

تفاوت الگوریتم‌های SUFI-2 و GLUE در شبیه‌سازی رواناب حوزه‌های آبخیز جنگلی، مطالعه موردی: حوزه آبخیز سفارود

احمد نوحه‌گر^۱، آرش ملکیان^۲، مجید حسینی^۳، ارشک حلی‌ساز^۴ و ادریس تقوای سلیمی^{۵*}
^۱استاد، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، ^۲دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ^۳دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، ^۴استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه هرمزگان و ^۵دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه هرمزگان و مربی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۰۱

چکیده

دو عامل میزان هزینه و صرف زمان، مستقیماً با برآوردهای دقیق از میزان رواناب حوزه‌های آبخیز مرتبط است. اطلاع دقیق‌تر از وضعیت بارش رواناب در یک حوضه علاوه بر تسهیل در تصمیم‌گیری‌های مدیران حوضه در برنامه‌های آبی، گامی در جهت حفظ منابع طبیعی در راستای توسعه پایدار خواهد بود. در این پژوهش به منظور دستیابی بهینه به میزان رواناب در حوزه آبخیز سفارود، ابتدا داده‌های بارندگی چهار ایستگاه بارندگی در طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۱ جمع‌آوری شد و به همراه سایر نقشه‌های تهیه شده از منطقه مورد مطالعه چون DEM، کاربری اراضی و خاکشناسی به‌عنوان داده‌های ورودی در قالب مدل SWAT به نرم‌افزار داده شد. پس از اجرای مدل، به منظور بررسی عدم قطعیت داده‌ها و دستیابی به دقیق‌ترین شبیه‌سازی از الگوریتم‌های SUFI-2 و GLUE در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. بدین ترتیب که سه سال اولیه (۲۰۰۰-۱۹۹۸) از داده‌های بارندگی برای warm-up و هفت سال بعدی (۲۰۰۷-۲۰۰۱) برای مرحله واسنجی و چهار سال انتهایی (۲۰۱۱-۲۰۰۸) نیز برای مرحله صحت‌سنجی در نظر گرفته شدند. در نهایت با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد، عدم قطعیت داده‌ها با مقادیر به‌دست آمده برای عوامل P-factor و R-factor و ضرایب R^2 و NS مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد، دقت شبیه‌سازی الگوریتم SUFI-2 ($R^2=0/85$ و $NS=0/74$) در برآورد میزان رواناب حوضه از الگوریتم GLUE ($R^2=0/82$ و $NS=0/71$) بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: استان گیلان، توسعه پایدار، عدم قطعیت، وضعیت بارش، SWAT-CUP

مقدمه

در جریان‌های حوضه در مباحثی چون کاربری اراضی، پوشش گیاهی، لایه‌های خاک، نفوذپذیری، جریان‌های روی سطحی، جریان‌های زیرزمینی، پستی بلندی و زمین‌شناسی حوضه را مد نظر قرار داد، می‌توان امیدوار بود که تصمیمات مدیریتی در حوزه آبخیز همگام با توسعه پایدار در منطقه خواهد بود (Neitsch)

مدلسازی در هیدرولوژی باعث درک بهتر چرخه هیدرولوژی در مقیاس حوزه‌های آبخیز شده و این امر در روند توسعه پایدار منطقه تاثیرگذار است (Xu, 2003). اگر بتوان در شبیه‌سازی، از مدلی استفاده نمود که با نگاهی همه جانبه، همه گروه داده‌های موثر

Shen و همکاران (۲۰۱۲)، از الگوریتم GLUE^۴ در حوزه آبخیز Daning در چین برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب استفاده کردند. آن‌ها تعداد ۲۰ پارامتر موثر در رواناب و رسوب حوضه را برای کم کردن فاصله بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی مورد ارزیابی قرار داده و با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد، محدوده موثر هر پارامتر را معرفی نمودند. نهایتاً ضمن دستیابی به بهترین شبیه‌سازی به‌وسیله مدل، عملکرد الگوریتم یاد شده را مناسب ارزیابی نمودند.

مقایسه الگوریتم‌های SUFI-2 و GLUE را می‌توان در مطالعات Nkongle و همکاران (۲۰۱۴) مشاهده نمود که در حوزه آبخیز Tana در کنیا مورد ارزیابی قرار گرفت. آن‌ها در پژوهش خود اثر الگوریتم‌های مذکور در کاهش عدم قطعیت پارامترهای موثر در سیلاب حوضه را مورد بررسی قرار دادند و سرانجام بر اساس نتایج آماری حاصل از شبیه‌سازی هر یک از روش‌های فوق، الگوریتم SUFI-2 را به لحاظ آنکه توانسته است، فاصله بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را به حداقل برساند، برتر از الگوریتم GLUE معرفی نمودند.

در این پژوهش پس از مدل‌سازی بارش-رواناب حوزه آبخیز جنگلی شفارود در استان گیلان به‌وسیله مدل SWAT، از دو الگوریتم SUFI-2 و GLUE برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شد و نهایتاً برای کاهش میزان عدم قطعیت پارامترها، با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد، مقایسه دو الگوریتم یاد شده به گونه‌ای که بهترین برازش را بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ارائه نمایند، به انجام رسید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز شفارود یکی از حوزه‌های آبخیز غرب استان گیلان به مساحت ۳۳۶ کیلومتر مربع بوده که بین طول‌های جغرافیایی ۳۴° ۳۹' ۴۸" و ۱۱' ۸" ۴۹° و عرض‌های جغرافیایی ۵۸' ۲۴" ۳۷° و ۱۸' ۳۴" ۳۷° قرار گرفته و حداقل و حداکثر ارتفاع حوضه به ترتیب ۱۶۸ و ۲۸۹۵ متر

و همکاران، (۲۰۰۵). مدل SWAT^۱ (Arnold و همکاران، ۱۹۹۸) یک مدل هیدرولوژیکی نیمه‌فیزیکی و توزیعی است که به‌طور گسترده‌ای در دنیا به‌کار گرفته شده و قادر است ارزیابی دقیقی در مبحث مدیریت منابع آب را ارائه نماید. این مدل در مباحث همچون شبیه‌سازی رواناب و مدل‌سازی کیفیت آب (Debele و همکاران، ۲۰۰۸؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۱)، ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی (Sheng و همکاران، ۲۰۰۳؛ Fohrer و Schmalz، ۲۰۰۹؛ Niu و Sivakumar، ۲۰۱۴؛ Kryanova و Srinivasan، ۲۰۱۵)، برآورد تبخیر و تعرق (Alizadeh و همکاران، ۲۰۱۳)، بیلان آبی (Hosseini، ۲۰۱۴) و اثرات تغییر اقلیم (Andersson و همکاران، ۲۰۰۶؛ Azari و همکاران، ۲۰۱۳) به‌کار رفته است.

امروزه استفاده از روش‌های تحلیل عدم قطعیت پارامترها چون SUFI-2، MCMC، PCP و GLUE در مبحث مدیریت منابع آب و به طبع آن مدیریت منابع طبیعی و حوزه‌های آبخیز به‌طور گسترده‌ای توسط محققین و پژوهشگران در سراسر دنیا مورد استفاده قرار گرفته است (Schuol و Abasspour، ۲۰۰۶؛ Stedinger و همکاران، ۲۰۰۸؛ Alibuyog و همکاران، ۲۰۰۹؛ Li و همکاران، ۲۰۱۰؛ Shen و همکاران، ۲۰۱۰؛ Gosling و همکاران، ۲۰۱۱؛ Du و همکاران، ۲۰۱۳؛ Lin و همکاران، ۲۰۱۵؛ Nyeko، ۲۰۱۵).

به‌منظور پیش‌بینی دبی جریان، Narsimlu و همکاران (۲۰۱۵)، در حوزه آبخیز Kunwari در هند از مدل SWAT استفاده کردند. سپس الگوریتم SUFI-2 در برنامه جانبی SWAT-CUP^۲ را برای اعتباریابی و آنالیز عدم قطعیت پارامترهای موثر در جریان انتخاب نمودند. شروع کار آن‌ها با ورود نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک‌شناسی به نرم‌افزار بوده و به‌وسیله داده‌های بارندگی ثبت شده در ایستگاه‌های منطقه، شبیه‌سازی را انجام دادند. در نهایت با تحلیل عدم قطعیت داده‌ها به‌وسیله الگوریتم SUFI-2، بازه‌های بهینه برای پارامترهای موثر و همچنین، بهترین پیش‌بینی جریان را ارائه نمودند.

¹ Soil and Water Assessment Tools

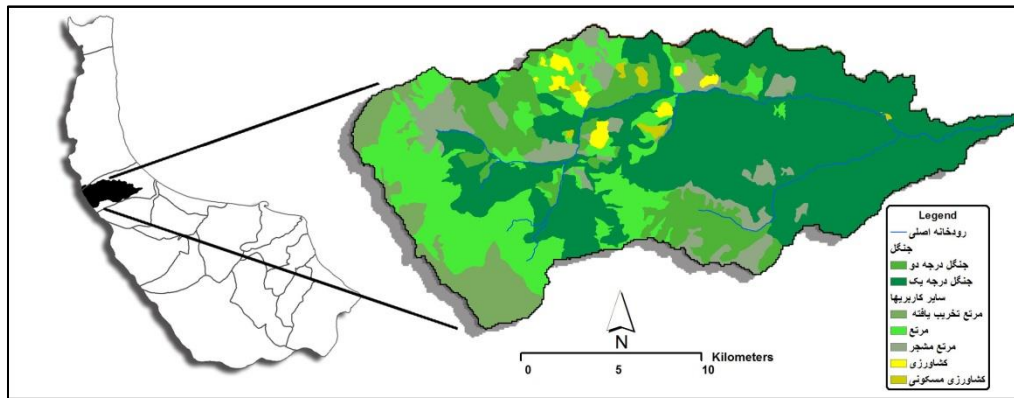
² Sequential Uncertainty Fitting

³ SWAT-Calibration and Uncertainty Program

⁴ Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

کشاورزی، منطقه مسکونی نیز با مساحت‌های کوچک‌تر در آن قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت حوضه در استان و وضعیت کاربری‌های آن را نشان می‌دهد.

است. این حوضه به یازده زیرحوضه تقسیم شده و ایستگاه هیدرومتری منطقه در خروجی حوضه قرار دارد. رودخانه اصلی حوضه به طول ۴۰/۹۵ کیلومتر بوده که بیشتر در شمال حوضه امتداد دارد. اکثریت حوضه دارای کاربری جنگل بوده و کاربری‌های مرتع،



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد پژوهش

خاک آمریکا (SCS)^۱ انجام می‌شود (Mishra و Singh, ۲۰۰۳). برنامه SWAT-CUP یک برنامه کامپیوتری برای واسنجی داده‌های خروجی‌های مدل SWAT بوده که توانایی انجام تحلیل حساسیت پارامترها، واسنجی، صحت‌سنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT را دارا است (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۷b).

الگوریتم SUFI-2: این الگوریتم تعریف کننده اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است (Rostamian و همکاران، ۲۰۱۳). این الگوریتم تمامی عدم قطعیت‌ها اعم از داده‌های ورودی، پارامترها، ساختار مدل و داده‌های خروجی را در بر می‌گیرد. اجرای مدل عدم قطعیت در این الگوریتم به‌وسیله باند عدم قطعیت ۹۵ درصد (95PPU)^۲ صورت می‌گیرد (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۴، ۲۰۰۷b). به‌منظور ارزیابی اجرای صحیح الگوریتم SUFI-2 در شبیه‌سازی جریان رواناب از چهار عامل P-factor، R-factor، ضریب کارایی نش-ساتکلیف و ضریب تعیین (R^2) استفاده شده است.

P-factor عامل P که نشان‌دهنده درصد حضور داده‌های مشاهداتی در محدوده عدم قطعیت ۹۵ درصد

SWAT و SWAT-CUP: مدل SWAT یک مدل نیمه‌فیزیکی برای ارزیابی اثرات مدیریت و آب و هوا بر روی بیلان آبی در حوزه‌های آبخیز است و چرخه هیدرولوژی که به‌وسیله SWAT شبیه‌سازی می‌شود، بر پایه رابطه بیلان آبی است.

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

که در آن، SW_t برابر با مقدار نهایی آب در خاک، SW_0 برابر با مقدار اولیه آب در خاک، R_{day} برابر با مقدار بارندگی در روز t ام، Q_{surf} برابر با مقدار رواناب سطحی در روز t ام، E_a برابر با مقدار تبخیر و تعرق در روز t ام، W_{seep} برابر با مقدار آبی که از پروفیل خاک به ناحیه غیراشباع در روز t ام وارد می‌شود و Q_{gw} برابر با مقدار جریان برگشتی در روز t ام است (Narsimlu و همکاران، ۲۰۱۵). این مدل یک حوضه را به چندین زیرحوضه با واحدهای هیدرولوژیک همگن از لحاظ توپوگرافی، کاربری اراضی و خصوصیات خاک تبدیل می‌کند (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۷a). مدل SWAT از توانایی شبیه‌سازی جریان رواناب و رسوب در چرخه هیدرولوژیکی حوزه آبخیز برخوردار است و این عمل به‌وسیله روش به روز شده سرویس حفاظت

¹ Soil Conservation Service

² Percentage Prediction Uncertainty

باشد، صحت اجرای مدل را اثبات می‌کند. رابطه زیر نحوه به‌دست آمدن ضریب R^2 را نشان می‌دهد (Plunkk و همکاران، ۲۰۱۴).

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{Ob,i} - \bar{Q}_{Ob})(Q_{S,i} - \bar{Q}_S)]^2}{\sum_i (Q_{Ob,i} - \bar{Q}_{Ob})^2 \sum_i (Q_{S,i} - \bar{Q}_S)^2} \quad (۴)$$

که در آن، Q_{Ob} و Q_S به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر شبیه‌سازی شده و \bar{Q}_{Ob} و \bar{Q}_S به ترتیب میانگین داده‌های مشاهداتی و میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهند.

الگوریتم GLUE: الگوریتم (GLUE Beven و Binley، ۱۹۹۲) نیز همانند SUFI-2 تمامی منابع عدم قطعیت (داده‌های ورودی، پارامترها، ساختار مدل و داده‌های خروجی) را در نظر می‌گیرد. در این الگوریتم فرض بر این است که برای پارامترهای موثر در رواناب حوضه، یک مقدار مشخص برای به‌دست آوردن بهترین شبیه‌سازی وجود ندارد (Yang و همکاران، ۲۰۰۸؛ Abbaspour، ۲۰۱۱). در GLUE ابتدا یک بازه احتمالی برای توزیع تمامی پارامترها انتخاب می‌شود (Muleta و Nicklow، ۲۰۰۵؛ Lenhart و همکاران، ۲۰۰۷؛ Migliaccio و Chaubey، ۲۰۰۸) و میزان جداول و حداکثر محدوده آن برای پارامترهای مختلف، متفاوت است. سپس با اجرای شبیه‌سازی مدل به تعداد دفعات بسیار زیاد، بهترین بازه برای هر پارامتر به‌طوری که بهترین برازش بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای را ارائه دهد، معرفی می‌شود. نهایتاً کارایی مدل به‌وسیله ضرایب نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین R^2 و همچنین، به‌وسیله عوامل P و R مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Abbaspour، ۲۰۱۱؛ Stedinger و همکاران، ۲۰۰۸).

در تحقیق حاضر، ابتدا با استفاده از لایه‌های توپوگرافی سازمان نقشه‌برداری کشور نسبت به تهیه نقشه رقومی ارتفاعی حوزه آبخیز شفارود اقدام شد. سپس نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه بر اساس داده‌های موجود در اداره کل منابع طبیعی استان گیلان در قالب نقشه‌ها و عکس‌های هوایی گردآوری شد و پس از رقومی‌سازی و انجام بازبینی‌های صحرائی به‌منظور مطابقت هر یک از کاربری‌ها، لایه

است، اغلب 95PPU نامیده می‌شود. محدوده عامل P بین صفر تا یک بوده و هر چقدر عدد به‌دست آمده برای این عامل به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تطابق بهتر داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی یا اندازه‌گیری شده است (Yang و همکاران، ۲۰۰۸).

R-factor: عامل R نشان‌دهنده ضخامت پهنای باند عدم قطعیت (95PPU) بوده که حالت بهینه آن، حالتی است که در آن باند عدم قطعیت، کمترین ضخامت را داشته باشد. اما به خاطر داشته باشیم که مقادیر بهینه برای پارامترهای مدل در هنگام شبیه‌سازی از تناسب مقادیر قابل قبول برای دو عامل P و R به‌دست می‌آید. عامل R از رابطه زیر به‌دست می‌آید (Yang و همکاران، ۲۰۰۸؛ Narsimlu و همکاران، ۲۰۱۵).

$$R\text{-factor} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t_i=1}^n (\gamma_{t_i, 97.5\%}^M - \gamma_{t_i, 2.5\%}^M)}{\sigma_{obs}} \quad (۲)$$

که در آن، $\gamma_{t_i, 97.5\%}^M$ و $\gamma_{t_i, 2.5\%}^M$ به ترتیب عبارتند از محدوده بالا و پایین باند عدم قطعیت و σ_{obs} انحراف استاندارد داده‌های مشاهده‌ای است.

ضریب نش-ساتکلیف: ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NS) وظیفه ارزیابی اجرای صحیح مدل را در امر شبیه‌سازی بر عهده دارد. این ضریب به‌وسیله رابطه زیر مورد محاسبه قرار می‌گیرد (Sutcliffe و Nash، ۱۹۷۰).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \{y_i - x_i\}^2}{\sum_{i=1}^n \{x_i - \bar{x}\}^2} \quad (۳)$$

که در آن، x_i مقدار داده‌های اندازه‌گیری شده، y_i مقادیر شبیه‌سازی شده و \bar{x} میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده است. مقادیر به‌دست آمده برای ضریب نش-ساتکلیف اگر در بازه $0.65 < NS < 0.75$ باشد، نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب و $NS > 0.75$ نشان‌دهنده شبیه‌سازی خیلی خوب مدل رواناب است (Plunkk و همکاران، ۲۰۱۴).

ضریب تعیین: ضریب تعیین R^2 ارتباط بین واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. مقدار این ضریب بین صفر و یک بوده که هر چقدر عدد به‌دست آمده به عدد یک نزدیک‌تر

داده شد و مدل SWAT برای حوزه آبخیز شفارود اجرا شد.

نتایج و بحث

پس از اجرای مدل، داده‌های خروجی مدل SWAT طی فرایند مشخص به‌عنوان ورودی‌های مدل SWAT-CUP فراخوانی شد. در این مرحله تعداد ۳۲ پارامتری که می‌توانند در رواناب حوزه‌های آبخیز دخیل باشند، انتخاب شدند و پس از انجام تحلیل حساسیت پارامترها، داده‌های غیرموثر حذف و نهایتاً تعداد ۱۴ پارامتر موثر چون، CN2، SOL_Z، SOL_AWC، SOL_K، SOL_ZMX، ALPHA_BNK، OV_N، SOL_BD، CH_K2، ALPHA_BF، GW_DELAY، GWQMN، CH_N2 و HRU_SLP برگزیده شدند. جدول ۱ پارامترهای موثر در رواناب را نشان می‌دهد.

اطلاعاتی کاربری اراضی تهیه شد و در نهایت نسبت به کدگذاری هر یک از کاربری‌ها بر اساس کدهای چهار حرفی مدل SWAT اقدام شد. در گام بعدی نقشه خاکشناسی منطقه مورد مطالعه بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از پلات‌های خاکشناسی، به‌صورت لایه اطلاعاتی خاک در قالب نقشه‌های رستری تهیه شد. در مرحله بعد آمار و اطلاعات مربوط به چهار ایستگاه بارندگی واقع در اطراف منطقه مورد مطالعه و یک ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوزه آبخیز شفارود بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۱ گردآوری شد و پس از بررسی و پردازش داده‌ها، آمار روزانه بارندگی ایستگاه‌ها در قالب فرمت مناسب (فایل‌های dbf) برای ورود به مدل SWAT تهیه شدند. در نهایت داده‌های ورودی مورد نیاز برای اجرای مدل همچون توپوگرافی، کاربری اراضی، خصوصیات خاک و داده‌های بارندگی به مدل

جدول ۱- پارامترهای موثر در جریان و میزان حساسیت آن‌ها

پارامتر	تعریف	رتبه حساسیت پارامتر	
		SUFI-2	GLUE
SOL_BD	چگالی حجمی خاک (g cm^{-3})	۱	۱
CN2	شماره منحنی در روش SCS (بدون بعد)	۲	۲
SOL_K	هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع (mm hr^{-1})	۳	۴
ALPHA_BNK	ضریب آلفا جریان پایه (days)	۴	۳
SOL_ZMX	ماکزیمم عمق پروفیل خاک (mm)	۵	۱۱
SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس در لایه خاک (mm mm^{-1})	۶	۵
CH_N2	ضریب مانینگ آبراهه اصلی (بدون بعد)	۷	۹
GW_DELAY	زمان تاخیر جریان زیرزمینی (day)	۸	۱۲
CH_K2	هدایت هیدرولیکی بستر آبراهه اصلی (mm/hr)	۹	۸
SOL_Z	عمق خاک (mm)	۱۰	۱۰
OV_N	ضریب مانینگ برای جریان سطحی (بدون بعد)	۱۱	۱۳
HRU_SLP	طول شیب متوسط در هر HRU (m m^{-1})	۱۲	۱۴
GWQMN	حداقل مقدار (آستانه) جریان در آبخوان (mm)	۱۳	۶
ALPHA_BF	ضریب عکس‌العمل جریان آب زیرزمینی (days^{-1})	۱۴	۷

CUP داده شد و ۱۴ پارامتر یاد شده، بر اساس دو الگوریتم SUFI-2 و GLUE مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. در مجموع برای هر الگوریتم، سه دفعه واسنجی و در هر دفعه، تعداد ۵۰۰ بار شبیه‌سازی انجام شد. بعد از هر تلاش، بازه جدید عدم قطعیت (بازه بهینه شده) برای هر یک از پارامترها در تلاش بعدی مورد استفاده قرار گرفت.

دوره آماری این پژوهش بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۱ بوده که تعداد سه سال (۱۹۹۸-۲۰۰۰) برای گرم کردن مدل (warm-up)، هفت سال (۲۰۰۷-۲۰۰۱) برای دوره واسنجی و تعداد چهار سال (۲۰۰۸-۲۰۱۱) برای دوره صحت‌سنجی استفاده شد. در مرحله واسنجی داده‌های اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه به‌صورت ماهانه به برنامه SWAT-

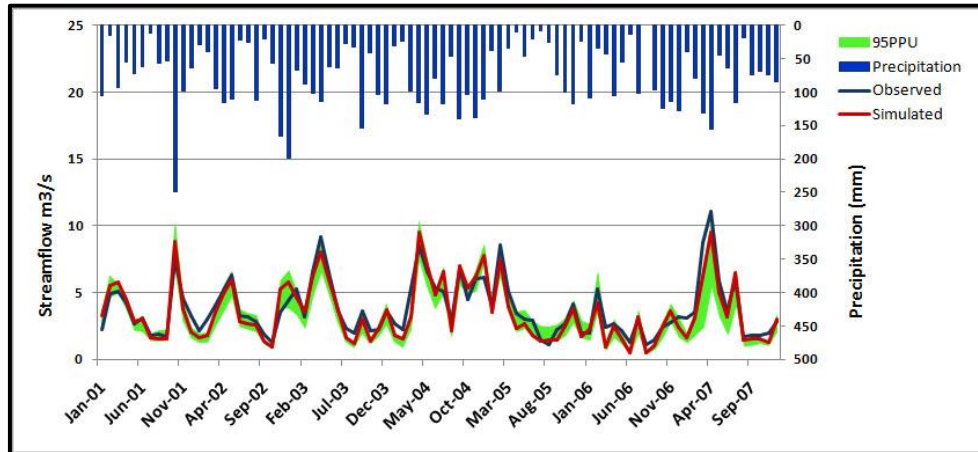
۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷ را در مرحله واسنجی نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتایج آماری به‌دست آمده در مرحله واسنجی

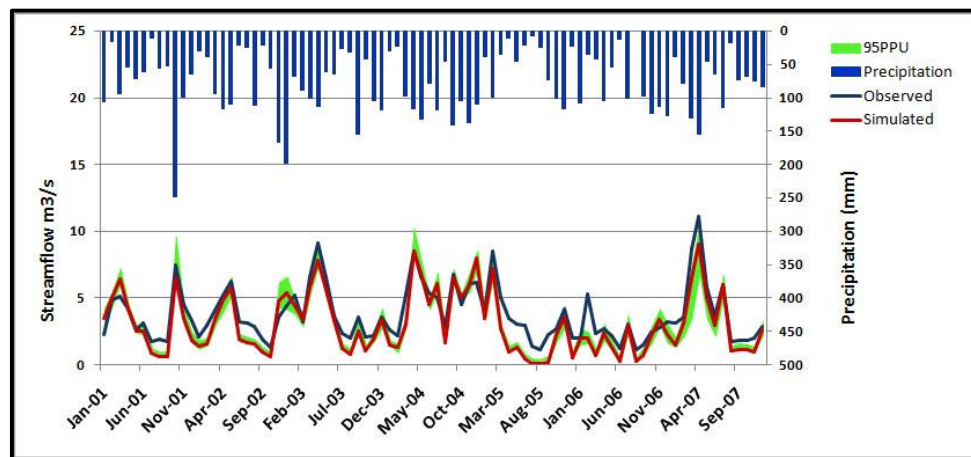
GLUE	SUFI-2	
۰/۳	۰/۵۱	P-factor
۰/۴۵	۰/۵۴	R-factor
۰/۸۴	۰/۸۶	R ²
۰/۷۲	۰/۷۷	NS

نهایتاً ارزیابی کارایی الگوریتم‌های SUFI-2 و GLUE با بررسی نتایج آماری ضرایب تعیین R² و نش-ساتکلیف (NS) و همچنین، بررسی عوامل R و P مورد بررسی قرار گرفت که مقادیر آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

شکل‌های ۲ و ۳ بهترین شبیه‌سازی حاصل از الگوریتم‌های SUFI-2 و GLUE برای دوره زمانی



شکل ۲- شبیه‌سازی به‌وسیله الگوریتم SUFI-2 در مرحله واسنجی



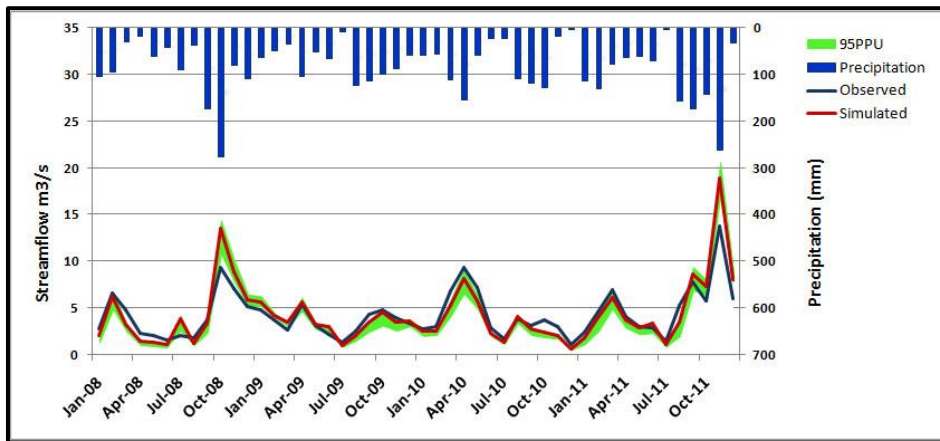
شکل ۳- شبیه‌سازی به‌وسیله الگوریتم GLUE در مرحله واسنجی

الگوریتم‌های SUFI-2 و GLUE به‌وسیله عوامل P-factor و R-factor و ضرایب R² و NS مورد ارزیابی قرار گرفت که در جدول ۴ آورده شده است. شکل‌های ۶ و ۷ به‌منظور مقایسه تطابق مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی در دو الگوریتم SUFI-2 و GLUE ترسیم شده که برآزش بهتر مقادیر شبیه‌سازی شده را در الگوریتم SUFI-2 می‌توان مشاهده کرد.

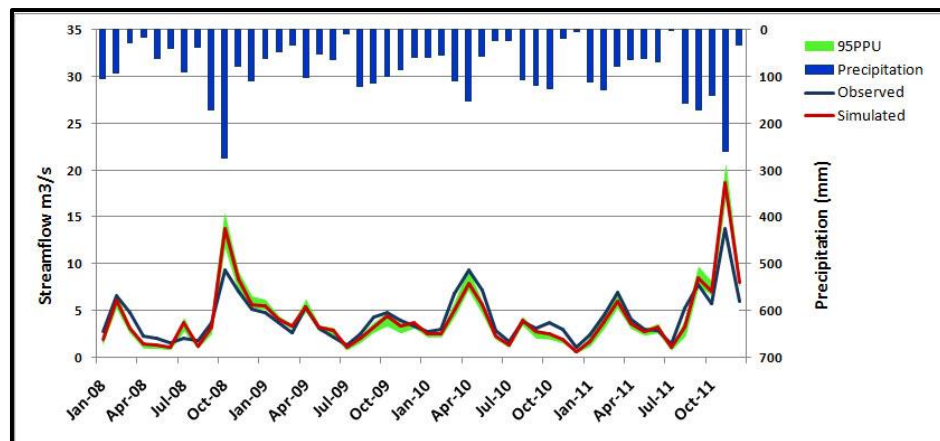
پس از انجام مرحله واسنجی، بر اساس بهترین شبیه‌سازی انجام شده با توجه به ضرایب و عوامل ارزیابی، مقادیر بهینه پارامترها (بهترین بازه برای هر پارامتر) به‌دست آمد که در جدول ۳ ارائه شده است. با انتقال مقادیر بهینه پارامترها به مدل، به‌منظور صحت‌سنجی، شبیه‌سازی رواناب برای هر دو الگوریتم SUFI-2 و GLUE در دوره زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ انجام شد که در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. در نهایت نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده به‌وسیله

جدول ۳- محدوده پارامترهای مدل

پارامتر	محدوده اولیه		محدوده بهینه	
	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
SOL_Z	۰	۱۰۰۰	۳۱۵/۵	۵۰۶/۱
SOL_ZMX	۰	۳۵۰۰	۶۶/۶	۱۶۲/۴
ALPHA_BF	۰	۱	۰/۱۷۱	۰/۲۹۷
CH_K2	۵	۱۸۰	۱۳۳/۷	۱۶۵/۱
HRU_SLP	۰	۰/۲	۰/۰۴۴	۰/۰۹۳
GWQMN	۰	۲	-۰/۷۸۳	۰/۲۳۸
CN2	-۰/۲	۰/۲	۰/۱۹۳	۰/۲۷۲
GW_DELAY	۳۰	۴۵۰	۱۲۱/۸۹	۱۶۷/۱۹
SOL_K	-۰/۸	۰/۸	۰/۴۳۴	۰/۷۸۴
OV_N	-۰/۲	۰	-۰/۱۹۹	-۰/۱۶۸
CH_N2	۰	۰/۳	۰/۲۰۴	۰/۲۴۵
ALPHA_BNK	۰	۱	۰/۶۱	۰/۹۱
SOL_AWC	-۰/۲	۰/۴	۰/۰۱۱	۰/۰۸۸
SOL_BD	-۰/۵	۰/۶	۰/۳۳۴	۰/۵۷۱



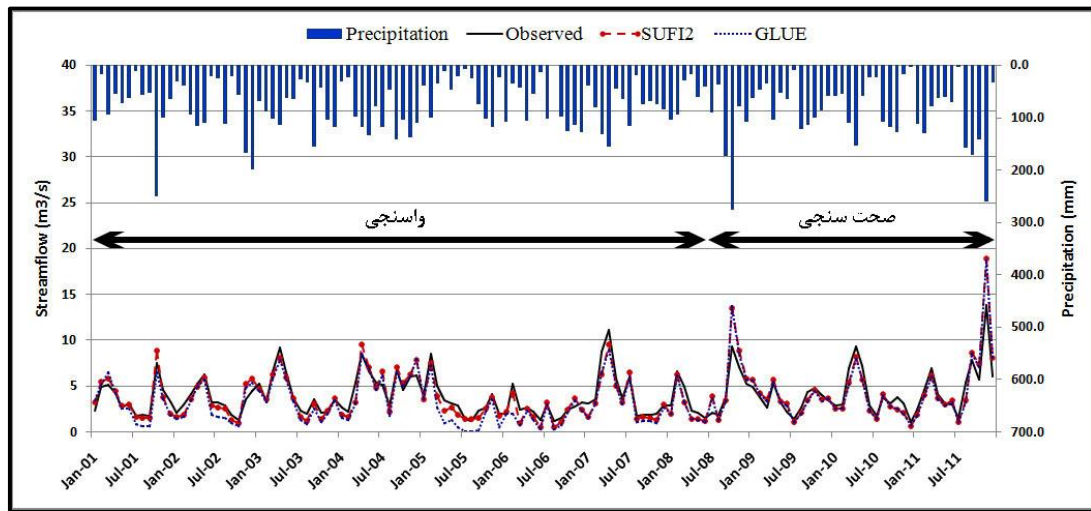
شکل ۴- شبیه‌سازی به‌وسیله الگوریتم SUFI-2 در مرحله صحت‌سنجی



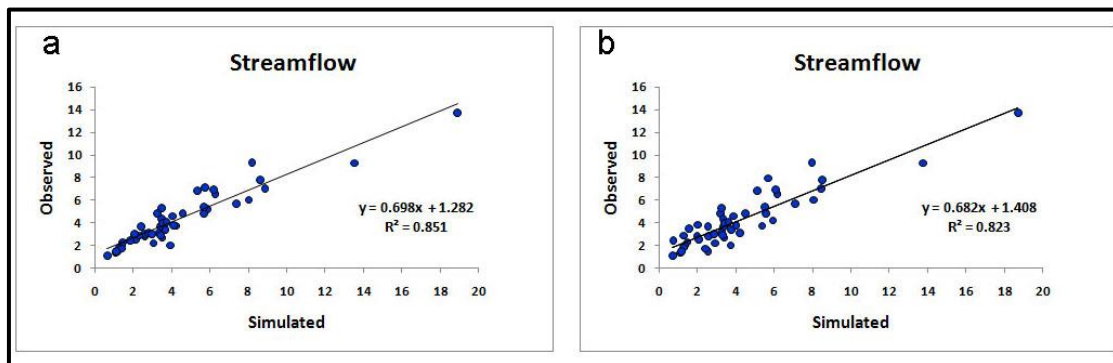
شکل ۵- شبیه‌سازی به‌وسیله الگوریتم GLUE در مرحله صحت‌سنجی

جدول ۴- مقایسه نتایج آماری مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

عامل	واسنجی		صحت‌سنجی	
	GLUE	SUFI-2	GLUE	SUFI-2
P-factor	۰/۳	۰/۵۱	۰/۲۷	۰/۶۳
R-factor	۰/۴۵	۰/۵۴	۰/۴۳	۰/۴۹
R ²	۰/۸۴	۰/۸۶	۰/۸۲	۰/۸۵
NS	۰/۷۲	۰/۷۷	۰/۷۱	۰/۷۴



شکل ۶- مقایسه الگوریتم SUFI-2 و GLUE



شکل ۷- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در مرحله صحت‌سنجی، (a) الگوریتم SUFI-2 و (b) الگوریتم GLUE

GLUE در یکی از حوزه‌های آبخیز جنگلی استان گیلان که بیش از ۶۳ درصد از مساحت آن را پوشش جنگلی تشکیل داده است، پرداخته و پس از آماده‌سازی داده‌های اولیه مورد نیاز (چون بارندگی، توپوگرافی، کاربری اراضی، خاکشناسی) و اجرای مدل، واسنجی و صحت‌سنجی داده‌ها به‌وسیله دو الگوریتم یاد شده انجام شد.

اگر ضریب نش-ساتکلیف (NS) بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ باشد، دقت شبیه‌سازی خوب بوده و در صورتی که ضریب مذکور بیش از ۰/۷۵ به‌دست آید، دقت شبیه-

امروزه به‌کارگیری مدل SWAT به همراه برنامه SWAT-CUP در شبیه‌سازی جریان هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز به‌وسیله بسیاری از پژوهشگران توصیه شده است. این روش ضمن معرفی پارامترهای حساس در مبحث بارش-رواناب، توانایی بالایی در پیدا کردن محدوده بهینه برای پارامترها و متعاقب آن شبیه‌سازی دقیق‌تر رواناب حوضه‌های مختلف (از نظر تفاوت در کاربری‌ها، نوع خاک، توپوگرافی و غیره) دارد (Azari و همکاران، ۲۰۱۳). در این پژوهش به‌وسیله مدل SWAT به مقایسه توانایی دو الگوریتم SUFI-2 و

الگوریتم SUFI-2 مقدار P-factor دارای حد قابل قبولی است که بر اساس آن می‌توان نتیجه‌گیری نمود دقت شبیه‌سازی الگوریتم GLUE کمتر از SUFI-2 است.

دستیابی به مقادیر بهینه داده‌ها و پارامترهای موثر در رواناب حوضه‌ها در پایین آوردن میزان عدم قطعیت آن‌ها موثر بوده و به دنبال آن تخمین دقیق‌تری از مدل بارش رواناب حوضه را ارائه می‌دهد. دو الگوریتم SUFI-2 و GLUE با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد، توانایی کم کردن عدم قطعیت پارامترها و ارائه یک محدوده بهینه برای آن‌ها را دارا هستند. با نگاهی به نتایج ارائه شده در جدول ۳ و مقایسه مقادیر اولیه و نهایی به‌دست آمده برای پارامترها، دقت بالای دو الگوریتم در پیدا کردن محدوده دقیق‌تر و کاهش عدم قطعیت پارامترها مشخص می‌شود. در مجموع می‌توان گفت اگر چه هر دو الگوریتم SUFI-2 و GLUE، در کاهش اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توانمند هستند، ولی کارایی الگوریتم SUFI-2 در مبحث شبیه‌سازی رواناب نسبت به الگوریتم GLUE از دقت بیشتری برخوردار است. نتایج این پژوهش با یافته‌های Nkonge و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد. همچنین، Singh و همکاران (۲۰۱۳) نیز در حوزه آبخیز Tungabhadra در کشور هندوستان که ۴۴ درصد مساحت آن را پوشش جنگلی تشکیل می‌دهد، توانایی دو الگوریتم SUFI-2 و GLUE در شبیه‌سازی جریان دبی را مورد مقایسه قرار داده و نتایج به‌دست آمده از روش SUFI-2 را مناسب‌تر تشخیص دادند.

یافته‌های این پژوهش می‌تواند برای مباحث همچون حفاظت خاک و آب، خشکسالی و مبحث سیل مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، می‌توان از الگوریتم SUFI-2 برای ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی و تغییر اقلیم بر منابع آب در حوزه‌های آبخیز در تحقیقات آینده استفاده نمود.

سازی در حد عالی است (Pluntke و همکاران، ۲۰۱۴). از طرفی هر چه میزان ضریب R^2 به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تطابق بیشتر داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. با نگاهی به جدول ۴ درمی‌یابیم که ضریب نش-ساتکلیف برای الگوریتم SUFI-2 در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۷۴ به‌دست آمده که در مقایسه با مقادیر به‌دست آمده برای ضریب مذکور در الگوریتم GLUE (۰/۷۲ و ۰/۷۱) بیشتر است. همچنین، میزان ضریب R^2 نیز برای الگوریتم SUFI-2 از الگوریتم GLUE بیشتر است. بنابراین بر اساس مقایسه انجام شده می‌توان گفت الگوریتم SUFI-2 دقت و کارایی بیشتری نسبت به الگوریتم GLUE دارد.

یکی دیگر از معیارهای مقایسه برای تطابق بهتر داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی، P-factor است که نشان‌دهنده میزان حضور داده‌های مشاهداتی در باند عدم قطعیت (95PPU) است و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، دقت بیشتر شبیه‌سازی را نشان می‌دهد (Yang و همکاران، ۲۰۰۸) که این مقدار مطابق جدول ۴ برای الگوریتم SUFI-2 (۰/۵۱) و ۰/۶۳) بیشتر از GLUE (۰/۳ و ۰/۲۷) است. اگرچه R-factor که نشان‌دهنده پهنای باند عدم قطعیت است در شبیه‌سازی انجام شده با الگوریتم GLUE مقادیر کمتری را نشان می‌دهد، اما این عامل به تنهایی نمی‌تواند مبنای مقایسه برای سنجش کارایی روش‌های شبیه‌سازی باشد و باید به‌صورت مشترک با مقادیر به‌دست آمده برای P-factor در نظر گرفته شود. Yang و همکاران (۲۰۰۸) تناسب بین مقادیر P-factor و R-factor را نشان‌دهنده دقت شبیه‌سازی عنوان نمودند. بنابراین می‌توان گفت، در الگوریتم GLUE اگر چه پهنای باند عدم قطعیت داده‌ها (کمتر بودن R-factor) نسبت به SUFI-2 کوچک‌تر است، اما حضور داده‌های مشاهداتی در محدوده باند عدم قطعیت (P-factor) بسیار ناچیز است. در مقابل در

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K.C. 2011. SWAT-CUP4: SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag.
2. Abbaspour, K.C., C. Johnson and M.T. Van Genuchten. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3: 1340–1352.

3. Abbaspour, K.C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist and R. Srinivasan. 2007a. Modelling hydrology and water quality in the prealpine/alpine Thur Watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2-4): 413-430.
4. Abbaspour, K.C., M. Vejdani and S. Haghghat. 2007b. SWATCUP calibration and uncertainty programs for SWAT. In: Proc. Intl. Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'2007), Melbourne, Australia, 1603-1609.
5. Alibuyog, N.R., V.B. Ella, N.R. Reyes, R. Srinivasan, C. Heatwole and T. Dillaha. 2009. Predicting the effects of land use change on runoff and sediment yield in Manupali River sub-watersheds using the SWAT model. *International Agricultural Engineering Journal*, 18(1-2): 15-25.
6. Alizadeh, A., A. Izady, K. Davary, A. Ziaei, S. Akhavan and Z. Hamidi. 2013. Estimation of actual evapotranspiration at regional–annual scale using SWAT. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 7(2): 243-258.
7. Andersson, L., J. Wilk, M.C. Todd, D.A. Hughes, A. Earle, D. Kniveton, R. Layberry and H.H.G. Savenije. 2006. Impact of climate change and development scenarios on flow patterns in the Okavango River. *Journal of Hydrology*, 331(1): 43-57.
8. Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment, part I: model development. *Journal of American Water Resources Association*, 34(1): 73–89.
9. Azari, M., H.R. Moradi, B. Saghafian and M. Faramarzi. 2013. Assessment of hydrological effects of climate change in Gourganroud river basin. *Journal of Water and Soil*, 27(3): 537-547 (in Persian).
10. Beven, K. and A. Binley. 1992. The future of distributed models-model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3): 279–298.
11. Debele, B., R. Srinivasan and J.Y. Parlange. 2008. Coupling upland watershed and downstream water hydrodynamic and water quality models (SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basins. *Environmental Modeling and Assessment*, 13: 135-153.
12. Du, J., H. Rui, T. Zuo, Q. Li, D. Zheng, A. Chen, Y. Xu and C.Y. Xu. 2013. Hydrological simulation by SWAT model with fixed and varied parameterization approaches under land use changes. *Water Resources Management*, 27: 2823–2838.
13. Gosling, S.N., R.G. Taylor, N.W. Arnell and M.C. Todd. 2011. A comparative analysis of projected impacts of climate change on river runoff from global and catchment-scale hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 279–294.
14. Hosseini, M. 2014. Simulation of water balance in Gharesou watershed using SWAT. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 6(1): 63-73 (in Persian).
15. Krysanova, V. and R. Srinivasan. 2015. Assessment of climate and land use change impacts with SWAT. *Regional Environmental Change*, 15: 431–434.
16. Lenhart, T., K. Eckhardt, N. Fohrer and H.G. Frede. 2007. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27: 645–654.
17. Li, Z., Q. Shao, Z. Xu and X. Cai. 2010. Analysis of parameter uncertainty in semi-distributed hydrological models using bootstrap method: A case study of SWAT model applied to Yingluoxia Watershed in northwest China. *Journal of Hydrology*, 385: 76–83.
18. Lin, B., X. Chen, H. Yao, Y. Chen, M. Liu, L. Gao and A. James. 2015. Analysis of land use change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. *Ecological Indicators*, 58: 55–63.
19. Migliaccio, K.W. and I. Chaubey. 2008. Spatial distributions and stochastic parameter influences on SWAT flow and sediment predictions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13: 258–269.
20. Mishra, S.K. and V. Singh. 2003. Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology. Berlin, Springer, 516 pages.
21. Muleta, M.K. and J.W. Nicklow. 2005. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. *Journal of Hydrology*, 306: 127–145.
22. Narsimlu, B., A.K. Gosain, B.R. Chahar, S.K. Singh, and P.K. Srivastava. 2015. SWAT model calibration and uncertainty analysis for streamflow prediction in the Kunwari river basin, India, using sequential uncertainty fitting. *Environmental Processes*, 2: 79–95.
23. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282–290.
24. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry and J.R. Williams. 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 494 pages.
25. Niu, J. and B. Sivakumar. 2014. Study of runoff response to land use change in the east river basin in south China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(4): 857-865.

26. Nkonge, L.K., J.K. Sang, J.M. Gathanya and P.G. Home. 2014. Comparison of two calibration-uncertainty methods for soil and water assessment tool in stream flow modeling. *Journal of Sustainable Research in Engineering*, 1(2): 40-44.
27. Nyeko, M. 2015. Hydrologic modelling of data scarce basin with SWAT model capabilities and limitations. *Water Resources Management*, 29: 81-94.
28. Pluntke, T., D. Pavlik and C. Bernhofer. 2014. Reducing uncertainty in hydrological modelling in a data sparse region. *Environmental Earth Sciences*, 72: 4801-4816.
29. Rostamian, R., A. Jaleh, M. Afyuni, S.F. Mousavi, M. Heidarpour, A. Jalalian and K.C. Abbaspour. 2013. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 53(5): 977-988.
30. Schmalz, B. and N. Fohrer. 2009. Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model. *Advances in Geosciences*, 21: 91-98.
31. Schuol, J. and K.C. Abbaspour. 2006. Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to West Africa. *Advances in Geosciences*, 9: 137-143.
32. Shen, Z., Q. Hong, H. Yu and J. Niu. 2010. Parameter uncertainty analysis of non-point source pollution from different land use types. *Science of the Total Environment*, 408: 1971-1978.
33. Shen, Z.Y., L. Chen and T. Chen. 2012. Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 121-132.
34. Sheng, X.B., J.Z. Sun and Y.X. Liu. 2003. Effect of land-use and land-cover change on nutrients in soil in Bashang area, China. *Journal of Environmental Sciences*, 15(4): 548-553.
35. Singh, V., N. Bankar, S.S. Salunkhe, A.K. Bera and J.R. Sharma. 2013. Hydrological stream flow modelling on Tungabhadra catchment: parameterization and uncertainty analysis using SWAT-CUP. *Current Science*, 104(9): 1187-1199.
36. Stedinger, J.R., R.M. Vogel, S.U. Lee and R. Batchelder. 2008. Appraisal of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) method. *Water Resources Research*, 44:W00B06, doi:10.1029/2008WR006822.
37. Xu, C.Y. 2003. Testing the transferability of regression equations derived from small sub-catchments to large area in central Sweden. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7: 317-324.
38. Yang, J., K.C. Abbaspour, P. Reichert and H. Yang. 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to Chaohe basin in China. *Journal of Hydrology*, 358(1-2): 1-23.
39. Zhang, Y., J. Xia, Q. Shao and X. Zhai. 2011. Water quantity and quality simulation by improved SWAT in highly regulated Huai river basin of China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(1): 11-27.