





Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 2 - Number 42, Summer 2022

<https://geoeh.um.ac.ir>


 <https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2022.74253.1144> 

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره چهل و دوم، تابستان ۱۴۰۱، صص ۹۶-۷۷

مقاله پژوهشی

استفاده از مدل SWAT در شبیه‌سازی و آنالیز عدم قطعیت هیدرولوژیک حوزه آبخیز کسلیان

نیلوفر رسولزاده درزی - دانشجوی دکتری گروه جنگل، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران.

 حسن احمدی^۱ - استاد گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.

ابوالفضل معینی - استادیار گروه جنگل، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران.

بهارک معتمدوزیری - استادیار گروه جنگل، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۲۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۲۴ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱

چکیده

مدل SWAT، ابزاری جهت ارزیابی آب‌وخاک است که برای بهبود مدیریت حوزه آبخیز توصیه می‌شود. چرخه مورد استفاده در مدل SWAT کاملاً شبیه چرخه هیدرولوژیکی در طبیعت است. این ابزار، مدیریت مؤثر حوزه آبخیز و تصمیم‌گیری آگاهانه برای توسعه بهتر آن را حمایت می‌کند که از نظر زمانی یک مدل پیوسته است. در مطالعه حاضر، هدف تحلیل ارزیابی کارایی مدل نیمه توزیعی - فیزیکی SWAT در شبیه‌سازی رواناب روزانه و ماهانه، بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر بارش - رواناب و آنالیز عدم قطعیت هیدرولوژیک حوزه آبخیز کسلیان است. در این تحقیق جهت شبیه‌سازی و آنالیز عدم قطعیت و واسنجی مدل از نرم‌افزار SWAT-CUP، روش‌های SUFI-2 و PARASOL استفاده شد. در مرحله واسنجی و اعتبار سنجی رواناب از ضرایب R^2 ، br^2 و NS بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای صحت سنجی استفاده شد. به‌طور کلی دقت شبیه‌سازی در دوره ماهانه بالاتر از دوره روزانه است. همچنین در دوره روزانه طی واسنجی و اعتبار سنجی دقت PARASOL بالاتر از SUFI-2 است، ولی در دوره زمانی ماهانه در واسنجی و اعتبار سنجی دقت SUFI-2 بالاتر است. در کل برحسب ضرورت برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر نیاز به تکرارهای بیشتری است. با توجه به نتایج ارزیابی، مدل در طی دوره‌های

Email: ahmadi@ut.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۱۰۰۶۶۳۹

نحوه ارجاع به این مقاله:

رسولزاده درزی، نیلوفر؛ احمدی، حسن؛ معینی، ابوالفضل، معتمدوزیری، بهارک؛ ۱۴۰۱. استفاده از مدل SWAT در شبیه‌سازی

و آنالیز عدم قطعیت هیدرولوژیک حوزه آبخیز کسلیان. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۱(۲). صص ۹۶-۷۷

<https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2022.74253.1144>

واسنجی و اعتبارسنجی با شاخص‌های آماری R^2 ، br^2 ، MSE ، $RMSE$ و ضریب کارایی ENS حاکی از موفقیت‌آمیز بودن مدل در شبیه‌سازی دارد که با دقت نسبتاً خوبی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه را شبیه‌سازی نموده است. این مدل می‌تواند برای آنالیزهای بعدی حوضه و زیر حوضه‌های مربوطه و برای بررسی مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: مدل SWAT، حوزه آبخیز کسلیان، واسنجی، عدم قطعیت.

۱- مقدمه

برای شناخت و درک بهتر نقش فرآیندهای هیدرولوژی حوضه‌های آبخیز از مدل‌های شبیه‌سازی استفاده می‌شود (شفیعی و قراری، ۱۳۹۶). SWAT مدلی نیمه توزیعی - فیزیکی بوده که در سال ۱۹۹۵ با حمایت سازمان تحقیقات کشاورزی ایالت متحده آمریکا توسعه داده شد. این مدل برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبخیز پیچیده و وسیع با توجه به تغییرات خاک، کاربری اراضی و شرایط آب و هوایی در دوره‌های طولانی کاربرد دارد. در این بررسی از نسخه ۲۰۰۹ مدل SWAT که ARCSWAT2009 نامیده می‌شود، استفاده گردیده است. SWAT - CUP یک برنامه عمومی غالب و الحاقی به مدل SWAT است که برای واسنجی مدل SWAT مورد استفاده قرار می‌گیرد. این برنامه قادر به آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی و آنالیز عدم قطعیت مدل‌های SWAT است. در SUFI-2 برای تمامی منابع نامشخص، عدم قطعیت در مورد متغیرهای تقسیم‌شده، مدل مفهومی و پارامترهای موجود محاسبه می‌گردد. درجه عدم قطعیت توسط دو فاکتور P-factor و R-factor محاسبه می‌گردد. تخمین عدم قطعیت ۹۵٪ در سطوح ۲/۵٪ و ۹۷/۵٪ از تابع توزیع تجمعی متغیر خروجی که با روش نمونه‌برداری لاتین - هایپرکیوب (LH) به‌دست آمده، محاسبه می‌گردد (عباس پور و همکاران ۲۰۱۵). این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که دو شرط برقرار شود: ۱. اکثر داده‌های مشاهده‌ای در سطح ۹۵ ppu واقع شوند (P-factor)؛ ۲. فاصله متوسط بین حد بالا و حد پایین ۹۵ درصد تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده تا حد ممکن کوچک شود (R-factor) (معماریان و همکاران ۲۰۱۳). روش PARASOL توابع هدف را در درون شاخص بهینه‌سازی جهانی متمرکز می‌کند که این توابع یا معیارها با استفاده از روش تکامل تصادفی جوامع (SCE) به حداقل می‌رسد و آنالیز عدم قطعیت با انتخاب بین دو مفهوم آماری انجام می‌گیرد. این روش توانایی بسیار بالایی در پیدا نمودن نقاط بهینه‌سازی سراسری دارد (دوان و همکاران، ۱۹۹۲؛ ناصرآبادی و همکاران ۱۳۹۵) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه حوضه آبخیز قره‌سو و ارزیابی دقت شبیه‌سازی مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی واقع در استان اردبیل استفاده گردید.

1. Abbaspour et al.
2. Memarian et al.
3. Shuffled Complex Evolution
4. Duan et al.

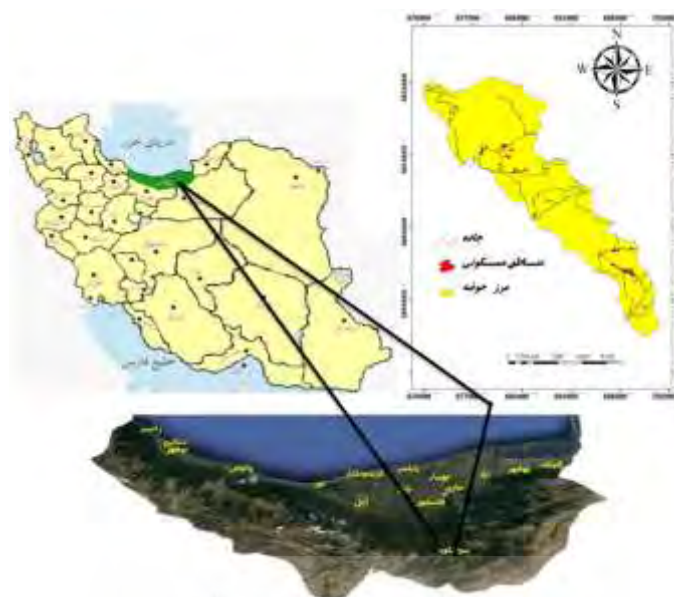
اعلمی و همکاران (۱۳۹۷) به‌پیش بینی رواناب و بار مواد جامد معلق حوضه آبریز بالادست سد علویان (رودخانه صوفیچای مراغه) با استفاده از مدل SWAT پرداختند. رضائی مقدم و همکاران (۱۳۹۹) به شبیه‌سازی، بیلان آبی حوضه آبریز لنبران با استفاده از مدل SWAT پرداختند و برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT از دو روش SUFI-2 و GLUE استفاده شد. فاتحی و شاهویی (۱۳۹۹) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT اقدام به شبیه‌سازی رواناب خروجی در محدوده بالادست ایستگاه هیدرومتری سسته در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در استان کردستان در ایران شد. کائو و همکاران^۱ (۲۰۱۸) به بررسی و ارزیابی دقت و کارایی مدل SWAT و CMADS در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه رودخانه لیجیانگ چین پرداختند. لیو و همکاران^۲ (۲۰۱۹) به ارزیابی تأثیر پارامترهای مخزن بر رواناب در حوضه رودخانه یالونگ با استفاده از مدل SWAT صورت گرفت. بررسی‌های ماراهاتا و همکاران^۳ (۲۰۲۱) به بررسی کاربرد SWAT در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه پیچیده رودخانه کوهستانی پرداختند. با وجود مطالعات متعدد صورت گرفته، در این منطقه برای اولین بار شبیه‌سازی رواناب هم بر پایه زمانی روزانه و هم ماهانه صورت گرفته است و مقایسه آنالیز عدم قطعیت و واسنجی مدل با دو روش SUFI-2 و PARASOL انجام شد. هدف از پژوهش حاضر بررسی کارایی مدل SWAT در برآورد و شبیه‌سازی رواناب و بررسی عدم قطعیت پارامترهای هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز کسلیان است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز کسلیان یکی از زیر حوضه‌های حوزه آبخیز تالار بوده و در ارتفاعات منطقه مرکزی سلسله جبال البرز، در استان مازندران واقع شده است. مساحت این حوضه ۳۴۲/۸۶ کیلومتر مربع و از نظر جغرافیایی در بین طول شرقی ۵۳°۱' تا ۵۳°۲۶' و عرض شمالی ۳۵°۱' تا ۳۶°۳۲' واقع شده است (شکل ۱). حداقل ارتفاع آن ۲۸۶ و حداکثر ارتفاع آن ۳۲۸۸/۸۸ متر از سطح دریاست و متوسط بارندگی در کل حوزه آبخیز حدود ۷۳۳/۳ میلی‌متر و دارای اقلیم نیمه مرطوب سرد (بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن) است. از نظر تقسیمات زمین‌شناسی ایران جز البرز مرکزی محسوب می‌شود که بیشتر سنگ‌های تشکیل‌دهنده سطح حوضه از نظر زمانی مربوط به دوران دوم، سوم و دوره کواترنری است. بخش اعظمی از این حوزه شامل اکوسیستم جنگلی بوده و کاربری‌هایی چون مرتع، مناطق روستایی و کشاورزی نیز در کنار کاربری جنگل وجود دارد. خاک‌های حوضه نیز عمدتاً از نوع پدوزولیک، قهوه‌ای جنگلی و دارای بافت لومی و لومی - رسی است.

1. Cao et al.
2. Liu et al.
3. Marahatta et al.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز کسلیان

۲-۲- روش انجام پژوهش

به طور کلی فایل های ورودی به مدل SWAT به سه سطح حوزه آبخیز، زیر حوضه ها و HRU ها تقسیم می شوند. در این تحقیق برای شبیه سازی پدیده های هیدرولوژیکی حوضه (منحصراً دبی جریان) از مدل SWAT و بسته نرم افزاری SWAT-CUP و برنامه SUFI-2 و PARASOL استفاده گردید. بر این اساس اطلاعات مورد نیاز مدل عبارتند از: (۱) تهیه نقشه های مورد نیاز مدل که شامل: مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه کاربری اراضی، نقشه بافت خاک، نقشه الگوی زهکشی (۲). جمع آوری داده های هیدرولوژیکی و هواشناسی، که شامل داده های: بارندگی روزانه، درجه حرارت روزانه، رطوبت نسبی روزانه، تشعشع خورشید روزانه، سرعت باد روزانه، دبی روزانه و ماهانه ایستگاه هیدرومتری شیرگاه است. برای انجام آنالیز حساسیت در مراحل اولیه از روش لاتین هایپرکیوب - موریس (LH_OAT)^۱ که ترکیبی از طرح OAT در ترکیب با روش نمونه گیری LH برای شناسایی حساس ترین پارامترهای مدل استفاده گردید. تحلیل حساسیت با روش LH-OAT بر روی ۲۸ پارامتر با دامنه تغییرات پیش فرض مدل و با ۲۸۰ بار اجرای مدل انجام گرفت. پارامترهای مورد استفاده برای آنالیز حساسیت و دامنه تغییرات آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین آنالیز حساسیت با استفاده از شاخص های t-stat و p-value و برنامه های PARASOL و SUFI-2 در بسته نرم افزاری SWAT-CUP انجام گرفت. بعد از شناسایی حساس ترین پارامترهای مؤثر بر دبی جریان واسنجی برای تعیین مقادیر بهینه پارامترها صورت پذیرفت. واسنجی در واقع حل یک مسئله معکوس است،

1. Latin Hypercube-one factor at time

که با روش معکوس و به‌صورت خودکار با استفاده از برنامه‌های PARASOL و SUFI2 تعیین می‌شوند. (رستمیان و همکاران، ۱۳۸۵). این فرآیند با تغییر در مقادیر پارامترهای تعیین شده در فایل ورودی و ارزیابی کیفی مدل انجام می‌گیرد (همیش و همکاران^۱، ۲۰۰۰). فرآیند واسنجی در دو پایه زمانی ماهانه و روزانه و بر روی دبی حوزه کسپیلان صورت گرفت. در ابتدا مدل برای یک دوره مطلوب شبیه‌سازی شد (دوره warming-up) سپس بر اساس مقادیر اولیه به‌دست آمده مدل برای یک دوره معین به اجرا درآمد. در کل ۲۷ پارامتر بر اساس مطالعات مختلف صورت گرفته در این زمینه انتخاب گردید که بعد از تحلیل حساسیت و شناسایی مؤثرترین پارامترها تعداد این پارامترها به ۱۷ پارامتر تقلیل پیدا نمود. کاهش تعداد پارامترها طی تحلیل حساسیت باعث کاهش زمان اجرای مدل و افزایش دقت به‌واسطه کاهش عدم قطعیت می‌گردد (احمدی و نصیری، ۲۰۲۰^۲). مدل با استفاده از پارامترهای حساس مؤثر بر دبی رودخانه به اجرا در آمد. برای بررسی دقت مدل کالیبره شده به‌منظور استفاده در تخمین‌ها و فعالیت مدیریتی بعدی، مدل با استفاده از داده‌های مشاهداتی مستقل (سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲) بدون تغییر پارامترهای حاصل از واسنجی اجرا گردید (منگستو و همکاران^۳، ۲۰۱۹). در اینجا هم اعتبارسنجی با استفاده از بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP و برنامه‌های PARASOL و SUFI-2 انجام گرفت. کائو و همکاران^۴ (۲۰۱۸) استفاده از ضریب همبستگی (R²) به‌اضافه ضریب کارایی ناش- ساتکلیف (ENS) را به‌عنوان روشی برای ارزیابی و آنالیز داده شبیه‌سازی شده پیشنهاد کرد. در این مطالعه روش‌های زیر برای ارزیابی کارایی دقت مدل SWAT به کار رفته است:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{simav})(Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{simav})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})^2}$$

ضریب تبیین که در آن: Q_i^{sim} = مقدار برآوردی بر نقطه نام، Q_i^{simav} = مقدار میانگین دبی برآوردی، Q_i^{obs} = مقدار مشاهده‌ای برای نقطه نام، Q_i^{obsav} برابر میانگین دبی مشاهداتی و n = تعداد داده‌ها است. ضریب تبیین بین صفر تا یک تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن یک است و این حالت مربوط به زمانی است که در آن مقادیر شبیه‌سازی شده دقیقاً مشابه مقادیر مشاهداتی باشد.

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})^2}$$

مقدار ناش- ساتکلیف (ENS)، بین یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند. مقدار بهینه این شاخص یک است. اگر میزان آن از ۰/۵ بیشتر باشد، مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است و در صورت منفی شدن آن بهتر است که به نتایج مدل بسنده نشود و از متوسط مقادیر مشاهده‌ای استفاده شود.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2$$

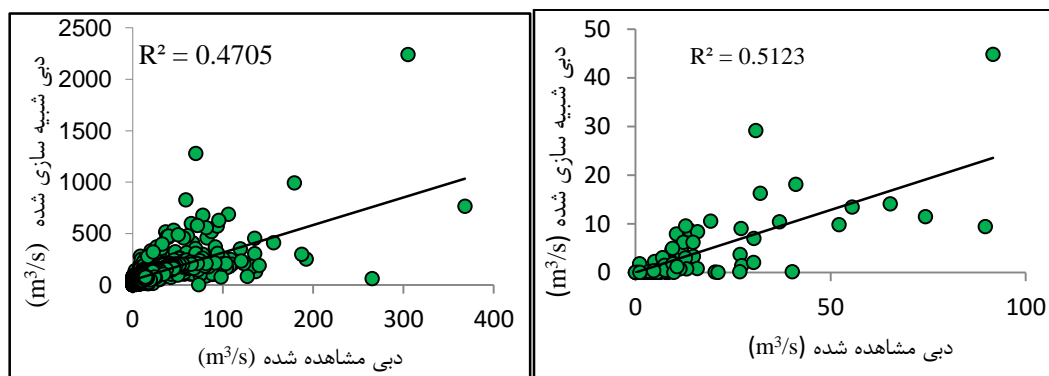
1. Himesh et al.
2. Ahmadi & Nasseri
3. Mengistu et al.
4. Cao et al

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}$$

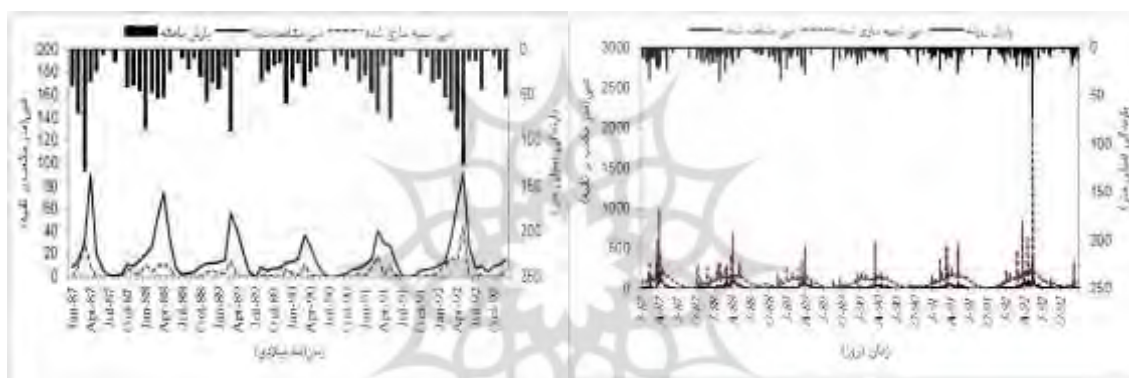
که در آن: Q_i^{sim} = مقدار برآوردی بر نقطه i ام و Q_i^{obs} = مقدار مشاهده‌ای برای نقطه i ام است.

۳- نتایج و بحث

در ابتدا مدل با استفاده از داده‌های ورودی و همچنین اطلاعات پیش‌فرض خود مدل به اجرا درآمد. شکل (۲) همبستگی مشاهده شده بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را در اجرای اولیه مدل SWAT در خروجی حوزه آبخیز کسلیان نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۳) اولین اجرای مدل بر پایه زمانی روزانه و ماهانه نشان داده شده است. همان‌طوری که در این اشکال نشان داده شده است، شبیه‌سازی حوضه در اجرای اولیه مدل بسیار ضعیف است. برای بررسی کیفیت شبیه‌سازی در اجرای اولیه از ضرایب ناش-ساتکلیف (ENS)، ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده (R^2)، درصد تفاوت (D) و همچنین از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. مقدار شاخص RMSE در اجرای اولیه مدل مقدار این شاخص برای دوره زمانی روزانه و ماهانه به ترتیب ۷۴/۹۱ و ۱۹/۹۶ است. همان‌طوری که در این اشکال دیده می‌شود، مقدار ضریب ENS نیز منفی به دست آمد که نشان‌دهنده شبیه‌سازی خیلی ضعیف مدل در اجرای اولیه است. به‌طوری که مقدار این ضریب برای پایه زمانی روزانه و ماهانه به ترتیب ۱۶۹۳- و ۰/۰۴- به دست آمدند. همچنین با وجود پیش‌بینی نزدیک دبی اوج در شبیه‌سازی روزانه و ماهانه مقادیر شبیه‌سازی با هم اختلاف زیادی دارند. به‌طوری که در پایه زمانی روزانه مدل مقدار شبیه‌سازی خیلی بیشتری نسبت به دبی مشاهده‌ای دارد که این مقدار به دلیل در نظر گرفتن آب‌پایه بالا برای هیدروگراف است؛ ولی در پایه زمانی ماهانه برعکس است و با وجود داشتن مقدار ENS بهتر، شبیه‌سازی خوبی ارائه نشد و همان‌طوری که مشاهده می‌گردد مقدار شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر مشاهده‌ای کمتر است. در این بررسی متوسط رواناب مشاهده‌ای در پایه زمانی ماهانه ۱۶۱۷ مترمکعب بر ثانیه و رواناب شبیه‌سازی شده در اولین اجرای مدل ۳/۵۱ مترمکعب بر ثانیه است که از این نظر رواناب شبیه‌سازی شده ۷۸٪ کمتر از رواناب مشاهده‌ای برآورد گردیده است. مقادیر متوسط رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در اجرای اولیه مدل و در پایه زمانی روزانه به ترتیب ۱۶۱۱ و ۸۵/۸۵ مترمکعب بر ثانیه است؛ به عبارتی مدل رواناب را ۵/۳ برابر رواناب مشاهده‌ای شبیه‌سازی نموده و شبیه‌سازی با ۴۳۲/۸٪ خطا همراه بوده است.



شکل ۲- همبستگی بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در اجرای اولیه مدل بر پایه زمانی روزانه (شکل سمت چپ) و بر پایه زمانی ماهانه (شکل سمت راست)



شکل ۳- مقادیر رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حوزه کسلیان در اجرای اولیه مدل در پایه زمانی روزانه (سمت راست) و در پایه زمانی ماهانه (سمت چپ)

نتایج آنالیز حساسیت در روش LH-OAT بر اساس ۲۸ پارامتر انتخابی ارائه شده و پس از ۲۸۰ بار اجرای مدل در شکل (۴) نشان داده شده است. همچنین بررسی پارامترهای حساس بر پایه زمانی روزانه و ماهانه با استفاده از برنامه‌های SUFI-2 و PARASOL و بر روی ۲۷ پارامتر نیز در جدول (۱) و (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱- اولویت‌بندی پارامترهای حساس بر اساس مقادیر t-stat و p-value با استفاده از برنامه‌های PARASOL

و SUFI-2 بعد از واسنجی مدل و بر پایه زمانی روزانه

PARASOL		نام پارامتر	SUFI-2		نام پارامتر	اولویت
p-value	t-stat		p-value	t-stat		
۰/۰۰	۳۵/۰۶	CN2	۰/۰۰	-۲۶/۱۵	CN2	۱
۰/۰۰	۱۰/۴۲	SOL_K()	۰/۰۰	۱۶/۵۰	CH_N2	۲
۰/۰۰	-۹/۴۰	CH_K2	۰/۰۰	-۱۳/۴۱	ALPHA_BNK	۳

PARASOL		نام پارامتر	SUFI-2		نام پارامتر	اولویت
p-value	t-stat		p-value	t-stat		
۰/۰۰	-۷/۷۱	CH_N2	۰/۰۰	-۱۰/۴۵	SOL_K()	۴
۰/۰۰	۵/۷۵	ALPHA_BNK	۰/۰۰	۹/۹۷	CH_K2	۵
۰/۰۰	-۵/۲۱	SLSUBBSN	۰/۰۰	۷/۵۴	SLSUBBSN	۶
۰/۰۰	-۳/۵۶	GWQMN	۰/۰۰	۳/۶۸	GWQMN	۷
۰/۰۰	۳/۰۴	TLAPS	۰/۰۰	-۳/۴۸	SOL_BD()	۸
۰/۰۱	-۲/۷۹	SMFMX	۰/۰۴	-۲/۰۴	TLAPS	۹
۰/۰۱	-۲/۵۲	SOL_ALB()	۰/۱۳	-۱/۵۳	ALPHA_BF	۱۰
۰/۰۲	-۲/۳۷	GW_DELAY	۰/۱۸	-۱/۳۶	SOL_AWC()	۱۱
۰/۰۲	-۲/۳۶	SOL_AWC()	۰/۱۹	۱/۳۲	SMFMX	۱۲
۰/۰۲	۲/۲۵	EPCO	۰/۲۱	-۱/۲۵	EPCO	۱۳
۰/۰۴	۲/۰۵	GW_REVAP	۰/۳۰	۱/۰۳	GW_DELAY	۱۴
۰/۰۴	-۲/۰۲	ALPHA_BF	۰/۳۱	۱/۰۲	SMTMP	۱۵
۰/۰۵	۱/۹۸	SFTMP	۰/۴۳	۰/۸۰	SURLAG	۱۶
۰/۰۸	-۱/۷۵	LAT_TTIME	۰/۵۴	-۰/۶۱	LAT_TTIME	۱۷
۰/۰۸	-۱/۷۵	SMFMN	۰/۵۴	-۰/۶۱	GW_REVAP	۱۸
۰/۰۹	-۱/۶۹	ESCO	۰/۵۶	-۰/۵۸	SOL_ALB()	۱۹
۰/۱۹	-۱/۳۰	SOL_BD()	۰/۵۸	-۰/۵۵	SMFMN	۲۰
۰/۲۸	-۱/۰۹	SMTMP	۰/۶۱	-۰/۵۲	REVAPMN	۲۱
۰/۴۰	۰/۸۴	CANMX	۰/۶۷	-۰/۴۳	CANMX	۲۲
۰/۴۶	-۰/۷۵	SLOPE()	۰/۶۹	-۰/۴۱	SFTMP	۲۳
۰/۵۹	-۰/۵۴	SURLAG	۰/۷۱	۰/۳۷	ESCO	۲۴
۰/۷۸	-۰/۲۸	RCHRG_DP	۰/۷۸	۰/۲۷	SLOPE()	۲۵
۰/۸۷	۰/۱۶	TIMP	۰/۸۶	-۰/۱۷	RCHRG_DP	۲۶
۰/۹۴	۰/۰۸	REVAPMN	۰/۸۶	۰/۱۷	TIMP	۲۷

جدول ۲- اولویت بندی پارامترهای حساس بر اساس مقادیر t-stat و p-value با استفاده برنامه های PARASOL

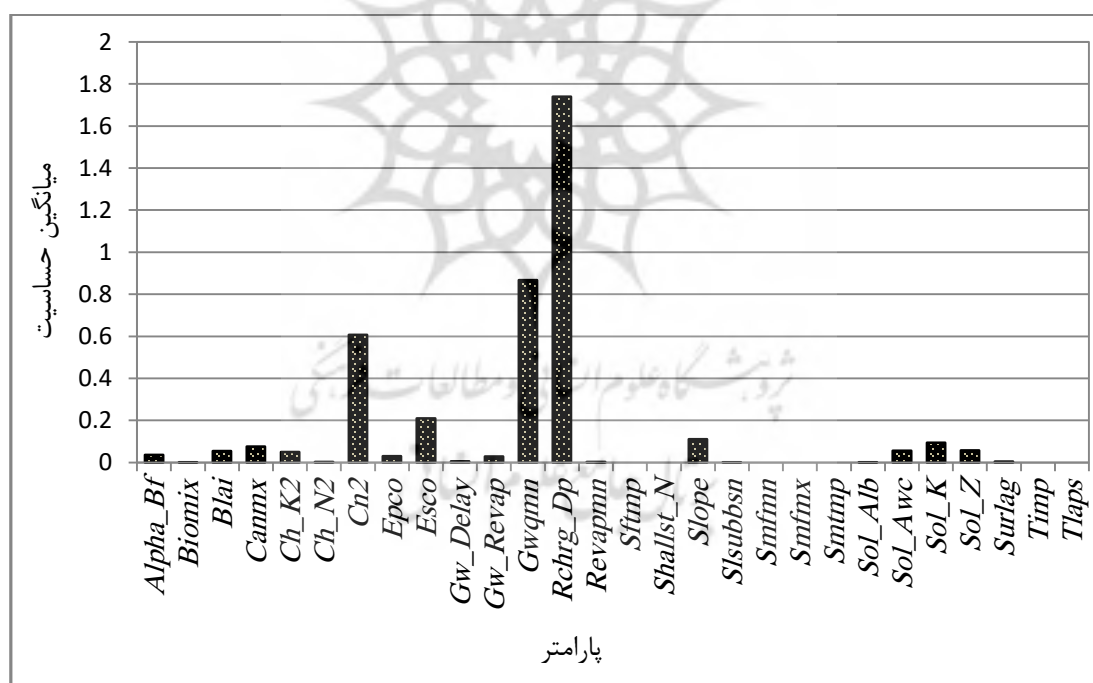
و SUFI-2 بعد از واسنجی مدل و بر پایه زمانی ماهانه

PARASOL		نام پارامتر	SUFI-2		نام پارامتر	اولویت
p-value	t-stat		p-value	t-stat		
۰/۰۰	۱۹/۰۵	CN2	۰/۰۰	-۲۱/۱۵	CN2	۱
۰/۰۰	۱۰/۲۳	SOL_K()	۰/۰۰	-۱۵/۷۳	SOL_K()	۲
۰/۰۰	-۹/۶۵	SLSUBBSN	۰/۰۰	۷/۹۰	SLSUBBSN	۳

PARASOL		نام پارامتر	SUFI-2		نام پارامتر	اولویت
p-value	t-stat		p-value	t-stat		
۰/۰۰	-۵/۱۹	GWQMN	۰/۰۰	-۷/۲۱	SOL_BD()	۴
۰/۰۰	-۴/۰۶	RCHRG_DP	۰/۰۳	۲/۱۴	REVAPMN	۵
۰/۰۱	۲/۶۰	CH_N2	۰/۰۷	-۱/۸۳	ALPHA_BNK	۶
۰/۰۱	-۲/۴۷	ESCO	۰/۰۸	۱/۷۷	CH_N2	۷
۰/۰۳	-۲/۲۴	SMFMX	۰/۰۸	۱/۷۵	SOL_AWC()	۸
۰/۰۳	۲/۲۲	CANMX	۰/۰۹	-۱/۷۲	GWQMN	۹
۰/۰۴	-۲/۰۸	CH_K2	۰/۱۰	-۱/۶۴	SURLAG	۱۰
۰/۰۷	-۱/۸۴	REVAPMN	۰/۱۲	۱/۵۴	LAT_TTIME	۱۱
۰/۰۸	-۱/۷۳	SFTMP	۰/۱۶	۱/۳۹	RCHRG_DP	۱۲
۰/۱۵	-۱/۴۲	SMTMP	۰/۱۹	-۱/۳۱	TIMP	۱۳
۰/۲۱	۱/۲۵	TLAPS	۰/۱۹	-۱/۳۰	SOL_ALB()	۱۴
۰/۳۶	-۱/۱۲	SLOPE()	۰/۲۴	۱/۱۶	CANMX	۱۵
۰/۳۳	۰/۹۸	GW_REVAP	۰/۲۴	۱/۱۶	ESCO	۱۶
۰/۳۸	-۰/۸۹	SOL_AWC()	۰/۲۵	۱/۱۶	SMFMN	۱۷
۰/۴۱	۰/۸۳	LAT_TTIME	۰/۵۷	۰/۵۶	SMTMP	۱۸
۰/۴۲	-۰/۸۰	EPCO	۰/۵۹	-۰/۵۴	GW_REVAP	۱۹
۰/۴۷	-۰/۷۳	ALPHA_BNK	۰/۵۹	۰/۵۴	SFTMP	۲۰
۰/۶۵	-۰/۴۵	SMFMN	۰/۶۳	-۰/۴۸	TLAPS	۲۱
۰/۶۹	-۰/۴۰	SOL_BD()	۰/۶۴	۰/۴۶	GW_DELAY	۲۲
۰/۷۱	۰/۳۷	TIMP	۰/۶۴	-۰/۴۶	SLOPE()	۲۳
۰/۸۰	-۰/۲۵	SURLAG	۰/۷۰	-۰/۳۹	EPCO	۲۴
۰/۹۴	-۰/۰۷	SOL_ALB()	۰/۸۸	۰/۱۵	ALPHA_BF	۲۵
۰/۹۸	-۰/۰۲	ALPHA_BF	۰/۹۲	-۰/۱۰	SMFMX	۲۶
۰/۹۹	۰/۰۱	GW_DELAY	۰/۹۷	۰/۰۴	CH_K2	۲۷

نتایج تحلیل حساسیت انجام گرفته با استفاده از روش LH-OAT بر روی ۲۸ پارامتر اولیه نشان داد که در پایه زمانی روزانه و ماهانه پارامترهای GWQMN, RCHRG_DP, CN-2, ESCO حساس ترین پارامترهای مؤثر بر دبی می‌باشند. در شکل (۴) نمایش گرافیکی حساسیت پارامترها با استفاده از روش LH-OAT نشان داده شده است. همچنین در اشکال (۵) و (۶) نتایج تحلیل حساسیت با استفاده از برنامه‌های SUFI-2 و PARASOL در دو پایه زمانی روزانه و ماهانه نشان داده شده است که تا حدودی نتایج مربوط به آنالیز حساسیت با استفاده از دو برنامه با یکدیگر مطابقت دارد؛ به طوری که حساس ترین پارامترهای مؤثر بر دبی حوزه کسپلیان بر پایه زمانی روزانه به ترتیب

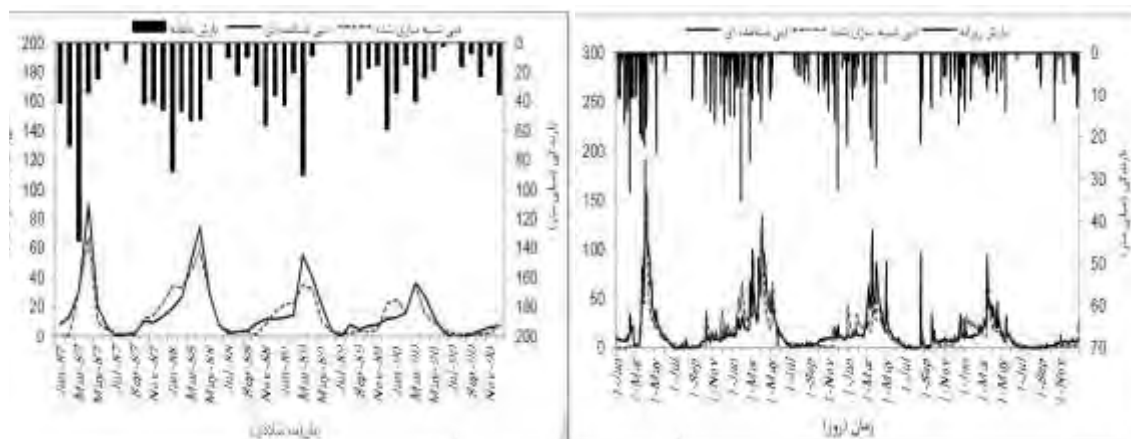
پارامترهای CN2، CH_N2، ALPHA_BNK، SOL_K می‌باشند. همچنین در شبیه‌سازی دبی بر پایه زمانی ماهانه با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP پارامترهای CN2، SOL_K و GWQMN SLSUBBSN، جز حساس‌ترین پارامترهای مؤثر بر دبی حوزه کسپلیان می‌باشند. با توجه به تفاوت در تعداد دفعات شبیه‌سازی در هر یک از روش‌ها و همچنین الگوریتم‌ها و روش‌های مختلف بهینه‌سازی در دو برنامه SUFI-2 و PARASOL نتایج آنالیز حساسیت با نتایج روش LAO-AT متفاوت است. به‌طورکلی با توجه به شرایط اقلیمی و منطقه‌ای مختلف، پارامترهای حساس و مؤثر نیز برای آن منطقه چه در پایه زمانی روزانه و ماهانه متفاوت می‌باشند (حسینی و همکاران، ۲۰۱۰). در تمامی روش‌ها و بر پایه زمانی روزانه و ماهانه CN2 به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر است. پارامتر CN2 (شماره منحنی SCS اولیه برای شرایط رطوبتی متوسط (II) و شیب ۰.۵٪) تابعی از نفوذپذیری خاک، کاربری اراضی و شرایط رطوبت پیشین است. به‌طورکلی افزایش مقدار CN2 باعث افزایش حجم رواناب می‌شود که به‌نوبه خود باعث تلفات بیشتر آب و کاهش تغذیه منابع آب زیرزمینی و کاهش آب‌پایه رودخانه‌ها و تغییر در مقادیر فرسایش و رسوب می‌شود (حسینی و مکاریان، ۲۰۱۶).



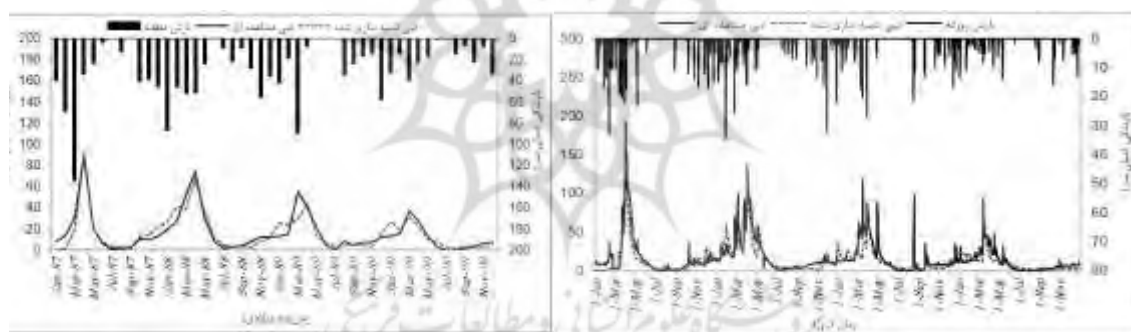
شکل ۴- رتبه‌بندی حساسیت پارامترهای مؤثر بر بارش - رواناب با استفاده روش LH-OA

1. Cibin et al.
2. Hosseini & Mokarian

واسنجی بر پایه زمانی روزانه و ماهانه با استفاده از برنامه‌های SUFI-2 و PARASOL و همچنین ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.



شکل ۷- مقادیر رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حوزه کسپلیان با استفاده از برنامه SUFI-2 در واسنجی مدل و در پایه زمانی روزانه (سمت راست) و در پایه زمانی ماهانه (سمت چپ)



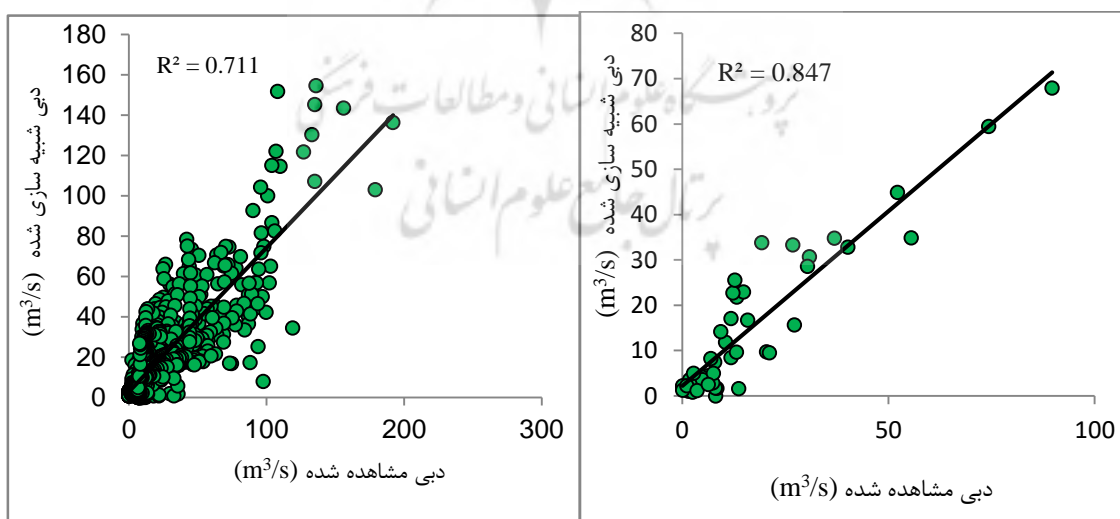
شکل ۸- مقادیر رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حوزه کسپلیان با استفاده از برنامه PARASOL در واسنجی مدل و در پایه زمانی روزانه (سمت راست) و در پایه زمانی ماهانه (سمت چپ)

جدول ۳- مقدار نهایی پارامترها با استفاده از برنامه‌های SUFI-2 و PARASOL در پایه زمانی روزانه و ماهانه

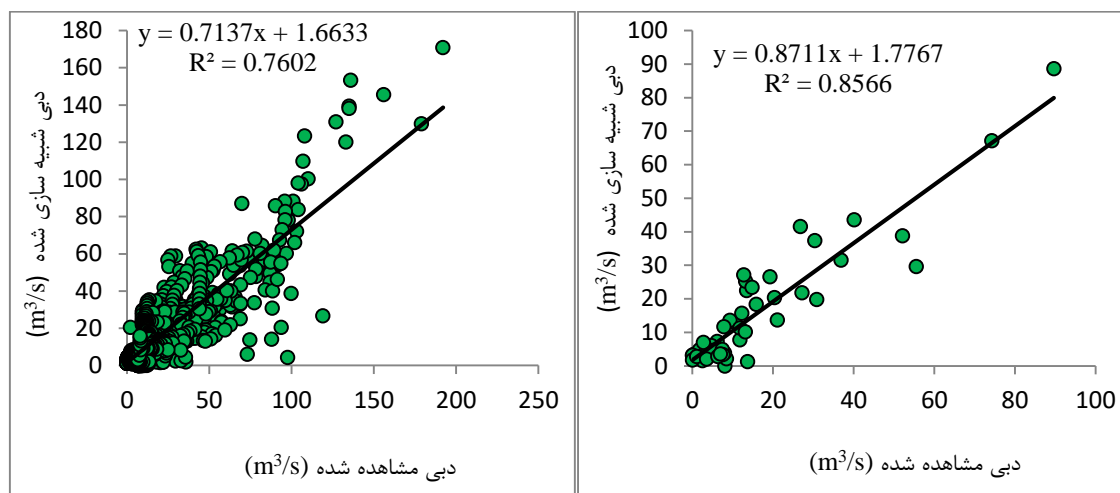
مقدار بهینه پارامتر (مقدار یا % تغییرات) بر پایه زمانی		نام پارامتر	مقدار بهینه پارامتر (مقدار یا % تغییرات) بر پایه زمانی		نام پارامتر
parasol	Sufi-2		parasol	Sufi-2	
۰/۰۰	-۰/۰۵	r_CN2.mgt	-۰/۰۶	-۰/۱۲	r_CN2.mgt
-۰/۷۹	-۰/۶۱	r_SOL_K().sol	-۰/۷۵	-۰/۷۰	r_SOL_K().sol
-۰/۱۶	۰/۷۲	r_SLSUBBSN.hru	۰/۳۶	-۰/۲۴	r_SLSUBBSN.hru

مقدار بهینه پارامتر (مقدار یا % تغییرات) بر پایه زمانی		نام پارامتر	مقدار بهینه پارامتر (مقدار یا % تغییرات) بر پایه زمانی		نام پارامتر
parasol	Sufi-2		parasol	Sufi-2	
۲/۳۰	۰/۹۲	r_SOL_BD().sol	۱/۴۰	۰/۶۱	r_SOL_BD().sol
۰/۲۶	۰/۵۷	v_ALPHA_BNK.rte	۰/۳۸	۰/۵۹	v_ALPHA_BNK.rte
۰/۵۹	۰/۰۷	v_CH_N2.rte	۰/۱۰	۰/۵۸	v_CH_N2.rte
۰/۲۸	۰/۳۹	r_SOL_AWC().sol	۰/۴۱	۰/۵۶	r_SOL_AWC().sol
۳۲۶۶۲۰	۲۰۹۷/۵۰	v_GWQMN.gw	۱۹۲۶	۴۴۲۲/۵۰	v_GWQMN.gw
۰/۶۴	۰/۴۵	v_RCHRG_DP.gw	۰/۶۶	۰/۵۴	v_RCHRG_DP.gw
۰/۷۲	۰/۰۷	r_ESCO.hru	۰/۶۹	۰/۴۶	r_ESCO.hru
۴/۲۸	۵/۲۸	v_SMFMX.bsn	۵/۱۷	۳/۴۹	v_SMFMX.bsn
۱۶۱/۰۸	۸۵/۱۷	v_CH_K2.rte	۹۷/۵۱	۱۴۴/۶۸	v_CH_K2.rte
۳۹۱/۶۸	۲۵۰/۷۵	v_REVAPMN.gw	۰/۶۲	۰/۳۷	v_GW_REVAP.gw
۱۳/۲۴	۵۶/۸۵	v_CANMX.hru	۲۲/۴۶	۸/۱۸	v_TLAPS.sub
۳/۳۸	۴/۱۲	v_SFTMP.bsn	۲۳۷/۲۷	۲۳۶/۲۵	v_GW_DELAY.gw
۶/۶۹	۱۷/۴۹	v_SURLAG.bsn	۰/۴۶	۰/۲۴	r_EPCO.hru
۱۵۱/۷۴	۱۳۴/۵۹	r_LAT_TTIME.hru	۰/۴۴	۰/۱۸	v_ALPHA_BF.gw

*نکته: در این جدول V به معنی جایگزینی مقادیر موجود پارامتر با مقادیر داده شده و T به معنی ضرب کردن مقادیر موجود پارامتر در (۱+ مقدار داده شده) است.



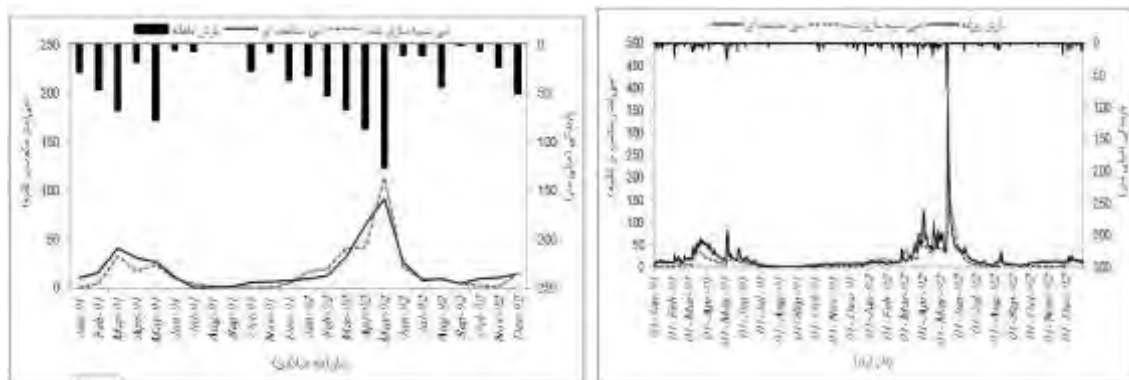
شکل ۹- همبستگی رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی مدل با استفاده از برنامه Sufi-2، در پایه زمانی روزانه (شکل سمت راست) و ماهانه (شکل سمت چپ) در حوزه آبخیز کسلیان



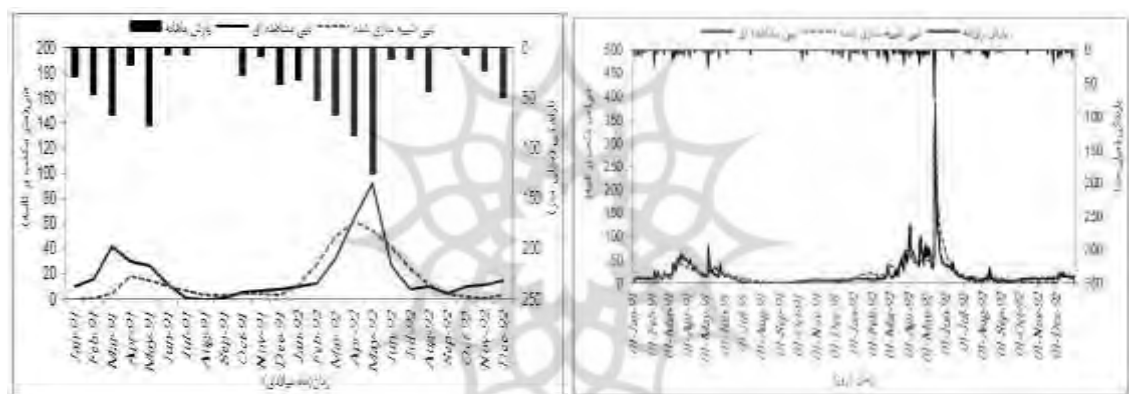
شکل ۱۰- همبستگی رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی مدل با استفاده از برنامه PARASOL، در پایه زمانی روزانه (شکل سمت راست) و ماهانه (شکل سمت چپ) در حوزه آبخیز کسلیان

در مطالعه حاضر از داده‌های ایستگاه هیدرومتری شیرگاه به‌عنوان کمک و مکمل برای پارامترهای محاسباتی موردنیاز مدل SWAT طی دوره واسنجی و اعتبارسنجی استفاده گردید؛ به‌طوری‌که مطابق مطالعات **عمانی و همکاران (۱۳۸۵)**، **ژانگ و همکاران^۱ (۲۰۰۹)** و **امینی زاد و همکاران (۲۰۱۸)** دوسوم از داده‌های موجود برای واسنجی و یک‌سوم برای اعتبارسنجی استفاده شد. نتایج آماری و گرافیکی شبیه‌سازی جریان آب در دوره واسنجی نشان‌دهنده موردقبول بودن نتایج مدل در این مرحله است. عملیات بهینه‌سازی پارامترها طی واسنجی مدل برای چهار سال (۱۹۸۷ تا ۱۹۹۰) از کل دوره آماری صورت گرفت و این پارامترها برای حوزه کسلیان واقعی شدند. بهینه‌سازی پارامترها زمانی معتبر است که این پارامترها در طی دو سال باقی‌مانده از شبیه‌سازی (۱۹۹۱ و ۱۹۹۲) نیز بتوانند شبیه‌سازی مشابه دوره چهارساله واسنجی انجام بدهند. برای اعتبارسنجی مدل از پارامترهای بهینه‌شده در مرحله واسنجی از برنامه‌های SUFI-2 و PARASOL استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی شده رواناب روزانه و ماهانه با استفاده از برنامه‌های مختلف در طی دوره اعتبارسنجی در **اشکال (۱۱) (۱۲)** نشان داده شده است. همچنین **اشکال (۱۳) و (۱۴)** نشان‌دهنده همبستگی بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده طی دوره اعتبارسنجی و بر پایه زمانی روزانه و ماهانه می‌باشند.

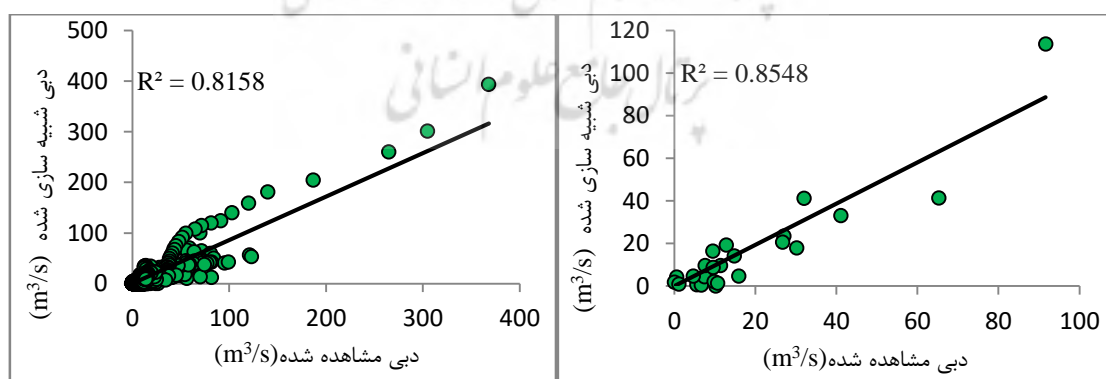
1. zhang et al.
2. Amini-Zad et al



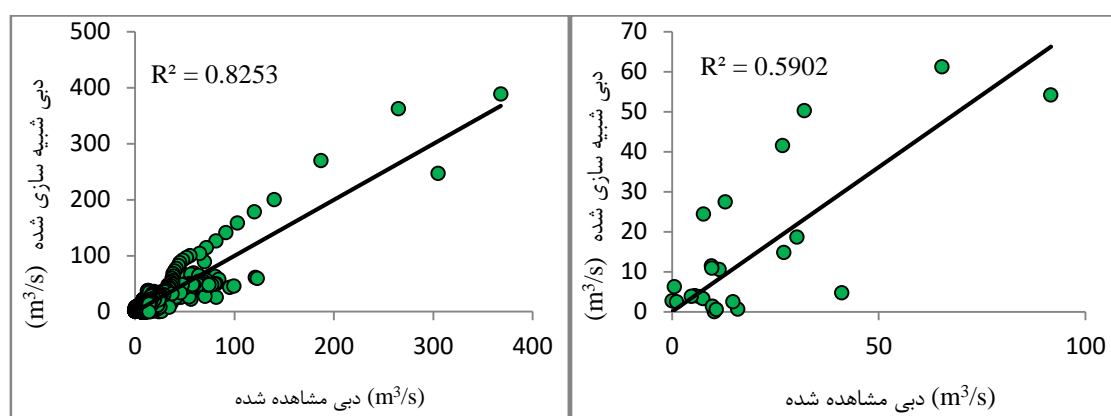
شکل ۱۱- مقادیر رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حوزه کسپلیان با استفاده از برنامه SUFI-2 در مرحله اعتبارسنجی مدل و در پایه زمانی روزانه (سمت راست) و در پایه ماهانه (سمت چپ)



شکل ۱۲- مقادیر رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حوزه کسپلیان با استفاده از برنامه PARASOL در مرحله اعتبارسنجی مدل و در پایه زمانی روزانه (سمت راست) و در پایه زمانی ماهانه (سمت چپ)



شکل ۱۳- همبستگی رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حوزه آبخیز کسپلیان در مرحله اعتبارسنجی مدل با استفاده از برنامه SUFI-2، در پایه زمانی روزانه (شکل سمت راست) و ماهانه (شکل سمت چپ)



شکل ۱۴- همبستگی رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حوزه آبخیز کسلیان در مرحله اعتبارسنجی مدل با استفاده از برنامه PARASOL، در پایه زمانی روزانه (شکل سمت راست) و ماهانه (شکل سمت چپ)

پژوهشگران مختلف استفاده از چندین روش بهینه‌سازی پارامترها و تحلیل عدم قطعیت را به‌جای یک روش توصیه کرده‌اند (عباسپور، ۲۰۱۵؛ استیژن و همکاران، ۲۰۱۰). به همین دلیل در این مطالعه از برنامه‌های SUFI-2 و PARASOL در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP استفاده گردید و کارایی مدل با استفاده از ضرایب R-factor، P-factor، RMSE، MSE، bR2، ENS، R2 در خروجی حوضه موردبررسی قرار گرفت. به‌طورکلی دقت شبیه‌سازی در دوره ماهانه بالاتر از دوره روزانه است. همچنین در دوره روزانه طی واسنجی و اعتبارسنجی دقت PARASOL بالاتر از SUFI-2 است. ولی در دوره زمانی ماهانه در واسنجی و اعتبارسنجی دقت SUFI-2 بالاتر است.

جدول ۴- ضرایب آماری ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی رواناب روزانه در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

PARASOL		SUFI-2		شاخص آماری
اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی	
۰/۳۵	۰/۲۱	۰/۸۸	۰/۸۸	P_factor
۰/۴۷	۰/۱۹	۳/۲۷	۳/۰۶	R_factor
۰/۸۳	۰/۷۶	۰/۸۳	۰/۷۱	R ²
۰/۷۸	۰/۷۴	۰/۷۸	۰/۷۰	ENS
۰/۸۱۸	۰/۵۴۲	۰/۷۶۹	۰/۵۰۷	bR ²
۱۷۰/۵۹۴	۱۲۷/۱۳۷	۱۷۳/۶۴۶	۱۴۴/۵۸۸	MSE
۱۳/۰۶	۱۱/۲۷	۱۳/۱۷	۱۲/۰۲	RMSE

1. Abbaspour
2. Stegen et al.

جدول ۵- ضرایب آماری ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی رواناب ماهانه در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

PARASOL		SUFI-2		شاخص آماری
اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی	
۰/۷۱	۰/۷۹	۰/۹۲	۰/۷۹	P_factor
۱/۶	۰/۹۴	۲/۹۱	۱/۵۱	R_factor
۰/۵۹	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۵	R ²
۰/۵۵	۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۸۶	E _{NS}
۰/۳۹۰	۰/۷۴۶	۰/۸۲۹	۰/۶۵۴	bR ²
۲۰۰/۲۵۱	۵۰/۹۵۸	۸۲/۰۷۲	۵۸/۸۸۰	MSE
۱۴/۱۵	۷/۱۳	۹/۰۵	۷/۶۷	RMSE

بر اساس مطالعات مختلف صورت گرفته در این زمینه مانند رابرت و همکاران^۱ (۲۰۰۸) ۲۷ پارامتر که بر جریان رودخانه مؤثرتر بودند برای تحلیل حساسیت انتخاب گردیدند. سپس تعداد این پارامترها به ۱۷ پارامتر تقلیل پیدا نمود که در بین این پارامترها در روش LH-OAT حساس‌ترین پارامتر RCHRG_DP به دست آمد. حساسیت بالای این پارامتر در حوزه کسپیلیان این احتمال را می‌دهد که آب از آبخوان سطحی به آبخوان عمیق حرکت نموده و مشکلاتی را در تعادل آبی منطقه ایجاد نماید. در برنامه‌های SUFI-2 و PARASOL در هر دو پایه زمانی روزانه و ماهانه پارامتر CN حساس‌ترین پارامتر شناخته شد که نشان‌دهنده نقش بالای عوامل اقلیمی در رواناب خروجی از حوضه دارد. با وجود اختلاف پارامترهای حساس در شرایط اقلیمی و محیطی مختلف نتایج تحلیل حساسیت در این مطالعه با اکثر مطالعات صورت گرفته در این زمینه از جمله با نتیجه علمی و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت دارد. نتایج ارزیابی مدل در طی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی با شاخص‌های آماری R²، bR²، MSE، RMSE و ضریب کارایی ناش- ساتکلیف (E_{NS}) نشان از موفقیت‌آمیز بودن مدل در شبیه‌سازی دارد که نتایج کار با نتایج پژوهش‌های کائو و همکاران^۲ (۲۰۱۸) و رضائی مقدم و همکاران (۱۳۹۸) در مورد کارایی برنامه SUFI-2 با تابع هدف ناش- ساتکلیف مطابقت دارد. همچنین نتایج واسنجی و تحلیل عدم قطعیت با شاخص‌های P-factor (۰/۹۲ تا ۰/۲۱) و R-factor (۳/۲۷ تا ۰/۱۹) نشان از قابلیت بالای مدل دارد. به طوری که مقادیر رواناب پیش‌بینی شده کاملاً مشابه مقادیر متناظر آن به دست آمد که نتایج این کار با نتایج پژوهش رضائی مقدم و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت دارد. همچنین نتایج کلی پژوهش در راستای کار ناصرآبادی و همکاران (۱۳۹۵) ماراهاتا و همکاران^۳ (۲۰۲۱) است.

1. Robert et al.
2. Cao et al.
3. Marahatta et al.

۴- جمع بندی

به طور کلی در این پژوهش با توجه به بررسی شاخص‌ها و نمودارهای به دست آمده مدل با دقت نسبتاً خوبی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه را شبیه‌سازی نمود. در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی نیز مانند اکثر مطالعات صورت گرفته در این زمینه شبیه‌سازی در طی دوران واسنجی نسبت به دوره اعتبارسنجی و همچنین پایه زمانی ماهانه نسبت به روزانه با دقت بیشتری انجام گرفته است. به کارگیری این مدل به دلیل کاهش هزینه عملیات میدانی به منظور اندازه‌گیری مؤلفه‌های مورد نیاز و به‌ویژه به دلیل کاهش زمان مورد نیاز برای تحلیل مسائل، جهت ارتقای سطح مدیریت منابع آب و حفظ محیط‌زیست بسیار کارآمد است. علاوه بر این، با استفاده از این ابزار این امکان به وجود می‌آید تا برنامه‌های مختلف مدیریتی را که امکان اجرای آن‌ها در کوتاه‌مدت و با هزینه‌های معقول وجود ندارد، ارزیابی نمایند و با تحلیل نتایج، بهترین تصمیم را اتخاذ کنند.

کتابنامه

- اعلمی، محمدتقی؛ عباسی، حبیبه؛ نیک سخن، محمدحسین؛ ۱۳۹۷. مقایسه دو روش متفاوت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT در برآورد میزان رواناب و بار مواد معلق حوضه صوفی چای. نشریه دانش آب و خاک. جلد ۲۸. شماره ۳. ۵۳-۶۴. <https://magiran.com/p1918470>
- رستمیان، رخساره؛ موسوی، سید فرهاد؛ حیدر پور، منوچهر؛ افیونی، مجید؛ عباسپور، کریم؛ ۱۳۸۵. کاربرد مدل SWAT2000 در تخمین رواناب و رسوب حوزه بهشت‌آباد از زیر حوضه‌های کارون شمالی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. سال دوازدهم. شماره چهل و ششم (ب). ۱۵ ص.
- <https://www.magiran.com/paper/۷۰۶۷۹۱>
- رضائی مقدم، محمدحسین؛ حجازی، میراسدالله؛ بهبودی، عبدالله؛ ۱۳۹۹. برآورد میزان رواناب حوضه آبریز لنبران چای استان آذربایجان شرقی: کاربرد مقایسه‌ای روش‌های واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT. جغرافیا و مخاطرات محیطی. شماره ۳۱. صص ۷۵-۵۹.
- <https://dx.doi.org/10.22067/geo.v8i3.81998>
- شفیعی، مجتبی؛ قراری، شروین؛ ۱۳۹۶. مروری بر مفاهیم مدل‌سازی هیدرولوژی: بخش اول، معرفی فرآیند مدل‌سازی. نشریه آب و توسعه پایدار. ۹۶(۳): ۹۵-۱۰۳. <https://civilica.com/doc/995459>
- عمانی، نینا؛ تجریشی، مسعود؛ ابریشم چی، احمد؛ ۱۳۸۵. شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل SWAT و GIS. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۸ ص.
- <https://civilica.com/doc/12844/>
- فاتحی، زانبار؛ شاهویی، سید وحید؛ ۱۳۹۹. کاربرد مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب ماهانه: حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در استان کردستان، نشریه محیط‌زیست و مهندسی آب. شماره ۳. صص ۳۰۳-۲۹۳.
- <https://doi.org/10.22034/JEWE.2020.218842.1346>

ناصرآبادی، فزاد؛ اسمعیلی عوری، اباذر؛ اکبری، حسین؛ رستمیان، رخساره؛ ۱۳۹۵. شبیه‌سازی 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. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jwmr.7.13.59>

- Abbaspour, KC., 2015. SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs, A User Manual, Department of System Analysis, Integrated Assessment and Modeling (SIAM), Eawag, Swiss Federal, Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland. 95pp. https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf.
- Abbaspour, KC., Rouholahnejad, E, Vaghefi, S. Srinivasan, R. Yang, H and Klove, B., 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model, *Journal of Hydrology*. 524:733-752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Ahmadi, A., and Nasser, M., 2020. Do direct and inverse uncertainty assessment methods present the same results? *Journal of Hydroinformatics* 22(4):842-855. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.190>
- Amini-Zad, A., Galavi, H, and MohammadRezaPoor, OB., 2018. Hydrological modeling of Pishin dam watershed using SWAT. In: Proc. of the First National Conference on SWAT Applications in Iran, Water and Wastewater Research Institute, Isfahan University of Technology, Isfahan. <https://civilica.com/doc/820016/>
- Bauwens W. and Nossent J., 2009. Modeling the Flows of the White Nile Basin using SWAT, Master dissertation in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Water Resources Engineering. 122pp. <https://researchportal.vub.be/en/studentTheses/modelling-the-flows-of-the-white-nile-basin-using-swat>
- 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. <https://doi.org/10.3390/w10060742>.
- Cibin R., Sudheer KP. And Chaubey I., 2010. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. *Journal of Hydrological processes*. 24: 1133-1148. <https://doi.org/10.1002/hyp.7568>
- Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resource Research*. 28, 1015-1031. <https://doi.org/10.1029/91WR02985>
- Etienne L., Anctil F., Van Grienseven, A. and Beauchamp N. 2008. Evaluation of streamflow simulation by SWAT model for two small watersheds under snowmelt and rainfall. *Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques*. 53(5): 961-976. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.5.961>
- Himesh S., Rao CVC. And Mahajan AU., 2000. Calibration and Validation of Water Quality Model, CSIR Centre for Mathematical Modelling and Computer Simulation, Technical Report CM 0002 Bangalore, India. 10pp. https://csir4pi.res.in/cmmacs/Publications/tech_rep/trcm0002r.pdf
- Hosseini, M. and Z. Mokarian., 2016. Estimation of groundwater runoff by SWAT model in Golog Catchment. *Watershed Engineering and Management*, 8(1): 80-92 (in Persian). <https://doi.org/10.22092/IJWMSE.2016.105976>

- 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. <https://doi.org/10.3390/w11040643>
- Marahatta, S.; Devkota, L.P.; Aryal, D., 2021. Application of SWAT in Hydrological Simulation of Complex Mountainous River Basin (Part I: Model Development). *Water* 2021, 13,1546. <https://doi.org/10.3390/w13111546>
- Memarian H., Tajbakhsh M. and Balasundram S.K. 2013b. Application of swat for impact assessment of land use/cover change and best management practices: a review. *International Journal of Advancement in Earth and Environmental Sciences*,1(1): pp 35-40. [https:// agris. fao. org/ agris-search/search.do?recordID=MY2022001054](https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=MY2022001054)
- Mengistu A. G., Rensburg 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. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100621>
- Robert, S,A., Scott, w,w., Hans, R, Z., 2008. Hydrologic Calibration and Validation of SWAT in a snow dominated rocky mountain Watershed, Montana, U.S.A. *Journal of the American Water Resources Association*.44(6): pp 1411-1430.[https:// doi.org/ 10.1111/ j.1752-1688. 2008. 00233.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00233.x)
- Setegn, SG., Dargahi, B., Srinivasan, R., Melesse, AM., 2010. Modeling of sediment yield from anjeni-gauged, watershed, Ethiopia using SWAT model. *Journal of the American Water Resources, Association (JAWRA)*. 46(3): 514-526. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00431.x>.
- Zhang, X., Liu, W., Li, Z., Zheng, F., 2009. Simulating site-specific impacts of climate change on soil erosion and surface hydrology in southern Loess Plateau of China, *Catena*. 79: 237-242. [https://doi.org/ 10.1016/j.catena.2009.01.006](https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.01.006).