیری شده و شبیه‌سازی‌شده است و b شیب‌خط رگرسیون است. مقدار تابع φ بین ۰ و ۱ تغییر می‌کند. ولی تابع NS بین یک مقدار منفی بزرگ تا ۱ تغییر می‌کند به‌عبارت‌دیگر این مقدار منفی بزرگ مربوط به شبیه‌سازی نامناسب در یک ایستگاه است که می‌تواند در فرآیند بهینه‌سازی بر سایر شبیه‌سازی‌ها مؤثر باشد (فرامرزی و همکاران، ۲۰۰۹). درصورتی‌که در واسنجی برای دو متغیر (مثل دبی و رسوب) باشد یا واسنجی برای دبی به‌طور همزمان برای چند ایستگاه هیدرومتری در حوضه باشد، تابع هدف g به‌صورت زیر تعریف می‌شود (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۹).

$$g = \sum_{i=1}^{n} w_i \varphi_i \qquad (۵)$$

که wi وزن هر متغیر است.

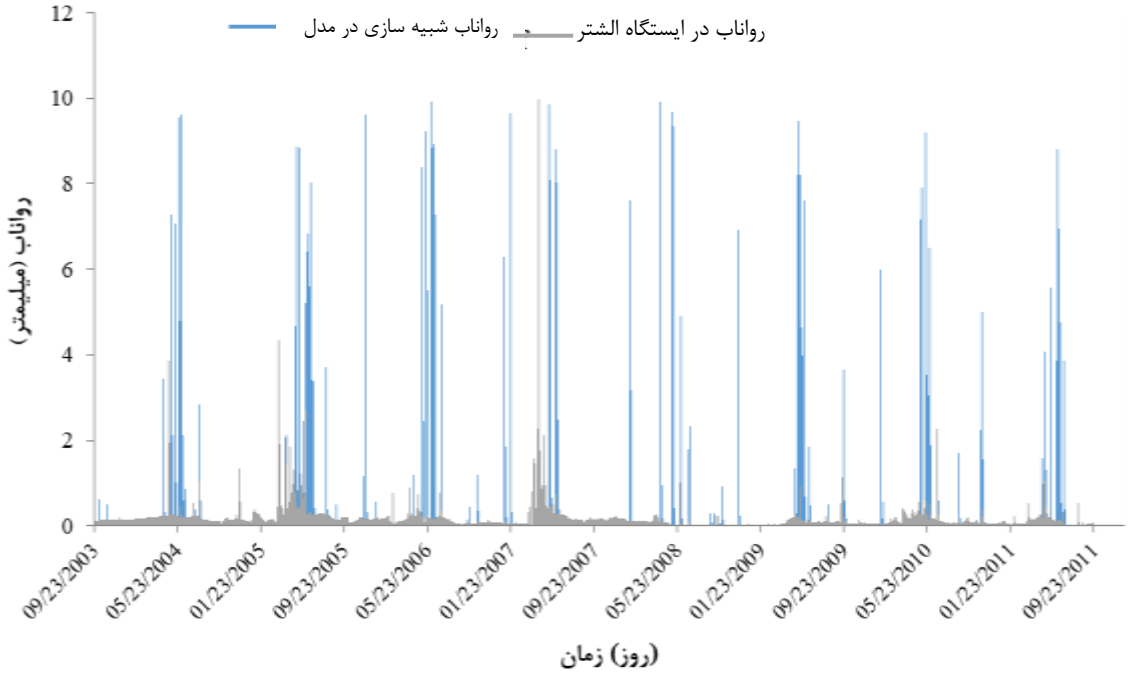
۳-نتیجه و بحث

۳-۱-شبیه‌سازی رواناب در حوضه موردمطالعه

شکل شماره ۳ شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل SWAT را در ایستگاه هیدرومتری الشتر نشان می‌دهد. داده‌های رواناب در این ایستگاه هیدرومتری به مدت ۹ سال و از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۱۱ موجود است که در تحقیق حاضر از آن‌ها استفاده‌شده است.

www.SID.ir

Archive of



شکل شماره(۳). رواناب روزانه ایستگاه هیدرومتری الشتر و شبیه‌سازی‌شده مدل SWAT (۲۰۱۱-۲۰۰۳)

شکل شماره(۳) نشان می‌دهد که اجرای اولیه مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه موردمطالعه از دقت خوبی برخوردار نمی‌باشد. این مسئله نشان دهندهٔ نیاز مدل به مراحل واسنجی، آنالیز حساسیت و عدم قطعیت، و صحت‌سنجی را نشان می-دهد.

۳-۲-واسنجی مدل

ایستگاه الشتر دارای ۲۰ سال آمار هیدرومتری (۲۰۰۵-۱۹۸۶) است که برای واسنجی مدل در برآورد رواناب آمار سال‌های ۲۰۰۱-۱۹۸۶ (۱۶ سال) و برای مرحله صحت‌سنجی از آمار سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۰۲ (۴ سال) استفاده شده است.

همان‌طور که پیش‌ازاین بیان شد پس از ساختن و اجرای اولیهٔ مدل SWAT، برای سایر مراحل تحقیق از نرم‌افزار SWAT-CUP 2012 استفاده‌شده است. در این مدل ابتدا خروجی شبیه‌سازی مدل SWAT به‌عنوان ورودی به مدل SWAT-CUP معرفی می‌شود. در ادامه اولین گام اجرایی این مدل ویرایش اطلاعات ورودی به مدل است که شامل ویرایش پارامترهای انتخابی برای مرحله کالیبراسیون، ویرایش و معرفی داده‌های مشاهداتی به مدل و ویرایش موردنیاز سایر قسمت-های مدل است. در مرحله نخست باید پارامترهای مؤثر برای کالیبراسیون مدل انتخاب شود که در تحقیق حاضر با توجه به نتایج اولیه مدل SWAT، ۷ پارامتر مهم و تأثیرگذار بر نتایج مدل‌سازی انتخاب شدند. این پارامترها و مشخصات آن‌ها در جدول شماره ۴ ارائه‌شده است.

جدول شماره(۴). پارامترهای واسنجی در مدل SWAT-CUP

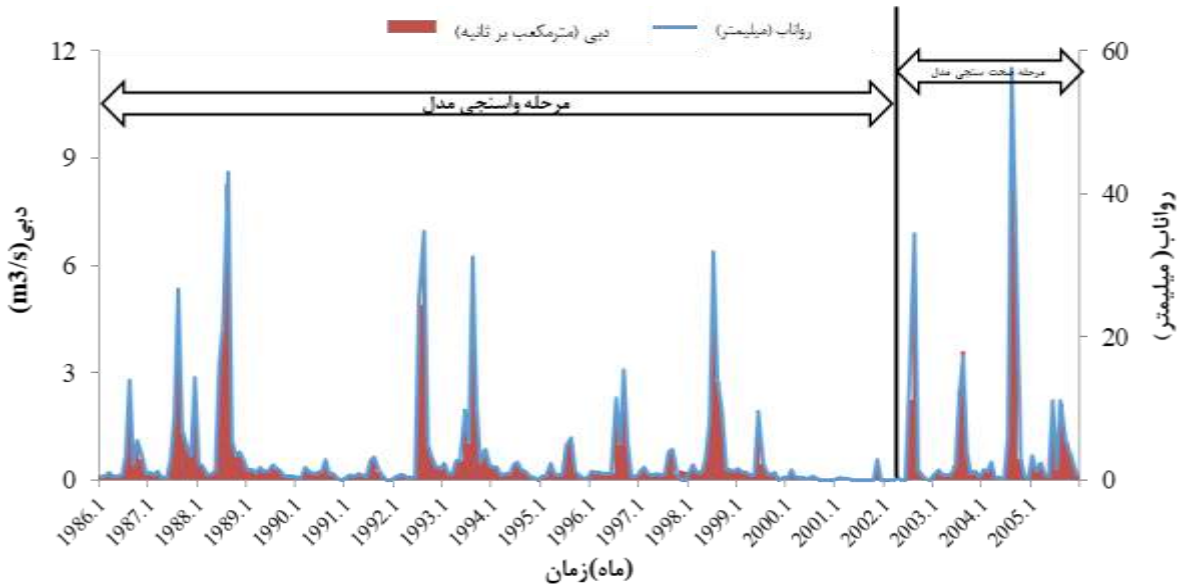
ردیف	طبقه‌بندی	پارامتر	شرح پارامتر	حد پایین	حد بالا

www.SID.ir

Archive of

۱		SOL_BD	وزن مخصوص ظاهری خاک	۰/۹۰	۲/۵۰
۲	خاک (.sol)	SOL_Z	عمق لایه خاک (سانتیمتر)	۰	۳۵۰۰
۳		SOL_K	هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع	۰	۲۰۰۰
۴		SOL_AWC	ظرفیت آب در دسترس در لایه خاک	۰	۱
۵	مدیریتی (.mgt)	CN2	شماره منحنی رواناب SCS	۳۵	۹۸
۶	آبراهه (.rte)	CH_N2	ضریب مانینگ در آبراهه اصلی	۰/۰۱	۰/۳۰
۷	آب زیرزمینی (.gw)	ALPHA_BF	فاکتور آلفا در جریان پایه (روز)	۰	۱

پس از تعیین پارامترهای مناسب برای واسنجی مدل نوبت به معرفی داده‌های مشاهداتی جهت یافتن مقادیر بهینه پارامترها توسط مدل است. در تحقیق حاضر داده‌های ماهانه متوسط دبی ماهانه و ارتفاع رواناب ماهانه در ایستگاه الشتر به‌عنوان داده-های مشاهداتی به مدل معرفی شدند. شکل شماره ۴ داده‌های دبی و رواناب ماهانه مشاهداتی را در ایستگاه الشتر نشان می-دهد.

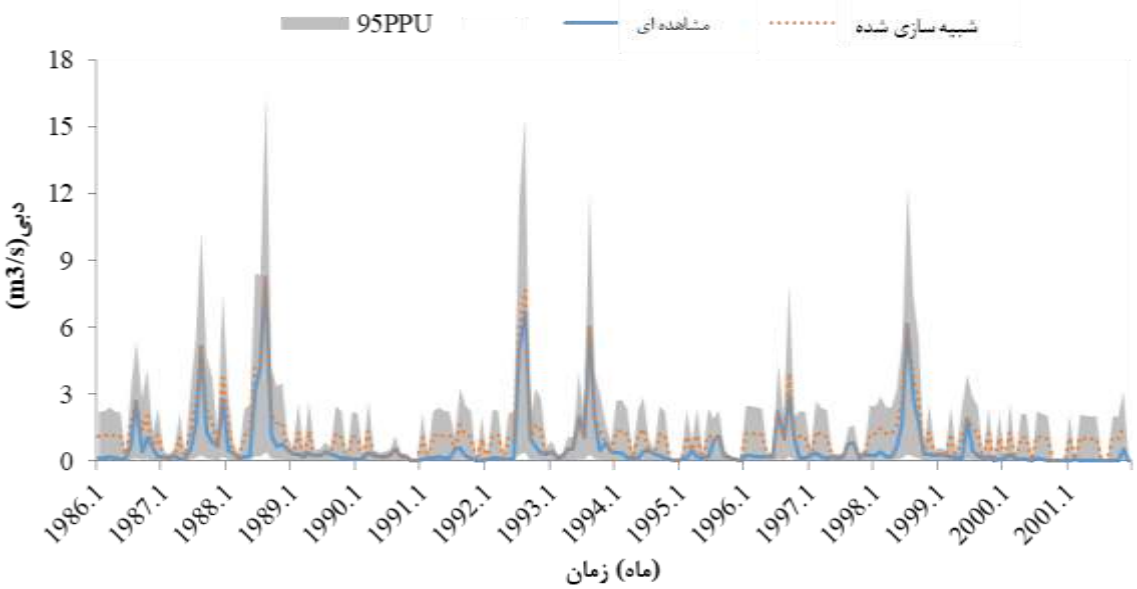


شکل شماره(۴). داده‌های دبی و رواناب ماهانه مشاهداتی در ایستگاه الشتر(۲۰۰۵-۱۹۸۶)

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج مرحله واسنجی مدل SWAT-CUP در شکل شماره ۵ ارائه‌شده است.



شکل شماره(۵). نتایج مرحله واسنجی مدل SWAT-CUP در ایستگاه الشتر (۲۰۰۱-۱۹۸۶)

همان‌طور که در شکل شماره ۴ قابل‌مشاهده است مدل SWAT-CUP توانسته است شبیه‌سازی با دقت قابل‌قبول برای دبی ماهانه در ایستگاه الشتر انجام دهد. این مطلب نشان دهندهٔ واسنجی صحیح نتایج مدل SWAT است.

جدول شماره(۵). پارامترهای آماری مرحله واسنجی مدل SWAT-CUP

پارامتر	p-factor	r-factor	R2	NS	MSE	SSQR
دبی ایستگاه الشتر	۰/۱۳	۰/۳۹	۰/۸۷	۰/۶۴	۰/۵۱۶	۱۱۵

جدول شماره(۶). بهترین مقادیر پارامترهای انتخابی در مرحله واسنجی مدل SWAT-CUP

ردیف	Parameter_Name	Min_value	Max_value	Fitted_Value
۱	2:R__CN2.mgt	۳۵	۹۸	۷۱/۰۹۹
۲	3:V__ALPHA_BF.gw	۰	۱	۰/۱
۳	9:V__CH_N2.rte	-۰/۰۱	۰/۳	۰/۲۶۹
۴	10:R__SOL_AWC(..).sol	۰	۱	۰/۳
۵	12:R__SOL_K(..).sol	۰	۲۰۰۰	۲۰۰
۶	14:R__SOL_Z(..).sol	۰	۰	۰
۷	16:R__SOL_BD(..).sol	۰/۹	۲/۵	۲/۰۲

www.SID.ir

Archive of SID

۳-۳-آنالیز حساسیت

در آنالیز حساسیت پارامترها در مدل SWAT-CUP با استفاده از دو پارامتر t-stat و p-value انجام می‌شود. t-stat مقدار حساسیت هر پارامتر را نسبت به داده‌های خروجی نشان می‌دهد و هر چه که قدر مطلق مقدار t-stat برای یک پارامتر ورودی بزرگ‌تر باشد مقادیر خروجی مدل حساسیت بیشتری نسبت به مقدار آن پارامتر از خود نشان می‌دهد. مقدار p-value معنی‌داری یک پارامتر را در آنالیز حساسیت نشان می‌دهد و این مقدار هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد حساسیت بیشتر خروجی مدل را نسبت به آن پارامتر را نشان می‌دهد. جدول شماره ۷ مقادیر t-stat و p-value را برای پارامترهای انتخابی در مرحله واسنجی مدل نشان می‌دهد.

جدول شماره(۷). مقادیر t-stat و p-value در آنالیز حساسیت مدل SWAT-CUP

ردیف	Parameter Name	t-Stat	P-Value	رتبه پارامتر در آنالیز حساسیت
۱	11:R__SOL_BD(..).sol	۳/۳۴	۰/۰	۱
۲	2:R__SOL_AWC(..).sol	۲/۵۲	۰/۰۱	۲
۳	9:R__CH_N2.rte	۲/۴۴	۰/۰۲	۳
۴	5:V__ALPHA_BF.gw	۲/۱۵	۰/۰۳	۴
۵	10:R__SOL_Z(..).sol	۲/۰۳	۰/۰۵	۵
۶	3:R__SOL_K(..).sol	۱/۱۹	۰/۲۴	۶
۷	4:R__CN2.mgt	۰/۹۹	۰/۳۳	۷

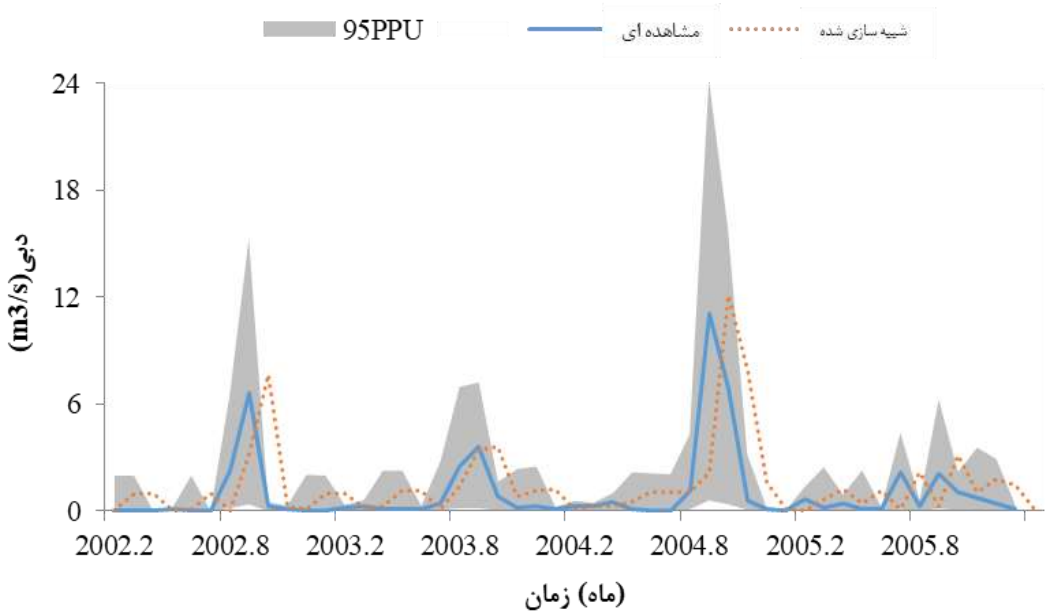
همان‌طور که در جدول شماره ۷ مشخص است بیشترین حساسیت خروجی مدل به پارامتر SOL_BD وزن مخصوص ظاهری خاک است.

۴-۳-صحت سنجی مدل

پس از انتخاب بهترین مقادیر برای پارامترها در مرحله آنالیز حساسیت و واسنجی مدل، با واردکردن داده‌های مشاهداتی مرحله صحت سنجی مدل انجام می‌شود. شکل شماره ۶ مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده پارامتر دبی را در مرحله صحت سنجی مدلSWAT-CUP نشان می‌دهند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل شماره(۶). دبی ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده مرحله صحت‌سنجی در ایستگاه الشتر (۲۰۰۵-۲۰۰۲)

همان‌طور که در شکل شماره ۶ مشاهده می‌شود دقت نتایج مرحله صحت‌سنجی از دقت نتایج در مرحله واسنجی مدل کمتر است که دلیل این مسئله برخورد نکردن مدل با این داده‌ها می‌باشد. جدول ۸ پارامترهای آماری مدل را در مرحله صحت سنجی نشان داده شده اشت.

جدول شماره(۸). پارامترهای آماری مرحله صحت سنجی مدل SWAT-CUP

پارامتر	p-factor	r-factor	R2	NS	MSE	SSQR
دبی ایستگاه الشتر	۰/۲۷	۰/۵۴	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۰۷۵	۱۸/۰۱

۴-نتیجه گیری

در این بخش پس از انجام کار و به دست آوردن نتایج نهایی، آنچه قابل‌ذکر است به‌صورت خلاصه در زیر ارائه می‌شود.

۴-۱-واسنجی

در مطالعه حاضر با توجه به اینکه مدل SWAT، مدل چندمنظوره با کارایی و دقت بالا است، دارای حساسیت فوق‌العاده ایی است. در این مطالعه از روش SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP جهت واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل هیدرولوژیک حوضه الشتر استفاده شد. در تحقیق حاضر با توجه به نتایج اولیه مدل SWAT، ۷ پارامتر مهم و تأثیرگذار شماره منحنی رواناب SCS ، وزن مخصوص ظاهری خاک، ظرفیت آب در دسترس در لایه خاک، هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع، ضریب زبری مانینگ آبراهه اصلی، عمق لایه خاک، فاکتور آلفا در جریان پایه ، بر نتایج مدل‌سازی انتخاب شدند

www.SID.ir

Archive of SID

و برای واسنجی استفاده شد. براساس پارامترهای اشاره‌شده مقدار دبی ایستگاه الشتر مورد واسنجی قرار گرفت که با تعیین بهترین مقادیر برای این پارامترها مقدار دبی محاسبه شد و با مقدار مشاهداتی ارزیابی گشت که دارای ضریب همبستگی R^2 حدود ۰/۸۷ بوده است.

۴-۲-تحلیل حساسیت

بعد از اجرای مدل ، پارامترهای مدل تست و تحلیل گشتند. در آنالیز حساسیت پارامترها در مدل SWAT-CUP با استفاده از دو پارامتر t-stat و p-value انجام شد. تأثیر پارامترها و نقاط ضعف و حساسیت مدل نسبت به آن‌ها به‌وضوح مشاهده شد. این معیارها کمک شایانی در واسنجی مدل داشتند به‌طوری‌که تأثیر کم یا زیاد بودن پارامترها در خروجی مدل توسط این معیارها به‌دقت نمایان می‌گشت و ما را به بهینه‌سازی پارامترها رهنمون می‌کردند. در جداول و اشکال مربوطه این تحلیل‌ها با موفقیت تفسیر گشتند. ازاین‌رو طبق نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد که بیشترین حساسیت خروجی مدل به پارامتر وزن مخصوص ظاهری خاک(SOL_BD) با t-stat ۳,۳۴ و p-value صفر اختصاص یافت.

۴-۳-صحت سنجی مدل

پس از انتخاب بهترین مقادیر برای پارامترها در مرحله آنالیز حساسیت و واسنجی مدل، با واردکردن داده‌های مشاهداتی، مرحله صحت سنجی مدل انجام شد. مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده پارامتر دبی در مرحله صحت سنجی مدل SWAT-CUP مورد ارزیابی قرار گرفت که پارامتر ضریب همبستگی R^2 برای صحت سنجی دبی حوضه الشتر حدود ۰,۷۶ محاسبه شد. دقت نتایج مرحله صحت‌سنجی از دقت نتایج در مرحله واسنجی مدل کمتر است که دلیل این مسئله برخورد نکردن مدل با این داده‌ها می‌باشد. از این رو با استفاده از این روش می توان اثر تغییر کاربری اراضی با تکنیک سنجش از راه دور بر رواناب مورد بررسی قرار داد.

مراجع

۱. اخوان سمیرا، عابدی کوپایی جهانگیر، موسوی فرهاد.، عباسپور کریم، افیونی مجید، اسلامیان سعید، 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 آب‌وخاک، سال چهارم، شماره پنجاه و سوم، ۱۳۸۹.

۲.سید قاسمی سمانه، ابریشم‌چی احمد، تجریشی مسعود، ارزیابی تغییرات جریان رودخانه زاینده‌رود براثر تغییرات اقلیم، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، ص ۸ ، ۱۳۸۶

۳.کاویان عطاالله، گلشن محمد.، روحانی حامد، اسمعلی عوری، اباذر، شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب حوضه آبریز رودخانه هراز مازندران با بهره‌گیری از مدل SWAT، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۷(۲): ۱۹۷-۲۱۱، ۱۳۹۴.

۴. غلامی شعبانعلی، مدل شبیه‌سازی رسوب روزانه با استفاده از مدل توزیعی SWAT در حوضه‌های کوهستانی(حوضه آبخیز امامه)، فصلنامه پژوهش و سازندگی: ۵۹: ۲۸-۳۳، ۱۳۸۲.

۵.وقابی محمد، مدل‌سازی رواناب و رسوب در حوضه بالادست سد طرق با استفاده از مدل SWAT. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه بوعلی سینا همدان. ۱۴۴ص، ۱۳۹۰.

www.SID.ir

Archive of SID

6. Abbaspour, K.C., Vejdani, M., and Haghighat, S. (2009). *SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Programs for SWAT*: 1596-1602.
7. Arnold, J. G., and Allen, P. M. (1996). *Estimating Hydrologic Budgets for three Illinois Watersheds*. Journal of Hydrology 176: 57-77.
8. Birhanu, B.Z., Ndomba, P.M., and Mtalo, F.W. (2007). *Application of SWAT Model for Mountainous Catchment*. FWU Water Rescource Publications: Volume No: 06/2007.ISSN No. 1613-1045: pp 182-187.
9.Green, C.H., and Griensven, A. (2008). *Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT 2005 in small-scale watersheds*. Journal of the Environmental Modelling & Software: 23: 422–434.
10.Hyung –Kyung, J., Jong –Yoon, P., Hyun-Kyo, J., Hyung-Jin, S., Hyung-Joong, K. and seong-joon, K. (2011). *The uncertainty analysis of SWAT simulated stream flow and water quality applied to Chungju dam watershed of South Korea*. dep of civil and environmental system eng, konkuk university seoul, south korea: 29 pp.
11.Faramarzi, M., Abbaspour, K., Schulin, R. and Yang, H. (2009). *BLUE AND GREEN WATERRESOURCES IN IRAN*.Hydrol.Process.23, 486–501 (2009).
12.Fatehi Z., and Shahoei S. V. (2020). *Application of SWAT model for simulating monthly runoff, Lake Urmia Watershed in Kurdistan Province, Iran. Environ*. Water Eng., 6(3), 293–303. DOI: 10.22034/jewe.2020.218842.1346.
13.Mengistu A. G., Remsburg, L. D. v. L., and Woyessa Y. E. (2019). *Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa*. J. Hydrol. Region. Studies, 25, 100621.
14.Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. (2007). *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 50 (3): 885-900.
15.Naramangam, S. (2008). *Modeling the impacts of agricultural management practices on water quality in the little Miami River Basin*. Doctorate of Philosophy (ph.d): *Geography. University of Cincinati*.217 p.
16.Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. and King, K.W. (2005). *Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation – version 2005*, Texas. Agricultural Research Service: 494pp.
17.Kumar, S., and Merwade, V. (2009). *Impact of Watershed Subdivision and Soil Data Resolution on SWAT Model Calibration and Parameter Uncertainty*. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 45: 1179–1196.doi: 10.1111/j.1752-1688. 2009. 00353.x.
18.Xu, Z. X., Pang, J. P., Liu, C. M., and Li, J. Y. (2009). *Assessment of runoff and sediment yield 25 in the Miyun reservoir catchment by using swat model*, Hydrol. Process., 23, 3619–3630, doi:10.1002/hyp.7475.
19.Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J., and Yang, H. (2008).*Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China.* .Journal of Hydrology. 358:1–23.

www.SID.ir