نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۲۵، شماره ۷۶، فصل تابستان، سال ۱۴۰۰، صفحات۱۳۹-۱۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۴ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۹/۰۹/۲۱

واسنجی و اعتبار سنجی مدل SWAT در شبیه سازی رواناب و رسوب در حوضه آبریز شهر چای میانه

محمد حسین رضائی مقدم [۱]
داود مختاری [۲]
مجید شفیعی مهر [۳]

چکیده

برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوضه‌های آبریز از مدل‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد که هر یک برای شرایطی خاصی ارائه‌شده است. در این پژوهش، بیلان آبی و رسوب حوضه آبریز شهر چای با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شد. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT از روش SUFI-2 استفاده گردید. نتایج حاصل با استفاده از چهار معیار ارزیابی مدل‌ها شامل معیار نش سا تکلیف، ضریب تبیین، نسبت باقیمانده میانگین مربعات خطابه انحراف از معیار داده‌های مشاهداتی و دو فاکتور p-factor و r-factor مقایسه شدند. نتایج نشان داد که روش SUFI-2 دارای الگوریتم موترتری برای واسنجی و اعتبار سنجی مدل در این حوضه هست همچنین مقادیر به‌دست‌آمده از مدل برای رواناب و رسوب در این حوضه در حد قابل‌قبول هست. ولی این مدل رواناب را بهتر از رسوب در این حوضه شبیه‌سازی می‌کند از مهم‌ترین علل ضعف مدل در شبیه‌سازی می‌توان به تعداد کم داده‌ها، غیرقابل‌اعتماد بودن داده‌ها، شبیه‌سازی ضعیف جریان، عدم پیوستگی اطلاعات و نبود یا کمبود داده‌های کامل روزانه رسوب اشاره نمود.

واژگان کلیدی: شهر چای، روش SUFI-2، واسنجی، مدل SWAT

مقدمه

حوضه‌های آبریز به‌عنوان واحدهای کاری و مطالعاتی معمول، نقش مؤثری در میزان جریانات و نیز فرسایش و رسوب تولیدی دارند. با توجه به اهمیت آب‌وخاک در زندگی بشر و ضرورت حفظ آن برای نسل‌های بعد مدیریت حوضه‌های آبریز لازم و ضروری است. یک مدیریت موفق نیاز به ابزارها و نیز اطلاعاتی از وضع گذشته و فعلی حوضه آبریز دارد. همچنین امروزه خسارات ناشی از فرسایش، تولید رسوب و بروز سیلاب‌های شدید از عوامل تهدیدکننده حوضه‌های آبریز است که ازجمله این خسارات می‌توان به پر شدن سدها، پایین آمدن کیفیت آب‌های تولیدی حوضه، کاهش سطح قابل‌استفاده در سطح حوضه و در مواردی هم موجب خسارات جانی می‌شود (اسمعلی و عبدالهی، ۱۳۹۰)؛ بنابراین مدیریت صحیح حوضه‌های آبریز از مهم‌ترین روش‌های استفاده بهینه از منابع آب‌وخاک است. در کشور ما اکثر حوضه‌های آبریز، به‌ویژه حوضه‌های آبریز کوهستانی فاقد ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب سنجی به تعداد کافی هستند و همین امر هرگونه برنامه‌ریزی‌های عمرانی و مدیریتی را با مشکل مواجه می‌سازد. هیدرولوژیست ها و محققان منابع آب راه‌حل‌های مختلفی را عرضه کرده‌اند ولی هیچ‌کدام کاملاً موفقیت‌آمیز نبوده است (رستمیان و همکاران، ۱۳۷۸؛ ۵۱۸ و شایگان و همکاران، ۱۳۹۰؛۲)؛ بنابراین درک و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به رواناب و رسوب در پهنه‌های طبیعی، به‌واسطه محدودیت‌های مالی و زمانی، شرایط سخت فیزیکی

[۱]. استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز (نویسنده مسئول) Email : rezmogh@yahoo.com - Tel: 0914414219
[۲]. استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز
[۳]. دانشجوی دکتری، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

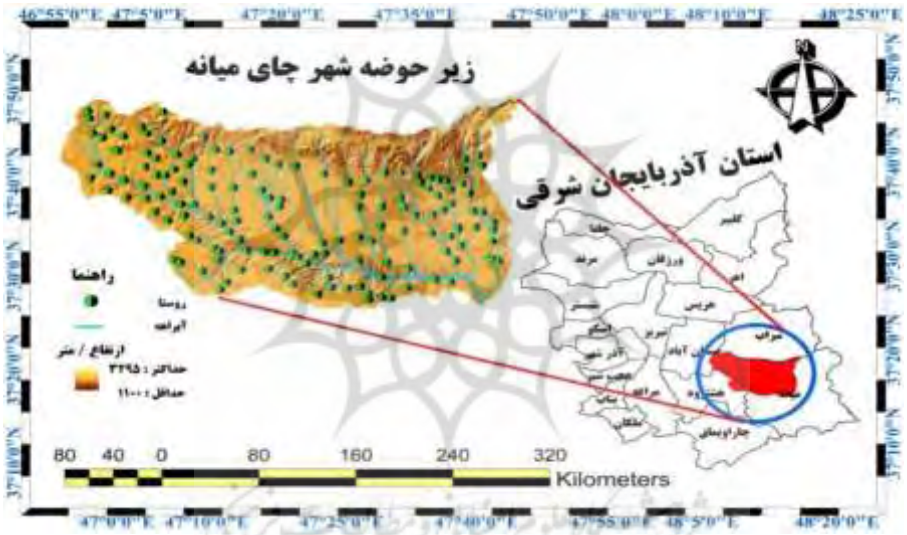
حاکم بر حوضه‌های آبریز و نیز نوسانات غیرقابل‌پیش‌بینی اقلیمی، از قبیل خشک‌سالی درازمدت همیشه میسر نیست (صادقی و یثربی، ۱۳۷۸؛ ۴۴ و مرادی و همکاران، ۱۳۹۵؛ ۶۳). از طرفی محدود بودن روش‌های اندازه‌گیری در هیدرولوژی و نیاز به داشتن روشی برای تعمیم آمار موجود به حوضه‌های بدون آمار و یا مکان‌هایی که اندازه‌گیری در آن‌ها امکان‌پذیر نیست و همچنین شبیه‌سازی تغییرات هیدرولوژیکی آینده از دلایل اصلی شبیه‌سازی هیدرولوژیکی است (بیون و بینلی[۱]، ۲۰۰۱؛ ۴۶). در دهه‌های گذشته، مدل‌های هیدرولوژیکی به‌طور وسیعی از سوی هیدرولوژیست ها و مدیران منابع آب به‌منزله ابزاری برای آنالیز سیستم‌های مدیریت حوضه‌های آبریز به‌کاربرده شده است. معمولاً مدل‌های هیدرولوژیک شامل تعداد زیادی از پارامترهایی هستند که برای بررسی رواناب سطحی و زیرسطحی، آب‌های زیرزمینی، عمق نفوذ، تبخیر و تعرق، خصوصیات خاک، کاربری اراضی و بارندگی استفاده می‌شوند (یاپو و همکاران[۲]، ۱۹۹۶؛ ۲۵). نخستین بار ایگلسون[۳] (۱۹۸۶) نیاز به مدل‌های هیدرولوژیک بزرگ‌مقیاس را بیان کرد. این مدل‌ها علاوه بر اینکه در حوضه‌های آبریز با وسعت زیاد کاربرد بسیار مناسبی دارند در سطح حوضه‌های کوچک‌مقیاس نیز قابلیت خوبی دارند (آرنل[۴]، ۱۹۹۹؛ ۲۰۳). مدل‌های زیادی برای شرح و پیش‌بینی هیدرولوژی آبریز پیشنهاد شده است که ازنظر اهداف و مقیاس زمانی و مکانی بسیار متفاوت هستند (ستاین و همکاران[۵]، ۲۰۱۰؛ ۵۱۶). یکی از این مدل‌ها مدل هیدرولوژیکی SWAT[۶] است که اخیراً موردتوجه قرارگرفته است. این مدل یک مدل نیمه توزیعی است که باهدف شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه آبریز در مقیاس روزانه عمل کرده و به‌منظور بررسی تأثیر راهکارهای مدیریتی متفاوت بر روی جریان، رسوب، عناصر غذایی و بیلان مواد شیمیایی در حوضه‌های آبریز متفاوت ازنظر خاک و کاربری اراضی توسعه‌یافته است (آرنولد[۷]، ۱۹۹۸؛ ۷۶). توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی پیچیده حوضه‌های آبریز در محیط GIS این مدل را نسبت به مدل‌های یکپارچه که در آن‌ها واحدهای کاربری بزرگ‌تر، مبنای عمل هستند، متمایز ساخته است. در مورد برآورد رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT و سایر مدل‌ها تحقیقات گسترده‌ای در سطح جهان و ایران در زمینه‌هایی مختلف هیدرولوژی و مدیریت حوضه‌های آبریز صورت گرفته است که می‌توان به مطالعات یانگ و همکاران[۸]، ۲۰۰۹؛ چین یون لی و همکاران[۹]، ۲۰۱۳؛ هیمن شو و همکاران[۱۰]، ۲۰۱۷؛ کائو و همکاران[۱۱]، ۲۰۱۸؛ لیو و همکاران[۱۲]، ۲۰۱۹؛ و ولی نژاد و همکاران، ۱۳۹۲؛ ناصرآبادی و همکاران، ۱۳۹۵؛ غلامی و همکاران، ۱۳۹۶؛ رحمتی و همکاران، ۱۳۹۶؛ شفیعی مطلق و همکاران، ۱۳۹۷؛ قضاوی و همکاران، ۱۳۹۷، خورشید دوست و همکاران، ۱۳۹۷؛ خطیبی و کرمی، ۱۳۹۸؛ رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۹ اشاره نمود. باوجود مطالعات صورت گرفته در این منطقه، مطالعه یکپارچه و جامعی در مورد شبیه‌سازی رواناب، رسوب و فرسایش انجام نگرفته است، لذا این مسئله می‌تواند اهمیت و ضرورت پژوهش حاضر را در جهت مدیریت صحیح برای کاهش خسارات ناشی از فرسایش، تولید رسوب و بروز سیلاب ها برآورده سازد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1 - Beven & Binley
2 - Yapo et al
3 - Eagleson
4 - Arnell
5- Setegn et al
6 - Soil and water assessment tool
7 - Arnold et al
8 - Yang et al
9 - Qingyun Li et al
10 - Himanshu et al
11 - Cao et al
12 - Liu et al

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوضه رودخانه قزل اوزن می باشد که در شمال غرب این حوضه قرارگرفته است. شهر چای به همراه رودهای دیگر ازجمله زنجان چای، آی دوغموش و قرانقوچای یکی از زیرشاخه‌های قزل اوزن می‌باشد که در شمال غرب و شمال حوضه جریان داشته و در نزدیکی شهر میانه به آن می‌پیوندند. شهر چای از شمالی‌ترین بخش این حوضه از کوه قاسم داغی در نزدیکی بستان‌آباد و تیکمه داش سرچشمه گرفته و با طی مسیر شمال غربی- جنوب شرقی در نزدیکی میانه به قزل اوزن می‌ریزد. رودخانه از نوع کوهستانی بوده و در بیشتر مسیر با بریدن سنگ‌های آذرین بستر خود را به عمق برده و در قسمتی از مسیر نیز با بریدن کنگلومرای‌های میوسن به جریان خود ادامه می‌دهد. محدوده مطالعاتی بین طول‌های جغرافیای "۸ '۵۲ °۴۶ تا "۱۳ '۴۶ °۴۷ و عرض‌های جغرافیایی "۵۰ '۲۵ °۳۷ تا "۱۳ '۴۹ °۳۷ قرار دارد. زیرشاخه‌هایی که به شهر چای می‌ریزند چون دارای طول و مساحت متفاوت می‌باشند سبب شده‌اند که شکل حوضه شهر چای نامتقارن باشد، بطوریکه وسعت حوضه و طول زیرشاخه‌های قرارگرفته در سمت شمال رودخانه شهرچای چندین برابر وسعت حوضه و طول زیرشاخه‌های قرارگرفته در سمت جنوب این رودخانه هست شکل (۱).



شکل (۱) :نقشه موقعیت حوضه آبریز شهر چای میانه در استان آذربایجان شرقی

مواد و روش

داده‌های مورداستفاده

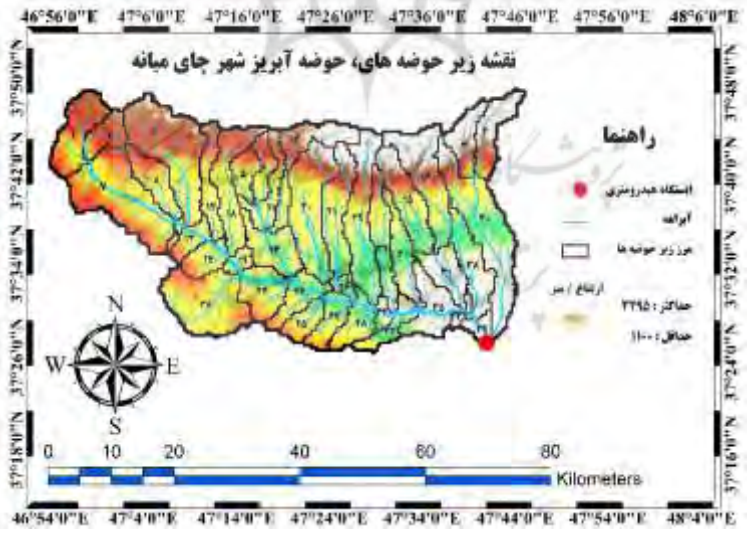
در این پژوهش داده‌های مورداستفاده شامل مدل رقومی ارتفاعی ۱:۱۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری، کاربری اراضی، خاک، بارش، دمای حداقل و حداکثر، سرعت باد، تشعشع خورشیدی و رطوبت نسبی روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک میانه، سراب، هریس، بستان‌آباد و چاراویماق و دبی و رسوب ایستگاه شهر چای هست جدول (۱). این داده‌ها با استفاده از افزونه SWAT2012 در محیط نرم‌افزار Arc Map، هم‌چنین واسنجی و اعتبار سنجی نتایج حاصل از مدل SWAT نیز در محیط نرم‌افزار SWAT Cup صورت گرفته است. پس از معرفی مدل رقومی ارتفاعی به محیط نرم‌افزار مدل با استفاده از نقاط ارتفاعی اقدام به ترسیم شبکه هیدرو گرافی می‌کند. همچنین در این مرحله مختصات جغرافیایی ایستگاه هیدرومتری جهت بستن مرز حوضه و تعیین نقطه خروجی به مدل معرفی می‌گردد با تعیین میزان حداقل مساحت مورد نظر برای زیر حوضه‌ها توسط کاربر مدل به تقسیم‌بندی حوضه اقدام می‌کند شکل (۲). نقشه کاربری اراضی به‌صورت رستری تهیه و به مدل معرفی می‌شود مدل SWAT تنها قادر به شناسایی کاربری‌های است که در Database آن وجود داشته باشد بنابراین لازم است که کاربری‌های اراضی بر اساس فرمت مدل نام‌گذاری شوند در این پژوهش برای تهیه نقشه کاربری اراضی از

تصاویر ماهواره‌ای لند ست و با استفاده از نرم‌افزار ENVI5.3 استفاده شده است که حوضه موردمطالعه دارای هفت نوع کاربری می باشد شکل (۳). سپس نقشه واحدهای خاک به مدل اضافه می‌گردد و لازم است که اطلاعات واحدهای خاک بر اساس پروفیل‌های تهیه شده از منطقه به Database آن اضافه گردد در این حوضه از نقشه خاک تهیه شده توسط منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی استفاده شده است. بر اساس این نقشه در کل حوضه ۲۴ کلاس بافت خاک قابل‌تفکیک می باشد شکل (۴) و در مرحله آخر این قسمت نقشه طبقات شیب به مدل اضافه می‌گردد شکل (۵). درنهایت با معرفی ایستگاه یا ایستگاه‌های سینوپتیک به مدل و معرفی داده‌های بارش، دمای حداقل و حداکثر، سرعت باد، تشعشع خورشیدی و رطوبت نسبی روزانه مدل شروع به ایجاد Database لازم می‌کند و سپس شروع به شبیه‌سازی می‌کند.

مدل SWAT

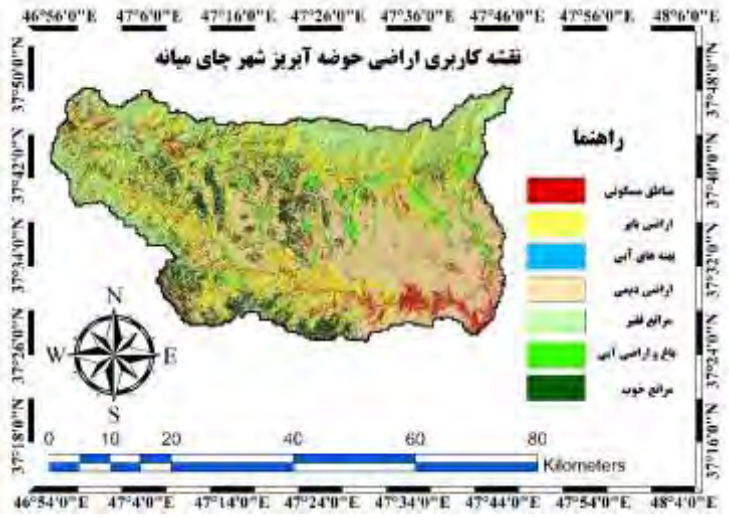
SWAT نمونه‌ای از مدل‌های فیزیک پایه است که با حل معادلات اساسی فیزیک به شبیه‌سازی فرآیندهای سسیتم آبریز می‌پردازد. این مدل به لحاظ مقیاس فضایی نیمه توزیعی و ازنظر زمانی مدلی پیوسته است. کوچک‌ترین واحد کاری در این مدل واحد واکنش هیدرولوژیک[1] HRU است که از ترکیب نقشه‌های طبقات شیب، خاک و کاربری اراضی حاصل می‌شود. آب موجود در خاک، رواناب سطحی، رسوب و عناصر شیمیایی ابتدا برای هر HRU و سپس هر زیر حوضه و در آخر کل حوضه آبریز محاسبه می‌شود. شبیه‌سازی سیستم آبریز در مدل SWAT به دو قسمت تقسیم می‌شود فاز زمینی و فاز آبی، فاز زمینی مربوط به فرآیندهای سطح زمین و ورود آب، رسوب و عناصر شیمیایی به آبراهه اصلی هر زیر حوضه است. فاز آبی فرآیندهای آبراهه‌ها و کانال‌های جریان شامل حرکت آب، رسوب و مواد شیمیایی را شبیه‌سازی می‌کند.

حوضه مورد مطالعه به ۴۱ زیر حوضه و ۱۱۳۲ واحد هیدرولوژیکی تقسیم گردید. از سال آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳ برای سازگاری مدل، از ۱۳ سال برای واسنجی و ۴ سال برای اعتبار سنجی استفاده گردید. پس از پارامتر سازی و ورود داده‌ها، شبیه‌سازی برای یک دوره ۲۰ ساله از ۱ ژانویه ۲۰۰۰ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱۹ بر اساس گام زمانی ماهانه صورت گرفت.

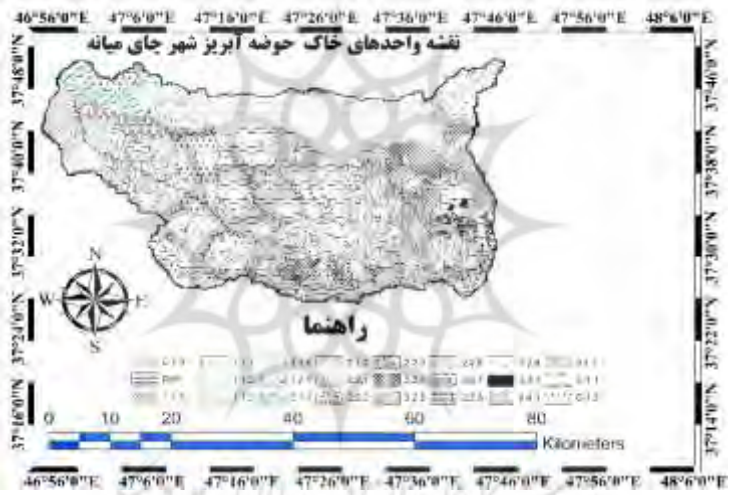


شکل (۲) نقشه مدل رقومی ارتفاعی، زیر حوضه‌ها و شبکه هیدرو گرافی حوضه آبریز شهر چای میانه

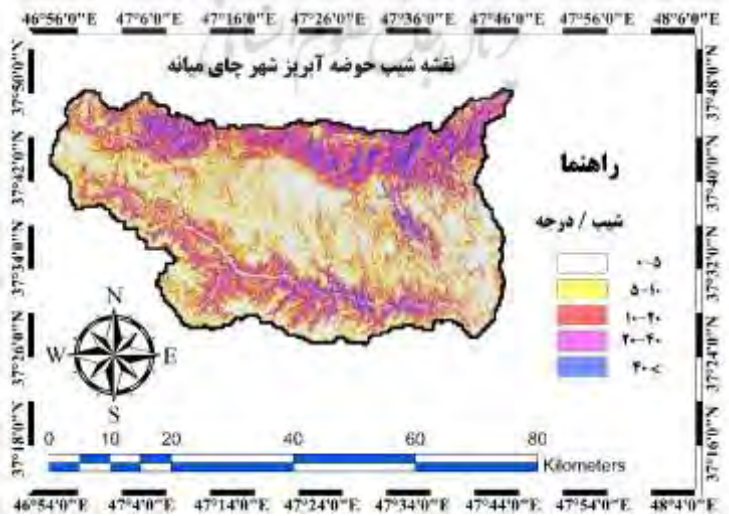
[1] - Hydrological Response Unit



شکل (۳): نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز شهر چای میانه



شکل (٤): نقشه واحدهای خاک حوضه آبریز شهر چای میانه



شکل (۵) : نقشه شیب حوضه آبریز شهر چای میانه

نتایج و بحث

به‌منظور تعیین درجه حساسیت پارامترهای جریان در مدل SWAT با استفاده از روش SUFI-2 حساسیت سنجی برای ۲۵ پارامتر انتخابی رواناب و ۱۵ پارامتر انتخابی رسوب انجام گردید. با استفاده از نتایج صحت سنجی در مورد حذف پارامترهایی که دارای درجه حساسیت کمتر می‌باشند از فرآیند واسنجی تصمیم‌گیری می‌شود که درنهایت پارامترهای با درجه حساسیت کمتر حذف گردید و ۱۳ پارامتر حساس بترتیب برای رواناب و ۷ پارامتر حساس بترتیب برای رسوب که حساسیت بیشتری داشتند انتخاب گردید. مهم‌ترین عواملی که برای واسنجی و تعیین عدم قطعیت مدل استفاده‌شده است به همراه مقادیر اولیه و مقدار واسنجی شده در جدول (۲) و (۳) آورده شده است. نتایج نهایی معیارهای ارزیابی مدل در دوره واسنجی و اعتبار سنجی رواناب و رسوب در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۱): داده‌های مورداستفاده در مدل SWAT و SWAT cup

ردیف	داده	منابع	بازه اطلاعاتی	توضیحات	کاربرد
۱	مدل رقومی	نقشه‌برداری	****	۱:۱۰۰۰۰	ورودی
۲	نقشه کاربری	تصاویر ماهواره	****	لندست	ورودی
۳	نقشه خاک	منابع طبیعی	****	۱:۲۰۰۰۰	ورودی
۴	داده‌های	هواشناسی	۲۰۱۹-۲۰۰۰	***	ورودی
۵	دبی و رسوب	سازمان آب	۲۰۱۹-۲۰۰۰	ایستگاه شهر چای	واسنجی

جدول (۲) پارامترهای حساس به همراه توزیع پیشین و پسین و مقدار بهینه آن‌ها جهت استفاده در واسنجی رواناب به روش SFI-2 در حوضه آبریز شهر چای

پارامتر	علامت اختصاری	SUFI-2		
رواناب		حداقل	حداکثر	بهینه
شماره منحنی SCS	r_CN2	-۰/۵	۰/۵	**۰/۰۸**
ضریب ذوب برفmm/c-day	V_SMFMX	۰	۱۰	۲/۵
هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع mm/h	r_SOL_K(1)	۰/۰۹	۰/۹۵	**-۰/۴۵**
ثابت تخلیه جریان از کانال	V_ALPHA	۰	۱/۵	**۰/۴۵**
درجه حرارت ذوب برف/ سانتی گراد	V_SMTMP	-۵	۵	**۳/۵**
ظرفیت آب قابل‌دسترس در لایه خاک/ mm	r_SOL_AWC	-۰/۴	۰/۸	**-۰/۰۲**
چگالی توده خاک g /cm^3	r_SOL_BD	-۰/۵	۲	**۰/۵**
فاکتور جبران تبخیر از خاک	V_ESCO	۰/۰۱	۱	**۰/۷۵**
متوسط طولی شیب واحدهای هیدرولوژیک/ متر	r_SLSUBBSN	۰	۰/۲	**۰/۰۱**
ضریب زبری مانینگ	V_OV_N	۰	۲	**۰/۸**
فاکتور جریان برداشت آب گیاه	V_EPCO	۰/۰۱	۱	**۰/۵**
عمق آستانه شروع جریان زیرزمینی/ میلی متر	V_GWQMN	۰	۲	**۱/۲**
ضریب تبخیر آب زیر زمینی	V_GW_REVAP	۰	۰/۳	**۰/۰۵**

جدول (۳) پارامترهای حساس به همراه توزیع پیشین و پسین و مقدار بهینه آن‌ها جهت استفاده در واسنجی رسوب به روش SFI-2 در حوضه آبریز شهر چای

پارامتر	علامت اختصاری	SUFI-2		
		حداقل	حداکثر	بهینه
فاکتور مدیریت	V_USLE_P.mgt	۰/۲	-۰/۲	۰/۰۸۶
ضریب انتقال رسوب	v_SPCON.bsn	۰/۰۰۱	۰/۲	۰/۰۱
فاکتور فرسایش پذیری کانال	v_CH_EROD.ret	۰	۰/۶	۰/۳۲
فاکتور تعدیل بیشینه روندیابی مقدار رسوب	v_CH_COV.ret	۰/۰۴	۰/۶	۰/۲۱
شماره منحنی برای شرایط رطوبتی	v_CH_N2.rte	۱	۰/۰۱	۰/۸۲
فاکتور فرسایش پذیری خاک	r_USLE_K.sol	-۱	۱	۰/۵
هدایت هیدرولیکی موثر بر آبرفت های کانال اصلی	$V_CH_K_2$	۰/۵	۲	۱/۱

جدول (٤) نتایج نهایی معیارهای ارزیابی مدل در دوره واسنجی و اعتبار سنجی رواناب و رسوب در حوضه آبریز شهر چای.

		SUFI-2		الگوریتم		
	دوره	سال	p-factor	r-factor	R^2	Ns
دبی	واسنجی	۱۳	۰/۹	۰/۶۶	۰/۸۸	۰/۸
	اعتبار سنجی	۴	۰/۸۴	۰/۶۱	۰/۸۷	۰/۷۸
رسوب	واسنجی	۱۳	۰/۷۹	۰/۶۸	۰/۸۶	۰/۶۹
	اعتبار سنجی	۴	۰/۷۳	۰/۵۷	۰/۹۶	۰/۷۴

هرچند کاربرد روش SUFI-2 آسان هست ولی کاملاً خودکار نیست در استفاده از این روش لازم است توزیع پسین عوامل در هر تکرار جهت اصلاح بازه پیشنهادی جدید (توزیع پیشین) تکرار بعدی بررسی گردد. واسنجی مدل برای رواناب و رسوب در یک مرحله با تعداد ۱۵۰۰ شبیه‌سازی در سه تکرار انجام گردید فرآیند واسنجی زمانی به پایان می‌رسد که بر اساس تابع هدف ضرایب موردنیاز جهت ارزیابی در حد قابل‌قبول باشند طبق نظر (موریاسی و همکاران[1]، ۲۰۰۷؛ آیل و همکاران[2]، ۲۰۱۷؛ کرمی و خطیبی، ۱۳۹۸) اگر ضریب کارایی مدل نش – سا تکلیف در ارزیابی مدل بین ۰/۷۵ – ۰/۶۵ باشد نتیجه شبیه‌سازی خوب است جدول (۵).

جدول (۵): مقادیر و طبقات شاخص‌های R^2 و NS

شاخص	مقادیر	طبقات
R^2	۰/۵	ناکارآمد
	۰/۵ -۰/۶	رضایت‌بخش
	۰/۶ -۰/۷	خوب
	۰/۷ -۱	خیلی خوب
NS	<۰/۴	ناکارآمد
	۰/۴ – ۰/۵	قابل‌قبول
	۰/۵ -۰/۶۵	رضایت‌بخش
	۰/۶۵ -۰/۷۵	خوب
	۰/۷۵ -۱	خیلی خوب

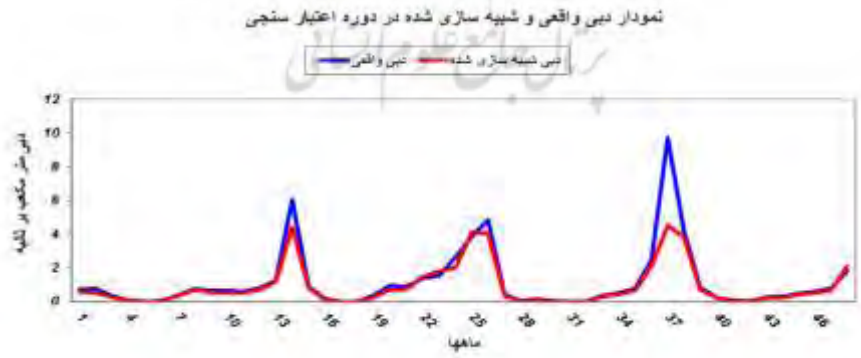
منبع: موریاسی و همکاران (۲۰۰۷)، آی ال (۲۰۱۷) و کرمی و بیاتی خطیبی (۱۳۹۸).

[1] - Moriasi et al

[2] - Ayele et al

در پژوهش‌های مشابه فراوانی که در ایران و جهان در مورد شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای با استفاده از مدل SWAT صورت گرفته است مانند عباسپور و همکاران (۲۰۰۷)، یانگ و همکاران، (۲۰۰۹)، دولت‌آبادی و همکاران (۱۳۹۲)، کاویان و همکاران (۱۳۹۴)، غلامی و همکاران (۱۳۹۶) و شفیعی مطلق و همکاران (۱۳۹۷) به نتایجی مشابه با نتایج پژوهش حاضر رسیده‌اند. ولی الگوریتم SUFI-2 دبی حداقل را مطلوب اما دبی حداکثر را کمتر شبیه‌سازی کرده است. مطالعه‌ای که تولسون و شوماخر[1] (۲۰۰۴) انجام دادند بیان کردند که مدل SWAT برای شبیه‌سازی وقایع شدید طراحی نشده است و معمولاً بزرگ‌ترین رخداد جریان را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی می‌کند. اکثر جریان‌های که مدل قادر به شبیه‌سازی آن‌ها نبوده در اواخر زمستان و فصل بهار بوده‌اند یکی از دلایل ضعف مدل در برآورد حداکثر جریان رواناب استفاده از مدل سازمان حفاظت خاک در محاسبه رواناب است که این مدل به‌خوبی رواناب حاصل از ذوب برف را شبیه‌سازی نمی‌کند اخوان و همکاران (۱۳۹۰) و انصاری و همکاران (۱۳۹۳) گزارش کرده‌اند که اکثر جریان‌هایی که مدل قادر به شبیه‌سازی آن‌ها نبوده در فصل بهار اتفاق می‌افتد. چو و شیرمحمدی[2] (۲۰۰۴) در پژوهشی در مریلند نشان دادند که مدل SWAT قادر نیست شرایط هیدرولوژیک را در دوره‌های ترسالی شبیه‌سازی کند. ازجمله علل دیگر ضعف مدل در نظر نگرفتن درصد تراکم پوشش گیاهی است که در این مدل صرفاً به نوع پوشش گیاهی اشاره شده است. از دلایل دیگر ضعف مدل در شبیه‌سازی جریان در بعضی از ماه‌های سال می‌توان به تعداد داده‌های کم جریان و فقدان داده‌های ورودی لازم برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی اشاره کرد. اشکال ۶ و ۷ دبی شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای، اشکال ۸ و ۹ رسوب شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای را به ترتیب در واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد. تمام معیارهای ارزیابی مدل در شبیه سازی رواناب و رسوب در حد مجاز هست.

شکل(٦) نمودار دبی واقعی و شبیه‌سازی‌شده به روش SUFI-2 در مرحله واسنجی ۲۰۰۳-۲۰۱۵

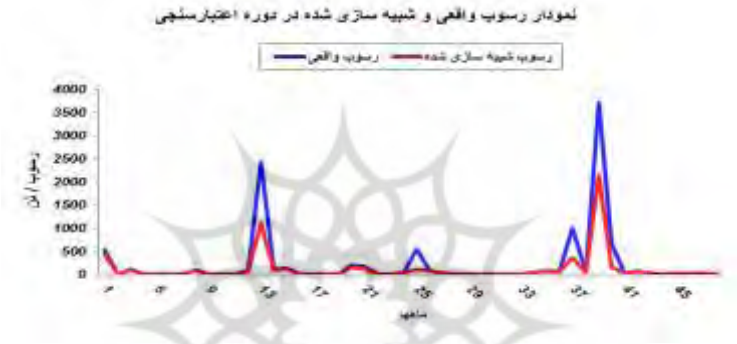


شکل (۷) نمودار دبی واقعی و شبیه‌سازی‌شده به روش SUFI-2 در مرحله اعتبارسنجی ۲۰۱٦-۲۰۱۹

[1] - Tolson & Shoemaker

[2] - Chu & Shirmohammadi

شکل (۸) نمودار رسوب واقعی و شبیه‌سازی‌شده به روش SUFI-2 در مرحله واسنجی ۲۰۰۳-۲۰۱۵



شکل (۹) نمودار رسوب واقعی و شبیه‌سازی‌شده به روش SUFI-2 در مرحله اعتبار سنجی ۲۰۱۶-۲۰۱۹

در مورد شبیه‌سازی رسوب، بسالت پور (۱۳۹۱) مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWAT برای بررسی رواناب و رسوب در حوضه آبریز بازفت انجام داد و نتیجه گرفت که این مدل رواناب را نسبت به رسوب با دقت بالایی شبیه‌سازی می‌کند. رستمیان و همکاران (۱۳۸۶) کاربرد مدل SWAT را در تخمین رواناب و رسوب حوضه بهشت‌آباد بررسی کردند، نتایج نشان داد که مدل رواناب را بهتر از رسوب شبیه‌سازی می‌کند. از مهم‌ترین علل ضعف مدل در شبیه‌سازی رسوب می‌توان به تعداد کم داده‌ها، غیرقابل‌اعتماد بودن داده‌ها، شبیه‌سازی ضعیف جریان، عدم پیوستگی اطلاعات رسوب و نبود یا کمبود داده‌های کامل روزانه رسوب اشاره نمود.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از حساسیت سنجی در مورد رواناب، شماره منحنی، چگالی توده خاک، هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع، ظرفیت آب قابل‌دسترس، ثابت تخلیه جریان از کانال، درجه حرارت ریزش برف و درجه حرارت ذوب برف حساسیت بیشتری دارد. همچنین در مورد رسوب فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در USLE، هدایت هیدرولیکی مؤثر بر آبرفت‌های کانال اصلی، شماره منحنی برای شرایط رطوبتی، فاکتور پوشش کانال و فاکتور مدیریت در USLE بر میزان رسوب شبیه‌سازی‌شده توسط مدل تأثیر داشتند. بررسی نتایج حاصل از روش SUFI-2 در حوضه آبریز شهر چای نشان داد که بر اساس معیارهای ارزیابی ضریب تبیین و نش–ساتکلیف، هم در مرحله واسنجی و هم در مرحله اعتبار سنجی نتایج خوبی در این حوضه دارد ولی نمی‌تواند دبی‌ها و رسوب‌های اوج را به‌خوبی پیش‌بینی کنند و الگوریتم SUFI-2 رواناب را بهتر از رسوب در این حوضه شبیه‌سازی کرده است. ولی برای مشخص شدن کارایی بهتر مدل، پیشنهاد می‌شود اولاً از آمار ایستگاه‌های دبی و رسوب سنجی متعدد و روزانه به‌جای ماهانه، در صورت وجود در یک حوضه استفاده شود تا نتایج آن‌ها باهم مقایسه شوند. ثانیا برای رسیدن به نتایج مطلوب این مدل به‌صورت مقایسه‌ای با سایر مدل‌های شبیه‌سازی در این حوضه و حوضه‌های هم‌جوار استفاده گردد.

منابع

اخوان، سمیرا، عابدی کوپایی، جهانگیر، موسوی، سید فرهاد، عباس پور، کریم، افیونی، مجید و اسلامیان، سید سعید، ۱۳۹۰؛ تخمین «آب آبی» و «آب سبز» با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز همدان- بهار، *نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، علوم آب‌وخاک، سال چهاردهم، شماره ۵۳، صص ۲۳-۹.

اسمعلی، اباذر و عبدالهی، خدایار، ۱۳۹۰؛ ***آبخیزداری و حفاظت خاک***، چاپ دوم، اردبیل، انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی.

انصاری، محمدرضا، گرجی، منوچهر، صیاد، غلام عباس، شرفا، مهدی و حمادی کاظم؛ ۱۳۹۳. شبیه سازی رواناب حوضه آبخیز رود زرد با استفاده از مدل SWAT. *نشریه علوم و مهندسی آبیاری*، جلد ۳۸، شماره ۴، صص ۱۰۷-۹۷.

خورشید دوست، علی محمد، اسفندیاری درآباد، فریبا، حسینی، سید اسعد و دولتخواه، پروانه، ۱۳۹۷؛ برآورد میزان رسوب حوضه رود ارس با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: زیر حوضه دره رود)، *نشریه علمی – پژوهشی جغرافیا و برنامه ریزی*، سال ۲۲، شماره ۶۵، صص ۲۲-۱.

رحمتی، حسین، امامقلی زاده، صمد و انصاری، حسین، ۱۳۹۶؛ برآورد رواناب حوضه بار اریه با استفاده از مدل های WetSpa و شبکه عصبی مصنوعی، *نشریه علمی - پژوهشی جغرافیا و برنامه ریزی*، سال ۲۱، شماره ۶۲، صص ۱۳۷-۱۱۷.

دولت آبادی، سپیده و سید محمد علی زمردیان، ۱۳۹۲؛ شبیه سازی هیدرولوژیکی حوضه فیروزآباد با استفاده از مدل SWAT، *فصلنامه مهندسی آبیاری و آب*، سال چهارم، شماره چهاردهم، صص ۴۸-۳۸.

رستمیان، رخساره، موسوی، سید فرهاد، حیدرپور، منوچهر، افیونی، مجید و عباسپور، کریم، ۱۳۸۷؛ کاربرد مدل SWAT 2000 در تخمین رواناب و رسوب حوضه بهشت آباد از زیر حوضه های کارون شمالی، *علوم فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، سال دوازدهم، شماره چهل و ششم، صص ۵۳۲-۵۱۷.

رضایی مقدم، محمد حسین، حجازی، میر اسدالله، بهبودی، عبداله، ۱۳۹۹؛ برآورد میزان رواناب حوضه آبریز لنبران چای استان آذربایجان شرقی: کاربرد مقایسه ای روش های واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، شماره سی و یک، صص ۷۵-۵۹.

شفیعی مطلق، خسرو، پر همت، جهانگیر؛ صدقی، حسین و حسینی، مجید؛ ۱۳۹۷. بررسی تغییر کاربری بر رواناب رودخانه مارون در ایستگاه ایدنک با استفاده از داده های سنجش از دور و مدل SWAT؛ *حفاظت منابع آب و خاک*، سال هفتم، شماره سوم، صص ۸۷-۷۱.

شایگان، مهران، علیمحمدی، عباس و روحانی، حامد، ۱۳۹۰؛ مدل سازی هیدرولوزیک حوضه طالقان در محیط GIS با استفاده از مدل SWAT، *نشریه سنجش از دور و GIS ایران*، سال سوم، شماره دوم، صص ۱۸-۱.

غلامی، عباس؛ شاهدی، کاکا؛ حبیب نژاد روشن، محمود؛ وفاخواه، مهدی و سلیمانی، کریم؛ ۱۳۹۶. ارزیابی کارایی مدل نیمه توزیعی SWAT در شبیه سازی جریان رودخانه ای (مطالعه موردی: حوضه آبخیز تالار استان مازندران)؛ *نشریه تحقیقات آب و خاک ایران*، دوره ۴۸، شماره ۳، صص ۴۷۶-۴۶۳.

صادقی، سید حمید رضا و یثربی، بنفشه، ۱۳۷۸؛ حفاظت خاک و آب در آبخیز های جنگلی، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۰۷ ص.

قضاوی، رضا، ندیمی، میثم، امیدوار، ابراهیم و ایمانی، رسول، ۱۳۹۷؛ بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی آینده بر تغییرات دبی رودخانه هروچای اردبیل با استفاده از مدل های SWAT و LARS-WG، *نشریه هیدروژئومورفولوژی*، شماره ۱۵، صص ۷۴-۵۵.

کرمی، فریبا و بیاتی خطیبی مریم؛ ۱۳۹۸. مدل سازی فرسایش خاک و اولویت بندی تولید رسوب در حوضه ی سد ستارخان اهر با استفاده از مدل های MUSLE و SWAT. *نشریه هیدروژئومورفولوژی*، شماره ی ۱۸، سال ۵، صص ۱۳۷-۱۱۵.

کاویان، عطاالله، گلشن، روحانی، حامد، اسمعلی عوری, & اباذر. (۲۰۱۵). شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب حوزه آبخیز رودخانه هراز مازندران با بهره‌گیری از الگوی SWAT. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، دوره ۴۷، شماره ۲, ۱۹۷-۲۱۱.

مرادی، ایوب، نجفی نژاد، علی، اونق، مجید و چوقی بایرام، کمکی، ۱۳۹۵؛ بررسی اثر انواع مدل های رقومی ارتفاعی در برآورد دبی و بار معلق با استفاده از مدل SWAT، مطالعه موردی: آبخیز گالیکش استان گلستان، *نشریه علمی – پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز*، جلد ۱۱، شماره ۱، صص ۷۵-۶۲.

ناصر آبادی، فواد؛ اسمعلی عوری، اباذر؛ اکبری، حسین و رستمیان، رخساره، ۱۳۹۵؛ شبیه سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: رودخانه قره سو اردبیل). *نشریه پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز*، سال هفتم، شماره ۱۳، صص ۵۹-۵۰.

0 ولی نژاد، فاطمه، خلیل قربانی، مهدی ذاکری نیا، امیراحمد دهقانی و بهنام آبابایی ، ۱۳۹۲؛ ارزیابی عملکرد مدل SWAT در بر آورد رطوبت خاک (مطالعه موردی حوضه آبریز نومل)، *نشریه آب و توسعه پایدار*، سال اول، شماره ۱، صص ۶۴-۵۷.

Abbaspour, K. C. J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist, and R. Srinivasan. 2007. Modeling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *J. Hydrol*. 333: 413-430.

Arnold, J. G. Srinivasan, R. Muttiah, R. S. & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 34(1), 73-89.

Arnell, N. W. (1999). A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain. *Journal of Hydrology*, *217*(3-4), 314-335.

Ayele, G.T. Teshale, E.Z. Yu, B. Rutherfurd, I.D. Jeong, J. (2017). Streamflow and Sediment Yield Prediction for Watershed Prioritization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia: Water, 9(782), 1-29.soc. 34 (1): 73-89.

Beven, K. and A. Binley. 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol Proc*. 6: 279-298.

Cao, Y. Zhang, J. Yang, M. Lei, X. Guo, B. Yang, L. ... & Qu, J. (2018). Application of SWAT model with CMADS data to estimate hydrological elements and parameter uncertainty based on SUFI-2 Algorithm in the Lijiang river basin, China. *Water*, *10*(6), 742.

Chu, T. W. and A. Shirmohammadi. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. *Trans. ASAE*. 47(4): 1057-1073.

0 Eagleson, P. S. (1986). The emergence of global-scale hydrology. *Water Resources Research*, *22*(9S), 6S-14S.

Himanshu, S. K. Pandey, A. & Shrestha, P. (2017). Application of SWAT in an Indian river basin for modeling runoff, sediment and water balance. *Environmental Earth Sciences*, *76*(1), 3.

0 Liu, X. Yang, M. Meng, X. Wen, F. & Sun, G. (2019). Assessing the Impact of Reservoir Parameters on Runoff in the Yalong River Basin using the SWAT Model. *Water*, *11*(4), 643

Moriasi, D.N. Arnold, J.G. Van Liew, M.W. Bingner, R.L. Harmel, R.D. Veith, T.L. (2007), Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations: ASABE, 50, 885–900.

Qingyun Li, Xinxiao Yu, Zhongbao Xin, Yanwei Sun 2013. Modeling the Effects of Climate Change and Human Activities on the Hydrological Processes in a Semiarid Watershed of Loess Plateau. Journal of Hydrology Engineering, 18(4): 401-412.

0 Setegn, S. G. Dargahi, B. Srinivasan, R. and Melesse, A. M. 2010. Modeling of Sediment Yield from Anjeni-Gauged Watershed, Ethiopia Using SWAT Model, JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 46(3), 514–526.

0 Tolson, B. A. and B. Shoemaker. 2004. Watershed modelling of the Cannonsville basin using SWAT 2000: model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to Cannonsville reservoir. Technical report, School of civil and environmental engineering, Cornell University, Ithaca, New York.

0 Yang Q. F. R. Meng, Z. Zhao, T. L. Chow, G. Benoy, H. W. Rees, and C. P. A. Bourque. 2009. Assessing the impacts of flow diversion terraces on stream water and sediment yields at a watershed level using SWAT model. Agr. Ecosyst. Environ. 132: 23-31.

Yapo, P. O. Gupta, H. V. & Sorooshian, S. (1996). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology*, *181*(1-4), 23-48.