

مقایسه دو روش متفاوت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT در بر آورد میزان رواناب و بار مواد جامد معلق حوضه

محمد تقی اعلمی*^۱، حبیبه عباسی^۲، محمد حسین نیک سخن^۳

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۰

۱-استاد گروه عمران آب دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز

۲-دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب دانشگاه تبریز

۳-دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست دانشگاه تهران

*مسول مکاتبه: mtaalami@tabrizu.ac.ir

چکیده

برآورد میزان بار مواد جامد معلق حوضه‌ها در بالادست سدها با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی گام اساسی در کنترل کیفی آب مخازن می‌باشد. بنابراین قبل از بکارگیری این مدل‌ها، واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل شبیه‌ساز برای این منظور ضروری می‌باشد. در این مطالعه، مدل SWAT در حوضه آبریز بالادست سد علویان (رودخانه صوفی‌چای مراغه) واقع در استان آذربایجان شرقی جهت پیش‌بینی رواناب و بار مواد جامد معلق حوضه به کار برده شده است. جهت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT از دو روش SUFI-2 و GLUE گردید. نتایج حاصل با استفاده از ۴ معیار ارزیابی مدل‌ها شامل معیار نش ساتکلیف (NS)، ضریب تبیین (R^2)، نسبت باقیمانده میانگین مربعات خطا به انحراف از معیار داده‌های مشاهداتی (RSR) و (br^2) و دو فاکتور اندازه‌گیری عدم قطعیت شامل p -factor و r -factor مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از کاربرد دو روش مذکور نشان داد روش SUFI-2 دارای الگوریتم موثرتری جهت واسنجی و تعیین عدم قطعیت مدل‌ها می‌باشد. بر این اساس با اطمینان بیشتری می‌توان از مدل SWAT واسنجی شده با الگوریتم SUFI-2 در مدیریت منابع آب، کمی‌سازی سناریوهای تغییر اقلیم و تغییر کاربری و تخمین تاثیر اجرای بهترین راهکارهای مدیریتی (BMP) در داخل حوضه استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: عدم قطعیت، مدل SWAT، رواناب، بار مواد جامد معلق، SUFI-2 و GLUE

Comparison of two Calibration-Uncertainty Methods for Soil and Water Assessment Tool in Stream Flow and Total Suspended Solids Modeling

MT Aalami ^{*1}, H Abbasi ², MH Niksokhan ³

Received: 2017-12-13

Accepted: 2018-10-02

¹Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Phd candidate, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³Associate Professor, Department of Environmental Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* Corresponding Author Email: mtaalami@tabrizu.ac.ir

Abstract

Estimation of total suspended solids in upland watershed of reservoirs using simulation models is a vital key to manage reservoirs water quality. It is consequently essential that these models undergo calibration and uncertainty analysis before their application. In this study, Soil and Water Assessment Tool model was applied to estimate stream flow and total suspended solids for Sofichai Watershed upstream of the Alavian Reservoir located in East-Azərbayjan province. The Generalized Likelihood Uncertainty Equation (GLUE) and Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) were used in this study to calibrate and analyze the uncertainty of SWAT model. The performance of the GLUE and SUFI-2 was evaluated using four objective functions namely: Nash-Sutcliffe Efficiency (NS), coefficient of determination (R^2), RMSE-observations standard deviation ratio (RSR) and the adjusted R^2 coefficient (bR^2). Uncertainty statistics used were the *P-factor* and *R-factor*. SUFI-2 proved to be a very efficient optimization algorithm for Calibration and uncertainty analysis. The model calibrated with SUFI-2 can therefore be applied confidently for water resources management, for quantification of scenarios of climate and land use change, and for estimation of the Best Management Practices efficiencies in the watershed.

Keywords: uncertainty, SWAT model, Stream Flow, total suspended solids, SUFI-2, GLUE

مقدمه

از آنجایی که مدل‌های شبیه‌ساز هیدرولوژیکی به طور فزاینده‌ای جهت اتخاذ تصمیمات در انتخاب گزینه‌های مدیریتی استفاده می‌شوند، واسنجی و تحلیل عدم قطعیت دقیق آنها مهم می‌باشد. این مدل‌ها تحت تاثیر عدم قطعیت‌های بزرگ قرار دارند که شامل عدم قطعیت مدل مفهومی، عدم قطعیت داده‌های ورودی مدل و عدم قطعیت پارامتری می‌باشند. استفاده از روش‌های معمول عدم قطعیت مانند روش استنباط فراوانی‌گرایانه و روش بی‌زین^۲ که فقط عدم قطعیت عوامل (پارامترها) را در نظر می‌گیرد و از سایر عدم قطعیت‌ها صرف نظر می‌کند، منجر به تعیین غیر واقعی بازه عدم قطعیت می‌شود. از جمله روش‌های جدید که هر سه نوع عدم قطعیت را در نظر می‌گیرد شامل روش SUFI-2 (عباسپور همکاران

۲۰۰۴ و ۲۰۰۷) و روش GLUE (بوین و بیلی ۱۹۹۲) می‌باشد. علیرغم توسعه تعداد زیادی از روش‌های تحلیل عدم قطعیت، به ندرت بیشتر از یک روش برای یک مورد مطالعاتی به کار برده شده است که در زیر به برخی از آنها اشاره شده است.

شیرمحمدی (۲۰۰۶)، تجربیات دانشمندان و مهندسان را در مورد ارزیابی عدم قطعیت در ارتباط با برنامه‌های حداکثر بار آلودگی روزانه (TMDL) تشریح نمود. نتایج مطالعه نشان داد که عدم قطعیت در مدل‌های TMDL یک موضوع واقعی است که باید برای هر دو مرحله ارزیابی و اجرای TMDL مورد توجه قرار گیرد. عربی و همکاران (۲۰۰۷)، یک چارچوب محاسباتی را برای تحقیق در مورد عدم قطعیت در ارزیابی اقدامات مدیریتی حوضه آبریز تدوین نمودند. آنها از روش GLUE برای تولید یک

² Bayesian Approach

¹ Frequentist Approach

SWAT مدلی در مقیاس حوضه آبریز می‌باشد که توسط آرنولد و همکاران (۱۹۹۸) ارائه شده است. این مدل برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت زمین‌ها بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی-کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری زمین‌ها و شرایط مختلف مدیریتی در درازمدت طراحی شده است. چرخه هیدرولوژیک که در مدل SWAT شبیه‌سازی می‌شود، بر اساس معادله بیلان آب استوار می‌باشد.

[1]

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

که در این معادله، SW_t مقدار نهایی رطوبت خاک (میلی‌متر آب)، SW_0 مقدار اولیه رطوبت خاک (میلی‌متر آب)، t زمان (روز)، R_{day} مقدار بارش در روز i ام (میلی‌متر آب)، Q_{surf} مقدار رواناب در روز i ام (میلی‌متر آب)، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (میلی‌متر آب)، W_{seep} مقدار نشت که در روز i ام از نیمرخ خاک وارد منطقه غیر اشباع می‌شود (میلی‌متر آب)، Q_{gw} مقدار آب بازگشتی در روز i ام (میلی‌متر آب) می‌باشد.

در مدل SWAT، فرسایشی که به وسیله بارش و رواناب ایجاد می‌شود از رابطه اصلاح شده معادله جهانی فرسایش (MUSLE) محاسبه می‌شود. این معادله فرم اصلاح شده معادله USLE می‌باشد که در آن فاکتور بارندگی یا همان شاخص فرسایش ویشمایر^۲ با فاکتور رواناب جایگزین شده است. یعنی به جای محاسبه انرژی ذرات باران در فرسایش خاک، از رواناب سطحی به عنوان عامل فرسایش استفاده می‌شود. از آنجایی که MUSLE نمی‌تواند میزان رسوبات منتقل شده به رودخانه، انتقال رسوب در رودخانه و رسوبات جمع‌شده در مخازن سدها را برآورد نماید به این منظور در مدل SWAT برای محاسبه مقدار فرسایش و رسوب در رودخانه‌ها از روش روندیابی رسوب استفاده می‌شود. مدل روندیابی رسوب شامل دو جزء تجزیه و ته‌نشست

درست‌نمایی تجمعی برای خروجی‌های مواد مغذی و رسوب مدل SWAT، استفاده کردند. پوررضا بیلوندی و همکاران (۲۰۱۳)، سه روش بررسی عدم قطعیت PSO، DREAM^۲ و SUFI-2 را در پیش‌بینی رواناب حوضه قزل‌اوزن بررسی کردند. بررسی آنها نشان داد که تفاوت زیادی بین عوامل آماری وجود ندارد و تفاوت بارز آنها در تعداد اجرا می‌باشد؛ به طوری که روش SUFI-2 با تعداد اجرای کمتر الگوریتم موثرتری جهت تعیین عدم قطعیت دارد. سینگ و همکاران (۲۰۱۳)، مدل SWAT را جهت برآورد دبی حوضه تونگابهارا به کار بردند. آنها از دو روش SUFI-2 و GLUE جهت واسنجی و بررسی عدم قطعیت مدل SWAT استفاده نمودند. بررسی نتایج نشان داد که بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی دبی ماهانه همبستگی خوبی وجود دارد در حالی که همبستگی در گام زمانی روزانه نسبتاً خوب می‌باشد. بسالت پور و همکاران (۲۰۱۴) کارایی ۳ الگوریتم واسنجی شامل الگوریتم‌های PSO، SUFI-2 و GLUE برای مدل SWAT، به منظور شبیه‌سازی رواناب روزانه در حوزه آبخیز کوهستانی بازفت بررسی کردند. وو و همکاران (۲۰۱۴)، از سه الگوریتم ParaSol، SUFI-2 و GLUE جهت واسنجی و بررسی عدم قطعیت مدل SWAT در برآورد رواناب حوضه رودخانه ونجینگ استفاده کردند. بررسی نتایج حاصل نشان داد که روش SUFI-2 نسبت به دو روش دیگر نتایج بهتری دارد.

هدف اصلی این مقاله، مقایسه نتایج حاصل از کاربرد دو روش GLUE و SUFI-2 در واسنجی و بررسی عدم قطعیت مدل SWAT در تخمین میزان رواناب و بار مواد جامد معلق روزانه می‌باشد. جهت ارزیابی کارایی دو روش مذکور از ۴ پارامتر ارزیابی مدل‌ها شامل NS، R²، RSR و bR² جهت تعیین میزان عدم قطعیت مدل SWAT از دو فاکتور p -factor و r -factor استفاده شده است.

مواد و روشها

مدل SWAT

² Differential Evolution Adaptive Metropolis

³ Wischmeier

¹ Partical Swarm Optimization

۱- در مرحله اول تابع هدف $g(\theta)$ و بازه عوامل $[\theta_{abs\ min} \cdot \theta_{abs\ max}]$ تعریف می‌شوند.

۲- از روش نمونه برداری لاتین مکعبی در بازه تعریف شده در مرحله قبل، جهت تولید مجموعه عوامل و مقدار تابع هدف به ازای هر مجموعه از عوامل استفاده می‌شود. مقادیر تابع هدف با استفاده از ماتریس ژاکوبین J و ماتریس کواریانس عوامل C مطابق رابطه زیر ارزیابی می‌گردد (S_g^2 واریانس مقادیر تابع هدف از m بار اجرای مدل و n تعداد عوامل).

[۳]

$$J_{ij} = \frac{\Delta g_i}{\Delta \theta_j} \cdot i = 1 \dots C_2^m \cdot j = 1 \dots n$$

$$C = S_g^2 (J^T J)^{-1}$$

۳- ۹۵ درصد از بازه پیش‌گویی شده هر کدام از عوامل از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

[۴]

$$\theta_{j,lower} = \theta_j^* - t_{v,0.025} \sqrt{C_{jj}}$$

$$\theta_{j,upper} = \theta_j^* + t_{v,0.025} \sqrt{C_{jj}}$$

که در آن θ_j^* مقدار پارامتر θ_j در تابع هدف بهینه می‌باشد v درجه آزادی یا $n - m$ می‌باشد.

۴- بازه ۹۵ppu محاسبه شده سپس دو شاخص $p - factor$ درصد داده‌های مشاهداتی که در بازه ۹۵ppu قرار می‌گیرند و شاخص $r - factor$ از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

[۵]

$$r - factor = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t_j=1}^n (y_{t_j,97.5\%}^M - y_{t_j,2.5\%}^M)}{\sigma_{obs}}$$

که در آن $y_{t_j,97.5\%}^M$ و $y_{t_j,2.5\%}^M$ معرف مرز بالا و پایین عدم قطعیت ۹۵ppu و σ_{obs} انحراف از معیار داده‌های مشاهداتی می‌باشد. بهترین نتیجه زمانی خواهد بود که ۱۰۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری با ۹۵ppu پوشانده شود یا بعبارت دیگر میزان $p - factor$ برابر ۱ شود و $r - factor$ کمتر و به صفر نزدیک باشد. در صورتی که

می‌باشد که به طور همزمان عمل می‌کند. در این مدل، حداکثر رسوبی که می‌تواند در مسیر منتقل شود تابعی از حداکثر سرعت جریان در نظر گرفته می‌شود.

روش تعیین عدم قطعیت GLUE

این روش اولین بار توسط بوین و بینلی (۱۹۹۲) به عنوان روشی جدید که معمولاً با مدل‌های شبیه‌سازی زیست محیطی به کار می‌رود، معرفی گردید. در این روش، عدم قطعیت شامل هر سه نوع عدم قطعیت داده‌های ورودی، ساختار مدل و عوامل خواهد بود زیرا مقدار تابع درست‌نمایی با مجموعه عوامل در ارتباط بوده و بطور ضمنی منشا همه خطاها و تاثیر کواریانس مقادیر عوامل بر عملکرد مدل را منعکس می‌کند. روش GLUE شامل سه مرحله زیر می‌باشد:

۱- بعد از تعریف تابع درست‌نمایی تعمیم‌یافته $L(\theta)$ ، تعداد زیادی مجموعه عوامل به صورت تصادفی از توزیع احتمال پیشین انتخاب می‌شود (شبیه سازی مونت کارلو) و بر اساس مقدار تابع درست‌نمایی و معیار حدی تعریف شده، هر مجموعه از عوامل به صورت هم‌رفتار یا غیر هم‌رفتار طبقه‌بندی می‌شود.

۲- هر مجموعه از عوامل هم‌رفتار بر اساس رابطه زیر وزندهی می‌شود (N تعداد مجموعه عوامل هم‌رفتار).

[۲]

$$W_i = \frac{L(\theta_i)}{\sum_{k=1}^N L(\theta_k)}$$

۳- در نهایت، عدم قطعیت پیش‌گویی بر اساس توزیع تجمعی تابع درست‌نمایی مربوط به عوامل هم‌رفتار توضیح داده می‌شود.

روش تعیین عدم قطعیت SUFI-2

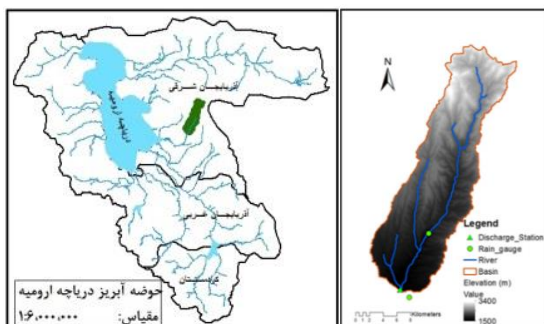
در روش SUFI-2 همانند GLUE سنجش میزان عدم قطعیت در مدل‌سازی، شامل عدم قطعیت در ورودی‌ها، مدل مفهومی، عوامل می‌باشد و توسط معیار $p - factor$ ارزیابی می‌گردد که بیانگر درصد داده‌های اندازه‌گیری شده که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد (۹۵ppu) قرار گرفته‌اند می‌باشد. مراحل انجام کار به صورت زیر می‌باشد:

مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ضرب شده است. مقدار بهینه آن یک می باشد.

با افزایش گام زمانی معیارهای ارزیابی سخت تر خواهد شد و بالعکس (موریاسی و همکاران ۲۰۰۷). براین اساس با توجه به اینکه مدل در گام زمانی روزانه اجرا شده است معیارهای مذکور می تواند با سخت گیری کمتری نسبت به گام زمانی ماهانه بررسی شود.

مطالعه موردی

محدوده مورد مطالعه قسمتی از زیرحوضه صوفی‌چای در بالادست سد علویان به مساحت ۳۱۳ کیلومترمربع در مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه تا ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی قرار دارند. این حوضه در قسمت جنوب غربی استان آذربایجان شرقی قرار گرفته و به دریاچه ارومیه می‌ریزد.



شکل ۱: موقعیت حوضه آبریز صوفی‌چای.

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل توپوگرافی، آب و هوا، پوشش گیاهی و خاک می‌باشد. اطلاعات داده‌های بارش روزانه از ایستگاه‌های بارسنجی منطقه و داده‌های دمای حداقل و حداکثر روزانه و سرعت باد روزانه، تشعشع خورشیدی و درصد رطوبت نسبی از آمار ایستگاه سینوپتیک مراغه گرفته شده است. جدول ۱ داده‌های ورودی مدل SWAT و داده‌های مورد استفاده در واسنجی مدل را نشان می‌دهد.

مقادیر دو شاخص مذکور رضایت بخش باشد، بازه تعریف شده عوامل به عنوان توزیع احتمال پسین خواهد بود در غیر این صورت بازه جدید عوامل بر اساس رابطه زیر محاسبه شده و تمام مراحل ۱ تا ۴ تکرار خواهد شد. [۶]

$$\begin{aligned} \theta_{j.min.new} &= \theta_{j.lower} \\ &- \max\left(\frac{\theta_{j.lower} - \theta_{j.min}}{2}, \frac{\theta_{j.max} - \theta_{j.upper}}{2}\right) \\ \theta_{j.max.new} &= \theta_{j.upper} + \\ &\max\left(\frac{\theta_{j.lower} - \theta_{j.min}}{2}, \frac{\theta_{j.max} - \theta_{j.upper}}{2}\right) \end{aligned}$$

در روش SUFI-2 فرض می‌شود که هر پارامتر ناشناخته به طور یکنواخت در یک دامنه با عدم قطعیت معین توزیع شده است. لازم به ذکر است در هر دو روش، درجه عدم قطعیت از دو فاکتور p -factor و r -factor محاسبه می‌گردد.

معیارهای عملکرد

جهت تعیین میزان کارایی دو روش از ۴ معیار عملکرد مدل‌ها، استفاده شده است. مقدار R^2 بیانگر ارتباط خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای بوده که مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است. ضریب NS بزرگی نسبی واریانس باقیمانده را در مقایسه با واریانس داده‌های مشاهداتی تعیین می‌کند. موتویلو و همکاران در سال ۱۹۹۹ در بررسی تعیین عملکرد مدل‌ها به این نتیجه رسیدند که اگر مقدار ضریب NS بیش از ۰/۷۵ باشد شبیه‌سازی خوب و مقادیر بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ شبیه‌سازی قابل قبول و کمتر از ۰/۳۶ غیرقابل قبول خواهد بود. پارامتر RSR با استاندارد نمودن مقادیر باقیمانده میانگین مربعات خطا RMSE با استفاده از انحراف از معیار مقادیر مشاهداتی به دست می‌آید. برای این معیار مقادیر بالای ۰/۷ قابل قبول می‌باشد (موریاسی و همکاران ۲۰۰۷). معیار bR^2 که در آن ضریب تبیین R^2 در ضریب خط رگرسیون بین داده‌های

ردیف	داده	منابع	بازه اطلاعاتی	توضیحات	مورد کاربرد
۱	مدل رقومی ارتفاعی	سازمان نقشه برداری	-	۱/۲۵۰۰۰	ورودی SWAT
۲	نقشه کاربری اراضی	استاندارد آذربایجان شرقی	-	تصاویر ماهواره‌ای مودیس	ورودی SWAT
۳	نقشه خاک منطقه	نقشه‌های کلی خاک فائو	-	۱/۵۰۰۰۰۰۰	ورودی SWAT
۴	داده‌های هواشناسی	سازمان هواشناسی	۱۹۸۳-۲۰۱۲	ایستگاه سینوپتیک مراغه	ورودی SWAT
۵	داده‌های بارندگی (روزانه)	آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی	۱۹۹۹-۲۰۱۲	ایستگاه‌های بارانسنجی آشان و سد علویان	ورودی SWAT
۶	داده‌های دبی (روزانه)	آذربایجان شرقی	۱۹۹۹-۲۰۱۲	ایستگاه هیدرومتری	واسنجی SWAT
۷	داده‌های رسوب		۲۰۰۳-۲۰۱۲	تازه‌کند علویان	واسنجی SWAT

شبیه‌سازی (۳۶۵۳) در دسترس می‌باشد. تعداد داده‌های رسوب ۱۰۷ می‌باشد.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی بار مواد جامد معلق بستگی زیادی به چرخه هیدرولوژیکی داشته و درستی محاسبات به واسنجی دقیق رواناب وابسته است. سری زمانی رواناب ایستگاه هیدرومتری تازه کند علویان جهت واسنجی و صحت‌سنجی رواناب استفاده شده است. برداشت داده‌های رسوب در ایستگاه هیدرومتری تازه‌کند علویان به صورت نمونه‌برداری تصادفی انجام شده است، گاهی در یک ماه دو یا سه مرتبه نمونه‌برداری انجام شده و گاهی برای چندین ماه متوالی هیچ‌گونه برداشتی ثبت نشده است. بنابراین لازم است مدل به صورت روزانه اجرا شود تا امکان مقایسه بین داده‌های رسوب شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده به وجود آید.

به منظور تعیین درجه حساسیت عوامل در مدل SWAT تحلیل حساسیت نسبی ۵۰ پارامتر انتخابی انجام گردید. با استفاده از نتایج این تحلیل در خصوص حذف عوامل با درجه حساسیت کمتر از فرایند واسنجی، تصمیم‌گیری می‌شود. بر این اساس از ۵۰ پارامتر انتخابی ۳۲ پارامتر جهت واسنجی مدل انتخاب گردید. بین ۳۲ پارامتر حساس، مدل SWAT به عوامل شماره منحنی SCS (CN2)، گرادیان ارتفاعی بارش (PLAPS)، فاکتور روش‌های حفاظتی در مدل USLE (USLE-P) و شیب (HRU-SLP) حساسیت بیشتری دارد. مهمترین عواملی که برای واسنجی و تعیین عدم قطعیت مدل

موقعیت ایستگاه‌های بارانسنجی و هیدرومتری مذکور در جدول ۱، در شکل ۱ نشان داده شده است. در حوضه صوفی‌چای به دلیل عدم وجود نقشه خاک نیمه تفصیلی از نقشه خاک فائو با دقت ۱/۵۰۰۰۰۰۰ استفاده شد که به دلیل دقت پایین نقشه‌ها میزان عدم قطعیت مدل را افزایش خواهد داد. بر اساس این نقشه، در کل حوضه سه کلاس بافت خاک قابل تفکیک می‌باشد. برطبق نقشه کاربری اراضی تهیه شده توسط استاندارد آذربایجان شرقی، ۶ طبقه کاربری اراضی در منطقه شناسایی گردید. دقت نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و تغییرات کاربری اراضی در سال‌های مختلف در شبیه‌سازی بسیار موثر بوده و در نظر نگرفتن این تغییرات باعث ایجاد خطا در روند شبیه‌سازی می‌شود. همچنین نبود ایستگاه‌های هواشناسی متعدد در حوضه باعث ایجاد خطا می‌شود. مدل در این حوضه فقط از آمار سینوپتیک یک ایستگاه (مراغه) استفاده کرده است.

پس از ورود اطلاعات حوضه، نسبت به اجرای مدل بین سالهای ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۲ اقدام شد. حوضه مورد مطالعه به ۱۴ زیرحوضه و ۳۲۹ واحد هیدرولوژیکی تقسیم شد. از سال آماری ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۲ به عنوان Warmup و از ۸ سال آماری برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده گردید. این مطالعه در حوضه آبریز صوفی‌چای جهت تحلیل ۲ متغیر (خروجی) که داده‌های مشاهداتی آنها در طول سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ اندازه‌گیری شده، انجام شده است. داده‌های رواناب روزانه در ایستگاه تازه‌کند علویان در طول کل دوره

استفاده شده‌اند به همراه بازه اولیه و مقدار واسنجی شده در جدول ۲ آورده شده است. نتایج نهایی معیارهای ارزیابی مدل در دوره واسنجی و صحت سنجی رواناب و بار مواد جامد معل ، بار نیترژن نیتراتی و بار فسفر فسفاتی در گام زمانی روزانه در جدول ۳ ارائه شده است.

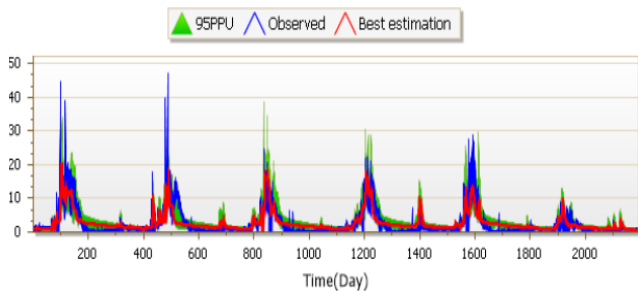
جدول ۲: مقدار واسنجی شده به همراه توزیع پیشین و پسین مهمترین عوامل مورد استفاده در واسنجی رواناب و بار مواد جامد معلق در دو روش SUFI-2 و GLUE.

پارامتر	توزیع اولیه عوامل		مقدار واسنجی		توزیع پسین روش SUFI-2		مقدار واسنجی
	کمینه	بیشینه	روش SUFI-2	مقدار	کمینه	بیشینه	روش GLUE
رواناب							
V_PLAPS.sub	-۱۰۰۰	۱۰۰۰	۶۲۵/۵	۴۶۴/۴۸	۸۲۱/۵	۸۸۳/۹	
V_TLAPS.sub	-۱۰	۱۰	-۶/۷۳	-۸/۳۷	-۵/۱	-۵/۴	
R_CN2.mgt	-۰/۵	۰/۰۶	-۰/۲۱	-۰/۰۴	-۰/۱۸	-۰/۴۱	
v_ALPHA_BF.gw	۰/۴	۰/۹۹	۰/۷۲	۰/۷	۰/۹۱	۰/۹۳	
R_SOL_AWC(..).sol	-۰/۵	۰/۵	-۰/۳۷	-۰/۵	-۰/۰۷۱	۰/۱۲	
V_ESCO.bsn	۰/۱	۰/۹۹	۰/۸۷	-۰/۵۹	۰/۸۲	۰/۳۴	
R_SOL_K(..).sol	-۰/۹	۹	۴/۸۷	۱/۹۲	۵/۳۵	۲/۸۵	
R_OV_N.hru	۰	۱۵۰	۱۱۸/۵	۸۵/۹۵	۱۱۹/۸۲	۹۹/۹۵	
R_SLSUBBSN.hru	۰	۰/۲	۰/۱۷	-۰/۱۴	۰/۱۹	-۰/۰۹۹	
V_SFTMP.bsn	-۵	۵	-۰/۱۹	-۰/۴۲	۲/۰۹	۰/۵۸	
V_SMTMP.bsn	-۵	۵	۱/۱۲	-۰/۶۸	۴/۴۶	۳/۴۸	
V_TIMP.bsn	-۰/۱	۱	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۴۹	۰/۲	
R_SOL_Z(..).sol	-۱	۲/۵	۱/۷۷	۱/۳۹	۲/۰۷	۱/۷۱	
R_SOL_BD(..).sol	-۰/۲۵	۰/۶۷	۰/۳۶	-۰/۲۱	۰/۶۶	-۰/۱۱	
بار مواد جامد معلق							
V_USLE_P.mgt	۰	۱	۰/۶۲	۰/۴۵۳	۰/۷۸	۰/۰۵	
R_USLE_K(..).sol	-۱	۰/۸۲	۰/۵۳	۰/۰۴۷	۰/۵۶	۰/۶۱	
R_HRU_SLP.hru	-۱	۰/۵۶	-۰/۵۳	-۱	-۰/۵۷	-۰/۹۲	
V_SMFMX.bsn	۶	۱۰	۵/۸۶	۵/۱۲	۷/۳۱	۷/۰۲۶	
V_SMFMN.bsn	۰	۶	۲/۱۶	۰/۴۳	۲/۳۵	۱/۱۶	
V_SNOCOVMX.bsn	۰	۵۰۰	۲۶۲	۱۶۶	۳۰۶	۳۵۸	
V_SNO50COV.bsn	۰	۰/۹	۰/۱۷	۰/۱۵۸	۰/۴۷	۰/۸۷	

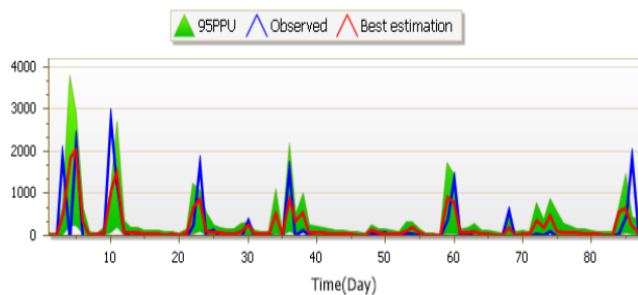
جدول ۳: نتایج نهایی معیارهای ارزیابی مدل در دوره واسنجی و صحت‌سنجی رواناب و بار مواد جامد معلق.

دوره	الگوریتم	خروجی/تعداد داده مشاهده‌ای	جواب بهینه				R-factor	P-factor	تعداد شبیه‌سازی
			bR ²	RSR	NS	R ²			
واسنجی	SUFI2	دبی/۲۱۹۲	۰/۳۷	۰/۲۶	۰/۶۵	۰/۶۶	۰/۸۱	۱۵۰۰ در ۳ تکرار	
		رسوب/۸۷	۰/۲۰	۰/۷۴	۰/۴۵	۰/۷۱			
	GLUE	دبی/۲۱۹۲	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۴۸	۰/۵۲	۰/۹۴	۱۰۰۰۰	
		رسوب/۸۷	۰/۲۴	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۸۵		
صحت سنجی	SUFI2	دبی/۱۴۶۱	۰/۵۸	۰/۵۹	۰/۶۵	۰/۶۹	۰/۹۲	۵۰۰	
		رسوب/۲۰	۰/۷۵	۰/۲۹	۰/۹۱	۰/۹۴	۱/۱		
	GLUE	دبی/۱۴۶۱	۰/۵۸	۰/۷۸	۰/۳۷	۰/۶۰	۱/۱۶	۲۹	
		رسوب/۲۰	۰/۱۱	۵/۹	-۳۴/۶	۰/۳۸	۷/۱۰		

پسین عوامل، در جدول ۲ آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود توزیع پسین^۳ عوامل در مدل SUFI-2 یکنواخت و مستقل بوده و در هر تکرار بازه آن کوچکتر می شود. اشکال ۲ تا ۵ باند عدم قطعیت (95ppu) دبی و بار مواد جامد معلق شبیه سازی شده توسط مدل و داده های مشاهده ای را به ترتیب در مرحله واسنجی و صحت سنجی نشان می دهد. تمام معیارهای ارزیابی مدل در شبیه سازی رواناب و رسوب روزانه در حد مجاز می باشد و با توجه به گام زمانی روزانه نتایج مدل در دوره واسنجی و صحت سنجی در حد خوب می توان ارزیابی نمود.



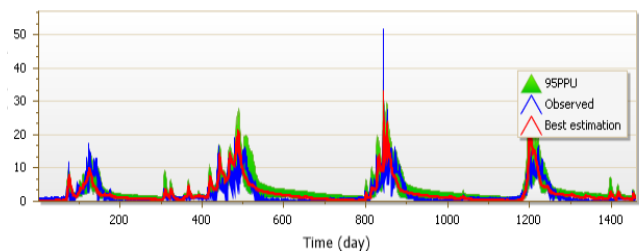
شکل ۲: باند عدم قطعیت و دبی شبیه سازی شده منتج از روش SUFI-2 و داده های مشاهده ای در مرحله واسنجی.



شکل ۴: باند عدم قطعیت و بار مواد جامد معلق شبیه سازی شده منتج از روش SUFI-2 و داده های مشاهده ای در مرحله واسنجی.

هر چند کاربرد روش SUFI-2 آسان می باشد ولی این روش کاملاً خودکار نیست و نیاز به داشتن دانش و فهم عوامل و تاثیر آنها در خروجی مدل دارد که ممکن است خطای مضاعفی به عنوان عدم قطعیت مدل کننده^۱ به سایر عدم قطعیت ها اضافه نماید. در کاربرد این روش لازم است توزیع پسین عوامل در هر تکرار جهت اصلاح بازه پیشنهادی جدید (توزیع پیشین^۲) تکرار بعدی بررسی گردد. همچنین بررسی شرایط لازم جهت خاتمه شبیه سازی لازم می باشد.

واسنجی مدل برای هر دو متغیر در یک مرحله با تعداد ۱۵۰۰ شبیه سازی و در ۳ تکرار انجام گردید و در هر تکرار دامنه عوامل تعدیل گردید. پروسه واسنجی زمانی خاتمه می یابد که تابع هدف تعیین شده (ضریب نش-ساتکلیف)، جهت ارزیابی مدل و میزان p -factor و r -factor (عوامل عدم قطعیت) در حد قابل قبول باشند. در دوره واسنجی مدل، مقدار NS رواناب و بار مواد جامد معلق به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۴۵ و در دوره صحت سنجی ۰/۶۵ و ۰/۸۵ محاسبه گردید. همچنین میزان p -factor و r -factor به همراه R^2 در دوره واسنجی و صحت سنجی در جدول ۳ آورده شده است. در این مطالعه، بازه عوامل در تکرار سوم به عنوان توزیع



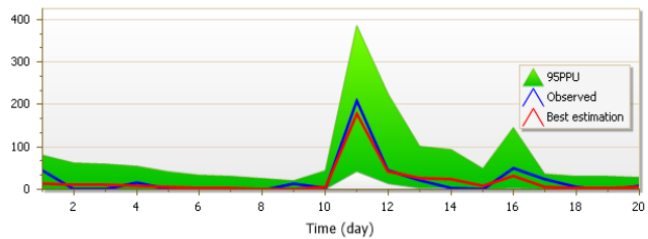
شکل ۳: باند عدم قطعیت و دبی شبیه سازی شده منتج از روش SUFI-2 و داده های مشاهده ای در مرحله صحت سنجی.

³ Posterior Distribution

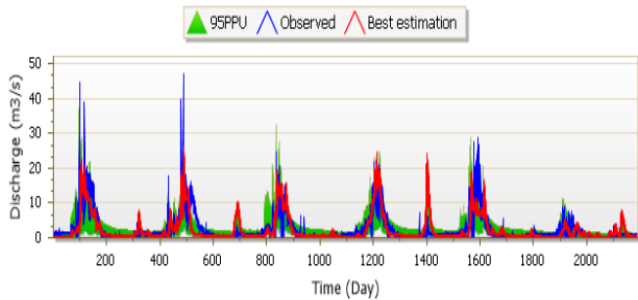
¹ Modelers' s Uncertainty

² Prior Distribution

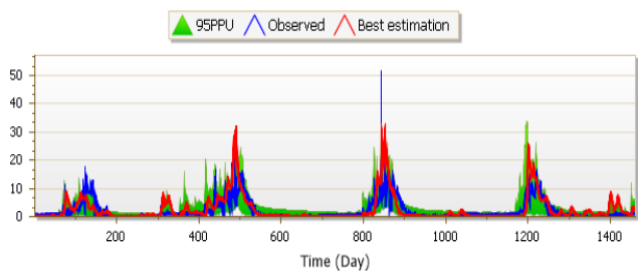
مشاهده‌ای را به ترتیب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد. توزیع پسین دو پارامتر $r_HRU_SLP.hru$ و $v_TLAPS.sub$ در شکل ۱۰ آورده شده است. اکثر عوامل دیگر، توزیع پسین منظمی ندارند و در اینجا ارائه نشده است.



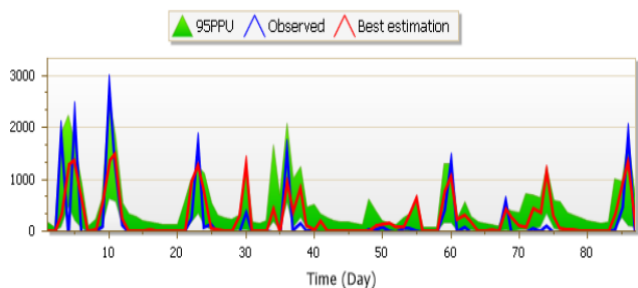
شکل ۵: باند عدم قطعیت، بار مواد جامد معلق شبیه‌سازی شده منتج از روش SUFI-2 و داده‌های مشاهده‌ای در مرحله صحت‌سنجی.



شکل ۶: باند عدم قطعیت و دبی شبیه‌سازی شده منتج از روش GLUE و داده‌های مشاهده‌ای در مرحله واسنجی.

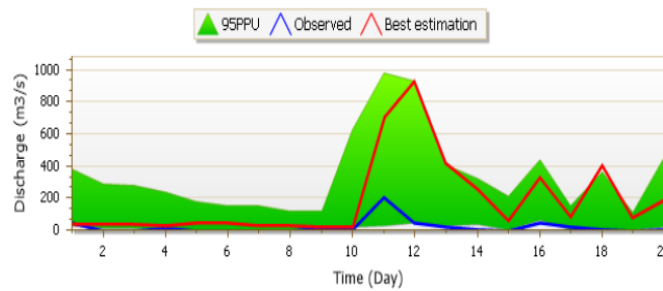


شکل ۷: باند عدم قطعیت و دبی شبیه‌سازی شده منتج از روش GLUE و داده‌های مشاهده‌ای در مرحله صحت‌سنجی.

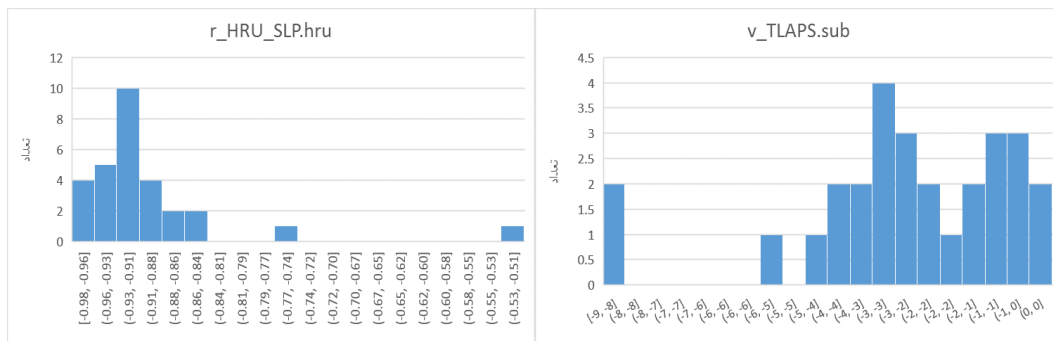


شکل ۸: باند عدم قطعیت و بار مواد جامد معلق شبیه‌سازی شده منتج از روش GLUE و داده‌های مشاهده‌ای در مرحله واسنجی.

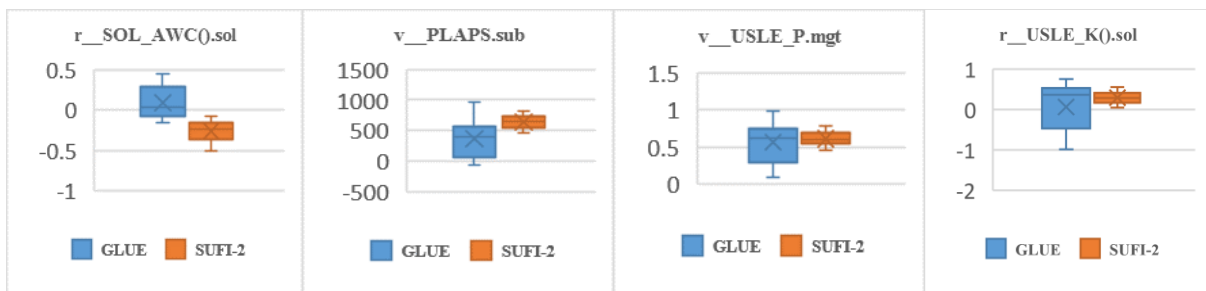
روش GLUE آسانتر و کاربرد آن راحت‌تر است. این روش در هیدرولوژی به طور گسترده‌ای استفاده شده است (نمونه‌هایی از کاربرد این مدل در مقالات فیریر و همکاران ۱۹۹۶، کامرون و همکاران ۲۰۰۰، بیلزکوا و همکاران ۲۰۰۲ می‌باشد). بار محاسباتی این روش به دلیل نمونه‌برداری تصادفی غیر قابل اجتناب می‌باشد (حسینی و همکاران ۲۰۰۴). در این مطالعه مقدار آستانه تابع هدف NS برابر ۰/۴ انتخاب گردید. روش GLUE با تعداد نمونه‌گیری ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ انجام شد. بررسی نتایج نشان داد که با تعداد نمونه‌گیری ۵۰۰۰، جواب قابل قبولی بدست نیامد. در مقایسه نتایج شبیه‌سازی با تعداد نمونه‌گیری ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰، تعداد نمونه‌گیری ۱۰۰۰۰ عملکرد بهتری نشان داد که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. مقدار ضریب NS در مرحله واسنجی رواناب و بار مواد جامد معلق به ترتیب ۰/۴۷ و ۰/۴۸ بدست آمده است. درصد داده‌های مشاهداتی رواناب و رسوب که در داخل باند 95ppu قرار می‌گیرند به ترتیب ۷۹ و ۷۸ می‌باشد. مقدار پارامتر $r - factor$ رواناب و رسوب به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۷۱ به دست آمده است. علیرغم نتایج خوب و قابل قبول مدل در مرحله واسنجی، در مرحله صحت‌سنجی نتایج مدل برای بار مواد جامد معلق قابل قبول نمی‌باشند. مقدار NS و مقادیر عوامل عدم قطعیت بار مواد جامد معلق در روش GLUE قابل قبول نمی‌باشند. اشکال ۶ تا ۹ باند عدم قطعیت (95ppu)، مقدار رواناب و بار مواد جامد معلق شبیه‌سازی شده توسط مدل با روش GLUE و داده‌های



شکل ۹: باند عدم قطعیت و بار مواد جامد معلق شبیه‌سازی شده منتج از روش GLUE و داده‌های مشاهده‌ای در مرحله صحت‌سنجی.



شکل ۱۰: هیستوگرام توزیع پسین دو پارامتر r_HRU_SLP.hru و v_TLAPS.sub منتج از روش GLUE



شکل ۱۱: نمودارهای جعبه‌ای باند عوامل عدم قطعیت در روش SUFI-2 و GLUE.

نتیجه‌گیری کلی

بررسی نتایج حاصل از کاربرد دو روش تحلیل عدم قطعیت SUFI-2 و GLUE در حوضه صوفی چای نشان می‌دهد که بر اساس معیارهای ارزیابی، روش SUFI-2 در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برای هر دو متغیر خروجی رواناب و بار مواد جامد معلق نتایج خوبی ارائه می‌دهد. روش GLUE در مرحله واسنجی نتایج

در شکل ۱۱ نمودار جعبه‌ای چند پارامتر که مدل به آنها حساس می‌باشد آورده شده است. این نمودارها، عدم قطعیت عوامل در دو روش را با هم مقایسه می‌کند. همانطور که مشخص است در روش SUFI-2 پراکندگی حول میانه کم و در نتیجه باند تغییرات و عدم قطعیت عوامل کم می‌باشد که نشان‌دهنده کارایی این روش در مقایسه با روش GLUE می‌باشد.

2 خیلی آسان است ولی در روش GLUE تعداد شبیه‌سازی جهت رسیدن به جواب قابل قبول، بیشتر است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که روش SUFI-2 با تعداد کم شبیه‌سازی نسبت به روش GLUE نتایج بهتری ارائه می‌دهد که تاییدی بر نتایج گرفته شده توسط یانگ و همکاران (۲۰۰۸) باشد.

خوبی ارائه می‌دهد ولی در مرحله صحت‌سنجی مقدار NS و مقادیر عوامل عدم قطعیت بار مواد جامد معلق در حد قابل قبول نمی‌باشد. به عبارت دیگر، مقایسه مقادیر معیارهای عملکرد نشان می‌دهد که نتایج هر دو روش تقریباً به هم نزدیک می‌باشد به جز در صحت‌سنجی رسوب با روش GLUE که نتایج قابل قبول نمی‌باشد. از طرفی هرچند کاربرد روش GLUE نسبت به روش SUFI-

منابع مورد استفاده

- Abbaspour KC, Johnson CA, van Genuchten MTH, 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal* 3 (4), 1340–1352.
- Abbaspour KC, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, Zobrist J, Srinivasan R, 2007. Spatially distributed modelling of hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333, 413–430.
- Arabi M, Govindaraju RS, and Hantush MM, 2007. A probabilistic approach for analysis of uncertainty in evaluation of watershed management practices. *Journal of Hydrology* 333: 459-471.
- Arnold JG, Srinivasan R, Mutiah RS and Williams JR, 1998. Large area hydrologic modeling and assessment—Part1: Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34:1 73–89.
- Besalatpour AA, Hajabbasi MA, Ayoubi S and Jalalian A, 2014. A Determining the Suitable Algorithm to Calibrate SWAT Model for Daily-Runoff Simulation: A Case Study of Bazoft Watershed, Southwestern Iran. *International Bulletin of Water Resources and Development*, 4: 7 13-26.
- Beven K, Binley A, 1992. The future of distributed models – model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes* 6:3 279–298.
- Bicknell BR, Imhoff J, Kittle J, Jobes T, Donigian AS, 2000. Hydrological Simulation Program – Fortran User's Manual. Release 12, US EPA.
- Bilondi MP, Abbaspour KC and Ghahraman B. 2013. Application of Three Different Calibration-Uncertainty Analysis Methods in a Semi-Distributed Rainfall-Runoff Model Application. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 15:9 1255-1263.
- Blazkova S, Beven K, Tacheci P and Kulasova A, 2002. Testing the distributed water table predictions of TOPMODEL (allowing for uncertainty in model calibration): the death of TOPMODEL? *Water Resources Research* 38:11 1257.
- Cameron D, Beven K, Naden P, 2000a. Flood frequency estimation by continuous simulation under climate change (with uncertainty). *Hydrology and Earth System Sciences* 4:3 393–405.
- Cameron D, Beven K, Tawn J, Naden P, 2000b. Flood frequency estimation by continuous simulation (with likelihood based uncertainty estimation). *Hydrology and Earth System Sciences* 4:1 23–34.
- Freer J, Beven K, Ambrose B, 1996. Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE approach. *Water Resources Research* 32:7 2161–2173.
- Hossain F, Anagnostou EN, Lee KH, 2004. A non-linear and stochastic response surface method for Bayesian estimation of uncertainty in soil moisture simulation from a land surface model. *Nonlinear Processes in Geophysics* 11:4 427–440.
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885–900.
- Motovilov YG, Gottschalk L, Engeland K, Rodhe A, (1999). Validation of distributed hydrological model against spatial observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 98: 257–277.
- Rostamian R, Aazam J, Afyuni M, Mousavi, F, Heidarpour M, Jalalian A and Abbaspour KC, 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal* 53:5 977-988.

- Shirmohammadi A, Chaubey I, Harmel RD, Bosch DD, Muñoz-Carpena R, Dharmasri C, Sexton A, Arabi M, Wolfe ML, Frankenberger J, Graff C and Sohrabi TM, 2006. Uncertainty in TMDL Models. *Transactions of ASABE*, 49: 1033 – 1049.
- Wu H, Chen B, 2015. Evaluating uncertainty estimates in distributed hydrological modeling for the Wenjing River watershed in China by GLUE, SUFI-2 and ParaSol methods. *Ecological Engineering*, 76: 110–121.
- Yang J, Reichert P, Abbaspour KC, 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.